

# Recommandations pour les installations photovoltaïques de pompage et de potabilisation

*Une étude financée par la Commission européenne, DG Tren, Programme "Energy, Environment and Sustainable Development"*



FONDATION ÉNERGIES  
POUR LE MONDE



ISBN : 2-913620-18-3

**Recommandations pour les installations photovoltaïques  
de pompage et de potabilisation**

Dépôt légal : juin 2003

Éditeur : **SYSTÈMES SOLAIRES**

146, rue de l'Université – 75007 Paris

Tél. : 01 44 18 00 80 – Fax : 01 44 18 00 36

[www.energies-renouvelables.org](http://www.energies-renouvelables.org)

## Sommaire :

---

I INTRODUCTION.....	2
II FONCTIONNEMENT ET SPÉCIFICATIONS DES SYSTÈMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUES.....	5
II.1 Fiabilité.....	6
II.2 Sécurité.....	19
II.3 Bilans énergétiques.....	20
II.4 Facilité d'utilisation.....	27
II.5 Installation.....	28
II.6 Entretien / maintenance.....	29
III EXPLOITATION DES SYSTÈMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUES.....	30
BIBLIOGRAPHIE.....	32

## I. INTRODUCTION

*« ... on peut affirmer aujourd'hui qu'un niveau de fiabilité élevé a été atteint grâce à des précautions techniques adoptées par le programme. »*

*« ... presque la moitié des villages trouve leur réseau de distribution sous dimensionné, on a observé de nombreux problèmes techniques sur la distribution au niveau du réservoir de stockage ou des bornes-fontaines... »*

*« Cette différence entre les besoins estimés et la consommation réelle peut en partie s'expliquer par les hypothèses utilisées pour la première évaluation. La consommation journalière a été calculée sur la base de 20 litres d'eau par personne et 40 litres par tête de troupeau. En réalité, ces standards sont rarement vérifiés... »*

(Programme Régional Solaire, leçons et perspectives)\*

*« ... les problèmes d'organisation des usagers pour une réelle sécurisation des installations et une exploitation optimale des capacités installées restent à résoudre durablement... »*

(L'Électrification Rurale Décentralisée)\*\*

Ces phrases sont extraites d'un ouvrage sur l'électrification rurale décentralisée et des documents d'évaluation du programme PRS. Ce programme de pompage solaire, exécuté dans les pays du Sahel entre 1990 et 1995, sous les auspices de la Commission européenne, a conduit à l'installation de 626 systèmes de pompage photovoltaïques totalisant une puissance installée de 1 330 kW crête et fournissant de l'eau potable à plus d'un million de personnes. Ce programme représente la plus importante et la plus audacieuse initiative de mise en œuvre de la technologie du pompage photovoltaïque dans des pays en développement. L'exploitation et le fonctionnement des installations ont été régulièrement suivis et évalués au cours des années. Les enseignements tirés sont de ce fait intéressants : ils montrent principalement que la technologie photovoltaïque fait preuve d'une qualité telle qu'il est aujourd'hui possible de parler d'une technologie mature, offrant une fiabilité adaptée aux contextes ; ils montrent aussi que les aspects liés aux contextes décentralisés ne sont pas encore adaptés aux réalités locales. L'estimation de la demande, la qualité des infrastructures hydrauliques et la gestion des systèmes sont, pour ne citer que les critères les plus significatifs, des questions qui vont demander un effort supplémentaire aux chercheurs, dans l'analyse comparée de nouvelles expériences, avant de pouvoir arriver à des réponses globales adaptées.

Ce présent document ne regardera pas en détail les techniques des expériences passées ; la littérature spécialisée montre que ces questions sont illustrées par un grand nombre d'exemples comme on peut le voir dans les illustrations 1 à 5, page suivante.

\* : Regional Solar Programme. Lessons and Perspectives. CE-DG VIII – CILSS, Ed. Fondation Énergies pour le Monde, 1999.

\*\* : C. de Gouvello, Y. Maigne, L'Électrification Rural Décentralisée. Ed. Systèmes Solaires, 2000.

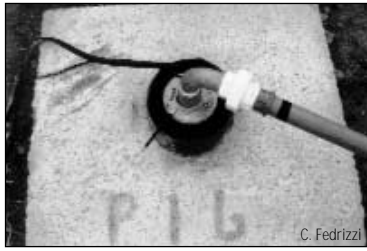


Photo 1 : La tête de forage n'est pas fermée.



Photo 2 : Une filtration est disposée à l'extérieur du réservoir.



Photo 3 : La corrosion du tuyau est si importante qu'on peut le percer avec un couteau.

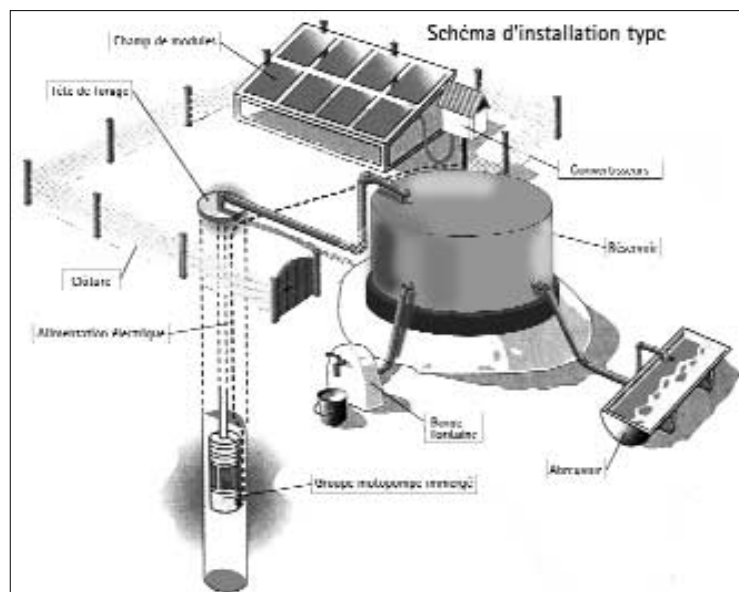


Figure 4 : L'herbe fait de l'ombre aux modules.



Figure 5 : Le positionnement au ras du sol favorise l'accumulation de poussière sur les modules.

Le système photovoltaïque de pompage le plus courant, selon l'état de l'art actuel, est constitué d'une pompe centrifuge mue par un moteur à induction triphasé. Le moteur est alimenté par un générateur photovoltaïque sans batteries, via un onduleur triphasé à fréquence variable conçu spécifiquement pour cette application.



Son domaine d'utilisation couvre la gamme de 500 à 1 500 m<sup>3</sup>/jour, avec des hauteurs qui varient de 20 à 60 mètres. Sans remettre en cause la maturité déjà mentionnée, le domaine du pompage photovoltaïque assiste régulièrement à l'apparition d'innovations technologiques qui cherchent, bien évidemment, à améliorer le service rendu (onduleurs à fréquence conventionnelle pour réduire les coûts par exemple) et à accroître le champ d'applications (pompe hélicoïdale pour des hauteurs supérieures à une centaine de mètres, etc.).

Ces innovations doivent être saluées, mais il ne faut pas oublier que toute amélioration technique apporte des risques qui ne doivent pas entacher la qualité du service rendu aux usagers.

Quelques exemples, comme celui mentionné ci-dessus, montrent que les risques sont réels et que des précautions doivent être prises pour s'assurer de la qualité technique des systèmes lors de la mise en œuvre de programmes de pompage photovoltaïques.

Au Sud du Maroc, et depuis 1995, un programme de pompage solaire a été réalisé, permettant à plus de 12 000 personnes dans 23 villages, d'être alimentées en eau fournie par autant de systèmes de pompage solaires associés à des infrastructures de distribution. Chaque maison bénéficie ainsi d'une alimentation en eau individuelle.

Le projet a à son actif plus d'un million de m<sup>3</sup> d'eau pompés à fin 2002. Il inclut quelques particularités, dont un monitoring avec l'enregistrement journalier de la quantité d'eau pompée, système par système, et d'un enregistrement mensuel de celle consommée dans chaque maison. Cette expérience constitue une excellente occasion de réflexion sur le pompage photovoltaïque en général. Ce partage d'expériences répond par ailleurs au vœu de la Commission européenne qui a apporté, avec le contrat NNE5-2000-35, son appui pour systématiser les recommandations de ces réflexions et assurer leur large diffusion.

Le document présent résulte d'un travail réalisé dans le cadre du contrat mentionné et vise à jeter les bases de spécifications techniques des systèmes de pompage photovoltaïques en général. Au travail effectué au cours de l'expérience marocaine viennent s'ajouter d'autres expériences, dont les leçons ont pu être étudiées. De plus, une première version de ce document a pu circuler auprès d'experts de plusieurs pays et leurs commentaires ont été pris en compte. La méthodologie de travail s'est inspirée de celle utilisée pour la réalisation du document "Normes techniques universelles pour les systèmes solaires domestiques", publié en 1999, et largement utilisé depuis pour la rédaction de spécifications techniques de systèmes solaires individuels.

Fidèle aux lignes directrices de cet ouvrage, le présent document s'intéresse à la conception et au fonctionnement des systèmes de pompage solaires. Il en tire concrètement des spécifications techniques auxquelles doivent répondre les équipements.

**Nota** : (O) correspond aux mentions obligatoires  
(R) correspond aux mentions recommandées  
(S) correspond aux mentions suggérées

## II. FONCTIONNEMENT ET SPÉCIFICATIONS DES SYSTÈMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUES

Les systèmes de pompage photovoltaïques sont, en général, constitués des éléments suivants :

- > **un générateur photovoltaïque** lui-même composé de modules photovoltaïques, interconnectés électriquement entre eux pour constituer une unité de production de courant continu (DC). Il comporte aussi une structure métallique pour supporter l'ensemble ;
- > **une unité de conditionnement de puissance**, constituée d'un convertisseur DC/AC, capable de faire varier la fréquence et la tension de sortie en fonction de la puissance disponible du générateur solaire, elle-même fonction de l'irradiation solaire qu'il reçoit ;
- > **un groupe électropompe immergé**, constitué d'un moteur électrique à induction et d'une pompe centrifuge ou volumétrique ;
- > **un câblage électrique**, par lequel transitent l'énergie du générateur au moteur, et les informations relatives aux contrôles de sécurité ;
- > **une infrastructure hydraulique** qui conduit l'eau de sa source, (souvent un puits ou un forage), jusqu'aux points de distribution. Celle-ci comporte les quatre éléments suivants :
  - la source d'eau ;
  - la conduite d'amenée jusqu'au stockage ;
  - un système de stockage d'eau (réservoir, bache, etc.) ;
  - le réseau de distribution depuis le stockage jusqu'aux lieux de consommation.
- > **un système de potabilisation** répondant aux normes en vigueur, pour s'assurer de la qualité sanitaire de l'eau.

