

A vibrant sunset scene over a desert landscape. The sun is a bright, glowing orb in the center, partially obscured by a layer of clouds. The sky transitions from a deep orange near the horizon to a pale blue at the top. In the foreground, the dark silhouettes of rugged rock formations and a winding river are visible against the bright light of the setting sun.

Wolfgang Palz

# LE TRIOMPHE DU SOLEIL

*L'ÉNERGIE DU NOUVEAU SIÈCLE*

Daniel Lincot

Hommage à Edmond Becquerel (1820-1891)

*Découvreur de l'effet photovoltaïque*

**Préface**

**Dominique Campana et François Moisan**

*Couverture : Lever de soleil sur Monument Valley (USA), 8 Août 2016. Crédit photo : Wisbert Vilsaint*

Editeurs : Daniel Lincot et Wolfgang Palz

ISBN 978-2-9576248-0-5 (livre électronique) - ISBN 978-2-9576248-1-2 (livre papier)

Edition : 7 janvier 2022

**Daniel Lincot**

## **Avant – propos**

### **Le triomphe du soleil, l'énergie du nouveau siècle : le cri du cœur de Wolfgang Palz**

Wolfgang Palz est un pionnier de l'énergie solaire qui a débuté sa carrière en France au Centre National des Etudes Spatiales à la fin des années 60 et début des années 70, où il avait en charge le domaine de la conversion photovoltaïque. Il y avait retrouvé des chercheurs de talent comme Michel Rodot, du CNRS et de l'école polytechnique, qui mis au point la première cellule photovoltaïque au silicium française en 1958, soit 4 ans seulement après l'annonce américaine. Le secteur spatial était un secteur stratégique nécessitant la maîtrise des technologies photovoltaïques. Cependant, les pionniers du photovoltaïque portaient également un autre rêve, celui de pouvoir le développer pour les applications terrestres, cette aspiration s'est concrétisée en 1973 avec l'organisation d'une grande conférence scientifique à Paris, à l'Unesco, « le soleil au service de l'humanité », avec un symposium sur le photovoltaïque organisé par Wolfgang Palz considéré comme le lancement de ce domaine. Wolfgang Palz inspira et dirigea ensuite jusqu'à l'aube des années 2000 les programmes européens sur les énergies renouvelables. Il fut donc un acteur de premier durant toutes ces années de lutte pour promouvoir les énergies renouvelables jusqu'à leur décollage au début du 21<sup>ème</sup> siècle. Il s'est alors lancé, à partir de 2010, dans une œuvre de transmission du savoir à travers l'écriture et l'édition d'ouvrages consacrés aux énergies renouvelables et à leur histoire, avec en particulier un livre de témoignage exceptionnel consacré à l'émergence du photovoltaïque et intitulé « the emergence of power from the sun ». C'est en 2018 qu'il décide d'écrire un ouvrage consacrant non seulement l'émergence des énergies renouvelables comme alternatives aux énergies fossiles et nucléaire, mais leur victoire, au titre sans ambiguïté « le triomphe du soleil : l'énergie du nouveau siècle ».

Avec quelques chercheurs de la communauté photovoltaïque française, en hommage à Wolfgang Palz, nous avons décidé d'en faire une version française et d'en assurer nous-mêmes la traduction. Il s'agit de Jean Eric Bourée, Elisabeth Chassaing, Stéphane Collin, Arnaud Etcheberry, Jean François Guillemoles, Ludovic Escoubas, Jean Paul Kleider, Daniel Lincot, Denis Mencaraglia, Negar Naghavi, Marcel Pasquinelli, Nathanaelle Schneider, Jean Jacques Simon, Abdelilah Slaoui, Philip Schulz, Bertrand Theys. Sans leur beau geste, cette version française n'aurait pas vu le jour. Elle fut présentée, précédée d'une préface rédigée par François Moisan, ancien directeur scientifique de l'ADEME, et Dominique Campana, ancienne directrice des relations internationale, à la conférence photovoltaïque européenne en septembre 2019, qui s'est tenue à Marseille.

A l'occasion du 200<sup>ème</sup> anniversaire de la naissance d'Edmond Becquerel, découvreur de l'effet photovoltaïque, qui a fait l'objet d'un symposium le 7 décembre 2020 nous avons le plaisir de republier la version française de septembre 2019, que nous vous invitons à découvrir, ainsi qu'un hommage à Edmond Becquerel avec le bilan du colloque et le lien vers les vidéos en libre accès sur internet.

- The triumph of the sun : the energy of the new century, Wolfgang Palz, 2018, Jenny Stanford Series on Renewable Energy : ISBN 978-981-4800-06-8

## Homage to Edmond Becquerel (1820-1891), discoverer of the photovoltaic effect

Edmond Becquerel (1820-1891) was born on 24 March, he was the son of Antoine Becquerel (1788- 1878) and the father of Henri Becquerel (1852- 1908), discoverer of natural radioactivity and Nobel Prize in Physics 1903 with Pierre and Marie Curie. He conducted his research and his teachings at the National Museum of Natural History and at the Conservatoire National des Arts et Métiers. He was a member (1863-1891) and then president of the Académie des sciences (1881). He is at the origin of major advances in the study of the effects of light on materials, in particular the discovery of the photovoltaic effect (1839), the invention of the first color photography process (1848) and the invention of the phosphoroscope (1858) for time-resolved photoluminescence (1858). He was also strongly engaged in industrial innovation and member and then president of the Société d'Encouragement de l'Industrie Nationale (1864-1888). His work is recognized worldwide. However, he remains unknown in France. The celebration of the bicentenary of his birth on 7 December 2020 was an occasion to make his scientific work exceptional and its current relevance.

This event was marked by the installation of a commemorative plaque on the wall of his laboratory at the National Museum of Natural History, on which is inscribed « Here, in 1839, Edmond Becquerel discovered the photovoltaic effect », not far from the one honoring his son Henri Becquerel for the discovery of radioactivity. Let us hope that this symbolic gesture will lead to others and that some streets or schools named Edmond Becquerel will soon be a reality, rehabilitating the contribution of this great scientist to the progress of humanity.

A summary of the symposium is presented at the end of the book. You can also find the complete set of presentations, interesting, from the symposium of 7 December on YouTube via the following links:

<https://www.ipvf.fr/fr/symposium-edmond-becquerel/>

<https://www.youtube.com/playlist?list=PL5UqkzFNKba9Emr9vb6SHIY00EZlMI00n> in French

<https://www.youtube.com/playlist?list=PL5UqkzFNKba-csyN3DAazWTEEaNwvX9Wj> in English



Commemorative plaque in honor of Edmond Becquerel fixed on the wall of his laboratory at the National Museum of Natural History in the Garden of Plants, 47 rue Cuvier, 75005, Paris, in July 2020, on the occasion of the bicentenary of his birth in 1820.

LE TRIOMPHE DU SOLEIL  
L'énergie du nouveau siècle

Wolfgang Palz

## Table des matières

<b>Préface</b>	<b>9</b>
François Moisan et Dominique Campana	
<b><i>Le triomphe du soleil, l'énergie du nouveau siècle dans le monde</i></b>	
Wolfgang Palz	
<b>Hommage à la Gloire du Soleil</b>	<b>15</b>
<b>Prologue : Une vision de l'avenir au début des années 1970</b>	<b>17</b>
<b>Prologue : Du triomphe du fer au triomphe du soleil</b>	<b>20</b>
<b>Première partie : Le Soleil et Nous</b>	
<b>1. L'Héritage du Soleil</b>	<b>25</b>
1.1 L'homme dans l'Univers	
1.2 Un ciel d'étoiles, un seul soleil	
1.3 La façon dont le soleil produit son énergie	
1.4 Le Soleil, la Terre et Nous	
1.4.1 Enfants du Soleil et de la Terre	
1.4.2 La naissance de la Terre	
1.4.3 Astéroïdes et comètes	
1.4.4 La Terre, prête pour la vie	
1.4.5 Le dernier âge glaciaire	
1.4.6 Héphaïstos	
1.4.7 Le grand déluge	
1.4.8 Le Paradis	
1.4.9 Le berceau de la civilisation	
1.4.10 Catastrophes en attente	
<b>2. L'énergie pour la vie</b>	<b>26</b>
2.1 Qu'est-ce qu'une bonne énergie ?	
2.2 Le bon, la brute et le truand	
2.2.1 Le bon	
2.2.2 La brute	
2.2.3 Le truand	
2.3 Pollution et changement climatique	
2.3.1 Pollution	
2.3.1.1 Les dangers de la pollution	
2.3.1.2 Politiques de lutttes contre la pollution	
2.3.1.3 Pollution par les déchets nucléaires	
2.3.2 Changements climatiques	
2.3.2.1 Un rappel historique	
2.3.2.2 Emissions de CO <sub>2</sub> et de GES, le rôle du charbon	

- 2.3.2.3 Politiques de lutte contre les émissions de GES, les quotas d'émission de carbone et les taxes sur le CO<sub>2</sub>
- 2.3.2.4 Regarder vers l'avenir
- 2.4 Comment l'industrialisation a marginalisé l'énergie solaire
  - 2.4.1 Les énergies renouvelables traditionnelles
  - 2.4.2 Le chemin de la victoire du charbon
  - 2.4.3 l'énergie nucléaire

## Deuxième partie : Le nouveau siècle est solaire

- 3. La révolution solaire de l'an 2000** 55
  - 3.1 La menace d'une guerre nucléaire
  - 3.2 Une société qui doute de son avenir
  - 3.3 Hermann Scheer : Du désarmement à la politique solaire
  - 3.4 La révolution solaire allemande s'étend à la Chine et au monde
- 4. Les énergies renouvelables à la conquête des marchés mondiaux dominants de l'énergie** 65
  - 4.1 Le triomphe de l'énergie solaire
    - 4.1.1 La capacité mondiale de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables jusqu'en 2018
    - 4.1.2 Le tournant du marché photovoltaïque européen de 2010 à 2013 et l'émergence de nouveaux leaders sur le marché, en Chine, au Japon, au Royaume Uni et en Inde
    - 4.1.3 Les marchés mondiaux du PV et de l'éolien aujourd'hui
    - 4.1.4 Nouvelles tendances
      - 4.1.4.1 Auto- consommation
      - 4.1.4.2 Energies renouvelables sur les marchés libres de l'électricité, les contrats d'achats d'électricité (PPA) comme nouvel instrument du marché mondial
  - 4.2 Énergies renouvelables pour le chauffage et les transports
    - 4.2.1 La bioénergie, l'Universelle
    - 4.2.2 Réseaux de chaleur favorisant le chaleur géothermique, la biothermie, les rejets thermiques des installations d'incinération et de co-génération
    - 4.2.3 Les solaire thermique
  - 4.3 Un résumé des réalisations à l'échelle mondiale
  - 4.4 Les énergies renouvelables dans le monde
    - 4.4.1 Chine
    - 4.4.2 États-Unis
    - 4.4.3 Allemagne
    - 4.4.4 Europe
    - 4.4.5 Japon
    - 4.4.6 Inde
    - 4.4.7 Brésil, Amérique latine

## Troisième partie : Comprendre la nature, créer un savoir-faire

- 5. Compréhension de l'atome et création de la technologie solaire** 107
  - 5.1 Physique quantique et compréhension de l'atome
  - 5.2 De la physique quantique au nucléaire et aux semi-conducteurs

- 5.2.1 La voie vers la fission nucléaire
- 5.2.2 Origine de la physique des solides
- 5.2.3 La bombe atomique et les réacteurs nucléaires
- 5.2.4 Nouveau monde des semi-conducteurs et photovoltaïque

**6. Photovoltaïque** **115**

- 6.1 Les marchés mondiaux du PV : Comment ils ont explosé
- 6.2 La situation actuelle
- 6.3 La recherche et développement aujourd'hui
- 6.4 Rétrospective : les découvertes du PV, un monde de pionniers
  - 6.4.1 La découverte de l'effet photovoltaïque
  - 6.4.2 Vers une cellule solaire d'usage
  - 6.4.3 Développement de cellules solaires au silicium
- 6.5 La première vision d'une production de masse du PV et la conquête des marchés mondiaux de l'énergie
  - 6.5.1 Les pionniers américains avaient un rêve
  - 6.5.2 L'Europe dans les starting-blocks

**7. Le monde merveilleux de l'énergie éolienne** **131**

- 7.1 Le développement des marchés mondiaux de l'énergie éolienne jusqu'à aujourd'hui
- 7.2 Ce que le monde a réalisé dans le domaine de l'énergie éolienne
  - 7.2.1 Comment tout a commencé
  - 7.2.2 Les éoliennes d'aujourd'hui
  - 7.2.3 Développements technologiques
  - 7.2.4 Quelques pionniers de l'industrie
- 7.3 Opposition à l'énergie éolienne
  - 7.3.1 Pas dans mon jardin
  - 7.3.2 L'effet Disco
  - 7.3.3 Les tueurs d'oiseaux ?

**8. La bioénergie en harmonie avec la nature** **141**

- 8.1 Biosphère de la Terre
  - 8.1.1 Évolution
  - 8.1.2 Origines de la vie sur Terre
  - 8.1.3 La biosphère d'aujourd'hui
- 8.2 La bioénergie

**Quatrième partie : l'Énergie pour le monde**

**9. L'énergie solaire pour les besoins de survie** **150**

- 9.1 Le scandale du 1 %
- 9.2 Le problème
  - 9.2.1 Le financement
  - 9.2.2 S'en tenir aux options énergétiques d'hier
- 9.3 Un résultat du problème : la migration
- 9.4 Le triomphe du Soleil pour les ruraux pauvres ? Une lueur d'espoir
  - 9.4.1 La Chine, le leader

- 9.4.2 Le développement des "systèmes solaires domestiques"  
pour les besoins de survie
- 9.4.3 Une tendance vers les grands systèmes d'alimentation électrique

<b>10. Les programmes passés aident à ouvrir la voie</b>	<b>153</b>
10.1 Éclairage solaire par le Barefoot Collège en Inde	
10.2 Pompage solaire de l'eau dans les pays du Sahel	
10.3 Connexion Internet pour les pauvres en Amérique centrale	
10.4 L'industrie des satellites pour le monde non connecté	
<b>Épilogue</b>	<b>159</b>
<i>Annexes</i>	<b>172</b>
Hommage à Edmond Becquerel : Bilan du symposium	172
Organisation du symposium	180
Programme en anglais	182

## Préface

L'ouvrage de Wolfgang Palz « le triomphe du soleil » arrive au bon moment. Celui d'une conquête en marche après des années de combats pour faire reconnaître cette énergie renouvelable comme la plus sérieuse option énergétique pour le XXIème siècle. Le qualificatif de « triomphe » semble passablement guerrier mais il s'est bien agi d'un combat long d'un demi-siècle comme le montre Wolfgang Palz. Les transformations du monde de l'énergie ne sont pas un long fleuve tranquille. Les intérêts en jeu sont colossaux non seulement au niveau économique mais aussi au niveau géostratégique. L'énergie solaire remet en jeu la domination de nombreux acteurs et le déploiement à grande échelle auquel on assiste à la fin de cette décennie ne s'est pas faite de façon apaisée même si l'énergie solaire a souvent été qualifiée « d'énergie douce ».

Des années durant l'argument majeur disqualifiant l'énergie solaire a été son coût. Il est vrai que dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix le prix des cellules photovoltaïques ne permettait pas de rivaliser avec les énergies fossiles. Cette disqualification ne se traduisait pas seulement au niveau des choix d'investissements immédiats, ce qui était rationnel, mais également au niveau des perspectives énergétiques de moyen et long terme. L'énergie solaire devait, certes, faire l'objet de recherches (plutôt fondamentales) mais les experts s'aventuraient rarement à envisager une rentabilité prochaine et la pénétration des marchés sans subventions. Il y a vingt ans un exercice de prospective lancé par le Commissariat Général du Plan (ancêtre de France Stratégie) en France évaluait les perspectives énergétiques pour la France<sup>1</sup>. L'atelier chargé des scénarios que l'ADEME a eu l'honneur de diriger projetait la demande et l'approvisionnement énergétique de la France pour les années 2010 et 2020. Trois options de scénarios avaient été retenues par le groupe d'expert rassemblant une soixantaine de personnalités issues de divers horizons (une composition assez proche de celle qui sera retenue par le Grenelle de l'environnement dix ans plus tard). Une option plutôt « libérale » dans laquelle l'Etat laissait jouer les forces du marché dans un monde où il était jusqu'à présent très impliqué, un autre scénario dans lequel l'Etat (français) restait très impliqué en matière de politique industrielle énergétique et pérennisait l'option de l'énergie nucléaire, enfin un scénario « Etat protecteur de l'environnement » dans lequel les politiques publiques s'attachaient à la transformation énergétique nécessaire pour atteindre les engagements climat qui seront pris à Kyoto en 1997. Aucun des trois scénarios, même le scénario « environnement » n'envisageait de contribution significative de l'énergie solaire pour la production d'électricité<sup>2</sup> que ce soit en 2010 ou en 2020 alors qu'en 2018 le photovoltaïque a produit 10 TWh d'électricité en France. En 2010 la puissance installée en photovoltaïque était de 878 MW et en 2018 de 8,5 GW soit presque dix fois plus (et la puissance installée de plus de 6 réacteurs nucléaires de 1300 MW).

Cette vision « obscure » du devenir de l'énergie solaire reposait sur l'estimation que les coûts resteraient élevés en raison de la dispersion de cette énergie qui ne pourrait bénéficier des effets d'échelle supposés des énergies comme le nucléaire. La conviction était que la recherche permettrait d'augmenter les rendements mais de ne réduire que faiblement les coûts de production. C'était sans anticiper la baisse des coûts envisageables par une courbe d'apprentissage sur les quantités produites. La phénoménale baisse des coûts du solaire depuis 2000 résulte pour une grande part de la taille des usines de production (beaucoup

---

<sup>1</sup> Energie 2010 – 2020 Rapport de l'Atelier Trois scénarios énergétiques pour la France Commissariat Général du Plan Septembre 1998. Président de l'Atelier François Moisan, rapporteur Olivier Godard

<sup>2</sup> Dans les trois scénarios la contribution du photovoltaïque se limitait en 2010 et en 2020 aux sites isolés et dans les DOM sans représenter une part significative du bilan énergétique national

plus que par les gains de rendement de conversion de l'énergie solaire). En 2016 l'ADEME a publié pour la première fois un scénario montrant qu'un système de production d'électricité basé sur 100% de sources renouvelables était possible en France à l'horizon 2050<sup>3</sup>. Les énergies comme l'éolien et le photovoltaïque complèteraient l'hydro-électricité et les besoins de stockage de ces énergies variables seraient limités grâce au foisonnement des usages et à une flexibilité très mesurée de la demande d'électricité.

Les politiques publiques d'ouverture du marché du photovoltaïque en Europe notamment mises en œuvre en Allemagne ont ainsi lancé une dynamique de baisse des coûts dont paradoxalement les entreprises européennes ont été victimes face à des investisseurs beaucoup plus agressifs en Chine comme le montre Wolfgang Palz. Ce processus de baisse des coûts par les volumes de production s'observe d'ailleurs maintenant pour d'autres technologies « diffuses » comme les lampes LED ou encore les batteries électrochimiques.

Ce schéma de développement technologique n'était pas familier des acteurs du monde de la production d'énergie. Pour le développement du nucléaire l'essentiel de l'effort public a porté sur la R&D jusqu'à des démonstrateurs à l'échelle 1 validant économiquement le concept avant de le déployer avec des gains de standardisation très mesurés. A l'inverse les technologies du photovoltaïque comme celles du numériques s'appuient sur gains de production de masse (loi de Moore par exemple).

Les nombreuses critiques formulées en France notamment sur le soutien à l'ouverture des marchés des énergies renouvelables au travers des tarifs d'achat relèvent de ce parti pris que seules les subventions publiques à la R&D sont légitimes sans jamais mettre en regard le coût public du soutien à la R&D nucléaire par exemple par rapport au soutien public global accordé aux énergies renouvelables (R&D et ouverture des marchés).

En revanche il est clair qu'une ouverture des marchés devrait s'accompagner d'une politique industrielle permettant aux entreprises européennes de faire face à l'offensive des acteurs industriels hors des frontières à laquelle on a assisté. Wolfgang Palz retrace les politiques publiques mises en œuvre dans les différents pays du monde depuis une quinzaine d'années en faveur des énergies renouvelables. Il analyse la diversité des mécanismes de soutien pour l'ouverture des marchés, subventions, tarifs d'achat... Il montre comment les très importants investissements industriels de la fin des années 2000 ont débouché après la révision des mécanismes de soutien dans les pays européens aux débuts des années 2010 sur la faillite de nombre des entreprises les plus puissantes, y compris en Chine en 2012 – 2013. La croissance des marchés de l'énergie solaire favorisée par les politiques publiques mises en œuvre notamment en Europe dans un premier temps a induit une forte concurrence industrielle internationale. La baisse du niveau de soutien des politiques publiques en Europe au début des années 2010 a eu un impact dramatique sur les entreprises les moins compétitives. Il est intéressant de noter que cette baisse de l'attractivité du marché européen a conduit la Chine à passer du statut de « pur » exportateur à la création d'un marché national de grande envergure.

On peut s'interroger sur la difficulté des investisseurs européens (pas seulement dans le secteur du photovoltaïque) à investir de façon pérenne dans des options de long terme face à leurs concurrents asiatiques ou du Moyen Orient et au rôle des pouvoirs publics pour consolider les stratégies industrielles de long terme. Les investisseurs européens ont-ils une vision financière de trop court terme ou est-ce le rôle des Etats d'accompagner les investissements de long terme ? Cette dernière option supposerait une évolution de la doctrine européenne de la concurrence.

---

<sup>3</sup> Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations ADEME, Juin 2016 <https://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>

Le soutien public à la recherche et au développement des technologies solaires reste une priorité. En France, le Programme des Investissements d'Avenir géré par l'ADEME depuis 2010 a pu soutenir l'innovation portée par les entreprises et faire émerger de nouvelles solutions à tous les niveaux de la filière solaire. Entre 2010 et 2018 l'ADEME a ainsi accompagné 187 projets et près de 400 entreprises dans le domaine des énergies renouvelables (éolien, solaire, stockage, réseaux électriques intelligents) à hauteur d'un investissement public en R&D de 1,1 milliards d'Euros générant un montant global de projets de plus de 3 milliards d'Euros.<sup>4</sup>

De nombreux pays se sont engagés dans la voie du développement des énergies renouvelables, dont les pays de la Méditerranée. Si les énergies renouvelables n'y représentent que 11% de la demande total en énergie primaire, de nombreux travaux mettent l'accent sur l'important potentiel de croissance dans cette région, d'autant plus sensible que les énergies fossiles dominent le mix énergétique en particulier sur la rive sud de la Méditerranée. Un scénario ambitieux de transition énergétique défini dans le cadre d'une collaboration entre l'OME (Observatoire Méditerranéen de l'Energie), MEDENER (Association des agences nationales de maîtrise de l'Energie) et l'ADEME prévoit, par rapport au scénario « laisser-faire », une réduction significative de la demande d'énergie primaire (-30%) et finale (-23%), une hausse sensible de la part des énergies renouvelables, principalement le solaire, dans le mix énergétique pour atteindre 27% en 2040. Si la contribution de l'hydroélectricité serait encore importante, le solaire serait un moteur principal de cette croissance (8% de croissance en moyenne par an) qui permettrait de fournir 2/3 de la production électrique : La contribution du solaire thermique, pour la production d'eau chaude domestique et la production d'électricité (CSP) pourrait être multipliée par six dans le mix énergétique d'ici à 2040.

Les derniers chapitres de l'ouvrage de Wolfgang Palz sont consacrés à l'accès à l'énergie dans les pays en développement et au formidable enjeu que représentent les solutions solaires pour les foyers non connectés aux réseaux électriques. Près d'un milliard d'habitants n'a pas d'accès à l'électricité et quelques centaines de millions ont accès à travers des générateurs à base d'énergie fossile polluante et coûteuse. L'extension des réseaux électriques centralisés se développeront mais ne pourront desservir l'ensemble des populations rurales des pays en développement. La baisse des coûts des énergies renouvelables et celle, en cours, des batteries constituent une opportunité pour l'accès hors réseau à l'électricité des ménages ruraux. Le déploiement de la téléphonie mobile permet par ailleurs de nouveaux dispositifs de paiement de l'électricité comme le Pay As You Go. L'objectif du développement durable des Nations Unies d'un accès pour tous à l'énergie en 2030 est maintenant atteignable au travers des solutions renouvelables décentralisées. Différents systèmes se développent depuis les Solar Home Systems qui permettent de satisfaire les besoins d'éclairage et de recharge de téléphones portables d'un foyer à un coût très abordable jusqu'aux mini-grids de quelques dizaines ou centaine de kW pour alimenter un village non raccordé au réseau centralisé en passant par des options génératrices de services comme les kiosques solaires. La Banque Mondiale, dans un rapport publié en juin 2019, estime que 490 Millions de personnes, notamment en Afrique sub-saharienne, pourraient être desservis en électricité par le déploiement de 210 000 mini-grids plus particulièrement solaires d'ici 2030. L'investissement requis serait de 220 milliards de dollars.

L'Afrique sub-saharienne reste en effet la région avec le plus faible taux d'accès à l'électricité dans le monde (43% en 2017 d'après l'Agence Internationale de l'Energie), qui peine à dépasser le rythme de la croissance démographique, notamment en zone rurale. Cependant, des progrès importants ont été

---

<sup>4</sup> Recherche et Innovation pour la transition énergétique et environnementale bilan 2010 – 2017 du programme des investissements d'avenir, ADEME, 2018

accomplis ces dernières années, notamment grâce au recours à l'énergie solaire. En effet, si on prend l'exemple du Sénégal, une volonté politique forte s'est traduite par un programme de développement de centrales solaires qui a permis entre autres le raccordement de quatre centrales solaires au réseau national depuis 2015. D'autres pays ont développé des stratégies d'électrification basées sur les énergies renouvelables et associant extension du réseau électrique existant avec la construction de mini-réseaux et la distribution de kits solaires. Un exemple est le Togo, qui vise via ce plan d'électrification à atteindre un accès universel à l'électricité d'ici 2030 (avec un taux d'accès de 35.8% en 2017).

Il reste néanmoins un certain nombre d'obstacles au déploiement de ces solutions décentralisées. Les projets ont encore du mal à trouver les financements adéquats auprès des banques même si leur solvabilité est assurée sur le moyen terme. Par ailleurs l'électricité fournie par le réseau centralisé est fortement subventionnée dans la plupart des pays en développement ce qui pénalise les investisseurs des équipements solaires décentralisés s'ils doivent pratiquer les mêmes tarifs que les compagnies nationales sans bénéficier des mêmes subventions. Il s'agit donc de mettre en place des solutions innovantes en terme de plans d'affaire et de modes de financement associant les acteurs privés, les ONG et les pouvoirs publics nationaux et locaux. C'est ce qui a conduit l'ADEME à lancer en 2017 un premier appel à projet pour des solutions innovantes d'accès à l'énergie en Afrique et à sélectionner 9 projets en cours d'expérimentation. Fort du succès de cet appel à projet avec plus de 90 projets déposés, l'ADEME et l'AFD lancent un nouvel appel à projet sur la même thématique à l'automne 2019.

Les enjeux géostratégiques pour l'Afrique soulignés par Wolfgang Palz sont l'un des piliers du Pacte Finance Climat<sup>5</sup> proposé pour l'Europe afin de mettre la finance au service d'une politique climatique ambitieuse assurant une solidarité internationale entre l'Europe et l'Afrique. Selon les auteurs de ce Pacte 40 milliards d'Euros seraient mobilisables au sein d'un fonds européen pour le climat, doté de 100 milliards d'Euros, pour déployer les solutions énergétiques renouvelables en Afrique.

Si le déploiement à grande échelle de l'énergie solaire est maintenant en marche Wolfgang Palz nous incite à ne pas baisser les bras. Il identifie les pistes de développement à mettre en chantier. Les compétences scientifiques de l'auteur se conjuguent à sa capacité d'analyse des stratégies industrielles et à son expérience des politiques publiques. Ses fonctions à la Commission Européenne lui ont permis d'avoir une position d'observateur inégalée. Cet ouvrage est au cœur de l'actualité de l'énergie et restera une référence historique.

**Dominique Campana, Directrice Europe et International de l'ADEME**

**François Moisan, Directeur Scientifique de l'ADEME**

---

<sup>5</sup> Anne Hessel, Jean Jouzel, Pierre Larroutourou : Finance, Climat, Réveillez-vous les solutions sont là. Indigène Editions Octobre 2018

*Publié initialement en version anglaise par*

Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.

Penthouse Level, Suntec Tower 3

8 Temasek Boulevard Singapore 038988

Courriel : [editorial@panstanford.com](mailto:editorial@panstanford.com)

Web : [www.panstanford.com](http://www.panstanford.com)

**British Library Cataloguing-in-Publication Data**

Une notice de catalogue pour ce livre est disponible auprès de la British Library.

**Le Triomphe du Soleil : L'énergie du nouveau siècle**

Copyright © 2018 Wolfgang Palz

Version anglaise copyright © 2018 Pan Stanford Publishing 2018 Pan Stanford Publishing

ISBN 978-981-4800-06-8 (couverture rigide)

ISBN 978-0-429-429-48864-1 (livre électronique)

*En hommage à mon ami,*

*Feu Hermann Scheer*

*Député*

*Prix Nobel alternatif (1999)*

*Héros du siècle vert (US Time Magazine, 2002).*



## Hommage à la Gloire du Soleil

Strauss, Richard. « lever de Soleil » et « *ainsi parlait Zarathustra* », dirigé par Herbert von Karajan avec l'Orchestre Philharmonique de Berlin, 1984, Berlin.

<https://www.youtube.com/watch?v=6Hi5xbguTJk>.

*Ainsi parlait Zarathustra* est aussi un poème symphonique de Richard Strauss, composé en 1896 et inspiré du roman philosophique du même nom de Friedrich Nietzsche. La première partie du poème s'appelle *Illumination* ou *Lever de soleil*.

Stravinsky, Igor. *L'oiseau de feu*, dirigé par Pierre Boulez avec l'Orchestre de Paris, 2009, Paris.  
<https://www.youtube.com/watch?v=pTbwQ6G-bP0>.

*L'Oiseau de feu* est une œuvre de ballet et de concert orchestral du compositeur russe Igor Stravinsky. Il a été écrit pour la saison 1910 à Paris de la compagnie des Ballets Russes de Sergei Diaghilev ; la chorégraphie originale est de Michel Fokine, avec un scénario d'Alexandre Benois basé sur les contes de fées russes de *L'Oiseau de feu* et la bénédiction, malédiction, qu'il développe pour son propriétaire.

van Beethoven, Ludwig. *Sonate N°21*, dirigée par Emil Gilels, piano, 1971, Ossiach.  
<https://www.youtube.com/watch?v=5UOLWqMPU20>.

La *Sonate pour piano N° 21 en do majeur, opus 53*, connue sous le nom de *Sonate de Waldstein*, est l'une des trois sonates les plus remarquables de la période médiane de Beethoven. Elle est également connue sous le nom de *L'Aurora* (L'Aurore) en italien, pour la sonorité des accords d'ouverture du troisième mouvement, pensé pour évoquer une image du lever du soleil et du lever du jour.

Paganini, Niccolò. *La Campanella*, dirigée par Clara Jumi Kang, violon, 2015, Saint-Pétersbourg.  
[https://www.youtube.com/watch?v=42O0EZkeQ\\_c](https://www.youtube.com/watch?v=42O0EZkeQ_c).

Le *Concerto pour violon no 2 en si mineur, opus 7*, a été composé par Niccolò Paganini en Italie en 1826. Dans son Deuxième Concerto, Paganini retient la démonstration de virtuosité en faveur d'une plus grande individualité dans le style mélodique. Le troisième mouvement du Deuxième Concerto de Paganini doit son surnom "La Campanella" ou "La Clochette" à la petite clochette que Paganini prescrit pour présager chaque récurrence du thème du rondo.

Mozart, Wolfgang Amadeus. *Concerto pour piano N° 23*, dirigé par Armen Manassian, piano, 2013, Moscou.  
<https://www.youtube.com/watch?v=qpT7XDWhiA4>.

Ce concerto en LA majeur est une composition pour piano et orchestre écrite par Mozart. Elle fut achevée, selon le catalogue de Mozart, le 2 mars 1786, deux mois avant la première de son opéra *Les Noces de Figaro*. C'était l'un des trois concerts d'abonnement donnés au printemps et il a probablement été joué par Mozart lui-même à l'un de ces concerts.

Brahms, Johannes. *Quintette pour piano op. 34*, jouée par le Quatuor Simon et Ionel Streba, 2014, Paris.  
<https://www.youtube.com/watch?v=RPmKKKqX5xV0>.

Le quintette en Fa mineur a été complété par Brahms au cours de l'été 1864 et publié en 1865. Il a été dédié à Son Altesse Royale la Princesse Anna de Hesse. L'œuvre, souvent appelée "la couronne de sa musique de

chambre", a commencé sa vie comme quintette à cordes. Brahms a transcrit le quintette en une sonate pour deux pianos (forme sous laquelle Brahms et Carl Tausig l'ont interprété) avant de lui donner sa forme finale.

Note : toutes Les annotations sont tirées de Wikipedia. Les lecteurs peuvent écouter ces œuvres en suivant les liens donnés.

*Sélection musicale* : Avec l'aimable autorisation d'Armen Manassian, ARTCONCEPT International Association.

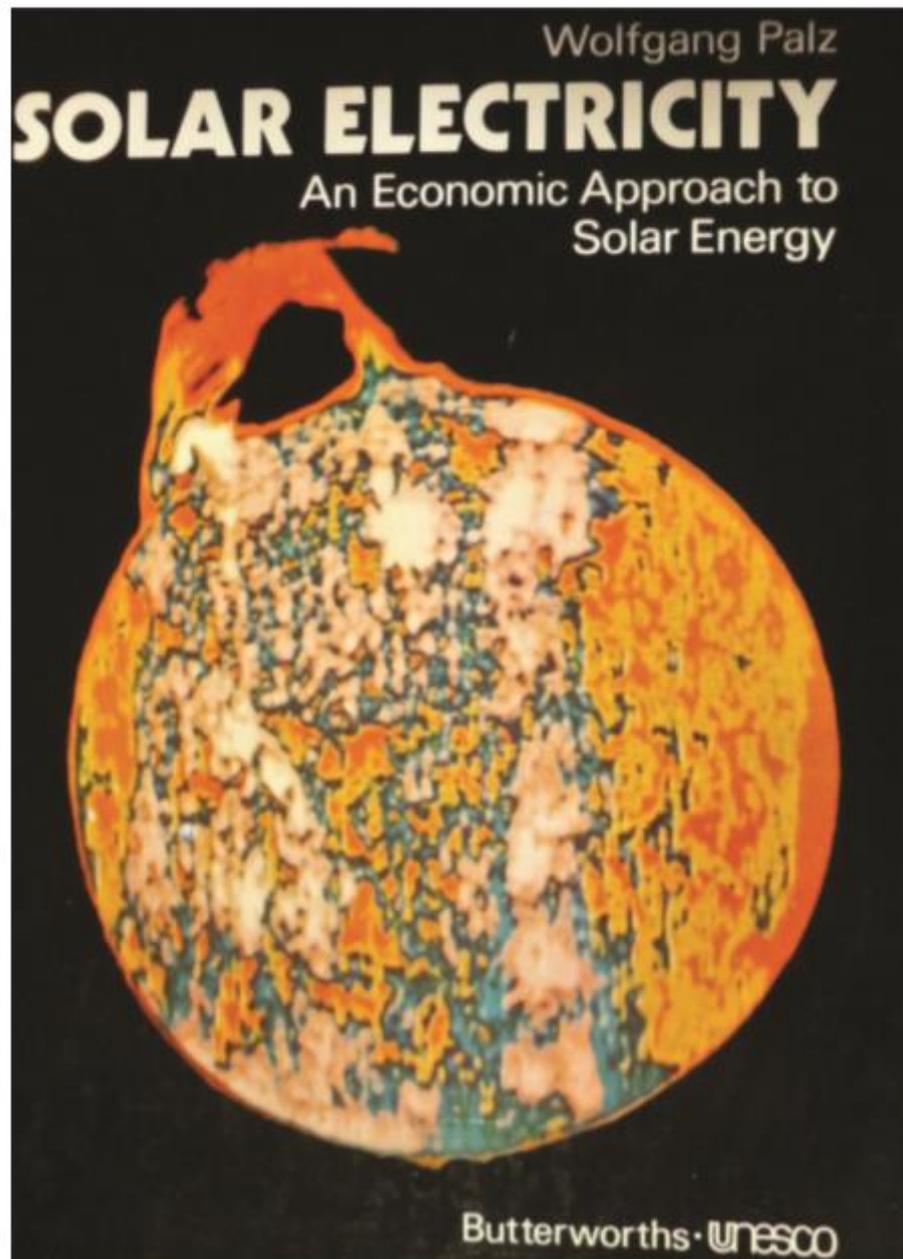
## **Prologue : Une vision de l'avenir dans les années 1970**

L'énergie nucléaire et le charbon ont connu leur apogée dans la seconde moitié du siècle dernier. En particulier, à partir du choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés sont devenus soucieux de préserver leur indépendance énergétique. Des centaines de centrales nucléaires ont alors été construites en un temps record.

Pourtant, en parallèle, l'électricité solaire et l'énergie éolienne ont fait revenir leurs adeptes à une longue tradition en Europe. Aux Etats Unis également leur intérêt s'était manifesté pour l'administration. Le président Carter a fait de son mieux pour soutenir les nouvelles technologies solaires, mais en vain. Alors que des centaines de gigawatts de nouvelle énergie atomique ont été installés dans le monde entier, l'énergie solaire photovoltaïque est restée négligeable, au mieux au niveau de quelques mégawatts. "Trop cher," disaient-ils.

En 1977-1978, j'ai publié avec l'UNESCO, à Paris, le livre « L'électricité Solaire : Une approche économique de l'énergie solaire ». Il avait pour but de rassembler les connaissances et les visions des experts de ce domaine en Europe et aux Etats-Unis. L'administration américaine avait aussi fait beaucoup d'enquêtes. Un rapport indépendant avait examiné en détail les perspectives des énergies renouvelables mais il n'a pas été publié pour le grand public. C'est pourquoi ce livre que j'avais publié avec l'UNESCO, en anglais et dans quelques autres langues, a été pour beaucoup une première rencontre avec l'énergie solaire, en voici quelques extraits marquants dont certains présentaient un caractère visionnaire :

" Il n'y a qu'une seule façon de diminuer les différents types de pollution provoquée par la consommation d'énergie à grande échelle de l'homme : l'utilisation directe de l'énergie qui domine le climat de la Terre. L'énergie utile peut être produite à partir du rayonnement solaire de telle sorte que ni la pollution thermique, ni la pollution chimique ne sont alors nécessaires. »



Le livre de l'auteur sur l'énergie solaire publié en 1977 par l'UNESCO à Paris

"Tous les moyens connus par lesquels le rayonnement solaire peut être converti en énergie utile sont discutés. L'attention se concentre sur la conversion directe de la lumière en électricité au moyen de cellules solaires"

"L'énergie disponible sous forme d'énergie solaire est répartie uniformément. Ainsi, chaque pays possède beaucoup plus d'énergie disponible que celle dont il aurait besoin, et en plus renouvelée chaque année par le Soleil. L'énergie solaire est une réserve fabriquée sur place".

"Le développement des applications de l'énergie solaire ne signifie pas le début d'un nouveau monde économique. Au contraire, les nouveaux systèmes énergétiques doivent d'abord gagner leur place sur le marché global de l'énergie, ils doivent être rendus compétitifs avec le pétrole, le charbon ou l'énergie nucléaire, que ce soit pour des raisons d'épuisement des ressources conventionnelles, de pollution thermique ou chimique de l'environnement naturel, d'indépendance accrue vis-à-vis des fournisseurs étrangers ou tout simplement à moindre coût".

"Les problèmes techniques et économiques liés à l'utilisation à grande échelle de l'énergie solaire sont explorés".

"Évaluation du potentiel à grande échelle de l'énergie solaire pour l'avenir : Il est prouvé que le coût élevé "actuel" des cellules solaires n'est nullement inévitable et que l'on peut s'attendre à une réduction à grande échelle des coûts de fabrication jusqu'au niveau requis pour des centrales électriques rentables dans les 10 à 15 prochaines années".

"Économie d'échelle".

"Progrès de l'industrialisation". "

« En 1975, le marché du photovoltaïque terrestre n'était que de 100 kW contre un taux d'installation annuel d'énergie conventionnelle de centaines de MW »

"Le volume de production photovoltaïque à grande échelle de 10 GW entraînerait un coût de 0,20 \$/W à 0,50 \$/W ». "Ces volumes de production cumulatifs associés à une courbe d'apprentissage raisonnable peuvent en fait être atteints. »

"Si les centrales photovoltaïques centrales sont intégrées dans un réseau électrique étendu, il n'y aura pas de problème particulier puisque la situation est la même que pour les centrales conventionnelles". "Ce n'est qu'en tant que générateur d'énergie indépendant qu'il est préférable d'ajouter un dispositif de stockage électrique".

"Les générateurs photovoltaïques utilisant des cellules solaires à très faible coût seront rentables à presque tous les niveaux de puissance, même au niveau de quelques Watts ou kW. Ainsi, il est possible d'envisager des générateurs individuels pour les maisons, des installations communautaires pour les villages, les centres commerciaux, les usines de production industrielle, la transformation agricole et les fermes, ainsi que des usines électriques centralisées ".

"Les générateurs solaires installés à proximité des consommateurs peuvent s'avérer attrayants parce qu'ils évitent des coûts de transmission excessifs et qui, lorsqu'ils sont montés sur des toits ou d'autres structures disponibles, éliminent la nécessité d'acheter des terres, de préparer le terrain et de fournir des structures supports".

"Une surface de 45 m<sup>2</sup> pourrait être installée sur le toit de la plupart des maisons familiales aux États-Unis. Si une batterie au plomb-acide était utilisée pour le stockage, elle aurait une capacité d'environ 200 kWh, son volume serait de 4 m<sup>3</sup>. Un tel système donnerait une autonomie complète à la maison".

# Prologue : Du Triomphe du Fer au Triomphe du Soleil

## Le triomphe du fer

C'était la devise de la grande Exposition Universelle de Paris en 1889 - avec la toute nouvelle Tour Eiffel se dressant fièrement au milieu. En fait, c'était l'année zéro du développement mondial que nous connaissons depuis.

Les premières voitures sont apparues sur les routes allemandes à cette époque et, quelques années plus tôt, Thomas Edison avait commencé à exploiter ses premières centrales électriques en Angleterre et aux États-Unis. D'ailleurs, il a également assisté à l'Exposition universelle de Paris, la Ville Lumière. Pouvez-vous imaginer aujourd'hui un monde sans électricité et sans automobiles ? C'était avant 1889, aux portes du 20<sup>ème</sup> siècle.

La croissance explosive de l'approvisionnement en électricité qui a suivi a entraîné une croissance tout aussi explosive de la consommation de charbon sale pour alimenter les centaines de nouvelles centrales électriques. La situation s'est encore dégradée lorsque, dans les années 1970, les centrales nucléaires ont obtenu les faveurs des politiciens : Le nucléaire était à l'époque "une énergie illimitée et gratuite". Quatre cent d'entre elles ont été construites et installées jusqu'au tournant du 20<sup>ème</sup> siècle en seulement 30 ans. Quand on regarde en arrière, cela ressemble à un cauchemar.

Le magazine Forbes écrivait en 1985 : "L'échec de l'énergie nucléaire américaine est le plus grand désastre managérial de l'histoire de l'entreprise, un désastre d'une ampleur monumentale - seuls les aveugles ou les partisans peuvent maintenant penser que l'argent a été bien dépensé".

Au cours du siècle dernier, d'autres événements ont également mal tourné. Deux guerres mondiales avec des millions de morts innocentes, deux dictatures qui apportent la misère et la mort à d'autres millions de personnes, une crise économique mondiale aux conséquences désastreuses. L'augmentation très rapide de la population mondiale, la pollution de l'environnement naturel, de l'air, du sol et des mers a affecté le monde à une échelle jamais vue auparavant, le changement climatique n'en étant qu'une des conséquences. Des montagnes de millions de tonnes de déchets plastiques créés, l'air dans de nombreuses villes du monde entier qui devient irrespirable. Le 20<sup>ème</sup> siècle ne marque t'il pas le début de l'anthropocène ?



La tour Eiffel à Paris (Photo de l'auteur)

Le nouveau siècle a en fait apporté un changement radical. Le discrédit de l'énergie solaire et des énergies renouvelables a pris fin. L'option nucléaire s'est terminée par l'explosion de deux centrales en Ukraine et au Japon. Était-il criminel de commencer à exploiter toutes ces centrales alors que personne n'avait la moindre idée de l'endroit où se débarrasser de tous les déchets nucléaires dangereux produits ? Les explosions, trop nombreuses, sont devenues la goutte d'eau qui a fait déborder le vase pour le nucléaire. En ce qui concerne le charbon, ses marchés se sont développés au cours de ce siècle. Cependant, à terme, la pollution qu'il entraîne et le risque de changement climatique dont elle est le plus responsable ont, plus récemment, paralysé son développement plus récemment.

Depuis l'an 2000, la production mondiale d'électricité à partir de centrales nucléaires est en baisse. En Europe, aucune nouvelle centrale nucléaire n'a été mise en service au cours de ce siècle. Il en va de même pour les États-Unis, où, à l'exception de celui qui a été mis en ligne en 2016, plusieurs anciennes centrales ont, en revanche, été déconnectées du réseau. L'Inde et la Chine ont mis quelques nouveaux réacteurs en service, mais la relance attendue du nucléaire, désespérément attendue par ses partisans, n'a tout

simplement pas eu lieu. L'industrie nucléaire mondiale - Areva, Westinghouse, Toshiba - est pratiquement en faillite.

La consommation mondiale de charbon a bien avancé dans notre nouveau siècle ; elle a doublé depuis 1990. Cependant, depuis 2013, elle n'augmente plus mais se stabilise. Depuis cette année-là, la consommation de charbon dans les centrales électriques américaines a cessé de croître. En 2016, il a chuté au niveau des années 1970. Au Royaume-Uni, la production de charbon a chuté de 82 % entre 2013 et 2017. La Chine est le leader mondial de la consommation de charbon et exploite trois fois plus de charbon que les États-Unis : Cependant, la Chine a brûlé en 2016 la plus faible quantité de charbon en 3 ans. Bloomberg, une agence internationale d'analyses financières, a noté que c'est la fin de l'ère du charbon : "La production de charbon est en chute libre".

Parallèlement à la stabilisation de la consommation de charbon dans le monde, les émissions de CO<sub>2</sub> se sont également stabilisées au cours des dernières années. En 2018, avec seulement 18 ans, notre nouveau siècle vient à peine de devenir adulte. Et elle a déjà ouvert la porte à une révolution industrielle, l'ère solaire. Depuis le début du siècle, nous avons vu le Triomphe du Soleil.

## **Le triomphe du soleil**

Tout a commencé en Allemagne, la plus grande économie d'Europe. Pourquoi et comment ? Nous le verrons plus tard et cela vaudrait la peine d'y consacrer un livre en soi. En l'an 2000, l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne et quelques autres énergies renouvelables ont commencé en Allemagne un développement époustoufflant. De 2000 à 2017, la production d'électricité à partir des énergies renouvelables a été multipliée par 10 pour atteindre 38 % de la consommation allemande totale. L'éolien et le photovoltaïque y produisent désormais plus d'électricité que le charbon et le nucléaire.

Dans l'Union européenne, depuis l'année 2000, la capacité de production d'électricité à partir des énergies renouvelables est supérieure à celle des énergies fossile et nucléaire. En 2016, 86 % de tous les ajouts de capacité de production d'électricité étaient de type renouvelable.

Depuis 2008, l'énergie renouvelable a représenté plus de la moitié de la nouvelle capacité de production d'électricité installée aux États-Unis. En 2016, le photovoltaïque et l'éolien représentaient 60 % de l'ensemble des nouvelles capacités installées.

Depuis 2013, la Chine est devenue le leader mondial en matière d'énergies renouvelables : nouvelles installations éoliennes, photovoltaïques, hydroélectriques et solaires thermiques. En Chine, c'est aussi le photovoltaïque qui est récemment devenu le numéro un pour les nouvelles installations électriques.

En 2018, les deux tiers des ajouts de capacité dans le monde étaient de type Renouvelable, le PV n°1 d'entre eux. En 2019, un tiers de la capacité totale installée était renouvelable; l'essentiel a été installé depuis l'an 2000. Pratiquement tous les pays sont concernés. Par exemple, en 2016, neuf pays d'Amérique du Nord et du Sud, d'Asie et d'Europe avaient déjà installé chacun plus de 10 GW d'énergie éolienne. En 2015, la capacité mondiale de l'énergie éolienne a dépassé pour la première fois celle de l'énergie nucléaire. D'après l'Agence internationale de l'énergie (AIE), basée à Paris, la capacité mondiale d'énergie renouvelable est passée pour la première fois devant celle de combustion du charbon en 2015 : elle a en effet atteint 1985 GW (31 % de la capacité mondiale totale de production d'électricité), alors que celle des centrales au charbon s'élevait à 1951 GW.

"C'est un nouveau monde".

Depuis le début du siècle, les énergies renouvelables ont attiré plus de 3 000 milliards de dollars d'investissements privés. Le photovoltaïque et l'éolien étant de nouveaux venus sur les marchés, il était normal d'attendre qu'ils bénéficient d'un soutien politique. Il est important de souligner, cependant, que les énergies conventionnelles ont bénéficié et bénéficient encore aujourd'hui d'un soutien beaucoup plus important - et celui-ci en espèces. Rien qu'en Allemagne, l'exploitation nationale du charbon a reçu 200 milliards d'euros de subventions depuis 1957. Récemment, les chefs d'État du G20 ont décidé de supprimer toutes les subventions à l'énergie la quelle ? d'ici 2025. Toutefois, ces déclarations ne sont pas juridiquement contraignantes.

Il est maintenant rentable d'investir dans les énergies renouvelables. Elles sont moins chères que les énergies fossiles et nucléaires conventionnelles. C'est ce qui explique leur succès sur les marchés mondiaux.

Les différentes activités liées à l'exploitation, à la commercialisation, à la production, à l'installation, à l'exploitation et à la maintenance des énergies renouvelables sont riches en termes de création d'emplois. Depuis le début du siècle, 10 millions d'emplois ont été créés dans le monde entier. Aux États-Unis, 260 000 personnes travaillent aujourd'hui dans le secteur du solaire photovoltaïque, contre 50 000 dans le secteur du charbon. Et il est préférable pour votre santé de travailler sur des panneaux solaires propres que de travailler sur du charbon sale.

L'introduction massive de l'énergie solaire et des énergies renouvelables ouvre de nouvelles perspectives pour nos vies. En Europe, aux États-Unis, au Japon et en Australie, plus de 6 millions de familles ont acquis une certaine autonomie énergétique grâce à l'installation récente de systèmes photovoltaïques sur leurs maisons. Cela signifie une meilleure protection contre les fournisseurs anonymes des énergies conventionnelles centralisées et leur décisions d'investissements dans la production et la distribution de l'énergie que nous pouvons désapprouver. Les énergies renouvelables offrent plus de transparence, de liberté de décision, et un sentiment de bien-être lorsqu'elles sont reliées à une énergie propre plutôt qu'à une énergie conventionnelle dangereuse et polluante.

Avec le photovoltaïque, nous faisons partie du monde moderne des semi-conducteurs. Il va même au-delà de la "silicon valley" avec les smartphones et la communication immédiate via Internet. Il s'agit de bénéficier de nouvelles applications satellitaires importantes au-delà du GPS, de la communication et de l'observation. Cela signifie une vie plus agréable à un coût acceptable - vivre dans des logements plus confortables et des structures urbaines durables combinant travail et loisirs en un seul endroit.

Le monde de la bioénergie que nous aborderons plus tard est un également aspect très important. De nouvelles perspectives de production de biomasse en agriculture et de traitement durable des flux de déchets biologiques doivent être prises en compte. Les nouvelles opportunités pour la lutte contre la pauvreté dans le monde sont peut-être les conséquences les plus importantes de l'essor de l'énergie solaire.

Ce que nous voulons aussi aborder, ce sont les relations plus évidentes que nous allons avoir, en tant qu'adeptes de l'énergie solaire, avec la nature, avec notre Soleil, avec l'Univers.

# **Partie 1**

## **Le Soleil et Nous**

# Chapitre 1

## L'Héritage du Soleil

### 1.1 L'homme dans l'Univers

L'Univers est fantastique. Et nous, les humains, nous n'y comptons pas pour grand-chose. Notre rôle est au mieux celui d'observateurs.

Jusqu'à il n'y a pas si longtemps, la sagesse traditionnelle voulait que l'homme et la Terre soient le centre de l'Univers. Rappelez-vous Nicolas Copernic (1473-1543), Johannes Kepler (1571-1630) et Galilée (1564-1642), qui ont été les premiers à montrer qu'il est faux que le Soleil et toutes les étoiles tournent autour de nous, et que c'est en fait la Terre qui tourne du soleil. Ce n'est « qu'hier », en 1992, que l'honneur de Galilée d'avoir adhéré à la vérité, lui a été entièrement rendu par le Vatican.

Notre Terre n'est en effet pas le centre du système solaire, et le Soleil avec ses planètes n'est pas non plus situé au centre de notre galaxie. Ce dernier est occupé par un trou noir mangeur d'étoiles. Le Soleil évolue à l'intérieur d'un bras latéral de notre galaxie qui s'est formé il y a 8,8 milliards d'années. L'Univers a 13,8 milliards d'années et le système solaire est un jeune de 4,6 milliards d'années. Il n'y a pas non plus de signe que notre galaxie joue un rôle central particulier dans l'Univers.

Notre Soleil est une étoile de taille moyenne. Ces étoiles ont une durée de vie d'environ 10 milliards d'années et finissent en "géantes rouges". Plus une étoile est grande, plus sa durée de vie est courte. Il y a des étoiles massives avec 100 fois la masse de notre Soleil ; elles ne vivent que quelques millions d'années avant de devenir une super étoile géante et d'exploser en tant que "supernova". Elles peuvent devenir 500 000 fois plus lumineuses que le Soleil. Les supernova finissent à leur tour sous forme d'étoiles à neutrons ou de trous noirs. Les trous noirs peuvent avoir un milliard de fois la masse de notre Soleil.

Non seulement les masses et les énergies, mais aussi les dimensions de l'Univers sont gigantesques. Les kilomètres et les miles étant inappropriés pour les décrire, on utilise l'année-lumière, la distance parcourue par la lumière en une année. La lumière est notre messenger dans l'Univers. Il n'est pas affaibli dans l'espace vide lorsqu'il voyage plus de 10 milliards d'années-lumière, ce qui est remarquable. Cependant, comme sa vitesse est énorme mais non pas infinie, nous ne pouvons pas voir l'Univers tel qu'il est aujourd'hui. Nous ne le voyons seulement que comme il était il y a des millions ou des milliards d'années, lorsque la lumière s'est éloignée des objets que nous voyons maintenant dans notre télescope.

L'Univers est dans un mouvement continu, suivant les lois de la physique. Il n'y a pas de création supplémentaire en jeu, à moins que vous ne soyez croyant.

Cependant, il y a beaucoup de mystères - l'un étant le "Big Bang". Comment se fait-il que cet énorme Univers se soit développé à un moment donné à partir d'une boule pas plus grosse qu'une tête d'ongle ? Ce n'est qu'en 1927-1929 qu'Edwin Hubble et le prêtre belge Georges Lemaître découvrent l'expansion de l'Univers et proposent le « Big Bang », l'expansion suivant une vitesse précise, la constante de Hubble. *Dans les modèles cosmologiques les plus récents, la constante n'en est pas une. Les nouvelles découvertes font état d'une expansion accélérée, à l'origine de l'énergie noire (NDT)*

D'autres mystères concernent la "matière noire" et l'"énergie noire" dans l'Univers. Seulement 5% de l'Univers est visible pour nous, le reste est sombre. L'existence de l'énergie sombre dans l'Univers provient

du fait que l'Univers est en expansion permanente. Sans quoi, les forces gravitationnelles de la matière visible en jeu devraient obliger les masses à cesser de s'étendre à un stade et à recommencer en revenant au point initial du Big Bang. La matière noire, estimée à 27% du total, dans l'Univers est une hypothèse issue de la mesure de la distribution vitesse des étoiles dans les galaxies en rotation comme la nôtre. Sans la matière noire autour, les étoiles au bord des spirales devraient voyager plus lentement que ce qui est observé.

En parlant de mystères, quelle peut être la nature des forces qui maintiennent les protons collés ensemble dans tous les atomes du monde ? Les protons contenus dans le noyau de tous les atomes - à l'exception de l'atome d'hydrogène - ont tous la même charge électrique positive, et sans une force qui les maintient ensemble dans le noyau, les atomes devraient être instables. Les forces gravitationnelles à l'intérieur du noyau sont en effet infiniment plus faibles que les forces répulsives des charges électriques. En pratique, juste au moment où l'uranium ou le plutonium sont bombardés de neutrons, les énergies qui maintiennent le noyau ensemble sont libérées et, comme nous le savons, les conséquences peuvent être terribles.

Et enfin, pourquoi les constantes physiques de l'Univers ont-elles leurs valeurs mesurées ? Elles ressemblent à des nombres aléatoires ; qui les a choisis ? Prenez les trois constantes universelles :  $c$ , la vitesse de la lumière ;  $h$ , la constante de Planck, également reliée à la lumière ; et  $g$ , la constante gravitationnelle. Pourquoi la vitesse de la lumière vaut-elle exactement 299 792 km/s et non pas 300 000 km/s ? Pourquoi la force décrivant, d'après Newton, l'attraction mutuelle des masses est-elle proportionnelle à  $6,674 \times 10^{-11} \text{ Nm/kg}^2$ , ou, pour le dire autrement, pourquoi la pomme tombant sur la tête de Newton, entraînant son intérêt pour la gravité, et n'est-elle pas tombée plus vite ou plus lentement ?

À côté des trois constantes universelles, il y a quelques autres constantes physiques, comme la charge électrique élémentaire. Pour chacune, la même question se pose. Et si l'une d'entre elle était différente, aurions-nous un autre univers autour de nous ? Pour autant que l'on sache, ces constantes ont la même valeur depuis la nuit des temps. Les chercheurs ont essayé de mettre en évidence la moindre évolution de ces paramètres physiques dans le temps. Ils n'en ont pas trouvé.

En conclusion, il est de fait que l'Univers est en constante évolution, obéissant aux lois éternelles de la physique. Il en va de même, comme nous le verrons plus loin, pour la biosphère : Il n'y a aucune trace d'une quelconque création, sauf pour les lois de la physique elles-mêmes, et certains mystères comme celui du Big Bang qui sont impossibles à expliquer rationnellement.

## 1.2 Un ciel d'étoiles, mais un seul soleil

Toutes les étoiles que vous voyez dans le ciel nocturne sont des soleils, à l'exception de quelques planètes comme Vénus. Toutes ces étoiles appartiennent à une seule galaxie : notre Voie Lactée. Comme nous le savons aujourd'hui, la Voie lactée est composée de 100 milliards d'étoiles, soit 100 000 millions d'étoiles. Mais il y a beaucoup plus encore à voir... Puisque nous pouvons compter sur des télescopes sophistiqués, nous savons que le Cosmos contient 1000 milliards de galaxies. Et chaque galaxie a approximativement le même nombre d'étoiles que notre Voie Lactée. On peut considérer pratiquement que le nombre total d'étoiles est infini ! Pourtant, en même temps, ces énormes masses évoluent dans l'espace, qui est pratiquement vide. La contradiction apparente vient du fait que les distances sont aussi énormes.

Bien qu'il n'y ait aucune raison pour laquelle la plupart des étoiles n'aient pas de planètes, le nombre de planètes semblables à la Terre pourrait être tout aussi important. Mais n'essayez pas de communiquer avec elles, les distances sont prohibitives.

Tout est donc en évolution et en échanges. Les astronomes américains ont conclu en 2017 à partir de simulations que les galaxies peuvent échanger de la matière entre elles à grande échelle : 50% de la matière

de notre Voie Lactée aurait ainsi pour origine d'autres galaxies après avoir voyagé pendant des milliards d'années.

Il ne fait aucun doute que le système solaire doit son existence à une ou plusieurs supernova. Comme mentionné précédemment, les supernova sont des étoiles extrêmement massives lourdes qui explosent et laissent derrière elles des gaz contenant les éléments chimiques lourds, comme le fer, le silicium... qui n'existeraient pas autrement dans l'Univers. Notre Terre, sa biosphère et nous aussi sommes faits de ces éléments chimiques qui, à l'exception des éléments plus légers comme l'hydrogène, sont issus des explosions de supernova. Toute l'eau en particulier contient de l'hydrogène, et celui-ci provient directement du Big Bang.

Depuis 1987, les astronomes observent une supernova en train de s'effondrer à 163 000 années-lumière dans une galaxie voisine. C'est la supernova la plus proche encore découverte. Elle a été étudiée au cours des 30 dernières années. À son apogée, elle rayonnait comme 100 millions de soleils. La plus grande partie de la lumière émise avait pour origine la désintégration du cobalt radioactif produit lorsque l'étoile a implosé, puis s'est amplifiée dans une réaction de fusion thermonucléaire géante.

Ainsi, notre Soleil s'est peut-être formé à partir des restes de ces supernova.

La théorie générale en vigueur est que tout aurait commencé avec un nuage moléculaire géant, de 65 années-lumière de diamètre, comme ceux qui existent encore aujourd'hui dans notre galaxie. Ces nuages moléculaires peuvent être, comme tout dans l'Univers, énormes : environ 300 000 fois la masse du Soleil. Ces nuages peuvent se former et se dissocier en moins de 10 millions d'années. On pense que le Soleil s'est formé à partir d'un "disque proto-planétaire" en moins de 50 millions d'années - une période relativement courte à l'échelle de l'Univers. Le Soleil ne s'est pas formé seul, mais au sein d'un amas de 1000 à 10 000 étoiles.

Il est intéressant de noter que, plus récemment, on s'est dit que les choses, déjà compliquées, étaient encore plus compliquées que cela. Et cela vaut la peine d'en parler aussi dans ce livre sur le Soleil. En 2012, le spécialiste français Mathieu Gounelle a ainsi publié ses résultats de son nouveau modèle théorique dérivé des travaux sur les astéroïdes. Il s'est intéressé à la présence d'une grande quantité de magnésium 26 et de nickel 60 dans les astéroïdes. Selon lui, une grande nébuleuse se serait effondrée il y a 4,6 milliards d'années, entraînant la création d'une première génération de 5000 étoiles. Cinq millions d'années plus tard, les supernova massives ont ensuite explosé et ont éjecté leurs éléments chimiques qui s'étaient formés en leur sein. Puis, 2 millions d'années plus tard, la partie gauche du nuage s'est effondrée à son tour, ce qui a conduit à la formation d'une deuxième génération d'étoiles. Certaines de ces étoiles étaient très massives avec des dizaines de fois ou des centaines de fois la masse de notre Soleil. Finalement, une de ces étoiles lourdes a éjecté 100 000 ans plus tard la matière qui a donné naissance à une troisième génération d'étoiles, dont notre Soleil et une centaine d'autres. Cela s'est produit il y a environ 4,6 milliards d'années. Les étoiles sœurs du Soleil ont disparu dans la galaxie. Quelques millions d'années plus tard, l'étoile massive qui avait éjecté la matière pour former le Soleil et ses étoiles sœurs est décédée dans une autre supernova. Dans la cosmologie Aztèque une référence à une étoile originelle est curieusement faite, Coatlicue, la mère du Soleil et la mère des Dieux.

Ainsi, le Soleil avec ses planètes est maintenant âgé d'un peu moins de 4,6 milliards d'années. Il n'a pourtant pas atteint la moitié de sa durée de vie, car il dispose encore de 74% de sa réserve d'hydrogène, son carburant et 24% d'hélium à bord. Pour le Soleil, on attend donc une durée de vie totale de 10,5 milliards d'années. En raison de la petite contraction de son noyau, l'irradiation du Soleil augmente de 7 % à chaque milliard d'années ; aujourd'hui, elle est de 30 % plus forte qu'au début de son existence. La fusion thermonucléaire a lieu dans le noyau à 15 millions de degrés. Il faut environ 100 000 ans pour que la chaleur générée dans le noyau (et transportée par les photons) atteigne la surface. Celle-ci n'est plus heureusement qu'à 5 778 degrés Kelvin, soit environ 6000 °C . Si elle était restée de quelques millions de degrés comme le noyau, le

rayonnement violent brûlerait immédiatement tout ce qui se trouve sur Terre, et vaporiserait toute l'eau de la planète.

Comme la flamme d'une bougie, le soleil rayonne de l'énergie sous forme de photons. Ce rayonnement suit une loi dite du rayonnement « du corps noir » qui dépend seulement de la température de la source émettrice, plus celle-ci est élevée, plus son maximum se déplace vers les courtes longueurs d'ondes et l'ultraviolet. Pour le soleil, compte tenu de sa température de surface de 6000°C, le maximum du rayonnement se situe justement dans la gamme des longueur d'onde visibles (0,4 à 0,7 micron environ) au niveau du bleu/vert (0,55 micron). A titre de comparaison la flamme d'une bougie n'atteint qu'environ 1500° C, et le maximum d'émission se déplace donc dans le rouge. Revenant au Soleil, la puissance lumineuse reçue au niveau de la terre, pourtant à 150 millions de km, est, hors atmosphère, de 1 367 Watt par m<sup>2</sup>. Cette valeur est appelée constante solaire, ce que ne l'empêche pas de connaître de légères variations. Après réflexion et absorption par l'atmosphère, l'intensité lumineuse descend à environ 1 kW par m<sup>2</sup> au sol et au niveau de la mer. C'est cette valeur qui est prise pour référence dans l'étalonnage des cellules et modules photovoltaïques.

Récemment, le rayonnement solaire reçu par l'Europe a été comparé entre les deux périodes 1965-1988 et 1989-2012 pour mesurer l'impact de la pollution. Il a été constaté que l'irradiation a augmenté au cours de cette dernière période, de 2 à 3 Watt/m<sup>2</sup>. Ce n'est pas grand-chose, mais c'est un effet mesurable associé à la réduction de la pollution par les particules. Les pluies acides qui étaient courantes en Europe au siècle dernier semblent également avoir disparu.

L'énergie rayonnée par le Soleil est d'une intensité inimaginable. Chaque seconde, 627 millions de tonnes d'hydrogène sont « brûlées » dans le noyau du Soleil pour donner de l'hélium - cet élément appelé à juste titre d'après le mot grec pour le Soleil. C'est une quantité incroyablement élevée. Comme le Soleil rayonne dans toutes les directions, toute l'énergie que la Terre reçoit ne fait que moins d'un milliardième de ce que le Soleil émet au total. En 2017, les chercheurs ont fait une autre découverte surprenante. Selon les données recueillies par l'Observatoire solaire et héliosphérique (SOHO), le Soleil est en rotation sur lui-même avec une période de 25 jours. À l'intérieur du noyau, la vitesse de rotation est plus rapide et plus proche de celle de la Terre ; Il ne faut qu'une semaine pour une révolution.

En avril 2019, le journal «Nature» a publié les nouvelles conclusions de chercheurs américains qui ont conclu que le crash de deux étoiles à neutrons - les restes d'explosions de supernovas - devait également participer à la création du système solaire. Cela provient de la concentration de quantités considérables de radio-isotopes lourds, tel le curium et le plutonium, dans le nuage d'origine duquel notre système solaire a émergé. La collision de deux étoiles à neutrons doit avoir eu lieu à peine 80 millions d'années avant la naissance du Soleil et proche de seulement 980 années-lumière.

Les énergies du cosmos peuvent être pour nous, les humains, également de dimension gigantesque. Un exemple vient d'être donné justement dans une publication de février 2020 par Simona Giacintucci et collègues aux USA qui décrivent la plus grosse explosion jamais observée dans l'univers depuis le Big Bang. Ça s'est passé il y a des centaines de millions d'années dans un conglomerats (cluster) de nombreux galaxies à 390 millions d'années lumières de la terre. À l'origine un gigantesque trou noir qui a accéléré la matière voisine à une vitesse voisine de celle la lumière. Bien que le phénomène ait eu une dimension exceptionnelle, il a été très difficile à observer, nécessitant l'expertise de grands spécialistes disposant des meilleurs moyens en satellites d'observations et des observatoires aujourd'hui disponibles.

L'Europe cherche à imiter les performances du Soleil. Depuis une trentaine d'années, Euratom « bricole » avec le projet thermonucléaire ITER dans le sud de la France pour produire un jour de l'énergie

commercialisable, avec un réacteur à fusion. Le financement de la recherche sur la fusion - 30 milliards d'euros jusqu'à présent - provient de sources publiques sans grand contrôle démocratique. Beaucoup pensent que c'est un gaspillage de milliards d'euros et qu'il faut laisser le Soleil là où il est.

