



Arxiu històric FUNDACIÓ JAUME BOFILL

Les filieres de photopiles et leur avenir

Groupe Energie Solaire
LPHNE Ecole Polytechnique

GENER 1979

FUNDACIÓ
Fundació
JAUME
Jaume
BOFILL
Bofill

LES FILIERES DE PHOTOPILES ET LEUR AVENIR

M. RODOT et A. DUPAS (PIRDES)

A. LLORET - LPNHE Ecole Polytechnique - PALAIS



8

1. Introduction

L'électricité est à la fois une forme d'énergie ayant de nombreux usages spécifiques (fourniture de travail, éclairage, etc.), et un vecteur énergétique largement utilisé. En 1975 en France, elle représentait 24% de l'ensemble des vecteurs-énergétiques et ses usages spécifiques constituaient 12% de la consommation d'énergies finales. C'est pour ces raisons que la production d'électricité à partir de l'énergie solaire est fondamentale pour l'avenir économique de celle-ci. Cette production peut s'obtenir de deux manières . D'une part, en passant par l'intermédiaire de chaleur à moyenne ou haute température, et de machines thermiques.

(D'autre part, par la voie directe de la conversion photovoltaïque dans des photopiles.

Ces dernières sont des composants électroniques à semi-conducteurs qui, éclairés par le rayonnement solaire, développent une force électromotrice (environ 0,5 V par cellule) capable de débiter un courant dans un circuit extérieur. Par rapport aux générateurs thermo-hélioélectriques, les générateurs photovoltaïques ont à priori certains avantages : fonctionnement à basse température, absence de pièces mobiles, utilisation de l'ensemble du rayonnement solaire parvenant au sol, et non seulement du rayonnement direct. Cependant, ce sont essentiellement des facteurs économiques (les coûts du kilowatt nominal installé et de l'électricité produite) qui décideront de l'avenir respectif des voies photovoltaïque et thermo-hélioélectrique, et plus généralement de la pénétration de l'électricité solaire aux différents niveaux du marché de l'électricité : petites alimentations autonomes (gamme de quelques kW), générateurs pour centres urbains isolés (100 kW à quelques MW, en concurrence avec les diesels),

électricité en heures de pointe pour réseaux (jusqu'à 100 MW), électricité de base (concurrence des centrales au fuel et nucléaires).

1.1 La situation actuelle

Actuellement sont commercialisés des panneaux de photopiles dont le matériau photosensible est le silicium monocristallin et la barrière de potentiel est constituée par une jonction p-n. Recevant perpendiculairement à leur surface le rayonnement solaire filtré par l'atmosphère, ils développent une puissance (dite puissance-crête) de 120 à 140 watts par m² de surface "utile" (surface occupée par les cristaux de silicium) pour un rayonnement nominal de 1 kW/m². Leur rendement est donc de 12 à 14 % ; d'autre part leur coût est de 50 à 100 F/watt-crête suivant les conditions industrielles et commerciales de production et leur fiabilité excellente (durée de vie probablement supérieure à 10 ans) grâce à la protection de deux plaques (de verre, en général) entre lesquelles les cellules au silicium sont hermétiquement scellées. La production mondiale, d'environ 2 mégawatts-crête par an (2MW/an) est principalement destinée à des générateurs électriques autonomes pour les télécommunications, le pompage de l'eau et d'autres dispositifs appelés à fonctionner en région isolée, ainsi que pour des opérations de démonstration. (Les photopiles pour applications spatiales, très différentes, ne sont pas discutées ici).

La capacité de production française (Radiotechnique - Compelec) est environ 1/10 de la production mondiale ; cette production se situe au plus haut niveau de qualité et dans la gamme supérieure des prix cités plus haut (à cause de la faible capacité de production) ; elle est exportée à plus de 95 %.

Ce secteur spécial, à la rencontre entre l'électronique et l'énergétique, se distingue par une dynamique industrielle remarquable : la production fait plus que doubler chaque année. La poursuite de cette croissance dépend en partie des perspectives d'amélioration du rende-

ment et du coût, dont la discussion fait l'objet du présent article. Elle dépend aussi de considérations politiques, à savoir la volonté plus ou moins affirmée de développer cette nouvelle source d'énergie (faisant partie des énergies "renouvelables"), et des moyens mis au service de cette politique.

Les Etats-Unis s'engagent dans un effort important : la loi Mac Cormack, votée et signée en 1978, prévoit que la production sera de 2000 MW-crête/an en 1988, au coût de 5F/W pour le générateur photovoltaïque complet (comprendant, outre les photopiles, les systèmes de conversion, stockage et régulation), et réserve à cette fin des crédits fédéraux de 750 millions de francs (MF) par an pendant 10 ans.