Dans cette nomenclature, les conduites et les réseaux comportent la tuyauterie, les dispositifs de mesure et les interfaces nécessaires.

La majorité des pompes solaires actuelles destinées à l'approvisionnement en eau potable de populations rurales répond à cette définition et leurs performances journalières sont souvent supérieures à 400 m<sup>4</sup> (débit x hauteur). D'autres configurations (pompes de surface, avec batteries, pompes bélier, etc.) sont, bien entendu, possibles et répondent à des secteurs de marché spécifiques, tels que la fourniture de débits journaliers adaptés à des usages individuels.

Bien que ces systèmes ne soient pas précisément concernés par ce document, les informations fournies, parce qu'elles sont générales, seront susceptibles d'être valables pour ces configurations particulières. Ce marché spécifique, correspondant aux usages domestiques, offre de bons produits dans la gamme 50 à 400 m<sup>4</sup>, mais il est toutefois nécessaire de souligner que ces systèmes fonctionnent en courant continu, donc en l'absence de convertisseur, avec ou sans batteries. Le terme convertisseur, appareil transformant le courant continu en courant alternatif, doit être entendu comme générique dans ce qui suit.

Un système de pompage doit être jugé par le degré de qualité des critères suivants :

- > **fiabilité** ;
- > **sécurité** ;
- > **rendement énergétique** ;
- > **facilité d'utilisation** ;
- > **facilité d'installation et d'entretien** ;
- > **qualité sanitaire de l'eau fournie**.

Si certains pourront s'étonner de voir le critère de qualité sanitaire de l'eau figurer en dernière ligne, il est important de souligner combien la mauvaise qualité de l'eau est responsable, en milieu rural dans les pays du Sud, de diverses maladies graves, affectant l'ensemble de la population. Cependant et *a contrario*, il est important de noter que la qualité de l'eau n'est pas une des priorités de ces populations.

À l'inverse des mentalités urbaines, il faut mentionner que les populations rurales sont plus attentives à d'autres critères et en particulier à la quantité d'eau disponible, à l'effort déployé pour le puisage, au goût, etc.

En faisant abstraction des considérations éthiques que la différence de priorités entre riches et pauvres peut poser, la qualité sanitaire de l'eau est un paramètre à prendre en compte de façon prioritaire pour permettre aux usagers de s'engager sur le long terme vis-à-vis des contraintes d'installation et d'utilisation d'une pompe solaire (paiement du service, entretien, création de revenus, etc.).

Les critères listés plus haut impliquent une rigueur dans le choix du matériel et de son installation : elle est traduite dans ce qui suit en termes de spécifications techniques précises. Celles-ci pourront être incluses telles quelles dans les documents relatifs à l'approvisionnement et à l'installation des équipements de pompage solaires (cahier des charges).

Il est utile de noter que les spécifications techniques dépendent souvent non pas d'un, mais de plusieurs des critères mentionnés. Par exemple, les spécifications destinées à éviter les fuites d'eau ou la corrosion dans les tuyauteries affectent la fiabilité, mais aussi la facilité d'entretien et la qualité sanitaire de l'eau.

Dans ce type de cas, et pour être bref, seule la première problématique, la fiabilité, sera considérée.

## II.1 Fiabilité

La fiabilité des systèmes de pompage, c'est-à-dire l'absence de pannes, dépend non seulement de celle des composants, mais aussi d'autres aspects du système comme la capacité de la ressource en eau, la qualité de l'installation, etc. Chaque composant du système doit répondre à des critères de qualité similaires, car la qualité de chaque composant, pris séparément, rejaillit sur celle de l'ensemble.

Cette fiabilité doit s'entendre ici en termes de disponibilité de l'eau. La nuance est importante car la qualité des composants dépend de l'environnement dans lesquels ils fonctionnent.

Par exemple, un robinet de bonne qualité, mais que l'on ne trouverait pas sur le marché local, est



en fait moins fiable qu'un robinet de qualité inférieure, mais dont les pièces détachées sont disponibles localement. Les conséquences d'une panne dans le cas de la première alternative, en termes de disponibilité de l'eau, peuvent être effectivement bien plus graves que dans le second.

### II.1.1 Générateur photovoltaïque

**Les modules photovoltaïques doivent être certifiés selon la norme internationale IEC-61215 ou la norme spécifique d'application dans le pays concerné. (O)**

À ce jour, cette exigence exclut les modules photovoltaïques en couche mince ou "amorphes" ; leur fiabilité étant sujette à de multiples controverses. Il existe cependant des normes spécifiques pour ce type de modules (IEC-61646) et leur usage est accepté dans certains projets d'électrification rurale appuyés par la Banque Mondiale. Cependant, l'expérience pratique de l'usage de cette technologie est à ce jour peu concluante et il est conseillé de prendre un minimum de risques lors du montage de programmes de pompage en milieu rural.

Dans les programmes de pompage photovoltaïques, le poids des modules solaires représente une partie relativement faible du coût global (pour le PRS, 28 % du coût global des systèmes installés hors coûts des réservoirs et des infrastructures de distribution d'eau). Ce constat pousse à ne prendre aucun risque inutile sur un composant dont la réduction de coût n'aura qu'un effet limité sur l'enveloppe financière globale.

Remarque : Récemment un constructeur réputé a mis sur le marché une gamme de pompes systématiquement équipées de modules amorphes. Compte tenu de l'intérêt de cette gamme et du sérieux du fabricant, il est difficile de l'exclure. Il sera alors nécessaire d'exiger de sa part l'apport de garanties claires sur la tenue des modules dans le temps.

**Les modules photovoltaïques doivent être protégés par des diodes pour éviter le phénomène de "hot spot" (O).**

La tension de fonctionnement (en courant continu) des systèmes photovoltaïques est souvent élevée (de l'ordre d'une centaine de volts). Elle peut provoquer des dommages irréparables sur des cellules lorsque l'une d'entre elles est partiellement occultée. Pour éviter cette dégradation, les fabricants fournissent systématiquement des diodes "by-pass". Elles évitent un échauffement trop important des cellules occultées.

Les générateurs photovoltaïques comportent en général un ensemble de branches de modules solaires, elles-mêmes constituées d'une série de modules. Dans des circonstances exceptionnelles et anormales, il est possible qu'un courant inverse parcourt les modules. Il est alors nécessaire de les protéger contre ce phénomène en disposant une diode anti-retour sur chacune des branches de modules. Ce phénomène est cependant extrêmement improbable et il faut savoir que les modules sont capables de supporter jusqu'à 5 fois le courant de court-circuit en conditions standards (I<sub>cc</sub>). Beaucoup pensent que l'usage de diodes anti-retour n'est pas indispensable, ce dispositif étant susceptible d'apporter plus de problèmes que de remèdes. En revanche, il peut être préférable d'in-

corpore un fusible à l'extrémité de chaque branche, calibré à 2 à 4 fois le courant de court-circuit Icc. Un fusible à l'extrémité de chaque branche fournit aussi un moyen facile pour l'isoler du reste du générateur. Ceci est utile lors des opérations de maintenance ou en cas de défaut d'isolement. Il est par conséquent utile de tenir compte des conseils suivants :

- > les générateurs solaires photovoltaïques constitués d'au moins cinq branches en parallèle doivent être protégés contre le phénomène de courant inverse (O) ;
- > la protection par fusibles, calibrés pour un courant de 2 à 4 fois le courant de court-circuit des modules en conditions standards, est particulièrement recommandée (R) ;

Par ailleurs :

- > les structures supports doivent être capables de résister aux intempéries, à la corrosion et aux efforts mécaniques pendant au moins 10 ans (O) ;
- > les structures supports doivent être capables de résister à des vents de 140 km/h (R) ;
- > les modules seront fixés avec une visserie inviolable pour éviter tout risque de vol (R) ;

Plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés : acier inoxydable, acier galvanisé à chaud, bois traité, etc.

- > en cas de fixation de modules sur cadres métalliques, l'ensemble de la visserie et des accessoires de fixation doivent être en acier inoxydable (O) ;

Il est intéressant de mentionner l'existence de modules sans cadre, collés directement sur les structures support grâce à un adhésif approprié. Même s'ils sont encore peu utilisés dans le marché actuel du pompage photovoltaïque, ils ont donné d'excellentes preuves de bon fonctionnement dans d'autres secteurs de marché et peuvent donc être considérés comme acceptables. Il est toutefois indispensable de faire attention à leur fragilité durant leur transport, aux bords coupants et aux angles saillants lors de leurs manipulations. Il faut également être conscient que le collage est une opération bien plus technique que le boulonnage. Il est ici aussi pertinent d'apprécier l'économie éventuelle comparée aux risques encourus. La majorité des experts consultés n'est pas favorable à l'utilisation de systèmes de suivi du soleil (tracking) car l'expérience montre que leur fiabilité est encore sujette à caution. Là encore et de façon similaire aux commentaires sur les modules en couche mince, le gain en performance ne justifie pas une prise de risque supplémentaire. Ainsi :

- > on choisira des structures supports fixes plutôt que des structures mobiles de suivi du soleil (S) ;

L'orientation et l'angle d'inclinaison des structures supports doivent optimiser l'énergie incidente sur le générateur solaire durant le mois le plus défavorable. Il correspond au mois de plus mauvais ratio entre ensoleillement et demande en eau.

La meilleure orientation correspond toujours à celle de l'azimut du soleil, soit :

> l'orientation doit être au nord dans l'hémisphère sud et au sud dans l'hémisphère nord (O) ;

Généralement, le mois le plus mauvais correspond au mois le plus chaud, soit, en été ou saison sèche.

**Angle (°) = max {10°, abs (φ) – 10°} (R)** (où φ représente la latitude du lieu d'installation, exprimée en degrés)

Il faut incliner les modules d'un angle égal à la latitude du lieu moins 10°. Dans tous les cas, il faut garder un angle minimum de 10° afin de permettre un nettoyage par l'écoulement des eaux de pluie. Il faut aussi savoir que de faibles variations en angle ou azimut ne portent pas préjudice au fonctionnement global de l'installation et peuvent être tolérées. Les ombres, par contre, doivent être évitées à tout prix, leur effet étant très préjudiciable aux performances de systèmes photovoltaïques. Ainsi :

> les générateurs photovoltaïques doivent être totalement libres de toute ombre portée dans l'intervalle de 8 heures centrées sur le zénith (R).

