

Et les photopiles ?

par Anne JOUSSEN-LENOIR,
L.T. Jean-Macé, Vitry-sur-Seine.

1. QU'EST-CE QU'UNE PHOTOPILE (ou cellule photovoltaïque) ?

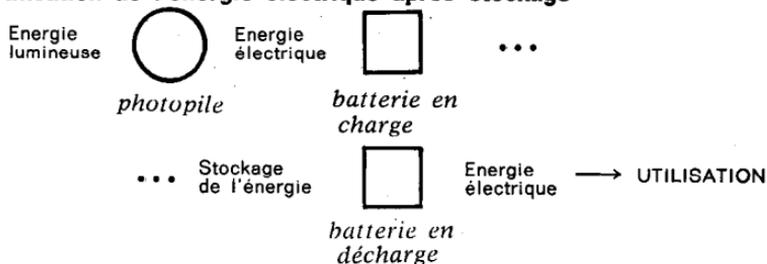
Ethymologiquement, c'est une « pile » qui fonctionne lorsqu'elle reçoit de la lumière (photo...). En réalité, c'est un système qui produit de l'électricité mais uniquement lorsqu'il est éclairé (et de façon convenable); il permet la conversion directe — et *instantanée* — d'énergie lumineuse (fournie par exemple par le Soleil) en énergie électrique. Ce n'est donc pas une pile, en ce sens qu'aucune énergie n'est stockée dans la cellule, ni sous forme chimique, ni sous aucune autre forme.

Aussi, si on désire pouvoir disposer d'électricité à tout moment, il est indispensable d'adjoindre à la photopile un système de stockage, sous forme d'accumulateurs chimiques, par exemple, de façon à utiliser cette photopile pendant tout le temps où l'éclairage est suffisant et à transformer l'excédent d'énergie électrique produit en énergie chimique (on « charge » des batteries). Cette énergie chimique accumulée pourra être, au moment voulu, transformée en énergie électrique (on « décharge » les batteries).

Utilisation directe de l'énergie électrique



Utilisation de l'énergie électrique après stockage



Les photopiles, aujourd'hui, sont constituées essentiellement de matériaux semi-conducteurs, corps simples (silicium ou germanium) ou composés chimiques (arséniure de gallium GaAs ou sulfure de cadmium CdS...).

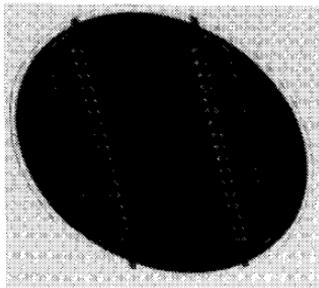
A partir de ces matériaux, on réalise une jonction $p-n$. Lorsque cette jonction est éclairée, des porteurs de charge sont rendus mobiles et sont entraînés spontanément vers le circuit extérieur (cf. Annexe 1).

Les photopiles au silicium étant les seules commercialisées à ce jour, ce sont elles que nous décrirons en premier lieu.

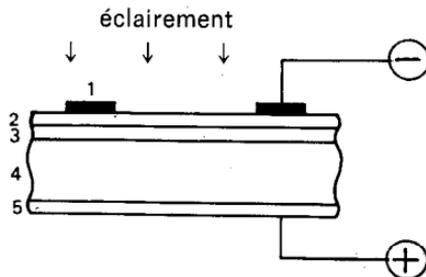
2. LES PHOTOPILES AUJOURD'HUI (photopiles au silicium).

Description :

Elles se présentent souvent sous la forme de minces disques à base de silicium monocristallin, de 3 à 10 cm de diamètre, et d'environ quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur.



Photographie d'une photopile



Vue en coupe de la photopile :

- 1 grille métallique (de faible résistance électrique),
- 2 revêtement antireflet,
- 3 zone dopée n (quelques millièmes de mm d'épaisseur),
- 4 zone dopée p ,
- 5 contact métallique.

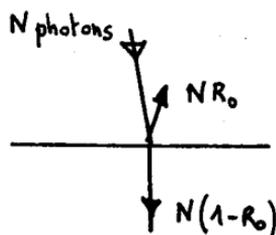
Le silicium est soit dopé au phosphore (zone n), soit dopé au bore (zone p). La face arrière est entièrement métallisée (dépôt d'aluminium) et est reliée à une des bornes du circuit d'utilisation.

Sur la face avant, une grille métallique (à base de titane et d'argent, recouverte parfois d'un alliage plomb-étain pour faciliter les soudures) sert à capter les photoporteurs. Elle est reliée à la 2^e borne du circuit d'utilisation. La surface qu'elle occupe doit être réduite pour occulter le moins possible la jonction.

Sur le reste de la face avant est disposé un revêtement anti-reflet (Al_2O_3 , TiO_2 ou Ta_2O_5) qui lui donne une couleur caractéristique.

Les pertes par réflexion peuvent être diminuées d'une autre façon par l'utilisation d'une surface « texturisée » (micro pyramides de 5 à 10 μm de hauteur). Dans ce cas, toute la lumière incidente est quasiment captée — d'où le nom de « photopile noire » donné à l'ensemble.

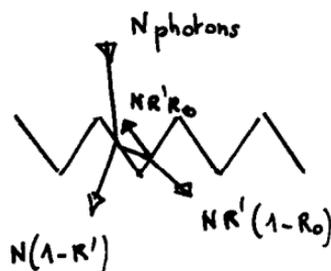
surface « normale »



$$T = N(1 - R_0) \text{ photons}$$

sont transmis

surface « texturisée »



$$R' \simeq R_0$$

$$T' = N(1 - R_0^2) \text{ photons}$$

sont transmis

Rendement :

On peut définir le rendement d'une photopile comme le rapport de la puissance électrique maximale fournie par la photopile à la puissance lumineuse incidente :

$$r = \frac{P_{el \max}}{P_I}$$

Ce rendement varie bien évidemment avec la composition spectrale du rayonnement incident. Même pour un rayonnement monochromatique, il ne peut être égal à 1 (tous les photons ne

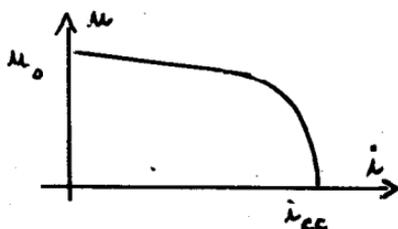
peuvent être efficaces ; une partie des électrons et des trous se recombine avant d'être utilisée...).

