

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Ghardaïa



**Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie**

N° de série :

N° d'ordre :

**Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de MASTER**

Domaine : *Sciences et Technologies.*

Filière : *Hydraulique.*

Spécialité : *Hydraulique urbain.*

Par :

- **Mohamed Lamine OULED HADJ YUCEF**
- **Abderahim HAMIDA**

**Etude comparative entre système de pompage
solaire (photovoltaïque) et système de pompage
classique (conventionnel)**

Soutenu le : .../.../....

Devant le jury :

**Mr. Achour mansour
Mme. Cady mokhtaria
Mr. Hocine BENSAHA**

**MAA Univ. Ghardaïa
MAA Univ. Ghardaïa
MAA Univ. Ghardaïa**

**Examineur
Examineur
Encadreur**

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Nous tenons à remercier avant tous

« **Le Bon Dieu** »

Qui nous donnés la volonté, et le courage pour continue nos études, et atteindre ce niveau, et nous exprimons notre profonde gratitude.

Nous tenons à remercier notre encadreur **Mr. H.BEN SAHA** pour ses conseils et sa grande assistance.

Nous tenons à remercier les membres de jury d'avoir accepté l'évaluation de ce modeste travail.

Nous remercions également tous enseignants du département d'hydraulique.

Nous remercions tous ceux, qui de près ou de loin, qui ont contribué et participé à réaliser ce mémoire.

Dédicaces

Nous voudrions dédicacer ce travail :

- à ma mère et mon père ; mes frères ; mes oncles ; mes amis et aussi à toutes les familles [Hamida ; ghrigha ; ouled ahmed ; rahem] . Qui me donne leurs soins et leurs amours.

- à mes chers parents ; mes frères ; mes amis ; et aussi à toutes la famille [ouled lhadj youcef]

Résumé

Résumé

L'exploitation des potentiels énergétiques (solaire) pour la production de l'électricité s'avère être rentable dans les régions isolées, là où l'extension du réseau électrique conventionnel serait impossible et onéreuse. Le choix d'un système énergétique doit obéir et respecter certaines règles. Le système énergétique choisi doit démontrer au préalable sa compétitivité vis-à-vis d'autres systèmes pour le même service rendu. Sa crédibilité doit reposer sur des bases économiques et techniques. L'opportunité de ce travail est double. Il permet d'avoir une idée précise sur les coûts d'investissement en connaissant les besoins de l'utilisateur et le site d'implantation d'une part, et d'autre part optimiser l'installation photovoltaïque en fonction des divers éléments. En effet la réalisation de systèmes de pompage autonomes, fiables et à bon rendement constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau dans les régions désertiques. Les résultats obtenus de notre étude comparative étaient prometteurs et restent à valider pratiquement.

Mots clés : Pompage photovoltaïque, Pompage classique, Région saharienne, Comparaison, Coût d'investissement, Algérie

Abstract

The exploitation of energy potential (solar) for the production of electricity is proving to be profitable in isolated regions, where the extension of the conventional electricity grid would be impossible and expensive. The choice of an energy system must obey and respect certain rules. The energy system chosen must first demonstrate its competitiveness vis-à-vis other systems for the same service provided. Its credibility must be based on economic and technical bases. The opportunity for this work is twofold. It allows you to have a precise idea of the investment costs by knowing the needs of the user and the installation site on the one hand, and on the other hand to optimize the photovoltaic installation according to the various elements. Indeed, the realization of autonomous, reliable and efficient pumping systems constitutes a practical and economical solution to the problem of water shortage in desert regions. The results obtained from our comparative study were promising and remain to be validated in practice.

Key words: Photovoltaic pumping, Conventional pumping, Saharan region, Comparison, Investment cost, Algeria

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale

A. Partie théorique

Chapitre I : Généralités sur l'irrigation dans la région de Ghardaïa

Introduction

1. Ressources hydriques en Algérie.....	3
1.1. Ressources en eaux souterraines.....	4
1..2. Ressources en eau de surface.....	6
2. Prélèvements des ressources en eau.....	8
Généralité sur les systèmes d'irrigation.....	11
3.Type d'irrigation : Gravitaire aspersion localise.....	11
3.1. Irrigation gravitaire.....	11
3.2. L'arrosage par infiltration (à la raie).....	11
3.3. Avantages de l'irrigation par gravité.....	11

3.4. Inconvénients de l'irrigation par gravité.....	11
3.5. Irrigation par aspersion.....	12
3.6. Avantages de l'irrigation par aspersion.....	12
3.7. Inconvénients de l'irrigation par aspersion.....	12
3.8. Irrigation par apports localisés.....	12
3.9. Avantages de l'irrigation localisée (goutte à goutte).....	12
3.10. Inconvénients de l'irrigation localisée (goutte à goutte).....	12

CHAPITRE II : Besoin en eau des cultures

Introduction.....	14
--------------------------	-----------

1. Définition.....	15
---------------------------	-----------

1.1. Evapotranspiration.....	15
1.2. Evapotranspiration réelle (ETR).....	15
1.3. Evapotranspiration optimale (ETROpt).....	16
1.4. Facteurs influençant l'ETP.....	16
1.5. Mesure de l'ETP.....	17
1.6. Conduite des mesures sur évapotranspiromètre.....	17
1.7. Estimation de l'ETP.....	18

2. Développement des différentes méthodes de calcul de l'etp.....	19
--	-----------

1.1. La méthode de Blaney-Criddle.....	19
1.2. . La méthode de Bllaney-Criddle généralisée.....	19
1.3. Méthode du rayonnement.....	19
1.4. Méthode du Bac.....	20

3. Bilan hydrique.....	21
-------------------------------	-----------

4. Evapotranspiration DE LA CULTURE (kc).....	21
5. Hydrologie et pluies.....	22
5.1. Pluies annuelles.....	22
6. Besoins nets en eau d'irrigation.....	22
6.1. Besoins de pointes.....	23
7. Besoins bruts en eau d'irrigation.....	23
Conclusion.....	24

A.1. POMPAGE CLASSIQUE (CONVENTIONNEL)

Chapitre III : Classification des pompes

Introduction.....	26
1. Généralité Sur les pompes.....	27
2. Principe de la pompe.....	27
3. Classification des pompes.....	27
4. Catégories des pompes.....	29
4.1. Pompes centrifuges.....	29
4.1.1. Principe de fonctionnement.....	29
4.1.2. Amorçage.....	29
4.1.3. Roue de la pompe centrifuge.....	29
4.2. Pompes volumétriques.....	30
4.2.1. Principe de fonctionnement.....	30
4.2.2. Utilisation.....	32

