

## L'énergie solaire électrique : grands projets et perspectives

M. Arkoub\* and R. Alkama

Faculté de la Technologie, Université Abderrahmane Mira  
Route de Targa Ouzemour, Bejaia, Algérie

(reçu le 10 mai 2009 – accepté le 25 Décembre 2009)

**Résumé** - L'énergie solaire électrique dans ses deux composantes (photovoltaïque et thermique) connaît dans la première décennie de ce nouveau millénaire un développement important qui laisse envisager à l'avenir une sérieuse concurrence avec l'électricité conventionnelle si des stratégies internationales communes sont mises en oeuvre. Si la production de l'électricité photovoltaïque est partout possible et réalisable, celle de la technologie CSP est pratiquement limitée aux pays de la 'ceinture solaire'. Les puissances produites dans les deux technologies sont déjà comparables à celles de petites centrales conventionnelles et le coût du kWh serait à moyen terme compétitif.

**Abstract** - Electric solar energy in its two components (photovoltaic and thermal) knows in the first decade of this new millennium a significant development which enable to foresee in the future a serious competition with conventional electricity if common international strategies are realized. If the production of photovoltaic electricity is possible and realizable everywhere, that of technology CSP is practically limited to the sunbelt countries. The powers produced in two technologies are already comparable with those of small conventional power stations and the cost of kWh would be in the medium term competitive.

**Mots clés:** Electricité solaire - Photovoltaïque - Thermique - Concentrateurs - Grands projets.

### 1. L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

#### RAYONNEMENT SOLAIRE ⇒ CELLULE SOLAIRE ⇒ ELECTRICITE

Les cellules PV, seules ou constituées en modules, en panneaux pour former de grands champs, sont des sources d'énergie électrique pour alimenter du plus petit appareil aux grandes installations. Les puissances actuelles vont du mW à plusieurs dizaines de MW.

Parmi les grands avantages techniques de l'énergie photovoltaïque, en faisant abstraction donc des aspects écologique et économique, nous citons ses propriétés de pouvoir être installée partout (sur terre, sur mer et dans les airs), accessible à tous, aisément déplaçable et transportable, embarquée et intégrée sur l'utilisation pour faire un seul élément, modulable et extensible. Enfin elle peut être présente sous forme autonome ou reliée au réseau, comme elle peut être associée à toute autre forme d'énergie pour constituer un système hybride.

L'énergie photovoltaïque a cessé d'être une curiosité pour devenir une réalité. Plus de cinquante ans après la première cellule solaire, il n'existe pas un seul pays au monde où on ne trouverait pas d'installations photovoltaïques. Il est vrai que dans les pays

---

\* arkoub\_m@yahoo.fr

industrialisés les installations photovoltaïques reliées au réseau sont prépondérantes, alors que les installations autonomes trouvent beaucoup plus application dans les pays en développement.

Dans les premiers pays, une politique énergétique, industrielle et économique bien étudiée conjuguée aux performances de leurs réseaux électriques a permis de réaliser des progrès très importants. L'Allemagne, le Japon et les Etats-Unis d'Amérique constituent à eux trois les deux tiers du marché mondial. Les programmes de soutien adoptés et les lois incitatives ont joué un rôle majeur.

Dans les seconds pays, aussi bien la précarité de bon nombre de réseaux nationaux que le niveau de développement ont fait que les installations autonomes représentaient la solution aussi bien pour alimenter les foyers d'habitations que pour fournir l'énergie électrique pour certaines activités agricoles et artisanales, sources de développement local. La connexion au réseau national est inexistante; les installations PV existantes, même si elles présentent dans certains pays une puissance relativement élevée, sont destinées à des projets bien définis et isolés.

Le secteur photovoltaïque connaît donc au début de ce nouveau millénaire une croissance très forte. Il a augmenté en moyenne de plus de 40 % au cours des huit dernières années, produisant plus de 2 200 mégawatts en 2006. Pour la première fois depuis les débuts de la technologie silicium, le marché solaire photovoltaïque s'accapare une grande part de la production du silicium alors qu'auparavant le solaire faisait beaucoup dans la récupération des déchets de la microélectronique.

