

ADDUCTION D'EAU POTABLE AVEC POMPE PHOTOVOLTAÏQUE

Pratique et recommandations de conception et d'installation



“Adduction d’eau potable avec pompe photovoltaïque”

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

Ce document est issu de travaux préliminaires financés dans le cadre d’un contrat spécifique avec l’ADEME (Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie). La contribution financière de la Commission européenne (programme MEDA, contrat ME 8/AIDCO/2001/0132/SMAP4) et de l’ADEME a permis une mise à jour du contenu, sa traduction en langue anglaise, sa mise en page, son impression et sa diffusion bilingue auprès d’opérateurs des pays en développement.

Avec la contribution financière de :

- la Commission européenne (programme MEDA, contrat ME 8/AIDCO/2001/0132/SMAP4)
- l’Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie (ADEME)

Contractants du projet :

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

Partenaire local :

- Association Tichka

Document réalisé par Hubert Bonneviot (Consultant indépendant)

sous la direction de la Fondation Énergies pour le Monde

avec la contribution de Michel Courillon (Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie)

et d’Yves Maigne (Fondation Énergies pour le Monde).

Photos : Hubert Bonneviot, sauf mention contraire (hubert.bonneviot@wanadoo.fr)

Illustrations : Véronique Louis

ISBN : 2-913620-33-7

Adduction d’eau potable avec pompe photovoltaïque

Achevé d’imprimer : octobre 2005

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 :

Hubert Bonneviot

Instituto de energía solar



INTRODUCTION

1 CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES COMPOSANTES D'UNE AEP SOLAIRE

1.1 LA NOTION DE SYSTÈME	3	1.5 POMPE PHOTOVOLTAÏQUE	30
1.2 LA RESSOURCE EN EAU	4	1.5.1 Dimensionnement	31
1.2.1 L'eau sur terre et dans le sol	4	1.5.2 Choix de la pompe	32
1.2.2 Les caractéristiques du sous-sol	5	1.5.3 Calcul du générateur	32
1.2.3 Les systèmes aquifères	9	1.5.4 Exemple de dimensionnement	33
1.2.4 Puits et forages	10	1.6 RÉSEAU	34
1.2.5 Qualité de l'eau souterraine	19	1.7 BORNES-FONTAINES	35
1.3 ÉVALUATION DES BESOINS	21	1.7.1 Cahier des charges de la borne-fontaine	35
1.3.1 Besoins en quantité	21	1.7.2 Remplissage des récipients	36
1.3.2 Besoins en qualité de service	23	1.7.3 Comptage	39
1.4 LE RÉSERVOIR DE STOCKAGE	24	1.7.4 Génie civil	40
1.4.1 Rôle	24	1.7.5 Évacuation des eaux perdues	41
1.4.2 Volume	25	1.7.6 Constats de terrain	41
1.4.3 Hauteur et forme	25		
1.4.4 Matériaux et conception	28		
1.4.5 Raccordements	28		
1.4.6 Aménagements	29		

2 INSTALLATION DU SYSTÈME

2.1 POMPE PHOTOVOLTAÏQUE	42	2.1.2 Installation de la pompe	42
2.1.1 La tête de forage et ses aménagements	42	2.1.3 Installation du générateur photovoltaïque	45

3 MISE EN SERVICE, RÉCEPTION ET MESURES DE PERFORMANCE

46

4 EXPLOITATION ET ENTRETIEN

4.1 EXPLOITATION : RETOURS DE TERRAIN	47	4.2 ENTRETIEN	48
---------------------------------------	----	---------------	----

Bibliographie



INTRODUCTION

Une installation d'adduction en eau potable (AEP) comprend une source d'eau (un puits, mais plus souvent un forage), une pompe mécanique et des infrastructures : château d'eau et réseau de tuyauteries terminés par des bornes-fontaines publiques complétées par quelques branchements individuels.

Quand la pompe est animée par énergie solaire, le prestige porté à cette dernière fait que l'on a tendance à résumer l'ensemble de l'AEP en "pompage solaire" et faire ainsi ombre aux autres constituants du dispositif. Le danger qui en découle est que la qualité des autres infrastructures risque d'être négligée ; on a en effet tendance à se focaliser sur la seule partie pompage. Pourtant chaque élément a son importance et c'est le maillon faible qui peut compromettre le but final et entacher la réputation de l'énergie solaire qui, étant sous les projecteurs, est trop rapidement montrée du doigt en cas de contre-performance.

Cet ouvrage tente de passer en revue la totalité des éléments d'une "pompe solaire", d'expliquer les phénomènes mis en jeu dans son fonctionnement et de donner des conseils sur la conception, l'installation et l'entretien d'un système d'AEP sur la base d'expériences et d'observations de terrain. Le photovoltaïque comme les principes de bases de l'hydraulique ne font ici l'objet d'aucuns rappels, – le lecteur se rapportera donc à l'ouvrage "Technologies européennes du pompage solaire photovoltaïque" pour de plus amples détails sur ces sujets. – Dans cet ouvrage, le photovoltaïque ne sera en fait traité qu'en tant que source électrique de puissance variable dont il est impératif d'optimiser le dimensionnement et l'utilisation. Les chapitres "ressource en eau" et "forage" sont volontairement détaillés, car il a semblé impératif de connaître les phénomènes liés à l'origine du sujet : l'eau.

Photo 1

*Vue d'ensemble
d'une AEP avec
de gauche à droite :
réservoir,
borne-fontaine
et générateur solaire*



CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES COMPOSANTES D'UNE AEP SOLAIRE



1.1 LA NOTION DE SYSTÈME

Une installation de pompage photovoltaïque doit être globalement prise comme un système, tel que le conçoit le photovoltaïcien.

Un système photovoltaïque décentralisé, c'est-à-dire autonome (par opposition aux systèmes raccordés au réseau), comprend la production d'énergie, son stockage et la régulation associée.

Mais, dans la plupart des cas, il ne se borne pas à la simple production d'énergie électrique: il intègre également la distribution et les récepteurs. Ceci pour deux raisons: d'une part, les récepteurs sont rarement standards et, d'autre part, cette énergie étant chère, le photovoltaïcien inclut systématiquement une démarche d'économie d'énergie (MDE ou maîtrise de la demande en énergie).

Ainsi le stockage et la distribution (le câblage jusqu'aux récepteurs) doivent limiter les pertes et les récepteurs eux-mêmes doivent être des appareils à haut rendement, quelquefois spécifiques.

Satisfaction des besoins et maîtrise de l'énergie sont les soucis constants du photovoltaïcien.

De façon analogue, lorsqu'on aborde l'approvisionnement en eau par énergie photovoltaïque (AEP solaire), on ne peut pas se contenter de ne parler que de la pompe solaire qui n'est, en fait, qu'un élément du dispositif et ceci pour deux raisons principales:

- **En amont:** on ne peut parler de pompage en dehors d'un contexte donné: Pourquoi pompe-t-on? Où pompe-t-on? Que pompe-t-on?
- **En aval:** une énergie chère est en jeu, il s'agit d'optimiser son usage et d'éviter toute perte inutile.

Il ne faut pas, enfin, oublier le but final: "tout ça" ne sert qu'à assurer un approvisionnement de qualité en eau de manière fiable. Autant c'est au pied du mur qu'on reconnaît le bon maçon, autant c'est devant la borne-fontaine qu'on reconnaît les qualités du concepteur et de l'exploitant d'une AEP solaire.

Parler d'approvisionnement en eau par pompage solaire, c'est donc parler de:

- la source d'eau ;
- du pompage ;
- du stockage ;
- du réseau ;
- des points de distribution.

Certains documents abordent la pompe solaire, d'autres, l'approvisionnement en eau, mais en fait l'AEP solaire n'est pas la somme des deux. Il manque quelque chose au pompiste photovoltaïcien s'il ne connaît pas ce qu'est un forage, de même l'hydraulicien est rarement rodé à la maîtrise de l'énergie.

Il est, à ce propos, tout à fait révélateur de voir combien certains électriciens traditionnels ont du mal à aborder les techniques du photovoltaïque et combien plomberie et électricité font rarement bon ménage.



1.2 LA RESSOURCE EN EAU

1.2.1 L'eau sur terre et dans le sol

6 milliards d'humains se répartissent – très inégalement – 500 millions de kilomètres carrés de terres émergées. Ils se partagent aussi très inégalement l'eau douce à disposition. Il pleut 1 à 20 millimètres d'eau par an dans les zones arides, les zones humides recevant, elles, en moyenne 1 500 millimètres de pluie par an.

Tableau 1

CONTINENT	Part de ressource mondiale en eau	Part de la population mondiale
Amérique du Nord et Centrale	15 %	8 %
Amérique du Sud	26 %	6 %
Europe	8 %	13 %
Afrique	11 %	13 %
Asie	36 %	60 %
Australie et Océanie	5 %	1 %

Si l'eau occupe 70 % de la surface de la planète, la part de l'eau douce y est extrêmement faible, moins de 3 %, soit 34 millions de kilomètres cubes, dont 1/10 seulement est disponible pour l'alimentation et les activités humaines, les 9/10 restants étant "fixés" dans les glaciers et des nappes très profondes.

L'eau de l'atmosphère se renouvelle en moyenne tous les 11 jours, et l'eau des océans subit un cycle complet évaporation/précipitation tous les 3 740 ans.

Tableau 2

CROÛTE ET MANTEAU	HYDROSPHÈRE (surface de la terre)				
	EAU SALÉE	EAU DOUCE		EAU BIOLOGIQUE	
22,2 %	75,6 %	2,3 %		0,0001 %	
	97,1 %	2,9 %		0,003 %	
		Glaces	Eaux souterraines	Eaux de surface	Atmosphère
		58 %	41 %	0,3 %	0,03 %

Le cycle de l'eau

La quantité totale d'eau sur la croûte terrestre (hydrosphère) est pratiquement constante depuis un milliard d'années. Aucune eau ne s'échappe vers le haut de l'atmosphère (la vapeur d'eau est un gaz trop lourd, attiré par la gravité terrestre) et on admet qu'aucune eau ne se mélange à la lithosphère.

Le cycle de l'eau concerne l'eau douce, la part d'eau qui transite entre l'atmosphère et la terre, le moteur de ce cycle est, bien entendu, l'énergie solaire.

Tableau 3
Quelques chiffres sur le temps de renouvellement de l'eau douce sur terre

	Temps de séjour
Atmosphère	10-12 jours
Océans et mers	≈ 4 000 ans
Lacs et réservoirs	≈ 10 ans
Marais	1-10 ans
Canaux fluviaux	2 semaines
Humidité du sol	2 semaines - 1 an
Eau souterraine	2 semaines - 10 000 ans
Glaciers	10 - 10 000 ans
Eau atmosphérique	≈ 10 jours
Eau biosphérique	≈ 1 semaine

L'eau de l'atmosphère représente une très faible quantité au regard de toute la masse liquide terrestre. Répartie également sur la surface du globe, elle ne représenterait qu'une couche de 25 mm à comparer à 80 m pour l'eau des glaciers.

On peut décomposer le cycle de l'eau en quatre étapes : évaporation, précipitation, ruissellement et stockage.

L'évaporation est le phénomène de transformation de l'eau liquide en vapeur, la vaporisation directe de la glace (sans passage intermédiaire à l'état liquide) est appelée sublimation. Chaque jour quelque 1 200 km³ d'eau passent à l'état gazeux sous l'action de l'énergie solaire. Le taux d'évaporation dépend de la surface d'eau ou de glace en contact avec l'air mais aussi de la température de l'air, de son hygrométrie, de la vitesse du vent et de l'intensité du rayonnement solaire. Les végétaux participent activement à ce phénomène par l'évapotranspiration.

En s'élevant, la vapeur se condense en fines gouttelettes d'eau et en minuscules cristaux de glace. Les proportions de glace et d'eau dépendent en grande partie de l'altitude des nuages qu'ils forment et c'est une des caractéristiques qui les distinguent (cirrus, cumulonimbus, etc.).

Ces masses d'eau restent en suspension en altitude et sont déplacées par les vents. Avec un changement de température et de pression, l'équilibre peut être rompu et des masses se "précipitent" au sol sous différentes formes : pluie, neige ou grêle.

1.2.2 Les caractéristiques du sous-sol

L'eau qui arrive sur le sol (après la fonte de la neige le cas échéant) va y pénétrer en partie ou complètement si le sol s'y prête. La végétation influence positivement l'infiltration en ralentissant l'écoulement de l'eau à la surface, lui donnant ainsi plus de temps pour pénétrer dans le sol. D'autre part, le système racinaire améliore la perméabilité du sol. Enfin, le feuillage protège le sol de l'impact de la pluie et diminue, par voie de conséquence, le phénomène de battance (tassement du sol par le choc des gouttes d'eau de la pluie).

La topographie et la morphologie rentrent en jeu : la pente, par exemple, agit à l'opposé de la végétation en favorisant les écoulements aux dépens de l'infiltration. Ce qui n'arrive pas à pénétrer tout au long du trajet et n'est pas évaporé, va s'accumuler dans des dépressions naturelles (mare, lac) ou finir dans la mer.

On distingue deux grands types d'écoulements : les écoulements "rapides" et, par opposition, les écoulements souterrains qualifiés de "lents" qui représentent la part infiltrée de l'eau de pluie transitant lentement dans les nappes vers les exutoires. Les écoulements qui gagnent rapidement les exutoires pour constituer les crues se subdivisent en écoulements de surface et en écoulements de subsurface :

- L'écoulement de surface ou ruissellement est constitué par la frange d'eau qui, après une averse, s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols. L'importance de l'écoulement superficiel dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer rapidement les premiers centimètres du sol, avant que l'infiltration et la percolation, phénomènes plus lents, soient prépondérantes.
- L'écoulement de subsurface ou écoulement hypodermique a lieu sur des horizons de surface partiellement ou totalement saturés en eau ou celle des nappes perchées temporairement au-dessus des horizons argileux. Ces éléments de subsurface ont une capacité de vidange plus lente que l'écoulement superficiel, mais plus rapide que l'écoulement différé des nappes profondes.

Dans le sol, l'eau s'enfonce par gravité de façon plus ou moins rapide en fonction de la nature des terrains traversés jusqu'à ce qu'elle rencontre un obstacle, c'est-à-dire une roche imperméable. Le phénomène est un peu comparable à ce qui se passe au sol : l'eau circule et s'accumule quand elle se trouve piégée. La pente de la couche imperméable peut, dans certains cas, conduire l'eau à ressortir en surface au niveau d'une source.

Les vitesses d'écoulement dans le sol sont toujours faibles : même dans un sol très perméable, l'ordre de grandeur est 0,1 m/s. On a pu déterminer, par exemple, que l'eau de surface met environ 70 ans pour atteindre la nappe de l'eau minérale d'Évian.

Pour mieux comprendre les phénomènes liés à l'eau dans le sol, il est nécessaire de faire appel à deux caractéristiques des roches : la porosité et la perméabilité.

La porosité

La porosité d'un terrain caractérise sa faculté à emmagasiner de l'eau. L'eau peut remplir les vides qui se trouvent entre les éléments qui constituent le terrain. Les vides peuvent être liés à la nature même de la roche (situés entre les grains d'un sable par exemple) ou aux fractures et fissures d'une roche de nature compacte. On parle ainsi de porosité primaire et de porosité secondaire ou macroporosité.

La porosité se mesure par le rapport entre le volume des vides et le volume total de la roche.

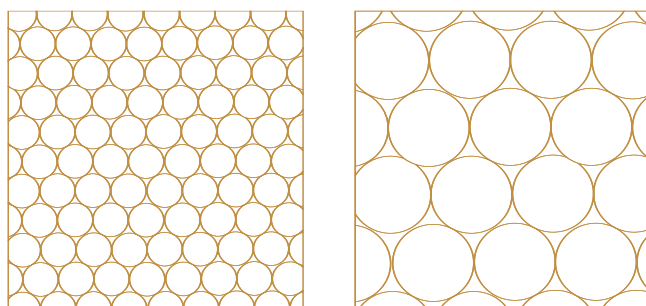
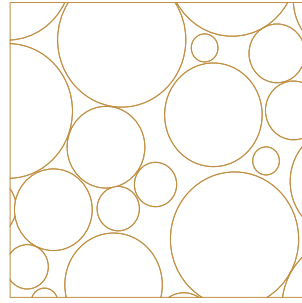


Figure 1
La porosité d'un sable ou d'un gravier est liée à l'homogénéité des grains qui le constituent et non pas à leur taille. Ainsi un volume de gravier calibré peut contenir la même quantité d'eau que le même volume de sable calibré.

La porosité diminue lorsque la granulométrie n'est pas homogène : en effet les plus petits grains se logent entre les gros grains et diminuent ainsi les espaces vides. La porosité est une caractéristique statique d'une roche qui est indépendante du mouvement éventuel de l'eau contenue dans celle-ci.

Figure 2



La porosité efficace

Si on soulève une éponge hors de l'eau, une partie de l'eau qui l'imbibe coule, il faut ensuite la presser pour extraire l'eau qui est encore retenue. L'éponge reste néanmoins humide.

On peut raisonner de manière similaire pour une roche et on va distinguer l'eau gravifique, qui peut s'extraire facilement par la simple action de la pesanteur, de l'eau de rétention qui est retenue (adsorbée) contre la surface des grains de la roche par des phénomènes physiques (forces électriques, capillarité).

- L'eau gravitaire est la fraction de l'eau souterraine soumise à la seule force de gravité. C'est elle qui circule dans un aquifère et alimente les exutoires. On peut l'extraire d'un échantillon de roche par égouttage.
- L'eau de rétention est la fraction de l'eau maintenue dans les vides et la surface des grains par des forces supérieures à celle de la gravité. Elle n'est pas mobilisable. On distingue l'eau adsorbée et l'eau pelliculaire.

L'eau adsorbée forme un mince film autour des grains, d'une épaisseur de l'ordre du dixième de micron. Les forces d'attraction moléculaire, consécutives à la polarité de la molécule d'eau, peuvent atteindre 200 000 fois celle de la gravité. Sa quantité augmente avec la finesse de la granulométrie du terrain, c'est-à-dire comme le rapport surface/volume.

L'eau pelliculaire est une couche d'environ 1 micron d'épaisseur qui tapisse les cavités délimitées par les grains. Elle est moins fortement liée.