5. Vitesse et diamètre spécifique d'une pompe.....	32
5.1. Notion de la vitesse spécifique.....	33
5.2. Notion du diamètre spécifique.....	33
6. Lois de similitude.....	34
7. Caractéristiques des pompes.....	35
7.1. Rendement global de la pompe.....	36
7.2. Couplage des pompes.....	36
7.2.1. Couplage en série.....	37
7.2.2. Couplage en parallèle.....	37
Conclusion.	38

A.2.POMPAGE SOLAIRE (PHOTOVOLTAÏQUE)

Chapitre IV : Pompage solaire (photovoltaïque)

Introduction.....	39
1. Le rayonnement solaire.....	40
2. Potentiel énergétique solaire en Algérie.....	41
3. Système photovoltaïque.....	41
3.1. Structure d'une cellule PV.....	41
3.2. Les principales technologies de cellules photovoltaïques.....	42
3.2.1. Le silicium.....	42
- Le silicium monocristallin.....	43
- Le silicium poly-cristallin.....	43
- Le silicium amorphe.....	43
3.2.2. Une cellule photovoltaïque à pérovskite.....	44
3.2.3. Les cellules organiques.....	44

3.3. Courbes et grandeurs caractéristiques.....	44
4. La chaine d'énergie du pompage de l'eau.....	46
1. Introduction.....	46
4.1. Problématique.....	46
4.2. Domaines d'utilisation de différentes sources d'énergies.....	47
2. Les organes de transformation de l'énergie électrique en énergie hydraulique.....	48
B.1. La pompe.....	48
➤ Les pompes centrifuges.....	48
➤ Les pompes volumétriques.....	48
➤ Les pompes de surface ou immergées.....	49
➤ - Les pompes de surface.....	49
➤ Les pompes immergées.....	49
B.2. Le Moteur.....	49
C. Les différentes architectures envisageables.....	50
C.1. Architecture du réseau collectif - connexion au réseau électrique.....	50
C.2. Architecture d'un système de pompage d'eau à partir d'une énergie Solaire..	52
➤ L'énergie solaire.....	53
➤ Architecture du système.....	55
➤ La chaîne d'énergie est composée.....	55

B. PARTIE PRATIQUE

Chapitre I : Méthode simple de dimensionnement

1. Méthode simple de dimensionnement.....	63
--	-----------

1.1. Evaluation des besoins en eau.....	63
1.2. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.....	63
1.3. Détermination de l'énergie solaire disponible.....	65
1.4. Inclinaison du générateur photovoltaïque.....	65
1.5. Mois de dimensionnement.....	65
1.6. Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	65
1.7. Dimensionnement du moteur.....	67
1.8. Dimensionnement de la pompe.....	67
1.9. Dimensionnement des tuyauteries.....	67

CHAPITRE II : Analyses économique

II Analyse économique.....	68
II.1. Calcul des différents coûts d'installation du système photovoltaïque.....	68
II.1.1. Équipements et matériels solaires.....	68
II.1.2. Etude technique et réalisation.....	68
II.1.3. Travaux de génie civil.....	69
• Installation.....	69
II.1.4. Coût d'un système photovoltaïque.....	69

CHAPITRE III : RESULTATS COMPARATIFS

Résultats comparatifs.....	71
Conclusion générale.....	77

Liste des tableaux

A. PARTIE THEORIQUE

Chapitre I : généralités sur l'irrigation dans la région de Ghardaïa

Tableau 01 :	Répartition spatiale des eaux souterraines du Nord de l'Algérie.....	5
Tableau 02 :	Prélèvements possibles des eaux souterraines en région aride.....	5
Tableau 03 :	Répartition spatiale des eaux de surface.....	6
Tableau 04 :	Variation interannuelle des apports au niveau de certains barrages.....	7
Tableau 05 :	Volume de prélèvement par type de ressource.....	9

CHAPITRE II : BESOIN EN EAU DES CULTURES

Tableau 06 :	Principales méthodes d'estimation de l'ETP avec les données initiales minimums nécessaires pour chaque une d'elle.....	17
Tableau 07 :	Recueillies sur une période de 110 années (1986-1994).....	22
Tableau 08 :	Potentiel solaire en Algérie.....	40
Tableau 09 :	Quelques avantages et inconvénients de deux moteurs (moteurs à courant continu ; et moteurs asynchrones).....	48

B. PARTIE PRATIQUE

Tableau 10 :	Coefficient K_{ac} pour différents types d'accessoires dans la tuyauterie.....	58
Tableau 11 :	Avantages et inconvénients des deux systèmes de pompage Etudie...	71

Liste des figures

Chapitre III : CLASSIFICATION DES POMPES

Figure 1 : Principe de conversion d'une pompe hydraulique.....	26
FIGURE 2 : Classification des pompes hydraulique.....	27
Figure 3 : Schéma d'une pompe centrifuge.....	29
Figure 4 : Disposition monobloc vitesse variable.....	29
Figure 5 : Pompe Volumétrique A Membrane (Alternative).....	30
Figure 6 : Pompe volumétrique (rotative).....	30
Figure 7 : Classification des turbopompes en fonction de la vitesse spécifique.....	32
Figure 8 : Système de couplage en série.....	34
Figure 9 : Point de fonctionnement de pompes en série.....	35
Figure10 : Système de couplage en parallèle.....	35
Figure 11 : Point de fonctionnement de pompe en parallèle.....	35

Chapitre IV : Pompage solaire (photovoltaïque)

Figure 12 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	39
Figure 13 : Structure typique d'une cellule solaire au silicium.....	41
Figure 14 : Courbe caractéristiques d'une cellule PV en mode générateur.....	43
Figure 15 : Schéma équivalent d'une cellule PV.....	44
Figure 16 : Montre les différentes solutions qui permettent de disposer de l'énergie hydraulique.....	45
Figure 17 : D'après la partie "le cycle de l'eau" de l'étude "Les métiers de l'eau "	49