## II.1.2 Convertisseurs

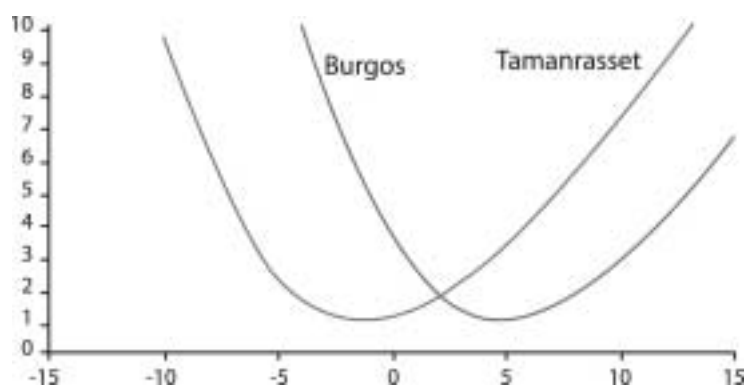
Comme son nom l'indique, ce composant sert à convertir le courant continu délivré par les modules solaires en courant adapté à l'alimentation du moteur de la pompe. Lorsque le moteur est triphasé à induction, cet élément est plus couramment appelé onduleur même s'il se distingue des onduleurs du marché qui, eux, sont à fréquence fixe.

De plus, le convertisseur peut comporter des fonctions de protection en cas de conditions de fonctionnement anormales : pénurie de ressource en eau, débordement du réservoir, défaut d'isolement du générateur solaire, etc.

Le fonctionnement d'un convertisseur doit imposer une tension d'entrée aussi proche que possible de celle où le générateur solaire fournit un maximum de puissance électrique (qui varie avec la température des cellules). Ainsi, certains convertisseurs de pompage comportent une fonction de recherche de puissance maximale.

Il faut signaler cependant que l'autre possibilité, consistant à travailler à tension constante, est également valable ; les pertes de puissance étant faibles par rapport à la première option. Le graphique suivant présente les résultats d'un calcul théorique pour les générateurs au silicium cristallin dans deux contextes climatiques différents. Il montre la perte annuelle d'énergie entre les deux options de part et d'autre de la valeur de la tension de référence. On peut ainsi observer qu'un fonctionnement, sous une tension comprise entre +/- 5 % de la tension au point de puissance maximale, n'entraîne pas de perte de puissance supérieure à 4 %.

% de perte en puissance



Tension de fonctionnement (% par rapport à la tension optimale)

Ainsi :

Les convertisseurs fonctionnant à tension constante ou munis d'un dispositif de recherche de puissance maximale sont acceptables (S).

S'il est en principe possible de préciser les pertes acceptables entre les deux options, il semble plus approprié d'indiquer une valeur de rendement global d'un système de pompage solaire.

Par ailleurs, le convertisseur doit adapter le courant d'alimentation aux caractéristiques du moteur de la pompe. Le couple résistant  $C_r$  des pompes centrifuges qui équipent la très grande majorité des systèmes installés est, pour une hauteur donnée, proportionnel au carré de leur vitesse  $n$  de rotation ( $C_p \sim n$ ), qui est elle-même, proportionnelle à la fréquence  $f$  d'alimentation du moteur ( $n \sim f$ ). D'autre part, le couple mécanique que produit un moteur à induction est directement proportionnel au carré du rapport entre la fréquence et la tension d'alimentation ( $C_m \sim (V/f)^2$ )\*.

Il faut bien sûr que "couple moteur" et "couple résistant" soient égaux ; le convertisseur devra ajuster la tension et la fréquence de sortie, de telle sorte que soit maintenue la relation quadratique ( $V \sim f^2$ ).

Ces considérations sont évidentes et il n'est pas utile de les assortir d'une spécification particulière.

Au cours de l'exploitation d'une pompe solaire, on ne peut pas exclure l'éventualité de circonstances de fonctionnement anormales. Afin d'éviter toute panne, il est utile d'incorporer, dans l'électronique du convertisseur, les protections évitant les effets néfastes de situations particulières : la plus dangereuse est sans doute le manque d'eau. Si, pour quelque raison que ce soit, l'eau descend au niveau de l'aspiration de la pompe, celle-ci se met à absorber une émulsion d'eau et d'air.

Dans ces circonstances, une pompe centrifuge se désamorçe : seule l'eau plus lourde (1 000 fois plus que l'air) est évacuée par la force centrifuge et la pompe se remplit donc d'air (on voit l'eau sortir de la pompe par paquets). La situation s'aggrave : il manque d'eau pour lubrifier et refroidir les paliers de la pompe, qui peuvent donc s'user, voire se gripper.

La protection contre ce phénomène peut se faire en détectant la baisse du niveau de l'eau par un capteur qui déclenchera l'arrêt de la pompe avant le seuil dangereux. En fait, l'expérience mon-

\* :  $C_p$  étant le couple à l'arbre de la pompe et  $C_m$  le couple à l'arbre du moteur.

tre que dans de nombreux cas (forages étroits) ce dispositif est délicat à installer et n'est pas suffisamment fiable. Il est plus judicieux de jouer sur la réaction de la pompe dans une telle situation. Celle-ci absorbe alors un mélange d'air et d'eau : la colonne montante s'en trouve donc allégée et le couple résistant diminué d'autant. Ayant moins d'effort à fournir, le moteur accroît sa vitesse et la variation est détectée au niveau du convertisseur par la mesure de la fréquence d'alimentation. Quand celle-ci atteint une valeur considérée comme limite, le convertisseur arrête l'alimentation du moteur. En conséquence :

**> le système de pompage doit être muni d'une protection manque d'eau (O) ;**

**La protection doit être de type détection de survitesse de la pompe et non de niveau dans le puits ou le forage (S).**

Indépendamment de la modalité de protection, il est nécessaire de prévoir un dispositif de redémarrage temporisé de la pompe. Celui-ci permettra non seulement d'attendre que le niveau d'eau retrouve sa valeur nominale (1 ou 2 heures), mais surtout d'éviter les successions de démarrage et d'arrêt (battement) dommageables au moteur et au convertisseur. En effet, chaque démarrage entraîne de forts courants qui échauffent les circuits et les bobinages. Il convient alors de remédier à cette situation anormale en immergeant la pompe plus profondément. Si ce n'est pas possible, c'est que le débit de la source a été mal évalué. C'est pourquoi :

**> la protection contre le manque d'eau doit inclure une temporisation (O).**

Dans un système bien conçu, l'accumulation de matière en suspension est fréquente. Elle peut aller jusqu'à engendrer un blocage de la pompe, provoquant, s'il n'est pas protégé, une destruction du moteur par échauffement.

Pour parer à ce risque, il est nécessaire de prévoir un dispositif de protection adapté. Ainsi :

**> un système de pompage doit être protégé contre un blocage mécanique de la pompe (O).**

Le débordement du réservoir est possible, même si le système solaire a été bien dimensionné. Il peut se produire simplement car la consommation d'eau peut varier pour des raisons inattendues et ponctuelles.

Si aucune protection n'est prévue pour arrêter le système de pompage, l'eau en excès va déborder et s'accumuler au pied du réservoir provoquant des nuisances importantes et graves (création de zones humides propices à la présence d'insectes, détérioration de la qualité environnementale du lieu, détérioration des fondations du support). Toute sensibilisation des habitants à l'utilisation rationnelle de l'eau est alors inopérante.

Une protection contre cette éventualité peut être mise en œuvre de différentes façons ; par exemple, l'eau en excès peut être dérivée vers d'autres applications (abreuvoirs à bétail, zones de jardinage, etc.). Il suffit alors d'équiper le réservoir d'une tuyauterie adaptée. Cette possibilité n'est pas recommandée, car elle peut rapidement entraîner des ambiguïtés en ce qui concerne le paiement de cette eau, dont on ne maîtrise plus l'écoulement.

Il est donc préférable d'arrêter la pompe dès que le niveau maximal d'eau dans le réservoir est atteint. Ceci peut se faire soit par un interrupteur à flotteur correctement fixé dans le réservoir, soit avec un robinet à flotteur. Dans cette dernière option, la surpression provoquée par la fermeture de la tuyauterie de refoulement sera détectée par un pressostat qui arrêtera la pompe. Dans l'un ou l'autre cas, le dispositif prévoira un redémarrage de la pompe à un niveau sensiblement inférieur pour éviter les battements.

Il est par ailleurs utile de mentionner qu'un indicateur de niveau d'eau du réservoir (facilement réalisé avec un système flotteur, câble et poulie) est très utile pour la gestion de la réserve d'eau. Ainsi :

- > un système de pompage solaire doit être protégé contre les risques de débordement du réservoir (O) ;
- > si la protection contre le débordement provoque l'arrêt de la pompe, il est nécessaire de prévoir une temporisation de redémarrage afin d'éviter des battements trop rapprochés (O).

Il est nécessaire de sélectionner des convertisseurs extrêmement fiables et de bonne qualité ; le minimum étant qu'ils puissent gérer sans aucun dommage toute la puissance fournie par le générateur solaire. Ainsi :

- > le convertisseur doit supporter sans dommage les conditions extérieures suivantes : température ambiante de 45°C, courant d'alimentation supérieur de 25 % au courant de court-circuit du générateur solaire dans des conditions standards et dans la plage de tension de fonctionnement (O).

Les circuits internes du convertisseur doivent être protégés contre les éventuels impacts mécaniques et les autres agents extérieurs (poussière, humidité, sel, insectes, etc.). De plus, ses composants internes doivent être suffisamment ventilés. Pour s'en assurer :

- > le convertisseur doit être protégé par un boîtier qui doit assurer un degré de protection minimum de IP 32 selon la norme IEC 529 (O).

Le premier chiffre de la référence IP indique le degré de protection contre l'intrusion de corps solides extérieurs ; ici, le chiffre 3 précise la taille : 2,5 mm (outils, câbles, etc.). Le second chiffre indique le degré de protection contre l'entrée d'eau ; ici, le chiffre 2 indique que l'appareil peut recevoir de l'eau tombant de haut en bas jusqu'à un angle de 15° par rapport à la verticale. IP 32 doit être considéré comme le degré de protection minimum sur lequel il ne faut en aucun cas transiger pour un équipement installé dans un local fermé. Il est cependant souhaitable d'exiger un degré de protection supérieur correspondant à des objets solides de 1 mm d'épaisseur et à la projection d'eau dans toutes les directions. Ainsi :

- > il est préférable que le convertisseur soit couvert par un indice de protection IP 54 selon la norme IEC 529. Cette recommandation est impérative si le

convertisseur est installé en extérieur. Il doit être protégé, quoiqu'il en soit contre l'ensoleillement direct (R).

