



FLASH N°9 – janvier 2009

Le solaire photovoltaïque

Par Claude POIRSON (ECN 71)

Cet article reprend les principaux points développés lors de la conférence de Centrale-Energies du 23 octobre 2008 sur l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que lors de la conférence organisée par la SEE sur le même thème le 6 décembre 2007.

La Terre baigne dans l'énergie solaire, avec 1,56.1018 kWh/an, océans compris. L'énergie solaire incidente représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale d'énergie (environ 1,1.1014 kWh). Il s'agit donc d'une énergie abondante, renouvelable, qui pourrait couvrir la totalité ou une grande part de nos besoins énergétiques futurs.

Dans le cas de la France, la quantité d'énergie reçue en moyenne varie entre 1,0 MWh/an/m² et 1,5 MWh/an/m². Elle atteint 2,7 MWh/m²/an dans le Sahara.

La puissance normalisée d'un module photovoltaïque exprimée en Wc (Watt crête) correspond à la puissance électrique qu'il délivre sous un éclairement solaire normalisé de 1 kW/m², correspondant à l'énergie reçue en plein midi face au Soleil par temps clair sous la latitude de l'Espagne

En considérant des modules photovoltaïques de 10 % de rendement électrique, l'énergie produite sera en moyenne en France d'environ 120 kWh/an/m². Pour atteindre la production électrique française d'environ 550 TWh/an, il faudrait donc couvrir environ 4600 km² de surface. Or la surface bâtie en France représente plus de 10 000 km² et les infrastructures routières plus de 16 000 km², en équipant une fraction de ces surfaces on pourrait donc produire assez d'électricité pour couvrir les besoins de la France (à condition de pouvoir la stocker).

Ces analyses trouvent leur prolongement dans les programmes de « toits photovoltaïques » en Allemagne ou au Japon, développés depuis plusieurs années et maintenant en France.

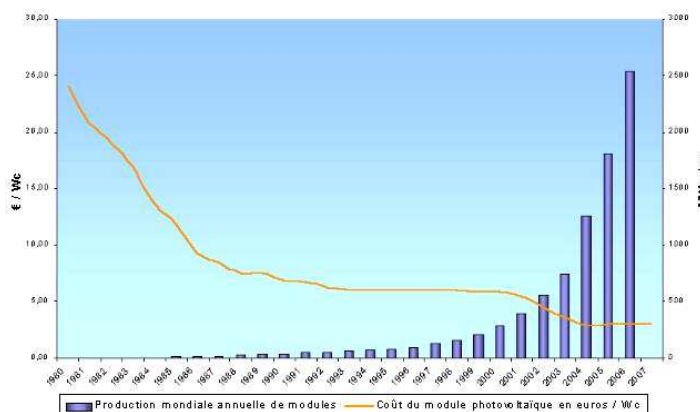
Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain avec une majorité dans le visible autour d'un pic à 0,45 µm. La conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie du photon en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière.

Une cellule délivre seulement une puissance de quelques W sous une tension d'environ 0,6 V. Le courant obtenu est continu. Pour obtenir un générateur plus puissant, on connecte les cellules en série et en parallèle.

L'ensemble réalisé, est appelé alors module photovoltaïque, dont les dimensions peuvent être de l'ordre du mètre carré et la puissance aller jusqu'à 200 Wc. Ces modules sont ensuite associés entre eux pour former un champ de modules, constituant une installation photovoltaïque. Le courant continu est transformé en courant alternatif par un onduleur. Le courant peut être utilisé soit directement, soit injecté sur le réseau.

À côté des équipements des toitures, l'installation de centrales photovoltaïques ayant des puissances allant de la centaine de kWc à quelques MWc se développe rapidement.

