



**ETUDE ET DIMENSIONNEMENT DES SYSTEMES DE POMPAGE
PHOTOVOLTAÏQUE DANS LES LOCALITES RURALES DU
BENIN : CAS DE ADJAKPATA**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC LE GRADE
DE MASTER, SPECIALITE GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 27 Juin 2017 par :

LAFIA SEIDOU Imorou

Travaux dirigés par :

Dr. Daniel YAMEGUEU

Enseignant-chercheur, Chef du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie
(LESEE), 2iE

M. DEDO K. Donald

Chef de la Cellule Environnementale de l'ABERME

M. ODJO Cyriaque

Directeur de la Maîtrise d'Energie de l'ABERME

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr. Y. Moussa SORO**

Membres et correcteurs : **Dr. Ahmed BAGRE**

Dr. Daniel YAMEGUEU

Promotion [2015/2016



Institut International d'Ingénierie Rue de la Science - 01 BP 594 - Ouagadougou 01 - BURKINA

FASO Tél. : (+226) 50. 49. 28. 00 - Fax : (+226) 50. 49. 28. 01 - Mail : 2ie@2ie-edu.org - www.2ie-edu.org

DEDICACES

Je dédie ce mémoire :

- ❖ A mon très cher et regretté papa, feu LAFIA Seidou
- ❖ A ma mère BOUKARI Fatouma, pour son soutien, ses conseils et bénédictions à mon égard ;
- ❖ A mon oncle LAFIA Sacca et son épouse ZIME YERIMA Lamatou Doué pour leurs soutiens moral et financier durant mon cursus scolaire et universitaire ;
- ❖ A tous mes frères, sœurs et cousins ;
- ❖ A toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à notre réussite scolaire et universitaire.

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Je remercie nos enseignants et encadreurs de l'Institut International de l'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) de Ouagadougou pour leurs encadrements, conseils et soutiens durant notre formation.

J'exprime en particulier toute ma gratitude et ma reconnaissance à l'endroit de mon maître de mémoire, **Dr Daniel YAMEGUEU**, Enseignant-chercheur en Génie Energétique et chef du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) à 2iE, pour son accompagnement, ses conseils et ses orientations qui ont beaucoup contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie très sincèrement mes maîtres de stage Monsieur **DEDO K. Donald**, Ingénieur des Services Techniques des Travaux publics et Monsieur **ODJO Cyriaque**, Ingénieur en énergie renouvelable, pour leur disponibilité sans faille tout au long du processus d'élaboration de ce document.

Je tiens enfin à remercier tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réussite de ma formation et à la réalisation de ce mémoire.

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

A	Ampère
ABERME	Agence Béninoise d'Electrification Rurale et de Maîtrise d'Energie
ASECNA	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
FCFA	Franc de la Communauté Financière Africaine
HMT	Hauteur Manométrique Totale
I	Intensité du courant
I-V	Courant -Tension
INSAE	Institut National de la Statistique et de l'analyse Economique
Km	kilomètre.
kW	Kilo Watt
kWc	Kilo Watt crête
kWh	Kilo Watt heure
m ³	Mètre cube
m ³ /j	Mètre cube par jour
m ³ /h	Mètre cube par heure
mm	millimètre
OMS	Organisation Mondiale de la santé
Pc	Puissance crête
PV	Photovoltaïque
SONEB	Société Nationale des Eaux du Bénin
UEMOA	Union Economique et Monétaire Ouest Africaine
V	Volt
Vcc	Volt tension continu
Vac	Volt tension alternative
W	Watt
Wc	Watt crête
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES	iv
RESUME.....	ii
ABSTRACT	iii
INTRODUCTION.....	1
I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DU PROJET	2
I.1. Présentation de la structure d'accueil	2
I.1. Présentation du Projet.....	2
I.1.1. Contexte et justification	2
I.1.1. Objectifs de l'étude	3
II. METHODOLOGIE DE RECHERCHE D'INFORMATION.....	4
II.1. Etude bibliographique.....	4
II.1.1. Différentes méthodes de pompage photovoltaïque	4
II.1.2. Etude des différents composants du système de pompage photovoltaïque.....	5
II.2. Visite sur le terrain	10
II.2.1. L'enquête par ménage	11
II.2.2. L'entretien	11
II.2.3. L'observation directe.....	11
II.3. Traitement d'information	11
III. METHODOLOGIE DE CONCEPTION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE	12
III.1. Besoins journaliers en eau	12
III.2. Dimensionnement et choix de la pompe.....	14
III.3. Energie solaire disponible et dimensionnement du champ photovoltaïque.....	17
IV. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE ET RESULTATS	19
IV.1. Présentation de la localité d'étude	19
IV.1.1. Situation géographique de zone d'étude.....	19
IV.1.2. Cadre physique et naturel	21
IV.1.3. Situation socio-économique	21
IV.2. Présentation du système d'alimentation en eau actuel.....	21
IV.3. Estimation des besoins journaliers en eau.....	22
IV.4. Dimensionnement et choix de la pompe	23
IV.5. Estimation du potentiel d'énergie solaire et dimensionnement du champ photovoltaïque	32
a) Estimation du potentiel d'énergie solaire	32

b) Dimensionnement du champ photovoltaïque	33
IV.6. Dimensionnement du réservoir d'eau	35
IV.7. Choix des équipements de protection	36
IV.8. Sections de câble	38
IV.9. Choix des équipements hydrauliques.....	40
V. ANALYSE ECONOMIQUE	45
V.1. Coût initial	45
V.2. Coût d'exploitation	46
V.3. Coût du m ³ d'eau	48
VI. ANALYSE ET DISCUSSION	49
VII. RECOMMANDATIONS	50
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	52

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les avantages et inconvénients des pompages au fil du soleil et avec batteries [3 ;4].....	5
Tableau 2 : Caractéristiques des différentes technologies des cellules PV [5].....	6
Tableau 3 : Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges [3 ;6]	8
Tableau 4 : Consommation spécifique donnée par l'OMS [6]	13
Tableau 5 : Méthode de calcul de la capacité utile du réservoir [13].....	16
Tableau 6 : Irradiation moyenne mensuelle et annuelles sur les six stations synoptiques	17
Tableau 7 : Caractéristiques techniques du forage et de la pompe à motricité humaine.....	22
Tableau 8 : Calcul de la projection de la population et de la consommation à l'horizon 2041	23
Tableau 9 : Dimensionnement de la conduite d'adduction	26
Tableau 10 : Coefficient de singularité des éléments hydrauliques de la conduite d'adduction.....	28
Tableau 11 : Calcul de perte de charges	29
Tableau 12 : Calcul de la hauteur manométrique totale	29
Tableau 13 : Valeur du coefficient K en fonction de la nature de la conduite [9].....	30
Tableau 14 : Etude du coup de bélier pour la conduite de refoulement	31
Tableau 15 : Caractéristiques techniques du moteur pompe et du contrôleur.....	32
Tableau 16 : Caractéristique du panneau PV choisi	34
Tableau 17 : Calcul de la puissance installée et la configuration du générateur PV	34
Tableau 18 : Vérification de la compatibilité du contrôleur avec la configuration des panneaux PV	35
Tableau 19 : Section nominal des câbles [6].....	39

Tableau 20 : Valeur du coefficient de pointe horaire selon la taille de la localité [9]	43
Tableau 21 : Dimensionnement de réseau de distribution.....	43
Tableau 22 : Etude du coup de bélier pour la conduite de distribution	44
Tableau 23 : Choix des équipements hydraulique de la conduite d'adduction et de distribution	44
Tableau 24 : Coûts d'investissement.....	46
Tableau 25 : Estimations des durées de vie des composants pour chacun des éléments du système	47
Tableau 26 : Coût du m ³ d'eau.....	49

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC [7]	9
Figure 2 : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC [7]	9
Figure 3 : Schéma du principe de pompage au fil du soleil [8].....	12
Figure 4 : Système de pompage photovoltaïque avec stockage [6].....	14
Figure 5 : Formule de Jules Dipuit [12]	15
Figure 6 : Chaîne de conversion d'un pompage PV au fil du soleil.....	18
Figure 7 : Localisation de la localité Adjakpata	20
Figure 8 : Photo de la pompe à motricité humaine de Adjakpata.....	22
Figure 9 : Schéma du forage de Adjakpata	23
Figure 10 : Cône de rabattement lors du pompage	24
Figure 11 : Schéma du réseau d'adduction.....	27
Figure 12 : Schéma de la configuration des panneaux PV	34
Figure 13 : Chemise de refroidissement.....	38
Figure 14 : Piquet de mise à la terre	38
Figure 15 : Schéma du système d'alimentation de la pompe	40
Figure 16 : Equipement hydraulique de la conduite d'adduction.....	41
Figure 17 : Borne fontaine avec des robinets situés à des hauteurs différentes	42
Figure 18 : Schéma de réseau de distribution.....	42
Figure 19 : Coût du m ³ d'eau dû à l'exploitation	50

RESUME

Le présent travail traite de l'étude et dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du Bénin. Il s'inscrit dans l'optique de contribuer à l'amélioration des conditions d'accès à l'eau potable en milieu rural. La présente étude cible la localité d'Adjakpata comme lieu pilote du projet. En effet, dans cette localité l'hydraulique villageoise mise en place pour l'approvisionnement en eau potable des populations a un faible débit d'exploitation et n'arrive pas à satisfaire la demande en eau de la population, malgré la disponibilité de l'eau dans le forage.

Pour ce faire, nous avons réalisé une enquête et une interview auprès de la collectivité locale de gestion du système d'hydraulique villageois de la localité afin de collecter les données indispensables pour l'évaluation des besoins en eau et la prise en compte de l'avis des populations dans le cadre de la réalisation du système de pompage photovoltaïque.

L'analyse économique a permis d'évaluer les coûts inhérents de l'installation du système de pompage par l'énergie solaire photovoltaïque. Les principaux coûts évalués sont : le coût d'investissement, le coût de renouvellement, les coûts d'entretien et de maintenance. Le coût d'investissement dans le cadre de la réalisation est de **7 331 122 FCFA** pour un besoin de 21,22 m³/jour.

Le coût du mètre cube d'eau obtenu avec le système PV est de 84 FCFA, alors que la population de la localité d'étude paie 400 FCFA pour cette même quantité avec le système à motricité existant. De cette comparaison, il ressort que le système de pompage d'eau par l'énergie solaire photovoltaïque est la meilleure solution énergétique, la plus économique à adopter en termes de coût du mètre cube d'eau pour la localité d'étude.

Mots clés :

- Pompage photovoltaïque
- Forage
- Système d'hydraulique villageoise
- Analyse économique
- Adjakpata

ABSTRACT

Deals with the study and sizing of photovoltaic pumping systems in the rural localities of Benin. It aims to ameliorate the access condition of drinking water in rural area. This study focus on the locality of Adjakpata as the place of pilot project. Indeed, in this locality, hydraulic villagers set up for supplying the population in drinking water has a low exploitation debit and this supplying can not satisfy the water demand of the population despite the availability of water in the drilling.

Then, we have realized a survey and an interview nearby the local collectivity of managing the hydraulic villagers' system in order to collect the data necessary for the assessment of water needs and taking into account the opinions of the populations in the framework of the realization of the photovoltaic pumping system.

Economic analysis allowed to evaluate the inherent cost of installation of the pumping system by photovoltaic solar energy. The main costs evaluated are: the investment cost, renewal cost, servicing and maintenance cost. The capital cost of the project is FCFA **7,331,122** for water need of 21,22 cubic meter per day.

The obtained cost of the cubic meter of water with PV system is 84 FCFA, yet the population of the locality of the study pays 400 FCFA for this same quantity existing human traction. From this comparison, it appears that the water solar pumping system is the best energy solution, the most economical to be adopted in terms of cost of the cubic meter of water for the locality of the study.

Keywords:

- Photovoltaic pumping
- Drilling
- hydraulic villagers system
- Economic analysis
- Adjakpata

INTRODUCTION

L'eau source de vie pour l'homme, les animaux et la végétation, est l'une des préoccupations majeures du 21^{ème} siècle pour toute la planète et surtout dans les régions où elle se fait rare. Ainsi, le Bénin a mobilisé ses efforts et ses moyens pour assurer l'approvisionnement en eau dans certains milieux ruraux, par la réalisation de cinq-cents (500) forages équipés de systèmes à motricité humaine dans les localités rurales grâce à l'appui de plusieurs partenaires techniques et financiers ces dix dernières années [1]. Les pompes à motricité humaine installées ont un débit d'exploitation faible qui n'arrive pas à satisfaire la demande en eau de la population due à une augmentation démographique rapide.

Les immenses ressources en eau souterraine dont disposent les forages, et qui ne sont pas encore exploitées de façon optimale, nécessitent l'usage de l'électricité, qui elle-même n'est guère disponible dans ces localités rurales.

Dans le souci d'améliorer la qualité de service d'approvisionnement en eau potable, le Gouvernement du Bénin à travers le Ministère d'Energie de l'Eau et des Mines (MEEM) a décidé de mettre en œuvre le programme « Energie et Eau pour la vie » [2]. L'une des composantes de ce programme consiste à substituer les pompes à motricité humaine installées dans les 500 forages par des systèmes de pompage photovoltaïque. C'est dans ce sens que la présente étude propose sa contribution à cet effort de développement à travers le thème « Etude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du Bénin : cas de Adjakpata. ». L'Etude de ce projet cible quatre (4) localités rurales du Bénin : Toumakpénou, Sonrigourou, Djabata et Adjakpata. Notre étude se portera sur la localité Adjakpata, situé au sud du Bénin dans la commune d'Allada, Département de l'Atlantique.

Le présent mémoire traite plus particulièrement des aspects techniques et économiques d'une solution de pompage d'eau en utilisant une source d'énergie solaire photovoltaïque. Une étude comparative avec le système à motricité existant dans la localité rurale ciblée, montrera l'importance de ce type d'énergie nouvelle dans l'application de système de pompage d'eau.

I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DU PROJET

I.1. Présentation de la structure d'accueil

Créée en République du Bénin par le décret n°2004/151 du 29 mars 2004, l'Agence Béninoise d'Electrification Rurale et de Maîtrise d'Energie (ABERME) ; est un établissement public à but non lucratif, placée sous la tutelle du Ministère de l'Energie, de l'Eau et des Mines (MEEM). Elle a pour mission de mettre en œuvre la politique de l'Etat dans les domaines d'électrification rurale et de la maîtrise d'énergie. A ce titre, elle est chargée de faire les études stratégiques, d'élaborer les programmes nationaux et régionaux de développement, de coordonner et de suivre leur mise en œuvre. L'ABERME est également chargée de réaliser les projets pilotes de démonstration ; de proposer les mesures d'incitation et d'encouragement susceptibles d'aider à la promotion de la maîtrise de l'énergie et de l'investissement privé dans l'électrification rurale ; de contribuer à la recherche et au développement de solutions technologiques novatrices et à moindre coût.

Son siège est à Cotonou, quartier Fifadji Chabigon. Il peut être transféré partout sur le territoire national sur proposition du Ministère de l'Energie, de l'Eau et des Mines.

Dotée de la personnalité morale et de l'autonomie organisationnelle et financière, l'ABERME déploie 47 personnel. Elle dispose d'un organigramme qui met en relief les différentes directions et services ainsi que leurs attributions respectives. Cet organigramme est présenté en annexe 1.

L'actuel Directeur Général de l'ABERME est **Mr Jean-Francis TCHEKPO**

I.1. Présentation du Projet

I.1.1. Contexte et justification

L'approvisionnement en eau des populations et du cheptel constitue un défi majeur dans les pays en voie de développement. Particulièrement au Bénin, le taux d'accès à l'eau potable en 2006 est de 35% en zone rurale. Pour y remédier un tant soit peu, le Gouvernement du Bénin a lancé en 2008 à travers le Ministère de l'énergie, de l'Eau et des Mines (MEEM) un vaste programme d'hydraulique villageoise qui a permis de réaliser 500 forages équipés des pompes à motricité humaine dans quelques localités rurales du Bénin grâce à l'appui de plusieurs partenaires techniques et financiers [1].

La population béninoise en zone rurale est de 4 139 781 habitants (soit 61,1% de la population totale) au recensement de 2002 de l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE). Avec l'évolution galopante de la population en milieu rural, il en ressort

une forte demande en eau. Ces pompes à motricité humaine installées en zone rurale n'arrivent plus à satisfaire la demande de la population rurale à cause de leur débit d'exploitation limité à $1\text{m}^3/\text{h}$, ce qui engendre une longue file d'attente autour d'un même point d'eau.

Les pompes à motricité humaine constituent également un souci pour certaines couches de la population, notamment les femmes et les enfants qui doivent exercer un effort physique pour s'approvisionner en eau.

Ainsi pour faciliter les conditions d'accès à l'eau potable en réduisant les souffrances de la population lors du pompage d'eau, la longue file d'attente et d'améliorer la santé publique, le Gouvernement du Bénin propose de remplacer ces systèmes à motricité humaine par des systèmes de pompage solaire photovoltaïque.

L'Agence Béninoise d'Electrification Rurale et de Maîtrise d'Energie (ABERME) a été ainsi retenue pour mener une étude pilote dans le cadre de la substitution de ces pompes installées dans 500 forages. Le présent mémoire qui s'inscrit dans cette optique, s'intitule « **Etude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du Bénin : cas de Adjapkata** ».

I.1.1. Objectifs de l'étude

Le but de cette étude se traduit par un objectif général, subdivisé en plusieurs objectifs spécifiques.

I.1.1.1. L'objectif général

L'objectif principal de ce projet est la réalisation d'une étude de substitution des pompes à motricité humaine par des systèmes de pompage solaire photovoltaïque pour permettre à la population d'avoir facilement accès à l'eau potable.

I.1.1.2. Les objectifs spécifiques

Spécifiquement, il s'agira de :

- Collecter les données ;
- Estimer des besoins journaliers en eau de la localité ;
- Réaliser les études techniques du système de pompage PV ;
- Faire une analyse économique.

II. METHODOLOGIE DE RECHERCHE D'INFORMATION

Pour atteindre les objectifs fixés, nous avons procédé dans un premier temps à la recherche documentaire sur le thème, ensuite une visite sur le terrain et enfin le traitement des informations et données collectées.

II.1. Etude bibliographique

Le choix du système de pompage dépend non seulement les contraintes techniques (type de pompe, énergie, hauteur de refoulement, débit, turbidité de l'eau) mais aussi les contraintes liées au contexte socio-économique (système de pompage accepté par la population, fiabilité, disponibilité des pièces détachées, le coût, et la facilité de maintenance des pompes).

Cette étude bibliographique donne un aperçu sur les différents types de systèmes de pompage photovoltaïque, ses propriétés technologiques et ses composants principaux.

II.1.1. Différentes méthodes de pompage photovoltaïque

Pour pomper l'eau avec un système photovoltaïque, deux (2) techniques sont possibles [3] Pour la première technique, l'énergie solaire est consommée en « temps réel » ; on parle alors d'un « pompage au fil du soleil (sans batterie) ». Cette technique permet d'utiliser directement une puissance continuellement variable, celle issue des modules photovoltaïques. Le débit de pompage va donc évoluer avec l'intensité de l'ensoleillement. En effet dans cette première technique, c'est l'eau elle-même qui est pompée et stockée lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir à une hauteur au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin.

La deuxième technique consiste à utiliser un stockage d'énergie cette fois-ci, via des batteries (pompage avec batterie). Ces batteries stockent l'énergie produite par les cellules photovoltaïques lors des périodes d'ensoleillement afin de pouvoir restituer cette énergie pour pomper l'eau en temps voulu. Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin.

Le pompage au fil du soleil doit être privilégié systématiquement, compte tenu du coût des batteries et du maillon faible qu'elles représentent dans un système photovoltaïque du fait de leur durée de vie limitée. Néanmoins, il présente certains inconvénients qu'il ne faut pas négliger lors de son choix (voir tableau 1).