Pour les cellules au silicium, sous un éclairement solaire « optimal », le rendement théorique maximal de conversion est de 23 % (à température ambiante).

Les rendements obtenus à l'heure actuelle avec les photopiles au silicium commerciales varient entre 10 et 15 %, bien qu'en laboratoire, on ait pu atteindre 17 à 19 %.

Caractéristiques techniques :

La caractéristique la plus utile est la courbe $u(i)$ donnant, pour chaque valeur de la tension délivrée par la photopile, l'intensité du courant qu'elle délivre.



Cette caractéristique n'étant pas linéaire, la photopile, en toute rigueur ne peut être considérée ni comme un générateur à tension constante, ni comme un générateur à courant constant.

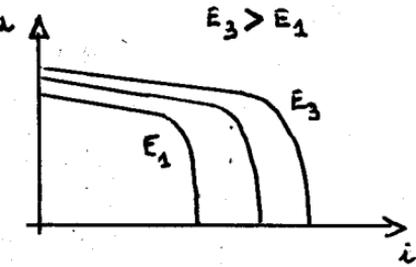
Les points remarquables de cette caractéristique sont les suivants :

- La tension à vide u_0 qui reste comprise entre 0,55 V et 0,6 V, quelles que soient les dimensions de la photopile.
- Le courant de court-circuit i_{cc} qui est sensiblement proportionnel à la surface de la photopile ; un ordre de grandeur est de 30 mA. cm⁻².

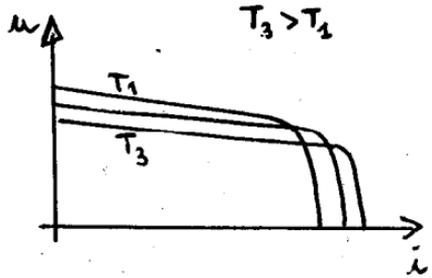
Cependant, la caractéristique de la photopile dépend de la température T de celle-ci et de l'éclaircement E incident. On doit donc considérer, pour chaque photopile, non pas une caractéristique unique mais les réseaux suivants (page 437).

Le constructeur donne souvent la caractéristique $u(i)$ correspondant à une température moyenne ($T = 25^\circ\text{C}$) et à un éclaircement moyen ($E = 1 \text{ kW.m}^{-2}$).

Parfois, il indique seulement les valeurs u_n et i_n correspondant au point de cette caractéristique où le produit ui est maximal (c'est dans ces conditions que la photopile délivre la puis-

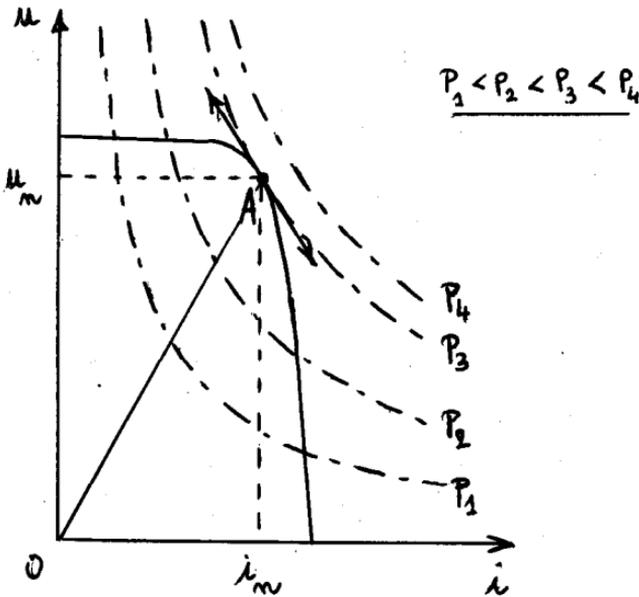


à température T constante, caractéristiques pour différentes valeurs de l'éclairement E .



à éclairement E constant, caractéristiques pour différentes valeurs de la température T .

sance électrique maximale, et c'est donc de cette façon qu'on a intérêt à la faire fonctionner).



Le point A de coordonnées (i_m, u_m) peut s'obtenir par l'une des méthodes suivantes :

1. En traçant les courbes (hyperboles) telles que $P = ui = c^e$ pour différentes valeurs de P . Une de ces courbes (correspondant sur la figure à la valeur $P = P_3$) est tangente à la caractéristique de la photopile en un point qui est précisément celui désiré.

2. En cherchant le point A tel que la pente de la droite OA soit l'opposé de la pente de la caractéristique $u(i)$, en ce point.

En effet, A est tel que ui est maximum ; donc :

$$d(ui) = 0 \Rightarrow u di + i du = 0,$$

soit :

$$-\left(\frac{du}{di}\right) = +\frac{u}{i}$$

↑
↑
 pente de la caractéristique en A pente de la droite OA

Quelques ordres de grandeur :

Il apparaît, sur la caractéristique, que la puissance maximale délivrée par la photopile est :

$$P_m = u_n \times i_n < u_0 \times i_{cc}$$

Nous allons prendre ce dernier produit, plus facilement calculable pour évaluer la puissance que pourrait fournir 1 m² de photopiles.

