

Le Photovoltaïque : à quel prix ?

M. HADDADI

Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque
Ecole Nationale Polytechnique El Harrach Alger
mourad.haddadi@enp.edu.dz

RESUME : L'essor très important de l'électricité d'origine photovoltaïque qu'on avait observé au cours de ces dernières années semble vouloir être freiné pour raisons financières liées au coût de cette électricité. Cette conférence aborde donc ce problème, comparant ce coût à celui de l'électricité conventionnelle et aboutissant à monter sa compétitivité lorsque les sites sont favorables. Elle évoque aussi l'état général de la recherche orientée vers l'amélioration des performances des générateurs photovoltaïques.

I. INTRODUCTION

Malgré la récession économique qui a fait chuter la consommation d'énergie et les investissements dans le secteur énergétique, le recours aux énergies renouvelables ne semble pas avoir été concerné par ces restrictions. En effet, certainement depuis la prise de conscience des problèmes causés par ce qu'on appelle le « changement climatique », l'énergie provenant de sources renouvelables continue sa progression et, selon les statistiques de l'agence internationale de l'énergie concernant particulièrement la production de l'électricité, il apparaît que ce sont ces sources qui ont présenté le plus fort taux d'accroissement entre 2008 à juin 2010 : 15,7% d'augmentation [1]

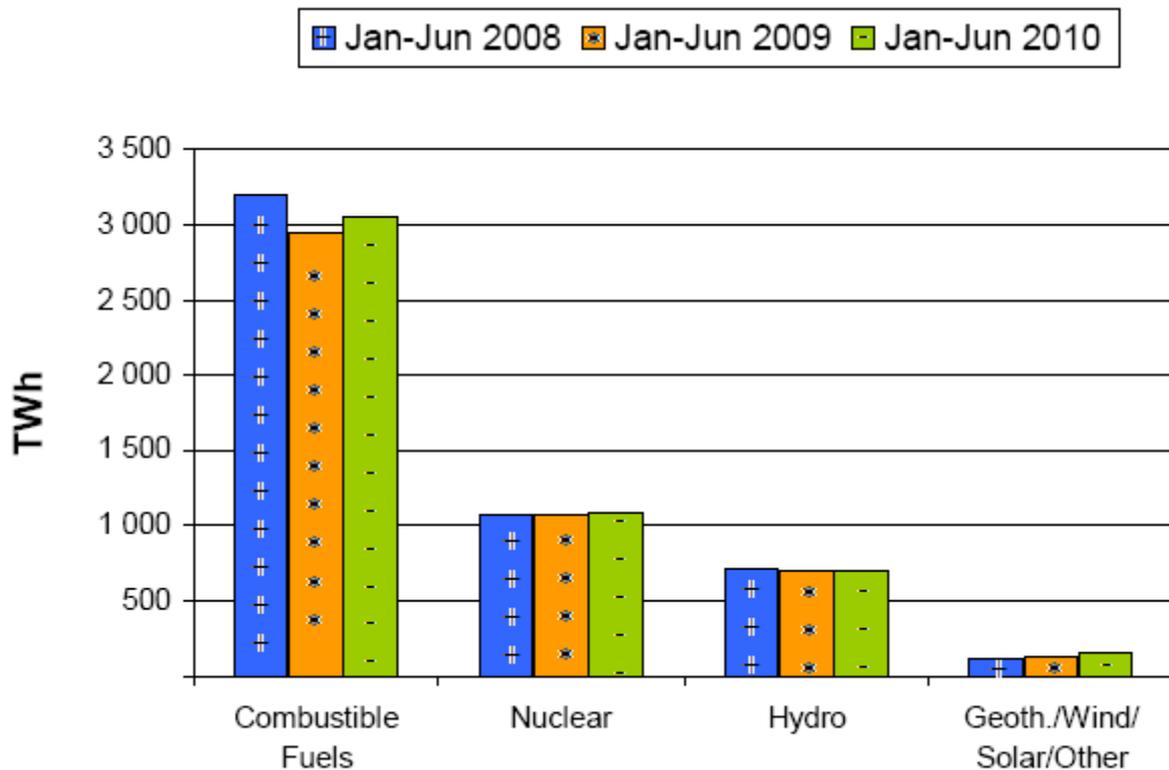


Figure 1
Sources de production d'électricité

Dans l'Europe des 27, ces mêmes sources ont représenté 62% (17 GW) de la capacité de production d'électricité installée en 2009 (57% en 2008). En termes absolus, les énergies renouvelables ont produit 19,9% (608 TWh) de la consommation d'électricité de l'Europe l'année dernière qui s'élève à 3042 TWh [2].

Mais si on regarde le détail de la structure mondiale de cette production (figure 2), on constatera que l'électricité solaire est un parent bien pauvre dans cette famille.

