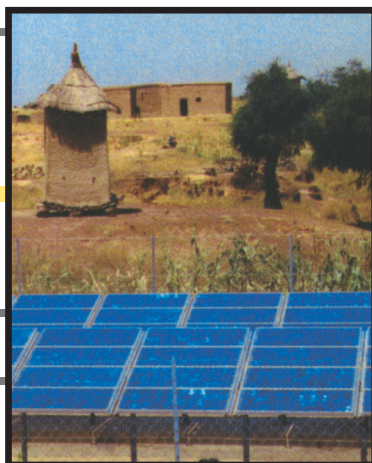


Luc Chancelier ● Eric Laurent

L'ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE

Collection LE POINT SUR



GRET

Luc Chancelier et Eric Laurent

L'électricité photovoltaïque



Collection « Le point sur »

GRET • MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION

Cet ouvrage est le fruit d'une recherche et d'un travail d'écriture effectués de mai 1990 à juillet 1991 par Luc Chancelier au sein du Gret.

Une nouvelle écriture et une réorganisation du contenu ont été réalisées par Eric Laurent en 1992. Une remise à jour et des corrections ont été apportées en 1995 par Bernard Gay, Luc Chancelier et Bernard Prigent.

Nous remercions également Jean-Pierre Jacquin pour sa participation à la partie sur le pompage.

Cet ouvrage a pu être réalisé grâce à une contribution financière du ministère français de la Coopération et de l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

Illustrations : Anne-Marie Rossin

Maquette : Solange Münzer

Sommaire

- 7 Introduction
- 11 PREMIÈRE PARTIE
GÉNÉRALITÉS SUR LES GÉNÉRATEURS PHOTOVOLTAÏQUES
- 15 **Production de l'énergie**
- 15 La conversion photovoltaïque
- 16 De la cellule au module photovoltaïque
- 18 Du module au panneau photovoltaïque
- 21 **Stockage de l'énergie**
- 22 Caractéristiques d'une batterie
- 25 Les différents types de batteries
- 26 La sécurité et le bon fonctionnement des batteries
- 27 **Régulation et traitement du courant**
- 27 Principe et fonctionnement du régulateur
- 27 Caractéristiques d'un régulateur
- 28 Quelques remarques sur les régulateurs
- 29 Les diodes
- 30 Les onduleurs
- 31 **Dimensionnement d'un système photovoltaïque**
- 31 Principes généraux
- 33 Dimensionnement des modules solaires
- 38 Dimensionnement des batteries
- 41 Dimensionnement du régulateur
- 44 Dimensionnement des câbles électriques

47	Mise en place d'un générateur photovoltaïque
48	Réception technique
49	Emplacement, orientation et inclinaison des modules
53	Préparation des sites d'installation, génie civil
55	Montage des différents éléments du système
59	Raccordement électrique des différents éléments du système
61	Démarrage, essais et réception finale
63	DEUXIÈME PARTIE
	PRINCIPALES UTILISATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE
65	Les matériels d'éclairage
65	Les différents luminaires
68	Les différents systèmes d'éclairage et leurs applications
73	Les besoins en énergie pour l'éclairage
75	Le point sur le coût des systèmes d'éclairage
78	Le pompage
78	Le point sur les matériels de pompage
89	Mise en place des éléments d'une unité de pompage
91	Besoins en énergie et dimensionnement d'un système de pompage
104	Le point sur les coûts des systèmes de pompage
110	Le froid
112	Les différents systèmes de réfrigération et leurs applications
117	Besoins en énergie d'un réfrigérateur solaire
119	Comparaison technique entre les différents systèmes de réfrigération
120	Le point sur le coût des systèmes de production de froid
124	Les télécommunications
124	Les différents systèmes et leurs applications
131	Besoins en énergie des systèmes de télécommunication

133	Comparaison des systèmes de télécommunication
133	Le point sur les coûts des systèmes de télécommunication
135	La recharge des batteries
135	Les différents systèmes de charge de batterie et leurs applications
140	Besoins en énergie d'un système de recharge de batterie
143	Comparaison entre différents systèmes de charge de batterie
144	Le point sur les coûts de recharge de batterie
147	Les applications diverses
153	TROISIÈME PARTIE
	CRITÈRES POUR LA RÉUSSITE D'UN PROJET PHOTOVOLTAÏQUE
155	Maintenance des équipements
156	Les différents éléments d'une maintenance
160	Gestion de la maintenance
165	Règles de base pour l'insertion d'un projet photovoltaïque
165	Analyser le contexte
169	Comparaisons économiques
173	Conditions techniques de réussite d'un projet
179	Comment financer un projet photovoltaïque
179	Les instruments financiers
181	Les financeurs et leurs instruments financiers
182	Dispositifs financiers d'aide à la diffusion du photovoltaïque
185	ANNEXES
187	Annexe 1. Les différents types de batteries
190	Annexe 2. Batteries : consignes de sécurité

192	Annexe 3. Déterminer les ombres portées sur les modules
194	Annexe 4. Principaux types d'électropompes
199	Annexe 5. Exemples de réalisations de systèmes photovoltaïques
210	Annexe 6. Exemples de financements et dispositifs financiers
221	Annexe 7. Avantages et inconvénients des principaux emplacements pour modules
222	Annexe 8. Tour d'horizon des principaux actes de maintenance
227	Annexe 9. Cartes mondiales de l'ensoleillement en janvier et juillet
229	Annexe 10. Professionnels du photovoltaïque par activités
234	Annexe 11. Professionnels du photovoltaïque par pays
241	Annexe 12. Liste d'adresses
251	Annexe 13. Bibliographie

*A la mémoire de Jacques Thibault (1941-1995)
fondateur et directeur de Sahel Energie Solaire au Burkina Faso,
pionnier de l'énergie photovoltaïque au Sahel, en hommage à
cette passion du solaire qui l'anima, à sa joie de vivre et à
son humour dont il fit toujours bénéficier ses
proches et ses amis.*

Historique du solaire photovoltaïque

Il y a maintenant trente ans que l'énergie solaire photovoltaïque est réellement née comme énergie techniquement exploitable. Peu après le premier choc pétrolier, emboitant le pas des pionniers, de nombreux fabricants et assembleurs interviennent dans ce domaine. A l'époque, le solaire peut apparaître pour certains comme la source d'énergie de l'avenir. Quelques années auront toutefois suffi, au début des années 80, pour que chacun se rende compte que si le solaire avait une place à prendre, il n'était pas de taille à concurrencer sur les réseaux le pétrole ou le nucléaire.

Les causes de ce "mauvais départ" furent diverses. Il est certain que le photovoltaïque souffrit de produits mal fiabilisés, d'une diffusion restreinte et de coûts de revient élevés. Fut-ce le fait des faibles quantités manufacturées, d'un manque de fonds ou d'énergie injectés pour la recherche ? En tout état de cause, beaucoup de petits fabricants ou distributeurs fermèrent boutique laissant la place à quelques entreprises travaillant sur des marchés très ciblés.

Malgré le pessimisme de certains, le marché du photovoltaïque existe et continue d'année en année à se développer. L'évolution du marché mondial le montre avec éloquence : 72 MWc de puissance installée en 1994, plus de 90 MWc prévus pour 96, contre 5 MWc en 1981, soit une progression de 120 % sur quinze années. Certains blocages posés dans les premières phases de la diffusion du photovoltaïque tendent peu à peu à se résorber. L'augmentation du nombre d'utilisateurs a en effet rendu possible l'amélioration des éléments

techniques, celle des services après-vente ainsi que l'apparition d'intermédiaires locaux tout en assurant la rentabilité de tels services.

Pour couvrir ce marché, on dénombre aujourd'hui une vingtaine de fabricants de modules dans le monde. Le marché du photovoltaïque repose actuellement principalement sur trois types d'applications : l'éclairage, le pompage et les télécommunications.

Un certain nombre de pays comme les USA, l'Allemagne, la Suisse ou le Japon favorisent l'émergence d'un nouveau marché prometteur de couplage des générateurs solaires au réseau d'électricité. En dehors de ces pays avant-gardistes où s'exerce une réelle volonté politique et économique de développement de l'énergie solaire, les principales zones d'implantation des équipements photovoltaïques se situent dans les pays en voie de développement (PVD) de la zone intertropicale. Dans le cas de la France, ce sont sans doute les DOM-TOM qui ont favorisé l'essor de la technologie photovoltaïque nationale.

Les enjeux du photovoltaïque

L'énergie solaire continue à rencontrer certaines difficultés pour être diffusée. Prenant en compte l'environnement et la maîtrise des ressources énergétiques par les populations, les enjeux qu'elle représente à l'aube de l'an 2000 sont pourtant loin d'être négligeables en terme de développement socio-économique durable. L'énergie solaire photovoltaïque constitue parmi les énergies nouvelles et renouvelables (ENR) celle qui possède le plus large potentiel de développement. Elle est respectueuse de l'écosystème, appropriable par des communautés restreintes et surtout fort adaptée à la satisfaction de la demande d'énergie des populations vivant dans les zones éloignées des réseaux de transport et d'électricité.

Compte tenu des demandes croissantes en énergie des populations, des difficultés à étendre les réseaux électriques dans les campagnes ou en périphérie de certaines villes, le potentiel de développement engendré par l'énergie solaire photovoltaïque mériterait d'être mieux pris en compte dans les politiques de développement. C'est un peu l'objet de cet ouvrage d'y participer.

Pourquoi ce livre, pour qui ?

Il s'agit d'abord de faire le point sur le photovoltaïque, aussi bien sous un angle socio-économique que technique, en portant un regard critique qui analyse objectivement les avantages et les inconvénients de cette technologie par rapport à d'autres alternatives énergétiques.

C'est aussi un outil permettant à un gestionnaire de projet d'obtenir les informations nécessaires à la conception et au montage d'un projet photovoltaïque ainsi qu'au choix des équipements. Il est construit selon une approche méthodique des divers types de systèmes solaires et de leurs critères de choix.

L'ambition de ce livre est de contribuer à éclaircir trois problèmes majeurs qui se posent à toute personne ou groupe souhaitant utiliser l'énergie solaire : quelles sont les conditions de sa rentabilité, est-ce une source d'énergie fiable, où peut-on s'adresser pour obtenir des matériaux et des conseils pour réaliser un projet photovoltaïque ?

Il s'adresse ainsi aussi bien aux divers responsables de services d'État (énergie, hydraulique) des pays concernés par le photovoltaïque qu'aux chargés de mission, coopérants techniques et responsables techniques d'organisations d'aide au développement.

Il peut intéresser, à différents niveaux, tous ceux qui veulent acquérir ou approfondir des connaissances sur le solaire photovoltaïque.

Comment est organisé ce livre ?

Cet ouvrage est constitué d'une série de " tiroirs " que l'on peut ouvrir de façon indépendante pour aller rechercher l'information utile à une demande spécifique. Il ne nécessite pas forcément une lecture d'ensemble. Les parties étant relativement indépendantes les unes des autres, elles peuvent être consultées séparément. Le document a cependant été organisé de façon relativement classique, de façon à ce qu'un lecteur peu informé sur le sujet puisse, de façon progressive, absorber l'essentiel des connaissances nécessaires à une bonne compréhension d'un projet d'énergie photovoltaïque.

Il se décompose en trois parties. La première traite des aspects scientifiques et techniques communs aux différentes utilisations envisageables du photovoltaïque. La deuxième partie décrit plus en détail les caractéristiques et les besoins en énergie de systèmes spécifiques parmi les plus répandus : éclairage, pompage, froid, télécommunications...

Ces deux premières parties sont intimement liées en ce qui concerne le dimensionnement d'un système photovoltaïque : la première précise les règles de dimensionnement pour les fonction de production, de traitement et de stockage de l'énergie pour une demande d'énergie donnée, tandis que la deuxième précise, pour chaque utilisation spécifique envisagée (éclairage, pompage, réfrigération...), les besoins en énergie à satisfaire.

La troisième partie regroupe pour sa part les éléments non techniques, mais combien importants, du montage d'un projet photovoltaïque : analyse de l'intérêt socio-économique du projet par rapport à d'autres solutions, financement, participation des populations bénéficiaires des projets, maintenance...

PREMIÈRE
PARTIE

Généralités sur les générateurs photovoltaïques



Production de l'énergie



Stockage de l'énergie



Régulation et traitement du courant



Dimensionnement
d'un système photovoltaïque



Mise en place d'un générateur
photovoltaïque



Tout système photovoltaïque peut se décomposer en trois parties : une partie production d'énergie, une partie contrôle de cette énergie et une partie utilisation de l'énergie produite. L'analyse précise de chacune de ces fonctions mérite d'être approfondie pour construire un système viable techniquement.

Production d'énergie

Cette partie est essentiellement composée d'un ou plusieurs modules photovoltaïques. Ces modules sont formés d'un assemblage de cellules photovoltaïques, qui réalisent la conversion de l'énergie solaire en électricité.

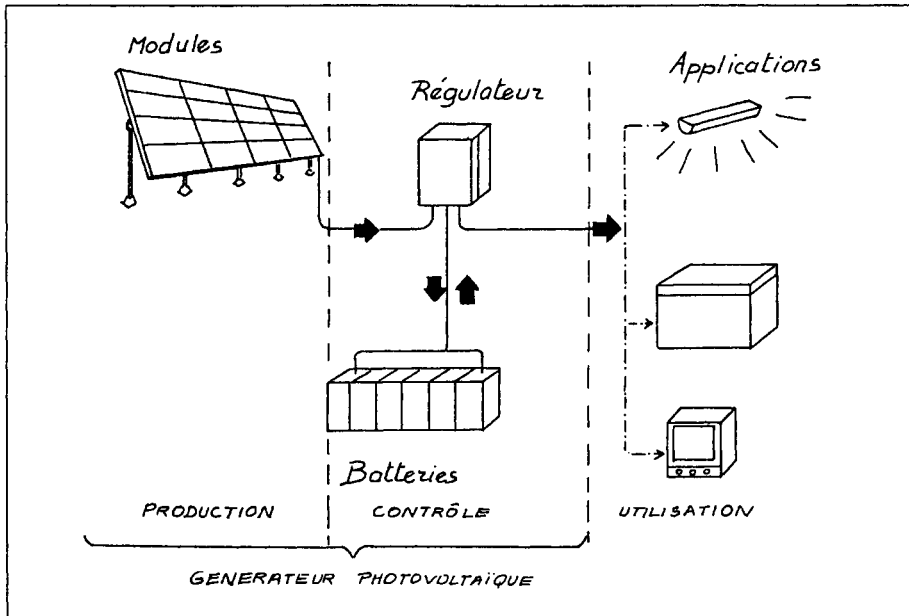
Un module photovoltaïque se comporte comme un générateur de courant continu (DC). Lorsqu'il est branché sur une batterie (12 V), celle-ci lui imposant sa tension, il a une tension constante.

Contrôle de l'énergie

L'intensité électrique que fournissent ces modules dépend, entre autres, de l'ensoleillement et de leur position par rapport au soleil. D'où une irrégularité dans la fourniture d'énergie qui peut ne pas être compatible avec les besoins en énergie, généralement plus constants. Il est donc souvent nécessaire de contrôler l'approvisionnement en électricité à l'aide d'un système de stockage de l'énergie, avec ou sans régulation de ce stock.

Il est aussi parfois nécessaire de modifier la nature du courant pour certaines applications (conversion du courant continu en courant alternatif au moyen d'un onduleur).

Les divers éléments d'un système photovoltaïque avec batterie



Utilisation de l'énergie

Cette partie se compose essentiellement d'un ou plusieurs récepteurs : ce sont les différents matériels qui utilisent l'énergie solaire produite et contrôlée (éclairage, pompage, ...).

On appelle générateur photovoltaïque l'ensemble des deux premières parties, c'est-à-dire les modules photovoltaïques couplés aux éléments de contrôle. On appelle système photovoltaïque l'assemblage d'un générateur photovoltaïque à un ou plusieurs récepteurs.

Ce découpage en trois parties permet de bien identifier les différents composants des systèmes photovoltaïques (souvent abrégé : PV) et de bien comprendre la logique "production-consommation" très particulière à l'utilisation du photovoltaïque.

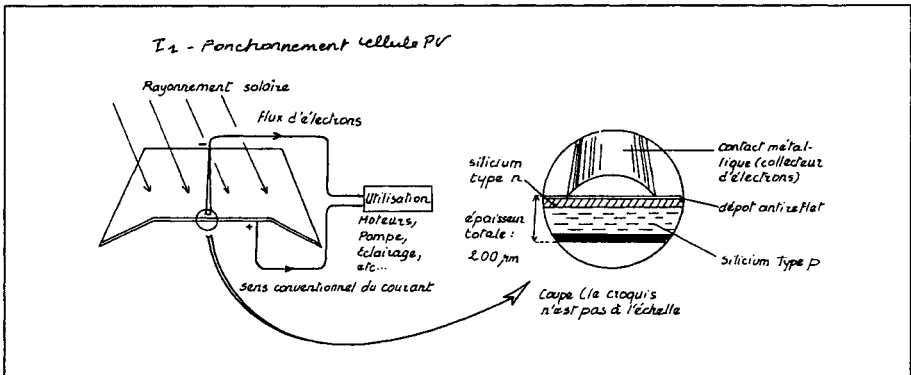
La présente partie de l'ouvrage traite donc des aspects liés aux fonctions de production et de contrôle de l'énergie, à l'exception des spécificités propres à une utilisation particulière. Celles-ci seront abordées lors de la présentation de ces utilisations, en deuxième partie du livre.

Production de l'énergie

LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

La cellule photovoltaïque (ou photopile) est un composant électronique à base de matériau semi-conducteur. Lorsque les particules de lumière, appelés photons, frappent ce matériau, il se crée un champ électrique qui produit deux types de charges : positives et négatives. Elles sont séparées et collectées sur les faces avant et arrière de la cellule photovoltaïque qui se comporte alors comme un générateur de courant continu.

Détail d'une photopile



Le matériau semi-conducteur actuellement le plus utilisé pour les usages "terrestres" (par opposition au spatial) est le silicium. Il existe trois grands types de silicium : amorphe, monocristallin et polycristallin.

Les silicium mono ou polycristallin ont un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois ceux du silicium amorphe, mais sont nettement plus chers. Dans la pratique, l'amorphe est choisi pour les applications de très faible puissance comme par exemple les calculatrices ou les montres alors que toutes les autres applications d'envergure supérieure privilégie le silicium cristallin.

Le rayonnement solaire

Les rayonnements solaires concernés par le photovoltaïque sont des rayonnements électromagnétiques (ultraviolet, rayonnement visible et infrarouge). Ils peuvent être divisés en trois types : rayonnement direct, rayonnement diffus provenant de l'atmosphère et rayonnement réfléchi provenant du sol. L'oeil humain nous renseigne de ce fait très mal sur l'énergie apportée par le rayonnement solaire à cause de la partie invisible (les infrarouges) qui représentent plus de la moitié de ce rayonnement. Par ailleurs, lorsque le soleil est voilé (nuages, vent de sable), une grande partie de l'énergie solaire n'arrive pas au niveau du sol (de l'ordre de 50 à 70 %).

Il faut correctement distinguer deux notions qui caractérisent le gisement solaire :

– *le rayonnement* correspond à la puissance instantanée qui est reçue au sol. Il s'exprime en watt par mètre carré (W/m^2). Par temps clair le rayonnement solaire maximal est voisin de $100 W/m^2$;

– *l'irradiation* ou *ensoleillement* correspond à l'énergie totale qui est reçue sur un plan horizontal, pour une durée déterminée (souvent par jour). Elle peut s'exprimer en $kW/m^2.j$ en moyenne annuelle.

Ces données sont variables en fonction du site, de l'heure de la journée et de la saison.

DE LA CELLULE AU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

A la base, une cellule photovoltaïque fournit un courant sous une faible tension (de l'ordre de 0,6 V en circuit ouvert). Pour obtenir une tension plus importante, il est nécessaire de raccorder plusieurs cellules en série. Cet ensemble de cellules est encapsulé de façon étanche afin de les protéger de

l'humidité et des chocs. L'assemblage constitue un module photovoltaïque. Le module devient alors l'élément de base de tout le système d'énergie photovoltaïque.

Pour obtenir une puissance électrique exploitable, plusieurs modules peuvent être raccordés ensemble pour former un panneau photovoltaïque.

La valeur du courant recueilli aux bornes d'une cellule photovoltaïque pour une tension donnée est déterminée par la nature et la qualité du matériau semi-conducteur. La capacité à fournir plus ou moins d'énergie pour un module PV dépendra donc :

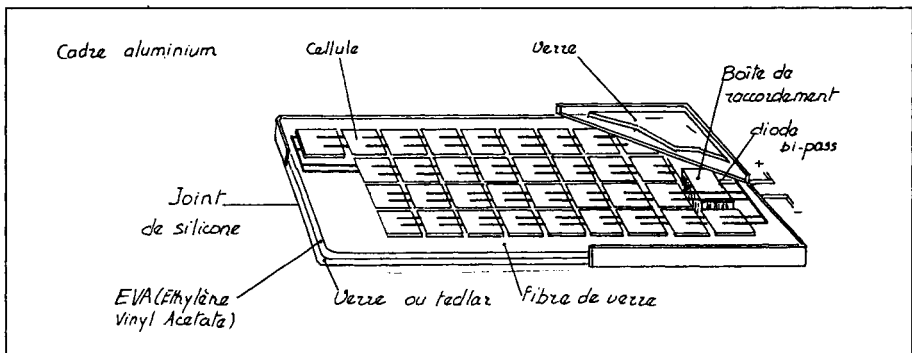
- du type de cellule photovoltaïque retenu ;
- du nombre de cellules montées en série sur ce panneau.

Le nombre d'électrons libérés par une cellule pour une unité de temps donnée dépend pour sa part des caractéristiques du semi-conducteur, mais aussi fortement du flux de photons arrivant sur la cellule. Le courant de sortie d'un panneau solaire dépendra donc :

- de l'ensoleillement ;
- de l'orientation du module par rapport au soleil (un panneau perpendiculaire aux rayons du soleil reçoit le plus grand flux de photons) ;
- du nombre de circuits de cellules montés en parallèle.

La tension aux bornes d'un module PV, ainsi que la puissance électrique qu'il fournit sont donc déterminées fortement par les choix du constructeur (nombre de cellules en série et dimension des panneaux). Les tensions standard sont le 12 V. D'autres tensions, adaptées à des besoins très spécifiques, sont imaginables. Les panneaux risquent alors de coûter plus cher s'ils ne sont pas produits en série.

Le module : un assemblage de cellules



DU MODULE AU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Afin d'augmenter la puissance et/ou la tension d'un générateur, on peut associer plusieurs modules, qui constituent alors un panneau photovoltaïque. Pour les gros générateurs, le panneau est également appelé "champ photovoltaïque". Le type de montage (série ou parallèle, nombre de panneaux) dépend ici des paramètres d'utilisation du générateur de courant (puissance requise, tension aux bornes des appareils). Avant de décrire ces différents types de montages, nous faisons un bref rappel d'électricité.

Rappel succinct des mesures utilisées en électricité

Concernant l'électricité photovoltaïque, et dans le cas d'une utilisation en courant continu, sept variables sont couramment utilisées :

- la tension (U) exprimée en volt (V) ;
- l'intensité (I) exprimée en ampère (A) ;
- la puissance (P) exprimée en watt (W) ;
- le temps (t) exprimé en heures (h) ;
- l'énergie (E) exprimée en watt-heure (Wh) ;
- la résistance (R) exprimée en ohms (Ω) ;
- la puissance crête exprimée en watt-crête (Wc).

Ces grandeurs sont reliées entre elles :

- la puissance est le produit de l'intensité par la tension : $P = U.I$;
- l'énergie fournie par un système pendant un temps t est égale à :
 $E = P.t$;
- dans le cas d'un système n'impliquant, dans les utilisations, que des résistances pures, d'une résistance totale R, la tension est égale au produit de la résistance par l'intensité : $U = R.I$.

Enfin, on appelle puissance-crête d'un module, exprimée en Wc (watt-crête) ou *watt-peak* (Wp) en anglais, la puissance qu'il délivre sous un rayonnement solaire de 1000 W/m^2 dans les conditions standard (température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et module présenté perpendiculairement aux rayons du soleil).

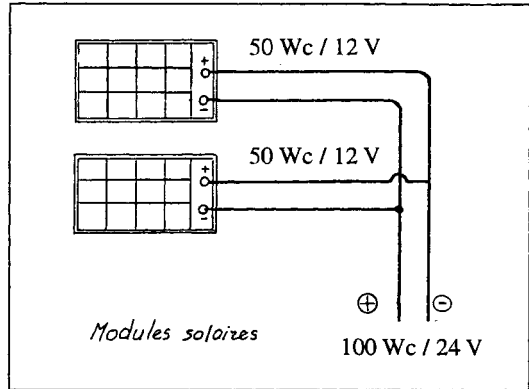
Notons que l'énergie, souvent exprimée en watt-heure en photovoltaïque, s'exprime en joules dans le système international. Elle s'exprime aussi parfois en calories (l'ancienne unité).

Les équivalences sont les suivantes : 1 watt-heure = 3600 joules, et 1 calorie = 4,186 joules.

Montage parallèle

Tous les pôles positifs sont reliés entre eux et tous les pôles négatifs entre eux.

Lorsque des modules semblables sont montés en parallèle, la tension résultante ne change pas mais l'intensité résultante est la somme des intensités de chaque module.

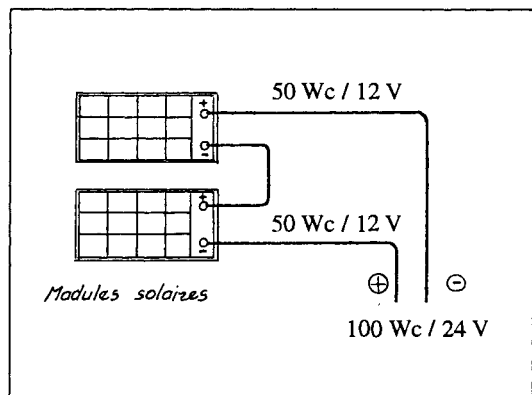


- *Exemple* : générateur photovoltaïque d'une puissance crête de 100 Wc et de tension 12 V. Si le courant maximal de sortie d'un module de 50 Wc est de 3 A, le courant maximal de sortie de deux modules montés en parallèle est de 6 A.

Montage série

Le pôle + de chaque module est relié au pôle - du module suivant.

Lorsque des modules semblables sont montés en série, la tension résultante est la somme des tensions de chaque module, mais l'intensité résultante ne change pas. Le principe est le même pour les batteries.



- *Exemple* : générateur photovoltaïque de 100 Wc / 24 V.

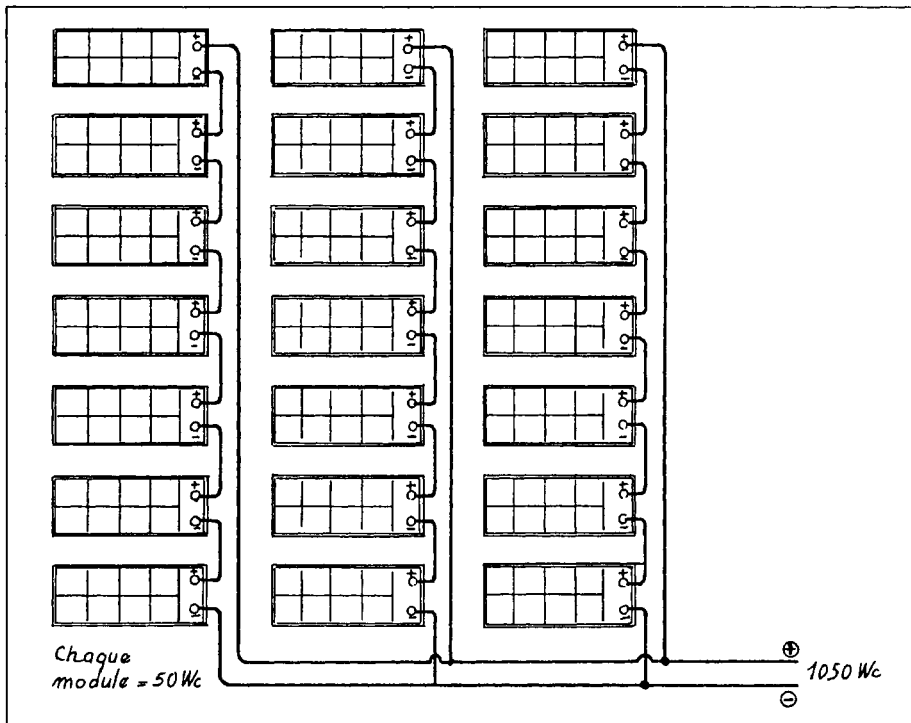
Si le courant maximal de sortie d'un module de 12 V est de 3 A, le courant maximal de sortie de deux modules en série reste de 3 A ; la tension est de 24 V.

Montage en parallèle et en série

La combinaison de montages série et parallèle est également possible, ce qui permet d'augmenter tension et puissance en même temps

Le générateur de l'exemple ci-dessous comprend 21 modules : 3 séries de 7 modules montés en parallèle. Si la tension de sortie d'un module est de 15 V (usage fréquent pour le pompage), la tension nominale de sortie de ce générateur est de 105 V. Si le courant maximal de sortie d'un module est de 3 A, le courant maximal de sortie de ce générateur est de 9 A.

Remarque : la mise en parallèle ou en série doit se faire avec des éléments identiques. Ceci est particulièrement important pour les montages en série : les caractéristiques d'une branche de modules seront celles du plus mauvais module.



Stockage de l'énergie

Le soleil fournit de l'énergie uniquement le jour et ceci de façon variable selon l'intensité lumineuse. Par contre, les utilisateurs consomment généralement de l'énergie jour et nuit et de façon variable, que ce soit pour s'éclairer, pour produire du froid, pour communiquer par radio ou téléphone ou pour regarder la télévision. C'est pourquoi il est souvent nécessaire de stocker l'énergie produite le jour afin qu'elle soit disponible à la consommation en permanence.

Certaines utilisations, comme la plupart des types de pompage photovoltaïque, utilisent des formes simples de stockage de l'énergie produite. Pendant la durée d'ensoleillement, l'électropompe débite de l'eau qui est généralement stockée dans un réservoir. Le débit fourni dépend directement de l'ensoleillement. Lorsque le soleil est absent, il n'y a plus de pompage mais le réservoir permet l'alimentation en eau. Ce principe, qui associe directement les modules à l'électropompe, prend le nom de pompage au fil du soleil.

Dans la plupart des autres cas, le stockage de l'énergie produite se fera dans des batteries. Il existe de nombreux types de batteries, chacune d'entre elles ayant été conçue pour un usage particulier. Elles sont définies par un ensemble de caractéristiques : tension nominale, capacité de stockage, aptitude au cyclage, tenue en décharge profonde, taux d'autodécharge, variations avec la température, maintenance, prix, etc. Ces caractéristiques sont fournies par le fabricant.

Pour l'usage spécifique du photovoltaïque, une batterie doit remplir les conditions suivantes : un nombre de cycles de charge et de décharge élevé sans altération, une faible autodécharge, un rendement électrique élevé et une maintenance légère.

CARACTÉRISTIQUES D'UNE BATTERIE

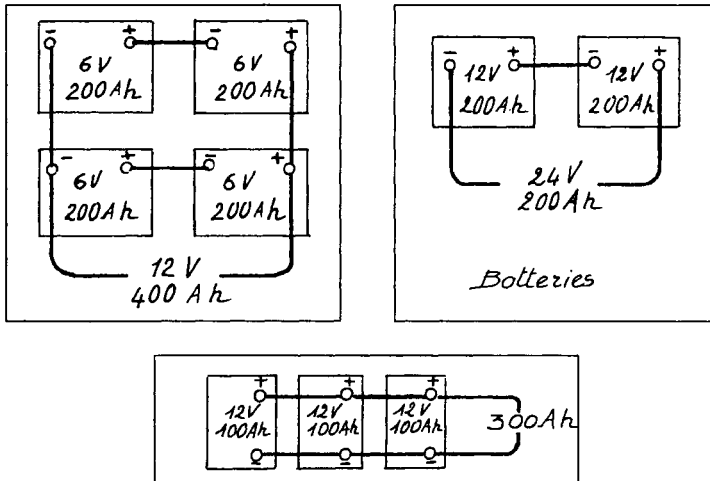
Tension nominale et capacité de stockage

La tension nominale d'une batterie dépend du nombre d'accumulateurs placés en série. Un accumulateur du type de ceux qui sont utilisés en photovoltaïque possède entre ses bornes une tension nominale de 2 V. Une tension de 12 V, par exemple, s'obtiendra en plaçant 6 éléments de 2 V en série (borne ⊕ d'un élément connecté à la borne ⊖ du suivant). Pour les systèmes solaires, les tensions d'utilisation les plus courantes sont 12 V, 24 V et 48 V.

La capacité de stockage correspond à la quantité d'énergie qui peut être stockée dans une batterie et restituée par celle-ci. Elle s'exprime en ampère-heure (Ah). Une batterie de 100 Ah permet théoriquement de fournir 1 ampère durant 100 heures (ou 2 A pendant 50 heures). On a ici le choix entre adopter une batterie de la capacité de stockage voulue, ou monter plusieurs circuits de batteries plus petites en parallèle. Il faudra alors s'assurer que chaque circuit de batteries a bien la même tension d'entrée-sortie que les autres.

Les schémas ci-dessous présentent les trois types d'assemblage de batteries, et leur effet sur la tension et la capacité du système de stockage.

Trois types d'assemblage de batteries

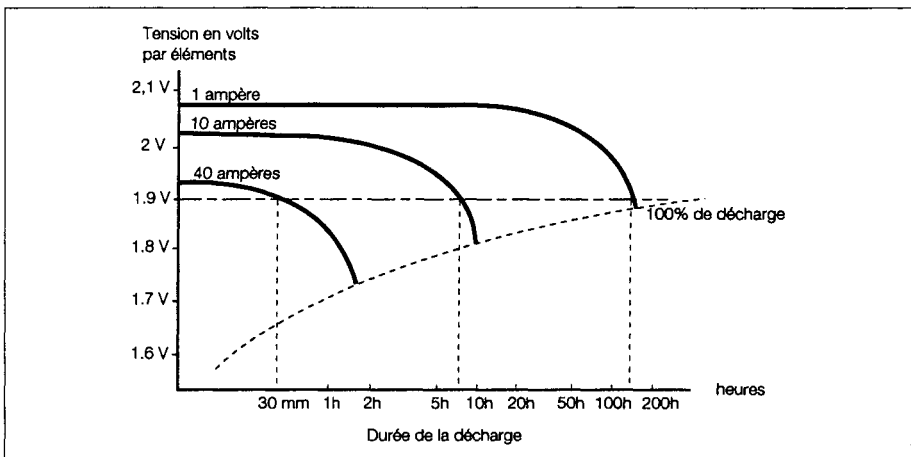


La mise en parallèle ou en série doit se faire avec des éléments identiques. Sinon, le système prendra les caractéristiques de la plus mauvaise batterie.

La capacité de la batterie est par ailleurs variable suivant la manière dont elle a été chargée et déchargée, c'est-à-dire selon l'intensité du courant de charge ou de décharge. Plus une batterie est chargée (ou déchargée) avec un faible courant, plus sa capacité est importante. On parle de C10 ou de C100 suivant que le courant de charge ou de décharge est égal au dixième ou au centième de la capacité ($I = C/10$ ou $I = C/100$).

Le graphique suivant présente à ce titre l'évolution théorique dans le temps de l'état de charge d'une batterie pour différents régimes de décharge.

Evolution théorique de l'état de charge d'une batterie



Dans la pratique, l'état réel de charge d'une batterie ne s'évalue, rigoureusement, que d'une seule manière : en mesurant la densité de l'électrolyte et la tension de chaque élément de la batterie à vide, c'est-à-dire déconnectée. Toutefois, par nécessité de terrain, on se limite à mesurer la tension pour avoir une indication sur l'état de chargée. C'est la seule valeur analogique qu'il est possible de collecter simplement. Cette information est cependant imparfaite (et parfois fautive), car tout dépend de "l'histoire" de la batterie et du moment de la mesure.

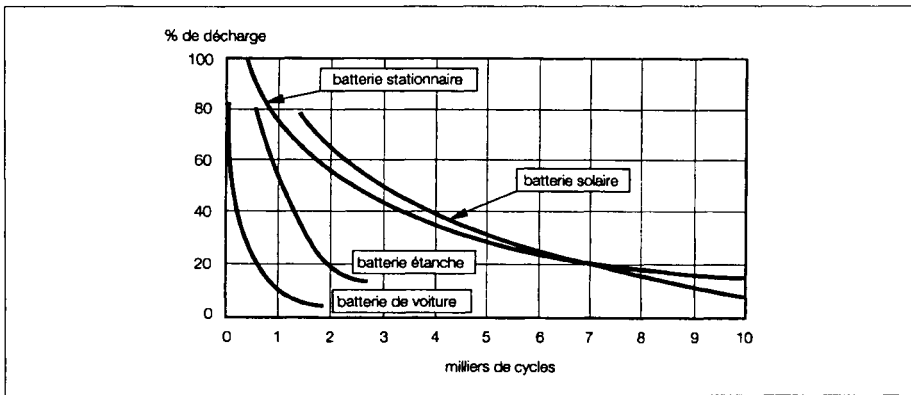
Durée de vie d'une batterie

Une batterie photovoltaïque est déchargée et rechargée chaque jour. C'est ce que l'on appelle un cyclage. La durée de vie d'une batterie correspond au nombre de cycles de charge/décharge qu'elle a eu à supporter dans sa vie. Elle dépend aussi de la profondeur de décharge (cf. page 24) de chaque cyclage.

Une batterie déchargée de 10 % chaque jour (avant d'être rechargée), aura une durée de vie beaucoup plus grande qu'une batterie déchargée quotidiennement de 30 %. Cette aptitude au cyclage dépend également du type de batterie. Les batteries "solaires" sont conçues pour supporter un nombre de cycles important. Elles sont généralement utilisées en usage "flottant" (*floating*), c'est à dire avec une faible décharge (20 à 30 % maximum) ; leur durée de vie en est d'autant plus grande.

Le graphique ci-dessous montre le lien entre la durée de vie (nombre de cycles) et la profondeur moyenne de décharge quotidienne de la batterie, pour différents types de batteries.

Durée de vie d'une batterie en fonction de la profondeur de décharge



La décharge profonde

La décharge profonde est la valeur qu'une batterie ne doit jamais atteindre, sans quoi il se produit une détérioration irrémédiable qui entraîne une dégradation importante de ses performances. Cette valeur s'exprime en pourcentage de la capacité de la batterie et varie entre 50 % et 100 % suivant le type de batterie.

Les batteries de type "solaire" peuvent exceptionnellement être déchargées jusqu'à 80 % de leur capacité. Par exemple, une batterie de 200 Ah pourra fournir 160 Ah au maximum, mais avec des risques de dégradation.

Les systèmes de régulation ont pour rôle d'éviter d'atteindre le seuil de décharge profonde. Ces systèmes évaluent le taux de décharge par mesure de la tension. Lorsque celui-ci est trop grand, c'est-à-dire que la tension est trop faible, ils coupent la fourniture d'électricité afin de sauvegarder la batterie.

Taux d'autodécharge

Une batterie inutilisée se décharge d'elle-même. Ceci est dû à des phénomènes électrochimiques. Les valeurs courantes d'autodécharge sont de l'ordre de 1 % à 10 % de la capacité par mois, suivant le type de batterie.

Variations avec la température

Les caractéristiques précédentes sont influencées par toute variation de température. En général, le taux d'autodécharge augmente avec la température et double tous les 10 °C.

La capacité des batteries au plomb diminue sensiblement lorsque la température est inférieure à 25 °C. C'est l'inverse pour les batteries au nickel-cadmium.

Maintenance

Le contrôle du niveau d'électrolyte représente souvent la maintenance la plus contraignante dans les systèmes photovoltaïques.

LES DIFFÉRENTS TYPES DE BATTERIE

Il est globalement possible de séparer les batteries en 5 types :

- les batteries au plomb (Pb) : étanches, à plaques planes minces, à plaques planes épaisses, à plaques tubulaires ;
- les batteries au cadmium-nickel (Cd-Ni).

Les batteries étanches au cadmium-nickel supportent sans problème des décharges profondes (100 %), contrairement aux batteries au plomb qui ne doivent jamais être déchargées à plus de 50-80 % selon leur type. On recommande même, pour les batteries au cadmium-nickel, une décharge complète périodique à des fins de maintenance. Leur prix est par contre beaucoup plus élevé que pour les batteries au plomb. Le choix de la batterie dépendra en fin de compte du compromis qui sera fait, en fonction des utilisations envisagées, entre le rapport prix/capacité de la batterie, et sa résistance à d'éventuelles décharges accidentelles. Pour les systèmes photovoltaïques, on préconise d'utiliser des batteries au plomb à plaques tubulaires.

L'annexe 1 présente les principales caractéristiques de ces différents types de batteries, et les ordres de grandeur de leurs prix relatifs.

LA SÉCURITÉ ET LE BON FONCTIONNEMENT DES BATTERIES

La sécurité des personnes est primordiale dans l'usage des batteries. En particulier, elles dégagent de l'hydrogène. Au contact de l'oxygène de l'air, et en présence d'une flamme, ce gaz provoque des explosions violentes. Il est donc impératif de ventiler le local contenant les batteries pour éviter l'accumulation d'hydrogène. Il est, pour la même raison, très dangereux et interdit de fumer, de faire du feu à proximité de ce local ou d'y placer un appareil électrique susceptible de produire des étincelles (tels les régulateurs ou les disjoncteurs).

L'électrolyte (liquide permettant la réaction chimique) des batteries au plomb est en général de l'acide sulfurique. La caractéristique principale de l'acide est sa densité qui est de 1,26 (en dessous de 1,20, la batterie est déchargée). On peut aussi l'exprimer en degré baumé (12 °B). On mesure cette densité avec un pèse-acide, appareil très simple et peu coûteux. L'évaporation d'eau de la batterie doit être obligatoirement compensée, pour éviter que les plaques ne soient découvertes, par de l'eau déminéralisée et jamais avec une eau quelconque. L'eau déminéralisée est soit de l'eau distillée, soit de l'eau de pluie, soit de l'eau de condensation. Il ne faut jamais rajouter d'acide dans une batterie !

Pour les régions montagneuses, il est nécessaire de prendre en compte le problème du gel dans le choix du type de batterie.

L'annexe 2 précise les principales consignes de sécurité à observer dans l'utilisation des batteries.

Régulation et traitement du courant

PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT DU RÉGULATEUR

Le régulateur a essentiellement un rôle de protection contre la surcharge ou la décharge profonde de la batterie. Il évite qu'en fin de charge d'une batterie ne se produise un phénomène de surcharge qui amènerait une ébullition provoquant une perte d'eau et que la décharge ne dépasse un seuil limite (généralement 80 % de la capacité de la batterie), ce qui l'endommagerait.

La mesure de la tension de la batterie permet d'évaluer son état de charge (cf. page 23). Les régulateurs sont donc réglés à des tensions de coupure (seuil haut et seuil bas) qui correspondent aux limites de charge et de décharge à ne pas dépasser.

Ce réglage est principalement fonction du type de batterie. Il varie aussi en fonction du courant de charge (taille du générateur), du courant de décharge (nombre et taille des récepteurs) ainsi que des conditions locales (température). Ce réglage nécessite l'intervention d'un professionnel (en usine ou sur le terrain).

CARACTÉRISTIQUES D'UN RÉGULATEUR

La tension de 12 V, 24 V ou 48 V est choisie en fonction de la tension de sortie du générateur photovoltaïque pour respecter l'adéquation des tensions.

Pour déterminer la puissance acceptable, il faut distinguer les deux parties du régulateur :

- *partie régulation de charge* (entrée du régulateur) : le régulateur est défini par son courant d'entrée, on le choisira supérieur au courant maximal délivré par le générateur photovoltaïque.
- *partie régulation de décharge* (sortie du régulateur) : le courant de sortie du régulateur est choisi en fonction du courant maximal demandé par les récepteurs. Le courant de sortie admissible devra être supérieur ou égal au courant maximal récepteur en veillant bien à tenir compte des courants de pointe (au démarrage d'un moteur par exemple, il y a un fort "appel" de courant).

L'annexe 3 précise les différents types de régulateurs de charge.

QUELQUES REMARQUES SUR LES RÉGULATEURS

La régulation de décharge des régulateurs cités agit essentiellement par ouverture du circuit de décharge (régulation par coupure). Il s'ensuit une impossibilité d'alimenter ces récepteurs jusqu'à ce que la batterie soit de nouveau chargée. A ce moment là le régulateur réenclenche automatiquement le circuit des récepteurs. Il est nécessaire de bien expliquer ce phénomène aux utilisateurs, sans quoi ces derniers, en manque de courant, risquent de "bricoler" et de provoquer ainsi une panne de l'installation.

♦ *Alarme* : Le régulateur lors d'une décharge excessive peut enclencher une alarme (voyant, sonnerie) afin d'avertir l'utilisateur de la coupure prochaine des récepteurs.

♦ *Régulateur à double seuil* : pour certaines installations comportant un récepteur prioritaire, il existe des régulateurs à double seuil de décharge qui permettent d'arrêter certaines utilisations (éclairage) avant d'autres (réfrigérateur à vaccins).

♦ *Absence de régulateur* : dans les petites applications (puissance inférieure à 50 Wc), lorsque la charge est très régulière (région très ensoleillée) et que la décharge est constante, il est possible de ne pas installer de régulateur à condition de placer une batterie de capacité suffisamment importante.

LES DIODES

Diode anti-retour

Une cellule photovoltaïque se comporte comme un récepteur lorsqu'elle ne reçoit plus de rayonnement solaire (nuit, cellule couverte). Elle consomme alors du courant comme une vulgaire lampe. Pour éviter dans ce cas de décharger la batterie, on utilise un composant électronique qui laisse passer le courant dans un sens et pas dans l'autre : la diode. Cette diode est installée en série entre les modules et la batterie, c'est la diode anti-retour, également appelée diode série.

La diode est caractérisée par sa tension (en général 0,6 V) et par l'intensité maximale du courant qui la traversera. Il est important de prévoir une diode de courant nettement plus élevé que le courant du générateur pour éviter une chute de tension anormale.

En général, la diode anti-retour est initialement installée :

- soit dans le boîtier de connexion du module ;
- soit à l'intérieur du régulateur.

Quand le générateur est constitué de modules en parallèle, il y a une diode anti-retour sur chaque branche. En effet il se peut qu'une branche débite plus de courant qu'une autre, dans ce cas, sans la diode, la première branche débiterait dans la seconde.

Certains régulateurs ne sont pas munis de diodes anti-retour. Ceci est à vérifier auprès du constructeur. La présence de diodes à l'intérieur du boîtier de connexion ne signifie pas forcément qu'il s'agisse de diodes anti-retour : elles peuvent être des diodes by-pass.

Diode by-pass

Lorsqu'une partie d'un champ de modules est accidentellement couverte, le courant produit par le reste du champ continue à circuler et traverse les cellules cachées. Dans ce cas, ces dernières cellules se comportent en récepteur et risquent l'échauffement et la destruction. Pour éviter ce phénomène, on installe sur les modules des diodes qui dérivent le courant en cas d'obstruction de cellules. Ce sont les diodes by-pass encore appelées diodes parallèles, de protection ou de dérivation.

L'installation de ces diodes de protection ne se justifie que lorsque la tension de sortie du générateur est supérieure ou égale à 48 V.

LES ONDULEURS

Certaines utilisations de l'énergie solaire se font en courant alternatif. Il est dans ce cas nécessaire de convertir le courant continu en courant alternatif, au moyen d'un onduleur.

On privilégiera en général l'usage d'appareils en courant continu développés spécifiquement pour le solaire et donc très économes. Les cas où l'usage du courant alternatif est préférable concernent le pompage ou l'usage de la télévision : les équipements en courant alternatif sont, dans ce cas, plus fiables et largement disponibles. La grande diffusion est souvent un critère de choix car il vaut mieux privilégier la garantie d'un bon service après-vente à d'autres qualités techniques des équipements.

Dimensionnement d'un système photovoltaïque

PRINCIPES GÉNÉRAUX

L'utilisation des systèmes solaires est soumise à certaines contraintes. La plus importante d'entre elles peut s'énoncer de la façon suivante : *"Il faut toujours respecter l'équilibre entre l'énergie produite par le générateur et l'énergie consommée par l'utilisateur."*

Du fait d'une production d'énergie exclusivement diurne et parfois aléatoire (nuages), il n'est pas possible de dimensionner les systèmes photovoltaïques en équilibrant les puissances, celle du générateur et celle des équipements utilisateurs, comme cela est pratiqué avec les groupes électrogènes. L'équilibre qui conditionne le bon fonctionnement d'un système photovoltaïque doit être réalisé entre l'énergie produite et l'énergie consommée sur une période donnée, par jour en général.

La présence de la batterie (ou d'un réservoir pour le pompage) permet de compenser un déficit accidentel entre énergie produite et énergie consommée, déficit qui peut être dû à un moindre ensoleillement d'un jour ou à une surconsommation exceptionnelle de la part des utilisateurs. Mais si cette surconsommation s'étale sur une plus grande période, soit les batteries se détériorent rapidement (en cas d'absence d'un régulateur), soit le système s'arrêtera (coupure du régulateur), généralement aux moments de plus forte utilisation du système.

Deux principes sont à respecter :

- **l'énergie à produire** (par jour) par le générateur photovoltaïque devra toujours être supérieure ou égale aux besoins en énergie (par jour) de

l'utilisateur. Avant d'acquiescer un système solaire, il sera nécessaire de définir assez précisément les besoins en énergie de l'utilisateur afin de pouvoir dimensionner correctement le générateur photovoltaïque ;

- **l'énergie réellement consommée** (par jour) par l'utilisateur devra toujours rester inférieure ou égale à l'énergie réellement produite (par jour) par le générateur photovoltaïque. Après avoir acquis un système solaire, il est nécessaire que l'utilisateur respecte la consommation d'énergie évaluée lors de la définition des besoins, puisque c'est en fonction de ceux-là que le générateur a été dimensionné.

Ce deuxième point est certainement le plus important. Une fois définis les besoins, le bon dimensionnement d'un projet photovoltaïque n'est généralement qu'un problème technique, de calcul de puissance, tension, capacité des batteries, que nous aborderons par la suite. La véritable clé de réussite d'un tel projet réside plutôt dans une bonne information des futurs utilisateurs aux caractéristiques du photovoltaïque. Si l'utilisateur consomme, après réalisation du projet, davantage d'énergie que le volume estimé pour dimensionner le système, il risque d'entraîner une rupture de l'équilibre production-consommation, avec les conséquences que l'on a mentionnées.

Les sources de telles modifications dans la consommation peuvent être nombreuses :

- ajouts de nouveaux appareils, non prévus au départ ;
- augmentation du nombre d'heures d'éclairage ;
- augmentation du nombre de litres d'eau consommée ;
- ouverture trop fréquente d'un réfrigérateur et/ou augmentation du régime de son moteur ;
- utilisation du système pour la recharge de batteries extérieures au système (lorsque cela n'était pas prévu) ;
- etc.

On devra d'autant plus insister sur l'intérêt d'une bonne discipline dans l'usage de l'énergie solaire que :

- nombre de personnes sont habituées aux groupes électrogènes, pour lesquels cette contrainte n'existe pas ;
- l'énergie solaire fait parfois l'objet d'un usage collectif. La discipline doit donc être collective.

Au besoin, et pour des projets pour lesquels un dysfonctionnement du système pourrait être préjudiciable (dispensaire contenant, entre autres, des

réfrigérateurs solaires pour la conservation des vaccins), on pourra envisager un léger surdimensionnement du générateur pour faire face à des utilisations imprévues. On notera que ce surdimensionnement ne saurait être excessif puisqu'il a un coût (plus de modules et de batteries qu'il est nécessaire).

Exemple de la démarche spécifique au photovoltaïque

Un utilisateur a besoin de s'éclairer.

I. *Premier temps* : en tenant compte des variations saisonnières, il évalue la puissance d'éclairage désirée (choix du type et du nombre de lampes), et le nombre d'heures d'utilisation par jour.

II. *Deuxième temps* : à partir de ces données et des conditions d'ensoleillement du site, un professionnel du solaire calcule la puissance du générateur opérationnel pour couvrir les besoins.

III. *Troisième temps* : une fois le système installé, cette personne doit utiliser l'éclairage comme cela a été défini au départ. S'il y a dépassement du nombre d'heures prévues, alors le système peut ne pas fournir suffisamment d'énergie et se mettre en "protection" (arrêt du système pour une certaine durée).

On trouvera dans la deuxième partie les paramètres qui permettent le calcul des besoins en énergie pour les différentes applications envisageables (électricité, pompe, froid, ...).

Nous précisons ci-dessous les règles de calcul nécessaires au dimensionnement du générateur photovoltaïque lui-même : modules solaires, batteries et régulateur, câbles électriques.

DIMENSIONNEMENT DES MODULES SOLAIRES

Le calcul de l'énergie fournie par un module solaire est déterminé par l'irradiation (paramètre local dépendant de l'ensoleillement, et la puissance crête du module) donnée fournie par le constructeur.

L'irradiation, exprimée en kWh/m².j (kilowatt heure par mètre carré et par jour) correspond à l'énergie totale qui est reçue sur un plan perpendiculaire aux rayons du soleil et par jour. C'est une moyenne du rayonnement solaire reçue au cours d'une journée.

Le rayonnement solaire maximal instantané est de l'ordre de 1000 W/m^2 . Les valeurs moyennes de l'irradiation peuvent être fournies par des services météorologiques, parfois les services de l'aviation, ainsi que des organismes qui travaillent dans ce domaine ou les industriels concernés. On peut retenir les ordres de grandeur suivants :

- sud de la France : $3 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j}$;
- Afrique côtière : $4 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j}$;
- Maghreb : $5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j}$;
- Sahel : $6 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j}$.

La puissance crête, exprimée en watt crête (W_c) ou watt peak (W_p) d'un module est par définition la puissance qu'il délivre sous un rayonnement solaire de 1000 W/m^2 . Les modules standards actuels (cristallins) ont une puissance crête variant (selon le constructeur) de 45 à 55 W_c pour une surface de l'ordre de $0,5 \text{ m}^2$, soit 90 à 110 W_c au m^2 . Ce paramètre permet, lorsque l'on connaît l'irradiation sur les lieux du projet à implanter, de déterminer l'énergie produite par un module en une journée.

Pour un module "moyen" de 50 W_c , l'énergie produite par jour est de l'ordre de :

- 110 Wh/j pour une irradiation de $3 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j}$;
- 150 Wh/j pour une irradiation de $4 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j}$;
- 200 Wh/j pour une irradiation de $5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j}$;
- 230 Wh/j pour une irradiation de $6 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j}$.

Pour un module de 55 W_c , il suffit d'augmenter ces valeurs de 10 % pour obtenir un ordre de grandeur satisfaisant (et inversement pour un module de 45 W_c).

Les estimations de puissance plus précises se font au moyen de courbes caractéristiques (qui sont fonction du rayonnement solaire et de la température), fournies par les constructeurs. Dans les régions dans lesquelles se présentent de fortes variations saisonnières de l'ensoleillement, il peut d'autre part être souhaitable de procéder à des estimations des énergies produites et consommées pour plusieurs périodes de l'année, et de dimensionner le système en fonction de la situation la moins favorable.

Mentionnons que la plupart des constructeurs disposent de logiciels performants qui permettent d'optimiser le dimensionnement d'un système dans des cas complexes (fluctuations saisonnières de l'irradiation et/ou des besoins en énergie). On n'hésitera pas à faire appel à leurs compétences.

Dans les cas plus simples, où les installations sont de taille relativement modeste (moins de 10 modules), un ordre de grandeur peut suffire. En effet, les modules ayant des puissances crête relativement standardisées (autour de 50 Wc), on dispose toujours après calcul d'une marge de sécurité (la différence entre les résultats de calcul de puissance et le premier multiple de 50 supérieur à ce chiffre, si 50 Wc est la puissance crête des modules disponibles). Rappelons que la puissance désirée s'obtient en associant plusieurs modules. Ainsi, pour obtenir une énergie moyenne par jour de 1 kWh.j au Maghreb (irradiation 5 kWh/m².j), il faudra environ 5 modules d'une puissance crête de 50 Wc (5 x 200 Wh/j).

Les trois étapes pour dimensionner les modules solaires

Pour dimensionner les modules solaires, on procède en trois étapes :

- ♦ *Étape 1.* On calcule l'énergie qui sera consommée par jour (E_c).
- ♦ *Étape 2.* On calcule l'énergie à produire.

L'énergie produite doit, à un coefficient correcteur près, équilibrer l'énergie consommée telle que l'évaluation des besoins l'a identifiée :

$E_p = E_c / k$	<i>E_p : énergie produite (Wh)</i>
	<i>E_c : énergie consommée (Wh)</i>
	<i>k : coefficient correcteur</i>

Le coefficient k tient compte :

- de l'incertitude météorologique ;
- de l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison ;
- du point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut être aggravé par : la baisse des caractéristiques des modules, la perte de rendement des modules dans le temps (vieillesse et poussières) ;
- du rendement de charge et de décharge de la batterie (90 %) ;
- du rendement du régulateur (95 %) ;
- du rendement de l'onduleur, s'il y en a un ;
- des pertes dans les câbles et connexions.

Pour les systèmes avec batterie, le coefficient k est en général compris entre 0,55 et 0,75. La valeur souvent utilisée dans les calculs de système avec batterie est : $k \approx 0,65$.

Pour un système de pompage (généralement sans batterie) le coefficient k a une valeur différente. Le dimensionnement de ces systèmes sera traité de façon séparée.

♦ *Étape 3.* On calcule la taille du générateur à installer.

La puissance crête du générateur à installer dépend de l'irradiation du lieu. On la calcule en appliquant le formule suivante :

$P_c = E_p / I_r$	<i>P_c : puissance crête (Wc)</i> <i>E_p : énergie produite par jour (Wh/j)</i> <i>I_r : irradiation quotidienne (kWh/m².j), moyenne annuelle</i>
Ce qui revient à :	
$P_c = E_c / (k \cdot I_r)$	<i>P_c : puissance crête (Wc)</i> <i>E_c : énergie consommée par jour (Wh/j)</i> <i>k : coefficient correcteur</i>

Le dimensionnement d'un générateur fait appel à la connaissance des besoins en énergie de toutes les utilisations envisagées. Ces besoins étant spécifiques à chaque utilisation, ils seront analysés plus en détail dans la deuxième partie de cet ouvrage. Nous nous contentons ici de produire (encadré pages suivantes) deux exemples de dimensionnement de générateurs photovoltaïques, les besoins en énergie de chaque utilisation étant supposés déjà connus.

