

**STANDARD TECHNIQUE DES SYSTEMES DE POMPAGE
PHOTOVOLTAIQUE ET DE POTABILISATION**

1. INTRODUCTION

Malgré la disponibilité depuis des années déjà de systèmes photovoltaïques de grande qualité, l'expérience du terrain avec les systèmes de pompage photovoltaïque n'est pas toujours entièrement satisfaisante. Les procédures de contrôle de qualité sont toujours requises quand il s'agit de lancer de grands programmes de pompage photovoltaïque à cause des risques dérivant des innovations techniques proposées sur le marché, mais surtout, du besoin d'étendre les bonnes pratiques de l'ingénierie à l'ensemble de la chaîne de l'eau : pompage, stockage et distribution.

Ce rapport propose un Standard Technique pour servir comme base pour une assurance qualité, dans la mesure où remplir les spécifications requises amènera un système photovoltaïque de pompage à fonctionner adéquatement. Les procédures de tests correspondants seront aussi discutées.

Ce rapport est le fruit du travail qui a été financé par la Commission Européenne sous le contrat MEDA (« Implementation of a PV Water Pumping Programme in Mediterranean Countries », ref. ME8/AIDCO/2001/0132/SMAP-4). Le projet a permis l'installation de 52 systèmes de pompage photovoltaïques avec une puissance totale de 256kW, qui a bénéficié à environs 45.000 personnes. Il a été une opportunité pour réfléchir sur le pompage photovoltaïque en général. Les aspects sociaux et de mise en œuvre ont été consignés dans un autre rapport intitulé « Bonnes pratiques pour l'implantation de systèmes de pompage photovoltaïques ». Le présent rapport a donc été restreint aux aspects purement techniques.

Pour ce qui est de la méthodologie, ce rapport s'inspire de l'expérience de "*Universal Technical Standard for Solar Home Systems*", qui est largement appliqué depuis sa publication en 1999.

Tout en poursuivant les mêmes lignes directrices, pour plus de flexibilité, ce qui permet aussi de l'adapter aux conditions particulières de chaque pays (climat, manufacture locale, marché local, capacités des indigènes, ...etc.), les critères présentés dans ce standard de pompage photovoltaïque ont été classé en trois catégories : **Obligatoire**, **Recommandé** et **Suggéré**.

Les critères *Obligatoires* (**O**) sont ceux qui peuvent directement affecter la sécurité et la fiabilité. Une défaillance quant au respect de ces critères peut produire des dommages personnels ou une panne du système de pompage photovoltaïque, et ils constituent donc un ensemble de critères minimums qui doivent être respectés n'importe où dans le monde.

Les critères *Recommandés* (**R**) sont ceux qui normalement permettent une optimisation du système. La plupart d'entre-elles sont universellement applicables, et une négligence dans leur respect peut induire une augmentation du coût. Cependant, et vu que les considérations économiques dépendent des conditions locales, l'application de ces critères doit être revue en fonction de chaque cas particulier.

Les critères *Suggérés* (**S**) sont ceux pour lesquels il faut s'attendre à une installation saine. Néanmoins, il faut noter que tout jugement de robustesse est subjectif, car les critères suggérés ici peuvent avoir été influencé par l'expérience personnelle des auteurs, et leur application doit être aussi revue pour chaque cas particulier.

Note : Les symboles **O**, **R** et **S** sont utilisés dans ce document pour spécifier le caractère obligatoire, recommandé et suggéré de chaque critère, selon la classification ci haut mentionnée.

Il faut être clair sur le fait que l'approche considérée ici pour l'assurance d'une qualité technique n'implique pas comme pré requis l'accréditation de laboratoires de tests par des entités internationales (ISO 25)¹. En revanche, elle est basée sur l'idée que la qualité technique dans l'électrification rurale photovoltaïque est plutôt une question de volonté que de

sophistication technique. Des tests locaux simples (dans des laboratoires d'agences classiques, utilités, universités, ...etc.) peuvent être un outil effectif d'une garantie de qualité technique s'ils sont établis dans un cadre contractuel entre vendeurs et utilisateurs. Il y a lieu de spécifier que cet alternative *ad hoc* ne prétend ni entrer en compétition avec des laboratoires accrédités ni les exclure. Elle est plutôt motivée par la persistance des problèmes techniques dans le domaine, qui aujourd'hui, restent hors de portée de standards internationaux.

2. FONCTIONNEMENT ET SPECIFICATIONS DES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

En général les systèmes de pompage sont constitués des composants suivants :

- Un *générateur photovoltaïque* composé à son tour, de modules interconnectés électriquement jusqu'à constituer une unité de production DC, et une structure de support mécanique
- Un *conditionnement de la puissance*, constitué d'un convertisseur DC/AC, capable de varier la fréquence et la tension de sortie, en fonction de la puissance disponible dans le générateur qui, à son tour, est fonction de l'irradiance incidente
- Un groupe *motopompe* immergé, constitué de l'association d'un moteur électrique d'induction et d'une pompe, centrifuge ou à déplacement positif
- Un *câblage* électrique à travers duquel circule l'énergie depuis le générateur jusqu'au moteur, et qui incorpore des fonctions de contrôle et de sécurité
- Une *infrastructure hydraulique* qui conduit l'eau depuis la source, normalement un puits, jusqu'aux points de distribution et qui, à son tour, est constitué par quatre éléments : la source d'eau, la conduction entre la source et l'entrée du réservoir de stockage, le réservoir, et la conduction entre le réservoir et les points de distribution. Dans cette définition, nous entendons par conduction l'ensemble des tuyaux, des dispositifs de mesure, et de l'interface avec l'utilisateur : robinets, sources, ...etc.
- Un *système de potabilisation de l'eau*, là où les conditions sanitaires le rendent nécessaire.

La plupart des pompes photovoltaïques actuelles destinées à la fourniture de l'eau potable aux populations rurales répondent à ce schéma, et leur gamme de fonctionnement est en dessus de 400 m⁴ (Débit x Hauteur) par jour. D'autres configurations, (pompes non immergées, batteries, pompes à bélier,...etc.) sont aussi possibles, et sont présentes dans certains secteurs du marché, principalement quand les volumes à pomper sont faibles : maisons individuelles,... etc. Même si elles ne sont pas considérées ici en détail, nous entendons que la philosophie qui régit ces configurations réponde aux mêmes principes considérés dans ce travail, et en conséquence, la déduction de spécifications concrètes leur résultera d'application immédiate. En particulier, pour des gammes d'application entre 50 et 400 m⁴ par jour, le marché offre quelques bons systèmes de pompage avec des moteurs qui fonctionnent directement en DC. A ceux là l'application de cette spécification leur résultera, sans plus que substituer dans les spécifications concrètes le terme convertisseur DC/AC par convertisseur DC/DC.

Récemment, la gamme des pompes immergées s'est élargie avec celles communément appelées pompes hélicoïdales. En particulier, quand il s'agit de grandes hauteurs de pompage, de l'ordre de centaines de mètres, et, à la fois, de volumes journaliers réduits, inférieurs à 20m³, le rendement de ce type de pompe est significativement plus élevé que les pompes centrifuges qui leur correspondent. Divers études ont signalé un intérêt potentiel pour ces pompes, pour des phréatiques profonds et des villages avec moins de 300 habitants.

Cependant, ce potentiel n'est pas encore une réalité, et doit affronter entre autres, le coût élevé de l'ouverture d'un puits et la construction d'infrastructures dans ces conditions particulières, ce qui veut dire, un prix unitaire élevé de l'eau pompée. D'un autre côté, il ne faut pas oublier que ce type de pompes requiert une puissance élevée de démarrage

Le mérite d'un système d'alimentation d'eau doit être jugé en se basant sur les critères suivants :

- Capacité de pompage
- Fiabilité
- Sécurité
- Simplicité à l'utilisation
- Simplicité à l'installation et à la maintenance
- Qualité sanitaire de l'eau

La liste ci-dessus n'est pas nécessairement établie selon les priorités. Cette étude se penchera sur les implications de chacun de ces critères, en cherchant particulièrement à déduire des spécifications techniques concrètes, qui peuvent être incorporées directement dans les procédures qui régulent l'acquisition et l'installation d'équipements. Dans plusieurs cas, une spécification particulière peut dériver de critères variés et différents. Par exemple, les spécifications destinées à éviter les pertes d'eau ou la corrosion dans les tuyaux affectent la fiabilité, mais aussi la simplicité de la maintenance et à la qualité sanitaire de l'eau. Dans ces cas, et pour ne pas élargir le discours, ils seront énoncés uniquement en premier lieu d'apparition, dans l'exemple précédent on traitera seulement de la fiabilité.

2.1 Capacité de pompage :

La demande en eau, l'irradiation solaire et la hauteur de pompage, sont des données qui doivent être mises à la disposition du designer du système photovoltaïque. Il faut insister sur le fait que les valeurs estimées de ces paramètres ne sont pas plus que des prédictions, qui inévitablement associent un certain degré d'incertitude. Cette incertitude est communément assumée, et représente une limite sérieuse à la précision (ou plus strictement à la signification) des résultats d'un quelconque exercice de dimensionnement.

2.1.1 Consommation d'eau :

Pour l'estimation de la consommation d'eau des populations rurales, la littérature recommande une valeur située entre 20 et 40 litres par personne et par jour. Cependant, le contraste expérimental avec cette pratique est rare et peu concluant. Le peu de mesures réelles publiées révèlent que même pour des lieux d'apparence identique (même région, même forme de vie, ...etc.) l'utilisation de l'eau pompée par un système photovoltaïque peut suivre des règles très différentes³. Dans de les mêmes conditions de similitude, des facteurs d'utilisation (rapport entre le volume consommé et le volume disponible) variant entre 30 et 70% ont été établi⁴.

La description qui s'ajuste le mieux à ce qui a été observé au Maroc et dans d'autres endroits, consiste à différencier entre le terme de la consommation d'eau destiné strictement l'être humain (boire, cuisiner, ...etc.), estimée à 18 litres par personne et par jour, et le terme de la consommation destinée à d'autres usages domestiques (toilette personnel, lavage de vêtements, animaux domestiques, ...etc.), estimée à 37 litres par personne et par jour. La consommation fournie par les pompes photovoltaïques serait de sommer au premier terme une fraction du second, qui varie en fonction de la facilité d'accès au point d'alimentation.

A titre d'hypothèse pour la conception, on retiendra une gamme variant entre 18 et 55 litres par personne et par jour. La limite inférieure correspond à des situations pour lesquelles l'eau est distribuée via des sources communes, à partir de celles qui doivent être connectées aux maisons – avec un effort conséquent des personnes, tandis que la limite supérieure correspond aux situations où il y a un point d'alimentation dans chaque maison.