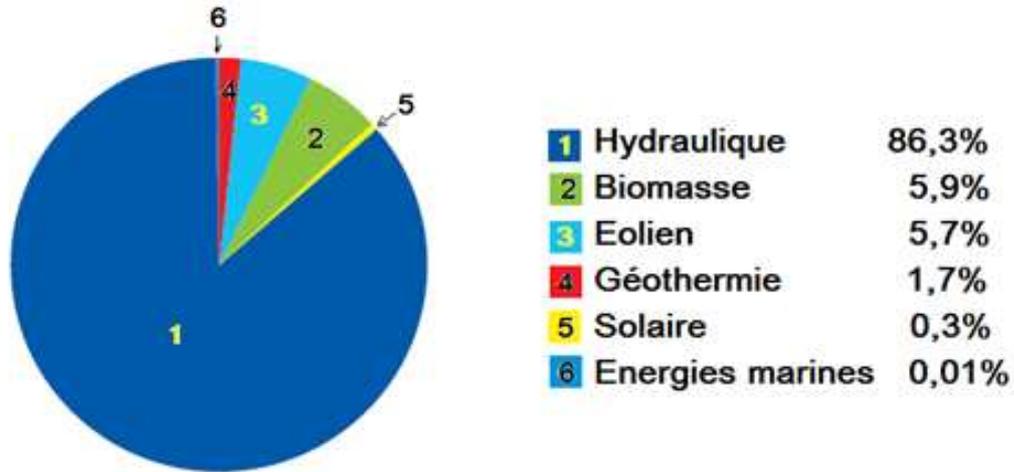


Figure 2
Structure de la production électrique d'origine renouvelable en 2008 [3]

Il est clair que l'électricité solaire a un problème et, comme on le verra, de sérieux efforts devront être consentis pour tenter de le résoudre.

II. L'ELECTRICITE SOLAIRE

Ce ne sont certainement pas les préoccupations actuelles sur l'environnement ou sur l'épuisement futur des ressources pétrolières qui sont à l'origine de l'utilisation de l'électricité photovoltaïque. Pour preuve, il n'y a qu'à rappeler les grandes dates marquantes [4]:

1839 : Edmond Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. C'est la découverte de l'effet photovoltaïque.

1877 : W. G. Adams et R. E. Day découvrent l'effet photovoltaïque du sélénium.

1940 : Adler, reprenant une idée émise par Garrison en 1923, étudie la tension de circuit ouvert d'une pile et sa variation en fonction de l'intensité d'illumination.

1941 : Russel Ohl décrit la première réalisation d'une jonction PN dans le silicium, à effet photovoltaïque (figure 3).

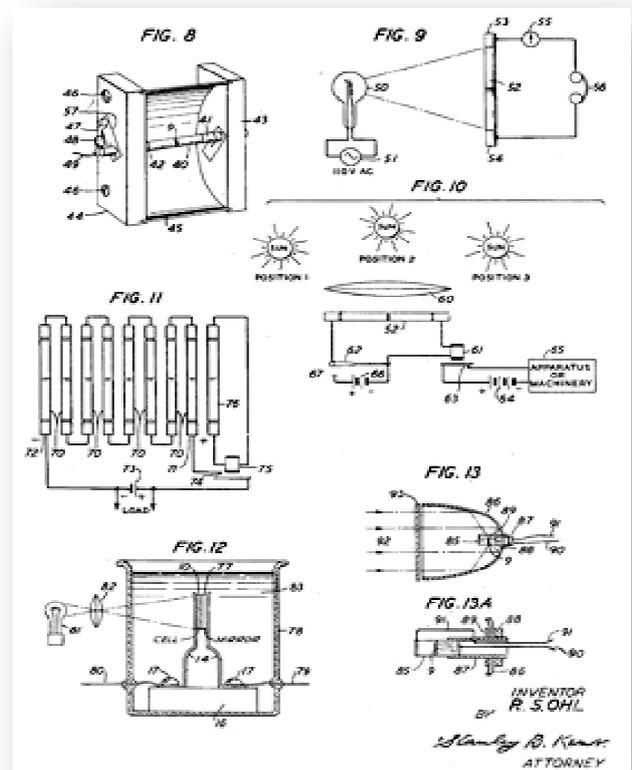


Figure 3

Le brevet "Light-Sensitive Electric Device"
U. S. Patent 2402662

Photos de :

<http://www.computerhistory.org/semiconductor/timeline/1940-Discovery.html>

1955 : C. S. Fuller, G. L. Pearson et M. B. Prince, des chercheurs dans les laboratoires Bell, annoncent la mise au point d'une cellule dont le rendement de conversion énergétique (c'est-à-dire le rapport de l'énergie électrique produite sur l'énergie rayonnée incidente) atteint 6 %, marquant ainsi véritablement la naissance de la photopile solaire.

1958 : Envoi dans l'espace des premiers satellites alimentés par des cellules solaires.