**EXEMPLE DE CALCUL DE LA PUISSANCE DU GÉNÉRATEUR
D'UN SYSTÈME AVEC BATTERIE
POUR L'ÉCLAIRAGE ET LA TÉLÉVISION**

Un usager désire chaque jour :

- 3 heures d'éclairage de 3 points lumineux de 13 W/12 V (lecture) ;
- 5 heures d'éclairage de 2 points lumineux de 4 W/12 V (veilleuse) ;
- 2 heures d'écoute d'une télévision (45 W/12 V en courant continu).

Le dimensionnement du générateur est le suivant :

♦ *Étape 1. Calcul de l'énergie consommée par jour (E_c)*

$$E_c = (3 \times 3 \times 13) + (5 \times 2 \times 4) + (2 \times 45) = 247 \text{ Wh/j}$$

c'est-à-dire : 3 heures x 3 points x 13 watts + 5 heures x 2 points x 4 watts + 2 heures x 45 watt.

♦ **Étape 2. Calcul de l'énergie à produire (E_p)**

$$E_p = E_c / k = 247 / 0,65 = 380 \text{ Wh/j}$$

♦ **Étape 3. Calcul de la puissance crête du générateur (P_c)**

Les relevés météorologiques donnent une irradiation quotidienne moyenne de 5 kWh/m².j

$$P_c = E_p / I_r = 380 / 5 = 76 \text{ Wc}$$

si l'on dispose de panneaux de 50 Wc, on en prendra 2.

On remarquera que l'on dispose alors d'une "marge de réserve" proche d'une heure supplémentaire d'utilisation pour la totalité des équipements.

Par contre, si les calculs sur la puissance crête à installer avaient conduit à un résultat plus proche de 50 Wc, par exemple 60 Wc, il faudrait se poser la question de savoir s'il ne vaut pas mieux restreindre la consommation (de 10 Wc dans ce cas), de façon à n'acheter qu'un seul panneau.

**EXEMPLE DE CALCUL DE LA PUISSANCE DU GÉNÉRATEUR
D'UN SYSTÈME AVEC BATTERIE
POUR LA CONSERVATION DE VACCINS**

Un centre de santé désire utiliser un réfrigérateur solaire pour :

- stocker l'équivalent de 30 litres de vaccins ;
- congeler 4 accumulateurs de froid par jour ;

La température ambiante est de 30 °C au maximum. En se référant aux données de l'OMS pour 32 °C, le réfrigérateur adéquat a une consommation énergétique de $E_c = 600 \text{ Wh/j}$.

Le dimensionnement du générateur est le suivant :

♦ **Étape 1. Calcul de l'énergie à produire (E_p)**

$$E_p = E_c / k = 600 / 0,65 = 923 \text{ Wh/j}$$

♦ **Étape 2. Calcul de la puissance crête du générateur (P_c)**

Les relevés météorologiques donnent une irradiation quotidienne moyenne de $5 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{j}$

$$P_c = E_p / I_r = 923 / 5 = 185 \text{ Wc}$$

♦ **Choix final : 4 modules cristallins de 50 Wc**

Un léger surdimensionnement (plutôt 5 à 7 modules) peut être souhaitable dans les zones pour lesquelles l'irradiation connaît de fortes fluctuations sur des périodes excédant l'autonomie des batteries. On peut pour certaines applications diminuer la consommation d'énergie dans les périodes de moindre ensoleillement, mais pas pour la conservation de vaccins.

DIMENSIONNEMENT DES BATTERIES

Pour réaliser le dimensionnement de la batterie, on procède de la façon suivante :

- ♦ *Étape 1.* On calcule l'énergie consommée (E_c) par les diverses utilisations.
- ♦ *Étape 2.* On détermine le nombre de jours d'autonomie (N) dont on souhaite bénéficier.
- ♦ *Étape 3.* On détermine la profondeur de décharge maximale acceptable par la batterie (D) d'après le type de batterie utilisé.
- ♦ *Étape 4.* On calcule la capacité (C) de la batterie en appliquant la formule suivante :

$$C = (E_c \cdot N) / (D \cdot U)$$

C : capacité de la batterie (Ah)

E_c : énergie consommée par jour (Wh/j)

N : nombre de jours d'autonomie

D : décharge maximale admissible (de 0,5 à 0,8) pour batteries au plomb

U : tension de la batterie (V)

Au sujet du nombre de jours d'autonomie

Ce chiffre correspond aux périodes où il n'y a pas de production d'énergie de la part des modules (jours sans soleil, panne éventuelle...) et où la batterie seule doit prendre la relève. Ce chiffre permet de calculer la réserve tampon pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs.

On choisit généralement :

- de 3 à 5 jours pour les installations rurales en climat tropical ;
- de 5 à 8 jours pour les installations rurales en climat équatorial ;
- 5 jours pour les réfrigérateurs à vaccins en climat tropical (classe A) ;
- 8 jours pour les réfrigérateurs à vaccins en climat équatorial (classe B) ;
- plus de 8 jours pour les systèmes professionnels (télécommunications).

Au sujet du taux de décharge maximale acceptable

Il s'agit du pourcentage de décharge exceptionnellement acceptable par la batterie sans qu'il y ait risque de détérioration (voir première partie p. 24). Les constructeurs préconisent :

- 80 % pour les batteries au plomb stationnaires (spécial solaire), soit $D = 0,80$;
- 50 % pour les batteries au plomb de démarrage (de voiture), soit $D = 0,50$;
- 100 % pour les batteries cadmium/nickel soit $D = 1,00$.

80 % de décharge veut dire qu'au maximum de décharge la batterie conserve toujours 20 % de charge.

Au sujet de la capacité

Vus les faibles courants de charge d'un générateur photovoltaïque, la capacité de la batterie est celle qui est donnée pour une valeur C_{100} dans les catalogues constructeurs.

EXEMPLES DE DIMENSIONNEMENT DES BATTERIES

Pour l'éclairage et la télévision

Reprenons les exemples utilisés lors du dimensionnement du générateur. Un usager désire chaque jour :

- 3 heures d'éclairage de 3 points lumineux de 13 W / 12 V (lecture) ;
- 5 heures d'éclairage de 2 points lumineux de 4 W / 12 V (veilleuse) ;
- 2 heures d'écoute d'une télévision (45 W / 12 V) ;

L'irradiation moyenne est de 5 Wh/m².j, en zone tropicale.

On choisit une batterie de démarrage 12 V (coût d'investissement limité pour ce petit système).

- ♦ **Étape 1.** L'énergie consommée est : $E_c = 247 \text{ Wh/j}$ (voir p. 36)
- ♦ **Étape 2.** On choisit 3 jours d'autonomie : $N = 3$.
- ♦ **Étape 3.** Le pourcentage de décharge acceptable pour cette batterie de démarrage est de 50 % : $D = 0,5$.
- ♦ **Étape 4.** On obtient donc une capacité $C_{100} = (E_c \cdot N) / (D \cdot U) = (247 \times 3) / (0,5 \times 12) = 124 \text{ Ah}$

On choisira une batterie standard (par exemple une batterie de 12 V, de capacité 150 Ah). L'autonomie est alors plus élevée que celle que l'on avait prévue. On peut aussi retenir une batterie standard de 100 Ah en réduisant l'autonomie à 2 jours et demi. Dans ce dernier cas, on risquera d'être parfois en rupture d'énergie.

Le surdimensionnement d'une batterie et surtout d'une batterie de démarrage ne pose aucun problème technique, au contraire (si ce n'est

son prix plus élevé). La décharge périodique sera moins profonde et la batterie "s'en portera mieux".

Pour la conservation de vaccins

Un centre de santé désire utiliser un réfrigérateur solaire dont les besoins en énergie sont de 600 W/j. On choisit une batterie stationnaire 24 V (type de batterie normalisé pour ce système).

- ♦ **Étape 1.** L'énergie consommée est : $E_c = 600 \text{ Wh/j}$ (voir p. 37)
- ♦ **Étape 2.** On choisit 5 jours d'autonomie : $N = 5$ (zone tropicale, classe A).
- ♦ **Étape 3.** Le pourcentage de décharge acceptable est de 80 % : $D = 0,8$
- ♦ **Étape 4.** On obtient donc une capacité $C_{100} = (E_c \cdot N) / (D \cdot U) = (600 \times 5) / (0,8 \times 24) = 156 \text{ Ah}$

Une capacité de 150 Ah est acceptable. Le choix sera : 2 batteries de 150 Ah/12 V, ou 12 éléments de 2 V de 150 Ah, pour former une tension de 24 V.

DIMENSIONNEMENT DU RÉGULATEUR

Principes

On sépare souvent pour ce calcul les 2 fonctions du régulateur : charge et décharge. Le dimensionnement de la régulation de charge (à l'entrée) est fonction de la puissance du générateur donc du courant produit par les modules (courant de charge). Le dimensionnement de la régulation de décharge (à la sortie) est fonction de la puissance totale des récepteurs donc du courant consommé par ces récepteurs (courant de décharge ou courant d'utilisation).

Caractéristiques d'entrée

L'intensité admissible du courant d'entrée du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale produite par le générateur. Cette intensité correspond à l'intensité maximale de chaque module, multipliée par le nombre de circuits de modules montés en parallèle. L'intensité maximale d'un module est fournie par le constructeur. Elle est généralement de l'ordre de 3 ampères.

Caractéristiques de sortie

L'intensité de sortie du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale appelée par les récepteurs. Elle peut être déterminée par la formule $I = P/U$, où P est la puissance totale (en watt) des récepteurs lorsqu'ils fonctionnent tous au maximum de leur puissance de fonctionnement, et où U est la tension aux bornes du générateur (en volt).

EXEMPLES DE DIMENSIONNEMENT DU RÉGULATEUR

Reprenons les exemples précédents :

Éclairage et télévision

Les besoins sont :

- 3 h d'éclairage de 3 points lumineux de 13 W / 12 V (lecture) ;
- 5 h d'éclairage de 2 points lumineux de 4 W / 12 V (veilleuse) ;
- 2 h d'écoute d'une télévision (45 W / 12 V).

La puissance du générateur est de 100 Wc (2 panneaux de 50 Wc). D'après les caractéristiques du constructeur le courant maximal fourni par un module est de 3 A. Les modules étant en parallèle, puisque nous sommes en 12 V, l'intensité du courant maximal fourni par le générateur est la somme des intensités de chaque panneau, soit 6 ampères.

La puissance totale des récepteurs est de 92 W ($3 \times 13 + 2 \times 4 + 1 \times 45$). Tous les récepteurs étant en parallèle, les intensités appelées par chaque appareil s'ajoutent ; le courant maximal appelé est donc de 7,7 ampères ($P = U \cdot I$).

Le régulateur devra donc avoir un courant d'entrée admissible supérieur à 6 A, et un courant de sortie admissible supérieur à 7,7 A. Etant

choisi parmi des modèles de série, il aura les caractéristiques du plus petit régulateur de modèle standard satisfaisant ces contraintes, soit ici :

- tension d'alimentation : 12 V ;
- courant d'entrée : 10 A ;
- courant de sortie : 10 A.

Conservation de vaccins

Besoins d'un centre de santé :

- stocker 30 litres de vaccins ;
- congeler 4 accumulateurs de froid par jour ;
- la température ambiante est de 30 °C au maximum.

La puissance du générateur est de 200 Wc ; la tension de la batterie est de 24 V ; les modules de 50 Wc sont nécessairement montés en série (2 par 2) pour obtenir 24 V et en parallèle (2 par 2) pour obtenir 200 Wc. D'après les caractéristiques du constructeur, le courant maximal fourni par un module est de 3 A. Le courant maximal fourni par le générateur est donc de 6 A.

La puissance du réfrigérateur correspond à celle de son compresseur : 60 W. L'intensité du courant appelée est donc de 2,5 ampères ($= 60 \text{ W} / 24 \text{ V}$). Il est à noter que le courant de démarrage d'un compresseur est beaucoup plus élevé que le courant standard d'utilisation ($\cong 7$ fois le courant nominal). Ce courant élevé est très bref. Si le régulateur est équipé d'une temporisation (cas le plus fréquent), il supportera cette intensité de démarrage sans se déclencher. Il faut toutefois vérifier ce point lors de l'achat du régulateur.

Le régulateur choisi aura les caractéristiques minimales suivantes :

- tension d'alimentation : 24 V ;
- courant d'entrée : 6 A ;
- courant de sortie : 2,5 A.

Les régulateurs des réfrigérateurs à vaccins sont généralement étudiés sur mesure et respectent donc ces caractéristiques. Certains réfrigérateurs sont équipés d'une déconnexion automatique de tension basse. Il est alors possible de les brancher en direct sur la batterie. La protection contre les surtensions reste toutefois à faire par un régulateur plus simple, n'assurant que cette fonction.

DIMENSIONNEMENT DES CÂBLES ÉLECTRIQUES

Principes

Il est nécessaire de limiter la longueur des liaisons entre le générateur photovoltaïque et les récepteurs. Cette distance n'excède jamais quelques mètres.

En effet les systèmes solaires fonctionnent généralement sous faible tension (12 V, 24 V, 48 V) donc avec un courant assez élevé ($P=U.I$, si U est faible, I est élevé). Le transport à distance de ce courant de plusieurs ampères implique inévitablement des pertes en ligne importantes par échauffement (effet joule).

Ces pertes sont, pour chaque circuit de récepteurs :

- proportionnelles au carré de l'intensité ;
- proportionnelles à la longueur des câbles électriques ;
- inversement proportionnelles à la section des câbles.

Ces pertes entraînent par conséquent une chute de tension. La batterie et les récepteurs ne sont alors plus correctement alimentés, d'où une perte globale d'énergie trop importante pour le système qui lui enlève sa rentabilité.

La chute de tension occasionnée par les pertes en ligne s'établit, pour chaque circuit de récepteurs, au moyen des formules :

$$U = R \cdot I \quad \text{et} \quad R = r \cdot l / s$$

U : chute de tension (en volt)

I : intensité traversant le circuit étudié (en ampère)

R : résistance du câble (en ohm)

r : résistivité linéaire du conducteur constitutif du câble

$$r = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ ohm.mètres pour le cuivre}$$

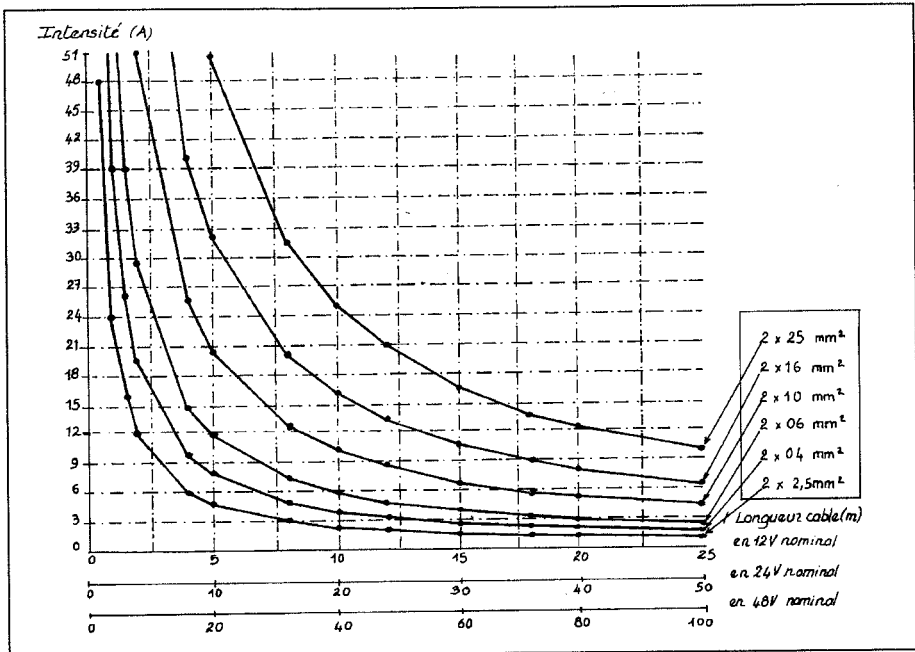
$$r = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ ohm.mètres pour l'aluminium}$$

l : longueur du câble en m

s : section du câble en m^2

Les pertes dans les câbles sont inévitables, mais il convient de les réduire au maximum afin de rester dans des choix de section "acceptable".

Pour simplifier ce calcul, il existe des abaques pour choisir la section des conducteurs (voir schéma ci-contre). On considère que les pertes de tension ne doivent pas excéder un faible pourcentage (de 1 à 3 %) pour une tension de 12 V. Ceci correspond au maximum à 0,36 V de chute de tension (ce qui est loin d'être négligeable pour le photovoltaïque).



EXEMPLE DE CALCUL SIMPLIFIÉ POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CÂBLES

On considère une installation en 12 volts, de 3 lampes de 13 watts, distantes de 50 m de la batterie. L'intensité du courant devant alimenter ces récepteurs est : $I = 3 \times 13 \text{ watts} / 12 \text{ volts}$, soit 3,25 ampères.

Si on choisit un câble en cuivre de section $1,5 \text{ mm}^2$, la résistance du câble sera :

$$R = r \cdot l / s = 1,6 \cdot 10^{-8} \times 50 / 1,5 \cdot 10^{-6} = 0,53 \text{ ohms}$$

La baisse de tension dans le câble est donc $U = R \cdot I = 0,53 \times 3,25 = 1,7 \text{ volts}$, ce qui représente 14 % de la tension totale et n'est pas acceptable. Un câble de 4 mm^2 de section est une solution limite (5 % de la tension). On retiendra plutôt un câble de 10 mm^2 (2 % de la tension), ou deux câbles de 4 mm^2 (3 % de perte), ou un câble de 4 mm^2 de section, mais en aluminium (3 % de pertes).

On peut opter pour une autre solution visant à réduire le courant dans le circuit, en adoptant une tension plus élevée ($P=U.I$, donc si on choisit U plus grand, I sera réduit). En règle générale, on conserve le 12 volts pour les générateurs inférieurs à 100 Wc, et l'on adopte plutôt le 24 volts pour les applications domestiques de plus grande puissance.

Les tensions supérieures sont utilisées pour des applications plus importantes (télécommunications, pompage, centrales photovoltaïques...).

Une autre solution est de réduire la longueur de câblage, par exemple en prévoyant dès le départ un emplacement des modules et de la batterie plus proches de l'utilisation finale (pour l'exemple ci-dessus, longueur maximale de 27 m pour une section de 4 mm² en cuivre).

Le problème du dimensionnement des câbles ne doit pas être une "étape finale" dans le processus de dimensionnement du système. Les contraintes sur les coûts des câbles électriques peuvent conditionner les autres choix : localisation ici plutôt que là du champ de modules, mais aussi choix entre adoption d'un générateur central et commun à toutes les applications, et multiplication de systèmes autonomes, plus près des différents utilisateurs.

Mise en place d'un générateur photovoltaïque

Ce chapitre n'a pas pour objectif de constituer un guide complet de montage d'une installation solaire importante et encore moins de permettre aux personnes en charge d'un tel projet de remplacer un professionnel du photovoltaïque. Nous présentons simplement une série de notions à connaître pour conduire le projet, pour s'assurer au cours d'un chantier du bon déroulement de toutes les étapes, ou encore pour pouvoir participer soi-même à la réalisation de "petites" installations (faible puissance, kits).

Pour mettre en place un équipement photovoltaïque, la méthode est la suivante :

1. Réception technique du matériel (recette en usine et/ou dans le pays).
2. Choix du positionnement des modules (emplacement, orientation et inclinaison).
3. Réalisation du génie civil (socle support des modules, local technique, préparation de la tête de forage).
4. Montage des différents éléments (montage et réglage des modules, positionnement et fixation des appareils, installation de la pompe).
5. Câblage des différents éléments (raccordement électrique entre modules, batterie, électronique de contrôle et récepteurs, mise en série/parallèle).
6. Démarrage, essais et réception finale de l'installation.

La réalisation d'une installation photovoltaïque comporte certains risques (tension élevée, manipulation d'acide). Pour cette raison, il est important de prendre connaissance des consignes de sécurité résumées en annexe 2.

RÉCEPTION TECHNIQUE

La réception technique est une étape fondamentale puisque c'est à partir d'elle que les fournisseurs et entrepreneurs se trouvent engagés quant à la qualité et au bon fonctionnement du matériel livré et par la suite du matériel installé.

Dans le cadre de projets, la réception technique se décompose en plusieurs volets : réceptions du matériel en usine et sur site, réceptions temporaire et définitive de l'installation sur site. Pour les petits systèmes (avec installation locale), la réception ne concerne que le matériel. En général c'est un certificat de garantie.

Réception du matériel en usine

Elle est réalisée soit par le gestionnaire du projet soit par l'entrepreneur responsable de l'installation. Elle s'effectue dans l'usine avant que le matériel ne soit expédié. L'objectif est de vérifier la conformité de l'ensemble des équipements par rapport aux engagements contractuels du fournisseur. Ce contrôle comprend : la vérification des caractéristiques techniques et parfois des performances des différents appareils, celle de la présence de l'ensemble des équipements suivant la liste de colisage et enfin celle de la présence des documents techniques.

Réception du matériel dans le pays de destination

Elle est réalisée soit par le gestionnaire du projet soit par l'entrepreneur responsable de l'installation. Dans ce deuxième cas, il est intéressant que le gestionnaire de projet assiste à la réception. Elle s'effectue au niveau d'un port ou d'un aéroport. L'objectif est de vérifier la présence de tous les équipements suivant la liste de colisage ainsi que leur état. Des réserves doivent être émises à l'égard du transitaire, transporteur ou autre personne responsable de l'affrètement s'il y a un quelconque dégât matériel.

EMPLACEMENT, ORIENTATION ET INCLINAISON DES MODULES

Avant toute réalisation pratique il nécessaire de se préoccuper du positionnement des modules qui conditionne le choix des supports ainsi que le génie civil (réalisation de plots de fixation en béton). Les modules ne délivreront leur puissance maximale que s'ils reçoivent le maximum de rayonnement (d'où le choix d'une orientation et d'une inclinaison à respecter). Ils doivent également ne jamais avoir d'ombre portée, à aucun moment de la journée.

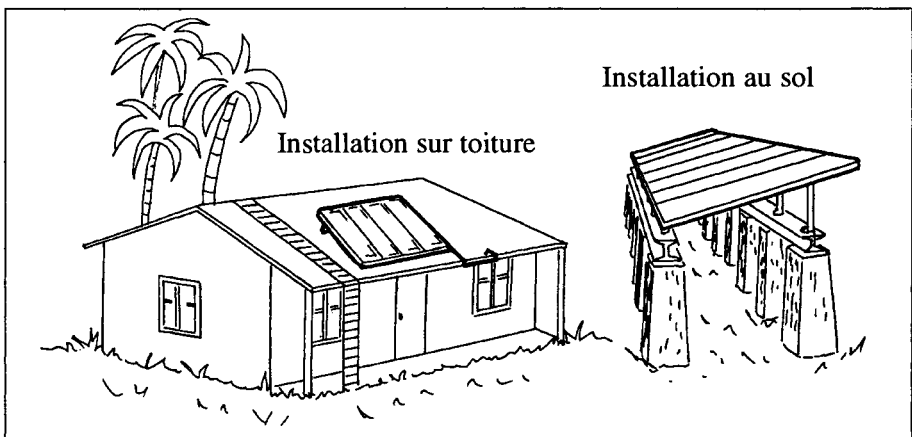
Choix de l'emplacement des modules, identification des masques

Emplacement

Le choix de l'emplacement des modules (et par conséquent du type de support) répond aux exigences suivantes :

- être exposés aux rayonnements solaires toute la journée en toute saison ;
- être faciles d'accès pour le nettoyage ;
- être proches des récepteurs pour limiter les pertes dans les câbles ;
- être à l'abri des jets de projectiles, des animaux, etc. ;
- être solidement fixés pour résister aux vents.

Différents types de support



De façon très schématique on peut dire que l'installation sur toiture correspond aux équipements de faible et moyenne puissances tandis que l'installation au sol correspond aux équipements de plus forte puissance (station de pompage et télécommunication). L'installation sur pylône (lampadaire) et l'utilisation en mobile (pompe de surface, lampe portable) sont d'un usage bien moins fréquent .

L'annexe 7 précise les avantages et inconvénients de ces différents emplacements.

Recherche des masques

Il s'agit d'identifier les obstacles susceptibles de porter une ombre sur les modules entre 8 h 00 et 16 h 00 (heure solaire). Pour cela, on identifie chaque obstacle et on vérifie si cet obstacle risque de gêner les modules à une quelconque saison de l'année, ou de les gêner plus tard (ne pas oublier qu'un arbre pousse !). Tous les "accidents" doivent être envisagés, comme l'installation à proximité des modules d'un fil d'étendage pour le linge, ou bien l'ombre portée sur un panneau... par un autre panneau.

Les personnes les plus à même d'identifier ces masques potentiels sont les futurs utilisateurs qui résident sur place. Une discussion avec eux sur ce thème est d'autant plus profitable que :

- ils pourront préciser le mouvement des ombres à mesure que changent les saisons (et donc la course du soleil dans le ciel) ;

- cela peut être une bonne occasion de les sensibiliser aux problèmes qui découlent d'un manque d'ensoleillement, en particulier en faisant le lien entre l'ombre sur les modules et la poussière qui s'y accumule, et qui doit être régulièrement retirée.

Dans les cas les plus complexes et en l'absence d'information fiable sur les mouvements des ombres, il sera nécessaire d'effectuer quelques calculs de géométrie, à partir :

- des distances entre le lieu projeté pour l'installation des panneaux et les obstacles potentiels ;

- les hauteurs de ces obstacles ;

- l'inclinaison du soleil par rapport à la verticale du lieu, à midi-heure solaire (on considèrera au moins une inclinaison d'hiver et une inclinaison d'été) ;

- les angles entre le champs de modules, les obstacles potentiels et l'axe nord-sud.

Choix de l'orientation des modules

L'orientation des modules est la direction vers laquelle ils "montrent" leurs cellules. L'orientation doit être plein sud pour les sites de l'hémisphère Nord et plein nord pour les sites de l'hémisphère Sud.

L'utilisation d'une boussole est fortement recommandée pour éviter toute approximation qui risquerait d'induire une perte de puissance consécutive à une mauvaise orientation.

- ♦ *Prendre en compte la déclinaison magnétique* : le nord magnétique est celui qui est indiqué par la boussole. Suivant la région du monde il peut y avoir une différence sensible entre le nord magnétique et le nord géographique encore appelé "nord vrai". Cette différence est la déclinaison magnétique.

Les panneaux doivent être orientés vers le nord (ou le sud) géographique. Il est donc nécessaire d'effectuer une correction par rapport à l'indication de la boussole, correction qui sera égale à la valeur de la déclinaison magnétique. Pour les sites de l'hémisphère Nord la correction s'effectue à l'inverse de la déclinaison magnétique. Par exemple si la déclinaison est de 15° W (15° ouest) le vrai sud se trouvera à 15° E (15° est) du sud indiqué par la boussole. Pour les sites de l'hémisphère Sud la correction s'effectue par contre dans le même sens que la déclinaison magnétique. Les déclinaisons magnétiques se trouvent en général sur les cartes géographiques.

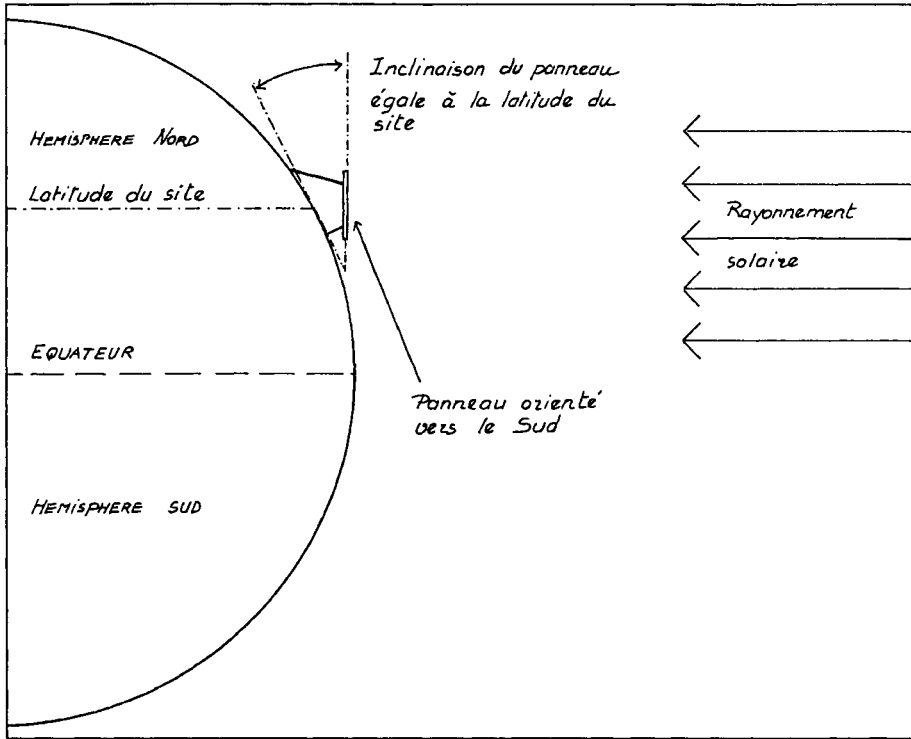
- ♦ *Systèmes de poursuite du soleil* : il est possible d'entendre parler de système de "poursuite du soleil". Dans ces dispositifs, les supports sont orientés différemment du matin au soir pour "suivre" le soleil tout au long de la journée. Ces systèmes causent pour l'instant plus de problèmes qu'il n'apportent d'avantages et ne sont pas à retenir.

Choix de l'inclinaison des modules

Pour que les modules produisent un maximum d'énergie, il faut que leur surface soit perpendiculaire aux rayons solaires. Or le soleil d'une saison à l'autre n'a pas la même inclinaison : selon les saisons, à midi, il est plus ou moins haut dans le ciel.

On doit donc incliner les modules pour qu'ils soient face au soleil. La valeur d'inclinaison correspond à l'angle que font les modules avec l'horizon-

Comment incliner le panneau solaire



tales. Comme il est difficile de modifier plusieurs fois dans l'année l'inclinaison des modules, on choisit généralement une valeur moyenne sur l'année qui est définie par la règle suivante :

l'inclinaison des modules est égale à la valeur de la latitude du site.

Lorsque la latitude du site est comprise entre 0 et 10 °, il faudra quand même conserver une inclinaison de 5 à 10 ° pour permettre à l'eau de pluie de s'écouler plus facilement.

Le réglage de l'inclinaison s'effectue à l'aide d'un niveau à bulle, d'un gabarit spécialement fabriqué pour l'inclinaison désirée (ou d'un simple rapporteur). Il est techniquement possible de concevoir un réglage de l'inclinaison des panneaux suivant les saisons mais au prix de grandes difficultés technologiques. Ces systèmes généralement fragiles, sources de pannes et peu répandus, ne sont pas conseillés.

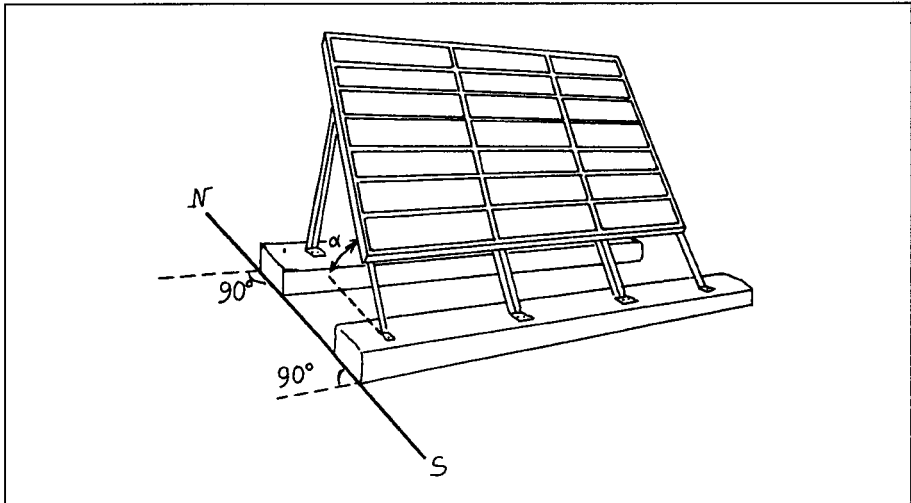
On pourra aussi choisir d'incliner les modules non pas à la latitude du lieu mais de telle manière qu'ils soient face au soleil à une saison donnée. Par exemple à la saison où le besoin est le plus fort, ou, cas de l'Europe, en hiver lorsque l'ensoleillement est le plus mauvais. Dans ce dernier cas, on ajoute 20° à l'inclinaison du lieu. Ainsi, le déficit d'ensoleillement est compensé par un gain sur le rendement de la conversion photovoltaïque.

PRÉPARATION DES SITES D'INSTALLATION, GÉNIE CIVIL

Arrimage des modules au sol

Un bon arrimage des supports de modules au sol, afin que l'installation résiste à des vents violents nécessite des plots en béton. Ces plots doivent être suffisamment solides pour assurer un bon ancrage. Ils contribuent également à surélever les modules du sol (1 mètre) pour une meilleure aération et un moindre encrassement.

Installation de modules au sol (hémisphère Nord)



Arrimage des modules sur toiture

Dans ce cas, l'arrimage doit utiliser les poutrelles qui supportent la toiture (tôles ondulées). Il est hors de question de fixer les supports de modules simplement sur les tôles.

Lorsque l'inclinaison des modules est supérieure à la pente de la toiture, et que le système offre ainsi des prises au vent, on veillera à s'assurer qu'il n'y a pas de risque d'arrachement de la toiture en cas de forte poussée du vent (vent violent ou très irrégulier). Autrement dit, on s'assurera de la qualité de la charpente - et de son ancrage dans le corps de bâtiment - voire des fondations.

Clôture d'un champ de modules

Pour des raisons évidentes de protection des modules, la pose d'une clôture est indispensable. Celle-ci sera constituée d'un grillage d'une hauteur minimale de 1,5 m avec une ouverture fermant à clef. Elle ne devra pas projeter d'ombre sur les modules ; non pas tant à cause de l'ombre du grillage lui-même (petite perte d'efficacité) que de l'ombre des poteaux qui le soutiennent, et dont l'ombre peut occulter la quasi totalité d'une cellule (auquel cas le module peut ne plus fonctionner).

Local technique

Il est important de prévoir des locaux techniques (fermés aussi à clef, ventilés) où seront installés l'électronique de contrôle (régulateur, onduleur) et la batterie. La batterie sera installée seule dans un local ventilé. Elle est en effet susceptible de dégager de l'hydrogène, qui est un gaz très explosif ; il faut donc éviter tout risque d'étincelle et ne placer aucun appareil électrique ni interrupteur à proximité. A défaut d'un local séparé, on installera la batterie dans une caisse ventilée, située à l'écart des équipements et des personnes.

Les onduleurs de pompes peuvent être installés sous les modules. Le matériel électronique (onduleurs, régulateurs) devra cependant toujours être placé à l'ombre (les composants peuvent être sensibles à de trop fortes chaleurs), à l'abris des intempéries (risques de court circuit et corrosion) et protégé de la poussière, qu'ils ont eux-mêmes tendance à attirer du fait de l'électricité statique.

MONTAGE DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DU SYSTÈME

L'étape "montage" consiste à positionner et assembler tous les appareils constitutifs d'un système photovoltaïque. Les quelques règles de montage suivantes permettent d'assurer un bon fonctionnement du système et d'optimiser la durée de vie de l'installation. Il sera nécessaire de lire attentivement les notices de montage fournies par les assembleurs et les fabricants.

Montage des modules et des supports

- ♦ La structure support est un ensemble de profilés (en U, en L) qui seront assemblés pour constituer un cadre aux modules. Ce cadre doit être rigide, ce qui veut dire que les profilés eux-mêmes doivent être suffisamment rigides. L'utilisation des supports proposés par les fabricants est conseillée dès qu'il y a plusieurs modules.

- ♦ Les fixations modules/supports, supports/plots en béton ou encore supports/poutrelles de toit doivent être rigoureusement effectuées par boulonnage avec rondelles "frein" afin en particulier de garantir le maintien de l'orientation des modules.

- ♦ La visserie doit être de préférence en acier inoxydable (inox) afin d'éviter la corrosion.

- ♦ Les supports doivent être dans la mesure du possible du même matériau que les modules (aluminium ou inox). Si tel n'est pas le cas, il est préférable d'isoler les matériaux avec un isolant plastique.

- ♦ Les modules posés sur toiture doivent être surélevés d'au moins 10 à 20 cm pour permettre la ventilation. En effet les modules perdent de leur puissance lorsqu'ils s'échauffent.

- ♦ Les modules posés au sol doivent être surélevés d'au moins 60 à 80 cm par rapport au sol pour permettre la ventilation, éviter les salissures et la végétation.

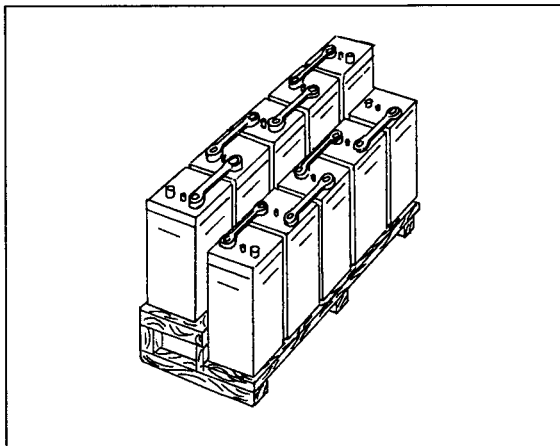
- ♦ Il est nécessaire d'avoir accès à toute la surface des modules pour le nettoyage.

Mise en place des batteries

Les batteries, du fait de l'acide sulfurique qu'elles contiennent, sont des éléments présentant un certain danger (toxicité, dégagement gazeux, risque d'explosion). Leur mise en place doit requérir, comme pour les modules, une attention particulière. Et ceci d'autant plus que leur durée de vie dépend également de leurs conditions d'installation.

- ♦ Les accumulateurs doivent être à l'abri des intempéries et des personnes. Ils seront placés soit dans un caisson (ventilé), soit dans un local technique. Les deux structures doivent être bien aérées pour éviter la concentration de gaz (hydrogène) et par conséquent le risque d'explosion.
- ♦ Les accumulateurs doivent être isolés du sol par des supports isolants robustes et non corrodables (chantiers en bois ou en plastique).
- ♦ La disposition des accumulateurs doit permettre une inspection facile des niveaux (disposition en escalier).
- ♦ L'horizontalité de chaque accumulateur doit être respectée de telle manière que le niveau de l'électrolyte recouvre uniformément les plaques.
- ♦ Les accumulateurs doivent être placés côte à côte pour réduire au maximum les longueurs de câbles électriques.
- ♦ Il faut recouvrir les bornes des accumulateurs d'un isolant plastique. De plus, il faut éviter de placer côte à côte les bornes de tension différente pour éviter des courts-circuits accidentels.

Accumulateurs superposés sur claies



Mise en route des batteries

La première charge d'une batterie est importante pour sa longévité. Cette charge doit être faite en appliquant une légère surtension afin d'avoir une capacité maximale. Lorsqu'elle est réalisée, l'utilisation est toujours déconnectée. On utilise soit un groupe électrogène qui effectue la charge en une journée avec un courant de forte intensité, soit le générateur solaire qui pratique une charge à faible courant en plusieurs jours.

Remplissage des batteries

- ♦ Les batteries sont généralement fournies sèches (chargées ou non) avec l'électrolyte séparé.
- ♦ Il est important d'utiliser l'électrolyte fourni avec les batteries (respect de la qualité de l'électrolyte et du degré baumé).
- ♦ Le remplissage initial ne s'effectue qu'avec de l'électrolyte.
- ♦ En fonctionnement s'il y a eu baisse de niveau, la remise à niveau ne s'effectue qu'avec de l'eau distillée (ou de l'eau déminéralisée).
- ♦ Il ne faut ensuite jamais rajouter d'acide dans la batterie.

Installation de l'électronique de contrôle (régulateur, onduleur)

♦ Ces appareils doivent être à l'abri des intempéries et du passage des gens. Ils seront placés soit dans un local technique, soit dans un endroit isolé de la maison, soit, pour les onduleurs de pompage, dans une petite cahute ou sous les modules photovoltaïques s'ils sont étanches.

♦ Ces appareils doivent être rigoureusement fixés (au mur) et à une hauteur moyenne de 1,5 m pour bien visualiser les voyants de contrôle (saufs les onduleurs de pompage).

♦ Leur positionnement doit faciliter également toute intervention (changement de fusible).

♦ Ces appareils doivent être placés à proximité des batteries (pour réduire au maximum les longueurs de câbles électriques), mais fortement isolés sur le plan électrique.

Installation des récepteurs

Les règles d'installation concernant les appareils utilisant l'électricité photovoltaïque font en réalité appel au bon sens. Il est toutefois important d'insister sur le fait que l'emplacement d'appareils qui dégagent de la chaleur (réfrigérateur, radio-émetteur) doit ménager une bonne ventilation (espace ment par rapport aux murs et au sol).

Installation des conducteurs et des équipements électriques

Conducteurs électriques

- ♦ Les câbles doivent être fixés, sur toute leur longueur, avec des cavaliers sur les murs ou colliers "Colson" et ceci au moins à chaque mètre.
- ♦ Il faut utiliser le type de câble correspondant à l'utilisation prévue : câble immergeable pour le pompage, câble blindé pour être enterré, câble extérieur résistant aux ultraviolets, etc.
- ♦ Les câbles provenant des modules installés au sol doivent être enterrés à au moins 50 cm de profondeur. S'ils ne sont pas blindés, ils doivent être placés dans une gaine. Il ne doit pas y avoir de connexions enterrées.
- ♦ Le passage de câbles à partir de modules installés sur un toit doit se faire dans la mesure du possible sans traverser la toiture (le long du toit et des murs). Toutefois, si c'est impossible, il sera nécessaire d'installer des reprises d'étanchéité sur le toit.
- ♦ Tous les câbles doivent emprunter le chemin le plus court pour éviter les pertes électriques. A l'intérieur des habitations, la règle est de suivre l'horizontale ou la verticale.
- ♦ Ne jamais diminuer les sections ou augmenter les longueurs de câble initialement prévues (voir le paragraphe sur le dimensionnement des câbles électriques p. 44).

Équipements électriques

- ♦ Certaines installations sont parfois munies de fusibles ou, mieux, de disjoncteurs. Toutefois cette précaution n'assure pas une protection complète contre certains phénomènes parasites (court-circuit, foudre).
- ♦ Tous les raccordements électriques doivent être réalisés dans des boîtes de connexion qui seront fixées.

RACCORDEMENT ÉLECTRIQUE DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DU SYSTÈME

Il est ici plus qu'ailleurs indispensable de lire bien attentivement les notices de montage fournies par les fabricants pour prévenir toute erreur dans les connexions électriques. De plus, il est préférable qu'une personne non expérimentée en électricité s'abstienne et fasse appel à un électricien formé au photovoltaïque.

Règles d'or

- ♦ Tout raccordement électrique sur un système photovoltaïque doit impérativement se faire avec les modules entièrement recouverts d'un tissu, carton ou plastique opaque. Les cartons d'emballage des modules peuvent faire l'affaire. En effet sur certains générateurs, la tension et le courant peuvent être très élevés (jusqu'à 300 V sur certaines pompes !) et donc dangereux pour l'homme. De plus la moindre étincelle due à une mauvaise manipulation peut provoquer la destruction d'un appareil électronique.

- ♦ Tous les contacteurs Marche/Arrêt des appareils doivent être en position Arrêt.

- ♦ Les connexions électriques doivent être effectuées dans les règles de l'art (toujours utiliser des blocs de jonction ou dominos, bien serrer les vis, mettre des cosses sur les bouts de câble, etc.). Les pannes dues à un mauvais contact sont parmi les plus fréquentes.

- ♦ Bien respecter les polarités + et -. Vérifier deux fois plutôt qu'une !

- ♦ Il est important de respecter un ordre dans le branchement des appareils. En principe :

- 1) connexion de la batterie au régulateur ;
- 2) connexion des modules au régulateur ;
- 3) connexion des récepteurs au régulateur.

De même pour les pompes :

- 1) connexion de l'électropompe à l'onduleur ;
- 2) connexion des modules à l'onduleur.

- ♦ Il est essentiel de vérifier le câblage une deuxième fois avant la mise en service. Personne n'est à l'abri d'une erreur et la moindre erreur sur un système photovoltaïque peut coûter très cher.

Mise à la terre

La mise à la terre des installations photovoltaïques est nécessaire pour évacuer entre autres les phénomènes transitoires dus à la foudre. Ces phénomènes représentent un risque important de détérioration des appareils électroniques. La mise à la terre de tous les éléments du système permet également d'obtenir une équipotentialité (même potentiel partout) qui évite les phénomènes électrostatiques (risque de claquage également).

Une bonne mise à la terre requiert toutefois certaines conditions :

- des câbles de terre de forte section (4 à 6 mm²) ;
- des connexions parfaites (soudées ou serties) ;
- une grille (1 m²) ou un piquet (2 m) en cuivre ou fer doux enterré à 1 mètre de profondeur ;
- un terrain si possible humide (proche d'évacuation d'eau ou de latrines).

Problèmes de foudre

Si la mise à la terre est le système le plus simple, pour les endroits où la foudre est particulièrement fréquente et violente, il existe des systèmes de protection plus efficaces :

- le paratonnerre ;
- certains composants électroniques de type parafoudre contre les phénomènes induits ;
- des cartes électroniques de protection. Ces dernières cartes ont une efficacité bien supérieure aux composants précédents mais leur prix ne justifie leur présence que sur des installations de puissance importante.

Aucun système de protection électronique ne protégera l'installation contre les coups de foudre directs.

DÉMARRAGE, ESSAIS ET RÉCEPTION FINALE

Mise en service

Après la réalisation et la vérification de tous les câblages, les modules peuvent être découverts. Alors seulement les interrupteurs et disjoncteurs pourront être enclenchés en position marche.

Systèmes de pompage

Il est conseillé d'opérer dans l'ordre suivant en ce qui concerne la mise en service des pompes avec onduleur :

- 1) enclenchement du disjoncteur onduleur/électropompe ;
- 2) enclenchement du disjoncteur panneau/onduleur s'il existe.

Les systèmes de pompage nécessitent la reconnaissance du sens de rotation. Il s'agit :

- 1) de contrôler le débit ;
- 2) d'inverser 2 phases (sur les systèmes triphasés) et de vérifier à nouveau le débit ;
- 3) de choisir la configuration qui fournit le plus fort débit.

En principe cette mise au point ne se retrouve que sur les systèmes "alternatif triphasé". Néanmoins certaines pompes à moteur à courant continu à balais, dont les polarités auraient été malencontreusement inversées, fourniraient les mêmes symptômes... et nécessiteraient la même intervention.

Systèmes à batteries

Avant de brancher les appareils, il faut faire charger les batteries par le générateur photovoltaïque jusqu'à ce que le régulateur se mette en limitation de charge. Ceci peut prendre de quelques heures (batterie chargée sèche) à plusieurs jours (batterie non chargée sèche). Une légère surtension est conseillée lors de la première charge.

Essais

Afin d'être sûr du bon fonctionnement du système, il est nécessaire (surtout pour les installations de forte puissance) de réaliser quelques essais.

Ces essais, qui visent des contrôles élémentaires comme la vérification du nombre d'heures d'utilisation, du débit, de l'autonomie, etc., ne requièrent pas de compétence particulière et pourront être effectués par l'utilisateur avec un minimum d'appareils de mesure. Les mesures devront toutefois être réalisées par "plein" soleil.

Par contre en ce qui concerne les projets importants, une campagne de mesures sera nécessaire pour s'assurer du bon fonctionnement et des performances de l'installation (la tension est-elle entre chaque points celle attendue, le courant dans les différents circuits est-il normal, la charge et la décharge des batteries sont elles correctes ?).

Réception technique de l'installation

La réception technique de l'installation se décompose souvent en deux parties : réception de l'installation sur site au moment de la mise en service du système et réception définitive en général un an après.

Réception sur site

Elle consiste à vérifier la conformité des installations de manière qualitative (respect de l'orientation des modules, de la qualité des câblages, etc.) et de manière quantitative (mesures des performances). Elle conduit soit à accepter l'installation avec ou sans réserve, soit à la refuser en fonction de la présence et de la gravité des problèmes.

Réception définitive

Le principe reste le même avec des observations surtout quantitatives (nouvelle campagne de mesures). Elle donne lieu à la levée des garanties financières, l'installateur étant encore engagé à travers les garanties jusqu'à ce moment-là.

DEUXIÈME
PARTIE

Principales utilisations de l'électricité photovoltaïque



L'éclairage



Le pompage



Le froid



Les télécommunications



La recharge des batteries



Les applications diverses



Cette partie aborde les différentes applications des systèmes photovoltaïques : l'éclairage, le pompage, la réfrigération, les télécommunications, les systèmes de recharges de batterie et quelques autres applications diverses comme par exemple les centrales photovoltaïques.

Chacune de ces applications possibles fait l'objet d'une analyse technique des récepteurs et du système photovoltaïque complet en le comparant à d'autres types d'énergie, l'analyse financière porte sur l'investissement à réaliser et les coûts de fonctionnement en les comparant aux autres solutions possibles. Quelques exemples de réalisations, qui illustrent concrètement chacune de ces applications, sont présentées en annexe 5.

L'éclairage

LES DIFFÉRENTS LUMINAIRES

Il existe principalement 4 types de luminaires adaptables à l'électricité photovoltaïque : le tube fluorescent, l'ampoule halogène, l'ampoule au sodium basse pression et l'ampoule à incandescence.

♦ *Grandeurs caractéristiques d'un luminaire :*

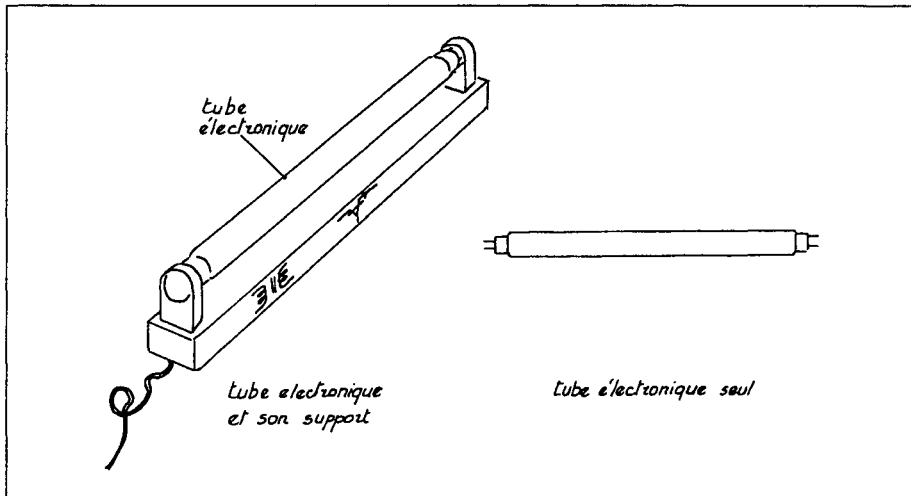
- le flux lumineux en lumen (lm) ;
- la puissance électrique (W) ;
- le rendement lumineux (lm/W) ;
- la tension d'alimentation (V).

Pour un type de luminaire donné, le flux lumineux est proportionnel à la puissance électrique. Les rendements de conversion diffèrent selon le type de lampe utilisé, ce qui explique les différences d'éclairage pour des lampes de même puissance mais de technologies différentes.

Les luminaires à tube fluorescent

Ils sont préconisés sur les installations photovoltaïques car ils présentent incontestablement le meilleur rendement "lumière fournie-énergie consommée". Comparées aux ampoules à incandescence (ampoules classiques), ces luminaires consomment 3 à 5 fois moins d'énergie et permettent donc d'utiliser une surface de modules photovoltaïques moindre pour un même résultat.

Tube avec réglette



L'efficacité lumineuse, varie de 40 à 80 lm/W suivant la qualité des tubes fluorescents. Les luminaires de 13 W développent couramment un flux d'environ 600 à 800 lm. Une lampe à incandescence équivalente en flux lumineux consommerait 60 W. De même une tube fluorescent de 18 W équivaut à une lampe à incandescence classique de 75 W.

On trouve principalement dans le commerce des luminaires fluorescents de 6, 8, 13, 18, 20 et 40 W. Leur tension est de 12 ou 24 volts. On estime à 5 000 heures la durée minimale de vie des "fluos".

Les tubes fluorescents, pour fonctionner à partir du courant continu, comportent un circuit électronique (ballast) permettant de convertir la tension d'alimentation à la tension requise par le tube (alternatif, haute fréquence). Un tube d'une puissance donnée ne peut être installé que sur un luminaire (réglette) de même puissance (en raison de la longueur du tube). Par contre le tube est indépendant de la tension : un tube d'une puissance donnée peut être installé indifféremment sur un luminaire de même puissance et de tension différente : 12 V ou 24 V, voire même sur un ballast fonctionnant en 220 V alternatif.

Les luminaires à ampoule halogène

Avec une lumière plus confortable que la lumière fluorescente, les halogènes sont parfois utilisés comme spot pour la lecture. Cette lumière peut

également être focalisée pour des besoins particuliers (intervention chirurgicale). On utilise alors un scialytique à halogène.

Le rendement lumineux des halogènes (15 à 25 lm/W) est inférieur à celui des luminaires fluorescents. On trouve principalement dans le commerce des luminaires halogènes, en 12 ou 24 volts, d'une puissance de 5, 10, 20 et 50 watt. On estime à 2000 heures leur durée de vie.

Leur principal avantage est l'absence d'électronique qui rend leur prix de revient inférieur aux "fluos" mais leur inconvénient majeur, outre un rendement plus faible, est leur fragilité puisqu'il faut éviter de les manipuler directement avec les doigts et de les remuer lorsqu'ils sont chauds.

Les luminaires à ampoule au sodium basse pression

Du fait d'un très haut rendement lumineux, les lampes sodium basse pression sont utilisées pour des éclairages de fortes puissances (éclairage/signalisation extérieure). La couleur de l'éclairage est jaune orangée. Le rendement lumineux des sodium basse pression (100 à 200 lm/W) est très supérieur à tous les autres luminaires. On trouve principalement dans le commerce des luminaires sodium basse pression de 18 et de 35 W. Leur prix de revient élevé limite leur utilisation aux usages collectifs.

Les luminaires à ampoule à incandescence

Ces luminaires utilisent les ampoules classiques à incandescence. Elles consomment 3 à 5 fois plus d'énergie que les "fluos", ce qui restreint leur utilisation. Le rendement lumineux est médiocre (10 à 15 lm/W). On estime à 1 000 heures leur durée de vie soit cinq fois moins que celle des fluorescents.

Leur avantage est l'absence d'électronique qui détermine leur très faible coût à l'achat. Consommant beaucoup d'énergie, elles imposent cependant d'augmenter la puissance du générateur, et donc son prix, et sont de ce fait déconseillées malgré leur grande diffusion (ampoules standard, ampoules de voiture). Certains programmes les recommandent toutefois pour les très faibles puissances (5 W et 20 W), en raison de cette grande disponibilité et de leur faible coût d'achat.

LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE ET LEURS APPLICATIONS

Il y a 4 grands types d'applications auxquelles vont correspondre des systèmes de conception différente : l'éclairage domestique (maison) et communautaire (dispensaire, école, église et mosquée), l'éclairage mobile (lampe portable), l'éclairage public (espace public extérieur, site isolé, hangars), l'éclairage de signalisation (balisage aérien, maritime, signalisation routière).

♦ *Grandeurs caractéristiques d'un système d'éclairage :*

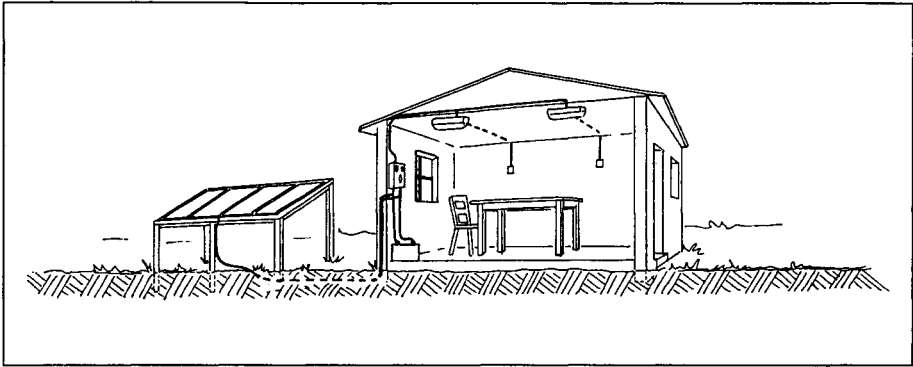
- la puissance crête du générateur photovoltaïque (W_c) ;
- la tension d'alimentation (V) ;
- le nombre, la puissance (W) et la durée d'utilisation quotidienne (en heures) des points d'éclairage ;
- l'autonomie en cas d'absence de soleil (en jours) ;
- la capacité des batteries (Ah).

L'éclairage domestique et communautaire

En général un système d'éclairage classique est conçu pour permettre le repérage et la lecture dans une ou plusieurs pièces. Les luminaires utilisés sont de type fluorescent et leur nombre peut varier de trois à une dizaine pour un système de base. Au-delà de ce nombre, ou s'il y a plusieurs bâtiments, on utilisera plusieurs systèmes séparés.

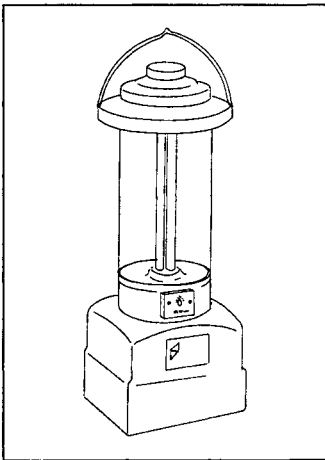
Un système de base comprend en général :

- 1, 2 ou 4 modules photovoltaïques avec support ;
- 3 à 10 luminaires fluorescents ;
- 1 régulateur de charge/décharge ;
- 1 batterie (12 ou 24 V) ;
- des câbles, des interrupteurs et différents accessoires (boîtes de connexion...).