En général, l'installation de générateurs photovoltaïques entraîne la mise en jeu de nombreux câblages. Certains forment des boucles qui sont autant de récepteurs (antennes réceptrices) de surtensions atmosphériques, induites par les phénomènes orageux, la foudre en premier lieu. Il est impératif de bloquer ces surtensions aux extrémités des boucles, y compris le câblage de l'arrêt du réservoir plein. Ainsi :

> le convertisseur doit être protégé contre les surtensions induites par les phénomènes atmosphériques grâce à une varistance de classe C, tel que défini par la norme IEC 61024, placée entre chacune des polarités (+ et -), isolées de la terre, le système disposant de sa propre mise à terre. L'installation de ces protections devra respecter les règles de l'art précisées dans la norme IEC 61024 (O).

Dans la pratique, cela consiste généralement à disposer, entre les polarités + et -, une varistance à oxyde de zinc (en anglais : MOV). Si une des polarités est systématiquement mise à la terre, le dispositif sera placé entre l'autre polarité et la terre.

En général, les convertisseurs sont installés à proximité de la source d'eau, ce qui permet de réduire la longueur du câble d'alimentation du moteur.

Ainsi, dans la majorité des cas, les risques de surtensions sont très faibles et une protection n'est pas réellement nécessaire. En revanche, dans les situations où la distance est supérieure à 20 mètres et dans les régions particulièrement exposées aux orages, il est conseillé d'équiper les deux extrémités de ce câble d'une protection similaire.

Enfin, les convertisseurs, dans la mesure où ils font appel à la technique PWM (Pulse Wave Modulation), peuvent provoquer des interférences pouvant affecter les postes de radio et les téléviseurs situés à proximité. Les pompes solaires étant électriquement isolées, l'ampleur du problème dépend de la longueur des câbles DC et AC ainsi que de la proximité des habitations à la pompe. Ainsi, et en règle générale :

> les convertisseurs doivent respecter les réglementations d'émission de radiofréquences, établies par la Commission européenne (O).

### II.1.3 Électropompes

Les groupes de pompage immergés, centrifuges ou volumétriques, sont des équipements standardisés disponibles sur le marché. Leurs qualités, robustesse, souplesse d'utilisation et prix, en font des types de pompes très couramment utilisés. En ce qui concerne les pompes utilisées avec des systèmes solaires photovoltaïques, il est nécessaire de vérifier que celles-ci font aussi appel à des composants d'excellente qualité.

Il faut, cependant, garder en mémoire l'ampleur des conséquences humaines, sociales et écono-

miques que peut avoir une panne, dans un lieu éloigné des circuits de distribution et des réparateurs compétents. Par exemple, sortir une pompe d'un puits ou d'un forage, peut être très onéreux lorsque les conditions d'éloignement du site sont extrêmes. La charge de l'eau (teneur de matières abrasives en suspension) est souvent mal connue et l'utilisation de matériaux nobles (acier inoxydable) est un plus qui doit systématiquement retenir l'attention. Depuis peu, les pompes hélicoïdales sont apparues sur le marché du pompage solaire et ont permis d'élargir la plage de performances jusqu'à présent disponible. Pour de grandes hauteurs de pompage (jusqu'à 100 m) et de faibles débits (de l'ordre de 5 à 15 m<sup>3</sup>/jour), elles ont des rendements sensiblement meilleurs que leur équivalent en pompe centrifuge.

Plusieurs études font référence à l'intérêt de ce type de pompes et principalement dans le contexte suivant :

- nappe phréatique profonde ;
- faible population (moins de 500 habitants).

Ces caractéristiques correspondent bien aux sites traditionnellement équipés de pompes à motricité humaine. Il est toutefois utile de préciser que les perspectives de développement du marché de ce type de pompe se heurtent au coût initial des équipements, auquel il faut souvent ajouter la construction d'un puits ou d'un forage et des ouvrages de stockage d'eau et de distribution. L'ensemble de ces investissements pèse lourdement dans le prix de l'eau consommée, car le ratio coût de l'ensemble/volume pompé devient beaucoup plus important que pour de plus gros systèmes. Enfin, ce type de pompe demande un couple de démarrage important et les tous premiers équipements installés ont été quelquefois victimes de pannes. Ceci ne met toutefois pas en cause la pertinence de cette technique. Il convient seulement de prendre un certain nombre de précautions à l'égard de ces systèmes relativement nouveaux et, concrètement, de s'adresser à des fabricants ou distributeurs.

Il n'est pas question d'envisager la moindre maintenance sur les moteurs, par exemple le remplacement de pièces d'usure comme des balais. Ainsi :

- > **les moteurs fonctionnant en courant continu doivent être sans balais ni autre pièce d'usure (R).**

Par ailleurs, les électropompes doivent être équipées de dispositifs évitant qu'elles ne puissent tomber au fond du puits ou du forage. Elles doivent toujours fonctionner dans une position correcte et leur fixation ne doit pas être endommagée par la réaction du couple de démarrage. Il est donc nécessaire que la tuyauterie, qui supporte l'ensemble électropompe et la colonne d'eau pompée, soit de taille et de matériaux appropriés. Il est recommandé de prévoir un câble de sécurité en acier inoxydable entre l'électropompe et la tête de forage.

- > **la fixation du groupe électropompe sera assurée de telle façon que la pompe soit en position verticale et qu'elle puisse absorber le contre couple de démarrage (O).**



## II.1.4 Câblage

Le câblage doit d'abord être capable de supporter les intempéries, il doit ensuite être de section suffisante pour que les chutes de tension n'affectent pas de façon significative le fonctionnement du système. Les spécifications suivantes seront appliquées :

- > la section des câbles ne devra pas provoquer de chute de tension supérieure à 2 % de la tension nominale entre le générateur solaire et le convertisseur ; à 3 % entre le convertisseur et la pompe (O).

Ces spécifications devront s'appliquer dans les conditions de fonctionnement suivantes :

- courant maximal ;
- conditions de fonctionnement standards.

Il est important de noter que ces spécifications ne tiennent compte que des pertes dues au câblage entre les composants. Les pertes, provenant des éléments de protection (fusibles, diodes) ou du convertisseur, ne sont pas comprises dans la définition précédente. Les systèmes de pompage fonctionnent souvent à des tensions relativement élevées (120 V en courant continu et 220 V en alternatif) et sous des courants relativement faibles (inférieurs à 30 A). La section des câbles est donc rarement un problème. En revanche il ne faudrait pas oublier que leur taille assure une solidité dans le temps, ainsi :

- > même si le niveau des pertes dues aux chutes de tension ne l'impose pas, la section du câblage doit être au moins de 4 mm<sup>2</sup>, entre le générateur solaire et le convertisseur, et de 4 mm<sup>2</sup> entre le convertisseur et l'électropompe (O) ;
- > les câbles, ne transportant pas de puissance, auront une section minimum de 1 mm<sup>2</sup> (R).

Par ailleurs :

- > les câbles exposés devront être impérativement de qualité adaptée à une utilisation en extérieur selon la norme IEC 60811 ou son équivalent dans le pays de l'installation (O) ;
- > dans toute sa partie immergée, le câble d'alimentation de la pompe devra être de qualité adaptée à un séjour prolongé dans l'eau (O) ;
- > les bornes de câblage devront permettre une connexion efficace et mécaniquement robuste. Elles auront une faible résistance électrique permettant une chute de tension inférieure à 0,5 % de la tension nominale de fonctionnement. Cette mesure s'applique à toutes les bornes et pour tous les courants maxima pouvant les traverser (O) ;
- > les matériaux des bornes de câblage ne doivent pas être sujets à corrosion galvanique (O) ;

- > l'ensemble du câblage doit être clairement identifié par des couleurs différentes ou une signalisation appropriée (O).

### II.1.5 Infrastructures hydrauliques

Les infrastructures hydrauliques doivent empêcher toute déperdition d'eau. Ces pertes sont très fâcheuses parce qu'elles provoquent souvent des zones insalubres et vont à l'encontre de tous les plaidoyers pour les économies d'eau. Les réseaux doivent aussi faire en sorte que l'eau ne se pollue pas au cours de son acheminement, de la source (puits, forage) au point de distribution (robinet). Les pertes de charge dans les tuyauteries doivent enfin être aussi faibles que possible. Ainsi, quelques prescriptions simples peuvent être édictées :

- > l'ouverture du puits doit être équipée d'une protection prévenant toute intrusion solide ou liquide (O) ;
- > l'ensemble de la tuyauterie et des accessoires (compteurs, vannes, etc.) doit être compatible avec l'acheminement d'eau potable (O) ;
- > tous les éléments métalliques, y compris les accessoires de raccordement (douilles, clapets, etc.), doivent être protégés contre la corrosion (O) ;
- > en règle générale, la tuyauterie du puits au réservoir devrait être munie d'un clapet anti-retour pour éviter que l'eau ne se vide chaque fois que la pompe s'arrête. Cet élément n'est pas nécessaire si la pompe comporte déjà un tel dispositif (R) ;
- > les réservoirs doivent être protégés contre toute entrée de poussière, de corps étrangers ou d'animaux (O) ;
- > les réservoirs doivent être accessibles et disposer d'un trou d'homme pour en permettre le nettoyage (R) ;
- > les différentes tuyauteries raccordées au réservoir ne doivent pas risquer de nuire à son étanchéité (R) ;
- > l'orifice de sortie d'eau du réservoir vers la distribution doit se situer au-dessus du fond de façon à permettre une décantation (R).