Les autres dates marquantes sont effectivement liées aux préoccupations évoquées :

1983 : En Australie, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km.

1995 : Les premiers programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

2008 : La production mondiale de cellules photovoltaïques (figure 4) a atteint 7910 MWc puis 12318MWc en 2009 [5] (je n'ai pas les chiffres de 2010).

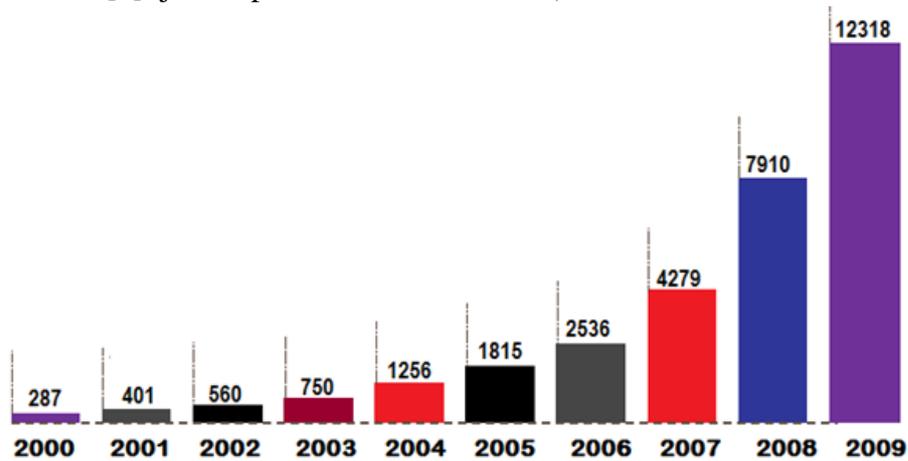


Figure 4

Evolution de la production mondiale de cellules solaires (en MWc)

Source : Photon International (Mars 2010)

Quant à la production d'électricité solaire, elle évolue aussi d'une façon identique (figure 5):

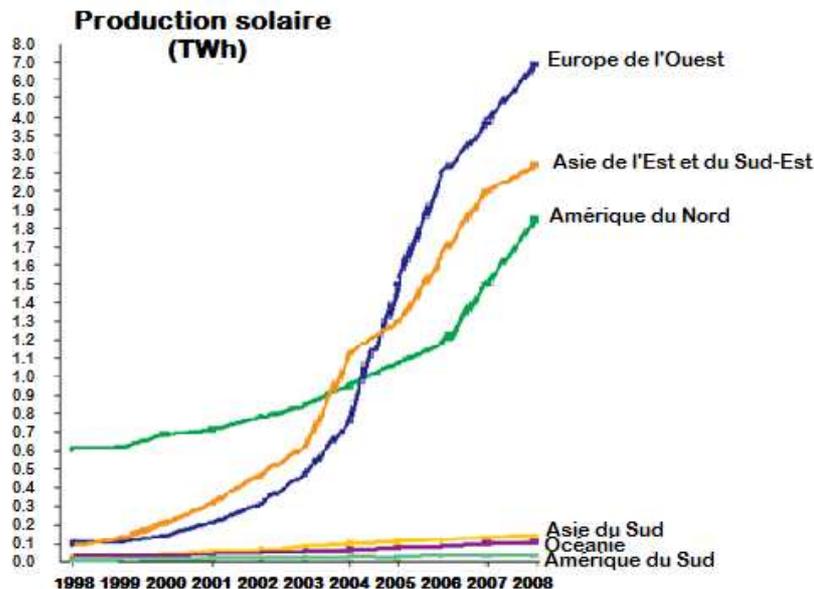


Figure 5

Evolution de la production d'électricité solaire par région du monde (TWh)

Cette figure adaptée de l'édition 2009 de l'Obser'Ver [3] inclut aussi la production d'électricité solaire d'origine thermodynamique. (Dans le monde, sur les 12,1 TWh d'électricité solaire produite en 2008, on compte 949 GWh -donc moins de 1 TWh- en électricité thermodynamique)

En fait, en dehors de 1839 et 1941, respectivement date de la découverte de l'effet photovoltaïque et de la fabrication de la première photopile, il me semble que la date marquante dans le domaine du photovoltaïque soit 1995, l'année qui avait vu les premiers « toits photovoltaïques » (figure 6).