En utilisant cette hypothèse pour choisir une valeur concrète pour la conception, il faut considérer, les particularités de chaque village (disponibilité d'autres sources d'eau, traditions, ...etc.), et, puisque ces particularités ne sont pas connues à l'avance, le concepteur est obligé donc de décider avec une marge d'incertitude. Notre conseil est de choisir des valeurs élevées qui permettent de tenir compte de l'augmentation future de la population ou bien des variations des profils de consommation. Nous conseillons ce qui suit:

- **Si la fourniture d'eau à la population s'effectue à travers des sources à usage commun, la valeur du volume d'eau pour le calcul doit être de 20 l par personne et par jour.** (R)
- **Si la fourniture de l'eau à la population s'effectue à travers des robinets individuels dans chaque maison, la valeur du volume d'eau pour le calcul doit être de 45 l par personne et par jour.** (R)

En particulier, quand il s'agit de systèmes d'alimentation communautaires, et si en plus d'autres sources alternatives existent, ces recommandations tendront à un certain surdimensionnement de la pompe, c'est-à-dire, à des situations pour lesquelles l'utilisation réelle de l'eau est inférieure à la capacité du système de pompage. Cette tendance comportera donc un certain surcoût économique, mais évite le risque contraire, c'est-à-dire, le surdimensionnement de l'infrastructure, devant laquelle les populations sont très sensibles. Il importe de rappeler que le coût du système de pompage photovoltaïque est loin d'être linéaire avec la taille. Le volume d'eau requis influence plus le coût du générateur photovoltaïque, qui représente une faible part du coût total du système de pompage (autour de 15% dans le cas du projet Meda).

2.1.2 Rayonnement solaire :

L'estimation d'une valeur de référence pour l'irradiation solaire incidente sur la surface d'un générateur ajoute plus d'incertitude dans la conception d'une pompe photovoltaïque. En accord avec sa nature aléatoire, le rayonnement solaire se caractérise par une valeur moyenne $G_d(I)$, représentative de son potentiel total, et par une déviation standard, σ_d , représentative de sa variabilité. Pour un lieu donné, ces valeurs peuvent être obtenues en observant le phénomène durant une période suffisamment longue pour que ça soit statistiquement représentatif. A partir de ces valeurs, on peut prédire l'évolution future du rayonnement. Un théorème classique nous explique que pour assurer une prédiction avec une probabilité de 95%, il est nécessaire de considérer une marge de variation de $G_d(I) \pm 2\sigma_d$. En général, l'information sur les valeurs moyennes mensuelles de l'irradiation journalière horizontale, $G_d(0)$ est largement disponible⁵, mais pas celle correspondante aux valeurs de la déviation. D'un autre côté, les méthodes pour estimer la valeur de $G_d(I)$ à partir de la valeur de $G_d(0)$ sont bien développées, et leur description n'est pas importante pour l'heure.

Un exemple aidera à mieux comprendre cette situation : les moyennes mensuelles de l'irradiation horizontale observée à Alger pour le mois de Mars, entre les années 1986 et 1994 suivent la série (en kWh/m²) : $G_{d, 1986}(0)= 3.3$, $G_{d, 1987}(0)= 4.2$, $G_{d, 1988}(0)= 4.3$, $G_{d, 1989}(0)= 3.7$, $G_{d, 1990}(0)= 3.8$, $G_{d, 1991}(0)= 3.4$, $G_{d, 1992}(0)= 3.5$, $G_{d, 1993}(0)= 3.9$, $G_{d, 1994}(0)= 3.9$, ce qui permet de

caractériser Mars en général par $G_d(0)=3.8 \text{ kWh/m}^2$ et $\sigma_d= 0.34 \text{ kWh/m}^2$. Ceci suppose que pour un quelconque mois de Mars futur, si on désire prédire avec une probabilité de 95%, il faut donner à la prédiction une marge entre 3.12 et 4.48 kWh/m², c'est à dire, un ±19% autour de la valeur moyenne !.

De nouveau, la reconnaissance de l'incertitude n'élimine pas la nécessité d'avoir une valeur de référence pour la conception. Notre propre expérience au Maroc indique que la consommation d'eau varie de forme significative le long de l'année, et que le mois le plus défavorable, à considérer pour les besoins de la conception, correspond à l'époque la plus sèche, l'été. Dans la majorité des cas, il est donc utile de recourir à la recommandation suivante :

- **La valeur de l'irradiation journalière incidente sur la surface du générateur pour la conception doit être située entre 5 et 7 kWh/m². La valeur intermédiaire pour cette marge, c'est à dire 6 kWh/m², est particulièrement conseillée. (S)**

D'un autre côté, le rendement instantané de la chaîne de pompage varie avec l'irradiance. Pour cela, les spécifications d'un système de pompage requièrent la considération non seulement de l'irradiation totale disponible, sinon du profil de distribution de l'irradiance le long du jour, $G(t)$. La norme IEC 61725 décrit une formulation analytique particulièrement convenable, qui permet de synthétiser le profil de l'irradiance à partir des valeurs de l'irradiation journalière G_d , de l'irradiance maximale G_{MAX} , et la durée du jour, S_d . La comparaison des profils que décrit cette norme avec une large collection de jours réels ¹¹ amène à recommander pour ces paramètres les valeurs du tableau suivant :

$G_d(\text{kWh/m}^2)$	$G_{MAX}(\text{Wm}^2)$	S_d (heures)
7	1035	12
6	1000	12
5	830	10
4	675	9
3	575	8

Tableau 1 Valeurs recommandées pour les paramètres considérés dans IEC 61725

Pour cela on propose ce qui suit :

- **Pour les besoins de la conception, on considérera le profil journalier de l'irradiance décrit dans la norme IEC 61725, pour les valeurs du tableau 1. (S)**

2.1.3 La hauteur de pompage

Les principales sources d'eau des villages proviennent de sondages et de puits traditionnels. Pour nos besoins actuels, la différence entre ces deux sources d'eau repose sur la capacité de stockage. Les sondages qui sont plutôt étroits (diamètre typique inférieure à 30 cm), ne permettent pas d'accumuler de l'eau à l'intérieur. Conséquemment, le débit d'eau extrait provient souvent des eaux de source de ses murs. Au contraire, les puits traditionnels sont plutôt larges (diamètre typique de 2 m), et peuvent donc accumuler des volumes d'eau significatifs à l'intérieur.

Le comportement dynamique des sondages est tel que, la profondeur de l'eau augmente quand le débit extrait augmente. L'ouverture d'un puits doit être suivie d'un essai de caractérisation

qui permet d'établir trois valeurs : la profondeur statique, H_{ST} , correspondant à un débit nul, la profondeur dynamique, H_{DT} , correspondant à la profondeur utilisée à l'essai, et la valeur du débit d'essai, Q_T , pour lequel on choisit normalement une valeur proche du maximum que peut fournir le puits.

La nature propre du pompage photovoltaïque fait que le débit extrait du puits varie dans une certaine marge le long du jour. Logiquement, plus grand est le volume journalier à pomper, plus grande est cette marge de débits, et en conséquence, plus grande aussi est la marge de variation de la hauteur totale de pompage. Pour un puits, un système de pompage et un jour déterminé, on peut définir une hauteur de pompage équivalente, H_{TE} , correspondant à un puits hypothétique dont la hauteur ne varie pas avec le débit, et à partir duquel la pompe extraira le même volume d'eau tout le long de la journée. On peut alors estimer la valeur de H_{TE} à travers la formule empirique suivante ⁶ :

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

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

où $\alpha = 0.047$ (h^{-1}) quand Q_d est exprimé en m^3 , H_{OT} est la hauteur verticale à partir de la sortie d'eau jusqu'au sol, et $H_F(Q_{AP})$ est la perte de hauteur dans les tuyaux correspondant à Q_{AP} . A noter que Q_{AP} , appelé « débit apparent », est un débit moyen.

On peut observer, comme cela est prévisible, que la valeur de H_{TE} augmente selon que le volume journalier extrait augmente Q_d , et selon que la capacité du puits, Q_T , diminue.

Au moment de choisir une pompe photovoltaïque, il est commode de recourir à cette valeur de H_{TE} , puisque d'un côté, cela facilite la tâche du concepteur et, de l'autre côté, rend possible l'utilisation des tests de laboratoire réalisés avec une hauteur constante, dans le cadre de possibles contrôles de qualité de systèmes de pompage.

A part cela, il est clair que la capacité maximale du puits ne doit jamais être dépassée par le pompage photovoltaïque. Ceci nous mène vers un critère important :

- **Quand le pompage est effectué à partir de sondage (pas des puits traditionnels), le débit correspondant au générateur fonctionnant aux Conditions Standards de Test (Irradiance=1000 W/m², Température cellule=25°C) doit être en dessous de la valeur du débit d'eau de caractérisant le sondage. (O)**

Pour ce qui est des puits traditionnels, ni leurs caractéristiques, ni les règles de pompage disponibles sont standardisées. Cependant, ces sources d'eau représentent souvent la meilleure alternative pour l'alimentation en eau du village. Lors du choix d'une pompe, seule la valeur de H_{TE} peut suffire pour caractériser le puits. Le lecteur doit être averti aussi que la sécheresse des puits a souvent été rapportée comme raison de l'arrêt de l'alimentation en eau. Ce problème aussi a été rencontré au Maroc. En effet, une section entière du rapport mentionné ci haut « *Bonnes pratiques pour installer des systèmes de pompage photovoltaïque* », traite justement de ce problème.

2.1.4 Taille du générateur photovoltaïque :

Une fois connus le volume journalier, Q_d (m^3), la hauteur de pompage équivalente, H_{TE} (m) et l'irradiation journalière incidente sur le plan du générateur, G_d (kWh/m^2), la puissance nominale correspondante du générateur photovoltaïque, P_G^* , est calculée en tenant compte du rendement du convertisseur et du groupe motopompe. Etant donné que les valeurs des

rendements dépendent de chaque équipement en particulier, il serait ici insensé de dériver une quelconque spécification pour imposer une valeur de P_G^* . Néanmoins, nous jugeons intéressant de présenter une méthode qui donne une bonne approximation de cette valeur.

Si la tuyauterie a un large diamètre, ce qui est le cas si elle est conforme à ce qui a été spécifié en 2.2.5, la vitesse de l'eau à l'intérieur sera faible, et donc, en plus des pertes de charge qui seront faibles, la vitesse cinétique avec laquelle l'eau entre dans le réservoir de stockage, le sera aussi. Dans ces conditions, le bilan énergétique d'une pompe photovoltaïque peut être établi en considérant que l'énergie hydraulique qu'elle fournit, E_H , sera égale à l'énergie potentielle gagnée par l'eau, E_{POT} . On peut donc déduire l'expression suivante:

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

Où η_g , η_I , η_{MP} sont respectivement, les rendements journaliers du générateur, de l'onduleur et du groupe motopompe, $\rho=10^3 \text{ kg/m}^3$ est la densité de l'eau et $g=9.81 \text{ m/s}^2$ la constante de gravité. Une approximation raisonnable, pour les générateurs au silicium cristallin et les pompes centrifuges consiste à supposer les valeurs suivantes: $\eta_g / \eta^* = 0.86$; $\eta_I = 0.9$; $\eta_{MP} = 0.35$. Il est à noter que η_g / η^* comporte les pertes d'énergie issues des points de fonctionnement à des températures cellules supérieures à 25°C , aux irradiances en dessous d'un certain seuil ($\sim 200 \text{ W/m}^2$), aux angles d'incidence et à la saleté. On arrive donc à :

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

En plus de sa simplicité, cette expression peut conduire à de bons résultats. Une étude de la GTZ sur un large échantillon de pompes photovoltaïques installées dans ses projets d'aide au développement ⁷ trouvât, de ce fait, que cette expression conduit généralement à de meilleurs résultats que ceux dérivés des outils graphiques fournis par les fabricants.