Figure 18 : Schéma de mobilisation de la ressource en eau.....	50
Figure 19 : Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.....	52
Figure 20 : Installation de production d'énergie hydraulique à partir d'un panneau solaire.....	53
Figure 21 : Architecture de la chaîne d'extraction de l'eau à partir d'un panneau solaire.....	53
Figure 22 : Calcul du coût de m ³ d'eau pompé par les deux systèmes photovoltaïques/électrogène.....	67
Figure 23 : Comparaison des coûts de m ³ d'eau pompé par les deux systèmes photovoltaïque/électrogène en fonction du nombre d'année d'exploitation.....	68
Figure 24 ; Comparaison des coûts de m ³ d'eau pompé par les deux systèmes photovoltaïque/électrogène en fonction du nombre d'année d'exploitation.....	69
Figure 25 : Histogramme d'amortissement du système de pompage (Avec aide de l'état).....	70
Figure 26 : Pompage d'eau pour irrigation.....	71

PARTIE THEORIQUE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. (**Meflah A et Allaoui T, 2012**). Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans zones désertiques et semi-désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides et semi-arides est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage solaire photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent (**Hadj Arab et al, 2005**). L'énergie solaire est largement utilisée pour l'alimentation des régions isolées ou désertes (éclairage, charge des batteries, pompes, etc...). Le grand avantage est que cette source est inépuisable, elle offre une grande sécurité d'utilisation et elle est propre (**Moussi A et Saadi A, 2002**).

Selon **Chenni R (2007)** La technologie photovoltaïque (PV) est une solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages :

- Elle est un moyen fiable qui requiert peu d'entretien ;
- Elle fournit de l'électricité avec l'énergie gratuite et renouvelable du soleil ;
- Elle ne nécessite aucun combustible ;
- Elle est silencieuse et non polluante respectueuse de l'environnement ;
- Elle est polyvalente et peut être ajustée selon les besoins.

Louazene M.L (2008) note que ce problème d'énergie est encore plus sensible dans les sites isolés où l'utilisation des ressources classiques s'avère souvent très coûteuse. En effet, plusieurs contraintes, comme le transport du combustible et les entretiens périodiques des moteurs diesel, rendent la recherche d'une source d'énergie alternative indispensable pour ce type de sites.

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Le système de pompage PV est généralement composé d'un générateur PV, d'un convertisseur d'énergie, d'un moteur et d'une pompe.

Le choix technique et économique de l'une des formes des énergies renouvelables sur des sites enclavés et éloignés, principalement en zones semi-arides et arides, est tributaire de la

connaissance de plusieurs paramètres, à savoir : la puissance électrique requise, le coût d'investissement, et les contraintes d'accès au site d'implantation.

L'analyse économique préalable de l'une de ces formes d'énergies renouvelables revêt une importance capitale, car elle conditionne la compétitivité entre les différentes sources énergétiques envisagées.

Cette étude comparative permet une évaluation précise à chacune des installations de pompage (pompage solaire et classique). Elle permet d'estimer, en outre la meilleure solution énergétique à adopter en termes de coût.

CHAPITRE I

Aperçu sur les ressources hydrique en Algérie

L'Algérie se situe parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par habitant et par an. Si en 1962, la disponibilité en eau théorique par habitant et par an était de 1500 m³, elle n'était plus que de 720 m³ en 1990, 680 m³ en 1995, 630 m³ en 1998. Estimée à environ 500 m³ à l'heure actuelle, elle ne sera que de 430 m³ en 2020 et serait encore plus réduite ramenée aux ressources en eau mobilisables.

La problématique de l'eau est indissociable du développement durable dans la mesure où l'eau doit permettre de répondre aux besoins des générations actuelles sans hypothéquer.

Par des effets peu ou non réversible, la capacité des générations futures à satisfaire les leurs Il faudrait disposer entre 15 et 20 milliards de m³ par an, en réservant 70% à l'agriculture, pour parvenir à une sécurité alimentaire satisfaisante. C'est un défi titanesque lorsqu'on sait qu'on mobilise à peine au plus 5 milliards de m³ d'eau par an (Conseil National Economique et Social, 2004).

L'eau n'est pas uniquement une matière première renouvelée mais finie et irrégulière, elle n'est pas non plus un don de ciel inépuisable et éternellement pure.

Les risques d'appauvrissement des ressources en eau imputables à d'éventuels changements climatiques sont à prendre sérieusement en compte, d'autant que la pression exercée sur ces ressources ne cessera de s'amplifier sous les effets conjugués de la croissance démographique et des politiques appliquées vis-à-vis des activités consommatrices d'eau, notamment l'agriculture, l'industrie et le tourisme.

Le début du 21^{ème} siècle s'annonce donc sous le signe d'une aggravation des pénuries d'eau, particulièrement dans les régions Ouest du pays en dépit du recours à d'autres formes de mobilisation de l'eau envisagée. Les pollutions des eaux et la pression démographique influent négativement sur la disponibilité en eau déjà faible.

L'érosion importante qui affecte les plaines septentrionales diminue à la fois le potentiel agricole et les capacités de mobilisation des ressources en eau du pays.

Par ailleurs, les pertes totales dans les réseaux d'irrigation sont estimées globalement à 40% des prélèvements ; elles dépasseraient 50% dans les villes et fluctuent généralement entre 30% et 70%.

Ce phénomène, tellement répandu au point de devenir banal, a fini par donner l'impression qu'il relevait d'une fatalité naturelle.

Dès lors, la question qu'il conviendrait légitimement de poser n'est-elle pas de savoir si les actions préconisées sont suffisamment pertinentes lorsqu'on sait que la dotation domestique moyenne nette est de l'ordre de 55 litres par habitant et par jour et pratiquement dans toutes les villes où le service de l'eau n'est pas continu. Les populations sont exposées aux maladies parce qu'elles sont alimentées en eau par citernes ou parce qu'elles stockent de l'eau. Les volumes d'eau non facturés au niveau des établissements de l'eau atteint 50%. (Actes des assises sur l'eau, 1995).

1. Ressources hydriques en Algérie

Le territoire algérien couvre une superficie de près de 2,4 millions de km², mais 90% de cette étendue correspondent à un désert où les précipitations sont quasi-nulles.

Dans cette partie du territoire, les ressources en eau superficielles sont très faibles et limitées essentiellement à la partie du flanc septentrional de l'Atlas ; les ressources souterraines y sont par contre abondantes mais sont très faiblement renouvelables (nappes du Sahara septentrional). Le potentiel des ressources en eau renouvelables est localisé dans le Nord de l'Algérie qui englobe les bassins tributaires de la Méditerranée et les bassins fermés des Hauts Plateaux.