Les réseaux de distribution d'eau sont particulièrement vulnérables à la pollution du fait de leur longueur, des multiples zones de contact avec des zones humides et des manipulations des usagers. Il est important de noter que c'est précisément cette partie des systèmes d'approvisionnement en eau qui est à l'origine des plus graves problèmes d'exploitation, et non la partie photovoltaïque. Dans les grandes villes européennes, certains circuits de distribution d'eau ont été

installés au cours du XIX<sup>e</sup> siècle. Il est reconnu que les fuites représentent une part non négligeable des consommations, pouvant atteindre 40 %. Pour éviter toute contamination et maintenir la potabilité de l'eau, une surpression est maintenue en tout point du réseau de façon à ce que l'eau puisse éventuellement s'en échapper, mais que de l'eau située à l'extérieur, en principe polluée, ne puisse y pénétrer. Tout arrêt de distribution crée alors des risques d'intrusion d'eau contaminée. L'expérience du PRS met également en exergue les problèmes posés par les réseaux de distribution affectant la continuité du service : « *Très peu de pannes au niveau des équipements solaires... en revanche... de nombreux problèmes (dimensionnement, conception, vieillissement, etc.) ont pu être observés au niveau du réseau, du réservoir de stockage ou des bornes-fontaines... pratiquement 30 % des villages ont des fuites de réservoir ou de vannes.* »

Ce constat montre combien il est nécessaire que les experts du photovoltaïque s'associent à ceux du domaine de l'eau pour éviter des contre-références. Ensemble, ils pourront mettre en œuvre des projets cohérents, dans lesquels les aspects relatifs au pompage et ceux relatifs à la distribution d'eau, seront traités avec le même professionnalisme. Du bon sens et un souci constant de la qualité sont les facteurs clés de réussite des projets d'alimentation en eau potable même si les problèmes sont multiples. Quelques spécifications complémentaires sont proposées :

- > les tuyauteries doivent être enterrées à une profondeur minimale de 60 cm et selon les règles de l'art (fond de sable, grillage d'alerte, etc.) (R) ;
- > les composants les plus fragiles et susceptibles d'être sujets à pannes doivent être facilement accessibles pour faciliter inspections et réparations (O) ;
- > le réseau de distribution comprendra au minimum une vanne à la sortie du réservoir et une à l'entrée de chaque point de distribution (R) ;
- > tous les robinets doivent être d'excellente qualité (R) ;
- > la disposition des points de distribution d'eau (hauteur, accès, etc.) doit être commode et tenir compte des habitudes locales d'approvisionnement en eau.
- > les eaux usées doivent être correctement drainées et en aucun cas les animaux ne doivent pouvoir y avoir accès (O).

Les pertes de charge dans les tuyauteries et leurs accessoires dépendent du débit qui les parcourt, des matériaux utilisés, de la section des tuyauteries et de leur longueur. Les pertes réduisent le débit de la pompe en augmentant la contre-pression totale qu'elle a à vaincre et que l'on traduit généralement en hauteur d'eau ( $H$ ). Ainsi, la hauteur totale ( $H_T$ ), vue par la pompe, correspond à la somme de la hauteur géométrique ( $H_G$ ) et des pertes de charge ( $H_{PC}$ ), exprimée également en mètres :  $H_T = H_G + H_{PC}$ . La hauteur géométrique étant le dénivelé entre le niveau de l'eau dans le puits et celui du remplissage du réservoir.

La section de la tuyauterie entre pompe et réservoir (accessoires compris) ne doit pas engendrer de pertes de charge supérieures à 5 % de la hauteur géométrique

de pompage. Ceci doit se confirmer pour un générateur solaire fonctionnant dans les conditions standards (R).

### II.1.6 Système de purification

Les conditions de fiabilité du système de purification photovoltaïque de l'eau sont énumérées ci-dessous. Pour des raisons de compréhension, les caractéristiques sont classées suivant les différents composants du système, auxquelles elles se rapportent :

#### a) Pompe à injection de chlore

La pompe à injection doit être dotée d'une protection IP 54 (O).

La pompe à injection doit permettre le passage de l'hypochlorite de sodium sans être endommagée (O).

La relation entre la fréquence d'injection de la pompe chlorhydrique et le signal de capteur de débit doit être linéaire sur toute la plage de fonctionnement (O).

La pompe à injection doit être dotée d'une alarme sonore lorsque le réservoir de chlore est vide (O).

Les fréquences d'injection ne doivent pas être altérées par une variation de tension de +/- 20 % (O).

#### b) Détecteur de variation du courant de l'eau dans la pompe

Le capteur de débit doit avoir une précision de 5 % (O).

Si le capteur de débit nécessite une alimentation séparée, le dosage ne doit pas être affecté par une variation de tension de +/- 20 % (O).

Le capteur de débit doit au moins être doté d'une protection IP 54 (O).

#### c) Le réservoir de chlore

Le réservoir de chlore doit être fabriqué avec un matériau qui permette de voir la quantité restante d'hypochlorite de sodium (O).

Le couvercle du réservoir de chlore doit être bien mis en place pour minimiser l'évaporation d'hypochlorite de sodium. Le trou requis pour l'aspiration du chlore doit faire au maximum 1 mm<sup>2</sup> (O).

La pompe à injection peut se trouver endommagée par l'évaporation d'hypochlorite de sodium. Pour cette raison : **Le réservoir de chlore ne doit pas être placé sous la pompe à injection (O).**

## II.2 Sécurité

Les systèmes de pompage photovoltaïques comportent les mêmes risques que n'importe quelle installation électrique. Il y a risque d'électrocution pour l'homme, quand la tension dépasse 120 Volts en courant continu et 60 Volts en courant alternatif.

On retrouve le même genre de situation dans les installations photovoltaïques raccordées au réseau et le développement récent de cette application a incité plusieurs pays à se doter de réglementations spécifiques. Bien que l'objet ici ne soit pas la comparaison de ces réglementations, on peut faire remarquer que les différentes règles de sécurité prescrites sont très différentes et même se trouvent quelquefois en contradiction. Par exemple, alors que le NEC (National Electric Code), loi appliquée aux USA, impose aux installations électriques de plus de 50 Volts d'avoir une des polarités directement reliée à la terre, les recommandations européennes stipulent précisément le contraire (c'est-à-dire le régime "flottant", avec les deux polarités isolées de la terre).

Cette différence provient des particularités de chacun des réseaux électriques et n'a aucun rapport avec les systèmes photovoltaïques. Par exemple, la mise à la terre du NEC répond d'abord au souci de protection contre la foudre, directement lié aux caractéristiques du réseau électrique américain : une tension relativement basse (125 Vca) et un grand nombre de maisons en bois (donc autant de risque d'incendie).

En Europe, la réglementation, au contraire, met l'accent sur la protection contre les risques d'électrocution. Ceci va de pair avec la tension plus élevée des réseaux BT (220 Vca) et avec une tradition de construction en matériaux peu inflammables. La directive IEC 364, sujette à moins de controverse, est donc la plus utilisée. Au moment de protéger un système de pompage photovoltaïque, il faut s'occuper d'abord des risques de contacts directs, c'est-à-dire quand une personne peut toucher un contact nu. On doit donc spécifier que :

- > tous les câbles et éléments électriques sous tension et à la portée des personnes doivent être convenablement isolés (O) ;
- > toutes les masses conductrices qui risquent d'entrer en contact avec un conducteur actif doivent être mises à la terre. Cette mesure concerne en particulier les cadres et structures de support du générateur photovoltaïque ainsi que les boîtiers métalliques des convertisseurs (O) ;
- > la résistance de la prise de terre doit être inférieure à  $120 V / (1,25 \times I_{cc})$  ;  $I_{cc}$  étant la valeur du courant de court-circuit du générateur dans les conditions standards (O) ;

Il faut ensuite envisager les risques de contacts indirects qui peuvent se produire suite à un défaut de l'isolement précédent. La norme IEC 364 décrit différents moyens de protections. Son application aux systèmes photovoltaïques, qu'il convient de mettre en pratique, mérite l'analyse suivante :

- parmi ses inconvénients : le disjoncteur différentiel classique ne fonctionne pas en courant continu et les modules photovoltaïques ne peuvent pas être sectionnés instantanément ;
- parmi les points positifs : l'isolement fournie par l'encapsulation des modules photovoltaïques, est suffisante pour les considérer comme des composants de classe II ou d'isolement renforcée. De plus, le courant de court-circuit des modules est intrinsèquement limité (contrairement à celui d'une batterie, par exemple).

D'où les propositions suivantes :

- > les systèmes photovoltaïques doivent comporter des mesures de protection contre les contacts indirects compatibles avec la norme IEC 364 (O).
- > on doit particulièrement recommander l'isolement renforcée, le régime flottant, et une vigilance permanente vis-à-vis de l'isolement (R).

Pour le système de traitement d'eau, on doit noter que l'hypochlorite de sodium est dangereux pour l'homme. Il faut par conséquent être attentif à la sécurité afin d'éviter tout accident. Pour ce faire, on propose ce qui suit :

- > la pompe d'injection doit être munie d'un fusible côté alimentation (O) ;
- > la pompe d'injection doit comporter un interrupteur (R) ;
- > le réservoir de chlore doit avoir le marquage "danger : liquide toxique" (O) ;
- > l'abri du système de purification doit comporter un robinet d'eau afin de pouvoir laver toute projection d'hypochlorite de sodium (O).

## II.3 Bilans énergétiques

### II.3.1 Consommation en eau

Les études sur la consommation en eau en milieu rural concluent à une quantité d'eau consommée de 20 à 40 litres par jour et par personne. Ces chiffres sont cependant loin d'être vérifiés sur le terrain. En effet, les rares mesures effectuées sur site révèlent que, dans des lieux identiques en apparence (même région, même style de vie, etc.), la quantité d'eau consommée est extrêmement variable. Dans des conditions similaires, le facteur d'utilisation (c'est-à-dire le rapport moyen entre le volume consommé et le volume disponible) varie entre 30 et 70 %.

Pour mieux comprendre cette question, la consommation mensuelle d'eau enregistrée entre septembre 1997 et juin 2001 dans les 1 301 logements de l'expérience marocaine (voir introduction) a été analysée. La description la plus appropriée de ce qui a été observé consiste à différencier :

- la consommation d'eau destinée strictement à la consommation humaine (boissons, cuisine, etc.) estimée à 18 litres par personne et par jour ;
- la consommation d'eau destinée aux autres usages domestiques (toilette, lavage des vêtements, animaux domestiques, etc.), estimée à 37 litres par personne et par jour.

La part de consommation correspondant à l'eau de la pompe solaire s'obtient en additionnant le premier chiffre à une fraction du deuxième, celle-ci dépendant de la facilité d'accès au point d'eau. Cette même analyse se retrouve dans d'autres études de cas. Pour plus de détails, on peut consulter le document "Leçons tirées d'une expérience de pompage photovoltaïque au Maroc" (voir bibliographie).

Le chiffre à prendre en compte pour effectuer un dimensionnement se situe entre 18 et 55 litres par personne et par jour. La fourchette basse correspond à la situation où l'eau est distribuée par bornes-fontaines communautaires, d'où l'eau est transportée jusqu'aux habitations par les usagers eux-mêmes. La valeur la plus élevée correspond à la situation où chaque habitation est équipée d'un point d'eau individuel. Pour retenir une valeur, il faut observer les caractéristiques propres du village (présence d'autres points d'eau, traditions, etc.). Comme ces particularités n'apparaissent pas à première vue, c'est avec une approximation conservatrice que le dimensionnement d'un système de pompage solaire sera effectué. Il ne faudra alors pas trop s'attacher aux considérations économiques qui sont souvent le facteur de décision en l'absence d'autres éléments plus précis.