Comme exemple illustratif, supposons un sondage avec les caractéristiques suivantes : $Q_T = 5.2 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{ST} = 5 \text{ m}$ et $H_{DT} = 32 \text{ m}$, sera équipé avec une pompe photovoltaïque capable de fournir $30 \text{ m}^3/\text{jour}$ quand l'irradiation journalière globale incidente est de 6 kWh/m^2 . On sait aussi que l'eau pompée sera stockée dans un réservoir situé à 7 m de la surface. Les étapes de calcul seront comme suit :

$$H_{TE} (m) = 7 + 5 + \frac{32}{5.2} \times 0.047 \times 30 = 19.3$$

en supposant une pompe centrifuge typique, la puissance nominale approximative requise pour le générateur photovoltaïque sera :

$$P^*(W) = 10 \times \frac{1}{6} \times 30 \times 19.3 = 965$$

2.2 Fiabilité :

La fiabilité des systèmes de pompage, dans le sens d'absence de pannes, dépend non seulement de la fiabilité des composants, mais aussi d'autres aspects du système comme la capacité de la source d'eau, la qualité de l'installation ...etc. Chaque composant du système doit satisfaire les mêmes critères de fiabilité, car sa connexion dans le système fait que la panne de l'un d'entre eux se répercute sur la qualité de l'ensemble.

La fiabilité doit être entendue ici comme se référant à la disponibilité de l'eau. La nuance est importante, parce qu'à la qualité intrinsèque des composants s'associent les conditions

particulières du milieu dans lequel ils opèrent. Par exemple, un robinet de grande qualité, qui n'est pas disponible sur le marché local, peut résulter moins fiable qu'un autre de moindre qualité, mais dont on peut trouver localement les pièces de rechange avec facilité, puisque les conséquences d'une panne du premier sont, en termes de disponibilité de l'eau, plus néfastes qu'une panne dans le second.

2.2.1 Générateur photovoltaïque :

- **Les modules photovoltaïques doivent être certifiés en accord avec la norme internationale IEC-61215, ou la norme spécifique appliquée dans le pays concerné.** (O)

Pour le moment, ce critère exclut les modules photovoltaïques avec cellules à couches minces. La fiabilité de cette technologie est sujette à une controverse générale. Ils existent des normes spécifiques pour cela (IEC-61646) et son utilisation est acceptée dans quelques projets d'électrification rurale appuyée par la Banque Mondiale. Cependant, l'expérience pratique avec cette technologie n'est pas encore concluante, et il est conseillé de prendre certaines précautions. Dans le cas concret des systèmes de pompage, le poids des modules photovoltaïques dans le coût total des systèmes est faible (15% dans le projet Meda, par rapport aux coûts des systèmes déjà installés sans considérer le réservoir de stockage ni les infrastructures de distribution) et, en conséquence, il n'apparaît pas sensé d'assumer des risques importants en contrepartie d'une réduction de prix qui, dans l'ensemble des systèmes, ne peut être que modeste.

La tension DC de fonctionnement des systèmes de pompage est souvent élevée, normalement plus de 120V, ce qui rend importants les dommages possibles en cas d'ombrage partiel des modules, et donc une protection spécifique est nécessaire. Heureusement, la majorité des fabricants incluent systématiquement les diodes by-pass, destinées précisément à cette protection, dans tous les modules photovoltaïques. Donc :

- **Les modules photovoltaïques doivent être protégés avec des diodes by-pass contre le phénomène du point chaud.** (O)

En général, les générateurs photovoltaïques sont constitués d'une association parallèle de plusieurs branches, chacune d'elle est constituée, à son tour, de l'association en série de plusieurs modules photovoltaïques. Dans des circonstances anormales, l'occurrence d'un courant inverse est possible, et plusieurs concepteurs incluent une diode anti-retour dans chaque branche comme mesure de protection contre ce phénomène. Cependant, ce dernier reste extrêmement improbable⁸, et en plus, il y a une grande évidence^{9,10} que les modules peuvent supporter sans dégât aucun des courants inverses allant jusqu'à cinq fois son courant de court-circuit en conditions standards, $I_{sc,m}^*$. Plusieurs pensent comme nous aussi, que l'utilisation systématique de diodes anti-retour comporte plus d'avantages que de désavantages, et pour cela elles sont peu conseillées. A leur place, il est meilleur de recourir à un fusible à l'extrémité de chaque branche, capable de supporter un courant 2 à 4 fois la valeur de $I_{sc,m}^*$. Un fusible additionnel à l'extrémité opposée de chaque branche est aussi un moyen commode pour isoler électriquement le reste du générateur, ce qui est utile pour la maintenance en général, et pour la détection de failles possibles d'isolation en particulier.

Par conséquent :

- Les générateurs photovoltaïques constitués de 5 branches ou plus associées en parallèle doivent être protégés contre le phénomène de courant inverse.(O)
- La protection au moyen de fusibles, pouvant supporter un courant de 2 à 4 fois le courant de court-circuit des modules en conditions standards, est particulièrement recommandée. (R)

D'un autre côté :

- Les structures de support doivent être capables de résister durant au moins, 10 années, aux intempéries sans corrosion ni fatigue importants. (O)
- Les structures de support doivent résister sans dégât à des vents de plus de 120 Km/h. (R)

Plusieurs matériaux ont prouvé leur convenance : acier inoxydable, aluminium, acier galvanisé, bois traité, ...etc.

- Dans le cas de modules photovoltaïques avec un cadre métallique, l'ensemble de la visserie et les éléments de fixation doivent être exclusivement en acier inoxydable. (O)

Il est important de mentionner que les modules sans cadre, collés directement à une structure de support, à travers un adhésif adéquat, même peu utilisés dans le marché actuel du pompage photovoltaïque, ont donné beaucoup de preuves de bon fonctionnement dans d'autres secteurs du marché photovoltaïque en général, et peuvent être acceptés ici.

La même remarque au sujet des couches minces s'applique aussi pour les systèmes solaires avec poursuite : Les gains d'énergie (en termes de volume d'eau pompée) associée à la poursuite sont, typiquement, de 30 à 50%, mais le même résultat peut être obtenu en augmentant dans les mêmes proportions la puissance nominale du générateur photovoltaïque. La répercussion de cette augmentation de puissance est faible dans le coût total du système de pompage, et ne justifie pas la prise de risques significatifs. Pour cela, et même en sachant que de bons systèmes de poursuite sont disponibles, nous déclarons que :

- Les structures de support statiques sont préférables à celles avec poursuite du soleil. (S)

Malheureusement, le vol de modules photovoltaïques fleurit là où un marché se développe. Le vol de modules est de plus en plus cité comme raison de panne dans le pompage photovoltaïque. Ceci peut être affronté de plusieurs façons : surveillance personnelle, enclos spécifiques, dispositifs anti-vol, ...etc. Donc :

- La conception du générateur photovoltaïque doit considérer une protection contre le vol. (S)

L'orientation et l'angle d'inclinaison de la structure de support doivent permettre l'optimisation l'énergie incidente sur le générateur durant le mois le plus défavorable de l'année, c'est-à-dire durant le mois qui présente la plus faible relation entre l'irradiation et la demande. La meilleure orientation correspond toujours à celle qui se dirige vers l'azimut du soleil à midi, c'est-à-dire :

- L'orientation doit être au nord pour l'hémisphère sud, et au sud pour l'hémisphère nord. (O)

Généralement, le mois le plus défavorable correspond au mois le plus chaud et coïncide avec l'été. On peut alors utiliser la formule suivante pour l'orientation :

- ***Inclinaison (°) = max {10°, [abs(φ)-10°]} (R).***

où φ représente la latitude du lieu exprimée en degrés. Cette expression considère un minimum de 10°, ce qui est suffisant pour favoriser le ruissellement de l'eau de pluie. Il y a lieu d'insister sur le fait que les légères déviations d'inclinaison ($\pm 10^\circ$), par rapport à ces valeurs optimales, ont de faibles incidences sur la collection d'énergie, et doivent être tolérées en général. Les ombres, cependant, peuvent arriver à être très néfastes, et donc une attention spéciale doit être prise pour les éviter. Pour cela :

- ***Les générateurs photovoltaïques doivent être totalement libres d'ombres dans l'intervalle de 8 heures centré autour de midi. (R)***

2.2.2 Convertisseur :

Ce composant sert primordialement pour transformer le courant que fournit le générateur photovoltaïque en un courant AC, requis par les moteurs à induction. En plus, le convertisseur peut incorporer des fonctions de protection face à des conditions anormales : baisse du niveau d'eau de la source, débordement du réservoir, absence d'isolation dans le générateur, ...etc.

Pour ce qui a trait à l'adaptation du générateur photovoltaïque, le fonctionnement du convertisseur doit être tel que la tension DC de fonctionnement qu'il impose à son entrée soit la plus proche de la tension au point de puissance maximum du générateur. De ce fait, nombreux sont les convertisseurs actuels qui incorporent cette fonction. Cependant, il faut noter que l'alternative de fonctionner à tension DC constante est aussi sensée, puisque les pertes sont faibles, quand la valeur de la tension DC de fonctionnement est convenablement choisie. La figure 1 présente le résultat d'un calcul théorique pour des générateurs au Si-x, et pour deux climats très différents ¹¹. La figure montre la perte annuelle d'énergie associée au fonctionnement à tension DC constante, en comparaison avec un fonctionnement à tension DC toujours au point de puissance maximum, en fonction de la valeur choisie pour la tension. On peut observer que, quelque soit la valeur dans la marge de $\pm 5\%$ autour de la valeur nominale, les pertes associées seront inférieures à 4%. Et pour cela :

- ***Le fonctionnement au point de puissance maximum est préférable, mais celui avec une tension constante est aussi acceptable (S).***

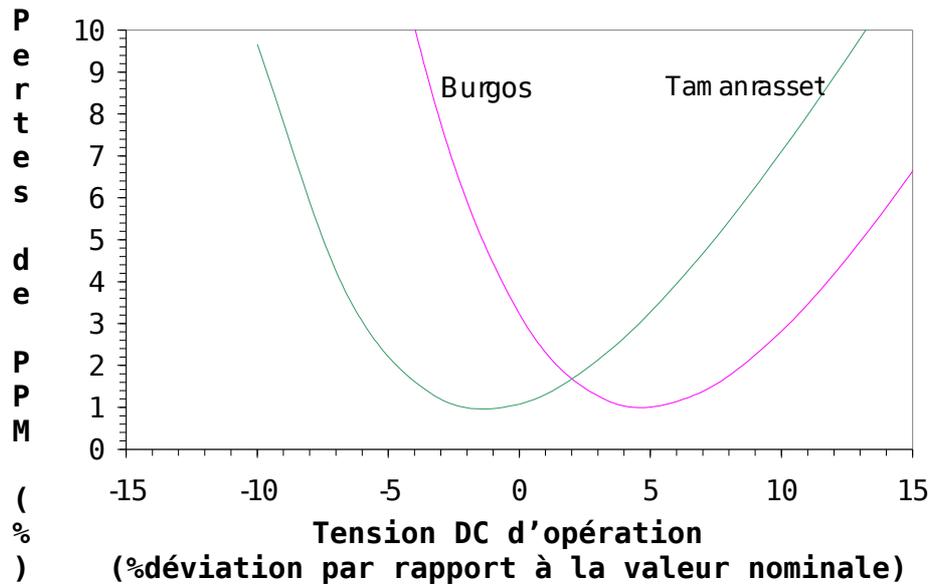


Figure 1 Comparaison des pertes de puissance annuelles pour un fonctionnement à tension constante et avec poursuite de puissance max. PPM pour deux sites : Burgos-Espagne (Lat. :42.22°) et Tamanrasset-Algérie (Lat. :22.47°)

Il est en principe possible de spécifier une marge recommandable pour les pertes énergétiques associées au fonctionnement à tension DC constante. Néanmoins, nous estimons préférable de les considérer dans la capacité du système de pompage dans son ensemble, qui a déjà été considéré dans 2.1. En d'autres termes, il est préférable de spécifier uniquement les critères de l'eau, et de permettre au à celui qui propose d'être libre de choisir sa solution technique particulière.