### 1.3 Comment le Soleil produit son énergie

Le Soleil produit son énergie par fusion thermonucléaire dans le noyau, où, sous une chaleur énorme, quatre protons, les noyaux de l'hydrogène, se rassemblent pour former un noyau d'hélium. Dans le processus, deux des protons sont convertis en neutrons et deux positrons et deux neutrinos sont créés. Ces neutrinos ont pu être mesurés sur Terre, bien qu'avec beaucoup de difficulté, ce qui a confirmé le modèle théorique.

L'explication semble simple, mais il y a un problème majeur : La charge électrique positive des protons étant la même, cela crée une force de répulsion énorme entre eux. Ils ne peuvent se toucher d'aucune façon et n'entrent pas en contact direct, même aux grandes vitesses qu'ils acquièrent à des températures élevées.

La question de savoir comment le Soleil produit son énergie a toujours suscité beaucoup d'intérêt parmi les scientifiques. Au XIXe siècle, Hermann von Helmholtz et Lord Kelvin ont proposé la contraction gravitationnelle du Soleil. Cependant, ils ont vite découvert que de telles énergies ne suffiraient pas à expliquer la longue existence du Soleil. Lorsque la radioactivité a été découverte au début du 20ème siècle, elle a aussi été proposée comme explication, mais cette explication s'est également révélée très insuffisante.

En 1920, Arthur Eddington en Angleterre proposa l'hypothèse visionnaire de la fusion de l'hydrogène en hélium. Le poids d'un noyau d'hélium ayant été mesuré et trouvé légèrement inférieur à celui de quatre noyaux d'hydrogène, la différence de masse pouvait alors expliquer, d'après la relation d'Einstein, toute l'énergie produite. Eddington s'est une nouvelle fois montré visionnaire lorsqu'il a soulevé la question du "contrôle de ce pouvoir pour le bien-être de l'humanité - ou pour son suicide".

Eddington avait donc raison, mais la question pratique de la répulsion des protons, dite répulsion coulombienne, n'était toujours pas résolue. La percée a eu lieu en 1928 lorsque le Russo-Américain George Gamov a introduit la mécanique quantique et la probabilité non nulle de deux particules chargées de surmonter leur répulsion électrostatique mutuelle, par un effet appelé tunnel. C'était en fait la bonne explication, mais les discussions ont continué pendant des années entre les protagonistes de l'époque, Teller, Bethe, von Weizsäcker...qui se connaissaient bien.

En 1937, Carl Friedrich von Weizsäcker a proposé le cycle Bethe-Weizsäcker, ou cycle CNO, où les éléments carbone, azote et oxygène (d'où l'abréviation, le N étant pour le nom de l'azote en anglais, Nitrogen) qui sont également contenus dans les étoiles en petites quantités, jouent un rôle de catalyseurs pour faire entrer les quatre protons dans l'hélium. Hans Bethe, chercheur germano-américain qui joua plus tard un grand rôle à Los Alamos et dans la construction des premières bombes atomiques, s'impliqua également en 1939 et proposa le même cycle CNO pour expliquer la façon dont notre Soleil génère son énergie. D'autre part - en fait, lors de la même réunion à Washington DC - une réaction directe entre les protons avait de nouveau été proposée par George Gamov et Critchfield. Ils avaient raison et Bethe avait tort. Les deux processus, réaction directe des protons ou cycle CNO, ont lieu dans les étoiles. Cependant, dans notre Soleil, la réaction directe prévaut et le cycle CNO ne fonctionne que dans les étoiles plus massives et plus chaudes.

Il est heureux que la fusion directe des protons soit extrêmement ralentie par les forces de répulsion très élevées entre eux et que le taux de fusion soit maintenu au minimum par l'effet tunnel quantique : sans cela, tous les protons se seraient combinés très rapidement et le Soleil aurait explosé immédiatement.

## **1.4 Le Soleil, la Terre et Nous**

### **1.4.1 Les enfants du Soleil et de la Terre**

Il est logique d'appeler la Terre notre mère et le Soleil notre père. En effet, dans les langues latines comme le français et l'espagnol, l'une est féminine et l'autre masculine. Cependant, cela dépend du point de vue. En allemand, les deux sont des femmes et la lune est masculine. Manifestement, ils se sont trompés.

On a tendance à oublier dans notre vie quotidienne que notre existence est bien régulée par le contrôle que le couple Soleil-Terre a sur nous. Prenez le sommeil. Toute vie est liée au sommeil. Pas de sommeil, c'est la mort. Le sommeil a son origine dans le mouvement de rotation de la terre dans la lumière du Soleil qui crée l'alternance entre le jour et la nuit. Prenez encore le décalage horaire, après avoir parcouru de longues distances, il faut adapter sa montre à la position locale du Soleil, qui dicte l'heure.

### **1.4.2 La naissance de la Terre**

Probablement la Terre et toutes les planètes proviennent du même disque nébuleux plat qui a donné naissance à la formation du Soleil. Cela a dû se produire peu de temps après la formation de notre étoile, soit 10 à 100 millions d'années plus tard. Cette vue est conforme avec le fait que toutes les planètes se déplacent dans le même plan et sur des orbites, dans le même sens de rotation que le Soleil.

Les premiers à spéculer que les planètes auraient été formées par la condensation d'une nébuleuse en rotation ont été Kant et plus tard Laplace. En 1943, C. F. von Weizsäcker - qui a également travaillé, comme nous l'avons vu, sur la production d'énergie à l'intérieur du Soleil, et sur l'énergie qui maintient les protons ensemble dans les atomes, a également formulé une vaste hypothèse sur la façon dont notre Terre et toutes les planètes ont pu se former dans le système solaire. Il a expliqué pourquoi les orbites des planètes ont des distances régulières par rapport au Soleil suivant une séquence particulière (l'équation de Titus-Bode). En particulier, il a supposé que les planètes ont dû avoir à l'origine la même composition d'éléments comme le Soleil, c'est-à-dire plus de 98% d'hydrogène et d'hélium et le petit pourcentage restant d'éléments plus lourds. Sur les planètes plus proches du Soleil, comme la Terre, les éléments légers ont été éjectés lors du processus d'accrétion et seuls les éléments plus lourds sont restés. Comme les planètes extérieures plus éloignées du Soleil étaient plus froides et glacées, elles ont conservé l'hydrogène. En effet, la teneur en hydrogène de Jupiter est proportionnellement comparable à celle du Soleil.

Aujourd'hui, nous connaissons plus précisément la composition chimique exacte de la Terre et du Soleil. La Terre contient principalement les quatre éléments oxygène, fer, silicium et magnésium. Tous les autres ne représentent pas plus de 0,3 % de la masse totale de la Terre.

Comme nous l'avons déjà mentionné, tous les éléments (hormis l'hydrogène) ont été formés dans des étoiles massives à des températures plus de 100 fois plus chaudes que dans le noyau de notre Soleil. Après l'épuisement de l'hydrogène, les étoiles ont commencé à brûler de l'hélium. Par contraction, la température des étoiles a alors augmenté. Le carbone et l'oxygène ont d'abord été produits, puis le magnésium, puis le silicium et, après avoir atteint 3 milliards de K, le fer. Pour les étoiles, la formation de fer est le signal qui annonce l'explosion de la supernova, et dans ce processus tous les éléments plus lourds que le fer sont enfin formés.

Il est intéressant de noter que le Soleil a toujours contenu les mêmes éléments lourds que la Terre, mais évidemment seulement à la proportion de 1,76 % - le reste étant de l'hydrogène et de l'hélium. La proportion des éléments lourds n'est pas exactement la même que sur Terre, mais elle est très proche, l'oxygène ayant la concentration la plus élevée, comme sur la Terre, et les autres, le fer, le silicium et le magnésium, étant relativement abondants dans le Soleil également.

Beaucoup d'autres modèles sur la formation planétaire ont été proposés jusqu'à aujourd'hui. C'est un sujet où rien n'est définitif, jusqu'à ce que le dernier physicien ait fait son ultime commentaire. Celui qui prévaut actuellement, c'est le modèle SNDM proposé par le Russe Solferov. Il n'est pas fondamentalement différent du modèle de von Weizsäcker.

### 1.4.3 Astéroïdes et comètes

Nous avons vu que le processus essentiel de formation de notre Terre était la collision et l'accrétion de poussière cosmique dans un disque plat en orbite. Celle-ci a été suivie par l'éjection de la majeure partie de l'hydrogène et par le bombardement massif avec des astéroïdes et des comètes. Sans oublier que la Terre primitive a été impactée par une proto-planète plus petite avec la création de notre lune.

Les astéroïdes, ces roches glacées qui frappent la Terre, proviennent souvent de la "ceinture de Kuiper", l'espace au-delà de la planète Neptune. Ce sont les restes de la formation de Jupiter et ils sont donc aussi vieux que le système solaire. En orbite autour du Soleil, ils peuvent traverser aussi l'orbite terrestre.

On pense que les comètes, contrairement aux astéroïdes, arrivent de l'extérieur du système solaire. Il y en a des milliards dont 184 ont été identifiées comme ayant une orbite périodique autour du Soleil. Elles sont composées de glace, de poussière et de gaz au centre. Leurs queues font 10 millions de km de long. Après environ 500 orbites autour du Soleil, elles deviennent de simples roches, tout comme les astéroïdes. La visite de la comète "Tchouri" par un satellite artificiel en 2016 a été un exploit remarquable. En étudiant les isotopes du xénon dans cette comète et en les comparant à ceux de la Terre et du Soleil, on en a conclu que le type d'eau de la comète était d'une origine différente de celle du système solaire.

On pense qu'à la naissance de notre Terre, 1% de l'eau aurait pu provenir de comètes, ainsi qu'1/100 000 de sa masse, seulement. Le reste de l'eau de notre Terre aurait pu provenir d'astéroïdes et de roches du disque original à partir duquel la Terre a été formé en premier lieu. On pense aussi que les comètes auraient pu apporter à la Terre les premières molécules organiques, des acides aminés comme la glycine qui représentent l'origine de la vie.

La formation de notre Terre, y compris celle de la lune, s'est achevée assez rapidement. Les océans de la Terre se seraient déjà formés il y a 4,4 milliards d'années.

Une exposition au Muséum National d'Histoire Naturelle à Paris en 2018 avait pour titre "Météorites entre Ciel et Terre". Des échantillons de différents types d'astéroïdes y étaient exposés, et notamment les "survivants", ces astéroïdes qui datent exactement de l'époque de la formation du Soleil. La figure 1.1 montre la coupe transversale d'un tel échantillon. Il y a des grains brillants enfermés dans une matrice brune. Les grains ont été formés à des températures très élevées dans le voisinage du Soleil indigène. A partir d'eux, on pourrait déterminer l'âge exact de notre Soleil comme mentionné précédemment. La matrice provient de la poussière à partir de laquelle le Soleil et ses planètes ont été formés à l'origine - elle est plus ancienne que le système solaire. Rappelons nous que le système solaire s'est formé à partir d'un énorme nuage contenant plus de 98 % d'hydrogène et 1,7 % de poussière, de poussière cuite que nous voyons sur ces astéroïdes, qui sont appelés chondrites par les experts. Notre Terre provient aussi de l'accrétion de cette poussière.



**Figure 1.1** Vue d'un astéroïde fait de la matière originale à partir de laquelle notre système solaire a été formé (photo de l'auteur).

D'autres types de météorites sont riches en carbone et en matière organique, qui sont les ingrédients de base de la vie, mais ne contiennent pas de traces de vie en tant que telle.

Il est intéressant de noter que la plupart des astéroïdes recueillis sur Terre sont en fer pur. Avant que l'homme n'ait appris à produire du fer à partir du minerai de fer - au début de l'âge du fer -, c'était la seule source de fer, par exemple pour fabriquer des armes. Un poignard trouvé dans la tombe de Toutankhamon aurait même été fait à partir du fer provenant d'un astéroïde. Le fer récupéré des astéroïdes est le même que celui qui se trouve au cœur de notre Terre. Beaucoup d'astéroïdes étaient composés comme des planètes : d'un noyau de fer, d'un manteau et d'une croûte. De tels astéroïdes auraient même eu un volcanisme. Un échantillon de ce type, qui a été récupéré en morceaux, est connu sous le nom de Vesta.

#### **1.4.4 La terre, prête pour la vie**

La Terre bénéficie de conditions particulières pour la vie dans son environnement. Tout d'abord, il y a le grand Jupiter à côté de nous, qui empêche les astéroïdes de percuter la Terre sur son orbite l'orbite. Puis, la vie a pu se développer en utilisant tous les principaux composants qui ont été apportés lors de sa formation, en premier lieu le carbone qui est à la base de tous les processus biochimiques et l'eau. Les éléments chimiques nécessaires à la vie sont appelés CHONPS, ce qui signifie carbone, hydrogène, oxygène, azote, phosphore et soufre.

Et puis il y a la relation de la Terre avec le Soleil. Les alliages de fer fondus dans son noyau externe sont en mouvement continu et produisent un effet dynamo. Sans le magnétisme créé de cette façon, les vents solaires constitués de protons heurteraient violemment la Terre et éjecteraient la partie supérieure de l'atmosphère. Pour maintenir l'ordre des saisons telles qu'il est, il faut que son axe de de rotation de la Terre

façon un angle stable par rapport à le plan de sa rotation autour du Soleil. Ceci est assuré grâce à la lune. Sur Mars, qui n'a pas de lune, l'inclinaison de l'axe de rotation peut varier de 10° à 70°.

La température y est aussi très agréable quand on considère que la Terre est située dans un endroit dangereux : en effet, la température dans l'espace ne dépasse pas 20 K et la surface de la Terre où nous vivons est juste au-dessus d'une véritable fournaise à 7 000 K, son centre lui-même. La température de la surface du soleil est elle-même à 5 778 K. La chaleur à l'intérieur de la Terre provient de sa formation et de la désintégration de l'uranium 238 qu'il contient, qui est radioactif avec un demi-vie de 4,5 milliards d'années. Cette chaleur interne se manifeste de façon éclatante dans le volcanisme mais n'a pas beaucoup d'influence sur la température de la surface qui est dominée par le flux lumineux solaire. 31% de l'irradiation du Soleil sont réfléchis dans l'espace – ce qui donne cette belle couleur bleue de la Terre vue de l'espace. Tout le rayonnement absorbé, soit 79%, se transforme à la fin en chaleur. Elle est également absorbée, par exemple, pour produire de l'électricité d'origine humaine ou de l'énergie mécanique. La Terre absorbe l'irradiation du Soleil qui est située dans le domaine du visible à une longueur d'onde d'environ 0,5 micron et rejette la même quantité que la chaleur dans l'infrarouge à environ 10 microns. La température d'équilibre résultante est de 254 K soit -19°C en moyenne. Heureusement, grâce aux gaz à effet de serre, celle-ci augmente de 35°C, ce qui transforme cette température froide et glacée en une température moyenne très agréable de 15°.

Nous allons voir plus loin comment la vie s'est vraiment développée sur Terre. C'était une route accidentée, la plupart du temps catastrophique pour les espèces qui évoluaient, avec 5 extinctions de masse majeures. Les organismes ne survécurent que grâce à leur extraordinaire vitalité. L'oxygène libre dans l'air existe depuis seulement un peu plus de 2 milliards d'années. Cependant, la vie est déjà vieille de 3,7 milliards d'années ; elle était initialement anaérobie.

#### **1.4.5 La dernière époque glaciaire**

La dernière époque glaciaire prit fin très « récemment », il y a quelques 9 000 à 10 000 ans. Ce fut un cataclysme total. Et, quand elle se termina, elle donna lieu à une inondation qui fut un désastre encore plus terrible.

La période glaciaire dura pendant 100 000 ans. Si on considère les nombreux événements qui peuvent survenir en seulement 1 000 ans – même la découverte de l'Amérique n'est intervenue qu'il y a 500 ans – on a une qu'une très faible idée de l'énorme durée qu'ont représentés 100 000 ans pour la population qui vivait à cette époque. En fait, c'était nos ancêtres directs. Selon les découvertes les plus récentes, l'*homo-sapiens* s'est installé dans tous les territoires connus depuis déjà quelque 300 000 ans. Pas seulement en Afrique de l'Est, où le climat favorable est le meilleur pour préserver les restes humains, mais aussi au Maroc, dans les Balkans, ou en Allemagne, des traces des premiers hommes modernes ont été trouvées. Une durée aussi longue que 100 000 ans pour la période glaciaire représente quelques 3 000 générations de nos ancêtres. Ils avaient largement le temps de se déplacer.

Pendant la dernière période glaciaire – il y en a eu plusieurs autres auparavant – 32% des terres étaient couvertes de glace, jusqu'à 3 km de hauteur. Les masses de glace épaisse recouvraient toutes les parties septentrionales de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique et aussi les parties les plus australes de l'hémisphère Sud ; des montagnes telles les Alpes ou le Tibet en étaient également recouvertes. Les bulles d'air récupérées dans les carottes de glace polaire montrent que les concentrations de gaz à effet de serre dans l'air étaient réduites de moitié à cette époque. Il se peut aussi que le refroidissement ait été amplifié par quelques éruptions volcaniques majeures. L'éruption du Toba, un volcan, il y a 74 000 ans, semble avoir été l'une d'entre elles, opacifiant l'air et empêchant les radiations solaires qui la réchauffent de traverser cette atmosphère.

Les conditions de vie des homo-sapiens devaient être terribles. Probablement peu d'entre eux se sont débrouillés pour survivre -peut-être dans des grottes, telles celles du Sud de la France et d'Espagne avec de magnifiques fresques de cette période ou dans des grottes en Allemagne où des objets impressionnants ont été retrouvés récemment. Les rares survivants étaient certainement à l'origine de l'arbre des langues, les langues indo-européennes en étant simplement l'une des branches. L'Anglais, l'Allemand, le Français, l'Espagnol, le Russe ou les langues indiennes font partie de cette branche mais pas, notamment, les langues africaines. La différenciation entre les populations africaines et européennes a dû intervenir très tôt. Malgré les désagréments subis par l' *homo-sapiens* au cours de cette longue période glaciaire, celui-ci a démontré qu'il était très intelligent, non seulement dans le domaine des arts, mais aussi en créant nos langues originelles. Ce que nous parlons aujourd'hui ne sont que des dialectes dégradés de celle qu'ils inventèrent.

#### **1.4.6 Hephaistos**

Les températures finirent par croître et la glace fondit en plusieurs étapes. Après quelque 9 000 ans, vers 7 000 av J.-C., les deux tiers de toute la glace fondirent et cette époque glaciaire de longue durée se termina. Le phénomène qui conduisit au réchauffement progressif n'est pas encore totalement identifié. On a d'abord évoqué la variation naturelle du rayonnement solaire, selon le cycle dit « de Milankovitch ». L'orbite de la Terre autour du soleil, qui est légèrement elliptique, subit en effet un phénomène de précession du fait d'un effet gravitaire dont Jupiter et Saturne sont à l'origine. De plus, l'inclinaison de l'axe de la Terre varie entre 22,1 et 24,5° selon un cycle de 41 000 ans. Le rayonnement solaire reçu varie légèrement avec l'évolution de l'orbite terrestre. L'inclinaison de l'axe était maximum il y a 10 700 ans, alors qu'actuellement, à 23,44°, nous sommes sur une légère tendance au refroidissement. Et il y a plusieurs autres cycles relatifs au mouvement de la Terre autour du Soleil. Depuis Platon, on sait que la Terre traverse tous les 2 150 ans un nouveau signe parmi les 12 du Zodiaque. Actuellement, nous sommes à l'âge du Verseau.

Mais on considère que le changement climatique impliqué dans l'époque glaciaire était beaucoup trop conséquent pour être expliqué par de faibles modifications du rayonnement solaire et de la température. Aussi, une autre cause a-t-elle été avancée, celle d'impacts d'astéroïdes ou de comètes.

Quelques chercheurs pensent qu'une comète dénommée Hephaistos doit avoir joué un rôle particulier dans ce qui est arrivé. Cette comète était l'une des 400 centaures qui ont été identifiés. Avec leur taille de 50 à 100 km, les centaures sont plus gros que la plupart des autres comètes. Hephaistos doit avoir été désintégré quand il s'est approché d'une planète intérieure du Système solaire il y a quelques 100 000 ans. Il a éclaté en des millions de débris, beaucoup d'entre eux heurtant la Terre. Beaucoup d'impacts ont été repérés vers la fin de la dernière période glaciaire. Un premier il y a 29 000 ans et un autre il y a 17 000 ans, laissant des traces dans les glaces de l'Antarctique. En 1972, le satellite Landsat découvrit en Alaska, à Sythylemencaat, le cratère d'un astéroïde de 500 m de diamètre qui datait de 12 000 ans. Un bloc de 250m de diamètre s'abattit dans les Alpes autrichiennes (Köfels) il y a 8 500 ans. Il est à l'origine du mythe selon lequel le Paradis serait tombé.

L'ancien « Livre des Morts » égyptien, il y a 6 000 ans, rend compte d'une succession de catastrophes cosmiques. Le Sahara a-t-il été victime d'un impact cosmique il y a 7 000 ans, provoquant un changement climatique local ? Il y a plus de 3 000 ans, les Egyptiens ont raconté qu'une comète avait traversé le ciel d'Inde à la Mer du Nord en une boule de feu et qu'un tremblement de terre et un tsunami s'en sont suivis. Le peuple de la mer dans l'histoire égyptienne peut trouver son origine dans de tels impacts ainsi que les légendes des « dix plaies d'Egypte » racontées dans la Bible. Dans les légendes vivantes chinoises, le dragon Kong Kong détruisit un des piliers du paradis provoquant des conséquences dramatiques. Elles renvoient à des conséquences astronomiques datant de 4 350 ans.

#### **1.4.7 La grande inondation**

La conséquence de cette énorme fonte des glaces a été une inondation de dimensions apocalyptiques. Elle dura quelques milliers d'années et apporta des pluies torrentielles et des vagues gigantesques avec des tsunamis de hauteur kilométrique. On pense que la plupart de nos ancêtres périrent en même temps que des millions d'espèces animales.

**Le niveau de la mer s'éleva de 130 m.** Ce que cela représente peut être compris en considérant que ce niveau n'est monté que de quelques centimètres à cause du changement climatique constaté depuis le début de l'industrialisation. Partout, le trait de côte recula vers l'intérieur des terres. La Grande-Bretagne redevint une île et la liaison terrestre entre l'Alaska et la Sibérie se trouva immergée. Le bassin méditerranéen se remplit et la communication avec l'Océan Atlantique fut rétablie. Comme toute la glace produisit de l'eau douce, la salinité de la mer décrut et les poissons eurent besoin de s'adapter.

La grande inondation est restée dans la mémoire de nos ancêtres. C'est une tradition et elle a d'abord été mentionnée dans les anciens textes sumériens. La Bible l'évoque également, en tant que légende, avec le Déluge et Noé, le sauveur de la biosphère.

#### **1.4.8 Le Paradis**

L'histoire d'un paradis au début de tous les temps est une autre légende de la Bible. Récemment, les chercheurs pensent l'avoir trouvé. Ils considèrent qu'il devait se trouver là où de nos jours une flotte de pétroliers s'affaire à transporter une grande part du pétrole mondial : il s'agirait du Golfe Persique. Aujourd'hui, la profondeur de l'eau atteint jusqu'à 90 m avec une moyenne de 50 m. Dans la période glaciaire, avant l'inondation, c'était une zone de terres émergées, parcourue par trois rivières fournissant de l'eau douce. On suppose que l'homme jouissait là d'une vie facile et que le climat local était idéal pour trouver à se nourrir et qu'il autorisait une vie confortable sans avoir besoin de fournir trop d'efforts.

En effet, le proche Sahara, à la même latitude, avant de devenir un milieu hostile à la vie et un désert est connu pour avoir été peuplé vers la fin de la période glaciaire par des tribus nomades et de gros animaux tels des éléphants et des lions. Une partie du Sahara est en Egypte. On suppose qu'une importante civilisation se développa à cet endroit dans les temps pré-pharaoniques quand c'était moins aride. Beaucoup de discussions portent sur le Sphinx de Gizeh. Il a été bâti en tant que lion et, plus tard, sa tête a été transformée en tête de pharaon dont la taille est disproportionnée - signe d'une modification ultérieure. Le corps du lion porte les traces de fortes chutes de pluie, laissant supposer qu'il a peut-être été érigé il y a 7 000 ans, avant la grande inondation.

#### **1.4.9 Le berceau de la civilisation**

L'hypothèse d'un paradis, par la suite inondé pour devenir le Golfe Persique, est étayée par le fait que la première civilisation au Monde naquit juste un peu plus au Nord, en Mésopotamie, aujourd'hui l'Irak.

Le peuplement des villes les plus basses comme Nineveh ou Uruk remonte à 7 000 ans. C'était juste après la fin de l'inondation. Les Sumériens, qui sont identifiés comme les premiers à avoir vécu là, ont tout inventé. Ils ont été les premiers à se sédentariser, ils bâtirent les premières villes et royaumes et organisèrent l'agriculture, l'irrigation, l'élevage, l'administration et les règles de loi. Les Sumériens furent parmi ceux qui inventèrent la première roue. Ils inventèrent la poterie. Ils inventèrent la première écriture 200 ans avant les anciens Egyptiens. Ils furent ceux qui divisèrent les premiers le cercle en 360 degrés. Ils inventèrent le « capitalisme ». Pour la première fois, on pouvait posséder une fortune personnelle. Ils inventèrent, avant la Bible, la semaine de 7 jours.

Un peu plus tard, les Babyloniens, également en Mésopotamie, divisèrent l'année en 12 mois de 30 jours. Ils divisèrent l'heure en 60 minutes et la minute en 60 secondes. Jusqu'à présent, le système décimal est resté incapable de faire cela.

L'histoire de Gilgamesh, le héros de la cité sumérienne d'Uruk, est le début de la littérature mondiale.

#### **1.4.10 En attendant les catastrophes**

L'espèce humaine d'aujourd'hui est menacée par 3 dangers principaux : les météorites, le changement climatique et la guerre nucléaire.

Pour conclure sur les astéroïdes et météorites, on peut au moins mentionner Toutatis, l'astéroïde baptisé d'après un dieu gallo-celtique. Il fait partie d'un ensemble appelé Apollon qui rassemble plus de 8 000 astéroïdes, quelques-uns d'entre eux atteignant la taille de 10 km de diamètre. Ils traversent tous régulièrement l'orbite terrestre. Toutatis vient près de la Terre tous les 4 ans ; le plus près était en 2004, quand il est passé à seulement 4 fois la distance Terre-Lune. Sa taille est impressionnante, 4,6 x 2,4 km<sup>2</sup>. Il n'est pas beaucoup plus petit que celui dont le diamètre était de 10 km et qui provoqua l'extinction des dinosaures il y a 65 millions d'années.

Nous sommes des familiers de Toutatis : une sonde spatiale chinoise a réussi à le survoler et à le photographier.

Et il y a eu aussi Florence. Cet astéroïde de 4,4 km de diamètre –un peu plus gros même que Toutatis- est passé près de la Terre récemment, en septembre 2017.

## Chapitre 2

### L'Énergie pour la Vie

#### 2.1 Qu'est-ce qu'une bonne énergie?

Il va sans dire que l'énergie est d'une importance fondamentale pour notre existence. Imaginez un instant que toute l'alimentation en énergie soit soudainement arrêtée. Alors le cours de la vie s'arrêterait. L'énergie pour le chauffage et le refroidissement, l'énergie pour le transport et l'électricité, pilotent notre économie et sont déterminantes pour notre bien-être et pour notre environnement. Même dans l'agriculture, qui est très largement mécanisée, une coupure d'énergie aurait des conséquences dramatiques et affecterait notre approvisionnement alimentaire.

Les dépenses énergétiques totales dans le monde s'élèvent à 1800 milliard de dollars par an, 2,4% du PIB. Des centaines de millions d'emplois sont impliqués. La pollution et le changement climatique sont les conséquences de la consommation d'énergie non durable. Avec la croissance quasi -exponentielle de la population mondiale grâce à l'industrialisation, l'approvisionnement et la consommation d'énergie ont pris les proportions monumentales qu'elles ont aujourd'hui.

Nous allons revenir aux différentes sortes d'énergies. L'accent doit être mis sur l'électricité car c'est la plus sophistiquée dans l'utilisation et la plus complexe à produire. La majeure partie de l'électricité est utilisée dans les moteurs, dans l'industrie, pour la robotique et pour le contrôle des procédés de fabrication. Elle fournit aussi notre éclairage, ainsi que l'alimentation de toute l'informatique et l'électronique grand public.

Compte tenu de l'importance cruciale de l'énergie, il est fondamental de bien choisir les investissements à faire. Dans ce processus, les responsables politiques jouent un rôle prépondérant mais souvent ceux-ci ont terriblement tort. Des centaines de milliards de dollars ont ainsi été gaspillés. Citons les programmes nucléaires mondiaux qui ont été décidés par des politiciens trop optimistes, qui ont lancé d'importants programmes gouvernementaux, financés par les budgets de l'État ainsi que les investissements aveugles dans toujours plus de nouvelles centrales au charbon, sans considérer les voies alternatives.

Quelles sont finalement les caractéristiques d'une "bonne énergie"?

Les éléments importants ayant une incidence sur toute option énergétique pour les investissements à l'échelle nationale ou régionale sont les suivants :

- La sécurité de l'approvisionnement;
- La compatibilité avec un environnement naturel propre et avec le climat mondial;
- Un coût optimal de production et d'utilisation ainsi que la rentabilité des investissements;
- La décentralisation de l'offre, le développement local, la création de revenus, le confort social des conditions de travail et de vie, le développement de l'industrie et de l'artisanat;
- La coopération internationale et la paix.

Ce qui est en jeu, ce sont des milliards de dollars et des choses aussi importantes que le combat contre le développement des mégapoles, la préservation des intérêts ruraux, la lutte contre la division toujours croissante entre les riches et les pauvres, le développement des économies les moins développées et des

zones rurales pauvres, la lutte contre les conflits ethniques et civils et les guerres, la lutte contre les migrations et les déplacements forcés de populations.

Cela paraît ambitieux, mais une politique énergétique raisonnable y contribuera.

## **2.2 Le Bon, la Brute et le Truand**

### **2.2.1 Le Bon**

L'énergie solaire et toutes les énergies dérivées de ce que nous fournit généreusement le Soleil telles que la bioénergie, l'hydroélectricité, et l'énergie éolienne peuvent être considérées de manière générale comme de bonnes énergies. Elles méritent toutes d'être regardées de plus près.

Premièrement, elles appartiennent aux énergies décarbonées. Celles-ci bénéficient d'un grand soutien dans le cadre des discussions sur le changement climatique, si populaires depuis la COP 21 (la Conférence des Parties organisée sous l'égide des Nations Unies) qui s'est tenue à Paris en 2015, au cours de laquelle a été convenue une limitation des émissions de GES pour préserver le climat. Mais attention, les énergies à peu ou sans carbone transportent avec elles un passager clandestin, l'énergie nucléaire. On pouvait remarquer à cette grande conférence politique que tous les lobbyistes du nucléaire étaient « vent debout » pour soutenir cette nouvelle opportunité qui s'ouvrait à travers le problème du changement climatique.

Soyons clairs. Notre climat ne peut pas être préservé par toutes les énergies décarbonées. Il ne peut être préservé que par les énergies renouvelables ! Nous reviendrons plus tard sur le fait que cela ne peut se réaliser par le développement de l'énergie nucléaire.

Un point particulier de controverse concerne l'intermittence. La signification est que ni le rayonnement solaire ni le vent ne sont disponibles de manière continue et il en va donc de même pour le solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne qui les utilisent. Cependant un des critères à satisfaire pour un approvisionnement énergétique est sa disponibilité à tout moment, au cours de la journée et pendant l'année. En fonction de l'application, les dispositifs de stockage thermique ou électrique peuvent aider à combler cette lacune, au moins pour de courts intervalles. Comme les prévisions météorologiques deviennent toujours plus fiables, la disponibilité du PV et du vent devient toujours mieux prévisible et devient ainsi planifiable pour assurer la couverture souhaitée de l'approvisionnement. De façon plus générale, la combinaison holistique des énergies solaires dans leurs différentes formes est la solution évidente.

En réalité, l'intermittence existe pour toutes les énergies. Elle s'applique aussi aux énergies classiques pour des questions d'exploitation et de maintenance. Prenez par exemple les chiffres fournis par le Conseil Mondial de l'Energie en 2016. Le temps d'opération annuel moyen pour la bio-électricité était de 4 500 heures, pour l'hydro-électricité de 3 700 heures, pour l'électricité éolienne 2 000 heures et pour PV 1 170 heures. Le temps de fonctionnement des usines à base d'énergie fossile ou de nucléaire était loin d'être continu. Avec 4000 heures, c'était moins de la moitié de l'année.

Il y a également la comparaison entre le PV que nous allons aborder plus loin dans le détail et le solaire thermique à concentration CSP c'est à dire les "centrales solaires thermiques". Ces dernières utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil afin de produire de la chaleur qui est ensuite convertie en puissance électrique avec des turbines. Comparé au PV, le CSP présente plusieurs inconvénients. D'abord, il nécessite essentiellement de grandes unités de puissance électrique. Les "conservateurs" aiment ça parce qu'ils préfèrent les grandes usines aux « cacahouètes » que l'on obtient avec les petites usines PV décentralisées. Eh bien, aujourd'hui le PV est gagnant avec plus de 400 GW installés dans le monde et quelques 80 GW ajoutés chaque année, tandis que le CSP a seulement 4,7 GW au total en fonctionnement et pas beaucoup de nouvelles usines à l'horizon.

Un autre inconvénient est la nécessité d'un rayonnement direct qui restreint son utilisation aux "ceintures solaires". Son principal inconvénient est que le coût de l'électricité qu'il produit est le double de celui de PV. Finalement, c'est ce qui le disqualifie.

Mais jusqu'à aujourd'hui, la technologie a ses partisans qui apparaissent souvent comme un syndicat. A Paris, Greenpeace et l'IEA comptaient parmi ses partisans. Google s'est impliqué mais s'est retiré plus tard. Le CSP possède une association propre, l'European Solar Thermal Electricity Association.

Contrairement au PV, qui implique des milliers de fabricants et d'installateurs, le CSP n'en a que quelques-uns. Abengoa en Espagne était un leader mondial, salué en 2010 par Obama lui-même. Pas étonnant qu'il ait obtenu une garantie de prêt de 2,9 milliards de dollars du gouvernement américain. Il a construit 25% de toutes les usines dans le monde jusqu'à présent. Mais d'enfant chéri de l'industrie, Abengoa est tombé financièrement en 2015, a perdu 1,3 milliards de dollars, et sa valeur boursière a été réduite au dixième. Les activités commerciales sur le CSP étaient en chute libre.

L'Espagne était un pionnier dans le CSP. Entre 2010 et 2013, elle a installé 30 usines d'une capacité comprise entre 50 et 200 MW chacune. En 2017, l'Espagne avait installé 2,3 GW de CSP au total; cela n'a pas augmenté du tout depuis. En 2016, les usines CSP espagnoles ont fourni un total de 5 TWh d'électricité. Cela correspond à une production spécifique d'environ 2,1 kWh par Watt et par an comparable à la production moyenne de toutes les centrales photovoltaïques du pays. La croissance du CSP en Espagne s'est arrêtée après que le pays ait cessé tout soutien à l'énergie solaire, aussi bien pour le CSP que pour le PV.

Les autres pays qui ont investi dans le CSP sont le Maroc, l'Afrique du Sud, Abu Dhabi et l'Inde (au Rajasthan). Les usines de Noor au Maroc sont plutôt grandes. Noor I dispose de 160 MW de CSP et de 3 heures de stockage. Noor II et III devaient être achevés en 2019. Ensemble, les trois ont une capacité nominale de 500 MW et coûtent 2 milliards d'euros. Le prix de vente de l'électricité de 19 cents / kWh est garanti par le gouvernement. Il était totalement financé par des fonds publics, le KfW allemand, l'AFD française, la BEI et la Banque africaine de développement. Après Noor III est prévu "Noor Midelt" à 800 MW; il y aura également du PV à côté du CSP- une découverte tardive que le PV est la voie à suivre. Les procédures d'appel d'offres ont été lancées mi-2019.

Les technologies utilisées à ce jour dans le monde incluaient la concentration parabolique - avec 90% de toutes les centrales jusqu'à présent, les centrales électriques à tour (four solaire sur une tour entourée par des miroirs), et les lentilles de Fresnel. Outre l'Espagne, les États-Unis étaient les plus enthousiastes pour le CSP. Les États-Unis opèrent maintenant une poignée de centrales, chacune d'une capacité de plus de 250 MW, soit un total de 1,74 GW. La deuxième plus grande centrale CSP au monde est IVANPAH en Californie. Elle se compose de trois tours avec une capacité nominale de 377 MW. Elle a été construite par Bright Source et Bechtel et coûte 2,2 milliards de dollars. Elle avait une garantie de prêt de 1,6 milliard de dollars du gouvernement. Elle a ouvert en février 2014 ; plus tard cette même, l'Associated Press indiquait que la centrale produisait seulement la moitié de la production attendue.

Dans les coulisses, l'Allemagne était le grand promoteur du CSP. Des groupes à DLR, le centre nucléaire de Jülich et d'autres, en coopération avec un centre solaire à Almeria, en Espagne, ont longtemps été les pionniers. Comme l'Allemagne n'a pas le climat adéquat pour installer de telles centrales, l'idée de "DESERTEC" a émergé en 2008. Ce concept promouvait l'installation de grandes centrales CSP en Afrique du Nord et le transfert de l'électricité produite en Allemagne. C'était une idée absolument folle à plusieurs points de vue, mais elle a reçu beaucoup de soutien de la part de passionnés de l'énergie solaire en Allemagne. Le budget proposé en 2009 était un incroyable montant de 400 milliards d'euros. Dans la mouvance de DESERTEC, une société a été créée en Allemagne, Solar Millennium AG. Vingt sociétés importantes sont devenues actionnaires, dont Munich Re, Siemens, Deutsche Bank, RWE et même le Club de Rome. Avec ses connexions en Espagne, Solar Millennium a participé à la construction de nombreuses centrales CSP. Le chef-

d'œuvre était censé être une centrale CSP de 1 GW à Blythe en Californie. Finalement, la vérité l'a emporté : La valeur boursière de Solar Millennium a perdu 80% et la société s'est déclarée en faillite en 2011. L'annonce officielle était la suivante : le PV est moins cher. Le projet Blythe a été réduit et la technologie changée pour le PV.

Avec Solar Millennium, DESERTEC s'est également éteint. Personnellement, je n'étais pas mécontent de ce résultat car j'avais combattu avec Hermann Scheer en Allemagne pour arrêter cette absurdité.

Les énergies renouvelables doivent aussi gérer des oppositions venant d'un horizon où c'était plutôt un soutien sans faille qui était attendu, je veux parler des **milieux écologistes et des verts**. Autant il est souvent juste de s'opposer à la construction de nouveaux grands barrages hydroélectriques. Mais est-il juste de condamner l'énergie éolienne avec l'argument qu'elle tue les oiseaux et dégrade le paysage et les conditions de vie dans les environs? Est-ce approprié de mettre la biomasse à l'écart, alors que la bioénergie mondiale est la numéro 1 des énergies renouvelables en cours d'utilisation ? Beaucoup la diabolisent en disant qu'elle est à l'origine de la faim ou d'une déforestation illimitée. En Allemagne, la biomasse n'a pas une voix reconnue parmi les énergies renouvelables. Nous reviendrons plus tard sur toutes ces idées fausses.

À la fin, ce qui fait aujourd'hui de l'énergie solaire et de toutes les énergies renouvelables le gagnant, c'est le coût. **Les énergies renouvelables sont les moins chères de toutes les énergies en jeu.**

Il est amusant de remarquer que des "experts" calculent déjà combien il coûtera de plus pour faire assurer tout l'approvisionnement en énergie à partir des énergies renouvelables au lieu de s'attaquer aux énergies conventionnelles polluantes. Tout est faux. Non seulement les énergies renouvelables rendront notre monde plus propre et plus agréable à vivre, mais elles rendront les énergies moins chères et plus abordables.

### 2.2.2 La Brute

Le charbon est la ressource dominante pour la production d'électricité. C'est le plus polluant et il accroît les émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. À son utilisation mondiale maximale, 7,65 milliards de tonnes ont été brûlées en un an, en 2017. Au cours des dernières années, la demande mondiale a été relativement stable. Le charbon est de fait le principal contributeur aux quantités gigantesques d'émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, avec 32,5 milliards de tonnes générées en 2017.

De la demande totale de charbon à 7,65 milliards de tonnes, 70%, c'est à dire 5,41 milliards de tonnes, a servi pour la production d'électricité en 2017, légèrement moins qu'en 2014, pour le dernier pic d'utilisation. Plus loin dans ce livre, nous nous concentrerons sur cette partie de la consommation. Le reste de la consommation mondiale de charbon va à la fabrication de l'acier et à d'autres utilisations industrielles et domestiques telles que la génération de vapeur ou le chauffage.

Le coût réel de l'électricité à partir du charbon devrait tenir compte de façon effective du coût des émissions de CO<sub>2</sub> ce qui n'est pas le cas sur les marchés financiers. Il devrait y avoir une taxe sur le CO<sub>2</sub>, mais il n'y en a pas. Au lieu de cela, le CO<sub>2</sub> est tarifé sur les marchés de l'émission. Le prix fixé par l'Union Européenne est maintenant à 6 € par tonne. En réalité, on considère qu'il devrait plutôt se situer entre 40 et 80 dollars par tonne pour compenser les dommages causés et garder à distance le changement climatique. À la réunion des chefs d'État du G20 en 2017 à Hambourg, un prix minimum de 190 dollars par tonne a même été exigé. La Chine, le plus grand pollueur de la planète, a mis en place en 2017 un système d'échange national du carbone pour lutter contre les émissions. C'est le plus grand du monde.

En fait, non seulement la mise en place d'un prix équitable de l'électricité à partir du charbon n'est pas appliquée, mais il est toujours largement subventionné. Ainsi dans le cadre des aides aux énergies fossiles, il bénéficie des 444 milliards de dollars de subventions attribuées chaque année au sein des pays du G20.

### 2.2.3 Le Truand

L'énergie nucléaire est l'objet de beaucoup d'inquiétudes. La plupart des 441 centrales nucléaires connectées au réseau électrique ont dépassé la moitié de leur vie. L'heure des démantèlements se rapproche. Il s'agit d'une hypothèque financière et environnementale gigantesque. Cela coûte aussi cher de démanteler une centrale que de la construire et il reste une montagne de déchets nucléaires à éliminer. Les coûts peuvent également être beaucoup plus élevés en cas d'accident: le démantèlement de la centrale de Fukushima est ainsi estimé à 90 milliards d'euros et durera 40 ans. Qui va payer pour cela? Le contribuable. Les centrales nucléaires ne sont pas assurées. Les dégâts sont imprévisibles et peuvent être gigantesques, aucune compagnie d'assurance ne prend ce risque.

En octobre 2017, Greenpeace a remis au gouvernement français un rapport détaillé sur le risque d'attaque terroriste du parc nucléaire du pays. La conclusion était que les risques sont élevés. Il est urgent de renforcer les piscines de refroidissement et d'accroître la sécurité des 58 centrales en activité. Cela coûterait de 140 à 222 milliards d'euros, trois à cinq fois ce que l'opérateur EDF a prévu.

La construction de nouvelles centrales nucléaires s'avère également être un cauchemar.

Depuis 2004 EDF poursuit la promotion d'une nouvelle génération de centrales atomiques, les EPR. Le premier dont la construction a été lancée est un EPR de 1.6 GW avec TVO en Finlande. En 2019, après plus de 10 ans de retard et des dépassements de budgets conséquents, la mise en service a de nouveau été reportée à 2021. Scénario similaire pour Flamanville en Normandie où EDF construit chez elle un EPR d'un peu moins de 1.6 GW pour un coût supérieur à 12 milliards d'€. Après plus de 10 ans de retards sa mise en service pourrait intervenir au plus tôt fin 2022. C'est donc raté comme démonstration concluante des perspectives d'une nouvelle génération de centrales atomiques devant prendre la relève de toutes celles en place actuellement.

Témoin d'un tel "succès", le Royaume-Uni n'a pas voulu rester sur la touche et a décidé d'autoriser les Français à construire deux nouveaux réacteurs de conception française dans leur pays à Hinkley Point. Les 3,2 GW prévus coûteraient 24 milliards d'euros. Le constructeur en est EDF, qui porte une dette de 37,4 milliards d'euros. Cela ne donne pas beaucoup d'assurance sur la faisabilité du projet, même si le gouvernement français donne sa garantie. Le directeur des finances d'EDF n'a rien trouvé de bon dans l'affaire et a démissionné.



**Figure 2.1 La centrale nucléaire du Tricastin en France (photo de l'auteur).**

Le Royaume-Uni garantit à EDF et au partenaire Chinois CGN un prix de vente de 10,5 cents / kWh pour 35 ans. Très impressionnant. Pourtant, le prix de gros actuel de l'électricité au Royaume-Uni est de 3,5 cents / kWh et le prix du kWh pour l'électricité éolienne est déjà inférieur à celui de ce que le nucléaire propose.

En tout et pour tout dans le monde ont été mises en service en l'an 2019, six nouvelles centrales atomiques d'une puissance totale de 5.2 GW, 3 centrales en Russie, 2 en Chine et une en Corée du Sud. En 2018 on avait encore mis en service 9 réacteurs. En même temps en 2019 13 réacteurs à 10.3 GW ont été définitivement arrêtés. Seulement un nouveau a été mis en chantier en 2019. Et il ne faut pas compter sur la Chine pour spéculer sur un renouveau du nucléaire dans le monde comme c'est fait souvent : depuis 2016, la Chine n'a mis en chantier qu'un seul réacteur. CONTRADICTION

## **2.3 Pollution et changement climatique**

### **2.3.1 Pollution**

#### **2.3.1.1 Les dangers de la pollution**

Selon certaines estimations, 19% des terres arables de la planète sont contaminées par des métaux lourds et d'autres polluants. Plus de la moitié de toutes les eaux souterraines sont polluées par des substances qui sont dangereuses pour la santé de l'homme.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) affirme que 92% de la population mondiale vit dans des endroits où la qualité de l'air est mauvaise. Elle attribue 3 millions de morts par an à l'exposition à la pollution de l'air extérieur. En Europe, la Commission européenne estime le nombre de décès prématurés en raison de la pollution à 400 000 par an. En 2017, elle a mis en place des limites supérieures d'émissions provenant des centrales électriques au lignite. L'Allemagne n'était pas contente et considérait que le réaménagement des centrales est trop coûteux. Euracoal, le groupe de pression Européen de l'industrie du charbon, s'est plaint que d'ici 2021, après la date limite de mise en conformité, 4 centrales au charbon sur 5 en Europe ne

répondraient pas aux nouvelles normes. Des milliards d'euros d'investissements sont nécessaires, ou certaines centrales devront être fermées. Excellente nouvelle!

En Chine et en Inde, la poussière, la brume et le smog affectent même la visibilité, notamment dans les grandes villes. La consommation de charbon est un contributeur principal à cette catastrophe. C'est pourquoi la Chine, qui dépend fortement du charbon, a mis en place une politique vigoureuse pour en changer. Cela a conduit au leadership chinois sur les énergies renouvelables propres qui sont massivement déployées aujourd'hui dans le pays.

Dans presque toutes les grandes villes d'Allemagne, les oxydes d'azote NO<sub>x</sub> et les particules émis dans l'atmosphère dépassent le double des limites admises. Une association de scientifiques aux Etats Unis, l'« Union of Concerned Scientists », a analysé la pollution rejetée par les centrales au charbon du pays et le smog résultant, les pluies acides et les éléments toxiques dans l'air. La plupart des centrales américaines n'ont pas installé de contrôle de la pollution liés aux gaz de combustion qu'elles émettent. En plus de tout le CO<sub>2</sub> rejeté dans l'air, une centrale à charbon typique de 600 MW émet des milliers de tonnes de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> par an, et le pays en compte environ 600 de ce type. Elles émettent également de la suie, des cendres volantes, du plomb, du cadmium, du mercure, du monoxyde de carbone (CO) toxique, et même des traces de plutonium. Le plus dangereux d'entre eux est le mercure, dont 80 kg sont émis par usine chaque année, alors que seulement 9% des centrales au charbon des États-Unis ont des dispositifs installés pour limiter son émission.

Dans le Sud-Est de l'Europe, en Serbie et certains de ses voisins, pays qui ne font pas partie de l'Union Européenne, les capitales se placent parmi les 10 villes les plus polluées du monde. La pollution gigantesque suite à une combustion excessive de charbon sale fait que 16 centrales électriques de la région émettent autant de SO<sub>2</sub> que les 250 autres dans les Pays-Membres de l'UE.

L'espérance de vie n'a plus augmenté récemment en Europe et a même diminué aux États-Unis trois années de suite. Est-ce le résultat de la pollution des sols, de l'air et de l'eau?

### **Chapitre 2.3.1.2 Politiques de lutte contre la pollution**

En 1999 a été créée et adoptée par la CEE-ONU, la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe, qui comprend, outre l'Europe occidentale, l'Amérique du Nord, la Russie, la Turquie, etc., le «**Protocole de Göteborg**». Son but était de réduire l'acidification, l'eutrophisation (excès de fertilisation), l'ozone troposphérique. Des résultats importants ont été obtenus: l'acidification a été réduite de moitié dans tous les États membres de la CEE entre 1950 et 2010 et l'eutrophisation de 30%. En ce qui concerne les polluants atmosphériques, des réductions significatives ont également été réalisées en 2010: 82% moins de SO<sub>2</sub>, composés organiques volatils moins 56%, NO<sub>x</sub> -47%, NH<sub>3</sub> -28%. Le protocole a été modifié en 2012 pour inclure le carbone noir et les matières de particules fines.

L'UE a mis en place une directive sur les plafonds d'émission depuis 2001. Elle reste applicable jusqu'en 2019. Les émissions de NO<sub>x</sub>, de SO<sub>2</sub>, etc. sont restées chaque année inférieures à leurs plafonds depuis 2010. Pour la période postérieure à 2019, l'UE a adopté en 2016 une directive de suivi concernant les pollutions nocives dans l'industrie, l'agriculture, les transports... Les pays membres de l'UE doivent les traduire dans leur législation nationale, les plafonds d'émission nationaux. Ces CEN devaient être communiqués à la Commission au début de 2019, mais la plupart des pays tardaient à le faire.

### **2.3.1.3 Pollution par les déchets nucléaires**

Concernant le plutonium, il n'est pas anecdotique de rappeler que plusieurs tonnes de cet élément radioactif sont encore présentes dans l'air à cause des essais d'armes nucléaires dans les années 1950 et 1960. La pollution provenant du business de l'énergie nucléaire est également trop souvent balayée sous le tapis. Quand en France des effluents d'américium et de plutonium sont découverts en mer près de l'usine de traitement nucléaire de La Hague, le commentaire typique est que ce n'est pas dangereux pour la santé. Areva n'a été officiellement condamnée en justice qu'une seule fois en France pour pollution. C'était à l'occasion d'importantes fuites d'uranium à l'usine de Tricastin en 2008.

Lorsque l'industrie nucléaire ne savait pas quoi faire de tous les déchets qu'elle produisait dans le monde, elle n'a pas hésité à aller les déverser en mer. Cela a commencé dès 1946 et 13 pays y ont participé, notamment les États-Unis, l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Russie et le Japon. Plus de 150 000 conteneurs en acier ont été éliminés dans les mers du monde entier et en attendant, les fûts fuient. Le Wall Street Journal, qui n'est pas la voix de Greenpeace, a signalé que les fonds marins à 50 miles de San Francisco ont été pollués avec du plutonium en quantité 1000 fois supérieure à la normale. Ce n'est qu'en 1993 que le déversement de déchets radioactifs dans la mer a été officiellement arrêté par le traité de Londres, toujours en vigueur aujourd'hui en 2018. Pourtant le Japon est déjà dans les starting blocks pour déverser des quantités de déchets jamais atteintes précédemment : 920 000 tonnes de déchets de Fukushima sont destinés à être jetés en mer. Vous aimez le poisson ? Profitez-en.

Les effluents émis par les centrales nucléaires en fonctionnement sont responsables de leucémies et de cancers de la thyroïde. L'industrie nucléaire et ses partisans ont largement pu tenir l'opinion publique à distance à ce sujet sur le mode "Circulez, il n'y a rien à voir". De nombreuses études impliquant la profession médicale ont clairement montré que tout le monde peut être concerné, il n'y a pas de dose de rayonnement reçue sans risque. Les jeunes enfants et les femmes enceintes sont les premiers à risquer de contracter la leucémie. C'est un petit risque, mais un vrai risque.

## **2.3.2 Le changement climatique**

### **2.3.2.1 Un rappel historique**

La prise de conscience des dangers du changement climatique a commencé, notamment en 1987, par le rapport par Gro Harlem Brundtland intitulé : "Notre Avenir Commun, d'une seule Terre à un seul Monde, un Appel pour Action". Le rapport est issu de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, sous l'égide de l'Assemblée Générale des Nations Unies.

Il s'en est suivi le désormais fameux « Sommet de la Terre » organisé sous l'égide de L'ONU en 1992 à Rio de Janeiro, où 172 gouvernements ont été représentés. La conférence a convenu d'une Convention sur le changement climatique qui a ensuite abouti "au Protocole de Kyoto". Le développement de sources d'énergie alternatives pour remplacer la production d'énergie fossile a été proposé comme réponse. Le Protocole de Kyoto a ainsi été ratifié en 1997. L'obligation d'objectifs chiffrés pour limiter les émissions de gaz à effet de serre a été actée, cependant aucun mécanisme pour en contrôler la mise en œuvre n'a été construit.

Après Rio, les Conférences des Partis (COP) des pays membres de L'ONU ont été mise en place. La première, COP 1, s'est tenue en 1995 à Bonn, suivie depuis par une conférence chaque année. La COP 21 a été organisée à Paris en décembre 2015 et la COP 23 est revenue à Bonn en 2017. La réunion de Paris fut une grande mobilisation mondiale à laquelle tous les chefs d'État importants du monde ont assisté. Un traité a été accepté et signé par les pays participants. Les États-Unis l'ont également signée mais en sont sortis après l'élection de leur nouveau Président, Donald Trump. La plupart des états l'ont aussi ratifiée depuis au niveau législatif de leur pays. Toutefois, le traité s'abstient de mentionner l'énergie produite par le charbon comme

mauvaise, une tueuse du climat - Il ne mentionne pas l'énergie solaire, ni même les énergies renouvelables d'ailleurs – afin de garder à bord les pays connus pour leurs sympathies envers les énergies fossiles.

En 2017, 13 agences fédérales américaines, conduites par l'Académie des Sciences américaine, ont présenté un rapport soutenant fortement le débat sur le changement climatique. Avec l'argument majeur "La température a considérablement augmenté aux États-Unis depuis 1880", elles insistent sur le fait que des milliers d'études conduites par des dizaines de milliers de scientifiques internationaux en sont venues à la même conclusion : la température mondiale moyenne de l'atmosphère a augmenté de 0.9°C depuis 1880. Entre 1951 et 2010, la contribution humaine à l'augmentation de température était de 0.65°C. Ces agences prédisent que même avec de faibles émissions de gaz à effet de serre, les températures aux États-Unis augmenteraient de 2.8°C et , avec des émissions plus élevées, de 4.8°C. Ce rapport a constitué la Quatrième Évaluation Climatique Nationale. Il a ensuite été diffusé à la presse au cours de l'été 2017 en attente de son approbation par la Maison Blanche. En dépit du fait que le Président ait précédemment décidé de sortir de "l'accord de Paris", la Maison Blanche a finalement approuvé, sans modifications sa publication.

Ce qui a particulièrement mobilisé les acteurs impliqués dans le domaine de l'énergie fut la demande de limitation de l'augmentation de température à long terme à moins de 2°C, même si cette cible paraît trop ambitieuse pour certains experts. Elle n'est pas non plus contraignante. Le combat contre le changement climatique est aussi devenu un mouvement populaire renforcé par l'accord de Paris. Lorsque Washington a abandonné le traité pour les raisons de coût, la Californie a pris le relais et s'est portée en figure de proue aux États-Unis. Les plus grandes entreprises aux États-Unis et au niveau mondial ont signé des déclarations de soutien. Cette démarche a conduit à la création d'une alliance nommée « We Mean Business Coalition » ou « la coalition des acteurs majeurs » adhère à l'objectif de substituer toutes les énergies fossiles par des énergies renouvelables avant 2050. Cette alliance regroupe 490 entreprises pesant 8 100 milliard de dollars et 183 fonds d'investissement pesant autour de 20 000 milliards de dollars. Les grandes villes du monde ont également déclaré leur soutien et le « Mouvement sous les 2°C », « Under2 MOU » en anglais, initié en 2015 par la Californie et le Baden-Württemberg en Allemagne, regroupe aujourd'hui 165 provinces dans 33 pays.

Le processus complet initié par l'ONU est scientifiquement accompagné par le Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) en français. Il a quantifié les augmentations de températures pour chaque type d'émission. Cet organisme a été créé en 1988 par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (UNEP) et l'Organisation Météorologique Mondiale (WMO) et approuvé par l'Assemblée Générale de l'ONU. Très communicatif avec les médias durant les premières années de son existence, il est plus discret aujourd'hui.

Cette fois enfin, l'énergie solaire et les énergies renouvelables ont suscité l'attention particulière qu'elles méritent dans ce débat sur le changement climatique. Cela s'est produit en 2002 lors du "Sommet Mondial sur le Développement durable" à Johannesburg en Afrique du Sud. Le Chancelier Allemand, Gerhard Schröder a alors annoncé l'initiative d'une conférence mondiale spécialisée sur l'énergie solaire. En fait, il le fit car son camarade de parti, Hermann Scheer, a pu glisser dans le texte de son discours une invitation à une grande Conférence en Allemagne. En effet, cela fut concrétisé en 2004 à Bonn, la capitale allemande de l'époque, par la tenue de la première conférence Mondiale Internationale des Energies Renouvelables (WIREC). Ce fut une grande manifestation festive, avec 3 000 délégués venus de 154 pays différents. La Déclaration finale de la Conférence appelait à ce que les énergies renouvelables jouent un rôle majeur dans l'économie du 21<sup>ème</sup> siècle. Rien que cela. Et c'est bien ce qui s'est produit comme nous le montrons dans ce livre.

D'autres réunions WIREC ont suivi. La conférence de 2005 s'est tenue à Pékin dans le Grand Palais du Peuple. La grande conférence de 2008 s'est déroulée à Washington DC. Elle a eu lieu à l'invitation du Département d'État, tandis que la plupart des autres départements de l'administration américaine étaient également

présents. Le Président des Etats Unis, Georges W. Bush, y a tenu un discours. La devise de la conférence était « l'indépendance énergétique grâce aux énergies renouvelables ». L'organisateur général était le Conseil américain sur les Énergies renouvelables (ACORE) et elle était présidée par mon ami Michael Eckhart.

Maintenant que la poussière est un peu retombée, nous pouvons revenir aux principes de base. Quelle est la dangerosité du changement climatique ? Incontestablement le climat est de plus en plus imprévisible avec des pluies torrentielles, de fortes vagues de chaleur exceptionnelle et de grandes sécheresses. Mais le niveau des mers n'a pas encore augmenté de plus de 20 cm depuis que l'industrialisation a débuté. En 2016 le niveau de la mer s'est simplement élevé de 3 mm et la moitié de cette amplitude est provoqué par le réchauffement de l'eau, qui se dilate, alors que l'autre moitié est due à la fonte des glaces du Groenland et de l'Antarctique. Pas de quoi s'alarmer encore.

En 2004, le film « Après-demain » imaginait que le changement climatique pourrait conduire à l'arrêt du Gulf Stream, ce courant marin qui nous réchauffe si bien en Europe. Ce serait en effet une catastrophe terrible. Mais, jusqu'à présent, les modèles montrent que son mouvement resterait stable.

Une autre préoccupation des conséquences possibles de l'accélération du changement climatique concerne la toundra en Sibérie et le permafrost plus généralement. Aujourd'hui un quart du bloc continental au nord de l'équateur est gelé en permanence. À ce jour la température a augmenté d'environ 2 à 3°C dans ces régions et il est prévu qu'avant 2080 la zone gelée pourrait être réduite d'un tiers. Le méthane à effet de serre et le CO<sub>2</sub> piégés par la glace pourraient alors être libérés et accélérer encore le changement climatique. Jusqu'à maintenant ce n'est pas le cas.

Voici d'autres bonnes nouvelles. L'accord en 2016 sur le « Protocole de Montréal » modifié pour protéger la couche d'ozone stratosphérique en éliminant progressivement les HFC (hydrofluorocarbures) dans l'industrie est aussi favorable pour le climat. En effet l'effet de serre associé à ces HFC est 14 000 fois plus fort que celui du CO<sub>2</sub>. Et le changement climatique pourrait aussi avoir ses « bons côtés ». Des simulations semblent avoir montré que la région du Sahel, qui couvre une immense étendue de terre en Afrique où la vie est hostile à cause d'une sécheresse très grande, pourrait maintenant profiter de plus de précipitations qui pourraient doubler ou même tripler. Et la réalité suit la modélisation : durant l'été 2017, le Niger, un des pays les plus secs du monde, a dû se battre contre de gigantesques inondations provoquées par la pluie.

Une autre observation modère les conséquences des émissions gazeuses sur le changement climatique : Pour la période de 15 ans, entre 1998 et 2012, même si les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté d'un tiers, l'amplitude du réchauffement n'a pas suivi autant. Heureusement.

Indépendamment des modèles de simulation, les émissions de gaz à effet de serre pourraient tout simplement ne pas augmenter du fait qu'une politique énergétique priorisant l'énergie solaire pourrait donner des résultats plus tôt que prévu initialement. Il faut savoir que grâce au processus de sortie du charbon par la Chine, les émissions de CO<sub>2</sub> mondiales ont cessé d'augmenter depuis 2013 déjà.

### **2.3.2.2 Émissions de CO<sub>2</sub> et de GES en 2018, le rôle du charbon**

La NOAA, l'agence américaine, a signalé pour le mois d'avril 2019 une concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère de 413,32 ppm, soit 3,12 ppm de plus qu'il y a un an. Il y a 10 ans, il s'élevait à 390 ppm. Au cours des dernières années, la croissance du CO<sub>2</sub> s'est accélérée; en 2018, elle était supérieure à celle de 2017 mais inférieure à celles de 2015 et 2017. Les mesures sont prises à Hawaï à 3 200 m d'altitude pour exclure les interférences locales. La NOAA est une autorité sur la question, c'était la première - il y a longtemps - de prouver par des mesures que nous avons un changement climatique.

En novembre 2018, la NOAA a publié, en coopération avec 300 scientifiques, « l'évaluation nationale du climat » aux États-Unis. Le rapport affirme que depuis 2015, le changement climatique a été à l'origine de 400 milliards de dollars de dommages sous la forme de décès supplémentaires, d'une baisse de productivité due à une chaleur excessive et de destructions côtières.

Les gaz à effet de serre GES sont mesurés en équivalents de CO<sub>2</sub>: ils représentent aujourd'hui pour 73% du CO<sub>2</sub> dans le monde et pour le reste principalement du méthane. En 2018, 51,7 Gt de GES ont été émis dans le monde. Le CO<sub>2</sub> avait une part de 33 Gt dont 10 Gt de CO<sub>2</sub> provenant de la combustion du charbon. En 2015 et 2016 les émissions mondiales sont restées stables ; un an plus tard, elles ont augmenté d'environ 1% en Chine, premier émetteur du monde, et dans l'UE. En 2018, les émissions avaient globalement augmenté de 55% depuis 1990 ou 40% depuis 2000.

Pour 2018, les reportages ont fait l'objet de nombreuses fausses nouvelles. Les nouvelles annonces concernant l'augmentation catastrophique des émissions de CO<sub>2</sub> cette année-là ont été systématiquement exagérées. CICERO, le Centre de recherche sur le climat international à Oslo, en est un exemple. Au début, ils sont venus avec des valeurs très élevées qu'ils devaient ensuite diminuer en raison de nouvelles preuves.

L'AIE est arrivée en mars 2019 avec des chiffres plus réalistes: une augmentation globale de 1,7% des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à 2017. Celles-ci ont ensuite été copiées dans de nombreuses autres communications sur le sujet. En 2018, l'UE avait émis 2,5% moins d'émissions par rapport à 2017. Ces chiffres ont été consolidés par Eurostat et publiés en mai 2019.

En 2019, l'UE a encore réduit les émissions de CO<sub>2</sub> dans ses centrales électriques de 12% par rapport à l'année précédente. Ceci a été possible grâce à une réduction de 24% de la consommation de charbon dans ses centrales cette seule année. La réduction a été la plus marquée en Allemagne et en Pologne. Le moindre rôle du charbon a été compensé par une accélération de la consommation de l'énergie éolienne (+14%), du PV (+7%) et du gaz (+12%).

Le cas de l'Allemagne, premier émetteur de l'UE, est exemplaire. Selon les chiffres officiels d'Eurostat, elle a émis en 2018 5,4% de CO<sub>2</sub> en moins par rapport à l'année précédente et, depuis 1990, 30,6% de moins alors que le taux mondial a augmenté de 55% comme rapporté précédemment. Et au premier semestre 2019 l'Allemagne a rajouté une couche, ses émissions de CO<sub>2</sub> ayant encore diminuées de 15% par rapport au premier semestre 2018. Pas mal, même si elle peut rater, qui sait, l'objectif de réduction de -55% par rapport à 1990 d'ici 2030.

En 2019 la décarbonation de la production électrique de l'Allemagne – premier producteur européen – s'est encore considérablement accélérée : moins 16% d'émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à l'année précédente; et moins 44% depuis 1990. La consommation du charbon dans la production électrique a en effet baissé de 25% en 2019. En Allemagne l'éolien a pris cette année-là la première place parmi les sources d'électricité avant la lignite, la houille et le gaz.

Si la consommation de charbon s'est tellement réduite, c'est aux Certificats d'émission de CO<sub>2</sub> qui l'ont accompagnée. Les centrales à lignite ont dû acheter en 2019 des certificats au prix moyen de 24€/tonne CO<sub>2</sub>. L'Etat les vend aux enchères et y a fait un gain de 3.16 milliards d'€ cette année. En 2018 ces Certificats s'étaient encore vendus à 15€/tonne CO<sub>2</sub> et la consommation de charbon était restée encore favorable. Au chapitre suivant sont données les raisons des changements de prix des Certificats en fonction du prix du gaz sur les marchés.

La Chine a publié un communiqué statistique en février 2019 annonçant une croissance des émissions de CO<sub>2</sub> de 2,3% pour 2018. Cela va à l'encontre des tendances des années précédentes. 70% des émissions en Chine

sont liées à l'énergie: le charbon représente toujours 59% de la production d'énergie. Il a augmenté en 2018 en raison de la forte demande et de la hausse de la production d'acier. Vers la fin de l'année, on dit que la croissance a ralenti.

Les États-Unis avaient également des émissions plus élevées en 2018. Ils avaient des émissions de GES plus élevées de 3,4%, soit la plus forte augmentation en 8 ans. Ils avaient déjà des émissions plus élevées en 2017 lorsque les émissions des transports ont dépassé pour la première fois celles du secteur de l'énergie. Les émissions du secteur de l'énergie ont également augmenté en 2018, mais ce n'est pas la faute du charbon. Les États-Unis ont considérablement réduit leur capacité de production de charbon en 2018 de 16 GW; la consommation de charbon était la plus basse en 39 ans.

### **2.3.2.3 Politiques de lutte contre les émissions de GES: quotas de carbone et taxes sur le CO<sub>2</sub>**

Les autorités de l'UE émettent des quotas de dioxyde de carbone, c'est-à-dire le droit d'émettre du CO<sub>2</sub> ou des polluants équivalents de CO<sub>2</sub>. Nous sommes maintenant dans la période d'allocation allant de 2013 à 2020. À l'origine, les allocations étaient gratuites, mais à l'heure actuelle, elles sont principalement attribuées par le biais d'enchères. Les pollueurs peuvent acheter des quotas d'émission. Il y a un marché libre pour eux. En fait, ils faisaient globalement le produit le plus performant sur les marchés en 2018. En avril 2019, ils ont atteint un nouveau sommet de 26,89 € la tonne, le plus haut niveau en 10 ans.

Les exploitants de centrales doivent notamment acheter des quotas de carbone pour compenser chaque tonne de CO<sub>2</sub> produite. Une centrale à gaz à cycle combiné en émet moins de la moitié de la quantité produite par une centrale au charbon. Le prix à la production plus élevé en kWh des centrales à gaz par rapport à celui des centrales à charbon est partiellement compensé par l'augmentation des quotas de carbone que les exploitants des centrales à charbon doivent acheter. Sur le marché libre de l'électricité, les producteurs d'électricité tendent à utiliser davantage de charbon lorsque le prix du gaz augmente. Cela entraîne le prix des quotas de carbone. C'est ce qui s'est passé début 2019.

Dans l'état actuel des choses, un prix du carbone inférieur à 30 € la tonne n'est pas encore suffisamment élevé pour marginaliser le charbon dans une large mesure. Le prix du carbone augmenterait-il davantage pour atteindre 40 € l'avantage du gaz naturel pourrait s'améliorer considérablement. Et plus encore l'avantage du PV, du vent et des autres sources d'électricité renouvelables qui ne dégagent aucun CO<sub>2</sub>.