Maison équipée en photovoltaïque

Ces systèmes photovoltaïques d'éclairage sont disponibles soit sous forme de systèmes "clés en main" (installation par un personnel spécialisé), soit sous forme de kits (installation possible par un personnel non spécialisé). Le nombre et la puissance des luminaires dépendent des utilisations et des habitudes. En zone rurale africaine, par exemple, une faible luminosité est souvent bien acceptée. Les exigences augmentent avec le niveau de confort.

La plupart des fabricants et des vendeurs fournissent de tels systèmes..

**Lampe portable**

Les lampes portables photovoltaïques ont été imaginées pour remplacer les lampes classiques à pétrole ou à gaz. Elles doivent rendre un service identique voire meilleur :

- éclairage suffisant pour la lecture (> 100 lm) ;
- autonomie de 4 à 5 heures par jour ;
- facilement portable à la main, facilement utilisable et facilement rechargeable ;
- coût compétitif avec les autres types de lampes portables.

Le luminaire qui constitue l'ensemble "lampe solaire portable" est de type fluorescent. Le module solaire est généralement séparé de la lampe. Il peut être fixé sur un support (toit). Cependant certaines lampes intègrent le module dans un même boîtier : le luminaire devra alors

rester sous le soleil pendant la charge. Ce montage est toutefois intéressant dans un contexte de nomadisme. Il existe aussi des ensembles "communautaires" qui comprennent un module plus puissant (50 Wc) et qui permet la recharge de plusieurs lampes (6 à 8).

Une lampe portable comprend en général :

- 1 module (10 Wc) ;
- 1 ou 2 tubes fluorescents (4 à 8 W) ;
- 1 régulateur de charge/décharge ;
- 1 batterie (1,4 Ah à 6,5 Ah – 6 ou 12 V – Cd/Ni ou Pb/acide) ;
- 1 boîtier intégrant l'ensemble (sauf le module pour la plupart des lampes).

Depuis 1985 beaucoup de problèmes techniques ont été soulevés au fil des premières années d'utilisation de ce type de lampes :

- certains modèles en plastique se sont révélés trop fragiles (attention donc à la qualité du matériau du boîtier) ;
- les lampes sans régulation de décharge ont montré une durée de vie très faible de leurs batteries au plomb, d'où un surcoût dû à un remplacement beaucoup plus fréquent. Il est nécessaire que la lampe soit équipée d'un régulateur de décharge ;
- la durée de vie des batteries Cd/Ni est nettement supérieure à celle au Pb/acide ;
- le remplacement des tubes fluorescents, ainsi que certains modèles de batteries, posent souvent des problèmes, leur disponibilité sur le terrain mérite attention ;
- le noircissement des tubes fluorescents sur certaines lampes est souvent dû à des cartes électroniques défectueuses ;
- les connexions électriques sont le point faible de ces lampes après maintes manipulations, il convient d'être vigilant à leur qualité.

En conclusion il n'est pas exagéré de dire que la mise au point technique par les fabricants n'est pas encore réellement achevée. D'importants progrès ont déjà été réalisés, mais on rencontre encore beaucoup de pannes.

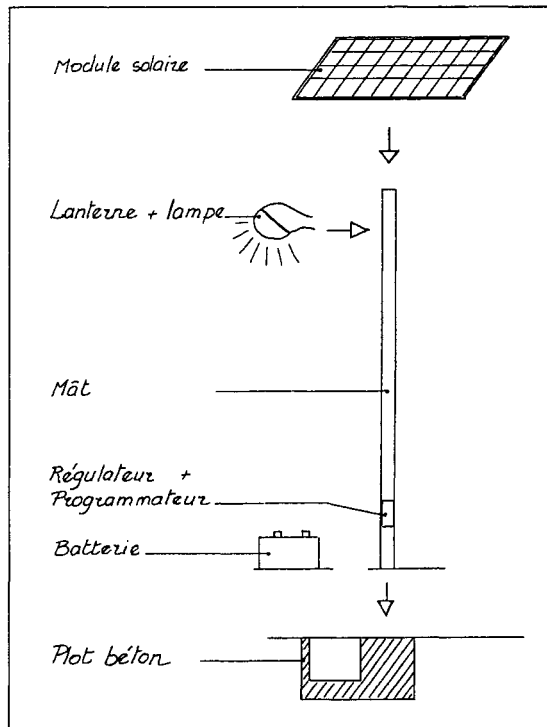
L'éclairage public

Les systèmes d'éclairage public sont conçus pour l'éclairage nocturne extérieur. Ils réalisent essentiellement une fonction de repérage. Le luminaire utilisé est de type sodium basse pression et est installé sur un lampadaire. Il permet l'éclairage d'une surface de 120 à 250 m².

Un lampadaire comprend en général :

- 1, 2 ou 4 modules ;
- 1 luminaire sodium basse pression (18 W ou 35 W) ;
- 1 régulateur de charge/décharge ;
- 1 programmateur ou 1 cellule photoélectrique ;
- 1 batterie (12 V ou 24 V) ;
- 1 mât-support contenant l'électronique et le câblage électrique.

Lampadaire solaire



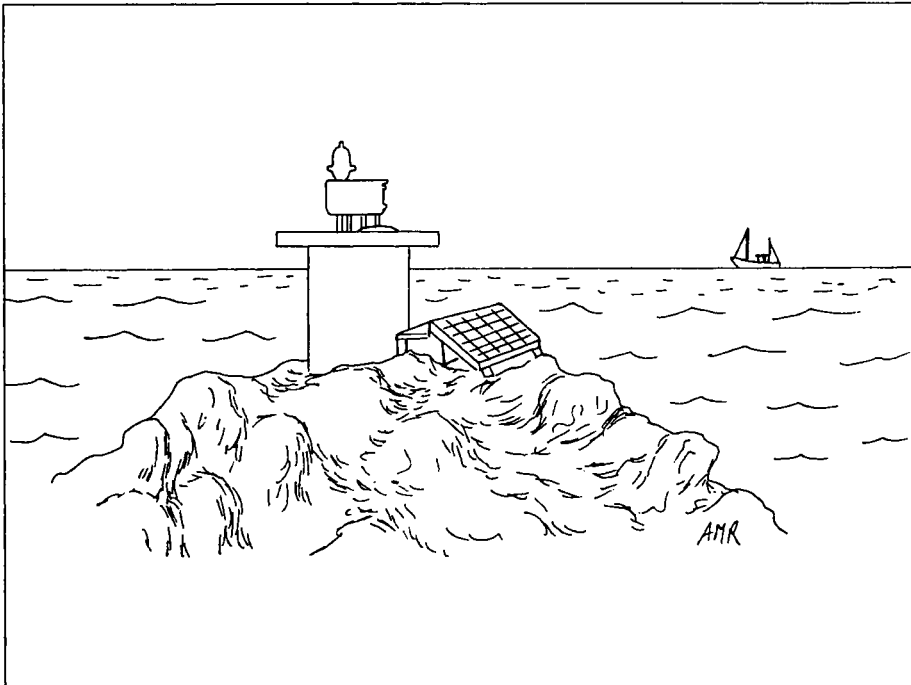
L'éclairage de signalisation

Les systèmes de signalisation sont conçus pour le balisage extérieur en site isolé (bouée maritime) ou sur des sites difficiles à alimenter en courant (signalisation routière, piste d'aéroport, sommet de lignes haute tension).

Un système standard comprend en général :

- 1 à 8 modules ;
- 1 ou plusieurs luminaires ;
- 1 régulateur de charge/décharge ;
- 1 programmeur ou cellule photoélectrique (facultatif) ;
- 1 clignoteur (facultatif) ;
- 1 batterie (12, 24, 48 V) ;
- 1 caisson support étanche contenant l'électronique et le câblage électrique.

Balise alimentée par photovoltaïque



LES BESOINS EN ÉNERGIE POUR L'ÉCLAIRAGE

L'identification des besoins d'éclairage consiste à déterminer ou à évaluer :

- le nombre de points d'éclairages utilisés ;
- la puissance (liée à la puissance lumineuse) désirée pour chaque point d'éclairage ;
- la durée d'utilisation quotidienne de chacun de ces éclairages.

Ces données permettront de calculer la consommation journalière de tous les points d'éclairage.

Il est intéressant de rappeler les informations suivantes pour avoir quelques points de repère concernant le choix de la puissance des luminaires :

Luminaires (type réglette pour les fluos)	Equivalent lumineux (lampe incandescence)	Surface couverte (fonction lecture)	Surface couverte (fonction repérage)	Intensité lumineuse
Fluorescent 4 W	≈ 20 W	2,5 à 5 m ²	8 à 16 m ²	120 à 240 lm
Fluorescent 8 W	≈ 40 W	5 à 10 m ²	16 à 32 m ²	240 à 480 lm
Fluorescent 13 W	≈ 60 W	8 à 16 m ²	26 à 52 m ²	390 à 780 lm
Fluorescent 18 W	≈ 100 W	11 à 22 m ²	36 à 72 m ²	540 à 1080 lm
Halogène 20 W	≈ 40 W	6 à 10 m ²	20 à 33 m ²	300 à 500 lm

L'utilisation quotidienne courante d'un point d'éclairage est de l'ordre de 3 à 5 heures (durée d'éclairage en soirée). Exemple : l'énergie consommée par un luminaire fluorescent de 8 W pendant 5 heures est de 40 Wh/jour.

Le nombre de points d'éclairage installés (fonction du nombre de pièces) est souvent supérieur au nombre de points d'éclairage quotidiennement utilisés (allumés). C'est ce deuxième nombre qui est à prendre en compte pour le dimensionnement. En réalité, on réalisera soit une moyenne s'il s'agit d'un faible nombre de points d'éclairage (exemple pour un kit d'éclairage de base : 5 luminaires fonctionnant 3 heures chacun), soit une évaluation précise pièce par pièce.

Note : les calculs de dimensionnement du générateur photovoltaïque qui satisfait aux besoins évalués en énergie, sont présentés en page 33

Tableau synthétique des avantages et inconvénients techniques des différents systèmes d'éclairage

ENERGIE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Pétrole et gaz	<ul style="list-style-type: none"> - technique simple et répandue - circuits de distribution généralement bien développés - coût d'investissement faible 	<ul style="list-style-type: none"> - approvisionnement en carburant (besoin de devises) - qualité d'éclairage pauvre (pour certains systèmes) - coût de fonctionnement non négligeable
<p><i>En résumé</i> : l'éclairage par lampes à pétrole reste le standard en zone rurale en raison de son coût immédiat faible et très fractionné. Le photovoltaïque ne peut rivaliser avec ces systèmes d'éclairage que par le supplément et la qualité de lumière qu'il apporte et la prise de conscience de son intérêt économique à long terme.</p>		
Groupe électrogène	<ul style="list-style-type: none"> - expérience d'utilisation et de maintenance - permet de combiner d'autres utilisations - facile à installer - coût d'investissement modéré - puissance installée importante 	<ul style="list-style-type: none"> - approvisionnement en carburant - bruit et pollution - fonctionnement fréquent en sous-charge - coûts de fonctionnement et de maintenance très élevés
<p><i>En résumé</i> : le groupe électrogène est le seul système à ne pas être limité en puissance, ce qui en fait son principal atout pour les utilisations importantes. En ce qui concerne les besoins limités tels que l'éclairage, la solution photovoltaïque est toujours rentabilisée en 3 ans au maximum par rapport au groupe électrogène.</p>		
Batterie (recharge communautaire)	<ul style="list-style-type: none"> - batteries disponibles localement - facile à installer - coût d'investissement faible 	<ul style="list-style-type: none"> - transport de la batterie - faible durée de vie - coût de la recharge souvent élevé
<p><i>En résumé</i> : malgré d'importantes contraintes de transports, la batterie permet d'accéder à l'électricité avec le plus faible investissement. Il faut toutefois disposer d'un centre de recharge à proximité.</p>		
Panneau photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> - bonne fiabilité - faibles besoins de maintenance - durée de vie théorique élevée - coût de fonctionnement faible 	<ul style="list-style-type: none"> - bon ensoleillement nécessaire - introduction d'une technologie nouvelle - pièces détachées peu disponibles - circuits de distribution peu développés - coût d'investissement élevé - puissance installée faible
<p><i>En résumé</i> : solution nouvelle, encore chère pour une bonne part de la population, techniquement très fiable, en plein développement.</p>		

Comparaison technique entre différentes sources d'éclairage

SOURCE D'ÉNERGIE	SOURCE D'ÉCLAIRAGE	FLUX (lm)	CONSOMMATION HORAIRE (Wh)	DURÉE DE VIE (h)	RENDEMENT (lm/W)
Cire	Bougie	1	–	6	0,01
Pétrole	Lampe à pétrole	5 à 10	–	–	0,1
lampant	Lampe tempête	20 à 100	–	–	0,2
	Lampe à pression	500 à 1000	–	–	1
Gaz	Lampe à gaz	500 à 1000	–	–	1
	Incandescence 3 W	10	3	1 000	3
	Incandescence 40 W	350	40	1 000	9
	Incandescence 75 W	1 000	75	1 000	13
	Halogène 10 W	200	10	2 000	20
Électricité	Halogène 20 W	400	20	2 000	20
	Halogène 8 W	350	8	5 000	43
	Halogène 18 W	1 000	18	5 000	56
	Fluorescente 40 W	3 200	40	5 000	80
	Vapeur de mercure 80 W	3200	80	5000	40
	Sodium basse pression 35 W	4500	35	5000	130

Attention : ces valeurs ne sont qu'un "ordre d'idée", elles varient d'un fabricant à l'autre.

LE POINT SUR LES COÛTS DES SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE

Niveau d'investissement

Il faut tout d'abord insister sur les points suivants :

- le coût d'investissement d'un système photovoltaïque est toujours élevé, ce qui représente une vraie barrière à sa diffusion ;

- les coûts de fonctionnement sont généralement faibles, par comparaison avec les énergies conventionnelles car l'énergie solaire est gratuite et la longévité des systèmes est élevée ;

– le coût moyen (investissement + fonctionnement) sur 10 ans est concurrentiel mais il est nécessaire de disposer d'outils financiers pour dépasser la barrière de l'important investissement initial.

On considère que les coûts d'investissement des systèmes d'éclairage collectif, ramenés au coût du watt crête, sont les suivants :

- 60 à 100 FF HT/Wc (matériel emballé sortie d'usine) ;
- 80 à 150 FF HT/Wc (système installé sur site).

On peut fournir cependant quelques indications plus précises sur les coûts d'investissement des principaux systèmes d'éclairage :

APPLICATIONS	COÛT D'INVESTISSEMENT (DÉPART USINE, HT)
Éclairage domestique et communautaire	3 500 à 7 500 FF
Lampe portable	500 à 1 500 FF
Éclairage public (lampadaire)	7 500 à 15 000 FF

Cependant, le problème des taxes locales vient très souvent gréver les coûts d'investissement. Des solutions peuvent parfois être trouvées afin que ces coûts ne soient pas majorés.

Comparaison économique avec d'autres énergies

Le système d'éclairage le plus traditionnellement utilisé est la lampe à pétrole. C'est pourquoi il est intéressant de comparer économiquement les solutions pétrole et photovoltaïque. Cette comparaison peut paraître disproportionnée tant la qualité d'éclairage fournie est différente. Toutefois, en terme de marché, c'est bien entre ces deux produits que se joue la concurrence pour la plus grande partie des habitants des zones rurales.

Le solaire est bien évidemment plus cher que la lampe à pétrole traditionnelle, d'autant que celle-ci ne demande jamais de grosses dépenses : les dépenses sont fractionnées au jour le jour. Le photovoltaïque, outre son coût moyen plus élevé, demande un apport personnel extrêmement important, ce qui constitue un obstacle majeur à sa diffusion.

Il faut toutefois considérer que les dépenses d'énergie en milieu rural comprennent également l'achat de piles pour l'éclairage, les appareils radio et les

magnétophones. Plusieurs enquêtes de terrain en Afrique de l'Ouest ont montré que la dépense moyenne d'énergie pour un ménage est de l'ordre de 400 à 600 FF/an pour une classe de population aisée (10 %), 250 à 400 FF/an pour la majorité de la population et 150 à 250 FF/an pour une minorité très démunie. Dans ces conditions, le photovoltaïque constitue une alternative économiquement intéressante pour 1 famille sur 5. La moitié de la population pourrait, en augmentant ses dépenses d'énergie d'un faible pourcentage, accéder à l'éclairage photovoltaïque qui apporte un service bien meilleur.

En définitive, le montant élevé d'investissement constitue aujourd'hui l'écueil principal qui bloque le marché populaire à l'éclairage photovoltaïque.

	LAMPE À PÉTROLE		LAMPE PHOTOVOLTAÏQUE	
Matériel	Lampe tempête		Kit familial (50 Wc) (ensoleillement = 5 kWh/m ² /j)	
Lumière produite	20 à 100 lm		2 000 lm	
Coût consommables	Pétrole	182 FF/an	1 batterie tous les 4 ans	125 FF
	0,1 l/jour à 5 FF/l		2 tubes tous les 3 ans	75 FF
	1 verre par an	10 FF/an		
	3 mèches par an	5 FF/an		
Coût investissement	Coût d'achat	50 FF	1 module + régulateur	4 000 FF
	Durée de vie	10 ans	Durée de vie	20 ans
	Coût par an	5 FF/an	Coût par an-	200 FF
Coût total	sur 5 ans	1 085 FF	après 5 ans	5 000 FF
	sur 10 ans	2 120 FF	après 10 ans	6 000 FF
			après 15 ans	8 000 FF
Coût moyen (sur 10 ans)	212 F/an 18 F/mois		400 F/an 33 F/mois	

Le pompage

LE POINT SUR LES MATÉRIELS DE POMPAGE

Les systèmes de pompage les plus répandus fonctionnent selon le principe du "fil du soleil", c'est-à-dire sans réserve d'énergie, le débit de l'eau étant directement proportionnel à l'énergie lumineuse reçue. Cette disposition offre une grande facilité d'installation, un meilleur rendement global, une plus grande fiabilité et, en définitive, un coût plus bas que les systèmes utilisant batterie et régulateur.

Un système "au fil du soleil" comprend essentiellement un générateur photovoltaïque et une électropompe. Il est complété d'un onduleur lorsque la pompe est à courant alternatif.

Les groupes électropompes

Un groupe électropompe est composé d'un moteur électrique et d'une pompe, cette dernière étant appelée généralement "hydraulique". Les deux composants fixés l'un sur l'autre constituent un ensemble homogène compact. Des systèmes où le moteur est éloigné de la pompe existent mais ne sont pas à recommander en raison des difficultés techniques qu'ils entraînent.

Le moteur est à courant continu ou alternatif. L'hydraulique est de type volumétrique ou centrifuge. Selon les configurations, le groupe électropompe est situé soit en surface, soit immergé au fond du puits ou du forage.

Les orientations techniques de base

♦ *Pompe centrifuge ou volumétrique ?*

Le principe de fonctionnement de ces deux pompes est totalement différent.

Dans les pompes centrifuges, une roue munie d'aubes est animée d'un mouvement de rotation. L'eau, aspirée en son centre, est expulsée à la périphérie avec une énergie qui lui permet de s'élever dans une conduite de refoulement. Plusieurs roues sont généralement placées sur le même axe afin d'obtenir de grandes hauteurs d'élévation.

Dans les pompes volumétriques, une chambre dont le volume varie sous l'action du moteur est alternativement raccordée à un orifice d'aspiration et à un orifice de refoulement. Chaque tour du moteur déplace un volume d'eau constant. Dans cette famille on trouve principalement les pompes à piston et à membrane.

En raison de leur simplicité de conception et de leur robustesse, les pompes centrifuges sont plus largement employées que les pompes volumétriques. Dans le cas d'une alimentation photovoltaïque, le très faible couple de démarrage des pompes centrifuges les rend incontournables pour le fonctionnement "au fil du soleil".

Tandis que le rendement des pompes à piston est constant, le rendement des pompes centrifuges varie avec la vitesse de rotation du moteur. Cet aspect est un handicap pour les systèmes photovoltaïques car la vitesse du moteur variant tout au long de la journée, la pompe fonctionne rarement à son rendement optimal. Le débit global des pompes centrifuges reste cependant acceptable (50 à 60%) pour les systèmes de pompage supérieurs à 5 m³/jour.

En ce qui concerne les installations de petite taille, de 1 ou 2 m³/jour, on utilisera de préférence des pompes volumétriques en raison de leur rendement intéressant. Toutefois, la présence d'un couple de démarrage important imposera un système comprenant obligatoirement une batterie.

♦ *Courant continu ou alternatif ?*

Les moteurs à courant continu sont très généralement des moteurs à balais et à aimant permanent, trop rarement à ce jour des moteurs à commutation électronique. Les moteurs à courant alternatif sont très généralement des moteurs asynchrones à aimant permanent, sans aucun entretien.

Lorsqu'ils sont largement dimensionnés, les moteurs à courant continu et à

aimant permanent ont un excellent rendement de plus de 85 % et offrent une fiabilité élevée. Les balais sont de grande longueur et la commutation se fait dans de bonnes conditions. Ils sont parfaitement adaptés à l'entraînement de pompes de surface. Le remplacement des balais tous les deux ou trois ans n'est pas un problème car ils sont facilement accessibles sur le marché.

En revanche, les moteurs à courant continu pour groupes électropompes immergés de faible diamètre, tels que ceux qui équipent les forages, fonctionnent en atmosphère confinée ce qui est préjudiciable à la commutation. Les balais, de faible longueur, ont une durée de vie trop courte. Par ailleurs, l'étanchéité absolue de ces moteurs est difficilement réalisable.

Pour ces raisons, les groupes électropompes immergés sont équipés de moteurs à courant alternatif et plus rarement de moteurs à courant continu à commutation électronique, l'étanchéité de ces 2 types de moteur n'étant pas nécessaire. L'inconvénient des moteurs à courant alternatif reste qu'ils ont besoin d'un onduleur et si possible d'un variateur électronique, ce qui augmente leur coût et diminue légèrement leur fiabilité.

♦ *Groupe immergé ou de surface ?*

Rappelons qu'une pompe ne peut pas aspirer l'eau à plus de 7 ou 8 mètres de hauteur. En revanche, la hauteur à laquelle elle peut refouler n'a pas de limite. Pour ces raisons, et pour éviter les problèmes d'amorçage, la pompe est de préférence immergée dans l'eau. Elle ne travaille ainsi qu'en refoulement.

Dans le cas du pompage en eau souterraine, on est contraint, en raison de la profondeur, d'utiliser un groupe électropompe immergé. Les systèmes composés d'un moteur en surface et d'une pompe immergée sont aujourd'hui totalement abandonnés.

Dans les cas de pompage pour l'irrigation à partir d'eaux de surface, fleuve ou marigot, la pompe peut facilement travailler hors de l'eau, en aspiration. Il est alors possible d'installer un groupe électropompe "de surface" sur la berge, ou mieux, sur un bac flottant, si les variations saisonnières du niveau de l'eau sont importantes.

Les électropompes immergées placées à l'intérieur de forages de 4 ou 6 pouces doivent nécessairement avoir un diamètre réduit (95 ou 136 mm) alors que celles en surface ne sont pas limitées par ces questions d'encombrement.

En résumé, on réserve l'utilisation des moteurs à courant continu pour les électropompes de surface, le changement de balais étant facilement réalisable. A contrario, les électropompes immergées sont toujours équipées de moteurs alternatifs, à l'exception toutefois des applications domestiques de petite

taille, où les pompes volumétriques utilisées sont équipées de moteurs à courant continu à balais.

De toutes ces considérations, on peut dresser un tableau des combinaisons les plus usuelles :

	CENTRIFUGES	VOLUMÉTRIQUES
Pompes immergées	type 1	type 2
Pompes de surface sur flotteur	type 3 (flottante)	—
Pompes de surface à poste fixe	type 4	—

Les caractéristiques de ces divers types de pompes sont décrites dans l'annexe 4.

Comparaison entre les électropompes les plus usuelles

Type d'électropompe	Utilisation	Points d'eau	Type de moteur	HMT	Fiabilité
Centrifuge immergée : AC	Hydraulique villageoise	puits et forages	AC + onduleur	jusqu'à 120 m	Très diffusée Excellente !
DC	Hydraulique villageoise	puits et forages	DC à commutation	jusqu'à 120 m	Peu diffusée Peu d'info.
Volumétrique immergée	Domestique	puits et forages	DC à balais immergé	jusqu'à 70 m	Peu diffusée Peu d'info.
Centrifuge flottante	Irrigation	eaux de surface	DC à balais en surface	jusqu'à 50 m	Assez diffusée Correcte
Centrifuge de surface	Gros modèle : irrigation	eaux de surface	DC à balais en surface	jusqu'à 50 m haut. aspir. < 7 m	Correcte
	Petit modèle domestique	eaux de surface	DC à balais en surface	quelques mètres haut. aspir. < 7 m	Très diffusée Excellente !

AC : courant alternatif DC : courant continu

Équipements pour l'adaptation électrique des électropompes au photovoltaïque

♦ Onduleur

Les électropompes à courant alternatif nécessitent l'usage d'un onduleur (convertisseur de courant continu en courant alternatif). Le modèle le plus

répandu est l'onduleur triphasé à puissance et fréquence variables. Il permet d'adapter le générateur photovoltaïque et l'électropompe au point de fonctionnement optimal et ainsi d'optimiser la taille du générateur. Certains appareils possèdent également des fonctions de contrôle (blocage de pompe, fonctionnement à vide) qui permettent d'arrêter momentanément l'électropompe en cas de problème. Ceci permet de protéger l'électropompe et d'éliminer les électrodes de niveau.

Le rendement de ce type d'onduleur est de l'ordre de 95 % et leur puissance standard est de 1 500 VA, toutefois des modèles plus puissants existent (4 kVA). Sa durée de vie moyenne est évaluée à 7 ans. Appareil aujourd'hui très fiabilisé, il reste cependant, du fait de son électronique, le maillon faible d'un système de pompage immergé en courant alternatif. Spécifiquement étudié pour le photovoltaïque, son coût de revient encore très élevé implique un coût de remplacement prohibitif supérieur à 10 000 FF, qui peut s'avérer un réel handicap en cas de panne.

♦ *Adaptateurs d'impédance*

C'est un petit système électronique qui permet d'accorder l'impédance entre les modules et l'électropompe de telle façon que la valeur de sortie du générateur photovoltaïque soit à son niveau maximal. Les adaptateurs d'impédance sont principalement utilisés sur les petites électropompes volumétriques du fait d'un fort couple à vaincre au démarrage.

Les différents systèmes de pompage et leur application

Il est possible de classer les systèmes de pompage aussi bien avec des critères de ressources en eau, qu'avec des critères d'utilisation (alimentation en eau potable, irrigation) ou encore avec des critères sociaux (usage individuel, collectif). Pour simplifier ce classement nous allons distinguer 3 principales applications auxquelles vont correspondre 3 types de système : le pompage collectif sur forage, le pompage des eaux de surface pour l'irrigation et le pompage domestique.

Éléments caractéristiques d'un système de pompage photovoltaïque

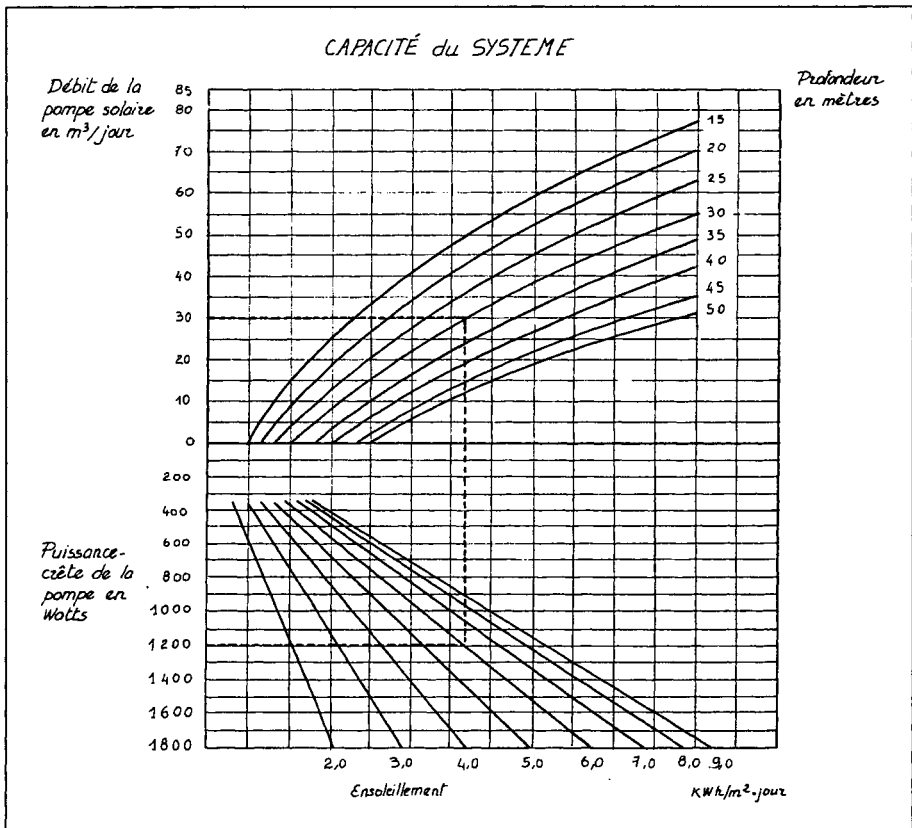
- la puissance crête du générateur photovoltaïque (W_c) ;
- le débit Q que le système fournit quotidiennement (en m^3/j) en fonction de l'irradiation quotidienne I_r (en $kWh/m^2.j$) ;

- la hauteur manométrique totale (HMT) requise (en mètre) ;
- la tension de fonctionnement (accessoirement).

Le débit est une valeur qui varie en fonction de la puissance du générateur et de la HMT à couvrir. Les fabricants et assembleurs fournissent en général des abaques reliant ces différentes valeurs.

Le débit dont on parle ici est un débit à la journée. Le débit instantané de la pompe solaire est très variable selon l'heure de la journée (maximum au midi solaire et selon la nébulosité du ciel).

Abaque de dimensionnement d'une pompe solaire



Le pompage sur forage

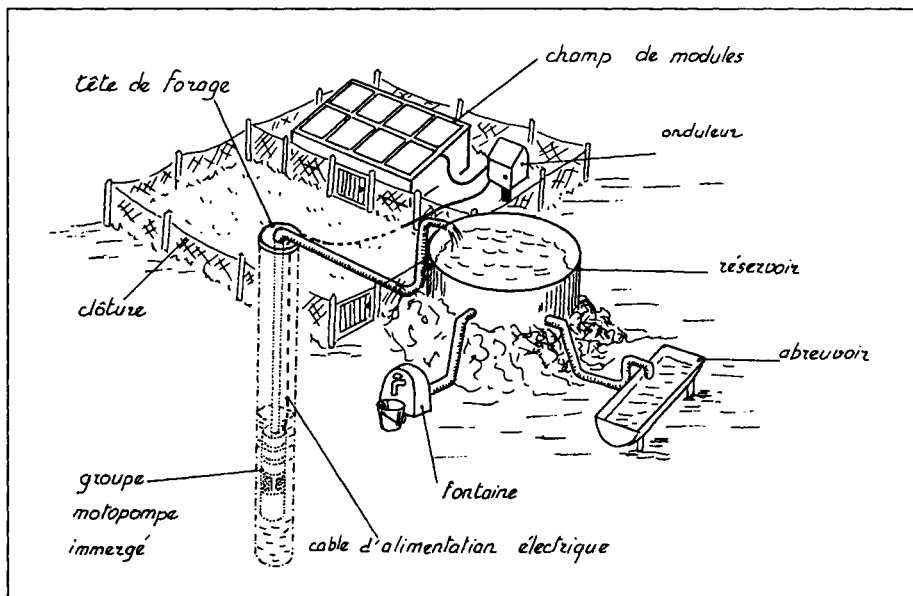
Répondant aux besoins vitaux de communautés villageoises, le pompage photovoltaïque commence à se positionner comme un remplaçant des pompes à motricité humaine. Les systèmes photovoltaïques de pompage sont installés très souvent sur des forages. On rencontre en effet un très grand nombre de forages dans les pays en voie de développement suite aux nombreux programmes réalisés durant la décennie de l'eau (1980 – 1990). Toutefois les forages doivent délivrer au moins 5 m³/h pour être exploitables, ce qui constitue une très importante contrainte.

Ces systèmes permettent alors de fournir de l'eau potable à des villages de 500 à 2 000 habitants. Ils fonctionnent généralement au fil du soleil et impliquent l'installation d'un réservoir.

La configuration classique comprend :

- un champ de modules photovoltaïques de 7 à 80 modules silicium cristallin de 50 Wc ;
- une électropompe centrifuge immergée à courant alternatif ;
- un onduleur triphasé ;
- un réservoir.

Installation solaire sur forage



La gamme couvre des hauteurs manométriques (HMT) de 5 à 120 m. En majorité utilisés pour une HMT de 20 à 40 m, les débits disponibles vont de 5 m³/j à 120 m³/j (moyenne : 35 m³/j). Les générateurs ont une puissance de 300 à 4 000 Wc.

Le MTBF (*Mean Time Between Failures* : temps moyen entre pannes) qui caractérise la fréquence de pannes, est de l'ordre de 6000 heures (2,4 années). A titre de comparaison le MTBF d'une pompe à moteur thermique (moto-pompe) est 3 à 4 fois inférieur.

Ces systèmes ont une très bonne fiabilité et équipent depuis quelques années la plupart des projets de pompage en hydraulique villageoise. Il est intéressant toutefois de comparer avantages et inconvénients :

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
- Fiabilité excellente	- Mauvaise exploitation des forages (4 h/j au débit maximal sur 24 heures)
- Entretien facile	
- Modularité	- Manque de souplesse d'utilisation (débit fixe par jour)
- Peu de pièces d'usure	- Présence d'équipements électroniques
- Coûts de fonctionnement faibles jour	- Coût d'investissement élevé - Coûts de fonctionnement supérieur à celui des systèmes manuels

L'excellente fiabilité de ces pompes ne doit pas cacher la nécessité d'une maintenance spécialisée. Les sous-ensembles (onduleur par exemple) coûtent cher et rendent parfois le dépannage aléatoire.

Ces pompes peuvent aussi bien être installées sur des forages que sur des puits (de préférence fermés). En plus des hommes, elles peuvent alimenter en eau le bétail (hydraulique pastorale) et quelquefois couvrir un peu d'irrigation (maraîchage).

Le pompage de surface pour irrigation

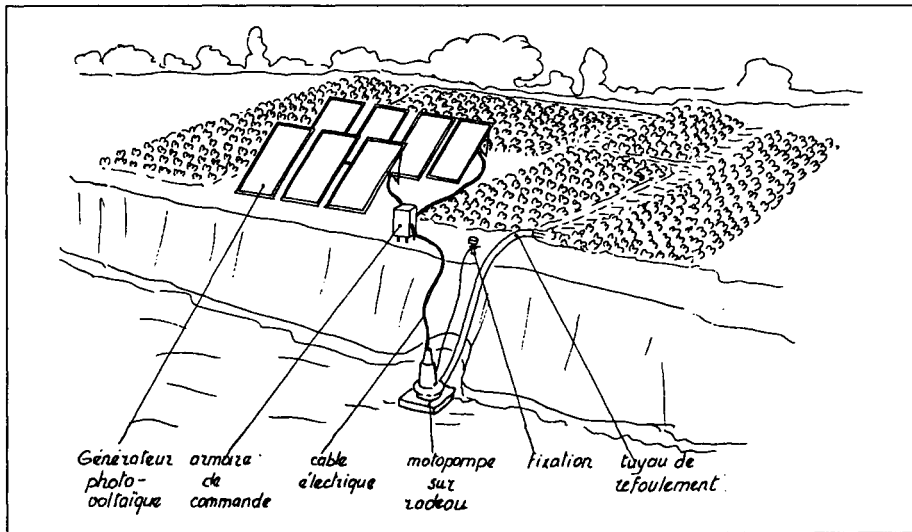
Les pompes photovoltaïques peuvent également être utilisées pour l'irrigation. Toutefois elles se mesurent aux performances des pompes à moteur thermique (motopompes) qui sont en général plus intéressantes. De ce fait, la diffusion de ces pompes solaires reste à ce jour encore assez faible. Elles sont généralement installées sur des rivières ou des mares, très rarement sur des puits car ces derniers n'ont pas le débit suffisant. Ces systèmes permettent d'ir-

riguer des parcelles pouvant atteindre 2 hectares de maraîchage et fonctionnent au fil du soleil sans besoin de stockage.

La configuration classique comprend :

- un champ photovoltaïque de 300 à 3 000 Wc ;
- une électropompe centrifuge flottante à courant continu ;
- un sectionneur (interrupteur).

Installation solaire en bord de fleuve



La gamme couvre des hauteurs manométriques totales (HMT) jusqu'à 50 m maximum. Systèmes en majorité utilisés pour une HMT de quelques mètres, leurs débits disponibles vont de 10 m³/j à 250 m³/j. Le MTBF* est de l'ordre de 3000 heures (1,2 année). A titre de comparaison le MTBF d'une pompe à moteur thermique (motopompe) est 2 fois inférieur.

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
- Fiabilité	- Manque de souplesse d'utilisation
- Maintenance facile	- Difficile à rentabiliser
- Modularité	- Faible surface irrigable
- Peu de pièces d'usure	- Coût d'investissement élevé
- Coûts de fonctionnement faibles	comparativement aux motopompes

* MTBF : (Medium Time Between Failures) durée moyenne entre deux pannes.

Ces pompes sont essentiellement utilisées pour l'irrigation. Or les besoins en eau des plantes varient en quantité selon le stade cultural. Par exemple, pour la culture du riz, la consommation d'eau varie de 120 m³/ha lors de la mise en eau des parcelles à 0 m³/ha lors de la phase finale de maturation. De même, les légumes demandent de 40 à 90 m³/ha selon leur stade végétatif et selon les conditions climatiques. Face à ces besoins variables, la pompe solaire ne sait que fournir les besoins de pointe. De ce fait, la pompe sera surdimensionnée le reste du temps. Pour résoudre ce problème, on double parfois la pompe solaire d'une motopompe qui assure le complément lors des besoins de pointe.

Par ailleurs, l'habitude est de ne faire du maraîchage que 6 mois par an (en saison sèche). Ceci implique la non-utilisation de la pompe solaire durant 6 mois, et ceci représente un non-sens économique. Il faudra donc chercher à irriguer tout au long de l'année en adaptant les méthodes culturales en conséquence (variétés adaptées, lutte contre les insectes).

L'installation en fixe du générateur peut parfois poser problème (lit de rivière qui se déplace, mare qui s'assèche). Pour cette raison plusieurs constructeurs ont installé les modules sur un support mobile. Les moteurs à courant continu nécessitent un remplacement périodique des balais (2 à 3 ans). Il est techniquement possible, cette solution est aujourd'hui utilisée, de placer une électropompe centrifuge immergée à courant alternatif sur un flotteur pour remplacer les pompes flottantes classiques. L'intérêt est la grande diffusion et la fiabilité des électropompes immergées à courant alternatif.

Les prix actuels, les produits disponibles ainsi que la démarche de diffusion sont autant de handicaps pour l'acquisition de tels systèmes par des petits exploitants (0,1 à 0,5 hectare).

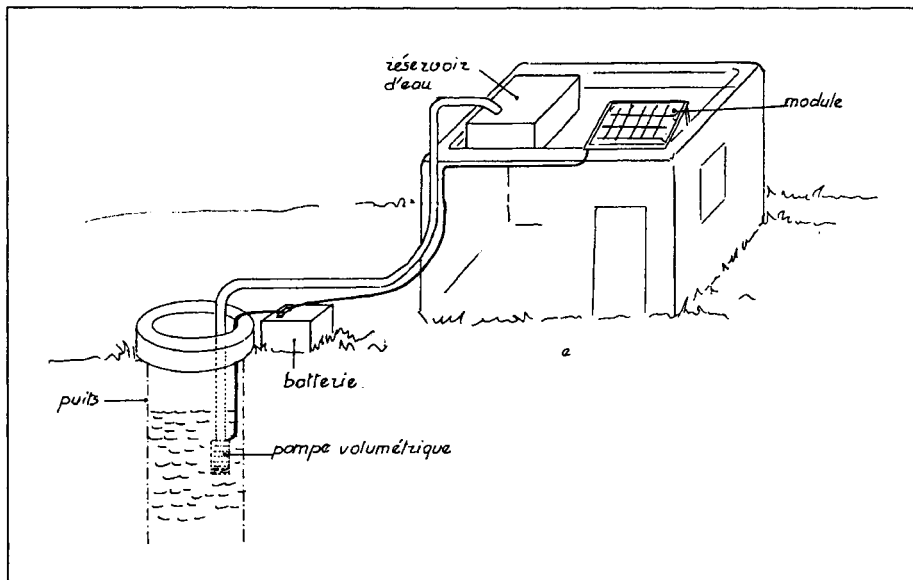
Le pompage domestique

Troisième filière commerciale du pompage photovoltaïque, l'adduction d'eau pour une famille représente à ce jour un marché certain pour les petits systèmes.

La configuration classique comprend :

- quelques modules cristallins (de 1 à 4 modules de 50 Wc) ;
- une électropompe de surface à courant continu ;
- un sectionneur ;
- un réservoir.

Alimentation en eau d'une maison individuelle



Ces systèmes fonctionnent soit au fil du soleil avec adaptateur d'impédance, soit sur batterie. Cette dernière solution, qui met en oeuvre une unité de gestion de l'énergie, optimise au maximum le fonctionnement du système. La présence d'une batterie permettra ainsi d'autres usages (éclairage, vidéo) en cas d'excédents d'énergie. Quelle que soit la solution choisie, la présence d'un réservoir est nécessaire.

La gamme couvrant des hauteurs manométriques (HMT) de quelques mètres (15 m maximum), les débits de ces petits systèmes sont de quelques mètres cubes par jour. Le générateur qui convient à ce type d'utilisation excède rarement 100 à 200 Wc. La durée de vie de ce type de pompes (grand public) est inférieure aux pompes précédemment citées (usage collectif) ; elle excède rarement quelques milliers d'heures.

Ces électropompes ont par contre l'avantage de bénéficier d'une diffusion assez large. L'utilisation de système mixte (pompage + électricité) permet une meilleure rentabilité de ces pompes solaires. La plupart de ces électropompes nécessitent le remplacement périodique des balais (6 mois à 2 ans).

MISE EN PLACE DES ÉLÉMENTS D'UNE UNITÉ DE POMPAGE

Mise en place des éléments périphériques

Tête de forage

La tête de forage est constituée d'une pièce métallique rapportée qui permet le support de l'électropompe avec sa tuyauterie. Cette platine est toujours en inox afin d'éviter toute corrosion. Un massif en béton est réalisé pour la supporter et pour garantir l'étanchéité du forage.

Ouvrage sur cours d'eau

L'électropompe peut être placée sur un radeau, ce qui a l'avantage de réduire au maximum la hauteur d'aspiration et de faciliter l'amorçage de la pompe. Ces radeaux posent toutefois des problèmes de durée de vie : ils finissent parfois par prendre l'eau et s'enfoncer.

Lorsque le cours d'eau présente un courant fort, des risques de détérioration sont également à prendre en compte du fait des corps flottants. Il pourra être nécessaire de fabriquer soit une digue protectrice, soit un puits de pompage alimenté par un canal. Dans ce dernier cas, attention à l'envasement du bassin de captage.

Réservoir et château d'eau

Conçu soit sous forme de réservoir placé quasiment au sol, soit sous forme de château d'eau, le stockage d'eau peut faire appel à des matériaux préfabriqués (citerne en acier galvanisée) ou à une fabrication locale (béton armé ou cuve en fibrociment). Dans le cas du réservoir placé en hauteur (château d'eau) la conception et le montage requièrent une certaine technicité. Les réservoirs sont de préférence munis d'un système d'arrêt en cas de trop plein.

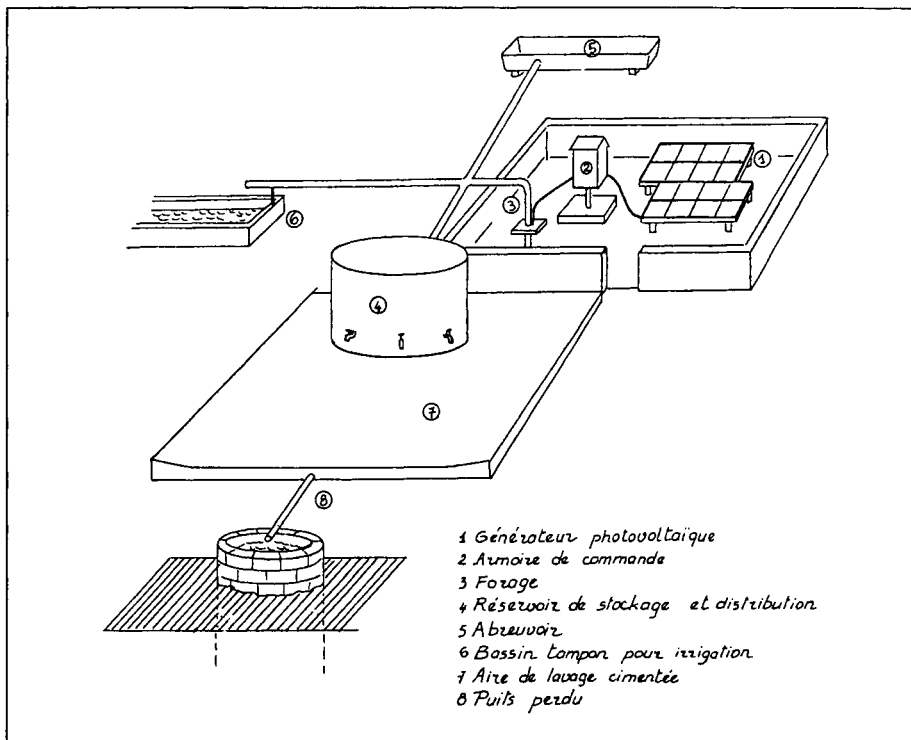
Abords du point d'eau

Dernier travail de génie civil, les abords du point d'eau requièrent un aménagement approprié afin d'améliorer les conditions d'hygiène sanitaire. En effet la réalisation d'une margelle, d'une surface cimentée d'approche du puits ou du forage ainsi que l'évacuation des eaux usées par une rigole cimentée vers un puisard permettent de limiter fortement la pollution du point d'eau et

donc les maladies hydriques. On éloignera les animaux en reportant les abreuvoirs à au moins 20 mètres du forage et en leur interdisant l'accès aux bornes-fontaines par une clôture.

Il faudra ensuite organiser le nettoyage régulier de tous ces éléments.

Aménagements sanitaires d'un point d'eau



Mise en place des électropompes

La mise en place de l'ensemble électropompe-tuyauterie requiert expérience et compétence. Elle est effectuée par des professionnels. Signalons simplement les points suivants :

Électropompes de forage

♦ Les électropompes de forage sont généralement supportées par leur propre tuyauterie et non par le câble en acier parfois installé qui assure sim-

plement une sécurité. Il s'agit en effet de respecter un positionnement parfaitement vertical à l'intérieur du forage.

- ♦ Le câble électrique (submersible) doit être installé le long du tuyau en prévoyant une marge sur sa longueur (au minimum 10 cm en plus tous les 2 m) pour éviter qu'après allongement du tuyau sous le poids de la pompe et de la colonne d'eau, le câble ne soit arraché pour cause de longueur insuffisante.

- ♦ Les électropompes à courant alternatif nécessitent avant leur mise en place la vérification du niveau du liquide de refroidissement.

Électropompes de surface

- ♦ Les électropompes destinées aux eaux de surface peuvent être montées sur des flotteurs (soit intégrés à la pompe, soit artisanaux – style radeaux ou bidons vides). Elles nécessitent un raccordement à la berge.

- ♦ Dans le cas d'une électropompe à aspiration, un système de flotteur avec maintien de l'entrée du tuyau (crépine) sous l'eau et à une certaine profondeur permet d'éviter le désamorçage ou l'aspiration de vase.

BESOINS EN ÉNERGIE ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME DE POMPAGE

Identification des besoins

L'identification des besoins consiste à déterminer ou évaluer :

- la quantité d'eau nécessaire (pour une utilisation donnée) ;
- la profondeur à laquelle l'eau doit être pompée ;
- la hauteur à laquelle l'eau doit être remontée (hauteur du château d'eau, par exemple) ;
- la distance à laquelle l'eau doit être transportée.

Déterminer la quantité d'eau nécessaire chaque jour

BESOINS QUOTIDIENS

Hydraulique villageoise	Seuil de survie :	5 litres/personne
	Niveau de subsistance :	20 litres /personne (objectif Unicef)
	Seuil de développement :	50 litres/personne
Hydraulique pastorale	Chèvres/moutons :	1 à 5 litres (suivant la saison)
	Porcs :	5 à 10 litres
	Bovins :	10 à 50 litres (suivant la saison)
	Chevaux :	30 à 50 litres
	Ânes/chameaux :	20 litres (chameaux : + de 100 litres par prise)
Irrigation	Maraîchage :	6 à 9 litres/m ²
	Riz :	9 l/m ² (moyen) ; 13 à 15 l/m ² (pointe)
	Maïs :	5 l/m ² (moyen) ; 6 à 10 l/m ² (pointe)
	Tomate :	5 l/m ² (moyen) ; 10 l/m ² (pointe)
	Pommes de terre :	3 l/m ² (période froide)
	Café :	5,5 l/m ²
Efficience de l'irrigation* (1 litre/m ² <=> 10 m ³ /ha)	Planche :	60 % (moyen) ; 80 à 30 % (extrêmes)
	Billons :	55 % (moyen) ; 70 à 40 % (extrêmes)
	Aspersion :	65 % (moyen) ; 80 à 50 % (extrêmes)
	Arrosoir :	80 % (moyen) ; 90 à 50 % (extrêmes)
	Goutte à goutte :	90 % (moyen) ; 95 à 70 % (extrêmes)

* L'efficience représente le taux de volume d'eau qui est utilisé par les plantes en tenant compte des pertes par évaporation, infiltration dans les canaux , etc.

TYPE D'UTILISATION	CARACTÉRISTIQUES	BESOINS QUOTIDIENS
Petit village	300 habitants	6 m ³ /j
Gros village	1 500 habitants	35 m ³ /j
Petit troupeau	30 zébus, 50 ovins	1 m ³ /j
Gros troupeau	400 zébus, 500 ovins	12 m ³ /j
Petit jardin	0,1 ha	8 m ³ /j (en pointe)
Gros jardin (collectif)	1 ha	80 m ³ /j (en pointe)
Rizière	10 ha	1 100 m ³ /j (en pointe)

Profondeur de pompage

Le niveau de l'eau dans un puits ou dans un forage varie lorsque l'on pompe. Plus le pompage est fort et plus le niveau de l'eau est bas. Il convient donc de connaître le niveau dynamique de l'eau. La valeur donnée du niveau dynamique est à rapporter à un certain débit de pompage. Le niveau dynamique peut également être donné par la somme de deux valeurs : celle du niveau statique de l'eau (après 24 h de repos) et celle du rabattement qui mesure la baisse du niveau de l'eau pour un débit donné.

Les forages à gros débit présentent un faible rabattement de leur niveau durant le pompage. Par contre les puits et les forages à faible débit peuvent présenter des baisses de niveau très importantes qui vont jusqu'à les assécher !

Il est absolument impératif de bien connaître les caractéristiques du point d'eau sur lequel sera installée la pompe solaire. Les services nationaux de l'hydraulique possèdent en général une documentation sur les points d'eau. En l'absence d'information, il faut faire des essais de pompage avant d'installer la pompe. On ne doit pas installer de pompe mécanisée sur un point d'eau inconnu, sauf à vouloir rechercher les déboires !

Les essais de pompage sont à mener selon un protocole rigoureux, avec des moyens de mesure (sonde électrique en particulier). La méthode la plus simple est de pomper avec un débit très nettement supérieur à celui de la pompe solaire, puis de mesurer la remontée de l'eau toutes les 15 minutes par exemple. Les résultats sont portés sur un graphique qu'un spécialiste interprétera. Un essai de pompage requiert donc un moyen puissant de pompage et la présence d'un spécialiste.

Hauteur d'eau à relever

Lorsque l'eau est pompée, elle est généralement relevée au-dessus du niveau du sol, dans un bassin ou un château d'eau. Cette hauteur d'eau est à relever au dessus du sol par la différence d'altitude entre la surface de l'eau et le champ (voir dessin page suivante).

Noter que la hauteur d'eau et la pression sont liées : 10 m de hauteur d'eau = $1 \text{ kg/cm}^2 \approx 1 \text{ bar}$.

Dans le cas de robinets placés juste sous le château d'eau, il n'est pas nécessaire de jucher le réservoir trop en hauteur. Une pression de 200 grammes/cm² est largement suffisante. Cela correspond à un réservoir perché à 2 mètres. Dans le cas d'une petite distribution (bornes-fontaines) le château d'eau doit avoisiner les 5 mètres de hauteur.

Distance d'approvisionnement

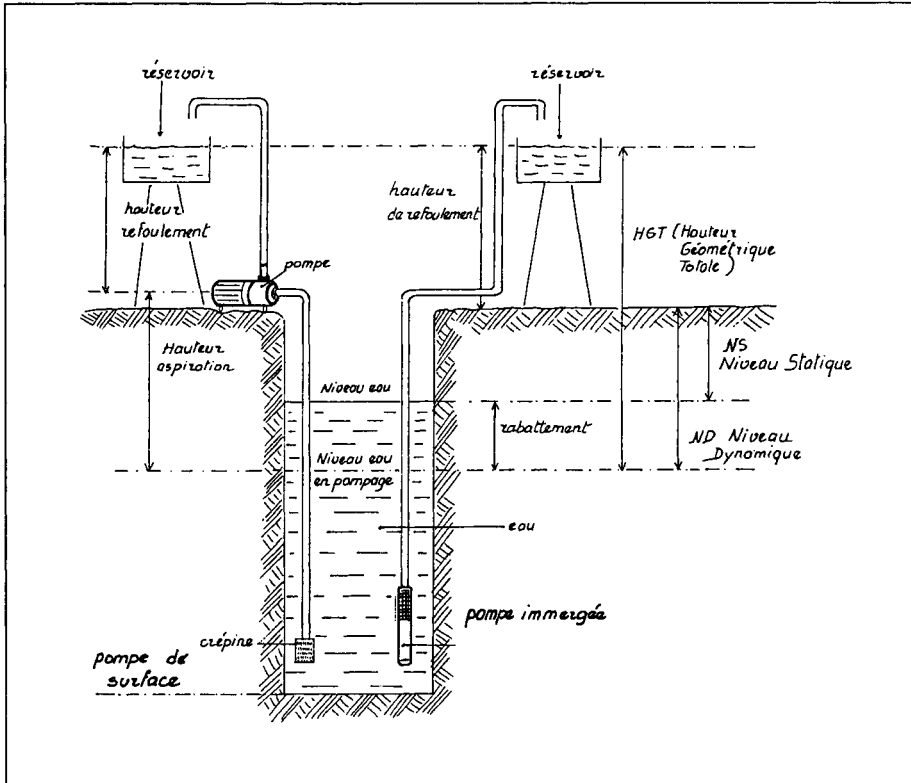
La longueur des tuyauteries fait également partie du dimensionnement. En effet le choix de cette longueur joue sur la valeur des pertes de charge, pertes qui sont dues au frottement de l'eau dans les tuyaux. Les pertes de charge consomment de l'énergie et doivent par conséquent être prises en compte lors du calcul de l'énergie totale consommée ainsi que lors du calcul de la section des tuyaux (voir paragraphes suivants).

Hauteur manométrique totale (HMT)

Une électropompe en fonctionnement doit fournir une somme de travaux pour :

- aspirer l'eau à une certaine profondeur (si elle n'est pas immergée) ;
- refouler cette eau à une certaine hauteur ;
- vaincre les pertes par frottements dans les tuyaux.

Les niveaux de l'eau lors du pompage



Le travail à fournir par la pompe est exprimé en hauteurs géométriques :

- ♦ *Hauteur géométrique d'aspiration* : différence d'altitude entre la pompe et le niveau de l'eau (elle est nulle quand la pompe est immergée).
- ♦ *Niveau statique* : hauteur entre le niveau du sol et le niveau de l'eau stabilisé après une longue période de pompage.
- ♦ *Rabatement* : hauteur entre le niveau statique et le niveau dynamique atteint par l'eau du puits durant le pompage (le niveau de l'eau descend dans le puits lors du pompage).
- ♦ *Hauteur géométrique de refoulement* : différence d'altitude entre la fin de la tuyauterie (la sortie de l'eau) et le niveau du sol ;

La somme de ces hauteurs est appelée hauteur géométrique totale (HGT). C'est la différence d'altitude entre la sortie de l'eau à l'air libre et le niveau dynamique de l'eau dans le puits, quel que soit le parcours de la tuyauterie.

- ♦ *Hauteur équivalente aux pertes de charge* : les frottements dans les tuyaux sont évalués en équivalents de hauteur à refouler (cf. ci-dessous).

La **Hauteur Manométrique Totale** (HMT) est la somme de toutes ces hauteurs. C'est la pression totale que doit vaincre la pompe.

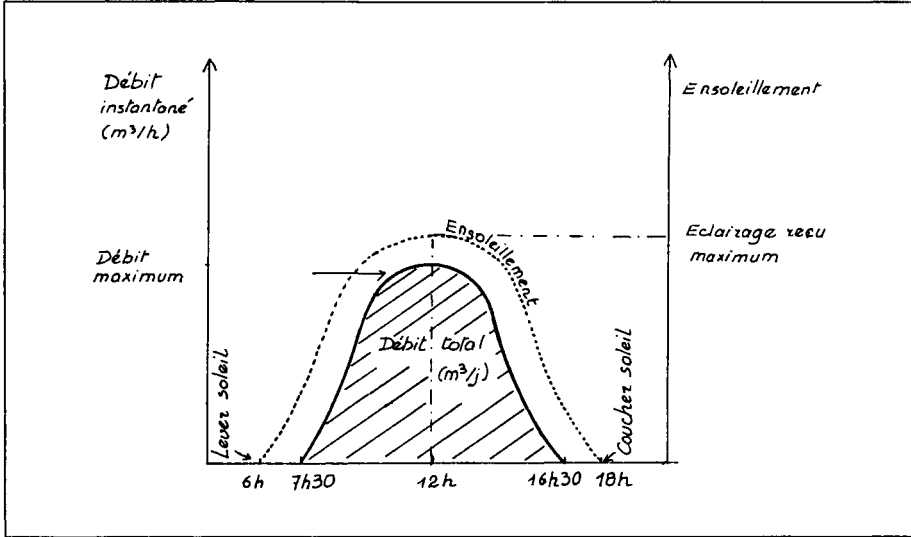
Les pertes de charge

Elles représentent en général 10 à 20 % de la hauteur géométrique totale sur une installation de pompage solaire classique (s'il n'y a pas de réseau de distribution de l'eau). Les pertes de charge varient principalement en fonction du débit, de la longueur des tuyaux, de leur section et des accidents de parcours (vannes, coudes, tés). Pour obtenir plus de précisions voir paragraphe ci-après "calcul de la section des tuyaux".

