LES ENERGIES RENOUVELABLES

La production photovoltaïque d'électricité : quelles perspectives pour le Pays Provence Verte?

Bernard FONTAINE

Directeur de Recherche au CNRS
Conseiller Municipal de Garéoult
Secrétaire Général du Conseil de Développement du Pays Provence Verte
Bernard.fontaine@lp3.univ-mrs.fr

Juillet 2009

La production photovoltaïque d'électricité : quelles perspectives pour le Pays Provence Verte?

Bernard FONTAINE

Directeur de Recherche au CNRS
Conseiller Municipal de Garéoult
Secrétaire Général du Conseil de Développement du Pays Provence Verte
Bernard.fontaine@lp3.univ-mrs.fr

Juillet 2009

Sommaire

I. Introduction 1
II. Un peu de physique et de technologie 5
III. Situation actuelle de la production photovoltaïque d'électricité 14
IV. Perspectives à 10 ans de la production photovoltaïque d'électricité 24
V. Conclusion 35
Références 37

I - Introduction

L'objet de ce document de synthèse est de présenter les progrès obtenus dans le domaine de la production photovoltaïque d'électricité, les recherches en cours et les perspectives que l'on peut en attendre, notamment dans le Pays Provence Verte, particulièrement favorisé par son ensoleillement.

Les habitants de notre chère planète Terre sont actuellement confrontés à deux problèmes maintenant largement reconnus à travers le monde:

- la raréfaction des ressources primaires d'énergie d'origine fossile (pétrole, gaz, uranium)
- réchauffement de la planète par effet de serre.

La réponse à ces deux problèmes est un véritable défi qui nécessite d'agir en parallèle sur le développement des sources d'énergie renouvelables (photovoltaïque, photo-thermique, photo-thermodynamique, éolien, hydraulique, géothermie, biomasse - énergie, etc.), sur la réduction de la production de CO2 et des autres gaz à effet de serre, et, enfin, sur le contrôle de notre consommation énergétique. On constate, sur ce dernier sujet, des progrès dans plusieurs pays dont la France dans les études sur la mise en place d'une contribution Climat-Energie (CCE)(Taxe Carbone)(Conférence de Consensus en France les 2 et 3 juillet 2009) [1].

Des efforts très importants sont entrepris dans le monde, principalement aux USA, au Japon, en Australie, en Chine et en Europe pour relever ce défi [2], [3], [4], [5], [6]. En Provence de nombreux laboratoires sont engagés dans des recherches sur les sources d'énergie renouvelables. Enfin, le Conseil Régional de la Région Provence – Alpes - Côte d'Azur prépare actuellement un schéma régional « Climat-Air-Energie » [7], [8], [9].

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kW_c/m2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. La puissance moyenne annuelle reçue est de 200 à 300 w/m2 en France. La France reçoit chaque année du soleil l'équivalent de 200 fois sa consommation annuelle en énergie. Le Pays Provence Verte reçoit du soleil une énergie de 1850 kWh/m^2/année, ce qui est à comparer avec 1100 kWh/m^2/année pour le nord de la France. La Fig.1 représente l'irradiation solaire moyenne en France en kWh/m^2/jour sur un plan orienté au sud et incliné de 45 ° [10].

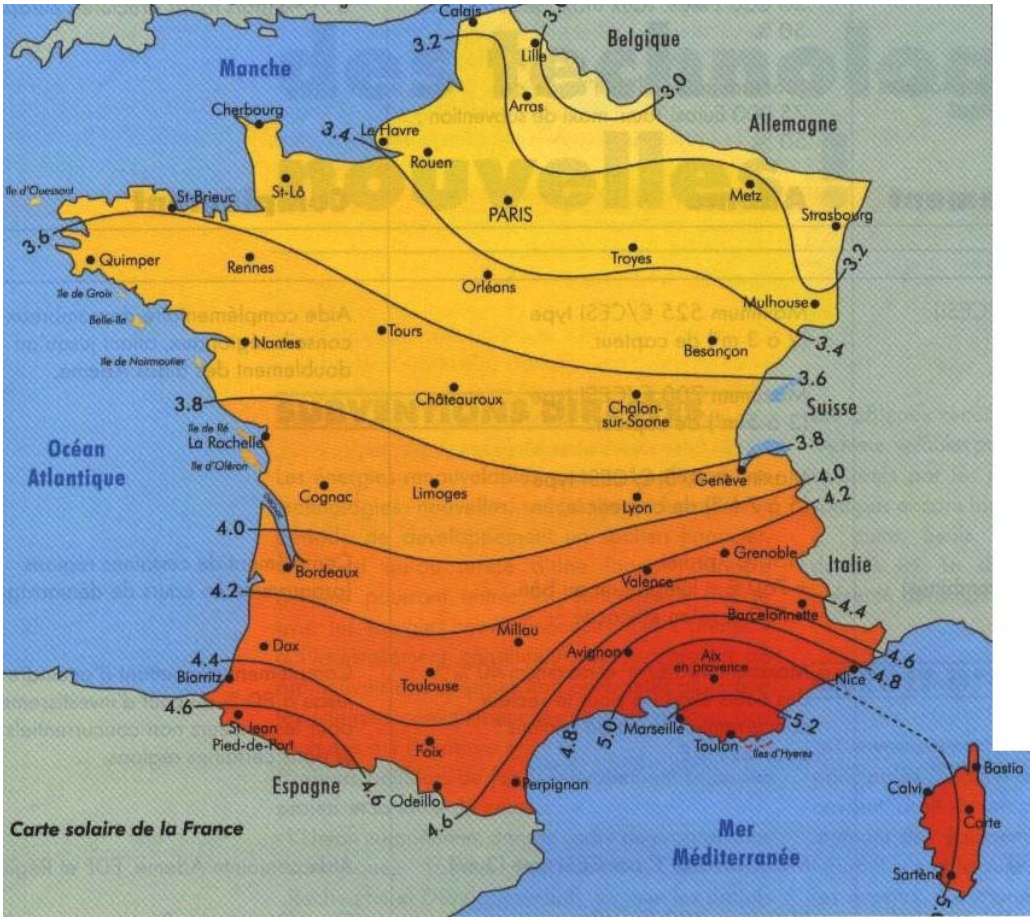


Fig. 1 Ensoleillement moyen en Kwh/m^2/jour sur un plan orienté au sud et incliné de 45 °. Source : Tecsol

Le solaire photovoltaïque (PV) est une source intermittente d'électricité nécessitant un moyen de stockage ou une liaison avec le réseau électrique. Cette source est limitée actuellement par son coût (3-4 euros par watt crête (W_c), son relativement faible rendement (de l'ordre de 15 % en production), la relativement faible puissance électrique fournie (P_c : ~ 1,5 MW_c par hectare, P moyen : 0,3-0,5 MW par hectare de panneaux solaires), et une énergie électrique annuelle disponible par unité de surface limitée, dépendant, bien sur, de l'ensoleillement. Cette dernière limitation entraîne un coût d'exploitation élevé. Il est actuellement de 0,3 à 0,5 euros/kWh en se basant sur 25 ans de fonctionnement, ce qui est à comparer au prix de marché de l'énergie qui est de l'ordre de 0,15 euros/kWh. La Fig. 2 montre la situation en Europe, en 2005, en terme de coûts comparés de l'électricité [11]. Au delà du coût de l'électricité photovoltaïque, il faut remarquer que l'emprise au sol des panneaux PV est, dans notre région ou il existe très peu de terrains disponibles, un vrai problème en ce qui concerne l'implantation de «grandes » centrale PV.

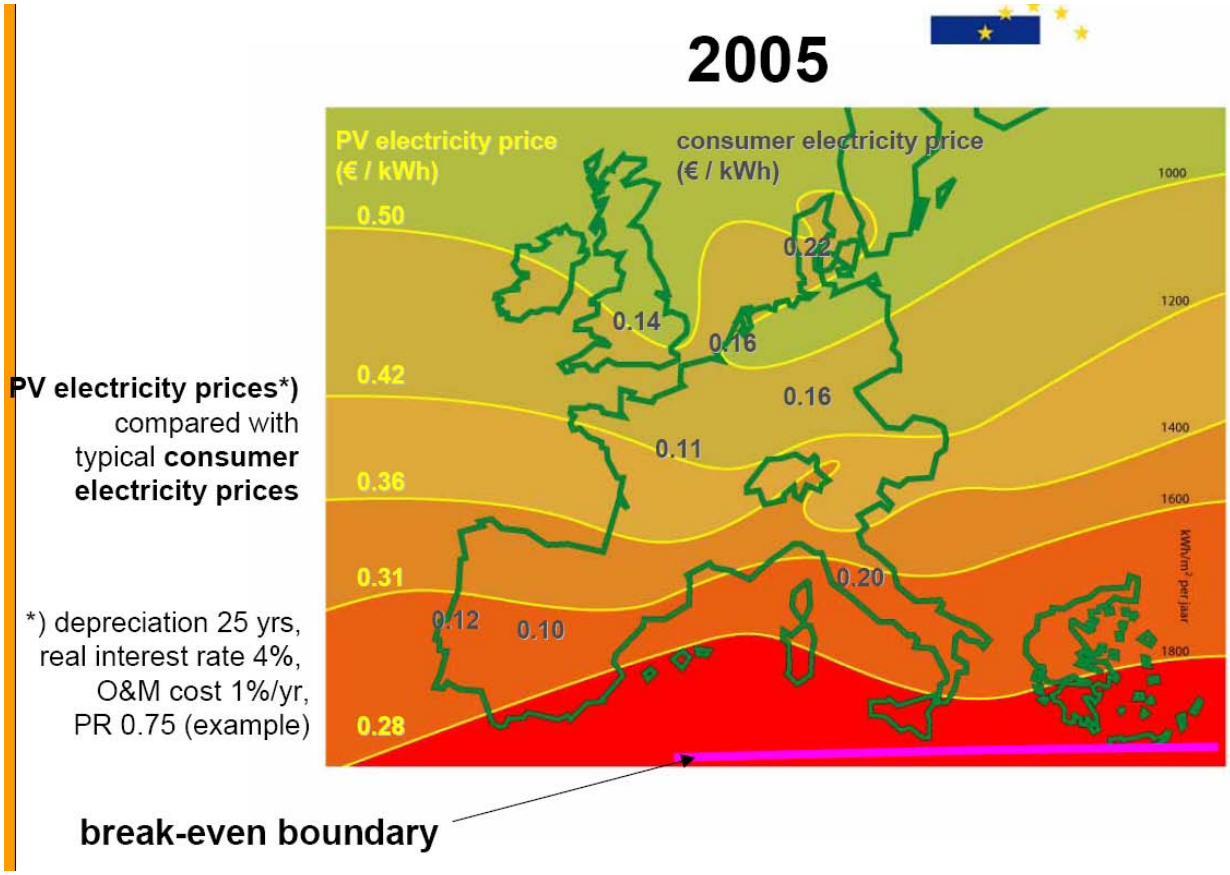


Fig. 2 Coût de l'électricité PV comparé à celui de l'électricité réseau en europe en 2005. La ligne « break-even boudary » montre la limite à partir de laquelle l'électricité PV devient compétitive. Source : EPIA

Réduire les coûts et augmenter les performances, tel est donc le cahier des charges pour rendre le solaire photovoltaïque compétitif. Actuellement la filière assure moins de 1% de la production d'électricité mondiale. Cependant des progrès technologiques récents importants, les effets d'échelle, ainsi que l'augmentation du coût du pétrole et du gaz rendent de plus en attractive la filière solaire photovoltaïque, avec l'espoir de disposer, dans les prochaines années, d'une énergie électrique PV à un coût équivalent à celui du réseau électrique, au moins dans les régions très ensoleillées.

II - Un peu de physique et de technologie

Ce chapitre est volontairement détaillé et technique pour le lecteur désirant approfondir le sujet. Celui qui n'est pas « accro scientifique » peut passer directement au chapitre III ! ! !

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons absorbés par un semi-conducteur en porteurs de charges électriques (électrons et trous). Cette création de charges va entraîner la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecté aux électrodes. La Fig. 3 présente le principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque d'électricité.

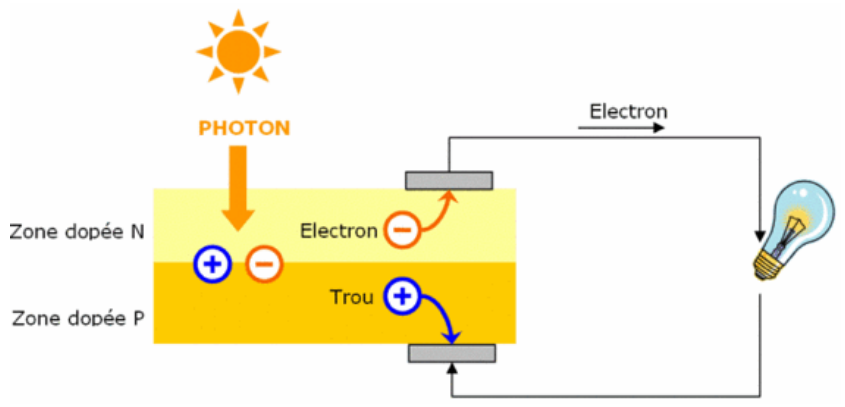


Fig. 3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Au cours des années, trois générations de cellules photovoltaïques sont apparues [12], [13]:

- une première génération utilisait – et continue à utiliser - des plaquettes de silicium cristallin issues des technologies développées pour la micro-électronique. Le rendement théorique est de 27 % , celui en laboratoire est de 25 % et celui obtenu en production industrielle est de 15 % environ. La Fig. 4 montre le rendement énergétique d'une cellule PV en silicium cristallin tandis que la Fig. 5 représente les rendements de différents types de cellules PV en silicium. Cette technologie est mature et peu de progrès sont à en attendre, excepté la réduction du coût par la diminution de l'épaisseur des plaquettes et le développement de structures « tandem » associant Silicium cristallin (Si_c) et silicium amorphe (Si_a). Cette dernière technologie permet en effet d'augmenter la part des photons du spectre solaire transformée en courant électrique (Si_c et Si_a absorbent « utilement » dans deux parties différentes du spectre solaire). La Fig 6 montre le principe d'une cellule tandem. Actuellement 90 % des cellules PV sont en silicium. Il est à noter que le silicium ne supporte que de faibles concentrations du rayonnement.

