

TECHNOLOGIES EUROPÉENNES DU POMPAGE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

- accès à l'eau potable • irrigation maîtrisée
- respect de l'environnement • réduction de la pauvreté



FONDATION ÉNERGIES POUR LE MONDE



COMMISSION
EUROPÉENNE

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



« *Technologies européennes du pompage solaire photovoltaïque* »

a été réalisé dans le cadre du projet “Implementation of a photovoltaic water pumping programme in Mediterranean countries”

Avec la contribution financière de :

- Commission européenne – programme MEDA, contrat ME 8/AIDCO/2001/0132/SMAP4
- Ademe

Contractants du projet :

- Universidad Politecnica de Madrid - Instituto de energia solar
- Fondation Énergies pour le Monde

Document réalisé sous la direction de la Fondation Énergies pour le Monde
avec la contribution de :

- Hubert Bonneviot (Consultant indépendant – hubert.bonneviot@wanadoo.fr)
- Michel Courillon (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie)
- Yves Maigne (Fondation Énergies pour le Monde)

ISBN : 2-913620-25-6

Technologies européennes du pompage solaire photovoltaïque

Achevé d'imprimer : décembre 2004

Éditeur : **SYSTÈMES SOLAIRES**

146, rue de l'Université – 75007 Paris – France

Tél. : +33 (0)1 44 18 00 80 – Fax : +33 (0)1 44 18 00 36

www.energies-renouvelables.org

Photos de couverture :

Rémy Delacloche

Établissement pompes Guinard

Instituto de Energia Solar

SOMMAIRE

INTRODUCTION	2
1. LE POMPAGE SOLAIRE	3
1.1 HISTORIQUE	3
1.2 PRINCIPES GÉNÉRAUX DU POMPAGE SOLAIRE	3
1.3 LES DEUX CATÉGORIES DE POMPES SOLAIRES	4
2. LES POMPES SOLAIRES DOMESTIQUES	5
2.1 CONSTRUCTION	5
<i>Moteur</i>	5
<i>Hydraulique</i>	5
2.2 FONCTIONNEMENT	6
2.3 TYPES D'INSTALLATION	6
2.4 PERFORMANCES	7
3. LES POMPES SOLAIRES VILLAGEOISES	7
3.1 ÉVOLUTION DE L'OFFRE	7
3.2 POMPES CENTRIFUGES IMMERGÉES	8
<i>Pompe</i>	8
<i>Moteur</i>	8
<i>Onduleur</i>	9
<i>Rendement du système</i>	9
<i>Tension de fonctionnement et contraintes associées</i>	9
<i>Performances des gammes proposées</i>	10
3.3 POMPES VOLUMÉTRIQUES IMMERGÉES	11
<i>Hydraulique</i>	11
<i>Moteur</i>	13
<i>Électronique</i>	13
<i>Rendement</i>	13
<i>Performances des gammes proposées</i>	13
4. PRIX DES SYSTÈMES	13
4.1 LES ÉLÉMENTS DU PRIX	13
4.2 PRIX AU WATT-CRÊTE	13
4.3 PRIX PAR LITRE D'EAU POMPÉ	14
5. CONCLUSION	15
ANNEXE 1. RAPPEL DE NOTIONS D'HYDRAULIQUE ET DE POMPAGE	16
1 DÉFINITIONS ET UNITÉS	16
<i>Énergie potentielle et pression</i>	16
<i>Énergie cinétique</i>	16
<i>Énergie d'un liquide en mouvement</i>	16
<i>Pertes de charge</i>	16
<i>Hauteur manométrique</i>	17
<i>Courbe réseau</i>	17
<i>Limite d'aspiration des pompes</i>	18
2 POMPES	18
<i>Pompes volumétriques</i>	18
<i>Pompes centrifuges</i>	19
<i>Rendement et vulnérabilité</i>	20
ANNEXE 2. LISTE DE FOURNISSEURS	22

INTRODUCTION

Fonctionnant au “fil du soleil”, le pompage est sans doute l’une des plus pertinentes utilisations de l’énergie solaire photovoltaïque. L’évolution progressive, depuis 20 ans, des matériels et des gammes de performances permet aujourd’hui de considérer le pompage solaire comme une technologie mature.

L’Europe, par un marché intérieur très réduit, s’est tournée, dès leur invention, vers un usage des pompes solaires dédié aux populations rurales des pays en développement.

Aussi, la majorité des systèmes conçus par les industriels européens sont destinés à satisfaire les besoins primaires d’eau potable des pays du Sud.

À l’inverse, certains pays comme les États-Unis ou l’Australie disposent d’un marché intérieur pour l’alimentation en eau à usage domestique de maisons isolées ou pour le bétail.

Ce document dresse un état de l’art des technologies et équipements de pompage solaire fabriqués en Europe, passant en revue les matériels disponibles, leurs caractéristiques, leurs atouts, leurs limites, leurs domaines d’applications et leurs coûts.

En dernier chapitre, les grands principes du pompage, information utile pour exploiter ce document, sont rappelés.

1 LE POMPAGE SOLAIRE

1.1 HISTORIQUE

Pomper à l'aide du soleil est un vieux rêve. On rapporte une première tentative par Héron d'Alexandrie en l'an 100 après J.-C. consistant à utiliser la dilatation de l'air entre le jour et la nuit pour aspirer de l'eau. Les premières machines ont utilisé l'effet thermique du rayonnement solaire pour constituer la source chaude d'une machine thermodynamique. La pompe de l'américain Schumann en 1911 près du Caire utilisait des capteurs à concentration et, dans les années 1970 en France, la pompe SOFRETES utilisait un capteur plan avec un fluide volatil (butane puis fréon). Le rendement de ces machines, lié à celui du cycle de Carnot, était très faible, inférieur à 1 %.

L'arrivée des cellules photovoltaïques, ou photopiles, a fait l'effet d'une révolution, tant le procédé était simplifié. C'est aux établissements Pompes Guinard, basés en France, que l'on doit la première pompe solaire photovoltaïque, installée à titre expérimental à Propriano en Corse en 1975. Les résultats satisfaisants ont permis d'installer la première pompe à Koni, au Mali, deux ans après. Pour une puissance nominale de 1 kW, les 5 tonnes de matériel et le mois d'installation d'une pompe thermodynamique étaient remplacés par 850 kg d'équipements et deux jours d'installation pour la pompe ALTA X. Le prix était similaire : 200 000 FF (30 000 €). Fin 1980, une pompe

de près de 30 kW sera installée en démonstration à Montpellier.

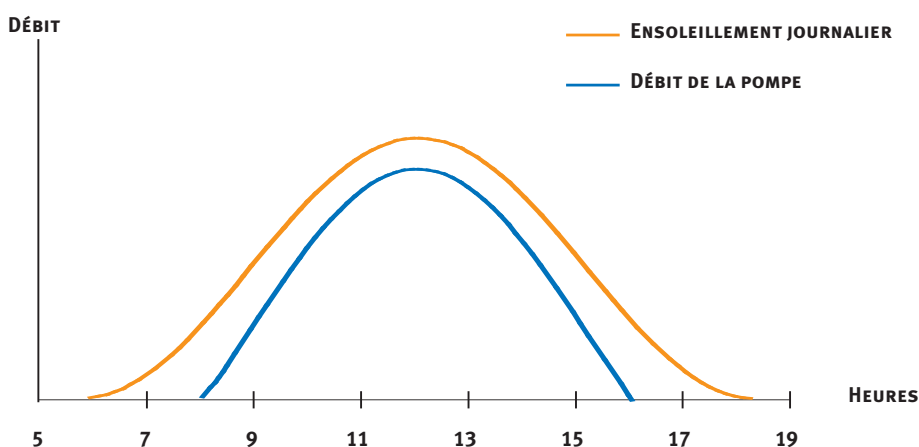
À ce jour, 5 000 pompes solaires à usage communautaire ont été installées sur les cinq continents. La réduction des coûts, l'amélioration de la technologie et de la fiabilité ont permis de réduire le coût de l'eau pompée. Il oscille dans une fourchette de 0,05 à 0,5 €/m³ d'eau selon la puissance de la pompe, la hauteur de refoulement et l'ensoleillement.

1.2 PRINCIPES GÉNÉRAUX DU POMPAGE SOLAIRE

La caractéristique de l'énergie solaire est d'être périodique (jour/nuit), continuellement variable en fonction de l'ensoleillement au cours d'une journée. Aussi faut-il en général un stockage tampon afin de pouvoir utiliser des récepteurs, consommateurs d'électricité, quel que soit le moment souhaité. Le pompage solaire est une exception, il est en effet relativement facile de stocker l'énergie potentielle de l'eau dans un réservoir surélevé, alternative largement moins onéreuse et plus fiable qu'un stockage par accumulateurs électriques, car les batteries ont une durée de vie limitée et nécessitent un entretien rigoureux.

Par la variation de vitesse, et donc du débit, le pompage permet d'utiliser directement une puissance continuellement variable, celle issue des modules photovoltaïques. Le débit de pompage va donc évoluer avec l'intensité de l'en-

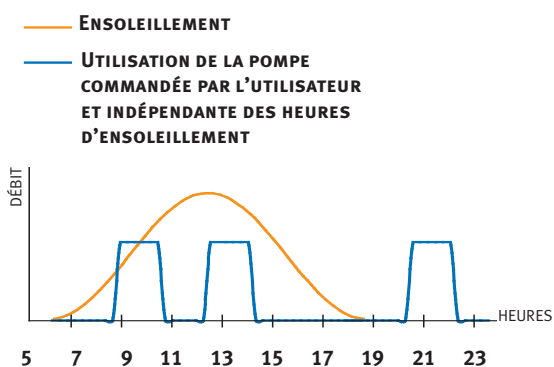
Graphique 1: *Pompage au fil du soleil*
(fonctionnement automatique sur une journée)



soleillement : c'est ce que l'on appelle le pompage "au fil du soleil" (voir graphique 1). Le débit maximum de la pompe, exprimé en m^3/h , obtenu généralement à midi est environ le sixième du débit journalier. Pour une pompe volumétrique, le couple est constant : la puissance absorbée sera proportionnelle à la vitesse de rotation (Puissance = couple x vitesse).

Il existe des situations où cet atout ne peut être mis à profit. Elles nécessitent un stockage par banc de batteries. Tel est le cas par exemple des petites unités de pompage à usage domestique. Elles font souvent partie d'un système pourvu de différentes applications, éclairages, froid, équipements audiovisuels déjà doté d'un banc de batteries. C'est l'utilisateur qui déclenche la mise en route de la pompe qui fonctionne alors en régime fixe (voir graphique 2).