Choix des forages selon leurs caractéristiques

Le choix d'un forage pour installer une pompe solaire dépend de son débit d'exploitation. Il faut vérifier que le forage peut au moins fournir le débit maximum demandé par la pompe solaire (débit en période de pointe). En effet le débit d'une pompe solaire est variable du matin au soir (en fonction de l'irradiation solaire) ; il passe par un maximum au midi solaire, comme le montre les graphiques suivants :

Débit instantané d'une pompe solaire au fil du soleil durant la journée



La valeur du débit maximum de la pompe est un critère technique très souvent déterminant qui exclut de nombreux points d'eau. Par exemple, pour une pompe solaire de 20 à 30 m³/jour on enregistre des pics de 5 à 10 m³/heure en milieu de journée. Il est donc impératif que les caractéristiques des forages à "usage solaire" soient équivalentes à au moins cette valeur, c'est-à-dire que la pompe ne déjauge pas à ce débit maximal.

Calcul de la puissance hydraulique et de l'énergie hydraulique

Le dimensionnement d'un système de pompage est légèrement différent de celui des autres systèmes. En effet le calcul de l'énergie consommée nécessite d'utiliser la notion d'énergie hydraulique (ou de puissance hydraulique) pour trouver l'énergie électrique consommée.

Puissance hydraulique (P_{hyd})

La puissance hydraulique est la puissance nécessaire pour déplacer une certaine quantité d'eau d'une altitude à une autre. En réalité c'est la puissance réellement communiquée à l'eau par l'électropompe. Elle est donnée par la formule suivante :

$$P_{\text{hyd}} = 2,725 \cdot Q_i \cdot H$$

P_{hyd} : puissance hydraulique (W)

Q_i : débit instantané (m^3/h)

H = HMT (hauteur manométrique totale (m))

Jusqu'alors dans les dimensionnements (avec batterie) la puissance utilisée était la puissance électrique demandée par la pompe. Celle-ci peut être déduite de la puissance hydraulique par la formule :

$$P_e = P_{\text{hyd}} / (\eta_m \cdot \eta_p)$$

P_e : puissance électrique (W)

P_{hyd} : puissance hydraulique (W)

η_m : rendement du moteur

η_p : rendement de la partie hydraulique de la pompe

Les rendements des électropompes dépendent des matériels utilisés. Lorsque l'optimisation est bonne, le rendement global pompe + moteur est de l'ordre de 30 à 40 %.

Énergie hydraulique (E_{hyd})

L'énergie hydraulique est l'énergie nécessaire pour déplacer une certaine quantité d'eau d'un niveau à un autre pendant une certaine durée. Elle est donnée par la formule suivante :

$$E_{\text{hyd}} = 2,725 \cdot Q_q \cdot H$$

E_{hyd} : énergie hydraulique consommée par jour (Wh)

Q_q : débit quotidien (m^3)

H : HMT (hauteur manométrique totale (m))

L'énergie électrique (appelée jusqu'alors énergie consommée) peut être déduite de l'énergie hydraulique par la formule :

$$E_c = E_h / (\eta_m \cdot \eta_p)$$

E_c : Énergie électrique consommée par jour (Wh)

E_h : Énergie hydraulique consommée par jour (Wh)

η_m : rendement du moteur

η_p : rendement de la partie hydraulique de la pompe

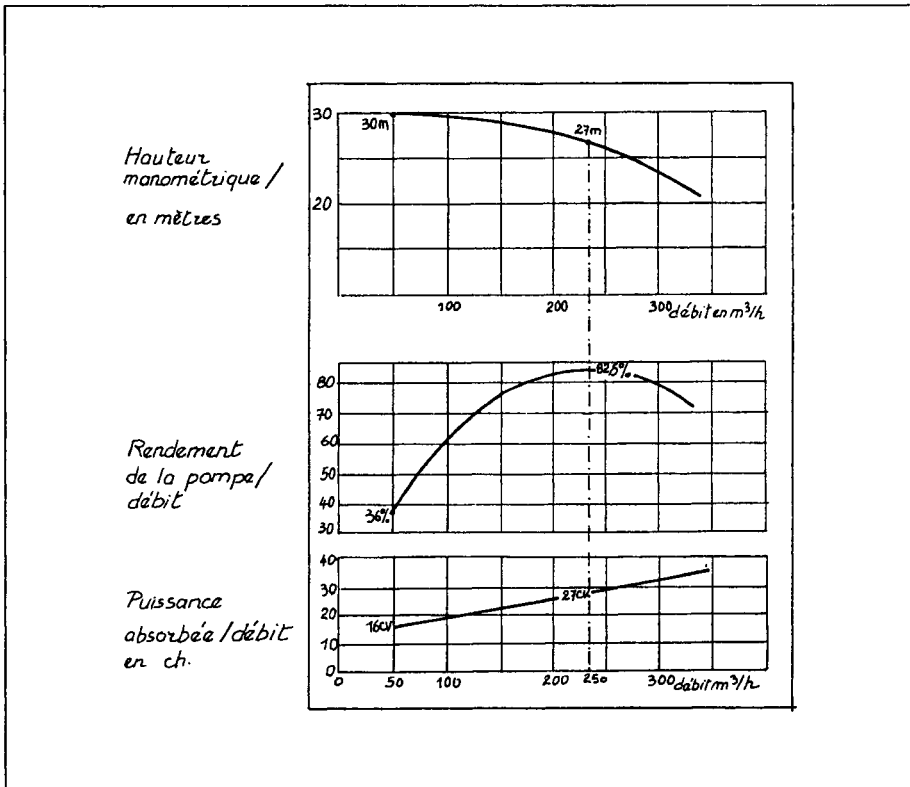
Le rendement global de l'électropompe (P_e / P_{hyd}) sur la journée est de l'ordre de : 30 %.

A propos du rendement

Le rendement maximal du moteur est de l'ordre de 80 % pour un moteur à courant alternatif, 90 % pour un moteur à courant continu. Le rendement de la partie hydraulique est de l'ordre de 50 %. Ces valeurs sont valables au point optimal de fonctionnement.

En réalité le rendement de l'électropompe est optimal pour une vitesse de rotation et une HMT données qui constituent les caractéristiques de l'électropompe. Dès que les valeurs de ces deux paramètres s'écartent du point optimum, le rendement chute rapidement. Il est donc indispensable que l'électropompe soit spécifiquement adaptée à la HMT du site. Par ailleurs le rendement optimal ne sera atteint qu'en milieu de journée puisque le matin et le soir l'irradiation est plus faible, et que la vitesse de rotation du moteur diminue, entraînant une chute de rendement.

Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge



Calcul de la puissance du générateur d'une pompe solaire

La plupart du temps les systèmes de pompage n'utilisent pas de batterie (fonctionnement dit "au fil du soleil"). Néanmoins la règle de base entre énergie produite et énergie consommée ($E_p = E_c / k$) reste valable. Seule la valeur de k changera suivant les rendements des différents éléments.

Méthode

Le dimensionnement du générateur se fait à partir de l'énergie consommée durant la journée (comme pour les systèmes avec batterie). On ne dimensionne pas à partir des débits instantanés de la pompe comme cela se pratique avec les pompes à moteur thermique.

- ♦ *Étape 1* : on évalue l'énergie hydraulique correspondant au besoin.
- ♦ *Étape 2* : on calcule l'énergie électrique qui sera consommée.
- ♦ *Étape 3* : on calcule l'énergie à produire (E_p) par jour ($E_p = E_c / k'$).

Le coefficient k' tient compte de toutes les baisses de rendement dans les modules, les câbles et l'onduleur. Il est assez élevé car les constructeurs optimisent les équipements et car il n'y a pas de batteries. Considérer $k' \approx 0,7$.

- ♦ *Étape 4* : on calcule la puissance crête (P_c) du générateur en tenant compte de l'irradiation ($P_c = E_p / I_r$).

Le rendement global de la puissance hydraulique par rapport à la puissance crête du générateur photovoltaïque (P_c/P_{hyd}) est en moyenne de 25 à 30 % sur l'ensemble de la journée.

Il est possible de résumer la formule de calcul de la puissance crête de la façon suivante :

$$P_c = (2,725 \cdot Q \cdot H) / (\eta \cdot I_r)$$

- P_c : puissance crête (Wc)
- Q : débit quotidien (m^3/j)
- H : hauteur manométrique totale (m)
- η : rendement global (de 25 à 30%)
- I_r : Irradiation ($kWh/m^2, j$) (moyenne annuelle)

La méthode de calcul précédente est une méthode simplifiée qui peut être présentée sous forme d'organigramme à remplir.

EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'UN GÉNÉRATEUR DE POMPE SOLAIRE

Un village de 1 000 habitants va être équipé avec une pompe solaire immergée. Le niveau dynamique est de 20 mètres (niveau statique = 17 m et rabattement = 3 m pour le débit moyen de 3,5 m³/h). Un réservoir sera installé à 2 mètres de hauteur du sol. L'irradiation quotidienne moyenne est : 5 kWh/m².j.

Le dimensionnement du générateur est le suivant :

- ♦ **Étape 1** : calcul des besoins.

On évalue le besoin à 20 litres par habitant par jour :

$$Q = 1\,000 \text{ hbts} \times 20 \text{ l/hab.j} = 20 \text{ m}^3/\text{j.}$$

- ♦ **Étape 2** : calcul de l'énergie électrique consommée par jour.

Calcul de la HMT : $HMT = 20 + 2 + (22 \times 0,1) = 24,2 \text{ m}$
(pertes de charge de 10 %).

Énergie hydraulique consommée :

$$E_{\text{hyd}} = 2,725 \times 20 \times 24,2 = 1\,319 \text{ Wh/j.}$$

Énergie électrique consommée : $E_c = 1\,319 / 0,3 = 4\,396 \text{ Wh/j.}$

- ♦ **Étape 3** : on calcule l'énergie à produire (E_p) par jour.

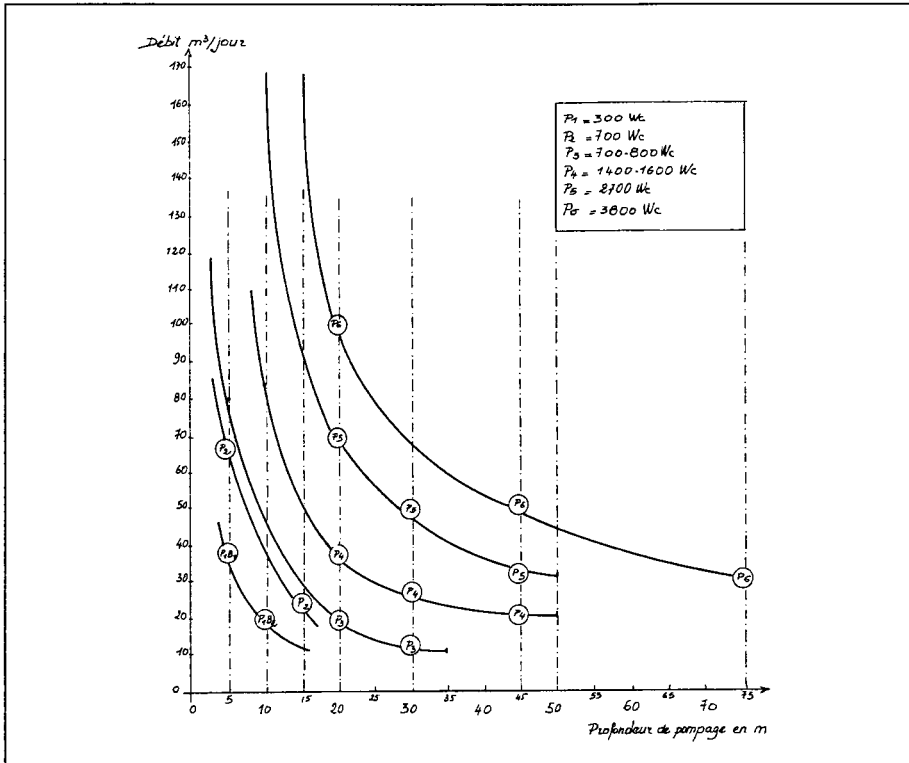
$$E_p = E_c / 0,7 = 4\,396 / 0,7 = 6\,280 \text{ Wh/j.}$$

- ♦ **Étape 4** : puissance crête du générateur.

$$P_c = E_p / I_r = 6\,280 / 5 = 1\,256 \text{ Wc.}$$

25 modules de 50 Wc doivent convenir. Il faut cependant savoir que de nombreuses électropompes à courant alternatif utilisent des branches de 7 ou 8 modules en série. Ce qui conditionne la tranche de puissance du générateur. Dans ce cas le choix de 28 modules est nécessaire : la puissance installée sera donc de 1 400 Wc.

Exemple de pompes photovoltaïques : le cas du PRS



Calcul de la puissance de l'onduleur

La puissance de l'onduleur est généralement déduite de celle du générateur photovoltaïque. La puissance de l'onduleur est supérieure à la puissance crête du générateur photovoltaïque. On vérifie ensuite qu'il supporte la puissance maximale appelée par l'électropompe.

Il existe des puissances standard d'onduleur (1500 VA, 4000 VA). Ces modèles, de part leur tension nominale d'entrée (105, 120, 210, 240 V DC), conditionnent le nombre de modules par branche à 7, 8, 14 ou 16 modules en série.

Calcul de la capacité du réservoir

La capacité du réservoir ou château d'eau est généralement égale à une journée de consommation. Plusieurs jours de capacité représenteraient un volume de réservoir trop important, donc un coût prohibitif.

Dans l'exemple précédent, une consommation journalière de 20 m³/j implique un réservoir de 20 m³, soit un cube de 2,7 mètres de coté, ce qui est déjà un réservoir assez complexe à fabriquer. La fabrication d'un réservoir demande des techniques rigoureuses (béton vibré) et une bonne expérience de la réalisation de ce type d'ouvrage. Les réservoirs peuvent être métalliques (mais dans ce cas attention à la rouille) ou en aluminium.

Calcul de la section des tuyaux

Les pertes de charge, dues au frottement de l'eau dans les tuyaux, dissipent inutilement de l'énergie. Les pertes de charge augmentent :

- lorsque le débit augmente ;
- lorsque la longueur des tuyaux augmente ;
- lorsque leur section diminue ;
- lorsque le tuyau "prend" des formes (coudes, restriction, etc.) ;
- lorsque la rugosité des tuyaux est plus importante (acier par rapport au polyéthylène).

Le calcul de la section des tuyauteries peut donc s'avérer une étape importante du dimensionnement. En réalité la taille des tuyaux est relativement standard sur les pompes solaires. Il importerait de connaître les pertes de charge en fonction de cette section, du débit désiré et de la longueur de tuyau.

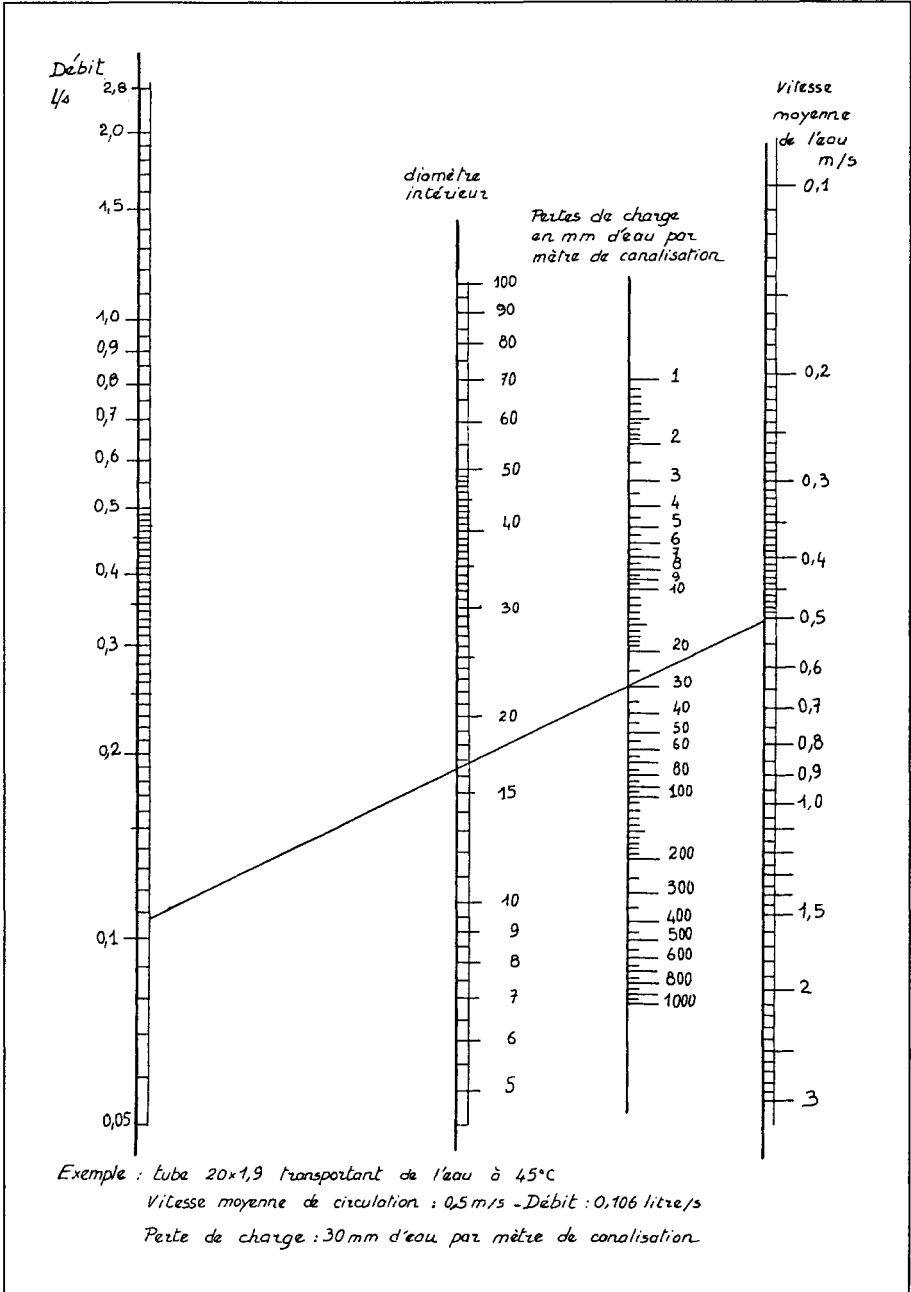
A titre d'exemple, le tableau suivant indique les pertes de charge (Jr) dans un tuyau PVC :

Ø INTÉRIEUR DU TUYAU	DÉBIT	LONGUEUR DU TUYAU	
		10 m	50 m
40 mm	10 m ³ /h* - 2.8 l/s	Jr = 0,7 m	Jr = 3,5 m
	5 m ³ /h - 1.4 l/s	Jr = 0,3 m	Jr = 1,5 m
60 mm	10 m ³ /h* - 2.8 l/s	Jr = 0,12 m	Jr = 0,6 m

* 10 m³/h = débit moyen d'une pompe solaire de 50 à 60 m³/jour

L'abaque de la page suivante permet de calculer les pertes de charge dans les tuyaux en connaissant leur diamètre et le débit qu'ils transportent.

Abaque de calcul des pertes de charge



LE POINT SUR LES COÛTS DES SYSTÈMES DE POMPAGE

Niveau d'investissement

Il est nécessaire de souligner, comme nous l'avons fait pour les systèmes d'éclairage, que le coût d'investissement d'une pompe photovoltaïque est très important : de 100 000 à 300 000 FF. Cependant, en comparant les coûts annuels, on constate que le solaire n'est pas plus cher que les autres systèmes de pompage. Cette structure des coûts limite fortement la diffusion du photovoltaïque pour le pompage. Elle nécessite des dispositifs renforcés de crédits, voire de subventionnement, afin de pallier cet inconvénient.

- ♦ Tout d'abord on considère que les coûts d'investissement au Wc des systèmes de pompage collectifs sont grosso-modo les suivants :
 - 70 à 100 FF HT/Wc (matériel emballé sortie d'usine) ;
 - 120 à 150 FF HT/Wc (pompe solaire installée sur site) ;
 - 50 000 à 200 000 FF HT (coût des aménagements et du réservoir).
- ♦ Si l'on sépare maintenant les différents types de pompes solaires, on obtient le tableau suivant :

	DÉBIT m ³ /j (5 kWh/m ² .j)	POUR UNE HMT	PUISSANCE GÉNÉRATEUR WC	COÛT DU SYSTÈME FF (FOB)
Pompe immergée	40	20 m	1 450	110 000 à 150 000
Pompe flottante	158	5 m	1 000	60 000 à 100 000
Pompe de surface à poste fixe	3	10 m	100	7 000 à 10 000
Petite pompe domestique	3	20 m	100	6 000 à 10 000

Le prix d'un système inclut les prix des modules, de l'électropompe, du système de contrôle (onduleur entre autres), des supports de modules, des tuyaux, des câbles et de l'emballage.

Concernant deux systèmes collectifs de pompage de puissance différente, une étude réalisée au Mali en 1990 nous donne des coûts qui sont présentés dans le tableau suivant. Il s'agit de deux cas distincts : une pompe de 540 Wc

et une pompe de 2 880 Wc. Ces deux pompes étaient installées sur forage et débitaient respectivement 15 et 90 m³/jour à 20 m de HMT.

Coût de l'eau au Mali

Désignation	540 Wc - 15 m ³ à 20 m				2 880 Wc - 90 m ³ /jour à 20 m			
	Prix (F. CFA)	%	durée (années)	annuité (F. CFA)	Prix (F. CFA)	%	durée (années)	annuité (F. CFA)
Générateur	1 500 000	17	15	100 000	7 200 000	35	15	480 000
Moto-pompe	300 000	3	7	128 571	400 000	2	7	57 143
Ondulateur	600 000	7	5		2 500 000	12	5	500 000
Accessoires	500 000	6	15	33 333	1 000 000	5	15	66 667
Emballage et transport	400 000	5	15	26 667	1 000 000	5	15	66 667
TOTAL MATERIEL	3 330 000	38		288 571	12 100 000	58		1 170 476
Installation	400 000	5	15	26 667	750 000	4	15	50 000
Aménagement standard	2 000 000	23	15	133 333	5 000 000	24	15	333 333
TOTAL GENIE CIVIL	2 400 000	28		160 000	5 750 000	28		383 333
Réalisation du forage	3 000 000	34	15	200 000	3 000 000	14	15	200 000
TOTAL GENERAL	8 700 000	100		648 571	20 850 000	100		1 753 810
Entretien	150 000		1	150 000	500 000		1	125 000
TOTAL PAR AN				798 571				2 253 810
Productible	5 400 m ³			108 000 m ⁴	32 850 m ³			657 000 m ⁴
Utilisé	3 800 m ³			76 000 m ⁴	22 995 m ³			459 900 m ⁴
Coût par m ³ productible	147,88 F. CFA (2,95 FF)				68,61 F. CFA (1,37 FF)			
Coût par m ³ utilisé	210,15 F. CFA (4,20 FF)				98,01 F. CFA (1,96 FF)			
Coût par m ⁴ productible	7,39 F. CFA (0,14 FF)				3,43 F. CFA (0,06 FF)			
Coût par m ⁴ utilisé	10,51 F. CFA (0,21 FF)				4,90 F. CFA (0,09 FF)			
(taux d'intérêt = 0 %)								

Source : J. Billerey, Le pompage solaire photovoltaïque, Coopération française, AFME, Mali, janvier 1990

On peut finalement tirer quelques conclusions quant au prix de l'eau (prix au m³ et au m⁴) pour les pompes solaires immergées précédemment analysées :

PUISSANCE POMPE Wc	VOLUME PRODUCTIBLE m ³ /an	VOLUME UTILISÉ (70 %) m ³ /an	COÛT AU m ³ PRODUCTIBLE UTILISÉ FF/m ³	COÛT AU m ⁴ * PRODUCTIBLE UTILISÉ FF/m ⁴
540	5 400	3 800	2,8 / 4,0	0,14 / 0,20
1 440	16 400	10 000	1,3 / 2,2	0,07 / 0,10
2 880	32 850	23 000	1,1 / 1,7	0,07 / 1,00

* La notion de m⁴ prend en compte le débit, c'est-à-dire des m³, multipliés par la HMT (m³ x HMT = m⁴). Dans ce tableau la HMT est de 20 m.

Source : J.Billerey, Le pompage solaire photovoltaïque, Coopération française, République du Mali, AFME, janvier 1990

On peut également donner quelques informations quant au prix de l'eau pour des pompes solaires de surface. Cet exemple s'applique à une pompe photovoltaïque de 3 kWc, pompant 250 m³/jour à 7,5 m de HMT.

NOMBRE DE JOURS D'UTILISATION PAR AN	VOLUME PRODUIT m ³ /AN	COÛT AU m ³ EN FF
1	250	
100	25 000	0,78
200	50 000	0,39
300	75 000	0,26
365	91 250	0,22

Source : J.Billerey, Le pompage solaire photovoltaïque, Coopération française, République du Mali, AFME, janvier 1990

Il apparaît de façon évidente que la non-utilisation (immobilisation) d'une pompe solaire coûte de l'argent. En effet le coût annuel, constitué en grande partie par l'amortissement du matériel, est fixe (19 500 FF / an) quelle que soit la durée d'utilisation.

Comparaison économique avec d'autres énergies

Le système de pompage qui offre un service plus ou moins équivalent à celui du photovoltaïque est la motopompe (pompe à moteur thermique, diesel ou essence). Voici une comparaison entre ces deux grandes sources d'énergie pour les deux types de pompage sur forage et de surface.

♦ *Pompage immergé sur forage*

Coût comparé en FF/m³ (HMT = 20 m)

Gamme de débit (HMT=20m) m ³ /j	Pompe solaire 540 Wc FF/m ³	Pompe solaire 1 440 Wc FF/m ³	Pompe solaire 2 880 Wc FF/m ³	Moteur diesel FF/m ³	Pompe à motricité humaine FF/m ³	Puisage manuel FF/m ³
< 10	–	–	–	6,1	1,5	1,0
10 à 20	3,0	–	–	3,6	–	0,7
20 à 50	–	1,5	–	2,3	–	–
50 à 100	–	–	1,4	1,9	–	–
> 100	–	–	–	1,5	–	–

Source : J.Billerey, Le pompage solaire photovoltaïque, *Coopération française, République du Mali, AFME, janvier 1990.*

Le pompage solaire présente un intérêt économique par rapport au pompage avec moteur diesel dans la gamme de débits allant jusqu'à 100 m³/j à 20 m, soit des puissances jusqu'à 3000 Wc. Attention, la comparaison doit toutefois se faire avec prudence. Les coûts ci-dessus sont des coûts de m³ productibles et le pompage solaire ne permet pas toujours d'adapter le débit aux besoins : l'eau inutilisée peut coûter cher ! Le pompage thermique, il faut le rappeler, présente une grande flexibilité d'utilisation. En contrepartie, il présente d'autres inconvénients (entretien périodique toutes les 200 heures, MTBF beaucoup plus faible, approvisionnement nécessaire en carburant).

Il faut également savoir que dans le cas d'adductions d'eau, le système de pompage ne représente qu'une part des coûts. Par exemple, pour une mini adduction d'eau (5 à 10 bornes-fontaines, 1 à 3 km de canalisations), les coûts d'investissement se répartissent de la façon suivante :

- pompe solaire installée : 30 % ;
- réseau de distribution : 30 % ;
- stockage d'eau (réservoir) : 30 %.

L'économie réalisée sur l'investissement d'une motopompe diesel n'apporte qu'une faible économie sur le coût total du projet.

♦ *Pompage de surface*

Coût comparé en FF/m³ (Q = 300 m³/j ; HMT = 7,5 m) :

DURÉE D'UTILISATION EN JOURS	POMPE SOLAIRE 3 000 Wc, FF/m ³	POMPE DIESEL (6. h/j) FF/m ³
100	0,8	0,2
200	0,4	0,2
300	0,3	0,2
365	0,2	0,2

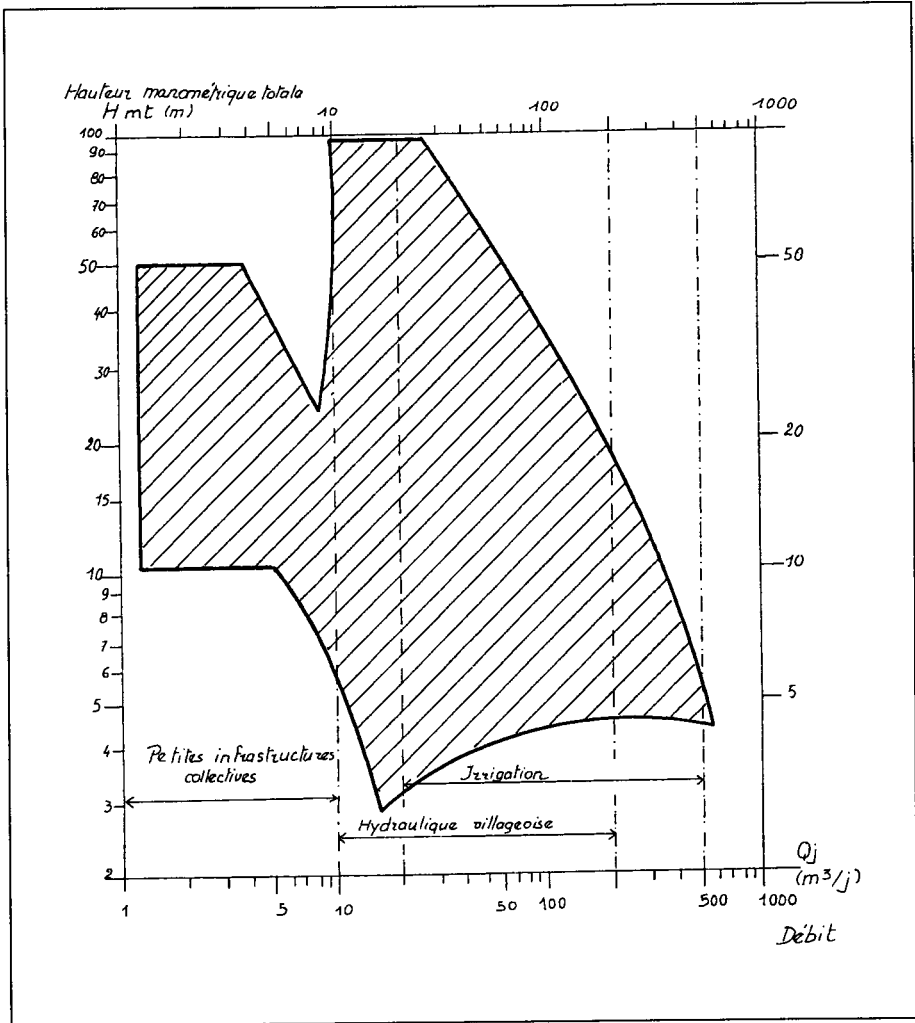
Source : J. Billerey, Le pompage solaire photovoltaïque, Coopération française, République du Mali, AFME, janvier 1990.

Lorsque l'on sait que l'irrigation dans des zones rurales africaines pour deux campagnes est nécessaire entre 5 et 8 mois (150 à 250 jours), on se rend compte que le pompage solaire pour irrigation n'est économiquement pas rentable. Le problème majeur du solaire avec ses coûts fixes se résume au problème de la durée d'utilisation de la pompe solaire dans l'année.

Domaine d'utilisation du photovoltaïque

L'abaque suivant donne la zone d'utilisation des systèmes de pompage PV, en tenant compte de la profondeur de pompage et des besoins journaliers en eau.

Zone de rentabilité du pompage photovoltaïque



Le froid

Un système de froid photovoltaïque comprend :

- un ensemble de modules photovoltaïques (de 150 à 500 Wc) ;
- une batterie ;
- un régulateur de charge et décharge ;
- un réfrigérateur.

Les réfrigérateurs photovoltaïques sont des appareils à compression, à isolation renforcée et fonctionnant en courant continu.

Il existe principalement trois types de réfrigérateurs solaires : les réfrigérateurs, les congélateurs et les appareils mixtes (partie réfrigération et partie congélation). Il existe par contre de nombreux modèles suivant la capacité de stockage désirée.

Un réfrigérateur de type photovoltaïque est généralement composé :

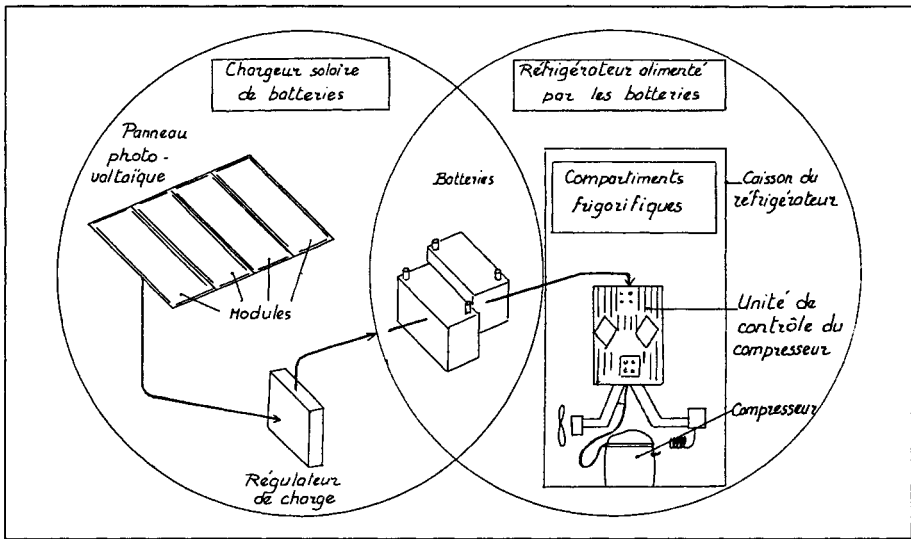
- d'une caisse à simple ou double compartiments, à ouverture sur le dessus (type bahut) et à isolation renforcée ;
- d'un groupe frigorifique à compression (évaporateur latéral + condenseur latéral + compresseur hermétique à courant alternatif basse tension 12 V ou 24 V) ;
- d'une unité électronique comprenant un convertisseur DC/AC (12 V ou 24 V) et une commutation électronique.

Tous ces éléments sont intégrés au sein d'un même ensemble : le réfrigérateur photovoltaïque. Certains modèles intègrent l'unité électronique précé-

demment citée et le régulateur de charge/décharge qui sera nécessaire à la batterie au sein d'une même carte électronique.

L'expérience a prouvé que de nombreux techniciens locaux, croyant qu'il s'agissait de réfrigérateurs classiques, ont mis hors service soit l'unité électronique, soit le compresseur basse tension. Toute manipulation de la part d'un personnel non formé est à proscrire !

Synoptique d'un système de réfrigération solaire



LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE RÉFRIGÉRATION ET LEURS APPLICATIONS

Les deux principales applications du froid photovoltaïque sont : l'usage médical pour la conservation des vaccins et la congélation d'accumulateurs de froid, ainsi que l'usage domestique pour la conservation de denrées. Il n'est pas conseillé de choisir la solution photovoltaïque pour des applications faisant appel à des besoins de froid important comme la congélation ou les chambres froides.

♦ *Grandeurs caractéristiques d'un système de réfrigération*

- la puissance crête du générateur photovoltaïque (Wc) ;
- l'énergie journalière consommée par le réfrigérateur (Wh/j), donnée pour différentes températures extérieures ;
- le volume de stockage (en litres) ;
- la capacité à produire de la glace (nombre de kg/j) ;
- l'autonomie en cas d'absence de soleil (en jours) ;
- la température ambiante moyenne (en degré Celsius, °C) ;
- la tension d'alimentation (V) ;
- la capacité des batteries (Ah).

La consommation en énergie dépend de l'utilisation (nombre d'ouvertures, introduction de vaccins, de denrées, demande de production de glace) ainsi que de la température extérieure. Cette consommation sert de base au dimensionnement du générateur. L'autonomie en cas d'absence de soleil est une valeur que l'on fixe au départ (fonction des conditions d'ensoleillement) et qui sert au dimensionnement des batteries.

L'usage médical : la conservation de vaccins

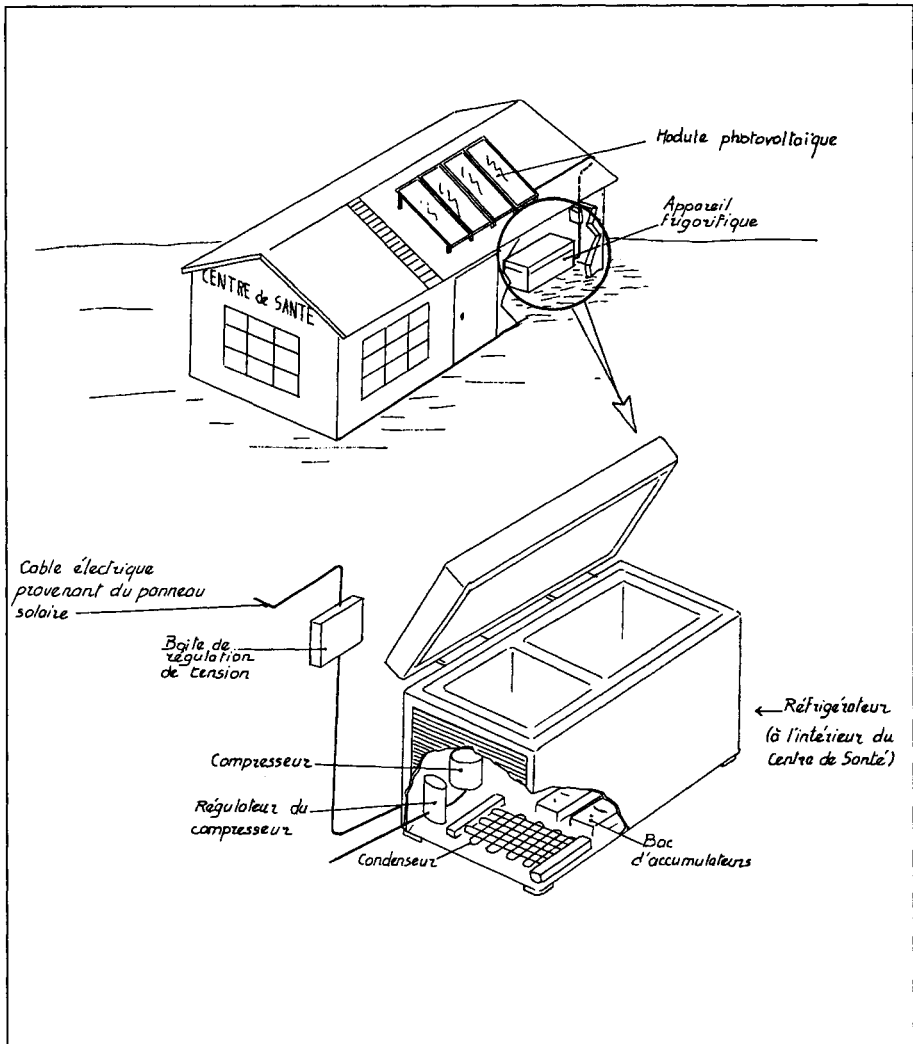
La conservation des vaccins en sites isolés nécessite depuis de nombreuses années l'utilisation des réfrigérateurs à pétrole ou à gaz. Ces deux types de réfrigérateurs présentent des difficultés d'utilisation. Ceux fonctionnant à pétrole ont souvent des problèmes techniques dus à la qualité du pétrole, au réglage de la mèche et à la maintenance ; le fonctionnement des réfrigérateurs à gaz, plus fiables, repose sur l'approvisionnement en bouteilles de gaz qui n'est pas toujours régulièrement assuré.

La mise en place des réfrigérateurs solaires apporte un gain réel en termes de fiabilité et de respect de la chaîne du froid. Ces réfrigérateurs permettent en général de stocker jusqu'à 20 000 doses de vaccins (30 à 100 litres de volume brut) et de produire de 2 à 3 kg de glace par jour. Cette production de glace est nécessaire pour permettre de congeler des accumulateurs de froid (récipients en plastique remplis d'eau, ou briquettes). Ces "*ice-packs*" seront utilisés à l'intérieur de petites glaciers pour la conservation des vaccins lors des tournées dans les villages où il n'y a pas de réfrigérateur.

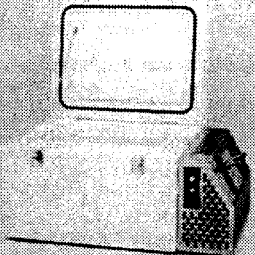
Un système standard comprend :

- 3 à 6 modules de 50 Wc (cristallins) avec support ;
- 1 appareil mixte réfrigérateur/congélateur (+ 4 °C et - 10 °C) de type solaire (12 V ou 24 V) ;
- 1 batterie (200 Ah par exemple) ;
- 1 régulateur de charge et de décharge.

Détail d'une installation solaire



Exemple de fiche technique OMS d'un réfrigérateur solaire

		CODE PIS E3/31			
DESIGNATION Réfrigérateur & congélateur pour briquettes, solaire PV, à compression. (991 23 03 01)					
NOM ET ADRESSE DU FABRICANT					
Dimensions	REFRIGERATEUR	CONGELATEUR	UNITE		
Volume brut fabricant	27*	--*	litres		
Volume stockage vaccin	14*	--*	litres		
Dimensions hors tout (hxbxL)	92x55x50*	--*	cm		
Volume/poids brut à l'expédition	0,39/60,0*	--*	m³/kg.		
Performance à	32	43	32	43	degrés C.
Briquettes congelées, avec vaccin	--	--	2,4/24	2,4/24	kg/h.
Briquettes congelées, sans vaccin	--	--	++	++	kg/h.
Températures intérieures, minimale	+2,0	+2,2	++	++	degrés C.
Températures intérieures, maximale	+5,8	+7,0	++	++	degrés C.
Autonomie en cas de panne de courant	5,5	0,42	++	++	heures
Consommation d'électricité en 24 heures :					
avec congélation de briquettes	--	--	0,6	[1,0]	kWh
sans congélation de briquettes	0,3	0,42	--	--	kWh
Températures relevées essais jour/nuit (+43/+15° C) : minimale +1; maximale +6° C.					
ENERGIE NECESSAIRE					
Source d'énergie		CC12V ou 24V			
PIECES DETACHEES/10 UNITES					
	Numéro	Quantité	ECU/1		
	Thermostat pour réfrigérateur électrique	292.2007.04.8	3	5,96 (\$ 7,10)	
	Thermostat pour congélateur	292.2007.06.3	3	10,39 (\$ 12,37)	
	Compresseur pour réfrigérateur électrique	292.9702.00.6	1	208,74 (\$248,50)	
OBSERVATIONS ET ACCESSOIRES					
Compte rendu des essais : GET-SOL-REF/1.86;					
Satisfont à la norme E3/RF.4 de l'OMS/UNICEF.					
Disponible en 24 volts sur demande. Le compartiment congélateur n'est pas indiqué pour le stockage ou la congélation de vaccins; il ne doit être utilisé que pour les accumulateurs de froid. Ne convient pas pour la congélation de briquettes lorsque les températures ambiantes sont basses (inférieures à 15-20°C). Accessoires : Porte(s) verrouillable(s). Comporte un compartiment pour congélation accumulateurs de froid (capacité : 8x0,3 l ou 4x 0,6 l).					
QUANTITE/PRIX FOB 1993 (Luxembourg)					
Compartiments	1-39		ECU 1 143 00 (\$ 1 360,71)**		
		40-99	ECU 1 088,00 (\$ 1 295,24)**		
	100+		ECU 1 030,00 (\$ 1 226,19)**		
Système complet			Voir page 55.		
* Dimensions variables dans les deux cas, le thermostat permettant d'utiliser l'appareil comme réfrigérateur/congélateur pour briquettes OU comme congélateur bahut.					
** Prix UNICEF, emballage export pour fret maritime non compris (approximativement ECU 41,50 (\$49,40) en sus par réfrigérateur).					

◆ *Performances*

Les performances des réfrigérateurs solaires pour vaccins sont soumis à une normalisation de la part de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Pour être agréé, un réfrigérateur subit des tests et doit satisfaire à un standard de performances (production de glace, consommation, volume de stockage, etc.). Chaque appareil possède ensuite une fiche avec ses principales caractéristiques. Celles-ci sont regroupées dans un catalogue publié par l'OMS et l'Unicef et remis régulièrement à jour. Les systèmes sont divisés en 2 classes (A et B) suivant l'ensoleillement et possèdent donc un nombre de modules (4, 6 ou 8) en fonction de la classe à laquelle ils appartiennent.

La longévité d'un réfrigérateur solaire est de l'ordre de 10 ans, celle des modules cristallins de l'ordre de 15 ans, celle des batteries de l'ordre de 7 ans et celle du régulateur de l'ordre de 10 ans. La maintenance spécifique au réfrigérateur est le dégivrage périodique pour éviter les pertes de rendement.

Certains modèles sont munis d'un témoin lumineux "ne pas congeler d'accumulateurs". Il s'agit d'avertir l'utilisateur que, lorsqu'il s'allume, les batteries sont presque déchargées sans pour autant que l'alimentation du réfrigérateur ne soit immédiatement coupée. Si l'utilisateur ne suit pas cette instruction, le réfrigérateur finira par s'arrêter (protection de décharge) en attendant la recharge des batteries par les modules.

◆ *Utilisation*

Les réfrigérateurs solaires, en raison de leur puissance relativement faible, sont essentiellement placés dans les centres de santé, c'est-à-dire à un niveau où il y a de réels problèmes d'énergie et où les quantités de vaccins sont faibles. Ils ne seront pas utilisés pour un stockage régional.

La température de stockage des vaccins au niveau du centre de santé doit être entre 0 °C et + 8 °C. Par conséquent aucun vaccin ne sera placé dans la partie congélateur, là où sont les accumulateurs de froid. La partie congélation est uniquement réservée à la congélation des briquettes.

Les réfrigérateurs ont malheureusement pâti ces dernières années de programmes d'équipements réalisés parfois à la légère et d'un matériel qui était encore en phase de fiabilisation. Il semble qu'aujourd'hui ce dernier problème ait été résolu, toutefois il est nécessaire de rappeler les principes suivants :

- un réfrigérateur solaire ne doit être installé que dans une région où il y a des problèmes évidents de carburant (approvisionnement, qualité) ;

- un réfrigérateur solaire pour vaccins doit être choisi dans la sélection OMS/Unicef ;
- il ne doit jamais être installé sans une information complète des utilisateurs et une formation adéquate de techniciens ;
- un réfrigérateur solaire doit être installé dans une zone où se rencontre un minimum d'équipements similaires (raison d'être d'une maintenance et présence de pièces détachées).

L'usage domestique

Le besoin de froid pour le stockage de denrées représente dans le monde aujourd'hui un marché non négligeable. Il est soit partiellement couvert par des réfrigérateurs à pétrole ou au gaz soit simplement inexploité. Le solaire peut parfois se positionner comme une alternative intéressante.

Les systèmes de réfrigération commercialisés sont, la plupart du temps, des appareils qui fonctionnent soit en réfrigération (+ 6 °C) soit en congélation (- 20 °C).

Un système standard comprend :

- 4 à 10 modules de 50 Wc (cristallins) avec support ;
- 1 réfrigérateur ou congélateur (soit + 4 °C, soit - 20 °C) de type solaire (12 V ou 24 V) ;
- 1 batterie (par exemple 200 Ah) ;
- 1 régulateur de charge et de décharge.

Les principaux modèles ont un volume de 100 à 300 litres. La consommation d'un réfrigérateur simple varie en général entre 300 et 900 Wh/j selon les différents volumes et pour des températures ambiantes entre 32 °C et 43 °C. Cette consommation est calculée pour un usage standard défini (charge de 2 kg avec une ouverture de porte de 20 mn par jour).

La consommation entre un réfrigérateur simple (+ 6 °C) et un congélateur (- 20 °C) peut facilement être multipliée par 4 ou 5. Les générateurs photovoltaïques qui équipent des congélateurs auront donc une puissance crête bien supérieure à celles de ceux qui équipent des réfrigérateurs.

Lorsque la demande en froid est plus importante que prévue, le système se met en protection et arrête le réfrigérateur pour quelques heures (le temps que les modules rechargent la batterie). Cette contrainte doit être parfaitement

expliquée à l'utilisateur sans quoi il y a risque de mécontentement, voire de bricolage, de la part de l'usager. Les utilisateurs choisissent habituellement un réfrigérateur pour son volume. Ils s'attendent, comme il est de mise pour l'électricité en ville, à ce que la production de froid suive l'usage qu'ils en font. Or, en solaire, la quantité d'énergie est limitée (et connue !). C'est à l'utilisateur de doser sa consommation : éviter les ouvertures trop fréquentes, ne pas l'utiliser pour des produits à "circulation rapide" (boissons fraîches par exemple). Une bonne information doit éviter les espoirs et les déceptions.

En réalité la diffusion pour usage domestique est à ce jour assez faible en raison du coût d'investissement élevé, excepté dans les pays du nord (DOM-TOM, USA).

BESOINS EN ÉNERGIE D'UN RÉFRIGÉRATEUR SOLAIRE

L'identification des besoins d'un système de froid consiste à déterminer ou à évaluer :

- la température ambiante (°C) ;
- la capacité désirée du réfrigérateur (l) ;
- la quantité de glace produite quotidiennement désirée (kg/jour).

Ces données permettront de connaître la consommation journalière du réfrigérateur.

Il y a deux types d'utilisation des réfrigérateurs :

- pour la vaccination, c'est-à-dire en réfrigération pour le stockage des vaccins et en congélation pour la production de glace. Il s'agit généralement de petits frigos ;
- pour l'utilisation domestique qui peut être soit en réfrigération, soit en congélation, soit les deux.

Les systèmes solaires utilisés en vaccination sont soumis aux normes OMS qui imposent un respect du réglage de la température interne entre 0 °C et + 8 °C (dans la partie réfrigération), ainsi qu'une production de ≈ 2 kg de glace par jour (dans la partie congélation). La consommation dépend par conséquent du modèle de réfrigérateur ou du changement de la température extérieure.

Deux solutions permettent d'obtenir les informations sur la consommation :

- pour les réfrigérateurs agréés OMS : le catalogue des articles sélectionnés du PEV (Programme Elargi de Vaccination) ;
- pour les réfrigérateurs courants : une fiche technique détaillée de la part du constructeur ou du fournisseur

Néanmoins pour avoir une idée des consommations, le tableau suivant peut apporter quelques informations.

	Capacité		Quantité de glace produite		Energie consommée	
	à + 4 °C (3) litres	à - 20 °C (4) litres	à 32 °C kg/jour	à 43 °C kg/jour	à 32 °C Wh/j	à 43 °C Wh/j
Réfrigérateur à vaccins	25 l	-	-	2,4 kg/j	-	320 Wh/j
	38 l	5 l	6,2 kg/j	3,1 kg/j	700 Wh/j	1 000 Wh/j
	30 l	14 l	4,8 kg/j	4,8 kg/j	1 100 Wh/j	1 500 Wh/j
	80 l	20 l	5,4 kg/j	5,2 kg/j	540 (5) Wh/j	660 (5) Wh/j
Réfrigérateur domestique (1)	125 l	-	-	-	-	310 Wh/j
	160 l	-	-	-	380 Wh/j	660 Wh/j
	265 l	-	-	-	-	545 Wh/j
		125 l	-	-	-	895 Wh/j
Congélateur (2)		200 l	10 à 15 kg/j	10 à 15 kg/j	≈ 1 500 Wh/j	2 000 Wh/j

(1) Valeurs pour une charge de 2 kg et 20 mn d'ouverture par jour.

(2) Il s'agit du même modèle que le réfrigérateur, mais commuté en congélateur.

(3) La capacité de réfrigération correspond à une capacité de stockage nette des vaccins (sauf pour les appareils domestiques où c'est une capacité brute).

(4) La capacité de congélation correspond à une capacité de stockage brute.

(5) La mesure de consommation pour ce modèle a été effectuée avec une production de 2,4 kg.

Note : les calculs de dimensionnement du générateur photovoltaïque qui satisfait aux besoins en énergie évalués sont présentés dans la première partie de l'ouvrage.

COMPARAISON TECHNIQUE ENTRE LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE RÉFRIGÉRATION

L'énergie traditionnellement utilisée reste le pétrole. Toutefois le gaz, comme énergie de substitution, s'implante dans beaucoup de régions privées d'électricité. Les réfrigérateurs utilisant ces énergies sont de type absorption (groupe de froid fonctionnant à partir d'une source de chaleur). La comparaison va donc essentiellement se faire entre ces deux modèles et les deux modèles solaires.

Réfrigérateur à pétrole (absorption)

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - technique simple et répandue - assez bonne maîtrise de la part du personnel - coût des pièces détachées modéré - facile à installer - coût d'investissement faible 	<ul style="list-style-type: none"> - approvisionnement et qualité médiocre des pétroles - qualité de froid souvent médiocre - pas de thermostat - entretien et maintenance lourde et "capricieuse" - coût de fonctionnement non négligeable
<p><i>En résumé</i> : le pétrole est très répandu et bien approvisionné, cependant les problèmes de qualité du pétrole et d'entretien entraînent des risques importants de rupture de la chaîne du froid.</p>	

Réfrigérateur à gaz (absorption)

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - technique simple - maintenance facile et réduite - facile à installer - coût des pièces détachées modéré - coût d'investissement faible 	<ul style="list-style-type: none"> - approvisionnement en gaz souvent difficile (parfois ruptures) - producteur de froid lent (absorption) - coût de fonctionnement non négligeable
<p><i>En résumé</i> : le réfrigérateur à gaz est fiable, assez performant et d'un coût de revient faible. Son bon fonctionnement dépend de la disponibilité en bouteilles de gaz qui n'est pas toujours assurée, selon les régions ou les saisons.</p>	

Réfrigérateur photovoltaïque (compression)

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - suppression des problèmes de carburant - producteur de froid rapide (compression) - maintenance facile et réduite - durée de vie théorique élevée - bon contrôle de température - faibles dépenses de fonctionnement 	<ul style="list-style-type: none"> - présence d'équipements électroniques (qualité et approvisionnement) - requiert un spécialiste pour l'installation - technologie et réparation complexe - remplacement des batteries après 7 ans - faible disponibilité des pièces détachées - coût élevé des sous-ensembles - coût moyen annuel élevé (dépenses + amortissements)
<p><i>En résumé</i> : le réfrigérateur photovoltaïque est d'un coût élevé d'investissement. Son coût de fonctionnement étant similaire à celui de ses concurrents, il est globalement plus cher que ses concurrents. Il permet toutefois d'assurer une bonne qualité de froid avec une excellente fiabilité.</p>	

LE POINT SUR LE COÛT DES SYSTÈMES DE PRODUCTION DE FROID

Niveau d'investissement

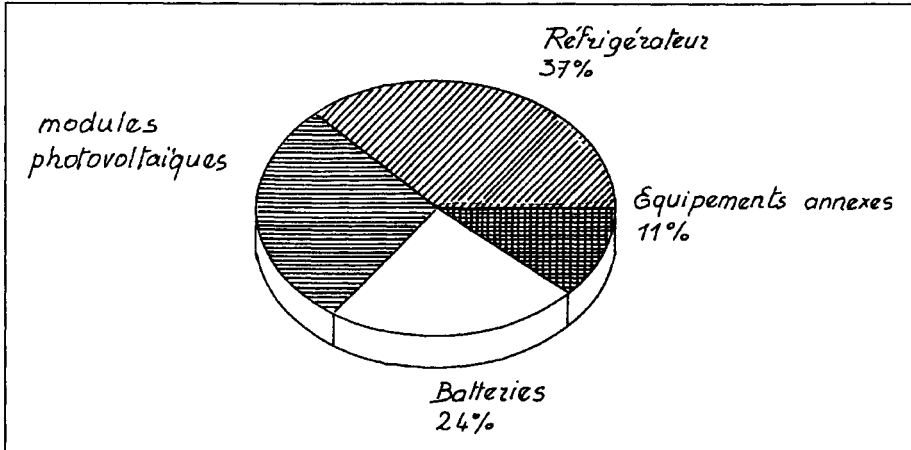
Comme pour tous les systèmes photovoltaïques, le coût d'investissement des réfrigérateurs solaires est important. Il sera donc nécessaire d'analyser en parallèle les coûts d'investissement et de fonctionnement afin d'établir des comparaisons avec les autres solutions.

Un système de réfrigération photovoltaïque pour vaccins (40 à 80 litres de stockage net) coûte globalement (avec les panneaux photovoltaïques) :

- avec 4 modules de 50 Wc entre 25 000 et 35 000 FF HT (FOB) ;
- avec 6 modules de 50 Wc entre 30 000 et 40 000 FF HT (FOB).

A titre d'information, la répartition des coûts d'investissement entre les différents éléments du système se divise de la façon suivante :

Répartition des coûts sur un réfrigérateur solaire



Source : Vaccine solar refrigerator : Lessons learnt from large scale programme survey. OMS, octobre 1991

Comparaison économique avec d'autres énergies

Le tableau de la page suivante indique les coûts détaillés d'un réfrigérateur photovoltaïque, comparés aux coûts d'un frigo à pétrole et d'un modèle à gaz. Tous trois sont normalisés OMS.