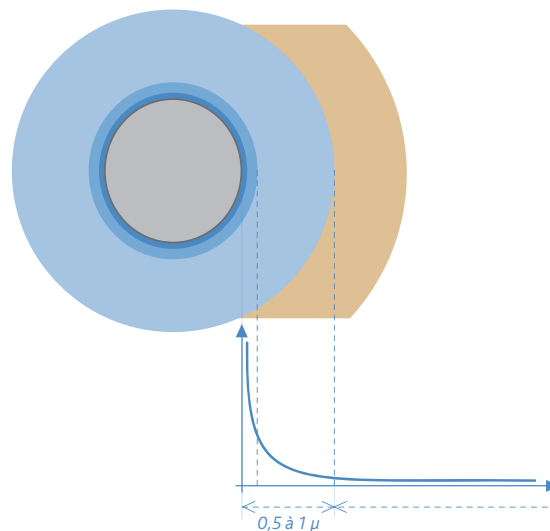


Figure 3

Le graphique ci-contre montre la force de rétention de l'eau contre une particule. En bleu foncé : l'eau adsorbée et en bleu clair, l'eau capillaire. En brun l'eau gravifique. Épaisseur 0,5 à 1μ (d'après Polubrina-Kochina 1962).

La porosité efficace est le rapport du volume d'eau gravitaire au volume total de la roche saturée en eau. La porosité efficace dépend des caractéristiques texturales de l'aquifère qui sont : le diamètre des grains, l'arrangement des grains et leur état de surface. L'arrangement des grains influe également sur la



proportion des espaces vides et donc sur la porosité. L'arrangement cubique offre 47,6 % d'espaces vides alors que l'arrangement rhomboédrique n'en offre que 25,9 %. Ces valeurs sont indépendantes de la taille des grains à condition qu'ils soient de taille homogène.

Tableau 4
Quelques exemples de porosité

Roche (non fracturée) ou sédiment	Porosité totale (l/m ³ de roche saturée)	Porosité efficace (l/m ³)
argile	400-500	10-20
calcaire	10-100	10-50
craie	100-400	10-50
granite	1-50	1-20
gravier	200-400	150-250
grès	50-250	20-150
sable fin	300-350	100-150
schiste	10-100	1-20

La perméabilité

La perméabilité mesure l'aptitude d'une roche à se laisser traverser par l'eau.

Loi de Darcy (écoulement vertical)

L'étude du déplacement de l'eau dans un milieu poreux a été conduite expérimentalement par Darcy en 1856. Pour une même charge hydraulique (même énergie potentielle), Darcy définit un coefficient de perméabilité K , mesuré en m/s , dépendant du type de milieu poreux.

Il énonce que le débit d'eau transitant dans ce milieu est proportionnel à la section totale traversée S , au coefficient de perméabilité K du milieu et à la charge hydraulique h et inversement proportionnelle à la longueur l du milieu traversé :

$$Q(m^3/s) = K(m/s) \times S(m^2) \times h/l$$

h/l est la perte de charge par unité de longueur, appelée encore gradient hydraulique. On le mesure en plaçant 2 piézomètres distants de L mètres. Le gradient i est le rapport entre la différence de niveau Dh des piézomètres et la distance L .

$$Q = K \times S \times i$$

La vitesse de filtration V est égale au rapport de la quantité d'eau passant en une seconde à travers la surface S . C'est également le produit du coefficient de perméabilité par le gradient hydraulique :

$$V(m/s) = Q/S = K \times h/l$$

Tableau 5
Quelques valeurs limites usuelles de cette vitesse

Graviers Gravillons	Seuil 1	Sables purs	Seuil 2	Sables très fins	Seuil 3	Argiles
Perméabilité très bonne	60 cm par minute	Perméabilité bonne	86 cm par jour	Perméabilité mauvaise	3 cm par an	Imperméabilité

Tableau 6
Valeurs comparatives entre porosité efficace et perméabilité telles que les a définis Darcy

TYPE DE RÉSERVOIR	POROSITÉ EFFICACE (%)	PERMÉABILITÉ K (m/s)
Graviers	25	$3 \cdot 10^{-1}$
Sables	15	$6 \cdot 10^{-4}$
Basalte fissuré	8 à 10	Très variable
Calcaires fissurés	2 à 10	Très variable
Craie	2 à 5	Très variable
Limons	2	Très variable
Granite fissuré	0,1 à 2	Très variable
Schistes	0,1 à 2	Très variable
Vase argileuse	0,1	$5 \cdot 10^{-10}$

Perméabilité et transmissivité

« La perméabilité est l'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique » (G. Castany). Elle est mesurée notamment par le coefficient de perméabilité K défini par la loi de Darcy comme le volume d'eau gravitaire traversant une unité de section perpendiculaire à l'écoulement en 1 seconde sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. En prenant comme unités le m² et le m³, K est exprimé en m/s.

Le coefficient de perméabilité dépend à la fois des caractéristiques du réservoir (granulométrie, porosité efficace) et des caractéristiques du fluide (viscosité, donc température, et masse volumique). Il varie de 10 m/s à 10⁻¹¹ m/s. Un matériau est considéré comme imperméable au-delà de 10⁻⁹ m/s.

La transmissivité caractérise la productivité d'un captage. C'est le produit du coefficient de perméabilité K par l'épaisseur de la zone saturée h.

$$T(\text{m}^2/\text{s}) = K(\text{m/s}) \times h(\text{m})$$

Sur le terrain, la transmissivité est mesurée par des pompages d'essai.

1.2.3 Les systèmes aquifères

Profil hydrique des sols

À partir de la surface du sol, on distingue généralement quatre zones :

- 1 - Une zone non saturée en surface : la zone d'évapotranspiration dont l'épaisseur et la teneur en eau sont très variables en fonction du climat, du type de terrain et de la végétation.
- 2 - Une zone de transition où la teneur en eau est voisine de la capacité de rétention.
- 3 - Une zone presque saturée (85 à 90 %) appelée aussi frange capillaire car l'ascension de l'eau de la couche plus basse se fait essentiellement par capillarité.
- 4 - La zone saturée ou nappe phréatique.

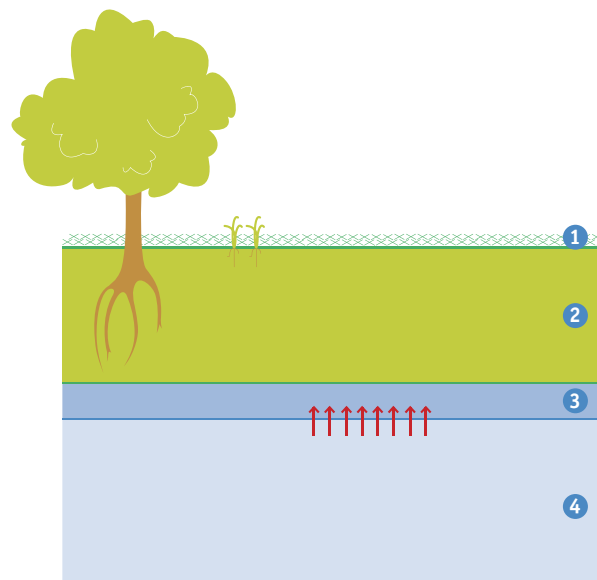


Figure 4

La nappe phréatique peut être définie comme une formation géologique saturée en eau et où l'eau peut circuler.



L'écoulement souterrain

Lorsque la zone d'aération du sol contient une humidité suffisante pour permettre la percolation profonde de l'eau, une fraction des précipitations atteint la nappe phréatique. L'importance de cet apport dépend de la structure et de la géologie du sous-sol ainsi que du volume d'eau précipité. L'eau va transiter à travers l'aquifère à une vitesse de quelques mètres par jour à quelques millimètres par an avant de rejoindre le cours d'eau. Cet écoulement, en provenance de la nappe phréatique, est appelé écoulement de base ou écoulement souterrain.

À cause des faibles vitesses de l'eau dans le sous-sol, l'écoulement de base n'intervient que pour une faible part dans l'écoulement de crue. De plus, il ne peut pas être toujours relié aux mêmes événements pluvieux que l'écoulement de surface et provient généralement des pluies antécédentes. L'écoulement de base assure en général le débit des rivières en l'absence de précipitation et soutient les débits d'étiage.

La nappe phréatique est la première nappe rencontrée lors du creusement d'un puits. C'est une nappe généralement libre, c'est-à-dire dont la surface est à la pression atmosphérique. Elle peut également être en charge (sous pression) si les terrains de couverture sont peu perméables. Elle circule, lorsqu'elle est libre, dans un aquifère comportant une zone non saturée proche du niveau du sol.

- Les aquifères à nappe libre : la base de l'aquifère, le substratum, est imperméable. La limite supérieure est hydrodynamique : la surface piézométrique peut s'élever ou s'abaisser librement dans la formation hydrogéologique perméable formant le réservoir.
- Les aquifères à nappe captive : les eaux souterraines sont emprisonnées entre deux formations imperméables fixes : le substratum et le toit. L'aquifère subit une pression, dirigée de haut en bas, due au poids de la colonne de terrain. Cette pression est équilibrée par la pression de couche à l'intérieur de l'aquifère.
- Dans les aquifères à nappe semi-captive, le toit, le substratum ou les deux sont constitués par une formation hydrogéologique semi-perméable. Celle-ci permet, dans certaines conditions, des échanges d'eau avec un aquifère superposé ou sous-jacent. On parle alors d'aquifère multicouche.

La nappe est confinée si elle est surmontée par une formation peu ou pas perméable ; l'eau est comprimée à une pression supérieure à la pression atmosphérique. À la suite d'un forage au travers du toit imperméable, l'eau remonte et peut jaillir : la nappe est alors dite artésienne.

1.2.4 Puits et forages

La recherche d'eau

Cette recherche est en principe le travail de l'hydrogéologue.

Il s'agit d'identifier la présence d'une nappe souterraine le plus près possible au-dessous du lieu d'utilisation et de stockage de l'eau. Il faut également rassembler une forte présomption sur la profondeur et la production potentielle de celle-ci. Le but est de ne pas forer au hasard, c'est-à-dire mobiliser un chantier important (hommes, machines, énergie) en pure perte financière.

Cette recherche peut se faire à plusieurs niveaux.

Le plus simple est de commencer par recueillir les informations et indices disponibles localement en effectuant une visite du site. Elle permettra de faire l'inventaire des puits et forages situés dans les alentours et de mesurer les hauteurs d'eau, d'interroger la population sur la présence d'eau en surface, sur la pérennité de l'alimentation des puits. Des observations sur la topologie et la végétation du site peuvent compléter les indices.

Interroger un puisatier ou une société locale de forage peut apporter à cette enquête des compléments utiles.

On peut ensuite consulter des services techniques officiels (ministère des Ressources en eau ou équivalent). Selon le cas, on pourra y trouver des études hydrogéologiques de la région, des photos aériennes (voire images satellites), ou même des dossiers de forage d'essai ou mis en exploitation. Beaucoup de pays, en effet, archivent systématiquement les caractéristiques des forages, qu'ils soient effectués ou non pour le compte de l'État. On peut en principe y trouver si le forage a été abandonné ou a, au contraire, été déclaré productif, et, dans ce cas, des détails sur les couches traversées et leur profondeur, le niveau de la nappe, le débit d'exploitation, le rabattement associé, les analyses d'eau, etc.

En l'absence d'historique sur l'hydrologie du site concerné, il sera nécessaire de procéder à des études et mesures géophysiques. Les différentes techniques pratiquées reprennent largement celles mises au point pour la recherche pétrolière.

Les premiers sans doute à avoir mis au point des investigations à partir de la surface du sol ont été les frères Schlumberger en 1912. Les mesures de résistivité du sol peuvent renseigner sur la présence de couches différentes par leur taux d'humidité. Les mesures sismiques utilisent la vitesse de propagation du son à travers le sol qui est différente suivant les roches traversées. D'autres méthodes électromagnétiques, électriques et gravimétriques sont également utilisées.

On peut enfin faire une investigation complète en effectuant des forages de reconnaissance. On utilisera la même machine que pour l'exécution du forage proprement dit mais avec des outils de faible diamètre. L'analyse de la nature et de la granulométrie des débris extraits complétée par des mesures de potentiel et de résistivité donnera des renseignements sur la nature du sous-sol et son hydraulicité.

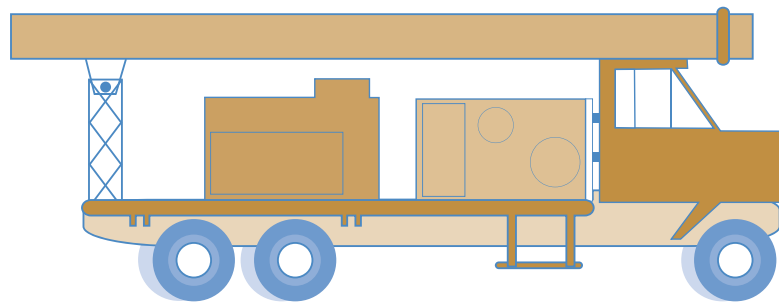


Figure 5

Construction du forage

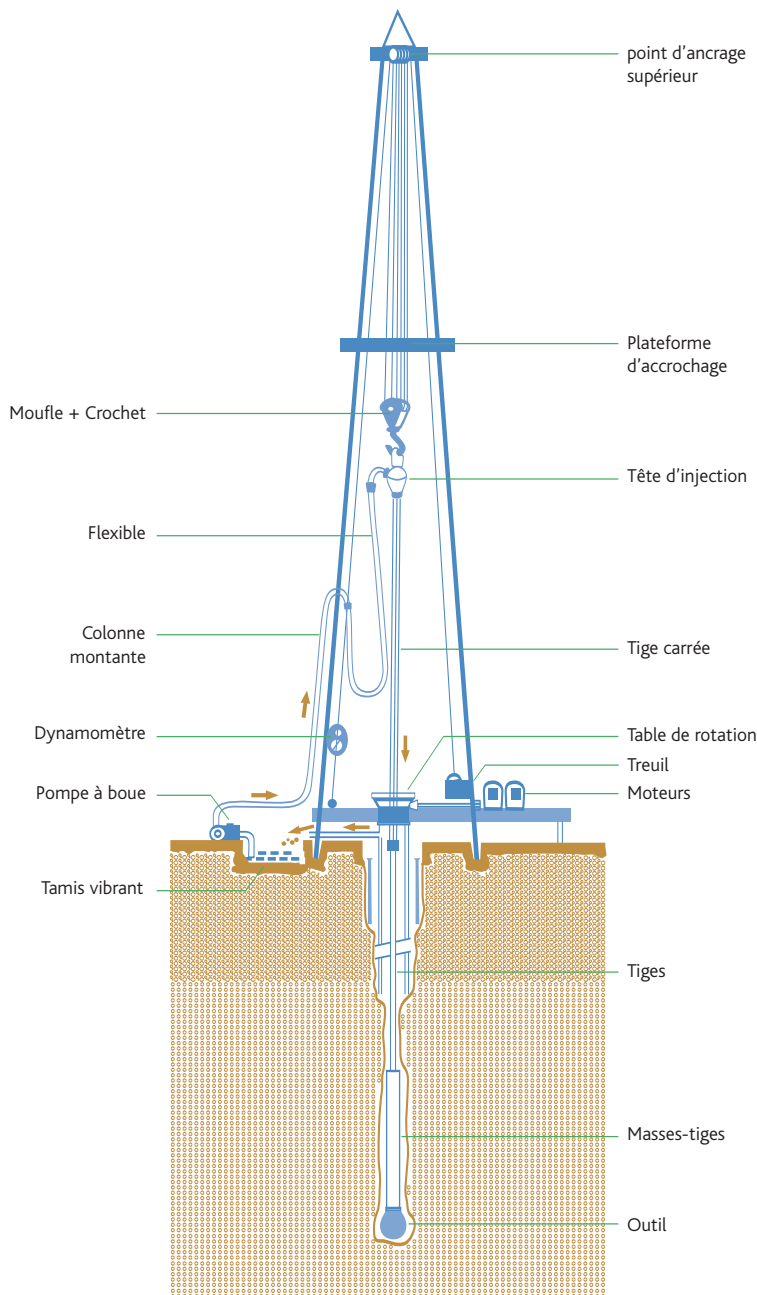
Les forages sont des puits tubés de faible diamètre creusés par un procédé mécanique à moteur (foreuse). C'est un moyen qui est plus rapide et plus économique que la construction d'un puits. Un atelier de forage peut réaliser au moins une centaine de forages dans une année. Construire le même nombre de puits avec une seule équipe de puisatiers nécessiterait plus de 10 ans. En hydraulique villageoise, les forages sont réalisés avec la méthode rotary dans les terrains tendres et celle du marteau fond de trou dans les terrains durs; ces deux méthodes sont vues plus loin.

Les diamètres habituellement utilisés en forage d'eau sont exprimés en pouces (techniques d'origine américaine). En AEP rurale, ils sont compris entre 6 et 12 pouces (165 et 300 mm) tandis que les colonnes de captages comprenant des tubages pleins et des crépines en face des zones productrices qui sont généralement d'un diamètre de 4 et 6 pouces (100 à 150 mm) d'où l'absolue nécessité d'utiliser des pompes de dimensions adaptées pour obtenir de l'eau.

Généralement montées sur des camions porteurs tout terrain, les sondeuses modernes sont conçues pour forer aussi bien au rotary qu'au marteau fond de trou. La mise en place s'effectue au moyen de puissants vérins qui redressent le mât de la machine.

Le forage rotary

Figure 6



La technique du forage rotary, issue de la recherche pétrolière, est aussi appelée forage à la boue. Un derrick supporte un train de tiges creuses au bout duquel est vissé un trépan. L'ensemble est entraîné par une table rotative. L'outil creuse la roche sous l'effet du poids au-dessus de lui et de sa rotation.

Les outils utilisés en rotation sont des trépan de différents types choisis en fonction de la dureté des terrains traversés (outils à lame, à pastille, tri-cône à molettes, outil diamanté, etc.). Au-dessus de l'outil, on place de lourdes masses-tiges pour accentuer la pression verticale et avoir une bonne rectitude de forage par effet pendulaire.

La boue de forage, que l'on fait circuler entre la surface et le fond du trou, joue un rôle essentiel pendant le creusement. Cette boue est préparée traditionnellement avec une argile très gonflante (bentonite) dont on contrôle constamment la viscosité et la densité (généralement entre 0,8 en émulsion aérée et 2 avec ajout de Baryte).

Une puissante pompe à pistons injecte cette boue à travers le train de tiges. Celle-ci ressort au centre de l'outil, le lubrifie et le refroidit. La boue remonte ensuite le long des parois du trou en entraînant avec elle les débris arrachés.

Arrivée au sol, cette boue est débarrassée de ces débris par décantation dans une fosse creusée à même le sol avant d'être injectée à nouveau dans le train de tiges par la pompe. Pendant le creusement, l'analyse des débris remontés par la boue renseigne sur la nature des couches traversées et leur granulométrie tandis que les variations de viscosité de la boue indiquent une arrivée d'eau.