Graphique 2 : Pompage sur batterie



1.3 LES DEUX CATÉGORIES DE POMPES SOLAIRES

Deux types de pompes solaires doivent être distingués : • Les pompes à usage individuel pour une famille ou pour le bétail à partir d'un petit point d'eau. • Les pompes à usage collectif pour la population d'un village, qu'elles soient destinées à l'approvisionnement en eau potable ou à l'irrigation de périmètres maraîchers.

Le contexte d'utilisation d'une pompe domestique est généralement le suivant :

- Elle est destinée à fournir de l'eau dans une habitation avec, fréquemment, une exigence en

termes de pression. • La pompe domestique correspond généralement à un achat individuel, ce qui sous-entend un utilisateur unique et souvent soigneux. • Elle s'intègre souvent dans un ensemble d'autres équipements solarisés avec un parc de batteries centralisé.

La pompe villageoise, au contraire, rend un service d'intérêt général, approvisionnant, par exemple, l'eau potable par bornes-fontaines.

Les besoins d'une famille sont de l'ordre du mètre cube par jour, ceux d'un village se situent entre 10 et 50 m^3 /jour voire au-delà. Aussi, les pompes domestiques seront pratiquement toutes volumétriques. Disponibles sur le marché grand public, elles sont généralement de construction légère.

Au contraire, les pompes villageoises font appel aux deux technologies complémentaires, les pompes centrifuges et les pompes volumétriques, selon les caractéristiques de débit et de hauteur de refoulement. La qualité de leur fabrication et de mise en œuvre est maximale pour en accroître la durée de vie.

2 LES POMPES SOLAIRES DOMESTIQUES

Les premières pompes employées ont été des pompes fonctionnant en courant continu de 12 ou 24 volts et conçues pour le nautisme de plaisance ou le caravanning pour l'alimentation en eau potable à partir d'un réservoir embarqué. Ces pompes de surface sont normalement installées à l'extérieur du réservoir. Certaines, immergées, sont conçues pour vider la cale du bateau. Elles peuvent accepter des eaux légèrement chargées, et la hauteur de pompage maximale n'excède pas 4 mètres environ. Leur rendement est médiocre. Le faible niveau de qualité correspond à celui des gammes "habitat" ou "loisir et jardin" (par exemple, les pompes vendues dans les grandes surfaces avec un emballage attrayant et un habillage plastique de couleur vive).

Ces pompes alimentées en courant continu sont conçues pour un usage moins intensif que les pompes industrielles à usage collectif. Leur

prix est en rapport avec leur qualité même si l'un de leur secteur de marché, le nautisme, a tendance à faire monter les prix.

La première pompe construite plus spécifiquement pour le solaire a sans doute été la Solar-jack (USA), dès la fin des années 1980. Il s'agit d'une électropompe monobloc immergée, c'est-à-dire que pompe et moteur ne font qu'un : on ne parle pas d'accouplement, car l'arbre moteur est aussi une pièce de la pompe. Plusieurs fabricants ont repris la même architecture.

2.1 CONSTRUCTION

Moteur

Le moteur est à courant continu avec balais (moteur série) pour trois raisons : • La pompe est volumétrique, donc demande un fort couple de démarrage. • L'alimentation est en courant continu. • Ce sont des moteurs faciles à construire, donc bon marché.

Les modalités d'utilisation lui imposent deux contraintes majeures : • Il doit être étanche, sinon il se produirait des courts-circuits au niveau des charbons et des collecteurs. Les deux zones de vulnérabilité sont la sortie du câble d'alimentation et celle de l'arbre. Il ne faut pas oublier que ce moteur qui travaille sous l'eau, reçoit la pression d'immersion et chauffe en fonctionnement ; par conséquent, la pression de la poche d'air interne augmente en fonctionnement ; l'étanchéité constitue sa première vulnérabilité. • Les charbons étant des pièces d'usure, ils doivent être changés régulièrement. Il faut donc prévoir, lors de la fabrication, de pouvoir ouvrir le moteur pour changer les charbons, nettoyer le collecteur et ensuite, de refaire son étanchéité d'une manière relativement simple.

Les moteurs peuvent être bobinés en 12 ou 24 volts pour quelques centaines de watts et tournent à 1 500 tours/minute environ. Les charbons doivent être changés environ tous les deux à trois ans par un technicien soigneux et équipé. Si l'opération ne se fait pas préventivement, elle peut nécessiter la refaction du collecteur du moteur. Il ne faut pas espérer une grande durée de vie pour ces matériels à usage

domestique et ils ne peuvent fonctionner en régime continu, conçus initialement pour fonctionner quelques minutes par jour.

Hydraulique

Beaucoup de pompes hydrauliques sont à membrane comme les pompes à essence des voitures. Une membrane souple en matériau de synthèse, renforcée par un tissage, actionnée par un plateau rotatif oscillant, est déformée en son centre de façon à faire varier le volume d'une chambre au-dessus d'elle. Celle-ci est munie de deux clapets (aspiration et refoulement). La pompe peut comporter deux, trois, voire quatre membranes pour répartir, à chaque tour, les efforts. Le fonctionnement étant sans frottement mécanique, l'étanchéité est plus facile à réaliser que pour les pompes à piston. Un fonctionnement à sec est toléré.

La vulnérabilité de ce type de pompes se situe au niveau de l'élasticité de la membrane, compromis par d'éventuels dépôts et incrustations à sa périphérie (calcaire, algues, etc.). Il va sans dire que les petits clapets de chaque chambre sont également très vulnérables à la qualité de l'eau. Ces pompes ne doivent véhiculer que de l'eau parfaitement claire. Le débit de chaque chambre est lié à la vitesse du moteur et est inférieur à 100 litres/minute.

On rencontre enfin des pompes à piston : l'arbre du moteur est muni d'une came qui repousse deux pistons horizontalement. Cette construction, plus délicate, offre cependant des avantages de solidité et de rendement.

2.2 FONCTIONNEMENT

Un moteur série a une faible résistance à l'arrêt et appelle un fort courant de démarrage. Relié directement à un générateur photovoltaïque, le point de fonctionnement courant/tension va se trouver très à gauche sur la courbe de fonctionnement d'un générateur solaire. La tension de fonctionnement sera bien inférieure à celle correspondant à la puissance maximum des modules, ne permettant pas un démarrage en charge, la tension étant trop faible. Le fonctionnement sur batterie ne pose en revanche pas de

problème puisque celle-ci impose la tension de fonctionnement.

Pour pouvoir fonctionner au fil du soleil, directement sur des modules, il est donc nécessaire d'intercaler un adaptateur d'impédance, souvent appelé "booster", qui va imposer une tension de fonctionnement au générateur. Les électroniques offrent deux possibilités : • soit la tension est fixe (avec possibilité d'ajustage manuel); • soit l'électronique recherche le point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT ou Maximum Power Point Tracking).

2.3 TYPES D'INSTALLATION

Contrairement aux pompes villageoises, les pompes domestiques peuvent être installées suivant différentes configurations : au fil du soleil ou avec batterie, et dans ce cas, avec ou sans réservoir de stockage.

La plupart des constructeurs déconseillent le fonctionnement avec batterie. Ce mode de fonctionnement est particulièrement justifié si le système est, par exemple, installé en plein champ pour l'abreuvement du bétail.

Si en revanche la pompe est installée dans une habitation comportant déjà un système photovoltaïque pour d'autres usages, il est avantageux de la faire fonctionner sur le parc de

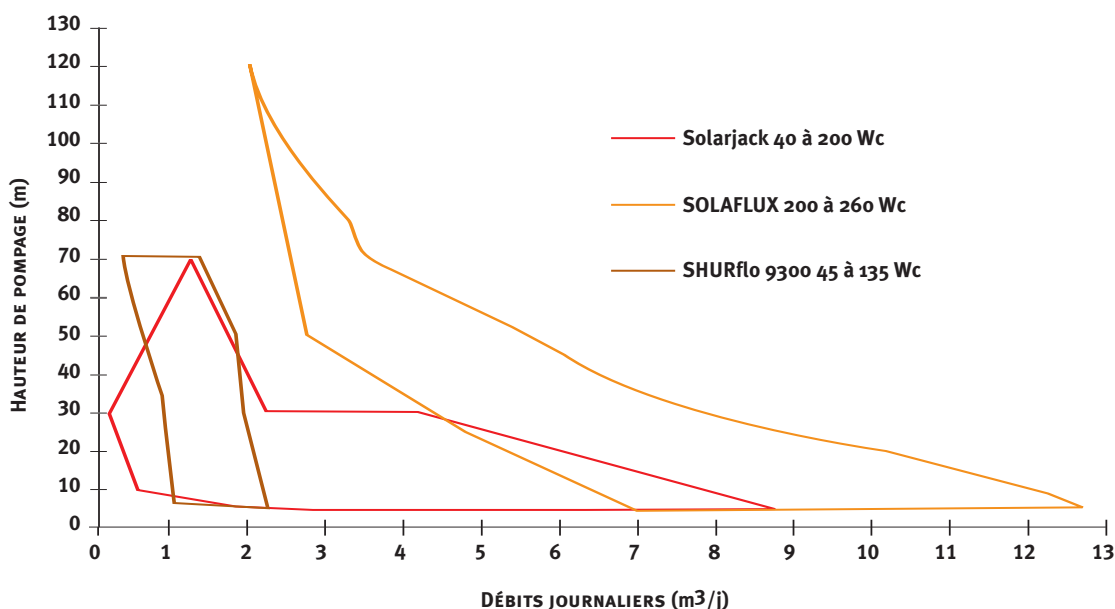
batteries du système. Ceci permet de supprimer le réservoir de stockage, organe encombrant et qui ne donne qu'une pression limitée à sa hauteur par rapport au sol. Le confort d'utilisation sera augmenté par une commande de la pompe par pressostat et un réservoir à vessie capable de fournir, en permanence, de l'eau sous pression au robinet.

2.4 PERFORMANCES

Le graphique 3 illustre, pour une sélection de trois pompes distribuées en Europe, la zone de performance débit journalier/hauteur de pompage. Une seule est de fabrication européenne la Solaflux, fabriquée par Fluxinos (Italie) ; les autres sont américaines.

- Solaflux (Fluxinos, Italie) : pompe volumétrique à deux pistons horizontaux (quatre combinaisons débit/hauteur en fonction de la hauteur de came). Moteur 48 volts, 400 W. Diamètre de forage : 4 pouces.
- Solarjack (US) : pompe volumétrique immergée à deux et quatre membranes. Moteur 12 à 30 volts. Diamètre de forage : 5 pouces.
- Sub Pump (SHURflo US) : pompe volumétrique immergée à trois membranes. Moteur 12/24 volts de 150 W à 1900 t/mn. Diamètre de forage : 4 pouces.