D'un autre côté, le convertisseur DC/AC doit adapter le courant AC qu'il fournit à sa sortie aux caractéristiques du type de pompe. Plusieurs des pompes actuelles sont centrifuges, et sont caractérisées, pour une hauteur donnée, par un couple mécanique directement proportionnel au carré de sa vitesse de rotation ($T_B \sim f^2$) qui, à son tour est directement relié à la fréquence d'alimentation du moteur. En plus, le couple mécanique que fournit un moteur à induction est directement proportionnel au carré de la relation entre la fréquence et la tension ($T_M \sim (V/f)^2$). Quelque qu'il en soit, le convertisseur DC/AC doit ajuster la tension et la fréquence à la sortie de telle manière que se maintienne une relation ($V \sim f^2$). Ces observations sont claires, et n'ont nullement besoin de spécifications particulières

L'occurrence de conditions anormales ne peut jamais être exclue totalement dans le fonctionnement des systèmes de pompage photovoltaïque. Il résulte commode d'incorporer des protections nécessaires dans la propre électronique des convertisseurs DC/AC, raison de leur traitement ici. La situation la plus potentiellement dangereuse, correspond au manque d'eau dans la source. Quand, pour une raison donnée, le niveau vient à baisser jusqu'à l'entrée de l'eau dans la pompe, celle ci commence à extraire un mélange air – eau. Ce phénomène dans la pompe est similaire à la *cavitation*. Une pompe qui cavite peut s'endommager rapidement, par excès de vibration ou par excès de température. En plus, la superficie intérieure du puits en bas de la couche aquifère peut être endommagé, à cause de la formation de vides qui provoquent d'éventuels effondrements du forage.

Une protection devant cette éventualité peut être obtenu en scrutant directement le niveau d'eau dans le puits, à l'aide d'un senseur de niveau qui donne un ordre d'arrêt au convertisseur, quand le niveau descend en dessous d'un certain seuil. Cependant, l'expérience

avec les senseurs nous apprend que dans plusieurs cas, leur installation est difficile, et que dans d'autres, leur fiabilité n'est pas suffisante. Pour cela, il est plus recommandable de suivre le fonctionnement proprement dit de la pompe. La densité de l'air est de quelques 1000 fois inférieure à celle de l'eau, et pour cela, que l'entrée de l'air dans la pompe diminue sensiblement le poids de la colonne du fluide entre la pompe et le réservoir et, avec cela, la résistance qui s'oppose au mouvement de la pompe. Ainsi « libérée », la pompe tendra à tourner plus rapidement et demandera au convertisseur une fréquence supérieure à celle qui correspond à son fonctionnement normal. La protection sera donc basée sur l'arrêt de la pompe, précisément, quand un certain seuil de fréquence est dépassé. Pour ces raisons :

- ***Le système de pompage doit être protégé contre l'éventualité de pertes d'eau dans la source ou, ce qui est le même, de l'entrée d'air dans la pompe. (O)***
- ***La protection basée sur la détection d'une élévation de la fréquence de la pompe est préférable à la protection du niveau d'eau dans la source (puits...etc.). (S)***

D'un autre côté, et indépendamment de la forme de protection adoptée, une fois que la baisse de niveau provoque l'arrêt du pompage, celui-ci ne devrait pas être redémarré tant que la récupération du niveau d'eau ne le permet pas de nouveau pour un pompage continu. Pour cela, ou bien on dispose d'un second senseur de niveau d'eau dans le puits, qui ordonne le démarrage de la pompe quand le niveau d'eau dépasse un certain seuil, ou bien le redémarrage de la pompe est temporisé, laissant passer un temps raisonnable pour permettre la récupération du puits, 1 à 2 heures peuvent être suffisantes. Ainsi donc :

- ***La protection contre la perte de l'eau dans le puits devra inclure une temporisation qui assure la récupération du niveau de l'eau, avant de redémarrer le pompage. (O)***

L'accumulation de matière en suspension retenue dans l'eau, ou l'aspiration d'un quelconque élément étranger (pierre ...etc.) peut occasionner le blocage mécanique de la pompe et, ainsi le moteur peut se griller. Pour cela :

- ***Le système de pompage doit être protégé contre le blocage mécanique de la pompe. (O)***

Le remplissage complet du réservoir de stockage est une situation fréquente, dans un système de pompage bien dimensionné. Si des mesures adéquates ne sont pas prises, le pompage pourrait continuer et provoquer un débordement de l'eau du réservoir. Aux dégâts donc que peut occasionner le ruissellement propre de l'eau, s'ajoute l'impact négatif de ce débordement, qui nuit à l'utilisation rationnelle de ce précieux liquide. Cette eau en excès peut être reconduite de différentes façons (fabrication de briques séchées au soleil, abreuvement du bétail, lavage de vêtements, irrigation,...etc.) ou même la faire retourner au puits proprement dit, et dans les deux cas, il y a lieu de fournir l'infrastructure hydraulique (tuyauteries...etc.). Autrement, on peut aussi arrêter le pompage quand l'eau atteint un certain niveau dans le réservoir. Cette situation peut être détectée soit à l'aide d'un senseur de niveau, qui comporte les mêmes inconvénients mentionnés pour les senseurs situés dans les puits, ou bien à l'aide d'un flotteur qui ferme l'entrée de l'eau dans le réservoir, ce qui provoque une élévation subite de la pression à la sortie de la pompe. Cette brusque élévation de la pression peut être détectée à l'aide d'un pressostat, qui ordonne l'arrêt du convertisseur DC/AC. Donc:

- ***Le système de pompage doit être protégé contre l'éventualité de débordement d'eau dans le réservoir de stockage (O).***

- ***Si la protection contre le débordement d'eau dans le réservoir s'effectue à travers l'arrêt de la pompe, on doit inclure une temporisation qui assure une vidange raisonnable du réservoir, avant de redémarrer le pompage (O).***

Bien évidemment, pour assurer tant le pompage de l'eau que les fonctions de protection qu'on peut incorporer, il est nécessaire que le convertisseur soit très fiable et qu'en plus, il doit être protégé. Une première considération serait de pouvoir manipuler avec commodité toute la puissance fournie par le générateur photovoltaïque De ceci :

- ***Le convertisseur doit résister sans dégâts en opération aux conditions suivantes : température ambiante de 45°C, un courant DC d'entrée égale à 125% le courant de court circuit du générateur photovoltaïque en conditions standards de mesure, dans toute la gamme de tensions DC possibles de fonctionnement. (O)***
- ***Le convertisseur doit résister sans dégâts à la connexion d'une tension DC égale à 125% à la tension en circuit ouvert du générateur photovoltaïque en conditions standards de mesure. (O)***

La circuiterie du convertisseur DC/AC devra être protégée face aux dégâts causés par de possibles impacts mécaniques, et face aux effets adverses d'intempéries (poussière, humidité et insectes), et en même temps ses composants doivent être suffisamment ventilés. Pour l'assurer :

- ***Le convertisseur doit être protégé avec un coffret qui assure un degré de protection d'au moins, IP 3.2, comme défini à la norme IEC 529.***

Le premier chiffre de la référence IP indique le degré de protection face à l'entrée de corps solides étrangers ; et le '3' indique la protection face à des corps solides d'une épaisseur supérieure à 2.5 mm (outils, câbles...etc.). Le second chiffre de la référence IP indique le degré de protection face à l'infiltration d'eau, et '2' indique que l'équipement ne doit pas être endommagé s'il est incliné d'un angle de l'ordre de $\pm 15^\circ$ autour de sa position normale, et si l'eau lui tombe verticalement. IP 3.2 doit être considéré comme un minimum indiscutable, applicable seulement aux convertisseurs DC/AC installés à l'intérieur d'habitations bien fermées. Quand cela est possible, le degré de protection doit être augmenté jusqu'à éviter l'entrée d'objets solides de 1mm d'épaisseur, et jusqu'à résister à la projection d'eau à partir d'une quelconque direction. Dans de tels cas :

- ***Le convertisseur doit être protégé avec un coffret qui garantit un niveau de protection IP 3.2, comme défini à la norme IEC529, si l'installation est à l'intérieure, mais, il doit être IP 5.4 si l'installation est à l'extérieure . (R).***

Les générateurs photovoltaïques impliquent l'existence de boucles conductrices de grande taille, et il donc conseillé d'observer les aspects relatifs aux surtensions induites par les décharges atmosphériques. En conséquence:

- ***Le convertisseur doit être protégé face à des surtensions induites à l'entrée, à l'aide d'un parafoudre de classe C, tel que défini par IEC 61024, placé entre chacun des pôles (+ et -) isolé de la terre, et la terre propre du système. L'installation de ce dispositif doit répondre aux règles de l'art définis aussi par IEC 61024. (O)***

En général, les convertisseurs s'installent à proximité des sources d'eau, pour cela la longueur du câble qui alimente le moteur en AC est normalement réduite. En conséquence, les

surtensions induites le seront aussi, et il n'est pas spécifiquement nécessaire de se protéger face à elles. Cependant, cette protection peut aussi être recommandée pour quelques cas concrets, quand la distance du convertisseur à l'entrée du puits est supérieure à 20 m, ou quand le système est contraint de fonctionner en zones à haut risque d'orages électriques. Dans ce dernier cas, on peut envisager une double protection à l'aide de déchargeurs, situés, un à la sortie du convertisseur DC/AC, et l'autre à l'entrée du puits.