En 2019, la discussion se poursuit sur l'opportunité d'imposer une taxe gouvernementale sur le CO<sub>2</sub> à tous les émetteurs de GES, et pas seulement aux exploitants de centrales. Certains pays en ont déjà une. La Suède a la plus haute avec 115 € la tonne. Les démocrates américains sont également en faveur. La France en a une, mais en Allemagne, il n'est pas encore passé.

### **2.3.2.4 Regarder vers l'avenir**

Le GIEC a publié ses conclusions en octobre 2018. Pour atteindre l'objectif de 1,5° C fixé dans l'Accord de Paris, les émissions de GES devraient disparaître d'ici 12 ans, a-t-il déclaré. Pas très réaliste, vous pouvez penser. Mais même dans ce cas, l'objectif de 1,5° C serait atteint dans 25 ans. À 1,5° C, la mer Arctique serait libre de glace chaque mois de septembre. Le GIEC recommande le reboisement, les plantations et la biomasse pour lutter contre le changement climatique. Nous-mêmes, mes amis et moi-même, recommandons 100% d'énergie renouvelable.

Un « Règlement du partage de l'effort » de mai 2018 a été adopté par l'UE. Il fixe un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40% en Europe d'ici 2030 par rapport à 1990. Il s'ajoute au « Cadre

climat et énergie UE 2030» avec l'objectif d'une part d'un marché des énergies renouvelables de +20% d'ici 2020 et +32% en 2030. Les États membres de l'UE doivent adopter des plans nationaux sur le climat et l'énergie pour la période 2021-2030 d'ici à fin 2019.

Et l'avenir du charbon? Les États-Unis sont décidés à réduire davantage son rôle dans le secteur de l'électricité, parallèlement à une réduction de l'énergie nucléaire. Le Royaume-Uni a décidé de s'abstenir complètement d'utiliser le charbon comme source d'énergie d'ici à 2025. En Allemagne, le gouvernement fédéral a finalement mis en place une «commission du charbon» qui a présenté sa recommandation en janvier 2019: moins de 12,5 GW d'énergie à base de charbon, à savoir du lignite, déjà d'ici 2022 et pas d'électricité issu du charbon après 2038.

## **2.4 Comment l'Industrialisation a marginalisé l'Énergie Solaire**

### **2.4.1 Les Énergies renouvelables traditionnelles**

Avant que l'industrialisation ne débute au 19<sup>ème</sup> siècle, le monde a utilisé presque exclusivement l'énergie solaire sous différentes formes. La combustion de bois ou le pouvoir du muscle, "le Cheval-Vapeur", étaient les principales sources d'énergies. Jusqu'au début du 20<sup>ème</sup> siècle, les grandes villes comme Paris étaient encombrées de chevaux pour le transport avec pour conséquence une pollution très importante. Le vent et des roues à eau ont été utilisés pour le pompage de l'eau et le broyage des grains pour la farine. Ces moulins étaient populaires partout en Europe, aux États-Unis et en Chine. Six millions de pompes à eau mues par des éoliennes étaient installées aux États-Unis dans les années 1880 et des milliers d'entre elles, les moulins à vent, ont assuré le pompage des polders au Danemark et la meunerie. L'énergie éolienne assurait aussi le transport maritime car la plupart des bateaux naviguaient à la voile.

Même les premières machines à vapeur fonctionnaient avec du bois et les premiers moteurs thermiques avec l'alcool de distillation que l'on devait se procurer en pharmacie. Mais cela a été de courte durée, le premier combustible à faire des percées massives dans les marchés énergétiques mondiaux fut le charbon.

Les formes modernes d'énergie solaire comme nous les utilisons aujourd'hui étaient déjà bien connues, mais trop sophistiquées à mettre en œuvre pour l'époque. Le PV solaire était réputé comme un sujet de laboratoire et Werner Von Siemens (1816-1892), un des pères de l'industrialisation en Allemagne en a bien estimé son potentiel naissant. Et comme le charbon avait déjà été reconnu comme un pollueur mondial, Augustin Mouchot (1825-1911) a démarré dans les années 1860 ses activités avec l'objectif de remplacer cette source d'énergie par l'énergie solaire thermique. Il peut être considéré comme le père du solaire à concentration (CSP). Dès 1866, il avait pu présenter à l'empereur Napoléon III un moteur produisant un mouvement mécanique grâce à la vapeur produite par la concentration de l'énergie avec des miroirs- notons que l'électricité comme vecteur d'énergie motrice n'a été utilisée seulement en 1882. À l'exposition Universelle de 1878 à Paris, sa machine d'impression solaire utilisant un grand miroir sphérique, rencontra un très grand succès.

Les premières éoliennes produisant l'électricité ont été inventées aux États-Unis et au Danemark à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle mais leur développement a été plus long. Nous y reviendrons plus loin.

### **2.4.2 La voie royale du charbon**

Le charbon, utilisé pour la fabrication du fer et de l'acier, pour la génération de vapeur et sa transformation en puissance mécanique dans les nouvelles industries et les locomotives des chemins de fer, bénéficia d'un effet d'accélération autrement plus rapide. A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, la consommation mondiale de charbon était passée de négligeable à 500 millions de tonnes par an. Le charbon constitua ainsi le premier des combustibles fossiles qui décolla. Dans la nouvelle économie associée à la production d'électricité apparue la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le charbon avait trouvé une nouvelle utilisation de choix, pour alimenter toutes les nouvelles centrales électriques. Il fallut encore 40 ans pour que l'utilisation de charbon double, atteignant 1 milliard de tonne par an en 1940. Quarante ans plus tard, en 1980, sa consommation avait alors plus que triplé à 3,7 milliards de tonnes par an. Finalement en 2000, avec 5.4 milliards de tonnes, elle représente plus de dix fois plus qu'en 1900. En parallèle, le pétrole et gaz naturel ont massivement conquis les marchés mondiaux, et de fait le charbon ne représentait pas plus d'un tiers du total des énergies fossiles consommées en 2000. Curieusement, cette année là, les énergies solaires modernes, photovoltaïque et éolienne ont à peine représenté 0,3 millièmes de toute l'énergie mondiale consommée.

Depuis 2000, la consommation mondiale de charbon a de nouveau augmenté de plus de 50 %. En réalité, cette augmentation est principalement due à la Chine. La Chine, qui présentait un retard de croissance économique, s'est massivement industrialisée. De 2000 à 2013, la Chine a ainsi pratiquement triplé sa consommation de charbon.

Toutefois, dans le reste du monde, la consommation de charbon était stable ou a plutôt diminué depuis le début de ce siècle. Ainsi depuis 2000, la consommation de charbon a diminué de 10 % en Europe, chutant même de 20 % aux États-Unis. Notons que 40 % de l'électricité en 2016 a été produite à partir du charbon.

En Allemagne, sa consommation a cependant légèrement augmenté et de fait les émissions de CO<sub>2</sub> de l'Allemagne n'ont pas diminué non plus. En 2017, l'Allemagne produisait toujours 40 % de son électricité avec de la houille importée et de la lignite extraite des mines à ciel ouvert situées sur son territoire. Cela entraîne l'émission annuelle de 900 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'air. L'Inde a augmenté de 6 % par an sa consommation de charbon lors de la dernière décennie, c'est-à-dire a doublé entre 2000 et 2013. Cependant sa consommation n'est pas au même niveau que la Chine, qui est 10 fois plus élevée.

En 2013, la moitié de la consommation mondiale de charbon a été faite en Chine; l'Europe ne représente à peine plus de 10 % du total mondial - dont 20% viennent de l'Allemagne- et les États-Unis représente 10 % également. La consommation de charbon de l'Inde atteint à ce jour celle des États-Unis et de l'Europe.

Le boom de la consommation de charbon est terminé, aussi bien en Chine qu'en Inde. Dans leur rapport « croissance et récession » de 2017, le Sierra Club et Greenpeace ont annoncé une baisse de 50 % dans la production prévue d'énergie par le charbon à l'échelle mondiale et une chute de 62 % de mise en construction de nouvelles centrales. Le gouvernement de la Chine met en attente 300 GW de nouvelles centrales électriques au charbon prévues, dont 55 GW déjà en construction. En 2016, 65 % de l'électricité en Chine ont été produits avec du charbon, soit 11 % de moins qu'en 2010. Ainsi, depuis 2010, le temps d'utilisation des centrales électriques au charbon chinoises a chuté de 20 %. Au final, la consommation de charbon en Chine a baissé de 4,7 % en 2016 en rapport de l'année précédente. Comme indiqué plus tôt les émissions de CO<sub>2</sub> sont stabilisées en Chine depuis 2013.

En 2016, les États-Unis ont produit 30 % de leur électricité avec du charbon, chiffre à comparer à celui de 1988 qui était de 57 %. Les émissions de CO<sub>2</sub> concernant le charbon américain sont donc descendues en 2016 presque à la moitié de leur maximum en 2008. Deux entreprises majeures de charbon dans le pays sont en faillite : Peabody et Arch Coal; Les actions des autres ont perdu une grande partie de leurs valeurs. Un tiers

de la capacité de production américaine est constituée d'unités vétustes et sous-exploitées. Elles sont prêtes pour la retraite et ne sont plus compétitives avec le solaire.

En Inde, les plus grandes sociétés minières arrêtent l'exploitation de leurs mines de charbon considérant qu'elles ne sont désormais plus compétitives. En mai 2017, 14 GW de nouvelles centrales électriques au charbon prévues ont été annulées. Le solaire est moins coûteux que le charbon en Inde. Pour 2016/17, seulement 6,9 GW de nouvelles unités de production au charbon ont été installées et pour comparaison 14,1 GW de production électrique l'ont été par des sources renouvelables.

En Europe, l'association regroupant les principaux producteurs d'électricité Eurelectric a décidé en mars 2017 de s'engager auprès du traité de la COP 21 avec la mise hors la loi du développement de nouvelles centrales électriques au charbon. L'Allemagne, qui exploite toujours 145 centrales électriques de ce type dans le pays, était réticente pour y souscrire.

### **2.4.3 Énergie nucléaire**

Le siècle du nucléaire est né 1960 quand le premier réacteur d'1GW de puissance nucléaire a été installé. Trente ans plus tard, 300 GW d'énergie nucléaire étaient en place; mais beaucoup d'autres installations avaient été déjà annulés depuis 1970. À l'exception de quelques unités en Chine, aucune nouvelle centrale nucléaire n'a été connectée au réseau électrique depuis. L'âge nucléaire est en proie à une fin précoce. Les trois catastrophes majeures que sont "Three Mile Island" en 1979, Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011 en ont précipité la fin. En 2016, 441 réacteurs étaient toujours connectés aux réseaux, mais beaucoup sont arrêtés temporairement ou définitivement.

Le Japon qui avait à l'origine 54 réacteurs nucléaires opérationnels n'en possède plus que 5 en 2018, 14 sont définitivement à l'arrêt pour des raisons de sécurité et de coût de fonctionnement excessif. L'année 1993 fut donc la meilleure année du nucléaire avec une production atteignant 17 % de l'électricité mondiale. Le marché a continuellement diminué depuis.

À ce jour, depuis le milieu de la deuxième décennie des années 2000, l'industrie mondiale du nucléaire est en grand péril. Westinghouse, l'entreprise d'électricité américaine qui construit et exploite environ la moitié des centrales nucléaires du monde a de grandes difficultés. Toshiba au Japon est son actionnaire majoritaire depuis 2006. Toshiba a acquis une nouvelle entreprise nucléaire aux États-Unis, Stone & Webster, en 2015 mais ce fut une entreprise nucléaire de trop car le coût exorbitant et les retards de livraison des centrales en Géorgie et en Caroline du Nord l'ont conduit à l'abîme. À la fin de l'exercice fiscal en mars 2017, Toshiba a dû publier une perte de 7,5 milliards de € pour son activité nucléaire. Pour se maintenir sur le marché boursier la société s'est vue dans l'obligation de vendre son bijou, son activité dans les semi-conducteurs dont Apple est client. Toshiba reconsidère maintenant son activité dans le nucléaire.

La situation avec Areva en France n'est pas plus favorable. Jusqu'à 2016, Areva, acteur de la construction nucléaire et de l'exploitation minière, a accumulé un déficit de 10 milliards €. Finalement le gouvernement français a dû la sauver de la faillite. Dans un arrangement qui a été récemment approuvé par les autorités de l'Union européenne à Bruxelles, EDF, entreprise publique française, a acquis Areva avec deux investisseurs japonais comme actionnaires minoritaires. La participation possible d'une entreprise nucléaire chinoise était envisagée, mais ne s'est pas concrétisée jusqu'à présent. Ainsi, le gouvernement français, actionnaire majoritaire (83 %) d'EDF, a tout le pouvoir sur le devenir du nucléaire en France. Cependant, cet accord n'a pas été apprécié en bourse, la valeur d'EDF sur les marchés ayant perdu 10 % en un jour; elle atteint aujourd'hui seulement le dixième de sa valeur cotée 10 ans plus tôt.

Sur le terrain les affaires sont le reflet de la situation institutionnelle : Le nouveau vaisseau amiral du nucléaire français, l'EPR de Flamanville, devrait être opérationnel en fin d'année 2018, mais assortie d'une condition

inattendue dans ce domaine, imposée par l'autorité de sûreté nucléaire française (ASN) : comme la fiabilité d'un composant essentiel de l'usine est douteuse, l'installation sera arrêtée seulement après quelques années de fonctionnement pour remplacer cet élément essentiel. En fait il s'agit de la découverte d'un vice de construction dans le couvercle de la cuve du réacteur – c'est une pièce maîtresse de la centrale – il a été imposé de changer le couvercle en cours de route d'ici 2024, après que la centrale ait commencé à fonctionner.

Vers l'année 2020, l'appui général à l'énergie nucléaire, avec tous ses inconvénients considérables, a généralement disparu. Malgré la tendance actuelle, l'AIE à Paris envisage encore un avenir prometteur. Et il y en a quelques autres qui ont des intérêts particuliers. L'une d'elles est la Grande-Bretagne, par exemple, qui considère le lien entre l'énergie nucléaire et l'armement atomique comme essentiel: elle est une «puissance nucléaire», et elle n'est pas la seule. Avec ses 58 centrales nucléaires, la France possède le deuxième plus grand parc du monde après celui des États-Unis. En octobre 2018, lors d'un sondage d'opinion, 53% des Français ont déclaré leur opposition au nucléaire - il s'agit de la proportion la plus élevée jamais enregistrée. Depuis des années, le gouvernement français, qui possède indirectement toutes les centrales, a déclaré qu'il allait en fermer beaucoup d'entre elles. Mais les déclarations manquent de crédibilité. Le très populaire ministre français responsable, Nicolas Hulot, a pensé qu'il se heurtait à un mur lorsqu'il a exigé un engagement crédible du président français qu'il n'a pas obtenu et a démissionné. À l'heure actuelle, la probabilité la plus élevée est que la France ne réduise pas d'un iota sa capacité nucléaire. C'est un goulot d'étranglement pour le déploiement des énergies renouvelables dans le pays.

Plus récemment, le monde réel frappait à nouveau le programme nucléaire français. En effet, l'agence de sécurité nucléaire française a imposé de nouvelles améliorations au prototype du réacteur de Flamanville: le 21 juin 2019, «Le Figaro», premier journal conservateur français, l'avait mis sur sa première page: «L'EPR de Flamanville se transforme en un fiasco industriel». De nouvelles améliorations sont imposées au prototype de réacteur, considéré par le propriétaire EDF et le public français comme une catastrophe. L'avenir de la conception est maintenant mis en doute par tous. Ce réacteur nucléaire de 1650 MW devait initialement être opérationnel en 2012. Le démarrage le plus tôt possible est maintenant prévu pour 2022 et les coûts auront triplé pour atteindre plus de 11 milliards d'euros. La conception de Flamanville est la même que celle utilisée par EDF pour la construction de ses réacteurs en Finlande et au Royaume-Uni.

À l'été 2019, le Parlement français débat du projet de loi «Énergie et climat» proposé par le gouvernement. Au lieu de 2028 initialement annoncé, il est maintenant proposé de fermer 14 réacteurs français sur 58 d'ici 2035 seulement. D'ici là encore, 50% de l'électricité française proviendrait du nucléaire. Aucune mention de nouveaux réacteurs à la Flamanville; cela ne signifie pas qu'on ne pense pas à les installer contre toute attente.

La France compte sur le soutien de la Chine au nucléaire. La Chine a achevé sa première centrale nucléaire de conception française, l'EPR, en 2018. La centrale, d'une capacité de 1.750 MW, est située à Taishan; EDF en est un partenaire technique et financier. Il n'en reste pas moins que la Chine préfère les énergies renouvelables où elle occupe la première place sur le marché mondial et non le nucléaire pour ses investissements. Depuis décembre 2016, aucune nouvelle centrale nucléaire n'est entrée en construction. Le gouvernement chinois semble réticent à aller plus loin dans le nucléaire pour son coût élevé et sa longue durée de construction.

Et aucun soutien des États-Unis, le grand frère qui possède le plus grand parc de centrales nucléaires au monde. Aux États-Unis, sa capacité nucléaire devrait diminuer de plus de 5 GW d'ici 2022.

Il y a enfin le cas de la Belgique, voisine de la France et pionnière de l'industrie nucléaire en Europe. Elle a 7 réacteurs nucléaires installés. La Belgique avait déjà décidé en 2003 d'arrêter définitivement toutes ses centrales d'ici 2025, mais n'a pas mis au point les solutions de rechange. La Belgique est actuellement loin

derrière les autres pays de l'UE en termes de déploiement des énergies renouvelables. Les anciennes centrales nucléaires peuvent être terriblement dangereuses, mais elles sont amorties et produisent de l'électricité à un prix avantageux, alors pourquoi s'inquiéter? Les politiciens belges discutaient quotidiennement de la question quand la lumière devait s'éteindre dans le pays faute d'électricité. En mai 2019, un peu de lumière est apparue dans le tunnel, cela reste une spéculation, mais qui sait: le Qatar, le pays riche en gaz du Golf, propose via une société EG située au Luxembourg de remplacer à temps tout le nucléaire par 3,5 GW au gaz - le gaz étant fourni à un prix préférentiel - le terminal gazier de Zeebrugge existe déjà...

Dans le World Nuclear Industry Status Reprt (WNISR) de juillet 2019 le monde nucléaire d'aujourd'hui se présente comme suit :

- Seulement 10% de l'électricité mondiale consommée provient encore de l'atome. Il y a 24 ans, à son maximum c'était 17.5%. La grande majorité des centrales a été construite au siècle dernier
- Les 417 réacteurs en service ont une capacité totale de 370 GW
- La durée de construction des 9 réacteurs mis en service en 2018 a été en moyenne de 10.9 ans
- 80 des 417 réacteurs nucléaires en service ont plus de 41 ans d'âge
- Les 192 autres en ont plus de 31
- 46 nouvelles centrales seraient en construction

Les investissements dans le nucléaire en 2018 ont plafonné à 33 milliards de \$. En même temps les investissements dans l'éolien et le PV solaire, objets de ce livre, ont été beaucoup plus importants.

## **Partie 2**

### **Le Nouveau Siècle est Solaire**

## Chapitre 3

### La révolution solaire de l'an 2000

Depuis que l'approvisionnement en énergie est devenu un marché de masse, il existe de nombreuses raisons de soutenir le développement et le déploiement de l'énergie solaire. L'une des premières était la crainte de voir les ressources fossiles du sol s'épuiser très rapidement. Cependant, maintenant que l'analyse précise est disponible, on sait que les gisements de houille et de lignite sont suffisants pour plusieurs siècles d'utilisation. Pour le pétrole, il y avait eu plus d'inquiétude, mais c'était parce qu'on ne comptait pas sur les réserves de pétrole provenant du schiste et des sables bitumineux en Amérique du Nord qui sont arrivées, entre-temps, de façon inattendue et massive sur les marchés mondiaux. Les ressources de gaz naturel ont longtemps été considérées comme encore plus limitées. Cette inquiétude s'est également dissipée. Même les minerais d'uranium sont disponibles à faible coût. Le contraire était attendu il y a quelques années par Areva en France ; d'ailleurs la spéculation erronée sur l'augmentation des prix de l'uranium a contribué à sa faillite. Une préoccupation politique de la plus haute importance a toujours été le critère d'indépendance énergétique nationale. Les crises pétrolières des années 1970 et 1980 déclenchées par les conflits au Moyen-Orient en sont les exemples dont nous nous souvenons encore aujourd'hui. Il s'en est suivi des investissements massifs dans le nucléaire et le charbon. Les préoccupations concernant les changements climatiques ont toujours existé, mais elles n'avaient pas la priorité qu'elles ont aujourd'hui. Par exemple, en Europe de l'Ouest, avec ses longues côtes et les Pays-Bas déjà partiellement sous le niveau de la mer, le principal intérêt du grand public est la menace d'une élévation importante du niveau de la mer.

La perspective d'abaissement du coût de l'énergie solaire était une raison incitative non négligeable pour le développement du photovoltaïque. Déjà, depuis les années 1960, il était scientifiquement prouvé que le photovoltaïque pourrait éventuellement devenir compétitif par rapport au nucléaire en termes de coût : Le coût du nucléaire était la référence à l'époque.

En fait, dans ce contexte de stratégies énergétiques pour l'avenir, celle qui a conduit à un changement de paradigme en faveur de l'énergie solaire, la révolution solaire du début de ce siècle, était la menace pressante d'un conflit nucléaire, en pleine guerre froide.

#### 3.1 La menace d'une guerre nucléaire

Actuellement, neuf pays possèdent au total un arsenal d'environ 15 000 armes nucléaires, chacune d'entre elles étant beaucoup plus puissante que celles qui ont été larguées sur le Japon en 1945. La Russie possède 7 000 ogives nucléaires et les États-Unis 6 800. La Chine en compte 270 et vient, comme les autres puissances nucléaires, loin derrière les deux superpuissances.

L'Allemagne n'a pas de bombes elle-même, mais compte 60 bombes nucléaires tactiques américaines stockées à Ramstein.

Pendant la phase chaude de la "guerre froide" dans les années 70 et 80 jusqu'en 1990, l'arsenal total était d'environ 70 000 ogives, soit près de cinq fois plus qu'aujourd'hui.

Actuellement, la tendance est de nouveau à l'augmentation de l'arsenal. Le nouveau président américain a fait des annonces en ce sens. Les États-Unis estiment que 399 milliards de dollars sont nécessaires pour

moderniser leur arsenal nucléaire d'ici 2026, la Russie parle de 330 milliards de dollars nécessaires pour son armement nucléaire au cours des 20 prochaines années.

Depuis les années 1970, les deux superpuissances ont beaucoup fait pour conclure des accords de désarmement. SALT I et II (pour parler sur la limitation des armements stratégiques) ont limité le nombre de bombes autorisées des deux côtés et le nombre de sous-marins, de bombardiers et de missiles balistiques intercontinentaux. Un traité antimissiles balistiques ABM a été signé, mais en 2001, les États-Unis s'en sont retirés.

Un traité sur la réduction des armements stratégiques (START) a été signé en 1991. En 2010, un nouveau traité START a été signé, engageant les deux parties à réduire le nombre d'armes nucléaires à 1 550 d'ici 2018.

En outre, un accord a été signé en 2000 pour se débarrasser de 34 tonnes de plutonium de qualité militaire. Il a été renouvelé en 2009. Cependant, en octobre 2016, Poutine s'en est officiellement retiré. Entre-temps, les relations entre les États-Unis et la Russie se sont beaucoup dégradées et continuent de se dégrader.

**Les observateurs ont remarqué que la menace d'une guerre nucléaire entre les superpuissances est plus élevée maintenant qu'elle ne l'était pendant la guerre froide.** Lors du Forum économique mondial de Davos en 2017, les dirigeants d'entreprises internationales ont déclaré que la menace possible d'armes de destruction massive est la plus importante source d'insécurité de notre époque.

Robert McNamara a publié en 1987 son livre *Blundering into Disaster* (Entrée dans le désastre). Lorsqu'il était secrétaire américain à la Défense, il a participé à trois crises mondiales, Berlin 1961, Cuba 1962 et la guerre du Moyen-Orient 1967. Chacune avait le potentiel de devenir nucléaire, avait-il écrit. Aucune des deux superpuissances ne voulait un conflit militaire, mais " le manque d'information, la désinformation et les erreurs de jugement ont conduit à la confrontation ". La crise des missiles de Cuba a été la plus proche d'une guerre nucléaire. Les Russes avaient des armes nucléaires à Cuba et ont failli autoriser leur utilisation contre une invasion américaine, poursuit-il. À un moment donné, un sous-marin russe avait été poussé à faire surface par l'adversaire américain. Les Américains ne savaient pas que le sous-marin transportait une torpille nucléaire. Cette dernière avait déjà été armée par le capitaine. Ce n'est que parce que le commandant de la brigade sous-marine était à bord, et que son avis s'est imposé au capitaine, que la torpille n'a pas été tirée. "Ainsi s'est répandue la menace d'une attaque nucléaire sur la flotte américaine".

En 2007, l'ancien secrétaire à la Défense William Perry a cité la probabilité d'une attaque terroriste nucléaire dans la décennie à 50-50.

Jusqu'à ce jour, seul l'équilibre de la terreur nucléaire entre les superpuissances a préservé le monde de l'Armageddon nucléaire. Il n'est pas souhaitable qu'il n'y ait qu'une seule superpuissance. Le risque d'une frappe nucléaire serait alors réel. La tentation était toujours là. En 1952, le général McArthur avait conseillé au président Eisenhower d'utiliser des bombes atomiques pour mettre fin à la guerre de Corée. John von Neumann, pionnier du développement de la bombe atomique et de l'informatique, voulait éliminer l'Union soviétique avec des bombes nucléaires. Le président Nixon, qui utilisait par ailleurs des produits addictifs, était en faveur de l'utilisation de l'arme nucléaire.

Nous sommes entourés d'ogives nucléaires. Elles circulent en permanence dans les mers du monde enfouies dans des sous-marins et dans les airs au-dessus de nous dans des bombardiers stratégiques ou bien attendent dans de nombreuses plates-formes de lancement de missiles. Et il y a eu des accidents. En 1950, un avion s'est écrasé en Colombie-Britannique, au Canada. Il y avait une bombe à l'uranium à bord qui n'a jamais été retrouvée. Le 17 janvier 1966, un B52 s'est écrasé à Palomares en Espagne. Il y avait quatre bombes à bord. Deux d'entre elles se sont rompues et ont dispersé 3 kg de plutonium sur des kilomètres aux alentours. Une

troisième bombe est tombée dans la mer. Vingt-huit navires l'ont cherchée pendant 80 jours. Ils l'ont récupérée à 870 m de profondeur. Près de 50 ans plus tard, en 2015, les États-Unis ont signé un accord avec l'Espagne pour assainir définitivement le site de Palomares, 1700 tonnes de terre contaminée ont dû être expédiées en Caroline. Une histoire semblable s'est produite à la base aérienne de Thule, au Groenland, en 1968. Quatre bombes ont été éjectées d'un avion qui s'est écrasé. Il a fallu 9 mois pour nettoyer le site. Des milliers de mètres cubes de déchets ont été collectés. Il semble que l'une des bombes n'ait jamais été retrouvée.

Finalement, en juillet 2017, l'ONU a adopté un nouveau traité interdisant toutes les armes nucléaires, 141 nations ont approuvé le traité, mais les 9 " puissances nucléaires " ont voté contre.

Un monde sans armes? À l'heure actuelle, il n'y a aucun danger que cela se produise. Après le SIPRI, l'Institut international de recherche sur la paix de Stockholm, le monde a dépensé en 2018 1820 milliards de dollars en armes, soit 1,82 billion de dollars, en fait 2,3% de plus que l'année précédente et un nouveau sommet depuis 1988. Comme toujours, les États-Unis arrivent en tête avec 649 milliards de dollars, suivis par la Chine avec 250 milliards. Ils sont suivis par l'Arabie saoudite avec 67,6 milliards de dollars, l'Inde avec 66,5 et la France avec 63,8 milliards de dollars. La Russie arrive en sixième position avec 61,4 milliards, suivie de la Grande-Bretagne avec 50 milliards, le Japon avec 46,6 milliards et la Corée du Sud avec 43,1 milliards de dollars.

Selon l'IISS, l'Institut International d'études Stratégiques de Londres qui a publié des bilans plus récents pour 2019, le monde a augmenté ses dépenses militaires de 4% en l'an 2019. En tête comme toujours les Etats Unis avec 685 milliards de \$ (+53.4 milliards) suivis par la Chine avec 181 milliards de \$, l'Arabie Saoudite, la Russie, l'Inde, la Grande Bretagne...

### **3.2 Une société qui doute de son futur**

Déjà en 1950, le Mouvement mondial pour la paix avait lancé l'Appel de Stockholm, appelant à une interdiction absolue des armes nucléaires. Il avait été signé par Frédéric Joliot, Pablo Picasso, Thomas Mann, et 500 millions de personnes à travers le monde.

En Allemagne, en 1957, 18 physiciens nucléaires ont publié le "Manifeste de Göttingen". Il avait été signé par des scientifiques éminents de la physique nucléaire en Allemagne et dans le monde, dont Otto Hahn, Werner Heisenberg, Max Born, Carl Friedrich von Weizsäcker et Karl Wirtz. Nous reviendrons sur ces personnalités importantes plus loin dans ce livre. Sur une note personnelle, K. Wirtz, qui avait participé avec d'autres aux études nucléaires allemandes pendant la Seconde Guerre mondiale, a été mon professeur plus tard lorsque j'ai étudié les réacteurs nucléaires à Karlsruhe. Le but du manifeste était de s'opposer fermement à ce que la nouvelle Bundeswehr allemande soit armée d'armes nucléaires. Et ce fut un succès. Après quelques hésitations, le chancelier allemand a accepté. Peu après, en mars 1958, le parti socialiste SPD a publié la devise "Combattre la mort nucléaire".

Un autre manifeste qui a été couronné de succès, même si ce fût beaucoup plus tard, est celui de novembre 2016. Il s'agit d'un appel à l'ONU de 15 lauréats du prix Nobel pour l'adoption d'une résolution contre les armes nucléaires. Ce manifeste a déclaré que les dangers des armes nucléaires sont totalement inacceptables et que la seule façon de prévenir une catastrophe prévisible est de les éliminer complètement. La résolution de l'ONU de juillet 2017, mentionnée ci-dessus, est également le résultat de cet appel.

Les plus grandes manifestations allemandes de tous les temps ont eu lieu contre le stationnement de nouveaux missiles balistiques nucléaires dans le pays et contre une troisième guerre mondiale considérée comme probable. Après une première manifestation en 1981 à Bonn, la capitale allemande, une manifestation encore plus importante, en 1983, a rassemblé plus de 1,3 million de personnes. La

manifestation principale rassemblant un demi-million de personnes a eu lieu au Bonner Hofgarten; 200 000 personnes ont formé une chaîne humaine de plus de 100 km de long dans le sud du pays.

Au début des années 1980, Petra Kelly, également appelée "Jeanne d'Arc de l'ère nucléaire", était une protagoniste du mouvement pacifiste allemand. Elle a été une source d'inspiration pour le mouvement antinucléaire en Allemagne. La campagne « Bertrand Russel pour une Europe sans nucléaire » était l'une de ses nombreuses initiatives.

Il y a eu beaucoup de pionniers contre la menace atomique et pour un monde meilleur. Frédéric Joliot, prix Nobel de 1936, déclarait en 1952 : "...il faut regarder très sérieusement et tout de suite le potentiel de l'utilisation de l'énergie solaire". Il a été le père du programme nucléaire français, ce qui donne un poids particulier à cette affirmation. Il a été le premier après la découverte par Hahn de la division d'un atome d'uranium à prouver expérimentalement qu'il s'agit d'une réaction en chaîne. Il a déposé un brevet sur la bombe atomique.

Sergeï Sakharov est peut-être le plus grand héros antinucléaire que le monde ait connu jusqu'à présent. Le Parlement européen décerne régulièrement un prix en son honneur. A l'origine, Sakharov était le chef du programme d'armement nucléaire soviétique. Il est à l'origine de la fabrication de la bombe Tsar, la plus grosse bombe qui ait jamais explosé sur Terre. Lorsqu'il a vu l'explosion en 1961 au-dessus de la Sibérie, il a été tellement choqué qu'il est devenu convaincu que les armes nucléaires pouvaient signifier la fin de l'humanité. Il est devenu un activiste pour le désarmement, pour la paix, pour les droits de l'homme, pour les libertés civiles. Dans son discours à la réception de son prix Nobel de la paix, il a appelé à la fin de la course aux armements, au respect de l'environnement et à la coopération internationale.

Robert Jungk a été le premier à avoir accès à Los Alamos en tant qu'extérieur. Il a écrit un livre à ce sujet, « *Brighter than a Thousand Suns* » (Plus brillant que mille soleils). Il a reçu le prix Nobel Alternatif en 1986. Son angoisse était que le monde puisse devenir un "État atomique". Son livre sur le Soleil a été publié à titre posthume. Il s'agit d'un rapport sur une nouvelle époque grâce au Soleil - le Soleil, symbole d'un monde durable et pacifique.

En 1982, le prix Nobel de la paix a été décerné à Alva Myrdal (Suède) et Alfonso Garcia Robles (Mexique). Myrdal avait présidé les pourparlers de l'ONU sur le désarmement de 1962 à 1973 ; Garcia Robles a été l'architecte d'un accord antérieur pour une zone exempte d'armes nucléaires en Amérique latine. Il a joué un rôle clé dans le programme commun des Nations Unies pour le désarmement de 1978 et a été considéré à l'époque comme Monsieur Désarmement.

Un membre très en vue de la société allemande était C. F. von Weizsäcker. Nous l'avons mentionné dans les chapitres précédents de ce livre en relation avec ses recherches sur le Soleil et les planètes. Pendant la guerre, il a également été impliqué dans la recherche nucléaire en Allemagne. La figure 3.1 montre la couverture de son livre en allemand publié vers la fin de sa vie : *Où allons-nous ?* Il a abordé les questions de la guerre et de la paix, de la pauvreté et de la richesse, de l'homme et de la nature, et de la valeur de la démocratie. Il se réfère à un concept développé par son fils Ernst Ulrich et les Lovins, Hunter et Amaury, aux États-Unis, «Facteur 4»: doubler la prospérité et réduire de moitié la consommation de ressources naturelles. Cela a pris de l'importance en tant que devise de l'Institut Wuppertal en Allemagne.

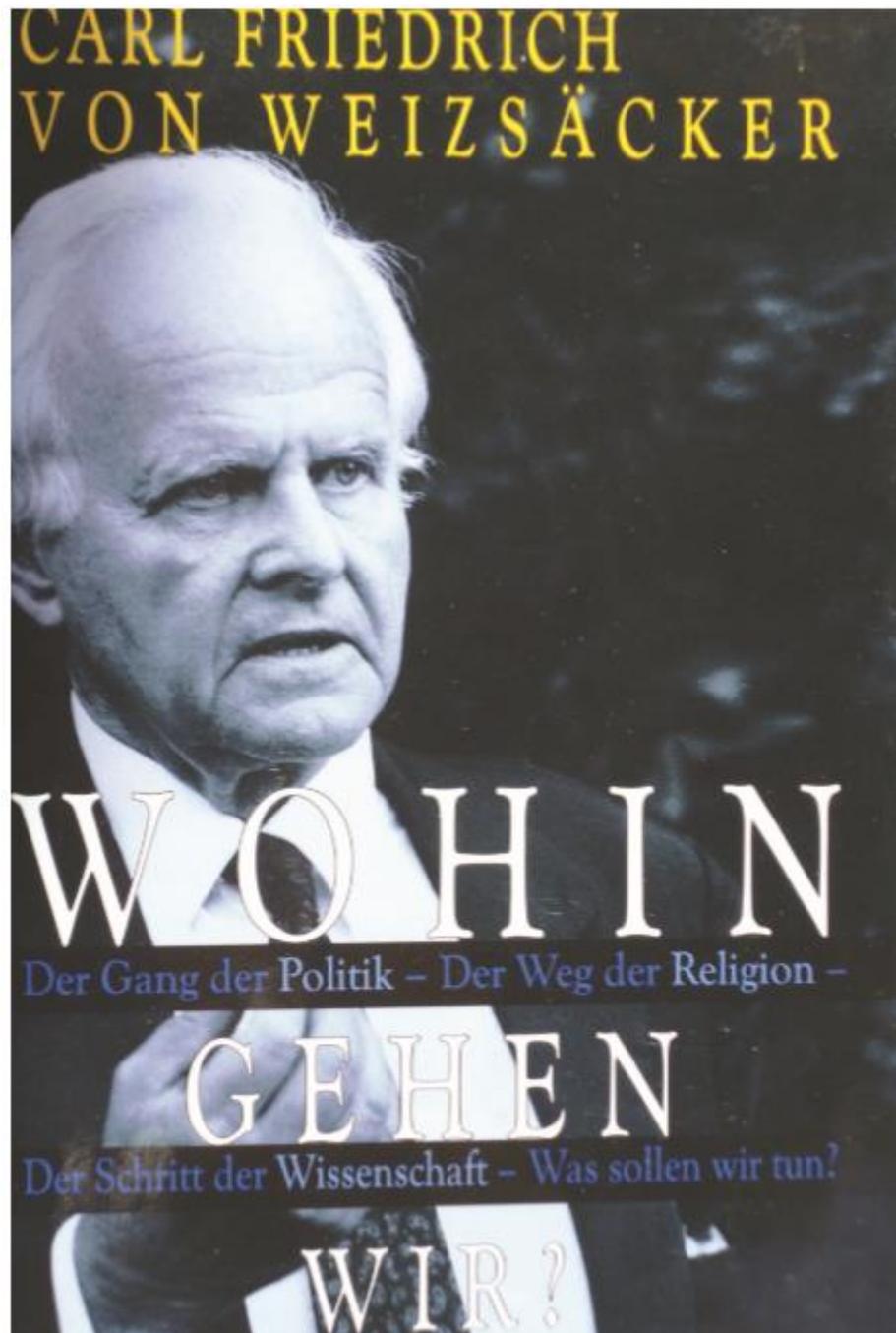


Figure 3.1 Le livre du scientifique et philosophe allemand C. F. von Weizsäcker « Où allons-nous ? »

A ce stade, il est temps de mentionner Hermann Scheer (1944-2010), qui était depuis le début de sa carrière un combattant contre la guerre nucléaire. Plus tard, il est devenu le père de la révolution solaire mondiale. La section suivante explique pourquoi et comment.

### 3.3 Hermann Scheer : Du désarmement à la politique solaire

Hermann Scheer (1944-2010) était membre du Bundestag, le parlement fédéral allemand, depuis 1980. Il était un membre influent du groupe du SPD. Dès 1982, il est devenu le rapporteur du SPD sur le désarmement et la maîtrise des armements. Il a été fortement influencé dans son jeune âge par la manifestation massive pour la paix à Bonn en 1982 dont nous avons parlé plus tôt. Des années plus tard, lorsque nous sommes devenus amis, il m'a emmené au Bonner Hofgarten et m'a expliqué tout ce qui s'était passé à cette réunion, en particulier le discours de l'ancien chancelier Willy Brandt.

En 1986, il a publié son premier livre en allemand, « *Die Befreiung von der bombe* » ("Se libérer de la bombe") (Fig. 3.2). Ayant la responsabilité du désarmement et de la préservation de la paix, il s'est convaincu de la nécessité d'un monde alternatif, un monde solaire. Ce que cela signifierait dans la pratique reste d'abord assez flou. Mais une chose était claire dès le début, "pas d'énergies conventionnelles de nature fossile ou atomique, pas de participation à aucun type de conflit armé". Scheer était un homme brillant et très gentil, mais il pouvait devenir très en colère lorsqu'il s'agissait de ces questions importantes. Le conflit sur la stratégie du charbon de son parti s'est avéré être un problème majeur dans sa carrière.

En 1988, Scheer a créé l'association EUROSOLAR à Bonn. Peu de temps après, il est venu me voir à Bruxelles et nous sommes devenus des amis très proches. Cette amitié durable s'est accompagnée d'un accord commun sur toutes les questions stratégiques liées à un monde solaire global, y compris celles qui sont controversées par nature, le photovoltaïque et le concentré solaire thermodynamique, le développement d'éoliennes sur terre et en mer, la bioénergie et le stockage.

Depuis le début du siècle, les énergies renouvelables sont devenues le courant dominant de l'approvisionnement et de la consommation d'énergie dans le monde. Cette tendance est partie d'Allemagne, qui a conservé le leadership pendant une bonne partie de la deuxième décennie, vers 2013. En 2002, les investissements dans le photovoltaïque avaient atteint pour la première fois 1 milliard de dollars en Allemagne ; en 2017, lorsque le photovoltaïque a conquis le monde entier, les investissements annuels ont atteint 100 milliards de dollars. Depuis le début du siècle, plus de 1000 milliards de dollars ont été investis dans le photovoltaïque. **En 2018, 3 milliards de dollars au total sur l'ensemble des énergies renouvelables avaient été investis à l'échelle mondiale.**



Figure 3.2 Le premier livre de Hermann Scheer « Libération de la bombe », publié en 1986.

## **L'architecte de cette incroyable révolution solaire était Hermann Scheer.**

Le terrain d'action de Hermann Scheer était le Parlement allemand, et non le gouvernement fédéral, qui n'a jamais pris l'initiative de promouvoir les marchés solaires dans le pays, quelles que soient les constellations politiques à un moment donné. Le Parlement n'était pas non plus un franc soutien de l'énergie solaire. J'étais moi-même membre d'une commission d'enquête du Bundestag sur l'énergie au tournant du siècle. Avec Harry Lehmann, nous étions à peine une poignée d'adeptes du solaire dans cette Commission ; les défenseurs de l'énergie nucléaire étaient plus nombreux et beaucoup plus agressifs. C'est l'art de Scheer à forger des alliances à travers le spectre politique qui a fait la différence. Sans lui, pas d'"Allemagne solaire".

Le premier coup d'éclat d' Hermann Scheer a été la "loi sur l'alimentation en électricité", StromEinspG, en allemand, de 1990. Son parti n'avait pas la majorité au Bundestag à l'époque. Il devait donc chercher des alliances au sein des partis conservateurs CDU/CSU. Il a trouvé un intérêt commun avec Manfred Lüttke et Matthias Engelsberger, qui cherchaient à promouvoir l'hydroélectricité. Wolfgang Daniels, du parti des Verts, était aussi impliqué. Finalement, l'initiative d'une loi a été introduite par les conservateurs – en principe les amis des compagnies d'électricité-et ces dernières étaient furieuses. En effet, la loi, qui est entrée en vigueur le 1er janvier 1991, les oblige depuis cette date à accepter dans les réseaux publics l'électricité produite à partir de toutes les énergies renouvelables et à payer pour cela un taux fixe, un tarif de rachat (FIT, pour Feed In Tariff). Ils devaient payer suivant cette loi 13,84 Pf (7 centimes d'Euro) par kWh d'hydroélectricité et 16,61 Pf (8,5 centimes d'Euros) pour chaque kWh d'électricité éolienne et photovoltaïque. Les compagnies d'électricité se sont adressés aux plus hautes cours d'Allemagne et de l'Union Européenne pour se plaindre, mais sans succès.

En fait, la loi avait été inspirée par le Danemark. Le Danemark a été le premier en Europe à développer un marché de l'éolien. La compagnie Vestas a construit en 1979 une première machine commerciale de 30 kW et plus tard, le Danemark a participé massivement au marché émergent de l'éolien américain, avec les installations au col de l'Altamont, en Californie, stimulé par un crédit d'impôt à l'investissement. Sur leur marché intérieur, les Danois ont essayé l'aide à l'investissement et, plus tard, à partir de 1988, ils ont été les premiers en Europe à introduire un tarif de rachat. Les compagnies danoises étaient obligées d'acheter l'électricité éolienne proposée et de payer un "juste prix".

C'est pourquoi l'Allemagne a introduit à partir de 1991 un système FIT comme le Danemark. Le résultat fut que l'Allemagne disposait d'un total de 6,1 GW d'énergie éolienne installée en 2000, soit plus même que le Danemark avec 2,4 GW à cette période.

Contrairement au succès du nouveau programme d'énergie éolienne, le tarif prévu dans la loi FIT de 1991 pour le photovoltaïque était trop bas pour permettre le démarrage d'un marché. Jusqu'alors, le PV souffrait du cercle vicieux : pas de faibles coûts sans un marché de masse pour enclencher des économies d'échelle, et pas de marché de masse sans un coût "compétitif". Hermann Scheer a eu le mérite de briser ce cercle avec une nouvelle loi, la "Loi sur les énergies renouvelables" (EEG).

Quand son parti, le SPD, est arrivé au pouvoir, la première chose qu'il a dû organiser était un programme de 100 000 toits solaires pour l'Allemagne. Le projet avait été préparé depuis de nombreuses années. Le programme des toits solaires a démarré le 1er janvier 1999. Il a été préfinancé par la banque d'État KfW et approuvé par le ministre des Finances de l'époque, Oscar Lafontaine. Le soutien financier pour les investissements dans le PV intégré au bâtiment a pris la forme d'un soutien pour les intérêts payés sur le prêt. Ce n'était pas assez

rentable pour les investisseurs. C'est pour cette raison que le programme a été immédiatement associé à cette nouvelle loi sur les énergies renouvelables (EEG). En 1999, Hermann Scheer et trois collègues du Bundestag ont rédigé la loi. Hans-Josef Fell était l'un d'entre eux. Ils se sont référés au "modèle Aachen" d'un prix payé aux propriétaires des installations PV et couvrant ses coûts engagés. Celui-ci avait été fixé à 45 centimes par kWh en plus des avantages associés au programme des toitures solaires. La nouvelle loi EEG est entrée en application le 1er avril 2000. Immédiatement après, la Commission européenne a intenté une action en justice à Bruxelles à son encontre. Elle a été rejetée par la Cour européenne.

Le programme des toitures ainsi que la première EEG qui lui est associée ont expiré fin 2003. Il n'a pas été renouvelé. Une deuxième loi EEG, à partir d'août 2004, est restée le seul mécanisme de soutien pour le PV, l'éolien, la biomasse et l'hydroélectricité, qui avaient tous leurs tarifs FIT spéciaux. La taille de marché n'était plus limitée par la loi depuis 2009. Auparavant, le volume du marché photovoltaïque admissible au soutien du FIT était limité, à 300 MW d'abord et à 750 MW plus tard.

Hermann Scheer a écrit sur ces événements fascinants au tournant du siècle (H. Scheer, *Initiating a solar revolution in Germany*, in *Solar Power for the World*, W. Palz, éd. pp. 287-300, Pan Stanford Publishing, Singapour, 2014), dont ce chapitre ne donne qu'un aperçu.

Grâce à cela, l'Allemagne est devenue un leader mondial dans le domaine du photovoltaïque et de l'énergie éolienne.

Alors qu'en 2000, l'Allemagne n'avait installé que 40 MW de PV, En 2004, la capacité installée atteignait plus de 1 GW et surpassait le Japon, qui était jusqu'à cette date le leader mondial traditionnel grâce à ses programmes Sunshine. L'Allemagne est restée le leader mondial du photovoltaïque en termes de capacité d'installation annuelle jusqu'en 2013, date à laquelle la Chine a pris le relais. Elle a même été dépassée depuis par les États-Unis et le Japon, car après la disparition de Hermann Scheer en 2010, le vent a tourné en Allemagne et le soutien n'est plus ce qu'il était.

En ce qui concerne l'énergie éolienne, l'Allemagne a acquis la première place sur le marché mondial, mais l'a perdue très tôt après 2005 en faveur des États-Unis. Aujourd'hui, la Chine est le leader mondial de l'énergie éolienne. Cependant, l'Allemagne occupe toujours une position forte dans l'industrie éolienne mondiale.

Hermann Scheer a reçu de nombreux prix et récompenses. En 1990, il a reçu l'Ordre du Mérite de l'Allemagne. Il a reçu le prix Nobel Alternatif et a été déclaré héros du siècle vert par Time Magazine.

Même au début de sa carrière, il était influent au sein de son parti. Dans sa région du Bade-Wurtemberg, il était le président de la commission pour décider qui étaient les candidats à inscrire sur la liste de vote. Sans une bonne place sur ces listes, il peut être difficile d'entrer au Parlement. Depuis 1993, il a été membre du comité de direction du SPD et des commissions du Bundestag sur les affaires étrangères, l'agriculture, etc. et membre de l'Assemblée parlementaire du Conseil de l'Europe.

En tant qu'étudiant, il était le leader du syndicat étudiant de Heidelberg. C'était pendant la révolte étudiante de 1968 dont Heidelberg était un point chaud. Une fois, il m'a emmené à Heidelberg pour m'expliquer comment il a réussi à tenir les étudiants à distance lorsqu'ils sont devenus trop agressifs. "Lors d'une réunion, les étudiants ont voté à la majorité pour occuper immédiatement le bureau du recteur. Hermann était contre. Il a déclaré, le vote est clair, il est contre l'occupation. Pour arrêter toute plainte, a-t-il déclaré, la réunion est terminée et les micros et les lumières sur le podium ont été coupés".

### **3.4 La révolution solaire allemande s'étend à la Chine et au monde entier**

Dès que l'Allemagne a mis en place ses incitations politiques pour le photovoltaïque, la Chine lançait son premier grand fabricant de modules photovoltaïques. Cela s'est produit dès 2001. Cette année-là, Shi Shenrong, inconnu dans l'industrie et la finance, a créé la société Suntech Power en Chine. En 2005, elle est devenue le premier producteur mondial de modules de silicium. La même année, elle a été inscrite à Wall Street à New York. Un an plus tard, M. Shi était devenu le premier milliardaire du photovoltaïque. Au début du siècle, la Chine n'ayant pas encore de programme photovoltaïque national, la quasi-totalité de la production de Suntech a été exportée. J'ai eu l'occasion de visiter la première ligne de production de Suntech à Wuxi, près de Changhai, à l'époque. Elle était entièrement automatisée, avec des machines importées d'Italie. Shi Shenrong est né dans une famille modeste en Chine occidentale. En 1989, il part en Australie et obtient trois ans plus tard son doctorat en photovoltaïque à l'Université UNSW de Sydney où il a été l'élève du professeur Martin Green, un acteur important dans le développement international du photovoltaïque. Le professeur Green a de bonnes relations avec les instituts et chercheurs académiques du photovoltaïque aux États-Unis, au Japon et en Europe ; il est un contributeur fidèle aux grandes conférences sur le PV que j'avais organisées dans toute l'Europe depuis 1977 (European Photovoltaic Solar Energy Conferences organisées par l'Union Européenne).

Titulaire de la citoyenneté australienne et d'un doctorat, Shi Shenrong est revenu en Chine en 2001. Son entreprise a subi comme beaucoup d'autres le grand tourbillon de l'industrie photovoltaïque en 2012 et 2013. L'entreprise a fait faillite, mais il a pu économiser quelques centaines de millions de dollars pour lui-même, dit-on.

A ce stade, il convient également de mentionner Frank Asbeck en Allemagne. Son parcours était très semblable à celui de M. Shi. Frank Asbeck n'était pas connu non plus dans le monde de l'industrie et de la finance. Il avait démarré son entreprise SolarWorld à Bonn dès que Hermann Scheer y avait créé Eurosolar. Au début du nouveau siècle, il est rapidement devenu le premier milliardaire allemand du Photovoltaïque. Son entreprise est entrée en bourse et a rapidement perdu 99% de sa valeur. En 2017, l'entreprise avait déjà connu deux faillites, générant le chômage de milliers d'employés. Finalement, une petite partie de la société a été sauvée avec l'aide d'investisseurs qataris.

Suntech n'était pas la seule nouvelle entreprise photovoltaïque à émerger au début du siècle en Chine et à Taiwan. Il y en a eu une multitude, la quasi-totalité d'entre elles étant positionnée dans le commerce d'exportation. Nous allons voir que cela n'allait changer que vers 2012-2013 lorsque la Chine a mis en place un grand programme de marché national.

En 2013, la moitié des 600 grandes villes chinoises avaient au moins un producteur solaire local. La Chine avait dépensé 50 milliards de dollars au cours de la décennie précédente pour développer son industrie photovoltaïque.

Les politiques allemandes sur le photovoltaïque ont fait de nombreux adeptes dans le monde entier. En 2007, on comptait 46 juridictions, dont plusieurs aux États-Unis, mettant en oeuvre la politique des tarifs d'achat pour les énergies renouvelables locales. En 2012, son principe était même adopté par plus de 65 pays. De nombreuses études ont montré qu'il était l'outil de développement le plus efficace par rapport, en particulier, au modèle de quotas et aux portefeuilles d'énergies renouvelables (RPS). Ce dernier est un outil important de promotion aux États-Unis ; nous y reviendrons plus tard.

En 2012, 13 pays avaient déjà installé plus de 1 GW de PV. Sept pays avaient plus de 4 GW installés, dans cet ordre : L'Allemagne, l'Italie, les États-Unis, la Chine, le Japon, l'Espagne et la France.

Le nouveau marché mondial du photovoltaïque de ce siècle a été le plus spectaculaire. Il est sorti de nulle part et s'est intégré dans le courant dominant des marchés mondiaux de l'énergie en l'espace d'une dizaine

d'années. Mais toutes les autres énergies renouvelables ont également connu une croissance explosive comme nous le présenterons de façon plus détaillée dans le prochain chapitre.



Figure 3.3 Bertrand Piccard (au centre), André Borschberg (à droite) en 2010 avec l'auteur lorsqu'ils ont remporté le Prix solaire suisse. Plus tard en 2015, les Suisses ont fait le tour du monde dans leur avion solaire Solar Impulse.

## Chapitre 4

### Les énergies renouvelables à la conquête des marchés dominants de l'énergie au niveau mondial

#### 4.1 Le triomphe de l'énergie solaire

##### 4.1.1 La capacité mondiale de production d'électricité à partir des énergies renouvelables jusqu'en 2018

Dans ce début de siècle, la croissance la plus extraordinaire parmi toutes les capacités de production d'énergie installées est sans conteste celle d'origine solaire photovoltaïque (PV). En 2018, le PV a atteint une capacité mondiale cumulée de plus de 450 GW crête ; 500.000 panneaux solaires sont installés tous les jours. La capacité cumulée a atteint le premier GW crête en l'an 2000. Un GW est déjà une valeur respectable, puisque cela représente environ 200 000 installations photovoltaïques intégrées aux bâtiments, assez pour alimenter une grande ville. Cependant, pour pouvoir être considéré comme un courant dominant dans les marchés mondiaux de l'énergie, il est nécessaire de franchir un cap supérieur, celui des 100 GW crête. C'est ce qui s'est passé en 2012 : au cours des 12 premières années de ce siècle, on a atteint une capacité installée globale de 100 GW. Depuis 2012, cette poussée s'est encore accélérée puisqu'il n'a fallu que 6 ans pour atteindre les 350 GW. Actuellement les taux d'installation annuels ont atteint de 70 à 100 GW. On ne s'attend pas à ce que ce taux de croissance augmente beaucoup plus: nous avons pratiquement atteint la limite supérieure. La récente explosion des marchés mondiaux est due en grande partie à la vigueur des marchés intérieurs émergents en Chine et au Japon.

Jusqu'en 2016, l'Allemagne avait la plus grande capacité photovoltaïque installée au monde, notamment grâce à son rôle de pays pionnier en matière d'incitations politiques autour des années 2000. Actuellement, en 2018, l'Allemagne est quatrième derrière la Chine, les États-Unis et le Japon. A la mi-2017 la Chine avait dépassé l'objectif de référence des 100 GW PV installés, ce qui fait que fin 2017 la capacité installée en Chine représentait 31% de la capacité installée mondiale. Les prix du PV sur le marché international ont chuté de manière spectaculaire. Actuellement le coût des modules est de 0.30 \$/Watt, un prix divisé par 6 ou 7 par rapport à celui de 2010. Le prix des cellules au silicium cristallin utilisées pour de tels modules est descendu jusqu'à la valeur incroyablement basse de 0.20 \$/Watt. Ce marché mondial est dominé par la Chine depuis déjà plus d'une douzaine d'années. En 2016, la Chine et Taïwan ont fourni 72,7% l'ensemble des modules installés dans le monde. L'industrie traditionnelle du PV aux États-Unis, en Europe et au Japon doit faire face à de grandes difficultés pour rester compétitive. A l'heure actuelle les États-Unis représentent le second plus grand marché PV au monde, cependant ils importent la majeure partie des modules qu'ils installent. La part du marché mondial des modules PV fabriqués aux États-Unis ne représentait que 1,4 % en 2016. Ses principaux fabricants de modules First Solar et SunPower ont subi des pertes et ont dû débaucher du personnel. L'Allemagne n'est pas en meilleure forme que les États-Unis concernant son industrie de modules PV. Elle ne représentait que 2,9 % du marché mondial en 2016. Sa principale industrie de pointe SolarWorld a fait faillite en 2018 - pour la troisième fois. Nous reviendrons plus loin sur cette situation.

Les prix des systèmes PV complets ne sont pas encore aussi faibles qu'ils auraient pu l'être, étant donné les prix bas pratiqués pour les modules sur les marchés. Les meilleurs prix pour les installations clé en main montées au sol sont pourtant maintenant inférieurs à 1 \$ par watt crête ; pour les systèmes PV intégrés au bâtiment, 1,3 \$ par watt constitue aujourd'hui un prix plancher.

Une autre grande surprise pour les experts internationaux de l'énergie a été l'énergie éolienne. Il est vrai que la capacité cumulée mondiale avait déjà atteint 18 GW en 2000 ; la capacité éolienne avait conservé son

avance sur le PV durant les années suivantes. L'énergie éolienne a ensuite connu une accélération époustouflante puisqu'elle a dépassé le cap des 100 GW installés en 2008, soit 4 ans en avance sur le PV, puis le cap des 200 GW en 2011. En 2018 ce dernier chiffre a pratiquement triplé avec 580 GW de capacité éolienne installée. Les principaux marchés de l'éolien en 2016 ont été la Chine, les États-Unis et l'Allemagne. Les principaux leaders dans la fabrication de turbines sont Vestas au Danemark, General Electric aux États-Unis, Goldwind en Chine, Siemens/Gamesa, Enercon en Allemagne et Acciona/Nordex en Espagne.



Enfin Le Royaume-Uni est un leader mondial dans le domaine de l'éolien offshore.

Pratiquement en partant de zéro, le photovoltaïque et l'éolien, avec plus de 1 000 GW, ou 1 TW, installés au cours du siècle qui vient de commencer, ont émergé comme les leaders mondiaux de tous les producteurs d'électricité à partir d'énergies renouvelables.

L'hydroélectricité et la bioénergie sont également des réussites. L'électricité d'origine renouvelable a été essentiellement associée à l'hydroélectricité au cours du siècle dernier. L'hydroélectricité est toujours considérée comme un leader mondial dans le domaine des énergies renouvelables et on a même observé sa capacité augmenter depuis le début du siècle. Les nations les plus importantes au niveau de la capacité hydroélectrique sont la Chine, le Brésil et les États-Unis grâce à la construction d'énormes barrages. Les chefs de file mondiaux en matière de capacité de production de bioénergie sont les États-Unis suivis par la Chine, l'Allemagne, l'Inde et le Japon. Le tableau suivant donne une vue d'ensemble des différentes formes d'énergie renouvelable au niveau mondial.

Type de production (GW)	2000	2018	2019 (Janvier)	2020 (Janvier)*
Hydroélectrique	688	1150	1290	1310
Eolienne	18	580	600	650
Solaire photovoltaïque	1	450	500	610
bioénergétique	17	130	130	138
Total énergies renouvelables	733	2323	2533	2721
Total toutes types	3500	7000	7000	

Nous avons laissé de côté les quelques usines géothermiques en Italie et aux États-Unis, de même une usine marémotrice en France sur la Rance. Cependant, ces installations avec une capacité de 13 GW représentent une fraction très minoritaire parmi les énergies renouvelables.

**Le tableau montre que les marchés mondiaux du photovoltaïque et de l'éolien ont démarré exactement en 2000.** Depuis le début du siècle, le monde a déjà installé plus de 1,1 TW ou 1 100 000 MW d'énergie éolienne et photovoltaïque propre et décentralisé. Des millions de personnes possèdent maintenant leur propre générateur d'électricité. Et la ruée vers le soleil continue:

En 2018, la capacité photovoltaïque mondiale installée en plus était légèrement inférieure à 100 GW, comme en 2017 d'ailleurs. La Chine est restée n°1 pour le taux d'installation en 2018 mais a installé près de 20% de moins que l'année précédente; elle dépasse la barre nationale de capacité photovoltaïque de 200 GW en 2019. Le Japon en a également installé moins, tandis que le taux d'installation aux États-Unis est resté stable. Pratiquement tous les autres pays ont vu augmenter leurs installations photovoltaïques. 14 pays ont déjà installé plus de 1 GW de PV. La tendance mondiale est à des taux d'installation encore plus élevés dans les années à venir, 110 GW et plus.

Pour l'énergie éolienne, les taux d'installation annuels sont plus ou moins stables entre 50 et 60 GW. En 2020, le PV dépassera pour la première fois la capacité éolienne mondiale installée.

La Chine a atteint la plus grande capacité énergétique renouvelable au monde, tant pour l'énergie éolienne que pour la photovoltaïque. Pour les deux, l'UE et les États-Unis suivent. L'Allemagne est la quatrième puissance éolienne au monde; en PV, le Japon a pris la quatrième place de l'Allemagne qui se retrouve reléguée au n°5 du classement mondial. L'Inde vient directement derrière pour les énergies photovoltaïque et éolienne.

Comme on le voit dans le tableau, à l'heure actuelle les capacités énergétiques globales provenant du charbon (1 950 GW) ou de l'énergie nucléaire (391 GW) sont dépassées par la capacité en énergies renouvelables. Le Secrétaire général du Conseil mondial de l'énergie (WEC), le Dr Christoph Frei, a dit au sujet du triomphe de l'énergie solaire que nous observons dans les faits et les chiffres : "Nous avons déjà franchi le point de basculement d'une grande transition énergétique".

L'Agence internationale de l'énergie (IEA) à Paris a déclaré dans un rapport publié en mars 2018 (Global Energy and CO<sub>2</sub> Status Report 2017) : "Les énergies renouvelables ont connu la plus forte croissance de toutes les sources d'énergie en 2017... Les énergies renouvelables représentent aujourd'hui 25 % de la production mondiale d'électricité. .... A elle seule la Chine a représenté 40% de la croissance combinée mondiale de l'énergie éolienne et du solaire photovoltaïque .... De même près de 40% de l'augmentation de l'hydroélectricité provient des États-Unis....Enfin l'UE, la Chine et le Japon ont représenté 82% de la croissance mondiale en bioénergie....".

#### **4.1.2 Le tournant du marché photovoltaïque européen de 2010 à 2013 et l'émergence de nouveaux leaders sur le marché, en Chine, au Japon, au Royaume-Uni et en Inde**

L'industrie mondiale de l'énergie éolienne n'a jamais dû affronter la tempête. Aujourd'hui, les principaux fabricants de turbines sont le danois Vestas, l'américain General Electric, Le chinois Goldwind, les deux partenaires allemands Gamesa/Siemens et Enercon et enfin une coentreprise espagnole Nordex/Acciona. Ces sociétés existent depuis le début du boom actuel de l'énergie éolienne dans le monde. Il n'y a pas beaucoup d'écart dans les coûts de production ; ils sont très concurrentiels les uns par rapport aux autres. Et depuis le début du siècle, les marchés n'ont pas connu une baisse de coût aussi drastique comme ce fut le cas pour le solaire PV. Les éoliennes ont toutes évolué rapidement en taille, cependant le prix du kW installé n'a jamais été très différent de ce qu'il est encore aujourd'hui. Nous verrons dans un chapitre à venir qu'il y a eu des développements technologiques spectaculaires, et aussi que quelques conflits industriels ont dû être surmontés. Mais ces derniers n'ont eu qu'un impact limité dans l'espace et le temps.

Le marché du photovoltaïque a vécu une histoire complètement différente. Tout d'abord, une énorme euphorie s'est installée dans l'industrie, en particulier en Allemagne, accompagnant la croissance exponentielle des marchés. En 2012, des milliers de nouvelles entreprises PV impliquant des fabricants et des installateurs étaient créées. Des milliards d'euros ont été investis dans ces entreprises, beaucoup d'entre elles devenant les chouchous des marchés boursiers. Au cours de l'année 2010, un investissement maximal de 20 milliards d'euros a été atteint en Allemagne.

Mais tout cela a pris fin dès 2012 et 2013.

Dans l'industrie photovoltaïque allemande, 110 000 emplois existaient en 2012. En 2013 ce chiffre avait chuté de 55 000; en 2015 il ne restait plus que 31 000 emplois.

Presque tous les fabricants de modules allemands ont fait faillite :

- Q-Cells, le plus grand fabricant de modules au monde, a été placé sous tutelle de la Corée du Sud.
- Conergy
- Solon
- Centrotherm
- Sunways
- Schüko
- Scheuten, qui avait repris Shell-Gelsenkirchen.
- Würth, spécialiste du CIS, une technologie reprise à partir des travaux du ZSW, le centre de R&D de ZSW à Stuttgart, repris par Manz
- Enfin First Solar, le spécialiste du CdTe a quitté l'Allemagne à cette époque.

Bosch, qui avait acheté la moitié d'Ersol en 2008 et Aleo en 2009, et a dû abandonner le PV en 2012 tout en supportant une perte de 1 milliard d'euros.

Siemens Solar a renoncé en même temps après une perte totale de 0,8 milliard d'euros.

Souvent, les déclarations fracassantes des entreprises annonçant faire partie des nouveaux leaders du PV entraient en contradiction avec leur piètre performance sur les marchés - avec des conséquences dramatiques.

Certaines entreprises allemandes ont survécu à la catastrophe et ont conservé un rôle de premier plan dans le PV international. Wacker, en Bavière, est l'un des plus importants fournisseurs de silicium cristallin au monde. Il a conservé ce statut depuis le démarrage des premiers marchés connus en PV jusqu'à aujourd'hui. Nous y reviendrons plus loin. SMA, le spécialiste incontesté des onduleurs localisé à Kassel, a été créé par le professeur Werner Kleinkauf, Günther Cramer et d'autres en 1981. SMA est resté un leader mondial jusqu'à aujourd'hui. Il faut aussi mentionner Solarwatt, qui a été sauvé de la faillite par la famille Quandt. Solarwatt s'est associé à Fronius pour le conditionnement de l'énergie, le stockage et d'autres composants de système. Manz a survécu, bien qu'il ait perdu quelques plumes. Phoenix Solar AG a survécu jusqu'à la fin 2017, avant de disparaître lui aussi.

L'industrie PV aux États-Unis, au Japon et en Chine a également été touchée par la crise européenne en 2012 et 2013. Aux États-Unis, l'entreprise Evergreen, spécialiste de la technologie des rubans de silicium, est tombée à l'eau. ECD, le promoteur du silicium amorphe sur les substrats souples également. Le spécialiste des modules photovoltaïques organiques, Konarka, a emprunté la même voie. Le scandale Solyndra, du nom de la société californienne fabriquant des panneaux tubulaires en CIGS qui a déposé son bilan peu après avoir bénéficié d'un fond de garantie de prêt d'un demi-milliard de dollars de l'administration Obama. Un dernier venu, Sun Edison, a péri en 2016.

Au Japon, pays leader traditionnel de l'industrie photovoltaïque mondiale, des entreprises telles que Kyocera, Sharp, Showa Shell, Panasonic et Solar Frontier ont également ressenti un tsunami suite au tremblement de terre européen, mais leur existence n'a jamais été mise en danger. Le Japon, qui était un pays exportateur

de modules photovoltaïques jusqu'en 2012, est devenu importateur net, aux dépens de sa propre industrie. Finalement, même Kyocera, un pionnier du PV dans le monde, a été durement touché. En 2018, ses ventes ont chuté de 40% par rapport à l'année précédente avec une perte de 616 millions de dollars

En Chine, le pionnier mondial Suntech Power, dont nous avons parlé plus tôt, a également péri en 2012. Intéressante est l'histoire de quelques anciens de l'industrie photovoltaïque qui ont disparu des radars photovoltaïques mondiaux au cours de cette terrible période. L'Allemagne possédait Schott Solar avec beaucoup de ramifications différentes. Jusqu'à ce qu'il ait définitivement renoncé à ses activités dans le PV en 2012 et 2013, Winfried Hoffmann, également Président de longue date de l'Association européenne de l'industrie photovoltaïque (EPIA), a géré le destin de Schott Solar jusqu'à son terme. Les origines remontent à l'année 1958 avec le célèbre groupe AEG-Telefunken, devenu plus tard Deutsche Aerospace, DASA. En 1979 a été créé RWE-Nukem, un fabricant de modules en couches minces. La même année, MBB, la société aérospatiale basée à Munich, et Total Energy ont créé Phototronics, spécialisé dans les modules en silicium amorphe. En 1994, les trois, DASA, Phototronics et Nukem ont joint leur force pour devenir ASE energy sous l'égide du conglomérat RWE, le champion allemand de l'énergie nucléaire. En 2002 Schott, un fabricant de verre allemand bien connu, entre en scène. Trois ans plus tard, Schott RWE Solar devenait une société filiale en propriété exclusive de Schott seulement. En 2012, Schott Solar se retirait de la production des modules au silicium cristallin et un an plus tard de la fabrication des modules en couches minces. Aux États-Unis, les premières activités photovoltaïques étaient en fait centrées autour de deux grands groupes pétroliers : BP et Shell.