Graphique 3 : Pompes domestiques. Zones de performance



3 LES POMPES SOLAIRES VILLAGEOISES

3.1 ÉVOLUTION DE L'OFFRE

La société Pompes Guinard, pionnier de ce secteur, avait développé une gamme de pompes centrifuges à arbre long : le moteur alimenté par les modules photovoltaïques directement en courant continu et disposé à la surface, au-dessus du forage, transmettait son mouvement à l'hydraulique grâce à une tringlerie. Fiable, ce mécanisme n'en était pas moins complexe, d'une installation et d'un entretien délicats.

La société danoise GRUNDFOS a lancé, au début des années 1980, une nouvelle technologie : le groupe moteur-pompe est au fond du forage, le moteur est à induction, et donc alimenté en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur. La fiabilité de l'ensemble en est grandement améliorée par la suppression de la tringlerie et son remplacement par un tuyau de refoulement souple et auto-porteur. Total Énergie (France) développa peu de temps après, une gamme de pompes selon le même principe.

Depuis moins de 10 ans, de nouveaux produits sont arrivés sur le marché, même si ce dernier ne croît pas de façon significative.

Les pompes centrifuges avec onduleur à fréquence variable restent le standard avec deux tendances : • augmentation des puissances admissibles, jusqu'à près de 10 kWc • utilisation de moteurs immergés standard en remplacement de moteurs spéciaux.

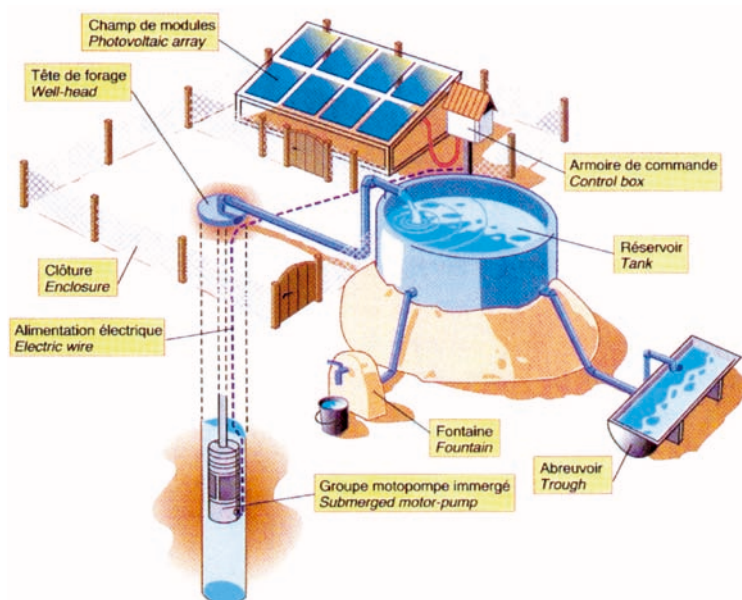
La nouveauté la plus marquante est cependant l'arrivée de systèmes de pompage volumétrique avec pas moins de 4 offres au niveau européen.

Les deux types de pompes, centrifuges et volumétriques, représentant la très grande majorité des systèmes proposés, sont présentés dans les chapitres suivants. Il est important de bien comprendre, du point de vue technique, ce qui différencie clairement ces pompes par rapport aux pompes domestiques en dehors de leurs caractéristiques de performance (débit/hauteur) et pourquoi il est important d'éviter la confusion trop souvent rencontrée.

3.2 POMPES CENTRIFUGES IMMERGÉES

C'est donc la société Grundfos qui a introduit le concept de pompe solaire immergée avec onduleur. Il a fait école et est devenu le standard actuel. L'idée de départ est simple : il faut une fiabilité aussi grande que possible compte tenu de l'éloignement des sites d'installation. La même appro-

Graphique 4 : Schéma d'installation type de pompe solaire villageoise



Source : Ademe

che avait été faite précédemment par le concepteur de la pompe Alta X, Pierre Lavit, des Pompes Guinard : une technique rustique, certes moins moderne, mais de grande fiabilité, telle que décrite précédemment. Le concept de Grundfos est simple : à une extrémité du système, les modules photovoltaïques dont la fiabilité est connue, à l'autre extrémité, une électropompe composée de deux parties principales : • une pompe centrifuge multicellulaire dont le diamètre permet son installation dans des forages étroits de diamètre normalisé, désigné en pouce (4", 6", etc.) • un moteur asynchrone à cage d'écureuil construit spécialement pour fonctionner entièrement immergé dans l'eau et aux mêmes caractéristiques dimensionnelles que la pompe.

La partie hydraulique et la partie électrique sont assemblées au niveau du corps d'aspiration (la partie inférieure de la pompe) pour former un groupe électropompe immergé. Le moteur électrique comporte une sortie de câble permettant le raccordement à l'alimentation électrique. Le groupe immergé est suspendu dans le forage par le tuyau de refoulement au niveau de la partie hydraulique. Il est toutefois doté d'un câble de retenue.

Pour un forage de 4", l'encombrement hors tout, y compris le câble électrique d'alimentation qui longe la partie hydraulique, ne doit pas excéder 96 mm. Plus le niveau de l'eau est profond, plus l'hydraulique comportera un nombre d'étages important : un étage élevant l'eau en moyenne de 4 mètres pour une pompe de 4".

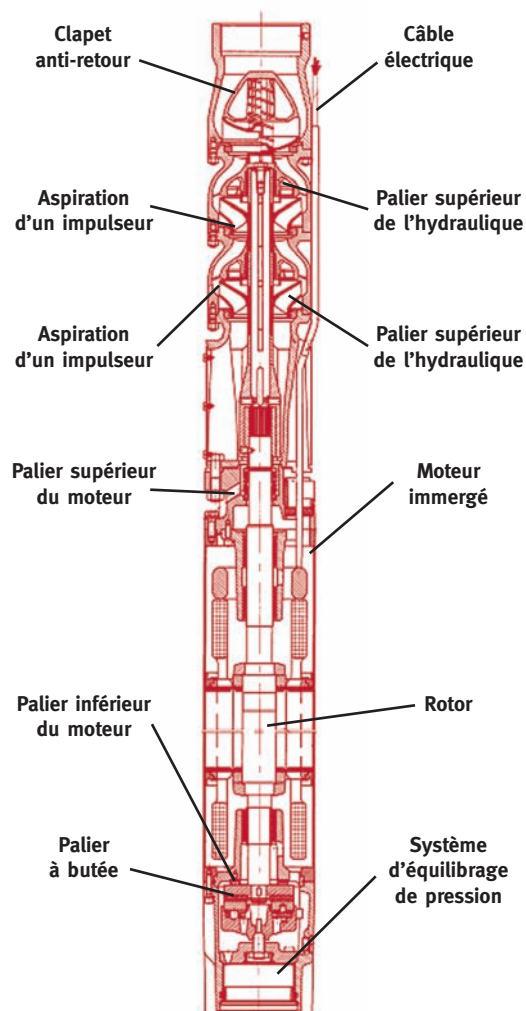
Pompe

Le choix des matériaux de construction prend en compte trois facteurs qui assurent la fiabilité du matériel :

- les problèmes de corrosion ;
- les phénomènes électrolytiques liés à la nature de l'eau ;
- les problèmes d'abrasion occasionnés par la centrifugation de particules en suspension contenues dans l'eau (limon, sable, silice).

Les matériaux composites modernes apportent des solutions largement éprouvées. L'utilisation de résines thermoplastiques moulées, chargées à 30 % environ de fibre de verre permet d'obtenir des formes et des états de surface favorisant un bon rendement. Les parties fixes ou tour-

Graphique 4 : Coupe d'une électropompe centrifuge immergée



Source : KSB

nantes sont maintenues dans une enveloppe en acier inoxydable assurant maintien et rigidité de l'ensemble. La technique "tout inox", autre école, a aussi largement fait ses preuves.

Moteur

Le moteur immergé est également un composant techniquement arrivé à maturité, depuis son lancement en 1929. Les différents fabricants mondiaux ont des détails ou des astuces de fabrication mais, là également, le schéma de base est le même : les bobinages sont réalisés avec un fil de cuivre enrobé dans une résine qui assure simultanément l'isolation électrique et l'étanchéité. Un câble immergé méplat sort du moteur, longe la partie

hydraulique puis le tuyau de refoulement pour rejoindre la surface et est raccordé au convertisseur.

L'équipage mobile : arbre, impulseurs de l'hydraulique et rotor du moteur, tourne à la base du moteur sur un palier à butée qui encaisse les efforts statiques, le poids, et dynamiques, la poussée hydraulique. L'arbre est guidé à la partie supérieure par un palier lisse protégé par un soufflet de caoutchouc.

Le moteur est entièrement rempli d'eau additionnée de glycol en usine. Ce fluide sert à la lubrification des paliers du rotor et participe à l'évacuation des calories dues à l'échauffement du rotor pendant son fonctionnement. À la base du moteur, une membrane maintient un équilibre de pression avec l'eau extérieure empêchant l'eau du forage, avec ses éventuelles matières abrasives en suspension, de pénétrer dans le moteur. L'eau ne pouvant ni rentrer ni sortir du moteur, la sortie de l'arbre n'a donc pas besoin de comporter d'étanchéité par joint tournant qui engendrerait une perte de puissance.

Onduleur

L'utilisation d'un moteur à induction requiert la transformation du courant continu, produit par les modules solaires, en courant alternatif.

En courant alternatif triphasé, la fréquence (50 Hz pour le réseau) conditionne la vitesse nominale du moteur, généralement fixée à 3 000 tours/minute. Or, les panneaux photovoltaïques délivrent un courant continu dont l'ampérage est lié à l'ensoleillement qu'ils reçoivent.

Utiliser une pompe immergée dont la fiabilité n'est pas à démontrer et dont le prix bénéficie d'une fabrication en grande série, implique donc d'utiliser un élément intermédiaire transformant le courant venant des panneaux solaires en un courant utilisable par le moteur. Il faudra, par ailleurs, que la pompe demande une puissance identique à celle développée par les panneaux constamment variable du matin au soir. Pour faire varier la puissance prise par la pompe, une seule solution : faire varier sa vitesse (son débit) et donc la fréquence du courant alternatif qui l'alimente. L'élément intermédiaire est donc un onduleur triphasé à fréquence variable. Celui-ci, en revanche, ne se trouve pas dans le commerce pour d'au-

tres applications, il fait donc l'objet de construction spécifique.

L'évolution des électroniques est liée à celle de ses composants de base. En l'occurrence il s'agit essentiellement des transistors de puissance dont les deux évolutions majeures ont permis :

- Une montée en puissance : initiée par Total Énergie et reprise par BP Solar.
- L'utilisation d'onduleurs de tension compatible avec des moteurs complètement standard développée par BP Solar.

Rendement du système

Le rendement global du système, produit des rendements de chaque composant : pompe, moteur, onduleur et générateur, qui, tous, évoluent au cours de la journée, est d'autant meilleur que la puissance du moteur et de la pompe augmente. Les valeurs indicatives moyennes sont les suivantes :

- pompe : 45 à 55 %
- moteur : 70 à 80 %
- onduleur : 93 à 97 %
- générateur : 85 à 95 %
- rendement global : 25 à 40 %.