Il faut rappeler que l'unique élément du système, dont le coût est directement lié à la quantité d'eau à fournir, est le générateur photovoltaïque. Son poids relatif au coût total du système installé, est, comme vu précédemment, relativement faible. Pour le "Programme Régional Solaire", les modules ont représenté 11 % du budget global du projet. Il y a cependant d'autres considérations à mettre en jeu dans les projets avec, en premier lieu, le développement d'une culture de l'économie de l'eau (en gardant un chiffre moyen mais en évitant les gaspillages). Il serait enfin nécessaire d'insister sur un facteur essentiel qu'est la ressource. Elle peut très bien être le facteur limitant et il est impératif de connaître précisément le débit du puits, quitte à faire des essais de pompage si les renseignements disponibles sont imprécis et sujets à caution. Ceci peut, si besoin est, à élaborer un nouvel ouvrage.

**Il est nécessaire dans tous les cas de s'assurer que le puits ou forage supporte le débit maximum de la pompe (O).**

Reconnaître une certaine incertitude n'empêche pas que, pour acquérir un système de pompage photovoltaïque, il soit nécessaire d'annoncer un volume quotidien de référence. Il sera recommandé ce qui suit :

- > si l'eau est distribuée par bornes-fontaines, la quantité d'eau à fournir doit être calculée sur la base de 25 litres par personne et par jour ;

> si l'eau est distribuée par robinets individuels, la quantité d'eau à fournir doit être calculée sur la base de 45 litres par personne et par jour (R).

Il faut par ailleurs noter que lorsque l'on prévoit un système communautaire d'approvisionnement et que d'autres points d'eau sont disponibles, les recommandations indiquées plus haut amènent à un certain surdimensionnement de la pompe. Cette tendance a bien entendu un impact économique, mais évite le risque contraire, c'est-à-dire un sous-dimensionnement rapidement mal vécu par les populations.

### II.3.2 Rayonnement solaire

L'estimation d'une valeur de référence du rayonnement solaire que reçoit quotidiennement la surface du générateur solaire, apporte encore plus d'incertitude quant au dimensionnement d'une pompe photovoltaïque. Vu son caractère aléatoire, le rayonnement solaire est défini par une valeur moyenne,  $G_j(l)$ , la puissance globale, assortie d'une valeur de dispersion  $\sigma_d$ .

Pour un site donné, ces deux valeurs peuvent être calculées à partir de mesures faites sur une durée suffisante pour être statistiquement valable. À partir des valeurs obtenues, il est alors possible d'estimer l'ensoleillement. Un théorème classique en statistique montre que, pour atteindre une précision de 95 %, il faut garder une marge de variation de  $G_j(l) \pm \sigma_d$ .

En général, les valeurs moyennes mensuelles de l'ensoleillement journalier sur un plan horizontal,  $G_j(0)$ , sont disponibles, mais il n'en est pas de même pour la valeur de dispersion. Les méthodes pour connaître  $G_j(l)$  à partir de  $G_j(0)$  sont bien connues, mais leurs descriptions sortent du cadre de cet ouvrage. Il importe de comprendre que tout exercice visant à déterminer le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque, nécessite de se projeter dans le futur, lorsqu'il sera mis en fonctionnement. On entre alors dans une marge d'incertitude indéfinissable comme l'illustre l'exemple qui suit : les moyennes mensuelles de l'ensoleillement journalier, sur un plan horizontal, observé à Madrid en mai entre 1979 et 1986, se lisent sur le tableau 1 ci-après.

1979	1980	1981	1982	1983	1984	1885	1986	Tableau 1
6,82	6,00	6,66	6,60	6,51	4,76	6,12	6,80	

Le mois de mai est donc caractérisé par un ensoleillement moyen de 6,28 kWh/m<sup>2</sup>/jour et une dispersion de 0,64. Ainsi, dans le futur, un mois de mai, si on veut être exact à 95 %, recevra un ensoleillement journalier situé dans la fourchette de 5 à 7,56 kWh/m<sup>2</sup>, c'est-à-dire 20 % autour de la moyenne !

De nouveau, prendre conscience de cette incertitude n'élimine pas la nécessité de retenir une valeur de référence pour le dimensionnement. Les expériences du PRS et du projet marocain indiquent que la consommation en eau varie de façon significative tout au long de l'année. Le mois le plus défavorable correspond à l'époque la plus sèche de l'année ou à l'été. Dans la majorité des cas, il est ainsi utile de tenir compte de la recommandation suivante :



> la valeur du rayonnement reçu sur la surface du générateur à prendre en considération pour l'étude doit se situer entre 5 et 7 kWh/m<sup>2</sup>/jour (S).

C'est la plage idéale d'utilisation d'une pompe solaire. Sous un ensoleillement inférieur, un même débit demandera une puissance de générateur solaire plus importante. Aussi, le coût d'investissement d'une pompe solaire devient moins compétitif vis-à-vis d'une pompe conventionnelle.

D'un autre côté, le rendement instantané de la chaîne de pompage varie avec le rayonnement. Les spécifications d'un système de pompage doivent non seulement prendre en compte l'irradiation globale disponible, mais aussi le profil de distribution du rayonnement  $G_t$  au cours de la journée. La norme IEC 61725 recommande l'utilisation d'une formule analytique permettant de construire le profil du rayonnement à partir de la radiation globale journalière  $G_d$ , du rayonnement maximum  $G_{MAX}$  et de la durée d'ensoleillement  $S_d$  d'une journée. La comparaison des profils que décrit cette norme avec un grand nombre de mesures effectives encourage à recommander les valeurs du tableau 2 suivant :

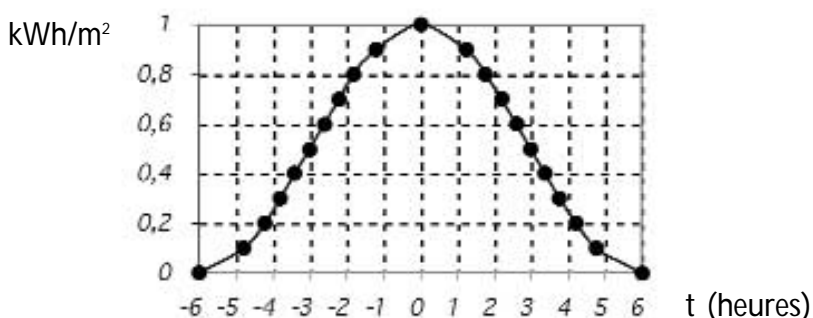
$G_d$ (kWh/m <sup>2</sup> /jour)	$G_{MAX}$ (W/m <sup>2</sup> )	$S_d$ (heures)
7	1 035	12
6	1 000	12
5	830	10
4	675	9
3	575	8

Tableau 2

Ainsi :

> pour le dimensionnement de la pompe, le profil journalier d'ensoleillement décrit dans la norme IEC 61725 (tableau précédent) sera retenu (S).

La figure suivante et le tableau 3 ci-après sont des exemples pertinents puisqu'ils montrent le profil d'irradiation IEC 61725, correspondant à  $G_d = 6$  kWh/m<sup>2</sup>,  $G_{MAX} = 1 000$  W/m<sup>2</sup> et  $S_d = 12$  h.



Profil d'irradiation, si on considère IEC 61725, incluant les paramètres  $G_d = 6$  kWh/m<sup>2</sup>,  $G_{MAX} = 1 000$  W/m<sup>2</sup> et  $S_d = 12$  h.

i	Gi (W/m <sup>2</sup> )	ti (h)
1	1 000	0
2	900	1,2
3	800	1,8
4	700	2,2
5	600	2,6
6	500	3
7	400	3,4
8	300	3,8
9	200	4,2
10	100	4,8

**Tableau 3 :** Données numériques du profil d'irradiation, si on considère IEC 61725, incluant les paramètres  $G_d = 6 \text{ kWh/m}^2$ ,  $G_{MAX} = 1\,000 \text{ W/m}^2$  et  $S_d = 12 \text{ h}$ .

Il est évident que, quelque que soit la méthode utilisée, le dernier calcul de volume pompé journalier doit prendre en compte le profil du débit en eau correspondant. Dans la pratique, on n'inclut généralement que de rares valeurs d'irradiation  $G_i$ . Comme, par exemple, celles représentées dans le tableau 3. Les valeurs du débit correspondant,  $Q_i = Q(G_i)$ , peuvent être obtenues à partir d'un test en laboratoire spécifique. Ainsi, la valeur  $Q_d$  se rapproche de :

$$Q_d = \sum_{i=1}^{10} \left( \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \right) \cdot (t_{i+1} - t_i)$$

### II.3.2 La hauteur de pompage

Dans un puits ou un forage, le niveau de l'eau baisse en fonction du débit de pompage, c'est ce que l'on appelle son "comportement dynamique". C'est en faisant un essai de pompage, juste après la réalisation du forage, que l'on peut en connaître ses paramètres principaux :

- le niveau statique  $H_{ST}$  qui correspond à un débit nul ;
- le niveau dynamique  $H_{DT}$  qui correspond au débit d'essai de pompage  $Q_T$ , dont la valeur est proche du débit maximum que peut fournir le forage ;
- le rabattement, qui est la différence de hauteur entre  $H_{DT}$  et  $H_{ST}$ .

Le débit d'exploitation (plus simplement appelé débit du puits ou du forage) doit toujours être inférieur au débit maximum ; au-delà, il y aurait une surexploitation de la nappe, qui mettrait l'ouvrage et la ressource en danger. Le pompage photovoltaïque est à débit variable tout au long de la journée (le débit étant fonction de l'ensoleillement) et ceci dans la plage : zéro – débit correspondant à un ensoleillement maximal. Évidemment, plus le volume pompé par jour est important, plus cette plage de débit est grande. Il en va logiquement de même pour la celle de variation du rabattement et donc de la hauteur totale de pompage. Pour un puits, un système de pompage et un jour donnés, on peut définir la hauteur équivalente de pompage  $H_{TE}$  comme étant celle d'un puits imaginaire, dont la hauteur d'eau ne varierait pas avec le débit et dont la quantité d'eau pompée ne varierait pas tout au long de la journée.

On peut estimer sa valeur par la formule empirique suivante :

$$H_{TE} = H_{DT} + H_{ST} + \left( \frac{H_{DT} - H_{ST}}{Q_T} \right) \cdot Q_{AP} + H_F(Q_{AP})$$

Avec  $Q_{AP} = \alpha \cdot Q_d$

Où :

- $\alpha = 0,047$  ( $h^{-1}$ ) pour  $Q_d$  exprimé en  $m^3$ , (h en heures) ;
- $H_{DT}$  (m) est le dénivelé entre l'eau et le sol ;
- $H_F(Q_{AP})$  sont les pertes de charge dans la tuyauterie correspondant au débit  $Q_{AP}$ .