Par sa densité, la boue permet aussi de contenir les arrivées d'eau intempestives (en cas de phénomène artésien par exemple).

Par sa viscosité, la boue effectue un revêtement (cake) qui consolide la paroi du trou. Ceci permet, si toutefois le terrain traversé est suffisamment compact, de ne pas être obligé de soutenir cette paroi avec un tubage provisoire qu'il faudrait descendre au fur et à mesure de l'avancement.

Pour éviter que la boue ne colmate les arrivées d'eau au niveau des zones aquifères, on peut aussi utiliser une boue synthétique autodégradable à base, par exemple, de polyacrylamides (Revert); de toute façon le nettoyage et le développement ultérieur devront l'éliminer.

Le forage au marteau de fond de trou



*Photo 2
Atelier de forage
au Rajasthan (Inde)*



La technique du forage au marteau de fond de trou a été développée plus tardivement que la précédente. Elle est particulièrement efficace pour les roches dures. Elle est surtout performante lorsqu'on est en présence d'aquifère constitué, non pas de couches sédimentaires, mais de roches de socle fracturé : en ceci, ce procédé a beaucoup contribué au développement de l'adduction rurale en Afrique.

La roche est frappée et désagrégée par un marteau pneumatique équipé de taillants. Le marteau est fixé au bout d'un train de tiges dans lequel est injecté de l'air comprimé sous haute pression (20 m³/min environ sous 15 à 20 bars) pour animer l'outil en percussion (200 à 1 000 coups/min) et en rotation. L'air refroidit l'outil et fait remonter les débris de roche jusqu'à la surface, ce qui permet de connaître immédiatement la nature des terrains traversés. Si la paroi du trou n'est pas assez stable, elle devra être maintenue par une colonne de tubes descendue au fur et à mesure du creusement. On utilise alors un outil excentrique pour avancer devant le tubage avec un diamètre supérieur à celui-ci. Lorsque le marteau fond de trou recoupe des fractures sous le niveau piézométrique, l'air comprimé, par sa force ascensionnelle, va faire remonter également l'eau. L'hydrogéologue en charge de la supervision du forage va pouvoir ainsi mesurer le débit d'eau et la conductivité de la couche. Ces données lui permettront de savoir s'il peut équiper le forage, s'il doit le poursuivre ou, au contraire, l'abandonner. Les venues d'eau se matérialisent au départ par la disparition de la poussière issue du broyage des roches, suivie aussitôt par une pulvérisation d'eau à débit croissant et avec une eau de plus en plus claire.

Sur certains ouvrages très productifs, le débit en creusement excédera de loin le débit de production ultérieur.

L'équipement du forage

Si le forage est jugé positif : débit suffisant et conductivité correcte, il est équipé d'une colonne de captage. Cette colonne est constituée d'une série de tubes vissés (ou soudés) les uns aux autres et servira à soutenir les parois du forage de façon permanente. Au niveau des zones productrices, les éléments de tubage comportent des orifices calibrés (perforations ou fentes) : ce sont les crépines. La colonne de captage peut être réalisée en différents matériaux : en acier de différentes

qualités et, de plus en plus, en PVC armé fibre de verre (tubage souvent de couleur bleue).

La préparation des tubages pleins et des crépines se fait dans l'ordre où ils seront descendus en fonction des mesures de profondeur des différentes formations rencontrées (logging). En bas de la colonne de captage, on trouvera toujours un bouchon de pied et un décanteur (portion de tubage plein de quelques dizaines de centimètres). La colonne est suspendue par son sommet, centrée dans le trou et ne repose pas sur le fond de façon à conserver une bonne verticalité par effet pendulaire.

La colonne de captage a toujours une taille largement inférieure au diamètre de creusement, par exemple 110 mm intérieur (4 pouces nominale) pour un diamètre de forage d'au moins 165 mm. Ceci permet de disposer un massif de gravier dans l'espace annulaire entre forage et colonne. Il sera surmonté d'un remblayage argileux puis d'un bouchon de ciment jusqu'au sol.

La qualité de ce travail, complété par le développement du forage (*voir plus loin*), est déterminante pour la production et la durée de vie de l'ouvrage.

Crépine de la colonne de captage

L'analyse de la granulométrie du terrain effectuée lors du creusement va servir à déterminer la taille des orifices de la crépine. On va admettre généralement que la crépine doit laisser passer 40 à 50 % des grains de l'aquifère. La surface totale des ouvertures de la crépine va, d'autre part, conditionner la vitesse d'entrée de l'eau dans le forage. Celle-ci doit être voisine de 3 cm/seconde (en deçà, les risques d'incrustation augmentent et, au-delà, corrosion ou abrasion sont à craindre). La partie inférieure de la crépine doit enfin se trouver à la base de la zone aquifère et ne correspondre qu'à 30, voire 50 % de la hauteur de celle-ci (*l'importance de ne crépiner que la partie inférieure de la zone productive est expliquée plus loin*).

Massif de gravier (Gravel pack)

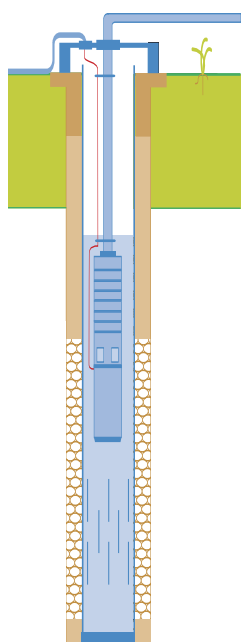
Il est constitué de gravier siliceux (non calcaire, c'est-à-dire très peu soluble) bien roulé, calibré et lavé (il peut être préparé soigneusement par le foreur, mais aussi approvisionné, comme les composants de la boue de forage, chez un fournisseur spécialisé). Sa granulométrie sera supérieure aux ouvertures de la crépine (entre 1 et 3 mm généralement). Le gravier sera disposé au niveau des crépines et les dépassera en hauteur de 5 à 6 mètres pour compenser les tassements ou effondrements ultérieurs.

Ce massif (appelé quelquefois et improprement "massif filtrant") n'est pas, à proprement parlé, obligatoire dans certains terrains compacts fracturés (macroporeux) mais tous les spécialistes s'accordent à penser qu'il reste recommandé.

Il faut noter pourquoi l'appellation de "massif filtrant" est trompeuse. Un filtre, en effet, se colmate – ce qui ne doit absolument pas se produire ici. Ce manchon de gravier, par son épaisseur, augmente ce qu'on appelle le rayon hydraulique. Il repousse la limite du terrain aquifère à une zone plus excentrée où la vitesse d'eau est, par conséquent, plus faible.

La très bonne perméabilité du massif va, en résumé, réduire considérablement les pertes de charge au voisinage immédiat de la crépine et son épaisseur va repousser les risques de migration des éléments fins (limon, sable fin) dans le forage.

Figure 7
Coupe d'un forage
avec pompe installée



En fin de construction, le tubage provisoire est enlevé et le forage est remblayé avec les débris jusqu'à environ 6 m du sol. À partir de ce niveau on procède à une cimentation du tubage jusqu'à la surface du sol de façon à maintenir la colonne suspendue et faire barrage à l'eau polluée en surface qui pourrait s'infiltrer dans la zone annulaire rendue perméable entre le trou et le tubage.

Le développement

Lors du pompage, le niveau d'eau dans le forage baisse d'une certaine hauteur appelée rabattement, le niveau au repos étant appelé niveau statique. Plus on se rapproche du forage, plus la vitesse d'eau est importante, puisqu'elle y converge. La perte de charge (et donc le gradient hydraulique) va également augmenter (Darcy), d'où la forme du cône de rabattement (*voir plus loin*).

Aux alentours de la crépine, le courant d'eau a tendance à provoquer une migration centripète des éléments du terrain aquifère en commençant par les plus fins.

Débarassée peu à peu de ces éléments, la zone de l'aquifère entourant la crépine va gagner en perméabilité (notons au passage que le massif de gravier initie le phénomène): le débit de l'ouvrage va donc augmenter à la longue (car le terrain provoque de moins en moins de perte de charge) jusqu'à ce que toutes les particules mobilisables l'aient enfin été. Ce phénomène est appelé le développement naturel du forage.

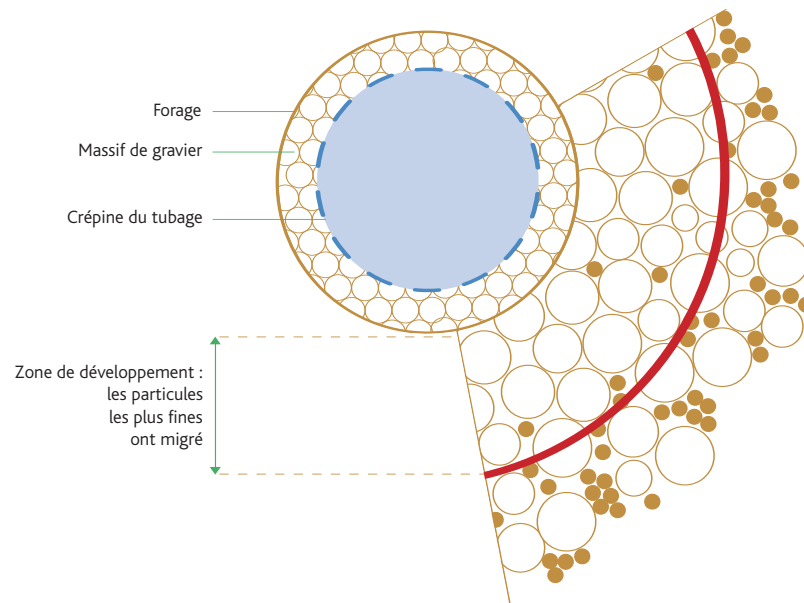


Figure 8
Coupe de la zone
du forage au niveau
de la crépine

Il n'est pourtant pas question de laisser se produire ce processus naturel car il est très lent et surtout très destructeur pour les pompes : il signifie, en effet, une arrivée continue de sable fin, bien souvent abrasif, dans l'eau du forage. Les conséquences sont une usure rapide de la pompe, voire son blocage, la destruction des compteurs, et parallèlement un colmatage progressif des tuyauteries du réseau où cette charge va se décanter.

Le développement est l'opération qui consiste à augmenter et accélérer ce processus, c'est-à-dire à faire migrer volontairement les particules les plus fines et les faire arriver dans le tubage d'où elles seront ensuite extraites, éventuellement à en refouler une partie loin dans la formation.

En éliminant les parties les plus fines, le développement va augmenter la perméabilité du sol et évitera, dans le futur, toute arrivée de sable destructeur pour la pompe.

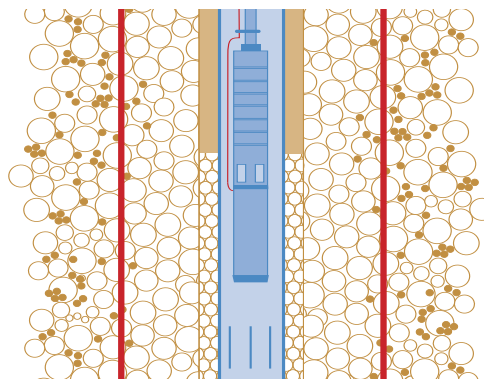


Figure 9

Plusieurs techniques sont utilisées qui consistent à provoquer de violents mouvements d'eau alternés, en particulier :

- pompages successifs à fort débit (2,5 à 3 fois le futur débit d'exploitation) ;
- pistonnage dans le tubage ;



- air comprimé (air lift) avec tubes concentriques décalés dans un sens puis l'autre pour provoquer des aspirations et des refoulements ;
- etc.

On peut également utiliser des produits chimiques en complément, acides et autres.

Essais et caractérisation

Lorsque le développement est terminé, il convient de caractériser le forage, c'est-à-dire de déterminer ses paramètres, en particulier quel débit d'exploitation il peut supporter. Ceci se fait par pompage. Plusieurs scientifiques ont étudié le débit des puits (Darcy, Thies, Dupuit, Jacob) et en ont tiré des formules relativement complexes, applicables que sous certaines conditions et associées à différents moyens d'essai non détaillées ici.

Les deux questions principales sont en fait :

- À quel débit puis-je pomper sans que la nappe ni l'ouvrage ne soient mis en danger ?
- Quel sera alors le rabattement ?

Les essais de longue durée permettront d'approcher la transmissivité de la nappe (débit qu'elle peut fournir sur toute son épaisseur et sur un mètre de largeur).

Pour déterminer les caractéristiques du forage, une des méthodes les plus simples est de procéder à des essais de pompage par paliers. On part du principe que, dans une première approximation, le rabattement est dû à deux sortes de pertes de charge.

- Celles qui se produisent dans la nappe où l'écoulement est lent et laminaire – donc proportionnel au débit (Darcy).
- Celles qui ont lieu à travers l'ouvrage (massif de gravier et crépine) où l'écoulement est (ou peut devenir) turbulent – donc proportionnel au carré du débit (voir puissances supérieures à 2 pour de grosses turbulences).

Le graphe rabattement/débit est ainsi la somme :

- de la droite $R = a + bQ$
- et de la parabole $R = cQ^2$

En première approximation, le rabattement sera donc de la forme :

$$R = a + bQ + cQ^2$$

Avec : R le rabattement, Q le débit, b et c des coefficients qui dépendent respectivement de la nappe et du forage. a est le rabattement résiduel: après pompage, le retour au niveau statique initial peut être, en effet, assez long.

Trois essais de pompage à débits différents et mesurés de façon précise permettront de dégager les valeurs de a , b et c (nous avons en effet trois équations à trois inconnues). La valeur de c détermine la qualité de l'ouvrage, des chiffres ont été proposés par B. Walton et qui distinguent :

Tableau 7

Valeur de C (m^3/s^2)	Diagnostic
$c < 675$	Bon ouvrage, développement correct
$675 < c < 1\ 350$	Ouvrage médiocre
$c > 1\ 350$	Ouvrage colmaté ou détérioré
$c > 5\ 400$	Ouvrage irrécupérable

On peut également tracer la courbe R/Q en fonction du débit (en ne tenant pas compte du rabattement résiduel), elle sera de la forme $R/Q = B + cQ$, c'est-à-dire une droite de pente c et d'origine b .

On peut facilement imaginer qu'un écoulement turbulent au niveau des crépines est néfaste à l'ouvrage : on limitera donc le débit à une valeur pour laquelle cQ^2 reste très inférieur à bQ , c'est-à-dire pour laquelle le rabattement n'augmente pas proportionnellement beaucoup plus vite que le débit. On déterminera ainsi le débit d'exploitation (maximum) de l'ouvrage.

Caractéristiques du cône de rabattement

Les caractéristiques d'un forage sont en principe données dans un document rédigé par l'entreprise. C'est un document type qui donne le descriptif de l'ouvrage et de la formation traversée.

Pendant le pompage, la surface piézométrique (partie supérieure de l'aquifère) a une forme qui s'apparente à un cône dont la pente en tous points représente le gradient hydraulique.

Il est possible de préciser la forme de cette surface vue en coupe :

Sur des coordonnées x, y , on prendra l'origine au centre du forage à la hauteur du niveau dynamique. En tous points, le gradient hydraulique est la pente de la courbe, soit dY/dL , reprenons la formule de Darcy :

$$Q = K \times S \times dY/dL$$

La surface traversée par l'eau à une distance L du centre du forage sur la hauteur Y est : $S = (2\pi \times L) Y$ (circonférence par hauteur).

On a donc : $Q = 2 \times \pi \times K \times L \times Y \times dY/dL$, c'est-à-dire $Y \times dY = Q/2\pi \times K \times dL/L$

En intégrant de 0 à L , on obtient :

$$Y^2 = Q/\pi \times K \times \log L \text{ (Courbe de Dupuit)}$$

Cette courbe est une parabole d'axe horizontal sur ordonnées logarithmiques.

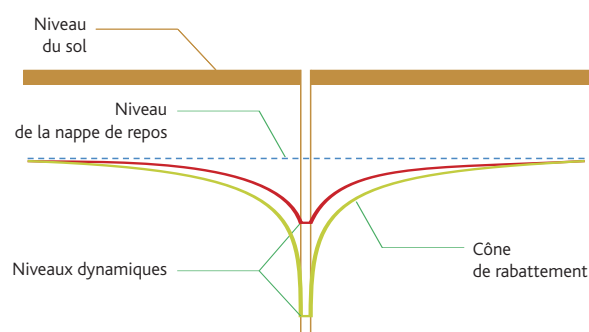


Figure 10
Vue en coupe du cône de rabattement dans la zone du forage

Vieillessement du forage

Un forage peut avoir une production stable pendant des dizaines d'années.

La baisse de productivité d'un forage peut être la conséquence de :

- une usure de la pompe : c'est un facteur qui est, certes indépendant du forage mais qui est à envisager en tout premier lieu ;
- un abaissement du niveau piézométrique de la nappe par défaut de recharge (baisse de la pluviométrie et/ou surexploitation de la nappe) ;
- les conséquences d'une mauvaise construction du forage ;
- des incrustations liées à la minéralité de l'eau (ou un colmatage dû à la rouille pour un tubage métallique).



On peut enfin assister à des venues subites de sable ou même à un effondrement de l'ouvrage.

Sans vouloir être exhaustif, on peut, à la lumière des explications précédentes, lister l'origine de certaines dégradations d'exploitation rencontrées sur site.

Une anomalie se manifeste extérieurement, soit par une baisse de débit, soit par une arrivée de matières fines dans l'eau. Cette dernière peut se percevoir par un dépôt dans le réservoir, voire un colmatage partiel du réseau (baisse de débit des robinets) avec parallèlement une usure et une opacification des compteurs.

- Si on peut mesurer une baisse du niveau statique, le niveau dynamique suit ce phénomène, ce qui peut expliquer en grande partie la diminution de production.
- Si le niveau statique n'a pas varié et que le niveau dynamique au débit considéré est identique à celui d'origine, on pourra conclure à une usure de la pompe (voire une baisse de production électrique due au générateur photovoltaïque). Celle-ci peut être normale (âge de la pompe) ou conséquente à une arrivée de sable.
- Si l'usure de la pompe ne peut être mise en cause, on doit pouvoir mesurer une baisse conséquente du niveau dynamique : le forage peut alors être, comme précédemment, mis en cause. Ceci pourra être confirmé par un essai de pompage par paliers, à la suite de quoi, on constatera une augmentation du coefficient c mesuré à l'origine.

Quelles sont les origines d'une arrivée de sable ou d'une augmentation du rabattement ?