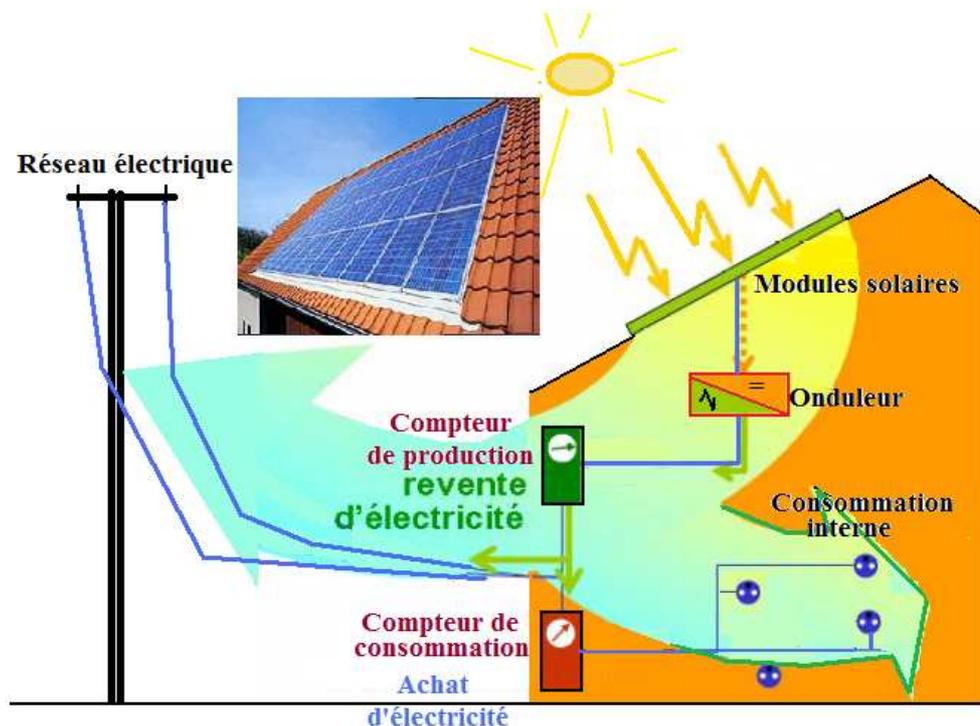


Figure 6

« Toit photovoltaïque »

Comme on le sait, avec le développement de l'électronique des onduleurs et en raison des considérations déjà évoquées liées à l'environnement en général ajoutées aux diverses libéralisations des marchés, toute personne pouvait installer des modules photovoltaïques et utiliser en totalité ou en partie l'énergie produite, devenant ainsi un véritable producteur.

Cette énergie d'origine renouvelable (« électricité verte ») peut donc être réinjectée dans le réseau public et elle est rachetée à des tarifs préférentiels (fixés par les pouvoirs publics mais toujours supérieurs aux prix d'achat de l'électricité du réseau) par les compagnies de distribution.

C'est donc cette situation qui a entraîné le développement massif du solaire photovoltaïque.

La croissance de la production d'électricité photovoltaïque s'est d'ailleurs accélérée puisqu'elle s'élève à 49 % entre 2007 et 2008 contre une moyenne annuelle de 39,4% entre 1998 et 2008.

Des chiffres de croissance impressionnants mais tout dernièrement, cette dynamique de l'accroissement du photovoltaïque risque un coup d'arrêt brutal, ce qu'on n'espère pas. Un peu partout dans le monde, on trouve que la rentabilité de l'électricité solaire est discutable. Par exemple, et tout récemment, les experts de l'inspection générale des finances français¹ mandatés pour évaluer l'état de la filière photovoltaïque, en plus de certains autres reproches, ont estimé que

¹ Pour l'histoire, certains accusent ces experts d'avoir des accointances avec le lobby nucléaire

cette filière possède « un coût disproportionné avec la quantité d'énergie produite » puisque la production d'électricité photovoltaïque au sol coûte plus de 200 euros par mégawatt-heure (€/MWh) contre 60 €/MWh pour l'hydroélectricité ou 70 €/MWh pour l'éolien terrestre [6].

Le photovoltaïque serait à leurs yeux donc un fiasco économique dont il convient de se débarrasser au plus vite.

Quel est donc le coût de cette électricité et comment la rentabiliser ?

III. LE COUT DE L'ELECTRICITE

Selon les chiffres de l'AIEA, la consommation électrique mondiale en 2008 s'élève à 18603 TWh (10097 TWh pour les pays de l'OCDE², 3293 TWh en Chine et 562 TWh pour toute l'Afrique) [7].

Ceci montre que la consommation électrique est un indicateur du développement³.

Quant aux coûts, en 2009 et au premier trimestre 2010, ils sont assez différents d'un pays à l'autre mais la moyenne du prix du kWh électrique (industriel) est de 0,1941 \$ (15 DA). (Il est de 0,1240\$ (9,4 DA) pour l'usage domestique).

Cette moyenne a été calculée par mes soins respectivement sur 19 et 23 principaux pays (OCDE et quelques autres)

En Algérie, le coût du kWh domestique qui bénéficie d'un soutien de l'état est de l'ordre de 4 DA (4.179).

Pour le photovoltaïque, l'indicateur qu'on prend pour discuter du coût est le prix du « Watt crête », prix qui sont toujours en baisse (figure 7).