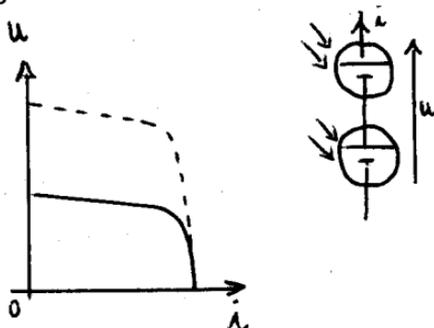
Comme nous l'avons déjà dit, dans les conditions standard (T = 25°C, E = 1 kW.m⁻², $i_{cc} \approx 30$ mA.cm⁻²). Nous prendrons 0,6 V pour u_0 (qui dépend peu de E), donc :

$$P_m < 0,6 \times 30 \cdot 10^{-3} \times 10^4 = 180 \text{ W.}$$

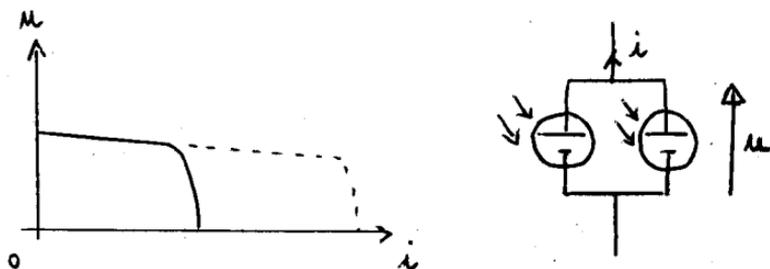
Il est possible, en prolongeant ce calcul, d'évaluer la surface de photopiles nécessaires à l'alimentation complète d'une maison d'habitation (en supposant, par exemple, que les photopiles reçoivent l'éclairément moyen E = 1 kW.m⁻², 8 heures par jour). On pourra considérer le cas d'une maison « tout électrique » et celui d'une habitation où les besoins en électricité sont réduits au maximum (chauffage non électrique, four à gaz...).

Il faut souligner qu'il n'est pas possible, technologiquement, de fabriquer des photopiles de surface 1 m². On est obligé d'associer des éléments de surface plus petite que l'on encapsule souvent dans une résine comprise entre deux plaques de verre de façon à les protéger des intempéries.

montage en série



montage en parallèle



En considérant la caractéristique équivalente à plusieurs photopiles en série (ou en parallèle), il apparaît clairement qu'on augmente la tension (ou le courant) délivré.

Dans la pratique, on s'oriente souvent vers des montages mixtes pour lesquels il est nécessaire de partir de cellules aux caractéristiques les plus semblables possible.

Exemples de photopiles du commerce (octobre 1982) :

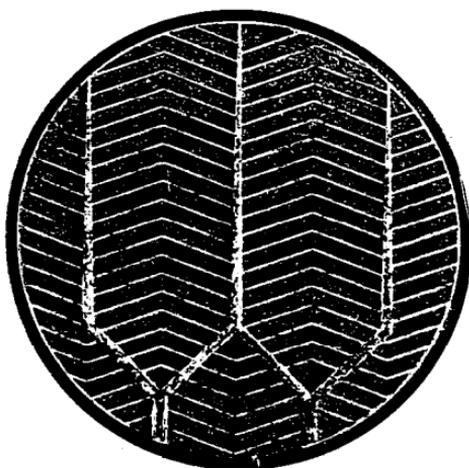
Les valeurs des courants et des tensions sont données pour un éclairage $E = 1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ et une température $T = 25^\circ \text{C}$.



Cellule CC 06



Cellule K 76



Cellule R 100

1. Cellule CC 06 :

(prix : 4 F),
croissant ($S = 6 \text{ cm}^2$),
 $i_n \simeq 100 \text{ mA}$,
 $u_n \simeq 0,42 \text{ V}$.

2. *Cellule K 76* :

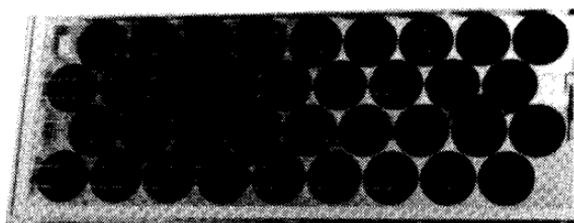
(prix : 15 F),
 quart de cercle,
 diamètre : $\varnothing = 7,6$ cm,
 $i_n \approx 250$ mA,
 $u_n \approx 0,42$ V.

3. *Cellule R 100* :

(prix : 73 F),
 diamètre $\varnothing = 10$ cm,
 $i_n \approx 1\,700$ mA,
 $u_n \approx 0,42$ V.

4. *Panneau BPX 47 CE* :

(prix : 3 400 F),
 dimensions ($L = 1,1$ m ; $l = 0,43$ m ; $e = 4,7$ cm),
 $i_n \approx 2,9$ A,
 $u_n \approx 12$ V.



3. LES UTILISATIONS POSSIBLES.

Si les prochaines années risquent de voir se multiplier les exemples d'utilisation, ceux-ci demeurent encore limités par le problème du coût.

* Néanmoins, l'alimentation de micro-systèmes (dont la puissance n'excède pas quelques dizaines de mW) s'est déjà fortement développée pour la raison suivante : les photopiles sont particulièrement fragiles et certaines sont cassées lors de la manutention. Ces « déchets » sont parfaitement utilisables pour alimenter des composants électroniques dont la consommation est très basse (oscillateurs à quartz, amplificateurs...).

On les utilise en particulier dans les montres et calculatrices depuis le développement de l'affichage à cristaux liquides qui a permis une économie appréciable d'énergie. Ces systèmes peuvent faire intervenir un stockage qui est alors un accumulateur « bouton » Cd-Ni.