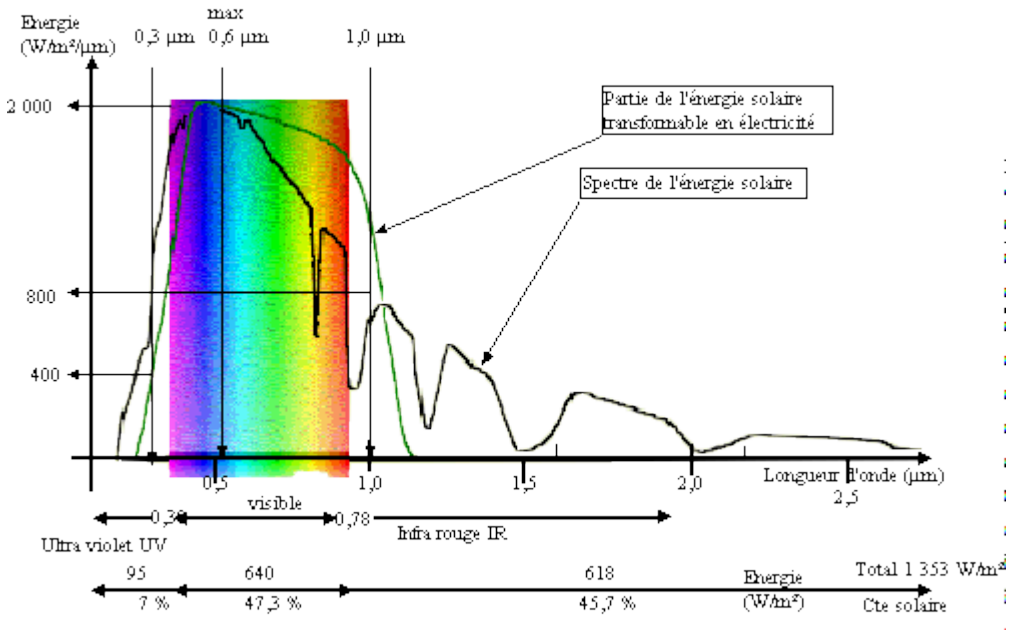


Fig. 4 Rendement énergétique d'une cellule photovoltaïque en silicium cristallin

Type de cellule	Rendement des Cellules			Coût
	Théorique	En laboratoire	Actuel	
Silicium monocristallin	27,0%	24,7%	14,0 à 16,0%	+++
Silicium polycristallin	27,0%	19,8%	12,0 à 14,0%	++
Silicium amorphe	25,0%	13,0%	6,0 à 8,0%	+

Fig. 5 Rendement actuel des cellules photovoltaïques en silicium

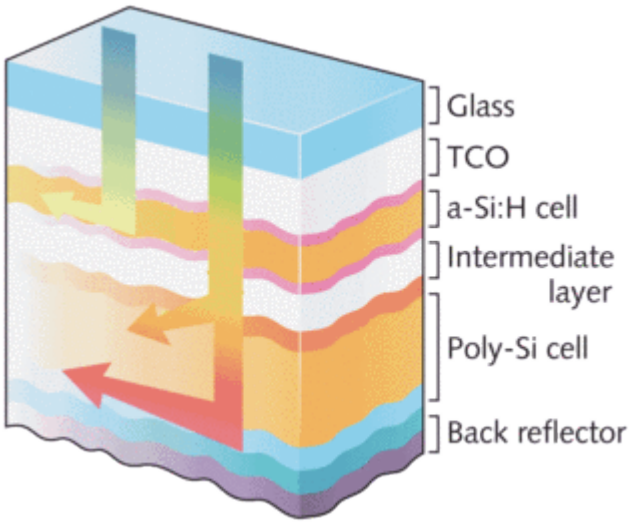


Fig. 6 Principe d'une cellule tandem silicium cristallin - silicium amorphe

- Une deuxième génération fait appel à la technologie des films minces, ce qui réduit fortement le coût en matière première. La plupart des matériaux utilisés sont des semi-conducteurs non organiques, mais des semi-conducteurs organiques et des matériaux dopés en colorants absorbant à différentes longueurs d'onde, beaucoup moins coûteux, sont également étudiés et développés en tant que matériaux PV. La fig. 7 montre la structure d'une cellule type en couches minces de silicium amorphe [14]. Cependant le rendement est actuellement limité à 10 % pour les semi-conducteurs non organiques tels le télurure de cadmium (CdTe), le sélénure de cuivre et d'indium (CIS) et le disélénure de cuivre d'indium et gallium (CISG). Le rendement est de 5 % pour les semi-conducteurs organiques dont la durée de vie est limitée actuellement à 5 ans. Des progrès en terme de rendement et de durée de vie sont attendus pour cette technologie,

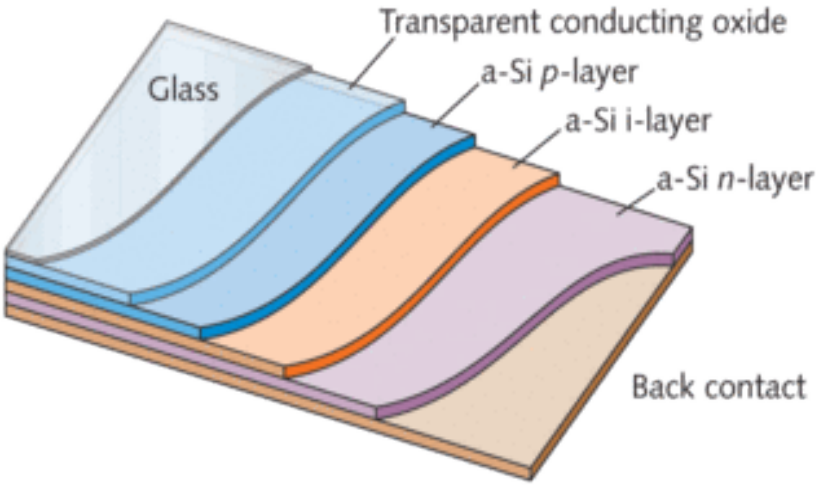


Fig. 7 structure d'une cellule photovoltaïque en couche mince en silicium amorphe a-Si. La couche supérieure de type p a une épaisseur de 8 nm tandis que la couche inférieure de type n a une épaisseur de 20 nm. L'épaisseur de la couche intermédiaire a-Si-i est de 0,5 à 1 micron.

- Enfin, une troisième génération est actuellement développée associant des cellules multi-jonction, absorbant utilement la plus grande partie du spectre solaire à des systèmes de concentration de la lumière pouvant atteindre 500 soleils (augmentation d'un facteur 500 de la densité de rayonnement solaire arrivant sur la surface de la cellule). L'empilement de matériaux PV absorbant utilement le rayonnement solaire à différentes longueurs d'onde permet d'accroître fortement le rendement global. La concentration permet de réduire la surface de matériau utilisée et d'augmenter le rendement pour ce type de matériau. La Fig. 8 montre le principe de ce type de cellule PV. Ces cellules sont composées, en général, de germanium, d'arséniure de gallium et d'indium, dont la matière première est coûteuse (10 fois celui du

silicium cristallin) mais le rendement beaucoup plus élevé. La Fig. 9 montre les spectres d'absorption des différents matériaux utilisés dans une cellule tri-jonction tandis que la fig. 10 présente les rendements obtenus. Cette technologie fait appel aux micro et aux nanotechnologies. La Fig. 11 montre la structure d'une cellule tri-jonction type en matériaux III-V ayant obtenu le record de rendement en laboratoire (40,8 %) à une concentration de 326 soleils [15].

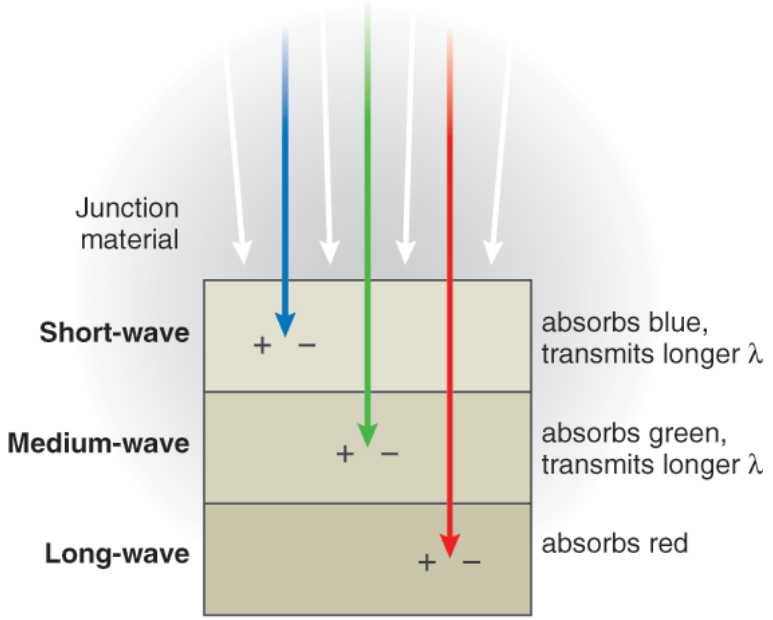


Fig. 8 Principe d'une cellule photovoltaïque à 3 jonctions empilées

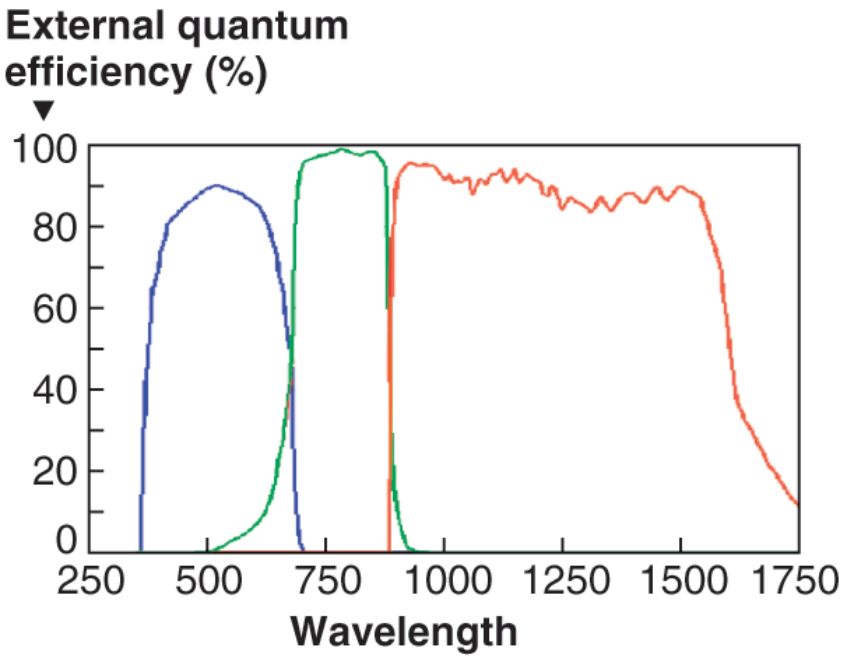
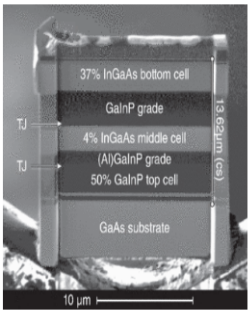


Fig. 9 Spectre d'absorption d'une cellule photovoltaïque tri-jonction de la société Spectrolab (USA). Bleu : AlGaInP ; Vert : BaAs ; Rouge : Ge

Layer efficiencies in six-junction solar cell	
Bandgap	**Ideal efficiency (%)**
High 2.4 eV	13.3
GaInP 1.84 eV	14.3
GaAs 1.43 eV	11.7
Si 1.12 eV	7.8
Low 0.95 eV	3.7
Lower 0.70 eV	2.9
Total	**53.5**
Designed for overall 50% efficiency at 20-fold solar concentration, including losses in the collection optics.	

Fig. 10 Rendement théorique d'une cellule solaire à six jonctions



Structure d'une cellule tri-jonctions en matériaux III-V type ayant obtenu le record de rendement (40, 8 %) à une concentration de 326 soleils

Source: NREL (USA)

Fig. 11 Structure d'une cellule tri-jonction en matériaux III-V. Source : NREL

Les systèmes tri-jonction à concentration, par l'augmentation du rendement, permettent donc de réduire fortement l'emprise au sol par watt produit. Le rendement de ces structures atteint actuellement la valeur record de 42 % en laboratoire 'Fraunhoffer ISE) et 28 % sur des prototypes industriels, soit 75% de plus que les cellules en silicium [12]. Ces systèmes comprennent des optiques complexes comme le montre la Fig. 12. Ils nécessitent aussi de suivre le soleil dans sa course pour que le soleil soit toujours focalisé sur la surface utile réduite de la cellule. Cela est obtenu grâce à l'utilisation d'héliostats programmables (trackers). Il est également nécessaire d'éliminer la chaleur produite par la partie du rayonnement solaire absorbé non transformée en électricité. Le coût total de ces systèmes est actuellement important mais devrait rapidement baisser par suite des progrès technologiques et du facteur d'échelle de la production industrielle. Ces systèmes sont essentiellement destinés aux grandes installations PV et aux ensoleillements élevés (>1800 kWh/m^2/année) car ils utilisent le seul rayonnement solaire direct, ils nécessitent des héliostats complexes et, leur modularité est réduite comparée aux panneaux solaires sans concentration.