La pluviométrie varie de 200 mm par an sur les Hauts Plateaux steppiques à 1600 mm par an sur les reliefs de l'Atlas Tellien en bordure de la Méditerranée. En plus de cette variation Nord-Sud, on note également une augmentation de ces précipitations d'Ouest en Est.

Les potentialités en eau du pays sont estimées à un peu moins de 20 milliards de mètres cubes, dont 75% seulement sont renouvelables (60% pour les eaux de surface et 15% pour les eaux souterraines). Les ressources non renouvelables concernent les nappes du Sahara septentrional qui seraient exploitées comme un gisement et qui se traduit donc par un abattement continu du niveau de ces nappes.

Les ressources en eau dépendent du climat qui dans le cas de l'Algérie est aride à semi-aride. Elles sont donc peu abondantes et correspondent globalement à 12.4 milliards de mètres cubes pour les eaux de surface et 2.8 milliards de mètres cubes d'eaux souterraines dont 800 millions de mètres cubes dans le Sud (ressources en eau renouvelables).

Schématiquement, les ressources en eau superficielles décroissent du Nord au Sud, au fur et à mesure que croissent les ressources en eau souterraines.

Au Nord du pays, les ressources mobilisées totales sont destinées à raison de 55,3 % à l'irrigation (2,1 milliards de mètres cubes), de 34,2 % à l'alimentation en eau potable (1,3 milliard de mètres cubes) et 10,5 % à l'industrie (0,4 milliard de mètres cubes).

Au niveau des Hauts Plateaux et du Sahara, pauvres en eaux de surface, correspondent des ressources souterraines ; de vastes nappes profondes aux circulations complexes, y ont été mises en relief, elles présentent l'inconvénient de n'être pas renouvelables au Sahara (DGAIH, ANRH, Groupement BETURE/CARL SALZGITTER, 1997).

La pollution des ressources en eau commence à atteindre des proportions inquiétantes notamment dans la région Tellienne où se trouve la plus grande partie des ressources en eau. La disponibilité en eau déjà faible risque de l'être davantage du fait de cette pollution des eaux usées mais également des pollutions chimiques (industrie et agriculture).

1.1. Ressources en eaux souterraines

Les eaux souterraines ont été évaluées dans le Nord à environ 1,9 milliard de mètres cubes. Ces ressources qui sont relativement plus faciles à mobiliser, sont aujourd'hui exploitées à plus de 90 %; beaucoup de nappes sont même dans un état de surexploitation critique.

Actuellement, on estime à plus de 12.000 forages, 9.000 sources et 100.000 puits qui sollicitent les nappes pour les besoins de l'agriculture et l'alimentation en eau potable et industrielle.

La répartition des eaux souterraines du Nord par région hydrographique se présente comme suit :

Tableau 01: Répartition spatiale des eaux souterraines du Nord de l'Algérie (DGAIH, ANRH, Groupement BETURE/CARL SALZGITTER, 1997)

Bassin hydrographique	Ressources potentielles (hm ³ / an)	Total (%)
Oranie Chott Chergui	375	19.7
Chélif Zahrez	231	12.2
Algérois Soumam Hodna	745	39.2
Constantinois Seybouse Mellègue	28,9	28.9
Total	1.894	100.0

A l'inverse des ressources en eaux souterraines situées dans le Sud, les réservoirs du Nord du pays sont renouvelables, ils concernent au total 126 nappes principales. Les nappes ayant fait l'objet d'une modélisation sont au nombre de huit et représentent 35% du potentiel des eaux souterraines de l'Algérie du Nord.

Dans le Sud, quelques nappes phréatiques, souvent saumâtres, existent dans les lits d'oueds tels que les oueds Righ, M'zab et Saoura, mais l'essentiel du potentiel en eau se trouve dans les nappes du Sahara septentrional qui ont fait l'objet d'études en 1969-1971, (ERES UNESCO) et en 1981-1985 (ANRH, Projet RAB PNUD).

Le renouvellement de ces nappes fossiles ou semi-fossiles n'est assuré qu'à hauteur de 800 millions de mètres cubes environ. Selon les dernières études citées ci-dessus, l'exploitation de ces

nappes pourrait être portée à cinq milliards de m³/an dont 56 % pour le continental intercalaire et 44 % pour le complexe terminal ainsi que l'indique le tableau ci-dessous :

Tableau 02 : Prélèvements possibles des eaux souterraines en région arides, Groupement algériennes (DGAIH, ANRH BETURE/CARL SALZGITTER,1997

Wilaya	Prélèvements possibles (Hm ³ /an)		
	Continental Intercalaire	Complexe Terminal	Totaux
Biskra	24,6	9.3	33.9
El Oued	310.5	713.9	10024.4
Ouargla	507,0	1446.2	1953.2
Ghardaia	559.9	-	559.9
Adrar	1180.1	-	1180.1
Tamanrasset	184.8	-	184.8
Totaux	2766,9	2169,4	4936,3

1.2. Ressources en eau de surface

Les écoulements de surface avaient été estimés pendant la période coloniale à 15 milliards de m³ (19ème Congrès géologique international Alger – 1952) pour les bassins tributaires de la Méditerranée (123000 km²), c'est-à-dire sans tenir compte des bassins qui dépendent des chotts. Dans les dernières études menées dans le cadre du Plan National de l'eau (ANRH et DGAIH) et qui intègrent des années de sécheresse (jusqu'à 1993), les ressources en eau de surface sont évaluées à 12.4 milliards de m³ répartis par bassin hydrographique selon le tableau 03 suivant:

Tableau 03: Répartition spatiale des eaux de surface (DGAIH, Groupement BETURE/CARL SALZGITTER, 1997 ; Projet RAB, 1987)

Bassin hydrographique	Ressources potentielles (hm³/ an)	Pourcentage (%)
Oranie Chott Cchergui	1025	8.7
Chélif Zahrez	1840	15.7
Algérois Soumam Hodna	4380	37,3
Constantinois Seybouse Mellègue	4500	38,3
Sud	600	0,48
Total	12.345	100.0

Les débits sont irréguliers au cours de l'année avec des étiages souvent nuls et des crues de courtes périodes mais violentes, causant une érosion à l'amont et des inondations à l'aval.