Cette croissance a provoqué une pénurie de silicium et les producteurs ont investi dans l'augmentation de la production tandis que de nouveaux arrivent sur le marché. Actuellement, le prix de vente des modules solaires est de 3 à 5 dollars par watt, tandis que les systèmes installés sont généralement vendus entre 6 et 10 dollars par watt.

Le PV est une technologie de production d'énergie à faible intensité en carbone. Durant leur cycle de vie, les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) du PV se situent actuellement entre 25 et 32 g/kWh. Le temps de retour énergétique est de 1,5 à 2 ans en Europe orientale et de 2,7 à 3,5 ans en Europe centrale, tandis que ce temps de retour est de 1 à 1,5 an en Europe du Sud pour les technologies à couche mince.

Les prévisions prévoient de réduire à un an le temps de retour énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub> à 15 g/kWh durant leur cycle de vie. D'ici à 2015, les coûts des systèmes pourraient être réduits de 50 % et les coûts de l'électricité photovoltaïque deviendront alors compétitifs.

## 2. SYSTEMES SOLAIRES A CONCENTRATION

**RAYONNEMENT SOLAIRE ⇒ CONCENTRATION OPTIQUE ⇒ HAUTE  
TEMPERATURE (ENERGIE THERMIQUE) ⇒ TURBINE ⇒ ELECTRICITE**

Les centrales solaires à concentration (CSP Concentrating Solar Power) concentrent à l'aide de miroirs ou de lentilles paraboliques l'énergie solaire. L'énergie thermique haute température collectée met en marche les générateurs turbines pour la production d'électricité. Par un stockage efficace de la chaleur et l'utilisation d'un combustible additionnel, la centrale peut fonctionner de façon continue et garantir une qualité énergétique équivalente à celle des centrales conventionnelles.

Ces centrales solaires sont réalisables dans les régions très ensoleillées de la planète à la latitude 40° parce que seule la composante directe de l'irradiation solaire est concentrée par les miroirs. Les technologies actuelles permettent de présenter des puissances de 10 kW (alimentation d'un village) jusqu'à quelques centaines de MW (connexion réseau).

Si on prend en considération les possibilités de stockage thermique durant la nuit et le temps couvert, de combinaison avec d'autres combustibles (systèmes hybrides), le bon rendement (meilleur rendement solaire) et le temps de retour énergétique, la technologie CSP est très attractive. Les prévisions lui donnent la position leader dans la production de l'électricité dans les dix prochaines années. La production actuelle, inférieure à un GW, sera portée à plus de 20 GW en l'an 2020 pour atteindre selon les mêmes prévisions plus de 600 GW vingt ans plus tard, ce qui représenterait 5% de la production mondiale d'électricité.

Les travaux de recherche menés actuellement portent sur la réduction des coûts par l'amélioration de la structure des collecteurs, l'optimisation du système opératoire et la génération directe de la vapeur.

Les technologies CSP permettent de réduire sensiblement les émissions de gaz à effet de serre et sont sans risques pour l'environnement. Le temps de retour énergétique des systèmes CSP est d'environ 5 mois, ce qui est très raisonnable comparé à leur cycle de vie de 25 à 30 ans.

### 3. LES GRANDS PROJETS

#### 3.1 Technologie photovoltaïque

La première décennie de ce millénaire a vu le lancement de projets de quelques MW à quelques dizaines de MW. La deuxième décennie verra la réalisation de projets dépassant la centaine de MW, l'objectif reste les centrales de l'ordre du GW.

L'Allemagne et l'Espagne sont les pays comptant le plus de centrales photovoltaïques. Les Etats-Unis semblent reprendre de l'intérêt au photovoltaïque et on y annonce les plus grands projets. La société SunPower Corp. a annoncé sa participation dans un projet géant de 800 MW de Pacific Gas & Electric Corp.

On parle en Chine d'un projet de l'ordre du GW, alors que l'Australie a déjà un projet de 154 MW. Il convient aussi de tenir compte des grands programmes comme celui de 100.000 toits en Allemagne ou plus encore de celui de un million de toits en Californie avec une puissance globale de 3 GW. Les records de puissance se succèdent rapidement.