* En ce qui concerne les systèmes de puissance plus importante, les photopiles sont utilisées dans des endroits isolés, difficilement accessibles ou situés loin d'une ligne électrique :

- En France, elles alimentent certains téléphones de secours sur les autoroutes, ainsi que de nombreuses stations météorologiques automatiques ; un modèle de balise marine fixe est constitué par 10 panneaux BPX chargeant le jour une batterie de 12 V, 600 Ah, qui assure l'alimentation de la balise la nuit.
- Quelques expériences sur des systèmes de puissance supérieure sont en cours : dans les Alpes, un groupement de 452 modules BPX 47 A, alimente un refuge. Le stockage se fait sur 120 éléments de batterie au plomb de 600 Ah. Un onduleur statique à thyristors transforme la tension continue délivrée par les photopiles en tension alternative (220 V, 50 Hz). Cette expérience a pour but de tester les performances des modules dans des conditions climatiques difficiles en vue d'une extrapolation possible à l'alimentation de bergeries de hautes montagnes.
- A Sophia-Antipolis, près de Nice, une autre station expérimentale a un objectif différent ; il s'agit de démontrer qu'il est possible d'alimenter une villa de 4 personnes, consommant une énergie de 10 kWh par 24 h, à l'aide d'un générateur photovoltaïque. Ce générateur (de 5 kW) est divisé en plusieurs parties (fixe, orientable saisonnièrement, suiveur un axe et suiveur deux axes) pour une comparaison des énergies fournies.
- Dans les pays du Tiers-Monde, où l'ensoleillement est souvent optimal, plusieurs expériences pilotes ont été lancées (alimentation de pompes à eau, de récepteurs de télévision, de systèmes réfrigérants...); l'hôpital de San au Mali est entièrement alimenté par quelques 780 panneaux BPX 47 A et un nombre aussi impressionnant de batteries de stockage est nécessaire.

N.B. : Nous avons donné précédemment les dimensions d'un panneau. Vous pouvez vous amuser à calculer la surface occupée...

- Aux États-Unis, où les recherches sont assez avancées, une centrale de 100 kW crête a été mise en service en 1980.

Des systèmes dans la gamme de 0,5 - 2 MW sont à l'état de projet et des implantations sont envisagées dans le Sud de l'Europe.

4. LES RECHERCHES ACTUELLES.

En France en 1980, la recherche sur les photopiles mobilisait environ 200 chercheurs, répartis dans une vingtaine de laboratoires et qui travaillaient dans les directions suivantes :

a) La filière du SILICIUM :

Il s'agit d'abord de remplacer les méthodes de transformation sophistiquées — et onéreuses — qui permettent d'aboutir à du silicium monocristallin ultra pur par des technologies plus simples. Pour cela, on s'oriente de plus en plus vers l'utilisation de silicium polycristallin : dans un polycristal, les cristaux, d'orientations et de dimensions différentes, sont séparés les uns des autres par des zones perturbées qui agissent comme des pièges vis-à-vis des porteurs de charge et diminuent considérablement le rendement. Néanmoins, on arrive à fabriquer maintenant certains types de polycristaux « pas trop irréguliers » permettant d'atteindre des rendements de 12 %. L'évolution des techniques de fabrication laisse espérer des coûts bien inférieurs à ceux que l'on a en utilisant du silicium monocristallin.

Une autre piste pourrait être prometteuse à moyen terme : celle du silicium amorphe hydrogéné. Ce matériau possède en effet des propriétés absolument différentes de celles du silicium amorphe pour lequel la mobilité et la durée de vie des porteurs de charge sont quasiment nulles. Le gros des efforts porte actuellement sur la préparation du matériau et l'analyse de ses propriétés.

b) La filière du SULFURE DE CADMIUM (CdS) :

Excepté le silicium, le sulfure de cadmium est le matériau ayant suscité les plus gros efforts au niveau de la recherche internationale. Il présente en effet des rendements de conversion corrects (5 à 10 %) quand il est associé au sulfure de cuivre Cu_2S . De plus, la couche de matériau nécessaire est extrêmement mince (« photopile en couche mince ») et ceux-ci peuvent être déposés sur des substrats peu onéreux, comme le verre — d'où un prix de revient très bas.

Le développement de ces photopiles a toujours été freiné par leur grande fragilité (à l'humidité, aux températures supérieures à 60°C...). Mais des améliorations décisives ont été apportées ces dernières années qui, si elles se poursuivaient, pourraient rendre l'électricité solaire compétitive.

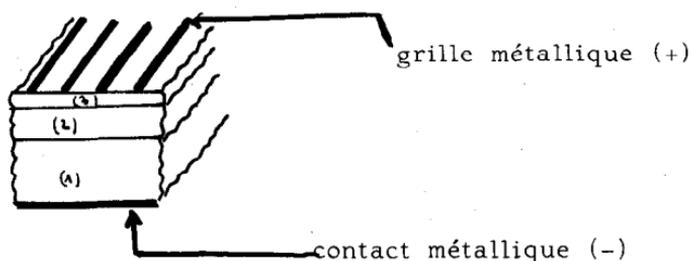
c) La filière de l'ARSÉNIURE DE GALLIUM (GaAs) :

Ces photopiles ont déjà été fabriquées en petite série. Cependant, les matériaux de base (gallium et arsenic) sont rares, et donc chers. De plus, l'arséniure de gallium ne peut être utilisé que sous forme monocristalline, ce qui augmente encore le prix de revient.

Par contre, ces photopiles offrent un grand intérêt à température élevée, puisqu'au-delà de 100°C, leur rendement est bien

meilleur que celui des photopiles au silicium. Elles sont donc particulièrement adaptées à un fonctionnement sous un flux solaire concentré, et il y a là des perspectives assez prometteuses (cf. Annexe 3).

Le schéma de principe est le même que pour les photopiles au silicium.