D'une part, il y avait la filiale d'une compagnie pétrolière, ARCO Solar, qui existait depuis 1977 et qui a été vendue à Siemens en 1989. En 2001, Siemens Solar a été vendue à son tour à Shell. Shell a renoncé à ses activités PV en 2009. Ce n'est qu'en 2016 que Shell a déclaré qu'il pourrait réintégrer le PV avec une nouvelle division de l'énergie.

D'autre part, il y avait BP Solar. Cela remonte en fait à la société Solarex, le nouveau leader du photovoltaïque créé en 1973 par mes amis Joseph Lindmayer et Peter Varadi. Solarex avait absorbé une jeune pousse, Solar Power Corp, créée en 1969 par Berman et avait vendu ses parts en 1983 à une autre compagnie pétrolière, Amoco. Non pas parce que Solarex était insolvable, mais parce que ses propriétaires voulaient simplement récolter les bénéfices. Plus tard, Amoco a fusionné avec BP Solar. Et comme mentionné précédemment, BP a abandonné le photovoltaïque en 2011 - pour manifester à nouveau son intérêt en 2017.

La liste des grands producteurs mondiaux de modules et de cellules PV en 2018 est dirigée par Jinko Solar, qui a vendu 11,4 GW. Viennent ensuite Trina, JA, Canadian, Longi, Hanwa Q-Cells, LGLSI, Risen, Shunfeng SFCE et Yingly. Les 10 plus gros producteurs mondiaux étaient des Chinois, à l'exception de Canadian et de Hanwha. Les usines de production de modules sont distribuées dans de nombreux pays, pas seulement en Chine: Malaisie, Vietnam, Thaïlande, Afrique du Sud, Brésil, Portugal...

Les 10 plus grandes sociétés photovoltaïques ont toutes produit des cellules et des modules en silicium cristallin. Les modules à couches minces ont été davantage marginalisés, mais First Solar avec CdTe est resté dans la course en tant que n°11. Les entreprises chinoises ont produit en 2018 87,2 GW pour une installation mondiale de près de 100 GW. La Chine a produit 250 000 tonnes de silicium pour le marché photovoltaïque. Grâce à la production de masse, les prix du marché mondial ont encore baissé à 25 cents / W le module.

La valeur boursière des principales entreprises photovoltaïques sur les marchés mondiaux figure dans le PPVX du Top 50 Solar. Depuis 2003, la valeur totale a augmenté de 269%. Il a atteint son plus bas niveau de 2013 à 2016. D'une valeur totale de 30 milliards de dollars en 2016, il est passé à 31,6 milliards de dollars en mars 2019. Au cours des premières semaines de cette année, il s'est amélioré de 22% - l'enthousiasme mondial pour le PV vient de se refléter sur les marchés boursiers. Le Chinois Jinko Solar, premier producteur mondial de cellules et de modules photovoltaïques, est également devenu un choucou des valeurs boursières en 2019, lorsque sa valeur a augmenté de 94%.

La situation est vraiment absurde. L'Allemagne, l'Espagne et l'Italie ont été les pionniers du développement du marché mondial du photovoltaïque – à la charge des consommateurs d'électricité dans leur propre pays. Au début, il y avait une énorme facture à payer car pour amorcer une économie d'échelle, les coûts sont obligatoirement élevés. Au cours de la première décennie du vingt et unième siècle, les consommateurs européens ont donc dépensé les centaines de milliards d'euros nécessaires. Maintenant que les coûts ont énormément baissé, les Européens sont passés à côté du marché. En 2016, l'Allemagne a installé moins de 2 GW, l'Europe à peine 7 GW alors que la Chine a installé 24 GW en 6 mois.

Qu'est-ce qui a déclenché tous ces événements au cours des années 2011 à 2013 ? Comme nous l'avons déjà mentionné, la loi allemande sur les énergies renouvelables ou EEG dans sa version originale datant de 2004 avait imposé un volume de marché pour ceux qui bénéficiaient de tarifs de rachat (FIT) très avantageux pour l'électricité. En 2009 les volumes du marché en Allemagne induits par ces incitations fiscales devenaient presque illimités. Ainsi l'Allemagne a installé en 2009, 4,5 GW de solaire photovoltaïque, puis 7,5 GW pendant chacune des trois années suivantes. Avec 26 TWh injectés dans le réseau allemand en 2012, le décaissement annuel à destination des investisseurs à cause des tarifs de rachat s'approchait dangereusement de la barre des 10 milliards d'Euros. Le gouvernement allemand a réagi en 2012. Le tarif de rachat fut réduit de 40 % entre 2012 et 2013. Rétrospectivement, on peut dire que cela fonctionnait. Ce qui a fait déraiser le système, c'est qu'un nouveau volume supérieur d'installations PV annuelles a été imposé. Cela a cassé le marché et entraîné l'industrie allemande dans l'abîme.

L'Espagne, l'autre pionnier européen du PV, a réagi de la même façon. Elle a arrêté net son système de tarif de rachat avantageux. Depuis 2012 il n'y a plus eu d'installations par rapport aux 4,5 GW déjà installés. Seulement en 2017, la pompe a été réamorçée au niveau d'1 GW grâce à un système de vente aux enchères.

Le Royaume-Uni est un cas particulier du PV européen dans les années critiques depuis 2010. Il avait déjà adopté une FIT en 2008, qui est entrée en vigueur deux ans plus tard. Le gouvernement a encouragé le photovoltaïque - pas surprenant sachant que le Royaume-Uni compte bien des pionniers mondiaux du photovoltaïque - mais le tarif en vigueur a toujours été réduit. Contrairement aux autres pays européens, il n'a pas été abaissé à un niveau prohibitif et les marchés n'ont cessé d'augmenter. À un moment donné, le Royaume-Uni a enregistré les plus importants ajouts de systèmes photovoltaïques en Europe, malgré un climat solaire moins favorable. En 2019, il disposait d'un respectable 13GW de PV installé.

La Chine a adopté le FIT en 2010, mais ce n'est qu'en 2013 que son marché a commencé à exploser. Cette année-là elle dépassait l'UE en installations annuelles et est devenue le leader sur le marché mondial.

Le Japon a adopté le FIT en 2012; ses marchés ont connu une croissance spectaculaire en 2013 et une lente baisse les années suivantes.

L'Inde a toujours été le pays politiquement le plus favorable aux énergies renouvelables. Il a introduit un FIT en 2010, mais pendant de nombreuses années, les marchés du PV n'ont pas beaucoup bougé. Encore en 2015, il n'avait installé en tout que 3 GW, moins que la Belgique. La croissance explosive était très récente et en 2019, l'Inde avait 10 fois plus de systèmes photovoltaïques installés qu'il y a 4 ans.

#### **4.1.3 Les marchés mondiaux du PV et de l'éolien aujourd'hui**

En l'an 2019, le marché mondial du PV est resté stable par rapport à 2018 avec 100 à 105 GW nouvellement installés. La capacité totale du PV en Chine, globalement la plus importante est passé à 205 GW pour la première fois. Néanmoins la Chine – qui a changé ses règlements pendant l'année, en course vers un marché PV exempte de subventions – n'a installé en 2019 que 30 GW, contre 44 GW l'année précédente.

L'industrie PV de la Chine a continué à dominer largement les marchés mondiaux comme les années d'avant.

L'Europe a atteint une capacité totale en PV de 132 GW, la 2<sup>e</sup> plus importante du monde avant celle des Etats Unis. 16.7 GW de PV ont été nouvellement installés en Europe cette année 2019, le double des 8.2 GW du marché de l'année précédente. Les pays en tête de liste en 2019 ont été l'Espagne, un revenant avec 4.7 GW

installés, l'Allemagne avec 4 GW, les Pays-Bas avec 2.5 GW, la France avec un petit GW, et la Pologne, un nouveau avec 0.8 GW.

Les 500 GW installés dans le monde produisent environ 600 TWh d'électricité, soit 1,8% de la consommation. Le premier pays en termes de part de consommation est l'Allemagne où le PV génère 46 TWh et détient 8% de la production nationale d'électricité. Puis l'Italie, le Japon, l'Australie, l'Inde, la Belgique, l'Union européenne, le Royaume-Uni, la Chine et la Turquie étaient les pays où la part d'électricité photovoltaïque était la plus élevée. La France a suivi à un autre rang.

Après BNEF, Bloomberg New Energy Finance, 130 milliards USD ont été dépensés en 2018 sur le PV, soit 24% de moins que l'année précédente. Comme le marché photovoltaïque n'a pas évolué de 2017 à 2018, ces 24% reflètent bien la diminution globale des coûts de l'ensemble des systèmes photovoltaïques installés. Seulement 32 milliards de dollars sont allés sur le marché mondial des modules. En conséquence, il apparaît clairement que les coûts d'installation, de commercialisation et autres coûts accessoires restent excessifs et laissent une marge considérable de réduction.

En France, on trouve un exemple de coûts excessifs sur le marché du PV intégré aux bâtiments. La société «In Sun we Trust» propose un système photovoltaïque de 3 kW à 8500 euros, tandis que sur les marchés internationaux, des modules sont proposés à 750 euros pour 3 kW. Les conditions de marché offertes par les autorités sont peut-être trop généreuses: les prix du marché pour un courant photovoltaïque de 0,19 € / kWh sur un système de 3 kW sont plus qu'équitables. De plus, la TVA est réduite à 10% et il existe un «prêt écologique» à 0%. Et toujours le marché français n'a jamais vraiment décollé. Qu'est ce qui ne s'est pas bien passé?

Aujourd'hui, l'efficacité des modules sur les marchés mondiaux se situe entre 16 et 17%. Les prix en kWh de l'électricité photovoltaïque produite continuent à baisser. Dans les pays très ensoleillés, comme au Moyen-Orient, 3 \$cents / kWh sont proposés.

L'Allemagne est un champion du nouveau marché des batteries électriques à associer au PV. Dans le pays, 75% de tous les systèmes PV sont intégrés aux bâtiments. À la fin de 2018, l'Allemagne comptait 125.000 batteries installées dans les systèmes photovoltaïques, soit 40.000 de plus qu'il y a un an. Au total, tout ce stockage décentralisé représentait près de 1GWh. Les prix du stockage sur batterie moderne ont diminué de moitié depuis 2014.

En mai 2019, la SEIA aux États-Unis a annoncé avec fierté que le pays compte désormais 2 millions d'installations photovoltaïques en place, dont 43% en Californie, et la plupart d'entre elles sont résidentielles. Ceci a été accompli 3 ans après le premier million; il avait fallu 40 ans pour atteindre ce premier million. Le Japon disposait de 2 millions d'installations photovoltaïques déjà depuis 2014, a précisé la SEIA, et en Australie c'est le cas depuis 2018. L'Europe avait déjà dépassé le niveau de 2 millions d'installations photovoltaïques en 2012. L'Allemagne avait, au début de 2019, 1,76 million de systèmes photovoltaïques en place, plus que la Californie. La petite Belgique, avec ses 10 millions d'habitants, disposait d'un demi-million de systèmes photovoltaïques, soit 10 fois plus que la France voisine. Bravo à la Belgique.

**Promotion du photovoltaïque auprès des propriétaires de maisons, même lorsqu'ils sont pauvres et qu'ils ne possèdent guère plus que le toit de leur maison.** En Belgique, en Suisse et dans d'autres pays, des entreprises commerciales proposent aux propriétaires de toits d'installer le PV de manière **totale** **gratuite**. En compensation, ils prennent le profit généré par le courant photovoltaïque au cours de ses 10 premières années d'exploitation. Par la suite, le panneau et l'électricité qu'il produit tombent entre les mains du propriétaire du toit. J'ai récemment reçu une telle offre chez moi à Bruxelles, même si j'ai déjà un générateur photovoltaïque sur mon toit. Le programme rencontre un tel succès en Belgique que tous ses installateurs de systèmes photovoltaïques sont complets jusqu'en 2020. «Vive le Soleil»!

**Ci-après, nous examinons le marché de l'énergie éolienne:** En 2019 le monde a installé une nouvelle capacité d'éoliennes de 61 GW, contre 51.3 GW l'année précédente. 88% de la nouvelle capacité a été onshore et le reste offshore. Le Danois Vestas a pu maintenir sa position de global leader de l'industrie éolienne. Il est suivi

de l'Européen Siemens-Gamesa, le Chinois Goldwind et l'Américain GE. La France n'a pas de fabricant notable dans l'industrie éolienne.

Le marché allemand a été particulièrement affecté depuis l'année 2019 par une opposition grandissante sur le plan local. L'Allemagne est devenue une particularité du marché éolien global et nous allons y passer plus en détail dans le chapitre consacré à ce pays. L'Allemand Enercon, jadis un fleuron de l'industrie éolienne allemande et mondiale est passé près de la faillite en 2019 avec un demi milliard d'€ de déficit et des milliers de son personnel à licencier. Trop dépendant du seul marché national il a dû en payer les frais. L'opposition locale est l'une des raisons pour lesquelles l'énergie éolienne est en train de perdre du terrain face au photovoltaïque. En Allemagne, l'approbation de nouvelles installations d'éoliennes prend en moyenne deux ans de retard, la plupart d'entre elles étant soumises à un tribunal. Dans d'autres pays comme la France, l'opposition est également forte.

La liste noire des pays les plus prospères sur les marchés mondiaux de l'énergie éolienne recommence avec la Chine. Il avait 221 GW de capacité éolienne installée après 2018, suivi de l'UE avec 178 GW, des États-Unis avec 96 GW, de l'Allemagne avec 59 GW, de l'Inde avec 35 GW, du Royaume-Uni avec 20,7 GW, du Brésil avec 14,5 GW et de la France comme n°8 avec 15,3 GW. Le classement des nouvelles installations cette année était le même, à l'exception du Royaume-Uni qui a ajouté moins de capacité nouvelle que le Mexique et la Suède.

Selon la WWEA, la World Wind Energy Association, l'énergie éolienne a fourni en 2018 déjà 6% de la demande mondiale en électricité. Dans l'UE, l'énergie éolienne a fourni en 2018 même 14% de la demande, soit 2% de plus que l'année précédente. Le vent offrant plus d'heures de fonctionnement que le PV, il génère plus de kWh par kW installé. Selon le «Wind Kraft Journal» allemand, 49% de toutes les nouvelles capacités installées dans l'UE en 2018 étaient de l'énergie éolienne.

D'après le GWEC, le concurrent de la WWEA, 46,8 GW des nouvelles installations mondiales en 2018 étaient à terre et 4,5 GW en mer.

Selon la BNEF, 128 milliards de dollars ont été consacrés à la nouvelle énergie éolienne en 2018, 101 milliards de dollars à l'onshore et le reste à l'offshore: cela signifie en moyenne un coût moyen de 2 100 USD par kW installé à terre et environ 6 000 USD par kW en offshore, environ 3 fois plus.

En 2018, dans l'UE, on avait 7,5 GW représentant 16,3 milliards d'€ d'énergie éolienne onshore neuve, et 2,7 GW pour 10,7 milliards d'€ en offshore. L'Europe a installé plus de capacité offshore que la Chine en 2018. Par kWh, les prix ont baissé dans des cas favorables à un peu moins de 2,5 centimes d'euros le kWh. Cependant, lors du dernier appel d'offres pour l'énergie éolienne au premier trimestre 2019 en Allemagne, le prix approuvé du kWh était de 6,1 cents. Pour l'offshore, ils sont actuellement beaucoup plus élevés, de l'ordre de 10 cents / kWh – bien qu'ils aient baissé de 24% cette année-là. On pense que 5 cents / kWh pour l'offshore pourraient être atteints dans le futur. Les axes de développement vont vers les plus grandes turbines de 12 à 15 GW, les tours en mer plus légères et un coût d'investissement inférieur d'un tiers. En pratique, Siemens / Gamesa propose pour 2022 une installation offshore de 10 MW avec un diamètre de rotor de 193 m et une hauteur de tour de 140 m.

Actuellement, les éoliennes installées à terre en Allemagne ont une capacité moyenne de 1,9 MW; les nouveaux de 2018 ont un diamètre de rotor de 114 m et une hauteur de tour de 129 m. De nouveaux développements sont également en cours pour les projets onshore: pour 2020 Siemens / Gamesa prévoient leur nouvelle plate-forme SG 5.X dans la plage de 5,8 MW avec des tours pouvant atteindre 170 m et des rotors de 165 m de diamètre. GE teste aux Pays-Bas le GE 5.3-158 Cypress. Une des innovations est les pales LM qui peuvent être pliées en deux pour un transport plus facile.

En 2018, le marché des éoliennes a été dominé comme toujours par le groupe danois Vestas, qui a installé une nouvelle éolienne sur 5 dans le monde cette année-là. La liste des 10 plus grands producteurs d'éoliennes comprend 5 sociétés éoliennes chinoises, mais elle n'est pas dominée par la Chine comme dans le cas du

photovoltaïque. Vestas est suivi du chinois Goldwind, suivi de Siemens / Gamesa, de l'américain GE Renewables, du chinois Envision, de l'allemand Enercon, du chinois Mingyang, de Nordex d'Allemagne, de United Power et de Sewind, tous deux de Chine.

**Nous examinons enfin le problème de la gestion des grands réseaux électriques nationaux lorsque le mélange de sources renouvelables intermittentes tel le photovoltaïque et l'éolien est devenu important: la gestion de l'alimentation en « feed in », FIT.**

Avec une part importante d'énergie photovoltaïque et éolienne dans un réseau, il est plus délicat d'assurer un équilibre exact entre la production et la demande à tout moment. C'est déjà un problème en Allemagne aujourd'hui. Lorsque l'offre de courant photovoltaïque devient trop élevée, son accès au réseau est restreint par le gestionnaire du réseau. En 2018, celui-ci a dû verser au total 1,4 milliard d'euros en compensation aux producteurs photovoltaïques.

Pour éviter les pertes, on peut utiliser des batteries électriques. Comme mentionné précédemment, la plupart des installations photovoltaïques en Allemagne sont aujourd'hui associées à des **batteries**, notamment celles au Li. Elles sont récemment devenues beaucoup moins chers et plus fiables; leur volume est inférieur à celui des batteries au plomb: c'est ce dernier facteur qui explique le succès récent des scooters électriques dans nos villes.

L'alternative consistant à convertir un courant PV excessif en **chaleur** n'est pas une bonne idée. Le courant PV est trop précieux pour cela. «**L'électricité transformée en gaz**» est une autre voie à l'étude. Par exemple, à Pritzwalk en Allemagne, la capacité renouvelable installée produit 4 fois plus que les besoins locaux en électricité. Le courant excessif y est utilisé pour produire de l'hydrogène par électrolyse. L'hydrogène est acheminé vers le réseau de gaz local.

En France, le projet **Solarzac** est à l'étude. Le projet est très grand et innovant, il suscite une forte opposition jusqu'à présent. Dans la plaine du Larzac, dans le sud de la France, il est proposé d'installer un générateur photovoltaïque de 320 MW sur 400 ha. L'électricité de 180 MW irait au réseau voisin, le reste étant converti en **méthane** via l'hydrogène. Ce processus nécessite beaucoup d'eau alors que la région est connue être sèche, d'où l'opposition. Le Larzac est un site classé au patrimoine mondial de l'UNESCO pour sa beauté.

Les opérateurs de réseaux en Allemagne ont le problème supplémentaire que le courant de vent est principalement produit dans le Nord du pays alors que la demande est plus forte dans le Sud. L'Allemagne est en retard dans la construction d'une ligne de réseau supplémentaire Nord-Sud, comme promis. Une autre solution consiste à installer des batteries de 500 MW comme «accélérateur de réseau». En outre, on peut réguler à la baisse les centrales électriques conventionnelles du Nord lorsque l'offre de courant éolien y est élevée et augmente la production conventionnelle du Sud.

La Chine est un pays beaucoup plus grand que l'Allemagne (les Allemands l'oublient souvent) et a ces problèmes à une échelle bien plus grande: une grande partie de son courant éolien est générée dans ses provinces de l'Ouest très à l'intérieur des terres avec une concentration de la demande près de la côte Est. La Chine construit un super-réseau innovant entre l'Est et l'Ouest. Fin 2018, une ligne de réseau de 3.200 km destinée à la transmission de 12 GW est devenue opérationnelle. La technologie utilise le courant continu et la tension la plus élevée de 1,1 million de Volts jamais vue, pour les faibles pertes qu'elles offrent. Les Européens ABB et Siemens ont participé à cette gigantesque entreprise.

## **Chapitre 4.1.4 Nouvelles tendances**

### **4.1.4.1 Autoconsommation**

En Europe, l'autoconsommation d'électricité à partir de sources renouvelables est encouragée dans la directive européenne «**Énergie et climat**» de décembre 2018 mentionnée précédemment. La directive demande aux pays membres de fixer des réglementations nationales qui donnent aux individus et aux

communautés le droit de produire, de consommer et de vendre leur propre électricité sans charges administratives excessives.

En pratique, tous ceux qui ont installé leur propre générateur photovoltaïque sont toujours connectés aux réseaux électriques locaux. Même une batterie, si elle est disponible, sera dans la plupart des cas insuffisante pour assurer une autonomie électrique totale. La question se pose alors de savoir comment les gestionnaires de réseau et les autorités politiques responsables factureront le client «autoconsommateur» pour l'utilisation du réseau. Par exemple, en Wallonie, une province de Belgique, l'opérateur photovoltaïque privé ne paie que le courant net qu'il achète sur le réseau, moins l'excédent qu'il réinjecte lorsque sa propre production est supérieure à ses besoins. Les compteurs sont réversibles. Par conséquent, le propriétaire du PV a un avantage sur le client du réseau qui n'a pas de PV. D'ici 2020, le gestionnaire de réseau introduira, à la demande du gouvernement local, un coût fixe supplémentaire pouvant atteindre 450 € par an pour le propriétaire du système photovoltaïque, uniquement pour la connexion au réseau. 150.000 propriétaires Wallons de PV sont concernés.

Certains gouvernements vont même plus loin en imposant des taxes sur l'autoconsommation. C'est actuellement le cas en Autriche où les consommateurs qui produisent eux-mêmes sont taxés sur ce qu'ils produisent; d'ici 2020, cette taxe pourrait être annulée. En Allemagne, l'opérateur photovoltaïque est taxé (TVA) sur l'électricité qu'il produit et utilise lui-même, ainsi que sur l'électricité qu'il vend au réseau. La situation est différente en France. Les systèmes photovoltaïques privés de 3 kW ou moins ne sont pas taxés. L'autoconsommation est même subventionnée en France. En 2019, un bonus de 400 € / kW est prévu pour les systèmes installés d'une capacité inférieure à 3 kW et la production non utilisée par le propriétaire est rachetée à 10 cents / kWh. Pourtant, toujours en France, seulement 17% de la puissance photovoltaïque installée est destinée à l'autoconsommation. Tous les autres injectent tout ce qu'ils produisent dans le réseau. Il est vrai que l'autoconsommation en France, où le kWh acheté sur le réseau coûte environ 15 cents, est moins rentable qu'en Allemagne ou en Belgique, où les consommateurs privés paient deux fois plus. Cela concorde avec le fait que la France ne comptait que 40 000 autoconsommateurs en 2018.

#### **4.1.4.2 Énergies renouvelables sur les marchés libres de l'électricité: les PPA comme nouvel instrument du marché mondial**

Alors que les coûts mondiaux de l'électricité renouvelable continuent de diminuer de façon spectaculaire, la dernière tendance en ce qui les concerne est de se débarrasser des corsets des marchés réglementés tels les FIT, les appels d'offres et d'autres types de subventions. Les PPA, les accords d'achat d'électricité entre grands producteurs et grands consommateurs, jouent un rôle croissant. Les coûts sont très bas sur ces marchés libres: au premier trimestre 2019, les prix des systèmes photovoltaïques négociés se situaient entre 3,3 et 2,3 \$cents le kWh et de 4 à 1,4 \$cents par kWh pour l'énergie éolienne. À titre indicatif, les États-Unis ont mis en place un **indice de prix PPA**. À compter de 2021, le programme PTC de soutien fédéral des États-Unis aura pris fin et on s'attend à un nouveau nombre record de PPA. En 2018, des PPA pour 8,6 GW ont été conclus dans le pays. En 2019, a été annoncé le REBA, le «Renewable Energy Buyers' Alliance» avec Google, Facebook, AT & T, Walmart et d'autres avec un objectif de plus de 60 GW de renouvelables sur les réseaux d'ici 2025.

Et il existe des exemples dans de nombreux pays qui suivent la nouvelle tendance.

En Allemagne, la « utility » EnBW prévoit une production d'énergie photovoltaïque de 400 MW à partir de 2020, sans subvention. Dans le Brandebourg, la plus grande centrale PV d'Allemagne est annoncée pour 175 MW sur 164 ha, pour un coût de 120 à 150 millions d'euros. De plus, les producteurs d'électricité Vattenfall et BayWA souhaitent mettre des installations PV sur d'anciens sites de lignite à ciel ouvert sans subvention. La «UmweltBank» a mis en place un produit de financement spécial pour les PPA. C'est la première banque allemande à offrir un prêt sur 25 ans pour les installations photovoltaïques à grande échelle sur le terrain. Pour obtenir le crédit, un prix de vente fixe en kWh est exigé pendant au moins 5 ans.

En Espagne, 700 MW d'énergies photovoltaïque et éolienne doivent être achevées d'ici à fin 2019 dans le cadre de PPA. Iberdrola a annoncé la plus grande centrale photovoltaïque de l'UE, une centrale de 500 MW sur 1.000 ha, le **Nunez de Balboa à Badajoz, dans l'Estrémadure**. Dans l'Estremadure, 2 GW d'énergies éolienne et photovoltaïque sont programmés dans le cadre de PPA.

La Norvège prévoit 1,5 GW d'énergie éolienne d'ici 2023 pour un coût en kWh de 3 cents.

La Chine construirait sa première grande centrale éolienne géante sans subvention en Mongolie intérieure: 6 GW pour 7 milliards de dollars à **Ulanqab** pour être prêts pour les Jeux olympiques de 2022.

#### **4.1.4.3 L'hydrogène vert à partir de l'éolien et du solaire**

C'est un renouveau pour l'hydrogène « renouvelable ». Il y avait déjà un grand intérêt pour l'hydrogène vert à la fin du siècle dernier. Notamment en Allemagne où des prototypes de voitures à hydrogène ont vu le jour. Mais ce n'était encore l'heure. Les ingrédients de l'hydrogène vert, le PV et l'éolien, étaient encore à un niveau de prix prohibitif. Comme le montre ce livre, les choses ont maintenant changé. Des voitures commerciales à l'hydrogène sont en vente. C'est Toyota qui les fabrique et l'un des premiers marchés a été la Chine. Tout se passe à petite échelle pour le moment, mais les idées pour un marché mondial important ne manquent pas.

L'Allemagne avait début 2020 mis en place un réseau de 82 stations service à l'hydrogène mais il n'y avait seulement 705 voitures pour en profiter. Mais l'Allemagne voit grand. D'ici 2030 20% de l'hydrogène devrait devenir renouvelable – actuellement il est plutôt fabriqué à partir du gaz naturel. Des unités d'électrolyse de 3 à 5 GW devraient être développées. Les Etats du Nord de l'Allemagne ont adopté en 2019 leur propre stratégie d'hydrogène. Elle est basée sur l'éolien et l'électrolyse. Pour commencer on prévoit 500 MW pour alimenter 150 000 voitures à hydrogène en combustible.

Dans le Nord aussi, à Hambourg ArcelorMittal vise un projet pilote pour la production d'acier à l'aide d'hydrogène dans une usine DRI (Direct Reduced Iron). Le VCI, l'Association allemande de l'industrie chimique voit l'hydrogène vert comme option valable pour remplacer l'hydrogène à partir du gaz naturel. Les fabricants d'acier ThyssenKrupp et Voestalpine voient également le potentiel de production d'acier sans émission de CO<sub>2</sub>. Ailleurs en Allemagne on voit l'avenir des piles à combustibles alimentées par l'hydrogène, non pas pour une application dans des voitures, mais comme unité produisant électricité et chaleur dans des applications particulières, par exemple de grands hôtels.

Le projet le plus ambitieux actuellement est hollandais et s'appelle NorthH2, annoncé en février 2020. Les parties prenantes sont Shell, Gasunie et d'autres. La source d'approvisionnement deviendrait de l'éolien offshore. Le client potentiel a été aussi identifié: l'industrie de la Ruhr. À plus grande échelle on verrait aussi un corridor Nord-Sud à travers le Rhin et les Alpes.

En Australie de l'Ouest les choses sont même plus avancées. Une installation de production hybride de 5 GW d'éolien et de PV doit servir à partir 2024 à la production d'hydrogène pour « Hydrogen Renewable Australia ».

En Afrique du Sud enfin Ballard commercialise des piles à combustible de 100 kW.

## **4.2 Les énergies renouvelables pour le chauffage et le transport**

### **4.2.1 La bioénergie, l'énergie polyvalente**

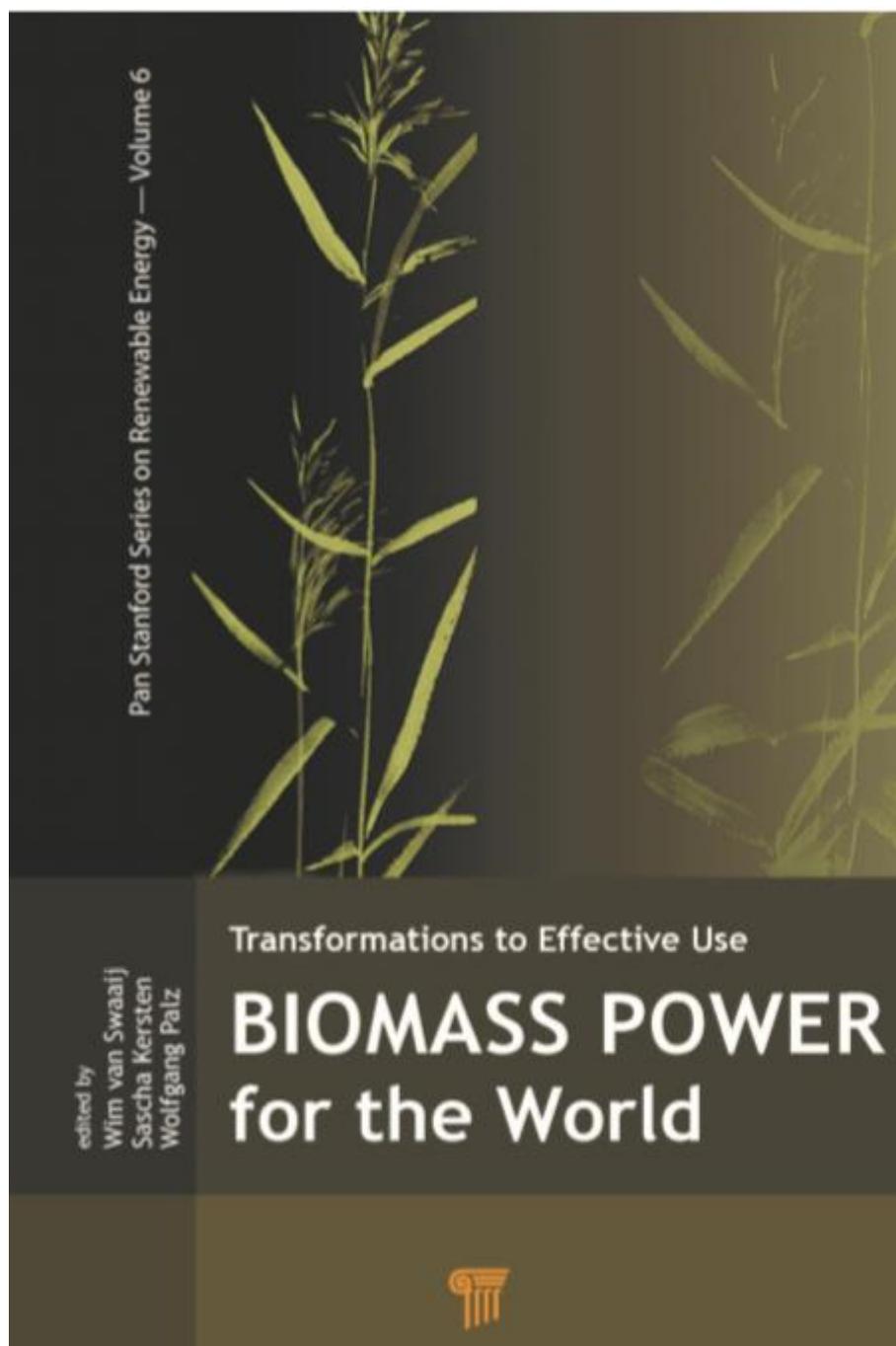
Contrairement au photovoltaïque, où un seul composant, la cellule solaire est répliqué 100 milliards de fois et étendu au monde entier, la bioénergie est quelque chose de beaucoup plus complexe. La biomasse dont elle dérive se présente sous la forme de produits de la sylviculture, de l'agriculture, de l'élevage du bétail et des flux de déchets provenant de la production et de la consommation de nos aliments. La conversion de ces

différentes formes de biomasse est également complexe. Il existe différentes façons de transformer la biomasse en un produit énergétique, biologique ou thermique. La transformation de la biomasse peut aussi engendrer de la pollution. Dans certains cas, des précautions spéciales sont nécessaires pour empêcher cette pollution. Pour les systèmes commerciaux, l'Europe impose depuis 2018 des limites strictes en matière de gaz d'échappement. Également pour éliminer la poussière en suspension, les cyclones, divers filtres peuvent devenir obligatoires.

La production de biomasse concerne l'ensemble de la biosphère. La matière verte qui nous entoure absorbe le rayonnement incident du Soleil. La matière et l'énergie ainsi créées finissent leur cycle par une décomposition thermique. La production et l'utilisation de la bioénergie consiste à récupérer une bonne partie de l'énergie avant que la décomposition ne commence.

La bioénergie est un vaste domaine. Nous avons publié un livre spécial de 700 pages consacré à ce sujet en 2015 : *Biomass Power for the World : Transformations to Effective Use* (édité par W. van Swaaij, S. Kersten et W. Palz, et publié à Singapour par Pan Stanford Publishing). Quatorze pour cent de la consommation mondiale d'énergie est aujourd'hui couverte par la bioénergie. C'est sans aucun doute l'énergie renouvelable la plus importante. Une grande partie de la bioénergie est consommée sous forme de bois de chauffage ou de charbon de bois pour la cuisson dans les pays en voie de développement.

La production et l'utilisation de la bioénergie à l'échelle mondiale a représenté un budget de 674 milliards de dollars en 2015, soit une augmentation de 15% par rapport au budget de 2010, 5 ans plus tôt.



Les biocarburants, le biogaz et les granulés de bois sont, avec le PV et l'énergie éolienne, les nouveaux venus du 21<sup>ème</sup> siècle au niveau mondial, à l'exception de la Chine qui a une longue tradition du biogaz, et du Brésil pour la production et l'utilisation du bioéthanol pour le transport. Contrairement au PV et à l'énergie éolienne, la bioénergie se présente sous différentes formes d'énergie stockée, ce qui la rend particulièrement bien adaptée pour être combinée avec eux.

Le tableau suivant donne pour l'année 2018 un aperçu des principales formes de bioénergies modernes au niveau mondial (en litres et en millions de tonnes équivalent pétrole [Mtep]).

	Volume du marché	Valeur du marché
Biocarburants liquides	155 milliards de litres/115 MTep	103 milliards de dollars
-Ethanol	-120 milliards de litres	-72 milliards
-Biodiesel	-35 milliards de litres	-31 milliards
Biogaz	20 MTep	15 milliards
Granulés de bois	12 MTep	6 milliards

Ces chiffres concernent la plupart des pays industrialisés. Si l'on inclut la Chine, ils sont considérablement plus élevés dans le cas du biogaz : avec ses dizaines de millions de digesteurs, le marché chinois du biogaz est environ cent fois plus important que celui du reste du monde.

L'importance économique de ces formes modernes de bioénergie est impressionnante. Bien que, comme nous l'avons mentionné précédemment, ils n'aient commencé leur croissance explosive qu'au début du 21<sup>ème</sup> siècle, ils font partie intégrante du passage au siècle solaire dont nous jouissons actuellement.

Par exemple, les **biocarburants pour le transport** qui ne représentaient que 10 Mtep en 2000 ont maintenant largement dépassé la barre des 100 Mtep et sont, avec plus de 100 milliards de dollars par an, un facteur économique important.

Environ 60 % de l'**alcool** destiné au transport dans le monde est produit et consommé aux États-Unis. Au tournant du siècle, la part de l'éthanol dans l'essence américaine n'était que de 1 % ; alors que la norme est aujourd'hui 10% (E10). Il pourrait y en avoir plus, mais il y a ce qu'on appelle un mur de mélange : les moteurs de voitures nécessitent désormais d'être modifiés pour tolérer un degré plus élevé. De plus, il y a un manque d'infrastructures pour l'approvisionnement de l'E15. L'E85 avec 85% de bio-alcool est utilisé dans le Midwest américain, où se trouvent les grandes usines de production d'éthanol, et où plus de 10 millions de véhicules pouvant rouler à l'E85 y sont utilisés. Le marché américain de l'éthanol ne connaît actuellement plus de croissance excessive. Toutefois, il y a toujours en arrière-plan le mandat de la norme sur les carburants renouvelables de 2007. Il prévoit une augmentation de la consommation de 15 milliards de litres en 2006 à 136 milliards de litres ou 36 milliards de gallons en 2022.

Le Brésil produit un quart de l'éthanol mondial. C'est traditionnellement le pays ayant le taux d'utilisation nationale le plus élevé, dont l'origine remonte aux programmes nationaux des années 1970 déclenchés par la crise mondiale des prix du pétrole de 1973. Durant ces années, j'ai eu l'occasion de suivre personnellement leurs créations lorsque j'étais membre d'une mission gouvernementale française se rendant dans le pays pour discuter d'éventuelles coopérations.

Aujourd'hui, environ 50 % du carburant pour le transport de véhicules légers au Brésil provient de la production nationale de bio-alcool. Il n'est pas spécifiquement subventionné, mais n'est pas aussi lourdement taxé que les carburants conventionnels. Il correspond à une part importante de l'industrie nationale de la canne à sucre dans le sud du pays (53% pour le sucre, 42% pour l'éthanol qu'il produit). Le bioéthanol est un produit à forte intensité de travail : 3 millions de personnes sont employées dans ce secteur au Brésil.

Le bio-alcool pour le transport est utilisé sous deux formes : E27 et E100. E27 est un mélange obligatoire imposé par la législation nationale, avec 27 % d'éthanol anhydre dans l'essence ordinaire. E100, aussi appelé gazohol, se compose d'alcools hydratés. Le Brésil a connu une révolution industrielle sur le marché de

l'automobile, associée au programme sur les biocarburants. L'année 2003 a vu l'introduction des véhicules polycarburant (VCM), dont le Brésil en compte aujourd'hui 25 millions, les autres types de véhicules ayant quasiment disparu des routes. Les importateurs de voitures conventionnelles comme VW et Ford ont dû s'adapter. Les VCM pouvant fonctionner avec n'importe quel mélange, E27 ou E100, les consommateurs choisissent à la station-service ce qui est localement l'option la moins chère.

L'UE a un objectif obligatoire depuis 2009, faisant partie de la directive 2009/28/CE, qui est contraignante pour les 28 pays membres de l'UE. En l'état actuel des choses, l'objectif de 10% de biocarburants pour le transport d'ici 2020 ne sera pas atteint. Une particularité du marché européen de l'automobile est la prédominance du diesel sur l'essence, qui fait partie de l'histoire du "scandale du diesel" des constructeurs automobiles européens depuis 2016. Quoi qu'il en soit, l'Europe utilise presque deux fois plus de biodiésel (6,6 %) que d'éthanol (3,4 %).

Le bioéthanol est aujourd'hui utilisé dans le monde entier pour le transport, et une part obligatoire est imposée dans plus de 30 autres pays. Même s'il n'est pas vendu spécifiquement à la station-service comme E10, E85 ou E100, pratiquement toutes les essences ont un petit pourcentage d'alcool afin d'augmenter l'indice d'octane.

**Le biogaz** est un autre secteur important de la bioénergie. La Chine est un leader mondial avec 80 000 exploitations agricoles et des millions de petits digesteurs. La plupart d'entre eux ont été installés au début de ce siècle. Les autres grands producteurs sont l'Allemagne, les États-Unis et le Royaume-Uni. L'Europe exploite 17500 installations de biogaz. A titre de comparaison, les États-Unis ont installé 2200 installations, principalement pour le traitement des déchets.

L'Allemagne joue un rôle particulier à plusieurs égards : c'est de loin le plus important producteur européen, avec 11000 usines en exploitation en 2018. Le développement du biogaz en Allemagne a commencé avec les initiatives de l'EEG, en relation avec le PV et l'énergie éolienne. En outre, l'Allemagne est le promoteur particulier de la digestion des céréales avec le fumier traditionnel et d'autres déchets agricoles. L'innovation est d'alimenter l'ensemble des plantes dans le digesteur, de la racine jusqu'au fruit. En Allemagne, les plantes destinées à la digestion sont cultivées sur 1400 ha. de terres agricoles.

L'Allemagne compte 44000 emplois dans le secteur de la bioénergie. Elle a une capacité de production de 4,2 GW de biogaz, dont la plupart sont des centrales de cogénération. Le biogaz crée une valeur annuelle de 8,3 milliards d'euros. Certaines usines ont la possibilité d'extraire le méthane du biogaz pour injection dans les réseaux de gaz. Le biogaz peut également être utilisé pour le transport.

Le tarif de rachat (FIT) proposé dans le cadre de l'EEG s'élève à 16,9 cents/kWh. Ce tarif généreux s'explique par l'attrait particulier du biogaz pour fournir un approvisionnement continu en combinaison avec l'intermittence de l'énergie solaire ou éolienne. Il s'agit également d'un soutien à l'agriculture allemande. En outre, l'agriculture profite également des installations photovoltaïques déployées sur les toits des grandes fermes.

En janvier 2017, un nouveau règlement est entré en vigueur, le nouveau EEG 2017. Pour le biogaz, comme pour les autres énergies renouvelables, Berlin a introduit un système d'enchères, mais la rentabilité de la production de biogaz reste intacte. Ce qui est nouveau est la limitation du nombre de nouvelles installations (environ 200/an). L'ajout de céréales est également limité à 50%.

Le marché mondial des **granulés de bois** est lui aussi assez récent. La capacité de production s'élève à 42 millions de tonnes. Des usines sont présentes dans 21 pays, mais la plupart proviennent d'Amérique du Nord. Les granulés sont utilisés à la place de l'huile de chauffage dans le secteur industriel, pour le chauffage urbain.

La **co-combustion** dans les chaudières à charbon est le nouveau marché préféré. Au Royaume-Uni, la centrale électrique à charbon de Drax a converti les deux tiers de sa capacité aux granulés.

Le coût de l'électricité issue de la co-combustion est attractif, car relativement bas (2 cents/kWh) lorsque la ressource est disponible localement. Le prix des granulés atteint environ 150 \$ la tonne, pour des applications industrielles.

L'Europe utilise 20 millions de tonnes de granulés chaque année. C'est le plus grand marché du monde, dont un tiers est importé, principalement de l'Amérique du Nord.

#### **4.2.2 Réseaux de chaleur favorisant la chaleur géothermique, la biothermie, les rejets thermiques des installations d'incinération et la cogénération**

Plusieurs centaines de milliers de km de conduites de chauffage sont actuellement utilisés dans le monde entier pour le chauffage urbain, les principaux pays concernés étant la Chine, la Russie et l'Europe. Dans l'UE, 60 millions de personnes sont raccordées à un réseau de chaleur. 11 à 12% de la demande de chaleur est couverte par le chauffage urbain. Une grande partie de l'énergie distribuée provient de sources renouvelables.

La France, l'un des leaders européens, exploite aujourd'hui plus de 5400 km de réseaux fournissant de la chaleur à 2,4 millions d'équivalents d'appartements. Environ la moitié de la chaleur provient de sources renouvelables telle la biomasse et la chaleur résiduelle provenant de la combustion des déchets ménagers. Le coût de la chaleur fournie sous forme de vapeur d'eau serait compétitif en France. L'extension des réseaux est soutenue par un fonds national de chaleur.

En région parisienne, sur un des multiples sites de production, la chaleur fournie aux réseaux provient de l'incinération de 140.000 t de granulés de bois depuis 2016. Une partie de la chaleur provient de sources géothermiques. La région parisienne a en effet la particularité de se trouver sur une grande bulle d'eau souterraine chaude (environ 28° C et plus) avec de l'eau propre à 600 m de profondeur. Il se renouvelle par infiltration d'eau de pluie. Dans la région, 4% de la chaleur du district provient de ces sources géothermiques; mais pas dans la ville de Paris elle-même. Paris dispose de 700 km de systèmes de chauffage urbain, en extension constante. La chaleur sur ceux-ci provient de l'incinération d'ordures ménagères.

#### **4.2.3 Collecteurs de chaleur solaire**

C'est toujours la même histoire : comme les autres énergies renouvelables, l'énergie solaire thermique s'est développée à partir de rien au cours de ce nouveau siècle. Au tournant du siècle, le monde n'avait installé que 70 km<sup>2</sup>, alors qu'en 2018, la capacité thermique totale a atteint une zone de collecte d'environ 820 km<sup>2</sup>. Les rendements spécifiques en Europe sont de 575 kWh de chaleur à 50°C et 411 kWh à 75°C par m<sup>2</sup> et par année pour un capteur plan. Ces chiffres sont supérieurs pour un capteur à tube sous vide.

Ces 820 km<sup>2</sup> de capteurs de chaleur solaire sont à comparer aux 3000 km<sup>2</sup> déployés actuellement pour générer les 450 GW de la puissance PV, comme mentionné précédemment.

Plus de 120 millions de systèmes de chauffage solaire sont en service dans le monde entier, dont 70% en Chine, suivi de l'UE et de l'Amérique du Nord. La Chine a déployé les produits à valeur ajoutée la plus élevée : les capteurs à tubes sous vide. Les systèmes chinois sont également les plus compétitifs par rapport aux systèmes plans qui dominent le reste des marchés mondiaux. La grande majorité (94%) sont utilisés pour les chauffe-eau solaires domestiques pour les maisons individuelles.



**Figure 4.3** Chauffe-eau solaire chinois (Photo de l'auteur).

Le Danemark a installé fin 2016, le plus grand réseau de chauffage urbain du monde (surface de capteurs solaires = 157000 m<sup>2</sup>, soit 15,7 ha).

Le chiffre d'affaires annuel global du chauffage solaire est de 25 milliards de dollars, et le secteur génère 730000 emplois.

### 4.3 Bilan des réalisations mondiales

De ce que nous avons analysé jusqu'à présent, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Les capacités de production d'énergie renouvelable que sont l'hydroélectricité, l'énergie éolienne et le photovoltaïque ont conquis les marchés mondiaux de l'énergie, et dépassé les capacités mondiales installées à partir de sources fossiles (charbon et nucléaire en tête).
- Il n'y a pas d'idéologie en jeu : les sources conventionnelles ont perdu les faveurs des investisseurs lorsque les nouveaux venus du solaire les ont battues sur leur propre terrain : le prix du marché.
- Cette croissance a commencé il y a seulement 18 ans. Cette révolution industrielle a généré des milliers de milliards de dollars américains, et transformé notre jeune siècle en un "Siècle solaire". La plupart des gens ne s'en sont pas encore rendu compte, mais non seulement nous sommes entrés, mais nous sommes déjà au beau milieu d'un "âge solaire".
- Outre le secteur de l'électricité, les marchés de la bioénergie moderne et de l'énergie solaire thermique ont également connu une croissance similaire.
- Les énergies renouvelables permettent un meilleur de confort dans le secteur du bâtiment, tout en réduisant la consommation d'énergie. Cette tendance va se renforcer à l'avenir : une directive européenne sur les bâtiments impose l'obligation de construire tous les nouveaux bâtiments en Europe à partir de 2021 dans la catégorie à consommation nette très faible ( "Near-Zero-Energy-Buildings"). Cela signifie qu'il faudra appliquer systématiquement le PV, le stockage et les autres énergies renouvelables dans le bâtiment et sur son enveloppe. La Californie vient d'imposer de rendre le PV obligatoire sur tous les nouveaux bâtiments à partir de 2020.
- Le développement des énergies renouvelables a été initié par des politiques spécifiques en Allemagne. Entre-temps, le leadership du marché s'est déplacé vers la Chine, suivi par les États-Unis.
- La consommation d'énergie diminue (-7% en Europe depuis 2000). Les émissions de CO<sub>2</sub> sont également sous contrôle et sont stables au niveau mondial depuis 2013, malgré une croissance économique de 3%.
- Les politiques en matière d'énergies renouvelables ont été renforcées par des opérations de soutien spécifiques tels que le tarif de rachat (Feed-In-Tariff, FIT) ou le PTC américain, les crédits d'impôt à la production applicables à l'énergie éolienne, les crédits d'impôt à l'investissement pour le PV, les Renewable Portfolio Standards (RPS) aux États-Unis, les Green Bonds, et bien d'autres encore.
- Le soutien financier initial pour stimuler les marchés émergents des énergies nouvelles est toujours resté bien en deçà des subventions aux énergies fossiles et nucléaires. Outre les centaines de milliards de dollars donnés chaque année par les pays du G20, certains États américains ont subventionné, avant même l'arrivée du nouveau président américain, et subventionnent leur industrie houillère (20 milliards de dollars en 2013) ; d'autres États apportent un soutien hors marché pour éviter l'effondrement de l'exploitation de leurs centrales nucléaires.
- Depuis le début du siècle, 10 millions d'emplois dans le secteur des énergies renouvelables ont été créés, et pourraient atteindre 24 millions d'ici 2030, dont un tiers en Chine. Aux États-Unis, on estime qu'un emploi dans le solaire induit deux emplois supplémentaires dans d'autres secteurs : les 260000 emplois directs du PV correspondent en fait à quelque 790000 au total.

La production économique correspondante est estimée à 154 milliards de dollars par an.

Enfin, un dernier mot sur les finances et la concurrence.

D'ici 2017, les nouvelles centrales au charbon produiront l'électricité à 7-10 cents/kWh, contre 5 cents/kWh ou moins pour l'éolien, et 7-8 cents/kWh pour l'électricité solaire provenant de centrales PV en Europe centrale et moins ailleurs.

Le parc actuel mondial de 580 GW d'énergie éolienne a produit environ 1160 TWh d'électricité cette année, à 5 cents/kWh soit une valeur de **58 milliards de dollars**. D'autre part, pour l'extension du parc, en comptant 1 600 \$/kW par éolienne installée, le décaissement total pour les installations globales de 50 GW s'élève à **80 milliards de dollars** d'ici 2018.

-Les 450 GW d'énergie photovoltaïque installés à l'échelle mondiale d'ici 2018 produisent une valeur de 46 milliards de dollars dans l'hypothèse d'une production de 540 TWh d'électricité et d'un prix du kWh de 8 cents. Toujours avec l'idée d'agrandir le parc PV, ceci peut être comparé à un investissement de 100 milliards de dollars pour 75 GW à un prix d'investissement moyen de 1 300 \$/kW cette année-là.

En d'autres termes, d'ici quelques années, lorsque d'une part, le parc de centrales PV et éoliennes aura encore augmenté et que, d'autre part, les coûts d'installation des systèmes auront diminué encore plus, les investissements pour l'installation de nouvelles centrales deviendront équivalents aux revenus de la production des parcs existants. Ceci signifie que financièrement, les centrales en activité génèrent l'argent nécessaire pour en installer de nouvelles. Cette idée fonctionne tant que la durée de vie dépasse bien les 10 ans qui sont à la base des calculs de kWh. Cependant, il ne fait aucun doute que les générateurs PV ont une durée de vie de plus de 40 ans et pour les éoliennes, on compte actuellement plus de 30 ans.

## **4.4 Les énergies renouvelables dans le monde**

### **4.4.1 Chine**

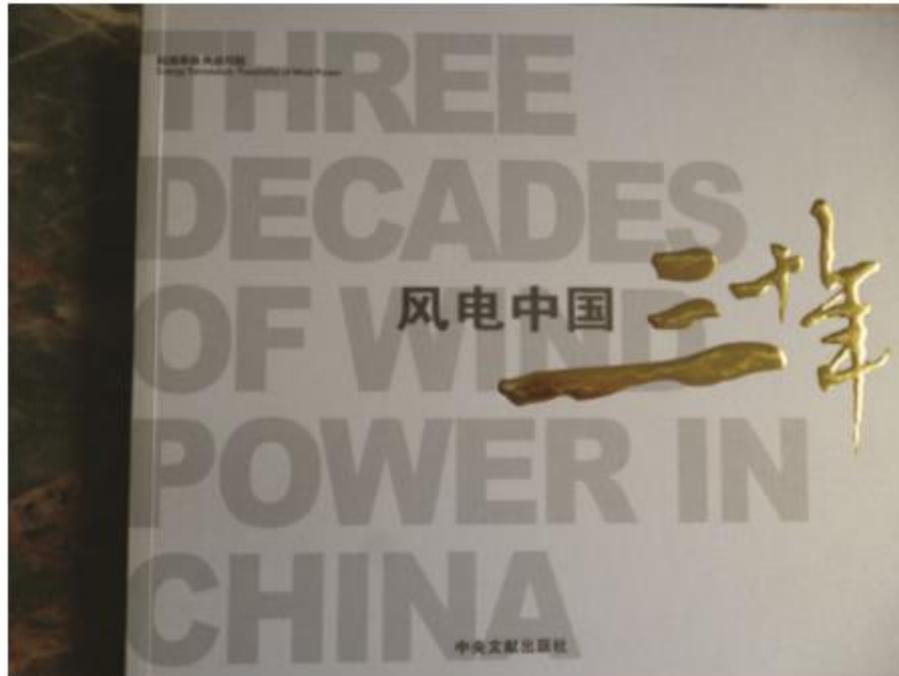
La capacité de production d'électricité de la Chine, qui s'élevait à 1649 GW en 2016, était la plus élevée au monde. Elle possède également la plus grande capacité de production d'électricité à partir du charbon.

Comme déjà mentionné, la Chine est le champion du monde sur les marchés de l'électricité renouvelable pour l'hydroélectricité, l'énergie éolienne et le photovoltaïque.

La capacité hydroélectrique de la Chine représente 20 % de sa capacité totale et a doublé depuis 2007.

Pour l'éolien, elle est passé de 1 GW en 2000 à 188 GW en 2017. Un système national de soutien par tarif de rachat est appliqué depuis 2009 et a été révisé récemment. Les tarifs suivants sont valides depuis 2017 : entre de 6 cents à 8,5 cents par kWh selon les quatre régions. Pour la première fois, un tarif spécial de 12,7 cents/kWh pour l'électricité éolienne offshore a été introduit.

Le marché chinois du photovoltaïque s'est récemment développé à une vitesse extraordinaire. En 2016, il a dépassé les installations PV cumulées de l'Allemagne et sa propre capacité nucléaire. Un an plus tard, en 2017, la capacité photovoltaïque de la Chine avait dépassé la barre des 130 GW soit trois fois la capacité installée en Allemagne.



**Figure 4.4** Un livre sur l'énergie éolienne en Chine publié en 2010, La Révolution Energétique : l'option éolienne, par l'Association chinoise de l'énergie éolienne.

Depuis 2008, la Chine est le plus grand producteur de modules photovoltaïques au monde. Toutefois, au cours des premières années, la quasi-totalité a été exportée et son marché intérieur n'a franchi la barre des 1 GW qu'en 2011, soit plus de 10 ans après l'Allemagne. Il ne manquait pourtant pas de programmes PV : la Chine avait dans les années 1990 un programme « brillance » ("Brightness" en anglais) et un programme d'électrification urbaine ("Township Electrification Program"), mais les marchés sont restés minuscules. Depuis 2006, la Chine s'est dotée d'une loi sur les énergies renouvelables qui fixe des objectifs et impose le raccordement au réseau et l'achat d'électricité. En 2010, le tarif de rachat a été porté à 1 RMB (15 cent\$) par kWh, et le PV bénéficie d'un enthousiasme national. Cela a permis de rentabiliser les investissements et le démarrage des marchés. Comme pour l'énergie éolienne, les tarifs de rachat ont été révisés en 2017. Il n'y a pas eu de forte réduction, ce qui encourage la poursuite de l'extension du marché photovoltaïque. Les tarifs de rachat sont désormais de l'ordre de 9,4 à 12,9 cents/kWh. En mai 2018 il y a eu une nouvelle mise à jour des tarifs avec une légère réduction de 0.05 RMB/kWh (7,5 cents) dans les quatre régions du pays concernées. Ceci a eu comme conséquence de réduire le taux d'installation du PV en Chine de 53 GW en 2017 à environ 35 GW l'année après. Le programme chinois de réduction de la pauvreté dans les villages par le PV est resté inchangé à 0.42 RMB/kWh



**Figure 4.5** Pékin, 2015. Présentation publique de la traduction chinoise du livre de l'auteur « Power for the World ». De gauche à droite : Gao Jifan, président de Trina et président de l'Association Chinoise de l'Industrie Photovoltaïque, l'auteur, et son ami Qin Haiyan, président de China Certification for RE. Au micro, Li Junfeng, directeur de la China RE Association et DG du National Centre of Climate Change Strategy.

La Chine est un vaste pays dont la pleine électrification n'a été réalisée qu'en 2015. De 2013 à 2015, 4 milliards de dollars ont été investis pour fournir de l'électricité aux 2,73 millions de personnes qui en manquaient encore, en particulier au Tibet. L'offre la moins chère était de 0,5 à 1 kW de PV avec un investissement de 1 400 \$ à 3 200 \$ par ménage.

Comme mentionné précédemment, la Chine est le leader mondial de la production et de l'utilisation du biogaz et du chauffage solaire.

Concernant les capteurs solaires, fin 2017, la Chine disposait d'une capacité totale de plus de 500 millions de m<sup>2</sup>, ce qui représente environ 80 % du total mondial. En 2016, elle a installé 34 millions de m<sup>2</sup> de capteurs à tubes sous vide et 5,4 millions de m<sup>2</sup> de capteurs plans. Environ 70 % des capteurs sont utilisés pour les systèmes de production d'eau chaude solaire (SHW), le reste pour le chauffage et la climatisation des locaux, et les applications dans l'industrie et l'agriculture. Un SHW avec des capteurs à tubes coûte en Chine environ 200 \$ par m<sup>2</sup> de surface de capteur.



**Figure 4.6** Pékin, 2015. L'auteur avec le vice-ministre du Ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information (MIIT) du gouvernement de la Chine, l'honorable Huai Jinpeng.

Pour le biogaz en Chine, un aperçu a été donné par Li Xiujin de l'Université de Génie Chimique de Pékin. D'après Li, le biogaz a été promu par le gouvernement depuis les années 1970. En 10 ans, entre 2003 et 2013, 42 millions de digesteurs domestiques ont été installés, chacun d'une capacité de 8 à 12 m<sup>3</sup>, et 160 millions de personnes dans les zones rurales chinoises en bénéficient. De plus, 80000 unités ont été installées par les éleveurs. Environ 15 milliards de m<sup>3</sup> de biogaz sont produits chaque année. Au total, le gouvernement a accordé une aide de 5 milliards de dollars. Le secteur emploie 290000 personnes et compte plus d'un millier d'entreprises de production et de sociétés de services.

Le succès de l'énergie solaire n'est pas qu'une question pour l'avenir seul. Depuis le changement de siècle, la roue a de nouveau tourné. Les énergies conventionnelles ont emporté le siècle et elles ont ramené l'énergie du Soleil pour la Terre. ?????

#### **4.4.2. Les énergies renouvelables aux États-Unis**

En 2018, la capacité de production d'électricité à partir de sources renouvelables présente 20 % de part de marché de la capacité américaine totale. Au cours de la dernière décennie, la part de la l'hydroélectricité, l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque n'ont cessé d'augmenter tandis que celle des capacités conventionnelles issues du charbon, du nucléaire et du pétrole a diminué. En 2016, 90% de tous les investissements dans le secteur, concernaient ceux des énergies renouvelables à savoir 46 milliards de dollars d'investissements dans 21,5 GW de nouvelles capacités électriques de PV et d'énergie éolienne.

D'après la Federal Energy Regulatory Commission FERC et l'EIA, la Energy Information Administration, la production d'électricité renouvelable américaine a pour la première fois dépassé en avril 2019 celle du charbon, avec 23% de l'approvisionnement national total en énergies renouvelables et 20% en charbon. Pourtant, on prévoit que pour les années complètes jusqu'en 2021, la production au charbon continuera encore de dominer la production d'électricité renouvelable. D'ici 2020, la production d'énergie renouvelable dépasserait également celle du nucléaire.

En termes de capacité énergétique, les énergies renouvelables viennent aujourd'hui, en 2019, en troisième position après le gaz naturel, puis le charbon, mais avant le nucléaire. La tendance s'accroîtra pour atteindre 25% d'ici 2022. La capacité hydroélectrique du pays, qui s'élevait à 8,41% du total, devrait être dépassée d'ici à fin 2019 par l'énergie éolienne. Le PV était au début de 2019 à plus de 4% de la capacité totale; 30% de celui-ci est décentralisé et intégré aux bâtiments. Sa part a doublé depuis 2017.

D'ici 2022, l'augmentation de la capacité de production d'énergie renouvelable dépassera largement celle du gaz naturel: puissance du gaz naturel +18,5 GW, puissance du charbon -12,4 GW, puissance nucléaire -5,1 GW, capacité éolienne + 25,1 GW, réseau photovoltaïque utilitaire +14,8 GW avec un autre 5 GW de PV décentralisé.

En outre, 2017 a été la deuxième année consécutive où les investissements dans le photovoltaïque et l'éolien ont représenté plus de 60 % des nouvelles installations, devançant le gaz naturel, qui est arrivé en deuxième position. Pour les centrales au charbon, il n'y a eu que de la décroissance plutôt que la croissance. Pour le nucléaire non plus la situation n'est pas bonne. Nous avons déjà parlé de cette catastrophe dans une section précédente. Un meilleur exemple est l'entreprise publique Duke Energy, qui a annulé un projet nucléaire en Floride en 2017 et a annoncé un investissement de 6 milliards de dollars dans les énergies propres, 700 MW de PV et une certaine capacité de stockage.

Le résultat est tout aussi impressionnant en termes de création d'emplois. Dans les secteurs de l'énergie photovoltaïque et de l'énergie éolienne, 475 000 nouveaux emplois directs ont été créés au cours des dernières années, ne laissant que 187 000 pour les secteurs conventionnelle de l'énergie.

L'émergence des énergies renouvelables s'est faite main dans la main avec le renversement de la croissance des émissions de GES; En 2016, les émissions de GES étaient les plus faibles depuis 25 ans.

La marche triomphale des énergies renouvelables a commencé avec l'énergie éolienne. Les États-Unis, à partir des années 1980, ont été la première nation à promouvoir systématiquement son déploiement. Les premiers parcs éoliens commerciaux en Californie au col d'Altamont et quelques sites similaires sont très connus. À la fin de 2001, 4,1 GW d'énergie éolienne avaient été installés au total, mais ce n'était que le début. Depuis lors, 52 000 turbines ont été installées. La capacité totale d'énergie éolienne a dépassé 90 GW en 2018. Les éoliennes sur le marché américain ont bénéficié d'une réduction de prix de 66% depuis 2009. Quelque 250 millions de dollars de loyers sont versés aux propriétaires fonciers, aux agriculteurs et aux éleveurs. En 2016, 16 milliards de dollars ont été investis dans de nouveaux parcs éoliens. Le vent fournit actuellement plus de 5,5 % de la production d'électricité aux États-Unis. Le prix du kWh revient aujourd'hui à 5 cents. Les principaux États américains en matière d'énergie éolienne sont désormais le Texas, l'Iowa, l'Oklahoma et la Californie. Selon les estimations du National Renewable Energy Laboratory (NREL), il est possible que 200 GW d'énergie éolienne soient installés aux États-Unis d'ici 2030 produisant de l'électricité à 2,3 cents/kWh. Dans ce contexte, il n'est pas certain que l'offshore, qui a fait l'objet de débats animés pendant de nombreuses années, puisse jouer un rôle. En 2016, seulement 60 MW en d'éolienne offshore étaient en exploitation.

A côté de l'énergie éolienne, les Etats-Unis ont un marché solaire photovoltaïque florissant. En fait, il a commencé lentement et n'a dépassé les installations totales de l'Allemagne qu'en 2016. En 2000, les États-

Unis n'avaient installé que 4 MW de PV, en 2010, la capacité est passée à 851 MW, mais le seuil de 1 GW n'a été franchi qu'en 2011. En 2017, sa capacité totale dépassait 50 GW, soit la deuxième plus grande capacité mondiale après la Chine. En 2016, 39% de la nouvelle capacité électrique installée dans le pays était photovoltaïque, plus que de l'électricité au gaz naturel et de l'énergie éolienne. En 2019, les États-Unis ont ajouté 13,3 GW de nouvelles capacités photovoltaïques, soit une augmentation de 18% par rapport à 2018. Les prix des modules ont été réduits d'un tiers, compensant ainsi les droits du gouvernement sur les importations. Les principaux États américains pour le PV sont la Californie, la Caroline du Nord, l'Arizona, le Nevada, le New Jersey, l'Utah et Hawaï.

Les États-Unis disposent de 2 millions d'installations photovoltaïques intégrées aux bâtiments. D'après le Laboratoire Nationale Lawrence Berkeley, qui gère un ensemble de données nationales sur le PV, environ 50 % des systèmes PV sont la propriété du client. Il existe aussi de grandes sociétés de leasing solaire. Energy Sage est l'un des principaux marchés en ligne pour l'énergie solaire, exploitée par National Grid, Sierra Club, WWF et Staples, avec des informations sur plus de 350 entreprises d'installations solaires. Connecticut Green Bank a lancé GoSolarCT.com. Il y a d'autres autres instruments d'utilisation : le tarif Temps d'utilisation (TU) qui a été introduit pour élargir la disponibilité de l'électricité solaire pendant la journée avec stockage, l'énergie solaire communautaire, la location des toits et l'élargissement de l'accès aux clients à faible revenu.

Google a analysé la ressource solaire disponible sur 60 millions de bâtiments aux États-Unis. Il a conclu dans une publication de mars 2017 que près de 80 % des toits américains conviennent à l'installation de panneaux photovoltaïques. Houston a le potentiel solaire le plus élevé sur ses bâtiments avec un potentiel de production de 18,9 GWh par an, devant LA, Phoenix, San Antonio et NY City. Avec les données de Google Maps et Google Earth, il a fait de la modélisation 3D et développé une "fonction d'outils de recherche" pour trouver le potentiel des toits individuels pour le photovoltaïque. Ils ont également obtenu le "Projet Sunroof", qui donne des conseils sur le meilleur dimensionnement des installations, estime l'énergie produite et le coût de location des panneaux.

Une autre tendance s'oriente vers l'échelle des services publics PV ; en 2016, 80 % de toutes les nouvelles capacités correspondait à des installations de grande taille. En 2017, les prix des centrales photovoltaïques à l'échelle utilitaire ont été pour la première fois inférieures à 1 000 \$ le kW installé, clé en main. Certains services publics concluent un accord d'achat (PPA en anglais pour Power Purchase Agreement d'achat de 5,5 cents/kWh à 5 cents/kWh. Le plus bas en 2017 était celui de Tucson Electric Power pour moins de 3 cents/kWh d'électricité photovoltaïque.

L'Amérique a été la première à mettre en place un outil révolutionnaire pour faire décoller les marchés de l'électricité renouvelable. En 1978, bien avant le Danemark, l'Allemagne ou la Chine, il a été décidé que la réglementation fédérale obligeait les services publics à accepter sur leurs réseaux l'électricité offerte par les producteurs d'énergie renouvelable et à payer un "juste prix" pour cette électricité. La Public Utilities Regulatory Policies Act (PURPA) a été adoptée cette année-là et, en 1991, elle était ouverte à toutes les échelles de production.

Cependant, les marchés n'ont alors pas bougé. Qu'est-ce qui a mal tourné ? La croissance explosive des marchés mondiaux n'a commencé que plus tard, lorsque l'Allemagne et les nombreux pays qui ont suivi ont mis en place l'EEG et la FIT. Ce sont eux qui ont fait la différence. Alors que l'approche du "juste prix" correspondait aux intérêts des gestionnaires de réseau qui ne paient pas plus pour l'électricité renouvelable qu'ils ne paieraient pour l'électricité conventionnelle régulière, l'EEG se place du point de vue de l'intérêt des producteurs qui veulent un prix permettant de couvrir leurs coûts. Au début, le coût du photovoltaïque, de l'électricité éolienne, etc. étant encore très élevé, la différence était très grande entre le "juste prix" offert par les services publics, trop faible, et le prix de couverture des coûts exigé par les investisseurs et éventuellement payé par l'EEG ou la FIT, beaucoup plus élevé.