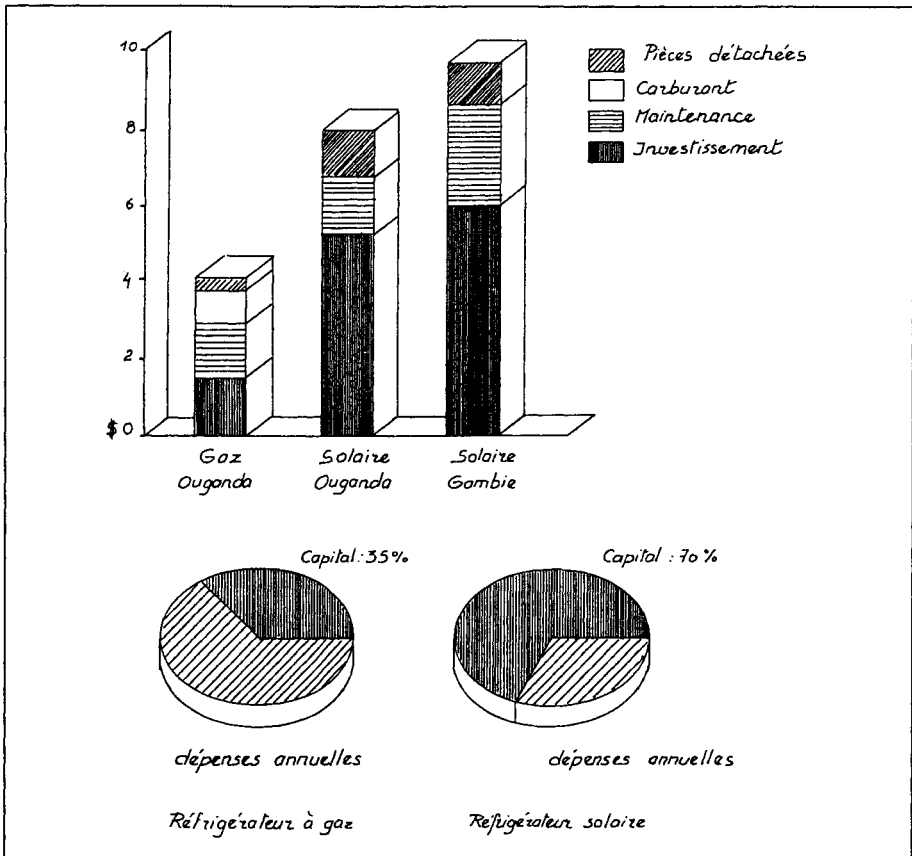
Une deuxième étude issue de l'expérience OMS en Ouganda et en Gambie, illustre la comparaison solaire/gaz sur une période de 10 ans (cf. graphique page 123). Ce graphique donne le coût des deux types de réfrigérateurs sur 10 ans : 22 000 FF pour le gaz et 45 000 à 50 000 FF pour le photovoltaïque. Il présente également la structure de ces différents coûts.

Coûts comparés des réfrigérateurs

	DURÉE DE VIE	PHOTOVOLTAÏQUE (EN FF)	GAZ (EN FF)	PÉTROLE (EN FF)
Coût d'investissement				
- modules PV (4 x 50 Wc)	15 ans	8 000		
- installation	15 ans	4 000		
- batterie (200 Ah)	5 ans	8 000		
- réfrigérateur et régulation	10 ans	10 000	6 000	6 000
- accessoires, câblage	2 ans	2 000		
- brûleur	5 ans			1 000
			1 000	
<i>Total investissement</i>		32 000	7 000	7 000
Coût des consommables				
- pétrole (1l/j à 5 FF/l)				1 825 F/an
- gaz (1 b/ sem à 17 FF/b)			1 213 F/an	
- changement brûleur			1 000 F/5ans	1 000 F/an
- changement batterie		8 000 F/5 ans		
<i>Main-d'oeuvre maintenance</i>		200 F/an	100 F/an	100 F/an
Coût total				
- en 5 ans		41 000	14 565	19 625
- en 10 ans		50 000	22 130	31 250
Coût moyen (sur 10 ans)		5 000 F/an	2 213 F/an	3 125 F/an

Source : "Vaccine solar refrigerator : Lessons learnt from large scale programme survey"
OMS - octobre 1991

Comparaison solaire/gaz sur une période de 10 ans



Conclusions sur les études comparatives

Ces deux études montrent que le solaire n'est économiquement pas compétitif, surtout avec le gaz. On peut donc conclure de façon globale que :

- *par rapport au pétrole*, les réfrigérateurs photovoltaïques présentent une qualité de froid et une fiabilité bien supérieures au pétrole lorsqu'il y aura des problèmes de carburant (principalement à cause de sa mauvaise qualité). Dans ce cas le choix du solaire est préférable ;
- *par rapport au gaz*, les réfrigérateurs au gaz, assez fiables et moins coûteux, présentent un avantage certain par rapport au solaire. Toutefois des problèmes de disponibilité de gaz (ou de coût élevé du gaz) peuvent justifier l'option solaire.

Les télécommunications

LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES ET LEURS APPLICATIONS

La technique et les caractéristiques des appareils de télécommunications eux-mêmes (comme cela a par contre été fait pour les électropompes) ne sont pas développées ici. En effet, que ces appareils aient une simple fonction de réception (radio, télévision) ou une double fonction d'émission/réception (radio-émetteur), qu'ils soient de petite puissance (talkie-walkie) ou de forte puissance (faisceaux hertziens), le principe de fonctionnement au niveau du système reste identique. Ces instruments sont raccordés sur la batterie d'un générateur photovoltaïque. C'est pour cela que dans ce chapitre ils seront simplement définis de manière transparente par leur tension d'alimentation (en général du continu basse ou moyenne tension) et par leur consommation propre.

Les principales applications photovoltaïques de télécommunication peuvent être réparties de la façon suivante : les transmissions radio à courte distance (VHF), longue distance (HF) et par satellite, la téléphonie rurale, les faisceaux hertziens, les usages en réception uniquement comme la télévision et la vidéo ou la radio.

Éléments caractéristiques d'un système de télécommunication :

- la puissance crête du générateur photovoltaïque (W_c) ;
- la puissance électrique de l'appareil (W) ou le courant absorbé (A) ;
- le taux d'utilisation quotidien (en heures) ;
- l'autonomie en cas d'absence de soleil (en jours) ;
- la tension d'alimentation (V) ;
- la capacité des batteries (Ah) ;
- la puissance d'émission radio (W), accessoirement.

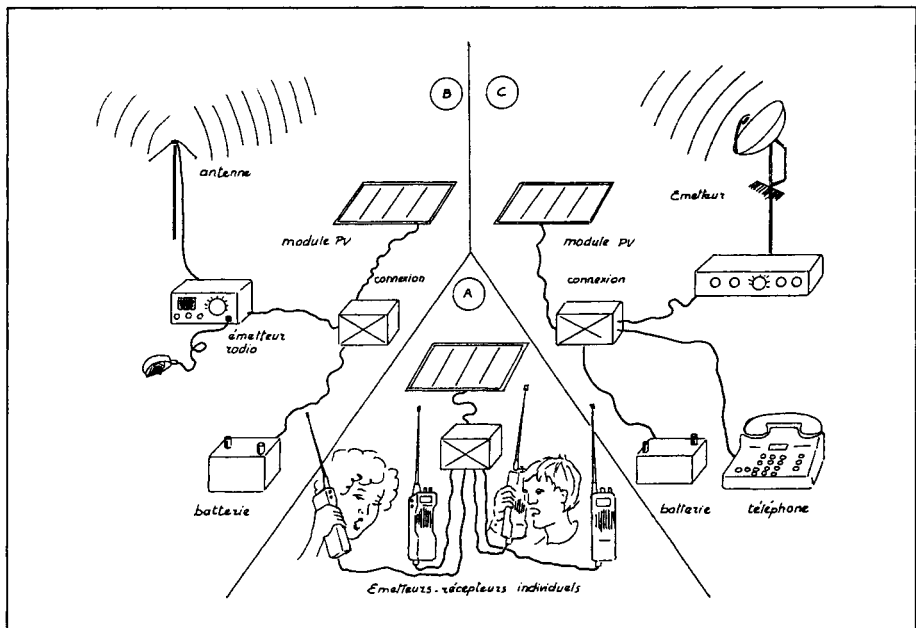
Pour les émetteurs/récepteurs il faut bien différencier la puissance consommée à l'émission et celle à la réception qui lui est nettement inférieure. Il faut également différencier la puissance électrique (proportionnelle au courant absorbé) et la puissance d'émission radio HF (qui est celle de l'onde qui s'en va dans les airs) et dont on ne se sert pas pour les calculs de consommation. Les puissances ou les courants absorbés à l'émission et à la réception sont les valeurs utiles au dimensionnement du générateur.

Les transmissions radio

Les transmissions radio permettant de relier directement deux personnes isolées et séparées l'une de l'autre soit de quelques kilomètres, soit de quelques milliers de kilomètres, sont évoquées ici. L'utilisation de ces appareils électroniques dans des zones fortement isolées a toujours posé des problèmes d'alimentation en électricité. Le photovoltaïque s'est positionné depuis le début de sa diffusion comme une énergie particulièrement bien adaptée à ce type de situation.

Il est toutefois intéressant de séparer les différents types d'émetteur/récepteur pour adapter le générateur photovoltaïque.

Synoptique d'une installation de radio-émission



Les communications à courte distance : La VHF (A)

C'est ce que l'on appelle couramment le talkie-walkie ou plus scientifiquement la transmission par VHF (très haute fréquence). Ce sont des appareils qui couvrent de faibles distances et qui consomment peu d'énergie. On trouve très souvent non pas seulement 2 postes mais au moins 4 postes qui fonctionnent en réseau.

Un système standard comprend (sans les postes de radio) :

- 1 module photovoltaïque de 20 Wc ou 50 Wc avec support ;
- 1 adaptateur de tension ;
- 1 batterie (très souvent incluse dans le poste).

L'intérêt est de pouvoir utiliser ces appareils au moins 4 à 5 heures. Un module de 20 Wc peut alimenter de 2 à 4 postes et un module de 50 Wc, plus de 4 avec éventuellement un amplificateur.

La puissance électrique courante d'un poste VHF (émission) est de l'ordre de 5 W. Sa tension d'alimentation est souvent de l'ordre de 6 à 7,2 V. Les postes sont généralement munis de batterie Cd/Ni ce qui rend inutile l'utilisation de régulateur de décharge. Ces appareils sont assez souvent utilisés en ville lorsque les communications téléphoniques sont mauvaises ou inexistantes. C'est pour cela que l'alimentation photovoltaïque est en fait assez rarement utilisée du fait de la présence fréquente d'un réseau électrique qui permet de charger les batteries.

Les communications à longue distance : la HF (B)

C'est ce que l'on appelle la transmission BLU (Bande Latérale Unique) ou SSB (Single Side Band) par HF (Haute Fréquence). Ce sont des appareils qui couvrent de grandes distances et qui consomment plus d'énergie que la VHF. Ces appareils sont souvent utilisés par des compagnies privées, les grandes organisations et les administrations militaires, pour assurer la logistique entre la base et les missions isolées ou éloignées.

Un système standard comprend (sans les postes de radio) :

- 1 ou 2 modules photovoltaïques 50 Wc avec support ;
- 1 régulateur de charge et de décharge ;
- 1 batterie de 60 à 100 Ah (12 V).

Le système standard (1 module de 50 Wc) a été conçu pour se servir d'une radio HF pendant 1 heure en émission au maximum (ce qui est suffisant pour des utilisations courantes) et pendant quelques heures en réception (veille). La

puissance électrique courante d'un poste HF est de l'ordre de 50 à 150 W (émission) et de 10 W (réception).

Les communications par satellite (C)

Nouveaux moyens de communication, les systèmes d'émission/réception par satellite sont utilisés de plus en plus souvent (navigation, intervention lors de catastrophes naturelles) compte tenu de leur simplicité de mise en oeuvre. Toutefois très souvent l'alimentation se fait par groupe électrogène. Certaines situations peuvent nécessiter l'usage du photovoltaïque. Alors que le standard A (système de transmission vocale) est gros consommateur d'énergie et fonctionne sur 220 V, le standard C (télécopieur) est un petit consommateur d'énergie et fonctionne souvent sur 12 V.

Un système photovoltaïque comprend (sans la valise standard C) :

- 1 ou 2 modules photovoltaïques 50 Wc avec support ;
- 1 régulateur de charge et de décharge ;
- 1 batterie de 60 à 100 Ah (12 V).

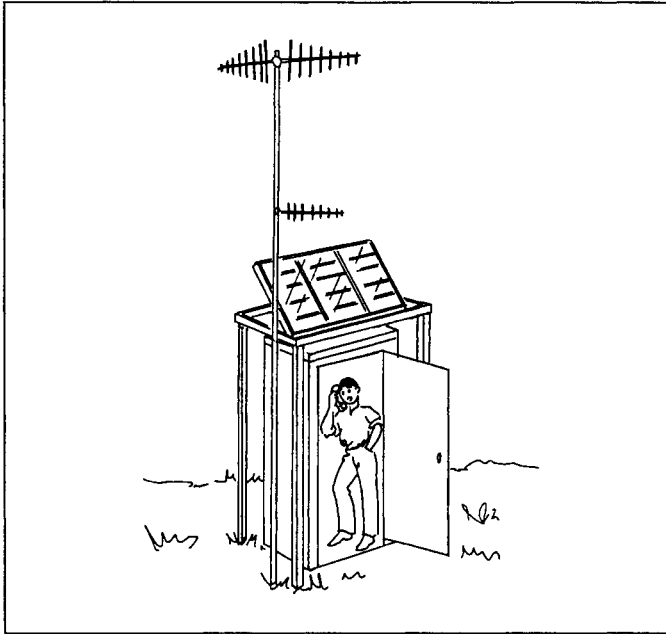
Le système standard (1 module de 50 Wc) a été conçu pour se servir d'un standard C pendant 3 heures en émission au maximum, et pendant quelques heures en réception (veille). La puissance électrique courante d'un standard C est de l'ordre de 50 W (émission) et de 15 W (réception).

Ces appareils sont souvent utilisés par des organismes de secours et par des journalistes pour assurer la logistique et les communications lors d'interventions d'urgence entre le lieu d'intervention et une grande ville. L'utilisation du photovoltaïque est assez peu répandue lors de telles interventions car les besoins en énergie sont tels qu'il y a souvent mise en place d'un groupe électrogène.

La téléphonie rurale

De nombreuses régions isolées ne possèdent comme seul moyen de communication que la téléphonie par liaison hertzienne. De plus ces régions, souvent dépourvues d'électricité, n'ont que peu de solutions pour alimenter leur système de télécommunication. Le photovoltaïque se présente dans de nombreux cas comme une solution qui peut répondre correctement aux besoins.

Cabine téléphonique rurale



Les postes de téléphonie rurale peuvent être répartis dans une zone de plusieurs dizaines de kilomètres autour d'un centre de réception connecté au réseau national. Ainsi, les cabines décentralisées ont accès via le centre régional, au réseau national et international. Ces radiotéléphones ont une consommation plus importante que les postes HF précédemment cités. Les systèmes photovoltaïques conçus pour ce besoin sortent du cadre "système standard" ou "kit" et deviennent des systèmes taillés sur mesure.

Toutefois un système comprend toujours :

- modules cristallins et support ;
- régulateur de charge et de décharge ;
- batterie avec coffre.

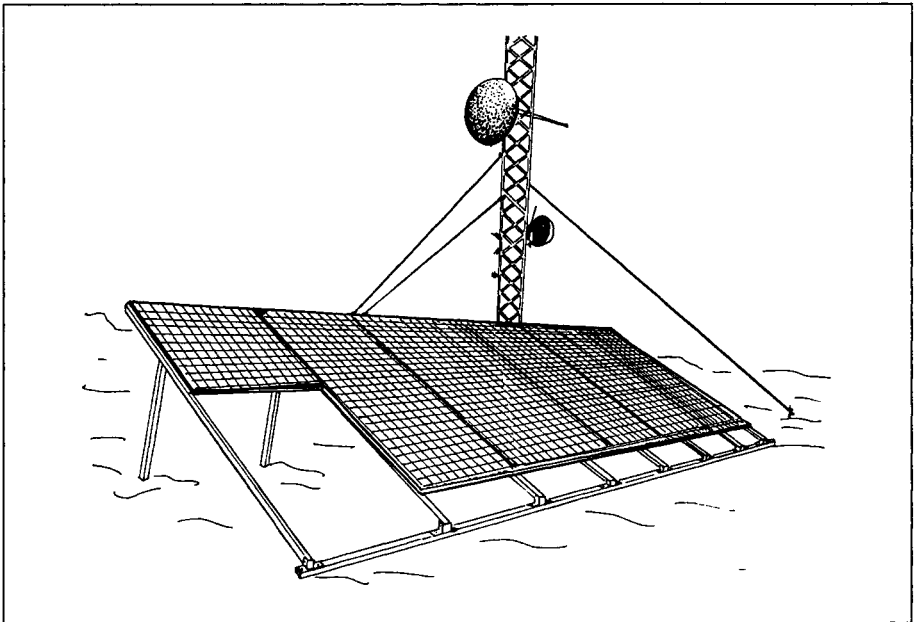
En général les générateurs dépassent les 150 à 200 Wc et permettent d'utiliser le téléphone 24 h sur 24 h. La consommation est de l'ordre de 500 à 1000 Wh/jour pour des puissances d'émission allant jusqu'à 40 W. De tels systèmes sont généralement gérés (analyse des besoins, dimensionnement, installation...) par des professionnels de la télécommunication et du photovoltaïque.

Les faisceaux hertziens

La très haute disponibilité des réseaux de télécommunications (24 h sur 24 h, 7 j sur 7 j) a toujours obligé à trouver des solutions de très haute fiabilité pour leur alimentation en énergie. Les générateurs photovoltaïques représentent la possibilité d'électrifier des relais de transmission radio et TV sur des sites particulièrement inaccessibles et nécessitent donc peu de maintenance.

En sites isolés, l'utilisation du photovoltaïque est préconisée, pour les faisceaux hertziens, par l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) en raison de sa très grande fiabilité. Outre les relais hertziens radio et de télévision, dans le même style d'usage existent les stations de réception de programmes télévisés par satellite et de rediffusion dans un rayon de quelques dizaines de kilomètres. Elles représentent de la même façon une application pour le photovoltaïque.

Installation solaire alimentant un relais hertzien



Ces installations sont du ressort de sociétés spécialisées en photovoltaïque et qui connaissent bien le domaine des télécommunications (ou l'inverse). Le professionnalisme et la haute qualité de ces installations est essentielle. En effet la fréquence de visites de certains relais peut être relativement faible (6 mois).

Un système comprend toujours :

- champ de modules cristallins et support ;
- régulateur de charge et de décharge ;
- parc de batterie avec coffre ;
- parfois un groupe électrogène de secours.

Du fait d'une consommation assez élevée des équipements de télécommunication (mais qui reste compatible avec le photovoltaïque) et d'une utilisation des transmissions 24 h sur 24 h, la puissance des générateurs se calcule souvent en kWc.

Les systèmes en réception uniquement : télévision et radio

L'usage le plus courant des télécommunications dans la vie de tous les jours est sans doute la télévision et la radio. Le photovoltaïque offre pour cet usage des possibilités intéressantes. Il faut noter que la télévision peut également être couplée à une vidéo, pour un usage privé ou parfois communautaire.

Du point de vue des usagers, c'est en réception uniquement que fonctionnent ces appareils d'où une consommation relativement faible et par conséquent des systèmes de petite puissance.

Un système standard comprend :

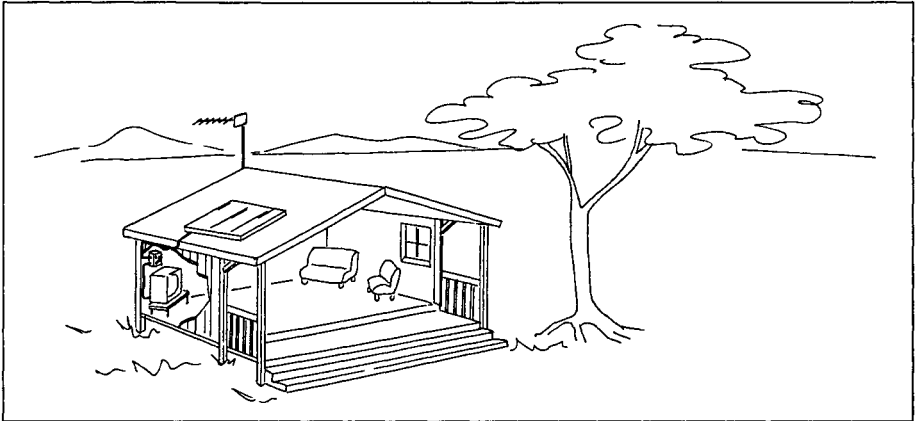
- 1 module photovoltaïque 50 Wc avec support ;
- 1 télévision 12 V ;
- 1 régulateur de charge et de décharge ;
- 1 batterie 60 à 100 Ah (12 V).

La présence d'un magnétoscope (vidéo) peut rendre nécessaire un second module et un adaptateur de tension.

La consommation d'une télévision courant continu, selon la grandeur de l'écran et suivant qu'elle est noir et blanc ou couleurs, varie de 30 W à 80 W.

Les systèmes classiques permettent de regarder la télévision pendant au moins 3 à 4 heures mais comme ils sont souvent couplés à un éclairage, l'utilisation est limitée à 2-3 heures par jour.

Station de télévision communautaire



Les petites télévisions noir et blanc sont disponibles dans de nombreux pays. Quelques grandes marques fournissent des modèles "couleurs" à courant continu. Il est cependant nécessaire de faire attention au standard en vigueur dans le pays.

BESOINS EN ÉNERGIE DES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION

Pour les systèmes professionnels (faisceaux hertziens, téléphonie rurale), la consommation du système de transmission est directement donnée par les fournisseurs des équipements électroniques. Concernant les systèmes domestiques (télévision, vidéo, radiocassette) ou semi-professionnels (radio émetteur, système satellite), la consommation sera calculée à partir de l'identification des besoins et des caractéristiques de l'appareil, ceci de la même façon que les systèmes à recharge de batterie (voir plus loin).

Les tableaux suivants donnent quelques informations sur les consommations "classiques" de ces appareils :

**Besoins en énergie des systèmes de télécommunication
pour les systèmes audio et vidéo**

	Tension alimentation U	Puissance de réception $P = U \cdot I$	Temps d'écoute standard t	Énergie consommée (réception) $E = P \cdot t$
Téléviseur N & B 38 cm	12 ou 24 V	20 à 60 W	2 heures/j	40 à 160 Wh/j
Téléviseur couleur 38 cm	12 ou 24 V	40 à 80 W	2 heures/j	80 à 160 Wh/j
(Usage en communauté)	12 ou 24 V	≈ 15 W (+ poste TV)	2 heures/j	30 Wh/j
Radio	6, 9 ou 12 V	2 à 10 W	5 heures/j	10 à 50 Wh/j
Radio-cassette	6, 9 ou 12 V	5 à 35 W	5 heures/j	25 à 175 Wh/j

Pour les émetteurs/récepteurs

	Tension alimentation U	Intensité consommée I	Intensité consommée	Puissance électrique $P = U \cdot I$	Temps émission t	Energie consommée $E = P \cdot t$	Puissance électro- magnétique
Émetteur récepteur HF	12 V	20 A	1 A	240 W	1/4 (logistique)	60 Wh/j	150 W
Emetteur récepteur VHF	6 à 12 V	---	---	5 W	5 heure/j (urgence)	25 Wh/j	---
Émetteur récepteur satellite	12 V	---	15 W	50 W	1 heure/j (urgence)	50 Wh/j	---

Les modèles ci-dessus sont des modèles typiques et ne correspondent pas forcément à votre réalité. Il conviendra de consulter les notices techniques des fabricants. Les temps d'utilisation standard sont issus d'expériences de terrain mais ne constituent pas un modèle.

Note : les calculs de dimensionnement du générateur photovoltaïque qui satisfait aux besoins en énergie évalués figurent dans la première partie de l'ouvrage.

COMPARAISON TECHNIQUE ENTRE LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION

La solution la plus utilisée pour alimenter électriquement des systèmes de télécommunication reste le groupe électrogène d'où l'étude comparative suivante :

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<p>Groupe électrogène</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fonctionne sous toutes les latitudes - Coût d'investissement modéré 	<ul style="list-style-type: none"> - Approvisionnement carburant - Parasitages de la part du groupe - Présence fréquente pour la maintenance - Coûts de fonctionnement et de maintenance élevés - Bruit, pollution
<p>Système photovoltaïque</p> <ul style="list-style-type: none"> - Excellente fiabilité - Fonctionnement autonome et simple - Maintenance réduite (peu fréquente et peu technique) - Courant continu dénué de perturbations électriques - Modulaire : permet l'extension et l'adaptation optimale à la charge utile - Résistance aux conditions climatiques sévères et durée de vie élevée - Coûts de fonctionnement faibles 	<ul style="list-style-type: none"> - Bon ensoleillement nécessaire - Nécessité, pour les gros systèmes, d'un groupe électrogène de secours ou d'un second générateur solaire redondant - Coût d'investissement élevé

LE POINT SUR LES COÛTS DES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION

Niveau d'investissement

Il faut séparer trois classes de systèmes de transmission : les systèmes professionnels (téléphonie rurale, faisceaux hertziens), les systèmes semi-professionnels (transmission radio) et les systèmes grand public (réception télévision et réception radio).

Voici quelques tranches de prix (sans inclure les équipements de transmission) :

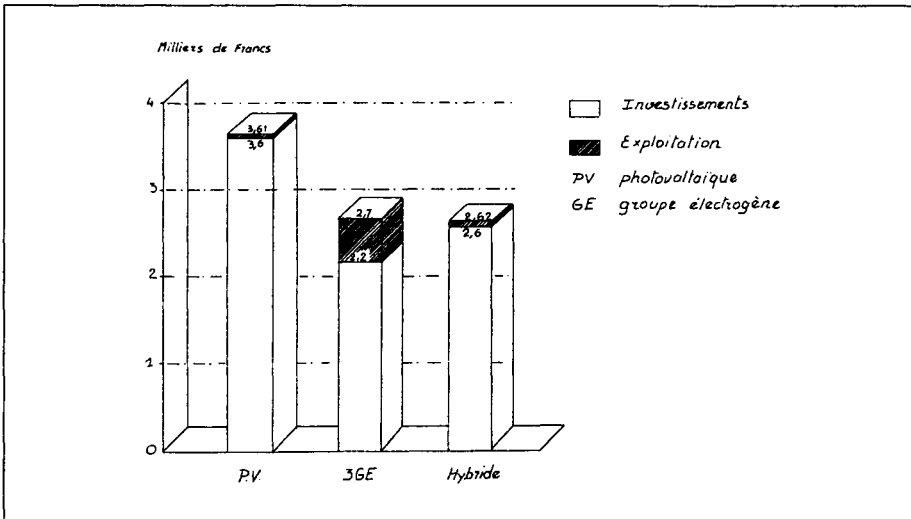
- Systèmes professionnels : de l'ordre de 150 FF HT/Wc (installé sur site)
- Systèmes semi-professionnels (VHF, HF) : de l'ordre de 5 000 à 7 500 FF HT (générateur de 50 Wc, FOB)
- Systèmes grand public (TV, vidéo) : de l'ordre de 8 000 à 12 000 FF HT (générateur de 50 à 100 Wc avec la télévision, FOB)

Comparaison économique avec d'autres énergies

Le photovoltaïque coûte aussi cher que les installations avec moteurs thermiques sur 5 ans pour les petites puissances inférieures à 1 kW. Plus la taille de l'installation augmente et moins le photovoltaïque résiste à la concurrence.

Ci-dessous un exemple de coûts pour un équipement installé dans la station de ski d'Isola 2000. Dans ce cas précis (1 kW) la solution photovoltaïque est plus chère de 30 % que la solution avec groupe électrogène. Toutefois elle est préférable, vu les contraintes d'isolement et d'environnement du site. On peut également se reporter aux comparaisons économiques du chapitre "Systèmes à recharge de batterie", qui restent applicables aux systèmes photovoltaïques de télécommunications.

Comparatif à Isola 2000



La recharge des batteries

Les batteries permettent de stocker de l'énergie, et sont transportables. Elles répondent de ce fait à des besoins de faible quantité d'énergie, de façon très décentralisée. Le photovoltaïque se prête bien à la recharge de ces batteries, ne serait-ce que parce qu'il peut fournir la tension d'alimentation adéquate sans recours à un transformateur.

LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE CHARGE DE BATTERIE ET LEURS APPLICATIONS

Il existe 2 grands types de systèmes :

– *les chargeurs individuels de batteries*. Dans ce cas, il peut s'agir de charger soit des batteries au plomb (de type batteries de voiture), soit des accumulateurs au cadmium/nickel (Cd/Ni) que l'on appelle en général "piles rechargeables" ;

– *les stations communautaires de recharge* (Pb et Cd/Ni).

♦ *Éléments caractéristiques d'un système de recharge de batterie :*

- la puissance crête du générateur photovoltaïque (W_c) ;
- la tension d'alimentation disponible (V) ;
- l'énergie quotidienne produite (Wh/j) ;
- le courant disponible (A), accessoirement.

L'énergie quotidienne produite par le générateur permet de connaître le nombre de batteries qu'il est possible de charger et en combien de temps.

Cette énergie peut s'exprimer en nombre d'Ah/j produits quotidiennement.

Il faut rappeler qu'une batterie de tension 12 V et de capacité 60 Ah renferme une énergie totale de 720 Wh ($E = P \cdot t = UI \cdot t = U \cdot C$). Comme, cependant, il est conseillé de ne pas décharger la batterie à plus de 50 %, l'énergie disponible sera donc de 360 Wh. Rappelons également qu'un cycle charge/décharge occasionne des pertes d'énergie de l'ordre de 10 à 20 %.

Pour les informations techniques concernant les différents types de batteries, se reporter à l'annexe 1.

Les chargeurs individuels de batterie au plomb

Les batteries sont très souvent utilisées dans les pays en développement pour les usages où l'électricité est indispensable (vidéo, radio...). Les gens font recharger en général leur batterie à la ville par un commerçant qui possède un groupe ou un chargeur (s'il peut se brancher sur le réseau). Il en résulte une perte de temps, une difficulté de transport et une moindre disponibilité d'électricité. Les systèmes photovoltaïques peuvent, suivant les cas, pallier ces difficultés.

Le chargeur élémentaire

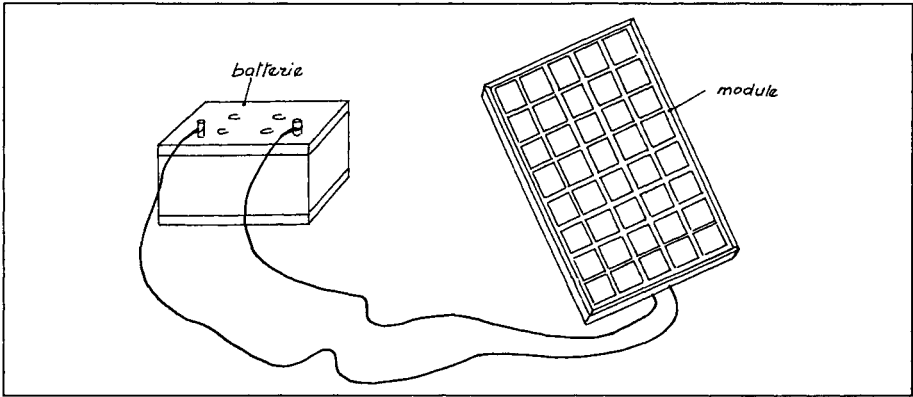
Le système le plus simple est constitué d'un (ou de deux) module muni de pinces auxquelles est directement raccordée la batterie. L'absence dans ce cas de régulateur de charge et de décharge permet de minimiser le coût d'investissement déjà très élevé pour un particulier. Les batteries utilisées sont la plupart du temps des batteries de voiture.

EXEMPLE D'UN SYSTÈME DE CHARGE COMPOSÉ DE 2 MODULES DE 10WC

La batterie de 60 Ah (12v) déchargée à 50 % sera rechargée en 6 jours :

- énergie quotidienne produite par les modules : $\approx 80 \text{ Wh/j}$ ($I_r = 6 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j}$);
- énergie disponible $\approx 64 \text{ Wh/j}$ (le rendement de la batterie est de 80%) soit 5,3 Ah/jour ;
- besoins d'énergie pour charger la batterie : 30 Ah ;
- nombre de jours de charge : $30/5,3 \approx 6$ jours.

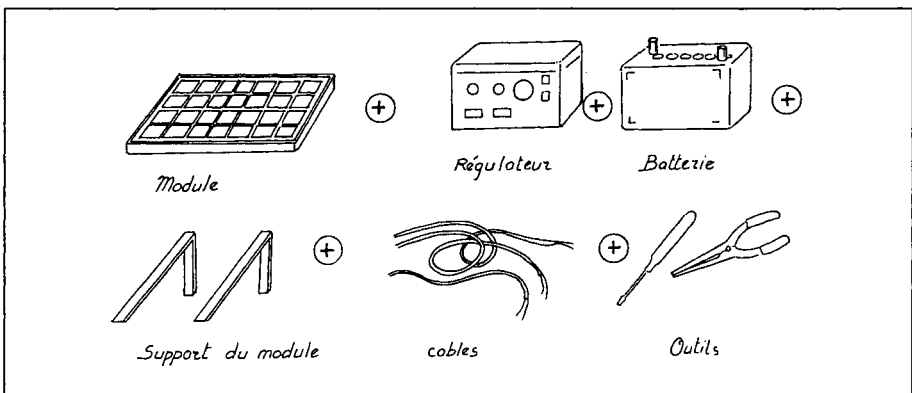
Ce cas se produit lorsque l'utilisateur n'a pas de module PV chez lui et qu'il vient périodiquement faire recharger sa batterie. Il ne devra donc pas consommer plus de 64 Wh par jour. En zone rurale africaine on constate qu'une famille moyenne consomme 2 à 3 batteries de ce type par mois.

Recharge de batterie directement à partir du module

L'absence de régulateur risque certes de diminuer la durée de vie de la batterie mais au regard de l'utilisation habituelle de ces batteries de voiture et de leur qualité, la présence du régulateur ne justifie pas forcément l'investissement dans le cas où l'utilisateur sait s'autodiscipliner.

Le kit chargeur

C'est le même principe que les chargeurs précédents mais avec, cette fois-ci, un générateur plus puissant et surtout l'utilisation d'un régulateur de charge et de décharge. Certains fournisseurs livrent parfois, avec le module et le régulateur, une batterie. En raison des problèmes de transport cependant, la batterie est souvent plus facile à acquérir sur place même si elle est de moindre qualité.

Les divers éléments d'un kit chargeur

Les chargeurs individuels d'accumulateurs Cd/Ni (piles rechargeables)

L'utilisation très fréquente de piles jetables pour des appareils comme les radio-cassettes incite à la diffusion des piles rechargeables avec chargeur photovoltaïque. Ces accumulateurs sont de type cadmium nickel et de modèle cylindrique "bâtonnet" (R4) ou plus gros (R20). Un système de base comprend un module de faible puissance (de 2 à 10 Wc maximum) raccordé ou intégré à un boîtier dans lequel on place les piles rechargeables.

Il n'existe pas réellement aujourd'hui de système techniquement au point. Le chargeur se dégrade rapidement, quant aux accumulateurs ils perdent rapidement de leur capacité.

Les blocs énergie

L'intérêt du bloc énergie est de présenter, sous une forme compacte facilement manipulable, la batterie, la régulation et les connexions. Il propose différentes prises de sortie permettant un branchement simple et immédiat d'appareils électriques (parfois de tensions différentes : courant continu, 6 ou 12 volts ; courant alternatif, 220 volts ; etc.). Il peut présenter également plusieurs prises d'entrée pour un fonctionnement autre que photovoltaïque (groupe électrogène, réseau électrique). Il est généralement conçu pour de faibles quantités d'énergie ($\approx 50\text{Wh/j}$). Le bloc énergie occupe en fait un créneau entre celui des piles rechargeables et celui des batteries de voiture.

Ce système est composé d'une batterie faible capacité (10 à 20 Ah), d'un régulateur de charge et de décharge, d'une électronique d'adaptation des tensions d'entrée et de sortie et enfin de différentes fiches de sorties.

Le bloc énergie est un ensemble très pratique d'emploi. Son principal handicap actuel demeure son prix élevé. Une large diffusion pourrait diminuer son prix de revient. Ceci serait favorable à une utilisation diversifiée du photovoltaïque. Mais ce produit doit cependant encore faire ses preuves sur le plan technique et vérifier l'existence de son marché.

Les stations de recharge communautaires de batterie au plomb

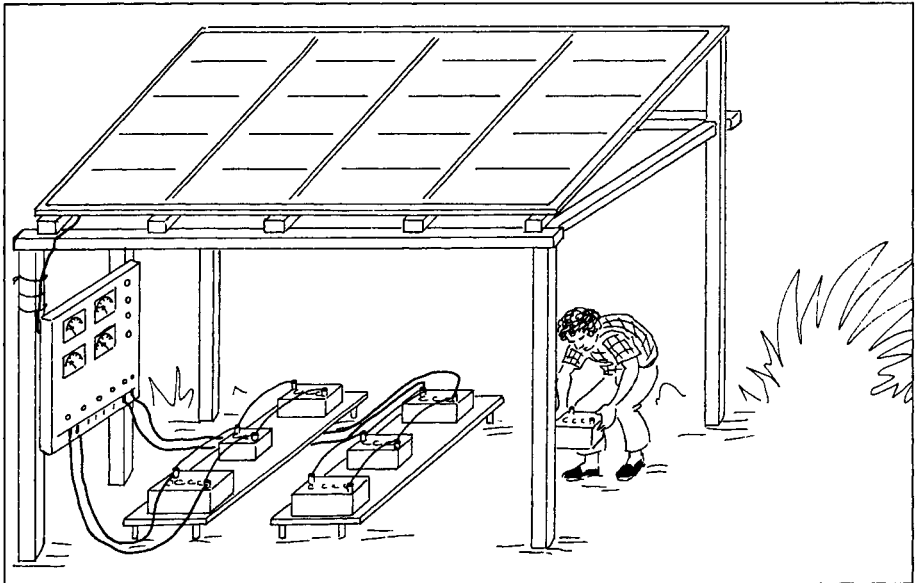
Il s'agit d'un site équipé d'un générateur photovoltaïque qui permet simultanément la charge de plusieurs batteries de 6 V ou 12 V. Les batteries sont

souvent rechargées moyennant une somme d'argent, si possible proportionnelle à la charge réalisée sur la batterie, d'où une obligation de mesure de charge. Cette station doit être techniquement et financièrement gérée par une personne ou par une institution.

Une station classique comprend :

- une série de modules (au minimum 4 de 50 Wc) avec support ;
- un régulateur uniquement de charge ;
- un système de contrôle de l'état de charge d'une batterie ;
- les systèmes de connexion.

Station communautaire de recharge de batteries



Les performances sont variables suivant la puissance du générateur et le nombre de batteries raccordées. Il ne faut cependant pas que le temps de charge d'une batterie dépasse 2 à 3 jours.

Ce type d'équipement nécessite une aide à l'investissement, par exemple sous forme de crédit, du fait de son coût assez élevé. Il ne peut ainsi être mis en place que dans le cadre d'un projet où l'aspect économique est rigoureusement considéré (gestion des paiements). Il peut alors donner lieu à une activité commerciale.

Ce système présente également l'inconvénient que les usagers ne peuvent pas toujours récupérer leur batterie le jour-même, ce qui porte préjudice à la qualité du service attendu par les clients et nécessite une information préalable.

Les stations de recharge communautaires à accumulateurs Cd/Ni

Il s'agit d'un ou de plusieurs appareils qui permettent la charge simultanée d'un grand nombre de piles rechargeables. La gestion de cette station est similaire à la gestion des stations de recharge des batteries au plomb.

Les systèmes classiques comportent :

- 1 module de 50 Wc (cristallin) avec support ;
- 1 boîtier qui positionne les accumulateurs (de 20 à 40 modèles R20).

Les accumulateurs sont généralement répartis en branches de 5 accumulateurs. Pour éviter des courants de charge importants (donc dégradants pour les accumulateurs) il est préférable de remplir un maximum de branches lors de la recharge. Le temps de charge d'un jeu d'accumulateurs peut être de l'ordre de 1 jour.

Comme pour les chargeurs individuels, il n'existe pas réellement aujourd'hui de système techniquement au point. Le chargeur se dégrade rapidement, quant aux accumulateurs, ils perdent rapidement de leur capacité.

BESOINS EN ÉNERGIE D'UN SYSTÈME DE RECHARGE DE BATTERIE

Principes

Il faut dans un premier temps déterminer ou évaluer :

- ♦ *Les caractéristiques des batteries et du chargeur :*
 - la capacité des batteries ;
 - le temps acceptable ou le temps choisi pour charger une batterie ;
 - le nombre de batterie devant être chargées simultanément ;

♦ *Les conditions d'utilisation des batteries :*

- le nombre de personnes (donc de batteries) ;
- la fréquence de recharge qui dépend de la consommation d'électricité de chaque utilisateur.

Très souvent on n'aura qu'une idée approximative de ces informations.

Lorsque les utilisateurs ne possèdent pas encore de batterie, il faudra estimer la consommation moyenne de chacun. Ceci permettra :

- de choisir la taille des batteries à recommander ;
- de connaître la fréquence de recharge ;
- d'effectuer en définitive le dimensionnement du générateur.

Pour les batteries, les éléments de base permettant les calculs de dimensionnement sont les suivants :

♦ *Relation entre énergie et capacité :*

$E = C \cdot U$
E : énergie à consommer, en watt/heure (Wh) ;
C : capacité de la batterie, en ampère/heure (Ah) ;
U : tension de la batterie, en volt (V)

♦ *Relation entre capacité et énergie disponible :*

$E_d = C \cdot U \cdot T_x$
E_d : énergie disponible (récupérable)
T_x : taux de décharge maximum autorisé (< 80 %)

♦ *Relation entre énergie consommée et énergie disponible :*

$E_d = E_c \cdot r$	E_d : énergie disponible, restituée lors de la décharge
$E_d = C \cdot U \cdot T_x$	E_c : énergie consommée lors de la charge de la batterie
r	r : rendement de la batterie ($\approx 80\%$)

Exemples de stations de charge de batteries

Type de station	Nombre de batteries (moyenne)	Capacité disponible des batteries d'utilisation)	Fréquence de charge (durée)	Temps de charge (sur station)	Nombre de batteries simultanées par jour	Energie consommée
Batterie au plomb (Pb) U = 12 V	N	C	f	t	$n = \frac{N \cdot t}{f}$	$E = \frac{C \cdot U \cdot n}{t \cdot r}$
	20 batteries (10 usagers)	100 Ah	tous les 6 jours	3 jours (acceptable)	10	5 000 Wh/j
Piles rechargeables Cd/NiU U = 1,2 V	N	C	f	$t = f/(N/n)$	n	$E = (C \cdot U \cdot n)/t$
	160 batteries (16 usagers)	4 Ah	Tous les 6 jours (usage radio)	1,5 jour (requis)	40 (type de station)	160 Wh/j

Lors du calcul de la consommation journalière, on doit considérer deux hypothèses :

- soit la durée de charge est limitée, dans ce cas, il faut calculer le nombre de batteries qui doivent être mise simultanément en charge ;
- soit le nombre d'accumulateurs à charger simultanément est limité, dans ce cas, il faut adapter la durée de charge nécessaire.

EXEMPLE DE CALCUL

On dispose d'un générateur photovoltaïque d'une puissance crête de 1440 Wc, dans une zone où l'irradiation moyenne est de 6 kWh/m².j. On veut recharger des batteries au plomb déchargées à 50 % par session de une journée pour chaque recharge. Combien de batteries peut-on recharger dans une même session ?

♦ **Etape 1** : pour une irradiation moyenne de 6 kWh/m².j, et compte tenu de la puissance crête du générateur, l'énergie quotidienne produite est de l'ordre de 6000 Wh/j (pour un k de l'ordre de 0,7).

♦ **Etape 2** : l'énergie stockée correspond à l'énergie produite dans la journée, multipliée par le coefficient de rendement (de l'ordre de 80 %). On peut donc stocker approximativement 4800 Wh/j.

♦ **Etape 3** : on peut recharger environ 8 batteries de 100 Ah/12v déchargées à 50 % par jour ($8 \times 12 \text{ V} \times 100 \text{ Ah} \times 50 \% = 4800$).

Note : les calculs de dimensionnement du générateur photovoltaïque qui satisfont aux besoins en énergie évalués sont présentés dans la première partie de l'ouvrage.

COMPARAISON ENTRE DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE CHARGE DE BATTERIE

Il est intéressant de prendre pour cette étude l'exemple des stations de recharge communautaires. Néanmoins les critères invoqués ci-dessous restent valables pour les différents types de chargeurs cités précédemment.

Charge de batteries par groupe électrogène

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
- Fonctionne sous toutes les latitudes	- Approvisionnement en carburant
- Connaissance de la technologie	- Entretien et maintenance conséquents
- Grande quantité d'énergie disponible	- Source de bruit et de pollution
- Charge rapide (< 1 jour)	- Coûts de fonctionnement et de maintenance élevés
- Coût d'investissement modéré	

Charge de batteries par système photovoltaïque

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
- Permet une charge plus complète des batteries	- Bon ensoleillement nécessaire
- Fonctionnement autonome et simple	- Sous-ensemble coûteux
- Maintenance réduite, peu fréquente, peu technique	- Charge lente (> 1 jour)
- Coûts de fonctionnement faibles	- Coût d'investissement élevé
	- Énergie disponible limitée
	- Besoin d'un spécialiste en cas de réparation

LE POINT SUR LES COÛTS DE RECHARGE DE BATTERIE

Niveau d'investissement

♦ *Les chargeurs individuels de batterie au plomb*

En kit : de l'ordre de 3 500 à 5 000 FF HT (pour un générateur de 50 Wc sans batterie, FOB)

Système clef en main : de l'ordre de 100 à 150 FF HT/Wc (installé sur site)

♦ *Les chargeurs individuels d'accumulateurs Cd/Ni (piles rechargeables)*

Système compact de 4 accus : de l'ordre de 500 à 1 500 FF HT (pour un générateur de 4 à 10 Wc sans les accumulateurs, FOB)

Prix d'une pile rechargeable R20 : de l'ordre de 50 FF HT

♦ *Le bloc énergie*

Sous forme de système compact : de l'ordre de 1 500 FF HT (sans module mais avec batterie 7 Ah)

♦ *Les stations communautaires de recharge de batterie au plomb*

Système clef en main : de l'ordre de 100 à 150 FF HT/Wc (installé sur site)

♦ *Les stations de recharge communautaire pour batterie au plomb*

Système 40 accus. : de l'ordre de 3 500 à 5 000 FF HT (pour un générateur de 50 Wc sans les accumulateurs, FOB)

Comparaison économique avec d'autres énergies

Nous allons comparer deux systèmes. D'abord les accumulateurs rechargeables seront comparés aux piles jetables. Ceci concerne les systèmes de piles pour les lampes torche, les postes de radio, les magnétophones. La seconde comparaison intéressante est de mettre en regard la charge de batteries par des modules photovoltaïques ou par un groupe électrogène.

Les chargeurs de piles

	CHARGEUR SOLAIRE D'ACCUMULATEURS Cd/Ni (PILES RECHARGEABLES)	PILES JETABLES
Coût achat :		
– module	750 F	–
– chargeur	1 000 F	–
– 4 piles	200 F	20 F
Taux d'intérêt	10 %	10 %
Durée de vie :		
– module	5 ans	–
– chargeur	10 ans	–
– piles	400 cycles	1 cycle
Nombre de cycles par an :	183	61
– durée d'un cycle	5 heures	15 heures
– fonctionnement par jour :	2,5 heures	2,5 heures
Coût d'amortissement :		
– module :	198 F	–
– chargeur	163 F	–
Total amortissement annuel	361 F	–
Coût des consommables	92 F	1 220 F
Total coût annuel	453 F	1 220 F
Coût par mois	38 F	102 F
Coût par heure d'éclairage	0,50 F	1,34 F

Le prix d'achat des piles dans les pays en développement est parfois moindre que les prix affichés ci-dessus (jusqu'à deux fois moins cher), cependant la durée de leur cycle est également moindre (parfois rapport de 2 également). La conclusion reste alors la même : les piles rechargeables sont économiquement plus avantageuses que les piles jetables.

Les stations collectives de recharge de batterie

	GROUPE ÉLECTROGÈNE	CHARGEUR PHOTOVOLTAÏQUE
Coût achat :		
– groupe électrogène 2 kW	15 000 F	
– chargeur	3 000 F	
– électronique de contrôle	2 000 F	15 000 F
– modules 540 Wc		35 000 F
Taux d'intérêt	10 %	10 %
Durée de vie :		
– groupe électrogène 2 kW	–	–
– chargeur	5 ans (5 000 h)	–
– électronique de contrôle	10 ans	8 ans
– modules 540 Wc	8 ans	15 ans
Fonctionnement par jour	3 heures	–
Energie produite par jour	2 000 Wh/j	2 000 Wh/j
Coût d'amortissement :		
– groupe électrogène 2 kW	3 957 F/an	–
– chargeur :	488 F/an	–
– électronique de contrôle	375 F/an	2812 F/an
– module PV		4 602 F
Total amortissement annuel	4 820 F/an	7413 F/an
Coût des consommables :		
– carburant (5 F/l)	1 700 F/an	–
– maintenance	1 500 F/an	1 000 F/an
Total coût annuel	8 020 F/an	8 413 F/an

Cet exemple montre que les coûts entre les carburants fossiles et le photovoltaïque sont comparables pour de petites unités telles que celles-ci (2 kWh par jour). Dès que l'on examine des puissances plus importantes, le photovoltaïque devient de moins en moins concurrentiel puisque les moteurs présentent un coût d'achat et de fonctionnement qui coûte de moins en moins cher au kWh produit tandis que pour le photovoltaïque, où il n'y a pas de facteur d'échelle, ce coût est à peu près constant quelle que soit la taille de l'installation.

Les applications diverses

La ventilation

Il existe principalement deux gammes de ventilateurs : les petits ventilateurs frontaux, les plus répandus dans le commerce et les brasseurs d'air "plafonnier".

Alors que les premiers modèles consomment peu (5 à 10 W) et donc fonctionnent avec des modules de faible puissance (10 Wc), les modèles "plafonnier" ont une consommation plus élevée (30 à 50 W) et nécessitent, suivant le nombre d'heures d'utilisation, 1 à 2 modules de 50 Wc.

Et la climatisation ?

Il est impensable d'alimenter un climatiseur classique (à compresseur) avec du photovoltaïque, la puissance requise étant beaucoup trop élevée. On ne fait donc pas de climatisation mais du rafraîchissement d'air par "air cooler". Cet appareil utilise l'évaporation de l'eau comme principe de climatisation, d'où des limites évidentes d'utilisation dans les régions humides. En raison des risques de germes dans l'eau, ce système n'est pas recommandé pour les hôpitaux.

Ce système nécessite suivant le nombre d'heures d'utilisation de 1 à 2 modules de 50 Wc. Sa consommation est celle d'un ventilateur et d'une petite pompe (≈ 50 W).

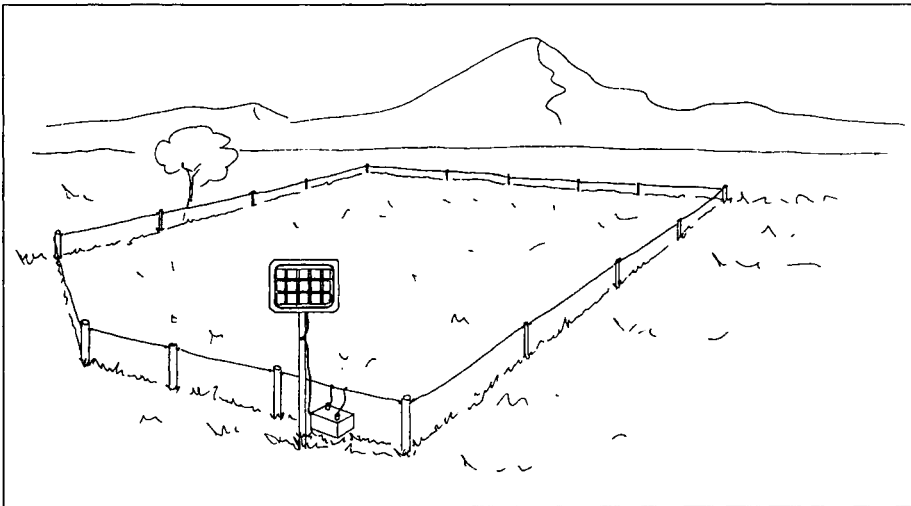
La stérilisation

La seule stérilisation qui puisse rationnellement être alimentée avec du photovoltaïque est la stérilisation par ultra violet. Il s'agit en réalité de l'utilisation d'une lampe à UV.

Les clôtures électriques

Il s'agit essentiellement de clôtures pour le parage d'animaux. Elle nécessite un système de génération d'impulsions électriques. La puissance crête du générateur est généralement de l'ordre de 10 Wc à 50 Wc.

Clôture électrique alimentée par énergie photovoltaïque



L'installation avec raccordement par prises

L'usage de certains récepteurs (lampe portable, radio, ventilateur portable) nécessite un raccordement près du lieu d'utilisation qui peut changer d'une fois à l'autre. C'est pourquoi il est intéressant d'équiper une installation avec des prises et ceci dans les différentes pièces désirées.

Ces prises sont soit particulières au courant continu (2 broches orientées différemment, ou prises "jack") soit adaptées au courant continu (utilisation de 2 des 3 broches sur une prise classique courant alternatif, par exemple phase et terre ou neutre et terre). Dans les deux cas il y a un système de détrompage qui évite l'inversion de polarité.

Attention, la présence de prises ne doit pas faire oublier que l'utilisation est limitée en temps, conformément au dimensionnement initial. De plus il faudra respecter la puissance que peut délivrer une ligne électrique et sa prise.

La protection cathodique

De nombreux ouvrages métalliques enterrés ou immergés (pipe-lines, canalisations de gaz, eau, électricité) sont détériorés au fil du temps à cause de la corrosion électrochimique. Afin d'éviter ce problème un procédé de protection cathodique a été mis au point qui nécessite une source d'énergie. Traditionnellement la solution est l'emploi d'un groupe électrogène. Toutefois l'importance économique de ces réalisations (principalement ouvrages des producteurs de pétrole) a justifié l'utilisation d'un moyen efficace et permis au solaire de se positionner sur ce marché.

Les centrales photovoltaïques

Ce sont des systèmes qui fournissent des quantités d'énergie importantes et qui sont reliés à un réseau électrique local (centrales villageoises) ou interconnectés.

Les centrales villageoises

Ces centrales, généralement d'une puissance de plusieurs dizaines de kWc, peuvent fournir de l'électricité à quelques centaines de ménages à travers un réseau électrique local. Ces centrales peuvent être autonomes (une seule source d'énergie) ou être couplées à un groupe électrogène d'appoint. Toutefois la présence d'un important stockage (par batterie) est nécessaire.

L'électricité fournie est en général un courant alternatif 220 V (ou 380 V triphasé) afin d'utiliser des appareils électriques récepteurs de grande diffu-

sion. Le transport de cette électricité (sur quelques kilomètres au maximum) se fait parfois sous une tension plus élevée afin d'éviter les pertes par dégagement de chaleur dans les câbles. Ces systèmes impliquent souvent la mise en place du réseau électrique (lignes électriques et compteurs).

Une centrale comporte généralement :

- un champ de modules photovoltaïques cristallins avec support ;
- un système de régulation de charge/décharge ;
- un parc de batteries ;
- un système de conversion DC/AC (onduleur).

Parmi les réalisations effectuées (Guyane française, Thaïlande, Sénégal, Crête, Îles bretonnes...), certaines centrales se sont avérées très fonctionnelles. Toutefois leur compétitivité en regard des centrales diesel moyenne puissance est difficile à obtenir. De plus la satisfaction des usagers est souvent moindre à cause de la nécessité de gérer leur consommation d'électricité et d'utiliser des appareils à basse consommation (plus chers).

Les centrales directement reliées aux réseaux nationaux

Ces centrales généralement de très grandes puissance (de l'ordre du MW) réinjectent le courant qu'elles produisent directement sur un réseau national sans avoir besoin de le stocker.

Les projets réalisés (États-Unis, Japon, Allemagne, Italie) ont été lancés dans un but de recherche, d'apprentissage et d'impact médiatique. Elles sont loin d'être rentables vis-à-vis des sources d'énergie fossile ou même des autres sources d'énergie renouvelable (hydroélectrique, éolien, biomasse).

A l'avenir, ces centrales pourront donner lieu à une exploitation uniquement s'il y a une volonté politique d'investir sur ces systèmes. Pour l'instant, elles sont économiquement inadaptées aux pays en développement.

Besoins en énergie de quelques systèmes

L'identification de ce type de besoins consiste à déterminer ou évaluer :

- le nombre d'appareils utilisés ;
- la puissance de chaque appareil ou l'intensité consommée (et la tension d'alimentation) ;
- la durée d'utilisation quotidienne de chacun de ces appareils.

Ces données permettront de calculer la consommation journalière des appareils.

Le tableau suivant donne quelques informations sur les consommations "classiques" de différents récepteurs couramment utilisés :

	TENSION ALIMENTATION	INTENSITÉ	PUISSANCE UTILISATION	TEMPS UTILISATION STANDARD	ÉNERGIE CONSOMMÉE	PERFORMANCES
	U	I	$P = U \cdot I$	t	$E = P \cdot t$	
Ventilateur de plafond	12 ou 24 V	–	32 W	4 heures/j	128 Wh/j	Vitesse : 190 tr/mn
Sonorisation	12 V	–	15 W	3 heures/j	45 Wh/j	Portée : 150 à 300 m

Note : les calculs de dimensionnement du générateur photovoltaïque qui satisfait aux besoins évalués en énergie sont présentés dans la première partie de l'ouvrage.

Coûts des applications diverses

Niveau d'investissement

Le niveau des coûts d'investissement concernant les applications courantes précédemment citées (ventilation, clôture électrique...) sont similaires aux coûts d'investissement des systèmes à recharge de batterie (voir chapitres précédents). Par contre le niveau des coûts d'investissement concernant les centrales photovoltaïques varie en fonction de la puissance installée. En effet le coût au Wc diminue avec une puissance installée plus importante. Quant à la protection cathodique, du fait de la spécificité de ce système, un devis constructeur est nécessaire pour connaître le coût d'investissement.

Comparaison économique des centrales énergétiques

Il est intéressant de réaliser une étude économique concernant les centrales photovoltaïques, les centrales diesel et leur extension au réseau électrique.

	CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE (20 kWc)	CENTRALE DIESEL (20 kVA)	EXTENSION DU RÉSEAU MT (30 km)
Coûts d'investissement	2 763 600 FF	1 122 800 FF	3 602 800 FF
Annuité des coûts d'investissement (avec 12 % de taux d'intérêt par an)	408 613 FF	195 476 FF	461 676 FF
Coûts de fonctionnement	55 272 FF/an	123 167 FF/an	91 930 FF/an
Coûts annuels	463 885	318 644	553 605
Production annuelle	25 550 kWh/an	25 550 kWh/an	25 550 kWh/an
Coûts du kWh produit	18,16 FF/kWh	12,48 FF/kWh	21,66 FF/kWh
Coûts par unité de puissance	≈ 138 FF/Wc	–	–

Source : *La pré-électrification solaire en milieu rural en Afrique de l'Ouest*, C. Barbier (voir également rapports GTZ)

Quelques conclusions sur cette étude

– Pour que le photovoltaïque devienne compétitif, il faudrait que le coût de tous les composants (modules, batterie, électronique) baisse de façon sensible. Il faudrait aussi que le prix du diesel soit multiplié par 4,5.

– Par rapport au réseau interconnecté, il faudrait que la longueur de raccordement de la ligne soit inférieure à 11,6 km pour être plus rentable que le solaire et inférieure à 6,1 km pour être plus rentable que le diesel.

Ceci corrobore la règle générale qui fixe au photovoltaïque une limite en puissance (à peu près 5 kW) au-delà de laquelle il n'est plus concurrentiel, même en zone isolée.

TROISIÈME
PARTIE

Critères pour la réussite d'un projet d'électricité photovoltaïque



Maintenance des équipements



Règles de base pour l'insertion
d'un projet photovoltaïque



Comment financer un projet photovoltaïque



Maintenance des équipements

L'emploi de l'électricité photovoltaïque se distingue, par rapport aux autres solutions envisageables, par un coût élevé d'investissement initial. Un projet dans ce secteur ne pourra de ce fait jamais être considéré comme un succès que s'il arrive à survivre à l'usure du temps et aux accidents occasionnels, et que l'on parvient à répartir les charges d'investissement sur une période suffisamment longue. Une bonne maintenance est une clé fondamentale de la réussite d'un tel projet. L'organisation de la maintenance doit donc constituer une préoccupation essentielle de la part des chefs de projets et des futurs utilisateurs.

Ce chapitre traite des différents actes de maintenance en analysant leur faisabilité, les intervenants qu'ils nécessitent ainsi que les outils de gestion qu'ils utilisent. Nous appelons "maintenance" l'ensemble des actes de nettoyage, d'entretien et de réparation, que ce soit en préventif ou en curatif. La maintenance se divise en trois parties : l'entretien de routine, la maintenance préventive et le dépannage.

Les actes de réparation sont très peu détaillés dans ce chapitre car ils sont renvoyés aux notices de dépannage et/ou aux professionnels du photovoltaïque. Il est par ailleurs fortement conseillé de s'abstenir de toute intervention si le système n'est pas parfaitement maîtrisé puisqu'une "erreur" peut être très coûteuse en photovoltaïque.

Voici tout d'abord les notions s'appliquant à toute la gamme des systèmes, aussi bien aux "tout petits" (lampe solaire portable) qu'aux "grands" (installations de fortes puissances).

LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS D'UNE MAINTENANCE

L'entretien de routine

Il s'agit de tous les actes préventifs nécessaires pour qu'un système garde ses performances et reste en bon état de fonctionnement, mais il s'agit également d'essayer de pérenniser l'installation et d'obtenir une durée de vie maximale.

De façon plus précise il s'agit de tous les gestes simples et périodiques à accomplir :

- nettoyage de modules ;
- contrôle du niveau de l'acide dans les batteries ;
- dégivrage du réfrigérateur ;
- dépoussiérage et nettoyage (si besoin) des équipements ;
- etc.

Ces gestes peuvent également s'élargir à l'environnement du système solaire :

- fauchage de l'herbe sous les modules ;
- nettoyage des abords du point d'eau ;
- surveillance des ombres portées ;
- etc.

De par leur simplicité et le minimum de connaissances que ces gestes requièrent, ils peuvent être réalisés par les personnes qui utilisent ces équipements ou/et habitent à proximité de l'installation. Pour les systèmes collectifs, ces actes doivent nécessairement être réalisés par des personnes qui bénéficient du service rendu (ou par des "salariés" ou "contractants" du comité de gestion) ce qui renvoie à l'implication des utilisateurs.

Cet entretien, aussi simple qu'indispensable, n'est souvent effectif qu'à certaines conditions :

- information et sensibilisation sur la nécessité d'un tel entretien ;
- gestion et supervision de la part d'une autorité (comité villageois...) ;
- rémunération (salaire, pourcentage...) du responsable (dans le cas d'un système collectif).

Une fiche d'entretien peut s'avérer intéressante pour rappeler au responsable quel jour il doit réaliser tel ou tel acte. Cette fiche peut également servir à la supervision. Elle est, à titre d'exemple, déjà utilisée dans les programmes de vaccination pour l'entretien de la chaîne du froid.

Le responsable de l'entretien peut cumuler d'autres fonctions : vente de l'eau, de recharge de batterie, gardiennage ainsi que d'autres activités. Il est important d'insister sur le fait que cet entretien ne coûte rien d'autre que le temps de travail. L'aspect préventif de cet acte de maintenance l'amène à être très souvent négligé. En effet les intéressés n'intègrent pas toujours la raison pour laquelle il faut intervenir sur un système qui en définitive "marche bien".

Maintenance préventive

Ces actes préventifs sont nécessaires au système pour qu'il conserve ses qualités et ses performances. Il s'agit toujours de gestes périodiques à accomplir mais cette fois-ci un peu plus techniques :

- inspection des modules (état général, propreté) ;
- inspection des supports (état des fixations) ;
- inspection du régulateur, de l'onduleur (état général, contrôle des voyants) ;
- inspection des batteries (état général, état des bornes, mise à niveau) ;
- inspection des récepteurs (état général, contrôle simple des performances) ;
- inspection de tous les câbles et de toutes les connexions (état d'usure des câbles, fixations, prévention des faux contacts, étanchéité des boîtes de connexions) ;
- etc.

Du coté environnement :

- inspection de l'environnement (ombres éventuelles) ;
- inspection état de la clôture, du local technique... ;
- nettoyage complet du point d'eau et du réservoir ;
- etc.

Cette maintenance, d'un degré technique supérieur à la précédente, fait appel à une compétence extérieure qu'il faudra sans doute rémunérer. La per-

sonne qui réalise ce type de maintenance doit posséder en effet certaines compétences spécifiques rarement disponibles à l'intérieur de la communauté utilisatrice. Ce technicien peut faire partie d'un organisme d'État responsable de projets d'équipements ou de préférence d'une structure privée concernée par la vente et l'installation de ce type d'équipements. Il peut aussi être un artisan local préalablement formé.

Il faut préciser que la maintenance préventive, réalisée selon une fréquence de un à deux passages par an, est une étape essentielle pour détecter d'éventuelles pannes (surtout dues aux câblages et connexions). Il est également important d'informer que cette inspection coûte de l'argent pour rémunérer le technicien et son déplacement et qu'elle peut engendrer aussi des frais supplémentaires lors du remplacement de certaines pièces proches de la panne.

Le rôle du comité de gestion est plus que jamais nécessaire pour faire comprendre et convaincre la communauté de la nécessité de ces visites périodiques.

Cette maintenance préventive est à préconiser dans tous les cas. Les premières années, la grande fiabilité du photovoltaïque peut faire illusion. Même si les pannes sont rares, il est important de mettre tout de suite en place un système de surveillance et un mécanisme financier de maintenance. La meilleure solution est certainement celle adoptée par le Programme Régional Solaire au Sahel : une maintenance obligatoire incluant pièces et main d'oeuvre durant les 5 premières années. De ce fait, les utilisateurs prennent l'habitude de supporter un coût annuel de maintenance et les réparateurs sont directement intéressés par le résultat des visites préventives. La garantie de service est pratiquement totale et la pérennité du système est bien assurée.

Le dépannage

C'est un acte qui répond à un problème constaté, que ce soit l'arrêt total du système ou un simple dysfonctionnement. Il fait inévitablement appel à des personnes compétentes et formées en matière de système photovoltaïque. Un dépannage nécessitera généralement le changement de certaines pièces et implique un coût de maintenance nettement plus élevé.

Pannes simples

Les pannes simples (qui ne sont pas forcément de réelles pannes) peuvent être :

- l'arrêt du système par simple limitation de décharge (surconsommation) ;
- un disjoncteur ou un fusible qui a "sauté" ;
- un tube fluorescent qui a "grillé" ;
- une vanne fermée malencontreusement.

Ces pannes peuvent et doivent être détectées sans faire appel à un spécialiste de haut niveau. Par exemple un responsable, nommé par le comité de gestion, peut faire l'affaire et doit être identifié et formé. Il peut s'agir du même individu que celui qui assure l'entretien ou d'un artisan local compétent sur le photovoltaïque. Toutefois cet individu ne devra pas dépasser le cadre de ses compétences et devra immédiatement appeler un spécialiste si la panne s'avère plus complexe.

Le coût de ce type de dépannage est très modéré, mais il est nécessaire de posséder au sein du comité un petit stock de pièces détachées élémentaires comme des fusibles, des tubes fluorescents, etc.

Pannes complexes

Les pannes complexes, dont la liste est plus longue, sont finalement moins fréquentes. Elles peuvent être de divers ordres :

- problème de connexions ;
- régulateur ou onduleur hors service ;
- batterie hors d'usage ;
- récepteur hors service ;
- forage ensablé ou tari ;
- etc.

Ces pannes font obligatoirement appel à un spécialiste de haut niveau et c'est au comité de gestion d'initier cette procédure qui peut être relativement coûteuse.

La plupart du temps, ce spécialiste appartient à une société privée ou à une structure étatique de maintenance. Quel qu'il soit, il devra être rétribué pour ses actes et pour le coût des pièces de rechange. Le coût de ce type de dépannage peut s'avérer nettement plus élevé et son paiement doit faire appel à certaines solutions (voir annexe 6).

L'information concernant la panne doit être véhiculée très rapidement aux personnes concernées (comité de gestion, artisan/réparateur, cellule de main-

tenance). Le dépannage doit lui aussi intervenir très rapidement sinon il y a un risque de détérioration ou d'abandon des équipements. C'est pour cela que le circuit d'information et celui de maintenance doivent être bien identifiés et leurs rouages parfaitement "huilés".

On trouvera en annexe 8 une série de tableaux qui présentent, pour chaque type d'utilisation, les principaux actes de maintenance à réaliser, leur fréquence et le type d'intervenant requis.

Toutes les maintenances préventives et les réparations nécessitent l'arrêt du système, la couverture des modules et la déconnexion des batteries.

GESTION DE LA MAINTENANCE

Organisation de la maintenance

Les usagers sont au coeur de cette organisation, aussi bien du côté prévention, où ils assurent l'entretien, que du côté réparation des équipements où ils informent les structures compétentes de l'apparition d'un problème.

L'identification préalable d'intervenants compétents et régionalement présents doit être si possible effectuée.

Concernant le dépannage d'équipement collectif, un schéma logique peut être le suivant :

- 1) rapport du responsable de l'équipement ou des usagers auprès du comité de gestion ;
- 2) premier diagnostic de la part du responsable (et du comité) sur le niveau de réparation ;
- 3) contact de la part du comité de gestion de la structure de maintenance correspondante ;
- 4) réunion des fonds nécessaires (caisse existante, appel à cotisations...) ;
- 5) si l'installation est encore sous garantie, le contact et le paiement de la structure de maintenance dépendra des termes du contrat initial passé entre le comité, les pouvoirs publics et/ou l'entreprise installatrice ;

6) suivi de la réparation ;

7) réception d'un certificat de réparation attestant l'acte réalisé, les pièces changées ;

8) paiement de réparation sur présentation d'une facture décrivant les actes effectués et les pièces changées.

Dans le cas de systèmes individuels, ce schéma peut également s'appliquer à l'exception du passage par le comité.

Les structures de maintenance

Le comité villageois

Son existence est nécessaire pour éviter que des équipements collectifs ne soient laissés sans entretien et, en cas de panne, sans réparation rapide. Son rôle est d'être une interface décisionnelle entre les usagers et les réparateurs, sur le plan financier (récolte des cotisations, paiement des factures), social (satisfaction des usagers, évolution des besoins) ou technique (supervision de l'entretien, approbation des réparations).

Ce comité doit posséder au moins un trésorier et si possible quelques connaissances techniques de base sur le solaire.

Le service de maintenance des équipements

Il existe encore au sein de certains ministères ou départements (hydraulique, énergie, santé) un service de maintenance des équipements. Si ce service a pu être par le passé en charge de l'entretien et de la réparation des équipements, il s'avère que la tendance est au désengagement total de l'État de toute intervention directe. Celles-ci sont maintenant à la charge des entreprises privées de maintenance.

Cette orientation s'est décidée sous la pression des plans d'ajustement structurels qui font la chasse aux activités coûteuses et qui recentrent le rôle de l'État sur ses fonctions vitales. Cependant l'État conserve parfois un rôle d'intervenant dans le cas de régions très enclavées pour lesquelles le coût de la maintenance privée serait prohibitif pour les populations.

Par contre l'État conserve pleinement son rôle d'orientation, de formation et de contrôle :

- orientation quant au choix des matériels, au code de l'eau et des services ruraux, aux modalités de contractualisation avec les populations... ;
- formation des villageois à la gestion, à la maintenance ; éventuellement formation des artisans réparateurs... ;
- contrôle vis-à-vis des sociétés privées d'installation et de maintenance, à l'égard des performances des équipements, du respect des engagements contractuels population/entreprises, des stocks de pièces détachées, etc.

Il reste que la situation actuelle ne permet pas aux populations de réaliser l'amortissement complet de leurs installations. Le renouvellement des équipements à long terme est encore sans réponse, comme d'ailleurs la poursuite de l'équipement des PVD en infrastructures. L'État devra bien encore assurer cette fonction, aidé en cela par les donateurs internationaux, jusqu'à ce que des systèmes financiers viables de renouvellement soient définitivement en place.

Les sociétés privées locales

L'investissement des privés locaux dans la maintenance des équipements photovoltaïques est encore à ce jour réduite :

- les coûts d'intervention sur une panne sont relativement élevés surtout dans le cas de sites éloignés. La faible solvabilité des usagers n'incite pas ces sociétés à s'investir sur ce marché ;
- la faible concentration actuelle des équipements solaires n'incite pas les privés à stocker des pièces détachées ;
- trop souvent, la fourniture des équipements est faite par des sociétés étrangères, sans implantation dans le pays. Ce système ne permet pas l'éclosion de PME stables capables d'assurer ensuite les dépannages ;
- le faible taux de pannes des équipements solaires rend aléatoire la viabilité de telles structures ;
- les grandes distances à parcourir rendent les interventions très coûteuses et peu rentables.

L'accent est mis aujourd'hui sur le développement des entreprises photovoltaïques locales à l'exemple du Programme Régional Solaire. Il n'empêche que ce marché reste étroit d'où la nécessité pour ces sociétés de diversifier leurs activités. L'avenir des entreprises privées locales se situe dans le développement d'activités de maintenance lorsque les installations existent en

nombre suffisant, en recourant aux financements internationaux, et dans la vente de petits systèmes d'éclairage individuels dont le marché dépend de la mise en place hypothétique de systèmes de crédit ou de paiement fractionné des investissements.

L'artisan local

Les avantages d'un tel réparateur pour la communauté qui possède des équipements sont :

- là où le niveau technique de réparation est faible (remplacement d'un fusible), un artisan local peut faire l'affaire ;
- les coûts de maintenance sont moindres pour les usagers ;
- l'artisan local est présent à proximité des équipements, donc facile à contacter et à faire venir ;
- il intervient rapidement.

Les conditions de bon fonctionnement de ce type d'intervention sont :

- l'artisan a reçu une formation spécifique ;
- son volume d'activité doit être suffisant (concentration d'équipements) ;
- il connaît ses limites : s'il ne peut réparer, il ne doit pas "bricoler", il doit se référer à une structure plus compétente.

Il est nécessaire que ce technicien local, par exemple un électricien, possède d'autres activités pour compléter ses revenus.

Gestion des pièces détachées

La diffusion des pièces détachées est fortement liée à la diffusion des équipements solaires qui aujourd'hui reste faible. De plus le coût élevé des pièces permet difficilement un maintien du stock, si minime soit-il. Les seuls organismes à posséder éventuellement un stock complet de pièces détachées sont les structures d'Etat, dans le cas où cela a été prévu dans le projet. Les sociétés privées locales possèdent rarement de stock, sauf si le projet les y oblige comme dans l'exemple du Programme Régional Solaire.

Il faut toutefois séparer deux niveaux de pièces détachées :

- les "consommables" (tubes fluorescents, batteries, lampes portables, etc.) qui doivent nécessairement être présents sur le terrain ;

– les sous ensembles (module, régulateur, onduleur, etc.) dont un ou plusieurs modèles devraient être présents au niveau national.

Les "consommables" peuvent être stockés au niveau local ou régional et leur diffusion peut se faire dans le commerce. Une solution pour intéresser les commerçants peut être le dépôt vente.

Quand il y a fabrication locale d'équipements, la disponibilité des pièces détachées augmente. C'est l'exemple des régulateurs et des néons en Mauritanie, des régulateurs et des batteries au Sénégal. Ces pièces sont alors généralement moins chères que les pièces importées.

Les contrats de maintenance

Un contrat peut être passé entre les usagers (via le comité de gestion) et une structure de maintenance. Il permet d'assurer la qualité et l'efficacité d'un service de maintenance en échange d'une contrepartie financière. Dans le cas d'un système collectif, ce type de contrat est très utile ; il permet aux usagers de voir le dépannage de leur équipement dans les meilleures conditions, tout en simplifiant l'organisation à mettre en place.

L'avantage d'un tel contrat est qu'il viabilise les privés ; son inconvénient majeur est qu'il coûte relativement cher en regard de la faiblesse du nombre de pannes et donc d'interventions. Le prix du contrat mérite des négociations approfondies.

Les types de contrat "maintenance d'équipements solaires" qui existent à ce jour fournissent rarement un service complet (main-d'oeuvre et échange des pièces détachées gratuits) avec une contrepartie du type abonnement comme le fait le Programme Régional Solaire dans plusieurs pays. Le coût des sous-ensembles reste là aussi un frein à ce type de contrat. Par ailleurs, les communautés acceptent mal de payer à l'avance un service qui ne sera pas rendu si aucune panne ne se présente.

Le type de contrat fréquemment rencontré est un engagement des populations à payer les factures d'interventions. Il s'agit en fait d'un paiement à la prestation, sans véritable contrat de maintenance.

Règles de base pour l'insertion d'un projet photovoltaïque

Les conditions minimales d'insertion d'un projet peuvent ne pas être remplies avant le projet. Il conviendra de savoir s'il sera possible de réunir les principales d'entre elles durant le déroulement du projet. C'est leur mise en place qui déterminera la pérennité des actions et la viabilité économique du projet.

ANALYSER LE CONTEXTE

Environnement social favorable ou non

L'équipement doit être voulu et demandé par ses bénéficiaires. Une association des usagers devra être impliquée dans ce projet dès l'origine.

Motivation des usagers

La seule manière de tester la motivation des usagers est d'attendre d'abord une démarche de leur part puis un engagement financier significatif. On évitera donc les installations programmées *d'en haut* au profit d'un système d'appel d'offre à destination des communautés intéressées. L'idéal est de proposer plusieurs types d'équipements et de laisser les usagers choisir en toute connaissance de cause en fonction des avantages et inconvénients de chaque système et de leur coût.

Existence d'une association

Le principe d'une implication technique et économique de la part d'une organisation des usagers est nécessaire afin d'assurer la gestion de l'équipement.

L'environnement social sera donc d'autant plus favorable qu'une association villageoise sera déjà opérationnelle au sein de la communauté et qu'il sera possible de l'impliquer dans le projet photovoltaïque. La création d'une organisation villageoise dans une communauté n'ayant jamais eu la pratique d'une gestion communautaire est reconnue comme une expérience plus difficile.

Organisation sociale du village

Il est préférable que le village soit uni, les tensions et rivalités ne représentent pas un environnement très favorable. Il est également important que le village possède des leaders dynamiques, compétents et reconnus par leur communauté.

Implication des usagers

Elle commence dès la conception du projet, l'avis des usagers est au coeur des décisions à prendre et se poursuit par la mise en place des méthodes de gestion. Les usagers doivent assurer certains travaux comme le génie civil et l'aide logistique et les entretiens de routine comme le nettoyage des modules et des points d'eau.

Écriture des contrats

Dans la mesure du possible, on établira des documents contractuels afin de définir les obligations du comité et des usagers à l'égard du projet, et surtout la fonction et les tâches de chacun.

Environnement économique favorable ou non

Les coûts récurrents du projet doivent être supportés par la communauté bénéficiaire.

Implication financière

Le principe de l'implication financière des usagers est une des bases sur laquelle repose tout projet. Sans cette participation, la maintenance des équi-

pements (pièces détachées et main-d'oeuvre) est plus qu'aléatoires sans parler d'un éventuel renouvellement des équipements. Il s'agit également d'indemniser les personnes qui assurent l'entretien de routine et le gardiennage.

D'expérience, aucun projet n'a jusqu'alors fonctionné à long terme sans une participation financière des usagers.

Sur certains projets, il y aura une demande de participation à l'investissement. Celle-ci peut être directement utilisée pour la réalisation de l'installation mais elle peut également être considérée comme une provision pour réparations et placée en épargne pour assumer les frais importants occasionnés par une panne grave.

Ce principe d'implication financière ne devrait jamais être transgressé. Si la communauté ne peut ou ne veut pas assurer sa part de financement, il est conseillé de repenser ou d'ajourner le projet.

Il faut se conformer également à la politique nationale des États dans le cas où il en existe une sur ce problème financier, ou à la pratique d'autres projets de la même zone. Il est en particulier important de ne pas offrir de conditions nettement meilleures que celles déjà en vigueur dans la zone concernée et même dans le pays.

Existence de revenus

L'environnement économique ne sera favorable que s'il existe au sein de la communauté un minimum de sources de revenus (vente des cultures, de maraîchage, artisanat local, expatriés). Cet argent peut permettre aux usagers de supporter les coûts d'achat de l'eau, de recharge de batterie ou un appel à cotisation pour la réparation d'un équipement collectif.

Existence d'une institution d'épargne/crédit

Par ailleurs l'environnement économique sera d'autant plus favorable qu'il existera un système d'épargne/crédit. Un tel système peut permettre au comité de placer une somme d'argent qui restera disponible en cas de "coup dur" mais qui ne dormira pas dans une caisse. Il peut également permettre à l'utilisateur d'emprunter de l'argent pour acheter quelques petits équipements personnels.

S'il est nécessaire de réaliser une épargne destinée aux grosses réparations et au renouvellement, la gestion des fonds ainsi immobilisés demande réflexion. Les utilisateurs ont bien du mal à comprendre que des sommes importantes d'argent (5 000, 10 000 FF) "dorment" sur des comptes bancaires

ou même d'épargne. Son utilisation prudente et concertée – forcément très partielle – valorise davantage cette épargne et facilite son recouvrement.

Adéquation correcte aux besoins

L'équipement doit répondre à un besoin correctement formulé (de manière économique).

S'il existe déjà un service rendu que l'on veut "solariser", il est tout d'abord important d'analyser si ce service actuel est correct ou non et quel est son coût. En ce cas, il est impératif de se poser des questions sur l'intérêt du projet solaire envisagé : quels sont les avantages du solaire ? Si ces avantages ne sont pas nets, il a toutes les chances d'être abandonné à la première difficulté. Si le créneau est mal occupé ou ne l'est pas du tout, il convient alors de détailler et de formuler correctement le besoin des populations.

La bonne adéquation au besoin est un critère essentiel de réussite. Si le service rendu est insuffisant, partiel, difficile à gérer..., la population ne sera pas intéressée et la pérennisation du système sera compromise.

Il est important d'insister sur le fait que des moyens doivent répondre à des besoins et non l'inverse comme c'est encore parfois le cas.

Inversement, les contraintes liées à la diffusion des équipements solaires impliquent parfois des réponses qui ne correspondent pas à 100 % aux besoins. Le but est alors d'essayer de limiter les inadéquations ! Il faut se remettre en mémoire que le photovoltaïque fournit une énergie à peu près constante chaque jour, tout au long de l'année, alors que les besoins sont souvent irréguliers et saisonniers. Il sera donc important d'étudier les périodes de pointe et de trouver des solutions pour rentabiliser l'équipement en toutes saisons.

COMPARAISONS ÉCONOMIQUES

Dans tous les cas, il est nécessaire de réaliser une étude technique et économique comparant la solution photovoltaïque à ses concurrentes.

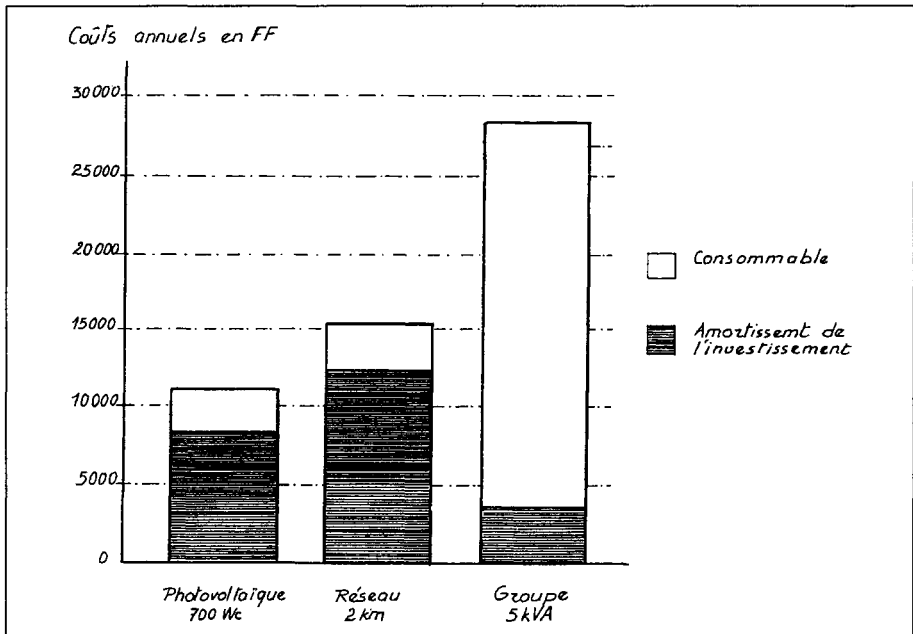
Installation tout confort d'un site isolé

Nous présentons un premier exemple de comparaison économique entre trois solutions différentes :

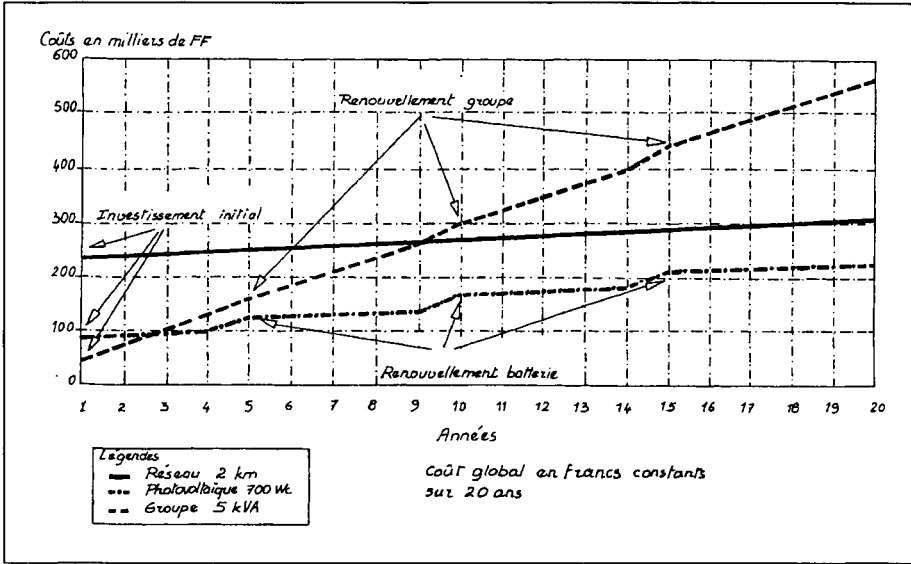
- photovoltaïque ;
- groupe diesel ;
- extension du réseau.

Il s'agit de l'électrification d'un site isolé, avec une installation tout confort (éclairage, pompage, froid, télévision), pour un besoin total d'énergie estimé à 4 000 Wh/jour. La comparaison est donnée par les deux graphiques ci-après : coûts moyens annuels et coûts sur 20 ans.

*Comparaison des coûts annuels pour trois sources d'énergie
(installation tout confort en site isolé)*



**Coût comparatif de trois systèmes de fourniture d'électricité
(installation tout confort en site isolé)**



Dans cet exemple, les coûts initiaux sont très importants pour la connexion au réseau qui reste durant 9 ans le système le plus cher. Le diesel est le moins cher au départ, cependant en raison de ses coûts annuels élevés il devient dès la 4^{ème} année plus cher que le photovoltaïque, et le plus cher de tous les systèmes après 10 années de fonctionnement.

La faiblesse des coûts de fonctionnement permet cependant au système photovoltaïque de devenir rapidement la moins chère des solutions. Sur le très long terme, la connexion au réseau sera la solution la plus rentable, mais après 20 ans de fonctionnement le solaire demeure encore intéressant.

♦ *Le cas du pompage*

Un deuxième exemple d'étude économique concerne les différents systèmes de pompage (humain, photovoltaïque, diesel). Le graphe ci-après délimite les zones de compétitivité de l'énergie solaire et place les zones d'utilisation des autres énergies (noter les échelles logarithmiques).

Le pompage photovoltaïque est concurrentiel pour des profondeurs de 10 à 50 mètres et des besoins de 10 à 50 m³/jour. En dessous de 10 m de HMT, il est très fortement concurrencé par les groupes motopompes bon marché et les pompes à motricité humaine.

On trouvera également d'autres comparaisons économiques entre énergies pour chaque type d'utilisation : éclairage, pompage, froid, télécommunication et recharge de batterie dans la deuxième partie, section "Le point sur les coûts".

Le tableau suivant présente une synthèse très simplifiée des critères économiques des différentes énergies. Il permettra au moins d'appréhender les grandes différences entre chaque système.

Coûts par poste et par source d'énergie

	Générateur photo-voltaïque	Générateur et moteur diesel	Aéro-générateur électrique	Éolienne mécanique	Système hydro-électrique	Système pétrole/gaz*	Système à énergie humaine et animale	Réseau électrique
Investissement	+++	++	+++	++	+++	++	+	+++
Fonctionnement	+	+++	+	+	+	++	+	+
Pièces détachées	+++	++	+++	++	+++	++	+	+
Main-d'oeuvre dépannage	+++	++	+++	++	+++	++	+	+
Carburant		+++				+++		+
Fréquence entretien et pannes	+	+++	+	++	+	+++ / +	++	+

* Il s'agit de systèmes d'éclairage et de réfrigération pour le pétrole et le gaz et de systèmes de pompage pour l'énergie humaine et animale.

CONDITIONS TECHNIQUES DE RÉUSSITE D'UN PROJET

Résumé des grands principes

1. Seules les régions avec un ensoleillement "correct" ($> 3 \text{ kWh/m}^2.\text{j}$ en moyenne) seront retenues

Il existe un seuil minimum d'ensoleillement en dessous duquel le photovoltaïque devient une énergie qui n'est plus, ni techniquement, ni économiquement, adaptée. En effet la puissance des systèmes les rend trop imposants et non rentables. Le seuil de $3 \text{ kWh/m}^2.\text{j}$ est bien sûr approximatif. Les zones à forte pluviométrie comme la zone équatoriale ou les zones à répartition inégale de l'ensoleillement pendant l'année, ou celles au-dessus du 45° parallèle, sont parfois considérées comme critiques pour le photovoltaïque.

Une autre donnée d'importance est la variation de l'ensoleillement quotidien aux différentes saisons ainsi que les périodes sans soleil. Si les périodes sans soleil sont trop longues (> 10 jours), il sera raisonnable d'envisager une autre énergie soit en appoint, soit en remplacement. Les périodes d'irradiation faible représentent aussi un facteur limitatif si le seuil de $3 \text{ kWh/m}^2.\text{j}$ est peu souvent atteint pendant ces périodes.

2. Un minimum de concentration géographique des équipements est nécessaire

En prenant en compte les expériences passées, il est évident que l'isolement et l'éparpillement des équipements solaires est un facteur de risque de mauvais fonctionnement. Dans ces cas-là, la maintenance, difficile et coûteuse, est rarement correctement réalisée. Il est préconisé aujourd'hui d'essayer de concentrer les installations solaires au niveau d'une région afin de faciliter les interventions de maintenance.

3. Le service rendu doit être au moins égal aux besoins identifiés

Le sous-dimensionnement d'un système conduit à un service rendu qui ne correspond pas à la demande des usagers, entraînant une insatisfaction et donc un désintérêt des utilisateurs. De la même façon, la diffusion de systèmes qui ne respectent pas les performances annoncées entraîne les mêmes préjudices. Un sous-dimensionnement conduit en particulier à des pannes du système (réaction du régulateur), suivies de reprises du fonctionnement qui peuvent laisser penser que le système fonctionne de façon aléatoire. Cela pose un pro-

blème pour la motivation des usagers à un bon entretien (l'entretien est supposé nécessaire pour que l'équipement fonctionne de façon optimale, ce qui ne sera pas le cas). Cela peut aussi provoquer des doutes dans les décisions de faire ou non appel à un réparateur dans le cas de "vraies" pannes.

4. Pour les pompes, le débit du point d'eau doit être suffisant pour supporter le débit maximal de la pompe

Il faut rappeler que les pompes solaires ont un débit de pointe à certaines heures de la journée (midi solaire), d'où l'importance de bien vérifier que le débit d'exploitation de l'ouvrage en toute saison soit au moins supérieur au débit de pompage requis.

Les générateurs de trop forte puissance seront rarement retenus puisqu'ils entrent en compétition avec d'autres énergies (diesel, éolien...) plus rentables à ces puissances là.

Il peut être instructif d'analyser les projets photovoltaïques déjà existants. Les expériences précédentes d'équipement photovoltaïque (au niveau de la région) doivent être recherchées, considérées et analysées pour déjouer les pièges et problèmes rencontrés par le passé. Elles doivent faire l'objet d'autant plus d'attention qu'elles auront constitué des échecs.

5. L'option photovoltaïque ne sera généralement envisagée que si les autres énergies (classiques et renouvelables) sont moins avantageuses

Sur le plan économique, le photovoltaïque rivalise parfois difficilement avec les énergies concurrentes. La raison du choix photovoltaïque est souvent due à l'excellente fiabilité et à la sécurité d'approvisionnement qu'il fournit. C'est pourquoi, lorsque la fiabilité technique d'une autre source d'énergie est assurée, celle-ci sera souvent préférée au solaire. Il faut également ajouter que le photovoltaïque nécessite une utilisation sur toute l'année afin d'être rentable (exemple des pompes de surface). Néanmoins devant la baisse lente, mais certaine, des prix du photovoltaïque, de plus en plus de types d'utilisations deviennent économiquement rentables.

6. Le service rendu par le photovoltaïque doit être égal, voire supérieur au service rendu par une autre source d'énergie

Il est illusoire de penser qu'en apportant un nouveau type d'énergie comme le photovoltaïque ou en changeant de type d'équipement (pompe solaire à la place d'une pompe diesel), la communauté opérera un changement d'habitude et d'attitude si le service rendu n'est pas le même (elle connaît souvent bien

les performances des systèmes diesel). Le degré de satisfaction par rapport à l'ancien système est une notion essentielle à considérer.

Etudes comparatives et critères techniques entre différentes énergies

On trouvera des études comparatives entre diverses sources d'énergies pour chaque type d'utilisation (éclairage, pompage, froid, télécommunication, recharge de batterie) dans la deuxième partie. Le tableau suivant effectue une synthèse pour pouvoir dégager les critères techniques qui permettront le choix de telle ou telle solution.

	Générateur photo-voltaïque	Générateur + moteur diesel	Aéro-générateur	Éolienne mécanique	Système hydro-électrique	Système à pétrole *	Système à gaz *	Système à énergie humaine et animale
Producteur d'électricité	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non
Domaines d'utilisation	Divers	Divers	Divers	Pompage	Divers	Éclairage froid cuisson	Éclairage froid cuisson	Pompage
Fiabilité	+++	++	+++	++	+++	+	+++	++
Astreinte de l'entretien de routine	+	+++	+	++	++	+++	+	+
Technicité de la maintenance	++	+	+++	++	+++	++	++	+
Gamme de production électrique*	< 20 kWh/j	pas de limite	< 2 400 kWh/j		< 24 000 kWh/j			
Pompage : débit (à 20 m HMT)	< 100 m ³ /j	sans limite	< 10 000 m ³ /j	10 à 60 m ³ /j	sans limite			< 15 m ³ /j
Rendement du système	+++	++	+++	++	+++	+	+	++
Durée de vie	10 à 15 ans	5 000 à 10 000 h	10 à 15 ans	10 ans	10 ans	5 ans	5 ans	5 ans

* Il s'agit de systèmes d'éclairage et de réfrigération.

Animation et formation

Outre les prestations de service classiques comme la vente, l'installation et la maintenance, il existe d'autres actions toutes aussi importantes à réaliser au niveau d'une communauté.

Sensibilisation, information et animation

Les actions de sensibilisation, d'information et d'animation sont indispensables avant le choix d'un équipement et son installation.

Avant même la formalisation d'un projet, il est nécessaire de rencontrer les futurs utilisateurs et de prendre le temps qu'il faut pour discuter avec eux. Il est entre autre important de détailler les avantages des systèmes solaires et surtout leurs inconvénients :

- on ne peut pas tout faire avec une installation photovoltaïque. Il est hors de question de brancher des appareils trop énergivores (climatiseur par exemple) ;
- l'utilisateur a un quota énergie par jour qui assure les besoins qui auront été définis avec lui au début du projet. Il est impossible de dépasser préalablement cette consommation sans risque d'arrêt du système (temporaire peut-être mais arrêt quand même) ;
- si ses besoins venaient à augmenter, il lui serait possible de développer son installation ;
- le photovoltaïque n'est pas gratuit. Il faut bien préciser les différents coûts (d'investissement et récurrents) et la participation obligée des utilisateurs ;
- certaines parties des systèmes photovoltaïques sont chères, complexes et demandent des compétences spéciales : c'est le cas de l'électronique et des batteries où toute intervention doit être faite par un spécialiste. Quant aux modules il faut préciser qu'ils sont en verre donc éventuellement cassables ;
- le confort d'utilisation n'est pas aussi bon qu'avec l'électricité classique.

La participation financière et éventuellement "physique" (réalisation du génie civil) des utilisateurs doit leur être présentée comme une contribution obligatoire. De même lorsque le comité de gestion sera fonctionnel, il aura à prendre en charge l'entretien de routine. Une fois toutes ces notions bien expliquées (souvent une seule rencontre ne suffit pas) l'utilisateur potentiel

sera en mesure de choisir s'il opte ou non pour le photovoltaïque. Mais si d'une part il faut qu'il ait des possibilités de choix, d'autre part il est indispensable d'appréhender l'intérêt de l'utilisateur et sa participation financière initiale.

Une autre étape d'animation sera le choix du système de recouvrement des coûts (vente au seau d'eau, abonnement pour la recharge de batterie...). Les usagers ou le comité devront choisir après avoir été pleinement informés des contraintes de chaque solution.

Après la décision des utilisateurs d'opter pour le solaire et tout au long du projet, il est important de continuer à former les responsables des groupes bénéficiaires. Des réunions périodiques permettront d'insister sur ce qui a déjà été expliqué mais n'a peut-être pas été totalement acquis et d'aborder les notions de gestion des équipements (entretien, exploitation économique...). L'échange d'expériences au cours de séminaires, l'utilisation de radio rurale, de télévision communautaire représentent des possibilités "attrayantes" de techniques d'animation.

Le principal point d'achoppement de ces actions de sensibilisation et d'animation reste leur financement. Même s'il est acquis aujourd'hui qu'un projet doit comporter un volet formation, ce dernier est trop souvent occulté par des contraintes de temps et d'argent.

Formation

Des actions de formation doivent être réalisées auprès des différents interlocuteurs (comité de gestion, usagers, responsable de l'entretien de routine et des réparations simples).

Elle doit être effectuée auprès de la communauté bénéficiaire en trois volets différents :

- formation à l'utilisation auprès des usagers ;
- formation à l'entretien de routine et aux réparations simples (petite maintenance) auprès des responsables nommés pour la supervision de l'installation ;
- formation à la gestion des équipements (principalement volet économique) auprès du comité de gestion.

Cette formation est souvent intégrée à des actions d'animation. Elle se différencie toutefois de celles-ci par un caractère d'enseignement plus formel où il s'agit d'apprendre des méthodes (d'utilisation, d'entretien, de gestion).

Les formations plus techniques (entretien et petite réparation) sont souvent les plus simples à assimiler pour les usagers alors que les processus de gestion sont beaucoup plus difficiles à faire passer. Les premières sont souvent réalisées par l'entrepreneur/installateur à la fin du chantier. Il est essentiel de prendre le temps nécessaire à ces enseignements (ce qui n'est pas toujours fait) et surtout de vérifier le niveau de compréhension des stagiaires. Il est également essentiel de dispenser des formations adéquates et adaptées au besoin (et non pas des formations standards souvent conçues pour d'autres contextes). A titre d'exemple les formations de l'OMS sur les réfrigérateurs solaires durent souvent de une à deux semaines et font appel à des enseignants spécialistes de la chaîne du froid et du photovoltaïque.

Il est souvent difficile de former des membres de communautés qui n'ont pas forcément une approche technologique et rationnelle du photovoltaïque. C'est pourquoi il est recommandé de s'entourer de professionnels de la formation et/ou d'utiliser des méthodes didactiques utilisant par exemple le dessin, la vidéo et la démonstration avec du matériel concret.

On peut citer parmi les organismes dotés de matériel pédagogique "photovoltaïque" :

- côté francophone : l'Ademe, l'Unesco ;
- côté anglophone : Intermediate Technology, Tools.

Comment financer un projet photovoltaïque

Ce chapitre concerne le financement d'un projet, des investissements et des moyens à mettre en oeuvre. Le financement des coûts récurrents a déjà été abordé précédemment.

LES INSTRUMENTS FINANCIERS

Les dons

La plupart des projets solaires ont jusqu'alors été financés de cette manière. La faible solvabilité des bénéficiaires et l'étroitesse du marché n'a pas permis de sortir réellement de cette logique du don pour les projets photovoltaïques.

Une formule intermédiaire, couramment utilisée aujourd'hui, repose sur une participation financière des bénéficiaires. Cette cotisation peut se faire soit sous forme monétaire, soit sous forme de ressources humaines (main-d'oeuvre pour la réalisation du génie civil). La participation financière des usagers est en moyenne de 15 à 30 % de l'investissement alors que la participation en travail est de plus en plus abandonnée au profit de la contribution financière car elle est compliquée à gérer et reste souvent symbolique.

Les subventions

La subvention peut être un outil de promotion du solaire. Dans la situation actuelle, la faible diffusion des équipements photovoltaïques rend leur coût relativement élevé et les organismes publics peuvent, par leur soutien, abaisser ces coûts au niveau qu'ils devraient atteindre lorsque la diffusion sera généralisée.

Cette subvention peut s'appliquer à tout achat d'un système solaire ; son montant dépend de la taille du générateur.

Ce système présente plusieurs intérêts :

- il aide à la diffusion commerciale du solaire ;
- il permet aux particuliers d'accéder plus facilement à cette technologie en dépit de son prix relativement élevé ;
- il permet enfin à l'organisme public qui subventionne de vérifier la qualité des devis, leur adéquation à la demande, le sérieux des propositions ainsi que la qualité des travaux effectués.

Le dispositif de subventionnement doit être partie prenante d'une politique globale de promotion des énergies renouvelables conçue et mise en place par une organisation ad hoc. En France, ce système est couramment appliqué dans les DOM/TOM par l'Ademe en collaboration avec les collectivités locales depuis le début des années 80 et en métropole plus récemment, en particulier dans le cadre de l'accord Ademe-EDF signé en 1994.

La vente commerciale classique

Lorsque les équipements sont commercialisés sur les marchés locaux, l'achat peut être financé en fonds propres par les utilisateurs. Cette possibilité est peu pratiquée du fait :

- des coûts relativement élevés des systèmes ;
- des revenus relativement faibles des utilisateurs potentiels (monde rural ou périurbain) ;
- de la méconnaissance des systèmes photovoltaïques de la part des usagers ;
- de la faible décentralisation des circuits commerciaux.

C'est pourquoi certaines techniques d'aide sont requises et certaines ont déjà été expérimentées avec succès. Il s'agit :

- des subventions à l'achat (voir ci-dessus). Exemple : DOM/TOM français ;
- une défiscalisation des produits photovoltaïques. Exemple : Cameroun, Sénégal, Mauritanie, DOM français ;
- l'utilisation de caisses d'épargne villageoises qui puissent fournir des crédits intéressants. Exemple : Sénégal, Rwanda, etc.

En réalité le crédit reste une des solutions obligées pour qu'un particulier puisse acquérir un système sans l'aide de subventions. Dans les régions où existe un certain niveau de vie ou une classe sociale suffisamment riche, la vente directe se rencontre toutefois pour les petits systèmes d'éclairage. C'est le cas par exemple de la Mauritanie où plusieurs centaines de kits d'éclairage/télévision ont été vendus par une société locale qui bénéficie de l'aide de l'État par le biais de l'exonération de taxes douanières.

LES FINANCEURS ET LEURS INSTRUMENTS FINANCIERS

Certains bailleurs de fonds se sont déjà clairement engagés dans le financement d'équipements photovoltaïques : l'Union européenne (Fonds européen de développement), la Banque mondiale, le ministère de la Coopération français, la Caisse française de développement, l'IEPF (Institut d'énergie des pays ayant en commun l'usage du français), etc. Le grand Programme Régional Solaire du FED/CILSS au Sahel (Fonds Européen de Développement / Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel) a largement contribué à démontrer la qualité des équipements. De nombreux bailleurs sont ainsi prêts à suivre ces choix techniques photovoltaïques malgré leurs coûts encore élevés. La manière dont sont conçues les actions, en particulier la question de la maintenance et de la gestion villageoise, sont des critères prépondérants et plus déterminants que le critère technique pour la faisabilité et la mise en oeuvre du photovoltaïque.

Généralement les grands organismes possèdent des bureaux dans chaque pays, où l'on peut s'adresser pour tester la possibilité d'un financement. Les aides d'État à l'État sont généralement intégrées dans des programmes géné-

raux de coopération bilatérale définis lors des "commissions mixtes". Toutefois, les ambassades disposent souvent de petits fonds souples, hors de ces cadres rigides.

Les bailleurs de fonds sont multiples. Dans la plupart des cas il sera nécessaire au porteur de projet d'obtenir un accord et un soutien du ministère local concerné. Ceci est un gage de cohérence avec la politique de l'État en matière d'aménagement du territoire et de maintenance. C'est à juste titre une condition exigée par les bailleurs de fonds internationaux.

DISPOSITIFS FINANCIERS D'AIDE À LA DIFFUSION DU PHOTOVOLTAÏQUE

Défiscalisation : le rôle primordial de l'Etat

L'Etat peut favoriser la diffusion des équipements solaires en établissant des conditions réglementaires et fiscales incitatives. Il s'agit principalement de réductions de taxes douanières ou éventuellement de baisse de la TVA. De façon idéale, il faudrait pour une période de démarrage que ces équipements puissent être vendus aux particuliers en hors taxes, comme cela se pratique par exemple au Sénégal, au Mali ou en Mauritanie. De façon pratique il serait au moins nécessaire que certains pays appliquent des taxes "raisonnables" sur ces produits (et non pas 65 % comme c'est le cas aujourd'hui dans certains pays).

Souvent la condition à une telle défiscalisation est la production locale d'équipements ; c'est le cas par exemple des modules en Inde ou du froid photovoltaïque au Zaïre. L'État incite les entreprises importatrices à fabriquer partiellement ou à monter certains éléments, notamment électroniques, dans leur pays.

Crédit : le rôle des dispositifs d'épargne / crédit

Le besoin de financement pour l'achat de matériels solaires est tout à fait spécifique et nouveau. Il est très différent des pratiques usuelles des banques, celles-ci agissent surtout en milieu urbain et conserve une maîtrise des crédits à court terme (2-3 ans au maximum) ; elles exigent aussi de solides garanties.

Le photovoltaïque quant à lui nécessite des crédits à long terme, offre peu de garanties tangibles et les projets sont éparpillés en milieu rural. De plus, les montants d'emprunt sont souvent trop faibles pour justifier un lourd système de recouvrement des crédits.

Cet écart entre l'offre et la demande de crédits n'interdit pas d'envisager la possibilité de mettre en place des dispositifs de financement spécifiques et adaptés sur mesure aux besoins. Les banques traditionnelles ont la possibilité d'investir ce nouveau créneau et doivent pour cela étudier des formes nouvelles d'intervention, en particulier en ce qui concerne le problème de la garantie des prêts et leur quasi absence en milieu rural. Une solution est par exemple de faire appel à des organisations relais intermédiaires qui assureront une partie du travail de recouvrement.

Un certain nombre d'initiatives pour aider le financement peuvent être imaginées, par exemple :

- le prêt bancaire normal, le prêt à taux bonifié, le prêt avec garantie d'un organisme tiers ;
- la location, la location-vente ;
- le crédit local, le crédit-vente, le leasing.

A chaque projet correspond une réponse différente et ceci en fonction du besoin, de la capacité financière des usagers, des dispositifs et des structures existants...

Une des recettes pour l'efficacité de ce type d'aide est la présence d'une structure financière décentralisée du genre caisse d'épargne ou caisse mutuelle d'épargne et de crédit. Il peut s'agir d'une réelle caisse d'épargne (villageoise ou autre) qui fonctionne déjà avec d'autres activités lucratives ou d'un système social de mise en commun des économies, comme par exemple les tontines en Afrique.

Ce type de structures peut aussi assurer la gestion de l'argent destiné au renouvellement des systèmes. En fait, c'est dans la multiplication des activités et des fonctions de service de cette structure de crédit que pourront être amortis ses coûts de présence sur le terrain et que résidera la viabilité du dispositif financier.

Annexes

1. Les différents types de batteries
2. Batteries : consignes de sécurité
3. Déterminer les ombres portées sur les modules
4. Principaux types d'électropompes
5. Exemples de réalisations de systèmes photovoltaïques
6. Exemples de financements et dispositifs financiers
7. Avantages et inconvénients des principaux emplacements pour les modules
8. Tour d'horizon des principaux actes de maintenance
9. Cartes mondiales de l'ensoleillement en janvier et juillet
10. Professionnels du photovoltaïque par activités
11. Professionnels du photovoltaïque par pays
12. Liste d'adresses
13. Bibliographie

Les différents types de batteries

Batteries au plomb étanches

- Faciles à transporter grâce à leur étanchéité (surtout en avion où les problèmes liés à la sécurité sont contraignants).
- Cyclage à 50 % de décharge : \approx 500 cycles.
- Prix de revient relativement faible (1,5 fois les batteries de voiture).
- Assez sensibles à la température.
- Très sensibles à la surcharge car toute évaporation d'hydrogène par la soupape de sécurité ne peut être compensée par ajout d'électrolyte (électrolyte gélifié).

Batteries au plomb à plaques planes minces (batterie de démarrage)

- Ce sont les batteries classiques de voiture.
- Ne peuvent pas accepter de décharge profonde (50 % maximum) du fait de la minceur des plaques.
- Autodécharge importante.
- Les moins chères (fabriquées en grandes séries).
- Plus adaptées à la décharge rapide qu'à la décharge lente (batterie de démarrage), donc techniquement peu adaptées au solaire.

Destinées aux voitures, elles sont parfois utilisées en solaire dans les pays en développement, du fait de leur grande diffusion (pour les stations communautaires de recharge de batterie par exemple).

Batteries au plomb à plaques planes épaisses

- Résistent beaucoup mieux que les précédentes à la décharge profonde du fait de leur conception (jusqu'à 80 %), ceci toutefois de façon accidentelle.
- Cyclage à 50 % de décharge : 1000 cycles.
- Plus chères que les précédentes (3 fois environ).
- Assez bien adaptées à la décharge lente (batterie de traction).

Ce sont les batteries des véhicules électriques (chariot élévateur). Elles sont toutefois utilisées en solaire dans le cas où les batteries à plaques tubulaires qui équipent habituellement les systèmes photovoltaïques sont économiquement inabordables.

Batteries à plaques tubulaires

- Cyclage à 50 % de décharge : $\approx 2\,000$ cycles.
- Cyclage à 20 % de décharge : $\approx 4\,000$ cycles.
- Décharge accidentelle admise à 80 % de la capacité.
- Faible taux d'autodécharge.
- Disponibilité moindre et prix élevé : environ 5 fois supérieur à celui des batteries de voiture.
- Grande réserve d'électrolyte qui permet un entretien moins fréquent.
- Espace important au fond de la batterie sous les plaques pour que la décomposition du plomb ne produisent pas de court-circuit intérieur.

Ces batteries appartiennent à la catégorie des batteries dites stationnaires. Elles sont conçues pour subir une faible décharge (décharge quotidienne de $\cong 20\%$ de leur capacité) et fonctionner à faible courant de charge et de décharge (C_{20} à C_{100}). Ce sont les batteries typiques des grosses installations photovoltaïques car elles sont particulièrement adaptées aux contraintes de la

demande solaire : nombre de cycle important, décharge faible et lente en raison des faibles courants utilisés, décharge profonde accidentelle, surcharge exceptionnelle.

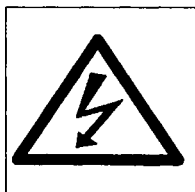
Batteries étanches au cadmium-nickel

- Acceptent sans problème des décharges profondes (100 %) que l'on recommande même de réaliser périodiquement.
- Prix de revient très élevé (environ 10 fois supérieur à celui des batteries de voiture).
- Très sensibles à la température (la capacité diminue quand la température augmente).

Elles sont plus rarement utilisées sur les systèmes photovoltaïques car elles sont chères, sauf pour les stations communautaires de recharge de petits accumulateurs (usage domestique pour la radio en remplacement des piles jetables).

Consignes de sécurité

PANNEAUX SOLAIRES



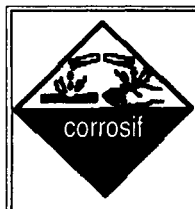
Les modules photovoltaïques peuvent provoquer une décharge électrique. Avant toute intervention au niveau des panneaux solaires :

- couvrir les panneaux d'un drap ou d'un tissu ;
- utiliser des outils isolants.

ACCUMULATEURS

La batterie d'accumulateurs est le composant le plus dangereux de l'installation. Il est impératif de respecter les consignes de sécurité.

1) La batterie contient de l'acide qui peut brûler la peau ou provoquer la cécité lorsqu'il entre en contact avec les yeux :



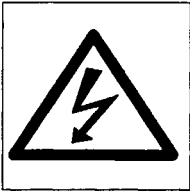
- éviter, durant les manipulations, de renverser l'acide de la batterie ;
- maintenir toujours la batterie en position verticale ;
- utiliser toujours un entonnoir pour remplir la batterie ou ajouter de l'eau distillée ;
- ne pas laisser la batterie à la portée des enfants.

2) La batterie dégage des gaz explosifs :



- le local où est installé la batterie doit être ventilé ;
- ne jamais approcher la batterie avec une flamme ou une cigarette allumée.

3) En cas de court circuit, la batterie peut débiter un courant très élevé :



- avant toute intervention électrique sur le générateur solaire, débrancher impérativement les câbles des bornes de la batterie ;
- éviter tout contact électrique entre deux fils ou deux cosses de couleurs différentes ;
- faire attention lors du montage ou du démontage des cosses à ce que la clé ne touche pas deux bornes de polarités opposées ;
- utiliser des outils isolés.

PREMIER SECOURS



- Si de l'acide vous a giclé dans l'oeil, lavez-le tout de suite abondamment à l'eau propre et consultez un médecin.
- Si de l'acide a touché votre peau, lavez toute de suite à l'eau et au savon.

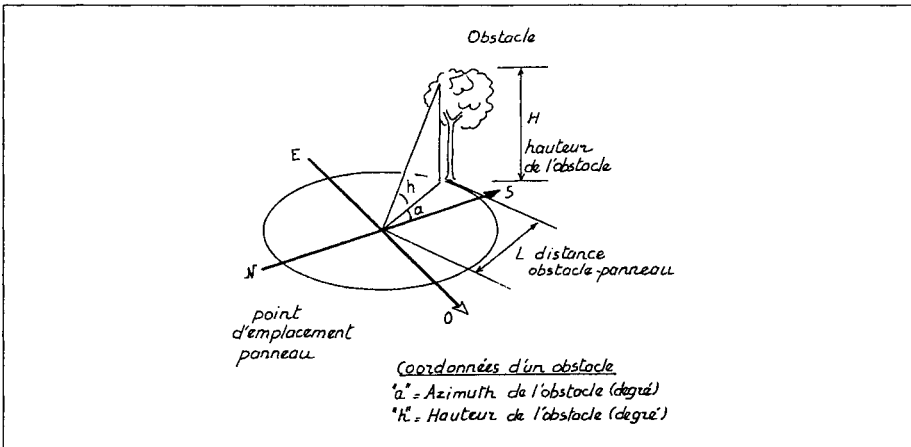
Déterminer les ombres portées sur les modules PV

Il s'agit d'identifier les obstacles susceptibles de porter une ombre sur le panneau solaire entre 8h00 et 16h00 (heure solaire). Pour cela, on identifie chaque obstacle et on vérifie si cet obstacle risque de gêner le panneau à une quelconque saison de l'année. Il existe une méthode de vérification des ombres portées :

Il faut d'abord :

- mesurer la distance "L" qui sépare panneau et obstacle ;
- mesurer ou estimer la hauteur "H" de l'obstacle ;
- mesurer l'angle "a" qui situe la position de l'obstacle par rapport à l'axe nord-sud (azimut).