Le **tableau 1** suivant présente les plus grandes centrales photovoltaïques actuelles (en opération ou en voie) de puissances supérieures à 10 MW [6].

**Tableau 1:** Grandes centrales photovoltaïques existantes [6]

Projet	Pays	Puissance crête
Parc PV Olmedilla de Alarcon	Espagne	60 MW
Parc Photovoltaïque Puertollano	Espagne	47 MW
Moura	Portugal	46 MW
Parc Solaire <u>Waldpolenz</u>	Allemagne	40 MW

Plant Solaire Amedo	Espagne	34 MW
Parc Solaire Merida/DonAlvaro	Espagne	30 MW

On dénombre une cinquantaine de centrales solaires photovoltaïques de puissance supérieure ou égale à 10 MW, une quarantaine de puissance entre 4 et 10 MW et plus d'une centaine de puissance entre 1.5 MW et 4 MW.

Le **tableau 2** cite les projets à l'étude [6]. On constate comme dans le CSP à grande échelle la prédominance des américains. On constate aussi l'absence de projets algériens d'envergure dans le domaine photovoltaïque.

**Tableau 2:** Grandes centrales photovoltaïques existantes [6]

Projet	Pays	Puissance crête
Ferme Solaire Topaz	USA	550 MW
Ranch High Plains	USA	250 MW
Station Solaire Victoria	Australie	154 MW
Ferme Solaire KRCD	USA	80 MW

### 3.2 Technologie CSP

Durant les années 1980, plusieurs centrales solaires à concentration, d'une capacité totale de 354 MW, ont été construites dans le désert de Mojave, en Californie. Puis, pour diverses raisons, rien n'a été construit. Mais depuis quelques années (depuis 2004), suite aux progrès notables et à la conjoncture politico-économique et énergétique, l'intérêt pour le CSP reprend et ce à travers de nombreux projets dans le monde.

L'enjeu énergétique a fait naître des stratégies régionales et globales aboutissant à des réseaux associant plusieurs pays de plusieurs continents. Les pays de la ceinture solaire (sunbelt countries) seraient les producteurs et les autres pays les consommateurs. Actuellement, plus de 45 projets de CSP dans le monde, d'une capacité combinée de 5500 MW, sont en cours d'élaboration. Les tableaux suivants montrent quelques grands projets [6], (**Tableau 3** – Projets opérationnels, **Tableau 4** – Projets en construction, **Tableau 5** - Projets en construction)

#### i. *Projets opérationnels*

**Tableau 3:** Centrales opérationnelles [6]

Projet	Pays	Puissance crête	Technologie
Mojave, Désert de Californie	USA	354 MW (total)	Parabolic trough Design
Nevada Solar One, Nevada	USA	64 MW	Parabolic trough Design
Andasol 1	Espagne	50 MW	Parabolic trough Design
PS10 Séville	Espagne	11 MW	Parabolic trough Design
Kimberlina	USA	5 MW	Fresnel reflector

ii. *Projets en construction***Tableau 4:** Projets en construction

<b>Projet</b>	<b>Pays</b>	<b>Puissance crête</b>	<b>Technologie</b>
Martin Next Generation Solar Energy Center, Florida	USA	75 MW	Parabolic Trough Design
Andasol 2, Grenade	Espagne	50 MW	Parabolic Trough Design
Andasol 3, Grenade	Espagne	50 MW	Parabolic Trough Design
-----	---	---	---
Hassi R'Mel	Algérie	25 MW	Parabolic Trough Design
-----	---	---	---

iii. *Projets annoncés*

Les puissances pour de nombreux projets annoncés se chiffrent en centaines de MW aux Etats-Unis, alors que l'Espagne semble adopter des projets à 50 MW. L'intérêt est partout présent dans le monde dans les pays à fort ensoleillement.