L'Italie et l'Allemagne ont également mis au point un programme national pluriannuel ; la Communauté économique européenne prépare un programme de recherche-développement pour 1979-83 d'environ 45 MF/an. La France, de son côté, dépense environ 70 MF/an à ce thème.

1.2 Les voies d'abaissement des coûts

Dans ces divers programmes, trois voies sont poursuivies pour abaisser le prix des photopiles. La première est la réduction des coûts des photopiles au silicium, par l'effet de production en série et le développement de nouvelles technologies d'élaboration. La seconde voie est la conception et la mise au point de photopiles à très haut rendement (plus de 20 à 30%), chères à l'unité de surface mais pouvant être utilisées sous forte concentration du rayonnement solaire. Enfin, la troisième voie est la réalisation de photopiles de rendement relativement faible (environ 10%), mais très économique à l'unité de surface. Nous allons examiner ces trois voies, avant de considérer le problème du coût des générateurs solaires complets, et des chances respectives des diverses filières considérées.

2. Les Photopiles au Silicium

Les photopiles au silicium ont des possibilités d'augmentation de rendement (18 % ont été atteints en laboratoire), mais surtout de baisse de coût. Dans le coût des panneaux entrent aujourd'hui : pour 40 % l'élaboration du matériau, pour 30 % la technologie de la photopile, pour 30 % l'assemblage des piles en panneaux. On peut chercher, soit à perfectionner ces trois opérations, soit à modifier plus profondément la conception de la cellule, sans renoncer à son mérite principal : son rendement élevé. Pour cela plusieurs voies sont possibles.

2.1 - Diminution de coût du matériau

Le matériau actuel est le silicium monocristallin, produit par les opérations suivantes : réduction de la silice, donnant un Si impur, chloruration de ce Si et distillations successives des chlorures, réduction par l'hydrogène des chlorures purifiés pour donner un Si polycristallin pur, fusion de ce Si et tirage (méthode Czochralski) d'un lingot de monocristal de diamètre 50 à 100 mm, sciage de ce lingot en tranches d'épaisseur 0,3 à 0,5 mm. Plusieurs variantes sont étudiées :

a) Amélioration du tirage et du sciage des lingots

On peut accroître le rendement-matière du tirage, et diminuer largement le coût de cette opération, en accroissant le diamètre des lingots. Celui-ci pourra sans doute atteindre 15 cm, et chaque monocristal obtenu pourra peser plus de 30 kg. L'emploi de scies plus fines et multiples pourra diminuer les pertes au sciage et la durée de cette opération. Un gain de coût d'un facteur 3 ou 4 est vraisemblable.

b) Filière du Si en rubans

Différents procédés ont été mis au point pour tirer le Si, non pas en lingots, mais en plaquettes minces, directement utilisables pour fabriquer les photopiles. Par exemple, celui du "tirage en filière" de Tyco (USA) conduit à des rendements possibles de 10 % - la qualité du cristal n'étant pas excellente - et celui des "dendrites" (Westinghouse) aurait déjà permis d'atteindre 15 %. Selon certains, le coût de ce Si pourrait être 10 fois moins cher que celui d'aujourd'hui.

c) Chimie du Si

Le matériau actuel, destiné principalement à la microélectronique (circuits intégrés), pourrait être moins purifié pour les photopiles, dont les seuils de tolérance de certaines impuretés sont plus élevés. On peut imaginer des procédés entièrement différents, basés sur la simple réduction de la silice par le carbone très pur, ou sur la valorisation de sous-produits inutilisés de l'industrie chimique (fluorures) ou encore sur une purification simplifiée (par électrolyse par exemple). Toutefois les impuretés risquent d'agir négativement sur le tirage du monocristal, de sorte que l'emploi de ce Si impur n'est guère envisageable qu'en liaison avec celui de polycristaux discuté maintenant.

d) Filière du Si polycristallin

On peut enfin se proposer de relaxer largement l'exigence de perfection physique des cristaux. En effet il suffit que la taille des cristaux soit grande devant la longueur de diffusion des électrons (une fraction de mm dans le Si) dans la direction de circulation de ces derniers, c'est-à-dire perpendiculairement à la jonction p-n. Dans les autres directions les cristaux peuvent être très petits sans que le rendement décroisse. On a pu atteindre des rendements élevés sur des polycristaux obtenus par simple solidification dirigée de Si liquide : 10 % par A.E.G. (Allemagne) dès 1976, 15 % par Solarex (USA, 1978). Le LEP (France) a atteint en 1977 le rendement honorable de 8 % au moyen de couches minces ($100\ \mu\text{m}$ par exemple) obtenues sur des rubans de graphite trempés dans du Si liquide : procédé plus ambitieux (économie de matière mais moins aisé à mettre en oeuvre à cause de la présence de carbone dans le Si).