Pour la promotion financière, les États-Unis n'utilisent pas le FIT, qui est l'instrument populaire dans de nombreux autres pays. Le principe de la FIT est que tous les clients du fournisseur d'électricité paient ensemble le tarif qui est déboursé pour soutenir les investisseurs dans le photovoltaïque, l'énergie éolienne, etc. Les États-Unis utilisent plutôt les crédits d'impôt. Cela signifie que ce ne sont pas les clients des services publics d'électricité, mais les contribuables qui paient pour les investissements. Le CIP fédéral correspondant, un crédit d'impôt sur la production des sociétés, a été adopté pour la première fois en 1992. Il s'élevait à 1,5 cents/kWh en 1993 et a été renouvelé et élargi à de nombreuses reprises. Une subvention équivalente en espèces était possible. Le CIP est toujours en place aujourd'hui. Le taux est simplement augmenté à 2,3 cents/kWh pour tenir compte du taux d'inflation depuis les années 1990. Ce soutien n'est pas très généreux, d'autant plus que les taux devraient être encore réduits dans les années à venir et que le soutien serait arrêté après 10 ans. Dans la pratique, il s'applique surtout à l'électricité éolienne. Nous remarquons que c'est cette approche qui a favorisé l'énergie éolienne en Allemagne depuis 1991 avec une nouvelle loi de participation financière : C'était un soutien bienvenu pour l'énergie éolienne, mais pas assez rentable pour le photovoltaïque. Pour le PV s'applique normalement le ITC, le crédit d'impôt d'investissement tandis que pour l'éolien on utilise le PTC, le crédit d'impôt sur la production (les kWh produits). Ce dernier venait à échéance en fin 2019. Il a été prolongé in extremis à Washington pour une dernière année, l'année 2020 avec un taux de 1.5cents/kWh.. Par contre l'ITC n'a pas été prolongé.

Depuis 2015, les marchés PV américains dans les secteurs résidentiel et commercial bénéficient d'une ITC de 30%. L'applicabilité de l'ITC s'étendra jusqu'en 2021. Son origine remonte à 2005, une "loi sur la politique énergétique" de l'époque.

L'American Council sur les énergies renouvelables (ACORE) a récemment souligné que les énergies renouvelables aux États-Unis ont été la plus importante source d'investissement en infrastructures du secteur privé au cours des six dernières années ; 100 milliards de dollars ont été réunis en 2015 et 2016 grâce aux crédits d'impôt sur les énergies renouvelables. Toutefois, elle a également constaté que la bioénergie, l'hydroélectricité, la géothermie ou les piles à combustible étaient exclues des conventions fiscales de 2015.

Dans un rapport de la mi-juillet 2017, le Laboratoire National Lawrence Berkeley a publié un rapport sur le RPS. Les États américains ont leur propre mécanisme de soutien, le RPS. On remarque qu'environ la moitié de toute la croissance de l'électricité renouvelable aux États-Unis depuis 2000 est associée au RPS. Au niveau national, les RPS représentaient 44 % de toutes les nouvelles additions d'énergie renouvelable en 2016. Le coût des REC, les certificats RE émis pour répondre aux obligations générales du RPS ont chuté en 2016, un autre encouragement. Les objectifs provisoires du RPS sont actuellement atteints. Les cibles ont même été augmentées dans le District de Columbia, le Maryland, le Michigan, New York, Rhode Island et l'Oregon.

Les accords d'achat d'électricité (AAE ou PPA) sont un moyen d'acheter des ER directement aux producteurs à un prix fixe. Sur le marché américain de 2016, la moitié de la puissance nouvellement installée concerne l'AAE. Des entreprises comme Google et Amazon les utilisent pour améliorer leurs images écologiques.

Dans ce contexte, il y a aussi les « yieldcos » (sociétés de rendement). En bref, l'objectif est d'investir dans des entreprises, yieldcos, qui possèdent un portefeuille de projets ER en exploitation. Le revenu est stable et prévisible. Cela fait une différence avec les fabricants et les installateurs. Nous avons vu précédemment que les valeurs boursières des entreprises de fabrication et d'installation d'énergie renouvelable peuvent être assez erratiques. Les yieldcos fournissent une opportunité à faible risque pour les investisseurs. Ils présentent un intérêt tant pour les investisseurs institutionnels que pour les particuliers.

Il y a aussi un nouveau venu, les "green bonds" ou littéralement les obligations vertes. Ils ont servi à collecter des fonds pour des projets d'énergie propre. En 2007, ils n'existaient même pas, mais en 2016, des "green

bonds" d'une valeur de 182 milliards de dollars avaient été émis par des collectivités, des entreprises comme Apple et Toyota, des banques et des États. Récemment, la France a émis ses premiers "green bonds". Avec 17 % du total mondial, les États-Unis viennent en deuxième position après la Chine, suivis de la Hollande, de l'Allemagne et de l'Inde.

Dans ce qui suit, nous revenons brièvement sur la Californie, qui a un dynamisme particulier pour les énergies renouvelables aux États-Unis. Elle ambitionne de devenir une superpuissance des ER. Dans une loi sur les énergies propres de 2017, la Californie a déclaré sa détermination à devenir 100 % ER d'ici 2045. D'ici 2020, un tiers de l'électricité devrait provenir de sources renouvelables. L'indice de référence du SRP est de 60 % pour 2030. L'intensité carbone de la Californie a diminué de 40 % depuis 1990.

Actuellement, la moitié de la nouvelle puissance photovoltaïque américaine est installée en Californie. De nombreuses villes ont des réglementations pour l'installation obligatoire de systèmes photovoltaïques sur les nouveaux bâtiments. Il y a trois fois plus de puissance PV en fonctionnement que l'énergie éolienne. La puissance PV totale a dépassé 25 GW en 2017. Jusqu'en 2003, il était nulle !

Jusqu'à présent, plus de 50 milliards de dollars ont été investis dans le photovoltaïque en Californie. Il s'agit de 100 000 emplois, en fait 236 000 emplois, en comptant les emplois indirects ; 16 milliards de dollars par année sont versés sous forme de salaires, de traitements et d'avantages sociaux. La Californie compte 500 fabricants PV et plus d'un millier d'installateurs.

L'équivalent de 4,7 millions de foyers sont alimentés en électricité photovoltaïque. La plus grande centrale photovoltaïque de Californie est le 579 MW Solar Star, construite par SunPower près de Rosamond.

Avant de conclure sur la situation des États-Unis, il ne faut pas oublier de mentionner son leadership mondial en matière de bio-alcool pour le transport. Les détails sont donnés dans un chapitre précédent.

En 2016, nous avons publié un livre spécial sur les énergies renouvelables aux États-Unis : « Le gouvernement américain et les énergies renouvelables : une route sinueuse », d'Allan Hoffman, également chez Pan Stanford Publishing, Singapour.

Finalement quelles seraient les perspectives d'avenir du développement énergétique américain vues de 2020. En janvier justement l'US EIA, l'Administration de l'Information de l'Énergie de Washington a sorti, en collaboration avec le DOE de l'administration américaine, un rapport très détaillé sur la question : « Annual Energy Outlook 2020 », avec des perspectives jusqu'en 2050. Première constatation pour le secteur électrique : d'ici 2050 les renouvelables connaîtront la croissance la plus importante de toutes les sources d'énergie. Le nucléaire et le charbon seront en grande partie arrêtés, notamment vers le milieu de la décennie qui vient. Aucune nouvelle de ces centrales conventionnelles ne sera construite, ni mise en service.

Dans le **scénario favorable aux renouvelables**, le solaire et l'éolien domineraient la croissance avec 585 GW de nouveau PV et 197 GW d'éolien. Les centrales à cycles combinés au gaz et celles au pétrole viendraient ensuite avec 293 nouveaux GW. Les centrales PV et celles au gaz seraient économiquement les moins chères. 78 GW de centrales au charbon seraient arrêtés.

Mais même dans le **scénario de référence**, la part des renouvelables serait doublée d'ici 2050 et la part du gaz resterait à peu près la même d'aujourd'hui. 382 GW de PV et 99 GW d'éolien seraient mises en service, contre 430 GW de gaz et de pétrole. 102 GW de charbon et 24 GW de nucléaire seraient arrêtés.

#### 4.4.3 Allemagne

En 2017, plus de 15 % de la consommation finale d'énergie de l'Allemagne a été couverte par les énergies renouvelables, soit trois fois plus qu'au tournant du siècle. Les deux tiers de ces énergies renouvelables provenaient de la biomasse. Ce pourcentage élevé de biomasse est conforme à la situation dans le reste de l'UE et dans les autres pays industrialisés.

Parmi les énergies renouvelables allemandes, la part de la production d'électricité a bénéficié d'une croissance extraordinaire; toutefois leur part dans le secteur du chauffage n'a doublé qu'à partir de l'an 2000 et dans le secteur des transports, la part des énergies renouvelables n'a pas beaucoup bougé.

Pour 2017, les chiffres définitifs du marché allemand de l'électricité sont disponibles. À ce moment-là, 202 GW de capacité totale étaient en opération, produisant 550 TWh d'électricité. Cela fait en moyenne seulement 2 720 heures de fonctionnement équivalent (appelé facteur de capacité) pour l'ensemble de l'année. En termes de capacité, l'ensemble des énergies renouvelables représentait 55 % du total :

• Eolien	55.3 GW
• PV	42.7 GW
• Biomasse	7.4 GW
• Hydraulique	5.6 GW

Les capacités de production d'énergie conventionnelle étaient les suivantes :

• Centrales électriques au gaz naturel	29.5 GW
• Charbon	25 GW
• Lignite	21.3 GW
• Nucléaire	10.8 GW

Pour la production effective d'électricité, les systèmes conventionnels étaient en 2017 en tête avec 62% du total contre 38% pour l'ensemble des énergies renouvelables dans l'ordre suivant (le temps d'exploitation équivalent en 2017 est indiqué entre parenthèses) :

• Lignite	136 TWh (6380 heures)
• Eolien	101 TWh (1830 heures)
• Charbon	84 TWh (3360 heures)
• Nucléaire	72 TWh (6670 heures)
• Biomasse	48 TWh (6490 heures)
• Gaz	46 TWh (1560 heures)
• PV	38 TWh (890 heures)
• Hydraulique	21 TWh (3750 heures)

En résumé, les capacités de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire photovoltaïque ont battu toutes les capacités conventionnelles - un fait remarquable étant donné qu'en 2000, elles comptaient pour presque rien ! Même en termes de production, l'électricité éolienne en 2017 bat pour la première fois l'électricité produite à partir de la houille et celle produite à partir du nucléaire. La consommation de charbon perd du terrain ; sa consommation dans les centrales électriques a diminué de 16 % par rapport aux années précédentes (chiffres de FhG ISE). Finalement, au premier semestre de 2019, 44% de la consommation totale d'électricité de l'Allemagne provenait de sources renouvelables! Qui pourrait prétendre que le pays tarde à mettre en œuvre l'énergie solaire? L'éolien a fourni 55,8 TWh, dont 12 TWh provenant de l'éolien offshore, 24 TWh provenant de systèmes photovoltaïques et 36,7 TWh de puissance biologique et hydraulique. En fin

de compte, le bilan de CO<sub>2</sub> de l'Allemagne s'améliore en conséquence : **moins 15% au premier semestre contre 2018.**

La part de l'électricité produite à partir de sources renouvelables dans la consommation globale d'électricité est passée de 6 % seulement en 2000 à 38 % en 2017. Comme nous l'avons vu, près de la moitié de l'électricité produite par les énergies renouvelables provient maintenant de l'énergie éolienne. Le deuxième bloc est la bioélectricité avec l'hydroélectricité. Ces derniers complètent très bien les puissances intermittentes du vent et du PV pour garantir un approvisionnement continu. La capacité de la biomasse est beaucoup plus petite que celle du vent, mais cela est compensée en partie par un temps de fonctionnement plus long dans l'année.

L'Allemagne possédait le plus grand parc photovoltaïque du monde avant d'être dépassée par la Chine, les États-Unis et le Japon. En 2017, la part du photovoltaïque dans l'approvisionnement en électricité en Allemagne était de 7,2 %.

Les Allemands aiment leurs énergies renouvelables : 95 % de la population y est favorable. Tous seraient d'accord pour avoir des panneaux solaires dans leur voisinage. Même pour les éoliennes, la proportion "pas dans mon arrière-cour" est inférieure à 50%.

L'Allemagne compte 330 000 emplois dans le secteur des énergies renouvelables.

En 2016, 15,2 milliards d'euros ont été investis en Allemagne dans le secteur des énergies renouvelables, principalement dans l'énergie éolienne.

Les énergies renouvelables bénéficient d'un soutien financier. Il a été calculé qu'elles avaient bénéficié de 54 milliards d'euros de soutien entre 1970 et 2012. Cependant, celui-ci est en fait minuscule par rapport aux subventions accordées à la même période à l'énergie atomique (187 milliards d'euros), à l'énergie provenant du charbon de houille (177 milliards d'euros) et à la lignite (65 milliards d'euros). En 2017, les subventions publiques des contribuables pour les énergies fossiles s'élevaient à 38 milliards d'euros en Allemagne, soit 50% de plus que l'EEG, alors que l'EEG n'est pas un soutien de l'Etat mais un prélèvement. Les compagnies d'électricité traditionnelles se sont brûlées les doigts car elles ont sous-estimé, comme beaucoup, le photovoltaïque, l'éolien ou les bioénergies. E-on, RWE et Vattenfall ont perdu des milliards d'euros. Après la restructuration de 2016, innogy (anciennement RWE), E-on et EnBW sont devenus des investisseurs de premier plan dans le domaine des énergies renouvelables - un nouveau monde.

Mais ce n'est pas la fin de l'histoire. En mars 2018, RWE et E-on a annoncé un nouvel accord pour couper Innogy en morceaux. RWE doit obtenir en suivant ces plans l'ensemble du secteur des énergies renouvelables d'Innogy. Ce n'est pas encourageant pour l'avenir des énergies renouvelables avec les services publics allemands : RWE est l'exploitant des plus grandes centrales au charbon du pays ; le charbon est son principal intérêt.

L'électricité conventionnelle n'est plus compétitive par rapport au solaire et à ses dérivés. Le coût total de l'électricité produite par les centrales nucléaires et fossiles se maintient aujourd'hui à environ 10 centimes d'euros/kWh. En tant que tels, les prix ne peuvent plus être obtenus sur le marché spot; les entreprises qui les produisent sont en difficulté. Aux enchères de 2017, l'électricité photovoltaïque a été proposée à 6,58 centimes d'euros/kWh : Rappelons qu'en 2004, elle s'élevait à 45 cents/kWh en Allemagne. Pour les parcs éoliens, les récentes ventes aux enchères ont donné des prix allant de 5,7 à 4,2 cents/kWh. Même pour les parcs offshore, les prix sont tombés à 6 cents/kWh.

L'Allemagne est le seul pays au monde à avoir décidé de fermer toutes ses centrales nucléaires. Cette mesure radicale fait suite à un mouvement populaire contre le nucléaire qui remonte aux années 1970. Un total de 27 GW d'énergie nucléaire a été retiré du réseau par décision politique du gouvernement ; en 2017, il ne

restait plus que 11 GW en exploitation. Le pays sera totalement libéré de l'énergie nucléaire d'ici 2022. C'était une décision courageuse prise à la lumière de l'accident de Fukushima au Japon.

Les experts en énergie dans le monde entier ont clairement pronostiqué que les deux politiques, le déploiement massif des énergies renouvelables et par-dessus tout l'élimination de l'énergie nucléaire, aboutiraient à une catastrophe pour l'approvisionnement énergétique du pays - et peut-être un problème pour le monde entier, car l'Allemagne est l'une de ses principales puissances économiques. Cependant, ce qui s'est passé a donné tort aux penseurs de l'énergie conventionnelle. Contrairement à des pays comme la France et la Belgique qui ont maintenu leurs grands parcs nucléaires et sont devenus importateurs d'électricité, notamment pendant les mois d'hiver les plus critiques, l'Allemagne, leader de l'énergie solaire et ennemie du nucléaire, est devenue un grand exportateur d'électricité.

Un problème majeur dans le système énergétique allemand est le rôle du charbon (houille et lignite - le charbon noir) dans la production d'électricité. Depuis 2000, tous deux ont conservé leur part dans le marché de l'énergie. Ce n'est qu'en 2017 que l'Allemagne a un peu diminué sa production d'électricité à partir du charbon, mais le lignite est resté une composante majeure dans la production globale. Les mines à ciel ouvert pour le lignite dans les zones de la rive gauche du Rhin sont célèbres, avalant des villages entiers et laissant derrière elles des paysages de pollution et de cratères comme sur la lune. Bien que la lignite demeure une importante source d'énergie domestique, les mines de charbon du pays ne sont plus exploitées. Elles étaient la raison d'être des conflits politiques avec la France concernant la "Ruhr" et la "Sarre" liés aux deux guerres mondiales qui ont éclaté entre les deux pays. Toutes les puits sont désormais fermés après avoir avalé plus de 100 milliards d'euros de subventions et laissé derrière elles de gros dégâts dans les paysages et les tunnels de charbon inondés jusqu'à 1 000 m de profondeur. Aujourd'hui, la houille allemande est importée du monde entier.

Dans l'état de Rhénanie-du-Nord-Westphalie (NRW) qui comprend la région de la Ruhr, les trois quarts de la production totale d'électricité sont encore produits à partir du charbon. L'Allemagne compte encore 134 centrales au charbon en exploitation, dont 51 pour la lignite. Même à Berlin, trois centrales au charbon sont restées en place en 2017 pour la production d'électricité et le chauffage urbain, héritage de l'époque communiste.

Les grands partis politiques refusent de présenter un calendrier pour savoir quand et comment en finir avec tout ce charbon.

Et qu'en est-il des émissions de GES ? Les gouvernements allemands ont tendance à enseigner au monde entier comment lutter contre le changement climatique. En fait, les émissions de CO<sub>2</sub> de l'Allemagne, qui s'élèvent à 900 millions de tonnes par an, n'ont pas beaucoup diminué depuis 2009. A l'origine de tout cela, leurs mauvaises politiques charbonnières.

Aujourd'hui, en 2018, l'Allemagne dispose de 64 GW d'énergie éolienne en exploitation. Sur ce total, 7 GW sont offshore. En Allemagne, on compte en moyenne 1 350 heures de fonctionnement complet par kilowatt et par an pour les éoliennes terrestres et 2 400 heures pour les éoliennes offshore. La raison d'aller vers le offshore est d'atteindre des taux d'exploitation plus élevés.

La taille moyenne des turbines en Allemagne est de 2,9 MW. En 2000, elle n'était que de 0,7 MW. Les dimensions ont énormément évolué au cours des dernières années. La plupart des tours de turbines actuellement en service ont plus de 120 m de haut. Pour l'offshore, la hauteur de la tour est un peu plus basse. Les diamètres des rotors des turbines varient de 90 m à plus de 120 m, pour l'offshore jusqu'à 145 m. Au total, il y a plus de 28 000 turbines en fonctionnement dans le pays.

Le plus grand parc offshore de la région est celui qui a été mis en service aux Pays-Bas en mai 2017. Il se compose de 150 turbines Siemens d'une capacité de 4 MW chacune. Le parc a coûté 2,8 milliards d'euros et couvre 13% de la demande d'électricité des Pays-Bas.

La Commission européenne a imposé des enchères sur les marchés des énergies renouvelables. A partir de 2019, l'Allemagne a l'intention d'organiser des ventes aux enchères d'énergie éolienne à hauteur de 2,5 GW par an. 2017 et 2018 ont été des années où ont eu lieu des ventes aux enchères et des paiements EEG les uns après les autres. En 2017, le soutien de l'EEG ou la prime de marché équivalente s'élevait à environ 7,5 cents/kWh. Les détails dépendent de la situation locale, de la force du vent, de la hauteur du hub etc. La première vente aux enchères a permis d'abaisser le prix du kWh à 4,2 centimes. De plus, les mécanismes communautaires proposés ont rencontré un grand succès. Certaines offres ont été faites à 0 cents/kWh, ce qui signifie qu'un investisseur souhaite vendre son électricité éolienne sur le marché libre en renonçant à toute forme de subventions.

La production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne a été expérimentée en Allemagne depuis 2015, dans une certaine mesure. C'est ce qu'on appelle « le power to gas » ou la conversion d'électricité en gaz. A Mayence, Siemens et Linde exploitent une usine de production d'hydrogène employant quatre éoliennes. Le coût total de l'installation s'élève à 13 millions d'euros, dont la moitié est subventionnée. A Hambourg, il existe une première station service alimentée avec de l'hydrogène produit localement. Six bus locaux et 30 voitures avec des moteurs à pile à combustible ont été mis en service. Toyota est l'un des plus grands promoteurs de voitures à hydrogène. En 2017 quelque 3 000 de ces voitures vendues par Toyota roulaient dans le monde. le réseau de stations-service d'hydrogène se densifie en permanence en Allemagne. Shell et Air Liquide exploitent déjà 68 stations-service, la plupart dans le Sud du pays.

En septembre 2018, les deux premiers **trains à hydrogène** du monde circulaient en Allemagne. Ils avaient été construits par le français Alstom. Les trains fonctionnent à l'énergie fournie par l'hydrogène via des piles à combustible. L'Allemagne voit un avenir pour de tels trains sur des voies ferrées non électrifiées jusqu'à présent. Dans la région de Francfort, 26 trains à hydrogène sur 4 lignes de chemins de fer sont à l'étude. La puissance de 240 MW nécessaire à la production de l'hydrogène doit être fournie par des éoliennes situées à proximité, au moyen de PPA.

Mais en termes généraux, l'avenir des transports au moyen de l'hydrogène a certainement plus de problèmes à surmonter. Il est aujourd'hui plus cher que celui alimenté par des batteries électriques. Et en juin 2019, près d'Oslo, en Norvège, une station de remplissage d'hydrogène a explosé pour des raisons inconnues, laissant tout le pays sans approvisionnement. Toyota et Huawei se sont ensuite arrêtés pour livrer leurs voitures équipées de piles à combustible.

L'Allemagne dispose d'environ 45 GW de puissance photovoltaïque installée en 2018. Elle génère ainsi quelque 40 TWh d'électricité par an. En raison des conditions climatiques du pays, la production d'électricité de l'ensemble du parc PV est concentrée sur les mois d'été. C'est l'inverse de l'électricité éolienne, qui est comparable en été et en hiver. Le rythme d'installation de seulement 2 GW de nouvelle puissance photovoltaïque par an est très inférieur par rapport à ce qu'il était il y a 8 ans. C'est un niveau également faible comparé aux installations actuelles très importantes en Chine, aux États-Unis, au Japon ou en Inde.

Environ 80 % des nouveaux systèmes photovoltaïques sont installés au sol et le reste est intégré aux bâtiments. Les systèmes photovoltaïques de plus de 100 kW bénéficient d'une prime de commercialisation dans le système EEG. Lors de la première vente aux enchères des grands parcs photovoltaïques en 2017 - ils sont aussi imposés maintenant pour le PV - les prix les plus bas ont été fixés à 6,58 cents/kWh.

L'intérêt relativement modeste pour le PV intégré au bâtiment est d'autant plus surprenant que l'Allemagne a dépassé la parité réseau entre l'électricité photovoltaïque et l'électricité du réseau depuis 2012. Ne pas

investir dans le photovoltaïque pour votre maison signifie perdre de l'argent. Les particuliers paient environ 28,5 cents/kWh l'électricité provenant du réseau, l'un des tarifs les plus élevés au monde. Au prix de 1350 € par kW de PV installé sur le bâtiment, le prix de l'électricité correspondante est de l'ordre de 10 à 12 centimes/kWh. La différence de prix avec 28,5 cents/kWh pour l'électricité du réseau représente le gain net. Il faut souligner la possibilité d'autoconsommation pour les opérateurs de PV sur les bâtiments, et de fait seulement 50% de l'électricité produite est destinée à être injectée dans le réseau.

L'électricité injectée dans le réseau a été payée 12,3 cents de FIT pour les petits systèmes photovoltaïques sur les bâtiments jusqu'à la fin de 2017.

Le calcul du paiement de l'EEG et de la répartition de l'EEG est quelque chose de compliqué que les Allemands appellent "l'effet de l'ordre du mérite". Ce qui se passe, c'est que sur le marché spot de l'énergie, le prix de l'électricité est de plus en plus bas lorsque la quantité d'électricité renouvelable injectée dans le réseau augmente. Il s'agit de la disposition de l'EEG selon laquelle toute l'électricité renouvelable est prioritaire par rapport à l'électricité conventionnelle produite à partir du charbon, du gaz naturel, etc. L'électricité renouvelable marginalise l'électricité conventionnelle, qui doit être vendue à perte, pour être vendue. Plus l'électricité renouvelable est disponible, moins on a besoin de l'électricité conventionnelle, qui doit se battre pour sa survie sur le réseau. Au milieu de l'année 2017, le prix du marché spot se situait à 3 cents/kWh.

La répartition de l'EEG est calculée en additionnant tous les versements de l'EEG, déduction faite des revenus du marché où l'électricité ER a été vendue. L'EEG est ensuite répartie entre tous les clients du réseau électrique - à l'exclusion d'un tiers des clients, les gros consommateurs industriels. Ils sont exemptés de la répartition de l'EEG par le gouvernement, qui voulait ainsi favoriser son industrie : grâce à l'EEG, l'industrie peut acheter son électricité à prix réduit sur le marché sans avoir à contribuer au soutien des énergies renouvelables. Les grands consommateurs d'électricité allemands vivent au paradis.

Dans la pratique, la facture à payer par les clients individuels - elle s'élève à environ 160 € par an pour un client moyen - est d'autant plus élevée que la quantité d'électricité ER acheminée vers le réseau est importante, et plus le prix du marché diminue de cette façon. En 2017, en termes de répartition de l'EEG, ce que chaque client du réseau, à l'exception des gros clients, devait payer s'élevait à 6,9 cents/kWh. Cela représente un quart de la facture totale des clients de 28,5 cents/kWh mentionnée précédemment.

Dans les années à venir, la répartition de l'EEG diminuera au fur et à mesure que le prix de l'électricité RE diminuera et parce qu'un nombre croissant de systèmes auront atteint leurs 20 ans d'avantages des EEG, en particulier ceux des débuts où le PV était cher.

À la fin, tout le monde est gagnant. À l'université de Erlangen-Nuremberg on a effectivement calculé en 2019 comment les prix cotés en bourse de l'électricité auraient évolué entre 2011 et 2018 s'il n'y avait pas eu l'imposition massive du PV et de l'éolien sur les réseaux grâce à l'EEG. Comme dit précédemment, les prix des renouvelables poussés vers le bas par l'EEG ont tendance à faire baisser les prix de gros en bourse allemande de l'électricité. Sinon les prix des énergies classiques très chères auraient prévalu. Résultat : entre 2011 et 2018, sans le PV et l'éolien les prix de gros de l'électricité auraient été de 70 milliards d'Euros plus élevés pendant cette période. Cet effet compense bien la répartition des frais de l'EEG parmi les consommateurs mentionnés plus haut. Autrement dit, sans les renouvelables sur le réseau, les consommateurs auraient pendant toutes ces années payé plus sans PV et éolien que ce qu'ils ont payé avec.

Tout compte fait, l'électricité payée par le consommateur allemand est, avec presque 30cents/kWh, une des plus chères du monde. Pour beaucoup elle n'est pas abordable. 30,000 clients en Allemagne se sont vus couper l'accès à leur compteur d'électricité faute d'avoir réglé leur facture. Un scandale pour un pays « riche ».

Une nouvelle tendance sur le marché PV allemand est d'installer le PV combiné à une batterie de stockage. Le stockage de l'électricité dans le bâtiment est intéressant car il permet d'augmenter la part de l'autoconsommation. Il est également intéressant pour les anciennes installations photovoltaïques : après la fin de la subvention aux EEG, l'autoconsommation est la voie à suivre car le prix de revente sur le réseau, 3 centimes/kWh, rend l'installation non rentable. En 2017, 60 000 batteries solaires avaient été installées avec les centrales photovoltaïques, soit davantage que les 34 000 batteries des voitures électriques du pays. Des batteries au lithium-ion ou au plomb-acide sont proposées, ces dernières étant les moins chères. Il faut noter que l'ajout d'une batterie double le coût de l'installation PV. Les batteries avec installations photovoltaïques sont soutenues par des subventions de la banque KfW et des crédits d'impôts.

Beaucoup d'habitations en Allemagne sont en location. La moitié de la population allemande vit dans des maisons ou des appartements locatifs. Berlin a récemment introduit des réglementations pour promouvoir les installations photovoltaïques sur ces bâtiments en partageant les retombées de l'EEG entre le propriétaire et les locataires.

Les promoteurs du photovoltaïque en Allemagne utilisent divers outils pour stimuler le marché. Il y a un cadastre solaire, par exemple, *Meteonorm* développé avec l'OMM, l'Organisation météorologique des Nations Unies, en utilisant des données fournies par des satellites. *Renewables.ninja.com* est un outil en ligne pour estimer la disponibilité de l'énergie solaire en n'importe quel endroit. Des données sont également fournies pour les bâtiments passifs, le vent, etc. De tels outils ont été utilisés dans de nombreuses villes et États d'Allemagne. A Vienne, en Autriche, il a été utilisé pour 240 000 toits, ainsi qu'à Paris. *Google Sunroof*, l'outil développé pour les États-Unis que nous avons déjà mentionné plus haut, est également disponible en Allemagne. Il contient toutes les données météorologiques pour votre maison, la position du toit, les ombres et les variations saisonnières. Depuis mai 2017, l'outil est promu en Allemagne par E-on et Tedraed : *eon-solar.de*.

Pour la surveillance d'installations photovoltaïques fortement dispersées, Internet offre par exemple l'Internet des objets (IoT) pour la surveillance sans fil.

Nous avons déjà discuté de la position de leader de l'Allemagne sur le biogaz dans la section spéciale sur le sujet (Section 4.4.3). Pour rappel, avec l'EEG 2017, un dispositif de prix d'appel a été mis en place pour protéger le marché allemand, qui est le premier en Europe dans ce domaine. L'Allemagne compte quelque 11 000 installations en exploitation, soit deux fois plus qu'en 2010. L'électricité produite à partir du biogaz provient principalement des centrales de cogénération (CHP). Une partie du méthane dérivé du biogaz est injecté dans les réseaux de gaz.

Les granulés de bois sont moins chers en Allemagne que le fuel domestique et le gaz naturel. Le marché allemand a commencé au début du siècle avec 3 000 installations de chauffage à granulés. Et comme pour toutes les autres énergies renouvelables, le marché a explosé depuis lors. D'ici 2018, 500 000 installations de chauffage à granulés seront en service en Allemagne.

L'Allemagne est également leader dans le domaine des capteurs solaires. Il dispose de 18 millions de m<sup>2</sup> de capteurs solaires installés, la plupart de type panneau plat. Le taux d'installation annuel est d'environ 100 000 m<sup>2</sup> ; 2,2 millions de maisons allemandes sont équipées d'un chauffe-eau solaire (SHW).

L'Allemagne installe également quelque 80 000 pompes à chaleur par an, mais elle n'est pas un leader européen dans ce domaine. Les systèmes sont proposés, au sein d'un marché très dynamique, par Junkers, Bosch, Stiebel Eltron et Viessmann. Des systèmes air/eau d'une capacité de 7 à 12 kW alimentés par l'électricité ou le gaz sont proposés.

L'Allemagne, l'Autriche et la Suisse sont de grands promoteurs du "chauffage solaire passif". L'Allemagne possède un Institut pour les bâtiments passifs dans la ville de Darmstadt. En 1991, la première "maison passive" d'Allemagne y a été construite. Fribourg est un autre centre pour la promotion du chauffage passif - comme c'est le cas pour l'énergie solaire en général. Entre-temps, des milliers de bâtiments passifs ont été construits en Allemagne. La Suisse a aussi ses "Minergy buildings". La Suisse a ses "Minergy buildings". Le leader dans ce domaine est l'Autriche. Les maisons passives sont obligatoires dans le Vorarlberg depuis 2007.

L'Allemagne a fêté en 2019 les 20 ans de son MAP, un programme de stimulation du marché de chaleur renouvelable. De septembre 1999 à septembre 2019 1.8 millions d'installations de chauffage ont été subventionnées à hauteur de 3 milliards d'Euro. Grâce à cette stimulation en tout 20 milliards d'€ ont été investis par les acteurs du marché. En ont bénéficié en priorité le marché des capteurs solaires avec une subvention de 1,2 milliards, puis les granulés de bois et autre biomasse pour 0,4 milliards et enfin les pompes à chaleur qui ont bénéficié de 140 millions d'€.

En Allemagne, la norme « Energieeinsparverordnung » (EnEV) (ordonnance pour l'économie d'énergie) définit la consommation d'énergie thermique d'une maison passive à 15 kWh de chaleur par m<sup>2</sup> de surface habitable et par an. Cela correspond à une consommation équivalente de 1,5 litre de fuel de chauffage par m<sup>2</sup> et par an. Ceci ne représente que le dixième de la consommation des "maisons standard". Les techniques utilisées comprennent le chauffage solaire, le triple vitrage, les pompes à chaleur et la récupération de chaleur. Les maisons passives coûtent de 5 à 15 % plus cher à construire et bénéficient d'un soutien financier de la banque KfW et des initiatives régionales.

Enfin, un dernier regard sur les perspectives politiques des marchés renouvelables en Allemagne. Le Bundestag y a adopté le 20 décembre 2019 un Plan Climat pour les années à venir. Voici ses contours.

D'ici 2030 on veut baisser les émissions de CO<sub>2</sub> de 55% par rapport à 1990. 100 milliards d'Euros seraient prévus pour l'intervention dans les transports, les bâtiments et l'agriculture, avec incitations fiscales sur l'isolation des bâtiments, des subventions sur les voitures électriques et la rénovation du réseau ferré. Le prix de l'électricité serait réduit. À partir de 2026 il n'y aurait plus de chaudières au fuel. Les flottes de bus converties à l'alimentation à l'électricité, l'hydrogène ou le biogaz. L'utilisation du charbon pour la production d'électricité serait réduite à 17 GW d'ici 2030, avec en parallèle l'augmentation de la part des renouvelables (65% de la consommation vers 2030) et de l'efficacité énergétique. Il y aurait 20 GW d'éolien offshore et la suppression de la limitation de la capacité totale du PV à 52 GW comme c'est le cas actuellement. Viendrait également s'ajouter une nouvelle stratégie pour l'hydrogène et les batteries.

#### **4.4.4. Europe**

L'Europe est bien organisée en ce qui concerne les énergies solaires et renouvelables.

Les statistiques peuvent être consultées à Eurostat, qui publie entre autres EU SHARES, Short Assessment of RE Sources (panorama synthétique des sources d'énergies renouvelables). Afin d'harmoniser les parts de marché des ER entre les différents marchés de technologies ER concernés et entre les 28 pays membres de l'UE, tous les volumes de marché sont exprimés en une seule unité, le Mtep (million de tonnes

équivalent pétrole). L'inconvénient est que les données ne sont disponibles qu'avec un délai d'un ou deux ans. Une autre source de données que j'ai moi-même encouragée au nom de la Commission européenne à ses débuts, il y a une trentaine d'années, est EurObserv'ER, qui est également publié chaque année. Pour plus de détails sur la bioénergie, on peut aussi se référer au site web de l'Association Européenne de la Biomasse (AEBIOM).

Tout au long des années 80 et 90, les énergies renouvelables ont bénéficié du soutien politique du Parlement Européen. La Commission Européenne n'a commencé à agir que vers la fin du siècle. Mon collègue Arthouros Zervos et moi-même avons rédigé un Livre blanc. Arthouros a réussi à convaincre son compatriote grec et commissaire de le faire publier comme communication de la Commission en 1997 : "Énergie du Futur, Sources d'Énergie renouvelables, Livre blanc pour une stratégie communautaire et un plan d'action " COM (97) 599 final (28/11/1997).

Cependant, il a fallu encore plusieurs années avant que le Conseil de l'UE, qui a le dernier mot, commence à bouger également. C'est ce qui s'est passé, sur proposition de la Commission en 2008 et 2009. En conséquence, l'Europe a des objectifs officiels et contraignants pour les énergies renouvelables d'ici 2020. La Directive 2009/28/CE de l'UE impose une part globale de 20 % d'ER dans la consommation finale d'énergie de l'Europe d'ici là. La directive a été adoptée lorsque le président français Nicolas Sarkozy et la chancelière allemande Angela Merkel étaient respectivement présidents du Conseil de l'UE. Ils ont adopté une attitude volontariste à l'époque pour faire adopter le projet de loi. La chancelière Merkel a reçu les félicitations enthousiastes du président de la Commission.

Cet objectif global de 20 % a été réparti de la manière suivante en 2010 dans les Plans d'Action Nationaux d'énergie renouvelable. Chacun des 28 pays membres de l'UE, ainsi que la Norvège et l'Islande, a son objectif spécifique. Les exemples sont l'Allemagne avec 18% et la France avec 23%. La Suède est l'un des pays les plus ambitieux avec un taux de pénétration des énergies renouvelables de 50 % d'ici 2020. En l'état actuel des choses, la plupart des pays atteindront l'objectif qu'ils se sont fixé. Cependant, certains grands pays comme la France ou l'Allemagne le manqueront de beaucoup.

La principale source d'énergie renouvelable en Europe, qui représente 60 % du total des énergies renouvelables, est la **bioénergie**. Depuis le début du siècle, sa contribution a doublé. À côté des bûches de bois traditionnelles pour le chauffage résidentiel, une nouvelle famille de marchés de la biomasse a émergé. La bioénergie moderne, le biogaz, les biocarburants pour le transport, les granulés de bois et l'exploitation des déchets municipaux ont gagné des parts de marché considérables. En ce qui concerne le chauffage et le refroidissement, la bioénergie a atteint un taux de pénétration de 16% dans la consommation finale de l'Europe.

Il n'est pas surprenant que la part dominante de toute la biomasse soit constituée de matériaux solides, à savoir le bois et d'autres matières forestières. Ceci représente 70 % de toute la bioénergie consommée. L'Europe bénéficie d'une importante couverture forestière. Et celle-ci reste sous-exploitée. Chaque minute, les forêts d'Europe croissent de la taille d'un terrain de football. Le prélèvement du bois est principalement destiné au marché industriel du bois, et seulement pour environ 20% à l'énergie.

En Europe, l'argent pousse sur les arbres. Le chiffre d'affaires total de la bioénergie dépasse 60 milliards d'euros par an ; 500 000 emplois sont concernés, plus nombreux que pour l'éolien ou le photovoltaïque.

Les principaux consommateurs de bioénergie en Europe sont l'Allemagne, la France, la Suède, l'Italie, la Finlande, la Pologne et l'Espagne. Ces mêmes pays sont les leaders européens en matière de production de chaleur issue de la biomasse. La Suède, la Finlande et le Danemark ont un important marché du chauffage urbain.

La plupart des **granulés de bois** du monde sont consommés en Europe. En 2015, le marché européen du granulé a franchi la barre des 20 millions de tonnes - en l'an 2000, il n'existait tout simplement pas. Les principaux pays producteurs de granulés sont aujourd'hui l'Allemagne, la Suède, la Lettonie, la France et le Portugal.

Le **Royaume-Uni** joue un rôle particulier sur le marché des granulés de bois : il consomme un quart des granulés de l'Europe, tous importés d'Amérique du Nord, tandis que le reste de l'Europe dépend de sa propre production ; et tous ces granulés en Grande-Bretagne servent au marché de l'électricité, tandis que dans les autres pays, ils sont utilisés pour le chauffage. Nous avons déjà mentionné la centrale au charbon Drax au Royaume-Uni. Celle-ci a été convertie à 70 % en **cogénération** avec des granulés. Drax produit 20 % de l'électricité renouvelable de la Grande-Bretagne.

Lorsque le Brexit entrera en vigueur, le reste de l'Europe changera pas mal ses marchés de granulés : elle réduira considérablement les importations de granulés et leur utilisation pour la cogénération.

Eh bien, pas totalement. **Copenhague** au Danemark projette de remplacer d'ici 2019 une centrale au charbon de 600 MW par une centrale de cogénération alimentée par des granulés importés. Sa construction devrait coûter 150 millions d'euros.

L'autre nouveau venu dans le domaine de la bioénergie depuis le début du siècle est le biogaz. Nous en avons rendu compte dans les sections précédentes, en particulier celle sur l'Allemagne. Dans la consommation d'énergie de l'Europe, le biogaz représente environ 16 Mtep. C'est en fait beaucoup plus que les 21 millions de tonnes de granulés de bois, si l'on considère qu'un kilo de pétrole ou de biogaz en termes d'énergie équivaut à 3 kg de bois. Contrairement aux granulés, qui sont principalement utilisés pour le chauffage, le biogaz est en général brûlé dans des installations de cogénération fournissant outre de la chaleur de l'électricité de grande valeur.

Un cas particulier est celui de la **Suède**, où le biogaz est principalement utilisé pour le chauffage uniquement. L'autre particularité, c'est qu'un quart du total est utilisé pour le transport.

Dans le reste de l'Europe, le biogaz est peu utilisé pour le transport. Cette place a été prise en 2016 par le **biodiesel**, avec 10,9 Mtep, et par le **bioéthanol**, avec 2,6 Mtep. Avec les 5,8 milliards de litres d'éthanol, l'industrie produit 5,9 millions de tonnes de co-produits, principalement des aliments pour animaux à haute teneur en protéines. Les **biocarburants** représentent 5,3 % du marché européen des transports en 2016 ; la part du biodiesel est de 5,8 % et celle du bioéthanol de 3,3 %. L'utilisation d'huile végétale pure est négligeable. Dans la directive sur les énergies renouvelables de 2009, un taux d'incorporation de 10% de biocarburants dans l'essence européenne d'ici 2020 avait été décidé. Cet objectif a été ramené en 2015 à 7 % seulement dans le cadre de la réforme dite du Changement Indirect d'Affectation des Terres.

La **Suède** utilise à côté de certains biogaz beaucoup de biocarburants liquides. C'est le champion d'Europe avec 19% d'incorporation, principalement du diesel. Les autres leaders européens pour l'utilisation des biocarburants sont la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni et l'Espagne.

En termes d'importance énergétique, les 13,5 Mtep de biocarburants liquides arrivent en deuxième position après les 16 Mtep de biogaz et avant les 7 Mtep des granulés solides.

L'énergie dérivée des **déchets municipaux** représente environ 7 % du total de la biomasse, ce qui est comparable à la part des granulés.

Pour en revenir au chauffage, nous devons mentionner le marché des **pompes à chaleur**. Il y a environ 30 millions de pompes à chaleur en service dans l'UE. Chaque année, environ 2,5 millions d'entre elles sont nouvellement installées. Elles comptent pour 9 Mtep de chaleur ER produite. Plus de la moitié des pompes à

chaleur sont installées en Italie. Elles servent aussi bien au chauffage qu'au refroidissement. Les autres pays principaux pour les pompes à chaleur en Europe sont l'Espagne, la France, le Portugal et la Suède. Pratiquement toutes sont des systèmes aérothermiques et utilisent la technologie air-air. En Allemagne, les pompes à chaleur ne sont pas très populaires. Celles qui sont utilisées utilisent un autre cycle, l'air-eau. Les pompes à chaleur géothermiques ont un marché européen de moins de 100 000 unités seulement.

La Suède tire 10 % de l'énergie de chauffage des bâtiments à des pompes à chaleur ; 55 % est fournie par la biomasse, ce qui représente un record de 65 % de chaleur ER dans l'ensemble du secteur du bâtiment.

Et il y a le **chauffage avec capteurs solaires**. En 2016, 51 millions de m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques étaient en service en Europe. Les pays ayant les plus grands parcs sont l'Allemagne, l'Autriche, la Grèce, l'Italie, l'Espagne, la France, la Pologne et le Danemark. L'ordre des pays pour les nouvelles installations est un peu différent, car la Pologne, la Grèce et le Danemark viennent directement derrière l'Allemagne, qui reste en tête avec près d'un million de m<sup>2</sup> de capteurs installés en 2016. La plupart des capteurs solaires utilisés en Europe sont du type à panneaux plats.

En 2019, l'Europe des 28 avait en activité au total un peu moins de 56 millions de m<sup>2</sup> de capteurs solaires thermiques. Chaque année environ 2,2 millions de m<sup>2</sup> sont nouvellement installés. Le pays en tête est l'Allemagne suivi de la Grèce. Le secteur représente un chiffre d'affaires annuel d'environ 2 milliards d'€ et emploie 18 mille personnes.

Le rôle de la Turquie dans ce domaine est le plus impressionnant. La Turquie est le deuxième pays du monde en termes de nouvelles installations après la Chine, devant les États-Unis et l'Inde, qui viennent en troisième et quatrième position, respectivement, et devant tous les pays de l'UE.

L'énergie éolienne et le photovoltaïque sont les grandes réussites de l'Europe. Elles ont commencé leur conquête du marché de l'énergie au tournant du siècle.

En 2017, l'UE avait 170 GW d'**énergie éolienne** installée ; en 2000, il n'y en avait que 17,6 GW. L'UE arrive maintenant au deuxième rang après la Chine et devant les États-Unis. Pour les nouvelles installations, le même ordre prévaut : d'abord la Chine, puis l'UE et enfin les États-Unis.

Fin 2017, la capacité éolienne offshore de l'Europe s'élevait à 13,7 GW.

L'Europe a produit 302,7 TWh à partir des 153 GW d'énergie éolienne qu'elle avait installés jusqu'en 2016. Son facteur de capacité ou équivalent temps plein d'exploitation sur l'année était alors de 20 %. La Grande-Bretagne a le taux le plus élevé d'Europe (25 %), suivie du Danemark, de l'Espagne, de la France et de l'Italie (18 %). L'Allemagne a le régime éolien le plus défavorable avec 16% seulement.

Cependant, l'Allemagne fait preuve de courage en conservant son leadership dans l'installation et la production d'énergie éolienne en Europe. Fin 2017, elle avait, comme mentionné précédemment, plus de 55 GW de capacité installée, générant 101 TWh. En termes de capacité et de production, l'Allemagne a été suivie de l'Espagne, du Royaume-Uni, de la France, de l'Italie et du Danemark. L'Espagne a connu une croissance nulle de l'énergie éolienne en 2016 et la France la plus élevée après l'Allemagne.

Début 2020 l'Europe avait 205 GW d'éolien installés. 15% de toute l'électricité consommée en 2019 a été d'origine éolienne. 15.4 GW ont été nouvellement installés, dont un quart offshore. Comme rapporté précédemment le marché européen a beaucoup souffert de la dégringolade du marché éolien allemand en raison de l'opposition locale, et pourtant il a été supérieur en 2019 à celui de l'année précédente. Le chiffre d'affaires cette année a été de 19 milliards d'€. 108,000 personnes sont employées dans le secteur, et même 154,000 en comptant les emplois .

La **capacité photovoltaïque européenne** a dépassé la barre des 100 GW en 2016. Jusqu'à cette année-là, l'UE était le numéro 1 mondial avant d'être dépassée par la Chine en 2017. Avec une production de 105 TWh en 2016, le facteur de capacité PV de l'Europe était légèrement supérieur à 10 %. Il en va de même pour l'Allemagne, la Grande-Bretagne et la Belgique, où il se situe sous la moyenne européenne de 10%. Pour l'Italie, elle est de 11 %, et pour la France, de 12 %. Le meilleur ensoleillement est celui de l'Espagne avec 19% - c'est du moins ce que l'Espagne prétend.

L'Allemagne a la plus forte puissance photovoltaïque installée, suivie de l'Italie, avec 50% de moins. Vient ensuite le Royaume-Uni, avant la France, les Pays-Bas, l'Espagne et la Belgique.

Les marchés du PV en Europe ont explosé en deux vagues - sans compter à ce stade la phase pilote avant l'an 2000. Le premier a été mené par l'Allemagne et l'Espagne entre 2000 et 2010-2011. Le deuxième n'a commencé que récemment, en 2011, mené par la Grande-Bretagne et de l'Italie. Entre 2011 et 2015, la puissance PV en Grande-Bretagne a été multipliée par 300 (trois cents !) – grâce à l'introduction des tarifs d'achat. Toujours en 2015, les nouvelles installations photovoltaïques en Europe ont été dominées par la Grande-Bretagne avec 3,76 GW devant l'Allemagne avec 1,5 GW, et la France, les Pays-Bas, l'Italie et la Belgique, qui ont suivi.

L'Europe a installé nouvellement en 2019 17 GW de PV, plus du double des 8 GW installés l'année avant. En tout il y a 132 GW de PV en fonctionnement en Europe. En raison de son climat favorable l'Italie est le pays avec 9% d'électricité PV dans sa consommation, le top de l'Europe.

C'est encore une fois un exemple que **les marchés du photovoltaïque et de l'éolien ne suivent pas seulement les conditions climatiques locales, mais aussi les politiques.**

Selon la Directive européenne EPBD sur la performance des bâtiments, depuis 2019 tout nouveau bâtiment public en Europe est tenu d'être un bâtiment à consommation énergétique proche de zéro. À partir de 2021 cela sera même imposé sur tout nouveau bâtiment quel que soit son usage.

**En conclusion**, l'Union européenne a produit globalement environ 16% de sa consommation totale d'énergie en 2015 à partir de sources d'énergies renouvelables. Cette part a doublé par rapport à 2004 ; à l'époque, elle était assurée par l'hydroélectricité et les grumes de bois conventionnelles pour le chauffage.

La part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'électricité de l'UE s'élevait à 29% en 2015. L'hydroélectricité et l'électricité éolienne représentaient chacune un tiers du total, suivies par la bioénergie, le photovoltaïque, etc. L'énergie éolienne et le photovoltaïque ont les taux de croissance les plus élevés. Il est intéressant de noter que plus de la moitié de toute l'électricité ER provient de l'hydroélectricité et de la bioénergie, qui sont disponibles en permanence, prêtes à compléter les sources intermittentes d'électricité solaire photovoltaïque et éolienne. Il s'agit d'un encouragement supplémentaire vers le développement d'une "Europe de l'énergie 100% ER".

La **production de chaleur** de l'UE à partir des énergies renouvelables s'élevait à 19 %. Les principaux composants étaient la biomasse solide dans une proportion de 80 %, les pompes à chaleur dans une proportion de 9 %, le biogaz dans une proportion de 3,5 % et les capteurs solaires thermiques pour 2,2 %.

Le chiffre d'affaires annuel total de la production européenne d'énergies renouvelables en 2015 s'est élevé à 153 milliards d'euros, avec l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni en tête. Quarante pour cent du chiffre d'affaires correspondait à la bioénergie, suivie par l'énergie éolienne, les pompes à chaleur et le photovoltaïque.

En Europe, 1,14 million d'**emplois** sont fournis par la mise en œuvre des ER, la plupart d'entre eux en Allemagne avec 322 000 emplois suivis par la France, la Grande-Bretagne, l'Italie, l'Espagne, la Suède et d'autres.

Un dernier mot sur **Paris**, la France, la ville où je vis. C'est une mégapole, peuplée, un haut lieu du tourisme international et le lieu des Jeux olympiques d'été de 2024.

Paris dispose de plusieurs réseaux de transport public bien organisés. La plupart des parisiens ont renoncé à conduire leur propre voiture ; seulement 1% d'entre eux prennent la voiture pour se rendre au travail. Deux voies principales traversant le centre de la ville le long de la Seine ont été transformées en boulevards piétons. Deux lignes de bus fonctionnent au biogaz.

A presque tous les coins de rue, la ville a établi des zones de stationnement de vélos ou de voitures électriques. En plein centre, une nouvelle station-service pour l'hydrogène a été mise en service. Même les bicyclettes fonctionnant à l'hydrogène sont testées.

Contrairement à Bruxelles voisine, il n'y a pas encore beaucoup d'intégration photovoltaïque sur les bâtiments parisiens, mais il y a de l'espoir. La France a introduit une loi en 2015 rendant obligatoire l'intégration du photovoltaïque ou de toitures vertes sur les nouveaux bâtiments commerciaux.

Et rappelons enfin que l'Europe, grâce à sa politique sur les renouvelables a pu réduire ses émissions de gaz carbonique de 12 % en l'an 2019.

Pour les années à venir, l'Europe annonce une politique écologique particulièrement agressive, le « Green Deal ». Par des investissements très lourds intervenant dans tous ses secteurs d'activité, l'Union Européenne, sous l'égide de la Commission de Bruxelles veut faire de l'Europe, d'ici 2050, le premier continent neutre en émissions affectant le climat, le CO<sub>2</sub> et consorts.

#### **4.4.4.1 Les Renouvelables en France**

Fin 2019, à la fin de la décennie donc, la France avait au total 53.6 GW de capacité électrique renouvelable installé, plus de 2.35 GW que l'année précédente. 23% de la consommation en électricité du pays ont ainsi été couverts. 10 ans plus tôt en 2009 on était à 30 GW, seulement un peu plus de la moitié d'aujourd'hui. Pour les 10 ans à venir on vise une couverture des besoins à base de renouvelables à 40%, de nouveau presque le double d'aujourd'hui.

Toujours fin 2019 on avait atteint une capacité éolienne de 16.5 GW, 1.36 GW de plus qu'en 2018, couvrant 7.2% des besoins de la consommation nationale en électricité de l'année.

Le solaire PV a atteint en tout et pour tout 9.436 GW et une couverture des besoins à 2.5%. En octobre 2019 Engie a inauguré la plus grande centrale solaire de 17 MW en Île de France. Mais le PV a du retard pour s'imposer en France avec seulement 890 MW nouvellement installés en 2019.

L'hydraulique, la classique à 25.5 GW n'a pas beaucoup bougé.

La bioélectricité a compté pour 2.1 GW au total et a quand même pu contribuer à la couverture des besoins à hauteur de 1.6%.

Par ailleurs, dans le cadre de l'objectif communautaire d'atteindre pour l'Europe en 2020 une part de 20% renouvelable de toute la consommation d'énergie – et pas seulement du secteur électrique – il est clair aujourd'hui que la France restera à quelque 17% de sa consommation énergétique renouvelable et va rater son objectif national de 23% pour 2020. Peut mieux faire...

Un secteur où la France devance tous les autres pays européens est celui des biocarburants. Elle en est le premier producteur. Bien qu'il n'intéresse que moins de 1% de la surface agricole du pays, le bio-alcool a créé 9000 emplois. En 2019 il y a eu notamment la prolifération de l'essence E-85. Il est vendu maintenant dans 1740 stations service. Pour ses avantages environnementaux il est moins taxé et se vend à 0.69 € le litre à la pompe : il émet 50% de CO<sub>2</sub> et 90% de particules fines en moins. Et il n'y a pas d'excuse pour ne pas l'acheter, 80% des voitures sont compatibles avec l'essence E-85.

Début 2020 le Gouvernement français a publié pour consultation publique son PPE, la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie. Elle concerne toutes les énergies, comme la chaleur renouvelable, les biocarburants et aussi le PV et toute l'électricité renouvelable où 74 GW sont prévus d'ici 2023 – à comparer au 54 GW installés aujourd'hui.

Dans le cadre plus large de la Loi « Énergie et Climat » en discussion depuis 2019 sont visés

- la neutralité carbone pour 2050
- une réduction de la part du nucléaire à 50% en 2035
- Une réduction de 40% de la part des énergies fossiles dans la consommation d'ici 2030
- Et la fermeture des dernières centrales à charbon à 2022

Depuis peu Paris se voit comme ville pionnière pour devenir verte et écologique. On veut apaiser et « végétaliser » les rues. Déjà 1 milliard d'€ a été investi dans la rénovation des bâtiments, les écoles etc. La ville a adopté un Plan-Climat-Energie avec pas moins de 500 mesures d'intervention. Le Plan d'action prévoit d'ici 2030 une réduction de 50% des émissions de gaz à effet de serre, une réduction de 35% de la consommation en énergie et 45% d'augmentation des renouvelables dans la consommation. On vient de créer des Eco-quartiers neutres en émissions de carbone. L'industrie est invitée à rejoindre une Charte « Paris Action Climat ».

À voir ce qui en reste des bonnes intentions après l'élection d'une nouvelle mairie au printemps 2020...

#### **4.4.5 Japon**

Le pays est un grand pionnier dans la promotion du PV. Le PV a traditionnellement la priorité sur toutes les autres technologies d'ER dans le pays. Plus de 90 % de l'énergie renouvelable du Japon provient du photovoltaïque.

Après le premier choc pétrolier, le Japon a commencé un Projet "Sunshine" en 1974, suivi en 1993 d'un Nouveau Programme "Sunshine". Un an plus tard, le gouvernement a adopté les "Lignes directrices de base pour l'introduction des nouvelles énergies". Ce projet prévoyait l'installation de 400 MW d'ici l'an 2000, soit l'équivalent de 100 000 toitures PV et de 4,6 GW d'ici 2010.

Le Japon a accordé un crédit d'investissement de 50 % lorsqu'un système photovoltaïque coûtait 10 € par watt, qui a été réduit à un tiers du coût depuis 1997 pour les habitations privées. Toutefois, ce soutien

financier était insuffisant pour stimuler la croissance du marché. En 2000, seulement 70 MW de PV ont été installés dans le pays cette année-là. En 2009, il n'avait pas trop augmenté et restait autour de 400 MW. Entre-temps, l'Allemagne, l'Espagne et tous les pays qui ont adopté un tarif de rachat sont devenus importateurs de PV et l'industrie japonaise en a profité. En 2008, le Japon a produit 1,22 GW de modules PV et en a exporté 80 %.

Le changement a eu lieu en 2012, lorsque, comme la Chine, la Grande-Bretagne et de nombreux autres pays, le Japon a introduit un tarif de rachat. En conséquence, les marchés ont explosé et le Japon est passé du statut d'exportateur de modules photovoltaïques à celui d'importateur. L'autre effet de l'introduction d'un tarif de rachat a été que les grandes centrales photovoltaïques ont pris le dessus sur les systèmes résidentiels, qui étaient auparavant les marchés dominants. Le Japon a adopté un tarif très généreux. Même la version révisée pour l'exercice 2017 prévoit 23,9 cents par kWh pour les systèmes jusqu'à 10 kW.

Peu après l'introduction du premier tarif de rachat au Japon, l'installation annuelle a atteint un maximum absolu de 9,2 GW en 2014, principalement pour les systèmes collectifs et commerciaux. Elle a ensuite diminué d'année en année, pour redescendre à quelques 6 GW en 2017. La capacité PV cumulée au Japon, qui avoisine les 50 GW, vient au troisième rang mondial après la Chine et les États-Unis, et devant l'Allemagne, qu'elle a dépassé en 2016.

#### 4.4.6 Inde

Si l'on en croit les chiffres officiels, une révolution énergétique est en marche dans ce pays. L'Inde est un pays traditionnel de charbon. C'est sur le point de changer.

En mai 2017, 14 GW de centrales à charbon supplémentaires ont été annulés. Au cours de l'exercice 2015-2016, l'Inde avait encore installé 23 GW d'énergie thermique et seulement 7 GW d'énergie renouvelable. Un an plus tard, pour la première fois, les deux sont arrivées au même niveau : Pas plus de centrales à charbon n'a été installé que les 10,9 GW d'énergie renouvelable correspondant à 5,4 GW de nouvelle énergie éolienne et 5,5 GW de nouvelle énergie photovoltaïque. L'électricité produite à partir de charbon importé n'est plus compétitive par rapport au photovoltaïque. En 2017-2018, une puissance record de 9,5 GW de PV a été nouvellement installée, portant le total à quelque 20 GW de capacité en plus des 35 GW d'énergie éolienne. En 2017, l'Inde a dépassé pour la première fois le Japon en termes d'installation PV annuelle. Au premier trimestre de 2019, l'Inde atteignait même 31,5 GW.

L'énergie éolienne a également démarré très tôt en Inde. De seulement 6 GW en 2005, elle est passée à quelque 40 GW en 2018. Près de 10 % de la demande d'électricité de l'Inde est aujourd'hui satisfaite par l'énergie éolienne. Plus de 400 000 personnes sont employées dans le secteur. En 2017, les prix en baisse, à 4 \$cents/kWh ont été atteints à la vente.

Après les appels d'offres en 2017, les prix de l'électricité photovoltaïque ont également baissé à 4,4 cents/kWh. Le prix d'installation peut être inférieur à 1 000 \$/kW par installation PV. La baisse des taux d'intérêt y contribue. La plupart des centrales photovoltaïques sont à l'échelle des services publics et seulement 15 % d'entre elles sont installées sur les bâtiments. Un quart de l'électricité est vendu aux chemins de fer de Delhi. On prévoit que chaque gare aura un système photovoltaïque.

Fin janvier 2020 l'Inde disposait d'une capacité PV totale de 34.5 GW. En 2019 11.4 GW ont été nouvellement installés, 7.4 GW au sol et 1.9 GW sur des bâtiments.

La capacité d'éoliennes s'est vue augmenter de seulement 2.37 GW cette année là.

Le gouvernement a déclaré que d'ici 2022, 100 GW de capacité PV totale devront être installés.

Cependant, le PV en Inde semble être une médaille à deux faces inégales. On rapporte qu'environ 230 millions de personnes n'ont toujours pas accès à une électricité fiable bien que le gouvernement affirme le contraire et que la plupart des villages ont été électrifiés en 2017- un développement intéressant à suivre.

Mentionnons également que l'Inde est en train de développer son infrastructure de pompage de l'eau avec du PV. D'ici 2017, plus de 30 000 pompes à eau photovoltaïque devraient fonctionner. Un million sont annoncés pour 2021...

#### 4.4.7 Brésil, Amérique latine

**Le Brésil est un pays modèle pour la mise en œuvre et l'utilisation des énergies renouvelables.** Elle devance toutes les grandes nations et régions du monde, les États-Unis, l'Europe, devançant même de beaucoup l'Allemagne et la Chine. Aujourd'hui, le Brésil couvre déjà 83 % de sa demande d'électricité par les énergies renouvelables : 61% d'hydroélectricité, 9% de bioélectricité et 7% d'énergie éolienne. Le 1% d'énergie atomique est particulièrement ridicule : je me souviens de tous les efforts déployés par les États-Unis et l'Europe pour que le Brésil s'engage dans le nucléaire dans les années 1970. Le pays a été l'un des rares à ne pas écouter très longtemps les sirènes atomiques séduisantes avec leurs portefeuilles garnis.

Ce qui manquait jusqu'à présent dans le bouquet des renouvelables, c'était le PV. J'avais moi-même déjà fait la promotion du photovoltaïque dans les années 1970, mais n'avais pas été assez convaincant. Le marché brésilien du PV n'a commencé lentement, qu'en 2015. Enfin, en 2018, une centrale photovoltaïque de 400 MW, la plus grande d'Amérique latine, a été achevée dans le Minas Gerais. Le maître d'œuvre était EDF. Ses modules photovoltaïques ont été fournis par Canadian Solar. Il était exigé que 60% de la valeur de l'usine devait être réalisée dans le pays. Cela a servi d'excuse pour justifier les 1 300 euros par kW installé, ce qui est un peu plus élevé que les prix sur les marchés mondiaux d'aujourd'hui.

Nous avons mentionné précédemment le rôle pionnier que le Brésil a joué jusqu'à ce jour, contre toute attente, pour la promotion du bioéthanol dans le secteur des transports. Le Brésil a aussi une longue tradition d'utilisation du charbon de bois provenant de la sylviculture à rotation courte - au lieu du charbon minéral - dans l'industrie sidérurgique.

Dans le reste de l'Amérique latine, une autre famille d'installations PV à échelle utilitaire est entrée en service récemment. Une centrale de 246 MW d'Acciona et une autre centrale de 147 GW d'EDF sont en exploitation dans le désert d'Atacama au Chili. Une centrale de 160 MW d'ENEL Green Power se trouve à Finis Terrae à Antofagasta, également au Chili. Deux autres centrales de taille similaire de First Solar et de SOPOSA fonctionnent au Honduras et au Chili. Une centrale photovoltaïque de 101 MW est en service à El Salvador depuis mai 2017. Toutes ces usines coûtent en moyenne 1 500 \$/kW à construire.

Il existe aussi des systèmes PV plus petits. Le Nicaragua est subventionné par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et le Fonds monétaire international (FMI) pour en faire d'ici 2020 un pays " énergie renouvelable " avec une large quantité d'énergie hydraulique, de biomasse, éolienne, géothermique et solaire.

En Bolivie, le président Morales a inauguré en 2017 une centrale photovoltaïque de 5,2 MW, et 93 MW d'énergie éolienne ont été installés avec l'aide du Danemark.

Dans un chapitre ultérieur sur l'aide au développement, nous reviendrons sur l'Amérique centrale, où l'UE a aidé à installer des systèmes photovoltaïques et éoliens pour la connexion Internet dans 600 écoles.

**Partie 3**  
**Comprendre la Nature, créer des savoir faire**

## Chapitre 5

### Fission de l'atome et création de la technologie solaire

#### 5.1 La physique quantique et la compréhension de l'atome

Max Planck est le fondateur de la mécanique quantique. Il présenta ses découvertes à Berlin en 1900. De l'interprétation du spectre de la lumière, il conclut que la lumière doit être composée de particules élémentaires : les quanta. Il proposa la constante de Planck  $h$  et la notion de quanta d'énergie. Il s'agit là du fondement pour comprendre le monde de la physique microscopique, le monde de la dimension atomique.

Son ami Albert Einstein joua un grand rôle en l'encourageant à croire en ses découvertes – étant donné que Planck était réticent à croire en ce qu'il avait lui-même découvert. Ce fut ainsi Einstein qui expliqua en 1905 que la lumière est composée de quanta - bien que le terme de photon ne date que de 1926. Et Einstein reçut le prix Nobel pour l'interprétation de l'effet photoélectrique. L'effet photoélectrique est souvent confondu avec l'effet photovoltaïque, mais le PV est différent de la simple émission d'électrons par la lumière, comme nous le verrons ci-dessous.

Planck fut également l'organisateur du premier congrès Solvay à Bruxelles en 1911 où tous les leaders scientifiques mondiaux de la physique de l'époque se rencontrèrent, Planck, Einstein, Rutherford ... La figure 5.1 montre une copie faite par l'auteur de photo de la réunion. Elle est encore accrochée aujourd'hui à la réception de l'Hôtel Métropole à Bruxelles, où se déroula le congrès.



**Figure 5.1** Congrès Solvay à Bruxelles (1911) des physiciens les plus réputés au monde. Albert Einstein (debout en premier à partir de la droite), Ernest Rutherford (troisième à partir de la droite) et Max Planck (debout deuxième à partir de la gauche).

Le néo-zélandais Ernest Rutherford de l'Université de Manchester en Angleterre fut le premier à expliquer que tous les atomes sont structurés selon une géométrie planétaire, avec le noyau au centre et les électrons répartis en couches sphériques tout autour – une différence notable étant que les planètes de notre système

solaire se déplacent approximativement dans un plan, tandis que les électrons se déplacent sur des couches sphériques. Tout l'espace entre le minuscule noyau et les couches sphériques est pratiquement vide. Rutherford conclut ses découvertes à partir de l'analyse des raies spectrales de l'hydrogène en 1911. Jusque-là, on avait pensé que l'intérieur de l'atome était composé d'une soupe de charges électriques positives, le modèle du pudding aux fruits secs ("plum pudding"). Nous retrouvons ici à nouveau la force énigmatique et colossale qui maintient ensemble tous les protons chargés positivement dans le noyau. Nous en avons discuté dans le contexte de l'interprétation de l'énergie du Soleil. Elle est à l'origine des énergies libérées lorsqu'une bombe atomique explose.

En 1911, entra également en scène Niels Bohr de Copenhague. Il passa quelque temps en tant qu'assistant de Rutherford à Manchester avant de retourner dans sa ville natale au Danemark. En 1913, il publia l'équation de Bohr développant le modèle planétaire de Rutherford. Il combina le modèle planétaire avec les quanta d'énergie de Planck. Bohr découvrit que les électrons évoluent sur des orbites stationnaires qui correspondent à des énergies bien définies. Aucune autre orbite n'est autorisée. Mais les électrons peuvent passer entre différentes orbites, et ceci uniquement si des places y sont disponibles : sur chaque orbite, le nombre d'électrons possibles est bien défini. Les orbites intérieures sont pleines. La chimie n'est rien d'autre que le jeu de réactions entre différents atomes et des électrons situés dans leurs couches sphériques externes

## **5.2. De la physique quantique au nucléaire et aux semi-conducteurs**

Après la Première Guerre mondiale, les années 1920 et 1930 furent une période fascinante de développement de la connaissance de l'atome et de la mécanique quantique. Des dizaines de scientifiques extrêmement brillants furent impliqués. Peut-être parce que leur père, Max Planck, avait commencé le travail depuis Berlin, l'Allemagne fut au centre des activités - jusqu'à la prise du pouvoir par les nazis en 1933.

La ville de Göttingen dans le centre de l'Allemagne devint la capitale mondiale des mathématiques et de la physique théorique. Le professeur Max Born y avait la chaire universitaire consacrée à la mécanique quantique et à la physique des solides. Pascual Jordan, Viktor Weisskopf, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg et beaucoup d'autres travaillèrent avec lui à Göttingen. De même, Robert Oppenheimer, Edward Teller, John von Neumann et Enrico Fermi préparèrent avec lui leur thèse ou furent ses assistants, ceux qui construisirent plus tard à Los Alamos les premières bombes à uranium et à hydrogène du monde. Dans le cimetière de cette petite ville on trouve encore aujourd'hui les tombes de huit lauréats du prix Nobel, Max Born, Max Planck, Otto Hahn, Max von Laue, Walter Nernst, et d'autres.