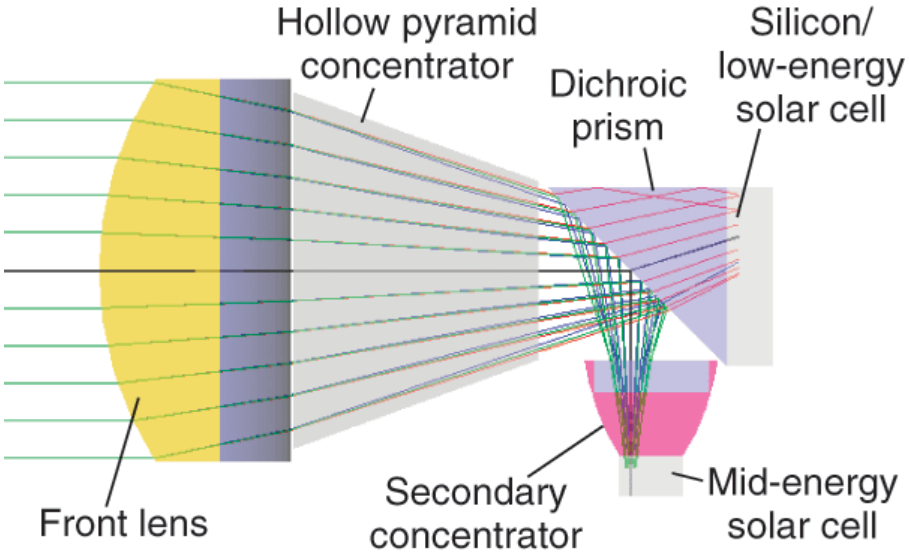


Fig. 12 Cellule photovoltaïque tri-jonction à séparation de bandes et concentration.Source : DARPA (USA)

Sur un plan général et quel que soit la nature du matériau, l'utilisation d'héliostats orientables programmables (trackers) permet de maximiser le rayonnement solaire récolté par les cellule. La fig. 13 représente un prototype de panneau solaire tri-jonctions à concentration tandis que la fig. 14 montre un élément de ce type de panneau solaire [16].

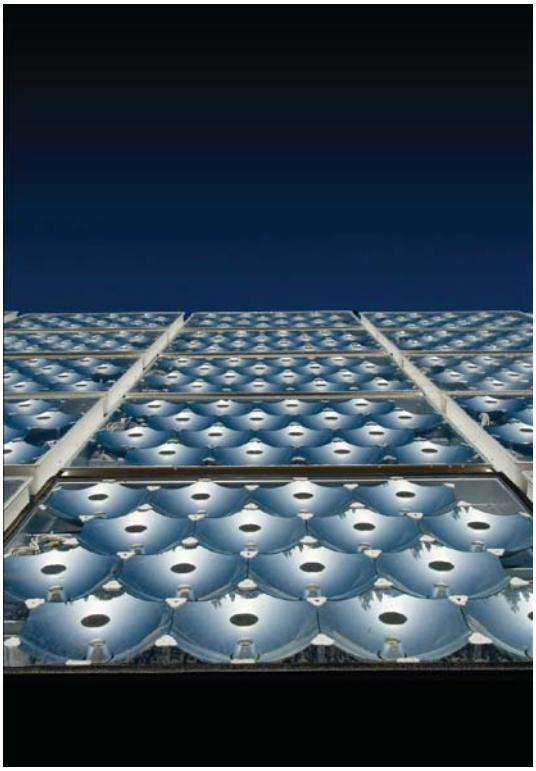


Fig. 13 Prototype de panneau solaire tri-jonctions à concentration

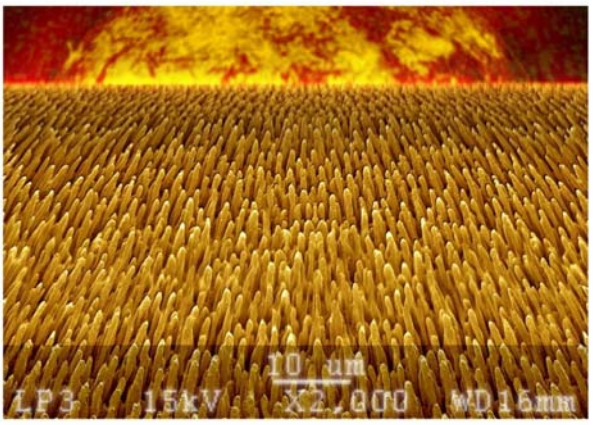
Source : Société Solfocus, USA

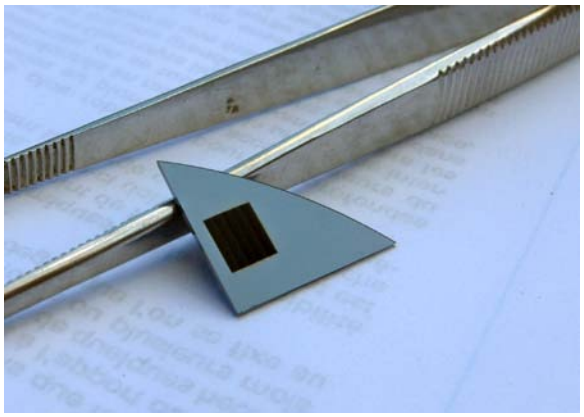
Fig. 14 Eléments de panneau solaire tri-jonctions à concentration

Source : Société Solfocus, USA

De nouvelles voies faisant appel soit aux nanotechnologies (nanostructures, confinement quantique, nanofils de silicium), soit à la conversion de longueur d'onde (de l'infrarouge vers le visible par des processus nonlinéaires et de l'ultraviolet vers le visible par des émetteurs luminescents) sont en cours de développement. Des efforts sont également entrepris afin de réduire les coûts des procédés de fabrication et les pertes par réflexion du silicium et d'autres semi-conducteurs. Une direction très prometteuse est l'utilisation, dans les différentes phases de fabrication, de lasers émettant des faisceaux intenses pendant des temps très courts [17][18].

En France la recherche est très active dans le domaine du photovoltaïque avec le soutien, notamment de l'Agence Nationale de la Recherche. Mon laboratoire, le LP3 (Lasers Plasmas et Procédés photoniques)-UMR 6182 CNRS et Université de la Méditerranée, est très impliqué dans les procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques performantes [18]. Il développe, en particulier, une méthode de nanostructuration du silicium par laser femtoseconde (création de « pingouins »). La Fig. 15a montre l'état de surface du silicium nanostructuré par laser femtoseconde). Cette méthode permet de réduire la réflexion du rayonnement solaire de 30 % à moins de 5% . On obtient ce que l'on appelle du « silicium noir » , représenté Fig. 15 b [19].





(a) (b)

Fig. 15a Surface du silicium nanostructuré par laser femtoseconde (pingouins)
Fig. 15b Réflexion du rayonnement solaire du silicium : - avant traitement (zone extérieure)(R=30 %); - après traitement par laser femtoseconde (zone extérieure (R= 5 %) (Source : LP3)

Les performances actuelles des cellules photovoltaïques obtenues en laboratoire sont :

- Rendement supérieur à 40 % avec des cellules tri-jonction associées a une forte concentration (500 soleils) du rayonnement solaire (Spectrolab, Emcore, Darpa)
- Très forte réduction en coût et en volume de la matière première nécessaire
- Rendement supérieur à 20% avec des cellules en silicium
- Rendement de l'ordre de 10 % avec des films minces non organiques
- Rendement de l'ordre de 5 % avec des cellules en colorants

Les meilleurs rendements obtenus en laboratoire sont présentés Fig. 16 [21].

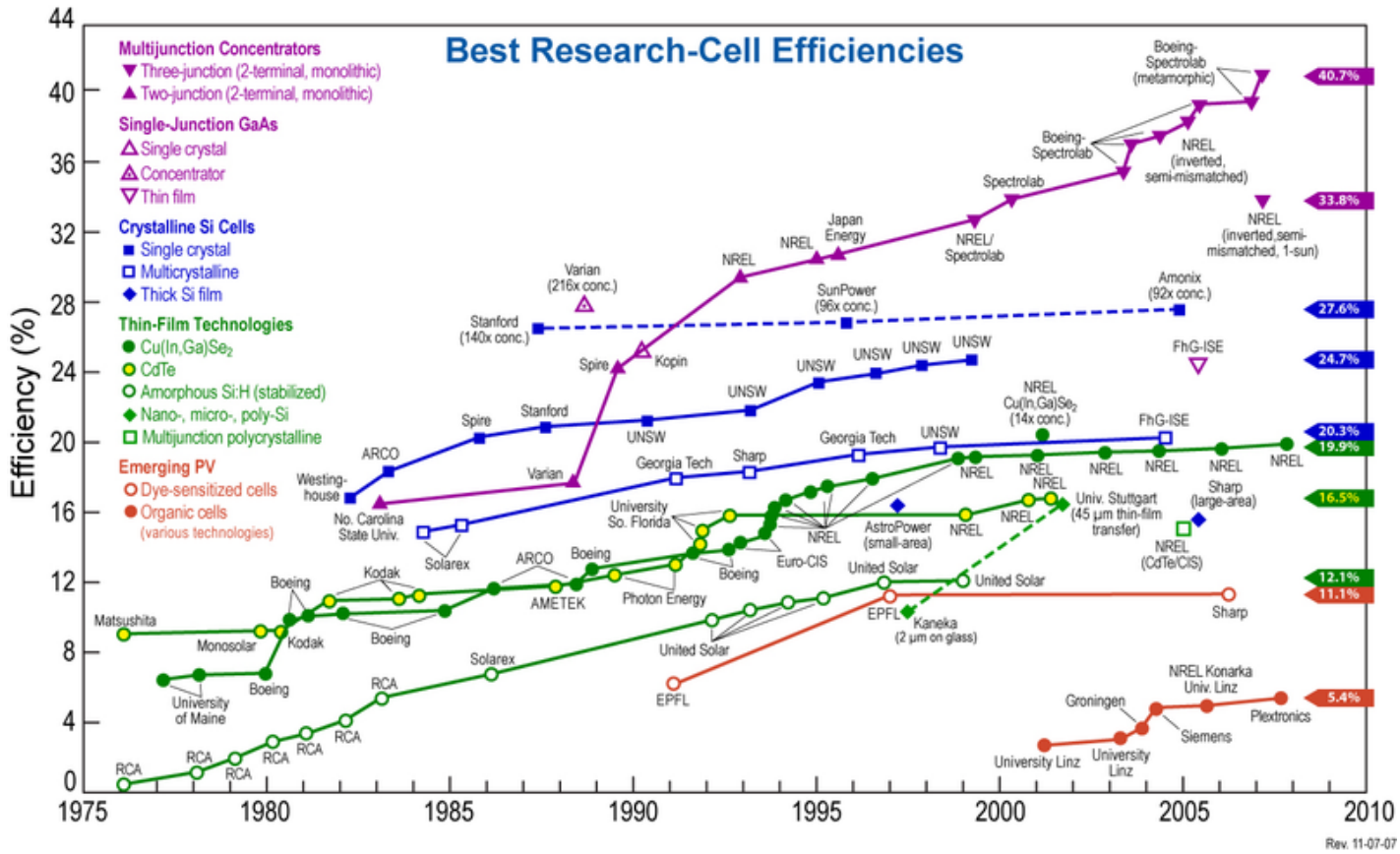


Fig. 16 Evolution de l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité obtenue en laboratoire pour divers types de cellules solaires (source NREL, USA)

Les principales directions des recherches actuelles sur les matériaux PV et les systèmes sont :

- Silicium cristallin
- Silicium amorphe
- Couches minces (non organiques, organiques, à base de colorants)
- Tri-jonction et multi-jonction
- Nanostructures (confinement quantique)
- Concentration (focalisation, suivi du soleil, chaleur)
- Traitements de surface anti-reflet large bande
- Moyens de stockage de l'électricité (batteries, piles à combustible)

Un système photovoltaïque raccordé au réseau comprend les composants suivants :

- **un générateur photovoltaïque** qui doit être exposé autant que possible de façon à recueillir le maximum d'ensoleillement sur l'année
- **un onduleur :** son rôle est de transformer le courant continu fourni par le générateur photovoltaïque en un courant alternatif ayant toutes les caractéristiques du courant alternatif délivré par le réseau électrique
- **des organes de sécurité et de raccordement** au réseau qui assurent des fonctions de protection et d des personnes et des biens vis à vis de l'usager et du réseau et de contrôle de production et de consommation
- **Un moyen de stockage de l'électricité** éventuel composé de batteries (lithium –ion, etc…)

Il existe une difficulté technique lorsque la puissance crête dépasse une puissance de l'ordre de 5 mégawatts crête comme c'est généralement le cas des centrales PV de grande puissance. En effet, dans ce cas, le raccordement nécessite la connexion des onduleurs, au moyen de transformateurs, à un poste source Haute Tension (HT) de 63 kV (standard français). Ce raccordement peut être très coûteux si le poste HT n'est pas situé à proximité de la centrale. Pour des puissances plus réduites le raccordement au réseau se fait sans difficulté : en basse tension (220-380 volts/50 hertz) pour des puissances inférieures à 250 kW_c et en moyenne tension (20 KV/50 Hertz), au moyen d'un transformateur, au delà [20]. La Fig. 17 montre le schéma simplifié d'un système photovoltaïque raccordé au réseau.

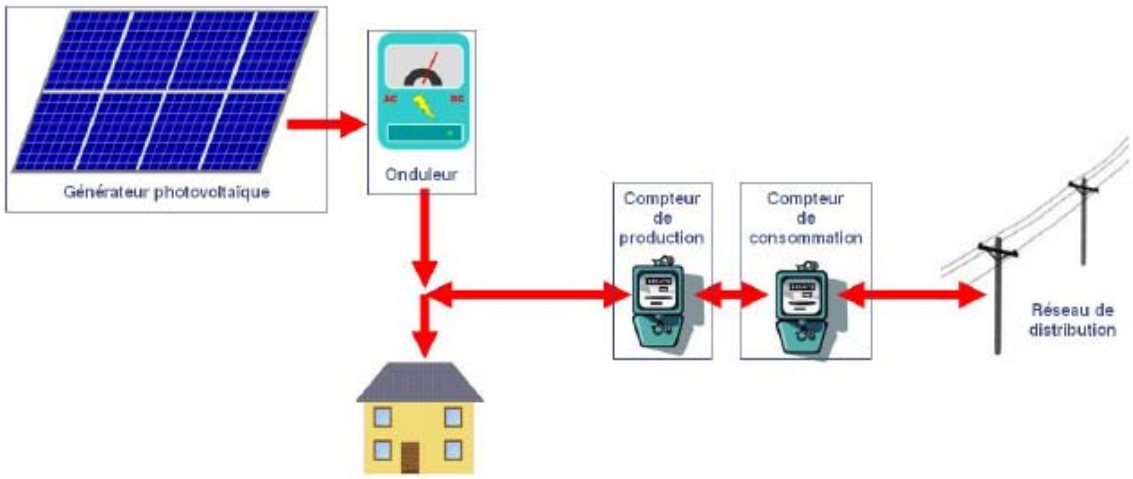


Fig. 17 Schéma simplifié d'un système photovoltaïque raccordé au réseau

III - Situation actuelle de la production photovoltaïque d'électricité

Depuis quelques années, la production d'énergie renouvelable s'est rapidement développée dans le monde, en raison de l'augmentation du coût des énergies fossiles, des aides publiques et d'une prise de conscience, par les habitants des pays industriels, du réchauffement de la Terre. Un consensus du Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC), composé de 2500 experts internationaux du domaine, sur la menace que représente, pour l'environnement et l'économie, le réchauffement climatique par effet de serre a été établi. Il a joué un rôle essentiel dans cette prise de conscience. Les énergies renouvelables représentaient, en 2007, 14 % de l'énergie totale consommée dans le monde (y compris le bois de chauffage, 4 % hors bois de chauffage) [3] et fournissaient plus de 18% de l'électricité [4]. La part des énergies renouvelables (ENR) dans la Consommation totale d'énergie primaire dans différents pays d'Europe en 2007 fait l'objet de la Fig. 18 [22], tandis que la part des ENR en France (Métropole) en 2006 est détaillée Fig. 19 [5].