Arrivée de sable

Il faut tout d'abord éliminer l'hypothèse d'une mauvaise installation de la pompe qui la positionnerait au droit de la crépine (voir chapitre sur l'installation de la pompe).

La cause la plus courante d'arrivée de sable est un développement insuffisant du forage. Il sera avantageux de pouvoir le confirmer et d'y remédier par un nouveau développement en effectuant, dans la mesure du possible, des pulsations alternées pour mobiliser les fines particules et casser leurs agencements en forme de voûtes qui les bloqueraient dans le massif de gravier.

Il se peut aussi que le massif de gravier, posé sur une hauteur insuffisante, soit descendu par tassement au point de ne plus protéger la partie supérieure de la crépine. Il n'y a, dans ce cas, pas vraiment de remède miracle à une flagrante mauvaise construction du forage.

Une autre cause d'arrivée de sable peut être une rupture au niveau de la crépine. La portion de tubage crépinée est en effet plus fragile qu'un tube plein et ce phénomène peut se produire suite à de fortes contraintes du terrain dans sa partie altérée. Dans le cas de crépine en acier, un phénomène similaire peut être aussi dû à la corrosion du métal. Comme plus haut, il n'y a pratiquement pas de remède à cet accident en forage étroit (4 et 6 pouces) : il faudra l'abandonner.

Augmentation du rabattement

Ceci correspond, bien entendu, à une augmentation des pertes de charge jusqu'à l'arrivée de l'eau dans le tubage. Cette modification ne peut être due qu'à un changement de structure des couches que l'eau traverse. Il est peu probable que le terrain aquifère, loin de la crépine, ne subisse d'évolution, c'est plutôt à la proximité de la crépine et au niveau de la crépine elle-même qu'il peut y avoir des modifications substantielles avec le temps. Colmatage, incrustation et corrosion sont les phénomènes mis en jeu. Qualité de l'eau, surexploitation et mauvaise construction du forage sont à l'origine des différentes dégradations de façon séparée et bien souvent combinée.

Un mauvais calibrage du massif de gravier et un mauvais choix dans les ouvertures de la crépine peu-

vent conduire à un colmatage par les éléments fins mobilisés qui vont former à la longue une gangue de moins en moins perméable.

Au niveau de la crépine elle-même, les vitesses d'eau peuvent entraîner des dégazages (gaz carbonique) qui provoquent des précipitations principalement calcaires (minéraux précédemment à l'état de carbonates solubles).

Si la crépine est en acier, certaines formes de corrosion, liées également à la vitesse de l'eau, augmentent le volume de la matière (gonflements de rouille) et obstruent partiellement les orifices.

Dans certains cas, il est possible, par un développement puissant, aidé éventuellement par produits chimiques, d'arriver à un rajeunissement du forage. L'alternative est un abandon de l'ouvrage à plus ou moins brève échéance.

1.2.5 Qualité de l'eau souterraine

Il est essentiel d'analyser l'eau produite par le forage pour connaître sa composition minérale et éventuellement sa charge biologique. Deux préoccupations doivent être présentes :

- sa potabilité ;
- sa composition minéralogique et son pH.

L'échantillonnage

L'échantillonnage est primordial car il conditionne la qualité de l'analyse. Il doit être de qualité mais également représentatif de ce que l'on veut analyser.

Les échantillons d'eau doivent être prélevés dans des récipients propres, rincés plusieurs fois avec l'eau à analyser, puis fermés hermétiquement sans laisser de bulles d'air dans le flacon.

La nature du matériau du récipient de prélèvement est importante, car celui-ci ne doit pas entrer en réaction avec l'eau à analyser.

Certains paramètres de l'eau peuvent être considérés comme stables à l'échelle de temps à laquelle on travaille, mais d'autres varient très rapidement : la température, la conductivité, le pH et les gaz dissous, enfin les nitrates et les sulfates.

Le CO₂ en solution tend d'autant plus à s'échapper que la température de l'eau est plus élevée. Un départ de CO₂ peut provoquer la précipitation de carbonate, qui à son tour modifie le pH. Les nitrates et les sulfates peuvent être réduits par l'activité bactérienne.

Un prélèvement effectué sur une eau ayant longtemps stagné n'est pas représentatif de la nappe. En effet, l'eau a subi l'influence du matériau de tubage et des éléments extérieurs (pollution, pluie...). Pour obtenir un échantillon moyen de l'horizon capté, il est nécessaire de pomper suffisamment longtemps pour renouveler l'eau contenue dans le tubage et les tuyauteries.

La température, le pH, la conductivité, l'alcalinité et l'oxygène dissous doivent être mesurés sur site. En effet, ces paramètres sont très sensibles aux conditions de milieu et susceptibles de varier dans des proportions importantes s'ils ne sont pas mesurés sur site. L'idéal est d'effectuer les mesures dans un seau placé au refoulement de la pompe. Il faut cependant garder en mémoire le fait que :

- les analyses réalisées par colorimétrie et interprétées visuellement ne sont pas très précises ;
- l'utilisation de bandelette pour la mesure du pH donne des résultats approximatifs.

La caractérisation des eaux souterraines concerne surtout l'analyse des paramètres de base (pH, température et conductivité) qui permettent de définir les caractéristiques fondamentales de l'eau. La minéralisation de la plupart des eaux est dominée par huit ions appelés couramment les ions majeurs. On distingue les cations : calcium, magnésium, sodium et potassium, et les anions : chlorure, sulfate, nitrate et bicarbonate.



Photo 3
Analyses
réalisées
par colorimétrie



Tableau 8

Ions	Situation normale / eau normale	Situation douteuse / eau polluée	Situation anormale / eau fortement polluée
SO ₄ (mg/l)	< 20	20 à 120	> 120
PO ₄ (mg/l)	< 300	300 à 500	< 500
NO ₂ - (mg/l)	< 0,01	0,01 à 0,1	> 1
NH ₄ + (mg/l)	< 0,01	0,01 à 0,1	> 1

Température

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau.

La température doit être mesurée *in situ*. Les appareils de mesure de la conductivité ou du pH possèdent généralement un thermomètre intégré.

Conductivité

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissoute dans l'eau.

La conductivité est également fonction de la température de l'eau : elle est plus importante lorsque la température augmente. Les résultats de mesure doivent donc être présentés en terme de conductivité équivalente à 20 ou 25 °C. Les appareils de mesure utilisés sur le terrain effectuent en général automatiquement cette conversion.

pH

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H⁺ de l'eau. Il traduit ainsi un degré entre acide et base sur une échelle de 0 à 14 (7 étant le pH de neutralité). Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibres physico-chimiques et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau.

Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par colorimétrie.

Tableau 9

Classification des eaux
d'après leur pH

pH < 5	Acidité forte : présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée : majorité des eaux de surface
5,5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense

Turbidité

La mesure de la turbidité permet de préciser les informations visuelles sur l'eau. La turbidité traduit la présence de particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques...). Les désagréments causés par une turbidité auprès des usagers sont relatifs car certaines populations sont habituées à consommer une eau plus ou moins trouble et n'apprécient pas les qualités d'une eau très claire. Cependant une turbidité forte peut permettre à des micro-organismes de se fixer sur des particules en suspension. La turbidité se mesure sur le terrain à l'aide d'un turbidimètre.

Autres éléments dissous

- Le fer

La présence de fer dans les eaux souterraines a de multiples origines: sous forme de pyrite, il est couramment associé aux roches sédimentaires déposées en milieu réducteur (marnes, argiles) et aux roches métamorphiques. On le trouve souvent en fortes concentrations dans les eaux des cuirasses d'altération de socle.

Présent sous forme réduite, le fer est oxydé par l'oxygène de l'air et précipite sous forme ferrique lorsque l'eau est pompée. Les alentours des points d'eau sont alors colorés en brun rouille et l'eau teinte le linge et a un goût quand elle est chauffée (thé), si bien qu'elle est délaissée par les populations.

- Le fluor

Les sources principales de fluor dans les eaux souterraines sont les roches sédimentaires (fluopatites des bassins phosphatés par exemple) mais également les roches magmatiques et certains filons. Les zones de thermalisme sont aussi concernées.

Le fluor est reconnu comme un élément essentiel pour la prévention des caries dentaires (dentifrices fluorés). Cependant, une ingestion régulière d'eau dont la concentration en fluor est supérieure à 2 mg/l (OMS) peut entraîner des problèmes de fluorose osseuse et dentaire (coloration en brun des dents pouvant évoluer jusqu'à leurs pertes). Les enfants sont particulièrement vulnérables à cette atteinte.



*Photo 4
Pompe solaire de 4 Wc*

1.3 ÉVALUATION DES BESOINS

1.3.1 Besoins en quantité

Quantité consommée

L'organisme humain a besoin d'un minimum de 2 litres d'eau par jour et il ne peut survivre que quelques jours sans eau. Au-delà du minimum nécessaire à la survie, on peut trouver tous les stades du confort.



Les tableaux suivants indiquent les consommations typiques que l'on constate en Europe pour l'habitat individuel ou collectif :

Tableau 10
Habitat individuel

Usage	Consommation
Chasse d'eau de WC	6 à 10 litres
Lavabo	5 à 10 litres
Douche	40 à 80 litres
Bain	150 à 200 litres
Lave-vaisselle	25 à 80 litres
Lave-linge	70 à 200 litres
Lavage de voiture	100 à 200 litres
Arrosage du jardin	100 à 1000 litres

Tableau 11
Habitat collectif

Usage	Consommation	Remarques
Hôpitaux	300 à 600 l/j/lit	
Écoles	80 l/j/élève	Sans douche ou piscine
Bureaux 1	10 l/j/employé	Sans cantine ni climatisation
Bureaux 2	80 l/j/employé	Avec cantine ou espace vert, sans climatisation
Bureaux 3	200 l/j/employé	Avec cantine et climatisation
Hôtels 2 étoiles	300 l/j/chambre	
Hôtels 3 étoiles	350 l/j/chambre	
Restaurant	90 l/j/table	
Cuisines collectives	15 l/couvert	
Camping	400 l/j/personne	
Buanderie	40 à 50 l/kg de linge sec	
Coiffeur	250 l/j/employé	

- un Nord-américain consomme en moyenne 700 litres d'eau par jour ;
- un Européen 200 litres ;
- un Africain urbain 30 litres ;
- un Haïtien 20 litres.

Si, pour les Européens, il est plus souvent question d'inondations que de pénurie, force est de constater qu'aujourd'hui, à l'échelle mondiale, une personne sur cinq (soit plus d'un milliard d'êtres humains !) n'a pas accès à l'eau potable. En l'espace d'un siècle, la population mondiale a triplé, alors que la consommation d'eau douce était multipliée par 6. En 2025, nous serons 8 milliards sur Terre (contre 6 aujourd'hui). À cette date, 3 milliards de personnes disposeront de moins de 1 700 litres d'eau par an, ce qui placera leurs ressources en dessous du "seuil d'alerte" fixé par l'ONU.

Quantité à prendre en compte pour une AEP

La question ici est de déterminer la quantité d'eau dont a besoin une personne en moyenne par jour dans un certain contexte lié au climat et aux habitudes. Les Sri Lankais ont, par exemple, des habitudes de consommation bien plus importantes que leurs voisins indiens.

L'eau produite par des moyens mécaniques cesse actuellement d'être gratuite pour devenir un service marchand : les gouvernements des pays du Sud ont de moins en moins la capacité de tenir à bout de bras un service public autrefois bien souvent gratuit pour le monde rural.

1.3.2 Besoins en qualité de service

Quand il y a une demande de la population pour une amélioration de ses conditions d'approvisionnement en eau potable, il ne faut pas se hâter de conclure que les sources traditionnelles ne sont pas suffisantes en quantité. Rien ne dit, d'autre part que les ménages sont disposés à mobiliser une part substantielle de leur budget pour améliorer la situation.

Cela ne veut pas dire non plus que les anciens points d'eau soient complètement abandonnés une fois le mini-réseau en place.

Ce qui nous intéresse pour dimensionner au mieux le système d'AEP, c'est d'estimer, en terme de quantité journalière, la demande solvable d'un service de meilleure qualité :

- Quel est le besoin global en eau ?
- Quel pourcentage de ce volume quotidien sera acheté ?
- Quel complément sera issu des anciennes sources gratuites ?
- À quelle évolution peut-on s'attendre dans le temps ?

Il est, par conséquent, nécessaire d'adopter une véritable démarche marketing lorsqu'on parle du service marchand de l'eau. L'étude de marché consiste alors à identifier les critères qui vont pousser le futur consommateur à délaisser une eau gratuite mais pénible à approvisionner et de qualité biologique ou minérale douteuse au profit d'un service de qualité, mais payant.

Il convient d'abord d'analyser la concurrence, c'est-à-dire de faire un bilan des sources d'approvisionnement en eau utilisées jusqu'à présent par la population concernée. Ces points d'eau seront évalués par rapport aux critères de qualité de service que veut apporter le mini-réseau tel que le perçoivent les populations rurales concernées (et non pas par rapport à des critères de citadins ou plus encore d'étrangers issus de pays industrialisés).

Le premier critère observé sur le terrain est la distance de la source d'eau. Certaines études (UNICEF) mesurent par exemple à 200 m (ou d'autres à 15 min de marche) la distance à partir de laquelle un point d'eau moderne commence à perdre son attrait. Vient ensuite le prix de l'eau, ensuite la difficulté de l'exhaure liée essentiellement à la profondeur de l'eau et enfin la qualité de l'eau.

Le prix n'est généralement pas perçu comme dissuasif par la population. Il peut cependant représenter une part importante du budget familial pour des ménages à faibles revenus : la part de la dépense affectée à l'eau, pour un ménage moyen en milieu rural au Sahel, est supérieure à 10 % des revenus (contre 0,8 % en France) et le montant affecté quotidiennement par les femmes pour l'eau peut représenter le tiers de la somme dont elles disposent pour la nourriture, le bois et l'eau.

On a souvent observé que la qualité de l'eau influence très peu la motivation des populations quant au choix d'une source d'approvisionnement. Il ne faut donc pas prendre la salubrité comme un argument de choc qui va provoquer un engouement général. En fait, le poids de ce dernier critère dépend beaucoup des notions d'hygiène et de santé que la population a pu acquérir, en particulier les femmes. La distinction peut alors se faire entre l'eau de boisson ou de cuisson et celle pour la toilette et la lessive, et ceci sans donner pour autant une quelconque exclusivité à l'eau du forage.

Dans les sites équipés de bornes-fontaines ou de postes d'eau autonomes, les améliorations souhaitées par les usagers sont principalement l'augmentation du débit aux robinets ou du nombre de robinets (afin

de diminuer l'attente). On demande également des aménagements (aires de lavage, hauteur des supports de bassine ou des robinets pour s'adapter au mode de transport de l'eau).

Il ne faut pas oublier que, au cours de l'année, deux paramètres importants évoluent : la présence saisonnière d'eau de surface (saison des pluies) qui apporte un complément gratuit à portée de main et les périodes de rentrées d'argent des ménages (récoltes). Entre autres termes, les besoins et le pouvoir d'achat évoluent et sont en déphasage au cours de l'année. Il faut donc en tenir compte dans la conception et l'exploitation de l'AEP.

Le dynamisme de la communauté, sa capacité à s'organiser, son union autour d'un chef sont autant de facteurs qui seront favorables à une modification des habitudes et à une adhésion de la population à accepter de nouvelles règles du jeu.

Quel chiffre faut-il retenir dans la pratique ? Il sera bien sûr issu de la conclusion des enquêtes auprès des populations concernées. Les réalités de terrain doivent primer lorsqu'il s'agit parallèlement de faire le business plan de l'exploitation de l'AEP afin de dégager les hypothèses réalistes qui assureront la pérennité des installations. On s'aperçoit que les résultats de terrain sont inférieurs aux standards des institutions reconnues (20, voire 30 litres en Inde) mais ces chiffres sont des souhaits rarement atteints.

Au Sahel, le chiffre à retenir pour la part d'eau achetée à la borne-fontaine est proche de 10 litres par habitant et par jour, 15 litres étant rarement atteints.

*Photo 5
Borne-fontaine
au Niger
(remarquez
le support bassine
improvisé)*



1.4 LE RÉSERVOIR DE STOCKAGE

1.4.1 Rôle

Dans un système mécanique d'approvisionnement en eau avec réseau, le réservoir de stockage a deux fonctions principales :

- il doit permettre, par sa hauteur, l'alimentation par gravité des points d'eau à tout moment de la journée selon la demande et avec le débit nécessaire, que la pompe soit ou non en fonctionnement ;
- le réservoir doit pouvoir, d'autre part, faire le tampon entre les périodes de pompage et les périodes de soutirage de l'eau. Ces périodes et débits ne sont pas *a priori* en phase: le pompage solaire a lieu au milieu de la journée avec une pointe à midi alors que le puisage a lieu de façon discontinue selon les coutumes, et quelquefois les saisons (travaux des champs), et bien souvent le matin et le soir.



Photo 6
*Au Burkina Faso,
 une hauteur
 de réservoir
 ici bien trop excessive*

1.4.2 Volume

Il y a quelques années, on s'est penché sur le calcul du stockage nécessaire en pompage solaire en essayant de modéliser le phénomène. Le calcul théorique reste souvent inexploitable car les phénomènes qui entrent en jeu sont liés à la météorologie et il n'est pas possible de paramétrer la faculté d'adaptation des usagers. C'est le volume du stockage qui permet la compatibilité entre les régimes de pompage et de puisage.

Une capacité de stockage insuffisante entraînera une perte d'eau. Il arrivera en effet à certaines périodes de la journée que le réservoir soit plein, en général autour de midi où la pompe débite le plus. Une partie de l'eau sera alors perdue soit par écoulement du trop-plein soit par arrêt de la pompe si le système inclut cette fonction. Dans un village du Burkina où le réservoir a une capacité correspondant au tiers seulement de la production, le chef du village bat le rappel avant 11 heures du matin pour que les femmes fassent le plein, ayant lui-même compris le phénomène.

Cette perte d'eau correspond à un déficit (et manque à gagner) dans la journée. Le phénomène tampon que doit jouer le réservoir est particulièrement important en saison humide. Si globalement la demande solvable est moins forte à cause de la concurrence des eaux de surface, la production moyenne est également plus faible du fait de la diminution de l'ensoleillement moyen. Ceci peut se traduire dans la pratique par de gros écarts de production d'un jour à l'autre. Ce décalage entre la production et la consommation pourra, dans une certaine mesure, être atténué par l'effet tampon constitué par la capacité du réservoir.