Born et Einstein étaient de bons amis. Jusqu'à la mort d'Einstein en 1955 - Born était alors de retour en Allemagne - ils échangèrent 117 lettres, dit-on.

Arnold Sommerfeld fut un des autres chefs de file. Il apporta des contributions mathématiques à la théorie spéciale de la relativité de son ami Einstein. Lorsqu'il eut une chaire d'université à Munich, Werner Heisenberg fut l'un de ses assistants. Parmi ses nombreux étudiants se trouvaient Linus Pauling, Max von Laue et Hans Bethe, un scientifique de grande envergure qui devint également l'un des dirigeants à Los Alamos quelques années plus tard.

Plus tard, Werner Heisenberg devint lui-même un chef de file à Leipzig. Parmi ses étudiants figuraient Pascual Jordan, Carl Friedrich von Weizsäcker, Félix Bloch et Edward Teller. Ce dernier, qui proposa par la suite la bombe à hydrogène, avait été diplômé à Karlsruhe, l'université où j'ai passé ma thèse environ 30 ans après lui.

Erwin Schrödinger, qui succéda à Max Planck à Berlin, et Lise Meitner, proche d'Otto Hahn, étaient d'autres physiciens de cette époque passionnante.

Quant à Niels Bohr, à Copenhague, il fut une sorte de parrain. Sommerfeld, Heisenberg, Pauli et beaucoup d'autres furent ses assistants.

Tous ces scientifiques se connaissaient très bien, échangeaient des idées, partageaient souvent un appartement et travaillaient dans le même bureau. Ils passaient une grande partie de leur temps libre ensemble. Beaucoup aimaient la randonnée. Dans un livre (en allemand) sur les "constructeurs de la bombe" publié par DTV en 2013, Alex Capus raconte comment Heisenberg, Niels Bohr, son fils Christian, C.F. von Weizsäcker et Felix Bloch sont allés skier ensemble pour la dernière fois dans les Alpes Bavaroises. C'était en 1933.

Beaucoup de ces scientifiques étaient juifs ou avaient de la famille juive, et ils n'eurent d'autre issue que l'émigration, lorsque les nazis prirent le pouvoir en Allemagne. Einstein en est un exemple bien connu. Beaucoup allèrent aux États-Unis et se retrouvèrent à Los Alamos: Hans Bethe, Felix Bloch, John von Neumann, Enrico Fermi et Edward Teller. Robert Oppenheimer était issu d'une famille juive d'origine allemande mais naquit aux États-Unis. Max Born alla en Grande-Bretagne mais revint en Allemagne après la guerre. Lise Meitner s'échappa en Suède, tout comme Niels Bohr, lorsque les nazis occupèrent le Danemark.

### **5.2.1 Le chemin vers la fission nucléaire**

Une percée dans la recherche sur la fission eut lieu en 1932. Cette année-là, James Chadwick, un assistant de Rutherford à Manchester, découvrit l'existence du neutron. On savait bien que les particules chargées comme les protons n'avaient aucune chance d'accéder aux noyaux atomiques également chargés positifs - la force répulsive est insurmontable - mais une particule neutre en est capable.

Leo Szilard, né en Hongrie, fut l'un des premiers à en comprendre les nouveaux débouchés. Dès 1933, il conçut une réaction nucléaire en chaîne et la fit breveter avec Enrico Fermi. De son côté, Werner Heisenberg fut le premier à développer un modèle réaliste du noyau atomique composé de protons et de neutrons.

Otto Hahn réussit la fission de l'atome et en apporta une preuve expérimentale en 1938. Comme nous l'avons rapporté précédemment, c'est Frédéric Joliot, en France, gendre de Madame Curie, qui réussit le premier à prouver expérimentalement une réaction en chaîne de l'uranium. Et il déposa aussi un brevet sur une bombe...

### **5.2.2 L'origine de la physique des solides**

Jusqu'ici, nous n'avons discuté que de l'atome isolé. Que se passe-t-il alors dans la matière condensée, dans des cristaux constitués de nombreux atomes rangés dans l'ordre ? Felix Bloch, le Suisse qui se rendit également à Los Alamos - nous en parlerons plus tard - et qui finit par devenir le premier directeur du CERN à Genève, aborda ce problème en 1928. Se référant à l'important «principe d'exclusion» de Wolfgang Pauli qui introduit différents spins pour les électrons dans un atome, Bloch développa à Leipzig dans sa thèse avec Heisenberg, le théorème de Bloch. Le théorème explique que les niveaux d'énergie des électrons, qui sont discrets dans un seul atome, s'élargissent pour former des bandes dans la matière solide du fait des interactions.

Peu de temps après, en 1930, Kronig, un américain d'origine allemande, publia à Londres son modèle de mécanique quantique, le modèle de Kronig-Penney. Kronig vécut à Delft, aux Pays-Bas, et publia "*Band Spectra and Molecular Structure*" chez Cambridge University Press. Il était en relation avec Bohr, Heisenberg, Pauli, ...

Les semi-conducteurs, que ce soit pour les circuits intégrés, les lampes à diodes lumineuses (LED), les écrans optiques ou les systèmes PV, obéissent à ce modèle. Les électrons sont confinés non pas sur un seul

niveau d'énergie mais dans des bandes, la bande de valence étant la dernière bande externe remplie. La bande de valence est séparée de la bande externe suivante par une plage d'énergie interdite, le gap, où les électrons ne sont pas admis d'après la mécanique quantique.

Les électrons peuvent accéder à la bande de conduction vide par dopage ou par excitation optique. Les deux effets sont impliqués dans l'effet photovoltaïque à partir d'une cellule solaire. Les «impuretés» de phosphore peuvent être implantées dans la plage d'énergie interdite du silicium cristallin. L'atome de phosphore possède un électron de plus que le silicium sur sa couche périphérique. Cet électron est libéré dans la bande de conduction. Et de cette façon, cette partie du cristal devient de type n. De la même façon, une zone de type p est créée en dopant, par exemple, avec des quantités infimes de bore. L'atome de bore a un électron de moins que le silicium sur sa couche périphérique. Dans le cristal de silicium, cet déficit est compensé par un électron qui saute de sa bande de valence, laissant derrière lui un trou mobile. En conséquence de tout cela, une couche barrière de potentiel (ou d'énergie) est créée entre les zones de type n et p du cristal de silicium, appelée une diode. Comme mentionné précédemment, de telles diodes constituent la base du monde des semi-conducteurs. De plus, une fois qu'une diode est mise sous illumination, les photons communiquent leur énergie aux électrons et les font s'élever en énergie de la bande de valence à la bande de conduction, laissant derrière eux des trous. C'est l'effet photovoltaïque. Les paires électron-trou créées par la lumière sont séparées par la chute de potentiel dans la couche barrière et donnent naissance au photocourant.

### **5.2.3 La bombe atomique et les réacteurs nucléaires**

Après la démonstration de la fission de l'uranium, démarra en Amérique le projet Manhattan. Ce fut l'une des réalisations technologiques et industrielles les plus extraordinaires que l'humanité ait jamais accomplies – et elle s'est soldée par la mort de 250 000 personnes en seulement deux jours, un record également.

Le projet Manhattan faisait partie de la Seconde Guerre mondiale. Il était dirigé par ces mêmes personnes qui avaient fui l'Allemagne et son objectif était de détruire ce même pays par des bombes super massives que le monde n'avait jamais connues auparavant.

Cela démarra par une lettre envoyée en 1939 par Einstein, Szilard et Wigner au président Roosevelt, demandant de développer la bombe atomique. Roosevelt approuva à la fin de 1941. En juin et juillet 1942, Oppenheimer et Fermi convoquèrent deux réunions à Chicago et à Berkeley, en Californie, pour lancer le projet. Toutes les autres personnes que nous avons vues auparavant en Allemagne participèrent également: Hans Bethe, Edward Teller, von Neumann, Felix Bloch ... Teller poussa tout de suite pour le développement d'une bombe à hydrogène, mais cette idée lui réussit seulement plus tard. Il exprima également la crainte qu'avec une super bombe, l'atmosphère de la Terre pût être enflammée par la fusion, mais l'intelligent Bethe calcula que c'était impossible.

Le 2 décembre 1942, Fermi obtint le premier réacteur atomique du monde avec de l'uranium et du graphite à Chicago. C'était un réel défi. En fait, on ne savait pas grand-chose sur la criticité dans ces premiers temps. Si l'on se rapproche de la réaction auto-entretenu et que cela devient critique, le tout peut exploser par effet boule de neige. C'est ce qui se passe dans la bombe à uranium concentré 235 quand il y a une réaction « critique rapide». D'un autre côté, une pile nucléaire contenant de l'uranium 235 et 238 est construite de telle sorte que la réaction nucléaire est auto-entretenu par un mélange de neutrons «rapides» provenant directement de la fission de l'uranium 235 et des neutrons libérés lentement, des isotopes qui absorbent des neutrons et les relâchent avec un certain délai. Contrairement aux bombes, dans les réacteurs nucléaires, cet effet de neutrons retardés fournit une plage de sous-criticité plus large. Le réacteur n'explose que si on dépasse cette plage, comme cela s'est produit à Tchernobyl.

Les **réacteurs commerciaux** utilisent aujourd'hui de 3% à 5% d'uranium 235 fissile avec de l'uranium 238 qui n'est pas directement fissile mais converti en plutonium 239. Les neutrons rapides émis par les atomes d'uranium 235 sont ralentis par un modérateur, sinon ils sont absorbés par l'uranium 239, un processus indésirable dans un réacteur commercial, même s'il n'est pas totalement évitable. Nous avons mentionné précédemment qu'un réacteur de 1000 MW produit aujourd'hui 290 kg de plutonium par an.

Un autre avantage de travailler avec des neutrons lents est que la probabilité de les capturer pour séparer davantage l'uranium 235 et produire de l'énergie est plus élevée que pour les neutrons rapides. La plupart des réacteurs utilisent aujourd'hui de l'eau comme modérateur, certains utilisent du graphite solide et quelques-uns seulement utilisent de l'eau lourde. Inutile de dire que les bombes n'ont pas de modérateur et utilisent directement les neutrons rapides pour provoquer la réaction en chaîne.

Dans les réacteurs nucléaires à neutrons rapides dits «surgénérateurs», on utilise l'effet de la conversion de l'uranium 238 en plutonium par les neutrons rapides de manière à produire de l'énergie et du nouveau combustible en même temps. Il fut un temps où l'on avait mis beaucoup d'espoir dans cette technologie. Le point d'orgue a été le réacteur français Superphénix. Cependant, en France et partout dans le monde, tous les efforts sur cette technologie ont été abandonnés, sauf en Russie. Près de l'Oural, les BN-600 et BN-800 sont en service et un BN-1200 encore plus grand est en prévision.

Dans le projet Manhattan, la plupart des efforts furent consacrés à la production de combustibles nucléaires. L'uranium 235 était produit à partir d'uranium naturel par trois méthodes différentes: diffusion électromagnétique, gazeuse et thermique. Une quatrième, la séparation centrifuge de l'uranium 238, ne fonctionnait alors pas. L'autre combustible était le plutonium. C'était un nouvel élément qui n'avait été découvert qu'en 1940 en Californie. Pour le projet Manhattan, il fut produit à partir d'uranium 238 dans un réacteur refroidi à l'eau à Hanford.

Los Alamos fut créé à partir de rien par Oppenheimer à la fin de 1942. Les premières bombes y furent conçues et construites. Tous les experts mentionnés précédemment participèrent et déménagèrent à Los Alamos dans un secret total. Bloch, qui était en charge de la conception de la bombe quitta en 1943 au grand dépit d'Oppenheimer. Il était alors devenu clair pour le Suisse qu'Hitler allait de toute façon perdre la guerre. Plus besoin de larguer des bombes atomiques sur l'Allemagne. Quand on pense qu'il avait rejoint le projet Manhattan seulement dans le but de détruire l'Allemagne avec ces super bombes.

En juillet 1945, tout était en place à Los Alamos. Suffisamment de combustible était arrivé et ainsi fut produite la bombe à uranium qui fut larguée en août sur Hiroshima et la bombe à plutonium qui fut larguée sur Nagasaki.

Szilard et Einstein écrivirent au président pour l'exhorter à ne pas bombarder les villes japonaises. Mais Oppenheimer, Fermi, Compton et Lawrence recommandèrent le bombardement. Fermi est cité: "Ne me dérangez pas avec vos scrupules de conscience. Après tout, la chose est de la superbe physique". La lettre exigeant de ne pas procéder au bombardement n'arriva jamais jusqu'au président. Roosevelt était déjà mort et Truman était en faveur des bombardements.

Dans ma jeunesse, je suis allé voir les maquettes des deux bombes lancées au Japon qui sont exposées à Albuquerque, au Nouveau-Mexique, aux États-Unis. Je suis aussi allé voir Hiroshima.

Comme mentionné précédemment, ce fut Robert Jung, un juif de Berlin qui avait émigré en Suisse pendant la guerre, qui fut le premier visiteur extérieur à avoir accès à Los Alamos en 1949. Après y avoir discuté avec Oppenheimer, il en repartit avec une mauvaise opinion sur lui. Il publia le livre "Brighter than a Thousand Suns" pour rendre compte du projet Manhattan. Le chef de toutes les opérations, Robert Oppenheimer, fut

attaqué à partir de 1953 dans les procès de McCarthy. Il ne fut pas très soutenu par ses anciens collègues. Il dit de lui-même: "A Los Alamos, nous avons fait le travail du diable".

#### 5.2.4. Un nouveau monde de semi-conducteurs et le PV

**La première réalisation d'une jonction p-n sur un semi-conducteur - c'était un cristal de silicium – remonte à 1939 aux laboratoires de la compagnie Bell telephone (Bell Labs), Murray Hill, New Jersey.** Toutes les diodes à semi-conducteurs que nous utilisons aujourd'hui, les LED ou les diodes laser, tirent leur origine dans ce dispositif. **Ce fut aussi l'heure de naissance du PV dans le silicium;** lorsque cette diode était éclairée par une lampe de bureau, elle montrait un effet PV.

**Russel Ohl**, qui réalisa l'expérience, eut la bonne intuition d'interpréter le résultat par la formation d'une barrière par dopage sur différents côtés du cristal. Il y avait en fait des impuretés différentes de chaque côté et le dopage avait été fait par accident. Plus tard pendant la guerre, Bell Labs utilisa des diodes au germanium dans les unités radar.

Le concept d'un transistor à trois polarités avait été inventé beaucoup plus tôt par **Julius Edgar Lilienfeld** à Leipzig. Il l'avait fait breveter au Canada en 1925. C'était le concept du transistor MOSFET à effet de champ qui est aujourd'hui un élément fondamental des circuits intégrés. En 1934, un certain **Oskar Heil** à Göttingen introduisit un autre brevet sur l'idée du transistor en Grande-Bretagne.

Toujours chez Bell, **John Bardeen** créa une nouvelle branche de la mécanique quantique pour comprendre la mobilité des électrons dans les cristaux. Il construisit le premier transistor opérationnel en décembre 1947. Travaillant en collaboration avec **Walter Brattain**, qui faisait les expériences, et **William Shockley**, qui était le patron, tous les trois prirent le brevet sur le transistor à «contact ponctuel». Le transistor à effet de champ (FET) ne put pas être breveté en raison du brevet antérieur de Lilienfeld. En 1948, Shockley prit seul le brevet sur le premier transistor bipolaire, un transistor de jonction n-p-n sur du germanium. Il prit le brevet sans ses collègues parce que les relations avec ses collègues étaient empoisonnées et empreintes de jalousie.

Le groupe Bell n'avait initialement rien publié sur ses inventions; de ce fait, en Europe un autre groupe développa simultanément le même transistor. C'est l'Allemand **Herbert Mataré** et ses collaborateurs, établis en région parisienne, qui inventèrent en 1948 ce qu'ils appelèrent le transistor. Mataré était un expert.

Pendant la guerre, il avait travaillé sur le silicium en Allemagne. Plus tard, il fut le premier à commercialiser des diodes et des transistors en Allemagne et à vendre la première **radio à transistors** au monde, un an avant les Américains.

Dans ses derniers jours, j'ai eu la chance de rencontrer Mataré à Aix-la-Chapelle, sa ville natale.

Cependant, tout ce travail sur du germanium polycristallin n'a pas eu beaucoup d'impact sur le monde des semi-conducteurs et de l'informatique qui a suivi. La chose la plus importante, qui fut inventée un peu plus tard, a été le transistor au silicium. Le mérite en revient à **Gordon Teal chez Texas Instruments**. Teal rendit public son exploit, le premier transistor commercial en silicium, en avril 1954. Teal avait aussi précédemment travaillé chez Bell Labs. Et c'est justement chez Bell que Moris Tanenbaum a construit le premier transistor sur silicium en utilisant une technologie utilisée quelques mois plus tôt par Teal quand il travaillait là-bas.

La première chose que Teal trouva indispensable fut de travailler sur des monocristaux très purs. Il fit croître des cristaux de silicium par la méthode que le Polonais Czochralski avait déjà inventée en 1915. Le matériau silicium de haute pureté donnant un semi-conducteur de qualité fut fourni par Dupont. Sur de tels cristaux de silicium, Gordon développa ensuite le transistor bipolaire n-p-n. Il fut immédiatement commercialisé avec un énorme succès et fit connaître Texas Instruments dans le monde entier.

**C'est dans la même année, en 1954, et au même endroit, aux Bell Labs., que fut développée la première cellule solaire commerciale en silicium**, par d'autres personnes. J'en dirai davantage à ce sujet plus tard.

**Les circuits intégrés (CI)** ont également été inventés chez Texas Instruments. Le mérite en revient à **Jack Kilby**, qui les réalisa en 1958 avec des collègues. Cela lui valut le prix Nobel et les éloges du président américain.

Les CI sur des puces de silicium sont une autre épopée des temps modernes. En 1971, il y avait 2 300 transistors sur une seule puce. En 2014, ce nombre a atteint 2,6 milliards. Les circuits intégrés en silicium sont aujourd'hui utilisés partout dans l'électronique moderne, les ordinateurs personnels, les téléphones mobiles, les centres de données et les services de télécommunication.

En 2015, les dépenses mondiales en technologies de l'information (TI) ont atteint 725 milliards de dollars, soit presque 10 fois plus que le marché mondial du photovoltaïque cette année-là.

Le même silicium de qualité électronique est utilisé pour les circuits intégrés et les cellules solaires photovoltaïques. Nous avons essayé dans les premiers temps de développer du silicium de "qualité solaire" avec l'idée que, pour les cellules solaires, les exigences de pureté pour le matériau étaient moins strictes et le coût de production pourrait être inférieur. Cependant, il s'est avéré que la production de masse mondiale de silicium de qualité électronique augmentait à tel point que les prix s'effondraient et devenaient suffisamment faibles pour une production de cellules et de modules solaires très bon marché. J'y reviendrai également par la suite.

Les puces de circuits intégrés sont cinq fois plus épaisses que les plaquettes de silicium utilisées pour la fabrication de cellules solaires commerciales (environ 0,2 mm).

En superficie, le monde a utilisé en 2015 une surface de 6,7 millions de m<sup>2</sup> de puces de silicium. Si l'on avait fait à la place des cellules solaires, la puissance PV obtenue aurait alors été équivalente à environ 1 000 MW, soit 1 GW. Ceci doit être comparé à la valeur réelle de 50 GW d'installations de modules solaires en silicium cette année-là. En fait, le monde utilise depuis 2006 plus de silicium de qualité électronique pour le PV que pour les puces de circuits intégrés.

L'optoélectronique est un autre secteur des semi-conducteurs qui a pris de l'importance plus récemment, en particulier avec l'émergence des LED à usage général. Les diodes p-n en silicium n'émettent pas de lumière. Donc, il a fallu partir à la recherche d'autres matériaux. L'arséniure de gallium, GaAs, est un matériau candidat possible. Texas Instruments obtint un premier brevet américain sur une diode électroluminescente à partir de ce matériau en 1962. Mais cette diode n'émettait que de la lumière infrarouge. Il s'en suivit une ruée avec toujours plus de types de diodes à semi-conducteurs pour toutes les couleurs du spectre visible. Les lauréats furent **Nakamura**, **Akasaki** et **Amano** au Japon, qui présentèrent la première diode électroluminescente blanche en 1994 ce qui leur valut plus tard le prix Nobel de physique.

Les premières LED avaient deux inconvénients importants. L'intensité lumineuse était insuffisante pour des utilisations pratiques et elles étaient beaucoup trop chères. Les deux problèmes ont été résolus au cours des dernières années. On a ainsi atteint jusqu'à 300 lumens par watt et les prix ont été divisés par dix. Philips, leader mondial du secteur, a réalisé un chiffre d'affaires de 7,5 milliards d'euros avec ses lampes LED en 2016 et s'attend à 25 milliards d'ici 2023. Cela dit, les LED n'ont pas encore atteint le monopole de l'éclairage car les lampes halogène et les lampes néon à basse pression défendent pour le moment leurs importantes parts de marché.

La plupart des LED qui connaissent le succès utilisent des composés de Ga, As, In, P et N. Le matériau est fortement dopé.

Les LED ont fait d'importantes percées dans le marché mondial de l'affichage optique, où des milliards d'ordinateurs, de smartphones et de téléviseurs sont vendus. Les LED sont utilisées en combinaison avec la technologie des cristaux liquides (LCD). Les OLED et QLED sont dédiées aux écrans de télévision, mais à ce jour les vrais pixels à LED permettant des images brillantes (par opposition aux LED utilisées comme rétroéclairage des affichages LCD) sont encore dans leur phase d'essai.

## Chapitre 6

### Photovoltaïque

#### 6.1 Les marchés mondiaux du PV : Comment ils ont explosé

Dans les parties précédentes nous avons déjà donné de nombreux détails sur le parcours aventureux du PV depuis son apparition sur les marchés mondiaux de l'électricité. Voici un résumé de ce qui s'est passé.

Les marchés mondiaux du photovoltaïque sont arrivés en trois vagues. La première s'est étendue de l'invention de la cellule solaire au silicium jusqu'en 2000, lorsque la capacité installée à l'échelle mondiale a atteint 1 GW.

La deuxième vague a dépassé 25 GW, atteints en 2009, jusqu'à 100 GW atteints fin 2012.

La troisième vague depuis 2013 a apporté encore plus de marchés en accélération avec 450 GW réalisés en 2018.

Au cours des 20 premières années qui ont suivi l'invention d'une cellule solaire pratique, le monde a atteint en 1973 une faible capacité terrestre de 1 MW installée, sous la direction des États-Unis. En 2000, ce marché avait cumulé jusqu'à 1 000 MW, ou 1 GW, de façon plus ou moins empirique par « essais et erreurs » comme on dit. Ce marché était dominé par l'Europe, les États-Unis et le Japon. La deuxième vague est survenue au début du nouveau siècle, lorsque l'Allemagne a mis en place un tarif d'achat incitatif. En conséquence, l'Europe a orienté le monde vers une capacité PV record de 100 GW en 2012. Les principaux pays étaient l'Allemagne et l'Espagne. La troisième vague ressemble plutôt à un tsunami. Tout a commencé lorsque la Chine, le Japon, le Royaume-Uni et d'autres pays ont également adopté le système du tarif d'achat en 2013 et que leurs marchés ont explosé. Quelques 450 GW de puissance PV cumulée ont été installés jusqu'en 2018. Dans le même temps, l'Europe a perdu son rôle de leader depuis cette année cruciale (2013) et a été complètement mise à l'écart. Depuis 2016, le monde s'est habitué à un régime de croisière de 70 à 100 GW d'énergie photovoltaïque nouvellement installée chaque année. Les principales nations dans cette ruée sont la Chine, les États-Unis, l'Inde et le Japon.

Depuis le début, les marchés mondiaux ont été dominés par les cellules et modules solaires au silicium, même si une niche a toujours été laissée aux technologies alternatives.

#### 6.2 La situation aujourd'hui

Aujourd'hui, le marché mondial du PV est dominé par les modules de cellules solaires au silicium, qui occupent une part globale de 94% du total, 71% pour les cellules solaires au silicium multicristallin et 23% pour les cellules monocristallines (chiffres pour 2016, d'après RTS Corp, Tokyo, Japon). En général, les modules multicristallins sont bleus et les modules monocristallins sont noirs. Les modules à base de couches minces de CdTe avec une part de marché de 4 % et ceux du CIGS avec 1,5 % jouent un rôle marginal. La Chine et Taiwan produisent la part du lion de 73% du marché mondial des modules photovoltaïques.

Sur le marché international au comptant, **les prix des modules de silicium** sont passés de 1,85 \$ le watt en 2010 à **30 cents le watt aujourd'hui**. Tous les maillons de la chaîne de valeur ont été concernés par cette énorme diminution des coûts. Depuis 2010, **le prix de la charge d'alimentation en silicium** est passé de 80 \$/kg à 12 \$/kg, **le prix des cellules solaires** est maintenant de 1,14 \$ pour une cellule standard de 6 pouces par 6 pouces, soit 5 fois moins qu'en 2010, et le coût des plaquettes de silicium a diminué de la même façon.

**La cellule solaire classique en silicium cristallin** est constituée d'une diode à jonction p-n. L'absorption de la lumière sur la surface supérieure est améliorée par un revêtement antireflet après l'avoir texturée par gravure. Sur la face arrière, la cellule possède un contact en aluminium et un champ de surface arrière (BSF). Ces cellules ont généralement une efficacité de 20%.

Actuellement, **la cellule arrière à émetteur passif (PERC)** et **les cellules à hétérojonction avec couche mince intrinsèque (HIT)** sont au premier plan.



**Figure 6.1** Une cellule solaire au silicium multicristallin (photo de l'auteur).

La cellule **PERC** possède en outre une couche de passivation diélectrique sur la face arrière qui réfléchit la lumière non absorbée dans le silicium monocristallin pour lui donner une seconde chance d'absorption. Swiss Meyer Burger est une entreprise leader dans le domaine de l'équipement de revêtement. Les PERCs ont une efficacité légèrement supérieure jusqu'à 22%.

**La cellule HIT** est produite par Panasonic au Japon. Elle se compose d'un cristal de silicium de type n qui est recouvert sur la surface supérieure d'une couche extrêmement mince de silicium amorphe, seulement 100 couches atomiques d'épaisseur. La couche de contact est intrinsèque, ou non dopée, recouverte d'une aussi

fine couche de type p de silicium amorphe. La barrière, diode à hétérojonction, est formée entre le silicium cristallin de type n et le silicium amorphe de type p séparé par une partie intrinsèque. La meilleure efficacité obtenue par Panasonic jusqu'à présent est de 25,6% sur une cellule et de 23,8% sur un module complet. Ce sont évidemment des produits de laboratoire. Les modules pour la vente sur le marché ont une efficacité de l'ordre de 20%. Panasonic est connu pour avoir un accord de coopération avec Tesla, le fabricant de voitures électriques aux États-Unis.

Une autre technologie va au-delà du HIT de Panasonic. Elle n'a pas de nom en soi. Elle est très sophistiquée et peut-être la plus intéressante de tous. Il s'agit de **la cellule en silicium cristallin de Kaneka de type « hétérojonction à contacts arrières »**. Pour former l'hétérojonction, le procédé utilise une très fine couche de silicium amorphe intrinsèque et de type p comme la cellule HIT, mais ici elle est placée à l'arrière de la cellule, celle qui n'est pas illuminée. Une autre différence est que les deux contacts, le positif pour le silicium amorphe et le négatif sur le silicium de type n sont tous les deux à l'arrière, cette technologie ayant été développée par Sunpower. Sans les doigts de contact habituels sur la face supérieure, l'absorption est augmentée. En 2017, le Japonais Kaneka a annoncé un record mondial d'efficacité pour le silicium sur sa cellule à près de **26,7%**.

De plus, les modules de Kaneka, avec un peu plus de 24 %, ont battu le record mondial d'efficacité des modules détenus jusqu'à présent par SunPower.

Par souci d'exhaustivité, il convient de mentionner qu'un certain nombre d'autres entreprises photovoltaïques proposent également des cellules et modules tout contact arrière, que ce soit avec ou sans la couche amorphe pour l'hétérojonction.

Ce n'est pas le but de présenter ici une liste complète des différents fabricants de cellules et de modules avec leurs produits et leurs efficacités de conversion qui sont sur le marché. Il y en a beaucoup.

En résumé, les modules commerciaux typiques d'aujourd'hui se situent entre 200 et 500 watts. Les rendements de conversion varient de 15 % à 20 %. Il en va de même pour les modules CIGS ou CdTe qui se trouvent sur le marché mondial.

Il existe un marché particulier pour les cellules solaires GaAs à jonction unique. Il s'agit principalement d'applications satellitaires et donc très limitées. L'efficacité typique des cellules commerciales se situe ici à environ 22 %.

Le marché des cellules à multijonctions est encore plus restreint. Comme elles sont chères, seul un petit marché de niche est apparu il y a quelque temps pour les concentrateurs PV, notamment pour la concentration optique avec lentilles, mais il n'a pas pu se développer beaucoup. Des multijonctions utilisant divers composés de Ga, In, P, As, etc. ont été développées par Sharp au Japon, Soitec en France, FhG ISE en Allemagne et NREL aux États-Unis. Des efficacités entre 44% et 46% à des concentrations de lumière de quelques centaines de soleils ont été démontrées sur des produits de laboratoire.

### **6.3 Tentatives de R-D d'aujourd'hui**

**Aujourd'hui, nous pouvons dire que l'essentiel du travail de R&D est terminé.** Au moins pour le composant clé, le module PV. Trente centimes de dollar le watt pour un beau produit, fiable, que voulez-vous d'autre ! Je me souviens, il y a longtemps, en France, quelqu'un d'EDF a dit que le PV n'y parviendrait jamais, même lorsque le coût du module devient nul. À l'heure actuelle, il ne coûte pas beaucoup plus cher que la feuille de verre sur laquelle il est déposé. Quelle réussite ! Les systèmes photovoltaïques clés en main sont encore beaucoup plus chers, mais cela a plus à voir avec les coûts accessoires et les politiques locales.

Ce que nous avons fait est le résultat du développement de la production de masse combiné à la R&D. Dans les années glorieuses du début du siècle, lorsque les marchés ont explosé, les conférences mondiales sur le photovoltaïque ont également explosé. Des milliers de personnes y ont assisté avec enthousiasme.

Aujourd'hui, il reste encore une importante communauté mondiale qui s'intéresse à la R&D sur le PV. Et elle continue d'être bien connectée. La plus grande conférence mondiale de spécialistes est la PV SEC européenne. J'ai créé la série en 1977. La 35e conférence s'est tenue en 2018 à Bruxelles. J'ai été l'un de ses initiateurs et j'y reste associé. La 34e conférence a été organisée avec les associations PV américaines et japonaises à Hawaï dans le cadre de la 7<sup>ème</sup> Conférence mondiale sur la conversion photovoltaïque.

Ces conférences sont importantes pour rassembler les gens, échanger les derniers résultats et d'autres idées nouvelles.

Un point fort est toujours la partie sur le silicium pour examiner l'état d'avancement des développements structurels, des gains d'efficacité et des applications. Le développement de modules haute tension d'environ 1 500 volts et des onduleurs correspondants est également intéressant.

Les cellules de silicium bi-faciales, autrefois créées par les Russes pour des applications spatiales, ont été développées par l'Espagnol Antonio Luque, qui a créé la société Isofoton à Malaga : elles aussi ont fait une nouvelle apparition.

Des cellules à spectre complet sont également apparues de temps à autre. Les travaux remontent à 1960 en Allemagne, avec des contributions de Klaus Thiessen à Berlin et une découverte que j'ai faite moi-même sur les cristaux CdS dans ma thèse en 1965, suivie par d'autres chercheurs. A. Luque a repris ce sujet bien des années plus tard, et a pris un brevet sur ce sujet.

Les progrès réalisés dans le domaine des matériaux et structures alternatives sont passés en revue ici. Un point culminant ici est le matériau perovskite. Les premières attentes sont loin d'être comblées jusqu'à présent. Il y a, en particulier, un problème de stabilité des performances qui ne dépassent pas 10% d'efficacité sur des cellules de taille raisonnable. Cependant, le groupe photovoltaïque suisse Meyer Burger a déclaré début 2019 sa confiance dans la filière perovskite, en particulier sous forme d'association avec les cellules au silicium pour former des cellules à deux jonctions superposées capables de fonctionner en tandem et d'atteindre des rendements théoriques plus élevés que les jonctions simples (43% au lieu de 33%). La technologie doit venir d'Oxford PV. La production en série des cellules a été annoncée par le PDG de la société pour la fin de 2020. Meyer Burger émerge de nombreuses années difficiles et considère la filière pérovskite comme une sorte de bouée de sauvetage, abstraction faite des risques que cela comporte.

Le sélénium revient un peu malgré ses modestes gains d'efficacité.

De nouvelles cellules à multijonctions basées sur des composés III-V sur silicium sont à l'essai. Des rendements de 33 % ont été annoncés, mais pour quel marché ?

## **6.4 Rétrospective : les découvertes PV, un monde de pionniers**

### **6.4.1 La découverte de l'effet photovoltaïque**

En 1839, **Edmond Becquerel**, âgé seulement de 19 ans, découvre l'effet photovoltaïque : "...on observe un courant électrique lorsque l'on expose de façon inégale au rayonnement solaire 2 feuilles d'argent ou d'or dans une solution acide, neutre ou alcaline...". Il a mené ses expériences dans les laboratoires de son père au Muséum National d'Histoire Naturelle en plein centre de Paris. Conscient de l'importance de sa découverte, il écrit en 1867 le livre *La Lumière, ses causes et ses effets*. Le bâtiment où cela s'est produit existe toujours. C'est le même où son fils Henri découvre en 1896 la radioactivité. C'était la radioactivité de l'uranium. La figure 6.2 montre le père et le fils.

Plus tard, les Curie devinrent très populaires à Paris avec leur travail sur la radioactivité qui suivit celui d'Henri. Il y a un Institut Curie, un Musée Curie, des livres Curie et des rues Curie partout en France.

Rien qui porte le nom d'Edmond Becquerel. Sa découverte a été tout simplement oubliée par les Français. Et j'ose dire que c'était peut-être un peu plus important que celle des Curie pour l'avenir de l'humanité.



**Figure 6.2** : Les Becquerel. À droite, Edmond qui découvrit l'effet photovoltaïque. À gauche, son fils Henri, le découvreur de la radioactivité (crédit photo : Loïc Babo, les Génies de la Science).

Cependant, les Anglais l'ont bien rappelé. En 1989, à l'occasion du 150<sup>ème</sup> anniversaire de la découverte, mon ami, le regretté professeur **Bob Hill** à Newcastle, en Angleterre, a demandé à la BBC de diffuser un programme sur Edmond Becquerel. J'ai alors décidé, au nom de l'UE, de créer un prix Becquerel pour récompenser les meilleures contributions au développement du photovoltaïque. Il est régulièrement remis jusqu'à ce jour lors d'une séance solennelle à chacune des conférences européennes PV SEC. Depuis lors, des dizaines de pionniers du photovoltaïque ont été honorés. Le premier était le regretté Baron Roger van

Overstraeten de Louvain en Belgique - il était aussi un pionnier belge dans le développement de l'informatique, en Flandre pour être plus précis.

#### 6.4.2 Vers une cellule solaire pratique

Le sélénium, et non le silicium, a été le premier matériau utilisé pour une cellule solaire pratique. Sa réponse spectrale à l'irradiation solaire est moins adaptée que celle du silicium, mais il est plus facile à produire.

Mais avant que le premier effet PV ait été découvert sur le sélénium, l'Anglais **Wilboughly Smith** a accidentellement trouvé un **effet photoélectrique** sur ce matériau. La différence par rapport au PV est que l'effet photoélectrique n'implique pas la création d'une tension, seule la conductivité électrique est altérée par la lumière incidente en fonction de son intensité. Il convient comme capteur optique, mais pas pour la production d'énergie. En conséquence, après que Smith ait publié ses découvertes dans *Nature* en 1873, **Werner Siemens** en Allemagne a produit le premier photomètre en 1874. Les capteurs optiques au sélénium ont survécu comme compteurs de lumière jusqu'aux années 1960 sur les caméras allemandes.

Un premier effet PV sur le sélénium a été découvert par **Adams et Day** à Londres en 1876. Il a également été trouvé accidentellement parce qu'ils n'avaient pas construit à dessein une diode qui est essentielle pour l'effet PV.

Le véritable événement s'est produit aux États-Unis en 1883 lorsque **Charles Edgar Fritts** a construit une première cellule solaire au sélénium. Le sélénium avait une couche de contact en or semi-transparent qui fournissait l'effet de diode. On dit que Fritts a atteint une efficacité de seulement 1% avec sa cellule. Il est intéressant de noter qu'il aurait dit : "Nous pourrions voir la plaque photoélectrique concurrencer les centrales à combustible fossile...". Fritts a envoyé sa cellule à Werner Siemens, qui l'a montrée à la Royale Académie de Prusse. Tout le monde fut impressionné, Siemens disant : "pour la première fois la conversion directe de l'énergie de la lumière en énergie électrique". Les premières cellules solaires avaient un rendement trop faible et étaient trop chères pour des applications pratiques. Mais la première voiture électrique à cellules solaires au sélénium a été construite aux États-Unis en 1912.

La première cellule solaire pratique au monde avec un rendement de 6 % a été construite aux laboratoires Bell en 1954 par **Daryl Chaplin, Calvin Fuller et Gerald Pearson** avec l'aide de **Morton Prince**. C'était une cellule de silicium monocristallin. Entre-temps, la métallurgie du silicium s'était suffisamment développée pour que cela soit possible. Le *New York Times* a écrit : "**Les cellules solaires conduiront éventuellement à une source d'énergie illimitée à partir du Soleil**". Mais à cette époque, les premières applications concernaient des changeurs de billets de banque. Plus tard, elles ont pris une importance stratégique dans la course entre les États-Unis et l'Union soviétique avec les satellites Vanguard et Spoutnik en 1958. Un autre chapitre présentera la ruée technologique des cellules au silicium qui en a découlé.

Dès les premiers jours où la compréhension des semi-conducteurs s'était suffisamment développée, on savait que de nombreux semi-conducteurs et composés élémentaires conviennent au PV. Comme alternative possible aux cellules en silicium qui venaient juste d'être inventées, les "cellules et modules solaires à couche mince" sont apparus à l'époque. Compte tenu de leurs propriétés propres, les cellules au silicium doivent avoir une épaisseur d'au moins 100 microns. Cependant, avec d'autres matériaux, il est possible d'obtenir une réduction de l'épaisseur d'un facteur 100 : il s'agit des cellules à couche mince.

Un bon exemple est le **GaAs**, qui a trouvé un marché particulier dans les applications satellitaires - en raison de son coût élevé, d'autres marchés sont difficilement accessibles. Une cellule solaire à hétérojonction GaAs a été développée pour la première fois en 1970 par **Zhores Alferov** en Union soviétique. En même temps, il a développé le premier laser à semi-conducteur avec ce matériau – c'est une personnalité exceptionnelle qui a reçu à la fois l'Ordre de Lénine et le Prix Nobel pour ses nombreuses réalisations.

A ce jour, des efficacités allant jusqu'à environ 28% ont été démontrées sur des cellules solaires au GaAs.

En 1976, **David Carlson et Christopher Wronski** de RCA aux États-Unis ont créé la cellule solaire au **silicium amorphe** (a-Si). Auparavant, le Professeur **Spear**, en Écosse, avait constaté que ce matériau est un semiconducteur et pouvait être dopé de type n ou p. Vous vous souvenez peut-être des calculatrices de poche des années 1970 avec leurs petites bandes PV. Celles-ci étaient réalisées à partir de a-Si. Vers 2010, le silicium amorphe occupait environ 15% du marché mondial du photovoltaïque, mais il n'a pas duré et a presque disparu aujourd'hui. Ce qui lui a brisé le cou était une dégradation inhérente des cellules amorphes. Le principal producteur avait été le Japonais Sanyo. Sauvegardant ce qui pouvait encore être sauvé, Sanyo, acquis par Panasonic en 2009, a développé la cellule HIT. Nous l'avons décrit à la section 6.2. Dans la cellule HIT, une hétérojonction est produite par la mise en contact du silicium cristallin avec une fine couche de silicium amorphe.



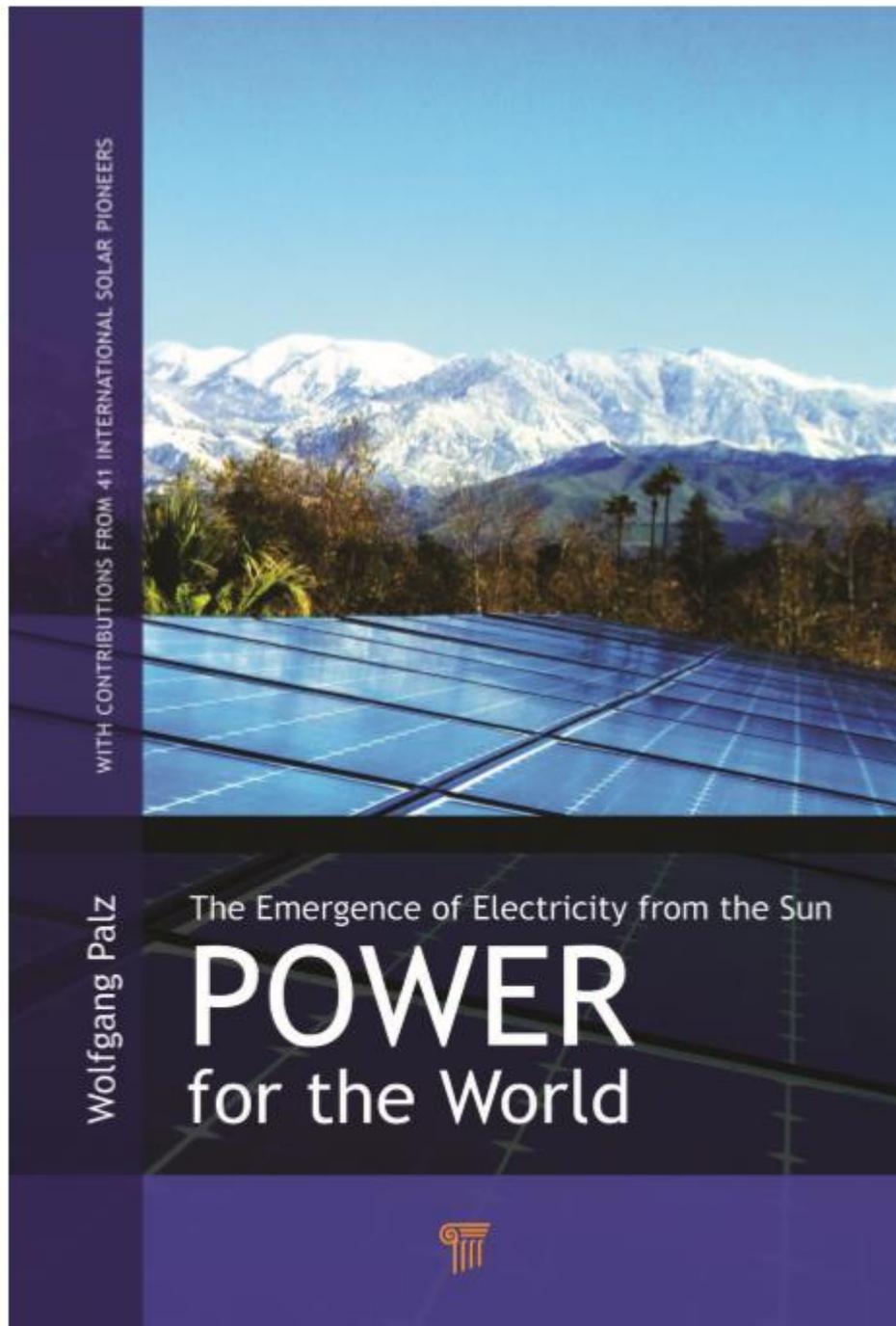
**Figure 6.3** Saint-Pétersbourg, 2008. A droite, Zhores Alferov, Ordre de Lénine et Prix Nobel, avec le Professeur Klaus Thiessen, Berlin, et l'auteur.

Après le silicium cristallin, les modules solaires **CdTe** sont aujourd'hui les plus performants sur les marchés mondiaux du photovoltaïque. Le pionnier de son développement fut le regretté **Dieter Bonnet** en Allemagne. Pour ses réalisations, il a reçu un prix Becquerel et une rue porte son nom dans sa ville natale. Dieter a établi les technologies de base de la cellule en 1971. C'est la même hétérojonction CdTe/CdS qui est toujours commercialisée. De nombreuses personnes et entreprises se sont impliquées en Allemagne, en France et en particulier aux États-Unis. En 2001, **Ting Shu**, l'USF et l'Université méthodiste du Sud à Dallas avaient déjà atteint une efficacité de 16%. Dieter a démarré la première ligne complète de production de modules CdTe au sein de la société ANTEC qu'il avait créée en 1996 en Allemagne. Il s'agissait de la première ligne dans le monde de production de modules photovoltaïques entièrement automatisée. L'entreprise n'a pas survécu aux nombreux hauts et bas de l'industrie photovoltaïque mondiale. Mais **Harold McMaster** de Solar Cell Inc.

aux États-Unis est venu le voir. Cela l'a certainement inspiré. Il a vendu son entreprise, qui est devenue **First Solar** en 1999. Elle est jusqu'à présent le leader mondial du marché des modules CdTe.

Il y a aussi les modules solaires **CIS et CIGS**. Ce sont des composés ternaire et quaternaire de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium. Ils étaient proposés depuis 1971 comme alternative aux cellules solaires au silicium par le Professeur **Josef Loferski** de l'Université Brown de Providence, USA. Je me souviens très bien des réunions des années 80 et 90 où certains responsables des programmes PV américains ont exprimé leur colère face à des structures aussi compliquées qui sont revenues sur le devant de la scène de la recherche. Mais ils ont continué à attirer un énorme intérêt scientifique et industriel et occupent désormais un rôle alternatif à côté du CdTe sur les marchés mondiaux du photovoltaïque. Et le gagnant n'est pas un de ceux qui étaient prévus dans les premiers jours. C'est Showa Shell Solar au Japon qui est impliqué depuis 1993. Avec **Solar Frontier**, elle produit à grande échelle depuis 2007.

Il y a en fait beaucoup plus à dire sur l'époque fascinante où le photovoltaïque a commencé à sortir la tête de l'eau. Le lecteur pourra se référer à notre livre *Solar Power for the World : What You Wanted to Know about Photovoltaics*, publié par Pan Stanford, Singapour, en 2013. La figure 6.4 montre la couverture de la version antérieure du livre de 2010. Dans le livre, 40 pionniers internationaux du développement photovoltaïque rendent compte de leurs premiers travaux. **Morton Prince**, qui a participé à l'invention de la première cellule en silicium aux Bell Labs en 1954 et qui est devenu plus tard le directeur du programme de développement du PV du gouvernement américain, a commenté le livre : "Je tiens à vous féliciter pour la qualité du livre et la quantité d'informations que vous avez pu y intégrer. En lisant les 50 premières pages, j'ai trouvé tellement d'informations dont je n'étais pas au courant... Et merci pour l'énorme contribution à la production d'un si beau volume".



**Figure 6.4** La première édition du livre de l'auteur *Power for the World* (2010).

### **6.4.3 Le développement des cellules solaires au silicium**

**Le monde du silicium a commencé en 1954**, l'année où le transistor et la cellule solaire ont été inventés simultanément à partir de ce matériau particulier.



**Figure 6.5** Beach Party 2010 de *Power for the World* à Valence, Espagne, avec quelques-uns des 40 auteurs de livres. Ma dernière photo avec Hermann Scheer (deuxième rangée, derrière les deux dames).

Compte tenu des énormes perspectives de marché pour les puces électroniques et les cellules solaires, la première chose à développer a été la production à grande échelle de **silicium ultra-pur**. Depuis ses débuts en 1954 le marché pour ce produit est en effet passé à 600 000 tonnes en 2018, principalement pour les cellules solaires.

Le silicium est simplement dérivé du sable, qui est constitué de dioxyde de silicium. On pourrait utiliser le sable de la plage, mais d'autres dépôts de quartzite plus propres sont utilisés. Après la réduction à partir du coke dans un four à arc, le silicium brut doit être nettoyé en profondeur pour obtenir une qualité électronique. Jusqu'à ce jour, cela se fait en particulier avec le "**procédé Siemens**". La méthode fut développée dans les années 1950 et brevetée par Siemens en 1973. La société Wacker en Allemagne a adopté ce procédé et a créé en 1968 Wacker Chemitronic, qui est devenu plus tard Siltronic. Son directeur était feu **Werner Freiesleben**.

Le procédé de croissance de monocristaux à partir de silicium était déjà bien connu depuis 1916, année de son invention par Jan Czochralski. Ainsi, la porte était alors ouverte, dans les années 1960 et 1970, pour entrer dans la production de masse de dispositifs électroniques sur puces et de cellules solaires sur des monocristaux de silicium.



**Figure 6.6** Un monocristal de silicium (photo de l'auteur).

A côté du silicium monocristallin, le matériau multicristallin pour cellules solaires a fait son apparition depuis le début des années 70 en Allemagne. Le moulage de blocs de poly-silicium a été développé par **Horst Fischer** et ses collaborateurs de AEG Telefunken et **Bernhard Authier** de Wacker. Tous deux ont reçu en 1978 le Prix allemand **Walter Schottky** pour leur travail. Fischer, que je connaissais bien à l'époque, a quitté le secteur photovoltaïque et a fini par devenir vice-président de Siemens AG.

Le silicium **multicristallin** semblait intéressant pour réduire le coût de production des cellules solaires. Ainsi, Freiesleben a créé en 1978 pour le compte de Wacker Chemitronic, la filiale **Wacker Heliotronic**, qui est en fait un programme ! **A cette époque, Freiesleben est devenu le principal promoteur allemand des promesses d'une ère solaire.** Il a eu beaucoup d'influence sur Hermann Scheer et l'a beaucoup encouragé quand Hermann a commencé ses initiatives politiques sur le déploiement de l'énergie solaire.

Cependant, Werner Freiesleben n'a reçu ni soutien ni reconnaissance de sa société. Après 30 ans chez Wacker, il l'a quitté en 1988 et Heliotronic est devenu obsolète. De toute évidence, il a eu un conflit avec son entreprise qui ne partageait pas sa grande vision de l'énergie solaire. Et aujourd'hui, Wacker Polysilicon fait beaucoup d'argent dans l'industrie solaire : Avec 80 000 tonnes, elle est le deuxième producteur mondial de silicium. Ils devraient ériger une statue en l'honneur de leur ancien directeur visionnaire!

Un autre défi est la découpe en plaquettes des blocs de silicium, qu'ils soient monocristallins ou multicristallins. En particulier, pour les cellules solaires, elles doivent être les plus minces possibles, entre 150 et 200 microns. A cette fin, un nouveau dispositif a été mis au point pour réduire au minimum la perte de "kerf", c'est-à-dire la perte de poudre pendant le sciage. C'est la **scie à fil**. Une scie à fil diamanté a été développée par **Charles Hauser** en Suisse avec le soutien, entre autres, de **Guy Smekens** de la société ENE à Bruxelles et **Photowatt** en France. Hauser a commencé comme consultant chez Solarex et a réalisé en 1986 sa première scie multifilaire. Il a créé la société HCT Shaping Systems et a pu la vendre en 2007 à Applied

Materials pour 475 millions de dollars. Plus tard, le savoir-faire a été transféré en Chine. Actuellement, l'entreprise suisse Meyer Burger est l'un des leaders du sciage à fil.

Enfin, il fallait optimiser la technologie des cellules solaires, améliorer l'efficacité de la conversion et réduire les coûts. Les améliorations essentielles de la cellule solaire standard à jonction pn en silicium ont été réalisées par Comsat Labs à Washington DC et publiées en 1973. L'œuvre a été dirigée par feu **Josef Lindmeyer**, un bon ami à moi, qui a ensuite créé avec **Peter Varadi** la société **Solarex**. L'histoire de ce développement essentiel est racontée par un autre de mes amis, le regretté **Martin Wolf**, de Princeton : "Silicon Solar Cell Development", page 113 des actes d'une conférence tenue à Toulouse, France, en mars 1976, dont j'ai été le secrétaire général.

Tout d'abord, le groupe de Lindmeyer a développé la **Cellule Violette**. Son efficacité était de 10 % supérieure à celle de la cellule conventionnelle. Trois éléments ont permis d'atteindre cet objectif : un meilleur revêtement antireflet, une zone de surface plus mince et une structure de grille plus fine. Dans l'étape suivante, ils ont approché l'efficacité de 18% avec la **Cellule Noire**. Pour cela, il a été introduit un procédé, maintenant devenu la norme sur toutes les cellules solaires qui se trouvent sur les marchés mondiaux : La surface de la cellule a été façonnée en une structure faite de petits cônes par un processus de gravure. Cela réduit la réflexion optique de plus de la moitié. De plus, les photons pénètrent plus obliquement dans la cellule, augmentant ainsi l'absorption des grandes longueurs d'onde.



**Figure 6.7** Pionniers "belges" du PV. Ils ont consacré toute leur vie au photovoltaïque. Bruxelles 2017. (à gauche) Guy Smekens, ENE à Bruxelles, (au centre) Pierre Verlinden, maintenant avec Trina en Chine, et (à droite) l'auteur.

Une autre amélioration a déjà été mentionnée : **la cellule solaire à contact arrière**. Ici, les deux contacts, le positif et le négatif sont placés sur la face arrière de la cellule en supprimant les doigts de contact sur la face avant. Il a été proposé en 1994 aux États-Unis par **Pierre Verlinden** et **Richard Swanson**. Comme il s'agit d'un processus de fabrication plus complexe, il n'a pas trouvé d'application générale.

## 6.5 La première vision d'une production de masse du photovoltaïque et la conquête des marchés mondiaux de l'électricité

### 6.5.1 Les pionniers américains ont fait un rêve

Imaginez la situation de l'énergie aux États-Unis au début des années 1970. Des milliards de dollars ont déjà été dépensés pour l'énergie nucléaire et des centaines de millions pour les centrales au charbon. Il était prévu de développer un surgénérateur nucléaire à métal liquide et la gazéification du charbon pour les centrales à cycle combiné d'ici 1980. Pour le premier, on projetait de construire chaque jour un réacteur surgénérateur de 5 GW. À plus long terme, la fusion nucléaire était dans les cartes de l'industrie de l'énergie conventionnelle et de leurs laboratoires nationaux associés. Les Goliaths énergétiques bandaient leurs muscles.

Et l'énergie solaire ? Cela ne comptait pas du tout. Vingt ans après l'invention de la cellule solaire au silicium, le marché annuel du photovoltaïque était encore inférieur à 0,1 MW (100 kW) en 1973, principalement pour des applications spatiales. Pourtant, aujourd'hui, en 2018, le marché américain a atteint quelque 10 000 MW. Il s'est passé quelque chose. Au début des années 1970, le goulet d'étranglement pour les marchés photovoltaïques était le coût élevé des cellules solaires : 20 \$/Watt pour le minuscule marché terrestre de l'époque et 200 \$/Watt pour les applications satellitaires. Aujourd'hui, un module solaire en silicium coûte 0,30 \$ le watt sur le marché mondial au comptant.

Le réveil est venu de **William Cherry** de la NASA : "L'utilisation à grande échelle de l'énergie solaire sera un héritage pour les générations à venir, quelque chose dont tous les citoyens pourront être fiers et un pas important vers l'assainissement de notre planète, tant du point de vue des particules que du point de vue thermique. Pour ces raisons, l'utilisation à grande échelle de l'énergie solaire devra être initiée. Il peut s'agir de la différence entre la survie ou l'autodestruction de l'homme".

Bill Cherry a fait cette déclaration en octobre 1971 lors d'une conférence d'évaluation sur l'utilisation à grande échelle du PV organisée par **Karl Wolfgang Böer** à l'Université du Delaware.

Lors de la même réunion, Josef Loferski, que nous avons mentionné précédemment, a souligné que les automobiles sont une référence pour la production de masse : À l'époque, elles coûtaient 0,5 \$ par kg de voiture. Les cellules solaires coûtaient 6 000 \$ le kilo à l'époque et, en termes de production de masse, des considérations similaires devraient s'appliquer. Et c'est ce qui s'est passé depuis.



**Figure 6.8** Karl Wolfgang Böer en 1973 devant son Solar One au Delaware, USA. C'était le premier bâtiment au monde avec un réseau PV intégré (photo de l'auteur).

Un événement majeur fut l'atelier suivant en octobre 1973 à Cherry Hill organisé par le Jet Propulsion Lab. et sponsorisé par la National Science Foundation. Mon ami **John F. Jordan**, avec qui j'ai été plus tard en relation pour son usine de cellules solaires CdS à El Paso, a fait remarquer que les États-Unis avaient à l'époque une capacité globale de 400 GW d'énergie conventionnelle en place. Et les nouvelles installations conventionnelles sont arrivées à 250 \$/kW, principalement financées par des investissements privés. Ce chiffre est devenu comme une sorte de référence de coût face auquel le photovoltaïque devait rivaliser à l'avenir.

Les résultats d'un panel d'experts sur les cellules au silicium ont été présentés par **Paul Rappaport** du RCA de Princeton, fondateur du **NREL**. Il a proposé qu'en utilisant l'effet d'échelle, un coût de 0,10 \$ le watt pourrait éventuellement être atteint pour un volume de production annuel de 50 GW - et la probabilité de succès était élevée : Il y a beaucoup de matière première disponible à bas prix, la théorie et la technologie sont bien comprises et la fiabilité est prouvée.

C'était une excellente projection. Maintenant, quelques 45 ans plus tard, en tenant compte d'environ 500 % de l'inflation depuis le moment où la projection a été faite, nous devrions nous situer à environ 0,50 \$ le watt aujourd'hui. Nous sommes encore même un peu plus bas sur les marchés mondiaux aujourd'hui, et les 50 GW se situent exactement dans la fourchette de ce marché. Bon travail !

Seule la mise en œuvre ne s'est pas déroulée comme les premiers pionniers américains l'avaient imaginé. Ils avaient exigé que le gouvernement commence à financer les investissements nécessaires. "L'indécision, la fluctuation des prix, la rhétorique politique ne susciteront pas la confiance pour un programme photovoltaïque financé par le secteur privé", ont-ils déclaré. Mais ce qui se passe toujours, c'est que les gouvernements financent les programmes nucléaires, mais pas les programmes solaires. En conséquence, le calendrier voulu par les pionniers américains n'a pas été réalisé du tout parce que le gouvernement n'a pas suivi. Jusqu'au tournant du siècle, le marché du photovoltaïque aux États-Unis n'a pas vraiment évolué.

Ce qui a d'abord bougé, c'est le marché allemand. Hermann Scheer avait amené le gouvernement social-démocrate au pouvoir pour ouvrir les portes à l'investissement privé avec le tarif d'achat (FIT). Le gouvernement de l'Amérique capitaliste était censé financer les investissements à partir des budgets publics. C'est un peu à l'opposé de ce à quoi vous vous seriez attendus : que les socialistes investissent à partir des budgets de l'État et que les capitalistes encouragent les entreprises privées. Cependant, l'Amérique a rattrapé son retard et se situe en 2018 bien avant l'Allemagne en ce qui concerne les marchés photovoltaïques.

### 6.5.2 L'Europe dans les starting-blocks

Il y a eu un événement majeur en juillet 1973 : le Congrès international sur "Le Soleil au service de l'humanité". Il a été organisé par les associations solaires françaises à la Maison de l'UNESCO à Paris. En fait cela a eu lieu quelques semaines seulement avant que les pays Arabes ne déclenchent la première crise du prix du pétrole et avant que les pionniers américains du photovoltaïque n'organisent l'atelier de Cherry Hill mentionné plus haut.

Le congrès a réuni un millier de personnes du monde entier, des États-Unis, de l'Allemagne, de l'URSS, des pays arabes, etc. Il a été ouvert par Pierre Auger, le célèbre physicien des semi-conducteurs (« l'effet Auger »). Il a commencé son ouverture par un hymne au Soleil.

On m'a demandé d'organiser la partie PV de ce congrès, et j'ai rassemblé ses actes.

Bill Cherry a dirigé la délégation américaine qui a contribué à la partie PV du Congrès. La délégation de l'URSS conduite par l'**académicien N. S. Lidorenko** a notamment rendu compte de leurs travaux sur la concentration optique en relation avec le PV.

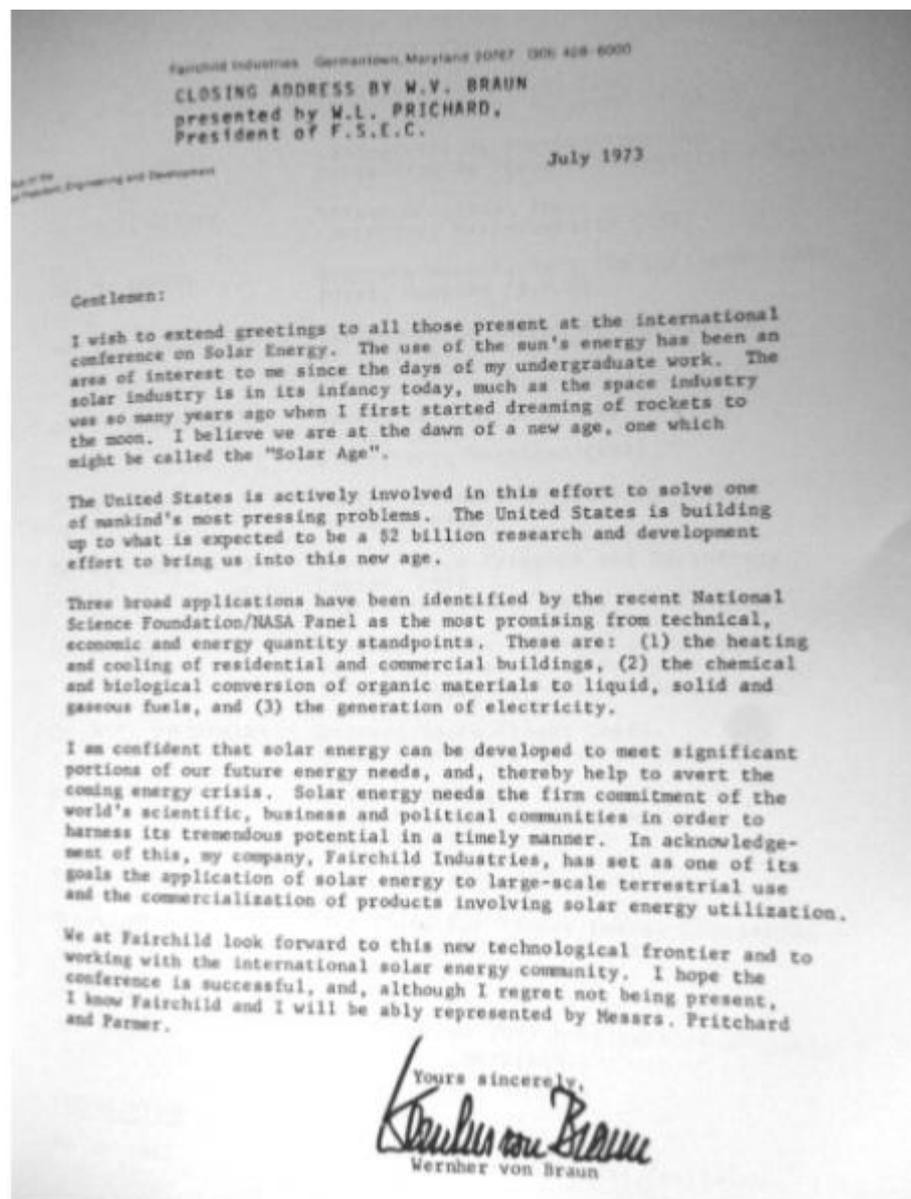
Les actes de cette section PV du congrès ont été introduits par une lettre de bienvenue de **Wernher von Braun**, ancien directeur du programme américain Apollo. Dans cette lettre écrite peu avant sa mort, il a inventé l'expression "Âge Solaire". Il est resté clairvoyant tout au long de sa vie.

En 1974, à la suite du congrès, j'ai préparé un rapport sous contrat avec l'UNESCO : "L'électricité solaire, la source d'énergie à venir". Il résume les perspectives du photovoltaïque pour les ménages, pour les centrales et pour les applications commerciales. J'ai insisté sur la possibilité d'installations pilotes PV pour diverses applications et, à côté du développement de cellules solaires meilleures et moins chères, sur la nécessité d'une technologie exhaustive d'un système PV. Plus tard, à partir de 1977, lorsque j'étais responsable de la R&D de l'UE sur toutes les énergies renouvelables et le photovoltaïque, j'ai mis en œuvre les programmes dans ce sens. Si l'on regarde en arrière, il était juste d'insister très tôt sur les aspects systémiques : Des

modules solaires vraiment de haute qualité et bon marché ont été bien réalisés, mais les coûts du système PV laissent encore de la place pour une réduction supplémentaire.

Dans l'Annexe à la fin du livre, nous reviendrons sur certains détails du programme de l'UE au cours des années critiques, jusqu'à l'an 2000.

Je suis heureux de constater que nous avons organisé en 1993 et 2013 à l'UNESCO, à la mémoire de l'événement solaire de 1973, des congrès à l'occasion desquels nous avons passé en revue ce qui avait été réalisé à l'échelle mondiale. Les résultats ont été très satisfaisants.



**Figure 6.9** Wernher von Braun, l'architecte du programme Apollo qui a amené les gens sur la lune. Sa lettre de 1973 à l'auteur où il invente le terme "Âge Solaire », peu de temps avant sa mort.

## Chapitre 7

### Le monde merveilleux de l'énergie éolienne

Les éoliennes de nos jours sont des merveilles technologiques. D'un seul mat de plus de 100 mètres de haut, d'une résistance mécanique sans pareil : des tempêtes terribles passent mais les affectent nullement. Et pourtant, à ces hauteurs là, les forces exercées par le vent sur ces engins sont terribles. Tout en étant exposées aux intempéries leur durée de vie dépasse des dizaines d'années. Dotées de l'électrotechnique et de l'électronique les plus modernes de nos jours, elles font preuve d'une fiabilité exemplaire.

Un miracle du 21<sup>e</sup> siècle.

#### 7.1 Le développement du marché mondial de l'éolien jusqu'à aujourd'hui

Des éléments de l'évolution du marché mondial ont déjà été donnés dans les chapitres précédents. Ils peuvent être résumés ainsi :

La puissance mondiale cumulée des turbines éolienne modernes dédiées à la production d'électricité a évolué d'une capacité totale de 18 GW en 2000 à environ 580 GW en 2018, dont seulement 20 GW en pleine mer (offshore) actuellement. L'accroissement annuel des capacités installées est passé de 6,5 GW en 2001 à 63 GW en 2015, soit une multiplication par 10 en seulement 15 ans. Plus de 5% de l'énergie électrique mondiale proviennent aujourd'hui des éoliennes, contre 0% en 2000. Aux Etats-Unis, l'électricité produite par le vent alimente l'équivalent de 24 millions de ménages.

De plus, 112 milliards de dollars ont été investis en 2016 – la dernière année pour laquelle les chiffres consolidés sont disponibles – pour 63 GW de nouvelles capacités éoliennes. Cela inclut des investissements dans 2,2 GW de nouveaux parcs éoliens offshore, plus coûteux que les installations terrestres. Les chiffres montrent qu'aujourd'hui les turbines installées clé en main coûtent encore en moyenne plus de 1500\$/kW, tous frais compris.

En termes pratiques, pour l'électricité produite, les prix pratiqués sur différents marchés mondiaux diffèrent fortement, d'environ 9 centimes de \$/kWh, le dernier paiement EEG en Allemagne, à 4,9 centimes de \$/kWh pour le nouveau parc offshore à Kriegers Flak au Danemark, et environ 3 centimes de \$/kWh à Mexico, au Pérou, au Maroc et en Egypte. Les Etats-Unis ont annoncé que les soutiens au marché ne seront plus nécessaires en 2021, et les derniers appels d'offre en Allemagne laissent penser que cette perspective sera valable également pour les parcs offshores plus coûteux en 2022.

En 2016, les premiers pays pour l'installation de nouvelles éoliennes étaient la Chine, suivie par l'Europe, les Etats-Unis, l'Allemagne (hors Europe), l'Inde, le Brésil et la France.

Il y a une différence notable entre la croissance de l'éolien et du photovoltaïque durant les dernières années. Premièrement, le marché global de l'éolien a atteint une vitesse de croisière dès 2013 avec environ 60 GW de nouvelles installations chaque année, tandis que le marché du PV a explosé et changé d'échelle depuis la même année, atteignant une vitesse de croisière depuis seulement 2016 avec 70 à 100GW de nouvelles installations chaque année.

Deuxièmement, l'Europe n'a pas été mise sur la touche dans le marché mondial de l'éolien comme ça a été le cas pour le PV. Le marché européen de l'éolien reste robuste – bien que de nouveaux défis sont pressentis à l'horizon 2022, en particulier en Allemagne, son leader, pour dépasser les nouvelles contraintes de marché

introduites par le système d'appel d'offre et la nécessité de poursuivre les améliorations technologiques et la réduction des coûts.