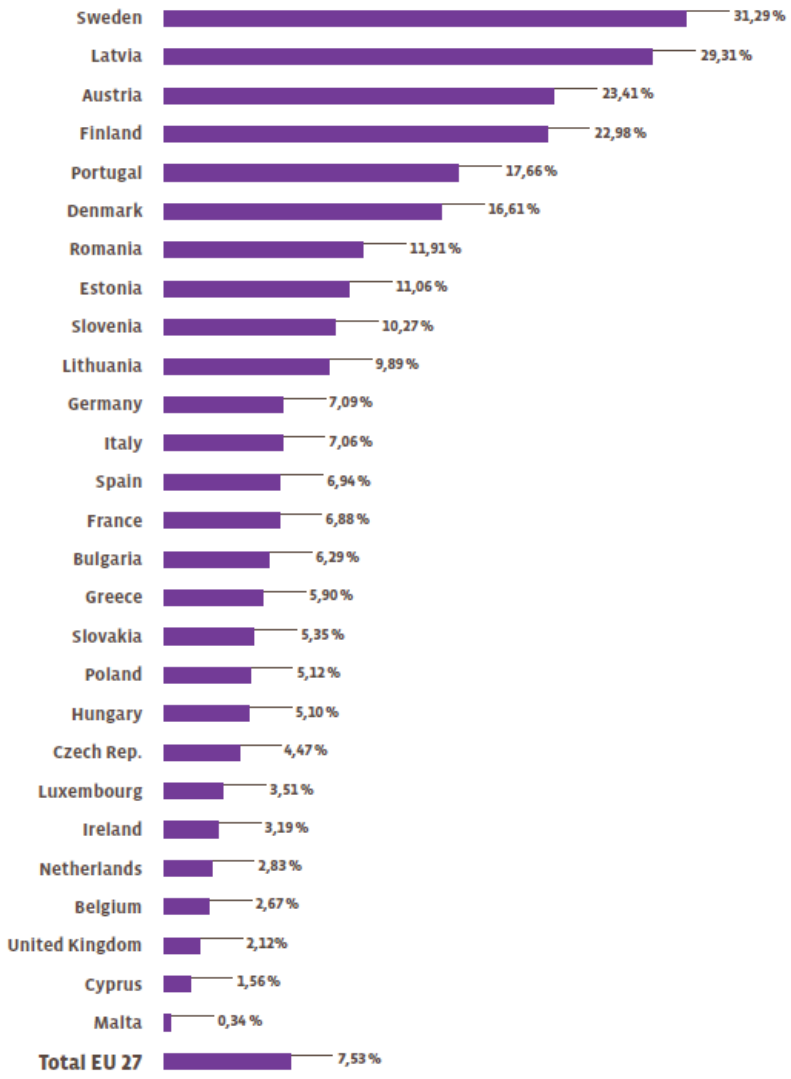


Fig. 18

Part des énergies renouvelables (ENR) dans la Consommation totale d'énergie primaire dans différents pays d'Europe en 2007.
Source : Eurobserv'er

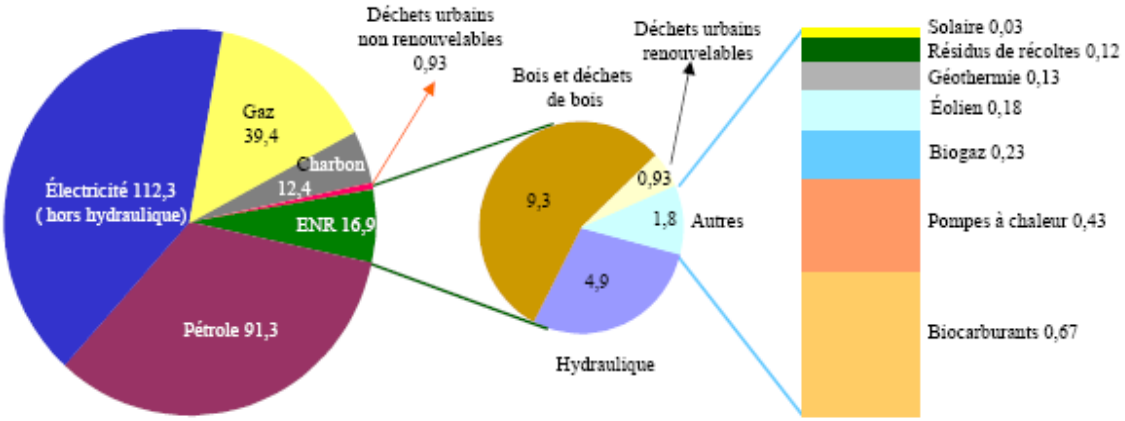


Fig. 19 Part des énergies renouvelables (ENR) dans la Consommation totale d'énergie primaire en 2006 en France (Métropole) en Mtep. Consommation totale d'énergie primaire : 273, 2 Mtep. Source : Observatoire de l'Energie.

En ce qui concerne plus spécifiquement l'électricité photovoltaïque, objet du présent document de synthèse, sa production croit rapidement dans le monde, à partir d'un niveau très faible, par suite de la baisse du coût de l'électricité photovoltaïque, des aides publiques et des programmes institutionnels [5]. La production d'électricité solaire photovoltaïque dans différents pays en 2006 est présentée Fig. 2019 [4]. Il est intéressant de remarquer qu'en France, Electricité de France rachète, en 2009, l'électricité d'origine photovoltaïque produite par les particuliers 0,60 euro le kWh pour une puissance installée inférieure à 36 kVA et cela pendant 20 ans (panneaux PV intégrés au toit) [23]. Ce tarif est à comparer au tarif régulé réservé aux ménages qui est en moyenne, en France, de 0,125 euro le kWh en 2009. Des tarifs très attractifs sont également offerts aux industriels par EDF.

Puissance installée en 2006	Puissance cumulée en 2006
Monde : 2 500 MW	Monde : 6 000 MW
Europe : 1 245 MW	Europe : 3 418 MW
Allemagne : 1 153 MW	Allemagne : 3 063 MW
Espagne : 60 MW	Espagne : 118 MW
France : 14 MW	France: 30 MW

Fig. 20 Production photovoltaïque d'électricité dans le monde en 2006

Il est intéressant de comparer les Fig. 2 et 21 [11] qui représentent le coût de l'électricité photovoltaïque comparé à celui de l'électricité réseau en Europe, respectivement en 2005 et en 2010 (estimation de EPIA). Sur ces figures, la partie hachurée représente la zone ou le photovoltaïque devient compétitif.

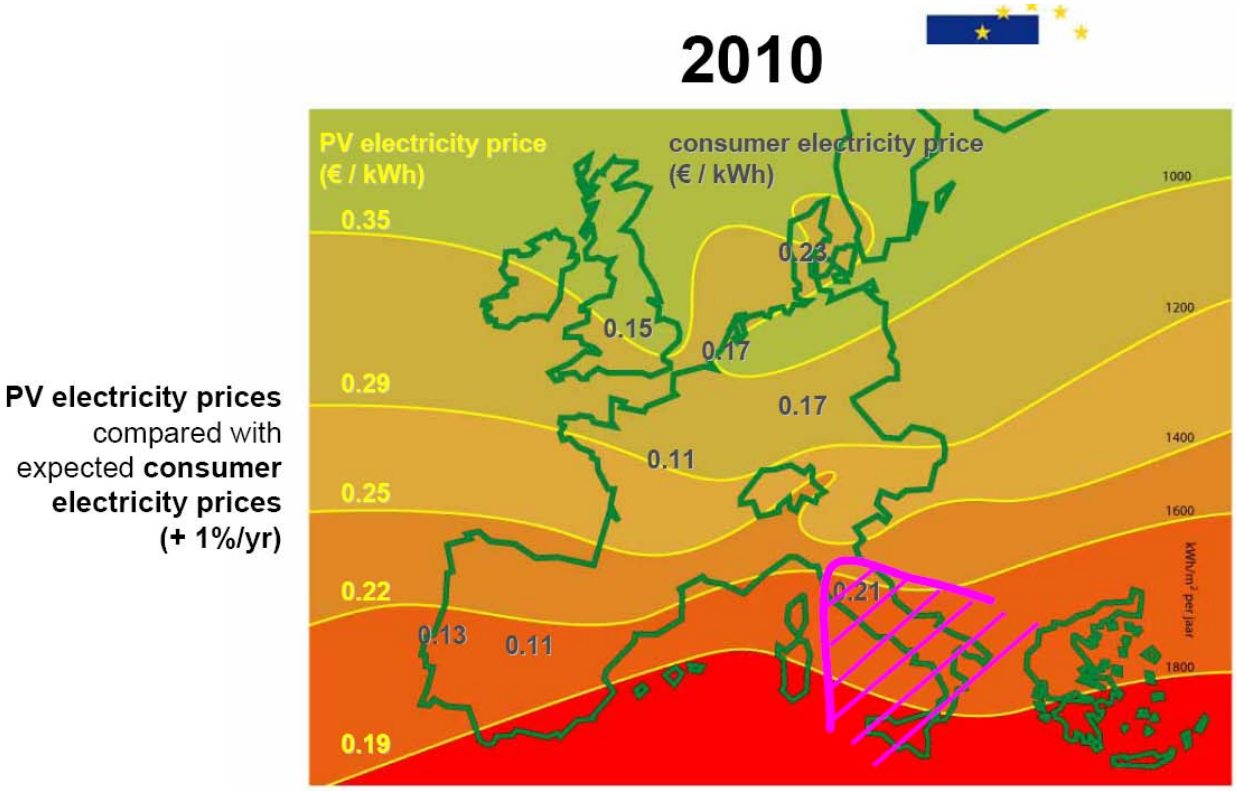
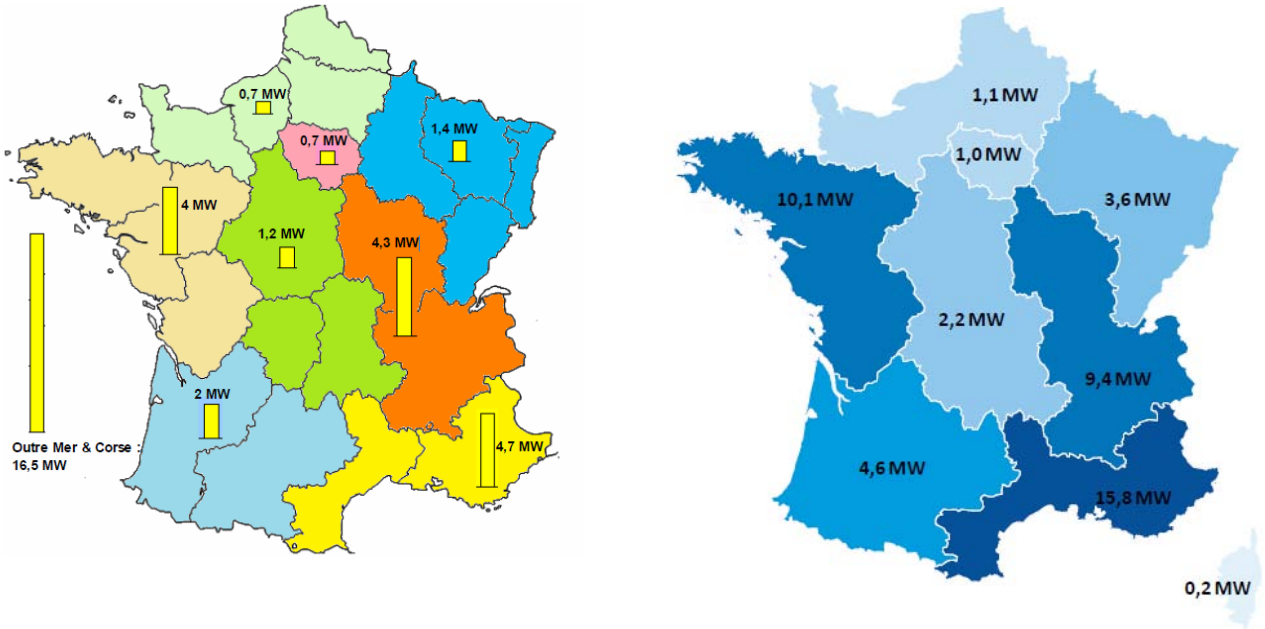


Fig. 21 Coût de l'électricité PV comparé à l'électricité réseau en 2010. Les hachures indiquent la zone de compétitivité du PV. Source : EPIA

La puissance mondiale installée en solaire photovoltaïque est passée de 1,4 gigawatt (GW_c) en 2000 à 9, 1 GW en 2007 et elle pourrait atteindre 44 GW_c en 2012. La France se situe aujourd'hui au 4ème rang européen derrière l'Allemagne, l'Espagne et l'Italie dans le secteur du solaire photovoltaïque [11]. L'Espagne est devenue le premier marché photovoltaïque en Europe en 2008. Bien qu'ayant triplée entre 2007 et 2008, la production photovoltaïque d'énergie électrique en France en 2008 est encore modeste : fin 2008 le parc cumulé atteignait 174 MW_c dont 17 MW_c en production dans les sites isolés, 69 MW_c raccordés au réseau (24, 5 MW_c en 2007) et 88 MW_c installés en attente de raccordement. Sur l'ensemble de l'année 2008, la production du parc PV français raccordé représente 70 GWh, soit l'équivalent de la consommation électrique moyenne de 31 000 habitants (statistiques ERDF, EDF-SEI). Ce parc, qui est localisé principalement dans le sud-est comprend 10575 installations au 31 décembre 2008. Il comporte essentiellement des systèmes photovoltaïques de

faible puissance intégrés en façade ou en toiture sur les habitations domestiques. 86 % des installations ont une puissance inférieure ou égale à 3 kW_c. Les Fig. 22a et 22b montrent respectivement la répartition du parc photovoltaïque raccordé au réseau en France fin décembre 2007 et fin décembre 2008.