Bien qu'on connaisse peu de choses sur l'effet des ségrégations d'impuretés aux joints de grain, on peut dire que ces procédés tolèrent mieux les impuretés que le tirage de monocristaux. Dès lors la simplification des aspects tant physique que chimique de la production du silicium permet d'envisager à terme des baisses de coût considérables, d'un facteur 10 à 20 par exemple.

2.2 - Diminution de coût de la technologie des photopile

Des progrès sont nécessaires sur ce plan si l'on veut tirer un profit notable de ceux qui seront obtenus sur le matériau. La méthode actuelle est fondée sur la diffusion de phosphore dans le Si-p à partir d'une phase gazeuse et sur la formation de contacts

par évaporation de couches métalliques (Ti - Ag), auxquelles il faut ajouter plusieurs opérations d'attaque chimique sélective, classiques en technologie des composants ainsi que la formation d'un revêtement antirélecteur superficiel.

a) Progrès sur la formation des contacts

Une première phase, en cours dans plusieurs laboratoires (notamment R.T.C. en France) consiste à remplacer l'évaporation par la sérigraphie, beaucoup moins coûteuse. La difficulté d'obtenir simultanément de bonnes propriétés d'ohmicité, de soudabilité et d'adhérence des contacts métalliques pourra sans doute être surmontée.

b) Progrès sur la formation des jonctions

A la recherche de procédés plus rapides et plus facilement automatisables que la diffusion, le Centre de Recherches Nucléaires du C.N.R.S. à Strasbourg et d'autres laboratoires étudient activement la recristallisation superficielle du Si soumis à l'éclair d'un laser, après qu'une impureté dopante ait été apportée soit par évaporation d'une couche métallique, soit par incrustation d'ions provenant d'un plasma ou d'un jet de petites particules (agrégats). Dans ces techniques, au contraire de a), on prend son parti de la nécessité d'opérations sous vide, mais on vise à réaliser ces opérations par une chaîne continue, en profitant de ce que la formation d'une jonction ne demande que 10 secondes, au lieu de plusieurs heures par diffusion. Des variantes tendant à remplacer les jonctions p-n par des jonctions Si-métal ou Si-isolant-métal ont été étudiées, mais sans améliorer le rendement ni le coût.

Il est trop tôt pour évaluer les baisses de coût que permettront les progrès a) et b) ci-dessus. On ne connaît pas non plus leur compatibilité avec l'emploi de Si polycristallin. Mais il est raisonnable d'être optimiste à ce sujet, et de présumer la possibilité de baisses de coût d'un facteur 5 à 10.

2.3 - Diminution de coût de la technologie d'encapsulation

Cette dernière étape technologique, par contre, risque fort d'être le "point dur" de la progression vers des panneaux plus économiques. Si l'on refuse de sacrifier la fiabilité de ces panneaux, il faut en effet maintenir l'encapsulation entre deux

.../7

plaques de verre (à la manière des pare-brises de voitures), de même que restent indispensables les fils de connexion, les diodes de protection etc... L'emploi de photopiles de grande surface (diamètre 10, puis peut-être 15 cm) pourra faire baisser le coût de cette étape, au maximum d'un facteur 2. L'emploi de cellules polycristallines, qui peuvent être carrées au lieu d'être rondes, est également une source indirecte de progrès à cause de l'amélioration du coefficient de remplissage des panneaux.

Il résulte des § 2.1, 2.2 et 2.3 que, dans quelques années (1985 ?), les photopiles au silicium vaudront certainement moins de 15 F/W crête, avec une ventilation sans doute largement modifiée (par exemple : 20 % pour le matériau, 20 % pour la technologie, 60 % pour l'encapsulation). Leur coût se situera-t-il à 15, 10 ou 5 F/W en 1985, ce dernier chiffre se rapprochant de l'objectif retenu par la loi Mc. Cormack ? Pour répondre à cette question, il faut non seulement examiner, comme on l'a fait ci-dessus, les modifications possibles des technologies, mais aussi évaluer l'effet de la croissance de la production sur la baisse des prix. Avant de le faire, nous discuterons les autres voies d'abaissement des coûts.

3. Concentration et filières à très haut rendement

3.1 - Emploi de la concentration du rayonnement solaire :

Un système assurant un facteur de concentration γ permet de réduire la surface des photopiles d'un facteur du même ordre, mais cependant inférieur à γ dans la plupart des climats. Le coût du générateur photovoltaïque se trouvera réduit d'un facteur important puisque les photopiles en sont aujourd'hui l'élément le plus cher (75 à 90 % du coût). Toutefois ce facteur est largement inférieur à γ pour deux raisons : l'adjonction nécessaire du système de concentration et le fait que les photopiles adéquates sont plus chères que les cellules ordinaires.