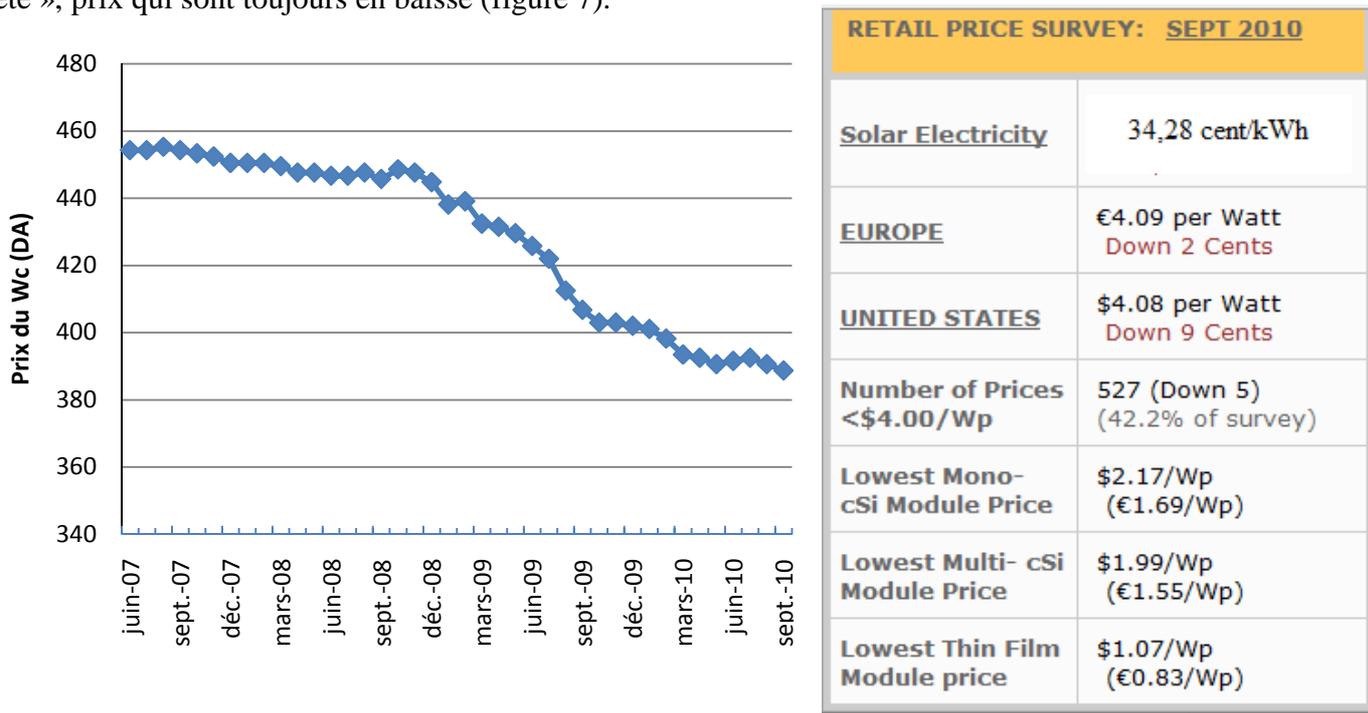


Figure 7

Evolution du prix du Watt-crête entre juin 2007 et Septembre 2010 [8].

² Pays de l'OCDE : Australie, Autriche, Belgique, Canada, République Tchèque, Danemark, Finlande, France, Allemagne, Grèce, Hongrie, Islande, Irlande, Italie, Japon, Corée, Luxembourg, Mexique, Hollande, Nouvelle Zélande, Portugal, Spain, Suède, Norvège, Pologne, Slovaquie, Suisse, Turquie, Grande Bretagne et USA.

³ Sauf pour certains pays dans lesquels la consommation électrique tient (malheureusement) plutôt du gaspillage !

Il faut savoir que les prix ont fortement baissé en 2009: de 37,8% en moyenne pour les modules cristallins, de 50% pour les wafers et de 80% pour le Silicium ! (en 2006-2008, il y eu une grande crise du Silicium car la demande était très nettement supérieure à l'offre).

Le prix du kWh qui apparait sur la figure concerne les installations résidentielles (quelques 2 kWc). Il ne serait que de 24,32 centimes de dollars pour les installations commerciales (50kWc au moins) et de 18,95 centimes pour les installations industrielles (500kWc au moins) [8]. (Il faut aussi savoir que ces prix doublent pour un ensoleillement défavorable.

Quant au prix du watt-crête, normalement de l'ordre de 4\$, il apparait que certains revendeurs de modules proposent des prix nettement plus avantageux mais bien évidemment en rapport avec les caractéristiques et les performances de leurs produits. C'est le chiffre de 4\$ qu'il faut retenir.

De tous ces chiffres, on comprend bien que l'électricité solaire est chère.