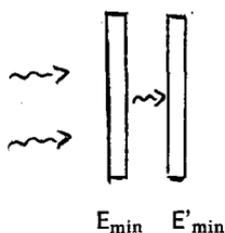


- (1) substrat de GaAs (type n),
- (2) GaAs dopé au zinc (type p),
- (3) mince couche $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ (permet de réduire l'absorption du rayonnement incident).

L'arséniure de gallium est aussi utilisé dans les « photopiles multicolores » : nous avons vu (Annexe 1) qu'un matériau semi-conducteur est caractérisé par la largeur de sa bande interdite E_{min} et que les photons « utiles » avaient forcément une énergie $E \geq E_{min}$. Nous avons vu aussi que tous les photons d'énergie

$E \geq E_{min}$ ne pouvaient être utiles ; en fait le rapport $\frac{E_u}{E_i}$ (énergie

utile sur énergie incidente) est d'autant plus grand que les photons ont une énergie proche de E_{min} . Ainsi les photons de grande énergie ne sont pas exploités au maximum — d'où l'idée de les récupérer de façon à les rendre « utiles » vis-à-vis d'une photopile faite dans un autre matériau caractérisé par $E'_{min} > E_{min}$.



Principe des photopiles « multicolores ».

On a réalisé ainsi des photopiles bicolores : Ge-GaAs ou Si-GaAlAs.

Il existe des centaines d'autres possibilités de combinaisons de semi-conducteurs pour réaliser des photopiles. Une quinzaine environ font l'objet d'études et de développement mais n'ont pas encore atteint un stade de compétitivité suffisant.

5. L'AVENIR DES PHOTOPILES.

Il est clair que le marché des photopiles va continuer à se développer dans les prochaines années. Mais dans quels secteurs seront-elles compétitives avec les autres moyens de production d'électricité ? Resteront-elles cantonnées aux systèmes de petites puissances, situés dans des endroits isolés ? Ou sera-t-il rentable d'envisager la construction de centrales photovoltaïques ?

Pour essayer de répondre à ces questions, il est nécessaire d'examiner le coût actuel des photopiles et les possibilités futures de le réduire.

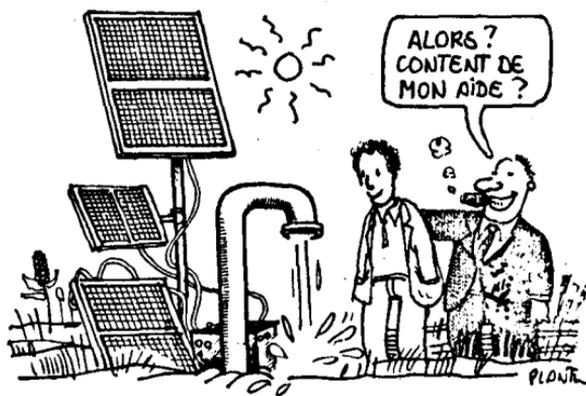
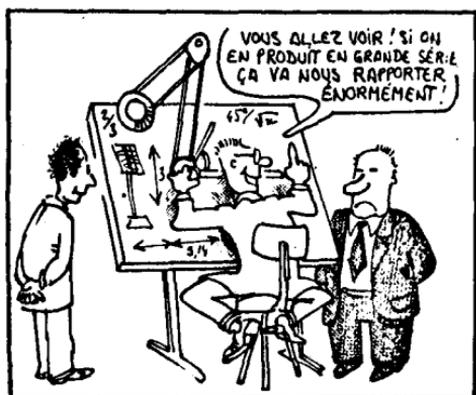
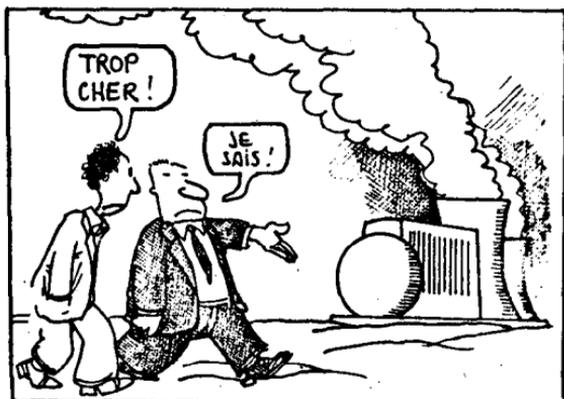
En 1979, on évaluait à 60 F par watt crête le prix des panneaux photovoltaïques. Il semble certain que ce prix est amené à diminuer, ne serait-ce que par les « Economies d'échelle » envisagées au niveau de la production des cellules. Par ailleurs, des progrès techniques sont à prévoir, en lien avec les recherches actuelles que nous avons déjà évoquées.

C'est pourquoi, on peut espérer atteindre, entre 1985 et 1990, un coût de panneau compris entre 5 et 10 F par watt crête. Il semble toutefois très difficile de descendre en dessous des 5 F surtout en ce qui concerne les panneaux au silicium. Les photopiles au sulfure de cadmium demanderont, quant à elles, des investissements considérables pour qu'une production importante permette d'atteindre ces prix.

A l'avenir, les générateurs photovoltaïques couvriront une large gamme d'applications. Tout d'abord, les systèmes d'alimentation destinés aux régions et sites isolés vont continuer à se répandre (ré-émetteurs T.V., répéteurs de liaisons radio, équipements de navigation aérienne). Même un isolement relatif par rapport au réseau suffit. On estime aujourd'hui rentable l'alimentation de l'éclairage des cabines téléphoniques par photopiles dès lors qu'elles sont éloignées de plus de 20 m du réseau.

Dans la gamme de puissances comprises entre 1 kW et 10 kW se trouve le marché très important des maisons individuelles : 25 000 habitations pourraient être concernées dans les prochaines années.