Pour rappel, la formule simplifiée de dimensionnement d'une pompe solaire est :

$$Wc = Q \times H \times 2.725 / (E \times R)$$

Avec : **Wc** = puissance du générateur en Watt-crête ; **Q** = débit en m³/jour ; **H** = hauteur manométrique en mètre ; **E** = ensoleillement journalier en kWh/m².jour ; **R** = rendement global

Tension de fonctionnement et contraintes associées

Pour garder un bon rendement au niveau d'un onduleur de pompage, les tensions d'entrée (courant continu) et de sortie (courant triphasé) doivent être voisines. Du côté moteur immergé, il ne faut pas travailler à tension trop faible afin d'être en mesure de réaliser un bobinage compatible à la fois avec les ampères à véhiculer et avec la taille d'un moteur de 96 mm de diamètre extérieur.

Cette contrainte n'est pas sans impacts sur la définition des gammes de produits : par exemple, SA 1 500 de Grundfos et TSP 2 000 de Total Énergie (700 à 2 000 Wc). La première fonctionne avec des séries de 7 modules (110 volts en entrée) et un moteur de 70 volts, la deuxième avec des séries de 8 modules (125 volts) et un moteur de 80 volts. D'une taille de pompe à l'autre dans la

gamme, les pas sont de 7 ou 8 modules, soit 525 ou 600 Wc en prenant des modules de 75 Wc. Cela revient à dire que si l'on veut couvrir à 100 % un besoin, on risque un surdimensionnement du générateur qui peut aller jusqu'à plus de 30 %.

Il en est de même en comparant la gamme TSP 4 000/6 000 de Total Énergie avec la gamme AP de BP Solar. Pour la première, la tension entrée onduleur est de 16 modules en série, soit 256 volts en fonctionnement et un pas de 1 200 Wc, toujours pour des modules de 75 Wc. Pour la gamme BP, il faut 20 modules série soit 320 volts et un pas de 1 500 Wc.

On peut, certes, diminuer l'effet de pas en jouant sur la puissance unitaire des modules, mais le phénomène de surdimensionnement qui a une incidence sur le prix et le taux d'exploitation de la ressource doit être gardé en mémoire.

Quelques conclusions importantes s'imposent : • si les besoins de pompage d'un site ont été surévalués, le phénomène de surdimensionnement risque, compte tenu de la tension de fonctionnement, de représenter 20 à 75 % de l'investissement répondant au besoin. • Il est essentiel de vérifier que la ressource (débit du forage) est compatible avec le surcroît de débit qu'un surdimensionnement par saut de pas provoque inévitablement. • L'augmentation des puissances unitaires des modules, poussée

par le développement du marché de la connexion au réseau et la pression sur la baisse de prix du Watt-crête, augmente l'effet de pas. Dans ce contexte, la baisse apparente du prix du Watt-crête ne bénéficie pas vraiment au pompage solaire, bien au contraire, puisqu'il limite le choix des tailles de générateur en augmentant l'écart entre elles.

- L'importance portée au rendement dans le critère de choix d'une pompe solaire doit ainsi être relativisée. Le terrain montre qu'il est largement bénéfique de mettre la fiabilité en toute première ligne.

- Les courbes de baisse de prix tracées dans les laboratoires ont peu de sens lorsque l'on évoque des installations en site isolé : il vaut beaucoup mieux interroger les fabricants et leurs distributeurs dans le pays concerné que de se baser sur "des prix au kilo" qui n'ont pas de réalité hors d'un contexte précis.

Cette série de remarques est valable pour toutes les pompes solaires.

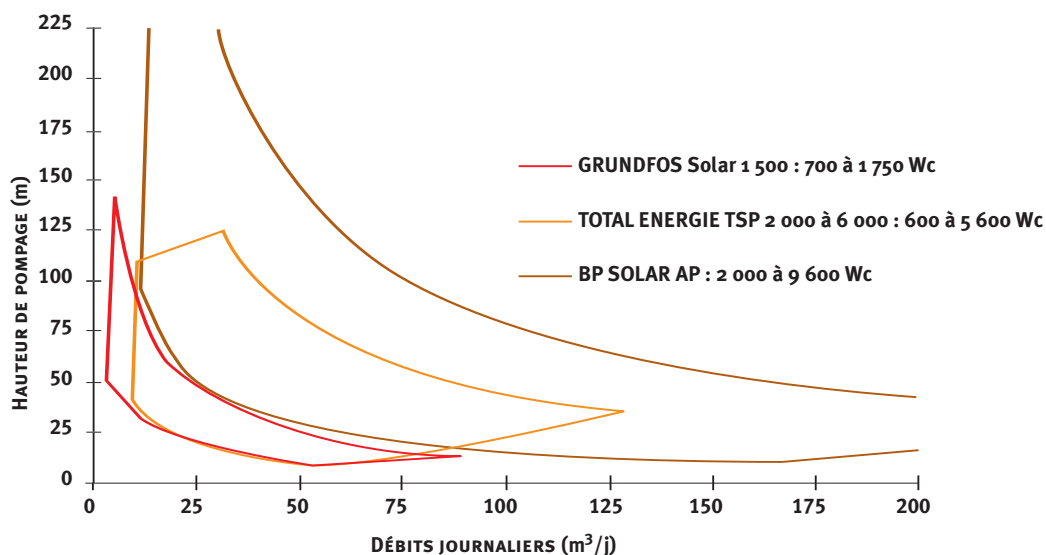
Performances des gammes proposées

Le graphique 5 illustre les performances des gammes de trois fournisseurs européens :

- Grundfos SA 1 500 • Total Énergie TSP 2 000, 4 000 et 6 000 • BP Solar série AP

Les zones de performance correspondent à

Graphique 5 : Pompes villageoises centrifuges. Plages d'utilisation



un ensoleillement de 6 kWh/m².jour, elles ont été lissées pour simplifier les graphiques.

3.3 POMPES VOLUMÉTRIQUES IMMERGÉES

Les systèmes volumétriques, de façon analogue aux pompes solaires maintenant classiques, comportent 3 éléments : un groupe électropompe immergé, une électronique de commande et un générateur photovoltaïque.

L'hydraulique

Les caractéristiques demandées par ce système de pompage, faible débit et hauteur importante, sortent du domaine de la pompe centrifuge et correspondent à celui de la pompe volumétrique. La totalité des constructeurs a choisi le type qui se prête le mieux dans ce cas : la pompe à cavité progressive, plus connue sous le nom de "pompe Mono" (voir schéma suivant).

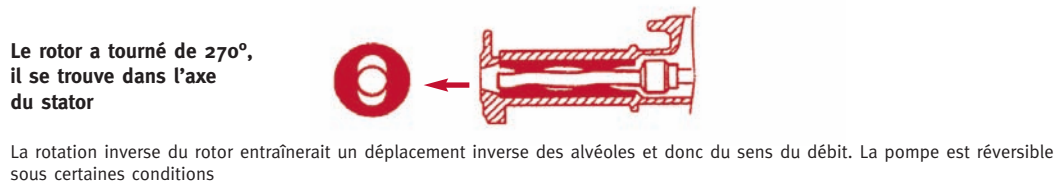
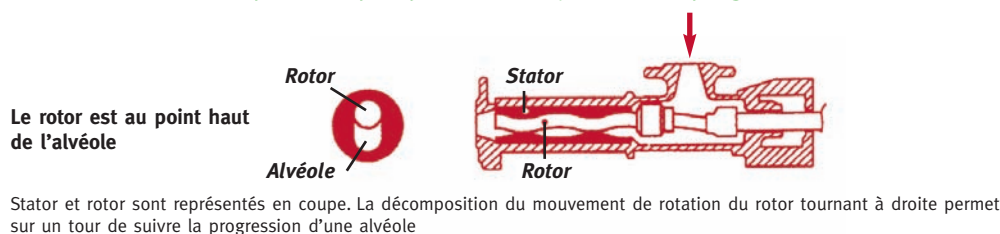
La pompe volumétrique à cavité progressive a été inventée en 1930 par René Moineau, qui

a fondé en France la société PCM. L'exploitation du brevet à l'étranger a commencé en Angleterre à partir de 1935 (Mono Pumps), puis en Australie et aux États-Unis (Mono et Monoflo). Cette pompe est maintenant fabriquée jusqu'en Chine. C'est une pompe qui, à faible vitesse, est très bien adaptée aux liquides visqueux, abrasifs ou ne supportant pas le brassage que leur ferait subir une pompe centrifuge.

C'est surtout dans les pays anglo-saxons et en Australie où elle est couramment utilisée pour le pompage d'eau sur puits ou forage et connue pour sa robustesse dans ce genre d'application. Elle a été tout d'abord montée sur arbre long et colonne, souvent avec une transmission à poulie. Une version en pompe manuelle a même été construite dans les années 1980 sans connaître un grand succès. Plus récemment, une "gamme hydraulique" a été développée pour permettre un accouplement direct avec un moteur immergé à 3 000 t/mn.

La pompe Mono se compose de deux éléments principaux : un rotor et un stator. Le rotor a une forme d'engrenage hélicoïdal ou encore de

Coupe d'une pompe volumétrique à cavité progressive



vis à larges filets arrondis souvent appelée “queue de cochon”. Le stator est un tube de forme intérieure complémentaire, mais avec deux filets dont les pas sont le double de celui du rotor. Cette géométrie particulière isole des cavités entre le rotor et le stator. Ces cavités sont repoussées, lorsque le rotor tourne, depuis l’aspiration vers le refoulement de la pompe (d’une extrémité à l’autre du stator). Quelle que soit la position du rotor, il y a toujours une zone continue de contact entre rotor et stator qui isole les extrémités aspiration et refoulement. Le débit engendré est continu, sans pulsation. Le rotor est poli et chromé dur, et le stator est en caoutchouc pour assurer un bon contact d’étanchéité et un bon coefficient de frottement en présence du fluide pompé. Le stator est tenu dans un fourreau en acier inoxydable qui assure la rigidité de l’ensemble.

La pompe Mono immergée se présente comme une pompe centrifuge immergée classique, avec le moteur électrique directement accouplé sous l’hydraulique, l’aspiration est au niveau de l’accouplement et le refoulement à la partie supérieure, le tout étant suspendu par la tuyauterie de refoulement.

Du point de vue hydraulique, le débit dépend du diamètre du rotor et, comme pour toute pompe volumétrique, il est proportionnel à la vitesse de rotation. La pression de refoulement est une source de fuites internes à travers la zone de contact entre le rotor et le stator. Ces fuites dépendent de l’ajustage plus ou moins serré entre les diamètres du rotor et du stator. Pour obtenir des pressions de refoulement plus importantes (si la puissance du moteur le permet), il faut diminuer les fuites internes. Plutôt que d’augmenter la pression de contact entre rotor et stator, on utilise un couple stator/rotor plus long de façon à disposer de plusieurs zones d’étanchéité successives (laminares successifs de la fuite) sans trop de pertes mécaniques par frottement au niveau de chacune.