On peut le voir par un petit calcul, même pour le site de Ghardaïa, pourtant fortement ensoleillé:

Il faut d'abord savoir qu'un module de « x Watts » ne délivre cette puissance que sous des conditions de laboratoire⁴.

A Ghardaia ou ailleurs, l'irradiation ne vaut pas 1000W/m² tout le temps et la température des cellules en fonctionnement doit être bien loin des 25°C sous le soleil ! Nous avons donc à estimer les x Watt sensés être délivrés par notre module.

Par ailleurs, on devra tenir compte (malheureusement) des éléments suivants présentés sous un tableau :

Tableau n°1 : Réduction du rendement

<i>Cause</i>	<i>Chute du rendement</i>	<i>Explication</i>
<i>Echauffement des cellules (on peut supposer qu'elles atteignent 50°C)</i>	<i>0.9</i>	<i>Le rendement chute de 0,4% par degré (souvent presque de 0,5%/K)</i>
<i>Poussières</i>	<i>0.94</i>	<i>Sur site, l'empoussièrement est inévitable</i>
<i>Résistance des câbles de connexion</i>	<i>0.99</i>	<i>Il y a toujours des résistances de contact au niveau des boîtiers de connexion même si on ne veut pas tenir compte de la résistance des câbles</i>
<i>Batteries</i>	<i>0.8</i>	<i>Le rendement des batteries est connu</i>
<i>Désadaptation</i>	<i>0.95</i>	<i>Même équipé d'un MPPT, un générateur présente toujours des défauts d'adaptation</i>
<i>Autres</i>	<i>0.8</i>	<i>D'autres effets tels que la dispersion des caractéristiques entre modules, l'ombrage de certains d'entre eux, d'inévitables réflexions des rayons,...</i>

Le rendement nominal du module devra donc être corrigé par un produit de facteurs égal à :
 $(0,9 \times 0,94 \times 0,99 \times 0,8 \times 0,95 \times 0,8) \sim 0,51$

Ainsi, un module donné pour un rendement de 14%⁵ ne présentera généralement qu'un rendement de 14x0,51~7% (S'il reçoit 1000W, il en délivrera 70)

*Revenons au site de Ghardaia dont chaque mètre carré reçoit une moyenne de 5,90 kWh/m²/jour [9]
 En 20 ans (durée de vie moyenne d'un module pv), le mètre carré de terrain aura reçu :*

$$20 \times 365 \times 5,90 = 43070 \text{ kWh}$$

*Et le module aura fourni 43070*0,07~3070 kWh*

⁴ Plus précisément sous les conditions dites « STC » (Standard Test Conditions). Ce sont les conditions normales d'essai mises en place pour les besoins d'homogénéisation afin de pouvoir comparer la puissance de différents panneaux solaires. Rayonnement 1000W/m², température 25 degrés Celsius et AM 1,5

⁵ 14% est une moyenne de rendement pour les modules courants avec de bonnes cellules cristallines. Les meilleurs modules possèdent un rendement de 17-18% ou même 19,5% et 22% (modules 318 et SPR-315 du fabricant SunPower voir site de ce fabricant). Bien sûr, ils sont plus chers). Avec des cellules poly cristallines, le rendement est de quelques points plus faible. Ce rendement n'est que de ~10% avec les modules couches minces genre CIGS de Q-CELL.

Le mètre carré de cellules (au Silicium, ~80% du marché) qui fournit (conditions STC) à peu près 130Wc coûte⁶ ~850\$ (~65.000 DA) ce qui rend le kWh au prix de ~0,28 \$ (~20 DA) .

Bien sûr, tout ce calcul est tout à fait approximatif et sans doute que les mauvais chiffres ont quelque peu été exagérés⁷ mais il reste tout à fait significatif et confirme bien que le kWh photovoltaïque est cher. Pour réduire son coût, les recherches sont menées dans différentes directions :

D'abord, dans le domaine des cellules, pour augmenter leur rendement et/ou réduire leur coût : le tableau n°2 résume les technologies et leur état de développement. (voir aussi le récent rapport « Photovoltaic solar energy: development and current research » <http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/>)

Tableau n°2 : Etat des technologies des photopiles

Type	Cellule (labo)	Module (labo)	Module (commercial)	Niveau développement
1ere génération				
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
2e génération				
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CIS	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16,70%		6-9%	Pret pour la production
3e génération				
Cellule organique	5,70%			Au stade de la recherche
Cellule de Gratzel	11%	8,40%		Au stade de la recherche
Cellules multi-jonctions ⁸	39% (sous concentration de 236 soleils)	25-30% (module triple jonction GaInP/AsGA/ Ge)		Au stade de la recherche, production exclusivement pour applications spatiales

C'est ainsi qu'on peut inventorier des recherches du type fondamental qui s'intéressent aux différents matériaux, nanostructures comprises [10], des recherches sur les caractérisations et les modélisations [11], des recherches sur les systèmes en général [12], etc...