Le coût élevé actuel de l'électricité photovoltaïque apparaît comme un frein à son développement. Cependant ce coût, aujourd'hui d'environ 2 à 3 € par Wc, baisse régulièrement et pourrait passer dans quelques années sous la barre symbolique de 1 € par Wc. Les effets d'échelle et l'amélioration des technologies sont à la base de ces progrès constants.



Dans ces conditions, la compétitivité de l'énergie photovoltaïque, est un objectif réalisable dans les prochaines années. L'accélération de ce processus fait l'objet de politiques volontaristes de nombreux États, accordant à la production d'électricité photovoltaïque, fournie au réseau électrique, des coûts de rachat incitatifs.. .../...

La France avec son tarif de rachat de 0.55€/kWh pour des modules intégrés à l'architecture va essayer de rejoindre le peloton des pays qui avec l'Allemagne, le Japon et l'Espagne font la course en tête.

L'évolution de la production de modules photovoltaïques connaît une croissance exceptionnelle avec un taux de 30 à 40 % par an depuis plusieurs années, avec en 2005 une production d'environ 1 800 MWc. C'est donc un domaine industriel en plein développement. Cependant cette progression spectaculaire ne doit pas faire oublier que cette puissance, reste négligeable dans le paysage énergétique et par rapport aux besoins

Une projection des évolutions comparées au niveau mondial de l'énergie consommée et de l'énergie photovoltaïque, montre que cette dernière pourrait atteindre 10 à 20 % en 2050 (auxquels il faut ajouter les autres énergies renouvelables).

Les différentes filières photovoltaïques exploitées aujourd'hui sont les cellules au silicium monocristallin et polycristallin, les cellules au silicium amorphe, les cellules au diséléniure de cuivre et d'indium (CIS), au tellure de cadmium (CdTe) ; les cellules au silicium (Si) sont à la base de près de 98 % de la production photovoltaïque. D'autres filières sont également explorées telles les cellules du type GaAs et InP, qui appartiennent à la catégorie des cellules à multijonctions.

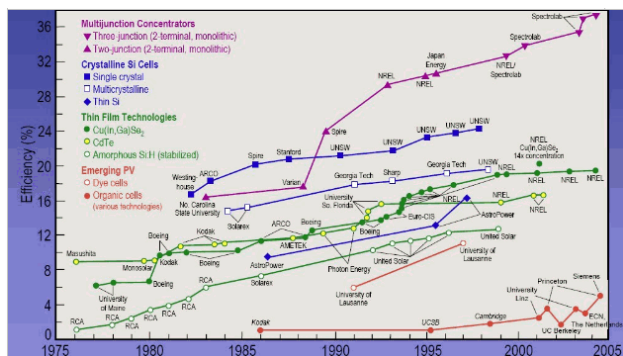
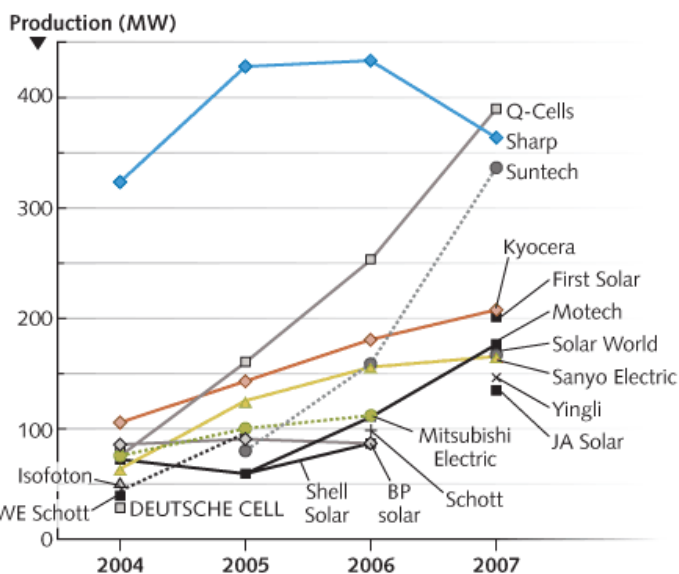
Le photovoltaïque est un domaine en pleine ébullition tant au niveau industriel qu'au niveau de la recherche, tout d'abord autour de la filière principale au silicium, mais aussi dans la filière des couches minces non silicium, puis dans de nouvelles filières exploitant des concepts ou matériaux nouveaux et enfin dans l'émergence d'une recherche sur les très hauts rendements.