Discutons d'abord ce dernier point. Pour γ compris entre 20 et 100, on peut utiliser des photopiles au silicium différant des cellules ordinaires ($\gamma=1$) seulement par une optimisation plus exigeante : résistance série abaissée donc connexions métalliques plus rapprochées, soudure sur une embase métallique permettant l'évacuation des calories. Cependant, on tend à leur imposer un rendement plus élevé (donc sélection plus sévère) parce que leur coût relatif dans l'ensemble du générateur est plus faible.

.../...

Avec certains types de concentrateurs, la forme des cellules et leur mode d'encapsulation doivent être adaptées au cas particulier considéré. Dans l'ensemble, on peut justifier un prix de cellule de 2 à 3 fois plus élevé que pour $\chi = 1$.

Toutefois la réalité peut être bien différente, pour des raisons autres que techniques : il est commercialement plus avantageux pour les fabricants de photopiles de vendre N photopiles au Silicium au coût x, utilisées sans concentration ($\chi = 1$), que de vendre N/50 photopiles au coût 3x associées à des concentrateurs donnant $\chi = 50$ (construits par d'autres industriels !). C'est pourquoi ce marché reste encore petit. Cette situation n'est que provisoire.

A long terme, cette "filière" peut encore progresser par l'introduction de photopiles de très haut rendement (de 20 à 40%), pouvant travailler sous des concentrations très élevées (plusieurs centaines). Le rendement important permet de réduire la surface de captation (et donc le coût du support) et la valeur élevée de χ réduit l'influence du prix de la photopile sur le prix de générateur. D'où la possibilité d'accepter des photopiles chères.

3.2 Filières à très haut rendement

3.2.1 - Filière à l'arséniure de gallium

Ce semiconducteur est le seul qui ait permis de construire des photopiles de rendement plus élevé que le silicium : 22 % avec une jonction p-n de GaAs sur laquelle a été déposée une "fenêtre" d'alliage $\text{Ga}_{0,2}\text{Al}_{0,8}\text{As}$ (nécessaire pour atténuer les effets néfastes de la recombinaison des électrons en surface du GaAs). Cette réalisation, initialement due à IBM (USA), présente peu d'intérêt pratique car les cellules au GaAs sont au moins 10 fois plus chères que les cellules au Si, sauf toutefois dans deux cas éventuels :

- l'emploi des cellules GaAs sous très forte concentration ($\gamma = 500$ à 2000) car on a pu montrer (notamment Vanrihan aux USA) qu'elles conservaient alors un rendement élevé, même si on tolérait une élévation de température notable (jusqu'à 200 °C) ;
- l'application spatiale de ces cellules.

3.2.2 - Filières à adaptation spectrale

Nous citons ici certaines filières encore hypothétiques, mais peut-être intéressantes :

- les systèmes à conversion de fréquence, visant à mieux adapter les cellules au rayonnement qu'elles reçoivent : cellule revêtue d'un matériau photoluminescent, ou encore cellule recevant le rayonnement d'un corps noir chauffé par le rayonnement solaire

concentré (effet "thermophotovoltaïque") ;

- les systèmes "multicolores", qui peuvent revêtir deux formes : plusieurs cellules recevant, en parallèle, différentes bandes spectrales du rayonnement solaire ; ou une seule photopile composée de plusieurs cellules recevant en série le rayonnement solaire et constituées de matériaux à largeurs de bande interdite successivement décroissantes. Un tel système, optimisé, pourrait avoir un rendement de conversion de 50 % dans le cas de 3 cellules mais à quel prix ?

Depuis une vingtaine d'années, on cherche à mettre au point des photopiles basées sur des matériaux et des technologies moins coûteux que ceux des photopiles au Si, même si leur rendement doit être moins élevé. Cette voie s'inspire, non plus des composants de la microélectronique, mais des dispositifs photoélectriques ou électroluminescents utilisant des semiconducteurs pulvérulents en couches minces : les cellules photovoltaïques au Se datant du siècle passé, les photorésistances au sulfure de cadmium ou les systèmes à base de sulfures complexes utilisés pour les écrans de télévision sont des exemples de dispositifs de conversion lumière-électricité utilisant des semiconducteurs peu coûteux.

Dans cette voie s'inscrivent deux filières principales.

4 ..1.- Filières au sulfure de cadmium

La première mention des photopiles au sulfure de cadmium date de 1954, comme celle des photopiles au silicium. A travers de constants progrès, cette voie a donné naissance à des cellules dont l'élément photosensible est le sulfure de cuivre, et la barrière de potentiel une hétérojonction entre Cu_2S et CdS. Ces deux matériaux sont obtenus en grains fins par des techniques très simples, mettant en jeu l'évaporation sous vide et les réactions chimiques en phase liquide. Le rendement record atteint aujourd'hui 9 % (Université du Delaware), et même peut-être 11 % (IIT, Dehli). Malgré des progrès récents, la stabilité de ces cellules laisse cependant à désirer. Si des productions en laboratoire-pilote existent aux Etats-Unis, aucune commercialisation n'a été amorcée.