Il est à noter que  $Q_{AP}$ , appelé "débit apparent", est un débit moyen. On peut observer en toute logique que, plus le volume journalier pompé croît, plus la valeur de  $H_{TE}$  augmente et plus la capacité de pompage  $Q_T$  du puits diminue. Pour définir les spécifications d'une pompe photovoltaïque, il est opportun d'utiliser la notion de hauteur équivalente qui facilite la tâche du concepteur pour sélectionner un matériel adapté et vérifier les caractéristiques des équipements.

### II.3.4 Dimensionnement

On entend par dimensionnement le calcul de la puissance crête  $P$ , du générateur photovoltaïque et le choix de la pompe répondant au service requis dans les conditions de référence définies par trois valeurs :

- le volume journalier à pomper  $Q_d$  (en  $m^3$ ) ;
- la hauteur équivalente de pompage  $H_{TE}$  (en mètre) ;
- le rayonnement solaire journalier reçu par le générateur  $G_d$  (en  $kWh/m^2$ ).

Si les diamètres des tuyauteries sont dimensionnés selon les recommandations stipulées en § II.1.5, la vitesse de l'eau, les pertes de charge et l'énergie cinétique de l'eau à l'entrée du réservoir seront relativement faibles. Dans ces conditions, l'énergie d'une pompe photovoltaïque, c'est-à-dire l'énergie hydraulique produite  $E_H$ , peut se réduire à l'énergie potentielle acquise par l'eau  $E_{POT}$ . D'où la formule suivante :

$$G_d \frac{P^* \eta_g \eta_I \eta_{MB}}{G^* \eta^*} = \rho \cdot Q_d \cdot g \cdot H_{TE}$$

où  $\eta_g$ ,  $\eta_I$  et  $\eta_{MB}$  sont, respectivement les rendements, sur une journée, du générateur, de l'onduleur et de l'électropompe,  $\rho = 10^3$   $kg/m^3$ , la densité de l'eau et  $g = 9,81$  m/s, la constante de gravité. Pour les générateurs cristallins et les pompes centrifuges, une approche raisonnable consiste à utiliser les valeurs suivantes :  $\eta_g/\eta^* = 0,86$  ;  $\eta_I = 0,9$  ;  $\eta_{MB} = 0,35$ . On doit noter que  $\eta_g/\eta^*$  comprend les pertes de rendement dues à la température de fonctionnement des cellules (au-delà de 25° C), aux périodes pendant lesquelles l'irradiation solaire est inférieure à 200  $W/m^2$  et aux effets de l'angle d'incidence du rayonnement solaire et de la poussière.

Nota : (\*) correspond aux conditions standards de mesure.

$G^* = 1\,000$   $W/m^2$ , correspondant aux conditions standards.

La formule est alors la suivante :

$$P^* (\text{W}) = 10 \cdot \frac{G^*}{G_d} \cdot Q_d (\text{m}^3) \cdot H_{TE} (\text{m})$$

Malgré sa simplicité, cette expression conduit généralement à de bons résultats. Une étude effectuée par la coopération allemande (GTZ), sur un large échantillon de pompes photovoltaïques, installées dans le cadre de projets d'aide au développement, a confirmé que cette expression conduit généralement à de meilleurs résultats que celles dérivées des abaques des fabricants.

Certains cas particuliers peuvent demander plus de précision dans le dimensionnement, par exemple, lorsqu'il s'agit de vérifier, par essais en laboratoire, le volume d'eau quotidien que peut pomper un système donné. Il faut alors recourir à une étude détaillée de la courbe : débit/rayonnement et la rapprocher du profil du rayonnement solaire décrit en II.3.2. Il faut, par exemple, vérifier quel volume d'eau peut délivrer une pompe photovoltaïque donnée à une hauteur de 30 mètres au cours d'une journée avec  $G = 6 \text{ kWh/m}^2$ . Pour ce faire, on effectue tout d'abord des mesures pour établir la courbe donnant le débit de la pompe en fonction de l'ensoleillement. Par ailleurs, on trace le profil de rayonnement décrit par la norme IEC 61725. On associe ensuite à chaque valeur d'ensoleillement, correspondant à un débit mesuré, le laps de temps pendant lequel il se produit. Le volume pompé pendant ce laps de temps sera : débit mesuré x période de temps. Ainsi, à la valeur  $G = 900 \text{ W/m}^2$ , est associée un intervalle de rayonnement de 800 à 1 000  $\text{W/m}^2$ . La journée-type montre que le laps de temps pendant lequel le rayonnement se trouve dans cet intervalle, est de 11h à 12h. Si la pompe débite 3  $\text{m}^3/\text{h}$  pour un rayonnement de 900  $\text{W/m}^2$ , le volume pompé durant ce laps de temps est le produit  $(12 - 11) \times 3 = 3 \text{ m}^3$ . Pour obtenir le volume total pompé dans la journée, il suffit alors de faire la somme de tous les volumes ainsi calculés. Trois tableaux peuvent illustrer cet exemple :

a) Mesure de débit de la pompe : c'est la correspondance entre l'ensoleillement et le débit :

Mesure de débit de la pompe	
Ensoleillement	Débit
G1	D1
G2	D2
G...	D...

b) Journée-type : elle donne la correspondance entre l'ensoleillement et l'heure dans la journée

Journée-type (IEC 61725)	
Ensoleillement	Heure
G1	t1
G2	t2
G...	t...

### c) Calcul du débit pompé au cours de la journée-type :

Ensoleillement (W/m <sup>2</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Laps de temps (heure)	Volume pompé (m <sup>3</sup> )
G1	D1	t2 - t1	D1 x (t2 - t1)
G2	D2	t3 - t2	D2 x (t3 - t2)
...	...	...	...
Gn	Dn	tn+1 - tn	Dn x (tn+1 - tn)
Volume d'eau pompé pendant la journée :			Somme des volumes

## II.3.5 Dimensionnement d'un système de purification

Le dimensionnement d'un système de purification d'eau et de ses composants doit assurer la quantité de chlore nécessaire pour un volume d'eau donné. Pour ce faire :

- > la pompe à injection doit avoir, au niveau de la pression exercée au point d'injection, une capacité de pompage 100 % supérieure à la capacité maximale observée en temps normal (R) ;
- > la concentration en chlore par m<sup>3</sup> d'eau respectera la législation en vigueur dans le pays (O).

## II.4 Facilité d'utilisation

Les systèmes de pompage sont, en majorité, des équipements à usage communautaire. Les interventions sur ce matériel doivent être confiées aux soins d'une seule personne, l'opérateur local. Il devra avoir reçu une formation de base lui permettant :

- de comprendre le fonctionnement des équipements ;
- d'effectuer des opérations simples d'entretien ;
- de savoir décrire les problèmes quand ceux-ci demandent l'intervention d'un spécialiste.

En fait, le plus important est que cet opérateur puisse décrire l'état général du système et puisse dire si l'arrêt de la pompe est dû à un événement externe identifiable (manque d'eau, réservoir plein, etc.) ou interne et d'origine plus complexe (plus d'alimentation électrique, moteur bloqué, etc.). Pour cela :

- > le système de pompage doit comporter une signalisation indiquant à l'opérateur local, les informations minimales suivantes (O) :
  - fonctionnement normal ;
  - réservoir plein ;
  - manque d'eau dans le forage ;
  - moteur bloqué ;
  - anomalie de tension entrée ;
  - court-circuit en sortie.

D'un autre côté, et bien que le fonctionnement d'un système puisse s'effectuer sans aucune intervention extérieure, il est utile de munir la sortie de la pompe d'un compteur d'eau. Ses indications, ainsi que les incidents qui pourraient se produire au cours de l'exploitation du système, devront être notés quotidiennement par l'opérateur local. Ces dispositions ne sont pas coûteuses (cahier et crayon) et garantissent la présence et l'attention quotidienne de l'opérateur. Dans l'expérience du Maroc, la lecture des compteurs, placés à chaque point de distribution, s'est avérée très utile pour :

- la détection des fuites cachées dans le réseau de distribution (en comparant les volumes pompés et consommés) ;
- la bonne gestion du système : tarification, etc.

**À la sortie de la pompe, un compteur permettra de relever quotidiennement le volume d'eau pompé (R). Il est fortement recommandé d'installer également un compteur à chaque point de distribution (S).**

Parallèlement à ces mesures de suivi, il faut prendre en compte que chaque point de distribution constitue une interface entre le système et ses utilisateurs. Leur conception doit faire l'objet de la plus grande attention pour que le remplissage des récipients soit facilité et les pertes d'eau évitées. Par exemple, s'il s'agit de fontaines publiques, il faut aménager des supports pour les bassines à remplir et prévoir le drainage des eaux perdues, lorsque celles-ci sont hissées sur la tête. Il faut également prévoir le remplissage des barriques que l'on transporte en charrette à l'instar d'un robinet sur lequel il est possible de fixer un tuyau d'arrosage. Ces remarques peuvent paraître évidentes, mais l'expérience montre qu'elles sont souvent oubliées. Ces oublis sont la cause de projections d'eau incontrôlables autour des points d'approvisionnement avec des conséquences plus que déplorables d'un point de vue sanitaire : les flaques, où prolifèrent les moustiques et où vaquent chiens et cochons, sont hélas des scènes que l'on retrouve trop souvent dans les projets de pompage photovoltaïque. Il convient d'insister sur ce point :

- > **la conception des points d'approvisionnement doit les rendre pratiques, permettre l'évacuation des eaux perdues et empêcher l'accès des animaux (O).**

Les systèmes de purification d'eau doivent, pour leur part, respecter ce qui suit :

- > **le fonctionnement normal de la pompe d'injection doit être signalé par un voyant vert, et par un voyant rouge dans le cas contraire (R).**

## **II.5 Installation**

Il est préférable que les systèmes de pompage solaires soient compris comme des systèmes "clé en main". C'est au fournisseur que doit revenir la responsabilité de l'installation et du démarrage de la pompe avant qu'elle ne soit confiée à l'exploitant. Il est néanmoins possible que certains maîtres d'ouvrage procèdent autrement, en prenant à leur charge l'installation des équipements. Dans ce cas, la fourniture devra comprendre tout le matériel nécessaire à l'installation (câbles,

connecteurs, tuyaux de raccordement, accessoires de fixation, etc.). Ils doivent également être clairement identifiés. Par conséquent :

- > le système de pompage photovoltaïque doit comprendre tous les éléments (câbles, connecteurs, vis, etc.) nécessaires à son installation (O) ;
- > les modules photovoltaïques, les convertisseurs DC/AC et les motopompes doivent être clairement étiquetés et référencés (R).