De nouvelles filières, basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, n'en sont qu'à leurs balbutiements. Bien que la majeure partie de la production de cellules soit faite sur des substrats de verre, une filière commence à se développer, utilisant des supports souples très minces, soit métalliques (quelques µm), soit plastiques.

L'avantage de ces supports est leur poids, leur souplesse d'utilisation, de mise en œuvre et de transport. Des cellules Si et CIS utilisent déjà cette technologie. Cependant ces substrats entraînent des contraintes supplémentaires qui doivent être surmontées. Un avantage majeur réside également dans leur coût, potentiellement très faible, ce qui en fait des supports de choix pour le futur.

Les acteurs industriels du photovoltaïques sont d'abord Japonais (Sharp, Kyocera, Sanyo, Mitsubishi,...) et Allemands (Q-cells, Solar World, Schott, Shell Solar,...) en cohérence avec les choix stratégiques faits par ces pays mais également les Etats-Unis (First Solar, BP Solar, Shell Solar,...). Les Espagnols sont présents (Isoton, BP Solar,...), et les Chinois (Suntech, Yingli, JA Solar,...) ont développé une industrie d'exportation très importante. Sur ces marchés d'exportation on trouve d'autres fabricants asiatiques (Motech à Taiwan, Sun Power aux Philippines, etc.).

La France est encore en retrait, mais la situation évolue notamment avec la création de l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES). Des projets importants (industrie & recherche) se développent dans ce domaine autour du CEA, du CNRS et d'industriels avec le soutien de l'ANR, de l'ADEME et des régions.



Malgré ses inconvénients (coût encore élevé, production intermittente, encore énergivore pour la production des modules), l'énergie photovoltaïque apparaît, comme une source d'énergie renouvelable incontournable et apte à couvrir dans l'avenir une proportion significative et croissante des besoins énergétiques, aux cotés d'autres sources d'énergie. Le stockage de l'électricité est une condition importante pour le développement du photovoltaïque comme pour les autres énergies renouvelables intermittentes.

Ordres de grandeur

par Johann DECLERCQ (ECM 02)

En cette période de propagation de la crise financière à l'économie réelle, il nous a semblé opportun de dresser un rapide panorama d'un fleuron de l'industrie française peu connu, générateur d'emploi et contributeur positif de la balance des paiements de notre pays :

L'industrie Parapétrolière en France

L'industrie parapétrolière regroupe l'ensemble des sociétés de service pétrolier. Elles réalisent, pour le compte des compagnies pétrolières et gazières, les travaux d'étude et de construction nécessaires à l'exploitation des gisements d'hydrocarbures: de la réalisation d'études sismiques à la construction d'unités de production et de raffinage, en passant par la conception d'équipements et d'outils de forage.

Bien que dépourvue de matières premières, la France occupe une place de choix dans ce secteur stratégique. Le rôle et la position internationale de Total et de GDF Suez y sont pour beaucoup ainsi que la présence de deux instituts de recherche connus mondialement (l'IFP et l'IFREMER), du leader mondial de la sismique (CGG Veritas) et l'existence de plusieurs grandes sociétés d'engineering et contracteurs dont Technip (2^{ème} sur le marché de la construction offshore avec 9.5% de part de marché) ainsi qu'Acergy et Saipem (3^{ème} sur le marché de la construction offshore avec 9% de part de marché), deux sociétés multinationales mais ayant une importante implantation en région parisienne.