Les avantages et inconvénients des deux (2) techniques de pompage photovoltaïque sont résumés dans le tableau 1 ci-après :

Tableau 1 : Les avantages et inconvénients des pompages au fil du soleil et avec batteries [3 ;4]

Méthodes de pompage	Avantages	Inconvénients
Pompage au fil du soleil	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Economie du coût des batteries et par conséquence leur maintenance ▪ Système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux ▪ Meilleur rendement énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Perte d'énergie au début et à la fin de la journée ▪ Le débit de la pompe n'est pas constant et le rabattement du forage peut-être trop élevé durant certaines périodes de la journée.
Pompage avec batterie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Débit de la pompe régulier et à pression fixe ▪ Possibilité de pomper l'eau lorsque le soleil est absent. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût élevé d'entretien et maintenance des batteries ▪ Changement des batteries tous 5 à 7 ans ▪ Les batteries introduisent un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30% de la production d'énergie. ▪ Coût élevé du système photovoltaïque

II.1.2. Etude des différents composants du système de pompage photovoltaïque

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant de l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable. La performance du pompage photovoltaïque dépend des caractéristiques du site (ensoleillement, température, obstacles géographiques), du rendement des modules photovoltaïque, mais aussi des caractéristiques des autres équipements (modules photovoltaïque, onduleur, moteur, pompe, etc..).

Le système de pompage photovoltaïque est généralement composé de :

- Le générateur photovoltaïque ;
- Le groupe électropompe ;
- L'électronique de commande et de contrôle ;
- La partie stockage le cas échéant ;

II.1.2.1. Le générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque peut être constitué d'un ou plusieurs modules photovoltaïques appelé champ photovoltaïque destiné à produire de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire.

En effet, le champ photovoltaïque est une association en série et parallèle de modules photovoltaïques selon la puissance et la tension d'utilisation. Sa caractéristique (I-V) est similaire à celle d'un module et les cellules sont protégées par des diodes série (anti-retour) et des diodes parallèle (by-pass). Il constitue la surface de captage de l'énergie solaire et de production d'électricité.

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui convertissent les irradiations provenant du soleil en électricité à courant continu. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium mono ou poly cristallin, amorphe, tellure de Cadmium(CdTe), et d'Arséniure de Gallium (GaAs).

La comparaison des différentes technologies de fabrications est présentée dans le tableau ci-après :

Tableau 2 : Caractéristiques des différentes technologies des cellules PV [5]

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisation
Silicium mono cristallin	12 à 18 % (24.7% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très performant ▪ Stabilité de production d'énergie ▪ Méthode de production couteuse 	Modules pour toits, façades...
Silicium poly cristallin	11à 15 % (19.8% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adapté à la production à grande échelle ▪ Stabilité de production d'énergie ▪ Moins cher que monocristallin 	
Amorphe	5 à 8 % (13% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fonctionnement à faible luminosité, à ombrage partiel ▪ La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est 15 à 20 % supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois 	Appareils électroniques (montres, calculatrice...)

Tellure de Cadmium (CdTe)	8 % (16 % en laboratoire)			
Arséniure de Gallium (GaAs).	18 à 20 % (27.5% en laboratoire)		Lourd ; fissure facilement	Système de concentrateurs aérospatiaux (Satellites)

Les caractéristiques d'un module photovoltaïque sont :

- **La puissance crête P_c** : C'est la puissance maximale produite par un module photovoltaïque dans les conditions standard : ensoleillement de 1000W/m^2 à l'horizontale, température ambiante 25°C , masse d'air optique (AM) égale à 1,5
- **La caractéristique (I-V)** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension.
- **La tension à circuit ouvert V_{co}** : Tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairement "plein soleil"
- **Le courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par le module en court-circuit pour un éclairement "plein soleil".
- **Le point de fonctionnement optimum (U_{opt} , I_{opt})** : Point où la puissance est maximale ; $P_m = U_{opt} \times I_{opt}$
- **Le rendement maximal** : Rapport entre la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Le facteur de forme** : $f = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}}$

II.1.2.2. Le groupe électropompe

Le groupe électropompe est constitué d'un moteur électrique et d'une pompe.

a) Pompe

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide.

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. A part ces deux classifications on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : la pompe à aspiration et la pompe à refoulement [3].

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle **pompe à aspiration** est limitée à une valeur théorique de 9,8 (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 à 7 mètre. Ces pompes sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Elles doivent également

être amorcées c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.

Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface, dans ce cas la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant le moteur à la pompe qui engendre des pertes mécaniques.

Les pompes volumétriques transmettent l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de va et vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. Ces pompes aspirent le fluide par l'accroissement d'un volume puis refoulent par diminution de ce même volume.

Les pompes centrifuges transmettent l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinée avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression.

Tableau 3 : Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges [3 ;6]

Les pompes volumétriques	Les pompes centrifuges
<ul style="list-style-type: none"> -Faible débit et une grande hauteur manométrique totale -Le débit et la puissance absorbée sont proportionnels à la vitesse -Le couple est fonction de la HMT -Le couple de démarrage est de 3 à 5 fois le couple nominal 	<ul style="list-style-type: none"> -Grand débit -Le débit est proportionnel à la vitesse lorsqu'elle atteint une certaine valeur -La puissance absorbée est proportionnelle au cube de la vitesse -Le Couple est fonction du carré de la vitesse -La pression est proportionnelle à la vitesse -Couple de démarrage est quasiment nul qui est intéressant dans l'application du système photovoltaïque car la pompe peut tourner à un faible ensoleillement et le moteur peut avoir une vitesse de rotation rapide, à peu constant.

b) Moteur

Le moteur d'un groupe électropompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans le cas où le moteur est à courant alternatif, un

convertisseur électronique appelé onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant du générateur photovoltaïque en courant alternatif.

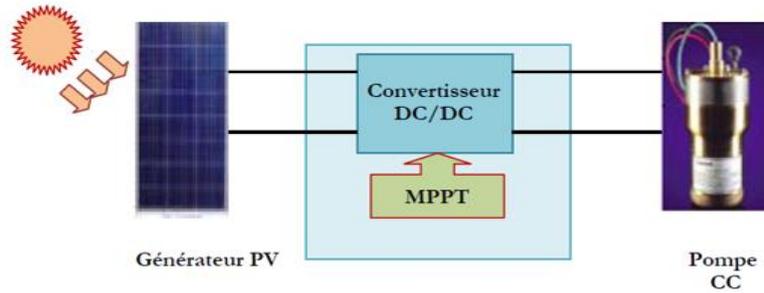


Figure 1 : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC [7]

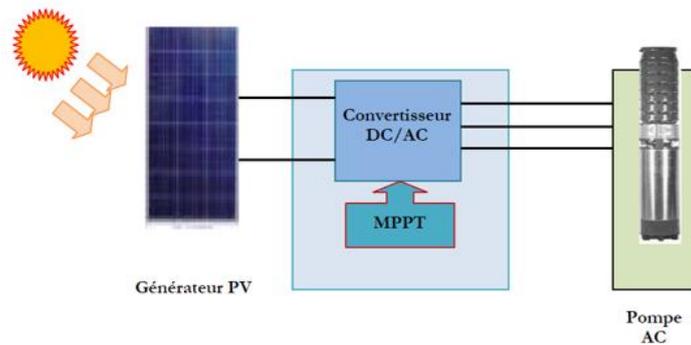


Figure 2 : Diagramme du pompage PV par motopompe à AC [7]

II.1.2.3. L'électronique de commande et contrôle

Le dispositif de commande et de contrôle est assuré par un onduleur ou hacheur.

- **Le convertisseur DC/DC (hacheur)**

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge (pompe alimentée par moteur à courant continu), la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle commandé par son rapport cyclique, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible.

- **Le convertisseur DC/AC (onduleur)**

Le convertisseur DC/AC assure le transfert optimal de puissance du générateur solaire vers le groupe électropompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits. Le rendement de l'onduleur est généralement élevé pour valoriser au mieux l'énergie produite par le générateur. Il est de l'ordre de 95 % au point de fonctionnement nominal [3].

Caractéristiques de fonctionnement les plus importants :

- Tension et courant d'entrée/sortie
- Forme de l'onde
- Limites de la tension d'entrée
- Basse de consommation et haut rendement
- Puissance de sortie
- Capacité de surcharge
- Facilité la réparation et la maintenance
- Fonctionnement dans les points de puissance maximale
- Conditions ambiantes (température de fonctionnement)

II.1.2.4. Stockage

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. Le réservoir ne requiert pas d'entretien complexe et est facile à réparer localement.

Aussi, le système de stockage avec batterie génère un coût additionnel, des problèmes de maintenance des batteries et de l'obligation les remplacer après 3 à 5 ans d'usage. De plus le rendement énergétique est dégradé avec des accumulateurs.

Dans le cas de notre étude, nous retenons la méthode de pompage au fil de soleil car la demande en eau n'est pas régulière dans la localité d'étude, elle se fait notamment pendant la journée.

II.2. Visite sur le terrain

Suite à l'étude bibliographique, une visite de reconnaissance a été effectuée du 13 au 27 décembre 2016 sur les zones d'étude afin de compléter les informations collectées précédemment et bien s'imprégner du contexte d'étude. En effet, elle est faite pour collecter les données nécessaires au dimensionnement du système de pompage et pour échanger avec les chefs des ménages ainsi que le comité de gestion de ces pompes à motricité humaine. Les investigations socioéconomiques sur le terrain ont été menées sous trois (3) formes : l'enquête des ménages, l'entretien et l'observation directe.

II.2.1. L'enquête par ménage

Elle s'est portée spécifiquement sur les ménages qui se trouvent dans la localité d'étude. Elle a permis de déterminer le nombre de personnes et bétails par ménage, d'apprécier et de quantifier le volume d'eau consommé par jour par la population qui exploite le forage. Elle a permis également de connaître les autres sources d'eau alternatives et le niveau économique par ménage.

II.2.2. L'entretien

L'échange avec chaque collectivité locale de gestion de ces pompes à motricité humaine a permis d'apprécier les enjeux liés à la gestion et à la maintenance de ces pompes. Il a permis d'apprécier sur chaque village le degré de mobilisation et d'engouement que suscite la réalisation de système de pompage photovoltaïque chez les populations. Cet entretien a permis également de connaître les différents groupes ethniques en présence, l'organisation du pouvoir local, la structuration du village, les activités économiques et infrastructures socio-économiques.

II.2.3. L'observation directe

Elle a permis de définir le site d'implantation et d'identifier les impacts liés à la matérialisation du système de pompage dans la zone d'étude. Elle a permis également d'inventorier et d'apprécier l'état des différents points d'eau existants de chaque village.

II.3. Traitement d'information

Cette phase a consisté à l'exploitation de l'ensemble de la documentation obtenue au cours de l'étude bibliographique et des informations recueillies sur le terrain. Elle a permis de recenser les informations utiles à l'élaboration du présent document. L'analyse de ces informations nous a permis d'avoir des données nécessaires à :

- L'estimation de la population de la zone d'étude ;
- L'évaluation des besoins en eau ;
- L'avis et attentes des populations sur le système de pompage photovoltaïque à mettre en œuvre.

III. METHODOLOGIE DE CONCEPTION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

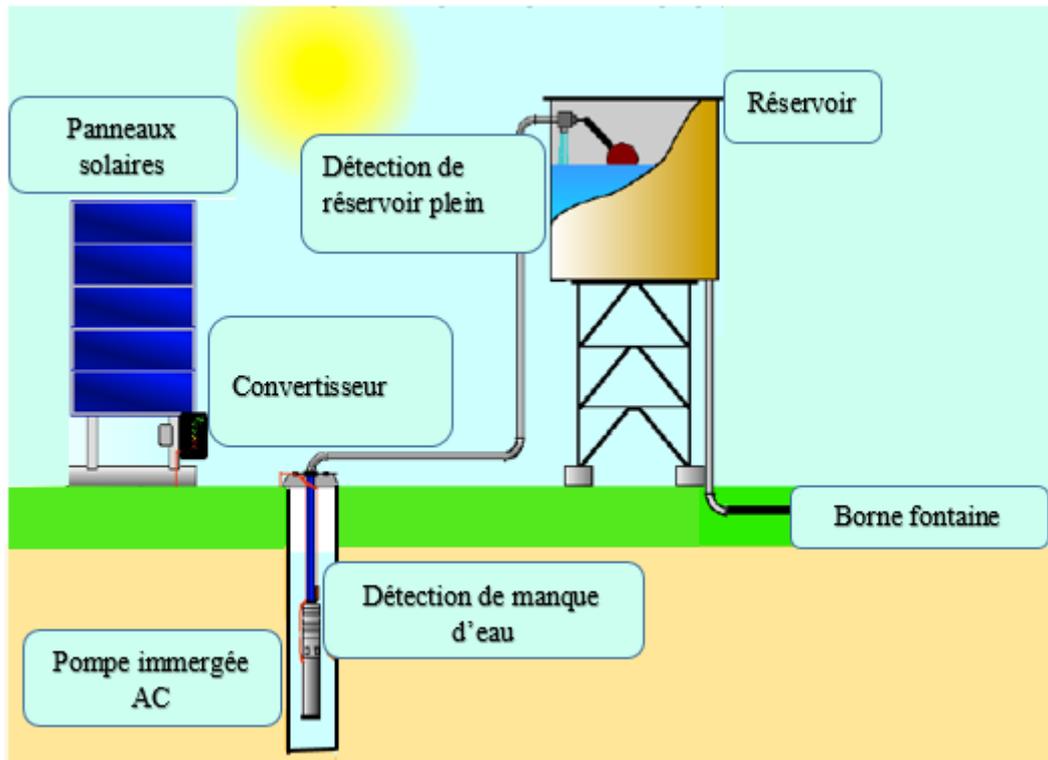


Figure 3 : Schéma du principe de pompage au fil du soleil [8]

Le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque au fil du soleil concerne essentiellement le calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque, le choix de la pompe et le choix du contrôleur répondants au service requis dans les conditions de référence. La démarche analytique adoptée dans le cadre de notre étude s'articule autour de quatre (3) étapes suivantes :

III.1. Besoins journaliers en eau

✚ Détermination de la consommation spécifique (Cs)

L'estimation des besoins en eau constitue la base du dimensionnement de système de pompage solaire photovoltaïque. Elle correspond au débit total nécessaire pour satisfaire les besoins de l'ensemble de la population et du cheptel.

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie. Ainsi les besoins peuvent être estimés sur la base des

enquêtes socioéconomiques ou en se basant sur des ratios de consommation établis par des organismes internationaux tels que l’OMS (voir le tableau 4 ci-dessous).

Tableau 4 : Consommation spécifique donnée par l’OMS [6]

Humain	
5 l/jour	Survie
10 l/jour	Minimum admissible
30 l/jour	Condition de vie normale en Afrique
Animaux	
Bœuf	40 l/jour
Mouton- Chèvre	5l/jour
Cheval	40 l/jour
Âne	20 l/jour
Chameau	20 l/jour (réserve de 8 jours)
Irrigation	
Riz	100 m ³ /jour/ha
Graines	45 m ³ /jour/ha
Canne à sucre	65 m ³ /jour/ha
Coton	55 m ³ /jour/ha

La base des objectifs actuels des organismes de financement pour les besoins unique de l’homme est de 20 litres/jour/personne.

Estimation de la population

L’évaluation du nombre d’habitants se fait sur la base du taux d’accroissement annuel de la population. Pour notre étude, l’horizon du projet est de 25 ans soit l’année 2041. La détermination du nombre d’habitants de l’année 2041 a été faite selon la relation suivante [9] :

$$P_n = P_0(1 + \tau)^n \tag{1}$$

Avec

P_n : nombre d’habitants à l’horizon 2041

τ : taux d’accroissement annuel de la localité

P_0 : nombre d’habitants en 2016

n : durée du projet (25 ans)

Estimation de la demande journalière en eau

Dans notre étude, les demandes journalières sont en général constituées essentiellement de la demande domestique. L'estimation de ces demandes s'est faite selon les formules suivantes :

$$\text{Demande journalière moyenne } D_{jm} (m^3/j) : D_{jm} = 1,1 \left(\frac{C_S \times P_n}{1000} \right) \quad (2)$$

$$\text{Demande journalière de pointe } D_{jp} (m^3/j) : D_{jp} = D_{jm} \times C_{pj} \times C_{ps} \quad (3)$$

Avec

C_S : Consommation spécifique 20 litres/jour/personne.

C_{pj} : Coefficient de pointe journalier généralement compris entre 1,05 et 1,15 [9]

C_{ps} : Coefficient de pointe saisonnière généralement compris entre 1,1 et 1,2 [9]

Les pertes sont estimées à 10 % des besoins journaliers moyens.

III.2. Dimensionnement et choix de la pompe

Détermination du débit horaire de la pompe Q_p en (m³/h)

Pour estimer le débit maximal de la pompe en m³/h, on prend approximativement la valeur de la demande journalière de pointe D_{jp} à l'horizon 2041 qu'on divise par 4,31 qui est le nombre heures d'ensoleillement maximal. Le débit horaire de la pompe est calculé de la manière suivante [8] :

$$Q_p = \frac{D_{jp}}{H_i} \quad (4)$$

Avec

H_i : Nombre d'heure d'ensoleillement (de référence 4,31 h/j)

Calcul de la hauteur manométrique totale (HMT)

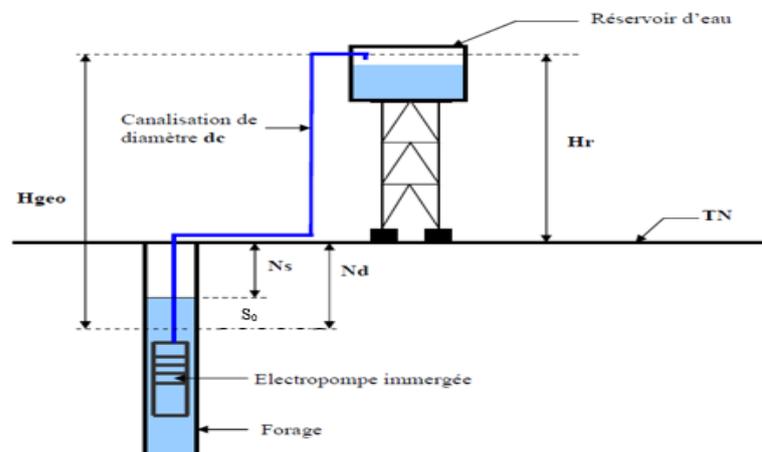


Figure 4 : Système de pompage photovoltaïque avec stockage [6]

La hauteur manométrique totale dépend de la hauteur géométrique d'élévation et des pertes de charge. Les pertes de charge dites de friction dépendent du diamètre, de la longueur, de la rugosité de la conduite, et du débit, tandis que les pertes de charge singulières sont dues à la présence d'accidents sur la canalisation tels que les vannes, les coudes, clapet, les filtres, les débitmètres, etc.

Cette hauteur peut être calculée comme suit :

$$\mathbf{HMT} = \mathbf{H_{géo}} + \mathbf{\sum Pdc} \quad (5)$$

Où

$\sum Pdc$: Pertes de charges (linéaires et singulières).

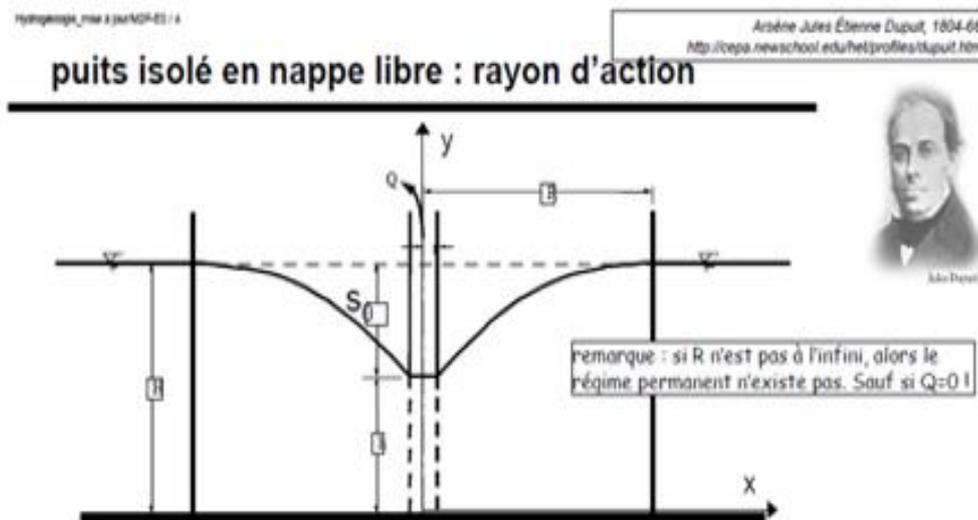
$H_{géo}$: Hauteur géométrique = Niveau dynamique (N_d) + Plan d'utilisation (H_r)

Le niveau statique (N_s) est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage.