Nous citons quatre projets aux USA (4 technologies), deux en Espagne, un en Italie, un en Afrique du Sud et un à Abu-Dhabi, tandis que l'on parle en Algérie à d'autres projets de puissance importante [4]:

**Tableau 5:** Projets en construction

<b>Projet _ Pays _ Puissance crête _ Technologie</b>
Ivanpah Solar, USA Californie, 500 MW + 400 MW Extension optionnelle, Power Tower Design
Mojave Solar Park, USA Californie, 553 MW, Parabolic Trough Design
Pisgah, Californie, USA 500 MW, Dish Design
Floride, USA, 300 MW, Fresnel Reflector Design
Extresol 2, Badajoz, Spain, 50 MW, Parabolic Trough Design
Andasol 4, Granada, Spain, 50 MW with heat storage, Parabolic Trough Design
Upington, Afrique du Sud, 100 MW, Power Tower Design
Shams, Abu Dhabi, 100 MW, Parabolic Trough Design
Archimede, Sicile, Italy, 28.1 MW, Parabolic Trough Design

Ainsi près de 7 GW sont annoncés à travers de nombreux projets dans le monde; les Etats-Unis et l'Espagne totalisent à eux deux 90 % de la puissance globale.

#### 4. PERSPECTIVES

Cette première décennie du millénaire a fait prendre conscience à toute l'humanité la place stratégique de l'énergie dans tous ses aspects. Désormais chacun sait que les gisements en pétrole, gaz et uranium seront épuisés dans quelques décennies, que les effets secondaires de l'énergie produite à partir de ces sources sont néfastes et que l'énergie solaire électrique est une alternative incontournable et surtout avantageuse.

Les réalisations prolifèrent, les records de puissances se succèdent et des projets élaborés dans des contextes de stratégies nationales, régionales et globales sont annoncés.

Il y a quelques années, on restait ébahi devant les réalisations de centrales à plusieurs milliers de modules et occupant des hectares de surface. Elles sont maintenant 10 fois plus grandes et elles le seront bientôt 100 fois plus.

Il y a quelques années le marché photovoltaïque vivait en partie des déchets de la microélectronique, il est aujourd'hui en plein essor, sa consommation en silicium dépasse celle de la microélectronique. Les rendements augmentent, les prix au kWh baissent; les technologies diverses semblent mouler avec le futur.

Le CSP aussi a vite évolué. Trois grandes technologies [1] ont prouvé sur le terrain leurs efficacités. Le problème de continuité de fonctionnement et de stockage semble résolu. Des projets à plusieurs centaines de MW sont annoncés ; ils sont équivalents en puissance aux centrales électriques conventionnelles.

Quand aux projets développés dans des stratégies globales de coopération, nous citons l'étude 'Energy from the desert' [8] et pour exemple le projet **TREC** (**T**rans-Mediterranean **R**enewable **E**nergy **C**ooperation) ([2, 3, 5, 7]). Ce dernier a été initié par le Club de Rome.

*'The sun-belt and the technology belt can become very powerful when they begin to understand themselves as a community: a community of energy, water and climate security; a community for their common future.'* H.R.H. Prince El Hassan Bin Talal, President of the Club of Rome. [2]

Ce projet regroupe les pays d'Afrique du Nord, du Moyen-Orient et de l'Union Européenne (EUMENA). Les pays du Maghreb et du Moyen Orient (MENA, Middle-East, North Africa) disposent de grandes capacités solaires de par leurs gisements solaires élevés, de leurs grandes superficies et de leur proximité avec l'Europe.

L'idée est une interconnexion des réseaux de l'Europe, du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (EUMENA) et d'évaluer le potentiel et les avantages d'importation d'électricité à base d'énergie solaire des pays du MENA.

Le réseau électrique conventionnel est non adapté au transfert sur de longues. La construction d'une ligne à courant continu à haute tension (HVDC) s'avère nécessaire.

Les études menées par le centre aérospatial allemand DLR montrent que par l'utilisation de moins de 0.3 % de la surface du désert de la région du Moyen Orient et de l'Afrique du Nord, le CSP peut générer suffisamment d'électricité pour satisfaire les demandes courantes. Le coût de l'électricité pourrait chuter alors à quelques centimes d'Euro/kWh.