Les chiffres clés de L'Industrie Parapétrolière française (pour plus de détail voir [1]) :

- CA 2008 (prévisions) : 32G\$ (+7% sur un an - multiplié par 2 en 10 ans).
- 93% de ce chiffre d'affaire est réalisé à l'exportation.
- L'amont représente 67% du chiffre d'affaire 2007 - 33% pour l'aval.
- Effectifs : plus de 70 000 emplois en France.

Le contexte mondial

Investissements mondiaux en exploration production [2] :

2007	330 G\$ dont Russie : 51 G\$ (+24%) et Chine : 62 G\$ (+38%)
2008 (estimations)	394G\$
2009 (prévisions)	stable par rapport à 2008.

Si la baisse du prix du pétrole se poursuivait, l'activité sur l'année prochaine et surtout à partir de 2010 pourrait diminuer. Cependant la nécessité pour les majors de renouveler leurs réserves et leur difficulté croissante à accéder à ces ressources nouvelles peut être un facteur de maintien des investissements.

Les activités de forage au niveau mondial [2] :

- Le nombre de puits forés en 2007 est de 105000 (-3.5% sur un an). Principalement du à la forte baisse du marché gazier en Amérique du Nord. Pour autant, le marché a plus que doublé en quatre ans pour atteindre 50G\$ en 2007 (35G\$ pour les forages en mer et 15 G\$ pour les forages terrestres).
- Les estimations de l'évolution du marché mondial du forage en CA sont les suivantes:
 - 2008 : forages terrestres -5% et forages en mer +25%
 - 2009 : forages terrestres -5 à -10% et forages en mer +10 à 15%.

Des projets complexes et de grandes envergure : comparaison du projet 'Qatar LNG' (6 trains) mené par Technip et du projet 'Stade de France' connu du grand public [3]:

Le Stade de France à Saint Denis	Projet de 6 trains LNG au Qatar
Capacité du stade : 75 000 spectateurs Effectifs maximum de construction : 1500	Chantier : 75 000 personnes sur site
Coût : 400 millions d'euros	Coût : 10 milliards d'euros
32000 tonnes d'acier	137000 tonnes d'acier

[1] <http://gep-france.com/files/Rapport2008IFP.pdf>

[2] L'industrie pétrolière et parapétrolière - Contexte International 2008 - IFP novembre 2008 - www.ifp.fr

[3] Présentation de Thierry Pilenko, PDG de Technip, au Journées du Pétrole 2008

4ème Rapport du GIEC 2007 – où en sommes-nous ? où risquons-nous d'aller ?

par Christiane DREVET (ECN 65) et Etienne PESNELLE (ECP 86)

cet article reprend les points forts de l'intervention de Valérie Masson-Delmotte, ECP (LSCE) le jeudi 25 septembre 2008, dans le cadre des conférences mensuelles de Centrale-Energies. Les membres de Centrale-Energies, ayant demandé leur ouverture au forum, peuvent se reporter aux planches projetées ce jour-là, disponibles au forum de www.centrale-energie.fr

LES 4 RAPPORTS DU GIEC

Valérie Masson-Delmotte rappelle que les rapports successifs, initiés par l'ONU en 1988, paraissent tous les 5-6 ans, et qu'ils ne sont qu'une compilation des études scientifiques mondiales publiées sur le changement climatique, ceci à des fins d'aide à la décision et à la demande des gouvernements.

Les groupes d'auteurs, au nombre de plus de 150, et qui se répartissent dans le monde entier sur une base volontariste, ne se connaissent pas initialement. D'un rapport à l'autre, ils sont renouvelés à 75%. Pour l'établissement d'un rapport, un 1er filtre est effectué dans les publications des revues scientifiques. Après plusieurs brouillons, dont le dernier, révisé par 600 experts et une dizaine de gouvernements, le rapport final de 600 pages est édité, avec un résumé à l'usage des décideurs. Près de 30 000 commentaires sont ainsi émis, y compris ceux des gouvernements pour le résumé, et le processus prend plus de 2 ans.