Le niveau dynamique (N_d) est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné.

La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement S_0 .

Ce rabattement sera calculé par la formule de **Jules Dupuit** [11 ;12] :



La formule de **Jules Dupuit** :

$$\mathbf{Q} = \frac{\mathbf{\pi K(H^2 - h^2)}}{\mathbf{\ln(\frac{R}{r})}} \quad (6)$$

La formule empirique de **Sichardt** : $\mathbf{R} = \mathbf{3000(H - h)\sqrt{K}}$ (7)

H : Epaisseur de la partie saturée en (m)

Q : Débit de pompage en (m^3/s)

K : Perméabilité du sol en m/s

r : Rayon du forage

R : Rayon d'action ou d'influence du cône de dépression en (m)

h : Hauteur d'eau dans le forage pendant le pompage en (m)

S_0 : Rabattement (m)

Après avoir déterminé la HMT et le débit de pompage, on se réfère aux catalogues des constructeurs des pompes pour choisir la pompe qui répond aux exigences.

✚ Détermination de la capacité de stockage

Le réservoir sert non seulement à stocker de l'eau mais il constitue aussi un régulateur de débit. Ainsi, la capacité utile du réservoir sera déterminée pour qu'elle puisse permettre de stocker les excédents de pompage pendant les heures de faibles consommations et de compenser le déficit entre le pompage et la consommation.

Pour la détermination de la capacité utile du réservoir, nous avons utilisé la méthode de calcul par le tableau.

Tableau 5 : Méthode de calcul de la capacité utile du réservoir [13]

Période(h)	0	2	4	6	10	14	16	18	22	24
Q_a (1)										
V_a (2) Par tranche										
V_a cumulé (3)										
Q_c (4)										
V_c cumulé par tranche(5)										
V_c cumulé (6)										
Contenance du réservoir (7) = (3) - (6)										

Q_a (m^3/h) : Débit d'eau d'adduction, reporté dans les différentes tranches horaires délimitées.

V_a cumulé par tranche (m^3) : Volume d'eau envoyé au réservoir cumulé par tranche horaire = $Q_a \times$ nombre d'heures dans la tranche.

V_a cumulé (m^3) : Volume d'eau d'adduction cumulé.

Q_c (m^3/h) : Débit horaire d'eau consommée, Q_c est très variable et difficile à maîtriser. Pour notre étude, nous avons estimé ce débit par des suppositions.

Vc cumulé par tranche (m³) : Volume d'eau consommé cumulé par tranche horaire = Qc x nombre d'heures dans la tranche.

Vc cumulé (m³) : C'est le cumule du volume d'eau consommée.

Contenance du réservoir : Les chiffres portés verticalement donnent les déficits et excédents qu'il y aurait si le réservoir n'existait pas. Donc la capacité utile du réservoir est déterminée par la formule ci-après :

$$\text{Capacité utile (m}^3\text{)} = |\text{Déficit max}| + \text{Excédent max} \quad (8)$$

III.3. Energie solaire disponible et dimensionnement du champ photovoltaïque

Energie solaire disponible

Au Bénin, l'irradiation journalière moyenne sur l'année, varie de 3,9 kWh/m²·jour au Sud et 6,1 kWh/m²·jour au Nord. Les villes ayant les plus fort taux d'irradiation solaire sont Natitingou et Kandi avec des pics respectifs de 9,08 kWh/m²·jour et 9,61 kWh/m²·jour.

Les valeurs mensuelles moyennes de l'insolation sur les six stations synoptiques (tableau 6) ont été obtenues de la banque de données du service météorologique de l'ASECNA, issue d'une compilation sur une trentaine d'années (1961 à 1990) de relevés climatologiques relatifs à l'insolation moyenne, aux températures minimales et maximales moyennes, à la vitesse moyenne du vent.

Tableau 6 : Irradiation moyenne mensuelle et annuelles sur les six stations synoptiques

	Cotonou	Bohicon	Savè	Parakou	Natitingou	Kandi
Janvier	5,33	5,48	5,58	5,58	5,46	5,41
Février	5,54	5,78	5,97	6,07	6,07	6,05
Mars	5,49	5,73	6,02	6,17	6,15	6,25
Avril	5,28	5,58	5,90	6,44	6,16	6,30
Mai	4,94	5,30	5,56	5,77	5,85	6,14
Juin	4,38	4,74	4,88	5,05	5,21	5,62
Juillet	4,31	4,28	4,29	4,53	4,74	5,11
Août	4,31	4,06	4,02	4,32	4,55	4,89
Septembre	4,37	4,37	4,39	4,67	4,94	5,35
Octobre	4,82	4,97	5,00	5,33	5,55	5,74
Novembre	5,01	5,24	5,50	5,73	5,71	5,77
Décembre	5,15	5,34	5,56	5,74	5,68	5,58
Moyenne annuelle (kWh/m²·jour)	4,89	5,07	5,22	5,42	5,50	5,68

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable qui est le mois d'août, C'est à ce mois que le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire est minimum.

✚ Dimensionnement du champ photovoltaïque

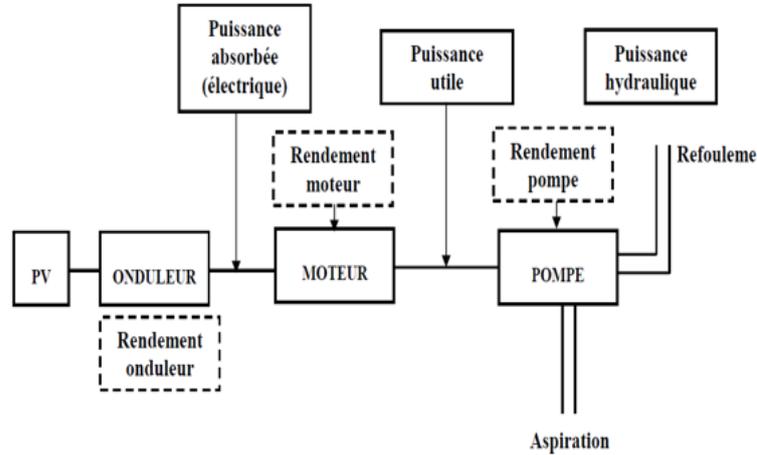


Figure 6 : Chaîne de conversion d'un pompage PV au fil du soleil

- L'énergie électrique journalière nécessaire E_{elec} (kWh/j) pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée par la formule suivante :

$$E_{elec} = \frac{P_{abs} \times t_f}{\eta_{ond}} \quad (9)$$

P_{abs} : Puissance absorbée de la pompe choisie en kW

η_{ond} : Rendement de l'onduleur

t_f : Nombre d'heure de fonctionnement en h/j

- La puissance crête nécessaire $P_{c\ mini}$ (en kWc) est calculée par la formule suivante :

$$E_{elec} = P_{c\ mini} \times E_i \times K_p \times \eta_{ond}$$

D'où

$$P_{c\ mini} = \frac{E_{elec}}{E_i \times K_p} \quad (10)$$

Avec

E_i : Irradiation moyenne mensuelle (kWh/m².j)

K_p : Coefficient de productivité du système PV

Dans le cas de pompes centrifuges au fil du soleil, la valeur typique de K_p est de l'ordre de 0,75 [6].

Après la détermination de la puissance nécessaire, on se réfère aux catalogues des constructeurs des panneaux solaires pour le choix et ensuite on fait la configuration en compatibilité avec la tension et l'intensité d'entrée du contrôleur.

IV. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE ET RESULTATS

IV.1. Présentation de la localité d'étude

IV.1.1. Situation géographique de zone d'étude

Anciennement appelé Dahomey, le Bénin est un pays de l'Afrique de l'Ouest, situé sur le Golfe de Guinée. Il couvre une superficie de 114 763 km² pour une population estimée à 10 600 000 habitants au recensement de 2013 de l'INSAE. Cette population est inégalement répartie sur l'ensemble du territoire national, avec de vastes étendues inhabitées au Nord, tandis que les régions du Sud sont surpeuplées. Le Bénin est subdivisé en 12 départements dont figure le département de l'Atlantique qui couvre une superficie de 3 233 km² (2,87 % du territoire national). Ce département est limité au Nord par le département de Zou, au Sud par l'océan Atlantique, à l'Est par le département de l'Ouémé et du Littoral et à l'Ouest par le département de Mono et du Couffo. Il s'étend sur huit (8) communes dont Abomey-Calavi, en est le chef-lieu. Il s'agit des communes Abomey-Calavi, Allada, Kpomassè, Ouidah, So-Ava, Toffo, Torri-Bossito et Zè.

La Commune de Allada s'étend sur une superficie de 381 km², soit 0,34% de la superficie totale du Bénin. Elle regroupe 86 villages ou quartiers de villes et douze (12) Arrondissements que sont : Allada, Agbanou, Ahouanonzoun, Atogon, Avakpa, Ayou, Hinvi, Lisse ganzoun, Lon-Agamè, Tokpa-ava, Togoudo et Sékou. La localité **Adjakpata** se situe dans l'arrondissement de Hinvi à 21 km de la commune de Allada. Ces coordonnées géographiques sont 02°09'20.8"E et 06°45'53.4"N en DMS (degrés, minutes, secondes) ou 2,155778 et 6,764833 (en degrés décimaux).

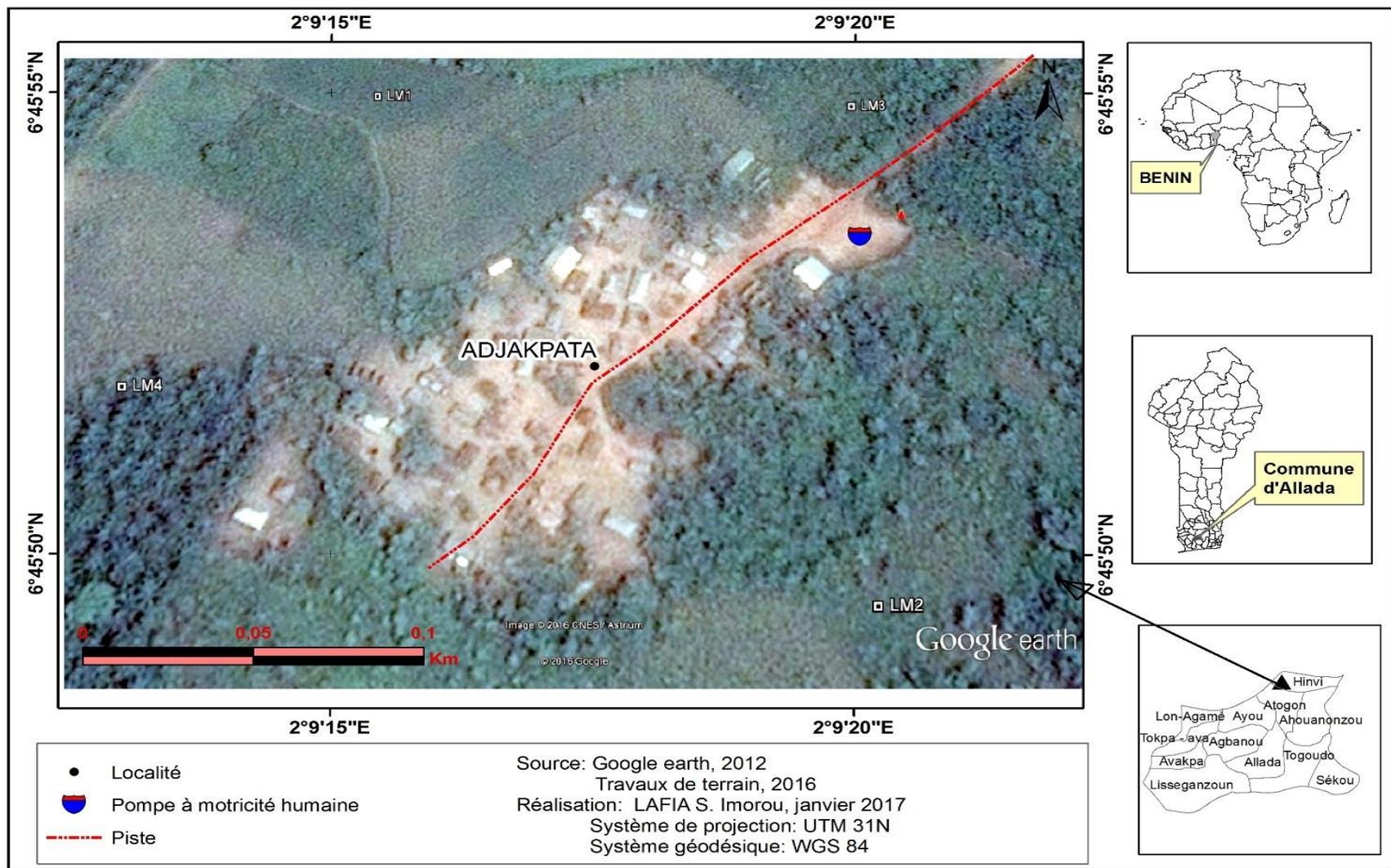


Figure 7 : Localisation de la localité Adjakpata

IV.1.2. Cadre physique et naturel

La localité jouit d'un climat de type sub – équatorial caractérisé par deux saisons des pluies (mars à juillet et septembre à décembre) et deux saisons sèches (août à septembre et décembre à mars). Ce climat est influencé parfois par l'harmattan qui est un vent froid et sec qui souffle de décembre à février. La température moyenne annuelle s'établit autour de 26°C avec un maximum de 32°C en avril et redescend aux environs de 23°C en décembre-janvier. L'humidité relative varie entre 30% et 70%. Son relief est, plat et très peu accidenté avec des élévations par endroits. Les sols de la localité sont des sols ferrallitiques et ferrugineux relativement profonds et leur perméabilité et porosité sont généralement bonnes. La végétation est caractérisée par une savane arborée et de hautes herbes. On y rencontre des forêts naturelles. Les sources d'approvisionnement en eau de la localité sont le forage équipé de pompe à motricité humaine, un puits traditionnel et une petite marré pour abreuver les animaux.

IV.1.3. Situation socio-économique

L'effectif total de la localité en 2016 est de 204 habitants, constitué 41 ménages. C'est une population essentiellement rurale qui s'adonne aux activités agricoles (ananas, maïs, manioc etc.) et l'élevage (lapins, escargots, le porc, le mouton, le bœuf etc.). On y rencontre plusieurs ethnies dont les Aïzo, les Fons et les Peulhs. Les populations de cette localité pratiquent la religion vodoun, l'islam et le christianisme.

IV.2. Présentation du système d'alimentation en eau actuel

L'alimentation en eau potable de Adjakpata est assurée par une pompe à motricité humaine sur un forage. L'eau asservie par le forage alimente près de 41 ménages et un cheptel animal à travers un abreuvoir placé non loin de la pompe. Le forage fonctionne entre 5 heures du matin et 20 heures du soir. Il fut financé par le Pays-Bas et équipé de pompe à motricité humaine le 2 juin 2009, date à laquelle les premières gouttes d'eaux furent recueillies. Cette pompe est fonctionnelle, mais elle demeure insuffisante pour satisfaire les besoins en eau dû à l'accroissement rapide de la population. Le forage a pour coordonnées 06°45'53.4"N latitude et 02°09'20.8"E longitude.



Figure 8 : Photo de la pompe à motricité humaine de Adjakpata

Source : visite de terrain, décembre 2016

Les caractéristiques du forage et de la pompe de la localité de Adjakpata peuvent être établies comme suit :

Tableau 7 : Caractéristiques techniques du forage et de la pompe à motricité humaine

		Forage			Pompe à motricité humaine		
Profondeur (m)	Niveau statique (m)	Niveau de la crépine (m)		Débit d'exploitation (m ³ /h)	Côte d'installation (m)	Modèle de la pompe	Débit de la pompe (m ³ /h)
		Supérieure	Inférieure				
76,3	15	66,4	72,43	12,5	36	VERGNET 4C	1

IV.3. Estimation des besoins journaliers en eau

L'estimation de la population à desservir est l'une des étapes importantes de tout projet d'alimentation en eau potable. Cette estimation de la population de la localité d'étude, a été faite sur la base du dénombrement de la population effectué lors de la visite sur le terrain. La population de 2016 de cette localité s'élève à 204 habitants.

Suite à cela, il a été jugé pour ce dimensionnement d'estimer 20 litres, le besoin minimal en eau des populations par jour et par habitant (tableau 4) et de négliger la consommation animale compte tenu de la dotation dans la localité d'autres sources d'approvisionnement qui couvrent une partie de leurs besoins.

Le tableau ci-dessous résume le calcul de la projection de la population et de la consommation pour l'année 2041, horizon du projet. La projection a été faite sur la base du taux

d'accroissement annuel du département qui est de 5,05% (RGPH4 de 2013 de l'INSAE), supposé constant. Le coefficient de pointe saisonnière et journalière considéré dans le cadre de notre étude est respectivement 1,2 et 1,15. Les pertes sont estimées à 10 % des besoins journaliers.

Tableau 8 : Calcul de la projection de la population et de la consommation à l'horizon 2041

Année	2016	2021	2026	2031	2036	2041
Population	204	261	334	427	546	699
Consommation journalière moyenne + pertes (m ³ /jour)	5	6	7	9	12	16
Consommation journalière de pointe (m ³ /jour)	6	8	10	13	17	21

IV.4. Dimensionnement et choix de la pompe

a) Détermination du débit horaire de la pompe Q_p en (m³/h)

Pour estimer le débit de la pompe en m³/h, on prend approximativement la valeur de la demande journalière de pointe D_{jp} à l'horizon 2041 qu'on divise par 4,31 qui est le nombre heures d'ensoleillement (pour un ensoleillement de référence de 4,31 h/j).

$$Q_p = \frac{D_{jp}}{H_i} \quad (11)$$

$$Q_p = \frac{21,22}{4,31} \quad \text{soit} \quad Q_p = 4,92 \text{ m}^3/\text{h}$$

b) Calcul du rabattement

Le rabattement est la différence entre le niveau dynamique et le niveau statique

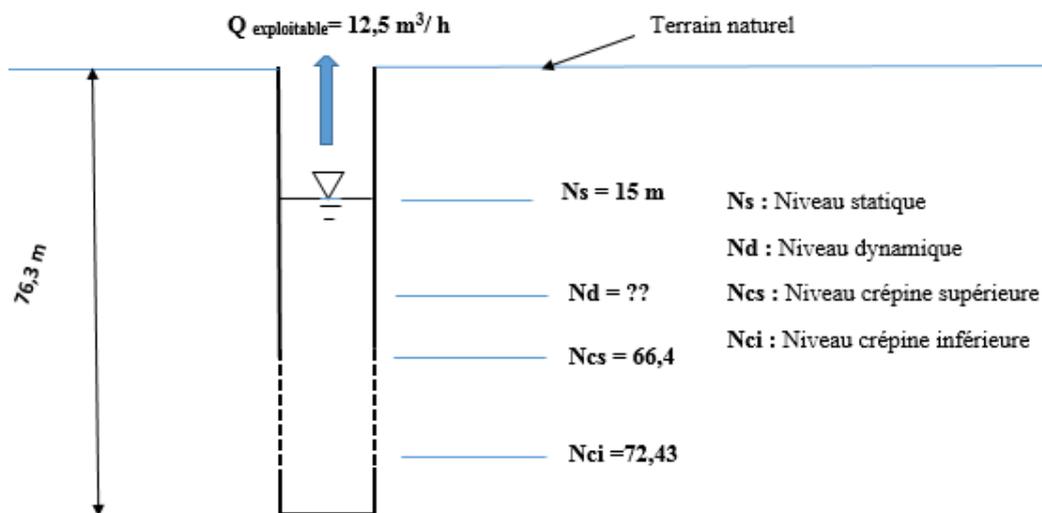


Figure 9 : Schéma du forage de Adjakpata

Sous l'effet du pompage, le niveau de la nappe baisse.