Finalement les convertisseurs DC/AC utilisant les techniques de modulation PWM peuvent produire des interférences qui affectent négativement aux radios, télévisions ...etc., se trouvant dans leur voisinage. Le caractère isolé, en termes électriques, des systèmes de pompage fait que la gravité de ce problème dépend plus de la longueur des câbles DC et AC, et de la proximité de la pompe aux maisons. Comme règle générale :

- ***Les convertisseurs doivent satisfaire les critères d'émission de radiofréquences établis par le label CE. (R)***

2.2.3 Motopompe

Tant les moteurs à induction que les pompes centrifuges sont des équipements bien standardisés dans le marché électrique conventionnel, pour cela les motopompes immergés, issus de cette combinaison, peuvent offrir de bons rapports qualité / prix. Néanmoins, quand il s'agit de les incorporer dans un système photovoltaïque il y a lieu de restreindre le choix aux pompes de meilleure qualité (roues en acier inoxydable, ...etc.) puisque, et de nouveau, l'impact économique de ce choix est faible, dans le contexte de l'ensemble du système, alors que les conséquences humaines et économiques d'une panne de ce composant sont particulièrement désastreuses. Extraire une pompe d'un puits, par exemple, peut être très coûteux dans les conditions d'isolement (absence d'électricité,...etc.) qui est fréquent dans cette application. Souvent, la qualité de l'eau est peu connue, et il est alors conseillé de prendre la précaution d'utiliser des matériaux résistants à la corrosion.

En ce qui concerne les pompes à déplacement positif, il faut considérer que, l'arbre reliant le moteur au rotor des pompes hélicoïdales, est relativement grand (environ 30 cm), et qu'il est soumis à un stress mécanique élevé, particulièrement quand la pompe démarre. Le plus souvent, parmi les problèmes cités avec ce type de pompes, c'est la rupture de l'arbre à cause de la corrosion. Une attention spéciale doit donc être donnée pour analyser la compatibilité du matériau de l'arbre avec la composition de l'eau. Même si ça paraît clair, il demeure important de rappeler que :

- ***Tous les matériaux du groupe motopompe doivent être résistants à la corrosion de l'eau. (O)***

En plus :

- ***Le système de pompage doit supporter sans dommage aucun, au moins 5000 cycles démarrage - arrêt, dans les conditions d'opération définies par : une hauteur maximale de pompage, et un générateur photovoltaïque fonctionnant en conditions standards de test. (O)***

La meilleure manière de garantir l'étanchéité d'un moteur c'est d'éviter l'ouvrir. Ceci s'applique aux moteurs DC qui, dans le cas où ils sont munis de balais, doivent être ouverts périodiquement pour les changer. L'expérience nous apprend que, dans les conditions de terrain, cette opération donne peu de garanties et doit donc être évitée. En conséquence :

- ***Les moteurs qui opèrent directement en DC, doivent être du type ‘sans balais’ (R).***

En dernier lieu, les motopompes doivent être fixées de manière, qu’elles ne tombent pas au fond du puits, qu’elles travaillent en position correcte, et que ne résulte aucun inconvénient issu du recul de la pompe au démarrage. Ceci peut s’obtenir en utilisant une tuyauterie capable de supporter le poids de la pompe, et le débit d’eau, ou bien en utilisant un câble additionnel en acier, fixant le groupe motopompe à la tête de puits. Dans tous les cas :

- ***La fixation du groupe motopompe doit être ferme, assurer sa position verticale, et supporter la tendance de recul au démarrage. (O)***

2.2.4 Câblage :

En plus de supporter les intempéries, le câblage doit avoir une section telle que les pertes de tension n’affectent pas significativement le bon fonctionnement du système. Les spécifications suivantes lui seront appliquées :

- ***La section du câble doit permettre de limiter les pertes de tension entre le générateur et le convertisseur à moins de 2%, et à moins de 3% entre le convertisseur et l’entrée du groupe motopompe. Cette spécification s’applique à la condition du courant maximum en fonctionnement, avec le générateur opérant dans les conditions standards. (R)***

Il est important de noter que cette spécification régle les pertes de tension strictement associées au câblage (conducteurs et terminaux de connexion). Les pertes internes des éléments de protection (fusibles et diodes) ou aux convertisseurs, ont d’autres spécifications.

Souvent, les systèmes de pompage opèrent à des tensions relativement hautes, en dessus de 120 VDC et de 220 VAC, et des courants relativement bas, en dessous de 30 A, et pour cela les sections résultantes de la spécification antérieure sont faibles. Il y a lieu donc de considérer que les câbles doivent supporter aussi la fatigue mécanique, pour que :

- ***Sans préjudice des pertes maximales de tension, spécifiées antérieurement, la section minimale des câbles dans chaque circuit est de 4 mm² entre le générateur photovoltaïque et le convertisseur, et de 2.5 mm² entre le convertisseur et le groupe motopompe (O).***
- ***Les câbles de signaux doivent avoir une section minimale de 1 mm². (R)***

D’un autre côté :

- ***Les câbles extérieurs doivent être spécifiquement adaptés pour supporter les intempéries, en accord avec la norme internationale IEC 60811, ou la norme nationale adoptée. (O)***
- ***Tous les terminaux des câbles doivent permettre une connexion sûre et robuste mécaniquement. Ils doivent avoir une résistance électrique basse, qui assure des pertes de tension inférieures à 0.5% de la tension nominale de fonctionnement. Ceci s’applique pour chaque terminal individuel et dans les conditions du courant maximum de fonctionnement. (O)***
- ***Les terminaux des câbles ne doivent pas être propices à la corrosion qui peut provenir de contacts métalliques. (O)***

- *L'ensemble du câblage doit être clairement signalé (couleurs différentes, numéros, ...etc.). (O)*

2.2.5 Infrastructure hydraulique :

En général, les infrastructures hydrauliques doivent permettre d'éviter les pertes d'eau. Ces pertes sont néfastes pour au moins trois raisons : les pertes elles-mêmes, les dégâts qu'elles peuvent occasionner (gouttières, humidité dans les murs, flaques d'eau dans les chemins, ... etc.) ; et le mauvais effet que produit leur persistance, qui est contraire à l'encouragement d'une utilisation rationnelle de ce précieux liquide. De même, il y a lieu d'éviter la contamination de l'eau par des agents externes, lors de son parcours de la source au point d'alimentation. En dernier, les pertes de charge introduites par le pompage doivent être aussi faibles que possible. Les spécifications suivantes doivent donc être respectées :

- *La tête de puits doit disposer d'une protection qui interdit l'entrée d'objets solides et de déchets liquides à l'intérieur. (O)*
- *L'ensemble tuyauterie et accessoires (compteurs, robinets, ...etc.) doit être adéquat pour leur utilisation avec une eau potable. (O)*
- *Tous les éléments métalliques doivent être protégés contre la corrosion. Les éléments accessoires à la conduction (raccordements, robinets d'arrêt,...etc.), en particulier, doivent être protégés. (O)*
- *Comme norme générale, la pompe ou la conduite d'eau entre le puits et le réservoir doit disposer d'un quelconque mécanisme anti-retour, qui évite sa vidange immédiate chaque fois que s'arrête la pompe. (O)*
- *Les réservoirs doivent disposer d'une protection qui interdise l'entrée de saleté à l'intérieur. (O)*
- *Les réservoirs doivent disposer d'une ouverture, ou similaire, qui permette une inspection rapide. En plus, ils doivent disposer d'un accès commode pour pouvoir nettoyer leur intérieur. (R)*
- *L'ensemble des conduites doit être connecté au réservoir de manière à préserver autant que possible leur étanchéité. (R)*
- *Le niveau d'admission d'eau dans la conduite de sortie doit être situé au dessus du fond du réservoir, de telle sorte que ce dernier sert de décanteur. (R)*

Les infrastructures de distribution d'eau sont particulièrement propices à l'entrée de contamination, à cause de leur étendue relativement grande, de leur parcours en surface, et à la manipulation indirecte des utilisateurs. Il convient d'insister que ces infrastructures, sont précisément elles qui causent la majorité des problèmes observés dans les systèmes d'alimentation en eau, et pas seulement photovoltaïques. Par exemple, dans les capitales européennes, qui avaient des systèmes de distribution d'eau à partir de la fin du XIX siècle, nombreuses étaient les conduites qui avaient des fuites. Pour éviter l'entrée de contaminants, on recourait continuellement à l'augmentation continue de la pression d'eau. Ainsi, les fuites d'eau sortaient par les tuyaux, évitant l'entrée de saletés à partir de l'extérieur, mais le volume perdu représentait, dans plusieurs cas, jusqu'à 40% de la quantité d'eau circulant dans les conduites. Dans les régions où la disponibilité de l'eau était rare, et où l'alimentation

devait être coupée de temps en temps, la perte de pression résultante permettait l'entrée de contamination dans les tuyaux, et la qualité sanitaire de l'eau était tellement affectée que l'eau finissait par ne plus être potable, et obligeait les utilisateurs à boire de l'eau mise en bouteille. Ce fut le cas de plusieurs villes du sud d'Espagne. L'expérience du PRS montre comment les problèmes d'infrastructures affectent aussi les systèmes photovoltaïques. Dans le rapport d'évaluation correspondant, on lit ' ... *très faible taux de pannes d'équipements solaires... cependant plusieurs problèmes techniques (dimensionnement, conception, vieillissement, ... etc.) ont été observés sur les réseaux de distribution d'eau, du stockage ou des fontaines ... près de 30% des villages avaient des fuites dans les robinets d'entrée ou bien des problèmes avec les accessoires* '.

Cette réalité sous-entend une pratique très étendue malheureusement dans les études photovoltaïques : accorder plus d'attention aux aspects liés au pompage de l'eau, et peu aux aspects relatifs à sa distribution.

Nous avons aussi rencontré ce problème au Maroc. Le rapport susmentionné « *Bonnes pratiques pour l'implantation des systèmes de pompage photovoltaïques* » a accordé une attention particulière aux aspects pratiques ayant trait aux infrastructures rurales de l'eau. Le bon sens commun et l'attention dans l'exécution sont les facteurs clés pour réussir une bonne qualité des infrastructures de distribution d'eau, même si leurs spécifications ne sont pas faciles. Comme proposition, nous retiendrons les spécifications additionnelles suivantes :

- ***Les tuyaux enterrés doivent l'être à une profondeur suffisante (si possible 60cm), conformément aux règles de l'art (fond de sable, bande de signalisation, ...etc.) . (R)***
- ***Les points susceptibles de souffrir de pannes (coudes, raccordements, ...etc.) doivent être situés dans des endroits accessibles qui facilitent leur inspection et leur réparation. (O)***
- ***Le système de distribution inclura, au moins, une vanne à la sortie, et une vanne à l'entrée de chacun des points d'alimentation (fontaines, maisons, ...etc.) . (R)***
- ***L'ensemble de la robinetterie doit être de qualité supérieure. (R)***
- ***La disposition des points d'alimentation d'eau (hauteur, accès, ...etc.) doit permettre pour les humains une collecte d'eau commode, selon les procédures caractéristiques de la région, de pouvoir canaliser adéquatement les déchets, et d'interdire l'accès aux animaux. (O)***

Les pertes de charge dans les tuyaux, accessoires inclus, dépendent du matériel avec lequel ils sont fait, de leurs sections, de leur longueur et du débit d'eau qui y circule. Les pertes de charge diminuent le débit que fournit une pompe, de même que le ferait une augmentation de la hauteur contre laquelle elle travaille. Pour cette raison on peut dire que la hauteur totale vue par la pompe, H_T , est la somme de la hauteur géométrique, H_G , et de la hauteur associée aux pertes de charge, H_F . Comme norme générale :

- ***La section des tuyaux doit garantir des pertes de charge (accessoires inclus) ne dépassant pas les de 5% de la hauteur totale vue par la pompe, dans les conditions de fonctionnement définies par : hauteur maximale de pompage et générateur travaillant dans les conditions standards (R).***

2.2.6 Système de potabilisation :

Plusieurs méthodes de purification d'eau sont disponibles aujourd'hui. Cependant, la javellisation est la seule méthode qui permette la potabilisation non pas du lieu du traitement mais aussi le long de l'infrastructure d'eau : réservoir, tuyaux, ...etc. Plus encore, le produit commun est l'eau de javel, disponible à travers le monde. Pour cela, nous allons restreindre nos commentaires à la javellisation.