L'irrégularité interannuelle est aussi marquée et les extrêmes observés au niveau de certains ouvrages (tableau 04) montrent l'importance des écarts, et présentent la difficulté qu'il y a à régulariser les écoulements en Algérie (DGAIH, ANRH, Groupement BETURE/CARL SALZGITTER, 1997).

Tableau 04: Variation interannuelle des apports au niveau de certains barrages (1943 –1993)

Barrages	Apport en hm ³ /an			
	Moyen annuel	inter-annuel	minimum	maximum
BNI BAHDEL	71	19	116	6.1
Bouhnifia	122	17	467	27.5
Cheurfas	76	18	235	13.1
FODDA	99	10	234	23.4
GHRIB	152	20	500	25.0
Eraguène	130	42	282	6.7
Eghil Emda	182	37	427	11.5
Chéffia	154	18	338	18.8

A noter que les besoins en eau ont tendance à être à forte composante saisonnière : l'irrigation, la population, ainsi que la part du tourisme concentré dans les zones littorales concourent à déterminer une forte saisonnalité des utilisations de l'eau. A l'inverse de la variabilité saisonnière des ressources : les demandes en eau sont maximales quand les ressources sont minimales. Ce déphasage entre le régime des ressources et des demandes se produit également à l'échelle interannuelle, ce qui accentue les risques de pénurie conjoncturelle.

2. Prélèvements des ressources en eau

On peut ainsi estimer que pendant ces dernières années les prélèvements en eau de surface à partir des barrages ont été d'environ 300 millions de m³ pour l'alimentation en eau potable, 270 millions de m³ pour l'irrigation dans les grands périmètres irrigués, soit un total de 570 millions de m³. Pour les eaux souterraines dans le Nord du pays, il est indiqué qu'elles sont évaluées globalement à 2 milliards de mètres cubes et qu'elles sont mobilisées à concurrence de 1,6 milliard de mètres cubes.

A cet effet, il est précisé que de 1990 à 1999, il a été mobilisé 1 milliard de m³ d'eaux souterraines, ce qui peut laisser croire qu'avant 1990, il n'a été mobilisé que 600 millions de m³ (ce qui semble peu vraisemblable dans la mesure où en 1989, on estimait déjà que les eaux souterraines étaient exploitées à 80%) (Conseil National Economique et Social, 2004). En dehors de statistiques, les prélèvements totaux sur les eaux souterraines ne peuvent être qu'approximatifs.

Si on peut considérer que les eaux souterraines connues du Nord du pays sont totalement exploitées, celles du Sud ne le seraient qu'à hauteur de 1,7 milliard de mètres cubes.

Le taux d'exploitation serait donc de 34 % en moyenne et est sensiblement le même pour les deux nappes (complexe terminal et continental intercalaire). Toutefois dans les zones à faibles potentialités (Biskra) le taux d'exploitation est déjà très élevé.

D'une manière générale, on peut estimer que les ressources en eau prélevées ces dernières années, seraient de l'ordre de 4,1 à 4.15 milliards de m³ répartis comme suit (Conseil National Economique et Social, 2004) :

Tableau 05 : Volume de prélèvement par type de ressource

Ressource	Prélèvement (Hm³)
Eaux de surface (barrages)	700
Eaux de surface (fil de l'eau et collinaire)	100 à 150
Eaux souterraine NORD	1600
Eaux souterraines SUD	1700
TOTAL	4100 à 4150

Ces volumes sont utilisés donc à hauteur d'un tiers pour l'alimentation en eau potable et industrielle et le reste pour l'irrigation. Il convient de noter que les prélèvements sont de 500 m³ par habitant dans le Nord alors que dans le Sud du pays, ils ne sont que de 90 m³ par habitant

La ville de Ghardaïa est située au centre du Sahara algérienne, cette ville à un caractère spécial, car elle conserve toujours sa culture ancienne et son patrimoine.

Dans ce chapitre on essayera de faire une identification générale des caractéristiques climatiques, géographiques, agricoles.

Les besoins d'irrigation dépendent essentiellement de deux facteurs :

- La nature des assolements (type de cultures)
- La superficie à irriguer

En fait, si on parle des consommations en eau, il faudrait ajouter un troisième facteur qui est la technique d'irrigation : (gravitaire, aspersion...etc.).

Généralité sur les systèmes d'irrigation

3. Type d'irrigation : Gravitaire aspersion localise

3.1. Irrigation gravitaire

Le ruissellement de l'eau créer par la pente du terrain naturel humecte le sol par percolation à travers ses pores. Cependant l'action les deux forces planchent ou par calant sont des sous classes de l'irrigation par ruissellement. Le principe consiste à faire couler sur le sol une mince lame d'eau qui s'infiltrera verticalement jusqu'à l'humidification de la tranche voulue du sol.

3.2. L'arrosage par infiltration (à la raie)

C'est une méthode qui consiste à faire distribuer l'eau par des rigoles ou raies avec un débit relativement faible comparativement aux autres procédés. Dans cette méthode, une partie seulement du sol qui reçoit directement l'eau, le reste est humecté par infiltration latérale.

Le principe consiste à donner au sol une couche d'eau plus au moins épaisse, qu'on laisse s'ajourner pendant le temps nécessaire pour qu'elle pénètre par infiltration à la profondeur utile permettant ainsi au sol de mettre en réserve l'eau indispensable au développement des Cultures.

3.3. Avantages de l'irrigation par gravité

- Coût moins élevé par rapport aux autres procédés.
- Pas d'équipements de mise en surpression de l'eau.
- Matériel d'irrigation très réduit.

3.4. Inconvénients de l'irrigation par gravité

- Grand volume d'eau par unité de surface.
- Déplacement des engins agricoles est difficile (à cause des rigoles)
- Nécessité d'une main d'œuvre importante.
- Nécessité de planage des terres.
- Pertes par infiltration considérables.

3.5. Irrigation par aspersion

L'eau parvient aux cultures sous forme de pluies artificielles grâce à des appareils alimentés en eau sous pression appelés (asperseurs).

3.6. Avantages de l'irrigation par aspersion

- Ne nécessite aucun aménagement préalable de la surface à irriguer.
- Augmentation du coefficient d'utilisation des terres.
- Permet une économie d'eau importante.
- Met à la disposition des exploitants des conditions d'arrosage très simples.
- Nécessite moins de main d'œuvre.
- Possibilité d'automatisation du système.
- Assure une forte oxygénation à l'eau.