4 - 2 Filière au silicium amorphe

Beaucoup plus récemment (1976-77) a été montrée la possibilité de photopiles utilisant comme matériau photosensible les alliages amorphes silicium-hydrogène (a-Si : H) découverts à l'Université de Dundee (Grande-Bretagne). Ce type de matériau, dont l'étude ne fait que commencer, peut être produit par des procédés peu coûteux tel que la pulvérisation cathodique, et la décomposition dans un plasma de silane. L'hydrogène associé au a-Si joue un rôle qui apparaît essentiel: il détruit les défauts par une liaison covalente entre une liaison

libre et un hydrogène atomique. Il s'agit d'une découverte importante qui peut avoir des développements intéressants dans l'avenir. Un effort de recherche particulier a été entrepris dans ce domaine. Il concerne les conditions de fabrication des dépôts, la caractérisation des couches (optique, structure de bande, états localisés, photoconductivité) et les dispositifs (diodes Schottky, structures MOS). A l'état actuel on obtient des dépôts de a-Si : H avec une densité d'états localisés de $\sim 10^{18}/\text{cm}^3$ (contre $10^{20}/\text{cm}^3$ pour le a-Si), un signal RPE $< 10^{16}/\text{cm}^3$ ($\geq 5 \cdot 10^{19}/\text{cm}^3$ pour le a-Si) et une photoconductivité $\sim 10^3 \cdot I$ obscurité alors qu'elle est très faible pour le a-Si. Le rendement de photopile est de l'ordre de 5%.

4.3 - Filières diverses

En dehors de ces deux cas principaux, il existe de multiples possibilités de photopiles à bas coût et à rendement médiocre. Certaines peuvent avoir un avenir intéressant.

Par exemple on pourra peut-être produire en couches minces des photopiles utilisant des composés photosensibles divers dont la valeur a déjà été démontrée en monocristaux mais dont le coût est alors trop élevé : CdTe ou InP, dont les hétérojonctions avec CdS ont permis d'atteindre un rendement de 12 %.

Peut-être même pourra-t'on s'intéresser un jour aux photopiles en semiconducteurs organiques, dont le record de rendement est inférieur à 1 % à cause de leurs mauvaises propriétés de transport électronique.

Une récente publication (E. BUCHER, Appl. Phy. 17 (1978) p. 1-25) a recensé 228 types de photopiles décrites dans la littérature, dont 76 utilisent le Si, 47 des composés III - V comme GaAs, 39 des composés II - VI comme CdS, 52 d'autres composés inorganiques et 14 des semiconducteurs organiques. Mais il est parfaitement suffisant, pour discuter l'avenir des photopiles à terme de 10 ans, de se limiter aux filières décrites par les § 2.1 à 4.2.

5. Analyse du coût des générateurs photovoltaïques

5.1 Notion de prix du "kW nominal"

En dehors des photopiles, un générateur photovoltaïque comprend :

- le support et les connections des cellules,
- une batterie pour stockage,
- un convertisseur fournissant du courant alternatif utilisable.

A partir du moment où on considère le système photovoltaïque dans son ensemble, la notion de puissance de crête, et, de coût par "kW-crête" perd beaucoup de son intérêt. La donnée importante est alors la puissance nominale que le générateur peut fournir pendant une fraction F de la journée (taux d'utilisation, par exemple, estimé à 40%), en partie en dehors des heures d'ensoleillement (grâce au stockage). La puissance nominale est pour plusieurs raisons très inférieure à la puissance de crête : il faut considérer la valeur moyenne de l'insolation, et non sa valeur maximale de 1 kW/m^2 environ ; la batterie et le convertisseur ont des rendements inférieurs à l'unité.

En définitive, le prix P du "kW nominal" installé peut se mettre sous la forme :

$$P = \frac{F}{f \eta_c \eta_p} \left(\frac{x}{\gamma} + y \right) + N.S. + C$$

avec : F = taux d'utilisation (%)

f = coefficient d'isolation moyenne (rapporté à 1 kW/m^2)

η_c = rendement de l'ensemble stockage-conversion

η_p = rendement photopile

x = prix de l'unité de surface des photopiles (F/m^2)

γ = facteur de concentration

y = prix du support (F/m^2)

N = nombre d'heures de stockage (à la puissance nominale)

S = coût du stockage (F/kWh)

C = coût du convertisseur (F par kW nominal)

5.2 Prix des générateurs actuels (1980)

5.2.1 Cas des générateurs sans concentration

Pour un climat méditerranéen ($f = 0,2$), un taux d'utilisation F de $0,4$ et un stockage de 6 h, le prix du kW nominal installé pour un générateur à photopiles silicium ($x = 10000$ F/m², correspondant à 80 F/W crête, $\eta_p = 12\%$), sans concentration ($\gamma = 1$), atteint 320000 F. Cette valeur est obtenue en prenant $S = 1400$ F/kWh (stockage), $C = 1800$ F/kWh (conditionnement), $y = 500$ F/m² (support), $\eta_c = 60\%$.