Le chlore peut être périodiquement ajouté dans le réservoir, ou injecté automatiquement à la sortie de la pompe. Notre expérience au Maroc nous a amené à penser que les pompes électriques d'injection (alimentées par le biais de petites installations photovoltaïques) représente l'option la plus conseillée. Nous allons limiter donc nos commentaires à ce type. Pour les besoins de clarifications, les spécifications seront classées en fonction des différentes parties du système :

a) Pompe d'injection du chlore

- ***La pompe d'injection doit avoir une protection IP 54 (O)***
- ***La pompe doit permettre un débit d'hypochlorite de sodium sans être endommagé (O)***
- ***La concentration de chlorite par m³ d'eau doit respecter la législation du pays (O)***
- ***La capacité de la pompe d'injection, en termes de pression au point d'injection doit être de 100% supérieure à la pression max. espérée dans les conditions normales (R)***
- ***La pompe d'injection doit être munie d'un détecteur de 'réservoir de chlorite vide' (O)***
- ***La pompe d'injection doit maintenir une linéarité inaltérable de la fréquence d'injection pour une gamme d'alimentation en tension suffisamment large ($V_{NOM} \pm 20\%$) (O)***

b) Senseur du débit d'eau pompée :

- ***Le senseur du débit d'eau doit estimer le débit avec une erreur maximum de $\pm 5\%$ (O)***
- ***Si le senseur du débit d'eau a besoin d'une tension d'alimentation, il faut maintenir inaltérable la linéarité de sa fonction de transfert pour une large gamme de la tension d'alimentation ($V_{NOM} \pm 5\%$) (O)***
- ***Le senseur du débit d'eau doit avoir une protection d'au moins IP 54 (O)***

c) Réservoir de chlorite :

- ***Le réservoir de chlorite doit être fait avec une matière qui permet de voir la quantité restante d'hypochlorite de sodium (O)***
- ***Le bouchon du réservoir de chlorite doit être suffisamment ajusté pour minimiser l'évaporation de l'hypochlorite de sodium. Le trou nécessaire pour l'aspiration de la chlorite doit être au maximum de 1 mm² (O)***

Vu que l'évaporation d'hypochlorite de sodium peut endommager la pompe d'injection :

- ***Le réservoir de chlorite doit être placé juste au dessous de la pompe d'injection (O)***

2.3 Sécurité :

Les systèmes de pompage photovoltaïques, comme n'importe quelle autre installation électrique, comportent des risques. Il existe en particulier un risque de choc électrique pour les personnes, en présence de tensions DC supérieures à 120 V, et/ou des tensions AC supérieures à 60 V, qui est normalement le cas de cette application.

Cette situation est commune aux installations photovoltaïques connectées au réseau, qui, à cause du récent essor de cette application ; a amené divers pays à développer des réglementations spécifiques. Même si la comparaison de ces réglementations n'a pas lieu d'être ici, il convient de mentionner que les mesures de protection prescrites pour de telles normes sont diverses et, dans certains cas, voire même contradictoires. Par exemple, tandis que le *NEC* (National Electric Code) appliqué au USA impose que, toute l'installation électrique avec $V > 50V$ doit avoir un de ses pôles directement connecté à la terre, les normes appliquées en Europe recommandent précisément le contraire, c'est à dire des configurations flottantes, avec les deux pôles isolés de la terre. Ces différences sont le fruit des particularités de chaque réseau électrique en général, et n'ont aucune relation avec les systèmes photovoltaïques. Par exemple, l'imposition de configurations de mise à la terre dans le *NEC* tend à privilégier la protection face aux phénomènes associés aux décharges atmosphériques, ce qui est cohérent avec les caractéristiques du réseau électrique au USA : tension relativement basse (125 VAC et de nombreuses maisons construites en bois, particulièrement susceptibles aux incendies). Tandis que les normes européennes privilégient la protection des personnes face au choc électrique, en cohérence avec la tension élevée de ses réseaux (220 VAC) et avec des maisons construites à base de matériaux peu inflammables. IEC 364-4-41 traite des protections contre les chocs électriques en général, et constitue une référence internationale largement suivie.

Au moment d'établir les protections d'un système de pompage photovoltaïque, il importe de considérer, d'un côté, le risque de *contact direct*, qui se produit quand une personne touche directement un conducteur actif, pour cela il faut exiger 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 occasionnellement peuvent être touchées par un conducteur actif doivent être mises à la terre. Ceci s'applique en particulier, aux cadres et structures de support du générateur photovoltaïque, et aux coffrets métalliques des convertisseurs (O).***
- ***La valeur de la résistance de la prise de terre doit être inférieure à la relation $(120/1.25 \times I_{sc}^*)$, I_{sc}^* étant le courant de court circuit du générateur dans les conditions standards (O).***

D'un autre côté, il faut considérer le risque de contact *indirect*, qui se produit quand une personne est affectée suite à un défaut d'isolation. La norme IEC 364 décrit les différentes mesures de protection. Son application aux systèmes photovoltaïques, requiert la considération d'autres aspects particuliers. Du côté des désavantages, les disjoncteurs différentiels conventionnels ne fonctionnent pas avec du courant continu, et les modules photovoltaïques ne peuvent pas être 'éteints' de manière instantanée. Du côté des avantages,

l'isolation fournie par l'encapsulation des modules photovoltaïques conventionnels est suffisante pour que ceux-ci puissent être considérés de classe II, ou comme isolation renforcée, et que le courant de court-circuit des modules est intrinsèquement limité. Nous conseillons ce qui suit :

- ***Les systèmes de pompage doivent inclure une mesure de protection contre le contact indirect, qui soit compatible avec la norme IEC 364-4-41 (O)***
- ***Particulièrement recommandées sont les mesures suivantes : isolation renforcée, configuration flottante, surveillance permanente de l'isolation (R).***

Pour ce qui est des systèmes de potabilisation, il est nécessaire de noter que l'hypochlorite de sodium est dangereux pour les personnes, et par conséquent, établir des critères de sécurité est le point clé pour éviter des accidents. Pour atteindre cet objectif, nous proposons les spécifications suivantes :

- ***La pompe d'injection doit avoir un fusible de protection à l'entrée de son alimentation électrique (O).***
- ***La pompe d'injection doit avoir un interrupteur d'arrêt (R).***
- ***Le réservoir de chlorite doit comporter une étiquette 'Danger : liquide toxique' (O)***
- ***La bâtisse abritant l'équipement de potabilisation doit avoir un robinet d'eau pour un rinçage rapide en cas de contact avec l'hypochlorite de sodium (O)***

2.4 Simplicité à l'utilisation :

Les systèmes de pompage sont des équipements d'usage commun dont la manipulation doit être confiée exclusivement à une personne, l'opérateur local, qui a une instruction minimale lui permettant de comprendre le fonctionnement de base des équipements, de pouvoir effectuer quelques opérations simples de maintenance, et de diagnostiquer les situations qui requièrent le recours à une personne plus qualifiée. En conséquence, le plus important est qu'il sache l'état général du système, en particulier, de pouvoir déterminer si un arrêt possible est dû à des causes normales (réservoir plein, manque d'eau dans le puits, ...etc.) ou, à des causes anormales (baisse de puissance DC, moteur bloqué, ...etc.). Pour cela :

- ***Le système de pompage doit inclure une visualisation indiquant à l'opérateur local, au moins, les circonstances suivantes (O):***

Fonctionnement normal

Réservoir plein

Manque d'eau dans la pompe

Moteur bloqué

Baisse de puissance

Court-circuit à la sortie

D'un autre côté, même si le fonctionnement du système est automatique, il est utile d'incorporer à la sortie de la pompe un débitmètre, accompagné d'un livret dans lequel l'opérateur local enregistre quotidiennement les lectures, et tout événement ayant pu se produire au cours de l'exploitation du système. Cette mesure a un coût très bas, et garantit la présence journalière et l'attention de l'opérateur. Dans l'expérience du Maroc, des débitmètres

ont été aussi incorporés dans toutes les maisons, et furent d'une grande utilité pour, d'un côté, détecter les fuites occultées dans le réseau de distribution (en comparant les volumes pompés et consommés), et de l'autre, pour une gestion correcte du système : tarification, ...etc. En conséquence :

- ***Un débitmètre doit être placé à la sortie de la pompe pour permettre l'enregistrement quotidien du volume d'eau pompé. (R)***
- ***Il est très recommandable aussi d'inclure un débitmètre à l'entrée de chaque point d'alimentation. (R)***

A part cela, il y a lieu de considérer que les points d'alimentation constituent une interface entre le système et les utilisateurs. Leur conception doit donc recevoir la plus grande attention pour que, d'un côté, la collecte de l'eau soit commode et, de l'autre, pour que ne se produisent pas des déchets indésirables. Par exemple, s'il s'agit de sources publiques, il faut disposer de lieux pour mettre les cruches (jarres) quand elles se remplissent, et des canalisations pour drainer l'eau se déversant des cruches portées sur les têtes des personnes. Certains utilisateurs peuvent remplir des bidons (jerrycans) montés sur une charrette (carriole), il faut donc prévoir une prise d'eau avec un tuyau pour attelage. Ces considérations peuvent paraître claires, mais l'expérience indique quelles sont souvent oubliées, et que cela entraîne des déchets aux alentours des points d'alimentation. Les mares prolifèrent de moustiques, et chiens et porcs arrivent autour d'elles : cette situation étant fréquente dans les installations de pompage photovoltaïques aujourd'hui, il convient donc d'insister sur cet aspect :

- ***La conception des points d'alimentation doit faciliter la collecte de l'eau, de canaliser les déchets indésirables et éviter l'accès aux animaux. (R)***

Pour ce qui est des systèmes de potabilisation, les critères suivants doivent être respectés :

- ***Le bon fonctionnement de la pompe d'injection doit être indiqué avec un signal vert, le cas contraire il doit être rouge. (R)***
- ***La pompe d'injection doit indiquer avec un signal rouge particulier la détection ' Réservoir de chlorite vide '. (R)***