Un volume de stockage correspondant à la production journalière est en général suffisant. Les réservoirs métalliques ou préfabriqués ont souvent des tailles standard: on peut, à ce moment, admettre un volume situé entre 80 et 120 % de la production des mois les plus favorables.

1.4.3 Hauteur et forme

La hauteur du radier (le fond du réservoir), va déterminer la charge minimum donnée au réseau. La charge statique minimum de chaque robinet correspondra à la différence de niveau entre le radier et le robinet en question.

La hauteur de la cuve, liée au volume et à la forme du réservoir, va donner non seulement une charge supplémentaire aux robinets mais aussi déterminer la HMT de la pompe (la part liée à la hauteur de la tuyauterie de remplissage par rapport au sol) si le remplissage s'effectue à la partie supérieure (*voir plus loin*).

Du côté distribution, plus cette hauteur est importante, meilleur sera le débit aux robinets, le réseau pourra également accepter plus de perte de charge (utilisation d'une tuyauterie plus petite en diamètre).

Il est facile de faire des mesures de la pression statique (charge) appliquée sur un robinet :
 Il suffit de se procurer un manomètre précis (classe 1) d'échelle 0-1 ou à défaut 1,5 bar, de le visser sur un réducteur de 1,5 pouce terminé par une douille de même diamètre. On enfoncera dans la douille un bouchon caoutchouc percé (utilisé par exemple en chimie). En appliquant fermement le bouchon contre l'orifice du robinet, puis en ouvrant celui-ci, on lira sur le manomètre la différence de hauteur entre le robinet et le niveau d'eau dans le réservoir.

Du côté production, une hauteur excessive de réservoir pénalise la Hauteur Manométrique Totale (HMT) et donc le débit de la pompe. Pour une HMT de 20 mètres, une hauteur de réservoir supplémentaire de 5 mètres handicape, par exemple, le débit journalier de 20 %.

La hauteur de remplissage dépend de trois paramètres :

- la hauteur du radier (hauteur du support du réservoir) ;
- le volume du réservoir et sa forme (rapport surface de base/hauteur) ;
- le mode de remplissage (*voir plus loin*).

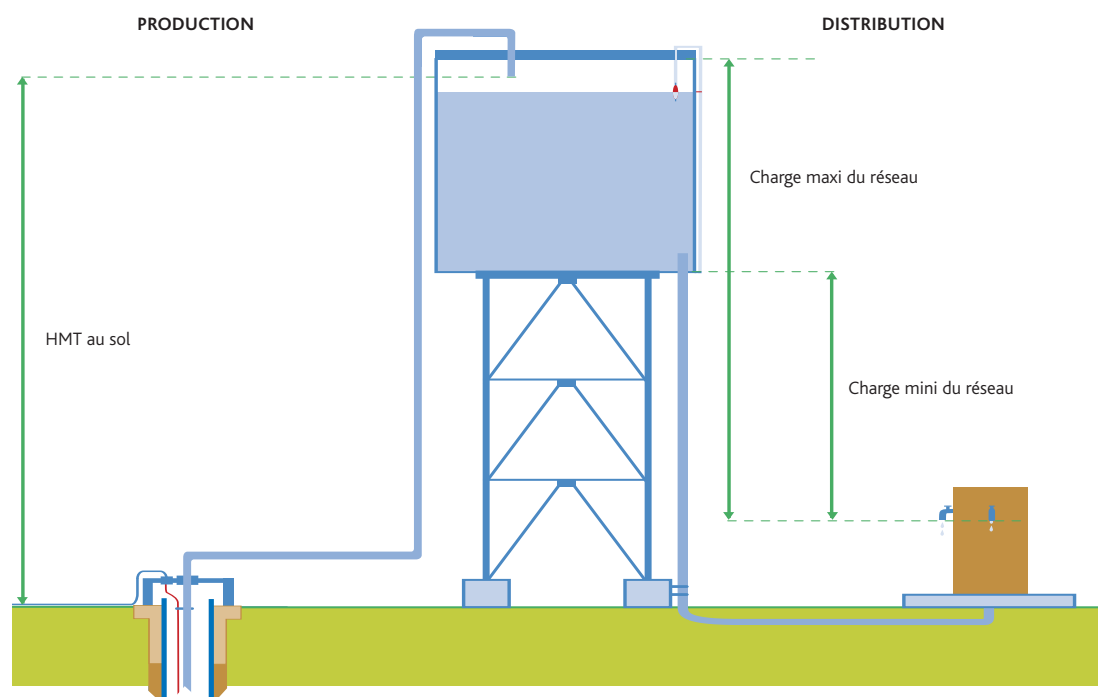
De gauche à droite :
Photo 7
 Mesure de pression
 statique au robinet



Photo 8
 Manomètre équipé
 pour mesurer
 la pression statique



Figure 11
 Une grande hauteur
 de réservoir pénalise
 la production
 mais favorise
 la distribution
 de l'eau



En terrain plat et pour des distances réservoir – borne-fontaine de l'ordre de 500 mètres, une hauteur de radier de 5 mètres est généralement suffisante (voir chapitres "réseau" et "bornes-fontaines").

Si on peut avoir le choix dans la forme (cas des réservoirs en béton), on aura intérêt à avoir une large surface au sol pour, à volume égal, limiter la hauteur maximale du réservoir. Le génie civil peut s'en trouver plus onéreux, mais il ne faut pas oublier que les économies d'énergie passent très souvent par un certain surcoût d'investissement. S'il s'agit par exemple de cuve standard en acier (de diamètre correspondant souvent au gabarit routier – 2,50 mètres), au-delà de 12 m³, on gagnera à installer la cuve horizontalement plutôt que verticalement car sa longueur devient alors plus grande que son diamètre.



*Photos 9, 10, 11 et 12
Différents types
de formes et de tailles
de hauteur de réservoir*

Décanteur

Une autre considération intervient qui peut avoir son importance : c'est la capacité du réservoir à jouer un rôle de décanteur. Si le forage laisse passer des matières en suspension (sable fin, limon) – et le terrain montre que ce n'est pas si rare – il est important de les arrêter en les laissant se décanter au niveau du réservoir.

Pouvoir décanter les matières en suspension ne devrait normalement pas être parmi les rôles du réservoir, mais il n'est pas question de mettre un filtre, qu'il faudrait laver, ni d'intercaler un dispositif spécial de décantation. Un tel dispositif n'est possible à installer que pour des réseaux alimentés par un captage de source. Aménager le réservoir pour qu'il puisse, le cas échéant, assurer cette fonction paraît la solution la plus raisonnable.

La plupart des constructeurs de pompes immergées admettent une quantité de 40 g/m³ de matière solide dans l'eau. À raison de 20 m³/jour d'eau pompée, ceci fait 290 kg de dépôts par an ! Une partie va rester en suspension et va être évacuée dans l'eau des robinets, mais une autre partie va se déposer dans les canalisations du réseau et les obstruer partiellement.

Rappelons que la décantation dans une canalisation se produit pour des vitesses d'eau inférieures à 0,7 m/s : ce qui est facilement atteint lorsque, par exemple, un seul robinet est ouvert.

La capacité de décantation d'un réservoir est en partie liée à la hauteur d'eau dans celui-ci : plus cette hauteur est faible, plus les particules atteindront rapidement le fond pour s'y déposer. À volume égal, un réservoir ayant une plus grande surface au sol – et donc une hauteur d'eau moins importante – facilitera la décantation. Le mode de remplissage (*voir plus loin*) joue aussi un rôle important dans la faculté du réservoir à laisser les matières en suspension se décanter.

Emplacement

Le choix de l'emplacement du réservoir sera pratiquement toujours le résultat d'un compromis. Idéalement, le réservoir devrait se trouver entre forage et bornes-fontaines, le plus près de l'un et des autres pour limiter les pertes de charge (et le coût) des tuyauteries de remplissage et d'écoulement.

Il n'est pas inutile de prendre également en considération l'avis de la population du village : le réservoir (château d'eau) est en effet la matérialisation d'une fierté bien légitime et qu'il faut respecter. On cherchera également à profiter d'un point haut qui limitera la hauteur et donc le coût du support dans la mesure où ceci n'entraîne pas de plus gros surcoûts de longueur de tuyauterie (et de pertes de charge associées).

1.4.4 Matériaux et conception

Il y a trois grandes familles de fabrication :

- le château d'eau construit sur place : en béton ou en ferrociment, par exemple ;
- le château d'eau assemblé sur place (cuve et support préfabriqués) ;
- le château d'eau transporté sur site en une seule pièce (pour la partie cuve au moins).

La construction sur place est généralement plus longue et demande du soin et du personnel qualifié sur site (contrôle de qualité du ciment ou du béton, des coffrages, etc.). Le montage sur place ne met en jeu que de la boulonnerie, voire quelques soudures au niveau du support.

Les différences entre les techniques pratiquées se situent au niveau :

- de l'investissement initial ;
- de l'entretien (fréquence et coût) ;
- de la durée de vie estimée (à prendre en compte dans l'amortissement).

Toutes les techniques ne sont pas disponibles dans tous les pays et il est souvent plus judicieux de s'adresser à une entreprise de la place et de faire un choix sur ce qu'elle propose plutôt que de chercher à introduire une nouvelle technique qui n'est pas maîtrisée localement.

1.4.5 Raccordements

Photo 13
Base d'un réservoir
avec tuyauterie
entrée et sortie



Remplissage

Deux types de remplissage du réservoir peuvent être envisagés : remplissage par le haut ou par le bas. On peut lister les avantages et inconvénients de chacun :

1. Remplissage par le haut de la cuve :

- la part de la HMT du sol au réservoir est fixe ;
- une intervention sur la tuyauterie de remplissage peut se faire sans être obligé de vidanger le réservoir ni d'installer une vanne qui sera peut-être source de problème. En cas d'intervention, il suffit de laisser couler l'eau contenue dans la tuyauterie ;

- la chute d'eau du haut de l'extrémité de la tuyauterie provoque dans le réservoir un brassage d'eau favorable à son oxygénation ;
- ce même brassage ne permet pas une bonne décantation.

2. Remplissage par le bas de la cuve :

- la hauteur géométrique à franchir par la pompe au niveau du sol est variable et déterminée par la hauteur d'eau dans le réservoir ; elle sera en moyenne inférieure à la HMT fixe du premier cas – d'où un gain en volume pompé ;
- une intervention sur la tuyauterie de remplissage nécessite la vidange du réservoir ou la fermeture d'une vanne (coût et problème potentiel).

Notez au passage que du point de vue hydraulique, le courant d'eau qui débouche au sein du liquide va perdre son énergie cinétique $V^2/2g$: il importe donc que l'arrivée d'eau se fasse à une vitesse la plus lente possible (l'eau doit déboucher par une canalisation de forte section). On peut remarquer également que cette faible vitesse, qui n'entraînera pas de remous, favorisera la décantation.

Le remplissage de la cuve par le bas permet donc de gagner en HMT si la hauteur de cuve est importante et c'est alors que cette option peut s'envisager. Pour assurer le remplissage par le bas de la cuve il y a deux solutions :

- soit le tuyau de remplissage est relié à la tuyauterie de sortie vers le réseau (by-pass), ce qui peut être un aménagement ultérieur ;
- soit le tuyau de remplissage débouche à la base de la cuve.

La première solution apparaît au prime abord plus favorable du point de vue de la HMT minimum, celle-ci peut en effet descendre jusqu'au niveau du by-pass, plus bas que la base du réservoir (l'eau peut arriver aux robinets sans transiter par le réservoir). La deuxième est en fait la seule à retenir car :

- elle autorise et favorise la décantation ;
- elle n'entraîne pas de perte de charge supplémentaire contrairement à la première. Le branchement du by-pass implique en effet le franchissement de deux téés comme le montre la photo ci-contre.



Photo 14
By-pass

Alimentation du réseau

Toujours pour des raisons de décantation, l'alimentation vers le réseau se fera au niveau d'une manchette d'une dizaine de centimètres de haut située à l'extrémité opposée du réservoir par rapport au remplissage. Cette manchette, qui détermine un volume mort, sera surmontée d'une crépine à gros orifices pour barrer le passage aux éléments flottants qui auraient pu pénétrer par le regard (lors d'une opération de nettoyage par exemple).

Il faut garder en mémoire que les vannes sont souvent sources de problème. Il faut en limiter le nombre et les choisir de qualité, type à guillotine pour limiter au mieux les pertes de charge.

1.4.6 Aménagements

Les aménagements du réservoir comprennent :



- l'échelle d'accès extérieure. Elle est nécessaire pour les opérations de nettoyage et doit prendre en compte les soucis de sécurité (interdiction d'accès aux enfants ou autres personnes non habilitées) ;
- la trappe de visite (trou d'homme) doit être de diamètre suffisant pour admettre même les forts gabarits (50 cm et plus), il n'est pas vraiment utile de prévoir de la cadenasser si l'accès est déjà contrôlé (c'est une clé de moins à perdre) ;
- l'échelle de visite intérieure doit être, aussi bien que l'intérieur du réservoir, protégée contre la rouille ;
- une mise à l'air séparée est nécessaire si ceci n'est pas prévu au niveau de la fermeture du trou d'homme ;

Photo 15
Indicateur de niveau



- l'indicateur de niveau.

C'est un accessoire qui devrait être indispensable : c'est en effet une aide précieuse à la gestion du stockage de la ressource. Les fontainiers peuvent, avec cet indicateur, savoir quand arrêter la vente le soir pour réserver de l'eau pour les besoins du matin. Les dispositifs les plus simples comprennent un flotteur et un contre-poids reliés par câble et poulies. Il est simple de fabriquer localement un tel dispositif en prenant un minimum de précautions (le câble ne doit pas frotter contre les parois, les poulies doivent être de gros diamètre pour limiter le rayon de courbure du câble mais surtout obtenir un couple conséquent au niveau de l'axe de la poulie afin d'éviter tout blocage de celle-ci et usure consécutive du câble).

Photo 16
Câble électrique
mal fixé



- le dispositif d'arrêt réservoir plein.

Ce dispositif peut être considéré de prime abord soit comme un palliatif à un surdimensionnement de la pompe, soit à une mauvaise gestion de la ressource : pourquoi en effet arrêter une pompe dont le fonctionnement est gratuit ! La position d'un flotteur ferme ou ouvre une boucle électrique (contact à ampoule de mercure). Les déconvenues rencontrées sur le terrain ont deux origines : une mauvaise fixation du flotteur ou un raccordement mal effectué qui transforme le câble électrique de liaison en une magnifique antenne à foudre.

Non seulement la liaison entre électronique et interrupteur à flotteur doit être enterrée et blindée (protégée dans un tube métallique éventuellement), mais elle doit être équipée de varistances à oxyde de zinc comme les autres câbles de liaison.

Par sécurité, il est nécessaire de prévoir un trop-plein qui débouchera loin des fondations du réservoir.

1.5 POMPE PHOTOVOLTAÏQUE

1.5.1 Dimensionnement

On appelle dimensionnement d'une pompe photovoltaïque le calcul de la puissance du générateur solaire qui permettra d'obtenir la performance souhaitée dans un certain contexte.

Le dimensionnement d'une pompe photovoltaïque met en jeu quatre paramètres :

- le débit journalier ;
- la hauteur de pompage ;
- l'ensoleillement et la température ;
- le rendement du type de pompe en jeu.

Le débit journalier à considérer est directement issu des estimations faites sur la consommation journalière. On considère généralement que celle-ci est fixe au cours de l'année, ce qui n'est pas le cas pour au moins ce qui concerne la consommation d'eau payante.

La saison des pluies non seulement apporte une eau de surface suffisante pour les animaux mais ralentit la soif en abaissant la température. La nébulosité durant cette saison abaisse également la production moyenne journalière de la pompe solaire, dans des proportions moindres généralement.

Dans la pratique, on prend, comme référence de dimensionnement, le mois le plus chaud (le mois de mai en Afrique), c'est à ce moment que les besoins sont les plus forts et que toute l'eau est vendue.

Le calcul de puissance crête du générateur est donné par une formule simple: l'énergie communiquée à l'eau en fin de journée correspond au travail effectué pour élever la production journalière d'eau V à une hauteur H (HMT).

Le volume V (en m^3) a une masse $M = 1\,000 V \times d$ (en kg) représentant un poids de $1\,000 \times V \times d \times 9,81$ newtons, c'est-à-dire $9\,810 V$ newtons puisque la densité d de l'eau est 1.

Cette énergie (en joule) est donc: $E = 9\,810 V \times H$

Transformé en wattheures (une heure correspond à 3 600 secondes, donc $1\text{ Wh} = 3\,600\text{ joules}$), $E = 9\,810 V \times H / 3\,600$, c'est-à-dire, en simplifiant :

$$E = V \times H \times 2,725$$

Entre l'énergie électrique théorique E_e (qui permet d'utiliser la proportionnalité entre énergie électrique et ensoleillement à travers la valeur de watt crête) et cette énergie hydraulique E , on a le rendement R global pompe et générateur (incluant l'effet de la température) soit $E_e = E/R$

On peut alors appliquer la formule de définition du **watt crête** : $P_c = E_e/I$, avec P_c égal à la valeur de puissance crête du générateur et I l'ensoleillement en kWh/m^2 .

On trouve donc la formule donnant la puissance théorique de la pompe en watt crête:

$$P_c = \frac{V \times H \times 2,725}{I \times R}$$

Avec:

V : volume journalier en m^3

H : hauteur manométrique de pompage en mètre

I : ensoleillement dans la journée en kWh/m^2

R : rendement global générateur, électronique et électropompe

Rendement global indicatif en fonction de la puissance				
< 800 Wc	800 à 1 200 Wc	2 à 3 kWc	3 à 5 kWc	5 à 10 kWc
40 %	20 ou 40 %	30 %	35 %	40 %

Remarques: la zone 800/1 200 Wc voit le chevauchement entre pompes volumétriques et centrifuges avec des rendements passant du simple au double. Si la puissance obtenue ne correspond pas au rendement choisi, il conviendra de refaire le calcul. (cf. l'ouvrage "Technologies européennes du pompage solaire photovoltaïque" publié par la Fondation Énergies pour le Monde).

Tableau 12
Valeurs de R
en fonction
des puissances
(donc des types
de pompes solaires)



Pour estimer le débit maximum de la pompe en m^3/h , on peut prendre en première approximation la valeur du sixième du débit journalier.

$$Q_{\max} = \text{Volume journalier}/6 \text{ (pour un ensoleillement de référence de } 6 \text{ kWh/m}^2\text{/jour)}$$

Cette valeur de débit va servir au calcul de la HMT (pour les composantes pertes de charge et rabattement). On peut remarquer que la HMT retenue pour ce calcul est en fait la HMT maximale, c'est-à-dire correspondant au rabattement au plus fort débit ajouté aux pertes de charges correspondantes jusqu'au réservoir.