Dans ce coût caractéristique, les panneaux de cellules entrent pour $300\ 000$ F (93%), la partie support pour 14000 F (4%), et la partie stockage-conversion pour 10000 F (3%). Cette répartition des coûts est essentielle pour la discussion ultérieure de l'évolution des prix.

On remarque en outre que le coût du kW nominal installé est plus de trois fois supérieur au coût du kW-crête des photopiles.

5.2.2. Cas de la concentration

Les générateurs à concentration n'utilisent que le rayonnement solaire direct, mais ils compensent ce désavantage par rapport aux générateurs à panneaux plans grâce au suivi du soleil qui leur est inhérent. Dans les deux cas, le coefficient d'insolation utile f est donc pratiquement le même. Le stockage et le conditionnement de l'électricité ne font pas davantage de différence. Restent donc comme facteurs déterminant l'intérêt (ou le manque d'intérêt) de la concentration, le prix par unité de surface des photopiles x , le rapport de concentration γ , et le coût du support y .

Actuellement, le prix d'un héliostat à concentration est d'environ 1500 F/m², et pour une concentration γ de 50 , on va bientôt pouvoir disposer de photopiles spéciales au silicium au prix de 50000 F/m² (5 fois le prix des photopiles normales). Dans les conditions définies au paragraphe précédent, on arrive alors à un prix de $80\ 000$ F/kW nominal installé, soit 4 fois moins que pour les générateurs à panneaux plans. La part "photopiles" ne représente que 35% de l'ensemble.

Les générateurs à concentration ont donc un net avantage sur les générateurs à panneaux plans, au prix des photopiles en 1979. Mais cet avantage est très théorique, car le temps que ces générateurs (aujourd'hui au stade de prototype) soient produits en série (1980 ?), le coût des photopiles au silicium pour panneaux plans, risque d'avoir baissé suffisamment (un facteur 4 environ) pour l'annuler en grande partie. Cette remarque ne condamne cependant pas la concentration. Comme nous l'avons déjà souligné, celle-ci ne verra son intérêt jouer vraiment à plein qu'avec des photopiles à haut rendement, sous une concentration élevée.

6. Perspectives d'évolution des coûts

Compte tenu de l'avance prise par le développement des générateurs à panneau plan de photopiles au silicium, il est clair que ces générateurs constitueront la référence par rapport à laquelle sera jugée, à la fois sur le plan du coût et de la fiabilité, la concentration et l'emploi de photopiles à bas coût. C'est donc par eux que nous commencerons notre analyse.

6.1. Cas des générateurs plans à photopiles silicium

Les photopiles représentent aujourd'hui plus de 50% du coût du kW-nominal de ces générateurs. L'abaissement de leur prix va ainsi être le facteur déterminant. Les objectifs américains sont connus : 0,5 \$ le W crête en 1986, contre 18 \$ environ en 1978 (il s'agit de l'objectif du Department of Energy -DOE- avant le vote de la loi Mc Cormack ; celle-ci est encore plus ambitieuse, puisqu'elle évoque un prix de 0,6 \$ le W installé pour 1986, mais son énoncé est ambigu car il ne spécifie pas ce qu'elle entend par "W installé" ; c'est pourquoi nous préférons en rester à l'objectif portant sur le W crête). Cet objectif est-il pour autant raisonnable ? Il correspond à une réduction de prix de 40% par an, soit, compte tenu des objectifs de production annoncés par le DOE (500 MW crête en 1986), à un coefficient d'apprentissage extrêmement élevé de 0,7. Il nous paraît plus raisonnable de tabler sur un coût de 2 \$/W crête en 1986, avec un rendement du panneau de photopiles silicium porté à 14% (contre 12% actuellement), soit $x = 1350 \text{ F/m}^2$. La valeur de 1 \$/W crête peut être considérée comme une limite accessible pour les photopiles silicium vers 1990/1995.

Cela étant, la chute très rapide attendue pour le coût des photopiles se traduira par un accroissement de la part relative des autres éléments (support, batterie, conditionnement) dans le prix total du générateur. D'où l'importance de réduire le plus sensiblement possible le coût de ces éléments. D'ici 1986, il est raisonnable de prévoir des progrès importants, du fait que l'on n'a peu cherché jusqu'à présent à optimiser les fonctions de stockage et de conditionnement. Avec $S = 600 \text{ F/kWh}$, et $C = 700 \text{ F/kWh}$, et un rendement de stockage-conditionnement porté à 80% (ce qui paraît un maximum), le prix du kWh nominal installé en 1986 serait de 33 000 F (en supposant pour le support un coût $y = 250 \text{ F (m}^2\text{)}$, réduit de moitié par rapport à aujourd'hui).