En ce qui concerne les centrales photovoltaïques et les perspectives de compétitivité avec les centrales conventionnelles, il



Dessin de Plantu, paru dans « Le Monde diplomatique » et dans « Les Cours du caoutchouc sont trop élastiques ». La Découverte - Maspero.

faut prévoir ce qui se passera dans 10 ou 20 ans pour le moins, ce qui rend les estimations très aléatoires.

Néanmoins, on peut spéculer sur une augmentation assez forte du coût de l'électricité classique — y compris de l'électricité d'origine nucléaire. Par ailleurs, les incertitudes en matière d'énergie sont telles qu'il sera bon d'avoir diversifié ses sources au maximum.

Dans ces conditions, il apparaîtrait une réelle possibilité pour les centrales photovoltaïques de devenir un jour compétitives et de contribuer à couvrir nos besoins en électricité. Elles pourraient servir en particulier d'appoint pendant la journée, période où la consommation est la plus élevée.

Par ailleurs, dans les pays où le réseau de distribution est inexistant, ou peu ramifié, et dans les régions peu peuplées, l'électricité solaire pourrait permettre de résoudre, à moindre coût, un certain nombre de problèmes. Mais la technologie nécessaire à la fabrication des photopiles est telle que ces pays qui sont, en général, des pays du Tiers-Monde, seront sans doute dans l'impossibilité de les réaliser eux-mêmes avant de longues années...

ANNEXE 1

EFFET PHOTOVOLTAÏQUE : PRINCIPE SOMMAIRE

Nous avons vu que les photopiles sont composées de matériaux semi-conducteurs. Rappelons leurs propriétés en considérant le cas le plus courant et le plus commode, celui d'un monocristal de silicium. Les atomes de silicium sont disposés aux sommets de tétraèdres réguliers. Un atome quelconque du réseau a quatre plus proches voisins. Il met en commun avec eux ses quatre électrons périphériques, dans des liaisons binaires qui ne laissent aucun électron « célibataire ». Au zéro absolu, tous les électrons sont ainsi dans la bande de valence ; le silicium est alors isolant.

Mais si l'on apporte de l'extérieur une énergie suffisante $E \geq E_{min}$ pour rompre quelques paires électroniques, des charges deviennent disponibles. Le matériau est alors conducteur, et ceci d'autant plus que l'énergie incidente augmente. C'est ce que l'on appelle la conduction par porteurs intrinsèques.

Ainsi s'explique la diminution de résistivité des semi-conducteurs lorsque leur température s'élève. La résistivité du germanium, par exemple, se divise presque par 100 quand la température passe de 20 à 90°C. Si l'énergie est apportée sous forme

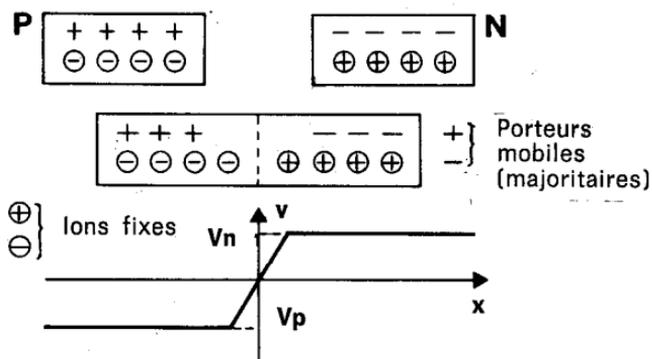
d'un rayonnement lumineux, on constate une décroissance de la résistivité avec l'éclairement : c'est la photoconduction, mise à profit dans les cellules photorésistantes.

Ce phénomène n'engendre pas par lui-même de courant électrique, tout au plus peut-il moduler le débit d'un générateur externe. Comment alors créer du courant à partir de la lumière ?

Il est nécessaire qu'il existe, au sein du matériau, une dissymétrie électrique permanente (ou plus précisément un champ électrique) susceptible d'entraîner les porteurs de charges libérés par l'énergie lumineuse incidente.

Cela est possible en associant deux matériaux dans lesquels les porteurs de charges sont respectivement positifs et négatifs : c'est ce que l'on appelle une jonction.

Dans un monocristal de silicium tétravalent, introduisons un très petit nombre d'atomes d'un corps trivalent, comme le bore. La maille cristalline ne sera pas rompue mais un des électrons périphériques d'un atome de silicium ne trouvera pas de partenaire. On crée ainsi une lacune électronique (un « trou ») se comportant comme une charge positive capable de se déplacer dans le réseau. Les porteurs étant positifs, un tel matériau est dit de type P. Inversement, si « l'impureté » est pentavalente (phosphore ou arsenic) il y aura localement un électron supplémentaire non apparié. Le matériau est alors de type N.



Si nous rapprochons un semi-conducteur P et un semi-conducteur N, trous et électrons diffusent à travers la frontière et se neutralisent localement. Mais cette neutralisation ne peut se faire qu'au voisinage de la frontière car les ions fixes subsistent et la variation de concentration des porteurs fait apparaître une différence de potentiel qui s'oppose à une neutralisation plus importante. Un équilibre dynamique s'établit avec une différence de potentiel $(V_n - V_p) > 0$.

Lorsque la jonction est éclairée par des photons « suffisamment énergétiques » ($E \geq E_{min}$, soit $\lambda \leq \lambda_{max}$) des paires électrons-trous sont créées. La différence de potentiel qui existe de part et d'autre de la jonction entraîne les porteurs de charges vers le circuit extérieur (les porteurs de charges + « sortent » par la zone P, qui est donc le pôle + de la photopile, la zone N étant le pôle -).