Du point de vue mécanique, un rotor ne comportant qu’un filet crée un phénomène de balourd. Aussi est-il nécessaire de monter un accouplement semi élastique (cardan par exemple) entre l’hydraulique et le moteur, de façon à faire barrière aux vibrations qui seraient nuisibles au palier du moteur. Cette difficulté peut aussi être résolue en prolongeant le rotor par un arbre fin et

relativement long (Flexishaft de Mono) dont la flexibilité permet d’amortir ce phénomène, le manchon de l’arbre est de plus vissé ou collé pour éviter l’usure des crans de l’accouplement sous l’effet d’efforts excentriques résiduels.

Le rendement global de cette hydraulique dépend principalement : • au niveau hydraulique : des fuites internes à travers les zones de contact entre stator et rotor, qui augmentent avec la pression de refoulement • au niveau mécanique : de la puissance absorbée par frottement entre stator et rotor au niveau de ces zones.

Il y a donc un compromis à réaliser au niveau des caractéristiques dimensionnelles des deux pièces : un ajustement serré entre rotor et stator favorise le rendement hydraulique au dépend du rendement mécanique et inversement.

Les avantages de cette hydraulique sont :

- un rendement bien supérieur à celui d’une pompe centrifuge multicellulaire (voisin de 85 % contre moins de 50 % pour cette dernière dans cette gamme de débit)
- une grande fiabilité (une seule pièce en mouvement, pas de clapets)
- une excellente tenue à l’abrasion, par l’utilisation d’un stator en caoutchouc. Il est important de rappeler ici que l’eau chargée est la principale cause de pannes des pompes immergées.

Moteur

Une des caractéristiques de ces pompes volumétriques est le fort couple demandé au démarrage (frottements statiques) puis à la mise en vitesse comme toute pompe volumétrique. Dans la gamme de puissances mises en jeu, les moteurs immergés triphasés (similaires à ceux utilisés pour les pompes solaires avec onduleur) ont, en plus de leur faible couple, des rendements médiocres en petite puissance : ils ne conviennent donc pas pour ce type d’hydraulique.

Des constructeurs ont développé récemment des moteurs à courant continu à aimant permanent (rotor en alliage de terre rare) à commutation électronique, c’est-à-dire sans balais : l’alimentation alternée des bobinages est réalisée électroniquement et non par un contact physique. Ces moteurs sans entretien reprennent l’architecture des moteurs immergés classiques (remplis d’eau) et ont donc leur fiabilité. Ils ont, en revanche, un couple et un rendement beaucoup plus

important. La fixation entre moteur et hydraulique est identique à celle des groupes centrifuges immergés.

Électronique

L'alimentation alternée des bobinages du moteur est pilotée par une électronique qui impose une tension de fonctionnement optimale au générateur photovoltaïque (tension pré-réglée ou MPPT). La fréquence de commutation est proportionnelle à l'intensité délivrée par le générateur, pour assurer un fonctionnement au fil du soleil. L'unité électronique est conçue pour protéger également les bobinages du moteur contre toute surintensité nuisible (surcharge ou blocage du moteur). L'électronique assure aussi l'arrêt de la pompe en cas de manque d'eau dans le forage par l'intermédiaire d'une sonde.

Rendement

Le rendement global de ces pompes dépasse souvent 50 %, soit supérieur de 25 points à celui des électropompes centrifuges avec onduleur, dans la même gamme de puissance.

Performances des gammes proposées

Le graphique 7 donne un aperçu de l'offre de quatre fournisseurs européens : • Total Énergie • Grundfos • BP Solar • Bernt Lorentz AG.

Les zones de performance correspondent à un ensoleillement de 6 kWh/m².jour, elles ont été volontairement lissées pour la clarté de l'illustration.

4 PRIX DES SYSTÈMES

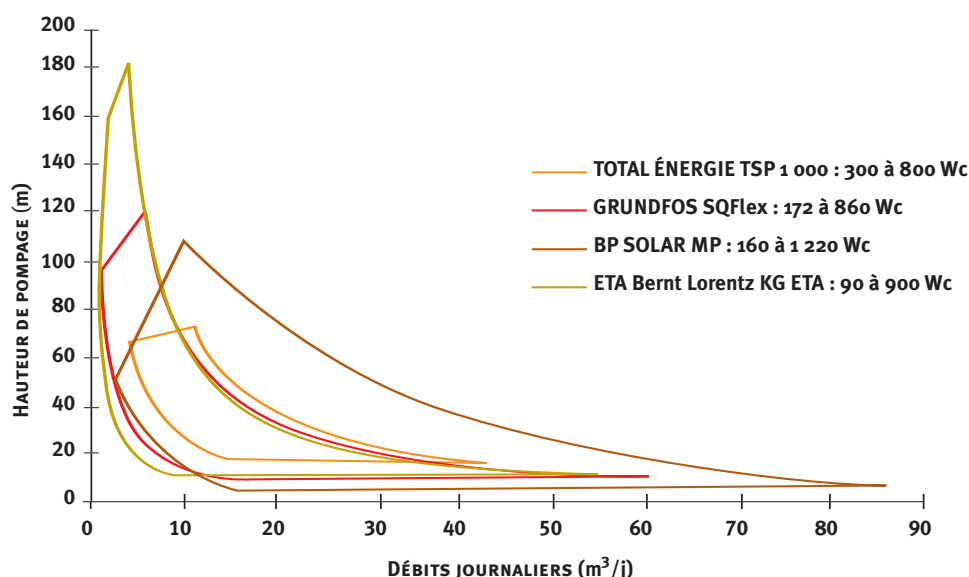
4.1 LES ÉLÉMENTS DU PRIX

Le prix d'un système de pompage peut se décomposer en trois parties : • Le prix de l'électropompe et de l'électronique associée. • Le prix du générateur photovoltaïque (modules, supports et câblage). • Enfin celui des accessoires (câble électrique de la pompe, tuyau de refoulement, etc.).

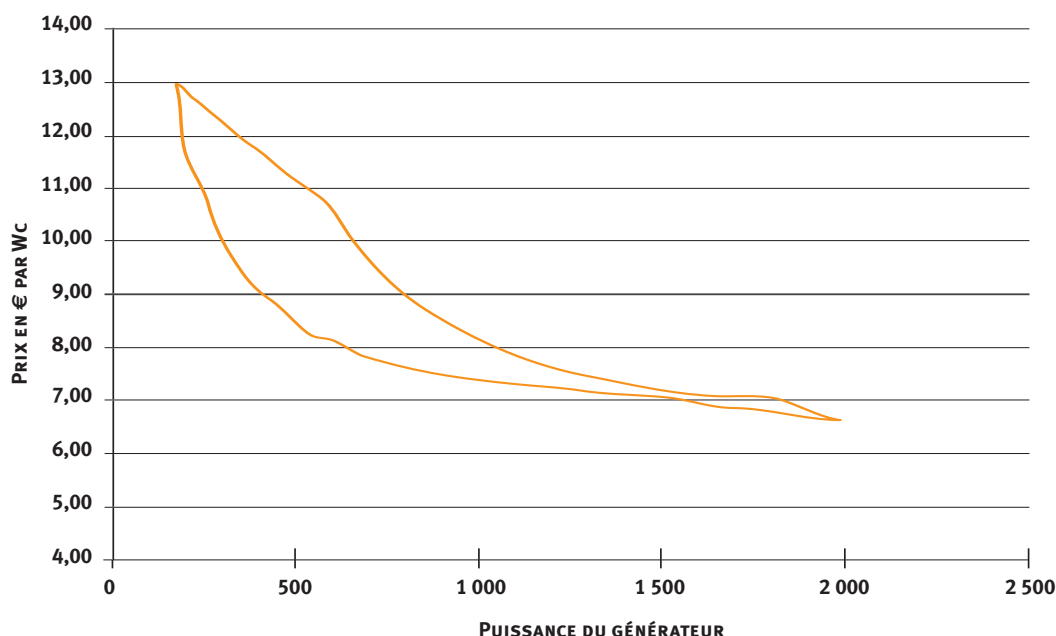
Dans une gamme de pompes, c'est la puissance du générateur qui fait varier le prix. Le type de moteur, de l'électronique et de l'hydraulique n'a que très peu d'influence sur le coût de l'ensemble.

Le pompage photovoltaïque met en jeu des générateurs photovoltaïques de tailles importantes, et son coût est donc très influencé par le prix de marché du module solaire. Courant 2004, le module photovoltaïque est vendu à environ 4,5 à 5 €/Wc auquel il faut rajouter environ 1 à 1,5 €/Wc pour le câblage et les supports des modules. Les prix indiqués ci-après ne comprennent pas les accessoires qui dépendent de

Graphique 7 : Pompes villageoises volumétriques. Plages d'utilisation.



Graphique 8 : Prix moyen au Wc pour pompes volumétriques et centrifuges de puissance inférieure à 2 000 Wc.



chaque installation particulière. Il est évident que plus la puissance du générateur est importante, plus le prix se rapprochera de celui du générateur seul (6 €/Wc, pour reprendre les chiffres précédents).

Les graphiques 8 et 9 ont été tracés à partir des tarifs actuels de fournisseurs européens. Ils illustrent l'influence de la puissance de la pompe sur les prix du Wc.