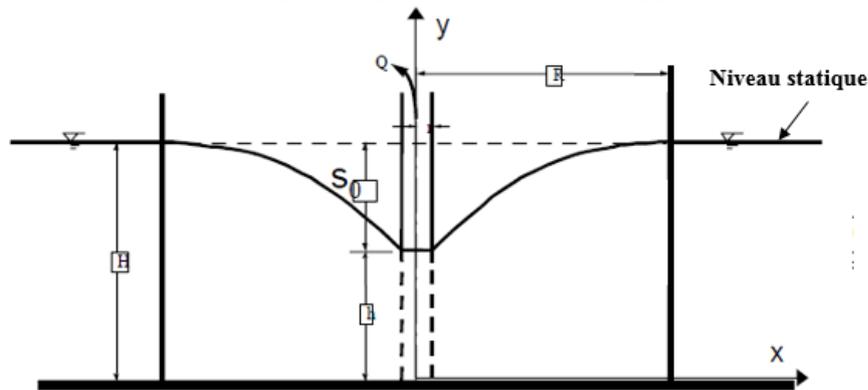


Figure 10 : Cône de rabattement lors du pompage

Pour déterminer le rabattement du forage à nappe libre, nous avons utilisé la formule de **Jules Dupuit** et la formule empirique de **Sichardt** (voir annexe 2 pour plus de détail).

La formule de **Jules Dupuit** :
$$Q = \frac{\pi K(H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (12)$$

La formule empirique de **Sichardt** :
$$R = 3000(H - h)\sqrt{K} \quad (13)$$

En tirant h de l'équation 13 on a :

$$h = H - \frac{R}{3000\sqrt{K}} \quad (14)$$

En remplaçant l'équation 14 dans l'équation 12 on a :

$$Q \ln\left(\frac{R}{r}\right) = \frac{2\pi KHR}{3000\sqrt{K}} - \frac{\pi R^2}{3000^2} \quad (15)$$

H : Epaisseur de la partie saturée en (m)

Q : Débit de pompage en (m³/s)

K : Perméabilité du sol en m/s (la couche de roche rencontrée au niveau de la crépine de forage est l'argile qui a une perméabilité $K = 10^{-11}$ cm /s.)

r : Rayon du forage (0,075 m)

R : Rayon d'action ou d'influence du cône de dépression en (m)

h: Hauteur d'eau dans le forage pendant le pompage en (m)

S₀: Rabattement (m)

- L'épaisseur de la partie saturée (H) est la différence entre la profondeur (H₁) du forage et le niveau statique (N_s).

$$H = H_1 - N_s$$

Avec

H_1 : Profondeur totale du forage en (m)

N_s : Niveau statique en (m)

$$H = 76,3 - 15 \text{ soit } H = 61,3 \text{ m}$$

- Le rayon d'action (R)

En itérant l'équation 15 on a : $R = 0,07500099 \text{ m}$

- La hauteur (h) d'eau dans le forage pendant le pompage avec le débit maximal ($4,92\text{m}^3/\text{h}$)

En appliquant l'équation 14 on a : $h = 53,38 \text{ m}$

D'où le rabattement (S_0) est la différence entre l'épaisseur de la partie saturée (H) et la hauteur (h) d'eau dans le forage pendant le pompage avec le débit maximal.

$$S_0 = H - h$$

$$S_0 = 61,3 - 53,38 \text{ soit } S_0 = 7,92 \text{ m}$$

c) Niveau dynamique

La côte du niveau dynamique (N_d) est la somme de la côte du niveau statique (N_s) et le rabattement (S_0).

$$N_d = N_s + S_0$$

$$N_d = 15 + 7,92 \text{ soit } N_d = 22,92 \text{ m}$$

d) Conduite de refoulement

Le choix du type de conduite convenable est lié à des facteurs d'ordre technique et économique, comme à titre d'exemple : les conduites en plastique sont reconnues pour leur légèreté, leur souplesse, leur résistance aux fluides agressifs et à la corrosion, leur flexibilité (PEHD), leur raccordement sans soudure (PVC) et par leur petit diamètre, mais le plus important c'est leur coût, contrairement aux conduites métalliques et celles à base de ciment dont les diamètres sont plus grands. Dans notre étude, on utilisera alors le PVC pour la conduite d'adduction et de distribution pour le branchement de la borne fontaine.

Le dimensionnement de la conduite d'adduction se fait par les formules de Bresse, Bresse modifié et de Munier. Le diamètre théorique au refoulement est déterminé par la relation suivante puis ramené au diamètre normalisé le plus proche (voir annexe 3 pour les diamètres nominaux.)

$$\text{Bresse : } D_{th} = 1,5\sqrt{Q} \quad (16)$$

$$\text{Bresse modifiée: } D_{th} = 0,8 Q^{1/3} \quad (17)$$

$$\text{Munier (1961) : } D_{th} = (1 + 0,02T_p)\sqrt{Q} \quad (18)$$

$$\text{Condition de Flamand : } V \text{ (m/s)} \leq 0,6 + D_{int} \text{ (m)} \quad (19)$$

$$V = \frac{4Q}{\pi D_{int}^2}$$

Avec :

T_p : Nombre d'heure de pompage en (h/j)

Q : Debit de pompage (m^3/s)

D_{int} : Diamètre intérieur de la conduite nominale choisi en (m)

V : Vitesse d'eau (m/s)

Hypothèse de calcul

Pour tenir compte du souci d'éviter des dépôts et/ou de garantir un auto curage dans une conduite de circulation, la vitesse minimale exigée est de 0,3 m/s par le constructeur de PVC.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9 : Dimensionnement de la conduite d'adduction

	PVC Classe 4 (10 bars)					Vérification $0,3 \leq V(m/s) \leq 0,6+D(m)$
	Diamètre théorique (mm)	Diamètre nominal (mm)		Vitesse (m/s)	$0,6+D(m)$	
		Interne	Externe			
Bresse	55,48	67,8	75	0,38	0,67	OUI
Bresse modifiée	88,81	99,4	110	0,18	0,7	NON
Munier (1961)	40,17	45,2	50	0,85	0,65	NON

En tenant compte de la **condition de Flamand** $V (m/s) \leq 0,6+D_{int} (m)$ et la **vitesse minimale exigée (0,3 m/s)**, on constate que seule la formule de Bresse peut être considérée pour le dimensionnement de la conduite de refoulement. Ainsi, nous retenons un diamètre nominal de **75 mm**.

e) Perte de charge totale et la HMT

Hypothèse de calcul

Les pertes de charge occasionnées par la conduite d'eau entre la pompe et le réservoir peuvent être importantes si cette conduite est trop longue, trop étroite ou si plusieurs coudes sont utilisés. Afin de minimiser ces pertes, on prendra une longueur de 3 mètre entre le forage et le réservoir d'eau.

Pour éviter que le réservoir d'eau soit trop surélevé, ce qui rendra plus coûteux le système de pompage solaire, on prendra la hauteur du réservoir (H_r) par rapport au sol égal à 5 mètres car la borne fontaine est situé près du réservoir d'eau.

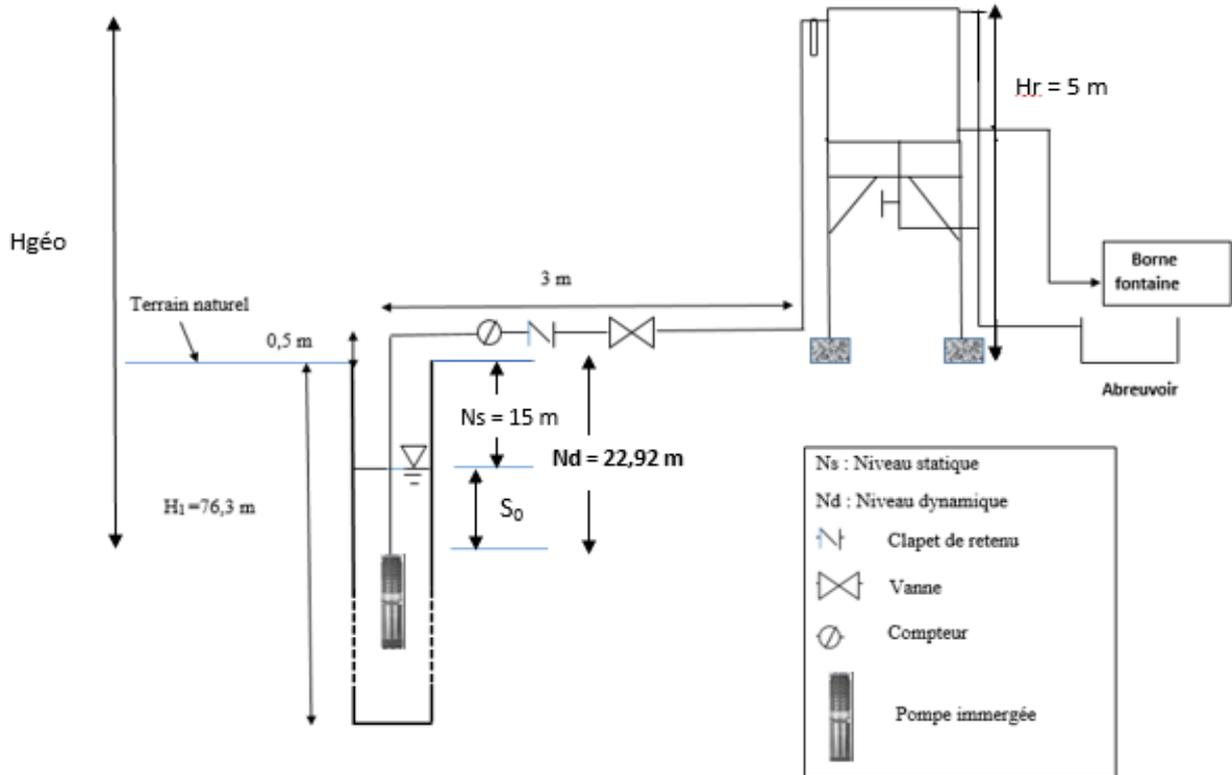


Figure 11 : Schéma du réseau d'adduction

Calcul de la vitesse d'écoulement

$$V = \frac{4 \times Q}{\pi \times D^2} \quad (20)$$

Q : Débit en m³/s

D : Diamètre de la conduite en (m)

Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \quad (21)$$

ρ : Masse volumique de l'eau

μ : Viscosité dynamique en (Pa. s)

ν : Viscosité en cinématique de l'eau à 20°C est 10⁻⁶ m²/s

Donc $\mu = \rho \nu$ soit $\mu = 10^{-3}$ Pa. s

Calcul des pertes de charge linéaire : $Pdc_l = \lambda \frac{L V^2}{D 2g}$, formule de Darcy-Weibach (1857)

L : Longueur de la conduite de refoulement en (m)

$$L = N_d + 3 + H_r + 0,5$$

La hauteur par rapport au sol de la tête forage est supposée à 0,5 mètre et la longueur entre le forage et le réservoir d'eau à 3 mètres.

$$L = 22,92 + 3 + 5 + 0,5 \text{ soit } L = 31,42 \text{ m}$$

Calcul du coefficient de perte de charge λ

λ dépend du nombre de Reynolds (Re).

- Régime laminaire si $Re < 2300$

Le coefficient λ est déterminé à l'aide de la formule de Poiseuille : $\lambda = \frac{64}{Re}$

- Régime transitoire si Re est compris entre 2300 et 10^4

Le coefficient λ est déterminé à l'aide de la formule de Blasius : $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$

- Régime turbulent si $Re > 10^4$

Le coefficient λ est déterminé à l'aide de la formule de Colebrook :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\left(\frac{K}{3,71D} \right) + \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \right] \quad (22)$$

Où K est le coefficient de rugosité de la conduite PVC ($K = 0,0015$)

Pour notre cas, $Re > 10^4$ (voir tableau 11), nous sommes dans un régime turbulent. Par conséquent, le coefficient λ est déterminé à l'aide de la formule de Colebrook.

Le coefficient de rugosité de PVC est $k = 0,0015$

Calcul des pertes de charge singulières : $Pdc_s = \zeta \frac{v^2}{2g}$ (23)

Avec ζ la somme des coefficients de singularité.

Calcul de perte de charge totale :

$$\sum Pdc = Pdc_l + Pdc_s \quad (24)$$

Le coefficient de singularité des éléments hydrauliques de la conduite d'adduction est énuméré dans le tableau ci-après.

Tableau 10 : Coefficient de singularité des éléments hydrauliques de la conduite d'adduction

Description	Nombre	Coéf. Singularité
Filtre	1	1
Clapet de retenue	1	2
Vanne - robinet	1	1
Coude 90°	3	0,75
1 Elargissement brusque de la conduite	1	1
Totale		7,25

Les résultats des calculs se trouvent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11 : Calcul de perte de charges

Longueur de la conduite	Diamètre interne de la conduite DN 75	Débit	Vitesse	Nombre de Reynold	Lamda	Perte charge linéaire	\sum Coéf. Singularité	Perte charge singulière	Perte charge totale
L (m)	D _{int} (m)	Q _p (m ³ /h)	V(m/s)	Re	λ	Pdc _l (mCE)	ζ	Pdc _s (mCE)	\sum Pdc (mCE)
36,42	67,8	4,92	0,38	25665,10	0,0244	0,083	7,25	0,053	0,136

• **Hauteur manométrique totale (HMT)**

$$\mathbf{HMT} = (\mathbf{N}_d + \mathbf{H}_r) + \sum \mathbf{Pdc} \quad (25)$$

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau 12 : Calcul de la hauteur manométrique totale

Niveau statique	Rabattement	Niveau dynamique	Hauteur du réservoir	Perte charge totale	Hauteur manométrique totale
N _s (m)	S ₀ (m)	N _d (m)	H _r (m)	\sum Pdc (mCE)	HMT (mCE)
15	7,92	22,92	5	0,136	28,05

f) Etude du coup de bélier

Le coup de bélier est un phénomène dû à des variations importantes de la pression due à l'arrêt et à la mise en marche de la pompe, la fermeture ou l'ouverture brusque d'une vanne ou le prélèvement d'un débit important. Le coup de bélier est un phénomène qu'on ne peut pas supprimer mais qu'il faut contrôler pour la sécurité des équipements.

Le coup de bélier a été étudié dans le cas de la fermeture totale rapide de la vanne et dans le cas de la fermeture totale lente de la vanne.

Cas 1 : Fermeture totale et rapide $T < 2*(L/a)$

Lors de la fermeture brusque d'une vanne, de l'arrêt de l'électropompe ou de la fourniture d'énergie, des variations de pressions se produisent. Elles se calculent par l'expression qui suit [9] :

Formule d'ALLIEVI
$$\mathbf{a} = \frac{9900}{\left(48,3 + \frac{KD}{e}\right)^{0,5}} \quad (26)$$

D : diamètre intérieur de la canalisation (m)

e : épaisseur de la canalisation (m)

L : longueur de la conduite (m)

a : Célérité de l'onde qui provoque le coup de bélier (m/s)

La valeur de K dépend de la nature de la conduite

Tableau 13 : Valeur du coefficient K en fonction de la nature de la conduite [9]

NATURE	PVC	ACIER	FONTE	BETON	PeHD
K	33	0.50	0.59	5	83

Ici, la conduite en PVC, donc $K = 33$

La variation de pression dans ce cas est :

$$\Delta h = \frac{aV_0}{g} \quad (27)$$

Avec :

V_0 : Vitesse de l'eau (m/s)

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2)

Δh : Suppression créée en mCE

Cas 2 : Fermeture totale et lente $T > 2*(L/a)$

Lors d'une fermeture lente d'une vanne, des surpressions se produisent. Le temps de fermeture est supposé égal à 5 second. Dans ce cas, le coup de bélier peut être atténué et la surpression est déterminée par la relation [9] :

$$\Delta h = \frac{2LV_0}{gT} \quad (28)$$

T : Temps de fermeture (s)

L : Longueur de la conduite (m)

Les résultats de calculs sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau 14 : Etude du coup de bélier pour la conduite de refoulement

Paramètres	Valeurs
$2*(L/a)$ en s	0,12
Pesanteur (m^2/s)	9,81
Vitesse de l'eau (m/s)	0,38
Cas 1 : Fermeture totale rapide $T < 2*(L/a)$	
Diamètre nominale de la conduite (mm)	75
Diamètre interne de la conduite (mm)	67,8
Epaisseur de la conduite (mm)	7,2
Pression Maximale admissible de la conduite PVC DN 75 (mCE)	100
Célérité de l'onde de choc dans l'eau (m/s)	522,47
K	33
Surpression crée Δh (mCE)	20,16
HMT (mCE)	28,05
$\Delta h + HMT$ (mCE)	48,21
Cas 2 : Fermeture totale lente $T > 2*(L/a)$	
Longueur de la conduite (m)	31,42
Temps de fermeture (s)	5
Surpression crée Δh (mCE)	0,48
$\Delta h + HMT$ (mCE)	28,54

L'installation d'un dispositif d'anti-bélier est nécessaire si $\Delta h + HMT > PMA$ (La Pression Maximale admissible PMA de la conduite en PVC, classe 4, DN 75 mm qui est de 100 mCE). Cependant, dans les deux cas, $\Delta h + HMT < PMA$, donc le réseau de refoulement n'a pas besoin un anti-bélier. D'où la **conduite en PVC, DN 75 mm classe 4 (10 bars)** convient au réseau de refoulement. L'installation d'une ventouse sera nécessaire pour diminuer les suppressions.

g) Choix de la pompe

Le débit nécessaire que doit fournir la pompe est de $4,92 m^3/h$. De ce fait, nous devons trouver une pompe capable de fournir un tel débit.

Selon le catalogue LORENTZ la pompe immergée de type pompe immergée PS600C-SJ5-8 est capable de refouler ce débit nécessaire. Les caractéristiques techniques se trouve dans le tableau ci-après :

Tableau 15 : Caractéristiques techniques du moteur pompe et du contrôleur

Marque :	LORENTZ
Type :	Pompe immergée PS600C-SJ5-8
Débit maxi :	6,5 m ³ /h
HMT maxi :	30 mCE
Moteur DC sans balais	
Puissance nominale :	0,70 kW
Efficacité max. :	92 %
Immersion maxi :	250 m
Contrôleur	
Type :	PS600
Puissance max :	0,7 kW
Tension nominale :	48 V
Tension d'entrée maxi :	150 V
Intensité du moteur maxi :	13 A
Efficacité maxi :	98 %
Température ambiante :	30 à 50 ° C

Pour plus de détail sur cette pompe, voir annexe 3

IV.5. Estimation du potentiel d'énergie solaire et dimensionnement du champ photovoltaïque

a) Estimation du potentiel d'énergie solaire

Pour un meilleur rendement de l'énergie solaire disponible nous avons besoin d'une inclinaison optimale du générateur photovoltaïque et de la détermination du mois de dimensionnement.