Troisièmement, l'industrie européenne de l'éolien fait toujours la course en tête, contrairement au PV où la Chine a pris le relais : au Danemark, en Allemagne et en Espagne les industriels ont été capables de préserver leurs atouts développés lors de l'apparition des premiers marchés à la fin du siècle dernier.

L'avenir s'annonce intéressant avec un nouvel environnement de marché et de nouveaux acteurs. En 2017, pour la première fois, la Russie est entrée sur la scène mondiale de l'éolien avec un appel d'offre pour ses premiers 1,9 GW.

Shell a annoncé en 2017 qu'il voit l'avenir en grand pour l'énergie éolienne : pas moins de 200 GW de nouvelles installations offshore, alors que la capacité mondiale cumulée en offshore s'élève aujourd'hui à 20 GW, comme mentionné précédemment.

Et il y aura de nouvelles opportunités technologiques.

## **7.2 Ce que le monde a réalisé dans la technologie éolienne**

### **7.2.1 Comment tout a commencé**

Pendant des siècles, les moulins à vent ont été utilisés pour pomper l'eau et moudre le grain. Ce n'est que dans les années 1890, lorsque les premières centrales électriques ont été construites par Edison, que les premières turbines éoliennes électrique ont pu apparaître. En 1887, en Ecosse, James Blyth a construit un moulin à vent muni de voiles qui produisait de l'électricité pour sa maison de campagne : la première maison au monde éclairée par l'énergie éolienne. La même année, dans l'Ohio, Charles Brush construisit un générateur propulsé par le vent grâce à un ensemble dense de pales en bois. On rapporte qu'il aurait fonctionné pendant 20 ans. Avec ses nombreuses pales, il s'agissait d'une turbine à basse vitesse et à faible rendement.

Le danois **Poul La Cour** (1846-1908) est considéré comme l'inventeur des éoliennes modernes. Il a construit sa première turbine en 1891. Un siècle plus tard, l'Association Européenne de l'Energie Eolienne (European Wind Energy Association, EWEA) a créé le prix *Poul la Cour* pour la reconnaissance de travaux remarquables sur ce sujet, et j'ai été l'un de ceux qui ont reçu ce prix.

### **7.2.2 Les éoliennes aujourd'hui**

Aujourd'hui, les éoliennes apparaissent élégantes et efficaces, mais elles sont aussi robustes. Quand l'ouragan Harvey a traversé le Texas, la Floride et la Géorgie en 2017, pas une seule des nombreuses éoliennes en fonctionnement n'a été endommagée. Au début de l'année 2019 une succession de tempêtes a ravagé l'Europe de l'Ouest, Ciara, Dennis et Ellen se sont succédés. Il y a eu des dégâts importants et la circulation a beaucoup souffert. Mais pas les éoliennes. Au contraire, pas une ne s'est cassée, mais elles ont montré au plus bel de ce qu'elles sont capables de fournir. L'Allemagne a connu en février 2020 – bien que le février est un mois court - un nouveau record absolu de production d'électricité d'origine éolienne, 20.9 TWh, dont 17.9 onshore et 3 GW offshore.

L'industrie travaille à la perfection : les projets sont achevés dans les temps et sans surcoût. L'industrie maîtrise une technologie exigeante : une grande éolienne moderne est composée de 30000 pièces. Le transport du mât et des pales peut être un exploit.

La puissance moyenne d'une éolienne est aujourd'hui de l'ordre de 3 MW. Au début des années 1980, quand le premier marché important a commencé à être installé à Altamont Pass aux Etats-Unis, avec 16000 machines installées, chaque éolienne avait une puissance de seulement 100 kW. En ce temps-là, la technologie n'était pas encore été complètement comprise. Trois mégawatts constituent en quelque sorte un optimum théorique pour les applications terrestres. Pour les éoliennes offshores, des machines plus grandes peuvent s'imposer mais en tenant compte des contraintes supplémentaires relatives aux conditions d'exploitation et de maintenance en milieu marin hostile.

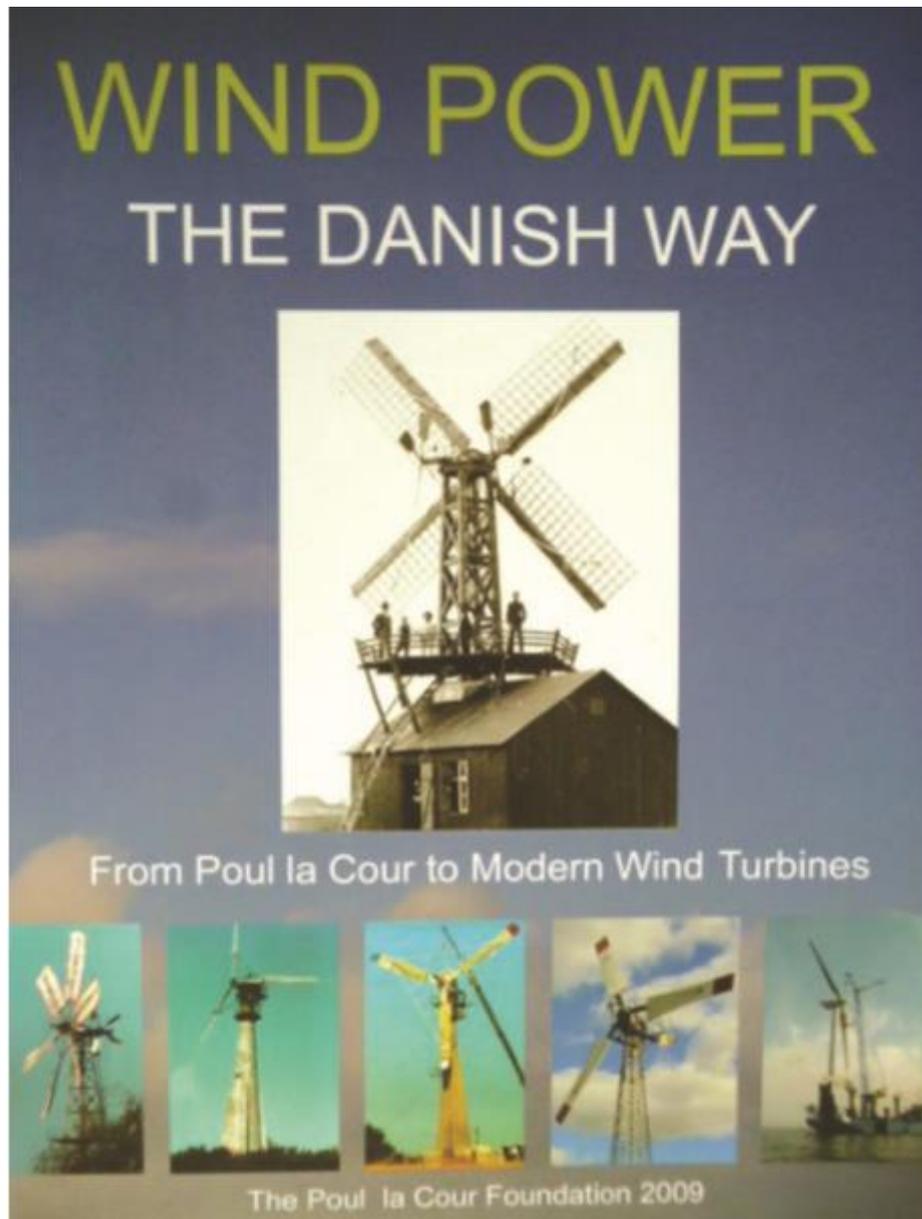


Figure 7.1 Le livre danois *Wind Power (Energie Eolienne)* (2009), par la fondation Poul la Cour.

Les mâts d'une hauteur de plus de 120 m sont devenus la règle, et des mâts allant jusqu'à 178 m de hauteur sont actuellement en service. En 1995, un mât type ne mesurait pas plus de 58m de haut.

Le diamètre des rotors utilisés actuellement est généralement supérieur à 100 m, et peut atteindre 138m. L'éolienne 8 MW développée par Adwen pour l'offshore a même un rotor de 180 m. La société Adwen a été rachetée par SIEMENS en 2017 qui commercialise maintenant cette turbine.

Les éoliennes ont connu un développement rapide : en 2000, 15 machines étaient nécessaires pour atteindre une capacité de 10 MW, contre 4 aujourd'hui. Les parcs éoliens actuels produisent 50% d'électricité en plus que ceux construits 10 ans plus tôt.

Le monde compte aujourd'hui quelque 200000 grandes éoliennes de capacité d'un megawatt ou plus en service, et encore plus de machines de capacité d'un kilowatt. Environ un million de petites éoliennes sont en service, la plupart en Chine, mais également aux Etats-Unis.

### 7.2.3 Développements technologiques

Il y a une différence fondamentale entre les différentes technologies disponibles aujourd'hui sur le marché mondial. Les principaux fabricants comme Vestas utilisent un entraînement par multiplicateur (boîte de vitesse) entre le rotor et le générateur électrique. D'autres comme Enercon, Siemens et Goldwind ont opté pour un entraînement direct en supprimant la boîte de vitesse. Le générateur électrique est alors un générateur "multipolaire" qui assure la connexion avec le réseau dans lequel l'électricité est injectée.

Il existe encore une autre différence entre Enercon, qui utilise exclusivement des bobines pour produire le champ magnétique des deux côtés des pôles, et les autres fabricants qui emploient des aimants permanents d'un côté. Ces générateurs employés dans des machines modernes utilisent des terres rares.

La technologie à transmission directe est apparue dans les années 1980. En juin 1988, j'ai organisé la grande Conférence de la Communauté Européenne sur l'Energie Eolienne (European Community Wind Energy Conference) à Helsingør, au Danemark. C'est là que le concept de transmission directe a été présenté au public. Les inventeurs étaient **Herbert Weh** et ses collègues de l'Université Technique de Brunswick, en Allemagne. Weh avait travaillé dessus depuis 1980. Sa présentation était intitulée "Générateur synchrone à aimant permanent et transmission directe pour fonctionnement à vitesse variable". La figure 7.2 montre le générateur présenté dans sa publication.

Les trois technologies coexistent encore aujourd'hui sur les marchés mondiaux.

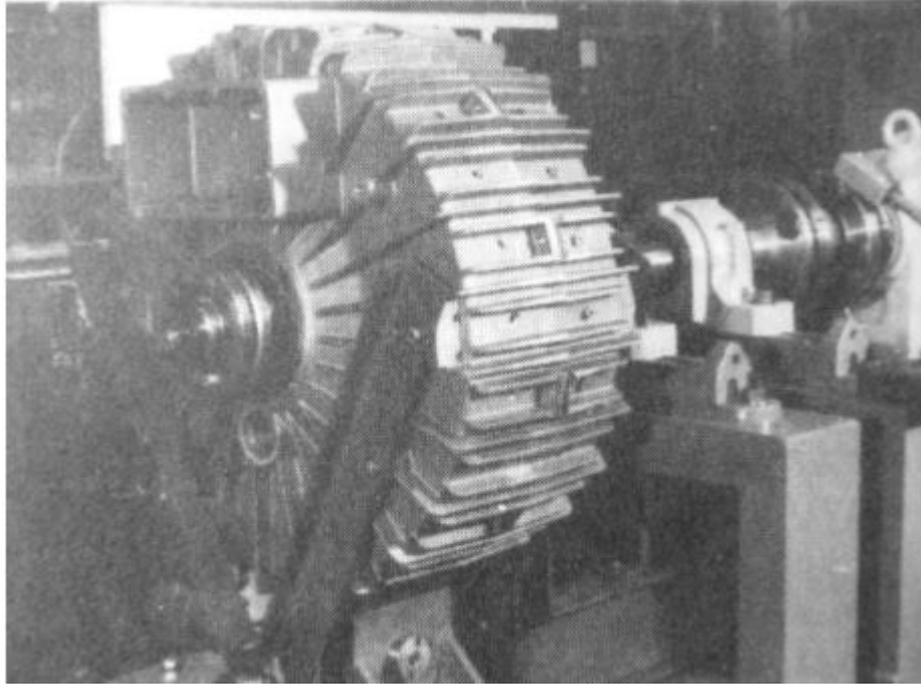


Figure 7.2 Le premier générateur à transmission direct d'une éolienne. Conçue par Herbert Weh, Université de Brunswick, en Allemagne (photo issue de la publication de Weh de 1988).

La R&D se concentre aujourd'hui principalement sur le développement de machines plus grandes, "monstres", pour les marchés offshore. Vestas prévoit de proposer une éolienne de 9.5 MW en 2020. D'ici quelques années, on anticipe des machines de 13 MW à 15 MW. Des projets sont déjà entrés dans une phase concrète, et des essais sur le terrain sont en préparation au Danemark.

En ce qui concerne les pales moins chères et de meilleure qualité, LM, un des leaders mondiaux de la technologie des pales qui vient d'être racheté par GE, travaille maintenant sur des pales hybrides en carbone de 69 m de long qui intègrent une protection contre la foudre - avec un "poids-plume" de seulement 20 tonnes.

Nordex en Allemagne propose déjà des rotors avec des pales plus longues (diamètre de 149 m) qui utilisent également du carbone comme élément raidisseur. Ces pales appartiennent à une nouvelle génération de machines éoliennes de 4 à 4,5MW que l'industriel propose pour des régimes de vents faibles. Qui va plus loin encore ?

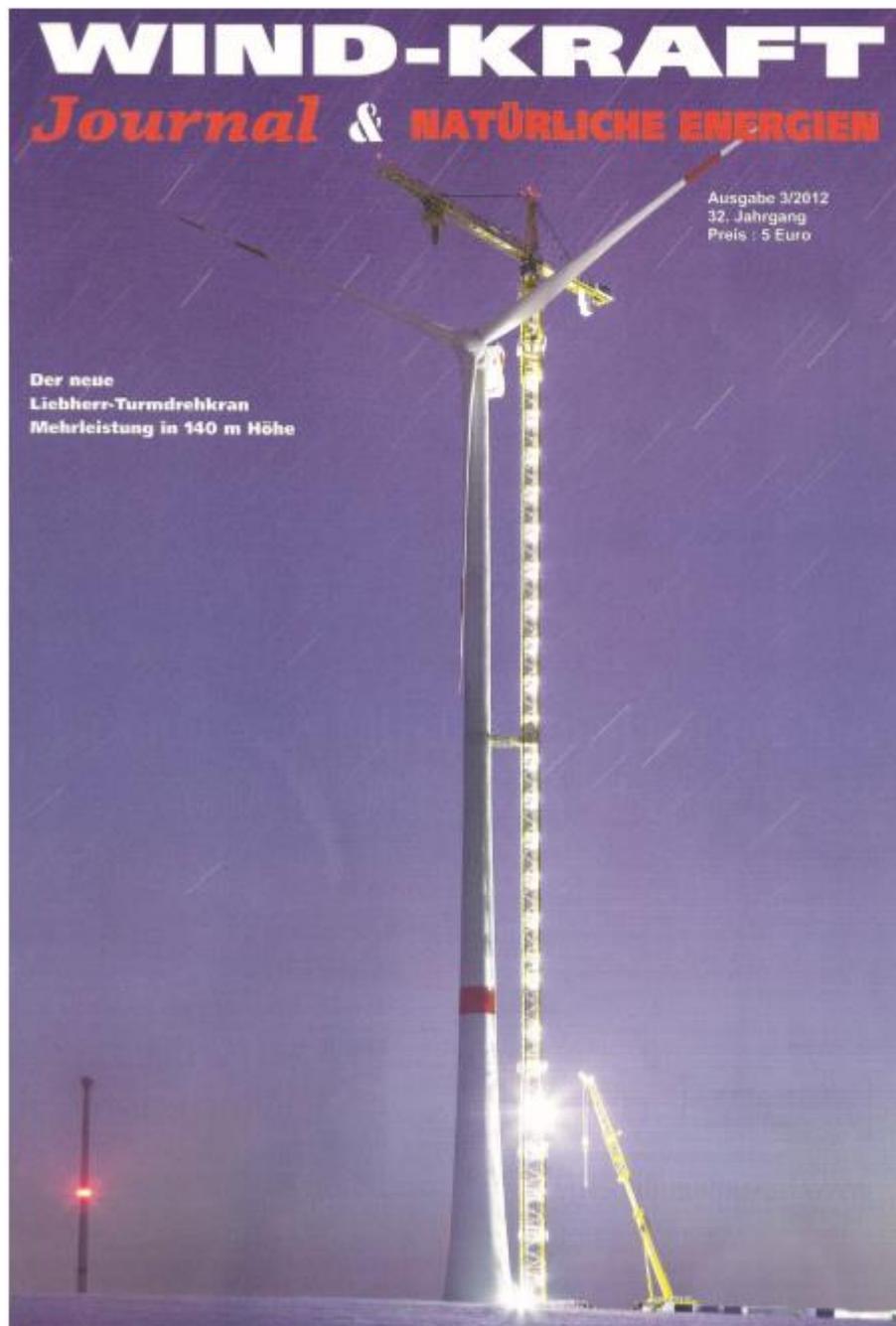


Figure 7.3 L'élégante tour de 140m de haut d'une éolienne moderne et sa grue de montage.

L'américain GE propose des rotors de 158 m sur des éoliennes de 4,8 MW, également à destination des régimes de vents faibles. Ces pales, fournies par son partenaire LM, utilisent aussi une technologie à base de carbone.

A la fin 2017, la plus grande éolienne était installée en Allemagne près de Stuttgart (à Gaildorf). Sa hauteur totale est de 246,5 m, avec un mât de 178 m auquel s'ajoute la turbine. C'est une turbine GE de 3,4 MW. Il est intéressant de noter qu'elle sera combinée à une station hydroélectrique de stockage par pompage-turbinage qui sera prête fin 2018.

De gros efforts continuent d'être déployés sur les mâts de turbines de 200 m de haut qui doivent être érigées dans des endroits très éloignés. Des tours en acier, en béton ou hybrides sont utilisées et en cours de développement. Elles sont transportées en morceaux qui sont assemblés sur place, ou le béton est coulé en

éléments circulaires qui sont placés les uns sur les autres. Notez les énormes grues utilisées pour assembler ces machines dans un environnement souvent très hostile.

La renaissance en R&D de vieux concepts que le monde avait presque oubliés est un signe de la vitalité actuelle de l'éolien.

A contre-courant des tendances du marché, dans lequel tous les rotors sont composés de trois pales, la compagnie hollandaise 2-B Energy a développé le prototype d'une "deux-pales" qui fonctionne avec succès depuis 2015. Il a une puissance de 6.1 MW.

Vestas, le leader du marché, a construit une machine à rotors multiples comme prototype de recherche et développement, la V29. Il dispose de 4 rotors de 225 kW, chacun d'un diamètre de 29 m sur une seule tour. Il est seulement moitié moins lourd qu'une machine standard de 1 MW. Il a été testé avec succès au centre d'essais danois de Roskilde. Vestas étudie également les tours plus légères tenues à la moitié de leur hauteur par 3 câbles. Vestas se penche aussi sur les petites turbines de 250 kW avec une tour de 29 m.

On peut également citer le «Vertical Sky A23» de la «Agile Wind Power» suisse. C'est l'une des machines inhabituelles à axe vertical d'une puissance de 750 kW. La hauteur de la tour est de 105 m; les 3 pales du rotor mesurent 54 m de long et tournent dans un cercle de 32 m.

Skywolf, de New York, associe PV et éolienne, une idée suivie depuis de nombreuses années par Bernd Melchior en Allemagne. Suivant le journal Wind Kraft, la machine américaine est proposée depuis 3 ans. Elle consiste en une turbine de 2,4 m avec 400 W de PV partiellement fixée sur les pales. Elle a une hauteur de 8 m, semble fonctionner très silencieusement et est offerte avec une garantie de 20 ans.

On peut également citer un concept complètement différent, le «MOVEA» de la TU Berlin avec la société Brose. Un prototype de cette mini-machine fonctionne depuis mi-2018 sur un bâtiment à Berlin. La conception combine 24 petites turbines dans un seul plan.

La Haute Ecole de Würzburg/Schweinfurt en Allemagne a construit une turbine avec neuf pales à la place des trois usuelles. Avec ces nombreuses pales, c'est un rotor à faible vitesse. Avantage: peu de bruit. Le rendement semble acceptable.

Une approche radicalement différente est proposée sous la forme de "systèmes éoliens aéroportés". Ils ont en commun d'utiliser des cerfs-volants tenus par des câbles plusieurs centaines de mètres au-dessus du sol. Une première approche consiste à déplacer un générateur électrique sur le sol, monté sur rails, la puissance mécanique étant transmise par le câble depuis le cerf-volant. Dans une autre approche, la puissance électrique est produite dans le cerf-volant suspendu dans les airs sur des structures en forme d'avion ; l'électricité est transmise au sol par un câble électrique. Les recherches sur ces systèmes se poursuivent depuis plusieurs années, notamment en Allemagne.

Pour l'instant, seuls des preuves de concepts ont été développées. Enerkite à Berlin pourrait avoir un prototype de 100 kW opérationnel en 2019.

#### **7.2.4 Quelques pionniers industriels**

**Alois Wobben** a été un des pionniers clés du développement des turbines modernes en Allemagne. Il a créé la compagnie Enercon, qui est depuis un leader du marché allemand. Il venait à l'origine de l'Université de Brunswick, où il a acquis sa formation en électronique de puissance. L'université a développé dans les années 1980 un savoir-faire important qu'il a pu utiliser pour développer ses machines. C'est le même savoir-faire

qui est utilisé pour d'autres applications bien connues, comme les ascenseurs. Vous pouvez remarquer que les ascenseurs modernes ne subissent plus de secousses quand ils s'arrêtent.

Enercon a reçu ses premières aides au développement d'un programme de l'Union Européenne que j'ai dirigé à Bruxelles. Nous avons également arrangé la forme particulière de la nacelle de ses machines, dessinée par Norman Foster et Associés à Londres. Enercon a développé sa première turbine à entraînement direct en 1993. Je me suis plaint auprès de Wobben du fait qu'il n'emploie pas d'aimants permanents, mais il s'est obstiné.

Après des débuts modestes, Wobben a fait d'Enercon une entreprise à succès. C'était un entrepreneur de génie. Mais pour finir, devenu déjà milliardaire, Alois Wobben a dû abandonner en 2012 la direction de Enercon pour raisons de santé. En 2019 enfin sa société Enercon a frôlé la faillite. Ses commandes se sont rétrécies en Allemagne, son premier marché, au point que son avenir est devenu incertain.

Un problème particulier est apparu aux Etats-Unis. Il concernait le concept de vitesse variable des turbines modernes. Les turbines fonctionnant avec des vitesses variables doivent composer avec des forces mécaniques plus faibles que celles fonctionnant à vitesse fixe. Avant 1939, toutes les turbines dans le monde utilisaient le concept de "vitesse variable", et Enercon a fait de même. Néanmoins, aux Etats-Unis, US Windpower a déposé un brevet là dessus en 1991, le fameux brevet 5,083,039. Finalement, GE devint propriétaire du brevet quand il racheta la compagnie qui le détenait. Et GE réussit à exclure Enercon du marché américain à cause de ce brevet. Dans une action anti-trust à 1 milliard de dollars, Mitsubishi a accusé GE de monopoliser le marché de la vitesse variable. Ce brevet controversé a expiré en 2011.

Pour en revenir au concept d'entraînement direct, on peut se référer au livre *Energie éolienne pour le monde*, publié par Pan Stanford Publishing en 2013. **Friedrich Klinger** de Innowind à Sarrebruck, Allemagne, y décrit le succès de l'entraînement direct en général. Klinger a monté en 1990 une équipe sur l'entraînement direct à l'Université de Sarrebruck. Il a été un des premiers pionniers et est venu présenter ce concept à Enercon. Celui de Klinger était conçu avec des aimants permanents. Plus tard, une petite compagnie issue de ce travail de recherche, Vensys, a vu le jour. Elle existe encore. En 2003, la compagnie chinoise Goldwind a pris une licence auprès de Vensys sur le concept d'entraînement direct. Goldwind utilise actuellement l'entraînement direct à grande échelle. C'est l'un des plus grands fabricants de turbines en Chine.

Klinger a travaillé depuis 1990 avec Siemens, à Erlangen, qui a développé un prototype. Ils ont proposé le concept à un fabricant de turbines danois, qui a décliné l'offre. Et Siemens a également abandonné.

Mais Siemens est revenu. Aujourd'hui, c'est l'un des plus grands industriels dans l'éolien, et il utilise le concept d'entraînement direct.

Klinger insiste également sur le rôle pionnier joué par **Hermann Honnef** dans les années 1930 en Allemagne. Il a commencé à développer une machine de 20 MW sur une tour de 500 m de haut, avec plusieurs rotors de 160 m de diamètre sur la même tour. Sa machine utilisait également un entraînement direct. Il l'avait conçue pour des applications offshore. Avec le savoir-faire acquis depuis dans la technologie éolienne, le rêve d'Honnef apparaît certainement moins stupide que lorsqu'il a été proposé.

## 7.3 Opposition à l'éolien

### 7.3.1 Pas dans mon jardin

Tout le monde n'a pas envie d'avoir une éolienne qui tourne dans son environnement, son voisinage, sa communauté, ou son lieu de travail. Il y a l'impact visuel, et il peut y avoir du bruit. L'industrie a appris très tôt à gérer le problème en impliquant les parties intéressées. Comme toutes ces turbines produisent un revenu substantiel, la participation financière aux projets était évidemment une opportunité. Aujourd'hui,

les communautés des régions où sont installées les éoliennes prennent souvent part à l'investissement et aux revenus. Il en va de même pour les agriculteurs qui louent leurs terres pour l'exploitation des éoliennes.

Il a été mentionné précédemment que l'opposition à l'énergie éolienne est un sérieux handicap pour son déploiement, un phénomène dont elle souffre beaucoup plus que le photovoltaïque. En France, l'opposition à l'éolien fait la une des journaux nationaux. Les opposants occupaient une fois la tour Eiffel. Mais un jour plus tard, on a pu apprendre, le jour de la «Sainte Mathilde», le 14 mars 2019, que la production d'énergie éolienne était la plus élevée jamais enregistrée en France: plus de 13 GW fournissaient le courant pour 18% de la consommation en France métropolitaine.

En Allemagne, l'autorisation d'installation d'une nouvelle éolienne prend en moyenne 700 à 800 jours. 10 GW de nouveaux projets d'éolien sont en attente aux tribunaux.

### 7.3.2 L'effet Disco

L'effet "disco" se produit quand le rotor de l'éolienne interfère avec les rayons du soleil, c'est-à-dire quand le soleil se trouve bas sur l'horizon dans des latitudes nord, ou durant les mois d'hiver. L'effet peut être gênant, comme j'en ai fait moi-même l'expérience une fois. Ainsi, quand le risque d'un effet "disco" peut être anticipé lors de la planification d'un projet, il est préférable de rechercher le site d'installation de l'éolienne au nord des quartiers d'habitation et de travail, à l'opposé de la zone de visibilité du Soleil.

"Laisser le soleil au sud et mettre les éoliennes au nord des bâtiments".

### 7.3.3 Les tueurs d'oiseaux ?

Il peut y avoir un réel danger à tuer un grand nombre d'oiseaux. Néanmoins, cela n'arrive quand dans des situations spéciales, quand d'énormes nuées d'oiseaux rencontrent un mur dense d'éoliennes. On trouve des exemples à Tarifa en Espagne, près de Gibraltar, où des nuées denses d'oiseaux migrateurs traversent en direction ou en provenance d'Afrique deux fois par an, ou à Altamont Pass en Californie, où des milliers de machines fonctionnent depuis 1980. Il est prouvé que de nombreux oiseaux ont été tués à Altamont. Les dernières turbines y ont été finalement démontées en 2017.

Quoi qu'il en soit, il y a un mythe selon lequel les éoliennes sont des tueuses d'oiseaux en général. L'Allemagne exploite un centre de données centralisé sur les causes de mort d'oiseaux depuis 1986. Comme le pays a environ 28000 machines en service, les résultats sont pertinents. Les données disponibles suggèrent qu'au total 681 oiseaux ont été trouvés près de l'ensemble des 28000 machines en service. C'est presque rien. En extrapolant aux 200000 machines en service au niveau mondial, on peut estimer le nombre d'oiseaux tués par les 200000 machines à environ 10000.

Venez, ornithologues, et corrigez, il y a plus de 100000 oiseaux morts chaque année rien qu'en Allemagne. Ils ne les trouvent pas parce que les oiseaux ont été mangés entre temps par d'autres animaux. Désolé, ce n'est que pure spéculation, il n'y a pas de preuve.

Mais même s'il était vrai que chaque éolienne tue 1 à 2 oiseaux chaque année cela en ferait au total 500000. A nouveau, ce n'est qu'une spéculation sans preuve. En fait, les centrales à charbon tuent plus d'oiseaux que ces nombres hypothétiques.

Pour en revenir aux fondamentaux, on compte environ 300 milliards d'oiseaux dans le monde aujourd'hui. Les chats en mangent 2,4 milliards chaque année, en ne comptant que les Etats-Unis. On estime qu'un milliard meurt en heurtant des vitres ou des façades de bâtiments. Un autre milliard meurt sur les câbles électriques à haute tension.

Désolé, les éoliennes ne peuvent pas rivaliser avec ces chiffres.

En 2019 l'Allemagne a développé dans ses campagnes une vraie psychose contre l'éolien. Après un marché annuel maximal en 2017, juste 2 années après c'était l'abîme : le petit GW nouvellement installé onshore en 2019 représente la plus faible capacité éolienne raccordée au réseau allemand depuis le début de ce siècle. Les gens n'en veulent plus dans leur voisinage. Les réseaux sociaux y sont pour quelque chose : il y a eu de la propagande négative. Toutes les raisons pour s'opposer aux éoliennes sont bonnes. Alors, les gens qui normalement ne se soucient guère du sort des oiseaux créent « un mouvement national » pour sauver ces pauvres rapaces qui se feraient déchiqueter par ces horribles engins. En tête de liste : le pauvre milan royal. Chaque enfant en Allemagne connaît dorénavant ce petit oiseau et le sort terrible qu'il subit par la faute de ces horribles monstres d'éoliennes. La vérité est évidemment toute autre. L'association allemande de l'éolien BWE les a comptés, ces milans allemands : En 2018 il y avait 15,000 couples de milan royal contre 12,000 en 2011. Ces années qui ont vu une extension maximale du réseau éolien en Allemagne étaient en fait celles d'une prolifération exceptionnelle du milan royal, de l'aigle marin et d'autres grues dans la paysage allemand.

On ne doit pas être voyant pour savoir que cette folle opposition contre l'éolien en Allemagne va bientôt sortir par la petite porte et que le marché éolien retrouvera son rythme d'antan en concert avec celui des pays du monde entier.

Mentionnons aussi l'opposition contre l'éolien en France. Le marché y est très inférieur au marché traditionnel de l'éolien en Allemagne. En France on n'a pas encore découvert le milan royal pour attaquer le marché des éoliens. Mais on a inventé d'autres arguments et les affaires ne marchent pas mieux qu'en Allemagne en ce moment.

## Chapitre 8

### La bioénergie en harmonie avec la nature

#### 8.1 Biosphère de la Terre

##### 8.1.1 Évolution

Charles Darwin (1809-1882) est connu pour avoir découvert l'évolution de toute la matière vivante. Cependant, le français Jean-Baptiste De Lamarck (1744-1829) l'avait découvert plus tôt en étudiant les invertébrés et a écrit des livres à ce sujet. La légende veut qu'il a voulu en présenter un à Napoléon, mais que l'empereur a refusé et a insulté le scientifique, qui s'est mis à pleurer. Les spécialistes soulignent la différence entre De Lamarck et le point de vue de Darwin. Alors que pour Darwin l'évolution a suivi une évolution naturelle, De Lamarck pensait qu'elle suivait des opportunités : une girafe développe un long cou pour atteindre les branches supérieures. De Lamarck est aussi celui qui a inventé le terme "biologie". Il travaillait et vivait comme professeur au "Jardin des Plantes" à Paris où un monument à sa mémoire a été érigé (voir Fig. 8.1). Ce jardin botanique situé dans le centre de Paris a plus de 400 ans et présente une particularité unique : il est planté dans l'ordre de l'apparition des plantes en botanique. L'évolution commence par les mousses et les fougères, des plus anciennes aux plus jeunes, les tomates, les carottes et les roses. Cette dernière plantation suit l'arbre de l'évolution tel que publié en 2009 par l'APG III, un groupe de botanistes internationaux.



*Figure 8.1 Monument en l'honneur de Jean-Baptiste de Lamarck à Paris, pionnier de la compréhension de l'évolution. Photo prise en 2017, l'auteur avec Jodie Roussell (au centre), PDG du Global Solar Council, et Michael Eckhart (à droite), du CitiGroup à New York.*

Dans ce jardin, l'arbre de l'évolution est gravé dans la pierre (voir Fig. 8.2)

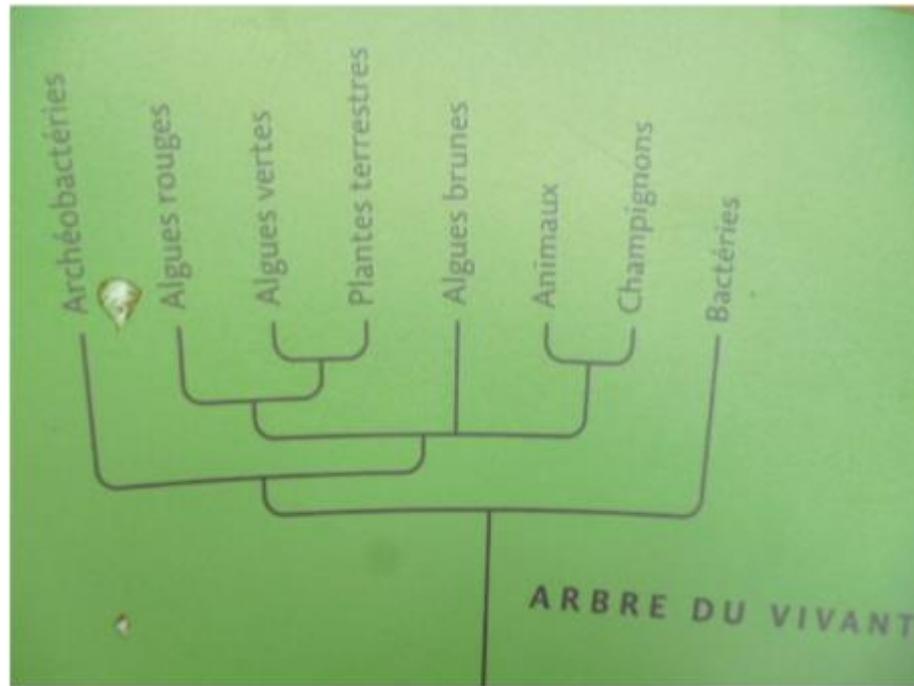


Figure 8.2 L'arbre de l'évolution de la vie, tel qu'il est représenté sur la pierre au "Jardin des Plantes" à Paris.

### 8.1.2 Origines de la vie sur Terre

Toutes les plantes et tous les animaux, tels que nous les connaissons, avaient un point commun à l'origine, il y a 543 millions d'années. A ce moment-là, notre Terre avait déjà les 8/9 de sa vie avec 4 500 millions d'années derrière elle et l'explosion de la vie, encore appelée explosion Cambrienne, avait déjà eu lieu. En l'espace de 10 millions d'années seulement, la terre avait dressé l'arbre de vie de toutes les plantes et de tous les animaux, y compris nous. Les organismes d'aujourd'hui sont "aérobies" et ils ont donc besoin d'oxygène pour exister. Cependant aux débuts de la Terre, l'air était composé d'azote comme aujourd'hui mais il n'y avait pas d'oxygène libre. Cet oxygène était entièrement lié à l'eau et au CO<sub>2</sub> et il a d'abord fallu le libérer. Cela a été réalisé grâce à la photosynthèse et donc à l'énergie solaire selon l'équation suivante



Les petits animaux unicellulaires qui ont fait le travail étaient les cyanobactéries que l'on trouvait dans les mers et qui avaient évolués à partir des bactéries ordinaires grâce à leur capacité à produire de l'oxygène libre par photosynthèse. Les cyanobactéries, ainsi que les bactéries, étaient donc les premiers êtres vivants sur Terre. On en a trouvé des traces vieilles de 3 700 millions d'années en Australie. Les cyanobactéries ont survécu jusqu'à notre époque et leurs nombreuses espèces (plus de 10 000) nous sont maintenant connues. L'oxygène a finalement été produit massivement de cette façon pendant environ 2 450 millions d'années. Tout d'abord, il a été absorbé en grande partie par le fer libre sur la croûte terrestre, d'abord dans les mers et enfin sur la terre qui a ainsi "rouillé". Ce phénomène de rouille a ensuite saturé et l'oxygène libre a commencé à s'accumuler dans l'air. La concentration d'oxygène en l'air dans les millions d'années qui ont suivi l'explosion Cambrienne (543 millions d'années) a alors atteint 35%, à comparer avec les 21% d'aujourd'hui.

Le big bang de cette explosion biologique repose sur une cellule de base : la cellule eucaryote. Celle-ci a commencé à évoluer il y a environ 1 600 millions d'années à partir d'algues qui elles mêmes s'étaient développées à partir de bactéries et de cyanobactéries. Contrairement aux cellules bactériennes, les algues ont un noyau cellulaire qui contient leur ADN. La cellule eucaryote a ainsi évolué à partir de ces algues et est apparu à côté du noyau une ou plusieurs "mitochondries". On estime que ces mitochondries étaient à

l'origine des bactéries indépendantes qui ont été englouties par les cellules. Les mitochondries ont leur propre ADN qui est indépendant de celui du noyau de la cellule. Les mitochondries sont indispensables pour la vie et la mort de la cellule eucaryote en fournissant l'énergie à la cellule. Lorsque l'organisme meurt, les mitochondries commencent le processus de décomposition. C'est ainsi que la nature fonctionne aujourd'hui pour tous les organismes vivants, à l'exception des bactéries et des virus. Un être humain est également composé de plus de 1 000 milliards de cellules eucaryotes, toutes spécialisées dans certaines fonctions. À la fin de notre vie, les mitochondries déclenchent le processus de décomposition des cellules. Les espèces les plus réussies sur Terre étaient les dinosaures. Ils ont survécu pendant 170 millions d'années. Nous, les humains, avons encore un long chemin à parcourir pour atteindre au moins le premier million d'années.

Une reproduction réussie est essentielle à la survie. On estime que la reproduction sexuée d'organismes eucaryotes a commencé il y a un milliard d'années. Elle est considérée comme une puissante force évolutive, par exemple pour augmenter les chances d'adaptation à un environnement changeant. Avec la recherche de la nourriture, le sexe est la force motrice fondamentale de la vie. Peut-être qu'il a aussi contribué à la joie de vivre. Les plantes ont dans leurs cellules eucaryotes un élément supplémentaire pour capter la lumière du soleil : les chloroplastes. Les chloroplastes sont les héritiers des cyanobactéries et ont aussi leur propre ADN. L'énergie obtenue par photosynthèse (dans les chloroplastes à partir de l'eau et avec libération d'oxygène) est stockée dans un matériau dit "ATP" qui va être ensuite utilisé pour former, à partir du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, la matière organique. L'ensemble est appelé cycle de Calvin.

### **8.1.3 La biosphère aujourd'hui**

Les bactéries sont les grandes survivantes. Elles ont été les premiers organismes vivants sur Terre et sont encore partout, certaines aérobies et d'autres anaérobies. Il existe plus de 5 millions d'espèces de bactéries et leur masse totale est estimée égale à celle de toutes les plantes. Les bactéries sont nos amies (avec des exceptions) et sans elles nous ne pourrions pas vivre. Des millions d'entre elles colonisent notre peau et notre bouche et des milliards de bactéries vivent dans notre tube digestif. À l'autre bout de l'évolution, à l'exclusion de ces micro-organismes, nous trouvons les eucaryotes les plus récentes, les plantes et les animaux. Le nombre total d'espèces existantes est estimé à 8,7 millions (étude du PNUE de 2011) avec 6,5 millions d'espèces vivantes sur terre et 2,2 millions dans les océans. On pense que la plupart d'entre elles restent à découvrir mais 1,25 million d'espèces sont déjà dans les bases de données. On décompte ainsi 7,7 millions d'espèces animales, 0,6 million pour les champignons, 0,3 million pour les plantes et 60 000 espèces d'arbres. Selon l'Organisation de l'alimentation et l'agriculture (FAO) de l'Organisation des Nations Unies à Rome, les forêts occupent aujourd'hui environ 30% du territoire mondial avec 4 628 millions d'hectares en 2017. La superficie forestière mondiale diminue actuellement de 0,08 % par an, ce qui correspond à la moitié de la diminution constatée dans les années 1990. Chaque année, cela représente une perte de 7,6 millions d'hectares qui est pour moitié compensée par un gain naturel grâce à la croissance de 4,3 millions d'hectares en particulier dans les forêts de Russie, d'Amérique du Nord et d'Europe. En revanche, la déforestation à grande échelle se poursuit en Amérique latine et en Afrique. La biomasse actuellement en stock dans les forêts du monde s'élève à 300 000 millions de tonnes. Elle a diminué au cours des 25 dernières années de 3,6 %. La réserve est gigantesque même si on la compare à la réserve mondiale totale de charbon dans le sol qui n'est que 3 fois plus importante. Et la biomasse est renouvelable, alors que le charbon ne l'est pas. 90% des plantes d'aujourd'hui sont des plantes à fleurs et les 300 000 espèces de ces plantes qui existent aujourd'hui proviennent d'une seule plante-mère qui vivait il y a 130 millions d'années d'après une étude de l'Université de Vienne regroupant des scientifiques de 13 pays. Cette plante mère était une hermaphrodite dont la fleur avait trois pétales concentriques (comme le magnolia d'aujourd'hui). Il existe également 28 000 espèces végétales aux propriétés médicinales. Pour les oiseaux, le Musée Américain d'Histoire Naturelle a récemment revu à la hausse son estimation à 18 000 espèces pour une population totale de 300 milliards. Le nombre d'espèces de mammifères sur Terre est aujourd'hui estimé à 5 400. Une seule de toutes ces espèces

domine le monde avec une population de plus de 7,5 milliards d'individus : nous, les humains. *En conclusion, la biosphère mondiale est une richesse exceptionnelle ! Seulement comparable à celle de l'Univers, juste à une autre échelle : nanomètres et microns au lieu d'années-lumière.* Le cosmos a évolué à partir d'un big bang à un moment donné du temps et de l'espace. C'est ce qui s'est aussi passé avec la biosphère, 3 700 millions d'années d'évolution à partir d'une bactérie avec son l'ADN primitif.

## 8.2 Bioénergie

L'énergie solaire sous forme de rayonnement solaire est convertie par photosynthèse dans les plantes de la Terre en quelque 3 000 EJ ( $3 \times 10^{21}$  Joules) chaque année. Ce chiffre impressionnant signifie simplement que l'énergie solaire, capturée en biomasse chaque année, est dix fois supérieure à la consommation mondiale annuelle en énergie. Cette énorme quantité d'énergie transférée en biomatériau est la base de tous les aliments pour les animaux et de notre nourriture. Mais toute cette biomasse, qu'elle soit destinée à une utilisation productive ou non, est en fin de compte en train de se décomposer de nouveau car elle n'est pas stockée. C'est ainsi qu'elle est recyclée de diverses façons, biologiquement ou thermiquement en eau et en libérant du CO<sub>2</sub>.

Si la bioénergie (sous forme de biomasse) représente une énergie considérable, seulement 1,4% de cette énergie est utilisée sous forme de granulés de bois, de liquides de combustion et de biogaz ou tout simplement sous forme de bois de chauffage traditionnel dans les villages les plus pauvres. Des détails ont été donnés dans certains chapitres précédents de ce livre. Nous y avons vu que les formes modernes de bioénergie se sont développées rapidement depuis le début du siècle. *La bioénergie moderne est aujourd'hui la plus grande source d'énergie renouvelable.* S'il est vrai que la bioénergie moderne s'est bien développée au cours de ce siècle, son potentiel reste très grand.

Les discussions entre partisans et opposants à la bioénergie se sont intensifiées en 2019. En France, le grand fournisseur d'électricité Engie a accusé son concurrent EDF de se concentrer excessivement sur le nouveau déploiement de l'électricité. Il affirme que le «gaz vert» généré à partir de déchets organiques pourrait à terme fournir 100% de la demande en gaz naturel du pays. À l'heure actuelle, la France n'utilise que 1% de son gaz en tant que gaz vert: selon les plans du gouvernement, cette proportion pourrait atteindre 10% d'ici 2028. EDF veut peut-être faire preuve de bonne volonté en convertissant les quelques centrales qu'il exploite encore au charbon en biomasse, par exemple sous forme de résidus de jardin. Mais ne touchez pas à notre nucléaire !

Le biogaz est un cas particulier. L'important flux d'effluents liquides, en particulier ceux provenant de l'élevage, devrait être mieux recyclés afin d'extraire l'énergie qu'ils contiennent. C'est ainsi que la Chine, avec ses 42 millions de ruminants, représente un marché immense mais encore très peu exploité. L'Allemagne, championne du biogaz en Europe, n'en est qu'au début de son potentiel de marché avec une voie dédiée au maïs qui est très prometteuse. Le marché des granulés de bois est actuellement en plein essor mais il reste actuellement concentré dans l'Europe malgré un marché mondial de l'ordre de 100 millions de m<sup>3</sup>. En termes de comparaison, le volume de bois annuel issu des forêts s'élève à quelque 3 000 millions de m<sup>3</sup> par an avec une utilisation partagée à moitié entre une utilisation industrielle et le bois de chauffage. Cependant comme il s'agit d'une énergie non durable, il convient à terme de prévoir son remplacement. Dans les pays de l'hémisphère Nord, le marché des granulés de bois pourrait rapidement dépasser la part actuelle (7%) du marché global du bois. Enfin il y a le marché des biocarburants pour le transport (l'éthanol et le biodiesel). S'il s'est fortement développé, en particulier au Brésil et aux États-Unis depuis le début du siècle c'est un marché qui a saturé dès les années 2008-2010 avec l'apparition comme déjà évoqué d'un "mur de mélange" de 10 % aux États-Unis et une saturation précoce du marché au Brésil. Cependant, il n'y a pas de raison fondamentale pour que le bioéthanol ne se développe pas beaucoup plus à l'avenir car les matières premières (canne au Brésil et maïs aux États-Unis) sont disponibles en grande quantité et à des prix attractifs.

Par ailleurs, le bioéthanol renouvelable est attrayant en termes d'amélioration de l'environnement et de protection du climat. L'opposition est essentiellement politique. Pendant des années, les environnementalistes ont dénoncé l'usage de l'éthanol de deuxième et de troisième génération mais ils ne seront plus produits car trop encombrants non indispensables. Aujourd'hui, guidés par Elon Musk, des dizaines de milliards sont dépensés dans l'industrie de la voiture électrique sous les applaudissements de l'industrie et ce même si les gens sont réticents à les acheter malgré de grosses subventions. Et si Toyota, leader mondial de l'automobile, avaient raison avec sa R&D sur les voitures à hydrogène ?

Le nouvel enthousiasme clamé haut et fort en Europe et ailleurs pour l'hydrogène comme carburant – voir l'aperçu donné par ailleurs dans ce livre – pourrait effectivement changer la donne. Mais ce ne sera pas pour tout de suite. Le nouveau paradigme hydrogène doit d'abord trouver sa confirmation dans la réalité.

L'Europe est actuellement totalement engagée sur la piste de la voiture électrique. Mais les choses ne sont pas encore faites, loin de là. Les producteurs de voitures ne manquent pas de déclarer jour après jour leur engagement pour la voiture électrique. Mais est-ce crédible ? Changer une industrie qui a plus de 100 ans de développement bien réussi derrière elle avec des investissements se comptant en milliards d'euros : les pères de l'automobile se retourneraient dans leurs tombes.

Les Chinois sont les pionniers de la voiture électrique. Après 10,000 unités en 2009, 717,000 voitures électriques y ont été vendues les 9 premiers mois de 2019. Rien qu'en 2017 la Chine en a subventionné le marché à 3,1 milliards de \$. Mais attention, en mars 2019 les subventions ont été fortement réduites. Le marché a suivi et a baissé de 1/3 en septembre 2019.

En Europe l'histoire chinoise risque-t-elle se répéter ? Actuellement nous sommes dans la phase initiale où les subventions coulent à flots.

Et gardons à l'esprit une simple vérité : le moyen de décarbonner le secteur des transports au moindre coût, n'est pas l'hydrogène et ce n'est pas la voiture électrique non plus, ce sont les biocombustibles.

## Partie 4

### L'Énergie pour le monde



## Chapitre 9

### L'énergie solaire pour les besoins de survie

#### 9.1 Le scandale du 1%

La fantastique croissance des marchés des énergies renouvelables enregistrée au début de ce nouveau siècle s'est produite spécifiquement dans les pays industrialisés dont la Chine comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, quelques 1000 GW d'énergie éolienne et photovoltaïque y ont été installés. Des milliards de dollars ont ainsi été mobilisés et 10 millions d'emplois nouveaux ont été créés.

La quasi-totalité des systèmes étaient et sont connectés au réseau. Le FIT, le tarif appliqué pour l'introduction de l'électricité propre dans le réseau de distribution d'électricité a été et est un instrument clé de promotion.

Les populations pauvres du Tiers-Monde, en particulier celles des pays en développement vivant dans les zones rurales, ont été laissées de côté. C'est devenu évident en 2010 lorsque la progression du PV a encore atteint de nouvelles dimensions. Dans mes discours publics depuis cette année-là, j'ai appelé cela « le scandale du 1% ». En effet moins de 1 % de l'ensemble des installations PV, soit moins de 1 GW, sont allés vers les 1000 millions de personnes dans le monde rural. C'est une "absurdité" qui choque tous ceux qui tirent déjà leur électricité du réseau alimenté par une nouvelle énergie propre et manque l'occasion de donner l'accès énergétique aux zones rurales défavorisées directement sans passer par le biais d'une période d'approvisionnement non durable, via les sources fossiles et nucléaires, comme l'ont fait les nations industrielles.

C'était une question de priorité. Il n'y avait rien d'étonnant à convertir le système énergétique existant dans les pays favorisés du Nord vers un système de production à base d'énergie renouvelables, c'était de toute façon dans une logique d'évolution des sources de production, mais les défavorisés en approvisionnement en énergie méritaient la priorité de cette évolution. L'évidence est que cela n'a pas fonctionné ainsi.

#### 9.2 Le problème

Une analyse de la situation générale se trouve dans le "Rapport 2017 sur l'état de l'accès à l'énergie" édité par la Banque mondiale. La première information est que 3 milliards de personnes dépendent encore des combustibles solides pour la cuisson et du kérosène pour l'éclairage.

En 2014, année pour laquelle les chiffres sont disponibles, 1 060 millions de personnes n'avaient toujours pas accès à l'électricité. Pourtant, dans les deux dernières décennies, 1700 millions de personnes se sont connectées aux réseaux électriques, en particulier dans les zones urbaines.

Le nombre de personnes sans accès à l'électricité a diminué partout sauf en Afrique « noire ». Il est passé de 480 millions en 2000 à 609 millions en 2014. La raison en est que la croissance de la population y est plus élevée que celle du taux d'électrification.

Après l'Afrique, l'Inde et le Bangladesh ont les taux de non-électrification les plus élevés. Leurs gouvernements font beaucoup pour améliorer la situation. L'Inde est célèbre pour les programmes d'électrification de ses villages. Cependant, il a été remarqué que l'électrification ne bénéficie souvent qu'aux espaces publics et laisse 90% des familles du village dans le noir.

En septembre 2015, l'ONU a adopté son Agenda 2030 pour le développement durable. Il reconnaît le rôle clé de l'énergie pour le développement durable, mais une analyse de la Banque mondiale fait apparaître qu'il est clair que l'électrification à 100 % pour tous d'ici 2030 ne figure pas sur les feuilles de route.

##### 9.2.1 Financement

De nombreux pays du tiers monde ne disposent pas des ressources nécessaires pour développer leurs infrastructures et, en particulier, un approvisionnement fiable en énergie et en électricité. Les plus oubliés sont, par définition, les pauvres dans les zones rurales.

L'aide au développement est un élément clé pour contribuer à combler les lacunes pour le compte des pays industrialisés "riches" et des institutions internationales connexes, comme la Banque mondiale. Ces aides sont d'une taille considérable, elles ont même augmenté de 66 % depuis 2000 (Rapport de la Banque Mondiale de 2017 sur l'état d'accès à l'électricité).

La Commission de l'UE à Bruxelles est le plus important donateur au monde, son aide n'est pas un crédit, elle n'est pas remboursable. J'ai été fonctionnaire au service "EuropeAid" en charge de ce service pendant quelques années. Les programmes d'aide de la Commission européenne ont débuté en 1957. Ils s'élèvent actuellement à quelque 7 milliards d'euros par an, la priorité étant accordée à l'Afrique "subsaharienne". L'une des priorités officielles du programme de la Commission est l'éradication de la pauvreté et le développement durable.

En plus du budget d'aide de la Commission, les pays membres de l'UE fournissent leurs propres budgets d'aide. Les budgets dédiés du Royaume-Uni, de l'Allemagne, de la France, du Danemark, etc, sont aussi considérables. Au total, l'Europe dépense quelques 55 milliards d'euros d'aide par an. Les États-Unis viennent en deuxième position, suivis du Japon. Le financement n'est pas la cause du retard du développement durable dans le Tiers-Monde.

### **9.2.2 S'en tenir aux options énergétiques d'hier**

Dans les pays industrialisés, les compagnies d'électricité ont dû apprendre dans la difficulté que l'époque de l'énergie conventionnelle à partir de combustibles fossiles et des sources nucléaires, était finie. Les services publics traditionnels en Europe, en particulier en Allemagne et en France, ont fait au cours des dernières années des dizaines de milliards d'euros de déficit, et leur valeur sur le marché boursier a chuté de façon dramatique ; ils ont dû se réorganiser pour devenir des services publics d'énergie renouvelable.

Comme prévu, le secteur de l'énergie dans le Tiers-Monde a pris de l'ampleur sans tirer profit des expériences des pays développés Jusqu'à présent. Il a été totalement orienté dans la façon traditionnelle de produire : centrales électriques à combustibles fossiles, réseau de lignes dans tous les pays, au mieux, certains mini- et des micro-réseaux utilisant des moteurs diesels pour desservir une zone autonome d'une cinquantaine de kilomètres de large. Les principaux bénéficiaires sont les villes ; les villages sont en grande partie délaissés. C'est dans ce contexte que le taux d'électrification dans les pays en voie de développement a augmenté de façon spectaculaire au cours des 20 dernières années.

L'Afrique utilise actuellement pour ses besoins énergétiques 42% de pétrole, 28% de gaz naturel et 22 % de charbon. Elle dépend à 6% de l'hydroélectricité et seulement pour 1% sur l'énergie solaire et éolienne. Elle est loin derrière les pays du Nord qui ont décidé d'opter massivement pour l'énergie solaire. L'Afrique dispose d'un "Programme d'énergie propre" spécial, appelé "Programme d'énergie propre", initiative pour les énergies renouvelables en Afrique (AREI). Il a un budget de 10 milliards de dollars d'ici 2020, qui est fourni par l'UE, le Canada, les États-Unis et le Japon. Néanmoins et cela peut être considéré comme symptomatique de la situation actuelle, le responsable du programme, un Africain, a démissionné en avril 2017 . Il a accusé, à tort ou à raison, les gestionnaires de programmes européens de se concentrer sur les grands projets d'infrastructure plutôt que sur des solutions communautaires. Et certains projets sont censés aider à la production de combustibles fossiles, certains seront la propriété d'Européens !

### **9.3 Une conséquence du problème : la migration**

Les conflits militaires au Moyen-Orient sont à l'origine de la migration des populations vers l'Europe. Il en va de même pour le manque d'accès à l'électricité dans les villages du Tiers Monde. L'Europe construit une barrière pour arrêter l'afflux d'immigrants potentiels et le président américain est enthousiaste pour construire un mur contre les immigrés d'Amérique latine.

Comme les jeunes dans les villages ne voient aucune perspective à demeurer chez eux, ils vont dans les villes, une raison pour laquelle plus de la moitié de la population mondiale vit dans les villes à l'heure actuelle. La vie en ville est difficile pour les nouveaux arrivants, de sorte que ces jeunes gens essaient de s'évader vers les pays développés les plus proches, un problème pour les migrants qui peut aboutir à la misère et à un problème politique pour les pays développés désireux de se protéger contre l'immigration illimitée.

Il n'existe pas de solution facile pour lutter contre ce problème. Cependant, une option n'a pas été suffisamment mise à l'essai : le déploiement de l'électrification à grande échelle dans les zones rurales. Lorsqu'elle est réalisée à l'aide de l'énergie solaire, elle est non seulement durable, mais elle fournit localement les emplois et les opportunités d'affaires dont on a tant besoin.

Les réfugiés de la guerre en Syrie sont particulièrement touchés. Pour un camp de réfugiés en Jordanie, l'Allemagne a fourni en septembre 2017 une installation PV de 13 MW pour l'éclairage, le refroidissement des aliments et la ventilation de l'air.

### **9.4 Triomphe du Soleil pour les ruraux pauvres ? Un coup d'œil sur le sujet**

#### **9.4.1 La Chine, le coureur de tête**

La Chine, le plus grand pays du monde, a réussi à fournir l'accès à l'électricité pour tous en 2015. Une grande réussite !

Les dernières familles vivant dans des endroits reculés, soit un total de 2,6 millions de personnes ont été alimentées en énergie photovoltaïque entre 2013 et 2015. À l'initiative du gouvernement, les systèmes d'une capacité allant jusqu'à 1 kW ont été déployés de façon centralisée, chacun fournissant une offre complète d'électricité : Il ne s'agit pas seulement de simples "systèmes solaires domestiques" ! Les coûts des systèmes se sont élevés à environ 3 200 \$ chacun

En 2018, la Chine disposait d'environ 800 MW de petites éoliennes pour l'utilisation en milieu rural. Cela signifie qu'il y a quelque 800 000 turbines d'une capacité d'environ 1 kW chacune. Elles fournissent également plusieurs millions de personnes dans les zones rurales avec de l'électricité propre.

Le rôle de la Chine dans le déploiement des énergies renouvelables dans les zones rurales est surtout visible dans le domaine de la bioénergie. Dans un précédent chapitre nous avons indiqué que la Chine déploie 42 millions de digesteurs « domestiques » dans ses zones rurales au service de 160 millions d'habitants.

La production de biogaz a une double fonction. En plus de la production d'énergie, elle assure une fonction dans l'assainissement des villages. Il ne faut pas penser que des centaines de millions de personnes dans les zones rurales du monde entier ont accès à des "toilettes". L'assainissement écologique des matières fécales dans les digesteurs est un progrès en soi.

À côté du géant chinois, le Népal voisin a développé ses ressources en biogaz depuis les années 1970. J'ai été témoin de leurs efforts lors d'une visite dans les années 1990. Le nombre de digesteurs de type « village » est estimé à 1,5 million d'unités

D'une manière générale, le biogaz a un rôle majeur à jouer dans le monde rural. La poursuite de son développement, en particulier en Afrique, est la clé pour contrer l'utilisation du bois de chauffage pour la cuisson. Cette dernière dégrade la qualité de l'air, les précieuses ressources en bois dans le Sud, et la fumée dégagée pendant la cuisson est très dangereuse pour la santé. L'utilisation du biogaz est propre et s'inscrit dans le développement de l'assainissement écologique en zones villageoises.

#### **9.4.2 La diffusion des "systèmes solaires domestiques" pour les besoins de survie.**

Le système solaire domestique (SSD) est un dispositif photovoltaïque destiné à fournir un minimum d'électricité à ceux qui n'en ont pas. Par exemple, on peut citer un système qui est actuellement proposé par une société française : Soltys ; il est produit au Burkina Faso. Il s'agit d'un minuscule panneau photovoltaïque de 5 Watt, avec un peu d'électronique, avec une batterie de 1,3 Ah, avec 3 lampes LED, et une connexion USB pour téléphone. Il fournit jusqu'à 38 heures d'éclairage. Il ne coûte que 20 €.

Les SSD modernes sont en effet très bon marché. En 1993, un système d'éclairage photovoltaïque coûtait 1 378 \$ au Kenya, droits et taxes inclus. Il comprenait un Module PV de 50 Watt coûtant 340 \$. Les prix ont baissé, en particulier grâce à la nouvelle disponibilité des LED à faible consommation et à leur baisse de prix. Leur prix a été réduit d'un facteur 10 en tout juste 10 ans.

Prenons l'exemple du Bangladesh. En 2003, il n'y avait que 12 000 SSD en service. Leur nombre n'a cessé d'augmenter au fil des ans et a atteint 5 millions. En Afrique, on estime que 60 millions de personnes bénéficient de l'aide de l'SSD, un chiffre qui explose actuellement.



Par-dessus tout, les SSD modernes sont importants pour la communication. En Afrique, les téléphones cellulaires sont massivement utilisés, y compris pour la santé, les soins et l'éducation. En Afrique "noire", il y avait 420 millions de téléphones cellulaires en service fin 2016. Presque tous les africains en avait un. Grâce à la SSD, les ruraux pauvres profitent maintenant du service et plus seulement ceux qui sont dans les villes reliées à l'électricité par le réseau.

#### **9.4.3 Une tendance vers les systèmes d'alimentation électrique de plus grande taille**

L'évolution vers les systèmes photovoltaïques offrant une plus grande autonomie énergétique, grâce à l'ajout de batteries, bat son plein en Europe. Plusieurs milliards de dollars US sont dépensés pour le développement de batteries sûres, fiables et rentables. L'intérêt pour les voitures électriques qui dépendent des batteries n'est pas l'intérêt de la seule force motrice électrique. Nous avons vu dans un chapitre précédent que L'Allemagne a désormais plus de batteries combinées avec le photovoltaïque sur ses marchés récents qu'elle n'en a dans ses voitures électriques nouvellement vendues. La conséquence de ces tendances vers les marchés de masse, est une diminution considérable du coût de ces batteries électriques. Les batteries Li-ion sont préférées sur les marchés émergents des voitures électriques. Toutefois, le type « plomb-acide » classique existe toujours, et à ce jour, c'est certainement le support le moins cher pour les applications sur le marché de l'alimentation électrique en Europe et dans le monde. En Allemagne, pour une famille moyenne, une installation photovoltaïque de 4 kW permet de couvrir une consommation annuelle de 4000 kWh/an. Ceci coûte environ 6 000 € lorsqu'il est installé. Pour une autonomie de 80%, le client doit ajouter une batterie de 4 kWh ou plus. S'il s'agit du type Li-ion, il coûtera autant que le générateur PV, soit environ 6 000 €. Une batterie au plomb-acide sera moins chère, mais nécessitera plus d'entretien. Ces développements récents dans les économies du Nord bénéficieront sans aucun doute aux tendances de l'électrification dans les zones rurales du Sud après un certain temps. En comptant sur une consommation plus faible de 1 000 kWh par famille et par an, le coût total de l'investissement peut se situer dans une fourchette de 3 000 à 6 000 euros. Il s'agit du coût initial pour un système d'une durée de vie de 20 ans. Même acheté à une cote de crédit habituelle pour un montant de 250 € par an, elle peut dépasser les moyens financiers d'une famille pauvre, mais il fournit une option pour les besoins centraux d'un village, les écoles, l'hôpital, les divertissements, etc. La meilleure approche est d'opter pour un système PV avec batterie en combinaison avec une unité de biogaz. Le biogaz qui alimente une unité de production combinée de chaleur et d'électricité, fournira sans aucun doute la totalité de la chaleur et de l'électricité, l'autonomie énergétique de manière durable et à un coût acceptable.

## Chapitre 10

### Les Programmes passés pour tracer les voies d'avenir

#### 10.1 L'éclairage solaire par le Barefoot Collège en Inde

Le Barefoot College (le collège des pieds nus), une ONG du Rajasthan, sous la direction de l'association de Bunker Roy, a joué un rôle exceptionnel dans la promotion de l'énergie solaire en Inde et en Afrique. Elle a commencé ses activités solaires dès 1984. Sa motivation était la religion et l'éthique.

La particularité du collège était de faire participer les femmes de la région à l'émergence puis au déploiement des centrales photovoltaïques émergentes dans leurs villages : "grand-mères pour l'énergie solaire". Les femmes ont été formées comme ingénieures en énergie solaire. Elles ont fabriqué des milliers de lanternes solaires et ont organisé leur installation. Et ça a très bien fonctionné !

Avec le programme "Électrification solaire pour l'éclairage", le collège a introduit le photovoltaïque pour l'éclairage dans des centaines de villages, leurs des écoles et des milliers de ménages. Environ 500 kW d'énergie photovoltaïque ont été déployés au total. A côté de l'éclairage, le collège a aussi fait la promotion de l'énergie solaire aussi pour le dessalement de l'eau.

Le collège a été actif dans la région de l'Himalaya, dans les pays sahéliens d'Afrique et plusieurs autres endroits en Inde et en Afrique.

#### 10.2 Pompage solaire de l'eau dans les pays sahéliens d'Afrique

Les pays du Sahel au sud du Sahara souffrent naturellement du manque d'eau. De grandes zones y sont arides. La Commission de l'UE à Bruxelles a lancé très tôt un programme gouvernemental visant à améliorer l'approvisionnement en eau potable et en eau pour l'irrigation. Il s'agissait d'un programme "régional" au profit des neuf pays de la région du Sahel : Burkina Faso, Ile du Cap-Vert, Gambie, Guinée-Bissau, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, et Tchad. Les bénéficiaires étaient au début du programme, dans les années 1980, les villages qui n'avaient pas accès à l'eau potable. A cette époque, 75 % de la population rurale se trouvait dans cette situation. Priorité a été accordée aux villages comptant entre 500 et 3 000 habitants.

Le programme régional s'appelait PRS d'après son "orthographe française". L'idée est née en 1985. Sa première tranche a débuté de 1990 jusqu'en 1996. Après une évaluation approfondie sur place de la mise en œuvre, les résultats ont été jugés suffisamment encourageants pour poursuivre l'action de 2001 à 2007.

Il s'agissait d'un programme solaire et la technologie utilisée était le photovoltaïque. Au total, quelques 2 MW de PV ont été installés, représentant le plus grand volume cohérent d'installations PV en Afrique jusqu'à son achèvement en 2007. Presque tous les systèmes déployés, un millier au total, ont servi à l'approvisionnement en eau potable. Ils étaient associés à des dispositifs d'éclairage et de refroidissement des aliments. Un très petit nombre d'entre eux ont été utilisés pour l'irrigation

Le coût total du projet a dépassé les 100 millions d'euros, Il a été essentiellement pris en charge par la Commission européenne à Bruxelles qui avait également la responsabilité générale du programme J'ai été impliqué dans le programme depuis le début ainsi que pour sa prolongation .

Quatre millions d'Africains ont bénéficié de cet important programme de pompage d'eau par assistance PV. Les gens ont non seulement bénéficié des appareils qui produisent l'eau, mais ils ont aussi été formés et éduqués sur une utilisation plus rationnelle de l'eau, sur le maintien d'un environnement propre autour des points d'eau, sur la santé et sur l'assainissement

### **10.3 Connexion Internet pour les pauvres en Amérique centrale**

Au tournant du siècle, lorsque l'Internet a commencé son fantastique développement, ses promoteurs se sont rendu compte que l'accès à l'Internet dans le Tiers Monde était un défi particulier. A cette époque, j'étais membre d'un "groupe interservices" à la Commission européenne appelé « Surmonter la fracture numérique » ou « Bridging the Digital Divide ». J'ai remarqué que les experts en ITI qui faisaient partie de notre groupe ne savaient pas grand-chose sur l'énergie d'où une complète sous estimation du problème de l'accès à l'électricité donc, pas d'Internet sans électricité.

L'occasion de faire quelque chose à ce sujet s'est présentée quand Fernando Cardesa, directeur de l'UE chargé de l'aide à l'Amérique latine, m'a informé qu'il y avait une nouvelle possibilité de financement pour l'énergie solaire dans son budget. Nous avons convenu d'une nouvelle initiative visant à fournir l'accès à l'électricité et à l'Internet pour certains des villages les plus pauvres d'Amérique latine. C'est ainsi que le programme EuroSolar a vu le jour.

Le programme a été officiellement adopté par la Commission européenne en avril 2006. Il s'est poursuivi jusqu'en 2012, avec un budget global d'environ 36 millions d'euros, dont 7 millions d'euros ont été apportés par les nations partageant le programme. Il s'agissait d'un programme régional qui a été mis en œuvre par le biais d'accords de coopération de la Commission européenne avec les gouvernements du Guatemala, du Salvador, du Honduras, du Nicaragua, de l'Équateur, du Pérou, de la Bolivie et du Paraguay. Les pays ont mis en place des structures nationales de mise en œuvre. Toutes les étapes de mise en œuvre ont fait l'objet d'appels d'offres internationaux.

Au total, 600 des villages parmi les plus pauvres (notons que pauvre veut dire pauvres en termes monétaires, ils ne sont pas pauvres du tout culturellement et socialement) ont été les bénéficiaires du programme. Environ 600 kW de PV pour 600 systèmes ont été déployés.