4.2 PRIX AU WATT-CRÊTE

Cette approche permet d'estimer le prix d'une pompe solaire à partir de celui du Wc considéré. À partir de la formule de dimensionnement d'une pompe donnée en paragraphe 2.2. :

$$Wc = Q \times H \times 2.725 / (E \times R)$$

et connaissant le prix moyen par Watt-crête (P/Wc) dans la gamme de puissances considérée, on obtient :

$$\text{Prix} = P/Wc \times Q \times H \times 2.725 / (E \times R)$$

À titre indicatif, le tableau suivant donne l'évolution du prix au Wc des pompes villageoises de moins de 2 000 Wc depuis l'émergence de cette technologie :

année	1975	1985	1995	2003
Prix/Wc (€)	30	15	13	7

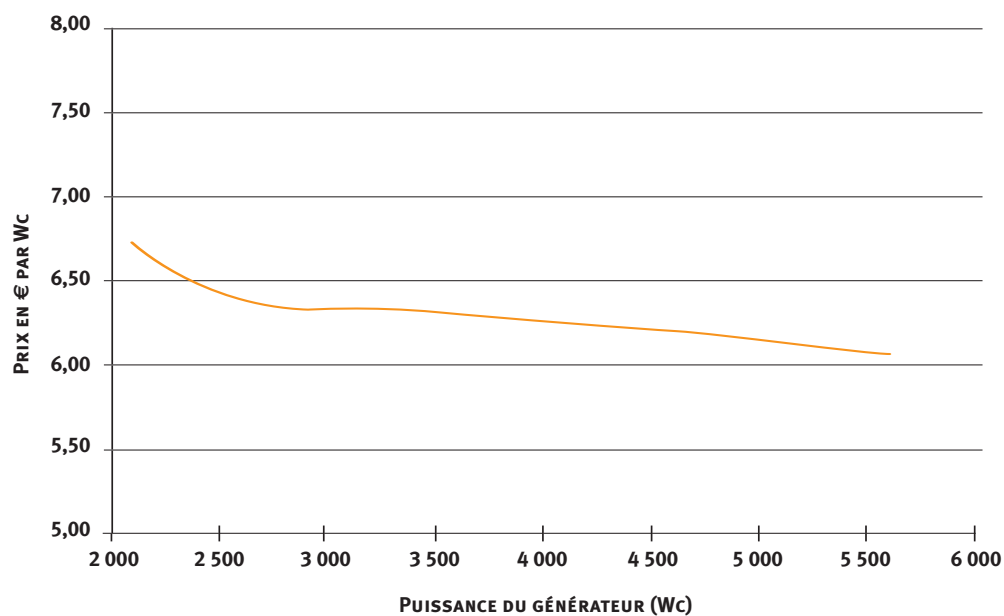
4.3 PRIX PAR M³ D'EAU POMPÉ

Le prix au Watt-crête ne tient pas compte des rendements, affectant le coût du service rendu. Aussi, il est plus juste d'exprimer le prix des systèmes en fonction de leur production journalière. Ceci donne l'occasion de faire un comparatif de rendement des systèmes de pompage par puissance et par type (graphique 10). Pour le comparatif suivant, effectué sur 8 types de pompes, ont été considérés une hauteur de pompage de 30 m et un ensoleillement de 6 kWh/m².jour.

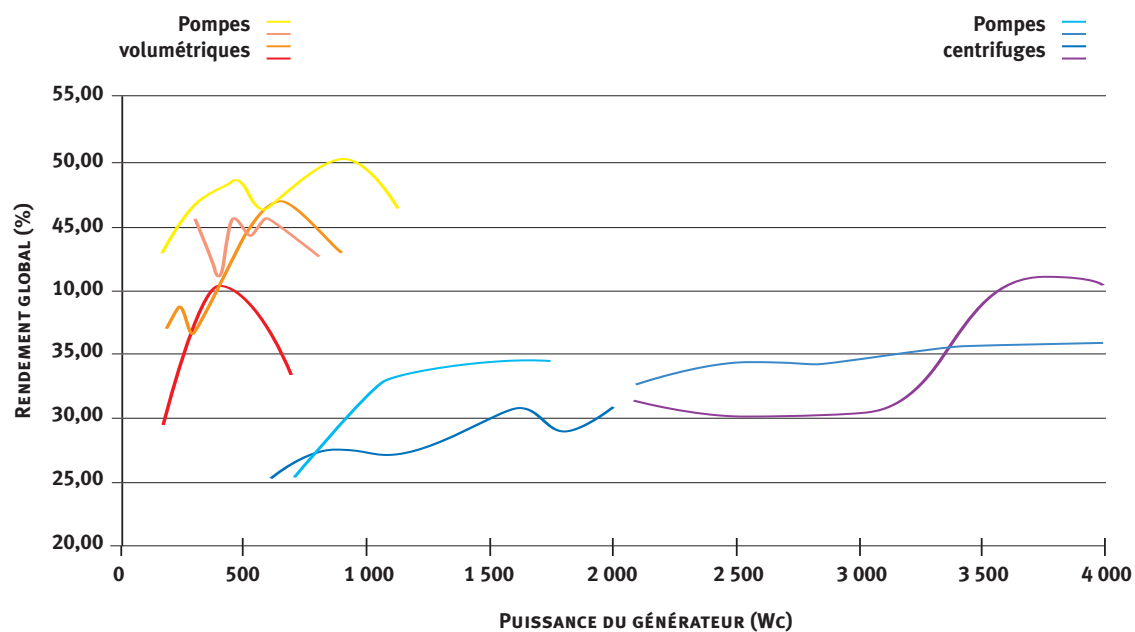
Le groupe des 4 pompes volumétriques se détache nettement dans leur zone de puissances, avec des rendements globaux entre 35 et 50 %.

Ces rendements se traduisent par une production spécifique supérieure des pompes volumétriques par rapport aux pompes centrifuges comme l'illustre le graphique 10. Ces rendements compensent largement un prix au Watt-crête supérieur des pompes volumétriques dans la

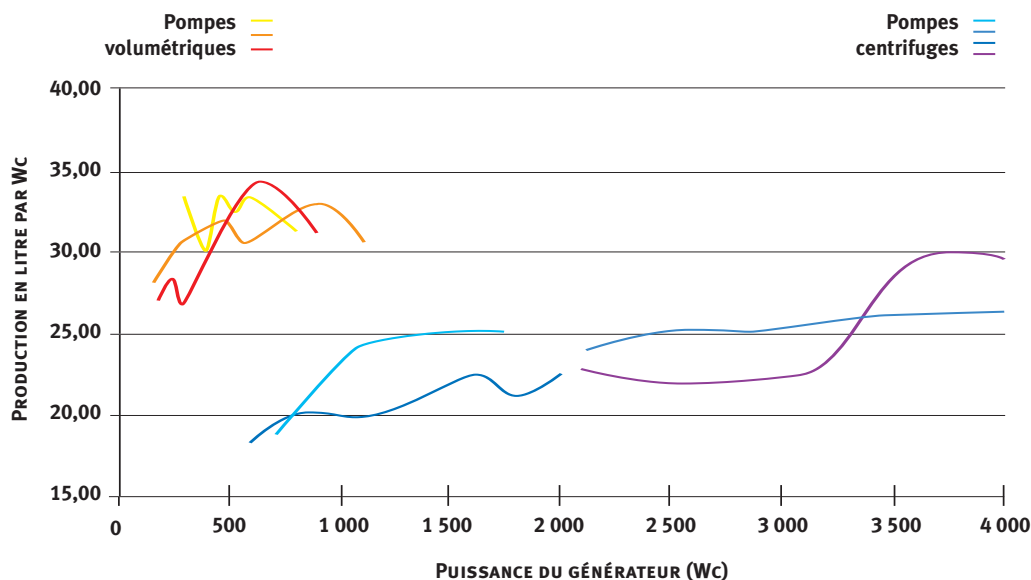
Graphique 9 : Prix moyen au Wc pour pompes centrifuges de puissance supérieure à 2 000 Wc.



Graphique 10 : Rendement global typique de plusieurs types de pompes pour une hauteur de de pompage de 30 mètres



Graphique 11 : Production journalière par Wc pour une hauteur de pompage de 30 mètres et un ensoleillement de 6kWh/m²/j



gamme de puissance de 300 à 1 000 Wc. Le graphique 11 illustre, sur ces mêmes bases, les prix par m³ pompé. Le graphique montre une zone de prix de l'eau en fonction de différentes pompes prises dans la gamme 500 à 6 000 Wc. Pour une puissance donnée, l'écart s'explique par les différences de prix et de performances annoncés par les différents fabricants. On peut remarquer que la fourchette de prix est importante dans la zone de recouvrement de deux gammes, pompes volumétriques et centrifuges. Pompe et électronique représentent alors en moyenne 35 % de l'ensemble, et les écarts de prix d'un constructeur à l'autre sont importants. Le prix de ces deux composants représente alors moins de 10 % dans la zone des fortes puissances.

Les calculs ayant conduit aux résultats présentés dans le graphique 12 ont pris en compte : • Le matériel de pompage et son renouvellement en admettant que les coûts des aménagements hydrauliques et de l'exploitation sont identiques quel que soit le moyen mécanique de pompage. • Une période de 20 ans en supposant que l'ensemble du système de pompage soit alors entièrement à remplacer (même si les modules ont en fait une durée de vie plus longue). • Les taux d'actualisation ne sont pas pris en compte comme

souvent dans ce genre d'évaluation. • Les durées de vie de l'électro-pompe et de l'électronique associées sont de 7 ans, soit 2 renouvellements (au bout de 7 et 14 ans). • L'eau est pompée à 30 mètres avec un ensoleillement de 6 kWh/m².jour. • 80 % du volume pompé est effectivement vendu (20 % de perte réseau et d'invendu).

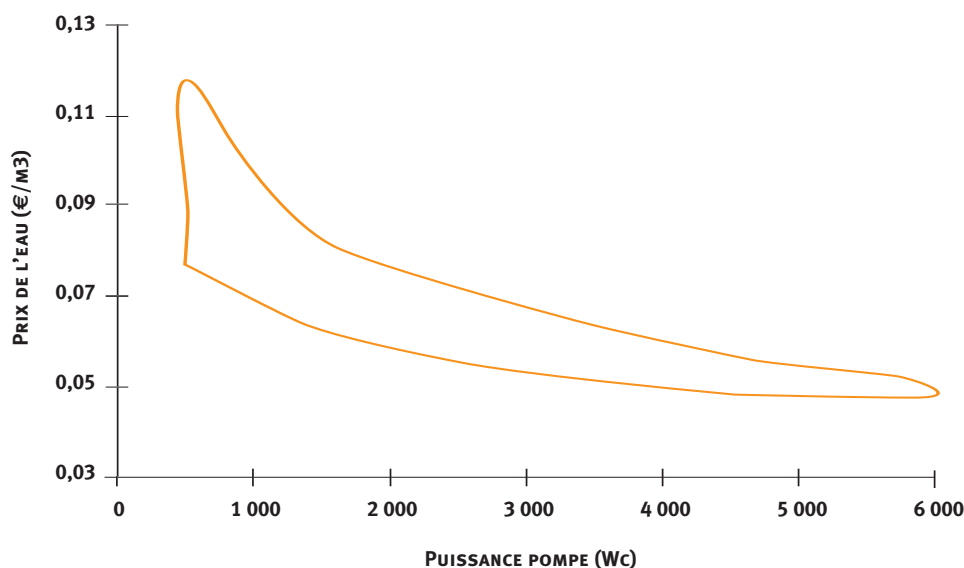
Enfin, il est utile de rappeler, que compte tenu du coût d'investissement élevé des modules solaires, il est nécessaire de privilégier le volume d'eau fourni pour réduire, autant que faire se peut, le prix de l'eau. Cette stratégie sera mise en œuvre par la conception et l'installation d'un circuit de distribution réduisant au maximum les pertes.

5 CONCLUSION

Le pompage solaire, dans l'Union européenne, représente une part peu significative du marché global du photovoltaïque, les modules solaires connectés au réseau captant aujourd'hui la quasi totalité de la production.