✚ Estimation de l'ensoleillement

Etant donné que la localité se trouve à 50 Km de Cotonou, nous considérons pour les calculs les données météorologiques de Cotonou. Pour le dimensionnement, la période retenue sera le mois d'Août qui correspond à une irradiation solaire de **4,31 kWh /m²·jour** (voir tableau 6)

✚ L'orientation et l'angle d'inclinaison

L'orientation et l'angle d'inclinaison des structures supports doivent optimiser l'énergie incidente sur le générateur solaire durant le mois le plus défavorable. La meilleure orientation correspond toujours à celle de l'azimut du soleil, soit : **au nord dans l'hémisphère sud et au sud dans l'hémisphère nord.**

Il faut incliner les modules d'un angle à peu près égal à la latitude du lieu soit $06^{\circ}45'53.4''N$ qui équivaut 6,764833 en degré décimal. Nous prenons un angle de 10° , afin d'optimiser l'énergie incidente sur le générateur solaire et de permettre un nettoyage naturel par l'écoulement des eaux de pluie. Il faut aussi savoir que de faibles variations en angle ou azimut ne portent pas préjudice au fonctionnement global de l'installation et peuvent être tolérées. Les ombres, par contre, doivent être évitées à tout prix, leur effet étant très préjudiciable aux performances des systèmes photovoltaïques.

b) Dimensionnement du champ photovoltaïque

✚ Calcul de la puissance crête nécessaire ($P_{c\ mini}$)

L'énergie électrique journalière nécessaire E_{elec} (kWh/j) est calculée par la formule suivante :

$$E_{elec} = \frac{P_{pompe} \times t_f}{\eta_{contrôleur}} \quad (29)$$

P_{pompe} : Puissance de la pompe en kW

$\eta_{contrôleur}$: Rendement du contrôleur

t_f : Nombre d'heure de fonctionnement

$$E_{elec} = \frac{0,7 \times 4,31}{0,98}$$

$$E_{elec} = 3,08 \text{ kWh/j}$$

La puissance crête nécessaire $P_{c\ mini}$ (en kWc) est calculée par la formule suivante :

$$E_{elec} = P_{c\ mini} \times E_i \times K_p$$

D'où

$$P_{c\ mini} = \frac{E_{elec}}{E_i \times K_p} \quad (30)$$

E_i : Irradiation moyenne mensuelle (kWh/m².j)

K_p : Coefficient de productivité du système PV

$$P_{c\ mini} = \frac{3,08}{4,31 \times 0,75}$$

$$P_{c\ mini} = 0,95 \text{ kWc}$$

Les caractéristiques du panneau PV choisi sont dans le tableau ci-après :

Tableau 16 : Caractéristique du panneau PV choisi

Fabriquant	Shell
Type	SQ85-P
Puissance maximum (W)	100
Tension à puissance max V_{pm} (V)	24
Intensité à puissance max I_{pm} (A)	4,17
Tension circuit ouvert V_{oc} (V)	27,2
Intensité du court-circuit I_{cc} (A)	4,67
Température de fonctionnement nominal des cellules	45 +/- 1°C
Rendement du module (%)	14
Dimension	
Longueur (mm)	1310
Largeur (mm)	654

✚ Configuration du champ solaire photovoltaïque

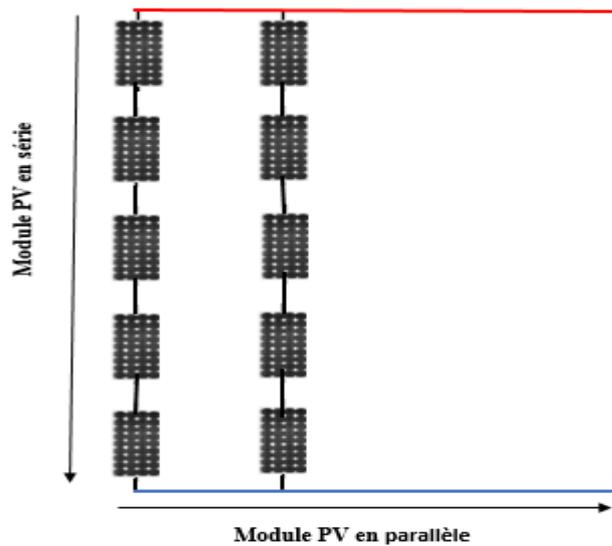


Figure 12 : Schéma de la configuration des panneaux PV

La puissance crête installée et la configuration du générateur PV sont présentée dans le tableau ci-après :

Tableau 17 : Calcul de la puissance installée et la configuration du générateur PV

Puissance installée du générateur	Tension du générateur	Intensité du générateur	Configuration		Nombre de panneaux
			N_{ms}	N_{BP}	
Pc (kWc)	V_{MPPT} (V)	$I_{gén\ max}$ (A)			
1	120	8,34	5	2	10

Nombre de module en série (N_{ms}) : 5

Nombre de module branche en parallèle (N_{BP}) : 2

$$\text{Surdimensionnement} = ((1 - 0,95) / 1) * 100 = 5\%$$

Tableau 18 : Vérification de la compatibilité du contrôleur avec la configuration des panneaux PV

	Valeur	Vérification
Tension circuit ouvert du générateur PV ($V_{oc\ géné} = N_{ms} * V_{oc}$ d'un module PV)	136 V	$V_{oc\ géné} < V_{max.cont}$ OK
Intensité MPPT du générateur PV ($I_{MPPTgéné}$)	8,34 A	$I_{MPPTgéné} < I_{max.cont}$ OK
Tension maximale du contrôleur ($V_{maxi.cont}$)	150	
Intensité maximale du contrôleur ($I_{maxi.cont}$)	13	

Cette configuration des panneaux PV est en compatibilité avec la tension et l'intensité d'entrée du contrôleur, donc ce contrôleur fonctionnera normalement.

Le débit maximal de la pompe est de 6,5 m³/h, différent de celui pris en compte pour le calcul des pertes de charges (4,92 m³/h). En considérant ce débit réel et en recalculant la perte de charge avec le même diamètre (75 mm), on a une augmentation de 0,09 m sur la HMT. Donc ce débit n'a pas une influence considérable sur la HMT.

IV.6. Dimensionnement du réservoir d'eau

Le choix du réservoir doit être fait de sorte à limiter les risques de contamination bactériologiques donc un temps de stockage maximal (02) de deux jours [12].

En utilisant la méthode du tableau (voir annexe 4), le réservoir obtenu a une capacité utile de 18,63 m³. De ce fait, pour des raisons de mise en œuvre, nous optons un réservoir cylindrique en béton de 20 m³, de 2,5 m de hauteur et un diamètre de 3,2 m.

$$\text{Temps de séjour maxi} = \frac{\text{Capacité utile retenue}}{\text{Consommation de pointe journalière}} \quad (31)$$

$$\text{Temps de séjour maxi} = \frac{20}{21,22}$$

$$\text{soit temps de séjour maxi} = 0,94 \text{ jour}$$

IV.7. Choix des équipements de protection

Fusible pour protection des branches

La protection d'un champ photovoltaïque est réalisée à l'aide de fusible installé sur chaque branche. Il sera placé à la sortie de chaque branche parallèle et sera choisi en tenant compte de :

- La tension de fonctionnement d'un fusible doit être de 1,15 fois la tension à vide dans les conditions STC des modules raccordés en série [5] : $1,15 \times V_{co} \times N_{ms}$

Tension assignée du fusible $\geq 156,4 \text{ V}$; $(1,15 \times 27,1 \times 5 = 156,4)$

- Le calibre des fusibles doit être compris entre 1,5 et 2 fois le courant I_{sc} (STC) de chaque chaîne [6]. $(1,5 \times I_{cc} \leq \text{calibre fusible} \leq 2 \times I_{cc})$.

$$1,5 \times 4,67 \leq \text{Calibre fusible} \leq 2 \times 4,67 \text{ on a donc } 7\text{A} \leq \text{Calibre fusible} \leq 9,34$$

Nous choisirons un fusible de type gG de calibre 8 A de taille 10 x 38 mm (diamètre x longueur) et de tension maximale 250 V_{CC} .

Comme nous avons 2 branches, il nous faut 2 fusibles de 8 A avec 2 portes fusible de type SBI 10 x 38. (Voir annexe 5)

Fusible pour protection générale

- Tension assignée du fusible $\geq 156,4 \text{ V}$; $(1,15 \times 136 = 156,4)$
- $(1,5 \times I_{cc} \times N_{BP} \leq \text{calibre fusible} \leq 2 \times I_{cc} \times N_{BP})$

$$1,5 \times 4,67,9 \times 2 \leq \text{Calibre fusible} \leq 2 \times 4,67 \times 2, \text{ on a donc}$$

$$14,01 \text{ A} \leq \text{Calibre fusible} \leq 18,68 \text{ A}$$

Nous choisirons un fusible type un fusible de type gG de calibre 16 A de taille 10 x 38 mm (diamètre x longueur) et de tension maximale 250 V_{CC} . Le porte fusible choisi est de type SBI 10 x 38. (Voir annexe 5).

Interrupteur -sectionneur

Il sera placé juste à la sortie du générateur et servira entre autres d'isoler électriquement le champ PV afin de permettre des opérations de maintenance en sécurité. Il doit être dimensionné selon la règle suivante :

- Tension assignée du fusible $\geq 1,15 \times V_{co} \times N_{ms}$

$$\text{Tension assignée du fusible} \geq 156,4\text{V} ; (1,15 \times 136 = 156,4)$$

- Intensité nominale $\geq 1,5 \times I_{cc} \times N_{BP}$

$$\text{Intensité nominale} \geq 14,01\text{A} ; (1,5 \times 4,67 \times 2 = 14,01)$$

Nous choisirons un interrupteur sectionneur de type SBN240 constitué de 2 pôles ; d'intensité nominale 16 A ; et de tension maximale 250 Vcc.

Parafoudre

Le parafoudre permet de protéger contre les risques de surtensions éventuelle dans l'installation. Pour prévenir les surtensions dû à la foudre, la protection contre les risques de surtensions induites dans le circuit de la partie à tension alternative de l'installation est important ainsi que la partie à tension continue.

Le parafoudre DC choisi est de type DS210-24DC de :

Courant maximal : 6 kA

Tension maximale 150 Vdc ;

(Voir annexe 6 pour les détails)

Capteur

Le contrôleur surveille le niveau d'eau dans le forage grâce un capteur pour éviter que la pompe soit dénoyée. Il contrôle ainsi le niveau d'eau dans le réservoir grâce un capteur. Nous choisirons 2 capteurs de niveau de caractéristique identique : GBS 01 avec une plage de mesure entre 0,1 à 25 bar (voir annexe 3 pour les détails).

Equipement de refroidissement du moteur

L'unité de contrôle arrête la pompe en cas d'échauffement. Pour prévenir l'éventuel arrêt en plein ensoleillement de la pompe et d'éviter l'aspiration de sable ou particule en suspension, on prendra une chemise de refroidissement équipé de crépine de type SQ-FS en acier inoxydable AISI 304 (1.4301) et diamètre de 130 mm (voir annexe 3). Ce dispositif permet de refroidir le moteur par le courant d'eau qui le long.

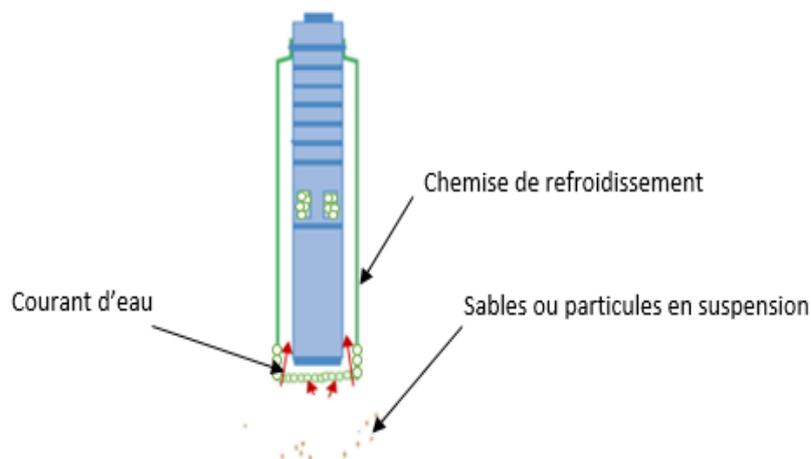


Figure 13 : Chemise de refroidissement

Mise à la terre

La mise à la terre est une protection contre tout accident électrique éventuel sur une personne en contact avec un appareil présentant un défaut électrique et aussi une protection pour le matériel mis en place dans le système. On relie donc tout l'équipement électrique et les parties métalliques à la terre à l'aide d'un conducteur de faible résistance (5 ohms), de sorte que le courant électrique en défaut soit évacué dans la terre. Le conducteur de terre qui assure la liaison entre la prise de terre et la barrette de mesure est de 16 mm² en cuivre isolé ou 25 mm² en cuivre nu. Le conducteur de terre qui assure la liaison entre la barrette de mesure et aux équipements est un câble en cuivre de couleur jaune-verte de 6 mm².

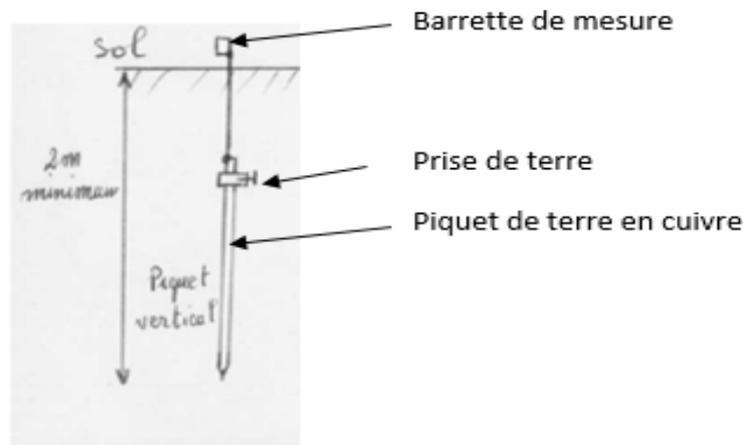


Figure 14 : Piquet de mise à la terre

IV.8. Sections de câble

La section de câble de la partie continue, se calcule par la façon suivante :

La relation de la loi d'Ohm :

$$\Delta V(V) = R \times I \quad \text{où} \quad R = \frac{2 \times \rho \times L}{S}$$

$$\text{Or } \Delta V(V) \leq \Delta V_L(\%) \times U(V) \quad \text{donc} \quad \frac{2 \times \rho \times L}{S \times V} \leq \Delta V_L(\%) \times U(V)$$

$$S \geq \frac{2 \times \rho \times L \times I}{\Delta V_L(\%) \times U(V)} \quad (32)$$

Avec : R : résistance totale du câble (Ω)

$L(m)$: longueur du câble supposé 10 m afin de réduire les chutes de tension entre le générateur PV et le contrôleur.

S : section (mm^2) du conducteur

ρ : Résistivité du cuivre ($0,017 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$)

$\Delta V_L(\%)$: Chute de tension limite (La chute de tension maximale admissible exigée par la norme UTE C15-712 relative aux installations ne doit pas excéder 3% de la tension nominale dans la partie DC). On prendra 3 % pour faire le calcul.

$U(V)$: Tension à puissance maximale du générateur PV obtenu dans les conditions (STC)

$I (A)$: Courant à puissance maximale générateur PV obtenu dans les conditions (STC)

$$I = I_{\text{max module PV}} \times \text{nombre de branche en parallèle}$$

Le tableau 19 donne la section des conducteurs cuivre en fonction de l'intensité maximale que le conducteur peut supporter.

Tableau 19 : Section nominal des câbles [6]

Section des câbles (mm^2)	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300
Courant maximum (A)	13	21	28	36	46	61	81	99	125	160	195	220	250	285	340	395

$$S = \frac{2 \times 0,017 \times 4,17 \times 2 \times 10}{0,03 \times 136}$$

On obtient $S = 0,7 \text{ mm}^2$

D'après ce tableau 19, on retiendra une section normalisée en cuivre de **2,5 mm^2** et d'intensité maximale admissible 21 A

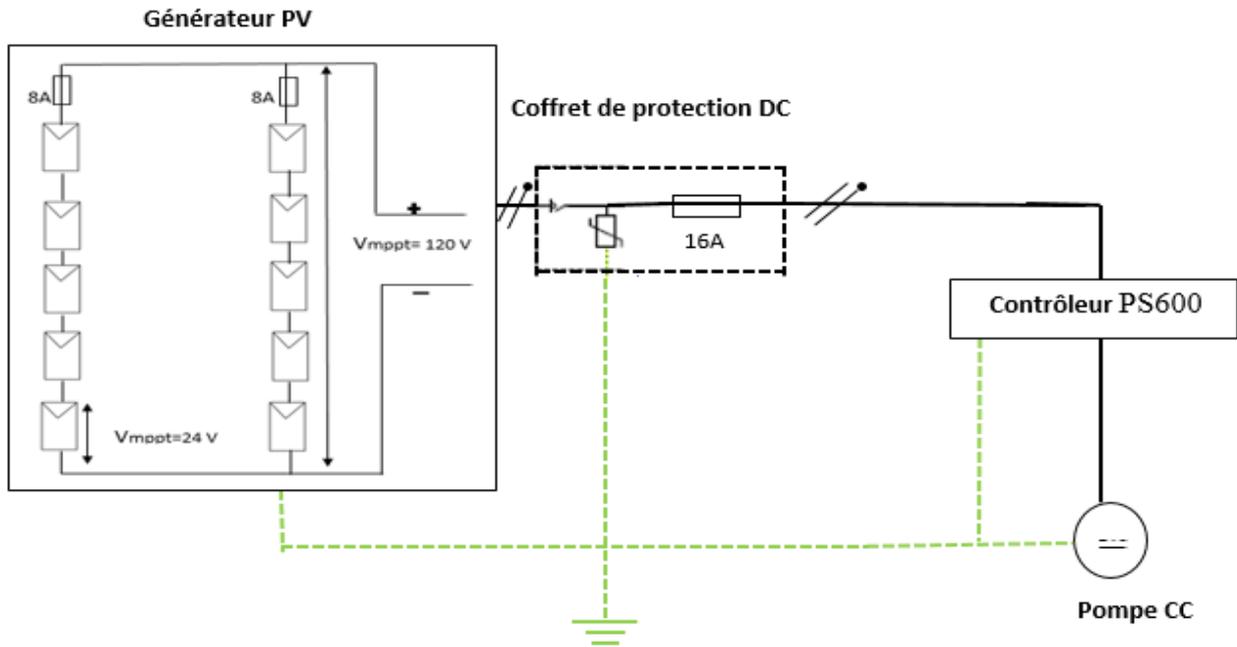


Figure 15 : Schéma du système d'alimentation de la pompe

IV.9. Choix des équipements hydrauliques

✚ Réseau d'adduction

Le diamètre du forage est de 150 mm ce qui permet d'installer une pompe immergée 4'' qui fonctionne avec un générateur PV de 1 kWc. L'aménagement de la tête de forage sera en acier galvanisé et comportera 3 trous pour le passage du câble d'alimentation de la pompe immergée, du capteur et du tube pour le suivi de niveau d'eau.

La conduite de refoulement réalisera au moyen de canalisations de diamètre 75 mm en PVC classe 4 (10 bar). Cette conduite comportera une ventouse placée aux points les plus hauts (tête de forage), et qui servira à évacuer l'air emprisonné dans les tuyaux pour contourner les pannes dévastatrices liées à l'air comprimé. Cette conduite comportera également, un filtre pour récupérer les particules fines en provenant du forage ; un clapet anti-retour pour protéger la pompe contre le retour d'eau ; un compteur pour évaluer la quantité refoulée ; un té réduit muni d'un robinet qui permettra de faire de prélèvement d'eau pour des analyses de laboratoire ; un manomètre pour mesurer la pression à la sortie de la pompe ; un débitmètre pour mesurer le débit de la pompe ; un robinet-vanne qui servira à isoler le tronçon du réseau lors d'une réparation.

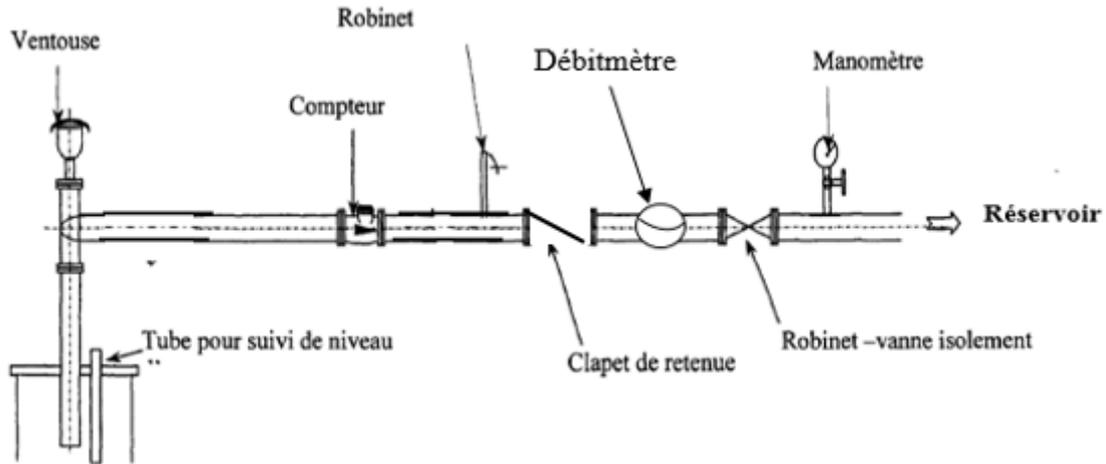


Figure 16 : Equipement hydraulique de la conduite d'adduction

🚦 Réseau de distribution

La conduite de distribution sera réalisée au moyen de canalisations en PVC, desservant la borne fontaine (BF) construite en béton armé avec des pentes permettant de rassembler les eaux de débordement pour les évacuer vers l'abreuvoir grâce un canal en béton. Il est prévu une vanne pour isoler le tronçon en cas de panne, un compteur qui permet d'évaluer la quantité d'eau consommée par les villageois.