(a) (b)

Fig. 22 répartition du parc photovoltaïque raccordé au réseau en France (a) fin décembre 2007, (b) fin décembre 2008. Source : ERDF, EDF-SEI

Des centrales photovoltaïques de grandes dimensions sont en service, en construction ou en projet dans le monde utilisant l'une ou l'autre des 3 technologies développées [6][24]. Cinq centrales photovoltaïques d'un puissance crête de plus de 100 MW_c sont actuellement en projet ou en construction (4 aux USA dont une de 600 MW_c et une en Australie). A titre de comparaison, la plus grande centrale électrique solaire non photovoltaïque , la centrale solaire thermique SEGS en Californie a une puissance installée de 354 MW. Les plus grandes centrales électriques nucléaires ont une puissance supérieure à 1000 MW_c.

En ce qui concerne l'Europe, une plate-forme technologique internationale a été construite en Espagne par l'Institut Solaire Photovoltaïque (ISFOC) [6]. La plus puissante centrale photovoltaïque en service en Europe est celle de Olmedilla de Alarçon (Espagne) qui a une puissance crête de 60 MW_c et qui est en 2009 la plus puissante au monde. Elle est présentée Fig. 23 [24]. La centrale PV la plus puissante en service au Portugal est celle de Moura, d'une puissance crête de 46 MW_c qui devait devenir la puissante en 2010 avec 64 MW_c. Elle est montrée Fig. 24 [24]. Plusieurs centrales photovoltaïques de grande puissance sont en service

en Allemagne. La plus puissante, celle de Brandis d'une puissance crête de 40 MW_c est montré sur la fig. 25 [24]. Le nombre de foyers allemands consommateurs d'électricité issue d'énergies renouvelables a presque doublé en 2008 par rapport à 2007. Selon le magazine Energie & Management, 2,1 millions de ménages ont utilisé ces sources d'énergie en 2008.

L'équipement de résidences individuelles et de toits de bâtiments publics, industriels ou agricoles se développe également rapidement dans le monde. La Fig. 26 montre un toit d'aéroport équipé de panneaux solaires.

Fig. 23 Vue de la centrale photovoltaïque d'Olmedilla de Alarçon (Espagne) (P_c= 60 MW_c). Source : Foro-Cualquiera.

2

Fig. 24 Vue de la centrale électrique solaire photovoltaïque Moura (Portugal) (P_c= 46 MW_c). Source : Acciona

Fig. 25 Vue de la centrale solaire photovoltaïque de Brandis (Allemagne) (P_c= 40 MW_c). Source : Suravia S.A.

Fig. 26 Toit d'aéroport équipé de panneaux solaires

En France, la centrale solaire photovoltaïque la plus importante en service, d'une puissance crête électrique de 7 MW_c, est localisée sur la Commune de Narbonne sur une ancienne friche de la société AREVA [25]. Elle est composée de 95000 modules de 2ème génération, à couches minces d'une surface totale de 80000 m2. Une vue partielle de cette centrale est présentée Fig. 27. Une centrale PV encore plus importante est en projet à Montendre (région Poitou-Charente) qui sur 20 hectares devrait fournir une puissance électrique crête de 8,8 MW_c en 2010.

Fig. 27 Vue partielle de la centrale photovoltaïque de Narbonne
Source : EDF-Energies Nouvelles

La région Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA), la plus ensoleillée de France, paradoxalement, ne produit actuellement que très peu d'énergie photovoltaïque, comparée à l'Allemagne, alors qu'elle est, de plus, est très déficitaire sur le plan de la production d'énergie par rapport à ses besoins. Elle ne produit en effet que la moitié de sa consommation en électricité. Afin de remédier à cette situation de pénurie, le Conseil Régional PACA a créé un structure de concertation, forum régional d'échanges, le Collectif de Débat sur l'Energie dans la Concertation (CODECO) et a engagé des actions incitatives financées par la région (Programme AGIR, etc…).

En ce qui concerne le photovoltaïque, la situation en région PACA est en train de changer très rapidement : 12 000 m2 de panneaux solaires sont en cours d'installation sur un entrepôt près d'Avignon, 2000 m2 de capteurs solaires photovoltaïques viennent d'être installés sur le toit de l'usine Arkema de Saint-Auban (Alpes de Haute Provence). Un parc photovoltaïque de 104 MW_c comprenant 472 000 panneaux solaires sur un terrain de 300 Ha est en projet dans la commune de La Barben. La ville de Marseille, qui a voté un plan climat-énergie le 15 décembre 2008, s'est engagée à développer le photovoltaïque en équipant 150 000 m2 de toits de bâtiments municipaux de panneaux Photovoltaïques. Marseille a également décidé de mettre à la disposition d'une société une friche d'une superficie de 30 à 35 Ha sur le site d'Entressen dans la plaine de la Crau pour la réalisation d'une grande centrale photovoltaïque [26]. Enfin, le Conseil régional de la région Provence –Alpes –Cote d'Azur a décidé, lors de sa séance pleiniere du 10 juillet 2009, d'équiper les toitures de « 8 lycées de la région de panneaux PV, ce qui représente 100 000 m2 de surface pour un

coût total de 100 millions d'euros.. Dans la Var, 5 lycées seront équipés grâce a ce programme : Cisson et Dumont d'Urville à Toulon, Costebelle à Hyeres, Galéni à Fréjus et celui du Muy [27].

En ce qui concerne la recherche-développement, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) projette d'installer une plate-forme technologique dédiée à l'étude des énergies renouvelables sur un terrain de 150 hectares à Cadarache (Bouches du Rhône).

Dans le Var, La centrale PV de Vinon-sur-Verdon dont la construction vient d'être achevée (première tranche du projet Solaire Durance), est actuellement la 1ère en importance en région Provence-Alpes-Cote d'Azur avec une puissance crête de 4,4 MW_c (6GWh/année) [28][29]. Elle est présentée Fig. 28. Sa technologie d'implantation sans fondations en béton facilitera la restauration du terrain en fin de vie de la centrale.

Fig. 28 Vue de la centrale photovoltaïque de Vinon sur Verdon.
Source : Solaire-Direct

Toujours dans le Var, de nombreux projets sont à l'étude dont, hors Provence Verte : Ampus, Besse-sur-Issole, Callian, Collobrieres, Figanieres, Ginasservis, Gonfaron, Hyeres, La Cadiere d'Azur, La Verdiere, Le Castelet, Le Revest les Eaux, Saint Julien le Montagner, Signes, etc.... [28].

En Provence Verte, Pays défini par la loi Voynet du 25 juin 1999, situé dans le Centre - Var et qui comprend 37 communes pour une population de 95000 habitants, Il existe plusieurs dizaines de projets de centrales photovoltaïques. L'équipement de toits en panneaux photovoltaïques (résidences individuelles et bâtiments publics, industriels ou agricoles) qui ont un impact limité sur les paysages et ne nuisent pas aux activités, se développe rapidement. La Fig. 29 montre une installation type de villa équipée de panneaux photovoltaïques. Une

centrale PV est en construction à Brignoles sur la ZAC de Nicopolis (P_c= 4,8 MW_c) [30]. Les toits de 1000 m^2 de superficie totale du lycée d'enseignement agricole professionnel (LEAP) de Saint Maximin ont été équipés de panneaux PV d'une puissance crête de 67 kW_c, permettant la production d'une énergie électrique annuelle de 132 MWh [31]. Au bout d'un an la dépense énergétique de ce lycée devrait être nulle grâce au PV. La Fig. 30 montre les toits équipés de panneaux voltaïques de ce LEAP. A Cotignac est située la plus grande « ferme photovoltaïque » du Var avec 800 panneaux PV sur 800 m^2 [32]. Plusieurs centrales photovoltaïques sont actuellement à l'étude pour une réalisation à court-moyen terme en Provence Verte. On peut citer Correns, Mazaugues, Méounes, Néoules, Rocbaron, Varages, etc…..

Fig. 29 Exemple de villa équipée de panneaux photovoltaïques.
Source : Rothelec

Fig. 30 Vue du lycée d'enseignement agricole professionnel de Saint Maximin équipé de panneaux photovoltaïques. Source : ENEOVIA

IV - Perspectives à 10 ans de la production photovoltaïque d'électricité

La signature du protocole de Kyoto, il y a plus de 10 ans (11 décembre 1997) marque la première prise de conscience à l'international des problèmes liés aux changements climatiques et à l'émission des gaz à effet de serre. Les gouvernements des principales économies mondiales ainsi que les opinions publiques dans les pays industrialisés ont pris la pleine mesure des enjeux environnementaux. Le protocole de Kyoto devrait s'achever en 2012 et la Conférence mondiale de Copenhague sur le climat, en décembre 2009, devrait le remplacer par un nouveau protocole sans doute plus astreignant. A cela on doit ajouter la prise de conscience de la raréfaction des sources d'énergie fossile.

Ces considérations ont entraîné un effort très important pour le développement des énergies renouvelables dans le monde et notamment pour l'utilisation du soleil, photovoltaïque et solaire thermique. Le photovoltaïque, en particulier, devrait connaître un fort développement et le prix des modules devrait fortement baisser. La fig. 31 montre l'historique et l'évolution prévue du parc total photovoltaïque dans le monde en cumul jusqu'en 2020. D'après les prévisions d'EPIA, le coût du module photovoltaïque devrait descendre au dessous du dollar par watt crête avant l'année 2020 par suite des progrès technologiques et des effets d'échelle. La Fig. 32 présente, elle, l'historique depuis 1976 et l'évolution prévue du prix des modules photovoltaïques.

Fig. 31 Historique et évolution prévue du parc photovoltaïque total dans le monde jusqu'en 2020. En vert : MW cumulés du Parc ; en gris marché annuel en MW/an. Source : ADEME

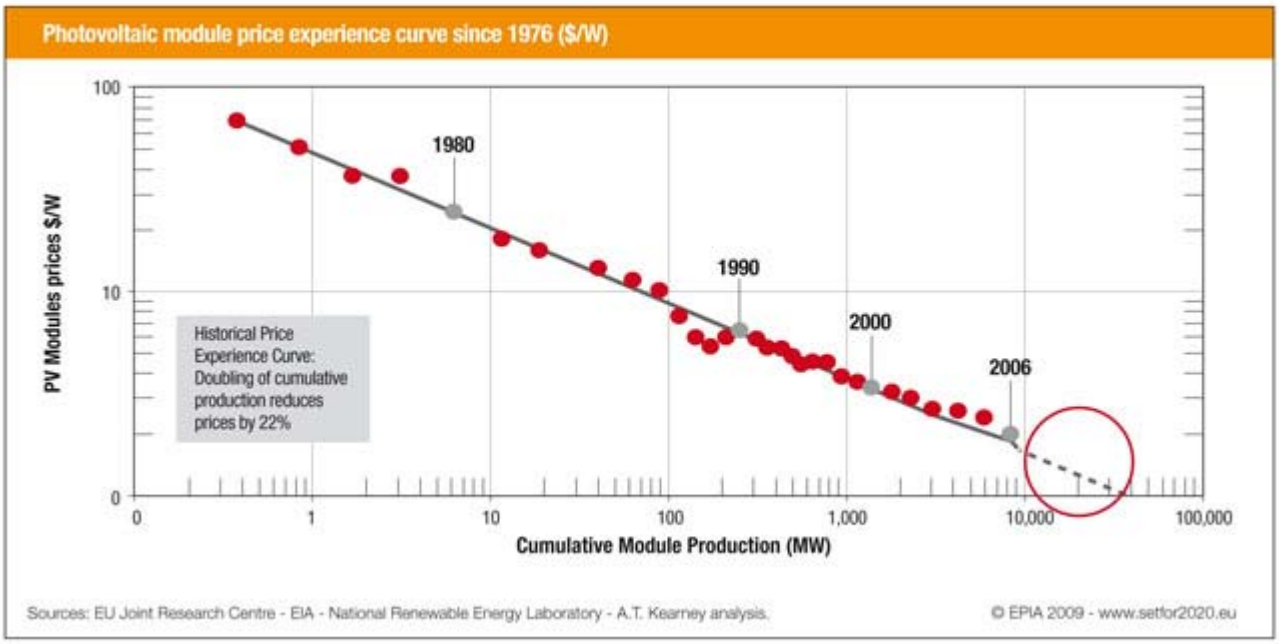


Fig. 32 Historique depuis 1976 et prévision d'évolution du prix des modules photovoltaïques. Source : EPIA

Le Japon, la Chine, l'Australie et les USA, depuis le changement de Président en 2009, ont annoncé des programmes de financement massifs dans les énergies renouvelables. Il s'agit principalement du photovoltaïque, du solaire thermique et de l'éolien. Le Japon et la Chine ont lancé des programmes de recherche et développement très importants sur la fabrication de panneaux photovoltaïques. L'Australie vient de lancer un programme solaire de 2,6 milliards d'euros dans les énergies renouvelables dont 1/3 dans le photovoltaïque en finançant dès 2010 la construction de centrales solaires d'une puissance totale de $1GW_c$. La Chambre des Représentants des USA a, le 26 juin 2009, voté un plan ambitieux de lutte contre le réchauffement climatique et pour le développement des énergies renouvelables, le « Clean Energy and Security Act » (énergies propres et économie verte). Ce plan comprend, notamment, une réduction de 17 % des rejets de CO_2 d'ici 2020, une proportion de la production d 'électricité de 12 % en provenance des énergies renouvelables en 2020 et une progression de 8 % de l'efficacité énergétique d'ici cette même date. 190 milliards de dollars seront consacrés à ce plan.

La Californie, leader dans le photovoltaïque aux USA, développe des grands programmes de centrales photovoltaïques. Aux USA toujours, un projet de centrale photovoltaïque dans l'espace captant l'énergie du soleil en permanence est actuellement à l'étude. Ce projet, digne de Jules Verne, permettrait, en 2016, de transférer annuellement, par radio-fréquence ou par laser, vers une station de réception située sur la terre, une puissance électrique de 200 MW_e. [33]. La Fig. 33 montre une vue d'artiste d'une telle centrale solaire spatiale.