Dans les faits, la HMT varie avec les pertes de charges mais surtout avec le rabattement. La formule, si elle inclut bien l'effet de la température sur le rendement (jusqu'à 15 % de perte à 45 °C ambiant) est donc pessimiste et conduit à un certain surdimensionnement, celui-ci est d'autant plus fort que la composante rabattement a un poids important dans la HMT totale.

1.5.2 Choix de la pompe

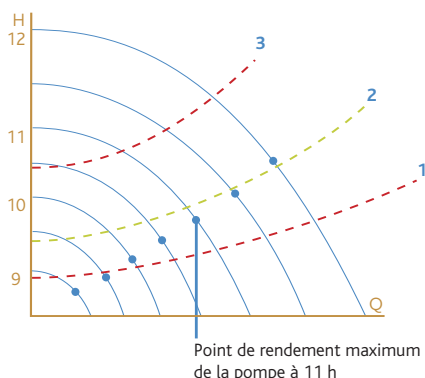
Le dimensionnement du générateur ne met en jeu que l'énergie hydraulique, c'est-à-dire le produit $V \times H$ en m^4 . Le générateur photovoltaïque sera donc le même pour une pompe donnant par exemple $20 m^3/jour$ à 40 mètres ou une autre donnant $40 m^3/jour$ à 20 mètres de HMT.

Si le moteur est vraisemblablement le même, ce n'est pas du tout le cas pour la partie hydraulique du groupe. Une pompe immergée est définie par son débit et sa HMT qui définissent le point de fonctionnement au meilleur rendement à vitesse nominale (autour de 2 850 t/min pour une fréquence de 50 Hz).

La meilleure pompe est celle qui travaillera à son meilleur rendement autour de midi solaire. Il ne faut absolument pas croire que "qui peut le plus peut le moins". Une pompe ayant une HMT nominale (matérialisée par le nombre d'étages pour une pompe centrifuge) supérieure à l'optimum, va démarrer plus tôt mais plafonner en débit avec un mauvais rendement en milieu de journée, au moment du plus fort potentiel. Dans le cas contraire, la pompe tournera toujours sur la partie gauche de sa courbe par rapport à son point de rendement maximum. **L'heure de démarrage n'est pas en soit un critère d'optimisation de choix de pompe.**

Figure 12

Positionnement d'une pompe centrifuge par rapport à 3 sites définis par leur courbe réseau. Sur les courbes (en bleu) de la pompe, correspondant à différentes vitesses, de 9 heures à 12 heures solaires, figurent les points de fonctionnement débit/hauteur où le rendement est le meilleur.



- Site 1 - La pompe est surdimensionnée en HMT par rapport au site : elle démarre tôt (9 h) mais est loin de son meilleur rendement à midi. Le volume d'eau produit n'est pas optimisé.
- Site 2 - La pompe est bien dimensionnée, le rendement maximum est atteint en milieu de journée où le débit est le plus fort.
- Site 3 - La pompe est sous-dimensionnée en HMT par rapport au site : elle démarre tard (10 h 30) et reste très loin des zones de meilleurs rendements. Le volume d'eau produit n'est pas optimisé.

NB : n'est traité ici que le cas de la pompe centrifuge

1.5.3 Calcul du générateur

Il n'est, en général, pas possible d'obtenir un générateur correspondant exactement à la puissance théorique calculée. Si la pompe est en a une tension de 12 volts nominale, on passe d'une taille à

l'autre en rajoutant un module. Ce n'est en fait jamais le cas, tout au moins au-dessus de 1 200 Wc. Pour les systèmes avec onduleur et moteur asynchrone, la tension d'entrée de l'électronique correspond à 7, 8, 16 modules voire plus. Le saut d'une taille de générateur à la suivante (ce qu'on peut appeler le "pas de gamme") est ainsi d'autant plus grand que la puissance unitaire de module utilisé est importante.

Il est recommandé de vérifier que les chiffres de consommation n'ont pas été surévalués avant de passer à une taille de puissance supérieure. Il faut également vérifier que ce surdimensionnement – et donc, que le débit de pompage plus important – puisse être supporté par le forage.

1.5.4 Exemple de dimensionnement

Exemple pratique. Les besoins ont été estimés à 35 m³ d'eau par jour et la HMT maximum pour le débit de pointe (35/6 = 6 m³/h) est de 50 mètres. Le projet se situe au Sahel et on prend 6 kWh/m²/jour comme ensoleillement de référence et *a priori* 0,3 comme rendement global.

La puissance théorique du générateur de la pompe sera :

$$Wc = 35 \times 50 \times 2,725 / (6 \times 0,3)$$

Soit : 2 649 Wc

On s'intéresse à un constructeur de pompes solaires qui offre un onduleur ayant une plage de puissance de 2 à 6 kW et dont la tension d'entrée correspond à 20 modules en série (16 x 20 = 320 volts, car c'est environ à 16 volts que le module offre la meilleure puissance sous une température ambiante sahélienne). On suppose également qu'on a le choix entre des modules de 50, 75 ou 85 Wc.

Nombre de branches de 20 modules en série	1	2	3
Puissance module	Puissance des générateurs (en Wc)		
50 Wc	1000	2000	3000
75 Wc	1500	3000	4500
85 Wc	1700	3400	5100

Tableau 13
Possibilités
de puissance
de générateurs

Le générateur, le plus près du calcul, a une puissance crête de 3 000 Wc comportant 2 x 20 modules de 75 Wc (ou 3 x 20 modules de 50 Wc).

Le surdimensionnement est de : $S = (3000 - 2649) / 2649 = 13\%$

De la formule $Wc = Q \times H \times 2,725 / E \times R$, on déduit le débit :

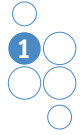
$$Q = Wc \times E \times R / (H \times 2,725)$$

Le débit journalier sera donc voisin de 40 m³/jour, avec un débit de pointe d'environ : 40/6 = 7 m³/h. Nous allons supposer que le forage admet ce débit d'exploitation et que le rabattement ne varie que très peu entre 6 et 7 m³/h, c'est-à-dire que la HMT est conservée. Dans le cas contraire, il conviendrait de refaire les calculs en procédant par itérations.

L'hydraulique à choisir devra avoir son meilleur rendement pour : $Q = 7$ m³/h, $H = 50$ mètres, en fait légèrement plus de façon à ce que le point de fonctionnement passe de part et d'autre du point de rendement maximum (comme illustré par la courbe 2 de la figure 12).

Dans la pratique :

- le calcul théorique du générateur est utile pour estimer l'investissement du poste pompage de l'AEP solaire ;
- le choix de la puissance unitaire du module est relativement important et conditionne le facteur de surdimensionnement du générateur ;



1.6 RÉSEAU

Le réseau est l'ensemble des tuyauteries et accessoires qui assure le transport de l'eau entre réservoir et points de distribution, bornes-fontaines publiques et branchements privés.

Principe de calcul

Lorsqu'un robinet est ouvert, l'énergie potentielle de l'eau venant du réservoir est dissipée en pertes de charge et en énergie cinétique (jet au robinet).

$$H = P_c + E_c$$

La donnée de base du calcul est le débit dans la tuyauterie et les deux paramètres du calcul sont d'un côté, la hauteur du réservoir et de l'autre, la perte de charge donc le diamètre et le profil de la tuyauterie. Le calcul du réseau, pour simplifier, revient à fixer un paramètre (hauteur du réservoir par exemple) pour déterminer l'autre.

$$P_c = \text{Fonction (débit, nature et diamètre de tuyauterie)}$$

Le réservoir alimentant plusieurs points d'eau (plusieurs bornes-fontaines à plusieurs robinets et éventuellement des branchements privés), le réseau comportera des ramifications. On commencera par faire un schéma du réseau et par tracer le profil en long. On calculera les débits transitant dans chaque portion en partant de l'aval (bornes-fontaines et branchements privés).

On calculera ensuite les pertes de charge dans chaque tronçon homogène en partant de l'amont pour finir à l'aval. À chaque étape, on part de la pression initiale du tronçon précédent, on y soustrait les pertes de charge du tronçon et on ajoute l'augmentation ou la baisse de pression correspondant à la différence d'altitude entre l'amont et l'aval du tronçon.

Il est important de vérifier que la pression résiduelle soit toujours positive, en particulier au niveau des points hauts. Dans la pratique, on prendra des vitesses d'eau de l'ordre du mètre par seconde.

Les pertes de charges seront lues sur un abaque qui indiquera également les longueurs équivalentes pour les accessoires. Le calcul peut être effectué à l'aide d'un logiciel qui intègre les données de pertes de charges en fonction des types de canalisation.

Deux cas doivent être absolument évités :

- les points hauts où de l'air peut s'accumuler en provoquant des phénomènes analogues à un pincement de tuyauterie ;
- les dépressions (pressions inférieures à la pression atmosphérique) qui, en plus de phénomènes de dégazage, peuvent, en cas de fuite, entraîner une pollution du réseau.

Photo 17
Fille d'attente
de bassines



Les points hauts qu'il est impossible d'éviter, parce qu'il est par exemple impossible d'enterrer plus profondément la tuyauterie, peuvent être purgés de façon continue par des ventouses à condition que la tuyauterie reste, dans tous les cas, à une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Tableau 14
Pour faire le calcul on peut remplir un tableau sur le modèle suivant

N° de tronçon	Longueur	Dénivelé	Débit	Diamètre	P de charge	Cumul	Pression résiduelle
---------------	----------	----------	-------	----------	-------------	-------	---------------------

Construction

On utilise généralement du polyéthylène haute densité (tuyau noir), il est avantageux d’employer des accessoires de raccordement de qualité (les déconvenues sont coûteuses). Les tuyauteries sont enterrées sur lit de sable dans des tranchées de 60 à 80 cm de profondeur avec grillage d’alerte. En plus des ventouses, lorsque la nécessité se présente, il est important de prévoir des points de vidange qui permettront de curer le réseau en cas de sédimentation.



Photo 18
Borne-fontaine au Mali

1.7 BORNES-FONTAINES

La borne-fontaine est le lieu de distribution d’un service public marchand vendu en vrac : l’eau potable.

Un lieu public est, par définition, exposé non seulement aux intempéries extérieures mais aussi aux agressions de l’homme. C’est en effet un lieu commun de dire que ce qui appartient à tout le monde n’appartient à personne et n’est guère entouré de soin. Les lieux publics, que ce soient cabines téléphoniques, toilettes ou mobilier urbain, répondent toujours et partout à des normes particulières de solidité et de protection contre le vandalisme. Le fait aussi que l’eau soit vendue en vrac, et non conditionnée dans un récipient, implique toute une série d’aménagements détaillés dans ce chapitre (ceux-ci ne seraient pas nécessaires si l’eau vendue était conditionnée dans des récipients).

C’est la qualité de ces aménagements qui déterminera en premier lieu la qualité globale du service rendu par L’AEP.

1.7.1 Cahier des charges de la borne-fontaine

Fonction

Le but est de remplir le récipient de l’usager dans un temps raisonnable. Les seaux et bassines ont une contenance de 10 à 20 litres, en prenant comme objectif 15 à 30 secondes, on arrive à un débit avoisinant les 40 litres par minute. Souvenez-vous que, pour se laver les mains, un robinet est calibré à 6 l/min.

Ergonomie

L’opération complète consiste à prendre place (il est souvent demandé de se déchausser pour accéder à la borne), laver le récipient, positionner le récipient sous le robinet, ouvrir le robinet (opération qui n’est pas toujours effectuée par le fontainier), attendre le remplissage – jusqu’au débordement pour être sûr d’en avoir pour son argent – reprendre le récipient et, aidé de la voisine, le positionner sur la tête.

Tout ceci implique des surfaces, des formes, des détails qui font que l'ensemble est fonctionnel ou, au contraire, qu'il ne permette pas que toutes ces opérations se fassent dans de bonnes conditions.

Comptage et protection

S'agissant d'une vente en vrac, la quantité délivrée doit être mesurée. La bassine ou le seau "standard" ont une contenance connue, il faut néanmoins mesurer l'eau distribuée pour pouvoir rendre des comptes – un compteur d'eau est donc indispensable.

La borne-fontaine doit aussi résister aux différentes agressions naturelles, animales et humaines. Ce ne sont pas des brodeuses mais des pilleuses de mil qui manipulent les robinets, il est important d'en tenir compte !

Hygiène

Il convient de prévoir l'évacuation naturelle des éclaboussures qui se produisent au cours du lavage, du remplissage et du transport, faute de quoi les lieux deviennent rapidement insalubres.

Photo 19
Bornes-fontaines
au Burkina Faso...



Photo 20
... et au Sénégal



Esthétique

Logiquement un service marchand doit attirer la clientèle et mettre en valeur le produit. La borne-fontaine est également un lieu de rencontre : pourquoi ne pas s'efforcer de le rendre attrayant ?

1.7.2 Remplissage des récipients

Le robinet est sans aucun doute le composant de l'AEP auquel il faut prêter la plus grande attention. On oublie trop souvent, en s'esbaudissant sur la magie du solaire, que c'est au niveau du robinet que se mesure le résultat de tout l'investissement et une grande partie de la qualité du service. Cet élément mériterait par conséquent qu'on lui consacre une dose importante d'attention.

Sur le terrain, on constate qu'un robinet "dure" 3 à 4 mois. Avant qu'il ne soit complètement à bout et enfin remplacé il aura eu largement le temps de provoquer le gâchis d'une eau précieuse au profit de l'entretien du bourbier qui borde l'évacuation engorgée des eaux usées. Une conclusion nette s'impose : les robinets utilisés ne satisfont pas l'objectif poursuivi.

Photo 21
Différentes
technologies
de robinets et tailles



Quand on pense au nombre de personnes qui dépendent d'un robinet public pour un besoin tellement primaire et que l'on sait que le mauvais fonctionnement de cet élément, si banal, peut être à l'origine de maladies hydriques mortelles, on conçoit qu'il n'est pas inutile de se pencher quelques instants sur le problème.

Pourquoi les produits disponibles sur le marché ne répondent-ils pas à la question ? En très grande partie parce que les pays industrialisés ne sont pas actuellement confrontés au même contexte et, qui plus est, ne l'ont historiquement jamais réellement été (*voir plus loin*). Peut-on rajouter comme raison que l'enjeu économique n'est pas très important ? L'argument mériterait d'être modulé : si le marché est dilué et s'adresse à une clientèle à faible revenu, en terme de quantité à l'échelle mondiale et de potentiel de financement (y compris les aides internationales) il mériterait quelques réflexions. En fait la solution technique n'est pas évidente à trouver, et même si l'enjeu est bien pesé, le composant robinet doit rester dans une limite de prix acceptable. Actuellement, dans les pays sahéliens, un robinet est vendu entre 3 500 et 4 500 F CFA, c'est-à-dire entre 5 et 7 euros.

Rappelons brièvement à quel cahier des charges devrait répondre le robinet d'un point d'eau communautaire dans le contexte présent :

- débit: le but est de remplir un récipient de 10 à 20 litres le plus rapidement possible afin d'éviter les files d'attente et donc de dissuader une partie de la clientèle ;
- pression: le robinet doit fonctionner sous une pression de quelques mètres (0,3 à 0,8 bar) ;
- écoulement: il doit être le plus vertical possible pour éviter les éclaboussures qui sont cause de nuisances et de pertes (brise-jet intégré) ;
- endurance: le robinet est destiné à subir plus de cent cycles ouverture/fermeture par jour. Une borne-fontaine de 10 m³/jour avec trois robinets correspond par exemple à environ 150 sollicitations quotidiennes pour chacun, et nous sommes dans la fourchette basse ;
- environnement de fonctionnement: le robinet est installé en plein air et en plein soleil, il doit par conséquent être capable d'endurer de gros écarts de température, la poussière et le sable ;
- solidité: c'est un instrument d'usage public qui est par définition utilisé avec peu de soin par différentes mains (homme, femme, enfants) qui n'ont pas l'habitude de doser leur force.

L'occasion est donnée ici de se pencher plus attentivement sur les produits disponibles. Un robinet pour usage domestique en extérieur (appelé aussi robinet de puisage par opposition au robinet de salle de bains) se présente comme une vanne terminée par un coude. Celui-ci peut être lisse ou terminé par un filetage qui permet le raccordement à une tuyauterie souple pour l'arrosage.

Les techniques de vannage sont variées (boisseau conique, pointeau, guillotine, papillon, etc.) mais, dans la pratique, seules deux d'entre elles sont utilisées en Europe pour ce type de robinet: le clapet et le boisseau sphérique.

Le robinet à clapet

Sa forme extérieure est bien connue, c'est celle du... "robinet". Il comporte deux parties: le corps et

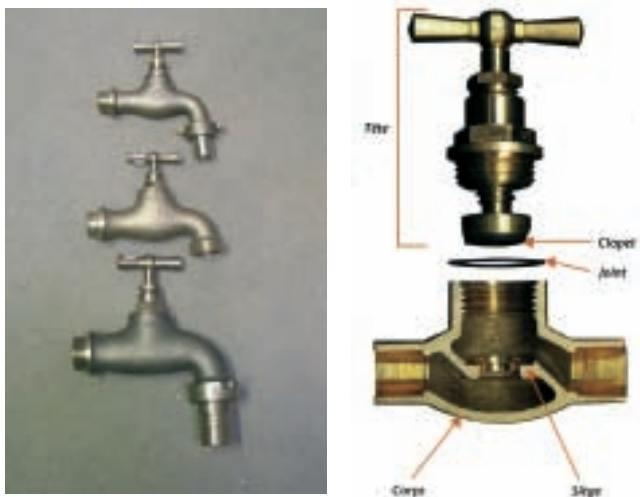


Photo 22
Différentes tailles de robinets à clapet

Figure 13
Vue en coupe



la tête. Le corps est une pièce moulée généralement en laiton qui comporte un filetage au pas du gaz (filetage conique qui est le standard en plomberie) pour le raccordement à la tuyauterie et à l'autre extrémité une sortie d'eau par un bec coudé, soit lisse (raccord nez) soit fileté comme vu plus haut. L'eau débouche dans le corps au niveau d'un siège qui est la seule partie reprise de fonderie. Au-dessus de ce siège, est vissée la tête. Sa partie mobile munie d'une garniture (joint nitrile, autrefois cuir) vient coiffer et fermer la sortie d'eau au niveau du siège.

La descente du joint sur le siège est actionnée par rotation d'une tige avec manette prolongée par un pas de vis. La tige qui traverse la tête est une zone de fuite barrée par un presse-étoupe réglé par un écrou.