Si le pompage solaire ne représente pas aujourd'hui une quantité significative de modules photovoltaïques fournis, il est cependant le

Graphique 12 : Prix de l'eau en fonction de la puissance des pompes solaires



N.B. : Ces prix ne tiennent pas compte de l'amortissement des coûts des infrastructures annexes, forages, réservoirs, points d'eau et canalisations associés, similaire pour toute autre source d'énergie, ni des charges de leur gestion

support d'un marché susceptible de représenter, à terme, l'un des principaux secteurs de marché :

- il dispose d'une grande importance en qualité de service rendu ;
- il est l'amorce d'une plus large utilisation du photovoltaïque, pour des applications domestiques, sociales ou économiques ;
- alternative aux groupes moto-pompes alimentés en carburant, il est d'autant plus compétitif que le prix du combustible augmente.

Réduire le prix du litre d'eau pompé, accroître la qualité du service, ce sont autant d'atouts que se donne la technologie photovoltaïque pour aborder ce vaste marché, prometteur mais complexe et permettre un accès à l'eau aussi large que possible, même pour les populations les plus démunies.

Associant fiabilité des équipements et souci de la qualité du service, l'Europe est bien positionnée pour prendre une part importante de ce futur marché.

ANNEXE 1. RAPPEL DE NOTIONS D'HYDRAULIQUE ET DE POMPAGE

L'hydraulique étudie le comportement des fluides incompressibles (les liquides par opposition aux gaz). Un liquide peut acquérir et transmettre de l'énergie sous deux formes : par sa vitesse (énergie cinétique) et par sa pression (énergie potentielle). Dans la pratique, c'est presque toujours une combinaison des deux mais, lorsque la part de l'énergie cinétique est prépondérante dans le phénomène, on parle d'hydrodynamique et, à l'inverse, d'hydrostatique. Dans une turbine, c'est principalement la vitesse du liquide qui entre en jeu, dans un vérin au contraire, c'est la pression.

1 DÉFINITIONS ET UNITÉS

Énergie potentielle et pression

L'énergie potentielle d'un volume d'eau situé dans un château d'eau correspond à l'énergie qui a servi à élever cette eau. Si on fait redescendre cette masse d'eau, elle va retocéder l'énergie acquise. Si on ne le fait pas, elle garde ce poten-

tiel. Cette énergie est le produit du poids d'eau par sa hauteur. $E_p = Mg \times H$. Elle se mesure en termes de pression.

La pression est la force appliquée (le poids) par unité de surface, l'unité de pression la plus courante est le bar. Une colonne d'eau de 10 mètres de haut exerce une pression de pratiquement 1 bar à sa base. C'est pourquoi on associe couramment la pression à une hauteur d'eau, et on traduit énergie potentielle et pression en mètre de colonne d'eau.

Énergie cinétique

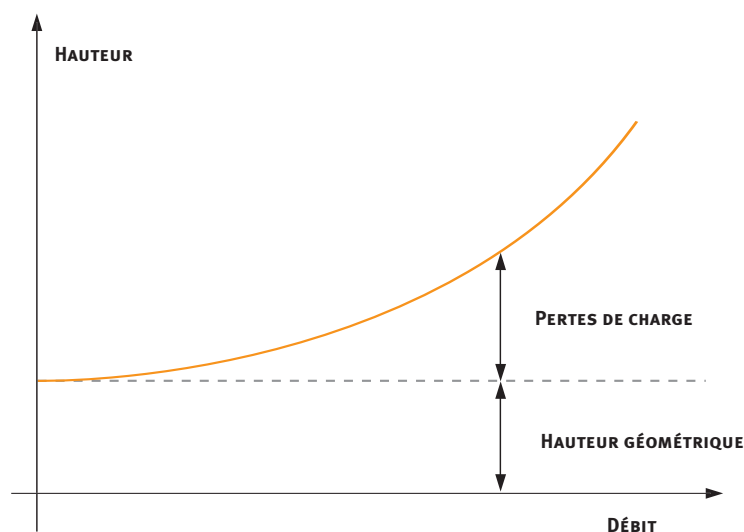
La deuxième composante de l'énergie hydraulique est le débit. Communiquer de l'énergie à un liquide ou, au contraire, la récupérer, implique un déplacement de ce liquide. Le débit est le volume de liquide déplacé par unité de temps. $Q = V/t$.

Plusieurs unités sont employées :

- en volume, le litre ou le m^3 ;
- en temps, la seconde, la minute ou l'heure.

On utilise couramment le m^3/s , le litre/mn, etc. Pour ce qui suit, on utilisera le m^3/h . Un même débit peut transiter dans une tuyauterie plus ou moins grosse : la différence sera la vitesse du liquide : plus la section de la tuyauterie est faible, plus la vitesse du liquide est importante. Un transfert de liquide implique donc la mise en jeu de plus ou moins d'énergie cinétique.

Graphique 13 : *Courbe réseau*



Graphique 14: Pompe rotative à palettes.



Énergie d'un liquide en mouvement

De ce qui précède, on voit que l'énergie d'un liquide en mouvement dans une canalisation a trois composantes : hauteur, pression et vitesse. L'énergie totale du liquide est la somme de ces trois types d'énergie : $E = E_p + p + E_c$.

Dans la pratique, les vitesses d'eau dans les canalisations sont relativement faibles, inférieures à 2,5 m/s, au-delà duquel l'écoulement serait bruyant. La part d'énergie cinétique est beaucoup plus faible que les deux autres, si bien qu'elle est généralement négligée dans les calculs.

La puissance est la faculté d'un appareil à consommer ou à produire une certaine quantité d'énergie dans un temps donné. L'unité d'énergie est le Joule, celle de la puissance est le Watt (1 Watt = 1 Joule/seconde ou 1 joule = 1 Watt x 1 seconde). Le wattheure (Watt x heure) est une unité plus courante, il vaut 3 600 joules.

Pertes de charge

Dans une tuyauterie horizontale, l'eau reste à la même hauteur et a donc une énergie potentielle constante. Si la section diminue à un endroit donné ; le débit restant le même, la vitesse de l'eau va augmenter, la part de son énergie cinétique également. Cette augmentation ne peut se faire qu'au détriment de sa pression car, dans la somme, il n'y a eu aucun apport d'énergie supplémentaire : la pression du liquide va donc diminuer.

L'inverse n'est pas complètement vrai. Le liquide a "frotté" contre la surface interne de la tuyauterie, entraînant des pertes qui augmentent rapidement avec la vitesse de l'eau (comme le carré de la vitesse). À l'endroit où la tuyauterie retrouve son diamètre initial, on constate que la pression a légèrement diminué. Comme toute

perte d'énergie, la différence a été perdue en chaleur. On appelle pertes de charge, ces pertes en frottements le long d'une tuyauterie. Pour être précis, on distingue les pertes de charge linéaires dans une conduite et les pertes de charge singulières. Elles sont fonction de :
• La vitesse de l'eau, donc du débit et du diamètre de la tuyauterie.
• La longueur de la tuyauterie.
• La rugosité interne de la tuyauterie : la rouille multiplie par 5 la rugosité, un tube plastique n'est pas loin de 100 fois moins rugueux qu'un tuyau galvanisé.
• Des singularités du réseau (coude, té, vanne).

Les pertes de charge étant des pertes de pression, elles se mesureront comme la pression, en mètre. Compte tenu du coût des modules solaires, il est nécessaire de réduire, autant que faire se peut, les valeurs de ces pertes. En pratique, elles ne doivent pas dépasser 5 % de la hauteur géométrique.

Hauteur manométrique

Quelle énergie faut-il dépenser pour élever une masse d'eau dans un réservoir ? À la fin de l'opération, on a vu plus haut que la masse d'eau aura une énergie potentielle égale à $Mg \times H$ et que la pression mesurée en bas (pression statique exprimée en mètre d'eau) sera H , la hauteur du réservoir. Mais nous avons également vu, que lors du transfert, il y a des pertes de pression dans la canalisation (les pertes de charges P_c). Il faut les compenser et donc appliquer une pression $H + P_c$ au niveau de la pompe : cette pression s'appelle hauteur manométrique, elle est exprimée en mètre de colonne d'eau.

Hauteur manométrique = hauteur géométrique + pertes de charge.

Ainsi l'énergie communiquée à l'eau est : $Mg \times (H + P_c)$.

Pour une canalisation donnée, plus l'opération est rapide (c'est-à-dire plus le débit est important) plus les pertes de charges sont importantes. La hauteur manométrique est donc fonction du débit.

Courbe réseau

On appelle réseau, la tuyauterie et les accessoires qui servent à transporter de l'eau entre deux points : par exemple d'une source d'eau à un réservoir. Un réseau a certaines caractéristiques propres : le dénivelé entre les deux extrémités et la configuration de la tuyauterie. Celle-ci entraîne, comme on l'a vu plus haut, des pertes de charge qui sont fonction du débit. Ceci peut se traduire sur un graphique (13) qui donnera la hauteur manométrique du réseau en fonction du débit. À débit nul, la hauteur manométrique sera égale à la hauteur géométrique, puis elle augmentera comme les pertes de charges.

Limite d'aspiration des pompes

Au-dessus d'une colonne d'eau de 10,33 mètres (comme au-dessus d'une colonne de mercure de 76 cm), il y a le vide (nous faisons abstraction de la pression de vapeur saturante). Ceci veut dire tout simplement, que la limite d'aspiration de l'eau est de 10,33 mètres (la pression atmosphérique mesurée en mètre d'eau). De la théorie à la pratique, nous arrivons à un chiffre que l'on peut situer autour de 7,5 mètres.

Donc, gardons en mémoire qu'il est impossible de pomper une eau qui serait à plus de 7,5 mètres en contrebas d'une pompe.

2 POMPES

Une pompe est une machine qui transforme l'énergie mécanique en énergie hydraulique. L'énergie mécanique est elle-même produite par un moteur électrique, thermique, etc. Comme une pompe ne peut se passer de moteur, on associe moteur et pompe lorsque l'on parle d'électropompe, de motopompe ou encore de pompe manuelle.

Lors du pompage d'un liquide, la pompe ne doit pas seulement fournir une pression équivalente à celle correspondant à la différence de niveaux entre l'aspiration et le refoulement (hauteur géométrique d'élévation totale), mais également la pression nécessaire pour vaincre les pertes de charge dans les conduites d'aspiration et la tuyauterie de refoulement. On peut lire sur la courbe réseau le point de fonctionnement de la pompe : le débit et la pression fournie.