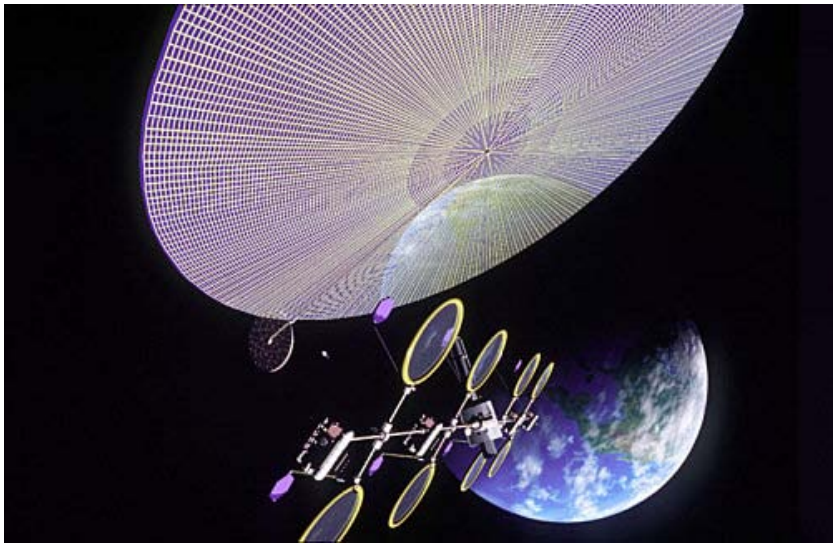


Fig. 33 Vue d'artiste d'une centrale photovoltaïque dans l'espace. Source NASA

L'Union pour la Méditerranée qui associe les pays du pourtour de la Méditerranée souhaite investir dans le développement durable. Elle a décidé le 25 juin 2009 de lancer pour un montant d'un milliard d'euros de programmes sur ce thème, dont la construction d'une centrale photovoltaïque au Maroc [34].

L'Allemagne envisage la construction de très grandes centrales solaires thermiques (centrales à tour et concentration) et photovoltaïques dans les déserts du Sahara qui, reliées en réseau, l'alimenteraient en électricité, grâce à des lignes électriques trans-méditerranéennes. Il s'agit du projet Desertec de 400 milliards d'euros qui relève du paquet Climat-Energie de la Communauté Européenne et qui a reçu le soutien de l'Union pour la Méditerranée (UPM)[35][36]. La fig. 34 montre un schéma du réseau envisagé associant différentes sources d'énergie renouvelable.

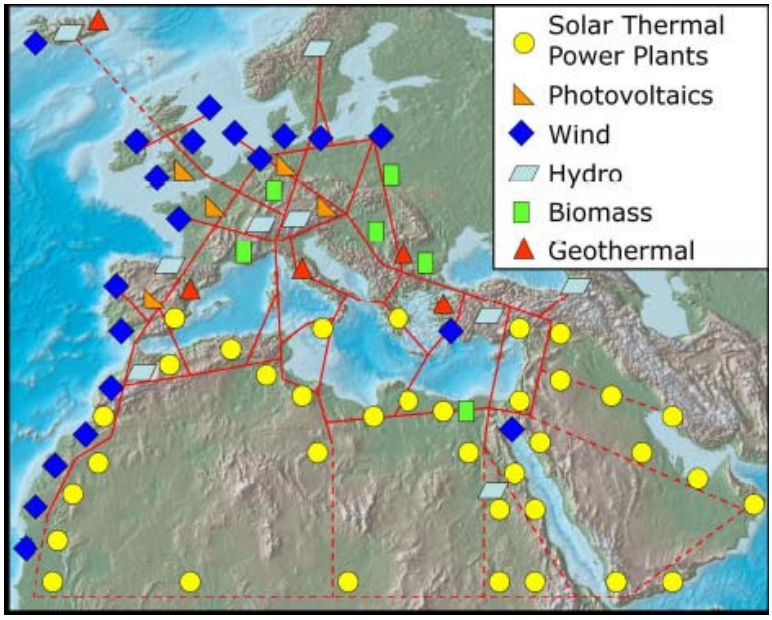


Fig. 34 Projet de réseau d'alimentation de l'Europe par des sources d'énergie renouvelables localisées principalement en Afrique du Nord. Source : Desertec.

Toujours sur les pas de Jules Verne, mais il s'agit là de solaire thermique, un projet suisse prévoit la réalisation, au large des Emirats Arabes Unis, d'îles artificielles recouvertes de miroirs permettant d e concentrer l'énergie du soleil sur des tubes transportant un fluide caloporteur. Ces tubes seraient associés à un échangeur, à une turbine et à une génératrice d'électricité comme dans une centrale électrique « classique » (projet Solar Islands).

En Europe le développement des énergies renouvelables est également soutenu par de nouvelles réglementations, des programmes et des financements publics. La Communauté Européenne (CE) a voté en décembre 2008 un « Paquet Climat-Energie » ambitieux, le triple 20 » dont l'objectif comprend notamment [36]:

- l'amélioration de 20 % de l'efficacité énergétique d'ici 2020
- une réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre en 2020 par rapport aux chiffres de 1990
- Un pourcentage de 20 % d'énergie renouvelable dans l'approvisionnement énergétique de l'Union Européenne à l'horizon 2020.

La France, où la politique du tout nucléaire a réduit les autres sources d'énergie électrique à la portion congrue, doit rattraper son retard. Le Grenelle Environnement, loi d'orientation votée le 23 juillet 2009, prévoit de porter à au moins 20%, en 2020, la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale, soit un doublement par rapport à 2005 (10,3 %). Atteindre cet objectif suppose d'augmenter de 20 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) la production annuelle d'énergie renouvelable d'ici 2020, en portant celle-ci à 37 Mtep. En ce qui concerne la production photovoltaïque d'énergie électrique, l'objectif fixé lors du Grenelle est une puissance installée de 5400 MW en 2020. Selon les prévisions d'EDF la puissance installée devrait atteindre 1400 MW en 2015, en ligne avec l'objectif fixé par le Grenelle [37]. Il est à remarquer que se sera encore très marginal dans la consommation française.

L'Assemblée Nationale a porté l'objectif à 23 % lors de l'examen en première lecture du projet de loi de programme relatif à la mise en œuvre du Grenelle Environnement, en cohérence avec l'objectif du paquet « climat-énergie » européen. Le Comité opérationnel « énergies renouvelables » du Grenelle de l'Environnement a élaboré un scénario de développement des énergies renouvelables à l'horizon 2020 qui est présenté Fig. 35 [38]. On remarque la forte croissance de l'ensemble des filières, croissance qui dépend, bien sûr, des régions. L'événement marquant de ces derniers mois est l'émergence du photovoltaïque. Pour cette filière, le Sud de la France est particulièrement favorisé par son ensoleillement.

Production d'énergie renouvelable (hors biocarburants), en Mtep	2006	2020	2006/2020
Chaleur	**9.7**	**19.7**	**+10.1**
- Biomasse	8.8	15.0	+6.2
- Géothermie	0.4	2.3	+1.9
- Solaire	0.00	0.9	+0.9
- Déchets	0.4	0.9	+0.5
- Biogaz	0.0	0.6	+0.5
Electricité	**5.6**	**12.9**	**+7.2**
- Hydraulique	5.2	5.8	+0.6
- Eolien terrestre	0.2	3.6	+3.4
- Eolien en mer	0.0	1.4	+1.4
- Biomasse	0.2	1.4	+1.2
- Solaire photovoltaïque	0.0	0.5	+0.5
- Autres (géothermie, énergies marines, ...)	0.0	0.1	+0.1

Fig. 35 Scénario de développement des énergies renouvelables à l'horizon 2020 élaboré par le Comité Opérationnel 'Energies Renouvelables » du Grenelle de l'Environnement

La France s'est associée à 80 autres pays désireux d'aller plus loin sur une problématique commune : concilier une protection efficace du climat sans nuire au développement économique. Dans ce cadre, ces pays ont fondé l'IRENA (International Renewable Energy Agency –Agence Internationale des Energies renouvelables). Cette structure, dont le siège va être situé dans l'émirat pétrolier d'Abou Dhabi, a pour but de promouvoir une transition rapide vers la généralisation et l'utilisation durable des sources d'énergie renouvelables, à l'échelle mondiale [39].

Le Ministre français de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) a annoncé, le 5 mai 2009, le lancement d'un appel d'offre pour la réalisation d'au moins une centrale photovoltaïque par région en France dans les 3 ans pour un budget total de 1,5 milliard d'euros. Ce programme distingue 4 zones géographiques en fonction le leur ensoleillement. Dans la zone 1 (Aquitaine, Auvergne, Languedoc-Roussillon, Limousin, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Rhône-Alpes), il porte sur 2 projets de 10 MW_c dans chaque région [40].

La recherche française est très compétitive au plan international dans le domaine du photovoltaïque. Une force de frappe comprenant le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), l'Institut Français du Pétrole (IFP), le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), etc… a été regroupée au sein de l'Institut National de l'Energie Solaire (INES) créé à Chambéry en 2006. Le 30 juillet 2009 a été créée l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCRE) destinée à regrouper le potentiel de recherche et développement français dans le domaine de l'énergie et dont le CNRS, le CEA et l'IFP sont les membres fondateurs.

La France est actuellement beaucoup moins compétitive sur le plan industriel où elle a pris un important retard au cours des années sur les leaders mondiaux que sont le USA, le Japon, l'Allemagne, la Chine, etc…Les constructeurs français pionniers , Photowatt et Tenesol, spécialisés dans le solaire intégré au bâti, ne sont pas actuellement compétitifs en terme de quantité de panneaux produits pour les futures grandes centrales photovoltaïques. Pour remédier à cette situation défavorable, le Ministre français de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire a annoncé, le 23 juillet 2009, le lancement d'une filière industrielle dans le solaire photovoltaïque française. [41].

Enfin, EDF Energies Nouvelles a décidé de s'allier avec l'américain First Solar pour construire une unité de production de modules photovoltaïques de technologie couches minces (en matériau CdTe). Elle pourrait être située à Peyruis dans les Alpes de Haute Provence et générerait 300 emplois. 100 millions d'euros seraient consacrés à la construction de cette usine destinée à approvisionner les futurs sites solaires français dès 2011 qui permettrait de doubler la production française de panneaux solaires [42].

La France, qui avait pris beaucoup de retard dans la production d'énergie photovoltaïque, notamment sur l'Allemagne, est donc en train de le rattraper [43]. L'évolution estimée des parcs photovoltaïques français et allemands de 2007 à 2020 est présentée Fig. 36.

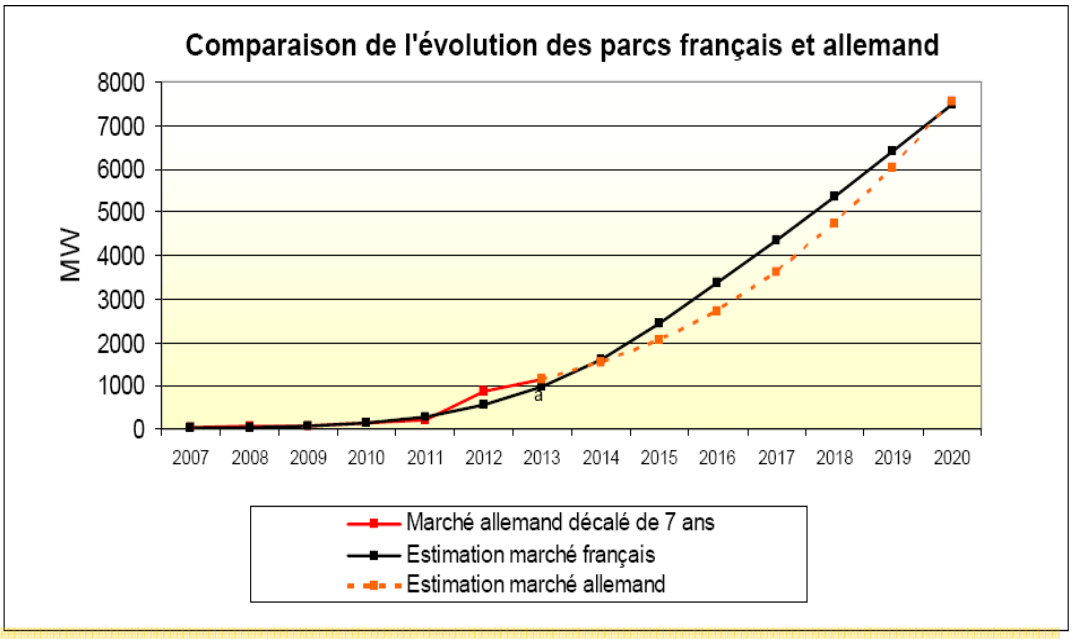


Fig. 36 Evolution prévue des parcs photovoltaïques français et allemands.
Source : Syndicat des Energies Renouvelables (SER)

Les recherches actuelles permettent d'estimer que, dans 10 ans, et probablement bien avant, la situation du photovoltaïque sera la suivante pour les panneaux industriels:

- Rendement augmenté d'un facteur 2,5 à 3 (40 % de l'énergie solaire incidente)(panneaux tri-jonction associés à une forte concentration) (réduction d'autant de l'emprise au sol par watt crête)
- Coût de fabrication divisé par 3 à 4, ce qui permettra de descendre au dessous de 1 euro par watt crête,
- Coût de revient du kWh de l'ordre de 0,13 euros en Provence, ce qui le rendra compétitif avec l'électricité fournie par le réseau électrique
- Possibilités d'installation de centrales photovoltaïques de grandes dimensions dans l'espace avec transfert vers la terre de l'énergie électrique obtenue
- Capacités de stockage de l'électricité fortement accrues par l'emploi de batteries lithium-ion (l'énergie massique que l'on peut stocker actuellement est de 150 à 200 watts-heure/kilogramme et les perspectives d'accroissement sont importantes).