Avec l'usure, il peut être nécessaire de resserrer cet écrou pour faire barrage à la fuite à la base de l'axe. L'usage intensif du robinet affecte trois parties : le joint, voire le siège lui-même, le pas de vis et le presse-étoupe.

Comment un tel robinet finit-il ?

Typiquement le presse-étoupe commence naturellement à fuir et, bien sûr, il ne vient à personne l'idée de lui donner un petit coup de clef à molette. Le réflexe est plutôt de fermer le robinet avec plus d'énergie, ce qui entraîne deux conséquences funestes : une plus grosse contrainte sur le pas de vis qui, de plus, travaille avec un moins bon guidage (qui était assuré en partie par le presse-étoupe) et un effort excessif sur le joint qui est écrasé contre le siège au-delà de ce que permet son élasticité naturelle. À partir de ce moment les avis sont partagés : qui lâchera en premier ? Le joint ou le pas de vis ? Autrefois les plombiers avaient dans leur caisse à outils de quoi changer le joint, rectifier le siège, graisser le pas de vis, voire changer complètement la tête du robinet. Maintenant on remplace le robinet complet et l'ancien finit à la poubelle en Europe (au Burkina Faso, il a plus de chance d'être fondu et de finir en statuette pour touriste).

Le robinet quart de tour

C'est une appellation courante du robinet à boisseau sphérique. Une boule percée par un large orifice tourne entre deux joints circulaires qui assurent en amont et en aval une étanchéité entre celle-ci et un conduit qui est en fait le corps du robinet. La boule est reliée à un axe traversant le corps, une manette en forme de levier actionne sa rotation entre deux butées correspondant aux positions pleine ouverture et fermeture complète, soit un quart de tour.

Photo 23

Robinet quart de tour



Photo 24

Vues en coupe



Cette construction est simple mais fait appel à des procédés de fabrication plus sophistiqués tant au niveau des joints que pour l'état de surface de la sphère chromée ou exécutée en inox.

La grosse différence avec le type précédent est que l'ouverture permet un passage intégral (ce qui n'est pas effectif pour tous) sans plus de perte de charge qu'une tuyauterie de même section. L'ouverture est rapide sans vraiment possibilité de réglage fin du débit, ce qui est plutôt un avantage ici : le plein débit est obtenu rapidement et la fermeture est presque instantanée, au risque parfois de provoquer des coups de bélier.

Ce type de robinet, contrairement au précédent, n'est pas démontable et il y a aucune possibilité de changer les joints lorsque l'usure de ceux-ci commence à provoquer une fuite. Les joints plaqués de part et d'autre de la sphère travaillent en frottement lors de la rotation du boisseau sphérique, mais ce frottement n'est pas influencé par la force de l'opérateur, autrement dit la manière dont on actionne ce robinet n'a pas d'influence sur la longévité des joints principaux.

Quelle est la fin d'un tel robinet ?

On peut remarquer tout d'abord que la manette provoque un effort désaxé et non pas un couple contrairement à la manette papillon de notre robinet classique. L'effort résultant a tendance à provoquer une ovalisation au niveau de l'axe et des forces désaxées sur la sphère. Le vieillissement du robinet a surtout pour origine l'usure des joints de part et d'autre de la sphère. La rapidité de cette usure a comme facteur :

- le nombre de manipulations ouverture/fermeture
- l'élasticité des joints et leur coefficient de frottement avec la sphère
- l'état de surface de la sphère
- la charge de l'eau en matières solides



Photo 25
Vannes d'isolation d'une fontaine publique à Pompéi ; bronze et plomb, âgées de 2 000 ans (photo A. Lugrin).

Que choisir ?

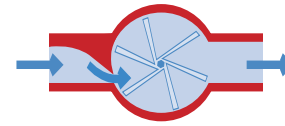
Quoi qu'il en soit, il est important d'impliquer le responsable du point d'eau sur la manipulation des robinets (sensibilisation et formation). En l'absence de produit adapté on choisira la taille la plus importante disponible, le robinet à clapet de 1 pouce (27 mm), réparable, a souvent prouvé une longévité supérieure. Les opérations de maintenance devraient inclure un remplacement systématique.

1.7.3 Comptage

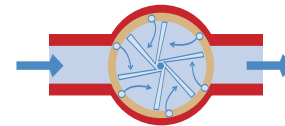
Les compteurs sont des accessoires coûteux qui entraînent des raccordements et des pertes de charge supplémentaires. Ils sont cependant indispensables pour mesurer, d'une part, la production de la pompe et, d'autre part, la consommation unitaire, soit au niveau des bornes-fontaines, soit au niveau des branchements particuliers.

Il y a deux types de compteurs mécaniques : les compteurs de vitesse et les compteurs volumétriques.

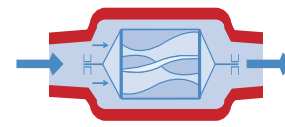
Système palettes à jet unique : l'eau pousse les palettes l'une après l'autre. La vitesse de rotation des palettes est proportionnelle au débit. Type moins précis en position verticale (orifices de $\frac{3}{4}$ pouces).



Système palettes à jets multiples : l'eau est répartie tout autour des palettes et les frappe en même temps. La précision est bonne dans toutes les positions.



Système Woltman : une hélice tourne dans l'axe de la veine liquide. Il est réservé aux débits supérieurs à 15 m³/h.



Système volumétrique : Il est plus précis surtout à faible débit. En revanche il est très sensible à la charge de l'eau – sable en particulier.

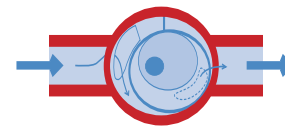


Figure 14
Les différents types de compteurs

Un compteur correspond, selon sa taille, à un certain débit nominal.

Au-delà et en deçà, la précision diminue en fonction de la classe du compteur, A, B et C dans l'ordre croissant. C'est surtout pour les petits débits que la différence est sensible (la précision descend à 5 % environ contre 2 % de part et d'autre du débit nominal). Un compteur volumétrique sera facilement de classe C alors qu'un compteur à jet unique en position verticale ne sera que de classe A.

Les compteurs sont généralement à cadran noyé, c'est-à-dire fonctionnant remplis d'eau jusqu'à la vitre.

Dans les types à cadran sec, le mouvement est transmis par deux aimants situés de part et d'autre d'une paroi étanche. La lecture est plus claire surtout si l'eau contient des impuretés qui, en se déposant, finissent par interdire toute lecture.



Photo 26
Dépôts
dans un compteur



Une autre caractéristique du compteur c'est qu'il provoque des pertes de charge. Un compteur de $\frac{3}{4}$ de pouce (DN 15) peut produire jusqu'à 4 mètres de perte de charge à un débit de $2 \text{ m}^3/\text{h}$. Le problème en AEP solaire est que, pour limiter les pertes de charge, on utilise des diamètres de tuyauterie largement surdimensionnés. Les compteurs utilisés le seront aussi et il ne faut donc pas espérer une grande précision dans les mesures. On utilise généralement un compteur de tête (entre pompe et réservoir) de DN 40 ou 50 de type Woltman, or, celui-ci a un débit nominal de 15 ou $25 \text{ m}^3/\text{h}$ alors qu'il mesure des débits de 0 à $5 \text{ m}^3/\text{h}$ en moyenne.

Photo 27 et 28
Compteurs
de bornes-fontaines à jet
unique en position
verticale et à jets
multiples en position
horizontale. On
peut noter le soin
apporté pour éviter trop
de perte de charge
au niveau du té sur
la photo de droite



Photo 29 et 30
Compteur de tête type
Woltman et compteur
de vitesse à cadran sec.
On peut remarquer,
pour ce dernier,
le rétrécissement de
diamètre de tuyauterie



1.7.4 Génie civil

Le génie civil des bornes-fontaines comprend au minimum une dalle de propreté et l'encrage du ou des robinets. De rares installations plus élaborées comportent des supports de récipients, une rigole de drainage débouchant sur un piège à boue et une évacuation dans un puits perdu. Le compteur peut se trouver dans un logement du plot central ou dans un regard adjacent.



*Photo 31
Bornes-fontaines
au Niger*



Les conceptions rencontrées sur le terrain sont extrêmement variables oscillant souvent entre médiocre et très mauvais, empirées par le manque de talent du maçon.

1.7.5 Évacuation des eaux perdues

Toute l'eau pompée ne se retrouve pas dans les bassines. Il y a toujours des éclaboussures à proximité des bornes-fontaines. Il est nécessaire de les drainer et de les évacuer pour maintenir la salubrité des lieux. On trouve sur site des constructions ne comportant qu'un périmètre drainant ou d'autres comportant muret de protection, rigole et conduit d'évacuation enterrée.

1.7.6 Constats de terrain

L'impression que retient l'observateur non encore blasé, est plutôt mitigée. Le contraste entre le niveau des techniques et des qualités de construction de la pompe solaire et celles des bornes-fontaines est pour le moins renversant : aucun souci d'ergonomie : l'eau se déverse de la hauteur du robinet en éclaboussant la périphérie (pas de support de bassine), la dalle concave garde ses flaques d'eau, l'évacuation à contre-pente conduit à un tuyau enterré qu'il est impossible de curer...

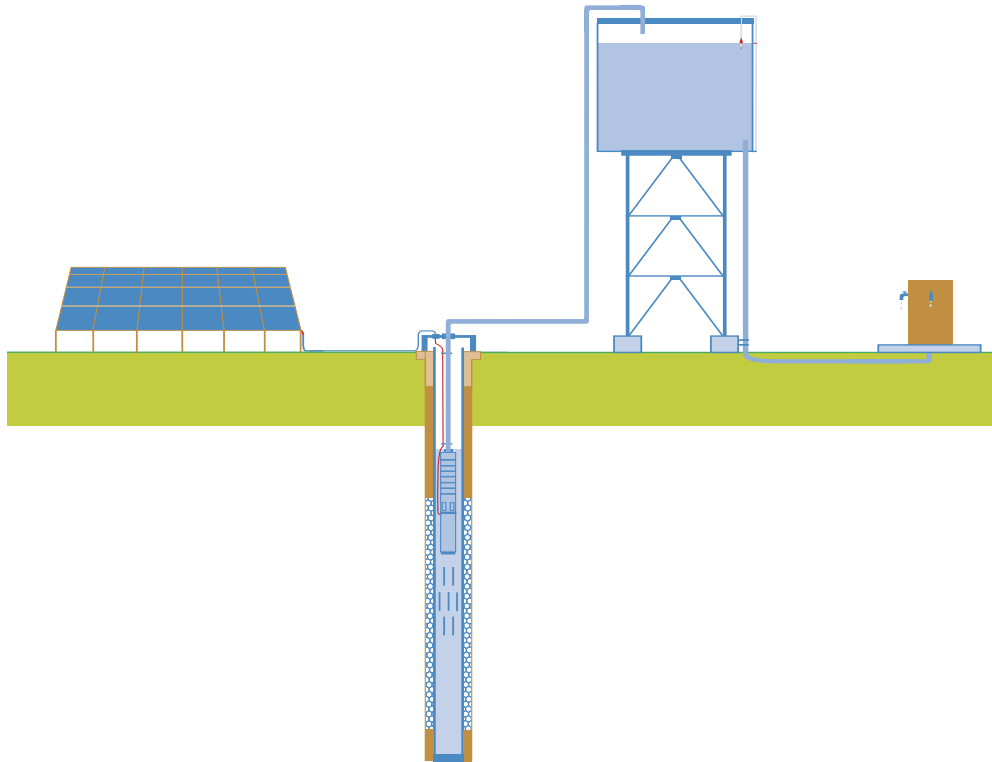
Il convient quelquefois d'avoir une pensée admirative pour les talents de persuasion qui sont déployés pour convaincre les usagers de payer pour un tel service.

L'entretien et le renouvellement des équipements ne sont possibles qu'à travers la contribution financière des bénéficiaires. Une mauvaise conception et une mauvaise construction de la borne-fontaine compromettent au premier chef la qualité du service sur laquelle repose la pérennité de l'AEP dans son ensemble.



*Photos 32, 33 et 34
Bornes-fontaines
au Niger et au
Burkina Faso*

Figure 15



2.1 POMPE PHOTOVOLTAÏQUE

2.1.1 La tête de forage et ses aménagements

La partie du tubage du forage qui dépasse du sol doit être protégée par un massif de béton. C'est une opération qui est bien souvent effectuée en fin de forage mais qui doit être complétée avant l'installation pour permettre la fixation de la tête de forage. Celle-ci est constituée d'une plaque métallique sous laquelle est suspendue l'extrémité supérieure du tuyau de refoulement et qui, par conséquent, supporte tout le poids de la pompe.

2.1.2 Installation de la pompe

Transport

La pompe immergée est livrée, soit séparément, soit déjà accouplée à son moteur. Il est bon de le vérifier avant le transport sur site.

Si le moteur est livré séparément, son emballage individuel inclut quelquefois un calage de l'arbre. Celui-ci sert à éviter que le jeu longitudinal du rotor ne provoque des chocs au niveau de la butée au cours du transport et n'endommage celle-ci. Le moteur sera transporté sur site dans son emballage d'origine, en position horizontale et, autant que possible, protégé des chocs et vibrations.

Préparation

Certains constructeurs recommandent de vérifier le remplissage du moteur, surtout si celui-ci a été stocké longtemps dans une ambiance chaude, le complément de remplissage se fait avec de l'eau claire par l'orifice prévu.

L'accouplement sur site entre le moteur et la pompe consiste à engager l'extrémité cannelée de l'arbre moteur dans la douille de bout d'arbre de la pompe. Il convient de repérer la position de la

sortie du câble électrique du moteur qui correspond souvent au niveau de la pompe à un dispositif pour fixer ce câble et le protéger au niveau où il longe la pompe.

Avant cette opération, on peut dégommer l'arbre du moteur et vérifier qu'il tourne librement à la main sans point dur. Mieux encore, on pourra mouiller l'hydraulique pour que les premiers tours soient lubrifiés – ceci est impératif pour une pompe volumétrique à rotor excentré où caoutchouc et inox, après un long stockage à la chaleur – adhèrent fortement. La fixation entre le moteur et la pompe se fait généralement par 4 écrous avec rondelles. Il faut effectuer un vissage progressif en diagonale de façon à bien positionner les deux éléments avant un dernier serrage énergétique.

Sondage du forage

Le forage est supposé connu : il est toujours utile de vérifier au moins sommairement deux de ces paramètres qui sont la profondeur totale et le niveau statique. L'opération peut se faire simplement avec une cordelette lestée. Ceci permet d'éviter des déconvenues de dernière minute.

Profondeur d'immersion de la pompe

La pompe doit toujours se trouver complètement immergée, c'est-à-dire installée sous le niveau dynamique le plus bas dans l'année. C'est évidemment un impératif pour éviter tout dénoyage qui signifierait baisse de production et mise en danger de la pompe (mauvaise lubrification des paliers).

On a toujours intérêt à immerger le plus possible une pompe : l'augmentation de perte de charge engendrée dans la tuyauterie de refoulement est négligeable et le coût des longueurs supplémentaires de tuyauterie, câble et autres est largement compensé par le gain de sécurité résultant.

Il y a en fait une limite basse pour cette immersion.

Le moteur de la pompe devrait en effet toujours se trouver au-dessus de la crépine du forage, c'est-à-dire dans une section de tubage plein. Cette recommandation des constructeurs de pompe a deux fondements principaux : le refroidissement du moteur et le risque de venue de sable.

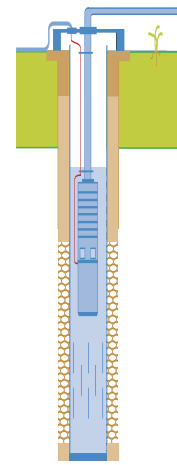


Figure 16

Position de la pompe dans le forage

1 - Le moteur est refroidi par le courant d'eau qui le longe. La vitesse de convection naturelle est généralement insuffisante lorsque la pompe est en pleine eau, dans un large puits, par exemple, à moins que l'eau ne soit à une température inférieure à 20 °C. Pour les moteurs de 4 pouces, les constructeurs recommandent un courant d'eau d'au moins 8 cm/seconde pour 25 °C et de 15 cm/seconde jusqu'à 40 °C.

2 - Si la pompe immergée se trouve plaquée contre la crépine du forage, une grande partie du débit d'eau arrivera à l'entrée de la pompe au-dessus du moteur sans le longer et, par conséquent, ne participera pas au refroidissement du moteur.

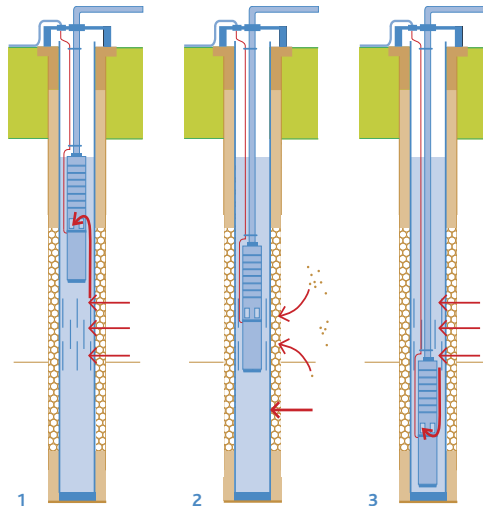


Figure 17

Le deuxième problème est que, si la crépine de la pompe se trouve contre la crépine du forage, la vitesse d'eau à travers la crépine va augmenter à ce niveau. Cette vitesse locale sera supérieure à la vitesse moyenne qui a servi à la caractérisation du forage : le risque est donc une aspiration de sable suivi, éventuellement, par un colmatage local du massif de gravier et ensuite de la crépine. C'est précisément pour cette raison, en grande partie, qu'on ne crée que la partie inférieure d'un aquifère sur 30 à 50 % maximum de sa hauteur.

3 - Si la pompe est installée en dessous de la crépine, du côté pompe, les particules éventuellement en suspension vont "tomber" vers l'aspiration de la pompe. De son côté, le moteur baigne dans une eau stagnante et aura un très mauvais refroidissement, nuisible à son rendement et à sa durée de vie.

Chemise de refroidissement

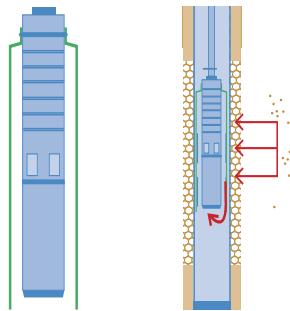
Il est possible de remédier aux inconvénients des deux derniers cas d'installation lorsqu'aucune autre solution n'est possible, ceci en utilisant une chemise de refroidissement. C'est un accessoire qui est proposé dans le catalogue de nombreux pompistes et qui est également facile de fabriquer.