Tableau donnant, pour différents semi-conducteurs, E_{min} et λ_{max}

	Ge	Si	GaAs	CdSe
E_{min} (eV)	0,67	1,11	1,35	1,74
λ_{max} (μm)	1,87	1,13	0,93	0,72

pour $T = 300 \text{ K}$

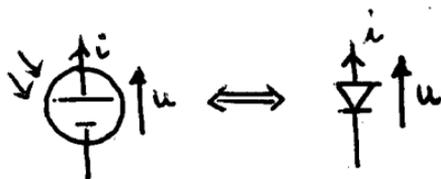
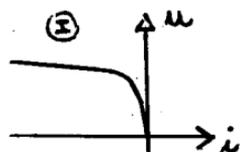
N.B. : E_{min} correspond, dans la théorie des structures de bandes, à la largeur de la bande interdite.

ANNEXE 2

SCHEMA EQUIVALENT A UNE PHOTOPILE

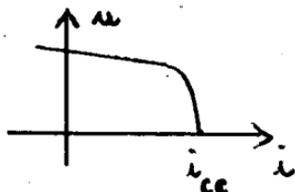
A température constante, traçons la caractéristique d'une photopile pour différentes valeurs de l'éclairement :

* $E = 0$.



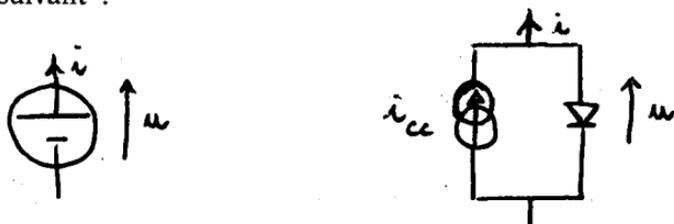
On obtient la caractéristique « classique » d'une jonction $p-n$: c'est un dipôle passif et, avec les orientations choisies et en se limitant à $u > 0$, sa caractéristique se trouve dans le cadran (I).

* $E > 0$.



Grossièrement, on peut considérer cette caractéristique comme identique à celle obtenue pour $E = 0$, à une translation près (de i_{cc} sur l'axe des abscisses).

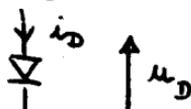
En première approximation, on obtient donc le schéma équivalent suivant :



On peut en déduire une équation paramétrique approchée.

Pour une diode à jonction, on rappelle que :

$$i_D = Ae^{B u_D}$$



Par suite, $i = i_{cc} - Ae^{Bu}$.

Comme le courant i est proportionnel à la surface S de la photopile (quelle que soit la tension u), on peut écrire :

$$i = S(\alpha - \gamma e^{Bu})$$

α , γ et B sont des coefficients dépendant de la température et de l'éclairement.

ANNEXE 3

LES SYSTEMES A CONCENTRATION

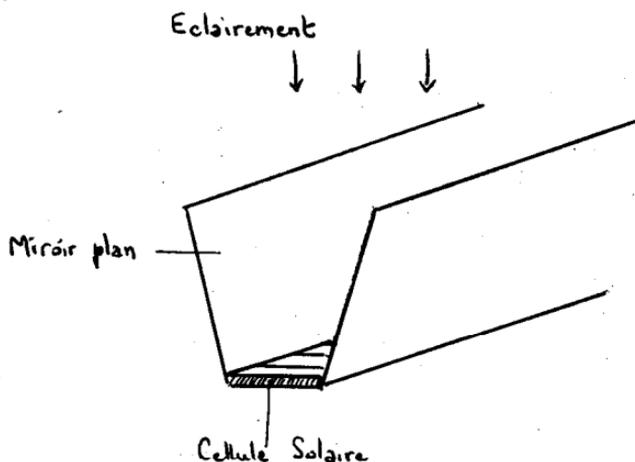
Il est courant de justifier l'emploi de la concentration pour les photopiles par le pourcentage élevé du prix du matériau semi-conducteur dans les systèmes plans. Utiliser la concentration du rayonnement solaire revient à utiliser moins de matériau semi-conducteur pour une même puissance électrique résultante, et l'on peut espérer diminuer ainsi le prix du watt produit. En réalité, le raisonnement n'est pas aussi simple qu'il y paraît car un système à concentration nécessite toute une infrastructure, réalisée avec des matériaux classiques ainsi que des circuits électroniques nécessaires, dans la plupart des cas, pour obtenir l'orientation des capteurs. Pour être rentables économiquement, les systèmes à concentration ne pourront être envisagés qu'avec des cellules photovoltaïques très performantes (de rendement égal au moins à 20 %).

Le prix du watt-heure produit n'est d'ailleurs pas le seul critère à prendre en compte. Les contraintes diverses associées à la production de ce watt-heure (nécessité d'une bonne fiabilité du système, problèmes de maintenance...) vont jouer un rôle important, surtout pour des utilisations en site isolé et il est possible que, dans les années à venir, les systèmes à concentration ne jouent qu'un rôle mineur.

Il existe de nombreux types de concentrateurs ; chacun est caractérisé par son facteur de concentration $f = \frac{E_c}{E_i}$ (E_i : éclairement incident ; E_c : éclairement concentré).

La conservation de l'énergie implique : $E_i \times S \geq E_c \times s$ (S : surface totale réceptrice ; s : surface de concentration), donc

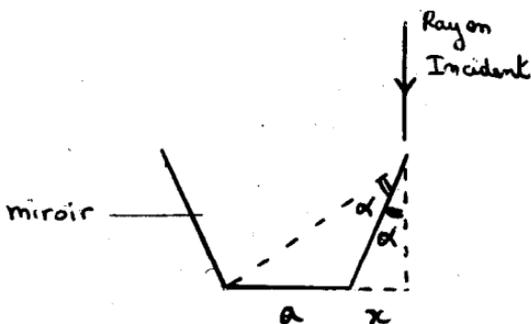
$f \leq \frac{S}{s}$; ce dernier rapport est appelé facteur de concentration géométrique.



Concentrateur simple.

L'un des concentrateurs les plus simples se compose d'un réflecteur de section trapézoïdale. La lumière est concentrée sur une cellule solaire placée au fond de l'auge.