La borne fontaine aura les équipements ci-après :

- Une vanne d'arrêt pour chaque robinet
- 3 robinets
- Un mur de hauteur 1,5 mètres

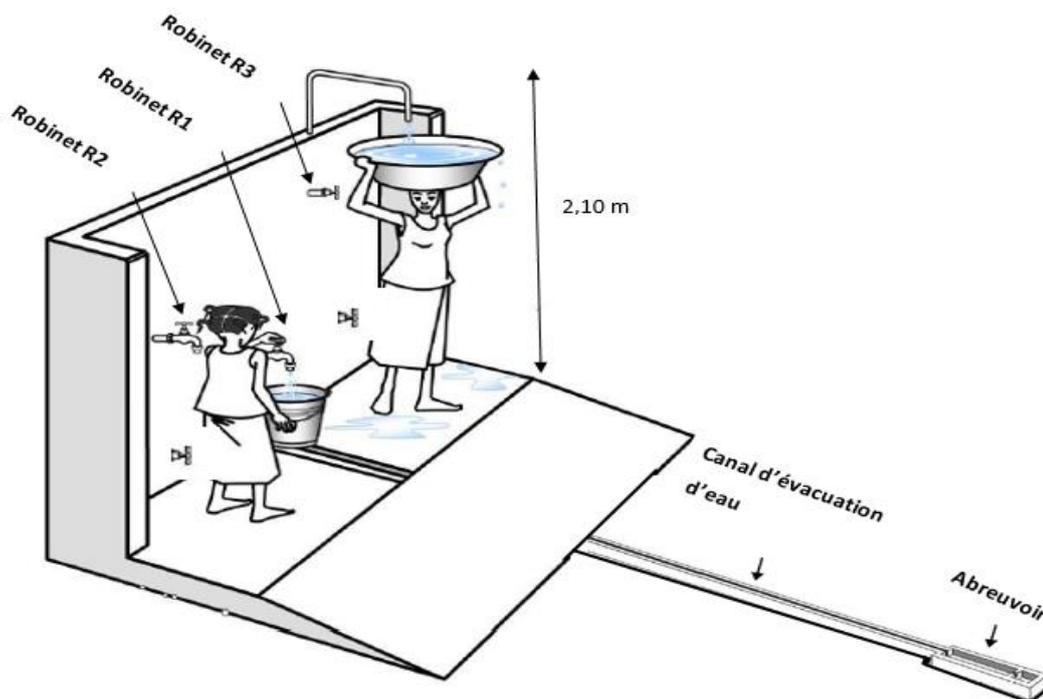


Figure 17 : Borne fontaine avec des robinets situés à des hauteurs différentes

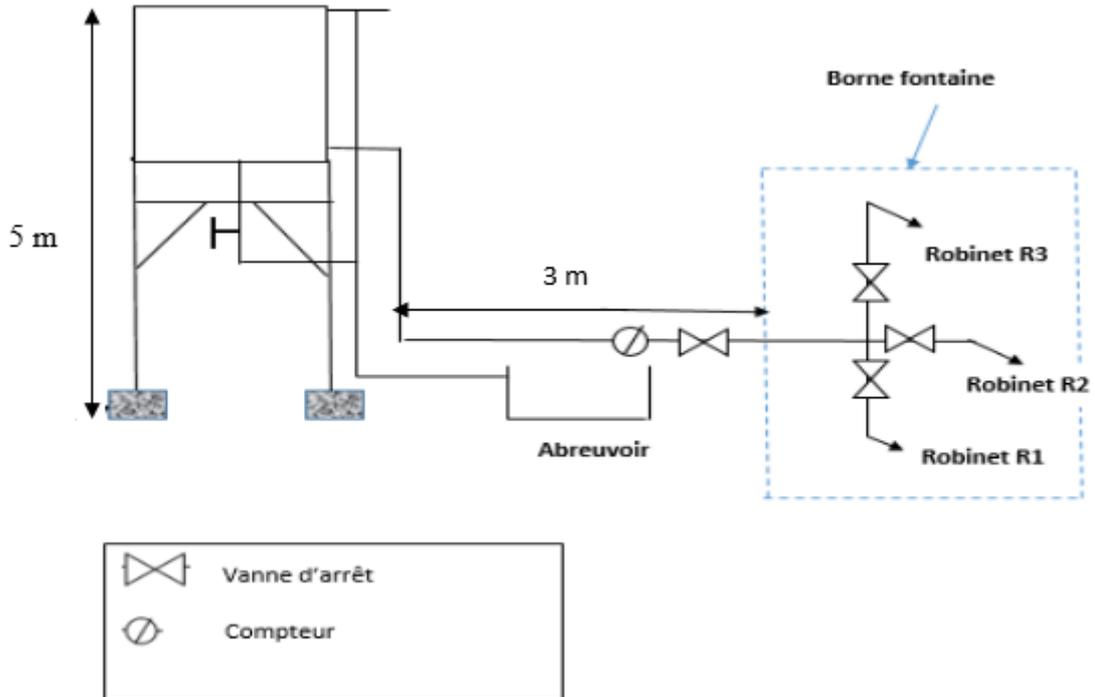


Figure 18 : Schéma de réseau de distribution

Formule et hypothèse de calcul

Les diamètres théoriques sont calculés par la relation

$$D_{th} = 2 \sqrt{\frac{Q}{V\pi}} \quad (33)$$

Q : est le débit qui transite la conduite (m³/s)

V : est la vitesse d'écoulement (m/s)

D_{th} : est le diamètre théorique de la conduite (m)

Pour tenir compte du souci d'éviter la formation de dépôts et les bruits dans une conduite de circulation, la vitesse recommandée par le constructeur de PVC dans un écoulement gravitaire est comprise entre 0,3 m/s et 1,2 m/s. Pour notre étude, nous fixons une vitesse de 1m/s pour le dimensionnement du réseau distribution.

La conduite principale du réseau de distribution est dimensionnée sur la base du débit horaire de pointe. La formule utilisée pour calculer ce débit est la suivante [9] :

$$Q = \frac{D_{jm} \times C_{pj} \times C_{ps}}{24} \times C_{ph} \quad (34)$$

Tableau 20 : Valeur du coefficient de pointe horaire selon la taille de la localité [9]

Taille de la localité (habitants)	< 10 000	10 000 à 50 000	50 000 à 200 000	> 200 000
Coefficient	2.5 à 3	2 à 2.5	1.5 à 2	1.5

La population de la localité étant égale à 204 habitants, elle est inférieure à 10 000, le coefficient de pointe retenu est donc la moyenne de 2,5 à 3, soit 2,75.

La formule de Manning STRICKLER sera utilisée pour le calcul des pertes de charges :
Les pertes charges singulières sont égales à 10% de pertes de charges linéaires.

$$J = 1,1 \frac{4^{\frac{10}{3}} \times Q^2 \times L}{\pi^2 \times K_s^2 \times D^{\frac{16}{3}}} \quad (35)$$

D : Diamètre intérieur de la conduite commerciale choisie (m)

L : Longueur de la conduite (m)

J : Perte de charge totale

Le coefficient de Manning STRICKLER $K_s = 120$ est pour PVC

Après le calcul du diamètre théorique, on se réfère aux catalogues des constructeurs pour choisir le diamètre commercial existant. Ce diamètre commercial doit être supérieur ou égal au diamètre calculé pour garantir des pertes de charge inférieures ou égale à J . Avec ce diamètre commercial on vérifie que le débit Q s'écoule avec une vitesse comprise entre 0,3m/s et 1,2 m/s.

Calcul de la pression minimale observée aval (P_{min} en point X)

$$P_{min} = H_{Reservoir} - J_i \quad (36)$$

Avec $H_{Reservoir}$ est la hauteur du réservoir (5 m)

Les résultats du dimensionnement sont présentés dans le tableau suivante :

Tableau 21 : Dimensionnement de réseau de distribution

Tronçon	L(m)	Q (l/s)	D_{th} (mm)	D_n (mm)	D_{int} (mm)	j (m)	j_{x-r}	$H_{réservoir}$	P_{min} en x (mCE) aval	V (m/s)	Vérification de la condition de Vitesse
A - P	3	0,68	29,33	40	36,2	0,048	0,048	5	4,95	0,66	Vrai
P- R1	1	0,23	16,93	25	22	0,025	0,073	5	4,93	0,59	Vrai
P- R2	1,2	0,23	16,93	25	22	0,03	0,078	5	4,92	0,59	Vrai
P- R3	2,1	0,23	16,93	25	22	0,053	0,100	5	4,90	0,59	Vrai

Etude du coup de bélier pour la conduite de distribution

Tableau 22 : Etude du coup de bélier pour la conduite de distribution

Paramètres	Valeurs
$2*(L/a)$ en second	0,01
Pesanteur (m^2/s)	9,81
Vitesse de l'eau (m/s)	0,66
Cas 1 : Fermeture totale rapide $T < 2*(L/a)$	
Diamètre nominale de la conduite (mm)	40
Diamètre interne de la conduite (mm)	36,2
Epaisseur de la conduite (mm)	1.9
Pression Maximale admissible de la conduite PVC DN 50 (mCE)	100
Célérité de l'onde de choc dans l'eau (m/s)	519,85
K	33
Surpression crée Δh (mCE)	34,80
Hauteur du réservoir (m)	5
$\Delta h + HMT$ (mCE)	39,80
Cas 2 : Fermeture totale lente $T > 2*(L/a)$	
Longueur de la conduite (m)	8
Temps de fermeture en second	5
Surpression crée Δh (mCE)	0,21
$\Delta h + HMT$ (mCE)	5,21

L'installation d'un dispositif d'anti-bélier est nécessaire si $\Delta h + HMT > PMA$ (La Pression Maximale admissible PMA de la conduite en PVC, classe 4, DN 40 mm qui est de 100 mCE). Cependant, dans les deux cas, $\Delta h + HMT < PMA$, donc le réseau d'adduction n'a pas besoin un anti-bélier. D'où la **conduite principale en PVC, DN 40 mm classe 4 (10 bars)** convient au réseau d'adduction.

 **Choix des équipements hydraulique de la conduite d'adduction et de distribution.**

Tableau 23 : Choix des équipements hydraulique de la conduite d'adduction et de distribution

		Réseau d'adduction	Réseau de distribution
	Compteur	ZENNER/ DN 63 mm Qmin = 0,45 m ³ /h Qmax = 30 m ³ /h PN 16 bar Portée = 1 000 000 m ³	WATEAU / DN 50 mm Qmin = 0,12 m ³ /h Qmax = 20 m ³ /h PN 16 bar Portée = 100 000 m ³
	Clapet de retenu	GLYNWED/63 mm	

	Vanne	41AC/DN 3" PN 16 bar	ACS/DN 3" PN 16 bar
	Robinet de puisage	1/2" x 3/4"	1/2" x 3/4"
	Robinet d'arrêt		DN 25 mm
	Manomètre	MM0-10/DN 63 Plage de mesure : 0 à 10 bar	
	Ventouse automatique triple à effet : Admission, évacuation et dégazage sous pression.	UNIRAIN/ 2" Pression de service 0,2 à 12 bar.	
	Filtre à disque	F7000/DN 2" Q= 10m ³ /h Pression maximale 10 bar Précision de filtration 200 μ	
	Débitmètre	Siemens/ MAGFLO MAG Plage de mesure : 3-10 m ³ /h (DN 40)	

V. ANALYSE ECONOMIQUE

Une analyse économique inclut le coût d'investissement, ainsi que la valeur actualisée des coûts d'exploitation, d'entretien et de remplacement des composants sur la durée de vie prévue du système. Dans nos calculs, le choix de la durée de vie du système est lié au fait que la durée de vie moyenne estimée des modules photovoltaïques est normalement de 25 ans.

L'objectif de notre étude consiste à évaluer les coûts représentatifs d'un système de pompage photovoltaïque installé dans la localité Adjakpata. Cette étude aboutira à une estimation du coût du mètre cube d'eau pompée par notre système de pompage photovoltaïque.

V.1. Coût initial

Les coûts d'investissement comprennent les dépenses effectuées lors de l'installation du système de pompage, les frais de transport et d'installation des différents composants du système,

ainsi que les coûts de génie civil associés. Les frais généraux couvrent les frais de réalisation, et de surveillance du chantier.

Tableau 24 : Coûts d'investissement

	Système PV
10 Module PV de type SQ100-P Shell de 100 Wc	900 000
Pompe immergée PS600C-SJ5-8 et accessoires	1 453 576
Câbles et divers accessoires	390 018
Canalisation et accessoires hydrauliques	925 813
Construction et divers	1 643 000
Transport, installation et surveillance matériel	796 861
Imprévus (5%)	265 620
TVA 18%	956 233
TOTAL GENERAL TTC (FCFA)	7 331 122

Voir annexe 7, pour plus de détails sur les coûts d'investissement.

V.2. Coût d'exploitation

Les charges d'exploitation peuvent se diviser comme suit :

- Les frais de fonctionnement : Coût de rémunération de fontainiers, gardiens éventuels ;
- Les frais d'entretien et de réparation : Coût d'intervention du personnel qualifié assurant la maintenance du système (main-d'œuvre et déplacement).et la réparation éventuelle des composants du système
- Les frais de renouvellement : Coût des composants à renouveler durant la durée de vie du système.

Ces frais interviennent à des moments différents durant la vie du système ; ils ont donc des valeurs très différentes de celles qu'elles ont présentement. De plus, alors que certains frais sont plus ou moins périodiques et peuvent être ramenés à des annuités, d'autres charges représentent des dépenses exceptionnelles qui se produisent que quelques fois durant la vie du système. L'opération d'actualisation des coûts permet donc de ramener ces frais sur une base commune en leur donnant une valeur actualisée. Cela permet de comparer ces coûts avec d'autres options et de trouver ainsi le choix le plus économique.



Hypothèse de calcul

Les hypothèses retenues pour le calcul du coût actualisé de l'entretien, maintenance et renouvellement des composants sur la durée de vie du système sont les suivantes :

Le taux d'actualisation est fonction du taux d'inflation (τ_{inf}) et du taux d'investissement (τ_{inv}) disponible pendant la durée de vie du système. Pour notre projet, nous avons fixé le taux d'inflation des équipements est 3% [3]. Le taux d'investissement est fixé à 8%, ce qui nous donne un taux d'actualisation ($\tau_{act} = \tau_{inv} - \tau_{inf}$).de 5%.

Tableau 25 : Estimations des durées de vie des composants pour chacun des éléments du système

Composants	Générateur PV	Electropompe et contrôleur	Réservoir	Accessoires
Durée de vie	25 ans	7 ans	25ans	25 ans



Formule de calcul

Pour les frais ponctuels qui sont généralement liés aux équipements (contrôleur et électropompe) susceptibles d'être remplacés sur la durée du projet (25 ans), on procède à une actualisation simple de la valeur présente de l'équipement pour l'année de la dépense. La formule ci-dessous permet de calculer la valeur actuelle de cette dépense par rapport au moment futur où elle sera effectuée [3] :

$$V_{ac} = \frac{V_{in}}{(1 + \tau_{ac})^n} \quad (37)$$

Où :

V_{ac} = la valeur actualisée simple de l'équipement ;

V_{in} = la valeur initiale de l'équipement ;

τ_{ac} = le taux d'actualisation ;

n = la durée de vie de l'équipement.

Pour les frais annuels (entretien et maintenance), on procède à une actualisation uniforme de cette valeur annuelle sur la durée de vie du système. Ce calcul permet de ramener la valeur des annuités à une valeur actualisée globale. La formule suivante permet de calculer la valeur actuelle des annuités [3] :

$$V_{ac} = \frac{V_d}{\tau_{ac}[1 - (1 + \tau_{ac})^{-N}]} \quad (38)$$

Où

V_{ac} = la valeur actualisée uniforme de la dépense annuelle

V_d = la valeur initiale de la dépense annuelle

τ_{ac} = le taux d'actualisation ;

N = la durée de vie du projet.

V.3. Coût du m³ d'eau

Le projet d'étude est un projet social qui sera financé par le gouvernement béninois pour réduire la pauvreté et améliorer la santé de la population. Par conséquent l'investissement initial ne sera pas remboursé sur la durée de vie du système. Pour assurer la pérennité du système, la population bénéficiaire doit s'acquitter des frais d'exploitation. Ainsi, le coût du mètre d'eau actualisé est calculé par la formule suivante :

$$\text{Coût du m}^3 \text{ d'eau dû à l'exploitation} = \frac{\sum Dn}{D \times d} \quad (39)$$

Le coût réel du mètre cube d'eau est par la formule ci-après :

$$\text{Coût réel du m}^3 \text{ d'eau} = \frac{CTA}{D \times d} \quad (40)$$

$$CTA = \sum Dn + I - R \quad (41)$$

$$R = A \times \frac{n_r}{n} \quad (42)$$

Avec :

$\sum Dn$: Somme des dépenses actualisées (frais de fonctionnement, de renouvellement, d'entretien et de maintenance) durant toute la durée de vie du projet

I : Coût d'investissement initial

CTA : Coût total actualisé sur 25 ans

R : Coût résiduel du système

A : Coût d'achat de l'équipement

n = Durée de vie de l'équipement.

n_r : Durée de vie restante de l'équipement

D : besoin en eau annuel (m³/ans)

d : la durée du projet (25ans)

Tableau 26 : Coût du m³ d'eau

Besoin en eau (m ³ /j)	21	Valeur actualisée (FCFA)
Besoin en eau (m ³ /ans)	7747	
Durée du projet (ans)	25	
Coût d'investissement initial		7 331 122
Exploitation		
-Frais de l'entretien et maintenance		690 463
-Frais de fonctionnement		13 500 000
-Frais de renouvellement		2 062 846
Coût total d'exploitation		16 253 309
Coût du résiduel du système		374 285
Coût total actualisé sur 25 ans		23 210 146
Coût réel du m ³ d'eau dû à l'exploitation		84
Coût du m ³ d'eau réel		120



Voir annexe 8, pour plus de détails sur les coûts d'exploitation.

VI. ANALYSE ET DISCUSSION

Le projet étant social, les populations bénéficiaires doivent néanmoins prendre en charge les frais d'exploitation pour assurer la pérennité du système de pompage. Ainsi, le coût du mètre cube d'eau dû à l'exploitation, obtenu avec le système PV est de 84 FCFA. Pourtant la population de la localité d'étude paie 400 FCFA par mètre cube d'eau à raison de 10 FCFA par bidon de 25 litres avec le système à motricité existant. De plus, le mètre cube d'eau avec le système PV est moins couteux en comparaison au prix de la Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB) qui s'élevé à 330 FCFA pour les points d'eau d'accès collectif (figure 19).

Le projet est intéressant, d'une part il contribue à l'amélioration de la santé de la population ainsi qu'à la réduction de la pauvreté et d'autre part l'énergie renouvelable utilisée permet une réduction de gaz à effet de serre.