La Fig. 37 représente l'évolution comparée de 1990 à 2040 (évaluation) du coût de l'électricité d'origine photovoltaïque et de l'électricité réseau pour 2 valeurs de l'ensoleillement (900 et 1800 heures/année (cas de la Provence Verte))[44]. La Fig. 38, elle, représente une projection, calculée par les experts d'EPIA, du coût de l'électricité photovoltaïque en 2020 en Europe comparé au coût de l'électricité de réseau à la même époque tandis que la fig. 39 représente la même projection pour l'année 2030. EPIA estime qu'en 2020 57 à 76 % de l'électricité solaire aura un coût compétitif sans l'aide de l'Etat.

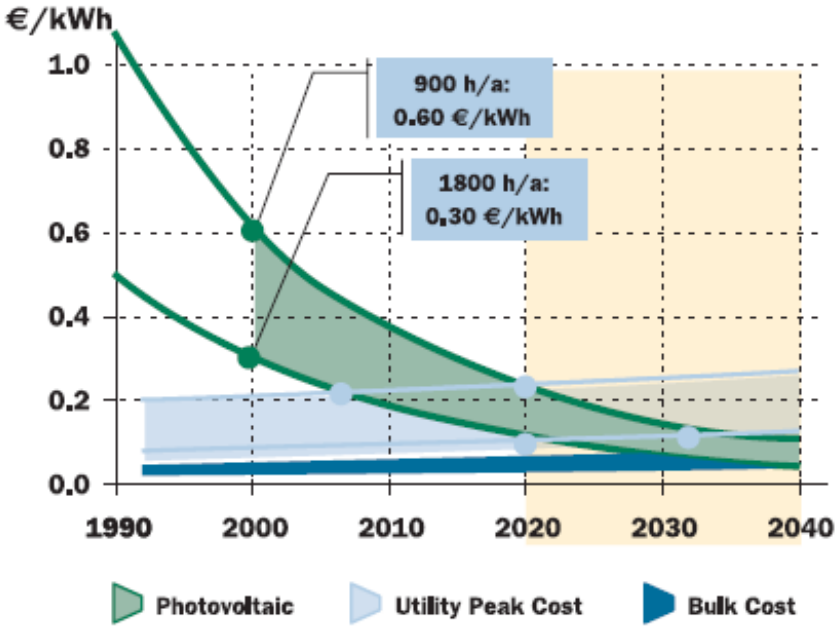


Fig. 37 Evolution de 1990 à 2040 (évaluation) du coût de l'électricité d'origine photovoltaïque et de l'électricité réseau pour 2 valeurs de l'ensoleillement. Source : PVTRAC-CE

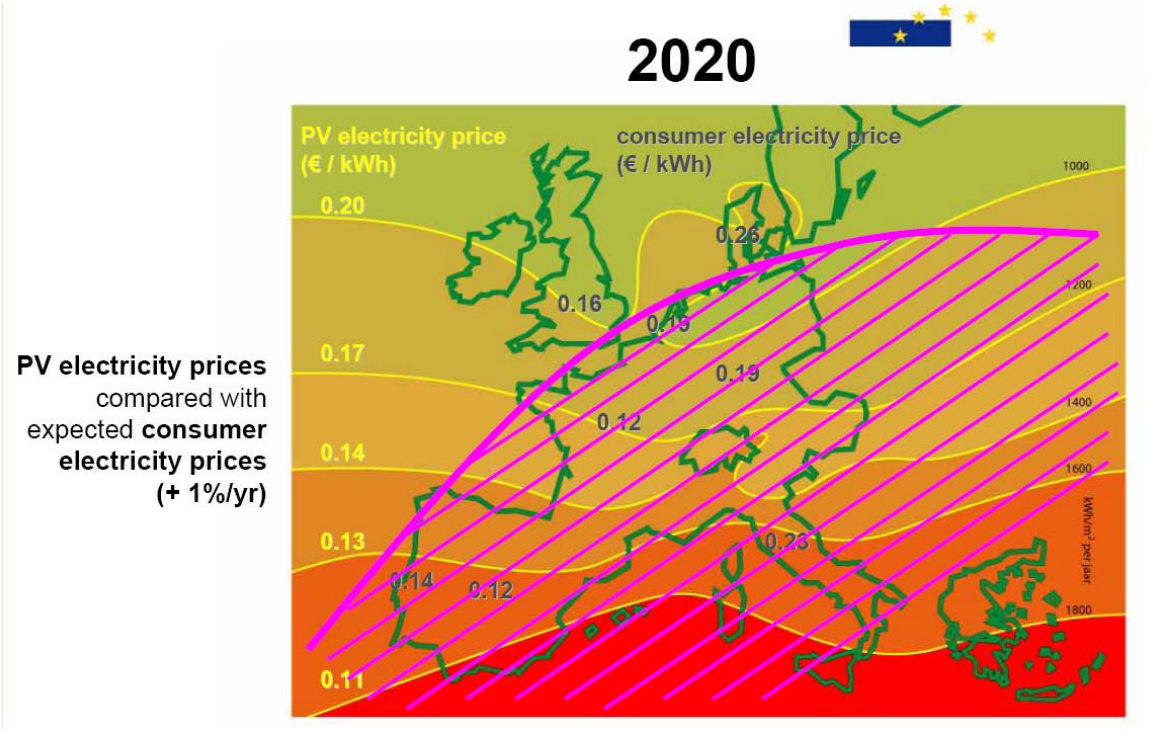


Fig. 38 Estimation du coût de l'électricité PV comparé à celui de l'électricité réseau en 2020.. Les hachures indiquent la zone de compétitivité du PV. Source : EPIA.

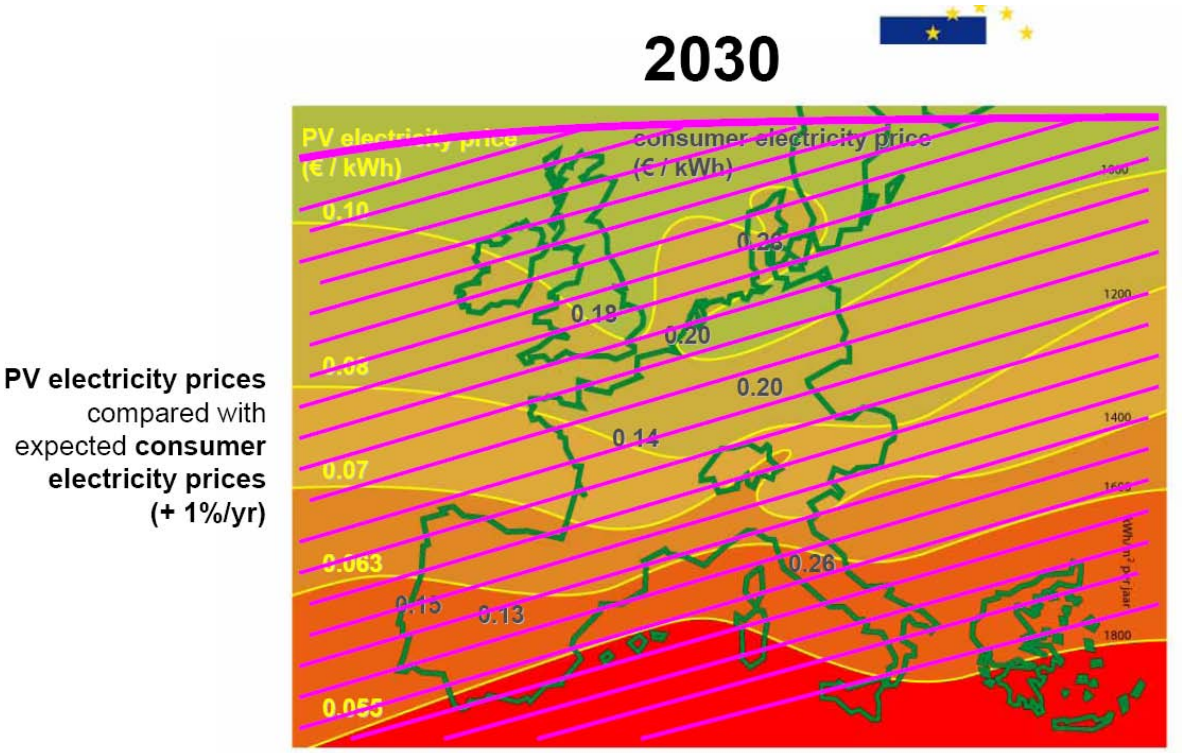


Fig. 39 Estimation du coût de l'électricité PV comparé à celui de l'électricité réseau en 2030. Les hachures indiquent la zone de compétitivité du PV. Source : EPIA.

La Région PACA est fragilisée sur le plan de l'approvisionnement énergétique, en raison du dynamisme de la consommation, de la croissance démographique rapide, de l'absence de centrales électriques de très grande puissance et d'une situation excentrée. Cela peut entraîner des conséquences économiques, sociales et environnementales très négatives. Cette situation impose la nécessité d'un développement spécifique en région PACA de sources alternatives d'énergie. La situation géographique de la Région PACA favorise naturellement le développement de l'utilisation du soleil - solaire photovoltaïque et solaire thermique. De plus le solaire photovoltaïque permettrait le stockage local d'énergie (batteries au Lithium-ion, etc).

La production de l'énergie électrique est une nécessité mais cela ne suffit pas : une gestion optimisée de celle-ci est également très importante. Dans ce cadre, les réseaux électriques intelligents décentralisés ou « smart grids » s'apprêtent à bouleverser notre manière de produire, de distribuer et de consommer l'énergie [45],[46]. Mais que recouvre le terme de « smart grid » ou maillage intelligent ? C'est le mariage de tous les réseaux, Internet, informatique, télécommunications pour tisser une toile gigantesque aux multiples ramifications. Cette toile permettra notamment d'arrêter ou de démarrer un appareil selon l'état du réseau et le coût de l'électricité.
L'enjeu écologique est triple : les smart grids sont le sésame, pour réduire la consommation globale d'électricité, limiter le recours aux centrales les plus polluantes et intégrer des millions de sources d'énergie renouvelables. De plus ils permettraient de réduire la production de dioxyde de carbone et de créer des emplois.

Dans le futur, des millions de bâtiments équipés de panneaux solaires, d'éoliennes ou de pompes à chaleur auront transformé particuliers et entreprises en producteurs d'électricité. « *On ne pourra pas faire que des grands champs d'éoliennes et des usines solaires et les « smart grids » sont le seul moyen de gérer cette production décentralisée d'électricité*» affirme Jean-Marc Ollagnier responsable pour l'Europe du secteur énergie au cabinet de conseil Accenture. Tout va très vite : « *en 2020, 80 % des foyers seront connectés à des réseaux intelligents* » prédit M. Ollagnier. Soixante-seize millions de compteurs intelligents auraient déjà été installés dans le monde selon l'institut ABI Research, et ce chiffre devrait doubler d'ici 2013. Le président Obama a décidé d'affecter au « Smart Grid » 11 milliards de dollars dans le cadre de son plan pour une relance verte au USA. En matière de « smart meters », les compteurs intelligents, l'Italie se situe en pointe en Europe avec 31,6 millions de foyers déjà équipés d'un terminal du réseau intelligent de demain permettant d'optimiser la consommation d'électricité. En France, un programme pilote d'ERDF, la filiale réseaux d'EDF, prévoit l'installation de 300 000 appareils à Lyon et à Tours. Remplacer les 35 millions de compteurs mécaniques de l'Hexagone d'ici 2015 coûterait en effet de 4 à 5 milliards d'euros. La Provence

Verte, où la production décentralisée d'électricité photovoltaïque va être amenée à très fortement augmenter dans le futur, est très directement concernée par ces « Smart grids » qui devraient rendre de plus en plus intéressant le développement des sources d'énergies renouvelables. Enfin, ces réseaux intelligents pourraient éviter les ruptures d'électricité par coupure de ligne haute tension et délestage du réseau dans les cas de surcharge.

A terme c'est le marché des « prosumers » qui est visé, ces clients à la fois consommateurs et producteurs d'énergie dont le réseau intelligent pourra gérer et comptabiliser le double flux d'électricité. la Fig. 39 montre le principe d'un réseau intelligent de gestion décentralisé de l'électricité. La Fig. 40 montre le principe d'un réseau intelligent de gestion décentralisé d'électricité.

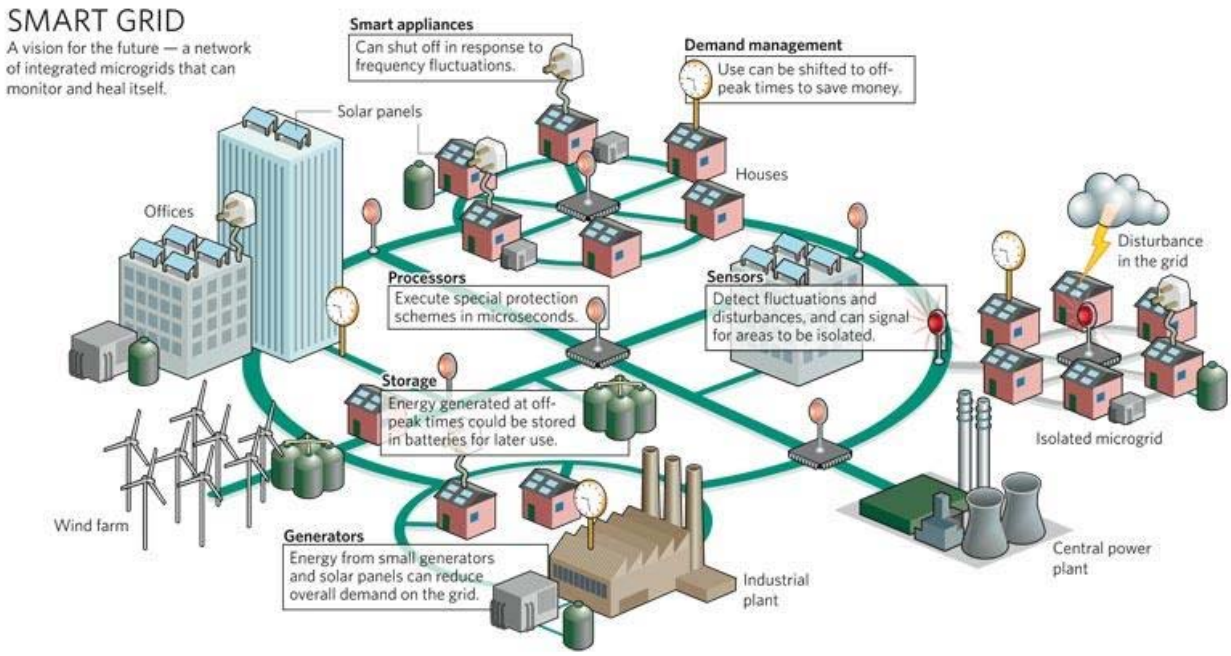


Fig. 40 Principe d'un réseau intelligent de gestion décentralisée de l'électricité (Smart Grid). Source : Urban Ecoist

Le syndicat Mixte du Pays de la Provence Verte , « parlement » de ce Pays , territoire de projet fondé sur une volonté locale, a engagé une réflexion approfondie sur l'avenir a moyen long terme. Dans ce cadre il a réalisé un d'établissement du Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT) de la Provence Verte, document de planification stratégique d'aménagement et de développement. Il a également établi une version provisoire du Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) qui est associé au SCOT [47]. Ce document, qui comprend un diagnostic et des propositions, traduit la volonté politique des élus *«d'engager le Pays sur la voie d'un développement durable harmonieux et partagé, afin que vivre et travailler en*

Provence Verte ait un sens aujourd'hui comme demain, parce que l'on saura préserver la qualité de vie et les ressources de notre pays pour les générations futures ».