2.5 Installation et maintenance :

Les systèmes de pompage doivent être fournis comme systèmes '*clefs en mains*', le fournisseur doit installer complètement et mettre en marche le système avant de le délivrer aux utilisateurs. Néanmoins, il est aussi possible que quelques entités (agences de développement, sociétés installatrices, ...etc.) recourent à l'acquisition des équipements, en se chargeant elles mêmes de leur installation. Dans pareil cas, la procédure d'acquisition des équipements doit prêter attention à ce que la fourniture inclut tous les éléments nécessaires pour l'installation, câbles, connecteurs, tuyaux de raccordements, éléments de fixation,... etc. En plus, ils doivent aussi être convenablement identifiés. En dernier la fourniture doit inclure la documentation adéquate (dans la langue du pays). Pour cela :

- ***La fourniture de pompes photovoltaïques doit inclure tous les éléments nécessaires pour leur installation (câbles, raccordements, vis, ...etc.). (O)***
- ***Les modules photovoltaïques, convertisseurs DC/AC et motopompes doivent être convenablement étiquetés. (R)***

La maintenance routinière des systèmes de pompage inclura le nettoyage du générateur photovoltaïque, le nettoyage du réservoir, et la réparation des fuites dans l'infrastructure hydraulique. Pour faciliter ces tâches :

- *Les structures de support, et leur montage, doivent permettre un accès commode aux modules photovoltaïques, aussi bien pour leur nettoyage que pour le contrôle de leurs contacts électriques. (R)*
- *L'installation des structures de support doit préserver leur résistance à la corrosion, à la fatigue et au vent. (O)*
- *L'infrastructure de distribution doit être dotée de vannes permettant d'isoler les différentes parties des conduites. (R)*

Pour ce qui est de systèmes de potabilisation, les tâches de maintenance suivantes seront requises : nettoyage du filtre de la pompe d'injection ; et le remplacement de fusibles si nécessaire. Dans le but de faciliter ces tâches, les critères suivants sont recommandés :

- *Le système de potabilisation doit inclure des fusibles et des filtres de rechange. (O)*
- *Les pièces de rechange doivent être disponible sur le marché local. (R)*
- *Les composants de chlorite qui requièrent des manipulations complexes pour remplir le réservoir doivent être évités. En particulier, l'eau de javel commerciale est recommandée. (R)*
- *L'inclusion de 'test de couleur' pour contrôler la quantité de chlorite dans l'eau parmi les pièces de rechange est recommandé. (S)*

Finalement une remarque générale peut être faite au sujet de la documentation :

- *Tous les systèmes de pompage et de potabilisation doivent être fournis avec une documentation de base (description technique, prévention de risques d'accidents et des schémas explicatifs simples). (R)*

3. Tests de laboratoire:

L'approbation de pompes photovoltaïques requiert la vérification du volume journalier d'eau pompée, Q_d , pour une hauteur manométrique, H_{TE} et une irradiation journalière donnée, G_d . Ceci est généralement effectué dans des laboratoires bien équipés avec des simulateurs de générateurs et des dispositifs spécifiques de pression, comme une chambre à air pré pressurisée ou bien avec des colonnes d'eau réelles. Cependant, ceci est aussi faisable dans des laboratoires classiques, et équipés, comme ceux qu'on retrouve dans les universités du monde entier, ...etc. Il est important de noter que s'impliquer dans ce domaine est non seulement utile pour les tests de qualification des programmes de pompage réels, mais aussi pour acquérir une précieuse expérience dans le pompage photovoltaïque en général. Ceci est particulièrement important, parce que les applications réelles se trouvent souvent dans des régions isolées, loin de la portée quotidienne de ces laboratoires.

Ce projet MEDA a donné l'opportunité à l'IES de développer des bancs d'essai et des procédures de test de pompes photovoltaïques basés sur des équipements conventionnels. L'expérience a été extrêmement positive.

Nous avons réalisé des tests de qualification pour ce projet particulier, et nous avons développé un banc qui reproduit automatiquement une hauteur réelle constante le long de la journée. Ceci permet de maintenir les pompes photovoltaïques en mode d'opération continu, et pour une large gamme de conditions différentes. Selon la devise « apprendre en travaillant », ceci a amélioré significativement notre expertise. C'est pour cela que nous encourageons d'autres collègues à lancer leur propre banc sur des thèmes similaires, et pourquoi nous expliquons ici les principes de fonctionnement de notre banc de tests « fait maison ».

Dans sa simple expression (Figure 1), le test du circuit hydraulique comporte les composants suivants : le réservoir d'eau, le groupe motopompe (objet du test), un manomètre (sortie de la pompe), une vanne manuelle (pour créer une pression opposée en réduisant le débit), et un débitmètre. Le circuit électrique est composé d'un générateur photovoltaïque et le convertisseur du système sous test.

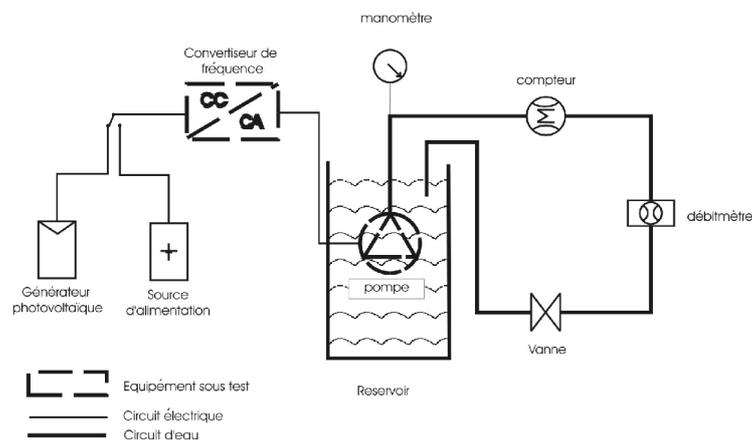


Figure 1. Schéma du circuit de base de test de pompes PV

Le fonctionnement de la tuyauterie doit être conçu de sorte à éviter les poches d'air, et de s'assurer que la composante de l'énergie cinétique de l'eau à la sortie de la pompe soit petite en comparaison avec l'augmentation de l'énergie potentielle due à l'augmentation de la pression autour de la pompe. Si possible, le tuyau de déversement doit être sous la surface de l'eau pour prévenir l'éclaboussement qui pourrait causer de petites bulles pouvant être entraînées dans l'eau entrant dans la pompe. Quelque soit le cas, une cloison verticale insérée dans le réservoir entre la prise de la pompe et le tuyau de retour forcera alors l'eau à passer sous la cloison près du bas du réservoir pour atteindre la pompe. De cette façon, les petites bulles seront exclues et resteront près de la surface. Alternativement, un large tuyau peut être placé autour de la pompe avec sa partie haute coupant la surface et ayant quelques trous dans sa base pour permettre l'entrée de l'eau.

Le principe des tests est le suivant : pour une valeur donnée de l'irradiance, G , l'entrée de la vanne est ajustée pour avoir la pression désirée à la sortie de la pompe (la pression est liée à la hauteur totale : 1 bar \sim 10m), et le débit correspondant est enregistré. En répétant cette

procédure pour différentes irradiances on obtient la courbe $Q = Q(G)$. Ensuite, puisque la valeur de G_d résulte de l'intégration d'un certain profil d'irradiances, la valeur de Q_d peut être calculé par intégration numérique du profil du débit correspondant. L'utilisation pratique de cette procédure implique des tests pour différents moments de la journée, comme pour obtenir différentes valeurs d'irradiance, et la translation des résultats actuels à une température de référence, en tenant en compte du coefficient de température des modules PV.

A cause de leur dimension relativement grande, le recours à une source peut être préféré au générateur PV qui peut être encombrant parfois. De cette manière, le groupe motopompe et le convertisseur uniquement peuvent amenés au banc d'essai. Les simulateurs de générateurs PV, équipements capable de reproduire les caractéristiques électriques du générateur PV (courbe $I = I(V)$) dans n'importe quelles conditions de fonctionnement, sont spécifiques, et chers aussi. Dépendamment des caractéristiques particulières du convertisseur, cela est aussi faisable au moyen d'une source DC de puissance, ce qui est significativement moins cher qu'un simulateur de générateur PV. Quelque soit le cas, ce circuit hydraulique de base oblige l'ajustement manuel de la vanne (la pression à la sortie de la pompe) chaque fois que l'irradiance (ou la puissance DC) varie.

La figure 2. montre le schéma d'une amélioration du circuit de base qui a permis d'ajuster automatiquement la pression à la sortie de la pompe quand l'irradiance varie. Suite à une idée originale proposée par un de nos collègues de l'université de Sao Paulo (Instituto de Electrónica y Electrotecnia), la vanne à glissière a été remplacée par un 'dispositif sensible à la variation de la pression' consistant en une pompe conventionnelle directement alimentée à partir du réseau électrique à travers un driver standard à fréquence variable (appelé aussi AC driver, ou convertisseur de fréquence). Ce driver permet d'ajuster automatiquement le débit de cette nouvelle pompe, dans le but de maintenir constante la pression à la sortie de la pompe PV. De cette manière, la hauteur de pompage PV devient indépendante de l'irradiation, et est maintenue constante le long de la journée. Ceci prépare le chemin des mesures des volumes d'eau pompés en fonction des irradiances journalières. L'intégration de l'irradiance pour obtenir l'irradiation journalière est un calcul direct, tandis que l'intégration du débit est effectuée directement à partir d'un compteur d'eau, comme celui qui existe dans nos maisons.

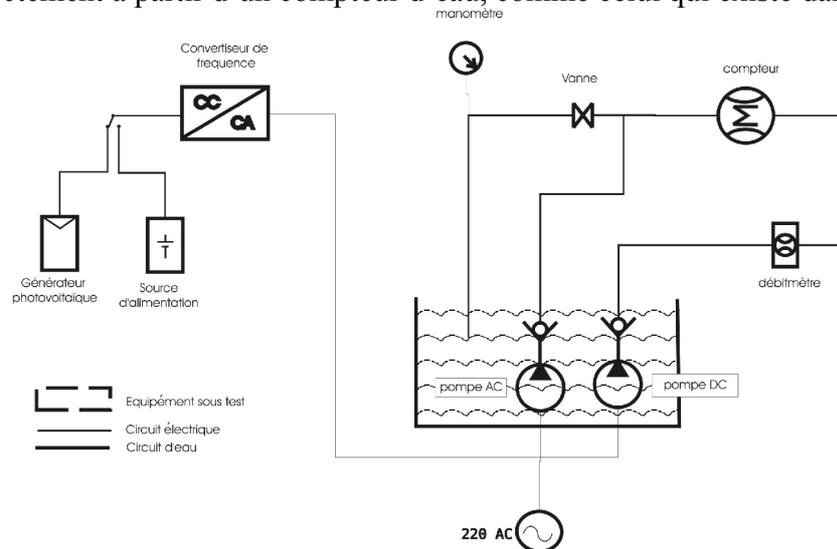


Figure 2 Même circuit hydraulique antérieur, plus la nouvelle pompe, et le compteur d'eau

La figure 3 montre les résultats d'une telle expérimentation. Un système de pompage photovoltaïque, alimenté par son générateur PV, a été maintenu en opération durant 20 jours à une hauteur constante, $H_{TE} = 80m$. Chaque point (Q_d , G_d) provient d'un jour particulier. La

dispersion observée autour de la ligne d'interpolation reflète les variations de second ordre, comme la température ambiante, la vitesse du vent, et le spectre solaire. La relative faible dispersion suggère la possibilité de pouvoir spécifier directement et de tester la capacité de pompage en considérant seulement les valeurs journalières du volume d'eau et de l'irradiation, indépendamment des profils journaliers.