Calcul de l'ombre projetée par un obstacle



Ensuite il faut reporter ces données sur le graphe ci-dessous dans l'ordre suivant (sens des aiguilles d'une montre) :

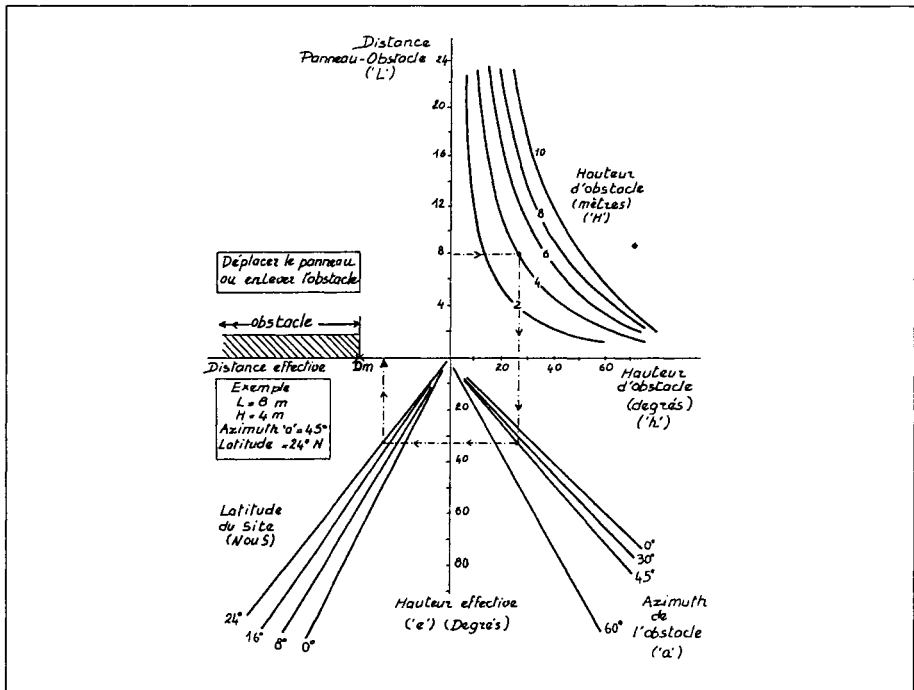
- positionner la distance «L» et la hauteur «H» pour déterminer la hauteur en degré "h" ;
- à partir du positionnement de cette valeur "h" et de celle de l'azimut "a" déterminer la hauteur effective "e" ;
- à partir du positionnement de cette valeur "e" et de celle de la latitude déterminer la distance effective "D".

Si cette distance effective "D" est inférieure à "Dm" l'obstacle en question n'est pas gênant.

Si, au contraire, $D > D_m$ (partie hachurée) alors l'obstacle est gênant : il faut déplacer le panneau ou supprimer l'obstacle.

Ne pas oublier que les arbres poussent avec le temps et que les modules ont une durée de vie importante. Attention, l'occultation d'un panneau solaire peut provenir d'une autre rangée de modules placée à proximité.

Abaque pour la recherche des masques

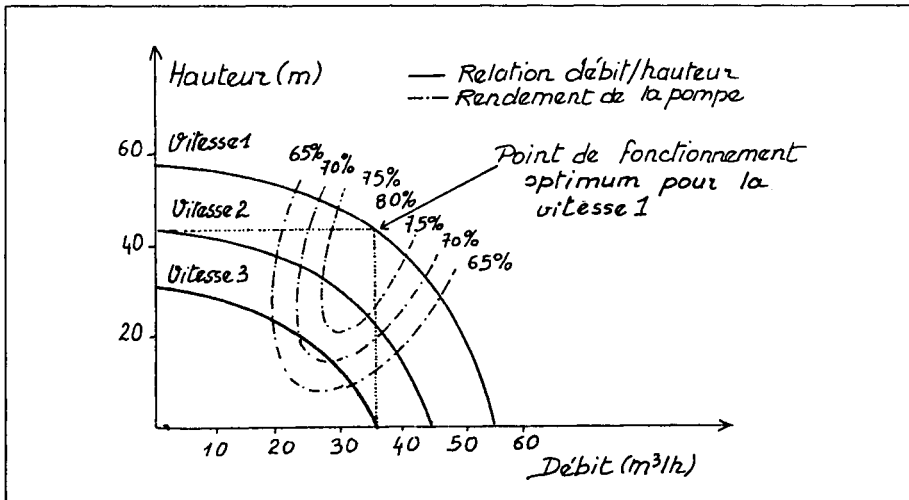


Principaux types d'électropompes

Éléments caractéristiques d'une électropompe :

- le débit Q qu'elle peut fournir (en m^3/h ou l/mn) ;
- la hauteur manométrique (HMT) pour laquelle elle est conçue (en m) ;
- la puissance absorbée (W) ;
- le rendement.

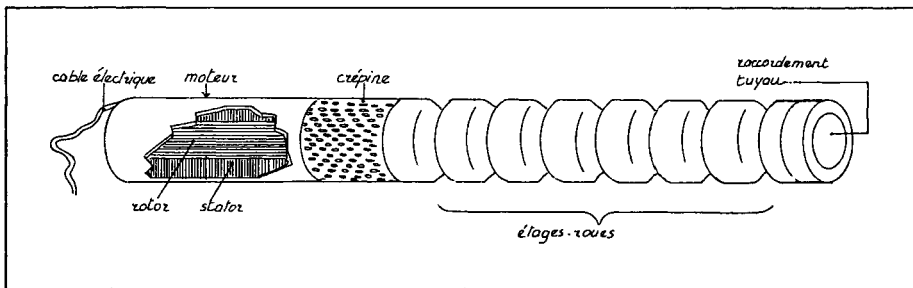
Courbes débit / hauteur typiques d'une électropompe



Type 1 : les électropompes centrifuges immergées

Le moteur est accouplé à une pompe centrifuge multicellulaire (à plusieurs roues) afin d'obtenir la hauteur de pompage requise. Le nombre de cellules est directement proportionnel à la HMT. Le moteur est à courant alternatif ou à courant continu à commutation électronique.

Electropompe centrifuge immergée



Filière "moteur à courant alternatif" (type 1)

Le rotor du moteur tourne dans un liquide qui assure la lubrification. Tous les bobinages sont coulés dans de la résine. Cette technologie très fiable a été éprouvée depuis de nombreuses années dans la plupart des applications de pompage immergé traditionnelles. Pour les applications solaires, les moteurs sont conçus selon le même principe mais leurs performances sont très nettement optimisées. Le moteur est alimenté par un onduleur à puissance et fréquence variables afin de s'adapter à tout moment à la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque.

La gamme d'électropompes utilisables avec le photovoltaïque couvre des hauteurs manométriques jusqu'à 120 m et des débits jusqu'à 20-25 m³/h pour de faibles profondeurs.

Le rendement du groupe électropompe est fonction de la puissance du moteur et du débit de la pompe :

- rendement moteur : de 70 à 85 % selon la puissance ;
- rendement pompe : de 60 à 75 % selon le débit.

Le rendement du groupe évolue également en fonction de l'énergie délivrée par les modules photovoltaïques. La durée de vie d'un groupe électropompe

est estimée à 7 ans. Les électropompes triphasées sont préférables aux monophasées pour des raisons de pertes électriques moindres dans les lignes.

Ce type d'électropompe immergée est le plus utilisé à ce jour pour le photovoltaïque. Il y en a déjà plusieurs milliers installés dans le monde. Leur excellente fiabilité fait que de nombreuses électropompes immergées à courant alternatif n'ont pas eu besoin d'être remontées à la surface même pour entretien pendant des années.

Filière "moteur à courant continu à commutation électronique" (type 1)

C'est un moteur à aimant permanent sur le rotor et où la commutation est effectuée par un circuit électronique. Le problème des balais est ainsi résolu. Filière prometteuse il y a quelques années, elle n'a toujours pas débouché sur des produits réellement industrialisés. Certains fabricants continuent toutefois, avec l'augmentation de la diffusion de ce type de moteurs, la mise au point de cette électropompe immergée à courant continu. Affaire à suivre...

Type 2 : les électropompes volumétriques immergées

La partie hydraulique est une pompe volumétrique à piston (un ou plusieurs pistons). Le moteur est le plus souvent à courant continu à balais. La transmission entre les deux parties est souvent réalisée par un excentrique. Ces électropompes présentent l'avantage de posséder une membrane isolant la pompe du passage de l'eau. De ce fait, le moteur et toutes les pièces mécaniques sont totalement isolées de l'eau.

Elles sont utilisées pour de faibles débits (jusqu'à 500 l/h à faible profondeur) mais peuvent fonctionner jusqu'à des hauteurs manométriques de 70 m. Le changement des balais reste là aussi une contrainte majeure qui entrave l'utilisation de ces pompes.

C'est une des seules électropompes immergées à usage individuel qui soit actuellement assez largement commercialisée. Cependant les faibles informations sur l'évaluation de leur utilisation sur le terrain ne permettent pas de tirer de conclusions sur sa fiabilité à long terme.

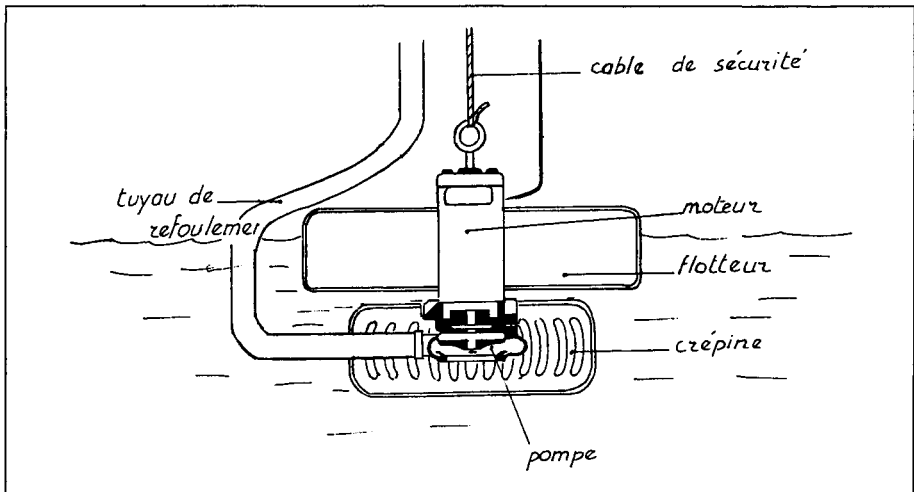
Le couple de démarrage de ces pompes volumétriques impose que leur alimentation se fasse à partir d'une batterie, par exemple celle qui fournit l'énergie pour les autres applications d'une maison (éclairage). Il est toutefois éga-

lement possible d'alimenter ces pompes par l'intermédiaire d'un adaptateur d'impédance directement à partir du générateur photovoltaïque, sans l'intermédiaire d'une batterie.

Type 3 : les électropompes centrifuges flottantes

Le groupe électropompe est installé sur un flotteur ou un radeau. Seule l'hydraulique, mono ou multicellulaire est immergée. Le moteur, à courant continu et à aimants permanents, est placé au-dessus de la ligne de flottaison.

Pompe centrifuge flottante



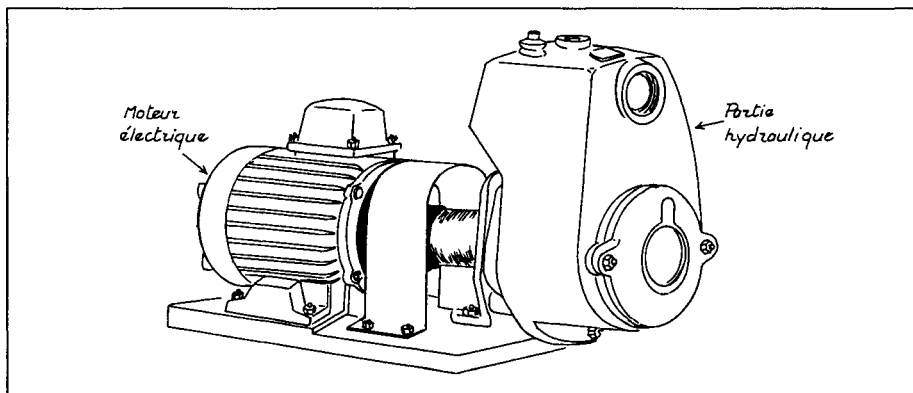
Ce type d'électropompe est étudié pour des hauteurs manométriques totales (HMT) faibles ou moyennes, de 5 à 15 mètres. Il peut atteindre 40 m³/h de débit en ce qui concerne l'usage photovoltaïque. Le rendement de ce type d'électropompe est de l'ordre de 50 à 70 % et sa durée de vie est estimée à 10 ans. Ces moteurs nécessitent un changement périodique des balais (2 à 3 ans). L'opération est relativement facile car le moteur est accessible en surface.

Bien que simples de conception, ces groupes de pompage n'ont pas bénéficié d'un développement comparable à celui des groupes électropompes immergés à courant alternatif. Aussi, beaucoup de systèmes de pompage flottant utilisent des groupes immergés suspendus sous les flotteurs afin de bénéficier de matériels de plus grande fiabilité.

Type 4 : les électropompes de surface à poste fixe

Par rapport aux électropompes flottantes, les électropompes appelées ici "de surface" sont entièrement placées en dehors de l'eau (pompe et moteur). La partie hydraulique de ces électropompes est composée soit d'une pompe centrifuge monocellulaire (1 seul étage), soit d'une pompe volumétrique à piston (ou à membrane). Quant à la partie électrique elle est constituée d'un moteur à courant continu.

Pompe de surface à poste fixe



Les débits varient, suivant les modèles, de quelques dizaines de litres par heure à quelques dizaines de m³ par heure. Ce type d'électropompe ne peut techniquement pas fonctionner quand la hauteur d'aspiration est supérieure à 7 mètres. La hauteur de refoulement peut atteindre 50 mètres. Le moteur est identique à celui du type 3 : les électropompes centrifuges flottantes.

Les modèles de faible puissance, sont assez largement diffusés ; ils sont en général auto-amorçables. Les modèles de plus forte puissance ont en revanche besoin d'être amorcés par remplissage de la colonne d'eau. La présence d'un clapet de pied (clapet anti-retour) est nécessaire pour éviter que la colonne ne se vide à l'arrêt de la pompe.

Exemples de réalisations de systèmes photovoltaïques

ÉCLAIRAGE

L'éclairage est l'application du photovoltaïque la plus importante à ce jour avec plusieurs dizaines de milliers de systèmes installés à travers le monde. Nous allons étudier, pour illustrer ce sujet, deux cas : l'électrification des îles en Polynésie française et la diffusion de kits au Sénégal.

Polynésie française : l'électrification des îles

Conçu initialement en 1980 comme un projet commercial de diffusion (vente locale des produits et de régulateurs), ce projet bénéficiait cependant de subventions. Il a ensuite évolué vers une prise en charge totale par l'administration, les attributaires recevant gratuitement les installations. Le projet a donc diffusé un grand nombre de générateurs photovoltaïques.

En ce qui concerne la responsabilisation des utilisateurs, le succès fut nettement moins évident comme le montrèrent les difficultés de prise en charge lors des remplacements de batteries, qui constituent une dépense élevée. Suite à la privatisation en 92 du GIE Soler et grâce à l'action de la nouvelle entreprise Soler Energie, un programme de réhabilitation a remis à niveau les installations viables. Des contrats de maintenance sont aujourd'hui signés avec certaines communes ce qui permet, quinze ans après les premières installations, d'envisager sereinement la pérennisation des équipements solaires.

Sénégal : diffusion de kits photovoltaïques (projet sénégal-allemand)

Appelés systèmes photovoltaïques familiaux (SPF), ces kits comprennent 1 module 50 Wc, 1 régulateur de charge, 1 batterie de 50 Ah, 4 ampoules incandescentes de 10 W avec abat-jour et une prise à 2 sorties 12V/9V ou 12V/6V pour l'audiovisuel.

Le projet a été conduit en 3 phases :

Les SPF ont été donnés à des associations paysannes avec comme objectif la vente et l'achat de nouveaux systèmes.

- Pendant une période-test les SPF ont été vendus 3 000 FF avec possibilité de crédit sur 5 ans (apport de 600 FF et 4 annualités de 600 FF). Le transport et l'installation ont été supportés par le projet.
- Pendant une période de vulgarisation, les SPF ont été vendus entre 3 300 FF et 3 900 FF, ce qui permettait de couvrir les frais d'installation et certains frais de gestion de l'association. Le crédit a été ensuite ramené à 3 ans.

Une enquête a été réalisée après 2 ans d'expérience auprès de 50 ménages. Elle fournit les conclusions suivantes :

- usagers type : l'enquête a montré qu'il s'agissait essentiellement de foyers à revenus élevés ;
- utilisation pour l'éclairage : la consommation correspond aux 2/3 de la production des SPF ;
- presque 50 % des usagers ont rajouté une ou plusieurs lampes ;
- état des systèmes : 64 % des modules sont posés sur le toit, 68 % des modules sont mal nettoyés ;
- 10 % des systèmes comportent quelques signes de détérioration (prises, interrupteurs détachés).
- fréquence de pannes et de coupures : 1 à 2 pannes par système pendant les 2 ans ont été relevées. Les pannes sont en général mineures (fusible, ampoule) bien que les pannes de batteries disposées à l'extérieur (sous le panneau) soient fréquentes. Deux interruptions par an en moyenne de fourniture d'électricité (manque d'ensoleillement, surconsommation).

Appréciation des usagers

78 % des ménages disent que "ces systèmes procurent des avantages financiers" et près des 3/4 lui accordent une "amélioration du confort et de la commodité". Une large majorité (86 %) regrettent le "nombre de lampes trop faible".

Comparativement aux lampes-tempête les usagers sont très satisfaits. Les tubes fluorescents sont aussi très appréciés pour leur qualité d'éclairage (72 % seraient intéressés).

Amortissement du système : pour un prix de 3 700 FF le système est amorti en 13 ans tout remplacement compris (batterie, régulateur, ampoules) pour des ménages à revenu modéré.

Ce même système est amorti en 5 ans pour des ménages à revenu élevé en raison d'une plus forte consommation d'énergie.

Quoiqu'il en soit, avec une durée de vie estimée à 15 ans, les SPF sont économiquement fiables et apportent une amélioration du confort non négligeable.

SYSTÈMES DE POMPAGE

En terme de projets collectifs, le pompage photovoltaïque regroupe aujourd'hui quelques-uns des grands programmes solaires financés et soutenus par la communauté internationale. Nous allons étudier 3 cas : le Mali avec ses presque 20 années d'expérience, l'Inde et la diffusion du photovoltaïque dans ce pays et le Sahel avec le Programme Régional Solaire (PRS).

Le Mali : bilan d'une expérience de treize années

L'expérience malienne porte sur près de 200 pompes photovoltaïques installées entre 1977 et 1990. Ces pompes ont principalement été installées sur des forages destinées à l'hydraulique villageoise. Le nombre d'échantillons et la standardisation des équipements a permis de faire une analyse assez fine de la situation et du comportement des systèmes. L'organisation technique de

maintenance décrite ici (la CEES) n'existe cependant plus aujourd'hui pour des raisons budgétaires. Il reste que les acquis techniques et organisationnels peuvent servir de référence, sans oublier les éternelles exigences de pérennité qui ont fait défaut dans le cas du Mali.

D'un point de vue technique, on a constaté une bonne tenue du matériel solaire installé dont la fiabilité est largement supérieure à celle des groupes électrogènes. Toutes interventions confondues, on comptait une réparation toutes les 2,4 années. Cette fiabilité ne doit pas faire oublier la nécessité de disposer d'équipes compétentes pour assurer l'entretien et les éventuels dépannages. Si le pompage solaire ne nécessite pas forcément d'interventions régulières, fréquentes et coûteuses, le dépannage des équipements reste un impératif d'autant plus grand que les investissements sont élevés et ne se justifient que sur des périodes de 10 à 15 ans.

Au Mali, l'installation et l'entretien des équipements était assuré par la Cellule d'entretien des équipements solaires (CEES), organe de l'administration, qui était organisée en trois équipes d'intervention dotées de moyens propres et coordonnées par une cellule centrale basée à Bamako. Une telle cellule a besoin d'un appui financier extérieur pour survivre. La CEES était financée par les bailleurs extérieurs et par l'État. Dans le contexte de resserrement des dépenses de l'État et de privatisation du secteur public engendré par le plan d'ajustement structurel, ce service n'a pas survécu. Le nombre assez important de pompes installées permet d'envisager une maintenance privée à un coût abordable.

La clé du succès de tout projet de pompage passe par une prise en charge des coûts réels par les utilisateurs. Ces derniers ont été de plus en plus associés au processus d'installation de la pompe et ont participé financièrement aux investissements (à hauteur de 20 000 à 50 000 FF suivant les cas, soit 10 à 20 % du total).

Des exemples réels montrent que le coût de l'eau solaire varie de 1,4 à 3 FF/m³ suivant les puissances (à 20 m de HMT). Ce coût est tout à fait comparable au coût de l'eau pompée avec une motopompe à moteur thermique diesel pour des volumes d'eau inférieurs à 100 m³/j à 20 m (ce qui correspond à un générateur photovoltaïque d'une puissance d'environ 3 000 Wc).

Le pompage de surface reste quant à lui limité aux puissances de 300 à 3 000 Wc, soit des surfaces irrigables de 0,3 à 3 hectares environ.

Les pompes solaires sur forage continuent à être diffusées au Mali (entre autres avec le PRS). Par contre, les pompes de surface ont moins de chance aujourd'hui de se développer au Mali compte tenu des prix actuels inacces-

sibles aux petits exploitants. En effet, le maraîchage est souvent privé et individuel.

L'effort de formation des utilisateurs est à renforcer pour que la gestion des pompes soit plus rigoureuse et que la valorisation de l'eau permette la constitution d'une provision pour le renouvellement de la pompe.

Il apparaît que les besoins ne se limitent pas au problème de l'eau. Il serait donc nécessaire de développer une approche photovoltaïque plus globale (éclairage, recharge de batterie).

L'Inde : pompage photovoltaïque et diffusion du solaire

L'Inde rassemble aujourd'hui, avec plus de 500 systèmes, le plus grand nombre de pompes solaires installées dans un pays. L'utilisation en est principalement l'alimentation des villages en eau potable. Des études de terrain ont montré une large acceptation de la part des utilisateurs.

Les modules et les systèmes ont été fabriqués en Inde par la société CEL (Central Electronics Ltd). Le marché du photovoltaïque est tel aujourd'hui en Inde que d'autres sociétés ont emboîté le pas. BHEL (Bharat Heavy Electricals Ltd), REIL (Rajasthan Electronics & Instruments Ltd) et Tata-BP Solar & Suryovonics ont également commencé la production de systèmes photovoltaïques. La production de produits photovoltaïques dans des pays à niveau technologique moyen (comme l'Inde par exemple) est une expérience intéressante à suivre, surtout en ce qui concerne la maîtrise technologique locale de la filière solaire.

Le Sahel : Programme régional solaire (PRS)

Le PRS concerne les 9 pays membres du Comité inter-Etats de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS), c'est-à-dire : le Burkina Faso, le Cap-Vert, la Gambie, la Guinée-Bissau, le Mali, la Mauritanie, le Niger, le Sénégal et le Tchad.

Ce programme qui a démarré en 1991 visait initialement, par l'installation d'un millier de pompes solaires et de 600 systèmes communautaires photovoltaïques, d'une part à apporter un service à ses bénéficiaires directs et

d'autre part à mettre en place un ensemble de conditions pérennisant l'utilisation du photovoltaïque :

- ce dispositif s'appuie sur des entreprises privées solides et viables et une gestion villageoise rigoureuse qui collecte des fonds suffisants par la vente de l'eau, pour assurer la maintenance et le renouvellement des équipements ;

- un service après-vente efficace (représentation dans le pays du fabricant des systèmes fournis, stock de pièces détachées, garantie des équipements pendant 5 ans, intervention dans les 48 heures par une compagnie locale) ;

- coûts de fonctionnement supportés par les bénéficiaires (salaire du gardien, paiement du contrat de maintenance, paiement de pièces en panne à l'exception des modules pris en charge par l'Etat) ainsi que la constitution de provisions pour le renouvellement du matériel ;

- contribution initiale de la part des utilisateurs. Elle permet de couvrir d'éventuels problèmes ;

- choix de zones de concentration afin de diminuer les coûts de maintenance. Le PRS veut enfin que s'établissent à travers ce programme des relations de base entre les communautés villageoises, les opérateurs privées et les financeurs. La critique sur les échecs des projets photovoltaïques s'est toujours focalisée sur les points suivants :

- non-implication des populations ;

- discordance entre la technologie introduite et le contexte socioculturel ;

- technologie trop sophistiquée en regard des conditions de l'environnement ;

- non-vérité des coûts.

Le PRS a tenté d'apporter une réponse à tous ces problèmes dans son approche opérationnelle et les résultats obtenus offrent un exemple de méthodologie à suivre.

SYSTÈMES DE PRODUCTION DE FROID

Il faut préciser que l'expérience actuelle sur les réfrigérateurs solaires provient essentiellement de l'effort que l'OMS a consacré à la diffusion de ces appareils avec le soutien financier de l'Unicef.

Le Zaïre : producteur et utilisateur

La situation difficile rencontrée au Zaïre ces dernières années ne permet pas de connaître la situation du parc photovoltaïque actuel. Toutefois, en 1992, les réfrigérateurs solaires couvraient 38 % des réfrigérateurs à vaccins dans les centres de santé du pays. Une partie de ces réfrigérateurs (100/294) faisaient partie d'un programme d'équipement du département de santé publique et des affaires sociales du Zaïre financièrement supporté par l'Union européenne.

Les réactions des utilisateurs étaient bonnes, les systèmes démontrant une bien meilleure fiabilité que les réfrigérateurs à pétrole. Des évaluations réalisées se sont avérées encourageantes. Un tel essor du solaire était basé sur la présence d'une société locale : la FNMA, qui produisait les systèmes à partir de certains éléments importés comme les modules, les compresseurs et les batteries. Ceci permettait d'avoir le fabricant "sous la main" donc de pallier plus facilement différents problèmes et de réduire les coûts, de transport en particulier.

L'Ouganda : une expérience et un suivi de plus de cinq ans

A partir de 1986, l'Ouganda a intégré l'installation de réfrigérateurs solaires dans son programme national de vaccination (Unepi). L'expérience est intéressante puisqu'elle mettait en comparaison réfrigérateurs à gaz et réfrigérateurs solaires. Le problème de l'Ouganda, pays non producteur de pétrole, résidait dans sa dépendance énergétique complète à l'égard de son voisin le Kenya (vente et circuit d'approvisionnement). Les troubles entre les deux pays ont conduit plusieurs fois à des ruptures de fourniture de gaz entraînant des ruptures dans la chaîne de froid. Ce fut une des raisons de la diffusion massive des réfrigérateurs solaires.

Cette expérience a permis de démontrer que si la sélection d'appareils normalisés est respectée, si l'installation est réalisée dans les "règles de l'art" et si les utilisateurs et les techniciens sont bien formés, alors les réfrigérateurs peuvent être considérés comme très fiables.

D'un point de vue économique, l'expérience ougandaise a permis de démontrer que la solution solaire reste deux fois plus chère que la solution gaz (étude sur une base annuelle du coût total pour une durée de vie de 10 ans). Elle a permis d'évaluer les coûts de fonctionnement du solaire (35 % du coût total sur 10 ans). Dire que "le solaire ne coûte quasiment rien après l'achat" ne doit plus être un argument pour le choix.

Pendant, dans ce cas précis, seule la solution solaire a permis de conserver la pérennité de la chaîne du froid et d'éviter les ruptures dues au manque de combustible. De ce point de vue, elle est donc la seule valable. L'intérêt économique, ici en faveur du gaz, est toutefois à considérer globalement et sur de longues périodes de temps (10 ans). L'intérêt à court terme ne doit pas, dans le domaine de la santé, faire oublier les considérations stratégiques à long terme.

Une des solutions pour rentabiliser un peu plus le photovoltaïque serait d'ajouter d'autres utilisations de l'électricité produite dans les centres de santé (éclairage, charge de batterie).

Papouasie - Nouvelle Guinée : un exemple à ne pas suivre

Un nombre inconnu de réfrigérateurs solaires (sans doute plus de 60 déjà installés) sont actuellement utilisés en Papouasie – Nouvelle Guinée.

Dans ce programme, réalisé avec peu de coordination avec les services de vaccination, aucune des recommandations de l'OMS/Unicef n'ont été suivies. La plupart des réfrigérateurs n'ont jamais été testés indépendamment et ne répondent pas aux exigences du programme élargi de vaccination.

La qualité des installations est très médiocre, aucune formation n'a été dispensée aux utilisateurs et aucun système de maintenance n'a été envisagé.

RÉALISATIONS EN TÉLÉCOMMUNICATIONS

Les communications radio entre missions : l'exemple des organisations humanitaires

Dès les débuts des années 80, les organisations humanitaires utilisèrent pour leur logistique des radios HF qui leur permettaient de communiquer avec la capitale à partir des missions très reculées. Au commencement l'alimentation électrique fut réalisée avec la batterie des véhicules. Il en résulta à cette époque de mauvaises qualités de transmission, un changement trop fréquent des batteries et de lourdes manipulations. Très rapidement la solution solaire fut testée et adoptée. Elle permit outre l'émission radio quotidienne de générer un peu d'éclairage. Le générateur photovoltaïque adopté (et qui le reste toujours) a une puissance de 50 Wc et une batterie étanche de 60 Ah. En raison du faible niveau des techniciens sur le terrain, la version kit (avec fiche détrompée pour éviter les inversions) reste le meilleur modèle à l'installation.

Les transmissions à l'échelle d'un pays : l'exemples des grandes compagnies de téléphone

Toute la téléphonie rurale, et en particulier l'alimentation des faisceaux hertziens, se fait à base de photovoltaïque dans les pays en développement (Burkina, Côte d'Ivoire, Afrique du Sud, Colombie, ...). Ce sont des milliers de stations photovoltaïques qui sont ainsi installées. Ces installations ont prouvé la grande fiabilité et l'intérêt économique du photovoltaïque dans les télécommunications.

Les balises de navigation aérienne

Les balises au sol pour la navigation aérienne (les VOR) ont besoin d'une fiabilité maximale puisque la sécurité des avions dépend de leur bon fonctionnement. Afin d'éviter toute perturbation électromagnétique, les balises sont généralement installées en zone isolée. Aujourd'hui elles sont alimentées par panneaux photovoltaïques. Une des raisons essentielle de ce choix est d'éviter d'installer une ligne électrique qui constitue un excellent conducteur de foudre et entraîne de ce fait des dégâts occasionnels. Le photovoltaïque apporte dans ce cas une solution doublement satisfaisante.

RECHARGE DE BATTERIES

L'exemples des services de santé zairois

Afin de recouvrir certains frais de fonctionnement et d'entretien des équipements du programme de vaccination, le Zaïre a mis en place en 1990 des stations de recharge d'accumulateurs dans les dispensaires. La vente aux particuliers de ces recharges de batteries doit permettre de générer quelques revenus. L'idée de départ était de consacrer un faible pourcentage de l'investissement initial en matériel solaire (les réfrigérateurs solaires) pour ces systèmes de recharge d'accumulateurs afin de générer un revenu régulier pour le dispensaire.

Ce projet a mis en place 2 chargeurs de batterie de voiture (180 et 360 Wc) et 1 chargeur d'accumulateurs Cd/Ni (45 Wc) par dispensaire. Le principe étant la vente ou la location des piles rechargeables. Quant à la recharge des batteries plomb, il s'agit de batteries appartenant aux usagers. Il a également permis l'installation d'un système de vidéo/télévision communautaire.

La gestion est effectuée par une personne employée à plein temps.

Bilan après six mois de fonctionnement

Le système semble très difficile à gérer pour le chargeur de piles rechargeables, les piles sont parfois égarées ou non payées. Il y a un manque de formation auprès des usagers et du responsable. Enfin malgré les prix compétitifs, un nombre relativement faible de recharges est vendu.

Pour les chargeurs de batteries : le fonctionnement technique est bon. Il y a une forte demande (utilisation quasi permanente des chargeurs). Ce système a suscité des achats de batteries au sein de la population.

Conclusions

Des études de faisabilité économique ont confirmé que les chargeurs de batteries pouvaient dégager des profits non négligeables (ainsi que la télévision communautaire). Il n'en est pas de même pour les chargeurs d'accumulateurs.

Le bon fonctionnement de ces systèmes implique cependant :

- une parfaite maîtrise technique des appareils de la part du responsable ;
- la proximité d'un technicien de maintenance compétent ;
- une bonne réaction face aux aléas économiques (pannes, inflation).

Il semble que de tels équipements puissent être considérés comme de réels appuis financiers pour le fonctionnement de petites structures (centre de santé, école). Toutefois le problème de gestion reste un point difficile à résoudre.

CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE

Une expérience au Sénégal

Cet exemple est le même que celui de l'étude économique précédemment réalisée dans ce chapitre.

Historique

Deux centrales photovoltaïques ont été installées dans deux villages sénégalais en 1989 et 1990 :

- à Diaoule (1 500 habitants) avec une puissance installée de 21,5 kWc ;
- à Ndiebel (1 600 habitants) avec une puissance installée de 18,0 kWc.

Le nombre de ménages abonnés est respectivement de 193 et 215 (ce qui correspond à la quasi totalité des ménages).

La capacité moyenne de production journalière est respectivement de 70 et de 58 kWh/j. Le réseau mis en place dans les deux cas comprend 7 km de ligne électrique et véhicule du 220 V AC monophasé.

Bilan et conclusions

La solution centrale photovoltaïque n'est économiquement pas rentable par rapport à la solution diesel (18,16 FF par rapport à 12,48 FF). Par contre elle l'est par rapport à la solution raccordement réseau (18,16 FF par rapport à 21,66 FF) mais de façon trop faible pour adopter le solaire.

Il s'avère en fait qu'il n'est pas intéressant, dans ce contexte rural africain et en l'état actuel de la technique et des coûts, de concentrer la production d'énergie solaire. Quant à la qualité du service, il est trop tôt pour vraiment se prononcer, l'avenir nous donnera de plus amples renseignements. Ces expériences méritent d'être suivies dans la durée pour dégager une véritable évaluation.

Exemples de financements et dispositifs financiers

Le Programme Régional Solaire (PRS)

Le PRS est financé par le 6^{ème} FED (Fonds Européen de Développement). L'enveloppe globale s'élève à 34 millions d'écus à laquelle il faudrait ajouter les coûts des infrastructures d'accueil pour avoir une idée du coût total du programme (implantation, animation, forages, superstructures...). Elle comprenait initialement l'installation de 1 000 systèmes de pompage (ramenés à 600 aujourd'hui) et 600 équipements communautaires (froid, éclairage). Par rapport aux nombreux programmes déjà financés par la communauté internationale dans le domaine du photovoltaïque, le PRS se remarque par la taille de son enveloppe financière, très supérieure à tous les programmes déjà réalisés.

La politique de l'ensemble des pays du CILSS (Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel) s'appuie sur le principe de ne plus fournir l'eau gratuitement aux populations mais de leur facturer ce service. Le PRS va dans ce sens en proposant que les coûts récurrents (fontainiers, maintenance et entretien) soient assumés par les groupements villageois.

En ce cas, le service proposé doit être générateur de ressources. Plusieurs cas de figure sont possibles : vente de l'eau à la bassine, abonnement hebdomadaire ou mensuel proportionnel à la taille des familles, utilisation des surplus d'eau non consommée pour du petit maraîchage, vente à des éleveurs de petit bétail... Si le principe de base est défini, la situation n'est pas figée et varie suivant les pays en fonction des habitudes sociales. Au cours des sessions d'animation, les groupements villageois choisissent les modalités de recouvrement des coûts après avoir été pleinement informés des contraintes de chaque système d'exhaure.

A titre d'exemple, au Burkina Faso, le coût annuel d'un contrat d'entretien pièces et main-d'oeuvre pour un système d'exhaure P4 (27 m³/j) était de 235 000 Fcfa (4 700 FF avant dévaluation). A cette somme à verser annuellement il faut ajouter la participation initiale du village égale à 10 % du coût du système (soit environ 570 000 Fcfa = 11 400 FF avant dévaluation). L'importance des sommes en jeu pour le milieu rural et le décalage entre l'instant de collecte et l'instant d'utilisation des fonds collectés ont conduit à rapprocher ce problème de l'aspect plus général d'épargne/crédit du monde rural.

Il est à noter, au passage, que la dévaluation du franc CFA en 94 a apporté deux bouleversements : érosion des fonds épargnés qui ont perdu la moitié de leur pouvoir d'achat du jour au lendemain, et difficulté des sociétés de maintenance dont le prix des contrats en francs CFA n'a pas varié.

Il est nécessaire de présenter le paiement des villageois comme la rétribution d'un service de fourniture d'eau : l'eau est payante. Cela dissocie ce paiement du coût du service d'entretien lui-même. Sinon les villageois vont rapidement refuser de payer puisque, pendant les premières années, le matériel est neuf et les interventions pour réparation sont rares.

Comme chacun le sait, en Afrique sahélienne, aucun des organismes bancaires initialement conçus pour répondre aux besoins en crédit et mobiliser l'épargne du monde rural n'a réussi à atteindre ses objectifs. Les mieux gérés se sont repliés sur les villes et les autres sont dans une situation de pré-liquidation. Avec le PRS, chaque pays est obligé de rechercher un système d'épargne/crédit viable dans une zone géographiquement limitée mais destiné à un nombre significatif de groupements villageois.

Dans le cas du Burkina Faso, il est prévu que la Caisse nationale de crédit agricole (CNCA) sera présente dans les capitales régionales des zones d'implantation des équipements solaires et sera amenée à signer des protocoles d'accord avec les groupements villageois et le ministère de l'Eau. Cependant si un groupement villageois éprouve la nécessité d'emprunter, il lui faudra garantir son emprunt à hauteur de 50 % comme le demande la CNCA. La solution proposée est de regrouper une vingtaine de groupements villageois afin que leur contribution initiale serve de fonds de garantie à ceux qui doivent emprunter. En fait à travers le PRS, c'est bien toute la question de l'accès au crédit en milieu rural qui est abordée.

Le Programme Élargi de Vaccination (PEV)

Le PEV est principalement financé par l'Unicef pour les équipements et par l'OMS pour les services. Depuis 1986, près de 2 100 réfrigérateurs solaires pour vaccins ont été diffusés dans le monde. Le coût moyen d'un équipement solaire de ce type est de l'ordre de 30 000 FF.

L'électrification domestique et les banques populaires au Rwanda

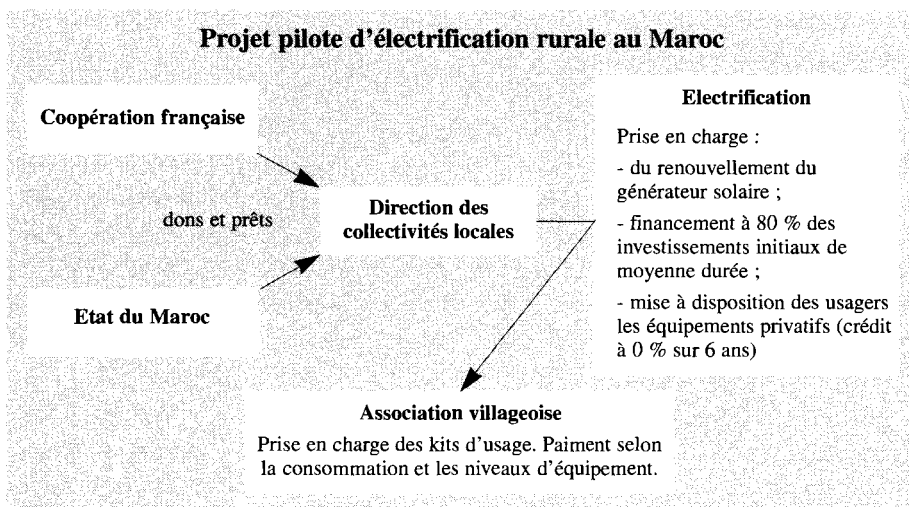
Sur la base d'une étude de marché faite auprès de plus de 400 familles, l'Union des Banques Populaires Rwandaises (UBPR) avait démarré un projet pilote de financement de crédits sur un, deux ou trois ans dans une dizaine de banques. Le système de base comprenait un module de 16 Wc (encapsulé au Rwanda), un régulateur (fabriqué au Rwanda), une batterie de 35 Ah, trois lampes de 8 Wc et un adaptateur pour radio.

Les personnes intéressées s'inscrivaient auprès de la banque populaire la plus proche et versaient 1/5 du prix total. Lorsque la banque avait réuni au moins cinq demandes, une entreprise locale (CPQ) venait pour l'installation et donnait une garantie de trois visites de routine la première année. Ensuite la banque populaire versait la totalité du prix à l'entreprise CPQ et récupérait les mensualités avec un taux d'intérêt de 9 %. Le prix total était de 50 000 FRW (= 3500 FF) avec possibilité d'un crédit en moyen terme remboursable entre 12 et 37 mensualités.

Les différentes comparaisons effectuées entre les systèmes photovoltaïques existants au Rwanda et l'éclairage traditionnel montraient que les dépenses dans tous les cas étaient du même ordre et que la rentabilité économique du système photovoltaïque était pratiquement assurée. Le projet avait prévu 1 450 installations au cours de 1991.

Exemple au Maroc

Le Programme Pilote d'Electrification Rurale marocain (PPER) est financé par le Maroc, sur crédits bilatéraux, dans le cadre de la coopération franco-marocaine avec une partie sous forme de dons. Il prévoit l'électrification d'environ 200 centres ruraux sous la responsabilité de la direction des collectivités locales. La première phase du projet porte sur 30 villages et est destinée à vérifier la pertinence des options techniques et économiques ainsi que des modes d'organisation retenus.



L'objectif du programme est de satisfaire les demandes domestiques de base en services électriques (éclairage, radio et télévision) avec trois solutions techniques : centrale photovoltaïque pour recharge de batteries, kits individuels et mini-réseaux locaux alimentés par groupes électrogènes ou micro-hydrauliques. Les modalités tarifaires dépendent des solutions techniques retenues, le programme finance les investissements de durée de vie longue (réseaux de distribution, panneaux solaires, etc.), les usagers financent le renouvellement des équipements de durée de vie moyenne (3 à 5 ans : batteries, régulateurs, etc.) ainsi que les consommables (lampes).

Les usagers ont également la charge de l'exploitation et de la gestion des installations à travers des associations villageoises qui assurent le fonctionnement des installations collectives et la collecte des paiements. La propriété des équipements (sauf pour les kits individuels) et leur gestion demeurent du ressort des collectivités locales.

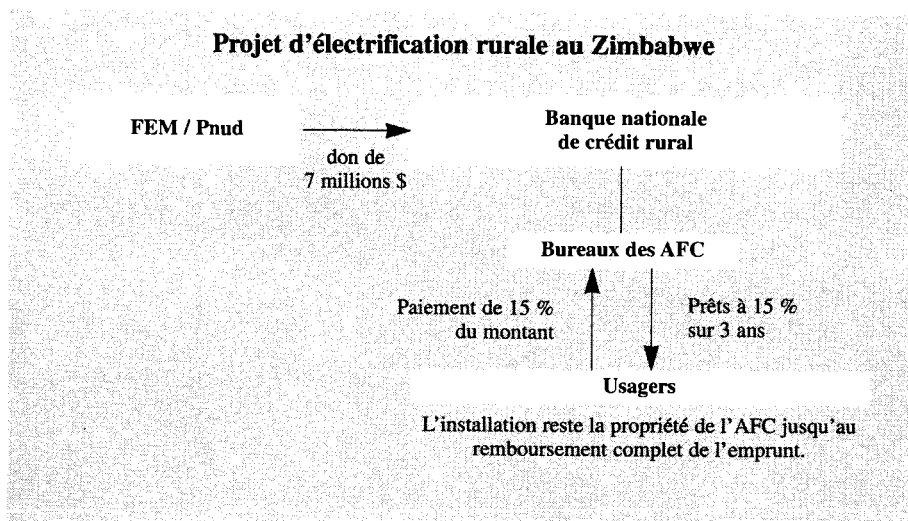
Exemple au Zimbabwe

Le programme d'électrification rurale PV du Zimbabwe est financé par un don de \$ 7 000 000 du FEM/Pnud au gouvernement du Zimbabwe. Cette somme alimente également un fonds revolving pour l'achat de panneaux PV et soutient la cellule projet rattachée au "Department of Energy". Il s'agit d'un

programme pilote dont l'objectif est d'installer 9 000 systèmes d'éclairage PV sur une période de 3 ans, en s'appuyant sur des entreprises du secteur privé. A l'issue de la première année du projet, un millier de systèmes ont été installés.

L'ensemble des équipements commercialisés dans le cadre du projet sont exonérés de taxes, à condition que les installateurs se conforment à certaines spécifications techniques. Les utilisateurs peuvent payer les systèmes comptant ou bénéficier de crédits par le biais de la Banque nationale de crédit rural (AFC), partenaire du projet. Le taux des prêts proposés par l'AFC est de 15 %, la période de remboursement s'étalant sur deux ou trois ans. La contribution initiale de l'acquéreur est de 15 % du montant total de l'installation qui reste propriété de l'AFC jusqu'au remboursement complet de l'emprunt.

Si des ONG présentes dans des dispensaires ou des écoles rurales ont acheté des systèmes, la grande majorité des bénéficiaires sont des ménages, clients habituels de l'AFC, c'est-à-dire pouvant disposer de revenus réguliers (fonctionnaires ruraux, salariés urbains souhaitant équiper leur famille restée au village, etc.) ou des agriculteurs aisés.



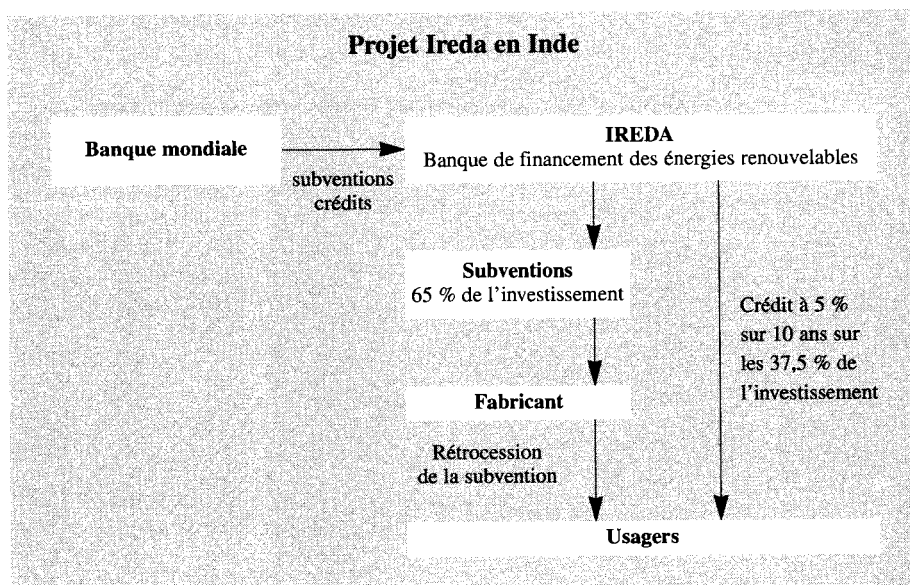
Exemples en Inde

L'Ireda (Indian Renewable Development Agency)

L'Inde a depuis longtemps développé une politique de soutien aux énergies renouvelables, qui a été confirmée en 1987 par la création de l'Ireda, véritable banque de financement et de promotion des énergies renouvelables (éolien, biogaz, PCH, solaire thermique ou photovoltaïque). L'Ireda a pour principale vocation de financer la production d'énergie ainsi que les intermédiaires installateurs ou les usagers finaux.

L'Ireda gère actuellement quatre programmes photovoltaïques par un fonds "revolving" de la Banque mondiale (financement mixte IDA/FEM/Danida/SDC) et un programme de commercialisation du ministère des Energies non gouvernementales octroyant des crédits subventionnés aux utilisateurs finaux et des crédits d'équipement aux fabricants. Le programme de pompage sur fonds du MNES fait plus particulièrement l'objet des analyses concernant l'Ireda dans ce qui suit.

L'objectif du programme lancé en octobre 1993 est d'installer 1000 systèmes de pompage, essentiellement pour des usages productifs, en une année. Après une période de lancement initiale de quelques mois, 403 systèmes étaient installés en juin 1994, d'une puissance moyenne de



600 à 900 Wc, alors que des gammes plus larges avaient été initialement prévues. Les usages agricoles et d'irrigation prédominent avec 60 % des systèmes, le solde se répartissant entre l'aquaculture, l'horticulture, les pêcheries et la sylviculture. Compléter un service diesel ou de réseau défaillant constitue la motivation principale des acheteurs ; pour 50 %, ce sont des fermiers individuels et pour 30 %, des entreprises. Autre caractéristique notable, plus de 80 % des systèmes sont localisés dans deux Etats du sud de l'Inde, où se trouvent également les principales unités de production de systèmes photovoltaïques. On cherche, à travers ce programme, à consolider les capacités de production et d'installation, à identifier des zones de concentration où les caractéristiques socio-économiques sont favorables au pompage PV et à élaborer des stratégies de marketing et de service après-vente appropriés. Ce programme demeure donc un programme subventionné de démonstration à grande échelle. Les conditions de financement sont les suivantes :

- une subvention de 5,5 \$/Wc (1 \$ = 31 Rp) est versée au fabricant / intermédiaire / fournisseur, dont la répercussion sur le consommateur n'est pas vérifiée ;
- un crédit de 2 500 \$ à 2,5 % sur l'encours, remboursable en annuités sur 10 ans, avec une année de grâce, est accordé à l'intermédiaire. L'utilisateur final, lui, bénéficie théoriquement d'un crédit à 5 %.

Si l'Ireda attache une grande rigueur aux procédures de financement et de sélection des bénéficiaires des concours financiers, un enjeu majeur du programme de pompage demeure bien la mise en place de réseaux d'entreprises rurales et de services après vente appropriés.

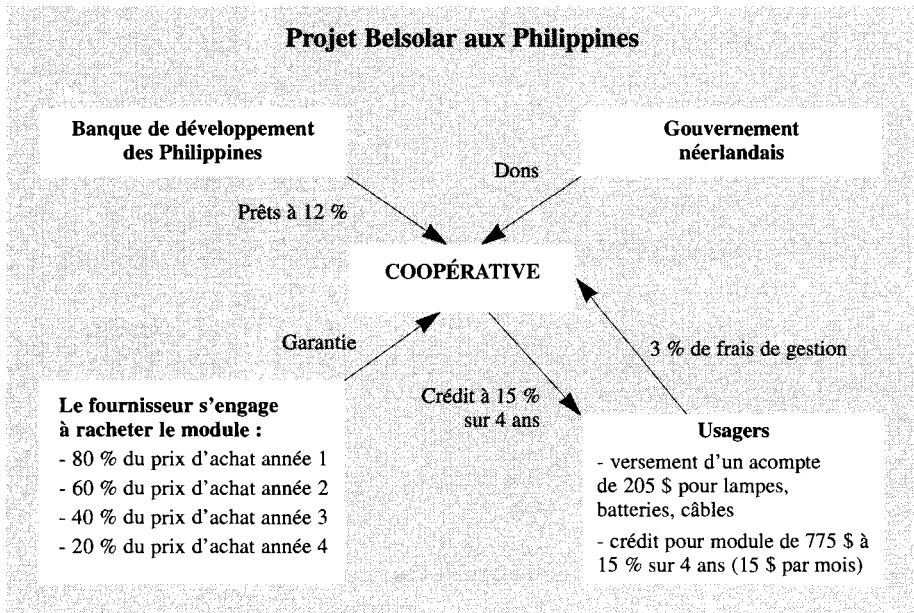
Concours financier schématique pour le système de pompage le plus répandu de 900 Wc (taux de change utilisé : 1 \$ = 31 Rp).

Coût d'un système de 900 Wc en Inde :	8 000 \$
Subvention à 5,5 \$ / Wc :	5 000 \$
Prix subventionné :	3 000 \$
Crédit \approx 2,5 % à l'intermédiaire, \approx 5 % à l'utilisateur, 10 ans :	2 500 \$
Paiement initial minimal par l'utilisateur :	500 \$

Source : Atelier sur la mise en oeuvre de programmes d'électrification rurale décentralisée. Paris, 20-22 septembre 1994.

Exemples aux Philippines

Les Philippines bénéficient d'une importante expérience en matière d'électrification rurale PV avec une capacité installée sur des projets du ministère de l'Energie dépassant 100 kWc cumulés, et notamment, plusieurs projets d'électrification de petites îles initiés par le gouvernement avec le soutien de la coopération allemande (GTZ). Plusieurs de ces projets reposent sur une approche privée, dont le projet Belsolar décrit ici.



Le projet Belsolar cherche à faire financer des programmes d'électrification rurale PV par des banques nationales de développement. Il a permis la diffusion de 100 systèmes PV individuels à travers une coopérative ainsi que l'installation d'équipements collectifs pour les ménages qui ne pouvaient pas acquérir les systèmes individuels.

Le financement du projet comprend, d'une part, un don du gouvernement hollandais (DGIS) destiné à couvrir les coûts de préparation et de suivi ainsi que l'achat des équipements collectifs, et d'autre part, un prêt de la Banque de développement des Philippines (DBP) pour les systèmes individuels.

Les utilisateurs ont la possibilité d'acheter les systèmes PV individuels au comptant ou de bénéficier d'un crédit. L'acompte demandé (\$ 205) représen-

te le coût de l'équipement intérieur (lampes, batterie, câbles), soit 25 % du coût total du système (coût total : \$ 775). Le solde, qui correspond au coût du module et de la régulation, fait l'objet d'un prêt à 15 % sur 4 ans, soit des paiements mensuels de \$ 15.

Une coopérative de développement, présente sur le site depuis une dizaine d'années (CSJU), assure la mise en oeuvre du projet. C'est elle qui emprunte, en tant qu'intermédiaire entre les usagers et la Banque de développement des Philippines (DBP), qui collecte l'acompte et les paiements mensuels des bénéficiaires, et les reverse à la DBP. Sa rémunération pour ces prestations se monte à 3 % des paiements mensuels, les usagers devant être membres de la coopérative moyennant une cotisation de \$ 1/an. L'originalité de ce projet réside dans la participation de la DBP qui a accepté de considérer les modules comme garantie des prêts, leur valeur étant assurée par le fournisseur avec une dépréciation linéaire sur la durée du prêt (4 ans).

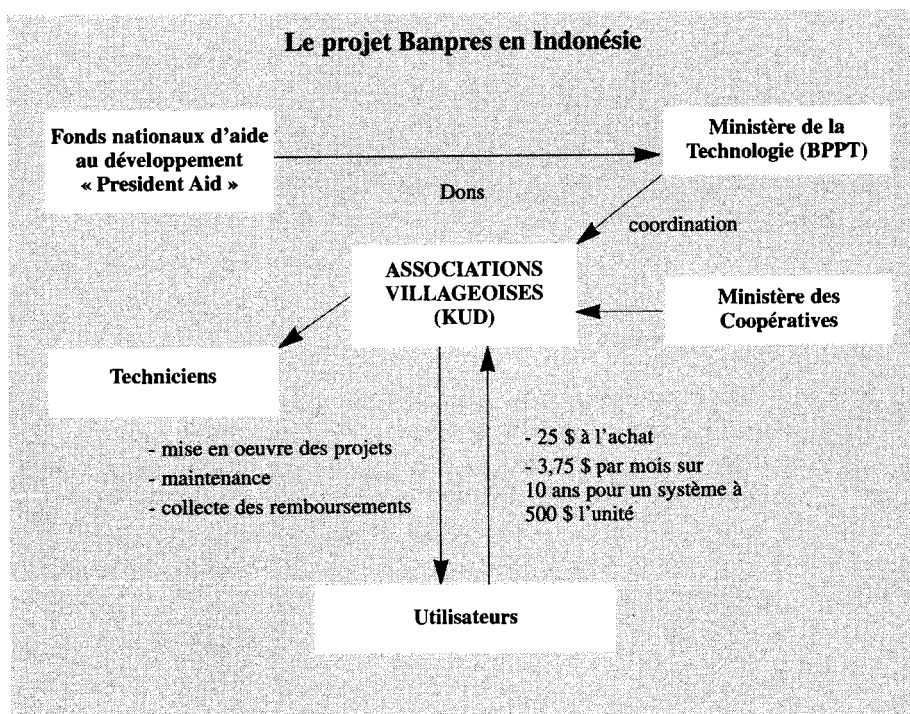
Exemple en Indonésie

Le projet Banpres d'électrification rurale PV en Indonésie, financé sur fonds nationaux d'aide au développement (*President Aid*), a consisté en l'installation, depuis 1991, de 3000 systèmes individuels destinés principalement à l'éclairage et à la radio/télévision.

La coordination d'ensemble est assurée par le ministère de la Technologie (BPPT). La mise en oeuvre du projet sur le terrain et la maintenance des systèmes sont confiés à des techniciens employés par les associations villageoises, les KUD, qui dépendent du ministère des Coopératives. Leur responsabilité couvre également la collecte des remboursements et l'assistance technique de base aux utilisateurs.

Les critères d'éligibilité des villages sont fonction de leur isolement, de l'éloignement par rapport au réseau et de l'existence d'associations villageoises. Les systèmes PV individuels sont achetés aux fournisseurs sélectionnés par appel d'offres gérés par le BPPT et divisés géographiquement. Les associations villageoises les installent chez les utilisateurs contre une contribution initiale de 25 \$ pour l'utilisateur et le paiement de mensualités de 3,75 \$ pendant 10 ans, correspondant, pour des systèmes de 500 \$ l'unité, à un prêt sur 10 ans à taux nul.

Au-delà de la durée de garantie des composants et du stock de pièces de rechange inclus dans le marché du fournisseur, le remplacement des pièces



consommables y compris les batteries, est à la charge de l'utilisateur qui s'adresse aux associations villageoises pour être approvisionné.

Exemple au Kenya

Il ne s'agit pas ici à proprement parler d'un "programme" puisque la diffusion des systèmes d'éclairage PV individuels au Kenya s'est effectué pour l'essentiel sans soutien public direct, mais le développement de ce marché a été rendu possible par la dynamique créée à l'origine par des programmes pilotes publics.

On dénombre près de 30 000 systèmes installés sur une base strictement commerciale. Les ménages bénéficiaires disposent de revenus suffisants pour acheter des systèmes au comptant, sans avoir besoin de recourir à des mécanismes de crédit spécifiques : agriculteurs aisés, enseignants, entrepreneurs, etc., qui constituent une frange étroite de la population rurale. Les coûts unitaires se situent dans une fourchette de 600 à 1 200 USD.

La diffusion spontanée semble ainsi atteindre aujourd'hui ses limites du fait de problèmes de normalisation et de standardisation des équipements, de prise en charge de la maintenance, de saturation du marché constitué par les ménages à haut revenu, etc. Une intervention publique semble nécessaire en ce qui concerne les normes techniques, la formation et la mise en place de systèmes de financement adaptés, pour atteindre une plus large part de la population.