La chemise de refroidissement est simplement constituée d'un tube de plus grand diamètre que la pompe, réalisé en PVC. Le tube coiffe la partie inférieure de l'électropompe au-dessus de la crépine. À ce point, l'espace annulaire entre tube et pompe est fermé par un collier de fixation, le tube est centré sur la pompe. L'eau aspirée par la pompe est ainsi canalisée au préalable le long du moteur et la vitesse d'eau à l'entrée de la chemise est suffisamment faible pour ne pas entraîner d'anomalies locales au niveau du captage.

La mise en place de ce dispositif suppose que le diamètre du forage le permette, pour une pompe de 4 pouces, on installera une chemise de 5 pouces dans un forage de 6 pouces.

Figure 18
Chemise de refroidissement

Figure 19
Pompe immergée équipée d'une chemise de refroidissement



Une pompe immergée doit en principe être positionnée dans l'axe du tubage par un centreur afin de réserver un espace annulaire régulier entre pompe et forage (bonne répartition d'entrée d'eau dans la pompe sur le pourtour de la crépine). Ceci n'est pas vraiment possible, lorsque diamètre intérieur du forage et diamètre pompe sont voisins. C'est en revanche recommandable lorsqu'on installe par exemple une pompe de 4 pouces dans un forage de 6 pouces.

Câble et tuyau de refoulement

Le raccordement électrique de la pompe doit être effectué en premier. Il s'agit de réaliser un raccordement étanche entre la portion de câble moteur raccordée en usine et la longueur de câble immergé nécessaire à l'installation. Rappelons que immergeable signifie, "peut supporter une immersion passagère" alors que, immergé, signifie "destiné à fonctionner sous l'eau".

Les pompes immergées solaires travaillent en plus basse tension que leurs homologues classiques et utilisent du câble de forte section (4 à 10 mm²) pour réduire les chutes de tension.

Le raccordement sera réalisé avec une tresse à épissure dans laquelle on verse une résine à deux composants: la prise complète demande jusqu'à 24 heures.

Deux précautions doivent être prises: ne pas effectuer de traction sur le câble à la sortie du moteur et ne pas endommager sa gaine.

Le reste de la préparation de la pompe consiste à raccorder la tuyauterie souple, le câble de sécurité et éventuellement la sonde d'eau.

À ce stade, on peut recommander d'équiper l'ensemble d'une mesure de niveau par tube d'air.

Mesure de niveau par tube d'air

La mesure des niveaux statiques et dynamiques est une opération qui est souvent difficile lorsqu'une pompe est installée dans le forage. L'appareil de mesure de niveau le plus classique est la sonde électrique: c'est un mètre ruban (plusieurs dizaines de mètres) enroulé sur une bobine et le long duquel sont noyés deux conducteurs isolés et qui se termine par une sonde lestée. Les deux conducteurs sont reliés

à un voyant ou un buzzer alimenté par une pile. Au contact de l'eau, la sonde ferme le circuit pour alimenter le signal. Dans la pratique, il est difficile d'introduire une telle sonde lorsqu'une pompe de 4 pouces est installée dans un forage de 110 mm : sa descente est gênée par le câble électrique et ses attaches et il arrive fréquemment qu'elle se coince lors de la remontée, ce qui peut aller jusqu'à être contraint à remonter la pompe en partie ou en totalité pour libérer la sonde.

Le système de mesure par tube d'air est, dans tous les cas, à conseiller car c'est une installation permanente de faible coût. Un petit tube en plastique est fixé le long de la tuyauterie jusqu'à la pompe. La longueur verticale L du tube jusqu'au sol est soigneusement mesurée.

Lorsque la pompe est installée, la partie I immergée du tube est remplie d'eau (de façon analogue à une paille dans un verre d'eau).

Pour faire la mesure, on branche l'extrémité du tuyau à une pompe à air équipée d'un manomètre : lorsque l'on pompe, la pression d'air va chasser l'eau du tuyau puis l'air va s'échapper. À partir de ce moment, la pression ne varie plus : elle correspond à la hauteur immergée I du tube. Par différence avec la profondeur de l'extrémité du tube, on peut connaître à tout moment le niveau d'eau dans le forage $N = L - I$. La seule difficulté est de se procurer un manomètre suffisamment précis (0,1 à 1 bar), de le conserver en bon état (et de bien noter la valeur de L !).

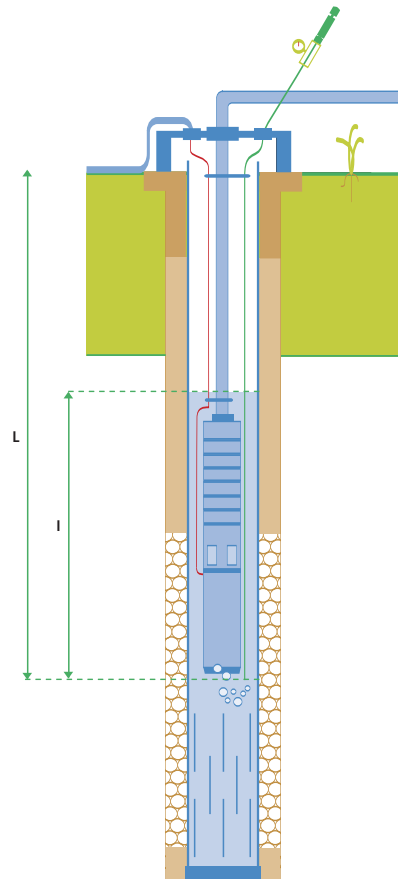


Figure 20
Pompe à air
et manomètre

2.1.3 Installation du générateur photovoltaïque

Emplacement

L'emplacement du générateur est choisi en tenant compte de deux contraintes principales : un ensoleillement sans masque (attention, au-dessous de 23° de latitude, le soleil passe au Nord au solstice d'été et inversement dans l'hémisphère Sud) et une faible distance par rapport à la pompe. Il est très souvent possible de concilier les deux. Si le forage se trouve éloigné des habitations, il faut envisager la difficulté de gardiennage, le générateur peut alors être implanté jusqu'à environ 400 mètres de la pompe (à vérifier avec le constructeur).

Génie civil

Des travaux de terrassement et nivellement de terrain sont quelquefois nécessaires pour implanter les supports des modules et l'enceinte de protection. Les plans de support du générateur sont donnés par le fournisseur.

Une clôture est pratiquement indispensable : un grillage de 2 mètres de haut avec porte d'accès et qui ne fait aucune ombre sur le champ de modules. La porte doit être disposée au niveau du forage où il sera utile d'avoir du dégagement lors des opérations de maintenance de la pompe.

Protection

Le vol des modules est un problème récurrent.

La première mesure indispensable est d'informer clairement la population et ses représentants locaux sur la propriété des équipements, leur part de responsabilité et qui, nommément, est habilité à intervenir sur les équipements. On rapporte des scènes rocambolesques où la population a aidé les voleurs à démonter les modules.

La deuxième mesure à prendre systématiquement est un gardiennage avec en complément la construction d'un logement "de fonction" à proximité immédiate de l'enclos. On a observé des compléments astucieux et peu coûteux: chien ou volaille enfermé dans l'enclos qui constitue une alarme sonore efficace. Il faut mieux oublier toute alarme électrique qui doit nécessairement inclure une batterie, ne serait-ce que pour fonctionner de nuit.

La pose de boulonnerie antivol fait aussi partie des mesures de base. Celle-ci doit être bien faite: serrage puissant avec outil de qualité et casse de la tête de l'écrou. Il ne faut pas oublier de placer des rondelles inox de part et d'autre car l'aluminium se mate avec le temps, ce qui libère l'écrou (ces rondelles ne sont généralement pas fournies avec cette boulonnerie). D'autres protections mécaniques consistent à enfermer les modules par groupes dans des châssis soudés.

Vient ensuite tout ce qu'on peut imaginer avec quelquefois une dose d'irréalisme: les constructeurs devraient être invités à proposer des solutions viables.

Raccordements électriques



*Photo 35
Câble mal serré
qui a provoqué
un échauffement local*

Les recommandations que l'on peut faire ne sont pas spécifiques au pompage: dénuder suffisamment les câbles, effectuer un serrage puissant dans les connecteurs, prévoir des boucles d'aisance, etc. Il est peut-être utile de rappeler que les presse-étoupes ont avant tout un rôle mécanique. Il est préférable de laisser s'échapper la condensation par le bas, et de vérifier que l'étanchéité des boîtiers est bien réalisée sur les côtés supérieurs et latéraux.

Raccordements hydrauliques

La tuyauterie de la tête de forage au réservoir devrait toujours comporter une légère pente ascendante afin de faciliter la purge d'air. À la sortie du forage, on prévoit généralement un raccord démontable (union ou à bride), une section de tuyauterie droite comportant une prise pour manomètre, une vidange manuelle et le compteur principal.

3 MISE EN SERVICE, RÉCEPTION ET MESURES DE PERFORMANCE

Il faut distinguer ce qui relève de l'observation de ce qui nécessite des mesures.

Aspects quantitatifs et qualitatifs

Avant toute mise en service, les mesures de tension des différentes branches permettent de desceller d'éventuelles erreurs de câblage. La tuyauterie peut être démontée au niveau de la tête de forage de façon à observer facilement le débit. Pour un système à pompe triphasée, on inversera systématiquement deux phases après un premier essai de débit, ce qui confirmera le bon sens de rotation de la pompe. L'inspection du générateur consistera à un contrôle mécanique puis électrique. Le serrage de toute la boulonnerie, de la fixation des boîtiers et des câbles sera passé en revue. Du côté électrique, il s'agira de contrôler les éventuelles erreurs de branchement et, en même temps, de vérifier la qualité des connexions en exerçant une traction sur les brins et en vérifiant que l'isolant n'est pas pincé dans le connecteur. En complément, on pourra dévisser quelques connexions pour vérifier, avec une pige, que la partie dénudée du brin correspond à la profondeur totale du connecteur.

Mesures de performance

Deux types de mesures peuvent être effectués : instantanées (puissance) ou cumulées (énergie). Les mesures instantanées sont, en fait, des vérifications de points de fonctionnement annoncés par le fournisseur, elles sont plus rapides mais ne donnent qu'une présomption de bonne performance.

Du côté hydraulique, on mesurera la HMT avec le tube d'air et le manomètre en sortie du forage. On admet généralement que la perte de charge dans la colonne montante (de 1 1/4 à 2 pouces de diamètre) est négligeable. Le débit sera mesuré par la lecture chronométrée du compteur ; il est quelquefois possible de vérifier sa précision par remplissage d'un récipient de 200 litres après le compteur.

La mesure d'ensoleillement se fera avec un solarimètre ou, à défaut, une cellule étalon et un voltmètre, elle sera complétée par la mesure de température ambiante à l'ombre des modules.

Il faudra ensuite se recalcr sur les conditions pour lesquelles les données du constructeur sont disponibles. Pour les HMT, débits et ensoleillement, on peut utiliser la proportionnalité si les écarts sont de l'ordre de 10 %. Par exemple, si Q_m , H_m et E_m sont le débit, la HMT et l'ensoleillement mesurés et H_r et E_r les conditions de références du constructeur, le débit Q à comparer avec ce qui est annoncé pour ces références sera :

$$Q = Q_m \times H_m / H_r \times E_r / E_m$$

Le cumul des imprécisions de mesure fait que l'on ne peut pas porter de jugement pour des écarts de débits allant jusqu'à 20 %.

Il est beaucoup plus intéressant de **faire des mesures d'énergie**, ce qui reflète la vérité : peu importe, en effet, d'avoir tel débit à tel ensoleillement, le résultat escompté est d'avoir le volume annoncé sur une journée complète.

La HMT prise sera celle mesurée à midi solaire. L'opération consiste alors à mesurer sur une journée complète l'ensoleillement et le volume d'eau pompé ; il faudra donc disposer d'un solarimètre intégrateur. Pour le volume, on mesurera de préférence les niveaux d'eau dans le réservoir le matin et le soir. On se recalcrera sur les conditions de référence de HMT et d'ensoleillement comme il a été vu précédemment. Un écart de volume de 10 % est alors admissible.

4

EXPLOITATION ET ENTRETIEN

4.1 EXPLOITATION : RETOURS DE TERRAIN

On reconnaît maintenant et presque partout, que l'eau potable issue de moyens mécaniques ne peut plus être gratuite pour les populations rurales et, d'autre part, qu'un service public, devoir de l'État vis-à-vis des citoyens, ne peut dépendre de l'organisation fragile de bonnes volontés locales.

L'exploitation d'un service marchand rentre par définition dans un schéma commercial et tous les intervenants de la chaîne doivent apporter une plus-value et avoir un intérêt financier à ce que le système fonctionne. L'implication du secteur privé n'est cependant pas encore partout opérationnelle.

Du côté des consommateurs, à de très rares exceptions, le terrain a montré que le paiement de l'eau au forfait était un échec. Ses quelques avantages (paiement à la saison des récoltes) sont largement dépassés par des conséquences fâcheuses en terme de gâchis d'eau : il est tout à fait révélateur de voir dans des zones de vente au forfait, des robinets qu'on ne ferme même plus entre deux remplissages de bassines.

La professionnalisation du service de l'eau devrait, le plus souvent possible, être couplée à celle de l'électricité, voire à d'autres services ruraux. Si, de façon isolée, ces services ont une rentabilité douteuse ou tout au moins fragile, combinés, ils peuvent se compléter et être source d'emplois de façon pérenne.

4.2 ENTRETIEN

L'entretien ne devrait pas consister à compenser de façon périodique les conséquences d'une mauvaise conception et d'une mauvaise installation.

*Photo 36
Extraction manuelle
d'une pompe
lors d'une visite
de maintenance
au Mali*



Le générateur solaire, ne comportant pas de batterie, ne demande en principe qu'un nettoyage périodique des modules. Le forage étant exempt de sable, la pompe ne sera remplacée qu'au bout de sa durée de vie normale (8 à 10 ans), l'électronique aura une durée de vie similaire en climat chaud. C'est le reste des infrastructures qui n'est pas spécifique à l'énergie solaire qui demande le plus d'entretien au jour le jour : réparation de fuites, remplacement de robinets, de compteurs, etc. Toutes les parties du système sont accessibles si ce n'est la pompe. L'utilisation de tuyauterie de refoulement souple peut offrir des facilités d'installation comme d'extraction (à condition de se munir de quelques équipements comme le proposent les fournisseurs).

La réalité de terrain n'est pas si simple. Si l'installation a mis en jeu deux entreprises (une pour le pompage, l'autre pour les infrastructures), il est difficile de faire assurer l'entretien de l'ensemble par une seule des deux qui n'a pas l'ensemble des deux compétences.

Pour le générateur photovoltaïque, il ne s'agit en principe que de vérifications de routine (la bonne fixation des câbles et le bon serrage des connecteurs) et les utilisateurs (et clients) ne sentent pas le résultat de l'opération. Du côté de la pompe, soit elle est à replacer car elle a atteint sa durée de vie, soit les problèmes viennent du forage, ce qui théoriquement dégage la responsabilité du pompiste. En théorie, le changement des parties électromécaniques (pompe et électronique de commande) pourrait faire l'objet d'une maintenance préventive.

Du côté des infrastructures, le besoin de maintenance se pose au contraire à tous niveaux : nettoyage du réservoir, entretien des vannes et autres accessoires, curage du réseau, réparation des fuites, changement des robinets, curage des évacuations des bornes-fontaines, etc.

Dans les AEP avec pompage solaire, la maintenance a, jusqu'à présent, trop mis l'accent sur la partie pompage ; un rééquilibrage est sûrement nécessaire et il serait plus avantageux que l'ensemble soit confié à une seule entreprise. L'aboutissement serait peut-être que cette même entreprise soit également chargée de la gestion des points d'eau.

BIBLIOGRAPHIE

TECHNOLOGIES EUROPÉENNES DU POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Hubert Bonneviot, Michel Courillon et Yves Maigne. Fondation Énergies pour le Monde. 2004.

RECOMMANDATIONS POUR LES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES DE POMPAGE ET DE POTABILISATION

Ouvrage collectif, IES-UPM, Fondem, Association Tichka. 2003.

LE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Ouvrage collectif, IEPF, Université d'Ottawa/EIER/CREPA. 1998.

WATER FOR BASIC NEEDS

Lens Abrams. OMS.

TRAINING BOOKLET BUILDERS AND TECHNICIANS

Interaide. 2002.

CONCEVOIR ET GÉRER UN PETIT RÉSEAU D'ADDUCTION D'EAU

Programme Solidarité Eau. 1997.

L'EAU POUR LES HOMMES, L'EAU POUR LA VIE

UNESCO. 2003.

HYDROGÉOLOGIE

Pierre-Alain Roche. École nationale des Ponts et Chaussées.

HYDROGÉOLOGIE

V. Merrien-Soukatchoff. École des Mines de Nancy. 2003.

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

Pierre Stouff. IUFM Bretagne.

HYDROGÉOLOGIE

Revaux. Université de Pau.

QUALITÉ ET GESTION DES EAUX

J. Beauchamps. Université de Picardie. 2003.

LE FORAGE D'EAU

A. Mabillot. 1998.

WATER WELLS

M. Detay. 1993.

WATER MANUAL

UNHCR. 1992.

A HANDBOOK OF GRAVITY-FLOW WATER SYSTEMS

Thomas D Jordan Jnr. 2000.

A WATER HANDBOOK

Unicef. 1999.

COMPTEURS D'EAU

Documentation Desbordes

SOLAR PUMPING STANDARD TECHNICAL SPECIFICATION

Energy & Development Group. 1998.

SOLAR PUMP – HANDBOOK FOR WATER POINT CARETAKER

Directorate of Rural Water Supply. Namibie. 1996.

INSTALLATION MANUAL

Mono Pumps (Africa) RSA. 1985.

ADDUCTION D'EAU POTABLE EN MILIEU RURAL. GUIDE DES PROJETS

BURGEAP. 2000.

EAU POTABLE ET ASSAINISSEMENT – PRATIQUES

Interaide. 1998.

ÉLÉMENTS D'HYDRAULIQUE GÉNÉRALE

ENSG Nancy. J. P. Laborde. 1977.

Les partenaires du projet :



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 Politecnica 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



Association Tichka
9A, avenue Mohamed VI
Quartier El Bahja
Quarzazate
Tél. / Fax : (212) 044 88 43 98
E-mail : asso.tichka@menara.ma