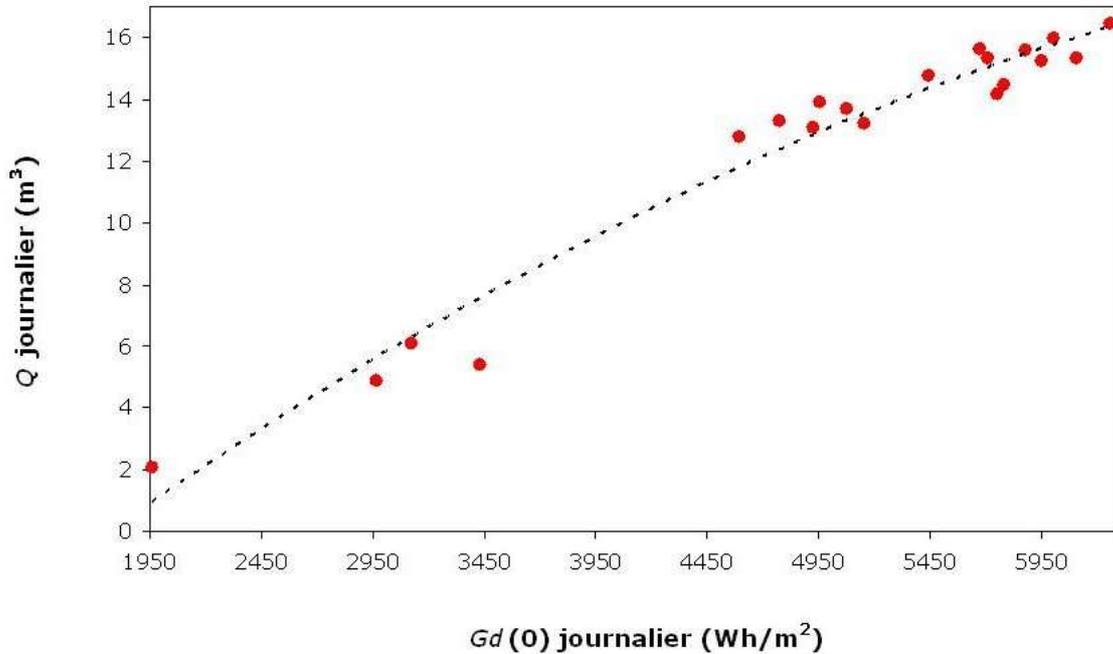


Figure 3 Résultats de l'expérimentation avec des valeurs journalières.

La Figure 4 montre une autre modification du circuit hydraulique de base, afin de tester la résistance des pompes PV durant le démarrage (il a déjà été mentionné que le démarrage représente un défi pour les pompes à déplacement positif). Cette fois, la vanne manuelle a été substituée par une valve électronique contrôlée par une vanne à ressort avec un petit étirement du tube flexible pour absorber le béliet hydraulique. De cette façon, et étant donné que la vanne électronique est initialement fermée, le démarrage de la pompe induit une augmentation brusque de la pression à sa sortie jusqu'à ce qu'un certain seuil est atteint, exactement comme cela arrive quand une pompe PV démarre. Le cyclage automatique est effectué au moyen d'un compteur simple. Une moyenne defois par minute est particulièrement conseillé.

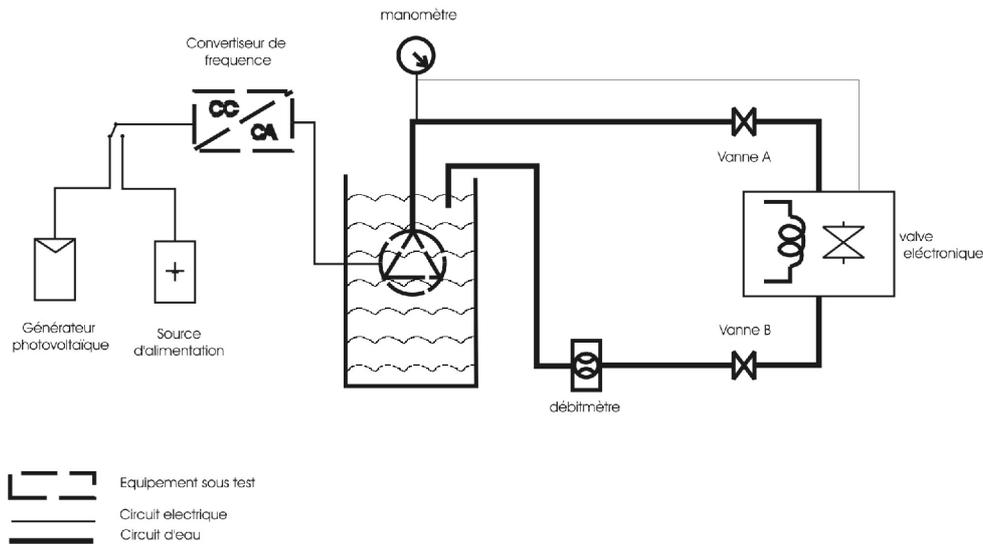


Figure 4 (Modification avec valve électronique et l'horloge)

4. Tests in situ :

Les pompes PV sont composées d'un générateur PV et d'un groupe motopompe. Il peut arriver que la fabrication des convertisseurs, ou des groupes motopompes aboutissent à des produits qui ont les mêmes caractéristiques, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour les modules PV. Pour cela, il faut comprendre que lorsqu'il y a un grand nombre de pompes dans un projet, la procédure de tests en laboratoire décrite est suffisamment représentative pour vérifier le rendement de convertisseurs et motopompes fournis, mais pas pour vérifier la puissance réelle des générateurs fournis. Ainsi, et afin de vérifier la capacité totale du système PV, la puissance crête du générateur PV doit être individuellement testée in situ. Dans ce projet Meda, ceci a été effectué à l'aide d'une charge capacitive « fait maison ». La figure 5 montre les résultats correspondants aux 29 pompes installées. On peut noter que la puissance moyenne réelle est de 6% inférieure à celle mentionnée dans le catalogue.

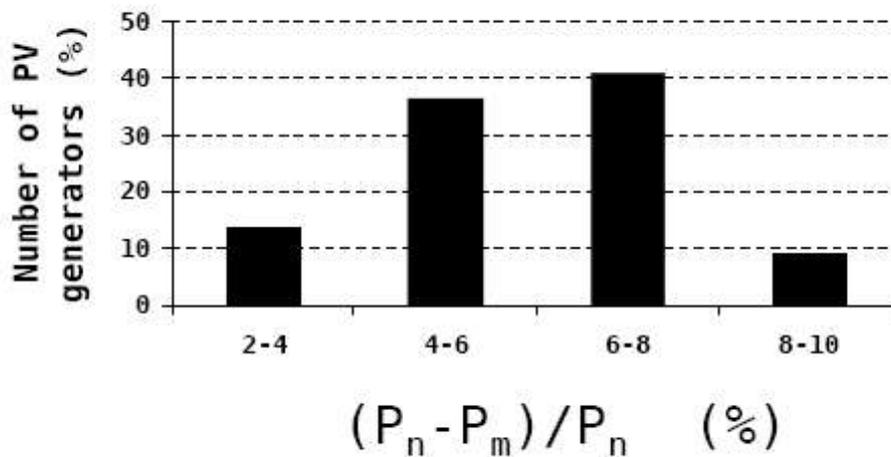


Figure 5. Mesures des puissances du générateur. Pourcentage de déviation par rapport à la puissance nominale

Parce que les hauteurs de pompages réelles peuvent différer significativement de la valeur standard, et parce qu'il n'y a pas de procédures claires de translation des valeurs des rendements standards aux valeurs réelles, le test in situ d'un système de fourniture d'eau donné est extrêmement difficile. Néanmoins, la mesure du rendement aux hauteurs réelles est toujours intéressante pour d'autres raisons autres que contractuelles. En particulier, parce qu'elle requiert l'observation de la profondeur d'eau durant le pompage, cela permet d'avoir une idée approximative mais utile pour estimer la capacité du puits en relation avec la capacité du système PV, de manière à pouvoir envisager d'autres tâches de restauration du puits (approfondissement, creusement de galeries, ... etc.).

REFERENCES

- [1] ISO/IEC 17025. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. 1999.
- [2] L. Narvarte, E. Lorenzo, M. Aandam, *Consumo de agua en medios rurales*, VI Congreso Ibero-Americano de Energía Solar, Vilamoura, Portugal, 2002.
- [3] A. Hänel, L. Hoang-Gia, F. Kaboré, B.S. Sy, "The performance of PV pumping systems in the CILSS-Regional Solar Programme: One year of monitoring results on 10 systems", 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 482-485, Nice, 1995.
- [4] A. Hänel, L. Hoang-Gia, "Monitoring of representative PV pumping systems of the Regional Solar Programme: results and conclusions", Proceedings of the Workshop on PV Water supply System Improvement (STR/1229/97-DE), Marrakech, p. 85-90, 1998.
- [5] National Solar Radiation Data Base. Available at rredc.nrel.gov/solar
- [6] L. Narvarte, E. Lorenzo, E. Caamaño, *PV Pumping Analytical Design and Characteristics of Boreholes*, *Solar Energy*, **68**, 1, pp. 49-56, 2000.
- [7] A. Hahn, C. Flores, R. Schmidt, "Photovoltaic water pumps. Lessons learned from demonstration and field testing projects supported by GTZ", Proceedings of the Workshop on PV Water supply System Improvement (STR/1229/97-DE), Marrakech, p. 39-44, 1998.
- [8] H. Laukman, G. Bopp, *Residential PV Systems Electrical Safety Issues and Installation Guidelines*, Progress in Photovoltaics, vol. 4, 307-314, 1996.
- [9] R. Hotopp, K. Jagger-Hezel, *On the possibilities to avoid series blocking diodes and bypass diodes*, 12th E.C. PVSEC, 1678-1681, Amsterdam, 1994.
- [10] A. Illiceto, G. De Angelis, S. Guastella, R. Patane, *Assesment of blocking and bypass diodes application in PV power plants*, 2nd World Conference and Exhibition on PV Solar Energy Conversion, 2108-2111, Vienna, 1998.
- [11] M. Alonso Abella, E. Lorenzo, F. Chenlo, *PV water pumping systems based on standard frequency converters*, accepted for publication in Progress in Photovoltaics