3.7. Inconvénients de l'irrigation par aspersion :

- Coût des investissements très élevé. Favorise l'évapotranspiration en période sèche.
- L'uniformité de l'arrosage se dégrade en cas de vents dépassant les 4 à 5 m/s.

3.8. Irrigation par apports localisés :

L'eau est distribuée à la surface du sol par des goutteurs qui fournissent un débit faible pendant une longue durée.

3.9. Avantages de l'irrigation localisée (goutte à goutte)

- Une économie d'eau très importante.
- Une économie de mains d'œuvre (système fixe).
- La non sensibilité aux vents forts.
- Elle permet un dosage régulier en engrais.
- L'humidité au voisinage des racines reste élevée.

3.10. Inconvénients de l'irrigation localisée (goutte à goutte) :

- Risque d'obstruction des goutteurs.
- Risque de salinisation
- Nécessite une main d'œuvre qualifiée.
- Coût élevé.
- Contrôle difficile des goutteurs.

CHAPITRE II

BESOIN EN EAU DES CULTURES

Introduction

La première étape de l'établissement d'un projet d'irrigation consiste à déterminer les besoins en eau des cultures. En termes généraux, le besoin en eau d'une culture est équivalent au niveau d'évapotranspiration nécessaire à sa croissance optimale.

De façon précise, le besoin en eau est défini comme le niveau d'évapotranspiration d'une culture indemne de maladie et poussant dans une parcelle d'une surface supérieure à un hectare dans les conditions optimales de sol ; ces derniers consistent en une fertilité et une humidité suffisante pour atteindre le potentiel de production de la culture dans le milieu considéré. Ce besoin en eau est appelé E.T.M.

1. Définitions

1.1. Evapotranspiration

Nous appelons évapotranspiration, la quantité d'eau consommée, qui comprend d'une part l'eau transpirée par la plante, d'autre part l'évaporation directe à partir du sol, la dernière n'est importante que dans le cas de couverts végétaux discontinus. Evapotranspiration potentielle (ETP ou ET0) : c'est en principe la valeur maximale possible de l'évapotranspiration dans des conditions climatiques données, cette définition se heurte à certaines difficultés d'interprétation, nous considérons plutôt dans la pratique l'évapotranspiration potentielle comme une référence et nous la définissons comme étant l'évapotranspiration d'un couvert végétal bas, homogène dont l'alimentation en eau n'est pas limitant et qui n'est pas soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnelle, physiologique ou pathologique .

Nous employons couramment le terme « ETP » pour désigner la valeur approchée de l'évapotranspiration potentielle obtenue par calcul à partir d'une formule d'estimation fondé sur des données climatiques. L'ETP ainsi définie est considérée comme une donnée climatique, c'est-à-dire que les facteurs culturaux n'interviennent pas dans son estimation.

Evapotranspiration maximale (ETM ou ETC) : c'est la valeur maximale de l'évapotranspiration d'une culture donnée, à un stade végétatif donné et dans des conditions climatiques données. Sa valeur est théoriquement inférieure ou égale à l'ETP, en fait il n'est pas rare de trouver pour certaines cultures des valeurs d'ETM supérieures à l'ETP. En fin nous posons :

$$\mathbf{ETM=K*ETP}$$

Avec K coefficient cultural qui dépend :

- de la culture
- du stade végétatif

1.2. Evapotranspiration réelle (ETR)

C'est l'évapotranspiration d'un couvert végétal dans des conditions réelles données : l'alimentation de la plante peut être limitée par des contraintes d'ordre physique, chimique et

biologique, et l'on a alors une réduction de la transpiration par rapport à la valeur maximale qu'elle pourrait atteindre en l'absence de contraintes. Ainsi donc :

$$\mathbf{ETR \leq ETM}$$

1.3. Evapotranspiration optimale (ETROpt)

C'est une notion plus difficile à approcher que les précédentes, et dont l'intérêt se fait sentir lorsque l'on constate que l'optimum économique est atteint pour des valeurs inférieures à l'ETM, soit parce que le rendement commercialisable maximal- ou la quantité maximale est atteint pour des valeurs de l'ETR inférieures à l'ETM, soit parce que le rendement marginal au voisinage de l'ETM est trop faible en comparaison du coût marginal de l'irrigation. Dans ce dernier cas, la comparaison d'ETROpt intègre donc également des critères économiques et peut être donc sujette à certaines variations en fonction de la conjoncture, Nous avons donc en principe :

$$\mathbf{ETR \leq ETM \leq ETP}$$

L'importance de l'ETP vient du fait qu'elle constitue une évaluation maximale des besoins en eau de toutes les cultures et qu'à partir d'elle nous pouvons estimer les besoins maximaux (ETM) ou optimaux (ETROpt), moyennant la connaissance des coefficients K et Kopt pour les différentes phases végétatives d'une culture données.

1.4. Facteurs influençant l'ETP

Nous pouvons résumées les principaux facteurs influençant l'ETP d'une surface donnée comme suit :

Facteurs dépendant du climat :

- Le rayonnement solaire, qui est la principale source d'énergie reçue directement par la surface ;
- Le déficit de saturation de l'air, dont le gradient détermine le flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère ;
- Le vent, qui accentue les effets du déficit de saturation, en augmentant les coefficients d'échange turbulent pour la vapeur d'eau et pour la chaleur ;

-
- la température de l'air, qui commande en partie ce déficit de saturation facteurs dépendant de la surface ;
 - L'albédo, qui dépend surtout de la nature du couvert végétal, mais qui varie également un peu en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement sur la surface ;
 - la rugosité du couvert ; qui a en général pour effet une augmentation de l'évapotranspiration (augmentation de la surface foliaire soumise à l'évaporation) si le déficit de saturation et le vent sont importants. Mais elle peut aussi avoir l'effet contraire dans des conditions de plus forte humidité (diminution du gradient d'humidité atmosphérique au voisinage des feuilles supérieures).

1.5. Mesure de l'ETP

Bien que l'ETP soit souvent considérée comme une donnée climatique, sa mesure se fait sur un couvert végétal. On appelle évapotranspiromètre l'installation utilisée pour cette mesure : il s'agit d'une cuve enterrée placée au milieu d'une parcelle irriguée, qui sert d'anneau de garde, et dans laquelle on reconstitue un sol recouvert de la même culture dans les mêmes conditions.