Exemple au Mexique

Le Programme du gouvernement fédéral mexicain, Pronasol, porte sur l'extension des services de base aux communautés rurales isolées, et en particulier sur l'installation de systèmes PV dans les zones difficilement accessibles. La Compagnie fédérale d'électricité (CFE) y participe activement en ce qui concerne l'approbation technique des projets ainsi que la définition de normes et spécifications techniques relatives à l'électrification rurale basée sur les énergies renouvelables.

Avec 24 000 systèmes installés, Pronasol porte sur la diffusion de systèmes d'éclairage individuels PV. Le financement des équipements des systèmes photovoltaïques individuels d'un coût unitaire d'environ 1 000 \$ (panneaux, batteries, lampes) est assuré par le gouvernement fédéral (50 %) et les autorités provinciales (30 %), puis complété par les autorités locales et les usagers sous forme de participation à l'installation. Il est par ailleurs demandé aux communautés villageoises de créer un fond de roulement destiné à assurer le fonctionnement et la maintenance des systèmes.

La mise en oeuvre est assurée par des compagnies privées sélectionnées par appels d'offres réalisés par chaque gouvernement régional. Les propositions des opérateurs portent sur la fourniture et l'installation des matériels, ainsi que la formation des utilisateurs. Aujourd'hui, au Mexique, se pose une question clé : celle de l'implication véritable de ces structures privées et du contrôle de la qualité de leurs prestations.

Avantages et inconvénients des principaux emplacements pour modules

EMPLACEMENTS	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Sol	<ul style="list-style-type: none"> – Accès facile pour le nettoyage – Solution toujours possible – Orientation facile – Panneau bien ventilé – Seule solution pour les générateurs de forte puissance – Pour les équipements pompage, rapprochement maximal des récepteurs 	<ul style="list-style-type: none"> – Risques de détérioration due aux jets de projectiles – Coût global élevé – Nécessité de socles en béton – Clôture de protection – Nécessité d'enterrer les câbles – Risque d'ombres portées de la part de bâtiment ou d'arbres
Toiture, terrasse	<ul style="list-style-type: none"> – Coût réduit des supports – Pour les équipements "de bâtiment" (maison, école et dispensaire) rapprochement maximal des récepteurs – Moins de risque d'ombres portées – A l'abri des jets de projectiles et des animaux 	<ul style="list-style-type: none"> – Accès difficile pour le nettoyage – Nécessité d'une toiture solide – Nécessité d'une orientation correcte d'un des pans du toit¹ – Non valable en général pour les fortes puissances (> 20 modules) – Echauffement sur les toitures en tôle ondulée
Pylone	<ul style="list-style-type: none"> – Orientation facile – Moins de risques d'ombres portées – Accès facile à contrôler – A l'abri des jets de projectiles et des animaux – Panneau bien ventilé 	<ul style="list-style-type: none"> – Nécessité d'un socle en béton – Accès difficile pour le nettoyage – Valable pour des petits générateurs (4 modules maximum) – Nécessité d'enterrer les câbles – Moins résistant aux vents violents

¹ Une différence d'orientation maximale de 10° est admissible.

Tour d'horizon des principaux actes de maintenance

Les tableaux suivants n'ont pas pour objectif d'initier à la recherche de défauts, travail qui demanderait une formation beaucoup plus large et plus pratique qu'une série d'informations, mais plutôt d'essayer d'apporter quelques conseils sur les actes de maintenance ainsi que sur les types de pannes les plus fréquentes.

ACTES DE MAINTENANCE	CONSEILS	TYPE D'ACTE FRÉQUENCE	NIVEAU DE COMPÉTENCE	COÛT ¹
MODULES				
Nettoyage	Nettoyer avec un chiffon sec Ne pas nettoyer à l'eau (risque d'abrasion du verre par le sable) Proscrire tout détergent	Entretien de routine quotidien	Villageois	Quasi nul
Bris module	Remplacement par module de mêmes caractéristiques	Réparation complexe rare	Spécialiste	Élevé ou très élevé
SUPPORT				
Resserrage	Contrôler et resserrer toute la visserie	Maintenance préventive	Réparateur ²	Faible à moyen

¹ Les coûts englobent matériel et main-d'oeuvre. En ce qui concerne l'entretien de routine, le prix des interventions est négligeable car celles-ci sont faites par les villageois. **Tranche de coûts de la maintenance** : quasi nul (0 FF, coût intervention négligeable) ; faible (coût < 100 FF) ; moyen (100 FF < coût < 1 000 FF) ; élevé (1 000 FF < coût < 5 000 FF) ; très élevé (coût > 5 000 FF).

² Artisan-réparateur : cette dénomination représente une personne à compétence technique (niveau faible) ayant reçu une formation sur le photovoltaïque.

ACTES DE MAINTENANCE	CONSEILS	TYPE D'ACTE FRÉQUENCE	NIVEAU DE COMPÉTENCE	COÛT
BATTERIE Lire les consignes de sécurité !				
Contrôle niveau	≈ 1 cm au dessus des plaques.	Mensuel	Villageois	Quasi nul
Remplissage (si besoin)	Absolue nécessité d'utiliser de l'eau déminéralisée ³ . Ne jamais rajouter de l'acide.	Mensuel ou annuel	Artisan réparateur	Faible
Nettoyage	Nettoyer à l'eau claire toute trace d'acide sur les batteries	Mensuel ou annuel	Artisan réparateur	Faible
Entretien connexions	Resserrer les cosses Brosser bornes et cosses si présence de sulfate. Graisser cosses une fois remontées.	Maintenance préventive annuelle	Artisan réparateur	Faible à moyen
Contrôle état de charge	Mesurer la densité ⁴ de l'acide Mesurer la tension	Maintenance préventive annuelle	Artisan réparateur	Faible à moyen
Capacité devenue trop faible, batterie hors service	Remplacement par batterie de mêmes caractéristiques	Réparation complexe	Spécialiste	Très élevé
REGULATEUR				
Dépoussiérage		Maintenance préventive annuelle	Artisan réparateur	Faible à moyen
Contrôle du fonctionnement	Constater si le système se met en limitations (charge et décharge) avec les voyants et voir s'il y a arrêt (ou limite de décharge)	Maintenance préventive annuelle	Artisan réparateur	Faible à moyen
Arrêt du système	Changement de fusible (même valeur), disjoncteur à réenclencher	Réparation simple	Artisan réparateur	Faible à moyen
Régulateur hors service	Remplacement par régulateur de mêmes caractéristiques	Réparation complexe	Spécialiste	Moyen à élevé

³ Eau déminéralisée : eau de pluie récoltée dans un récipient plastique, eau de dégivrage d'un réfrigérateur, eau de condensation (climatiseur) et eau distillée (l'idéal).

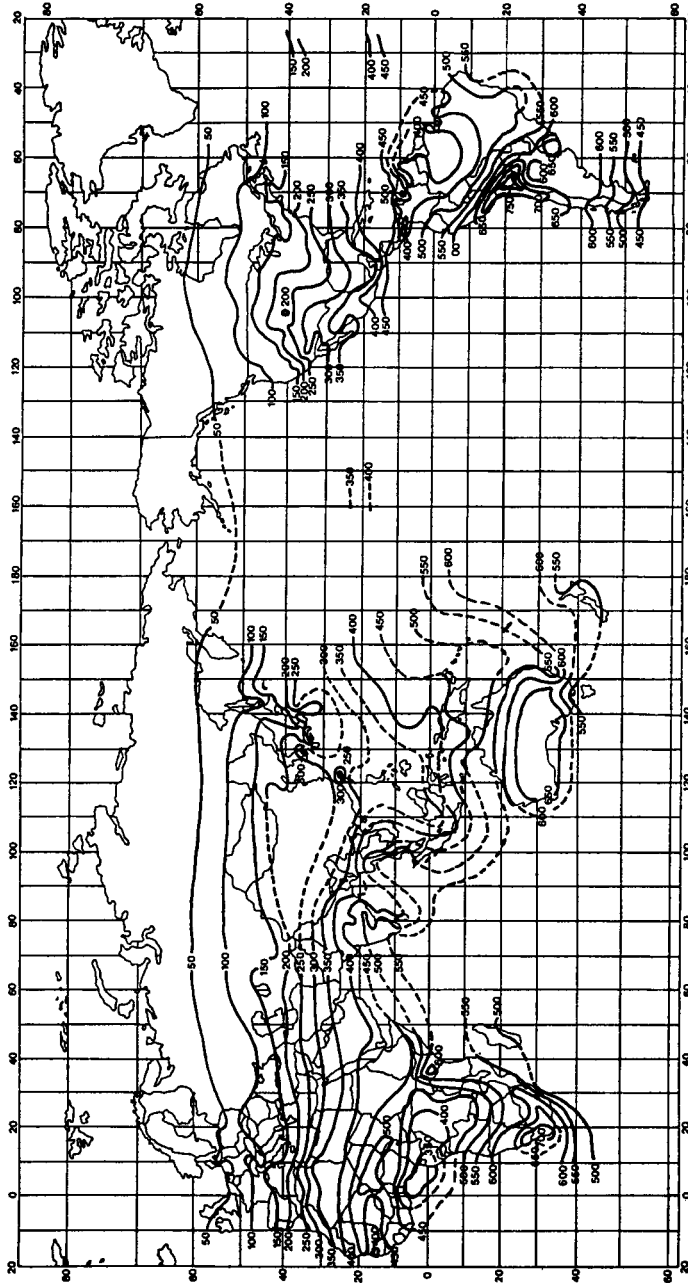
⁴ S'il y a problème, une investigation est nécessaire, l'artisan-réparateur (via le comité de gestion) doit faire appel à un spécialiste.

ACTES DE MAINTENANCE	CONSEILS	TYPE D'ACTE FRÉQUENCE	NIVEAU DE COMPÉTENCE	COÛT
ONDULEUR				
Dépoussiérage		Maintenance préventive annuelle	Artisan réparateur	Faible à moyen
Contrôle du fonctionnement	Constater si les voyants fonctionnent lors de la mise en service	Maintenance préventive annuelle	Artisan réparateur	Faible à moyen
Arrêt système	Changement de fusible (même valeur), disjoncteur à réenclencher	Réparation simple	Artisan réparateur	Faible à moyen
Hors service	Remplacement par onduleur mêmes caractéristiques	Réparation complexe	Spécialiste	Très élevé
CÂBLES ET CONNEXIONS				
Contrôle visuel	Vérifier l'état d'usure des câbles, l'état de l'étanchéité des boîtes de raccordement et des différentes fixations Exercer une tension sur les câbles au niveau des connexions Brosser bornes et cosses s'il y a présence d'oxydation, les "siliconer" une fois remontées	Réparation simple	Artisan réparateur	Faible à moyen
Problème de câble ou de connexions	Bien remplacer par le même type de câble et la même section	Réparation simple	Artisan réparateur	Faible à élevé
RÉCEPTEUR ÉCLAIRAGE				
Tube hors service	Remplacement par tube de mêmes caractéristiques	Réparation simple	Villageois	Faible
Luminaire hors service	Remplacement par luminaire de mêmes caractéristiques	Réparation simple	Artisan réparateur	Moyen
POMPE				
Balais usés	Remplacement par le même modèle, impérativement	Réparation complexe	Spécialiste	Élevé
Électropompe hors service	Remplacement par pompe de mêmes caractéristiques	Réparation complexe	Spécialiste	Très élevé

ACTES DE MAINTENANCE	CONSEILS	TYPE D'ACTE FRÉQUENCE	NIVEAU DE COMPÉTENCE	COÛT
TUYAUTERIE				
Nettoyage crépines	Périodiquement pour les pompes facilement accessibles ou plus souvent sur les pompes de surface.	Maintenance préventive mensuelle	Réparation complexe	Quasi nul
	Uniquement si besoin pour les les pompes de forage.	Réparation complexe		Faible à moyen
Tuyaux des pompes	Vérifier l'état d'usure et remplacement éventuel	Maintenance préventive annuelle	Artisan réparateur	Faible à moyen
Robinetterie, vannes	Vérifier l'état de fonctionnement et remplacement éventuel	Maintenance préventive annuelle	Artisan réparateur	Faible à moyen
RÉFRIGÉRATEUR				
Nettoyage, dégivrage	Dépoussiérage condenseur et partie compresseur Dégivrage par arrêt de l'appareil sans utilisation d'objet tranchant Contrôle état des joints	Entretien de routine hebdomadaire ou mensuel	Villageois	Quasi nul
Arrêt de l'appareil	Changement de fusible (même valeur), disjoncteur à réenclencher	Réparation simple	Artisan réparateur	Faible à moyen
Réfrigérateur hors service	Réparation sur site possible Remplacement probable : unité électronique, compresseur	Réparation complexe	Spécialiste	Élevé
RÉCEPTEURS DIVERS				
Arrêt de l'appareil	Changement de fusible (même valeur), disjoncteur à réenclencher	Réparation simple	Artisan réparateur	Faible à moyen
Appareil hors service	Remplacement par appareil de mêmes caractéristiques			

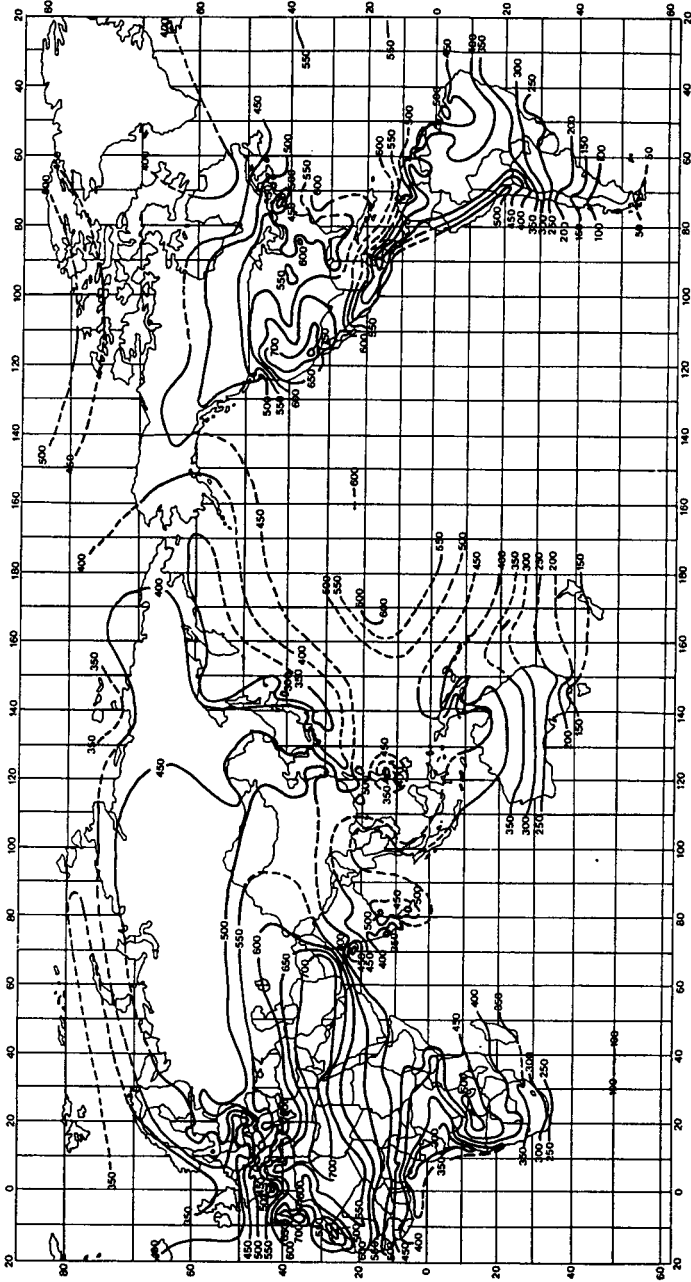
ACTES DE MAINTENANCE	CONSEILS	TYPE D'ACTE FRÉQUENCE	NIVEAU DE COMPÉTENCE	COÛT
ENVIRONNEMENT				
Entretien	Fauchage de l'herbe sous les modules. Nettoyage des abords du point d'eau.	Entretien de routine hebdomadaire	Villageois	Quasi nul
Contrôle	Inspection de l'environnement (ombres éventuelles). Inspection état de la clôture, du local technique, etc. Nettoyage complet du point d'eau et du réservoir.	Maintenance préventive annuelle	Villageois ou artisan réparateur	Faible à moyen

Carte mondiale de l'ensoleillement en janvier



Daily means of total solar radiation (direct+diffuse), incident on a horizontal surface in cal/cm² day.

Carte mondiale de l'ensoleillement en juillet



Daily means of total solar radiation (direct+diffuse).
Incident on a horizontal surface in cal/cm² day.

Professionnels du photovoltaïque

classés par activités

Fabricants, assembleurs, systèmes, installateurs, bureaux d'études,
centres techniques ou de recherche

FABRICANTS DE MODULES

Allemagne

ASE GMBH
SIEMENS SOLAR

Belgique

ENERGIES NOUVELLES ET
ENVIRONNEMENT
SOLTECH

Brésil

HELIODINAMICA

Etats-Unis

SIEMENS SOLAR INDUSTRIES
SOLAREX CORPORATION

France

NAPS FRANCE
PHOTOWATT INTERNATIONAL
SOLEMS

Grande Bretagne

BP SOLAR

Inde

BHEL

Italie

EUROSOLARE
HELIOS TECHNOLOGY

Japon

KYOCERA

Pays-Bas

R & S

FABRICANTS DE BATTERIES

France

CEAC-FULMEN
CFEC - STECO
OLDHAM FRANCE

Grande Bretagne

CHLORIDE SOLAR Ltd

FABRICANTS DE POMPES

France

GRUNDFOS
TOTAL ENERGIE

**FOURNISSEURS DE
RÉFRIGÉRATEURS**

France

APEX
CEVOS
TOTAL ENERGIE

Luxembourg

Electrolux

ENSEMBLIERS / SYSTÉMIERS

Allemagne

ASE GMBH
SIEMENS SOLAR

Belgique

ENERGIES NOUVELLES ET
ENVIRONNEMENT
SOLTECH

Brésil

HELIODINAMICA

Espagne

ATERSA

Etats Unis

POLAR PRODUCTS
SIEMENS SOLAR INDUSTRIES
SOLAREX CORPORATION

Finlande

NAPS INTERNATIONAL

France

APEX
ECOSOLAIRE / SERELIO
EQUINOXE
NAPS FRANCE
PHOTOWATT INTERNATIONAL
SES
SOLARCOM
SOLAREX
SOLEMS
TECHSOL
TECSOL
TENDANCIEL
TOTAL ENERGIE
TRANSENERGIE
VERGNET

Grande Bretagne

BP SOLAR
SOLAPAK Ltd

Inde

BHEL

Italie

IDEA S.R.L.
ISEI
ITALSOLAR S.P.A.
ANIT

Japon

KYOCERA

Kenya

ANIMATICS LIMITED

Norvège

NOACK SOLAR INTERNATIONAL

Pays-Bas

R & S RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

INSTALLATEURS

Algérie

SIGMA INGENIERIE

Allemagne

SIEMENS SOLAR

Belgique

SOLTECH

Bénin

ENERDAS

Brésil

HELIODINAMICA

Burkina Faso

SAHEL ENERGIE SOLAIRE

Etats Unis

POLAR PRODUCTS

France

APEX

CEVOS

SES SARL

SOLARCOM

TOTAL ENERGIE

VERGNET

Gabon

CGE GABON

ENERDAS GABON

Gambie

VM SOLAR - THE GAMBIA

Grande Bretagne

SOLAPAK Ltd

Guadeloupe

APEX CARAIBES

SOLELEC CARAIBES

Guyane

SOLELEC GUYANE

SAGEES GUYANE

Inde

BHEL

Italie

IDEA S.R.L.

ISEI

ITALSOLAR S.P.A.

Japon

KYOCERA

Kenya

ANIMATICS LIMITED

SKYTECH COMMUNICATIONS

Mali

SOMIMAD

Maroc

CASABLOC ACCUS NATIONAL

Martinique

SOLELEC MARTINIQUE

SUNWIND ENERGIES

Mauritanie

M. FADHEL BA

Niger

SNTT

Norvège

NOACK SOLAR INTERNATIONAL

Nouvelle Calédonie

PACIFIC ENERGIE

Pays-Bas

R & S RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

Polynésie Française

SOLER ENERGIE

La Réunion

APEX OCEAN INDIEN

SOLELEC REUNION

Sénégal

CGE

SAHEL ENERGIE SOLAIRE

SEEE SENEGAL

Tanzanie

BP TANZANIA Ltd

Tchad

BOK SARL

Thaïlande

BP THAI SOLAR CORPORATION Ltd

Tunisie

NATRA

Zimbabwe

PHILIPS ELECTRICAL Ltd

BUREAUX D'ÉTUDES

Allemagne

GTZ

Cameroun

CETT

Canada

SOLENER Inc.

France

BURGEAP

CEVOS

FUNDER

GERES

GRET

SEED

TECHSOL

TECSOL

TENDANCIEL

TRANSENERGIE

Grande Bretagne

ESD

ITDG

IT POWER Ltd

Maroc

SIGMA TECH INGENIERIE

Sénégal

ENDA-TIERS MONDE

SEMIS

**CENTRES TECHNIQUES,
ASSOCIATIONS DE
PROFESSIONNELS**

Espagne

INSTITUTO DE ENERGIA SOLAR

Burkina Faso

IBE

France

ADEME

ASDER

CIEN

CLER

COSTIC

FONDEM

GENEC CADARACHE

Inde

ITERI

ESTI CEC

Polynésie française

IERPS

Sénégal

CERER

Thaïlande

ASIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

BALISAGE MARITIME

France

GISMAN

**MAITRES D'OEUVRE
DE PROGRAMMES
PHOTOVOLTAÏQUES**

Burkina Faso

CILSS (PRS, administration internationale)

Danemark

UNICEF (organisation internationale)

France

ADEME

Mali

DNHE (administration nationale)

Maroc

Cellule projet PPER (administration nationale - ministère de l'Intérieur)

Suisse

OMS (organisation internationale)

Tunisie

AGENCE POUR LA MAITRISE DE L'ENERGIE (organisation nationale)

Professionnels du photovoltaïque par pays

PAYS	SOCIÉTÉ	FABRICANT	ENSEMBLIER	INSTALLATEUR	BUREAU D'ÉTUDES	CENTRE DE RECHERCHE	TYPE ORGANISME
Algérie	SIGMA INGENIERIE			x			
Allemagne	ASE GMBH	Modules cristallins	x				
	GTZ				x		
	SIEMENS SOLAR	Modules	x	x			
Belgique	ENERGIES NOUVELLES ET ENVIRONNEMENT	Modules cristallins	x				
	SOLTECH	Modules cristallins	x	x		x	
Bénin	ENERDAS			x			
Bésil	HELIODINAMICA	Modules	x	x			
Burkina Faso	CILSS (PRS)						Adm. internationale
	IBE					x	Public
	SAHEL ENERGIE SOLAIRE			x			
Cameroun	CETT				x		
Canada	SOLENER Inc.				x		
Danemark	UNICEF						Org. internationale
Espagne	ATERSA		x				
	INSTITUTO DE ENERGIA SOLAR					x	

PROFESSIONNELS DU PHOTOVOLTAÏQUE CLASSÉS PAR PAYS

Etats-Unis	POLAR PRODUCTS										
	SIEMENS SOLAR INDUSTRIES	Modules cristallins et amorphes	x								
	SOLAREX CORPORATION	Modules cristallins et amorphes	x								
Finlande	NAPS	Modules amorphes	x								
France	ADEME							x		Public	
	APEX		x								
	ASDER								x	Association	
	BURGEAP								x		
	CEVOS		x								
	CIEN								x	Association	
	CLER								x	Association	
	COSTIC									CT	
	CEAC-FULMEN	Batteries									
	CFEC - STECO	Batteries									
	ECOSOLAIRE / SERELJE								x		
	EQUINOXE								x		
	FONDEM									x	
											Association

Professionnels du photovoltaïque par pays

PAYS	SOCIÉTÉ	FABRICANT	ENSEMBLIER	INSTALLATEUR	BUREAU D'ETUDES	CENTRE DE RECHERCHE	TYPE ORGANISME
	GENEC CADARACHE					CT	
	GERES				x		Association
	GISMAN	Balisage maritime	x				
	GRET				x		Association
	GRUNDFOS	Pompes					
	NAPS FRANCE	Modules amorphes	x				
	OLDHAM FRANCE	Batteries					
	PHOTOWATT INTERNATIONAL	Modules cristallins	x				
	SES SARL		x	x			
	SOLARCOM		x	x			
	SOLAREX	Modules amorphes et cristallins					
	SOLEMS	Modules et cellules amorphes	x				
	SEED				x		
	TECHSOL				x		
	TECSOL		x		x		
	TENDANCIEL				x		

Professionnels du photovoltaïque par pays

PAYS	SOCIÉTÉ	FABRICANT	ENSEMBLIER	INSTALLATEUR	BUREAU D'ÉTUDES	CENTRE DE RECHERCHE	TYPE ORGANISME
	EUROSOLARE	Modules cristallins					
	HELIOS TECHNOLOGY	Modules	x				
	IDEA S.R.L.		x	x			
	ISEI		x	x			
	ITALSOLAR S.P.A		x	x			
Japon	KYOCERA	Modules	x	x			
Kenya	ANIMATICS LTD		x	x			
	SKYTECH COMMUNICATIONS			x			
Luxembourg	ELECTROLUX	Réfrigérateurs					
Mali	DNHE						Adm. nationale
	SOMIMAD			x			
Maroc	CASABLOC ACCUS NATIONAL			x			
	CELLULE PPER					x	Projet
	SIGMA TECH INGENIERIE				x		
Martinique	SOLEC MARTINIQUE			x			
	SUNWIND ENERGIES			x			
Mauritanie	M. FADHEL BA		x	x			
Niger	SNTT			x			
Norvège	NOACK SOLAR INT ^{nl}		x	x			
Nlle Calédonie	PACIFIC ENERGIE			x			

PROFESSIONNELS DU PHOTOVOLTAÏQUE CLASSÉS PAR PAYS

Pays-Bas	R & S	Modules cristallins	x	x					
Polynésie française	IERPS							x	Public
	SOLER ENERGIE			x					
La Réunion	APEX OCEAN INDIEN			x					
	SOLELEC REUNION			x					
Sénégal	CERER						CR		Public
	CGE			x					
	ENDA-Tiers Monde					x			Association
	SAHEL ENERGIE SOLAIRE			x					
	SEEE SENEGAL			x					
	SEMIS					x			
Suisse	OMS								Org. international
Tanzanie	BP TANZANIA Ltd			x					
Tchad	BOK SARL			x					
Thaïlande	ASIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY							x	Public
	BP THAI SOLAR C ^{ION}			x					
Tunisie	AGENCE POUR LA MAÎTRISE DE L'ENERGIE								Org. nationale
	NATRA			x					
Zimbabwe	PHILIPS ELECTRICAL Ltd			x					

Liste d'adresses

Algérie

SIGMA INGENIERIE
2 rue de la Vallée - El Mouradia
Alger
Tél. : (213) 2 - 59 40 25
Fax : (213) 2 - 60 86 98

Allemagne

AUGEWANDTE SOLAR ENERGIE (ASE)
GMBH
Postfach 1352
22872 Wedel
Tél. : (49) 4103 - 600
Fax : (49) 4103 - 60 47 00

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR
TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT
(GTZ)
Dag-Hammarskjöld-Weg
Post Box 5180
6236 Eschborn 1
Tél. : (49) 061 - 96 79 0
Télex : 41 52 23 O

SIEMENS SOLAR GMBH
Frankfurter Ring 152
8000 Munich 40
Tél. : (089) 35 00 24 11
Fax : (089) 35 00 27 73

Belgique

ENERGIES NOUVELLES
ET ENVIRONNEMENT (ENE)
Avenue van der Meerschen, 188
1150 Bruxelles
Tél. : (32) 2 - 771 13 28
Fax : (32) 2 - 771 13 28
Télex : 65945 ENEPV B

SOLTECH
Kapeldreef 60
3001 Heverlee
Tél. : (32) 16 29 84 42 / 29 83 11
Fax : (32) 16 29 83 19

Bénin

ENERDAS
Cadjéhoun - Lot 1184 J
BP 8155. Cotonou
Tél. : (229) 30 14 90
Fax : (229) 30 01 40

Brésil

HELIODINAMICA
CP 8085
9051 Sao Paulo, SP
Tél. : (55) 11 - 493 38 88
Télex : 0111 71754 HDSP BR

Burkina-Faso

COMITE PERMANENT INTER-ETATS
DE LUTTE CONTRE LA SECHERESSE
DANS LE SAHEL (CILSS)
03 BP : 70 49
Ouagadougou 03
Tél. : (226) 30 67 57 / 58 / 59
Télex : 52 63 Comiter BF
Fax : (226) 30 72 47

INSTITUT BURKINABE
DE L'ENERGIE (IBE)
BP 7047
Ouagadougou
Tél. : (226) 30 08 65

SAHEL ENERGIE SOLAIRE
1515 avenue Dimdlobson 01
BP 2723
Ouagadougou
Tél. : (226) 30 69 73
Fax : (226) 30 69 73

Cameroun

CETT
BP 4447
Douala
Télex : 5128

Canada

SOLENER INC.
442 rue Lavigueur
Québec
Canada, G1R 1B5
Tél. : (1-418) 640 7444
Fax : (1-418) 640 7445

Danemark

UNICEF
Unicef Plads, Freeport
2100 Copenhagen 0
Tél. : (45) 35 27 30 27
Fax : (45) 35 26 94 21

Espagne

ATERSA
Fernando Poo, 6
28045 Madrid
Tél. : (34) 1 - 47 47 211
Fax : (34) 1 - 47 47 467

INSTITUTO DE ENERGIA SOLAR
Universidad Politécnica de Madrid
E.T.S.I. Telecomunicacion
Ciudad Universitaria
28040 Madrid
Tél. : (34-1) 549 57 00 / 544 10 60
Télex : 47430 ETSI E
Fax : (34-1) 544 63 41

Etats-Unis

POLAR PRODUCTS
2808 Oregon Court
Building K/4
90503 Torrance, California
Tél. : (1) 213 - 320 35 14
Fax : (1) 213 - 320 31 35
Télex : 494 0451 POLARLSA

SIEMENS SOLAR INDUSTRIES
P.O. Box 6032
Camarillo, CA 93011
Tél. : (805) 4 82 68 00
Fax : (805) 3 88 63 95

SOLAREX CORPORATION
630 Solarex Court
Frederick, MD 21701
Tél. : (1-) 301 698 4200
Fax : (1-) 301 698 4201

Finlande

NESTE ADVANCED POWER SYSTEMS
(NAPS)
Rälssitie 7
SF-01510 Vantaa
Tél. : (358) 0 870 1611
Fax : (358) 0 826 301
Télex : 126048 NAPS SF

France**ADEME**

27 rue Louis Vicat 75015 Paris
 Tél. : 33 (0)1 47 65 20 00
 Fax : 33 (0)1 46 45 52 36
 Téléx : 203 712 F

APEX

4 rue de l'Industrie
 34880 Laverune
 Tél. : 33 (0)5 67 07 02 02
 Fax : 33 (0)5 67 69 17 34

ASDER

299 rue du Granier - BP 45
 73230 Saint-Alban Leysse
 Tél. : 33 (0)4 79 85 88 50
 Fax : 33 (0)4 79 33 24 64

BURGEAP

Eau - Sol - Environnement
 70 rue Mademoiselle
 75015 Paris
 Tél. : 33 (0)1 47 34 06 65
 Fax : 33 (0)1 48 42 37 12 ou 47 34 65 83
 Téléx : 203 522 F

CEAC - FULMEN

5-7 allée des Pierres Mayetres
 92636 Gennevilliers
 Tél. : 33 (0)1 41 21 23 00
 Fax : 33 (0)1 41 21 23 12

CEVOS

Route du Couvent
 20215 Venzolasca
 Tél. : 33 (0)4 95 36 77 77
 Fax : 33 (0)4 95 36 63 31

CIEN

ZI Bastillac Nord
 65000 Tarbes
 Tél. : 33 (0)5 62 93 93 13
 Fax : 33 (0)5 62 93 10 39

CLER

28 rue de Basfroï 75011 Paris
 Tél. : 33 (0)5 46 59 04 44
 Fax : 33 (0)5 46 59 03 92

**COMITE SCIENTIFIQUE ET
TECHNIQUE DES INDUSTRIES
CLIMATIQUES (COSTIC)**

Rue Lavoisier
 ZI Saint-Christophe
 04000 Digne
 Tél. : 33 (0)4 92 31 19 30 / 59 83
 Fax : 33 (0)4 92 32 45 71

**COMPAGNIE FRANCAISE D'ELECTRO-
CHIMIE (CFEC) - STECO**

77 à 97 rue de la Bongarde
 BP 68
 92233 Gennevilliers cedex
 Tél. : 33 (0)1 47 93 45 10 / 98 50
 Fax : 33 (0)1 47 93 89 96
 Téléx : CFEC GEN 630 884 F

ECOSOLAIRE / SERELIO

19 rue Pavée 75004 Paris
 Tél. : 33 (0)1 48 87 43 60
 Fax : 33 (0)1 48 87 86 27
 Téléx : 214 235 F

EQUINOXE

80 rue de la Mairie
 60170 Cambronne-les-Ribecourt
 Tél. : 33 (0)3 44 76 76 01
 Fax : 33 (0)3 44 76 75 14
 Téléx : 145 211 F

FONDEM

146 rue de l'Université
 75007 Paris
 Tél. : 33 (0)1 44 18 00 80
 Fax : 33 (0)1 44 18 00 36

GENEC CADARACHE

Bât. 351 - CEA Cadarache
 13108 Saint-Paul-Lez-Durance
 Tél. : 33 (0)4 42 25 66 67
 ou 20 46 / 70 74
 Fax : 33 (0)4 42 25 73 73

GERES

73 avenue Corot 13013 Marseille
Tél. : 33 (0)4 91 70 92 93
Fax : 33 (0)4 91 06 19 46

GISMAN

85 avenue de Neuilly
94120 Fontenay-sous-Bois
Tél. : 33 (0)1 43 94 01 02
Fax : 33 (0)1 43 94 27 31

**GROUPE DE RECHERCHE ET
D'ECHANGES TECHNOLOGIQUES
(GRET)**

211-213 rue La Fayette 75010 Paris
Tél. : 33 (0)1 40 05 61 61
Fax : 33 (0)1 40 05 61 10 / 11
Télex : 212 890 F

GRUNDFOS

Parc d'activités de Chesnes
57 rue de Malacombe, BP 7
38290 Saint-Quentin-Fallavier
Tél. : 33 (0)4 74 94 32 99 / 74 82 15 15
Fax : 33 (0)4 74 94 10 51
Télex : 308 296 F

NAPS FRANCE

35 allée du 12 Février 1934, Noisiel
77437 Marne la Vallée cedex 2
Tél. : 33 (0)3 60 37 35 60
Fax : 33 (0)3 60 37 84 11

OLDHAM FRANCE S.A.

ZI Est BP 962
Rue Alexandre Flemming
62033 Arras cedex
Tél. : 33 (0)3 21 73 21 34 / 21 60 25 25
Télex : 133617 F
Fax : 33 (0)3 21 73 16 51

PHOTOWATT INTERNATIONAL S.A.

33 rue Saint-Honoré
ZI Champfleuri
38300 Bourgoin-Jallieu
Tél. : 33 (0)4 74 93 80 20
Fax : 33 (0)4 74 93 80 40

SES SARL

10 rue Saint-Jean
83570 Cotignac
Tél. : 33 (0)4 94 04 77 34
Fax : 33 (0)4 94 04 78 49

SOLARCOM

ZI de Bastillac Nord 65000 Tarbes
Tél. : 33 (0)5 62 34 77 07
Fax : 33 (0)5 62 34 58 89
Télex : 520 977 F

**SOLAREX (Représentant en France de la
société mère américaine)**

1 place Royale 78230 Le Pecq
Tél. : 33 (0)5 34 51 81 77
Fax : 33 (0)5 34 51 81 88

SOLEMS

3 rue Léon Blum
ZI Les Glaises 91124 Palaiseau cedex
Tél. : 33 (0)3 60 13 34 40
ou 69 19 43 40
Fax : 33 (0)3 60 13 37 43
Télex : 690 549 F

**STRATEGIE ENERGIE
ENVIRONNEMENT DEVELOPPEMENT
(SEED)**

11 boulevard Brune 75014 Paris
Tél. : 33 (0)1 45 45 90 32
Fax : 33 (0)1 45 45 31 08
Télex : 200 907 F

TECHSOL

13 avenue Jean-Moulin
95350 Saint-Brice-sous-Forêt
Tél. : 33 (0)2 39 90 24 68
Fax : 33 (0)2 42 78 19 58

TECSOL

5 rue François Viète - BP 434
66004 Perpignan cedex
Tél. : 33 (0)4 68 66 13 00 / 57 58
Fax : 33 (0)4 68 66 88 07

TENDANCIEL

BP 55
91173 Viry Chatillon
Tél. : 33 (0)1 69 24 75 75
Fax : 33 (0)1 69 24 75 94

TOTAL ENERGIE

ZI le Tronchon, 7 chemin du Plateau
69570 Dardilly
Tél. : 33 (0)4 78 47 44 55
Fax : 33 (0)4 78 64 91 00
Télex : 306 115 F

TRANSENERGIE

3D allée Claude Debussy
69130 Ecully
Tél. : 33 (0)4 72 86 04 04
Fax : 33 (0)4 72 86 04 00

VERGNET S.A.

6 rue Henri Dunant
45140 Ingre
Tél. : 33 (0)2 38 43 36 52
Fax : 33 (0)2 38 88 30 50

Gabon

CGE GABON
ZI Oloumi
BP 3916
Libreville
Tél. : (241) 76 01 71
Fax : (241) 74 12 99

ENERDAS GABON

BP 15073
Libreville
Tél. : (241) 77 47 21
Fax : (241) 77 47 22

Gambie

VM SOLAR - THE GAMBIA Ltd.
Opposite Sir Dawda
Primary School
PMB 38, Banjul
Tél. : (220) 22 69 47 / 22 62 87
Fax : (220) 22 69 47 / 22 62 87

Grande Bretagne

BP SOLAR
P.O. Box 191
Chetsey Road - Sunbury on Thames
Middlesex TW16 7XA
Tél. : (44) 1932 779 543
Fax : (44) 1932 762 686

CHLORIDE SOLAR Ltd.

Lansbury Estate
Lower Guilford road
GU21 2EW Knaphill, Woking
Tél. : (44) 0483 - 79 77 73
Fax : (44) 0483 - 79 72 69
Télex : 859791

**ENERGIE FOR SUSTAINABLE
DEVELOPMENT Ltd. (ESD)**

51 Artesian Road
GB-W2 5DB Londres
Tél. : (44) 071 - 792 22 41
Fax : (44) 071 - 792 25 43
Télex : 94081148 SUDEV G

**INTERMEDIATE TECHNOLOGY
DEVELOPMENT GROUP (ITDG)**

Myson House
Railway Terrace
CV21 3HT Rugby
Tél. : (44) 0788 - 60 631
Télex : 317 466

IT POWER Ltd

The Warren
Bramshill Road
RG27 0PR Eversley, Hants
Tél. : (44) 0734 - 73 00 73
Fax : (44) 0734 - 73 08 20
Télex : 846 852 POWERG

SOLAPAK Ltd.

Factory Three - Cock Lane
HP13 7DE High Wycombe, Bucks
Tél. : (44) 0494 - 45 29 45
Télex : 837383

Guadeloupe

APEX CARAIBES
Complexe World Trade Center 3-8
Zone de commerce international
97122 Baie Mahault
Tél. : (590) 25 06 37
Fax : (590) 25 06 38

SOLELEC CARAIBES
3 rue Robert-Fulton, ZI du Jarry
97122 Baie Mahault
Tél. : (590) 26 78 79
Fax : (590) 26 74 48
Télex : 919 899 GL

Guyane

SAGEES GUYANE
22ZI Collery 3 - RN 3
97300 CAYENNE
Tél. : (594) 30 00 75
Fax : (594) 30 00 80

SOLELEC GUYANE
14 rue Louis Blanc 97300 Cayenne
Tél. : (594) 30 57 55
Fax : (594) 30 56 84

Inde

**BHARAT HEAVY ELECTRICALS
LIMITED (BHEL) - Electronics division**
Mysore Road - P.O. Box 2606
560026 Bangalore
Tél. : (91) 62 42 83 / 60 30 24
Fax : (91) 0812 62 31 37
Télex : 0845 2436 / 8151

**TATA ENERGY RESEARCH INSTITUTE
(ITERI)**
7 Jor Bagh
110003 New Delhi
Tél. : (91) 61 50 32 / 69 05 03
Fax : (91) 11 - 42 17 70
Télex : 31 61593 TERI IN

Italie

ANIT Srl.
Via A. Pacinotti, 20
16151 Gênes
Tél. : 010 - 46 61 37
Fax : 010 - 41 30 12

ESTI CEC
Joint Research Center
21020 ISPRA
Varese
Tél. : (39) 332 - 78 91 11
Fax : (39) 332 - 78 90 01
Télex : 380 042 / 380 058

EUROSOLARE
Via A. D'Andrea 6
00048 Rome
Tél. : 39 (0) 6 - 98 56 01
Fax : 39 (1) 6 - 98 50 267

HELIOS TECHNOLOGY Srl.
Via Postumia, 11
35010 Carno Gnano di Brenta
Tél. : (049) 94 30 288
Fax : (049) 94 30 323

IDEA S.R.L.
Via Gastone Rossi 13/3
40138 Bologna (BO)
Tél. : (39) 51 - 39 36 87
Fax : (39) 51 - 39 48 38

**IMEXLA SISTEMI ENERGETICI
INTEGRATI SRL (ISEI)**
Via S. Jacopo 32
50047 Prato (FI)
Tél. : (39) 574 - 24 051 / 60 54 15
Fax : (39) 574 - 36863
Télex : 570045 IMEXLA I

ITALSOLAR S.P.A.
Via del Giorgione 59/63
147 Rome
Tél. : (39) 6 - 59 00 69 83 / 4
Fax : (39) 6 - 59 00 60 50
Télex : 623137 ITALS2

Japon

KYOCERA - SOLAR ENERGY DIVISION
 2 F Eisen Karasuma Bldg, 680
 Karasumadori - Bukkoji - Sagaru
 Shimogyo-Ku - Kyoto 607
 Tél. : (075) 344 8241 - Fax : (075) 344 8240

Kenya

ANIMATICS LIMITED
 Baumann House
 Haile Selassie Avenue
 P.O. Box - 72011 Nairobi
 Tél. : (254) 2 - 210 300
 Fax : (254) 2 - 210 315

SKYTECH COMMUNICATIONS

P.O. Box 28738 - Nairobi
 Tél. : (254) 2 - 803 268
 Fax : (254) 2 - 228 443

Luxembourg

ELECTROLUX
 4, rue de la Frontière
 L-9412 Vianden
 Tél. : 84595. Fax : 848 11-300

Mali

DIRECTION NATIONALE DE
 L'HYDRAULIQUE (DNHE)
 BP 66 - Bamako
 Tél. : (223) 22 60 41

SOMIMAD

BP 1910 - Bamako
 Tél. : (223) 22 33 30
 Fax : (223) 22 32 39

Maroc

CASABLOC ACCUS NATIONAL
 163 rue Hadj Amar Riffi
 Casablanca
 Tél. : (212) 2 - 31 81 40 / 30 39 97
 Fax : (212) 2 - 31 80 41

CELLULE PROJET PPER

Direction générale des collectivités locales,
 Ministère de l'Intérieur
 Rabat Chellah
 Tél. : (212) 77 605 59
 Fax : (212) 77 607 59

SIGMA TECH Ingénierie S.A.

5 rue Midelt
 Rabat
 Tél. : 76 89 61 / 62 / 63
 Fax : 76 89 64

Martinique

SOLELEC MARTINIQUE
 61 Lot. Les Horizons - Acajou
 97232 Le Lamentin
 Tél. : (596) 50 53 34
 Fax : (596) 50 54 64

SUNWIND ENERGIES

ZI Petite Cocotte
 97224 Ducos
 Tél. : (596) 56 20 37 / 56 29 88
 Fax : (596) 56 39 13

Mauritanie

M. FADHEL BA
 BP 830
 Nouakchott
 Tél. : (222-2) 527 83
 Fax : (222-2) 527 83
 Téléx : 879 MTN pour la BP 830

Niger

SNIT
 BP 11244 Niamey
 Tél. : (227) 74 13 05
 Fax : (227) 73 39 98

Norvège

NOACK SOLAR INTERNATIONAL
 Kjelsaveien 160
 P.O. Box 79, Kjelsaas
 411 Oslo 4
 Tél. : (47) 2 - 20 66 90
 Fax : (47) 2 - 15 18 08
 Téléx : 71128 Noack N

Nouvelle Calédonie

PACIFIC ENERGIE
BP 8019 - Nouméa Sud
Tél. : (687) 27 62 27
Fax : (687) 27 62 27

Pays-Bas

R & S
Postbus 3049
5700 JC Helmond
Lagedijk 26
5705 BZ Helmond
Tél. : 0492 - 52 33 35
Fax : 0492 - 54 96 65

Polynésie Française

INSTITUT DES ENERGIES
RENOUVELABLES DU PACIFIQUE SUD
(IERPS)
BP 11530
Mahina, Tahiti
Tél. : (689) 48 20 20 . Fax : (689) 48 28 17
Télex : COMMER 318 FP-274 FP

SOLER ENERGIE
BP 4100 - Papeete
Tél. : (689) 43 02 00
Fax : (689) 43 46 00

La Réunion

APEX OCEAN INDIEN
14, rue de la Guadeloupe
97490 Sainte Clotilde
Tél. : (262) 92 10 14
Fax : (262) 28 19 72

SOLELEC REUNION

Z.A. Ravine à Marquet
rue Antonifotsy
97419 La Possession
Tél. : (262) 42 41 80
Fax : (262) 42 41 89

Sénégal

CENTRE D'ETUDES ET DE
RECHERCHE SUR LES ENERGIES
RENOUVELABLES (CERER)
Université de Dakar
BP 476 Dakar
Tél. : (221) 32 14 14

CGE Sénégal
2 avenue du Président Lamine Gueye
BP 237 Dakar
Tél. : (221) 23 61 45
Fax : (221) 23 78 30

**ENVIRONNEMENT ET
DEVELOPPEMENT DU TIERS-MONDE
(ENDA)**

Programme Energie
54 rue Carnot
BP 3370 Dakar
Tél. : (221) 22 54 83 / 22 24 96
Fax : (221) 22 29 95
Télex : 51456 ENDA SG

SAHEL ENERGIE SOLAIRE
SOFRACO 127
Box 342 Thiès
Tél. : (221) 51 23 31
Fax : (221) 51 23 31

SEEE SENEGAL
BP 7570 Dakar
Tél. : (221) 22 15 20
Fax : (221) 22 12 54

SERVICES DE L'ENERGIE EN MILIEU
SAHELIEN (SEMIS)
BP 652 Dakar
Tél. : (221) 21 58 11
Fax : (221) 22 61 89

Suisse

ORGANISATION MONDIALE DE LA
SANTÉ (OMS),
Programme élargi de vaccination (PEV)
(WHO EPI)
Via Appia
1211 Genève 27
Tél. : (41) 22 - 791 41 72
Fax : (41) 22 - 791 07 46
Télex : 415 416

Tanzanie

BP TANZANIA LTD
P.O. Box 9043
Dar es Salaam
Tél. : (255) 26 26 15
Télex : 41192

Tchad

BOK Sarl
BP 961 N'Djaména
Tél. : (235) 52 23 32
Fax : (235) 52 23 32

Thaïlande

ASIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY
(AIT)
Km 42, Paholyothin Highway, Klong Luang
Pathumthani
G.P.O. Box 2754
10501 Bangkok
Tél. : (66) 2 - 516 01 10 29
Fax : (66) 2 - 516 21 26
Télex : 84276 TH

BP THAI SOLAR CORPORATION Ltd
01/47/9 Nava Nakorn
Ind. Est. Phaholyothin road, Klong 1
Klong Luang, Pathumathani)
Tél. : (66) 2 - 529 11 05
Télex : 20889 BPTHSOL TH

Tunisie

AGENCE POUR LA MAITRISE DE
L'ENERGIE
3 rue Huit Mille 1002 Tunis
Tél. : (216) 1 787 700
Fax : (216) 1 784 624

NATRA
Cité Ennessim 2070 La Marsa
Tél. : (216) 1 - 752 300
Fax : (216) 1 - 752 766

Zimbabwe

PHILIPS ELECTRICAL Ltd
62 Mutare Road
Beverley P.O. Box 994
Harare
Tél. : (263) 4 - 486 571
Fax : (263) 4 - 486 698

Bibliographie

L'éclairage

OUVRAGES DE BASE

Ouvrages reliés disponibles à la vente chez l'éditeur

Jérôme BILLEREY. *Le pompage photovoltaïque*. Paris : Gret, Afme , Mcd ; Marseille : Geres ; 1986 ; 125 p.

Jérôme BILLEREY. *Le pompage solaire photovoltaïque*. Treize années d'expérience savoir-faire au Mali. Paris : Afme, Mcd ; Bamako : Dnhe ; 1991 ; 90 p.

Théodore FOGELMAN. *Systèmes photovoltaïques pour les pays en développement*. Manuel d'installation et d'utilisation. Paris : Mcd, Afme ; Marseille : Systèmes AMI ; 1982 ; 251 p.

Théodore FOGELMAN, Régis MONTLOIN. *Installations photovoltaïques dans l'habitat isolé*. Aix En Provence : Edisud ; 1983 ; 268 p.

GRET, IT DELLO. *Les énergies de pompage*. Paris : Gret, IT Dello, Mcd ; 1985, 271 p.

Anthony DERRICK, Catherine FRANCIS, Varis BOKALDERS. *IT Power, Swedish missionary council, The Stockholm Environment Institute Solar photovoltaic products. A guide for development workers*. Londres : Intermediate Technology Publications ; 1991 ; 127 p

Jeff KENNA, Bill GILLET. *Solar water pumping handbook*. Londres : Intermediate Technology Publications ; 1985 ; 123p

Guide de l'énergie. Paris : Seed, Acct, Mcd ; Québec : Iepf ; 1988 ; 460 p.

Livres et brochures

Michel COURILLON. *Le pompage photovoltaïque et l'approvisionnement en eau*. Paris : Afme ; 1988 ; 63 p.

OMS PEV. *Infrastructure centrale ou régionale pour l'installation et la maintenance de réfrigérateurs photovoltaïques. Guide de création et de gestion*. Genève : Oms ; 1990 ; 139 p

Bernard Mc NELLIS, Anthony DERRICK, Michael STARR. *IT Power, Unesco. Solar-powered electricity - A survey of photovoltaic power in developing countries*. Londres : Intermediate Technology Publications ; 1988 ; 87 p.

J. BURET-BAHRAOUI, F.A. SENHAJI, S. OUATTAR. *Fondation internationale pour la science. Les technologies appropriées pour le développement rural : Séchoirs solaires et systèmes photovoltaïques*. Rabat : Les éditions Toubkal ; 1990 ; 239 p.

CCE. P. COROLLER, W. KAUT. *L'électrification photovoltaïque de 40 habitations isolées en France ; projet de démonstration*. Luxembourg : Cce ; 1988 ; 103 p.

Bernard CHABOT. *Energies renouvelables et production décentralisée d'électricité*. Colloque "la production décentralisée d'électricité", Paris, 21-22 janvier 1991. Valbonne : Afme ; 1991/01 ; 30 p.

Diao BA, Antoine FARCOT, Mamadou Amar ATHIE, Luc HOANG-GIA. *Systèmes photovoltaïques et activités de services énergétiques en zone rurale au Sénégal*. Dakar : Cerer ; 1990 ; 15 p.

Bernard CHABOT. *L'utilisation de l'électricité photovoltaïque pour l'électrification rurale : bilan et perspectives*. Séminaire "Problèmes et perspectives de l'électricité dans le bassin méditerranéen", Rabat, 7 au 10 novembre 1989. Valbonne : Afme ; 1989/11 ; 15 p.

GTZ, *La pré-électrification solaire en milieu rural: les expériences et les perspectives d'une diffusion des systèmes photovoltaïques familiaux*, Programme spécial Energie, Documents-Volume 6, 1991, 237 p.

The World Directory of Renewable Energy, Suppliers and Services 1995, 576 p.

Bernard GAY, *L'énergie solaire photovoltaïque, un outil de développement*, Présentation résumée, cahier n° 7, Programme Solidarité Eau (GRET), Décembre 1993, 46 p.

Michel RODOT et Abdelhanine BENALLOU, *Electrification solaire au service du développement rural*, Guide de l'énergie solaire, RIES, 1993, 172 p.

GRUPE ENERGIE DEVELOPPEMENT, *La demande d'électricité rurale. L'électrification hors réseau*. AFME, CIRED, ECP (LEIS), N° 3 Septembre 1991, 40 p.

FONDS NATIONAL POUR LE DÉVELOPPEMENT DES ADDUCTIONS D'EAU, *Application de l'énergie photovoltaïque à l'alimentation en eau potable en zone rurale*, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, Document technique n° 12, Edition 1995, 44 p.

Divers

CAS. *Systèmes solaires*. Revue. Paris : Cas.

GRET. *Lettre d'information documentaire (LID)*. Lettre. Paris : Gret. Documentation consultée.

Cours

Bernard CHABOT. *Le pompage photovoltaïque*. Valbonne : Afme ; 1990/09 ; 26 p. – *Economie de l'électricité photovoltaïque : produits, services, marchés*. Cours Unesco "Electricité solaire pour les zones rurales et isolées", Paris, juillet 1990. Valbonne : Afme ; 1990/07 ; 22 p.

André CLAVERIE. *De la R et D au marché : l'électricité photovoltaïque en France et dans le monde*. Cours Unesco "Electricité solaire pour les zones rurales et isolées". Valbonne : Afme ; 1990/07 ; 18 p.

Alain ANGLADE. *La gestion de projets photovoltaïques*. Cours Unesco "Electricité solaire pour les zones rurales et isolées". Valbonne : Afme ; 1990/07 ; 21 p.

Gérard MOINE. *L'électricité photovoltaïque ; principes, applications*. Dardilly : Total Energie Solélec ; 101 p.

Etudes générales

Carine BARBIER, *La pré-électrification solaire en milieu rural en Afrique de l'Ouest, Reflexions sur les expériences de diffusion de systèmes photovoltaïques décentralisés pour l'éclairage et l'alimentation d'appareils audio-visuels*, Mémoire de DESS de l'Université de Paris X Nanterre, Février 1992, 86 p.

Par pays

Inde - Népal

Denis BLAMONT. *L'énergie solaire dans les campagnes indiennes : une technique douce pour des problèmes durs. Le programme ASVIN du CNRS*. Meudon : Cnrs ; 1990/08 ; 17 p.

Mali

Jérôme BILLEREY. *Rapport d'activité de la cellule d'entretien des équipements solaires ; campagne 1988-1989*. Bamako : Dnhe ; 1989/07 ; 24 p.

Philippines

GTZ. *Fact sheets of selected photovoltaic applications*. Eschborn (Allemagne): GTZ ; 1991 ; 39 p.

Sénégal

Direction de l'énergie, *Statistiques énergétiques, énergies renouvelables*, République du Sénégal, Ministère de l'Energie, des Mines et de l'Industrie, Mars 1994, 19 p.

Rwanda

SOGEC, *Etude de marché pour la commercialisation des systèmes photovoltaïques au Rwanda*, République Rwandaise, Ministère des Travaux Publics et de l'Energie, projet gestion rationnelle de l'énergie et de l'environnement (GREEN), Août 1993, 103 p.

Zaire

Valérie CORNILLON, Michel ZAFFRAN. OMS PEV. *Commercialisation d'électricité solaire : une contribution aux frais de fonctionnement du Pev dans la zone de santé rurale de Nselo, sous région de la Lukaya, Zaire - Evaluation à mi-parcours du projet pilote*. Genève : Oms ; 1991/01 ; 82 p.

OUVRAGES PARUS
DANS LA COLLECTION *LE POINT SUR*

- Du grain à la farine (1988, 140 FF)
- Les éoliennes de pompage (1989, 100 FF)
- Danger, termites ! Préserver les constructions des dégâts des termites. (1990, 100 FF)
- L'irrigation villageoise. Gérer les petits périmètres irrigués au Sahel. (1992, 170 FF)
- Produire du savon. Technique de production à l'échelle artisanale et micro-industrielle.(1992, 80FF)
- Diagnostic rapide pour le développement agricole (1993, 95 FF)
- Conserver et transformer le poisson (1993, 130 FF)
- La culture des champignons (1993, 130 FF)
- Jardins des villes, jardins des champs. Maraîchage en Afrique de l'Ouest. Du diagnostic à l'intervention. (1994, 190 FF)
- Transformer les fruits tropicaux (1995, 140 FF)
- Sécher des produits alimentaires. Techniques, procédés, équipements. (1995, 175 FF)
- Guide d'aide à la décision en agroforesterie (1995-1996, Tome 1 : 125 FF - Tome 2, Fiches techniques: 125 FF)

JOUVE
11, bd de Sébastopol, 75001 Paris
Imprimé sur presse rotative numérique
N° 385841H - Dépôt Légal : Novembre 2005

Imprimé en France

L'ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE

Dans les pays en développement, les demandes des populations en énergie sont croissantes. Les réseaux électriques ne peuvent être systématiquement étendus dans les campagnes ou en périphérie des villes. Dans bien des cas, l'énergie solaire représente une alternative pertinente, en particulier pour l'éclairage, le pompage et les télécommunications.

Ce livre fait le point sur le photovoltaïque. Il explique les avantages et inconvénients de cette technique, selon les contextes et les types d'utilisation.

Il répond à quatre questions majeures : quand faut-il opter pour le photovoltaïque ? Quels sont les choix techniques à opérer ? Quelles sont les conditions de rentabilité du photovoltaïque ? Où peut-on s'adresser pour obtenir des matériaux et des adresses ?

Tout responsable de projet, ingénieur ou technicien y trouvera une information à la fois complète et précise.

Ce livre intéressera aussi ceux qui souhaitent approfondir leur connaissance du photovoltaïque.

GRET

213, rue La Fayette 75010 Paris France
Tél. : 33 (0)1 40 05 61 61. Fax : 33 (0)1 40 05 61 10

Photo de couverture : Luc Chancelier

ISBN : 2 - 86844 - 081 - 9

Prix : 19.50 €