Le facteur de concentration maximal possible de l'appareil (obtenu quand les rayons du soleil sont parallèles à l'axe de symétrie du système) s'écrit : $f = \frac{a + 2x}{a}$.

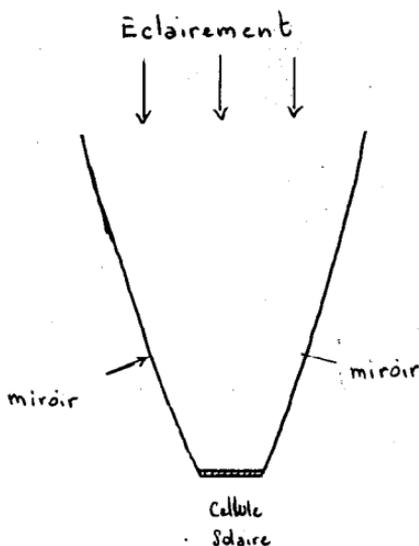


Le système est optimisé quand tous les rayons incidents arrivant sur un réflecteur sont réfléchis sur la photopile.

Dans ce cas :
$$x = a \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} 2 \alpha - \operatorname{tg} \alpha}$$

f est maximale quand x est maximale (pour a donné), soit pour $\alpha = 0$: miroirs pratiquement perpendiculaires au plan de la photopile et très élevés.

Le rendement de ce système est limité par le fait que les rayons incidents qui tombent loin de l'axe de symétrie sont réfléchis avec le même angle que les rayons plus proches de cet axe. Des modèles perfectionnés employant des miroirs courbés de façon à faire décroître progressivement l'angle d'incidence ont été proposés.

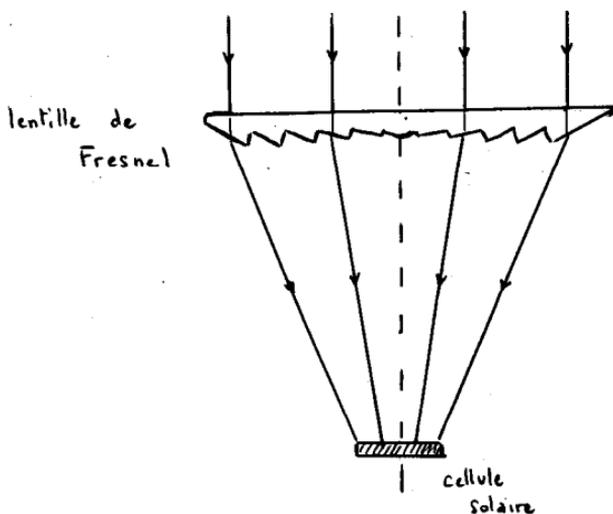


Concentrateur parabolique composite.

On a ainsi conçu des systèmes ayant un facteur de concentration géométrique $\frac{S}{s}$ égal à 10.

Mais pour avoir un facteur de concentration $\frac{E_c}{E_i}$ proche de 10, il est nécessaire que le système « suive » le soleil, c'est-à-dire que les rayons incidents soient parallèles à l'axe de symétrie du dispositif.

D'autres modèles ont été mis au point et on retrouve les mêmes familles de concentrateurs que pour la conversion thermo-mécanique (miroirs cylindro-paraboliques $f = 20$ à 40 ; miroirs paraboloides $f = 70$ à 200). Mais on fait plus largement appel à la concentration par lentilles et, en particulier, par lentilles de Fresnel, l'un des avantages importants des systèmes à réfraction sur les systèmes à réflexion étant leur plus faible sensibilité aux imprécisions de fabrication. On peut ainsi atteindre des facteurs de concentration de 500.



Concentrateur à lentille de Fresnel.

Il est important de souligner que, dans tous les cas où le facteur de concentration dépasse 50, un refroidissement actif (eau) des photopiles est indispensable (pour $f < 50$, un refroidissement passif (ailettes) suffit). Il ne faut pas oublier en effet que le rendement des photopiles diminue quand la température augmente, avant d'entraîner des destructions irréversibles.

Quelques expériences pilotes sont en cours actuellement :

- A Toulouse, avec le concours du C.N.E.S., a été étudié et réalisé un générateur photovoltaïque modulaire à concentration « Sophocle 1000 ».

Ce dernier fait appel à une concentration limitée du rayonnement solaire (40) par lentilles de Fresnel en polymétacrylate. Le système est monté sur un héliostat et est asservi par un suivi opto-électronique. Les photopiles sont au silicium.

Le rendement global est de 7 % (la puissance utile ici est de 1 kW mais l'aspect modulaire permet de réaliser les puissances voulues).

- Plusieurs éléments de Sophocle sont en cours d'expérimentation à l'étranger, dans des pays à contraintes climatiques sévères, pour tester leur fiabilité.

BIBLIOGRAPHIE

- W. PALZ. — « *L'électricité solaire* ». Ed. Dunod. 1981. 350 p.
- A. LAUGIER et J.-A. ROGER. — « *Les photopiles solaires* ». Ed. Technique et Documentation. 1981. 306 p.
- « *Action solaire* » n° 6 (mai 1982) (Bulletin du Comité d'Action pour le Solaire), 8, rue de Richelieu, 75001 Paris.
- « *Solaire 1* » n° 12 (janvier 1981).
- T. FOGELMAN et R. MONTLAN. — « *Installations photovoltaïques dans l'habitat isolé* ». Edisud. 1983. 240 p.

Quelques adresses pour acheter des photopiles :

- Ecosolaire (vente au détail), 19, rue Pavée, 75004 Paris.
(Tél. : 887.43.60).
 - Photowatt (vente de panneaux et d'équipements complets),
131, rue de l'Empereur, 92500 Rueil-Malmaison.
(Tél. : 708.05.05).
-