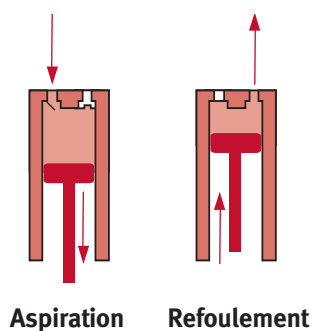
On suppose, bien sûr, que par sa construction et la puissance de son moteur, la pompe soit effectivement capable de fournir le travail (l'énergie) demandé. On peut très bien imaginer que la pompe au contraire, ne puisse pas accepter la pression imposée (qu'elle casse ou éclate sous l'effet de cette pression) ou que la puissance en jeu soit supérieure à ce que peut délivrer son moteur (donc qu'il cale). Une pompe doit avoir des caractéristiques de débit et de hauteur compatibles avec celles du réseau. Ces caractéristiques sont illustrées sur la courbe débit/hauteur de la pompe qui est fournie par le constructeur.

Pompes volumétriques

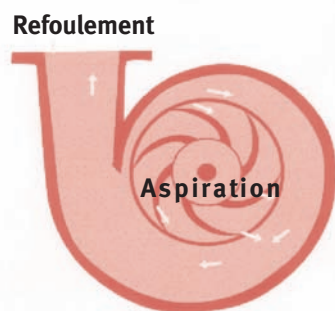
Ce sont les pompes les plus anciennes (200 avant J.-C., dit-on) et les plus connues. Elles fonctionnent en deux temps : remplissage puis vidange d'un volume de liquide, d'où leur appellation. Leur fonctionnement ne met pas en jeu la vitesse de l'eau, ce sont donc des machines hydrostatiques. La multitude des différents modes de fonctionnement les classe en deux catégories : • Les pompes alternatives. • Les pompes rotatives (graphique 14).

La plus connue des pompes alternatives est la pompe à piston (graphique 15). Elle comporte une soupape d'admission et une soupape d'échappement, le pompage se fait en deux temps : aspiration puis refoulement, et le débit se fait par à-coups.

Graphique 15 : Pompe à piston.



Graphique 15 : Pompe centrifuge.



Dans les pompes rotatives, le débit est au contraire régulier : c'est par exemple le cas des pompes à engrenages, à lobes, à palettes, etc. Cette deuxième catégorie de pompes a aussi l'avantage de ne comporter, en général, ni soupape ni clapet.

Le débit d'une pompe volumétrique est proportionnel à sa vitesse (nombre de coups par minute ou vitesse de rotation de l'axe). Pour une vitesse donnée, le débit est en théorie constant. Dans la pratique, le débit décroît avec la pression à cause des fuites internes au niveau des points d'étanchéité et, éventuellement, de la baisse de régime du moteur suite à l'augmentation de la puissance demandée.

Faire varier le débit d'une pompe volumétrique, si la vitesse du moteur est fixe, ne peut se faire qu'en détournant une partie du débit (by-pass). Arrêter le débit d'une pompe volumétrique en fermant une vanne est une manipulation dangereuse si la pompe n'est pas munie d'une soupape de sécurité.

Les pompes volumétriques permettent des pressions importantes pour des débits relativement faibles. Elles ne brassent pas le liquide et sont, de ce fait, bien adaptées aux liquides visqueux ou fragiles.

Le travail effectué commence au démarrage, dès les premiers tours de moteur : ce type de pompe nécessite donc un moteur qui a un couple de démarrage important ou, à défaut, un système qui embraye la pompe une fois le moteur lancé. Une pompe volumétrique permet en général d'aspirer l'air contenu dans la tuyauterie, on dit alors qu'elle est auto-amorçante.

Pompes centrifuges

Ce type de pompe plus récent (inventé vers 1850) est beaucoup plus répandu (graphique 15). Les

pompes centrifuges ont en effet beaucoup d'avantages par rapport aux précédentes. Leur construction est également plus simple : deux parties principales, pas de clapet. Dans ces pompes, l'énergie mécanique est tout d'abord transformée en énergie cinétique, le liquide est mis en vitesse dans un impulseur. Ce sont donc des machines hydrodynamiques. L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie potentielle (de pression) par ralentissement de la vitesse du liquide dans une volute.

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont très différentes des précédentes : • Le couple de démarrage est faible, principalement lié à l'inertie des éléments mobiles. • La pompe offre, pour une vitesse donnée, différentes possibilités de débit et de pression. • La pression a une limite maximale qui correspond à un débit nul et à une puissance absorbée minimale.

La pression que peut donner une pompe centrifuge est liée à la vitesse de rotation de son axe et au diamètre de son impulseur (qui donne la vitesse de l'eau à sa périphérie). Pour obtenir plus de pression, il suffit d'augmenter le diamètre, mais il y a le risque d'arriver à des vitesses d'eau dangereuses et une taille de pompe trop volumineuse. La limite se situe également au niveau de la tenue mécanique d'un impulseur qui, pour engendrer un petit débit, doit rester de faible épaisseur avec la fragilité qui en découle.

Retenons qu'une pompe centrifuge est mal adaptée pour de faibles débits et de grandes hauteurs contrairement à sa cousine volumétrique. Situons la limite inférieure de débit autour de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ pour fixer les idées.

Il est toutefois possible d'augmenter la pression de la pompe par un autre moyen : ajouter la pression donnée par un impulseur à un autre et ainsi de suite. On construit alors une pompe centrifuge multicellulaire dont la pression n'a théoriquement pas de limite et dont la taille (le diamètre) reste raisonnable. Signalons enfin que les pompes centrifuges ne peuvent aspirer l'air et, à moins de dispositif spécial, ne sont donc pas auto-amorçantes.

Rendement et vulnérabilité

Le rendement est le rapport entre l'énergie mécanique fournie à la pompe et l'énergie hydraulique qu'elle délivre. Les pertes d'énergie ont trois origi-

nes : les frottements mécaniques, les fuites internes (recirculation entre refoulement et aspiration) et les frottements dus à la mise en vitesse de l'eau (ou pertes de charge internes).

Dans une pompe volumétrique, il n'y a pas réellement de mise en vitesse d'eau si ce n'est aux passages étroits à travers les éventuels clapets. Une construction soignée permet assez facilement d'obtenir de très bons rendements, de l'ordre de 90 %.

La simplicité mécanique d'une pompe centrifuge permet de limiter les frottements mécaniques, une construction soignée réduit les fuites internes, en revanche c'est la transformation de vitesse en pression qui est le facteur limitant. Dans la pratique, 60 % est un chiffre très honnête pour une pompe centrifuge.

C'est l'eau qui lubrifie et refroidit les parties en frottement d'une pompe. Une pompe qui fonctionne à sec est donc rapidement mise en danger : usure voire grippage. Si le liquide véhiculé contient des matières en suspension abrasives la pompe s'use. Ceci est encore plus vrai pour une pompe centrifuge où la vitesse de l'eau augmente le phénomène d'abrasion. Le dernier ennemi de la pompe est le degré d'agressivité de l'eau (sa nature acide ou basique). Il faut en tenir compte dans le choix des matériaux qui la constituent.

Une pompe de construction soignée aura un bon rendement, en revanche elle n'acceptera que de l'eau claire. On trouve sur le marché des pompes qui acceptent des eaux chargées (pompes d'égout), mais cet avantage est compensé par des rendements qui sont de 20 % à peine, d'où un coût prohibitif d'une solution photovoltaïque.

ANNEXE 2. LISTE DE FOURNISSEURS

Cette liste de fournisseurs européens ne prétend pas être exhaustive.

BERNT LORENTZ GmbH & Co. KG

Oliver Nave
Großer Ring 9
22457 Hamburg, Germany
Tél. : +49/40/559-84025, fax: -3660
E-mail : oliver.nave@lorentz.de
www.lorentz.de

BP SOLAR

989 Corporate Blvd, Linthicum MD 21090, USA
Tél. : +1/410/981-0240, fax: -0278
E-mail : info@bpsolar.com
www.bpsolar.com

DANKOFF SOLAR PRODUCTS

Windy Dankoff
2810 Industrial Road
Santa Fe, NM 87505, USA
Tél. : +1/505/4-660059, fax: -733830
E-mail : windy@dankoffsolar.com
www.dankoffsolar.com

GRUNDFOS A/S

Erik BO Krusturup
Poul Due Jensens vej 7
8850 Bjerringbro, Denmark
Tél. : +45/87/50-4575, fax: -1468
E-mail : ebkrusturup@grundfos.com
www.grundfos.com

IBC SOLAR AG

Box 1107, 96231 Bad Staffelstein, Germany
Tél. : +49/9573/9224-0, fax: -24
E-mail : info@ibc-solar.de
www.ibc-solar.com

ISOFOTON S.A.

Julian BELLIDO
C/Montalban 9, Madrid, Spain
Tél. : +34/91/5312625, fax: +34/91/4147870
E-mail : isofoton@isofoton.com

FLUXINOS ITALIA Srl

Cristina Bartalli
Via Genova 10
58100 Grosseto, Italy
Tél. : 39/0564/4512-72, fax: -37
E-mail : info@fluxinos.it
www.fluxinos.it

MONO PUMPS Ltd.

Martin Street, Audenshaw
Manchester, M34 5JA, England
Tél. : +44 (0) 161 339 9000
E-mail : info@mono-pumps.com

SHURFLO EUROPE Ltd.

Godfrey Frost
Unit 5 Sterling Park, Gatwick Road
Crawley, West Sussex RH10 2QT, UK
Tél. : +44/1293/42-4000, fax: -1880
E-mail : sales@shurflo.co.uk
www.shurflo.com

SOLAR ENERGY SYSTEMS Ltd. (SES)

Tony Martin
3/81 Guthrie Street
Osborne Park, WA 6017, Australia
Tél. : +61/8/920415-21, fax: -19
E-mail : tmartin@sesltd.com.au
www.sesltd.com.au

TOTAL ENERGIE

12-14 Allée du Levant
69890 La Tour de Salvagny, France
Tél. : +33/478/488850, fax: -194483
www.total-energie.com

WORLDWATER Corp.

Mike Palladino
55 Route 31 South
Pennington, NJ 08534, USA
Tél. : +1/609/81807-00, fax: -20
E-mail : pump@worldwater.com
www.worldwater.com

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

Les partenaires du projet "Implementation of a photovoltaic water pumping programme in Mediterranean countries" :



Programme MEDA
Commission européenne
200, rue de la Loi
B-1049 Bruxelles
Belgique



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
27, rue Louis Vicat
75015 Paris
France
Tél. : +33 (0)1 47 65 20 00
Fax : +33 (0)1 47 65 22 29
www.ademe.fr



Universidad Politécnica de Madrid
Instituto de energía solar
E.T.S.I. Telecomunicación
Ciudad Universitaria
28040 Madrid
Espagne
Tél. : + 3401 544 10 60
Fax : + 3401 544 63 41
E-mail : rosa@ies-def.upm.es



Fondation Énergies pour le Monde
146, rue de l'Université
75007 Paris
France
Tél. : +33 (0)1 44 18 00 80
Fax : +33 (0)1 44 18 00 36
www.energies-renouvelables.org