Si ces hypothèses sont vérifiées, on assisterait donc à une réduction de prix d'un facteur 10 entre 1978 et 1986. Par la suite, il serait sans doute encore possible de gagner un facteur 2 pour ces générateurs plans à photopiles silicium, mais guère plus. Il paraît en effet difficile de descendre en dessous de $y = 100 \text{ F/m}^2$ pour le prix du support (c'est le coût d'une serre de très grande superficie), de $S = 200 \text{ F/kWh}$ pour le stockage, de $C = 300 \text{ F/kWh}$ pour le conditionnement, et d'avoir un rendement du panneau de photopiles supérieur à 15%. Dans ces conditions, avec un prix de 1 $\$/W$ crête pour la photopile, on trouve un coût de 14 000 F/kW pour le kW nominal installé, que l'on peut considérer comme une limite vraisemblable vers 1990/95. Si l'objectif américain de 0,5 $\$/W$ crête pouvait finalement être atteint, cette limite descendrait à 8500 F/kW nominal.

6.2. Cas de la concentration

Compte tenu de l'évolution envisageable pour le coût des générateurs plans à photopiles silicium (300 000 F/kW nominal, 30 000 en 1986, 14 000 et peut-être 8 500 vers 1990/95), les générateurs à concentration moyenne ($\gamma = 50$) et photopiles silicium cesseront d'être compétitifs vers 1982-83. Mais quel avenir aura alors le couplage haute concentration ($\gamma = 400$) et filières haut rendement ? Tout dépend du prix x des photopiles, et du coût y du support avec sa double fonction d'orientation et de concentration. En 1986, on peut espérer réduire y à 1000 F/m^2 . Avec $\eta_p = 20\%$ (des photopiles As Ga), la compétitivité avec les générateurs plans serait assurée dès lors que x ne dépasserait pas $300\,000 \text{ F/m}^2$ (6 fois le prix actuel des photopiles

silicium sous concentration). Cette condition semble raisonnable. Mais de toute façon, même si elle était très largement satisfaite, l'avantage en faveur de la concentration resterait faible : le prix du générateur "hors-photopiles" atteint déjà 20 000 F/kW nominal contre 33 000 pour l'ensemble du système à panneau plan, dans les hypothèses que nous avons prises pour 1986.

Qu'en est-il à l'horizon 1990/95 ? On peut alors espérer $\eta_c = 30\%$ (cellules multicolores) et $y = 700 \text{ F/m}^2$. Le coût "hors photopile" atteint alors déjà 7 500 F/kW installé. Avec $\gamma = 400$, la compétitivité est encore obtenue pour x inférieur à $300\,000 \text{ F/m}^2$, si le prix des photopiles au silicium est de 1 $\$/W$ crête, mais elle est pratiquement impossible à atteindre si le coût de ces photopiles descend à 0,5 $\$/W$ crête.

Au mieux, le créneau de succès des générateurs à concentration, avec des photopiles à haut rendement, apparait bien étroit. Compte tenu de leur complexité plus grande, et de leur coût de maintenance vraisemblablement plus élevé (à cause des parties mobiles), ces générateurs ont peu de chance de percer face aux dispositifs à panneaux plans. Ceci, du moins, si les objectifs visés pour le prix des photopiles au silicium sont atteints. Dans le cas contraire, la concentration aurait un avantage certain. D'une certaine manière, on peut dire que le développement des générateurs à concentration et des filières à haut rendement est une assurance contre un échec éventuel de l'abaissement radical des coûts des filières silicium.

6.3. Cas des filières à bas coût

Pour les générateurs à panneau plan faisant appel aux photopiles à bas coût, le problème se pose en des termes simples : l'accroissement de la surface, et donc du coût du support, conséquence du rendement plus faible, ne contrebalance-t-il pas le gain sur le coût des photopiles ? Il paraît impossible de descendre en dessous de 130 F/m^2 (prix d'une plaque de verre double) pour une photopile encapsulée. Ce prix correspond à 0,2 $\$/W$ crête, objectif le plus ambitieux du DOE pour les années 90. Pourtant il ne conduira à des générateurs compétitifs avec ceux aux photopiles silicium que si le rendement η_p dépasse une valeur minimum : 5% si les photopiles

.../...

silicium valent 1 \$/W crête ; 9% si elles ne valent que 0,5 \$/W crête. Cela évidemment à l'horizon post-1990, qui est le seul auquel ces filières puissent déboucher sur des applications économiques à grande échelle.