La partie la plus innovante du programme était la connexion Internet par satellite. Les systèmes d'alimentation électrique déployés se composent d'un réseau PV de 1 kW combiné avec une petite éolienne et une batterie plomb-acide. Une petite antenne parabolique assure la connexion satellite, via la bande K. Les systèmes sont installés dans les écoles villageoises et servent à l'éducation. Certains systèmes sont ouverts après l'école pour le public, servant de "café Internet". Ils fournissent également l'éclairage électrique.

Les systèmes ont également ouvert la possibilité de renforcer les soins de santé par la réfrigération des vaccins et des produits médicaux et de faciliter les opérations grâce à un meilleur éclairage. Le nettoyage de l'eau par des systèmes électriques était également une option.

EuroSolar a été évalué après achèvement par un groupe d'experts indépendants qui ont visité les installations sur place. Ils ont remis leur rapport en 2014 (à ce stade, je remercie mon collègue Horst Pilger, de la Commission, qui a rédigé le rapport et mis à ma disposition les documents 10.1 à 10,3). Le rapport énumère les nombreuses difficultés de jeunesse que l'on attendait d'un programme aussi novateur dans un environnement rural difficile. Toutefois, les conclusions générales sont très encourageantes.

Le programme a été un grand succès, en particulier pour les villageois. L'achèvement des systèmes dans leur village était pour eux une invitation à une fiesta « totale » avec beaucoup de joie, peut-être le plus beau succès populaire de l'énergie solaire dans le monde à ce jour.



Le programme est considéré comme ayant mis des centaines de communautés "sur la carte". Le manque d'accès à l'énergie électrique et à Internet est un indicateur d'exclusion sociale. L'Internet est vu comme une fenêtre sur le monde. La connexion avec les personnes émigrées est importante.



EuroSolar, conçu comme un programme régional, a en effet fourni l'espace pour l'échange de bonnes expériences entre les pays. Les résultats en matière de soins de santé se sont révélés particulièrement bons au Honduras. La connectivité s'est fortement améliorée au Nicaragua. Au Pérou, le programme a contribué de manière substantielle à la diffusion des préoccupations environnementales au sein des institutions et des personnes. Au Guatemala, on a même assisté à la construction de répliques sauvages des systèmes dans les églises.



L'Organisation des États hispano-américains pour l'éducation, la science et la culture s'est inspirée d'EuroSolar pour établir son programme "Light for Learning". Il a été décidé en septembre 2011 par les ministres de l'éducation de ses pays membres. Le programme comportait deux thèmes, une fondation pour l'énergie sans frontières et "Ondula", pour les télécommunications et PV. Soixante-dix mille écoles en Amérique latine, à savoir celles destinées aux populations autochtones d'Argentine, d'Uruguay, de la République dominicaine et d'autres pays ont adopté les systèmes inspirés d'EuroSolar.

Au Pérou, EuroSolar a contribué à la conception d'un important programme "pour l'électrification rurale massive" et pour l'alphabétisation. Le Pérou a mis en place "Aulas de Innovacion Pedagogica" avec un programme de connexion Internet par satellite. Dans ce cas la connexion est proposée gratuitement.

#### **10.4 L'industrie des satellites pour connecter les personnes non câblées du monde entier**

Il n'y a qu'un millier de satellites actifs dans l'espace, contre 2 600 qui ne fonctionnent plus ; 60 % de ces satellites sont utilisés pour les communications, le GPS, les télécommunications, la météorologie, la défense et l'agriculture.

Le 16 janvier 2020 a été lancé par une Ariane 5 pour le compte du français Eutelsat le satellite Konnect. Celui-ci se trouve sur orbite géostationnaire. Il couvre l'Afrique pour les besoins en internet des particuliers et entreprises. Konnect sert aussi l'Europe de l'Ouest où 150 millions de foyers ne sont toujours pas connectés par les moyens terrestres. Eutelsat poursuit la stratégie d'offrir le haut débit en orbite géostationnaire pour l'activité humaine en Europe, et une offre bas débit par la constellation en orbite basse pour l'activité des objets (IOT, internet des objets, NDLR).

Aujourd'hui, l'activité satellitaire est énorme ; globalement, elle s'est élevée à 260 milliards de dollars en 2017 et devrait quintupler d'ici 2030. De plus, un volet financier de 128 milliards de dollars est associé aux services mentionnés précédemment, plus particulièrement pour la communication. A ce jour seul un petit nombre de satellites est actuellement employés pour fournir Internet à large bande. Pourtant, la population qui n'a pas accès à l'Internet aujourd'hui est estimé à 3 milliards de personnes. Les réseaux Internet terrestres n'atteignent que 10% de la population du Tiers-Monde.

L'un des problèmes liés à la connexion par satellite pour l'accès à Internet est son coût élevé alors que la réception de la télévision par satellite est gratuite. Le coût était un obstacle majeur lors de la conception de notre EuroSolar, car le coût de la connexion était trop élevé pour être pris en charge par les villageois. Cependant, la situation est en train de changer. La société espagnole Quantis, fournisseur d'accès à Internet en association avec Hispasat, affirme qu'elle facture aujourd'hui 30 € pour 22 mégabits/s, un service d'accès à Internet, une infime fraction de ce qui était pratiqué au début du siècle.

L'entreprise consistant à connecter les non câblés pouvait être une énorme opportunité économique pour l'industrie, un âge d'or. En 2015, des grosses pointures telles qu'Elon Musk et Mark Zuckerberg y ont investi. La crise a suivi un an plus tard, lorsqu'Intelsat et Eutelsat ont été fragilisés par la chute des cours de leurs actions. Dans les années 1990, d'autres avaient subi également de graves revers. À l'époque, la société Iridium a dépensé 6 milliards de dollars pour le concept "un monde, un téléphone". Six mois plus tard, ils ont fait faillite. Un désastre similaire s'est produit avec O3B en 2007 sur le thème "large bande pour les autres 3 milliards".

Cependant, Iridium est revenu. Fin 2017, la société, qui est spécialisée dans la connexion téléphonique par satellite, disposait de 40 satellites dans l'espace. Iridium s'est associée à la société de lanceur SpaceX de Musk pour mettre en fonction un réseau de 81 satellites pour un coût de 2 milliards de dollars.

Néanmoins, en ce moment, les feux ont tendance à se remettre au vert pour la connexion Internet. Le prestataire de services Quantis est très actif sur le créneau du marché des 20% d'hispaniques encore non connectés, et sur ceux du Maroc, du Tchad, etc. Eutelsat a mis en orbite deux satellites en 2017, l'un d'eux au-dessus du Pacifique avec sa capacité vendue à Panasonic, et l'autre, le KA-SAT, au-dessus de l'Europe. Les deux sont géostationnaires et assurent la liaison avec les passagers des avions.

L'année 2017 a également été le début d'un "projet pharaonique", le « OneWeb ». Il s'agit d'une initiative américaine détenue à moitié par Airbus Défense and Espace. Parmi les investisseurs figurent : Softbank, Qualcomm, Intelsat et Virgin. L'objectif est de mettre dans l'espace 900 satellites pour fournir un accès Internet à large bande et à haute vitesse à "la moitié du monde", comme l'a annoncé le consortium. Ce sera une orbite basse comme pour le GPS. Il fonctionnera dans la bande KU à 12- 18 GHz, fournissant de 17 à 23 Gigabits par seconde. Le but est de fournir un accès à Internet disponible et abordable pour "tout le monde", maisons, voitures, trains, avions, etc..Le premier objectif, annoncé, est de connecter d'ici 2022 les 2 millions d'écoles qui n'ont pas accès à Internet aujourd'hui. Les 10 premiers satellites sont en cours de construction à Toulouse, en France. Les 6 premiers satellites ont été lancés le 27 février 2019 par Arianespace Soyouz. Continuer avec le nouveau texte: OneWeb a obtenu en mars cette année davantage de capital pour l'investissement. A partir du 4ème trimestre 2019, il a annoncé qu'il allait installer 30 satellites chaque mois. Au total, il prévoit 650 satellites pour une couverture mondiale complète.

Et il y aura de la concurrence. Le Canadian Telesat a annoncé qu'il déploierait 300 satellites à partir de 2022. Il a choisi **New Glenn**, un lanceur développé par Jeff Bezos, le fondateur d'Amazon. New Glenn est une autre société privée comme Space X d'Elon Musk. (Entre parenthèses: **Blue Origin**, le propriétaire de New Glenn a également proposé à la NASA de s'impliquer pour envoyer de nouveau des personnes sur la lune.) New Glenn aura également comme clients l'US Air Force, Eutelsat et... OneWeb.

Et il y a la communication conventionnelle par câble qui a été fortement innovée par la nouvelle technologie de fibre de verre, bien avant que l'intérêt pour les satellites à cet effet ne soit apparu. 1,2 million de km de câbles sous-marins ont déjà été posés depuis l'an 2000 et constituent un lien essentiel pour l'internet mondial. La France est l'un des rares producteurs de tels câbles. Et grâce à la diminution des coûts, le marché explose ici aussi. Google investit dans de nouveaux liens entre les États-Unis, le Chili et l'Europe, cofinancés par Facebook et le français Orange, leader dans ce domaine. La Chine déploie un réseau complet vers l'Europe et l'Afrique, l'Inde, l'Indonésie et le Brésil.

## **Epilogue : La vie en harmonie avec le soleil et la nature**

*D'abord ils vous ignorent, puis ils se moquent de vous, puis ils vous combattent, puis vous gagnez.*

Mahatma Gandhi.

Nous, les nombreux pionniers de l'énergie solaire, sommes passés exactement par ce cycle, et nous avons obtenu le résultat annoncé par Gandhi : Nous avons gagné.

Après un énorme effort intellectuel et financier, le monde est revenu à ses fondamentaux. Notre nouveau siècle, le XXI<sup>e</sup> siècle, est de retour à l'harmonie avec le Soleil. Nous avons de nouveau adopté les avantages de l'énergie solaire et nous nous sommes détournés du nucléaire et du charbon. La bioénergie, les capteurs solaires, l'énergie éolienne et l'hydroélectricité sont devenus le fer de lance de la politique énergétique et des investissements depuis le début du siècle.

Notre énergie est devenue plus décentralisée. Elle est devenue moins vulnérable, assurant une plus grande sécurité d'approvisionnement. Le déploiement massif des énergies renouvelables crée des milliards de dollars de valeur économique et des millions de nouveaux emplois. C'est le bras armé contre le changement climatique et la pollution de l'air, de la terre et des mers. C'est une nouvelle chance pour les laissés-pour-compte de sortir de la pauvreté. L'énergie solaire offre un confort pour tous dans de meilleures conditions de vie et de travail, avec des logements à énergie zéro et des bâtiments à énergie positive à l'horizon.

Des processus de décision politique de toutes sortes sont à l'origine de cette percée écologique. Le résultat global est que l'énergie solaire et les énergies qui lui sont associées sont devenues économiquement compétitives. Elle est sur le point de devenir la moins chère de toutes les énergies. Et comme l'énergie est fondamentale à notre vie, nous bénéficierons tous ensemble de ce processus en cours.

Mais il ne faut pas pour autant relâcher notre vigilance et nos efforts. Les politiciens, en particulier ceux du Bureau ovale, pourraient être tentés de déclarer demain un nouveau programme nucléaire ou une guerre nucléaire, de la même façon qu'ils ont récemment déclaré vouloir relancer l'utilisation du charbon sale, ou aller sur Mars.

Cependant, le nouvel avantage financier de l'énergie solaire rendrait très difficile, même pour un politicien conservateur, de revenir en arrière, contre le soleil. La Terre en harmonie avec le Soleil a de bien meilleurs arguments, et une vie beaucoup plus longue, que ces quelques politiciens qui créent des problèmes.

## Annexe

### A.1 Préparer l'Europe à la révolution solaire

Rien ne peut être créé à partir de rien.

Le monde a mené d'importants programmes de R&D sur l'énergie solaire, qui ont préparé le chemin vers sa mise en œuvre à grande échelle, à l'aube du nouveau siècle, comme nous l'avons décrit tout au long de ce livre.

En Europe, un effort de développement déterminé a commencé dans les années 1970 sous la direction de la Commission européenne à Bruxelles, et j'en étais le responsable officiel. La Commission a fourni des contrats pour des développements conjoints dans l'industrie, les universités et les institutions spécialisées dans toute l'Europe. Les programmes ont été mis en œuvre dans le cadre de comités consultatifs officiels avec les autorités de tous les pays membres de l'UE. Il y avait 12 pays membres à l'époque : Allemagne, France, Italie, Royaume-Uni, Irlande, Espagne, Portugal, Grèce, Grèce, Pays-Bas, Belgique, Danemark et Luxembourg. Les projets ont été financés par les budgets propres de la Commission avec des contributions des budgets nationaux des pays concernés par une recherche particulière.

À l'époque, l'UE avait également un accord de coopération officiel avec le programme solaire du ministère américain de l'énergie, que j'avais négocié par l'intermédiaire de l'ambassade des États-Unis à Bruxelles.

Les contacts entre spécialistes ont été encouragés par la Commission européenne lors de nombreuses réunions d'entrepreneurs et lors de conférences internationales consacrées au photovoltaïque, à l'énergie éolienne, à la bioénergie et à l'architecture solaire. Ces dernières ont été suivies par des milliers de personnes du monde entier. Des exemples bien connus sont les conférences européennes sur le photovoltaïque que j'ai lancées en 1977 au nom de la Commission. C'est une série qui continue encore aujourd'hui. Les conférences ont été très tôt un outil important pour le dialogue, y compris avec des activités non européennes. Dans le domaine du photovoltaïque, ces contacts sont particulièrement importants avec le Japon, qui a toujours été un leader mondial dans ce domaine.

#### A.1.1 Le développement de l'énergie solaire dans l'UE depuis les années 1970

Des programmes réguliers de R&D ont été lancés et mis en œuvre par la Commission européenne en 1977 sous ma responsabilité directe. Très tôt, le Conseil européen des ministres de la recherche a adopté des stratégies et des lignes directrices spécifiques, qui ont été approuvées, ainsi qu'un budget. Elles ont été mises en œuvre par le biais d'appels à propositions officiels. Le financement a été assuré par le biais de contrats conclus et gérés par la Commission à Bruxelles. Les programmes ont connu leur apogée dans les années 80 et 90.

Un millier de contrats ont ainsi été conclus au cours de ces années et plusieurs centaines de millions d'euros de financement ont permis le développement de l'énergie solaire. Les résultats ont été publiés dans plus de 60 livres publiés par la Commission en coopération avec des éditeurs commerciaux.

Le programme comportait cinq secteurs prioritaires : PV, énergie éolienne, bioénergie, applications solaires aux habitations et applications dans l'agriculture.

Le PV avait la priorité la plus élevée de toutes les allocations budgétaires. Son point culminant a été le "PV Pilot Programme". En 1983, un total de 1 MW de PV avait été installé dans des centrales dédiées. Il s'agissait de la plus grande capacité photovoltaïque installée en Europe à cette époque. Les installations étaient prêtes à l'emploi pour différentes applications. La plupart d'entre elles avaient aussi des batteries pour le stockage. La plus grande réalisation d'une capacité de 300 kW a été installée sur l'île de Pellworm en Allemagne ; 35

ans plus tard, elle est toujours opérationnelle. D'autres servaient aussi pour l'alimentation des îles et des villages. Une pour une école, une pour un grand émetteur de télévision, une pour un aéroport (Nice), une autre pour une ferme laitière, une pour la production d'hydrogène et une pour le dessalement de l'eau de mer. Les installations ont été installées en France, au Royaume-Uni, en Italie, aux Pays-Bas, en Belgique, en Grèce, en Irlande et, comme indiqué précédemment, en Allemagne.

A cette époque, beaucoup d'efforts ont été consacrés au développement des systèmes, alors que le coût des modules photovoltaïques était encore 10 fois plus élevé qu'aujourd'hui. Le développement de plaquettes de silicium à faible coût, le traitement des cellules de silicium, l'encapsulation, les cellules alternatives telles que le CdTe, le CdS, le CdSe, le CIGS ont fait l'objet de recherches prioritaires avec l'industrie et des instituts spécialisés.



Figure A.1 Le village d'Aghia Roumeli, île de Crète, Grèce. Site de l'installation pilote PV, comme on peut le voir à gauche, à partir de 1983 à l'initiative de la Commission européenne.

Pour l'énergie éolienne, une évaluation européenne de son potentiel a conduit à la conclusion qu'à terme, l'énergie dérivée du vent pourrait fournir trois fois les besoins totaux en électricité du continent. Cette étude a été réalisée alors que sa capacité n'avait même pas atteint le premier GW - il fallait être visionnaire.

L'Atlas européen de l'énergie éolienne a été préparé par Risoe au Danemark dans le cadre d'un contrat avec la Commission, de même que les outils d'implantation pour les installations d'éoliennes. L'état de l'art de la technologie de l'époque a été établi par l'étude de centaines de machines existantes. Sur la base de considérations fondamentales, la taille optimale des turbines rentables a été établie à 2 à 3 MW. Jusqu'à ce jour, il s'est avéré être un excellent guide pour les machines installées à terre - la taille moyenne en Europe est aujourd'hui exactement de 3 MW.

En 1985, nous avons commencé le développement d'éoliennes d'un mégawatt. Les programmes s'appelaient WEGA selon l'acronyme allemand pour "grandes éoliennes". Dans le WEGA I, trois turbines expérimentales de l'ordre du mégawatt ont été construites en Grande-Bretagne, en Espagne et au Danemark ; la danoise à Esbjerg était la plus grande avec 2 MW. L'espagnole a été la première à être érigée à Cabo Villano à l'angle nord-ouest de la Galice - mille autres construites plus tard par des investisseurs privés ont suivi. Puis vint WEGA II, qui conduisit au développement des premières éoliennes commerciales de la taille d'un MW en

Europe. Les contractants de la Commission après appel d'offres étaient Vestas, Enercon, Bonus (acheté plus tard par Siemens) et Nedwind. Le coût total du WEGA II s'est élevé à 25 millions d'euros, auxquels la Commission a contribué à hauteur de 7 millions d'euros.

En ce qui concerne la bioénergie, le programme de l'UE a impliqué l'industrie et les centres de recherche agricole. L'évaluation de son potentiel comprenait l'interface avec la "Politique agricole commune" (PAC) de l'UE, le développement des zones rurales, la création d'emplois, la production de nouvelles cultures énergétiques et le recyclage des résidus et des déchets.

Les matières premières considérées étaient, outre la sylviculture, des cultures agricoles telles que l'*Arundo donax*, le cordgrass, le sorgho sucré, le sorgho et les algues. Plusieurs millions d'euros ont été prévus pour la construction de quatre usines pilotes en Allemagne, en France, en Italie et au Royaume-Uni pour le "méthanol issu du bois" utilisant différentes technologies de gazéification.

Dans le domaine des applications solaires pour les habitations, le programme ne s'est pas intéressé au développement adéquat des capteurs de chaleur solaire, mais s'est concentré sur les essais et la certification. Elle s'est également impliquée dans le développement des données climatiques, du stockage thermique et du refroidissement solaire.

L'un des points forts du programme était le "chauffage solaire passif". Un manuel solaire passif à l'intention des architectes et des ingénieurs a été élaboré et publié. Des composants solaires passifs ainsi que des modèles de simulation et des outils de conception ont été développés.

Une évaluation du marché potentiel du chauffage et de la climatisation solaires dans le secteur du bâtiment en Europe a également été établie et publiée.

Pour les applications de l'énergie solaire dans le secteur agricole, le programme a également commencé par l'évaluation de son potentiel. Il s'agissait entre autres du chauffage des serres, du séchage des cultures et de l'amélioration de la qualité des produits.

### **A.1.2 Le programme de marketing de l'UE "APAS" des années 90**

APAS est l'acronyme français d'un programme de l'UE en faveur de l'énergie solaire qui signifie "Actions préparatoires, d'accompagnement et de soutien". Il a été décidé en 1994 lorsque le Parlement européen a demandé un tel programme et a fourni 25 millions d'euros supplémentaires sur la ligne budgétaire de l'UE pour les énergies renouvelables (ER). Le programme a été mis en œuvre par le biais d'appels à propositions et géré par ma division à la Commission européenne. Plus de 340 propositions ont été reçues et 70 contrats ont finalement été signés. Ils ont impliqué plus de 300 entités européennes de l'industrie et des services publics d'électricité, de l'architecture, de la recherche et du monde universitaire, des autorités régionales, des ONG, etc. En fait, il a rassemblé sur une plate-forme commune certaines des meilleures compétences disponibles en Europe sur les différentes énergies solaires dans les années 1990.

L'aperçu suivant est tiré de la publication officielle de l'UE "APAS Renewable Energies 1994, Project Synopses" sous EUR 16876 FR 1996. Les actions concertées transnationales suivantes, impliquant différentes entités européennes, ont été entreprises en cours de route.

#### **A.1.2.1 En route vers un monde de l'énergie solaire**

- Promotion des énergies renouvelables dans l'économie européenne ; l'industrie, la création d'emplois ; les goulots d'étranglement et les obstacles ; l'analyse des coûts et des risques.
- Impacts économique et environnemental d'une politique solaire ; le potentiel d'une Europe des énergies renouvelables - Meilleure utilisation des sols, développement de l'économie locale.

- Un système d'information géographique pour une intégration solaire à grande échelle.
- Planification stratégique
- Plans opérationnels et politiques d'intégration solaire à grande échelle.
- Un système d'aide à la décision
- Un réseau d'information
- L'éducation, la formation, les cours de maîtrise.
- Intégration dans l'approvisionnement énergétique des collectivités
- Intégration dans l'infrastructure d'approvisionnement européenne
- Réseau des régions européennes, intégration régionale accélérée, planification intégrée dans les régions - Paquets énergétiques pour les régions, municipalités, îles, création de nouvelles structures.
- Parcs technologiques
- Conditions juridiques, techniques, administratives, structurelles pour la production d'électricité par les auto-producteurs - Réseaux d'intégration des ER pour la production d'eau.
- L'approvisionnement en électricité et en eau pour le développement socio-économique des pays méditerranéens
- Les anciens sites d'extraction du charbon

#### **A.1.2.2 Aménagement urbain**

- Conservation de l'énergie et villes durables
- La ville solaire ; le concept a été développé dans ce programme APAS par les architectes vedettes Lord Norman Foster, Lord Richard Rogers et Renzo Piano ; par la suite, la ville solaire Pichling près de Linz en Autriche a été construite ; elle compte aujourd'hui 25 000 habitants qui ont le privilège de bénéficier d'un environnement particulièrement favorable à l'énergie et au transport.
- Vers un développement urbain zéro émission ; relation entre les bâtiments, l'énergie, les gens, le microclimat ; la ville zéro émission.
- Intégration technique et esthétique des ER dans les nouvelles implantations - Urbanisme ; maximiser l'utilisation des stratégies ER - ER pour les villes européennes.
- Stabilisation des émissions de gaz à effet de serre dans les villes
- Collecte de données architecturales solaires
- Utilisation de la lumière du jour et de la ventilation naturelle dans les bâtiments.
- L'énergie solaire et la bioénergie dans les petites et moyennes villes.
- Composants de capteurs PV et thermiques et d'enveloppes pour bâtiments existants et nouveaux.
- The Electric Home, accélération de l'intégration à grande échelle du photovoltaïque dans les bâtiments.

#### **A.1.2.3 Régions hors Europe**

- Pays du cône sud de l'Amérique latine
- L'électrification rurale décentralisée en Inde
- Systèmes solaires érudits sud-africains
- Surveillance du pompage de l'eau PV en Afrique de l'Ouest.
- Cliniques de soins de santé primaires dans les régions rurales éloignées.
- Potentiel de dessalement dans la vallée du rift jordanien via son potentiel hydrostatique.

#### **A.1.2.4 Photovoltaïque**

- Un déploiement à grande échelle à long terme (LSMD) du PV en Europe ; une étude menée par Bernard Chabot de l'ADEME française en association avec l'ETSU britannique, l'Ecofys hollandaise, l'Université de Karlsruhe en Allemagne et l'ENEL en Italie ; pour l'année 2030 l'étude prévoyait en Europe une capacité installée totale de 155 GW ; en ce moment en 2018, nous n'en sommes pas loin, un beau travail considérant qu'il a été réalisé alors que l'Europe n'avait même pas installé son premier GW ; L'étude a supposé un marché total de 5 GW de systèmes autonomes installés, 50% de toutes les toitures résidentielles, chacune équipée de 4 kW de PV, 25% de toutes les toitures de bâtiments commerciaux, et 10% de la capacité PV totale installée au sol ; l'étude a également projeté beaucoup d'exportation de PV qui n'a pas réalisé ; au contraire, l'Europe importe la plupart des modules ; et contrairement aux projections, une grande partie du marché est en fait consacrée aux systèmes installés au sol.
- PV pour les villages du monde, catalyseur de l'intégration à grande échelle dans les villages des pays en développement.
- Mise en œuvre de systèmes solaires domestiques Préparer l'Europe à la révolution solaire
- Aller vers l'échelle multi megawatt pour les filières silicium et couches minces au niveau des cellules et modules. Le projet MUSIC FM est une étude réalisée par BP Solar en association avec FhG ISE, ZSW, ASE et Phototronics en Allemagne, IMEC en Belgique, Crystalox au Royaume-Uni, et les universités de Madrid, Lisbonne, Utrecht et Newcastle avec de nombreux autres sous-traitants ; la conclusion était que pour une ligne de production de silicium de 500 MW par an, un coût de production des modules de l'ordre de 1 euro/watt était réalisable ; aucune percée technologique n'était nécessaire ; aucune difficulté insoluble dans la fabrication des modules CdTe, amorphe-Si ou CIS à couche mince n'a été identifiée
- Suppression des obstacles à la technologie PV.

#### **A.1.2.5 Les perspectives de la bioénergie**

- Culture à grande échelle de la biomasse à des fins énergétiques dans l'UE ; impacts à long terme sur les revenus agricoles, l'emploi et l'environnement.
- Technologie, environnement, utilisation des terres, législation, analyse économique et sociale
- Interface avec les politiques de la PAC et du GATT
- Intégrer les externalités de l'énergie de la biomasse dans l'analyse des coûts globaux.
- Concept de bioélectricité pour une mise en œuvre à grande échelle
- Réseau européen de bioélectricité
- Déchets solides municipaux, résidus de jardin
- biomasse agricole pour l'électricité et le combustible de chaudière
- Huile bio-brut pour moteurs.
- Gazéificateurs
- Cultures énergétiques, Cynara cardunculus, Arundo donax (canne de Provence)
- Sorgho sucré pour l'électricité et les combustibles dans l'industrie sucrière, réseau énergétique Robinia pseudoacacia.

#### **A.1.2.6 Énergie éolienne**

- Code de pratique pour l'industrie
- Dessalement éolien-diesel

## A.2 Voyager dans le monde entier pour donner des conférences sur les énergies renouvelables

Après avoir quitté la Commission européenne en 2001 en tant que fonctionnaire pour des raisons d'âge, je me suis engagé dans un effort de promotion mondiale au nom du Conseil mondial pour les énergies renouvelables. Voici quelques exemples.

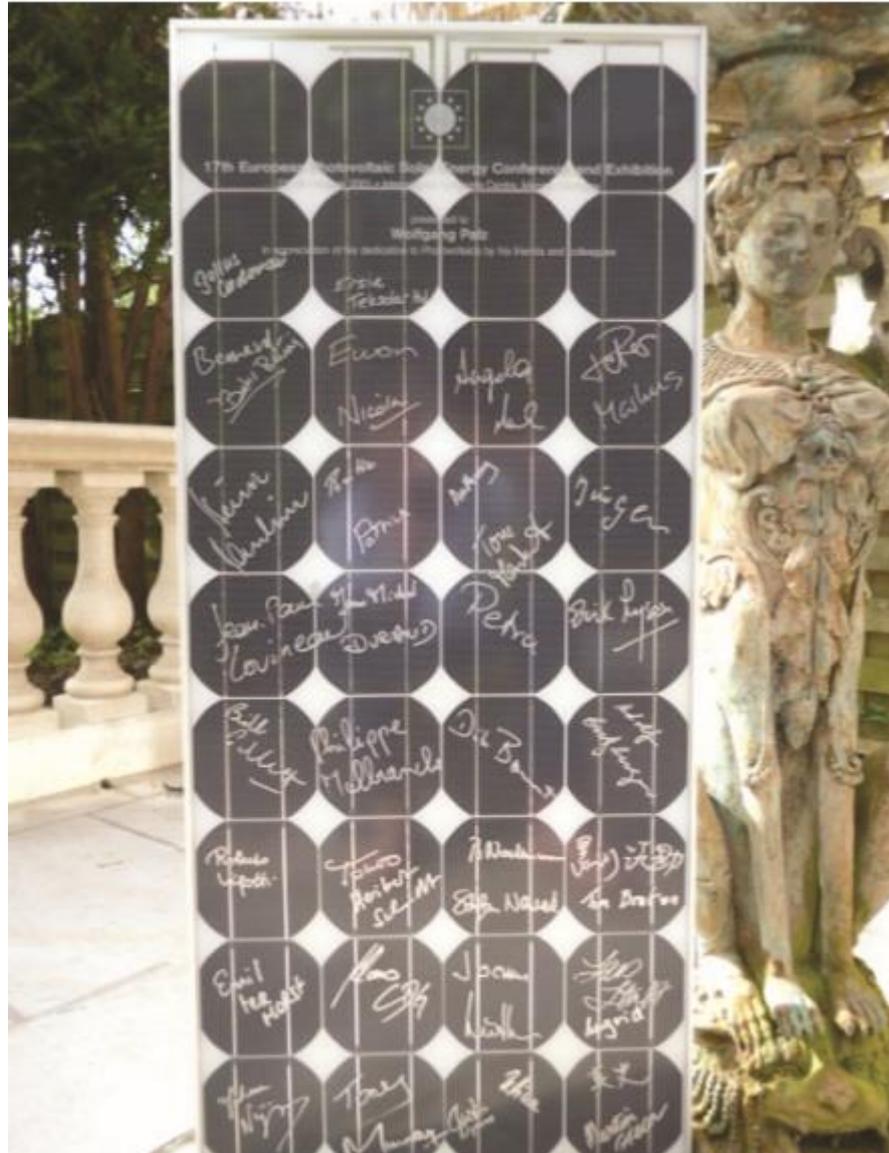


Figure A.2 Cadeau d'adieu à l'auteur en 2001 lors de la conférence PV à Munich lorsqu'il a pris sa retraite en tant que fonctionnaire de la Commission européenne. Fourni par Peter Helm et signé sur un panneau Siemens par des amis.

### A.2.1 Promotion politique des ER

- Santo Domingo 2001, Séminaire sur l'énergie durable de l'UE pour les États ACP insulaires.
- Pékin, 2005, Forum mondial des énergies renouvelables, keynote
- Pékin, 2006, "Great Wall RE Energy Forum", co-organisateur.
- Pékin, 2008, Forum international de l'énergie CIEF, discours liminaire
- Pékin, 2009, China Energy Strategy Summit, organisé par le gouvernement central, discours d'ouverture

- Washington DC, 2011, RETECH, discours d'ouverture.
- Saint-Petersbourg, Russie, 2008, Institut Ioffe, Conférence russo-allemande, keynote.
- Réunion des ministres du Commonwealth, 2008
- article dans l'ouvrage de référence Biofuels and the Global Food Crisis.
- Guatemala, Banque interaméricaine de développement, 2007, discours-programme.
- Malaisie, 2008, Sommet sur les énergies renouvelables, co-organisateur
- Lisbonne, 2008, Sommet mondial sur les énergies renouvelables IIR, co-organisateur
- Dublin, 2009, RENEW Une feuille de route pour la relance économique de l'Irlande
- Lecce, Italie, 2009, Festival dell'energia, keynote dell'energia, keynote

### **A.2.2 ER sur les conférences sur le pétrole et le gaz naturel**

- Algérie, 2007, Conseil des régulateurs européens de l'énergie CEER, sous le patronage du gouvernement, discours-programme.
- Téhéran, Iran, 2008, 13e Conférence internationale sur le pétrole et le gaz IIES, sur le podium avec le Secrétaire général de l'OPEP El Badri.
- Pékin, 2008, Conférence du Conseil d'État avec le World Petroleum Council, discours-programme.
- Bakou, Azerbaïdjan, 2009, Conférence de l'OCDE sur l'énergie, discours-programme.

### **A.2.3 Industrie, technologie et finance**

- Pékin, 2009, au Grand Hall du peuple, 12e Forum international sur le développement des entreprises de haute technologie, discours-programme VIP.
- Pékin, 2009, Club des Entrepreneurs RE
- Vienne, 2009, Institut européen d'innovation et de technologie.
- Londres, 2008 New Energy Finance Summit, invité en tant que " leader d'opinion ".
- Oxford, 2006, Oxford Union Debate : "Britain goes for Nuclear", je m'y suis opposé.
- Tenerife, 2011, Le Conseil des entreprises sur l'Afrique
- Budva, Monténégro, 2009, Conférence organisée par la GTZ. Rencontre avec le directeur de Volkswagen, W. Steiger, pour proposer un marché des moteurs automobiles pour la cogénération offrant une autonomie énergétique complète dans les bâtiments.



Figure A.3 Réunion préparatoire de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) à Bonn en 2009. Organisé par le gouvernement allemand, réalisé par Hermann Scheer (photo de l'auteur).

#### **A.2.4 Bâtiments et villes**

- Inde, 2004, Conférence sur les bâtiments intelligents.
- Bahreïn, 2005, Conférence architecturale
- Pékin, 2006, Energy Policy and Mega-City Development : Vers 100 % ER Villes, discours-programme
- Oxford, 2006, 2e Congrès international des villes solaires, discours-programme.
- Barcelone, 2012, Congrès mondial des villes intelligentes
- Munich, 2014, Forum des villes du futur.

#### **A.2.5 Bâtiments et villes**

- Partenariat mondial sur les bioénergies (GBEP) de la FAO à Rome, membre permanent depuis 2006.
- Denver, 2002, American Association of Advanced Science.
- IESES, en contribuant à de nombreux événements
- IRENA, impliqué dans sa création, notamment à Charm El Sheikh, Egypte, réunion (2009) en tant que membre de la délégation française.

#### **A.2.6 Anniversaires**

- UNESCO, Paris, 2013, 40e anniversaire, Congrès "Le soleil au service de l'humanité", co-organisateur.
- Folkecenter, Danemark, 2013, 30e anniversaire.
- ITER, Tenerife, 2015, 25e anniversaire, discours d'ouverture.

#### **A.2.7 Aventures, échapper au terrorisme**

- Syrie, 2008 : Invité par les autorités allemandes à la Conférence de Damas de l'Agence syrienne de protection de l'environnement. La Syrie était alors un pays normal et pacifique ; je me sentais comme

chez moi. J'ai loué une voiture et j'ai parcouru 2000 km à travers le pays tout seul, jusqu'à Palmyre et la rivière Euphrate. Tout était calme et agréable. J'ai eu un problème majeur, non pas avec le terrorisme, mais avec une tempête de sable qui m'a presque coûté la vie. Il est incroyable de voir toute la terreur et la misère, les centaines de milliers de morts, quelques années après ce voyage.

- Nigeria 2011 : Également invité par le gouvernement allemand, je suis allé donner des conférences à Lagos, Abuja et Kano dans le Nord. Ils ont eu Boko Haram. Depuis lors, le terrorisme islamique s'est répandu et un voyage de conférences n'est plus possible aujourd'hui.



Figure A.4 Paris, réunion de l'UNESCO commémorant le 40e anniversaire du Congrès "Le soleil au service de l'Homme" de 1973.



Figure A.5 Syrie, 2008. La porte Saint-Paul à Damas d'où l'apôtre s'est échappé par-dessus le mur : St Paul était important en tant que fondateur des églises chrétiennes. Imaginez ce qui se serait passé s'il n'avait pas réussi son vol (photo de l'auteur).



Figure A.6 Syrie, 2008. L'auteur à Palmyra. La plus grande partie a été détruite lorsque le SI a emménagé parfois plus tard.



Figure A.7 Syrie, 2008. A l'Euphrate, berceau de la civilisation. Peu de temps après le tournage de cette photo, le SI en a fait son siège social (photo de l'auteur).



Vols en montgolfière en Chine (photo de l'auteur).

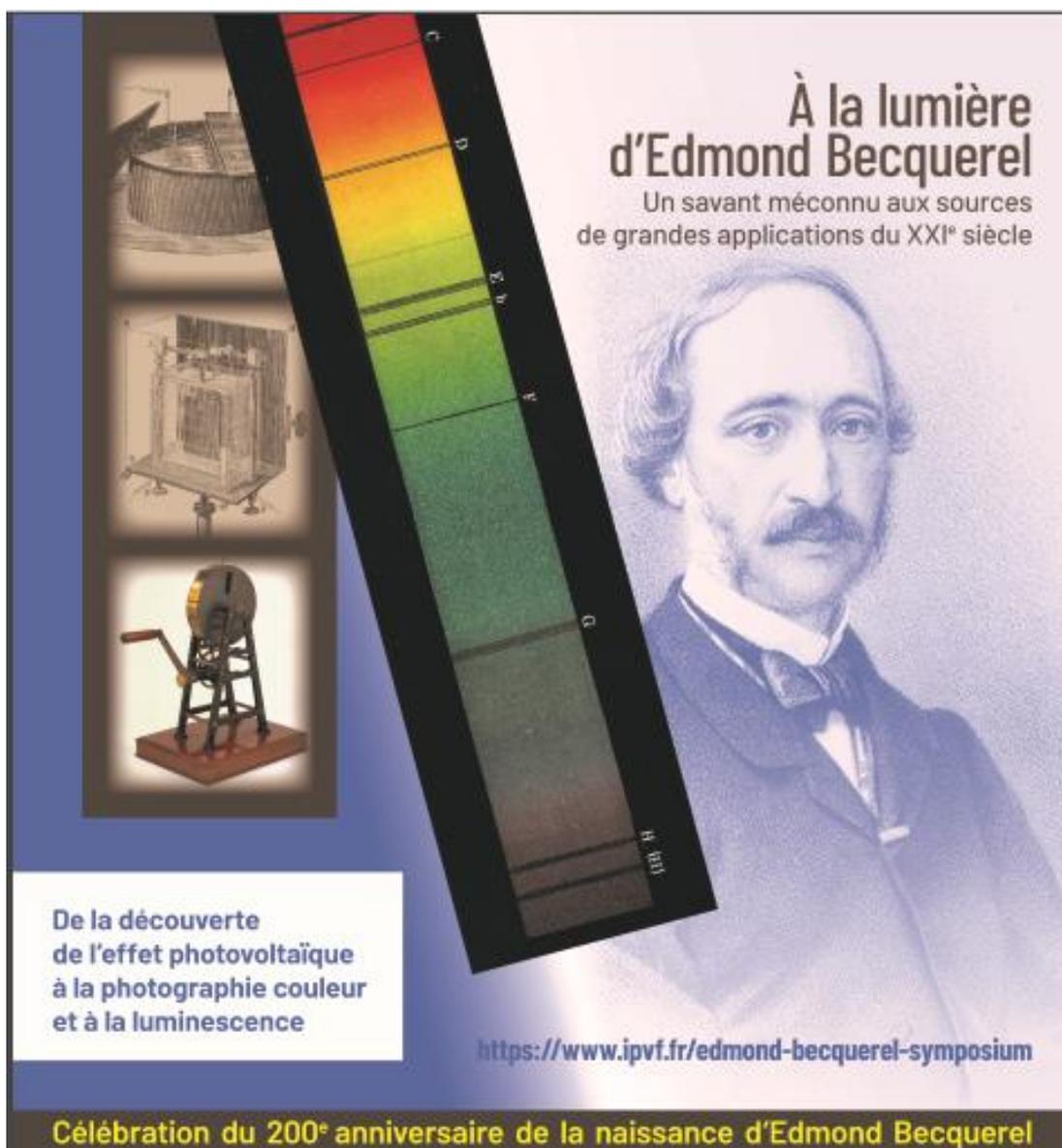
Hommage à Edmond Becquerel  
(1820-1891)  
Découvreur de l'effet photovoltaïque

Daniel Lincot

Videos sur Youtube en libre accès  
<https://www.ipvf.fr/fr/symposium-edmond-becquerel/>

**Bilan du symposium « Edmond Becquerel : une passion pour la lumière », organisé pour le 200<sup>ème</sup> anniversaire de sa naissance**

8 février 2021 –version provisoire



**À la lumière  
d'Edmond Becquerel**  
Un savant méconnu aux sources  
de grandes applications du XXI<sup>e</sup> siècle

De la découverte  
de l'effet photovoltaïque  
à la photographie couleur  
et à la luminescence

<https://www.ipvf.fr/edmond-becquerel-symposium>

**Célébration du 200<sup>e</sup> anniversaire de la naissance d'Edmond Becquerel**

## 1- Organisation et programme

Après l'annulation du symposium prévu à la date de 24 mars 2020, pour cause de pandémie, celui-ci a été reporté en décembre 2020, avec l'espoir de pouvoir le tenir en présentiel à Sorbonne Université comme initialement programmé. Compte tenu de la poursuite de la pandémie, l'organisation en distanciel a été décidée en juillet 2020. Le symposium s'est tenu le 7 décembre 2020.

En annexe 1 est présentée l'organisation mise en place pour le symposium. On y indique en particulier la composition du comité d'organisation, du comité de conseil, ainsi que la liste des organisations qui ont soutenu le symposium, et que nous remercions vivement.

En annexe 2 est présenté le programme complet du symposium ainsi que la liste des contributeurs invités.

## 2- Inscriptions et participation à la journée

En annexe 3 est présentée la liste des inscrits au symposium via le site WEB. Le nombre d'inscriptions via le site web s'est élevé à 560, environ 200 de plus de celles reçues pour le symposium en mars.

On y retrouve 239 inscrits venant du monde académique français, couvrant de plusieurs dizaines de laboratoires, universités ou écoles sur l'ensemble du territoire (Ile de France, Marseille, Amiens, Rennes, Strasbourg, Bordeaux, Lyon, Grenoble, Nantes, Toulouse, Metz..), avec une grande proportion de chercheurs du CNRS, de l'école polytechnique, de l'IPVF et du Museum, impliqués en particulier dans le domaine du photovoltaïque et des recherches sur la conservation. Notons également la participation d'une dizaine de chercheurs du CEA.

Au niveau international, 55 inscriptions venaient des centres académiques de Belgique, Allemagne, Italie, Luxembourg, Japon, Algérie, Royaume-Uni, USA, Iran, Pays Bas, Turquie, Inde. Un point également à noter concerne la participation, au niveau national et international d'une quinzaine de personnes travaillant dans des musées, bibliothèques ou dans le domaine de l'histoire des sciences (BNF, Musée Galilée de Florence, Institut de conservation Getty de Los Angeles, Bibliothèque de Genève, Université d'Oxford, Musée Royal d'Amsterdam, Ecole supérieure de conservation de Madrid, Société Chimique de France, Société Japonaise pour l'histoire de la chimie, musée de Chatillon Coligny). Une autre catégorie d'inscrits (environ 20) concernaient des organismes nationaux ou internationaux, sociétés savantes (ADEME, Ministères, UNESCO, Société Chimique de France, Société Française de Physique, Centre de recherche Européen).

Une autre composante importante des inscrits est directement issue du secteur économique et industriel, allant de la R&D à la production, avec près de 110 inscrits représentant autour de 70 entreprises. On y retrouve une forte participation d'EDF et de Total en lien avec leur activité dans le domaine du photovoltaïques, ainsi que de nombreuses entreprises également engagées dans ce secteur comme Photowatt, Armor, Solarcloth, Risun, mais aussi de nombreuses autres entreprises françaises comme St Gobain, Renault, Engie, Thales, Vallourec, Fronius, Cap gemini, Air liquide, Horiba, Nexans...

Le dernier groupe, d'environ une centaine d'inscrits concerne des représentants des partenaires ou intervenants du symposium comme le comité Becquerel, l'IEST, le European Solar manufacturing council, les sociétés savantes SCF, SFP, Académie des sciences, le SEIN, des associations variées, engagées dans le domaine du photovoltaïque avec la société Hespul, ou la centrale villageoise Soleil Sub Bourgogne, et enfin de nombreux participant individuels s'inscrivant simplement sous la dénomination « retraité(e) ».

Ce panorama des inscrits au symposium reflète bien la diversité de l'œuvre d'Edmond Becquerel en touchant un large public, au sein du monde de la recherche et de l'enseignement, mais aussi du monde de la culture et de la conservation comme on pouvait s'y attendre. La surprise est venue de la forte participation

du monde industriel qui rend hommage d'une certaine mesure à un aspect fondamental de la démarche d'Edmond Becquerel qui était le développement économique associé au progrès de la science. Son investissement dans la Société d'Encouragement de l'industrie nationale en est d'ailleurs la parfaite illustration. Le fait qu'il soit aussi le découvreur (méconnu) de l'effet photovoltaïque, qui est un domaine en pleine ébullition, tant au niveau de la recherche que de l'industrie, avec des enjeux très importants dans la transition énergétique, explique également l'intérêt suscité par l'initiative de célébrer le bicentenaire de sa naissance, et la forte participation venant de ces domaines.

*Au cours de la journée, la participation moyenne s'est élevée à 200-250 avec un pic dans la matinée à près de 300.*

### **3- Bilan de la journée**

Le programme du symposium a pu bénéficier du programme qui avait été établi pour sa tenue en présentiel le 24 mars 2020 qui en a constitué l'ossature après confirmation de la disponibilité des conférenciers prévus pour le 24 mars. Le report du symposium n'a pas eu que des effets négatifs mais d'une certaine mesure, grâce au passage en distanciel, il a permis une plus grande ouverture internationale, en particulier en réponse à l'initiative d'introduire des témoignages vidéo non prévus lors de la première date.

La journée a été introduite les représentants des institutions dans lesquelles Edmond Becquerel a œuvré avec Bruno David, président du Muséum national d'Histoire naturelle, Pascale Heurtel, directrice des bibliothèques du CNAM et Didier Roux, de l'Académie des sciences, ainsi que de Roch Drozdowski-Strehl, directeur général de l'Institut Photovoltaïque d'Île de France afin de marquer l'actualité de la découverte de l'effet photovoltaïque par Edmond Becquerel.

L'idée directrice de la célébration a été d'associer dans un même événement les aspects historiques de l'activité d'Edmond Becquerel en suivant l'évolution de ses thématiques de recherche pouvant être réunies sous le thème général de sa « passion pour la lumière ». Pour introduire ce thème, Gérard Mourou, Prix Nobel de physique 2018, nous a fait l'honneur d'une conférence introductive passionnante sur ses travaux consacrés aux lasers intitulée « Une passion pour la lumière extrême », montrant que les recherches sur la lumière sont sans cesse renouvelées. Où seront-elles dans deux siècles ? Gérard Mourou les voit même ouvrir de nouvelles perspectives ... pour l'énergie nucléaire. Christine Blondel, historienne des sciences, spécialiste de l'histoire de l'électricité avec ses travaux sur Ampère, a ensuite présenté le parcours exceptionnel d'Edmond Becquerel, dont elle fut également biographe. Elle a montré, à travers de multiples exemples, son profond attachement à l'expérimentation et à la mesure comme guide de son approche intellectuelle. Elle a rappelé l'engagement, peu connu, d'Edmond Becquerel à la valorisation industrielle des découvertes scientifiques, au cœur du processus d'innovation qui revient aujourd'hui d'actualité.

Après ces deux exposés inauguraux, le parcours scientifique d'Edmond Becquerel a été présenté autour de trois découvertes majeures. Tout d'abord celle de la découverte de l'effet photovoltaïque, pour laquelle il est encore trop peu connu en France, qui a eu lieu en 1839 dans son laboratoire du Muséum. Jérôme Fatet, de l'Université de Limoges, a raconté l'histoire de cette découverte et de la mise au point de l'actinomètre électrochimique dont il a répliqué la mise au point durant sa thèse de doctorat. L'exposé suivant, fait par Daniel Lincot, a porté sur l'interprétation actuelle des expériences d'Edmond Becquerel en s'appuyant sur les travaux postérieurs et actuels. Il a montré que les couches de chlorure d'argent utilisées se comportaient comme un semi-conducteur, le silicium par exemple, qui a servi à la mise au point des cellules photovoltaïques modernes plus d'un siècle après.

La session suivante a été consacrée à la photographie pour laquelle Edmond Becquerel s'est également passionné, avec plusieurs découvertes en particulier celle de la première photographie couleur. Le premier exposé, donné par Bertrand Lavédrine, a donné le contexte historique de ces travaux en s'appuyant sur de nombreux documents d'époque, dont de magnifiques photographies commentées avec érudition et brio. Il fut suivi l'exposé par Victor de Seauve, consacré à l'interprétation très fouillée sur l'interprétation des images photochromatiques obtenues par Edmond Becquerel, où il répond à la question clé sur la nature des mécanismes impliqués : effet plasmonique ou interférentiel ? c'est le premier. Mais de nouveaux questionnements sont nés sur leur nature fondamentale, exploré dans l'exposé suivant par Lucia Reining et Francesco Sottile faisant le lien, dans leurs recherches actuelles avec... la mécanique quantique, dans une présentation originale et ludique.

La troisième session de la matinée était consacrée aux travaux effectués dans les années 1850 par Edmond Becquerel concernant l'étude des phénomènes de luminescence/phosphorescence, passion commune des trois Becquerel de son père Antoine à son fils Henri, qui ont conduit à la découverte de la radioactivité par ce dernier en 1896. Edmond Becquerel a montré que ces phénomènes ne faisaient qu'un et se distinguaient uniquement par leurs constantes de temps. Pour cela il mit au point un nouvel appareil, le phosphoroscope, ancêtre des spectroscopies modernes. Guilhem Gallot a ainsi pu retracer dans son exposé la mise au point de cet appareil et illustrer son fonctionnement grâce à une expérience reconstruite réalisée au cours d'un projet avec les étudiants de l'école polytechnique. Jean François Guillemoles a ensuite illustré l'importance et l'actualité des études de luminescence aujourd'hui pour l'étude des matériaux et des processus de transfert d'énergie en leur sein. Il a aussi montré le lien existant entre la luminescence et le rendement de conversion ultime des cellules solaires, connu sous le nom de limite de Shockley-Queisser. Après une courte discussion générale, s'est ainsi conclue la première demi-journée du symposium.

La pause déjeuner, étendue sur 2 heures, a permis d'ouvrir le symposium à de nouvelles contributions invitées sous la forme de courtes vidéos préparées en amont par des personnalités des mondes scientifiques, économiques, culturels ou associatifs qui souhaitaient s'associer à l'hommage rendu à Edmond Becquerel. C'est ainsi que 19 vidéos ont été adressées aux organisateurs. Elles offrent de superbes témoignages, émanant pour la plupart de personnalités étrangères, sur l'impact et la résonance actuelle des travaux d'Edmond Becquerel, qu'il s'agisse de spécialistes mondialement reconnus dans le domaine du photovoltaïque, d'associations, de musées ou de jeunes entrepreneurs. Ces témoignages donnent à la célébration un relief très original en synergie avec les présentations orales, et laisseront également une trace dans l'histoire.

L'après-midi s'est plus concentré sur l'hommage à Edmond Becquerel par la communauté internationale de l'énergie solaire photovoltaïque. Comme la découverte de son fils Henri en 1896 fut à l'origine de l'épopée de l'énergie nucléaire dans la seconde moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, sa découverte de l'effet photovoltaïque est à l'origine de l'épopée en cours depuis le début du 21<sup>ème</sup> siècle du développement à grande échelle de l'énergie solaire, épopée qui a débuté par la découverte des solaires silicium et la conquête spatiale en 1954. C'est en 1989, à l'occasion du 150<sup>ème</sup> anniversaire de la publication de l'article fondateur, que fut créé, par l'Union européenne, le prix Edmond Becquerel récompensant, chaque année ou chaque deux ans, les meilleurs travaux en énergie solaire photovoltaïque. C'est fort logiquement que la première présentation a été faite par Joachim Luther, président du comité des lauréats du prix Becquerel, qui a ainsi présenté l'apport de ces 29 personnalités aux avancées du domaine. S'en est suivie une conférence plénière donnée par Henry Snaith, lauréat 2020 du prix Becquerel, sur les dernières avancées des recherches qui ont vu la découverte d'une nouvelle filière photovoltaïque à même de révolutionner les technologies actuelles, en l'occurrence la technologie dite « perovskite ». Clin d'œil à l'histoire, il s'agit comme pour les couches de chlorure ou iodure d'argent d'Edmond Becquerel, de matériaux du même type basés sur des iodures.

Christophe Ballif a ensuite fait rêver l'assemblée avec le développement du photovoltaïque dans le domaine de la ville où il se conjugue de plus en plus avec l'architecture et l'esthétique.

Les développements industriels ont ensuite résonné avec la fibre innovation industrielle d'Edmond Becquerel avec la présentation de l'état du domaine au niveau international par Gaëtan Masson, fondateur de l'Institut Becquerel à Bruxelles. Le développement spectaculaire du photovoltaïque a ainsi été analysé ainsi que ses perspectives à court et à long terme. Xavier Daval et Richard Loyen ont ensuite présenté la situation en France en mettant l'accent, à la façon d'une analyse SWOT sur les forces et les faiblesses de l'industrie photovoltaïque en France. On retiendra l'alerte sur les retards pris ces dernières années qui pourraient hypothéquer les chances d'être présent dans la prochaine phase décisive pour la transition énergétique et l'économie nationale.

La journée s'est ensuite poursuivie par une session de clôture présidée par Takahiro Wada qui a vu se succéder deux interventions illustrant parfaitement la dualité de l'héritage d'Edmond Becquerel, avec d'un côté le rôle de la recherche fondamentale et de l'enseignement dans le progrès scientifique, remarquablement présenté par Catherine Langlais et de l'autre l'innovation industrielle et sociétale illustrée brillamment par Paolo Frankl avec en apothéose l'expression « Roi Soleil » utilisée par l'Agence internationale de l'énergie pour caractériser le développement de l'énergie solaire.

Enfin, la journée s'est terminée par une allocution à deux voix portée par Bertrand Lavédrine et Daniel Lincot, remerciant les orateurs, organisateurs et soutiens de la commémoration et l'annonce d'une surprise finale : celle d'une courte vidéo mettant en scène le jardin des plantes et une découverte exceptionnelle.

Posée sur le mur du laboratoire d'Edmond Becquerel, une plaque est apparue sur laquelle on peut lire « Ici, en 1839, Edmond Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque ». Ainsi pour les années à venir et peut être plus, les visiteurs découvriront côte à côte l'hommage à Henri Becquerel et celui à Edmond.



#### 4- Perspectives

Plusieurs actions sont prévues pour poursuivre l'action engagée lors du symposium pour mettre en visibilité l'œuvre d'Edmond Becquerel et sa place dans l'histoire des sciences.

Il s'agit tout d'abord de réunir l'ensemble des contributions orales de la conférence sous forme de vidéos individuelles et d'effectuer un montage de l'ensemble de la prise de vue réalisée durant la journée. Ces vidéos seront jointes aux vidéos de témoignage déjà réalisées. Les versions en français et en anglais seront disponibles. L'accès se fera via la page web déjà ouverte pour le symposium et aussi par accès direct sur Youtube.

<https://ipvf.fr/fr/symposium-edmond-becquerel/>

<https://www.youtube.com/playlist?list=PL5UqkzFNKba9Emr9vb6SHIY0OEZIMI00n> en français

<https://www.youtube.com/playlist?list=PL5UqkzFNKba-csyN3DAazWTEaNwvX9Wj> en anglais

Un recueil des principaux articles d'Edmond Becquerel accompagnés de commentaires est également prévu qui pourra prendre la forme d'un ouvrage dédié.

Des articles sont également prévus à partir des interventions dans des revues spécialisées, en particulier suite à une proposition dans la revue d'histoire du CNRS. Plus largement une publication dans une revue de grand impact comme Science ou Nature est envisagée.

# Annexe 1 : Organisation du symposium

## Présidents

Daniel Lincot (CNRS-IPVF), Bertrand Lavédrine (CRC-MNHN)

## Comité d'organisation

E. Amouyal (CNRS, Ecole Polytechnique), J.-E. Bourée (CNRS, Ecole polytechnique), A. Crossay (CNRS, IPVF), G. Delport (CNRS,IPVF), J.-L. Lazzari (CNRS-CIMAP), J. Luther (ISE Fraunhofer), N. Schneider (CNRS-IPVF), B. Theys (CNRS-IPVF)

## Comité de conseil

O. Azzola (Responsable Musée, Ecole polytechnique), L. Barbo (Prof. De Physique, auteur du livre sur les Becquerel), N. Barreau (Université de Nantes, IMN), C. Blondel (Historienne, CNRS), G. Cadonau (Responsable Agence Solaire Suisse), G. Chambaud (Université Marne la Vallée, ancienne présidente SCF), J.-P. Chevalier (Conservatoire National des Arts et métiers), X. Daval (Syndicat des énergies renouvelables), R. Drozdowski-Strehl (IPVF), L. Dufaux (Musée du CNAM), A. Grassi (ETA Florence), J.-F. Guillemoles (CNRS,IPVF), D. Guthleben (historien CNRS), V. Jacques Le Seigneur (Observatoire des énergies renouvelables), A. Joffre (Pôle de compétitivité DERBI), A. Jouini (CEA-INES), J.-P. Kleider (CNRS-GEEPS), M.-A. Languille (MNHN), F. Lambert (CEA-LITEN), M. Leduc (CNRS-LKB), T. Leroux (historien CNRS), J.-M. Lourtioz (CNRS,C2N UPSaclay), R. Loyen (Enerplan), J. Luther (ISE Fraunhofer), G. Masson (Institu Becquerel), W. Palz (UE retraité), P. Roca i Cabarrocas (CNRS-IPVF), P. Rigny (Maison de la Chimie), D. Roux (Académie des sciences), H. Schock (HZB), A. Slaoui (CNRS-ICUBE), C. Subran (Comité lumière et société), D. Suchet (Ecole polytechnique-IPVF), J.-M. Tarascon (Collège de France-Académie des sciences)

## Soutiens



## Conférenciers invités

- Bruno David, Président du Muséum National d'Histoire Naturelle.
- Roch Drozdowski-Strehl, Directeur général de l'IPVF
- Pascale Heurtel, Directrice des bibliothèques du CNAM
- Didier Roux, membre de l' Académie des Sciences.
- Joachim Luther, Président du comité des prix Edmond Becquerel, Allemagne
- Gérard Mourou (Prix Nobel de physique 2018, École polytechnique).
- Christine Blondel (historienne au CNRS)
- Jim Sites (Colorado State University, USA)
- Jérôme Fatet (Université de Limoges)
- Hynd Remita (Université Paris Saclay)

- Victor de Seauve (CRC-MNHN)
- Lucia Reining (Ecole polytechnique)
- Francesco Sottile (Ecole polytechnique)
- Laurie Peter (Université de Bath, Royaume Uni)
- Guilhem Gallot (Ecole polytechnique)
- Jean François Guillemoles (CNRS-IPVF)
- Hans Schock (HZB, Allemagne)
- Nathanaelle Schneider (CNRS-IPVF)
- Henry Snaith (Université d'Oxford, Royaume Uni)
- Christophe Ballif (CSEM-EPFL, Suisse)
- Andreas Bett (ISE Fraunhofer)
- Gaëtan Masson (Institut Becquerel)
- Xavier Daval (Syndicat des Energies Renouvelables)
- Richard Loyen (ENERPLAN)
- Takahiro Wada (Université de Ryukoku, Japon)
- Catherine Langlais (SFP)
- Paolo Frankl (IEA)
- Olivier Azzola (Ecole polytechnique)
- Laetitia Brottier (Dualsun)
- Gallus Cadonau (Solar Agentur, Suisse)
- Edouard de Saint-Ours (Université St Andrew, Royaume Uni)
- Gérard Emptoz (SEIN)
- Olivier Mousson (SEIN)
- Michael Graetzel (EPFL, Suisse)
- Martin Green (UNSW, Australie)
- Bernard Mc Nelis (Université de Southampton, Royaume Uni)
- Shigeru Niki (NEDO, Japon)
- Dick Swanson (Université de Stanford, USA)

## Annexe 2 : Programme

### Edmond Becquerel: A Passion for Light

Animation: Géraud Delport and Alexandre Crossay

Interpretation : Isabelle Brusset

### Symposium Opening

#### 8:30am – 9:00am: Opening

Chairs: Daniel Lincot and Bertrand Lavédrine

- **Addresses from representatives** of the Museum national d'Histoire naturelle (MNHN), Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France (IPVF), Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), Becquerel Prize Committee :
  - Bruno David, President of the MNHN.
  - Roch Drozdowski-Strehl, Chief Executive Officer of IPVF.
  - Pascale Heurtel, Director of CNAM Libraries.
  - Didier Roux, Member of the Académie des Sciences.
  - Joachim Luther, Chairman of the Becquerel Committee.

#### 9:00am – 9:45am: Inaugural Session

Chairs: Daniel Lincot and Bertrand Lavédrine

- **A Passion for Extreme Light**, Gérard Mourou (Nobel Prize in Physics 2018, École polytechnique).
- **Rediscovery of Edmond Becquerel, a great experimenter**, Christine Blondel (CNRS).

### Edmond Becquerel's Contributions

#### 9:45am – 10:30am: Photovoltaics

Chairs: Jean-Éric Bourée (CNRS, FR) and Jim Sites (Colorado State University, USA).

- **The electrochemical actinometer and the discovery of the photovoltaic effect**, Jérôme Fatet (Université de Limoges).
- **Modern interpretation of the photovoltaic effect discovery**, Daniel Lincot (CNRS-IPVF).

#### 10:30am – 11:15am: Photography

Chairs: Edmond Amouyal (CNRS-EP, FR) and Hynd Remita (Univ. Paris Saclay, FR)

- **Edmond Becquerel and photography**, Bertrand Lavédrine, (MNHN-CNRS).
- **The Origin of Edmond Becquerel's photochromatic colored images: spectroscopic and electron microscopic studies**, Victor de Seauve (MNHN-CNRS).
- **The color photography of Edmond Becquerel and quantum mechanics**, Lucia Reining, Francesco Sottile (École polytechnique).

#### 11:15am – 12:00pm: Phosphorescence and luminescence

Chairs: Jean-Louis Lazzari (CNRS, FR) and Laurie Peter (Univ. Bath, UK)

- **The phosphoroscope of Edmond Becquerel: The reconstructed experiment**, Guilhem Gallot (École polytechnique).
- **From phosphorescence to ultimate solar cell efficiency**, Jean-François Guillemoles (CNRS-IPVF).

**12:00pm – 12:30pm: Exchanges – Discussion**

**12:30pm – 2:00pm: Break**

## **Invited Video Testimonies**

**12 :30 pm – 2:30 pm: 19 videos to be accessed on line in parallel**

## **Edmond Becquerel’s Legacy**

**2:30pm – 2:45pm: Session opening**

Hans Schock (HZB, GER, Awardee 2010)

- **The Becquerel Prize**, Joachim Luther (Chairman of the Becquerel Committee, ISE Fraunhofer).

**2:45pm – 3:35pm: Recent developments in photovoltaics**

Chairs: Joachim Luther (GER) and Nathanaelle Schneider (CNRS-IPVF, FR)

- **The advent of Perovskite solar cells**, Henry Snaith (Oxford PV), Becquerel Prize Awardee 2020.
- **Photovoltaic applications today and tomorrow, from industry to artworks**, Christophe Ballif (CSEM-EPFL), Becquerel Prize Awardee 2016.

**3:35pm – 3:55pm: Break**

**3:55pm – 4:30pm: State of the art of photovoltaics deployment**

Andreas Bett (ISE Fraunhofer, Germany)

- **General overview**, Gaëtan Masson (Institut Becquerel, Bruxelles).
- **The photovoltaic industry in France in 2020**, Xavier Daval (SER), Richard Loyer (ENERPLAN).

**4:30pm – 5:00pm: Exchanges – Discussion**

**5:00pm – 5:30pm: Closing Session**

Takahiro Wada (Univ. Ryukoku, Japan)

- Catherine Langlais, President of the French Society of Physics (SFP).
- Paolo Frankl, Director of renewable energies in International Energy Agency (IEA).
- **Closing address** : Bertrand Lavédrine, Daniel Lincot.

## Invited Video Testimonies

- 1-Olivier Azzola (Ecole Polytechnique, France) : **The Becquerel at Museum of Ecole Polytechnique.**
- 2-Andreas Bett (ISE Fraunhofer, Germany) : **Up and Downs in Photovoltaics in Germany**
- 3-Laeticia Brottier (DualSun) : **the testimony of a young entrepreneur**
- 4-Gallus Cadonau (Solar Agentur Switzerland) : **Plus Energy Buildings**
- 5-Edouard de Saint-Ours (University of St Andrews, UK): **The reception of Edmond Becquerel's colour incomplete photography process.**
- 6Gérard Emptoz (President of the History Commission of SEIN , France) et Olivier Mousson (President of SEIN, France): **Edmond Becquerel and the Society for the Encouragement of National Industry (SEIN)**
- 7-Michael Graetzel (EPFL, Switzerland) : **From Photosynthesis to Dye Sensitized Solar Cells**
- 8-Michael Gaetzel (EPFL, Switzerland) : **The Genesis and Rise of Molecular Photovoltaics and Perovskite Solar Cells**
- 9-Martin Green (UNSW, Australia) : **The Grand History and Future of Silicon Solar Cells**
- 19-Makoto Konagai (Tokyo City University, Japan): **Looking back on the innovative solar cell development in Japan.**
- 11-Daniel Lincot : **Presentation of the french edition of Wolfgang Palz' Book « The Triumph of the Sun, the Energy of the New Century »**
- 12-Bernard McNelis (University of Southampton, UK) : **Bob Hill and the recognition of Edmond Becquerel in photovoltaics**
- 13-Shigeru Niki (NEDO, Japan) : **Future projects on next generation PV technologies**
- 14-Laurie Peter (Bath University, UK): **Construction and use of a phosphoroscope at Fritz Haber Institute in Berlin (1972-1975)**
- 15-James Sites (Colorado State University, USA, Cherry Award 2020): **Evolution of Thin Films Photovoltaics**
- 16-Dick Swanson (Stanford University) : **Photovoltaics since Becquerel, the first 181 years as Prelude**
- 17-Pierre Verlinden (Amrock, Australia, Awardee 2019) : **From Edmond Becquerel experiments to reaching 1 Terawatt of cumulative Photovoltaic installation by 2022.**
- 18-Jean-Marie Voignier (Amis du Musée de Chatillon-Coligny) : **Guided visit of the Becquerel's history at Chatillon-Coligny Museum.**
- 19-Takahiro Wada (Ryokoku, Japan) : **Development of CIS solar cells from the perspective of materials scientist**

## Annexe 3

Couverture de la première édition, septembre 2019







Wolfgang Palz est un physicien allemand. Pendant plus de cinquante ans il a été un des leader mondiaux du développement de l'énergie solaire et des autres énergies renouvelables. Il fut directeur du programme photovoltaïque du CNES en France de 1967 à 1976, puis directeur des programmes de développement de l'énergie photovoltaïque à la commission européenne pendant 20 ans. Il fut ensuite membre de la commission du parlement allemand chargée de la prospective énergétique à l'horizon 2050, puis consultant auprès de la communauté européenne pour le programme photovoltaïques en Amérique Latine. Il a reçu de nombreux prix, dont le prix de la société internationale pour l'énergie solaire en 2011. Il est décoré de l'ordre du mérite de la république allemande.



Daniel Lincot est directeur de recherche de classe exceptionnelle au CNRS. Il s'est engagé en 1978 dans la recherche de nouvelles générations de cellules solaires en couches minces qui sont actuellement industrialisées. Il obtient la médaille d'argent du CNRS en 2004 et le grand prix de la société française de chimie en 2015. Il fonde en 2005 un premier laboratoire dédié au photovoltaïque, l'IRDEP et participe à la fondation de l'Institut Photovoltaïque Ile de France (IPVF) en 2013, dont il sera directeur scientifique jusqu'en juillet 2019. Il fut président en 2008 de la conférence photovoltaïque européenne. Il est auteur de plus de 300 publications.



François MOISAN est directeur scientifique de l'ADEME, agence française de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. Il était jusqu'en mars 2019 Directeur exécutif de la stratégie, de la recherche et de l'international de l'agence. Il a été chargé du pilotage des activités de recherche et d'innovation, notamment des investissements d'avenir, de l'expertise économique et des actions internationales de l'ADEME. Spécialiste de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables depuis quarante ans, il a été membre de différentes instances internationales dans le domaine de l'efficacité énergétique. Il est Ingénieur SUPELEC (1972) et Docteur en Sciences Economiques de l'Université de Grenoble (1983).



Dominique Campana est Directrice Europe et International de l'ADEME, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. Depuis plus de 30 ans, elle a consacré sa carrière à la promotion de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables, la protection de l'environnement et la lutte contre les changements climatiques. Après avoir débuté comme ingénieure de recherche à l'Ecole des Mines de Paris, elle a rejoint l'ADEME en 1993. Elle a joué un rôle très actif lors des négociations internationales sur le climat et le développement durable, en particulier lors de l'Accord de Paris à la COP 21 ou le Sommet de la Terre (Rio+20). Elle est titulaire d'un doctorat en sciences physiques et a été décorée au titre de "Chevalier de l'ordre national du Mérite" en 2006 et de "Chevalier de la Légion d'honneur" en 2014.