Une autre voie un peu moins directe a aussi été suivie, toujours dans le même but : la voie de la co-génération : il s'agit du module photovoltaïque-thermique du genre de ceux qui sont développés ici même à l'URAER par M. TOUAFEK . Ainsi, avec la même surface, le module a la capacité de convertir la lumière du soleil en deux formes d'énergie et présente une plus grande efficacité [13], ce qui réduira d'autant le prix du Wh. Le projet UPP-Sol (« Urban photovoltaics: polygeneration with solar energy ») cité par le rapport évoqué aurait réussi à atteindre un rendement

⁶ Dans le calcul, je prends le prix du Watt-crête silicium installé (~5 €/Wc actuellement) et je tiens compte d'un facteur de réduction (0,6) qui fera qu'un mètre carré de silicium ne délivrera que 78 W effectifs plutôt que 130 Wc

⁷ Par exemple avec des modules d'un rendement de 17% assez courants et d'une durée de vie de 25 années plutôt que 20, le coût du kWh ne serait que de 0,18\$ (13 DA) . Ce coût serait encore réduit avec des modules plus performants (on atteindrait un coût de l'ordre de 0,14\$/kWh (10 DA) avec le module SPR-315 de Sun Power). Il est normal que le prix du kWh photovoltaïque soit plus faible dans les sites ensoleillés.

⁸ En 2009, 41,1% de rendement ont été atteint pour une cellule photovoltaïque multi-jonction de 5 mm² de surface. Celle-ci se compose de couches de Phosphure de Gallium-Indium (InGaP), d'arséniure d'Indium et de Gallium (GaInAs) sur un substrat de germanium (Ge). Concentration 454 (Institut Fraunhofer).

de 75% ! (cellules à triple jonction de rendement 35% avec concentration et co-génération). Sachant qu'une centrale nucléaire ne possède qu'un rendement de 30%, on voit que de tels systèmes ont de l'avenir.

IV. CONCLUSION

L'électricité photovoltaïque, malgré ses avantages et son coût devenu quasiment compétitif dans un pays tel que le notre, n'a pas réussi à s'imposer. Son développement dans les pays du Nord n'a été du que par le fait de la pression des groupes écologistes et des aides de leurs pouvoirs publics. Tout ceci très probablement en raison de l'investissement initial relativement important et sans doute de sa (relative) dépendance des caprices de la météorologie.

Il est à espérer en ce qui nous concerne que le projet de Sonelgaz (qui est de produire des panneaux solaires avec une capacité de près de 50 MW par an) soit effectif à court terme et qu'il soit accompagné par quelques mesures incitatives afin que le photovoltaïque sorte des créneaux classiques dans lesquels il est maintenu.

Comme on l'a vu avec notre estimation rudimentaire, en optimisant le générateur, cette électricité pourra certainement concurrencer le réseau classique. Resterait le problème de l'investissement initial qui est une autre histoire.

Diverses études affirment qu'on atteindra vers 2015 des rendements de 20% pour les modules standards courants et 40% à plus long terme, ce qui rendrait dès 2015 le coût de l'électricité photovoltaïque comparable ou même inférieur au prix de vente de l'électricité classique.

REFERENCES :

- [1] <http://www.iea.org/stats/surveys/mes.pdf>
- [2] http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/10/886&format=HTML&aged=0&language_=EN&guiLanguage=en
- [3] La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde, Collection chiffres et statistiques, Onzième inventaire - Edition 2009 (<http://www.systemes-solaires.com/>)
- [4] <http://tpesolaire.bonnet-ribeau.net/hist.htm>
- [5] <http://www.photon-magazine.com/photon/index.htm>
- [6] J.-M. Charpin - A. Siné - P. Helleisen - C. Tlili (IGF), C. Trink, C. Stoffaes (CGIET Mission relative à la régulation et au développement de la filière photovoltaïque en France 2010) <https://www.igf.minefi.gouv.fr/>
- [7] Key World Energy Statistics 2010, International Energy Agency. Site : [iea.org](http://www.iea.org)
- [8] <http://www.solarbuzz.com/>
- [9] Kacem Gairaa, Valorisation du gisement solaire de Ghardaïa. Bulletin des Energies Renouvelables 2010, 17 :7-9.
- [10]
 - a) Li JS, Yu HY, Wong SM, et al. Design guidelines of periodic Si nanowire arrays for solar cell application. Applied Physics Letters 2009; 95(24): 243113.
 - b) Fedoseyev AI, Turowski M, Raman A, et al. Simulation of quantum dotbased nanodevices for photovoltaic applications with multiscale models. International Journal for Multiscale Computational Engineering 2009; 7: 1-7.
 - c) Gupta N, Alapatt GF, Podila R, et al. Prospects of Nanostructure-Based Solar Cells for Manufacturing Future Generations of Photovoltaic Modules. International Journal of Photoenergy 2009: 154059.
 - d) D. Hatem, F. Nemmar et M.S. Belkaid, Cellules solaires organiques: choix des matériaux, structures des dispositifs et amélioration du rendement et de la stabilité, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 77 – 86
 - e) S. Bouchekouf, B. Marir et M. Benabbas-Marir, Etude numérique de la cellule photovoltaïque organique MPP/ZnPc. Revue des Energies Renouvelables 2009 ; 12 (2) 163 - 174
 - f) A. Trabelsi, A. Zouari and A. Ben Arab, Modeling of polycrystalline N+/P junction solar cell with columnar cylindrical grain, Revue des Energies Renouvelables 2009 ; 12 (2) : 279 – 297