CONCLUSIONS DU RAPPORT 2007

Le résultat le plus important en 2007 est l'affirmation que l'élévation de la température moyenne du globe, observée depuis le début de l'ère industrielle, est quasi-certainement d'origine anthropique. En effet :

En 2001, le rapport *disait* : la grande majorité du réchauffement climatique des 50 dernières années est à 66% de certitude attribuable aux activités humaines (GES).

En 2007, le rapport *affirme* : le réchauffement moyen du globe est maintenant reconnu sans équivoque, et l'essentiel de celui des 50 dernières années est à 90% de certitude du à l'augmentation des gaz à effet de serre émis par les activités humaines (GES)

Les faits avérés aujourd'hui, d'après les travaux publiés avant 2006, et consignés dans le rapport **2007**, sont ainsi :

- une planète en moyenne plus chaude de 0,75 °C qu'elle ne l'était en 1860, le processus s'accéléralant depuis 1950, avec +0,13°C par tranches de 10 ans (séries de mesures temporelles de haute qualité sur les continents et les océans).

- des concentrations dans l'atmosphère des principaux GES (CO₂, méthane, oxyde nitreux,...) sans précédent, avec des taux de croissance qui s'envolent depuis 1950.
- des modèles de restitution temporelle de la température moyenne ne pouvant expliquer le décrochage observé à partir de 1950, qu'en ajoutant à la prise en compte des forçages radiatifs naturels (activité solaire, volcanisme,...), ceux dus aux GES (voir infra).
- Un réchauffement anthropique observé sur tous les continents et les océans depuis 1950, l'ensemble des modèles, prenant en compte les forçages radiatifs dus aux GES, étant là encore les seuls à restituer ce réchauffement.
- Aucune explication alternative n'existant de par le monde.

PHYSIQUE DU CLIMAT

Chauffage radiatif naturel : sous l'action du rayonnement solaire incident, le globe re-émet un flux radiatif infrarouge intense (Flux de 390 W/m²). Les molécules triatomiques de la proche atmosphère, qui constituent les GES naturels (50% d'eau; 33% de CO₂, méthane, ozone, CFC,...), peu réactives et non toxiques, absorbent ce rayonnement, et le renvoient en grande partie vers le sol sous forme de photons (Flux de 324 W/m²), en le réchauffant. C'est ainsi que la température est actuellement de +15°C, au lieu des -18°C qu'elle serait sans cet effet.

Jusqu'au début de l'ère industrielle, les concentrations dans l'atmosphère du CO₂, du méthane et la température oscillaient tous les 100.000 ans, conformément aux cycles astronomiques (principalement par variation de l'excentricité de l'ellipse), ce qui correspondait aux grandes glaciations et déglaciations. Concentrations de CO₂ (de 185 à 285 ppm), de méthane et température ont pu ainsi être reconstituées sur près de 800.000 ans, grâce à l'analyse des carottes de glace de la calotte polaire antarctique et ont été reliées entre elles sans ambiguïté.

Chauffage additionnel ou forçage radiatif : ce dernier, observé depuis l'ère industrielle, mais surtout depuis les 50 dernières années, a pu être attribué majoritairement à l'augmentation des GES due aux activités humaines (forçage « anthropique ») et minoritairement à la «variabilité naturelle» (activité solaire, volcanisme)

Exemple :

- une multiplication par 2 du taux de CO₂ induit un forçage radiatif de 4W/m². Le réchauffement au sol est alors de +3°C. Il faut souligner l'inertie du système, avec un temps de réponse des océans profonds de 250 ans et une durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère de plusieurs centaines d'années.
- le forçage radiatif «anthropique» du au CO₂ est de 1,49 à 1,83 W/m², le forçage radiatif «anthropique» total de 1,5 à 2, 5 W/m².
- le forçage radiatif du à la «variabilité naturelle» est beaucoup plus faible : de 0,06 à 0,3 W/m² pour le cycle solaire de 10 ans ; le forçage du à l'activité volcanique, qui est un épisode ponctuel (les particules ne restent guère plus d'un an ou deux dans l'atmosphère), est négligeable.