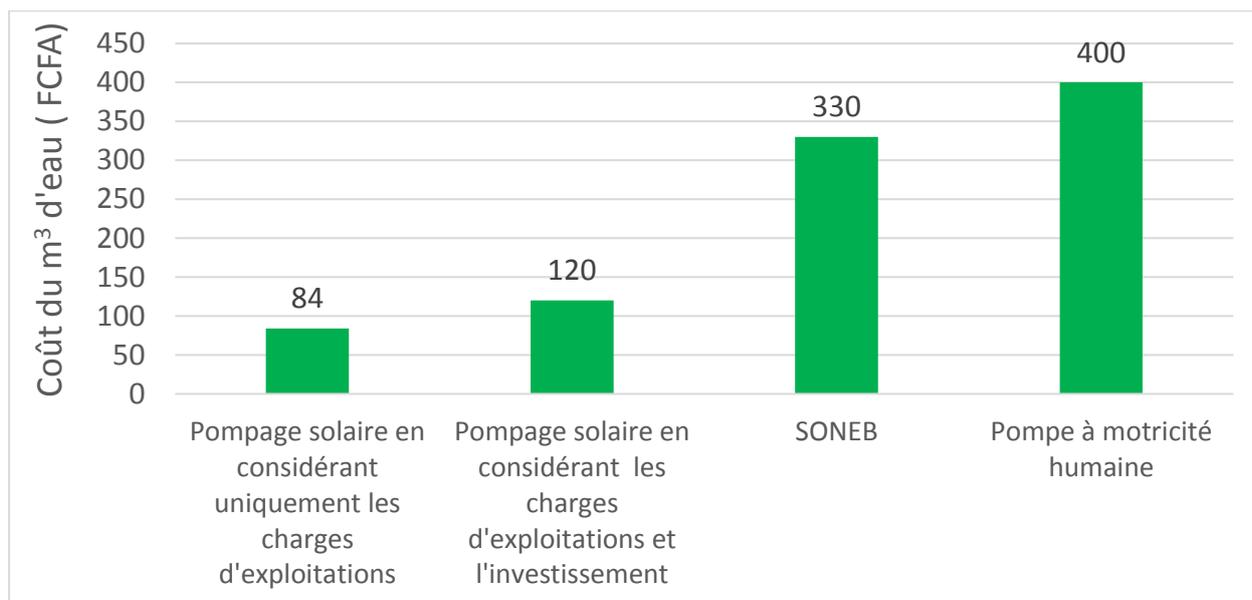


Figure 19 : Coût du m³ d'eau dû à l'exploitation

VII. RECOMMANDATIONS

L'application de l'énergie solaire photovoltaïque pour le pompage d'eau contribue au développement socio-économique des populations rurales du Bénin. La promotion de cette forme d'énergie est nécessaire. Il paraît opportun de formuler les recommandations suivantes :

- Sensibiliser les populations rurales sur la consommation de l'eau potable et sur les dangers liés à la consommation d'une eau insalubre ;
- Former certains paysans de la localité à l'entretien et la maintenance du système ;
- Exiger un pré-paiement pour la consommation de l'eau afin d'assurer la maintenance et l'entretien du système pompage PV ;
- Subventionner les prix de tous les équipements solaires en vue de les rendre disponibles et accessibles à tous afin d'encourager le secteur privé dans l'application de l'énergie solaire photovoltaïque pour le pompage d'eau.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au terme de ce travail, force a été pour nous de constater que la conception d'un système de pompage PV nécessite, une bonne connaissance des principes de fonctionnement des différentes composantes du système. Ainsi, les études menées dans le cadre de ce projet nous ont permis de procéder dans un premier temps au dimensionnement d'un système de pompage PV au fil du soleil et par la suite à celui du réseau d'adduction et de distribution d'eau pour la localité de Adjakpata.

Tous ces calculs de dimensionnements ainsi effectués permettront d'implanter dans la localité d'étude un système de pompage PV au fil du soleil et une borne fontaine qui viendra à coup sûr résorber le problème d'approvisionnement en eau et les difficultés de la population lors de pompage d'eau dans ladite localité.

Nous avons constaté que le projet est techniquement et économiquement réalisable car le coût du mètre cube d'eau en alimentant la pompe par l'énergie solaire photovoltaïque est avantageux par rapport au système à motricité humaine existant.

Selon la Direction Générale de l'Eau du Bénin, près d'un quart de la population béninoise disposait d'une source d'eau potable sécurisée en 2015 [2]. Ainsi l'étude réalisée dans le cadre ce projet représente un début de solution aux problèmes d'approvisionnement en eau potable des populations rurales qui utilisent jusqu'à présent les pompes à motricité humaine.

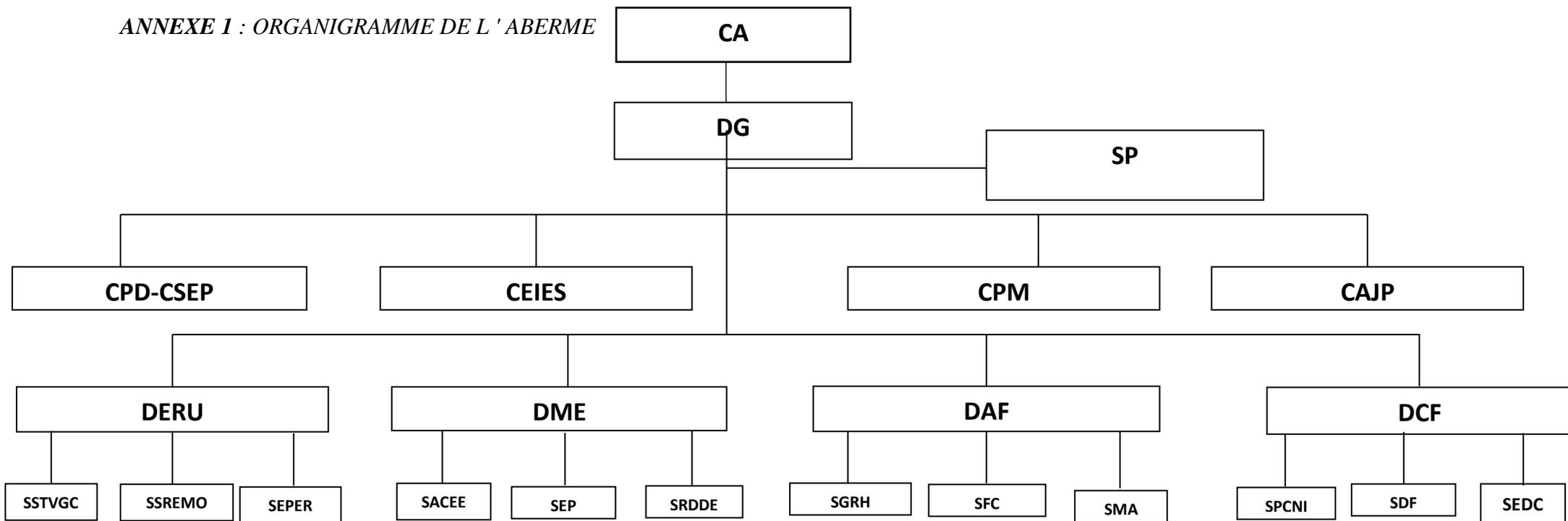
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Direction Générale de l'Eau (DGE) « Stratégie nationale de l'approvisionnement en eau potable en milieu rural du Bénin 2005-2015 », janvier 2005
- [2] Ministère d'Energie de l'Eau et des Mines « Programme Energie et Eau pour la vie », juin 2016
- [3] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy « le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des ingénieurs et techniciens » Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage français, 1998
- [4] Fondation Energie pour le monde et peuples solidaires, « Energie solaire photovoltaïque », Paris, juin 2005
- [5] www.total-energie.fr
- [6] Ahmed O. Bagré. « Cours sur le pompage photovoltaïque et le dimensionnement de système PV »
- [7] B. Multon, H. B. Ahmed, N. Bernard, « Les moteurs électriques pour applications de grande série », Pierre-Emmanuel CAVAREC Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan, Revue 3 juin 2000.
- [8] Bassam Ouaida « Les Energies Renouvelable et le Développement Durable en milieu rural », novembre 2013
- [9] Denis Zoungrana « Cours d'approvisionnement en eau potable », EIER Novembre 2003
- [10] Hubert Bonneviot « Adduction d'eau potable avec pompe photovoltaïque », octobre 2005
- [11] Jacques Lérau, « Cours de géotechnique », Institut national des sciences appliquées de Toulouse, Département de Sciences et Technologies pour l'Ingénieur ; 2006
- [12] Philippe Belleudy « hydrogéologie », octobre 2004
- [13] Béga Urbain Ouedraogo, « Cours sur les ouvrages constitutifs de systèmes d'AEP/Adductions, réservoirs, distribution », 2iE, avril 2005
- [14] www.solaris-store.com/ ; catalogue de pompes LORENTZ

LISTES DES ANNEXES

ANNEXE 1 : ORGANIGRAMME DE L ' ABERME.....	54
ANNEXE 2 : FORMULE DE JULE DIPUIT ET DE SICHARDT [11 ;12].....	55
ANNEXE 3 : POMPE ET ACCESSOIRES [14]	57
ANNEXE 4 : CALCUL DE LA CAPACITE UTILE DU RESERVOIR D'EAU PAR LA METHODE DE TABLEAU	61
ANNEXE 5 : FUSIBLES ET INTERRUPTEUR- SECTIONNEUR	62
ANNEXE 6 : PARAFONDRES.....	64
ANNEXE 7 : DETAIL SUR DU COUT D'INVESTISSEMENT	65
ANNEXE 8 : DETAIL SUR DU COUT D'EXPLOITATION	68

ANNEXE 1 : ORGANIGRAMME DE L' ABERME



LEGENDE

- CA : Conseil d'Administration	- SSTVGC : Service du Suivi des Travaux du Volet Génie Civil
- DG : Direction Générale	- SEREMO : Service du Suivi de la Réalisation et de la Maintenance des Ouvrages
- SP : Secrétariat Particulier	- SEPER : Service des Etudes des Projets d'Electrification Rurale
- CPD-PS-CP : Cellule de Politique de Développement, de la Coordination et du Suivi Evaluation des Projets	- SACEE : Service Audit et Efficacité Energétique
- CAJP : Cellule des Affaires Juridiques et des Procédures	- SRDIT : Service Recherche -Développement et Innovation Technologique
- CIES : Cellule d'Impact Environnemental et Social	- SEP : Service des Etudes Prospectives
- CPM : Cellule de Passation des Marchés	- SGRH : Service de Gestion des Ressources Humaines
- DERU : Direction de l'Electrification Rurale	- SS : Service de la Solde
- DME : Direction de la Maîtrise d'Énergie	- SFC : Service Finances et Comptabilité
- DAF : Direction Administrative et Financière	- SMA : Service Matériel et Approvisionnement
- DCF : Direction de la Coopération, de la Communication et de la Formation.	- SPCNI : Service des Politiques de Coopération Nationale et Internationale
	- SDF : Service de la Documentation et de la Formation
	- SEDC : Service des Etudes et du Développement Communautaire.

ANNEXE 2 : FORMULE DE JULE DUPUIT ET DE SICHARDT [11 ;12]

2 - ÉCOULEMENTS TRIDIMENSIONNELS À SYMÉTRIE DE RÉVOLUTION – HYDRAULIQUE DES PUIITS

On rencontre de tels écoulements lors de la réalisation de pompages dans la nappe phréatique. Les applications pratiques des pompages sont les suivantes : alimentation en eau, rabattement des nappes et essais de perméabilité in situ.

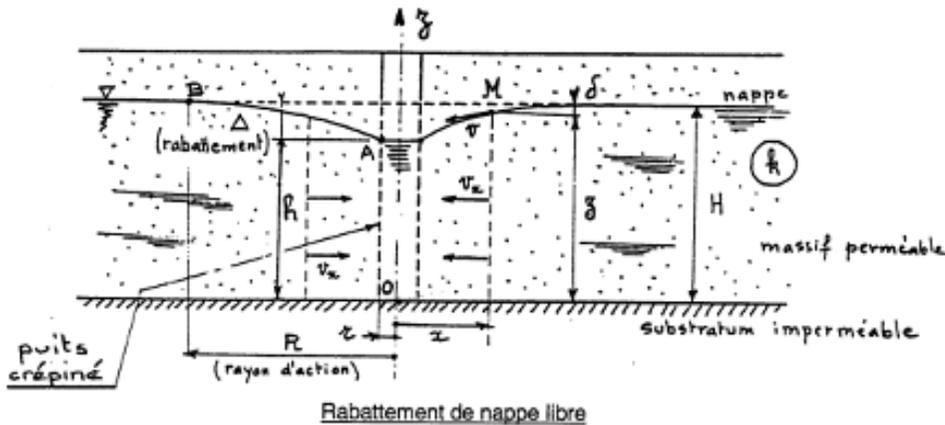
Nous ne donnerons ici que quelques résultats concernant le pompage en régime permanent.

2 - 1 - HYPOTHÈSES DE CALCUL

Soit un massif perméable, isotrope, de perméabilité k , baigné par une nappe libre d'épaisseur H , reposant sur un substratum imperméable (fig. 10). Supposons que l'on fore un puits circulaire vertical, de rayon r , traversant complètement la couche perméable jusqu'au substratum. Le puits est crépiné de manière à ce que les parois ne s'éboulent pas. On pompe alors dans le puits à débit constant q . La hauteur de l'eau dans le puits est notée h .

Dans le cas où la nappe phréatique a une grande épaisseur au repos, un régime permanent s'établit en une journée environ. La surface libre de la nappe présente alors une dépression en forme d'entonnoir, centrée sur le puits et se raccordant à une distance R de l'axe du puits à la surface initiale de la nappe. Le rabattement de la nappe n'affecte donc qu'une portion du massif perméable située à l'intérieur du cylindre vertical de rayon R , appelé rayon d'alimentation ou rayon d'action.

Le problème est de révolution autour de l'axe du puits. La figure ci-après représente une section du massif par un plan diamétral vertical. Le rabattement δ en un point d'abscisse x est donné par la différence de cote entre les points de la surface libre situés à la verticale de x avant et après pompage.



2 - 2 - POMPAGE EN RÉGIME PERMANENT - FORMULE DE DUPUIT

Puits dans une nappe libre (fig. 10)

Soit un point M quelconque de la surface libre de coordonnées x et z .

En désignant par s l'abscisse curviligne le long de la surface libre, le gradient hydraulique en M a pour valeur $-dz/ds$ et la vitesse de décharge, tangente à la surface libre, a pour module : $v = k \cdot i = k \frac{dz}{ds}$

L'hypothèse de Dupuit consiste à supposer que la surface libre a une pente faible et que les lignes de courant peuvent, en première approximation, être considérées comme horizontales et parallèles.

On peut alors écrire : $v = v_x$ et $ds = dx \Rightarrow v_x = k \frac{dz}{dx}$

En admettant que les filets liquides sont pratiquement horizontaux et parallèles, il résulte que v_x est la valeur moyenne de la composante horizontale de la vitesse de décharge le long de la verticale d'abscisse x .

Par suite, le débit qui entre dans le cylindre de surface S (rayon x et hauteur z) a pour valeur : $q = S \cdot v_x = 2\pi \cdot x \cdot z \cdot k \cdot \frac{dz}{dx}$ (1)

Puisque l'eau est incompressible et que le régime est permanent, q est égal au débit pompé dans le puits. En intégrant l'équation (1) entre le rayon du puits r et le rayon d'action R , on trouve la formule de Dupuit :

$$q = \pi \cdot k \cdot \frac{H^2 - h^2}{\ln \frac{R}{r}}$$

2 - 3 - REMARQUES

2 - 3 - 1 - Rayon d'action

L'utilisation de la formule de Dupuit nécessite la connaissance du rayon d'action R . Ce dernier peut être évalué de différentes manières, soit simplement par relevé du niveau de la nappe au cours du pompage, soit à l'aide de formules empiriques, soit encore par un calcul théorique en régime transitoire.

1. En première approximation, on peut admettre que $100 r < R < 300 r$

Les valeurs extrêmes du logarithme sont $\ln 300 = 5,70$ et $\ln 100 = 4,61$; on voit que la plage d'incertitude sur q reste faible. Pour $R = 200 r$, on obtient $\ln R/r = \ln 200 = 5,30$.

2. On peut également utiliser la formule empirique de Sichardt :

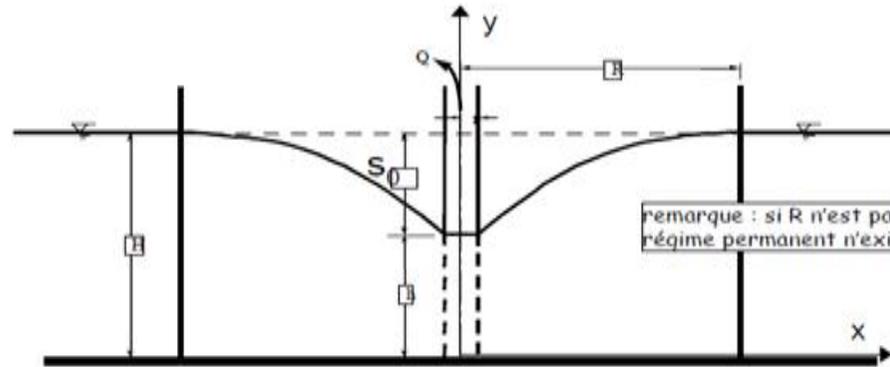
$$R = 3000 (H - h) \sqrt{k}$$

avec : R, H et h exprimés en m. k exprimé en m/s.

hydrogéologie_mise à jour/MSP-ES / 4

Arsène Jules Étienne Dupuit, 1804-66
<http://cepa.newschool.edu/hel/profiles/dupuit.htm>

puits isolé en nappe libre : rayon d'action



remarque : si R n'est pas à l'infini, alors le régime permanent n'existe pas. Sauf si Q=0 !

◆ rayon d'action R ?

- ◆ ne peut être déterminé qu'expérimentalement
- ◆ Sichart (empirique)

$$R = 3000(H - h)\sqrt{K}$$

- ◆ sable fin : 60m gravier : 200m

◆ formule de Dupuit

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

◆ si: $H - h = \Delta H \ll H$

$$H - h = s_0 = \frac{Q}{2\pi KH} \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

ANNEXE 3 : POMPE ET ACCESSOIRES [14]

Pompe immergée LORENTZ PS600C-SJ5-8 / 30m 6,5m³/h



Garantie 2 ans
Fabriqué en Allemagne

RÉFÉRENCE : **GE1001149**

TARIFS PRO & DISPONIBILITÉS :
sur demande

Système de pompe solaire immergée pour puits 4"

Données techniques :

Hauteur manométrique : max. 30 m

Débit : max. 6,5 m³/h

Contrôleur PS600

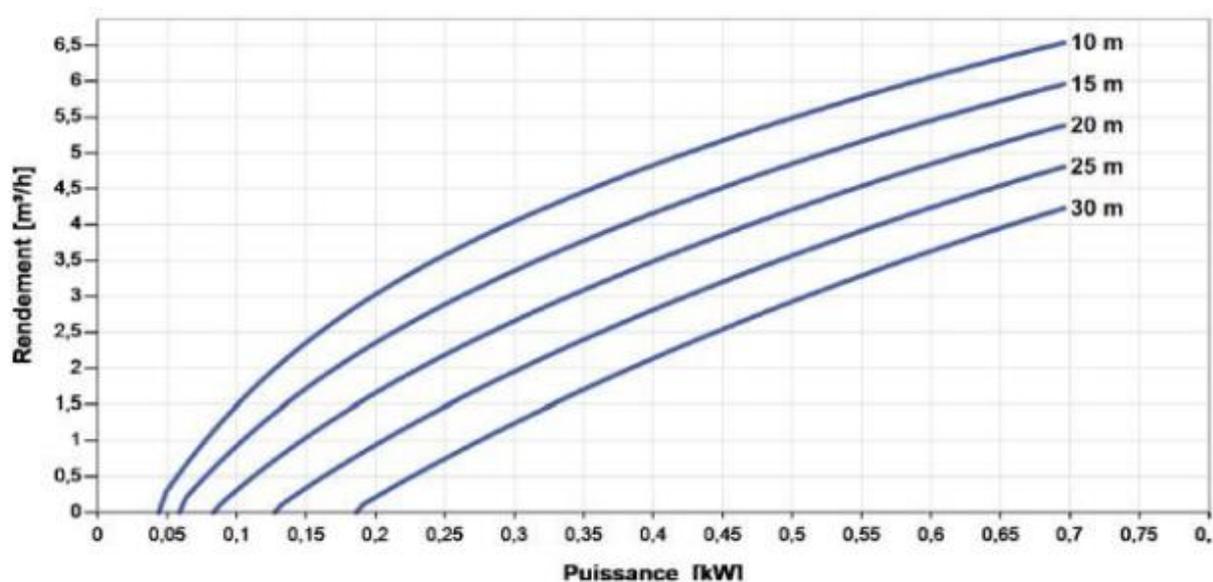
- Entrées de commande pour protection contre le fonctionnement à sec, commande à distance, etc...
- Protection contre inversion de polarité, surcharge et surchauffe
- MPPT (Maximum Power Point Tracking) intégré

Puissance	max. 0,70 kW
Tension d'entrée	max. 150 V
Optimal Vmp	> 68 V
Tension nominale	48 V
Intensité du moteur	max. 13 A