## II.6 Entretien / maintenance

L'entretien quotidien des systèmes de pompage comprend le nettoyage du générateur photovoltaïque, le nettoyage du réservoir et la réparation des fuites au sein de l'infrastructure hydraulique. Pour rendre ces tâches plus aisées :

- > les structures supports et leur installation doivent rendre accessibles les modules photovoltaïques aussi bien pour leur entretien que pour la révision de leurs contacts électriques (R) ;
- > l'installation des structures supports doit préserver leur résistance à la corrosion, à l'usure et au vent (O).
- > l'infrastructure de distribution doit être pourvue de robinets principaux qui permettront d'isoler les différentes parties des tuyaux (R).
- > chaque système de pompage doit être fourni avec la documentation de base (prévention des risques d'accident, entretien manuel à l'attention des villageois, et description technique de l'installation) dans le langage local et à l'aide de dessins d'explication simples (O).

En ce qui concerne les systèmes de purification, l'entretien suivant est nécessaire : remplacement de l'hypochlorite de sodium ; nettoyage du filtre à injection de la pompe ; et remplacement des fusibles si nécessaire. Pour faciliter ces tâches, il est recommandé :

- > que le système de purification soit fourni avec des fusibles et des filtres de rechange (O) ;
- > que les pièces de rechange puissent se trouver facilement sur le marché local (O) ;
- > que les composants de chlore, qui requièrent une manipulation complexe pour remplir le réservoir de chlore, soient évités. L'utilisation d'eau de javel commerciale est particulièrement recommandée (R).

La fourniture de "tests de couleur" pour contrôler la quantité de chlore présente dans l'eau est également recommandée. Ainsi :

- > des "tests de couleur" permettant de contrôler la quantité de chlore dans l'eau seront fournis en quantité suffisante (S) ;
- > chaque système de purification doit être accompagné de la documentation suivante : prévention des risques d'accidents, entretien manuel à l'attention des villageois, et description technique de l'installation (O).

### III EXPLOITATION DES SYSTÈMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUES

Les infrastructures motorisées d'approvisionnement en eau et de distribution, et en particulier par systèmes de pompage solaires, ont souvent fait l'objet de financements multiples. La propriété de ses différents composants (puits ou forage, équipement solaire, réservoir, réseau de distribution, robinets) est souvent mal définie et, en tout cas, mal perçue par les usagers. Ainsi, il est fréquent de constater que lorsqu'une réparation doit être effectuée, personne ne sait à qui en revient la responsabilité.

**Le régime de propriété des différents équipements ainsi que les droits et devoirs qui en découlent doivent donc être clairs pour la communauté des usagers.**

Un système de pompage photovoltaïque a quelque chose de magique : une pompe de qualité bien installée sur un forage où l'eau est claire peut fonctionner tous les jours pendant plus de 7 ans sans aucune panne. À raison, par exemple, de 6 heures de fonctionnement par jour, cela fait un cumul d'au moins 15 000 heures de fonctionnement. À titre de comparaison, ce serait un véhicule qui roulerait 450 000 km, à 50 km/h, sans carburant ni mécanicien ! Et pourtant, même si un tel équipement n'a, fort probablement, pas besoin de réparations coûteuses, il a absolument besoin d'entretien. Son bon fonctionnement, l'absence de pièces en mouvements visibles, pourraient pourtant laisser croire le contraire. En effet, il est nécessaire d'assurer, au minimum, trois types de vérifications :

- celle des organes principaux du système, le générateur solaire, le convertisseur, mais surtout la pompe. Un nettoyage régulier de la crépine permet, par exemple, d'éviter un arrêt inopiné par encrassement ou une baisse significative de rendement ;
- celle de l'ensemble des raccords, des connexions qui, avec le temps, se détendent, se desserrent ;
- celle des ouvrages en aval du système, le réservoir, le réseau de distribution d'eau, les vannes et robinetterie. Un contrôle périodique permet de limiter les effets de la corrosion, de prévenir toute fuite importante.

Le coût de cet entretien, auquel devra être ajoutée une provision pour le remplacement ultérieur des composants, représente un coût d'exploitation, variant de 5 à 10 % de l'investissement, qu'il faudra répartir sur l'ensemble des usagers. Ceux-ci devront être informés de l'existence et du montant de cette charge financière dès l'élaboration du projet d'équipement.



Toute installation de pompe solaire doit être accompagnée d'une campagne de sensibilisation sur le prix de l'eau.

En milieu urbain, les modalités de relevage de compteurs et les procédures d'établissement et de recouvrement des factures sont aujourd'hui bien rodées. Il n'en est pas souvent de même dans des villages, dans lesquels une pompe, qu'elle soit motorisée ou non, représente l'une des premières infrastructures de service public. Aussi :

> **il est absolument nécessaire d'élaborer, avec l'ensemble des usagers ou leurs représentants, les modalités d'exploitation et de gestion de toute pompe solaire à usage communautaire.**

Les modalités d'exploitation et de gestion à prévoir couvrent un large champ de domaines :

- la tarification de l'eau en fonction des coûts prévisionnels et des habitudes de la population ;
- le recouvrement des sommes dues ;
- la sécurisation et la valorisation éventuelle des sommes récoltées ;
- les procédures de débours selon les travaux à effectuer ;
- l'exploitation au quotidien du système de pompage ;
- les modalités d'exécution des travaux d'entretien courant ;
- les procédures d'entretien périodique, avec appel ou non, de prestataires de services ;
- les procédures en cas de défaillances pour une réparation ou un remplacement de pièces dans les délais les plus courts.

Ces recommandations sont donc primordiales pour assurer la pérennité d'un système de pompage photovoltaïque et la satisfaction des usagers. Pour obtenir un fonctionnement constant et régulier d'un système de pompage photovoltaïque, une organisation d'exploitation et de gestion doit être mise en place et acceptée par l'ensemble des usagers. Il y a quelques années encore, seul le bénévolat était considéré pour assurer le service de l'eau. Des cultivateurs étaient ainsi transformés par quelques séances de formation en comptables ou gestionnaires. Les organisations basées sur des personnes en particulier et non sur des structures ont toutefois montré leurs limites.

Il est nécessaire de professionnaliser les tâches d'exploitation et de rémunérer à leur juste valeur ceux qui les exécutent : que ce soit au sein d'une communauté villageoise ou par contractualisation de prestataires de services.

Si de multiples schémas d'exploitation et de gestion sont possibles, il est utile de rappeler le fruit de l'expérience, issu de nombreux équipements installés. Ainsi :

- > **l'exploitation et la gestion d'une infrastructure de service public doivent être dissociées du pouvoir politique local ;**
- > **une structure représentant l'ensemble des usagers doit être créée ;**
- > **une organisation d'exploitation, faisant appel à des compétences internes et externes, doit être mise en place. Leur répartition devra tenir compte de la disponibilité et de la capacité de la main d'œuvre locale.**

## BIBLIOGRAPHIE :

Auteur	Titre	Date	Commentaires
AFME – Agence française pour la maîtrise de l'énergie	<i>Le pompage solaire photovoltaïque</i>	1991	
AFME – CHABOT Bernard	<i>Le pompage photovoltaïque</i>	1990	
BENALLOU A., RODOT M.	<i>L'électricité solaire au service du développement rural</i>	2002	
BARLOW R., MCNELIS B. et DERRICK A.	<i>Solar pumping</i>	1993	
BARLOW R., MCNELIS B. et DERRICK A.	<i>Solar pumping: An introduction and update on the technology, performance, costs and economics</i>	1993	World bank technical paper number 168, intermediate technology publications, London, UK
BILLEREY J.	<i>Le pompage photovoltaïque</i>	1984	GRET, Paris, France
CARRIER F. ET SCHILLER E.J	<i>Méthode de dimensionnement du réservoir dans les systèmes de pompage photovoltaïques</i>	1993	Revue des sciences de l'eau, Ottawa, Canada
DERRICK, FRANCIS et BOKALDERS	<i>Solar photovoltaic products: A guide for development workers</i>	1991	Texte anglais
Fondation Énergies pour le Monde	<i>Des watts pour de l'eau (film vidéo)</i>	1992	
FRAENKEL Peter	<i>Water pumping devices</i>	1997	
GIRARDIER J. -P.	<i>Annales de la Faculté des sciences : les pompes solaires</i>	1964	
IEA – International Energy Agency	<i>Examples of stand alone photovoltaic systems</i>	1995	
IEA – International Energy Agency	<i>Photovoltaic components and systems</i>	1997	
KENNETH J. et GILLET W.	<i>Solar water pumping: A handbook</i>	1985	IT publications, London, UK
LAMACHE Corinne	<i>Pompage par énergie solaire, Intérêts, Applications, Limites</i>	1995	DEA "Géographie et Pratique du développement", Paris I
LOUINEAU Jean-Paul	<i>Guide de dimensionnement, d'installation et de maintenance des petits systèmes solaires photovoltaïques</i>	2001	
ROYER, DJAKO et SCHILLER	<i>Le pompage photovoltaïque</i>	1998	
Secretaria de salubridad y asistencia	<i>Bombas solares : una realidad en los desiertos mexicanos</i>		
SOURGNES Hélène (Cabinet Métrol)	<i>Enquête de terrain sur les stations de pompage et sur l'éclairage photovoltaïque</i>	1991	
POMPAPUR WEB SITE	<a href="http://www.ies.upm.es">www.ies.upm.es</a>	2003	
E. LORENZO, L. NAVARTE J. PIÑERO	<i>Évaluation d'un projet de pompage photovoltaïque dans le sud marocain</i>	1998	Mémoire interne Instituto Energia Solar (Madrid)

---

Ce document "Recommandations pour les installations photovoltaïques de pompage et de potabilisation" fait partie d'une étude réalisée dans le cadre du projet "Best practices for PV water pumping and purification programs (POMPAPUR) ; lessons from selected experience in Morocco", contrat CE-DG TREN n° NNE5-2000-35

Principaux contractants :

**IES-UPM**  
*Instituto de Energía Solar*  
*Universidad Politécnica*  
*de Madrid*

**FONDEM**  
*Fondation Énergies*  
*pour le Monde*  
*Paris*

Avec l'appui sur le terrain de :

**Association Tichka**  
*Ouarzazate*

Éditeur

**SYSTÈMES SOLAIRES**

L'OBSERVATEUR DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

146, rue de l'Université · 75007 Paris · Tél. : 01 44 18 00 80

[www.energies-renouvelables.org](http://www.energies-renouvelables.org)