Un projet de ligne HVDC entre Aachen (Allemagne) et Adrar (Algérie) à travers la Sardaigne (Italie) a été cité lors de la précédente visite du président allemand à Alger.

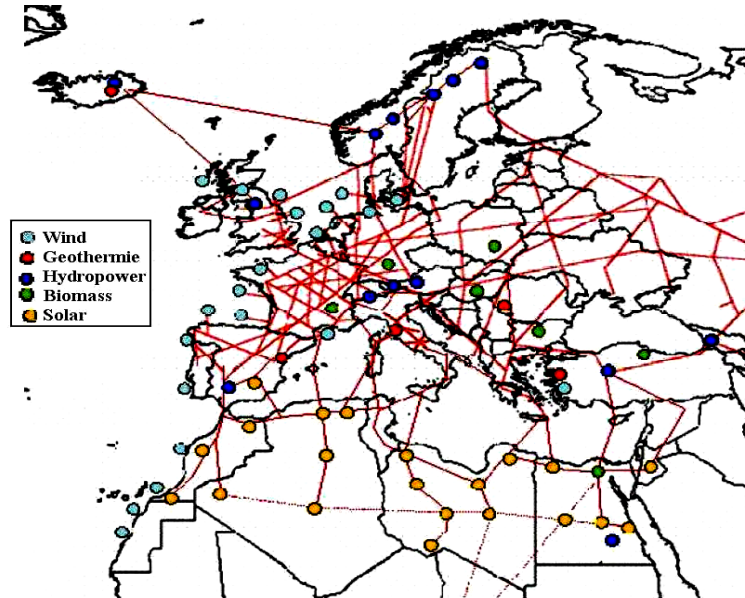


Fig. 1: Vision du réseau EUMENA [2]

Sa concrétisation reste cependant une grande tâche, puisqu'au-delà des moyens financiers colossaux nécessaires, d'autres contraintes de faisabilité, d'utilité et de maîtrise pourraient l'entraver.

Il existe enfin bien d'autres technologies (à l'essai actuellement) pour produire à partir de l'énergie solaire de l'énergie électrique: la cheminée solaire et la tour à vortex.

Un projet de tour solaire prévue pour 2010 est actuellement développé en Australie. La cheminée aurait 990 m de hauteur et 70 m de diamètre. La centrale fournirait 200 MW.

Un autre projet de tour solaire de 40 MW est prévu en Espagne.

## 5. CONCLUSION

L'énergie solaire photovoltaïque poursuivra son essor en multipliant ses avantages intrinsèques sus-cités qui restent très attractifs. Elle couvre toutes les gammes de puissance et son embarcabilité lui permet d'être intégrée et adaptée à l'utilisation.

L'énergie solaire à concentrateurs remplace beaucoup plus la centrale électrique conventionnelle ; l'énergie électrique produite doit être transportée vers son lieu de consommation. La technologie CSP produit aussi de la chaleur à haute température. Elle a ainsi l'avantage d'être exploitée aussi dans les projets de dessalement de l'eau de mer et dans les champs pétroliers. Le CSP est aussi une technologie à stratégie politique et économique.

Ces technologies couvrent certes aujourd'hui une infime partie des besoins mondiaux. La prochaine décennie prévoit des productions de puissances s'évaluant en GW et à moyen terme leur apport sera tel qu'une marche arrière ne sera plus possible.

**REFERENCES**

- [1] R. Pitz – Paal, '*Quo Vadis Solarenergie?*' Solare Kraftwerke, Freiburg 2006
- [2] Document, '*Transmediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power*', DLR, Final Report, Germany, June 2006.
- [3] Document, '*Declaration of Berlin*', International Executive Conference on CSP, Germany, June 2002.
- [4] [www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org)
- [5] [www.trec.org](http://www.trec.org)
- [6] [www.pvresources.com](http://www.pvresources.com)
- [7] Document, '*Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region*', Final Report, Germany Aerospace Center (DLR), Institute of Technical Thermodynamics.
- [8] K. Kurokawa and P. Van der Vleuten, '*Energy from the Desert*', Earthscan, London, 2006.