L'avant-projet de PADD constate, notamment, le déficit en sources d'énergies de la Provence Verte et comprend de nombreuses propositions sur le développement durable et les énergies renouvelables (solaire, éolien, bois – énergie) où il est reconnu que le potentiel de développement est important. Il est recommandé de stimuler fortement l'écoconstruction (haute qualité environnementale – HQE) et les énergies renouvelables. Il est également insisté sur les grands besoins en formation dans ces domaines.

En ce qui concerne plus particulièrement les énergies renouvelables, dont le photovoltaïque, le PADD comprend plusieurs propositions spécifiques :

- Intégration au SCOT d'une politique énergétique ambitieuse qui pourra prendre la forme d'un plan climat territorial, et développement d'une politique commune de maîtrise énergétique
- sensibilisation à l'utilisation des énergies renouvelables,
- Détermination de zones dédiées à la production d'énergies renouvelables et interdiction du développement de parcs solaires sur le foncier agricole,
- fort développement de la production photovoltaïque d'électricité
- Coordination au niveau du Pays de l'implantation de centrales photovoltaïques, réalisation d'un zonage et d'un schéma d'organisation des centrales photovoltaïques au sol et réflexion sur une stratégie d'ensemble
- Généralisation des toitures photovoltaïques dans les zones d'activité commerciale.

Le Conseil de Développement de la Provence Verte (CDPV), placé, dans le cadre de la loi Voynet, auprès du Pays de la Provence Verte réunit les élus et les acteurs économiques, sociaux, culturels ou associatifs au sein d'un organe de réflexion sur la politique de développement du territoire à mener. Il émet des avis, des propositions et accompagne les projets. Le CDPV va engager, à l'automne 2009, une large consultation de la population du Pays, sous la forme de réunions – débats, sur les propositions du PADD.

V- Conclusion

L'adaptation au changement climatique et la raréfaction des énergies d'origine fossile se révèlent être un moteur de croissance évident en plus d'une nécessité environnementale. La prise de conscience de cette situation tant au niveau des responsables politiques que des citoyens fait que l'environnement est désormais au cœur de la société française. Les sources d'énergies renouvelables sont donc amenées à être considérablement développées, en plus de l'accroissement de l'efficacité énergétique et des économies d'énergie. De nouvelles filières industrielles vont devoir être mises en place de façon structurée. La filière Photovoltaïque, à créer, devra aller de l'amont (fabrication des modules) à l'aval (production d'électricité).

Pour atteindre les objectifs ambitieux, mais réalistes, du développement durable qui sont fixés, un croisement entre le social, l'économique et l'environnemental devient quasiment incontournable.

A ce jour, il n'existe que très peu de métiers dédiés spécifiquement au développement durable et aux sources d'énergie renouvelables dont le photovoltaïque. La plupart des disciplines sont concernées et pas seulement les plus scientifiques d'entre elles. Il s'agit de la production, du stockage, de la distribution des énergies renouvelables, de la conception des écoquartiers qui concernent les aménageurs, les urbanistes, les architectes, etc… La réponse efficace et rapide aux besoins en formation, considérables et variés dans ces domaines, est une des clefs de la réussite des programmes futurs. Ces besoins vont du technicien à l'ingénieur en passant par le technicien supérieur (Bac + 2) : économiste spécialisé en DD, spécialiste d'environnement, sociologue, chercheur et ingénieur en recherche et développement dans les énergies renouvelables, Ingénieur et technicien de production, intégrateur de système, installateur spécialisé en systèmes photovoltaïque, artisan ayant le label Quali'PV, spécialiste en maintenance, électrotechnicien, opticien-électronicien (photonique), thermicien du bâtiment, etc.

A l'horizon 2012, le développement de la filière photovoltaïque en France devrait permettre de créer plus de 13 000 emplois, selon une étude de l'Ademe. Ce chiffre devrait fortement croître par la suite. Le secteur devrait représenter un chiffre d'affaires de 2 milliards d'euros en 2012. Les besoins de formation dans ce domaine sont considérables en Provence Verte.

Le déficit en production électrique en Région PACA, et, en particulier, en Provence verte, peut avoir des conséquences très négatives pour l'économie, le social et l'environnement si rien n'est fait pour remédier à cette situation. Le développement massif des énergies renouvelables en Provence verte et en particulier la production photovoltaïque d'énergie électrique est donc une nécessité.

La France ne sera pas couverte de fermes solaires avant longtemps et le photovoltaïque, seul, bien sûr, ne résoudra pas les énormes problèmes d'énergie de notre région, mais il sera une part significative de la solution.

Le Pays Provence Verte possède d'importantes capacités potentielles pour la production d'énergie photovoltaïque : toits des habitations, bâtiments publics, industriels et agricoles, parkings pour des puissances électriques modestes mais déjà bien utiles (10-250 kW_c). De plus, sans toucher à nos précieuses terres agricoles, il existe de nombreux plateaux et collines exploitables pour la construction de centrales photovoltaïques de moyenne et de grande puissance (quelques MW_c à quelques dizaines de MW_c).

Il est important de profiter des avancées technologiques et des effets d'échelle dans le photovoltaïque ainsi que des conditions climatiques privilégiées de la Provence Verte pour diversifier nos sources d'énergie électrique tout en créant des emplois, de la valeur ajoutée et des ressources budgétaires pour les communes. Il est très souhaitable, comme le préconise le PADD du Pays de la Provence Verte, que cette diversification soit coordonnée au niveau du Pays. Enfin, les « Smart Grids » seront un « plus » pour notre région actuellement pauvre en ressources énergétiques, car elles intégreront efficacement les sources d'énergie renouvelables dans un réseau «intelligent » décentralisé.

REFERENCES

[1] Laurence Caramel, *Taxe carbone : les contours possibles de la réforme*, Le Monde, 5-6 juillet 2009

[2] Alexandre Y. Fong, *Solar Energy : A Global perspective*, Optics& Photonics News, juin 2009, www.osa-opn.org

[3] *La consommation d'énergie dans le monde*, Planète Energie, 2009 http://planete-energies/com/contenu/energie/consommation.html

[4] *La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde*, Energies Renouvelables, 2008, http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/Capitre01FR.pdf

[5] *Observatoire de l'Energie*, MEEDDAT, 2008, http://www.developpement-durable.gouv/energie/statisti/se_stats.htm

[6] CPV Today Newsletter, http://www.cpvtoday.com/newsletters

[7] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, http://www.ademe.fr

[8] L'Echo du Solaire, http://lechodusolaire.fr

[9] Energie et Développement Durable Magazine, http://www.2e2d.info/

[10] *Solaire photovoltaïque raccordé au réseau du tertiaire* , ADEME, Juin 2003, http://ademe.fr

[11] Christoffer Wolfsegger, *Global PV Markets and Perspectives*, European Photovoltaic Industry Association, juin 2007, http://genc.ue.org.mix/genc/photovoltaico/pdfs

[12] *Cellule photovoltaïque*, Wikipedia, 2/7/2009, http://fr.wikipedia/wiki/photoelectricite

[13] Jeff Hecht, *Photonics Frontiers : Photovoltaics*, Laser Focus World, novembre 2007, http://www.laserfocusworld.com/articles/311586

[14] Jeff Hecht, *Photonics frontiers: thin film photovoltaics*, Laser focus World, mars 2009, http://www.laserfocusworld.com/articles/355404

[15] *NREL Solar Cell Sets Efficiency Record of 40,8 %,* Renewable Energy World, 14 août 2008, http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2008/08/nrel-solar-cell-sets-efficiency-record-of-40-8-53334

[16] Matthew McDermott, *25 % Efficiency Solfocus introduces new Concentrating Solar PV Product*, Treehugger-Science & Technology-Alternative Energy, 14 novembre 2008, http://www.treehugger.com/files/2008/11/new-solfocus-concentrating-solar-photovoltaic-25-percent-efficiency.php

[17] Finlay Colleville, *A sunny outlook for lasers in solar*, Laser Focus World, mai 2009, www.laserfocusworld.com

[18] Th. Sarnet, *Applications laser pour le photovoltaïque*, Journée Thématique Photovoltaïque, Gardanne, 18 juin 2009

[19] *La lumière superstar*, Le Journal du CNRS, N° 215, décembre 2007

[20] *Systèmes photovoltaïques raccordés au ré*seau, version 2007, ADEME, http://ademe.fr

[21] S. Kurtz et al. *High efficiency solar cells for large-scale electricity generation*, NREL,26/9/2008, http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44201.pdf

[22] *Le baromètre Eurobser'ER*, Energies renouvelables, 2008, http://energies-renouvelables.org/barometre.asp

[23] *Le Guide hespul Solaire Photovoltaïque*, Hespul, 7 avril 2009, http://hespul.org/-Publications-photovoltaiques-.html

[24] Denis Lenardic, *Large-Scale Photovoltaic Power Plants*, Pvresources.com, http://www.pvresources.com/en/top50pv.php

[25] *La plus grande centrale solaire inaugurée à Narbonne*, Enerzine.com, 18 décembre 2008, http://www.enerzine.com/1/6600+la-plus-grande-centrale-solaire-inauguree-a-narbonne...

[26] Ph. F., *Conseil Municipal : le solaire sera dans l'air du temps ce matin,* La Provence, 29 juin 2009

[27] François Tonneau, *L'écologie au cœur d'une séance marathon à la région*, La Provence, 11 juillet 2009
[28] P.J., *Le Var au cœur du plus grand « parc solaire » de France*, Var-Matin, 13 janvier 2008
[29] Helene Toutchkov, *Inauguration de 2ème parc photovoltaîque français : les jeunes agriculteurs inquiets*, Développement Durable, 19 mai 2009, http://www.developpementdurable.com/technologie/2009/05/A1737/inauguration-du-2eme-parc-photovoltaique-francais-les-jeunes-agriculteurs-inquiets.html
[30] I.B., *Brignoles : Le parc solaire entrera en fonction fin 2009*, Var Matin, 19 avril 2008
[31] Pierre Melquiot, *Une centrale photovoltaïque pour le lycée agricole professionnel de Saint Maximin*, Actualité-news-Environnement, 15 mai 2008, http://www.actualites-news-environnement.com/15924-centrale-photovoltaique-lycee-enseignement-agricole-professionnel.html
[32] Martine Picouët, *Quand les toits se transforment en source d'énergie et d'économie*, Le Monde, 28-29 juin 2009
[33] *Space-based solar power*, Wikipedia, 25 juin 2009, http://en.wikipedia.org/wiki/space-based_solar_power
[34] Gaële Dupont, *L'Union pour la Méditerranée tente de se relancer grâce au développement durable*, Le Monde, 27 juin 2009
[35] Gerhard Knies, *La plus grande source d'énergie techniquement accessible sur la planète est disponible dans les régions désertiques autour de l'équateur...*, Desertec, 5 août 2008, http://www.desertec.org/downloads/summary_fr.pdf
[36] *Le paquet « énergie-climat »*, Euractiv.fr, 23 mars 2009, http://www.euractiv.fr/energie/dossier/paquet-energie-climat-00050
[37] Gaëlle Dupont, *Consensus final pour le Grenelle de l'environnement*, Le Monde, 23 juillet 2009
[38] *Grenelle Environnement : 50 mesures pour un développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale*, MEEDDAT, 18 novembre 2008, http://www.developpement-durable.gouv.fr/article.php3?id_article=3902&var_recherche=scenario+de+developpement+des+energies+renouvelables
[39] *Naissance de l'IRENA : Agence Internationale des Energies renouvelables,* Ecosources.info, 27 janvier 2009, http://www.info/actualités/10013_IRENA_agence_internationale_energie_renouvelable
[40] Michel Deprost, *Jean Louis Borloo lance un programme de 300 MW de puissance photovoltaïque*, Enviscope, 15 mai 2009, http://www.enviscope.com/17303-photovoltaïque-appel-offres-centrale.html
[41] Jean-Michel Bezat, Energie : *la France se met à croire à la filière solaire*, Le Monde, 24 juillet 2009
[42] Marielle Court, Bruno Jacquot, *EDF s'associe au leader mondial des panneaux solaires*, Le Figaro, 24 juillet 2009
[43] *20% d'énergies renouvelables en 2020*, Syndicat des Energies Renouvelables, juillet 2007, http://eolinfo.com/SERENR2020.pdf
[44] *Evolution technologique de 1990 à 2040 (évaluation) du coût des cellules photovoltaïques et perspectives d'avenir*, Energie Facteur 4 asbl, 23 juin 2007, http://www.ef4.be/documents/publications/2007-06-23-ef4-evolutions_technologiques_cellules_photovoltaiques_genappes.pdf
[45] Baptiste Roux, *L'immense Chantier du Smart Grid*, Cleantech Republic, 20 mai 2009, http://www.cleantechrepublic.com/2009/05/20/limmense-chantier-du smart-grid
[46] Grégoire Allix, *Les réseaux Intelligents Révolutionnent l'Electricité*, Le Monde, 10 juillet 2009
[47] *Vivre et travailler différemment au pays, aujourd'hui et demain en Provence Verte*, Projet de PADD, Rapport provisoire, 25 avril 2009, Pays de la Provence Verte