La culture dans la cuve est arrosée avec un léger excès d'eau, et l'eau de drainage et est récupérée au moyen d'un tuyau se déversent dans un bac de récupération.

La détermination de l'ETP à partir des mesures sur évapotranspiromètre se fait par différence entre les apports et les pertes, elle se calcule par la formule suivante :

$$\text{ETP} = \text{pluie} + \text{irrigation} - \text{drainage} - R$$

Les variations de réserves R seront négligeables en valeur relative si l'alimentation en eau est régulière, et si la période de calcul est suffisamment longue (une semaine à dix jours au minimum).

1.6. Conduite des mesures sur évapotranspiromètre

Irrigations journalières : fertilisation et coupes régulières ; bilans sur des périodes telles que l'on puisse assurer que $R=0$.

La précision des mesures obtenues avec un évapotranspiromètre ordinaire est le plus souvent de l'ordre de 10%, même avec une conduite soignée. Par contre le moindre laisser aller peut aboutir à des distorsions de l'ordre de 30% à 40%, et même plus.

Ce n'est qu'avec des évapotranspiromètre que l'on peut atteindre des précisions de l'ordre 0.5 mm d'évaporation (pesée piézométrique ou dynamique), ou même de l'ordre de 0.05 mm d'évaporation (pesée par bascule mécanique). Seul de tel dispositif peuvent permettre d'envisager des mesures de l'ETP pour des périodes de 24h, ou même de suivre l'évolution de l'ETP au cours de la journée.

La mesure de l'ETP doit s'accompagner de mesures météorologiques complètes, d'abord la mesure de la pluviométrie est indispensable au calcul du bilan hydrique dans l'évapotranspiromètre, ensuite, il est important de pouvoir rapprocher les mesures de l'ETP des mesures climatiques effectuées sur le même site (rayonnement durée d'insolation, température maximale et minimale, psychrométrie, vent à 2m évaporation piche, évaporation sur nappe d'eau libre).

1.7. Estimation de l'ETP

Vu la complexité de la mise en œuvre d'un dispositif de mesure de l'ETP, il est presque toujours préférable de recourir à des méthodes d'estimation. On dispose en effet actuellement de formules et de méthodes suffisamment variées, et adoptées à différents climats, de plus une bonne estimation vaut mieux qu'une mauvaise mesure.

A partir des données météorologiques disponibles, on choisit une méthode de prévision pour calculer l'évapotranspiration de la culture de référence (ETP) ou (ET0). Si l'on dispose d'une série complète de données météorologiques, on choisira la méthode en fonction du degré de précision, Le tableau suivant résume les principales parmis beaucoup d'autres et indique les données initiales minimums nécessaires pour chaque méthode.

Tableau 06 : Principales méthodes d'estimation de l'ETP avec les données initiales minimums nécessaires pour chaque une d'elle.

Méthode	Température	Humidité	Vent	Insolation	Rayonnement	Evaporation	Milieu
Blaney-Cridle	*	0	0	0			0

Rayonne-ment	*	0	0	*	(*)		0
Bac		0	0			*	*

La source : **ARNH station d'étude**

Le calcul de l'ETP se fait par période de 30 ou de 10 jours, en utilisant les données climatiques moyennes.

La méthode du rayonnement donne de bon résultat pour des périodes décadaires ou plus mais exige une base de données météorologiques, la méthode du bac peut elle aussi donner de bons résultats si les bacs bénéficient de meilleurs emplacement et que les vents sont légers.

Sous de nombreux climats, la méthode de Blaney-Criddle donne des résultats satisfaisants, surtout si on introduit des coefficients liés au vent, à l'humidité, et à l'insolation relative.

Vu l'importance qu'a l'estimation de l'ETP dans tout projet de dimensionnement de réseaux d'irrigation, il est important de détailler chaque méthode pour sortir le choix le plus compatible avec notre situation et ça par une analyse cartésienne de la probabilité d'erreur pouvant être commise sur le résultat final.

2. Développement des différentes méthodes de calcul de l'ETP

2.1. La méthode de Blaney-Criddle

La formule de blaney-criddle (1950) est l'une des plus couramment utilisée pour estimer les besoins en eau des cultures, Surtout dans le cas où la seule donnée météorologique crédible disponible est la température de l'air.

L'approche originale de Blaney-Criddle fait intervenir la température (t) et le pourcentage d'heures diurnes (N) comme variables climatiques.

Donc l'ETP selon Blancey – Crid est calculée avec la formule suivante

$$\mathbf{ETP=N*(0.46*t+8.13)}$$

Avec :

N : pourcentage d'heures diurnes moyennes journalières déterminées du tableau.

t : la température en (°C).

2.2. La méthode de Bllaney-Criddle généralisée

La méthode de Bllaney-criddle a été généralisée pour d'autres climats et ça en corrigeant la valeur de l'évapotranspiration potentielle f qui est l'équivalence de l'ETP calculée avec la formule standard de Bllaney-criddle moyennant de 26 graphes correspondant à différentes conditions d'humidité relative minimum, d'heures d'insolation par jour et de vent diurne. Ces graphes ont comme abscisse f et t comme ordonnée ETP : la valeur corrigée de l'évapotranspiration potentielle.

Nous avons, à partir des graphes, essayé de trouver les expressions analytiques adéquates pour exprimer ETP en fonction de f , et on a eu les résultats suivants.

2.3. Méthode du rayonnement

Dans le cas où les données climatiques disponibles comprennent des mesures de la température de l'air et de l'insolation ou de la nébulosité ou du rayonnement mais ne mentionnent ni le vent ni l'humidité on suggère d'employer la méthode du rayonnement pour prédire l'effet du climat sur les besoins en eau des cultures.

Comme dans le cas précédent, la formule qu'on va utiliser va tenir compte des conditions générales liées aux vents diurne et à l'humidité relative moyenne.

Dans ce cas on aura f' calculé avec la formule suivante :

$$f' = W * R_s$$

Avec :

W : facteur de pondération qui dépend de la température et de l'altitude.

R_s : rayonnement solaire exprimé en évaporation équivalente.