- g) Kanai Y, Wu ZG, Grossman JC. Charge separation in nanoscale photovoltaic materials: recent insights from first-principles electronic structure theory. *Journal of Materials Chemistry* 2010; 20(6): 1053–1061.
- h) A.A. Boussettine, B. Rezgui, A. Benmansour, G. Bremond and M. Lemiti, Optimization of the performance of micromorph tandem solar cell a-Si/ μ c-Si, *Revue des Energies Renouvelables* 2010 ; 13(1) : 179 – 186
- i) A. Malaoui et A. Elmansouri, Deux nouvelles méthodes complémentaires pour l'extraction optimale des paramètres électriques des jonctions. *Revue des Energies Renouvelables* 2010 ; 13(2) : 199 – 212
- j) Liu SM, Chen W, Wang ZG. Luminescence Nanocrystals for Solar Cell Enhancement. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 2010; 10(3): 1418–1429
- k) Chen JY, Sun KW. Enhancement of the light conversion efficiency of silicon solar cells by using nanoimprint anti-reflection layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2010; 94(3): 629–633.
- l) Van Nieuwenhuysen K, Payo MR, Kuzma-Filipek I, et al. Epitaxially grown emitters for thin film silicon solar cells result in 16% efficiency. *Thin Solid Films* 2010; 518: S80–S82.

[11]

- a) Kontermann S, Horteis M, Ruf A, et al. Spatially resolved contact resistance measurements on crystalline silicon solar cells. *Physica Status Solidi a* 2009; 206(12): 2866–2871.
- b) Potthoff T, Bothe K, Eitner U, et al. Detection of the Voltage Distribution in Photovoltaic Modules by Electroluminescence Imaging. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2010; 18(2):100–106.
- c) Driemeier C, Zilles R. Six-Element Circuit for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic-Motor Systems with Variable-Frequency Drives. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2010; 18(2):107–114.
- d) Kluska S, Granek F, Rüdiger M, et al. Modeling and optimization study of industrial n-type high-efficiency back-contact back-junction silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2010; 94(3): 568–577.
- e) Szymkowski J. Modeling the electrical characteristics of P3HT:PCBM bulk heterojunction solar cells: Implementing the interface recombination. *Semiconductor Science and Technology* 2010; 25(1): 015009.
- f) Bovatsek J, Tamhankar A, Patel RS, et al. Thin film removal mechanisms in ns-laser processing of photovoltaic materials. *Thin Solid Films* 2010; 518: 2897–2904.

[12]

- a) Tian Pau C. Output energy of a photovoltaic module mounted on a single-axis tracking system. *Applied Energy* 2009; 86: 2071–2078.
- b) Huld T, Gottschalg R, Beyer HG, et al. Mapping the performance of PV modules, effects of module type and data averaging. *Solar Energy* 2010; 84(2): 324–338.
- c) Saglam S, Ekren N, Erdal H. Controlling of grid connected photovoltaic lighting system with fuzzy logic. *Solar Energy* 2010; 84(2): 256–262.
- d) T. Mrabti, M. El Ouariachi, B. Tidhaf, Ka. Kassmi, E. Chadli et K. Kassmi, Modélisation des propriétés électriques et caractérisation des panneaux photovoltaïques. *Revue des Energies Renouvelables* 2009 ; 12 (1) : 105 – 116
- e) S. Zaamta et A. Dib, Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs. *Revue des Energies Renouvelables* 2009 ; 12 (1) : 137 – 147
- f) R. Rezoug et A. Zaatri, Optimisation du rendement d'un système photovoltaïque par poursuite du soleil. *Revue des Energies Renouvelables* 2009 ; 12 (2) : 299 – 306
- g) Mehdaoui, A. Chaker, M. Zerikat et L. Messikh, Développement de deux modèles neuro-flous pour la poursuite du MPPT des modules photovoltaïques UDT5-50. Application au site d'Adrar. *Revue des Energies Renouvelables* 2009 ; 12 (2) : 257 – 268

[13] K. Touafek , M. Haddadi, A. Malek, Experimental study on a new hybrid photovoltaic thermal collector. *Applied solar energy, Springer* 2009 ; 43(3) : 181-186.