Moteur ECDRIVE 600-C

- Entretien minimal, moteur DC sans balais
- Rempli d'eau
- Matériel de haute qualité, acier inoxydable : AISI 304/316
- Moteur sans électronique à l'intérieur

Puissance nominale	0,70 kW
Efficacité	max. 92 %
Vitesse du moteur	900...3300 rpm
Classe d'isolation	F
Classe de protection	IP 68
Immersion	max. 250 m



**MECHANISCHE TOEBEHOREN
ACCESSOIRES MÉCANIQUES**



**KOELMANTELS VOOR ONDERWATERPOMPEN
CHEMISES DE REFROIDISSEMENT POUR POMPES IMMERGÉES**



RVS AISI 304 / INOX AISI 304

Code 4.89

Kit onderw.pomp Kit pompe imm.	Diam. x L [mm]	Inw. diam. [mm] Diam. int. [mm]	Type	Art.	Euro
KM/CR N° 1	130 x 500	113	FS N° 1	91 07 04 43	125,50
KM/CR N° 2	130 x 800	113	FS N° 2	91 07 04 44	141,70
KM/CR N° 3	130 x 400	115	FS N° 3	91 07 62 30	160,20
KM/CR N° 4	130 x 1000	113	FS N° 4	91 07 04 45	174,90
KM/CR N° 5	180 x 1000	158	FS N° 5	91 07 04 46	401,10
KM/CR N° 6	180 x 1000	158	FS N° 6	91 07 04 47	804,20

**FILTER VOOR KOELMANTEL
CRÉPINE POUR CHEMISE DE REFROIDISSEMENT**



RVS AISI 304 / INOX AISI 304

Code 4.89

FS N°	Diam. [mm]	L. [mm]	Type	Art.	Euro
1, 2, 3, 4	115	117	filter/filtre 115	91 07 04 76	77,50
5, 6	160	117	filter/filtre 160	91 07 04 77	130,90

LES DIAMETRES NOMINAUX EN PVC

D.N. (mm)	CLASS 2 (4 BAR)		CLASS 3 (6 BAR)		CLASS 4 (10 BAR)		CLASS 5 (16 BAR)	
	Epaisseur nominale (mm)	Masse nominale (Kg / m)	Epaisseur nominale (mm)	Masse nominale (Kg / m)	Epaisseur nominale (mm)	Masse nominale (Kg / m)	Epaisseur nominale (mm)	Masse nominale (Kg / m)
20							1.5	0.137
25					1.5	0.174	1.9	0.212
32					1.8	0.264	2.4	0.342
40			1.8	0.334	1.9	0.350	3.0	0.525
50			1.8	0.422	2.4	0.550	3.7	0.809
63			1.9	0.562	3.0	0.854	4.7	1.289
75	1.8	0.642	2.2	0.782	3.6	1.22	5.6	1.820
90	1.8	0.774	2.7	1.13	4.3	1.75	6.7	2.61
110	2.2	1.16	3.2	1.64	5.3	2.61	8.2	3.90
125	2.5	1.50	3.6	2.11	6.0	3.38	9.2	5.01
140	2.8	1.84	4.1	2.65	6.7	4.10	10.4	6.27
160	3.2	2.41	4.7	3.44	7.7	5.47	11.9	8.17
200	4.0	3.70	5.9	5.37	9.6	8.51	14.9	12.8
225	4.5	4.70	6.6	6.76	10.8	10.8	16.7	16.1
250	4.9	5.65	7.3	8.31	11.9	13.2	18.6	19.9
315	6.2	9.02	9.2	13.10	15.0	20.9	23.8	81.5
400	7.9	14.5	11.7	21.10	19.1	34.0	29.7	50.8

CAPTEURS DE NIVEAU D'EAU

Appareils portables	<h3>Capteur de niveau d'eau/de puits/de niveau de réservoir</h3> 	Convertisseurs de mesure
Indicateurs/régulateurs		Sondes de température
Enregistreurs/EASYBus	<p>GBS 01 398,40 €</p> <p>Pour des mesures faciles et rentables. Mesures systématiques du niveau des réservoirs, cuves, eaux courantes, lacs, puits d'eau potable, trous de forage et systèmes d'évacuation des eaux usées</p> <p>GBS 02 510,50 €</p> <p>Pour mesurer le niveau de fioul, de gasoil, produits corrosifs, etc. D'une très grande précision, cette sonde résiste à la circulation horizontale des eaux et possède de nombreuses options spéciales : protection contre la foudre, signaux de sortie spéciaux (par ex. 0-10 V). Pour les mesures d'essence, veuillez commander le modèle Ex.</p> <p>Description : Capteur de pression piézorésistif avec compensation de température. Modèle inoxydable entièrement soudé avec câble de connexion moulé dans la masse et étanche à l'eau. Compensation de la pression atmosphérique par câble ventilé, longueur de câble jusqu'à 300 m. N.B. : la sonde GBS02 résiste à la circulation horizontale des eaux pour éviter toute pénétration d'eau dans la sonde. En cas de panne, il suffit de changer le câble. La sonde restera en état de marche.</p>	Alarme/protection

Caractéristiques techniques :

Plages de mes. : 0,1 bar (100 mbar) à 25 bar = 1 à 250 m (colonne d'eau)
Plages livrables : 0,1,0,25, 0,4, 0,5, 0,6, 1, 1,6,2,5, 4, 6, 10,16, 25
Seuil de surcharge (bar) : 1 2 2 2 4 5 10 10 17 35 35 80 80
Signal sortie : 4-20 mA (option : 0-10 V sur GBS02 uniquement)
Impédance admissible : 4-20 mA: $R_A [\Omega] \leq (U_v [V] - 10 V) / 0,02 A$
 0-10 V : $R_A [\Omega] > 100 k\Omega$

Courant aux. : 10...30 Vc.c. (14...30 Vc.c. à 0-10 V), autres sur demande

Précision :
 GBS01 : Écart de la courbe caract. (% plage) : $\leq 0,5$ régl. du pt limite ou $\leq 0,25$ (BFSL)
 GBS02 : écart courbe caract. (% plage) : $\leq 0,25$ (régl. du pt limite) ou $\leq 0,125$ (BFSL)

(les plages de mesure 0,1 et 0,25 bar correspondent à la précision du GBS01)

Hystérésis (% de la plage) : $\leq 0,1$
Reproductibilité (% de la plage) : $\leq 0,05$
Stabilité annuelle (% de la plage) : $\leq 0,2$ (dans les conditions de référence)

Température de service : -10...+60 °C (GBS01) ou -10...+85 °C (GBS02)
Coefficient de température (% de la plage) : $\leq 0,02 / K$ (pour plage de mesure $\geq 0,4$ bar)

Fluide de remplissage : KN77, compatible usage alimentaire
Boîtier : Acier chrome-nickel 1.4571. Filetage ext. G½" après dévissage du capot de protection en plastique

Dimensions de la sonde : Ø 27 mm, longueur du corps métallique : env. 100 mm (GBS01), env. 147mm (GBS02), câble Ø env. 7,5 mm

Raccordement électr. : Câble PUR (GBS01) ou FEP (GBS02) 10 m moulé dans la masse. Protection anti-écrasement par écran en fibres de verre (câble plus long moyennant supplément, à indiquer lors de la commande)

Options GBS01 :

Câble connexion + long (PUR)	Suppl. au mètre	6,95 €
-------------------------------------	-----------------	---------------

Options GBS02 :

Câble connexion + long (FEP, téflon)	Suppl. au mètre	8,45 €
Parafoudre	Suppl. :	83,80 €
Signal sortie : 0-10 V	Suppl. :	30,80 €

ANNEXE 4 : CALCUL DE LA CAPACITE UTILE DU RESERVOIR D'EAU PAR LA METHODE DE TABLEAU

Période	00h-05h	05h-08h	08h-11h	11h-12h	12h-13h	13h-14h	14h-15h	15h-16h	16h-20h	20h-24h
Débit d'adduction (Qa) en m ³ /h (1)	0	0	0	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	0	0
VOLUME d'eau par tranche Va = Qa x tp en m ³ (2)	0	0	0	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	0	0
VOLUME cumulé (Va) en m ³ (3)	0	0	0	5,4	10,8	16,2	21,6	27	27	27
Débit de consommation (Qc) en m ³ /h (4)	0	0,3	1,75	1,25	1	1,12	1,5	3,5	1,75	0
VOLUME d'eau par tranche Vc = Qc x tp en m ³ (5)	0	0,6	5,25	1,25	1	1,12	1,5	3,5	7	0
VOLUME cumulé (Vc) en m ³ (6)	0	0,6	5,85	7,1	8,1	9,22	10,72	14,22	21,22	21,22
Contenance du réservoir (7) = (3) - (6)	0	-0,6	-5,85	-1,7	2,7	6,98	10,88	12,78	5,78	5,78

$$\text{Capacité utile} = |\text{Déficit Max}| + \text{Excédent max}$$

$$\text{Capacité utile} = |-5,85| + 12,78$$

$$\text{Soit Capacité utile} = 18,63 \text{ m}^3$$

ANNEXE 5 : FUSIBLES ET INTERRUPTEUR- SECTIONNEUR

FUSIBLES CYLINDRIQUES gG			
TAILLE	COURANTS ASSIGNES	TENSION MAXI EN DC	POUVOIR DE COUPURE EN DC
SIZE	RATED CURRENT	MAX. DC VOLTAGE	DC BREAKING CAPACITY
8,5x31,5	0,5A...10A 12A...20A	150 V DC 60 V DC	5 kA
10x38	0,5A...16A 20A... 32A	250 V DC 80 V DC	15 kA
14x51	1A... 25A 32A y 40A 50A	440 V DC 80 V DC 48 V DC	15 kA
22x58	2A...63A 80A y 100A 125A	440 V DC 80 V DC 48 V DC	15 kA

| www.demetec.fr/ : Catalogue / janvier 13/ABB

Cartouches-fusibles type gG



10 x 38 mm

LF301G

Description	Cond.	Référence	Prix
Cartouche fus. 10x38 gG 0.5A	10	LF300G	7,47 €/pc.
Cartouche fus. 10x38 gG 1A	10	LF301G	2,47 €/pc.
Cartouche fus. 10x38 gG 2A	10	LF302G	2,16 €/pc.
Cartouche fus. 10x38 gG 4A	10	LF304G	2,11 €/pc.
Cartouche fus. 10x38 gG 6A	10	LF306G	2,11 €/pc.
Cartouche fus. 10x38 gG 8A	10	LF308G	2,11 €/pc.
Cartouche fus. 10x38 gG 10A	10	LF310G	2,11 €/pc.
Cartouche fus. 10x38 gG 12A	10	LF312G	2,16 €/pc.
Cartouche fus. 10x38 gG 16A	10	LF316G	2,17 €/pc.
Cartouche fus. 10x38 gG 20A	10	LF320G	2,17 €/pc.
Cartouche fus. 10x38 gG 25A	10	LF325G	2,31 €/pc.
Cartouche fus. 10x38 gG 32A	10	LF332G	2,17 €/pc.



14 x 51 mm

LF402G

Description	Cond.	Référence	Prix
Cartouche fus. 14x51 gG 2A	10	LF402G	3,61 €/pc.
Cartouche fus. 14x51 gG 4A	10	LF404G	3,51 €/pc.
Cartouche fus. 14x51 gG 6A	10	LF406G	3,51 €/pc.
Cartouche fus. 14x51 gG 8A	10	LF408G	3,51 €/pc.
Cartouche fus. 14x51 gG 10A	10	LF410G	3,51 €/pc.
Cartouche fus. 14x51 gG 12A	10	LF412G	3,61 €/pc.
Cartouche fus. 14x51 gG 16A	10	LF416G	3,61 €/pc.
Cartouche fus. 14x51 gG 20A	10	LF420G	3,61 €/pc.
Cartouche fus. 14x51 gG 25A	10	LF425G	3,86 €/pc.
Cartouche fus. 14x51 gG 32A	10	LF432G	3,62 €/pc.
Cartouche fus. 14x51 gG 40A	10	LF440G	3,62 €/pc.
Cartouche fus. 14x51 gG 50A	10	LF450G	3,62 €/pc.

ANNEXE 6 : PARAFONDRES

• Partie CC

Caractéristiques

Référence CITEL		DS210-12DC	DS210-24DC	DS210-48DC	DS210-75DC	DS210-95DC	DS210-110DC	DS210-130DC
Description		Parafoudre pour alimentation continue DC ou PV						
Réseau		12 Vdc	24 Vdc	48 Vdc	75 Vdc	95 Vdc	110 Vdc	130 Vdc
Mode de connexion		+/-/PE	+/-/PE	+/-/PE	+/-/PE	+/-/PE	+/-/PE	+/-/PE
Mode de protection		MC/MD	MC/MD	MC/MD	MC/MD	MC/MD	MC/MD	MC/MD
Tension DC max. de fonctionnement	Uc	15 Vdc	30 Vdc	56 Vdc	85 Vdc	100 Vdc	125 vdc	150 Vdc
Tension AC max. de fonctionnement	Uc	10 Vac	15 Vac	40 Vac	60 Vac	75 Vac	95 Vac	115 Vac
Courant résiduel - <i>Courant de fuite à Uc</i>	Ipe	< 0.1 mA	< 0.1 mA	< 0.1 mA	< 0.1 mA	< 0.1 mA	< 0.1 mA	< 0.1 mA
Courant max de ligne <i>(si connexion série)</i>	IL	20 A	20 A	20 A	20 A	20 A	20 A	20 A
Courant de décharge nominal <i>- 15 chocs en onde 8/20µs</i>	In	1 kA	1 kA	2 kA	2 kA	2 kA	2 kA	2 kA
Courant de décharge maximal <i>tenue max. 8/20 µs</i>	I _{max}	2 kA	2 kA	6 kA	6 kA	6 kA	6 kA	6 kA
Niveau de protection MC/MD @ In	Up	85 V	105 V	180 V	250 V	300 V	350 V	400 V
Déconnecteurs associés								
Déconnecteur thermique		Interne						
Fusibles (si nécessaires)		Fusible type gG- 10 A						
Caractéristiques mécaniques								
Dimensions		voir schéma						
Raccordement au réseau		par vis : 1.5-10mm ² (conducteurs actifs) et 2.5-25mm ² (terre)						
Indicateur de déconnexion		Extinction témoin vert						
Module de remplacement		DSM210-12DC	DSM210-24DC	DSM210-48DC	DSM210-75DC	DSM210-95DC	DSM210-110DC	DSM210-130DC
Montage		Rail DIN symétrique 35 mm (EN60715)						
Température de fonctionnement		-40/+85°C						
Indice de protection		IP20						
Boîtier		Thermoplastique UL94-V0						
Conformité aux normes		CEI 61643-11 / NF EN 61643-11 / UL1449 ed.4						
Code Article		440201	440301	440401	440601	441001	440901	440602

www.citel.fr

ANNEXE 7 : DETAIL SUR DU COUT D'INVESTISSEMENT

Pour la localité de Adjakpata					Système PV
N°	Désignations	Unité	Quantité	Prix Unitaire	Montant (Fcfa)
I	Module PV de type SQ100-P Shell de 100 Wc	ens	10	90 000	900 000
II	Pompe immergée PS600C-SJ5-8 et accessoires				
II.1	Pompe immergée PS600C-SJ5-8/ LORENTZ de 6,5 m ³ /h HMT 30 m + contrôleur + les capteurs	ens	1	1 310 000	1 310 000
II.2	Chemise de refroidissement avec crépine	ens	1	143 576	143 576
	Sous total II				1 453 576
III	Câbles et divers accessoires				
III.1	Support de panneaux	u	10	25 000	250 000
III.2	Fusible gG 8 A/10 x 38	u	2	1 382	2 764
III.3	Fusible gG 16 A/22 x 58	u	1	1 421	1 421
III.4	Porte fusible SBI/ 10 x38	u	3	3 386	10 159
III.5	Interrupteur sectionneur SBN216/16A	u	1	14 410	14 900
III.6	Parafoudre DS210-130VDC	u	1	16 965	16 965
III.7	Coffret électrique GEROS IP40	u	2	11 947	23 894
III.8	Câble U-1000 R2V/ en cuivre de 2 x 2,5 mm ²	m	10	3 125	31 250
III.9	Câble de terre en cuivre nu 25 mm ²	m	15	1 801	27 019
III.10	Piquet de terre + barrette de mesure	ens	1	11 646	11 646
	Sous total III				390 018
IV	Canalisation et accessoires hydrauliques				
IV.1	Conduite PVC, PN 10 bar, DN 75 mm	m	50	1 925	96 250
IV.2	Conduite PVC, PN 10 bar, DN 50 mm	m	30	1 225	36 750
IV.3	Conduite PVC, PN 10 bar, DN 25 mm	m	15	726	10 883

IV.4	Coude 90° arrondi, DN 75/75 en PVC		3	5 096	15 288
IV.5	Coude 90° arrondi, DN 50/50 en PVC		5	1 231	6 157
IV.6	Té DN 50 en PVC		1	1 525	1 525
IV.7	Coude 90° arrondi, DN 25/25 en fonte		2	15 818	31 637
IV.8	Croix femelle DN 50 en PVC		1	7 722	7 722
IV.9	Réducteur 50 X 25 en PVC		3	1 395	4 185
IV.10	Compteur ZENNER/DN 63 mm de plage de mesure 0,45 -30 m3/h	u	1	180 275	180 275
IV.11	Compteur WATEAU/DN 50 mm de plage de mesure 0,12 -20 m3/h	u	1	170 565	170 565
IV.12	Clapet de retenu /GLYNWED DN 63 mm	u	1	23 187	23 187
IV.13	Vanne passage direct femelle 41AC/DN 63 mm,PN 16 bar	u	1	45 575	45 575
IV.14	Vanne ACS/DN 25 mm, PN 25 bar		3	7 657	22 971
IV.15	Robinet de puisage 1/2" x 3/4"/ 41AE	u	3	16 750	50 250
IV.16	Robinet d'arrêt DN 1"	u	4	3 314	13 257
IV.17	Manomètre M63RA 0-25 bar	u	1	15 065	15 065
IV.18	Ventouse UNIRAIN/ 2''	u	1	65 087	65 087
IV.19	Filtre dual lite/DN 63 mm	u	1	75 325	75 325
IV.20	Débitmètre QN 6 m³/h de plage de mesure 0 - 12 m³/h	u	1	53 860	53 860
	Sous total VI				925 813
X	Construction et divers				
X.1	Fouille				35 000
X.2	Réhabilitation de l'abreuvoir				18 000
X.3	Borne fontaine				70 000
X.4	Local technique				50 000
X.5	Réservoir d'eau en béton				1 350 000
X.6	Tête de forage				35 000
X.7	Clôture à grillage du champ PV				85 000
	Sous total IX				1 643 000
	TOTAL GENERAL HT				5 312 407

	796 861
Imprévis (5%)	265 620
TVA 18%	956 233
TOTAL GENERAL TTC	7 331 122

ANNEXE 8 : DETAIL SUR DU COUT D'EXPLOITATION

Pour la localité de Adjakpata		Durée de la période (an)	Système PV	
			Valeur présente (FCFA/an)	Valeur actualisée (FCFA)
I	Coût d'investissement initial			7 331 122
II	Exploitation			
II.1	Frais de l'entretien et maintenance			
II.1.1	Entretien du générateur PV = (0,2% Investi.)	25	14 662	206 649
II.1.3	Entretien du réservoir d'eau	25	16 000	225 503
II.1.4	Entretien de génie civil = (0,05% Investi.)	25	3 666	51 662
II.1.5	Entretien et réparation des accessoires = (0,2% Investi.)	25	14 662	206 649
	Sous total II.1			690 463
II.2	Frais de fonctionnement			
II.2.1	Frais de personnels (gardien et fontainier)	25	540 000	13 500 000
	Sous total II.2			13 500 000
II.3	Frais de renouvellement			
II.3.3	Electropompe + contrôleur	7	1 310 000	930 993
		14	1 310 000	661 639
		21	1 310 000	470 214
	Sous total II.3			2 062 846
Coût d'exploitation actualisé sur 25 ans (Sous total II.1+II.2+II.3)				16 253 309
III	Coût résiduel du système			374 285
Coût total actualisé sur 25 ans (I +Sous total II.1+II.2+II.3 - III)				23 210 146