MODELISATIONS-PROJECTIONS FUTURES :

Les modélisations permettent de faire des projections pour le futur. Elles s'appuient sur des couplages de modèles physico-chimiques de plus en plus sophistiqués du système terre-océan-atmosphère, recalés sur les mesures, avec cependant encore des imperfections. On note que :

- les modèles sont testés sur 10 000 ans de transition interglaciaire avec prise en compte de l'albedo des calottes glaciaires et du CO₂, et reproduisent bien les variations de température observées sur cette période.

- du fait de la longueur des calculs (3 mois pour 100 ans d'histoire du climat), les maillages sont encore grossiers (100X100) km et ne permettent pas une prise en compte correcte des nuages. Avec l'augmentation des capacités de calcul et la mesure par satellite des noyaux de particules dans les nuages, l'évaluation sera améliorée.

- ce sont les différents modélisations de par le monde qui donnent les fourchettes d'incertitude des évaluations de température (+/-0,5°C), pour chaque scénario utilisé. Mais la plus grosse incertitude provient du mode de vie que l'humanité va choisir. Les différents scénarios étudiés ne divergent qu'en 2040, mais tout se joue dès maintenant, avec l'inertie du système déjà soulignée. Le scénario « *business as usual* » donne un réchauffement en 2100 de +3,4°C sur les continents et de +7°C en arctique (850 ppm d'éq. CO₂), avec des conséquences très graves : intensification des pluies à l'équateur, augmentation des déserts ailleurs et effondrement des rendements des céréales tropicales, problème généralisé de l'eau, dépérissement des arbres, épisodes extrêmes turbulents avec longs épisodes de sécheresse, élévation du niveau des mers au-delà du mètre, avec déplacement de plusieurs centaines de millions de personnes (l'inlandsis du Groenland s'écoule beaucoup plus vite que prévu).

- Depuis 1990, la perturbation de température a été augmentée de+24%, dont 80% due au CO₂, et celle du taux de CO₂ de +34% (380 ppm aujourd'hui). Deux solutions se présentent : soit mettre en place des stratégies d'adaptation, soit maîtriser les émissions, mais il est très difficile d'inventer un autre mode de vie.

Il est urgent de statuer mondialement sur le niveau de CO₂ acceptable pour l'humanité.

compléments et réactions à cet article
Sur www.centrale-energie.fr

Dates à retenir

Par Christiane DREVET (ECN 65)

14 janvier 09	Les déchets nucléaires, avec le groupement «techniques avancées nucléaires» de l'AECP, rue Jean GOUJON
11 février 09	Eco-Quartiers, ASIEM
11 mars 09	Stockage de l'énergie, piles et batteries, ASIEM
8 avril 09	Ouverture des marchés de l'électricité et du gaz, avec les groupements « électricité et thermique » et « gaz » de l'AECP (report de décembre 08)
13 mai 09	Energie-bois, ASIEM
10 juin 09	Transports durables, ASIEM

Les lieux et le mode d'inscription sont précisés sur l'invitation, insérée au site www.centrale-energie.fr, un mois avant chacune des conférences

**Au sommaire du prochain numéro (mars 2009)
Pompes à chaleur – prix du pétrole brut – Fiche de lecture – Etats généraux de l'automobile française – Dates à retenir**

Rédacteur en chef, mise en page : Etienne PESNELLE (ECP 86)
Rédactrice-adjointe : Christiane DREVET (ECN 65)

© CENTRALE ENERGIE 2009 - FLASH N°9 - janvier 2009 - page 5