Là encore, la marge de succès est étroite, et dépend fortement des résultats ultimes obtenus avec les photopiles au silicium. Si ces résultats sont bons, (1 \$/W crête), il est clair que seules des filières atteignant 10% de rendement perdront un avantage suffisamment décisif, et s'ils sont très bon (0,5 \$/W crête), l'avenir paraît difficile pour les filières à bas coût.

7. Problème de la pénétration sur le marché

Compte tenu de l'existence de trois voies distinctes d'abaissement du coût des générateurs photovoltaïques, il paraît raisonnable d'escompter l'apparition sur le marché de générateurs au prix de l'ordre de 30 000 F/kW nominal vers 1986, et de 10 000 F/kW nominal vers 1990/95. Ces prévisions reposent cependant sur l'hypothèse d'un large développement de la production des photopiles et des générateurs, production qui selon le DOE devrait atteindre 500 MW crête en 1986 (correspondant à une surface de 330 ha de cellules à 15% de rendement), et de 10 000 à 50 000 MW entre 1990 et 2000 (6600 ha à 33 000 ha de surface totale). A titre de comparaison, la puissance crête de 50 000 MW correspond à celle de 50 tranches nucléaires.

Le problème est de savoir si la demande sera suffisante pour stimuler cette croissance et l'abaissement des coûts correspondant, ou si l'offre devra être poussée artificiellement par le biais de subventions aux industries, d'achats obligés des secteurs publics, ou d'incitations aux acheteurs (fiscales ou autres). Il est impossible de répondre avec certitude à cette question, mais il est très probable qu'un minimum de soutien et d'incitation sera nécessaire. Les votes de la loi Mc Cormack aux Etats-Unis, et de la loi sur : "la promotion et le développement des technologies pour l'utilisation des sources renouvelables d'énergie" vont manifestement dans ce sens volontariste.

Cela étant, il est clair que l'élargissement du marché des générateurs photovoltaïques passe par le franchissement de deux grandes étapes. La première est la compétitivité avec les générateurs diesels. Il est difficile de situer son niveau, compte tenu des incertitudes sur le prix à venir du fuel, mais une valeur de 2 F/kWh paraît un 1er ordre de grandeur.

Elle correspond à peu près à un prix du kW nominal de 40 000 F (avec un taux d'actualisation de 10%, une durée de vie de 10 ans et un coût de maintenance de 0,3 F/kWh), et pourrait donc être atteinte au milieu des années 80. La seconde étape est la compétitivité avec les sources d'électricité de pointe. Elle se situe en deça de 0,5 F/kWh, ce qui exige un coût de maintenance réduit (peut-être 0,15 F/kWh), et un prix du kW nominal inférieur à 10 000 F. Son franchissement est concevable, mais à la limite des possibilités évoquées dans ce texte.

En guise de conclusion, on peut dire qu'il faut actuellement poursuivre activement les travaux sur les voies d'abaissement des coûts (photopiles silicium, concentration + filières à haut rendement, filières à bas coût), en ayant bien conscience que les générateurs à concentration ne joueront un rôle important que si le développement du secteur photovoltaïque est moins rapide que prévu, et qu'inversement les photopiles en couche mince de bas coût ne deviendront intéressantes que si la demande s'accroît très vite (et si leur rendement devient suffisant). Entre ces deux extrêmes, la situation la plus probable est une prépondérance de la technologie des générateurs à panneau plan de photopiles silicium jusqu'à la fin du siècle.

Répartition sectorielle des engagements contractuels du programme français "photopiles solaires"

	1976		1977		1978		
	(DGRST + + ATP - KF (Kilofrancs)	CEE CNRS)	ATP CNRS	DGRST	ATP	DGRST COMES	CEE (approx.)
Cellules Si monocristal.	2 927		0	783	101	2 120	1 750
Concentration	580		0	1 163		1 202	1 550
Etudes systèmes	30		0	430		1 351	2 610
<u>TOTAL - Court terme</u>	<u>3 537</u>		<u>0</u>	<u>2 376</u>	<u>101</u>	<u>4 673</u>	<u>5 910</u>
Si polycristal	1 584		375	320	-	2 230	1 030
Si amorphe	0		295	749	302	663	430
III - V	1 065		80	380	-	240	0
II - VI	1 402		260	0	180	540	1 450
Autres	345		140	0	492	215	0
<u>TOTAL - Moyen terme</u>	<u>4 396</u>		<u>1 150</u>	<u>1 449</u>	<u>974</u>	<u>3 888</u>	<u>2 910</u>
T O T A L	7 933		1 150	3 825	1 075	8 561	8 820

Remarque : Les crédits du CNRS et de la DGRST n'incluent pas la rémunération des personnels scientifiques et techniques des organismes publics.