C'est-à-dire

R_s est exprimé en mm/jour

Ainsi donc on aura l'ETP en utilisant la formule suivante :

$$ETP = a * f' + b$$

Avec :

a , b :coefficient qui tiennent compte des conditions générales liées aux vent diurne et à l'humidité relative moyenne.

Et l'ETC en utilisant la formule suivante :

$$\mathbf{ETC=KC*ETP}$$

Méthode du Bac

Les bacs d'évaporation permettent de mesurer l'effet intégré du rayonnement du vent de la température et de l'humidité sur l'évaporation à partir d'une surface d'eau libre. Les végétaux réagissent d'une manière similaire aux mêmes variables climatiques mais plusieurs facteurs importants peuvent entraîner des différences appréciables en ce qui concerne la perte de l'eau. Le rayonnement que réfléchit un plan d'eau n'est que de 5 à 8 tandis que pour les végétaux il est de 20 à 25 pour cent du rayonnement solaire reçu.

L'emmagasinement de chaleur dans le bac pendant le jour peut être appréciable et entraîner une évaporation presque égale de l'évaporation entre le jour et la nuit alors que pour la plupart des cultures, les pertes sur 24 heures se produisent à 95 pour cent ou plus pendant les heures Par ailleurs, les pertes d'eau à partir des bacs et à partir du couvert végétal peuvent différer considérablement en raison de la variation de la turbulence de l'air juste au-dessus de ces surfaces, ainsi que de la température et de l'humidité de l'air immédiatement adjacent à ces sùr. Pour les bacs placés au-dessus du sol comme pour les bacs enterrés, il peut se produire un transfert de chaleur à travers les parois du bac, ce transfert peut être très important pour des bacs enterrés dans un sol en jachère. De même la couleur du bac et l'utilisation ou non d'une protection contre les oiseaux influents sur jouent aussi sur les résultats surtout quand le bac et placés dans des les mesures.

L'emplacement du bac et le milieu environnant champs cultivés plutôt que dans des champs en jachère, donc la connaissance de l'emplacement du bac et les caractéristiques du milieu environnant au moment des mesures est plus qu'importante pour tout projet d'estimation de l'ETP avec la formule qu'on va présenter ci-dessous.

2. Bilan hydrique

D'après ce qui été dit précédemment, l'expiration de bilan

$$P + I \pm S \pm D \pm \Delta R - ETR = 0$$

- P : précipitations.
- I : l'irrigation.
- S : ruissellement de surface.
- D : drainage ou apport d'eau par remontée de nappe.
- ΔR : variation de la réserve en eau de sol.
- ETR : évapotranspiration réelle.
- $B = ETP - (P_{eff} + RFU)$.
- B : besoin en eau d'irrigation (mm).
- E.T.P : évapotranspiration (mm / jour).
- RFU : réserve facilement utilisable.
- $RFU = Y (H_{cc} - H_{pf}) \cdot Da \cdot Z$
- Y : degré de tarissement
- Da : densité apparente
- Z : profondeur d'enracinement mm
- Hcc : humidité à la capacité au champ

Hydrique :

- H_{pf} : humidité au point de flétrissement
- P_{eff} : pluie efficace
- L'irrigation est faite lorsque $B > 0$.

4. Evapotranspiration DE LA CULTURE (kc)

Pour l'agriculture irrigant, la connaissance de ETM peut être acquise au cours de la campagne d'irrigation grâce à des réseaux d'avertissement, comme il en existe dans certains pays ou l'irrigation par aspiration a pris une grande extension.

Une station métrologique représentative de l'ensemble de périmée diffuse périodiquement – tous les semaines par exemple – les valeurs de L'ETM de différentes cultures pour la période écoulée : quelque fois on diffuse l'ensemble des éléments du bilan et parfois même la date de déclenchements des irrigations.

5. Hydrologie et pluies

Le bassin versant de l'oued M'Zab n'est équipé d'aucune station limina graphique. Les éléments à disposition sont essentiellement les observations de terrain faites lors de la survenue de crues durant la période 1907-1951 et qui ont été récapitulées par Du bief. Par la suite les informations

exploitables sont celles qui concernent principalement les crues de juin 1991, septembre 1994 : des hauteurs d'eau à l'occasion de ces événements ont pu être évaluées à partir de documents photographiques, d'enregistrements vidéo et d'enquêtes de terrain. L'étude hydrologique effectuée par le Bureau d'études s'est appuyée sur ces informations et sur l'analyse des pluies journalières à Ghardaïa et à d'autres stations environnantes, dont les données proviennent soit des statistiques de Du bief pour la période antérieure à 1956, soit des bulletins de l'Office National de la Météorologie (ONM) pour la décennie 1974-1985. Cette analyse a permis d'établir les caractéristiques des crues à différents point caractéristiques du bassin nécessaires au dimensionnement des ouvrages du volet protection contre les crues.

5.1. Pluies annuelles

Moy = Hauteur moyenne de la pluie annuelle.

Max = Hauteur maximale de la pluie annuelle.

Min = Hauteur minimale de la pluie annuelle.

Tableaux 07 : recueillies sur une période de 110 années (1986-1994)

Ghardaïa	Moy_{mm}	Max_{mm}	Min_{mm}
Brutes	71.2	175.9	1
Corrigées	67.3	175.9	1

La source : **ARNH station d'étude**

6. Besoins nets en eau d'irrigation

C'est la valeur positive du bilan hydrique pour une période considérée ou nuls choix du type d'irrigation et les pratique de conservation du sol.

6.1. Besoins de pointes

Ce sont les résultats maximaux du bilan hydrique, ces besoins modaux ont une importance particulière car ils représentent une donnée indispensable pour le projet de dans le cas contraire, ces besoins nets en eau d'irrigation ne prennent pas en compte le dimensionnement du réseau d'irrigation et ça en la conjuguant simultanément avec d'autre paramètre relatif à la protection du sol contre la salinité et la valeur de la perte à accepter pour un déficit hydrique donné.

$$\text{Inerte} = (\text{ETC} + \text{F} + \text{R}) - (\text{PE} + \text{Ge} + \text{N} + \Delta\text{W})$$

7. Besoins bruts en eau d'irrigation :

Les besoins bruts sont une fonction entre les besoins nets et le type du système d'irrigation pour tenir compte des inefficacités évitables et inévitables en matière d'application d'eau dans le but de s'assurer que les besoins en eau des cultures sont satisfaits l'efficacité d'application on majore la demande nette en eau d'irrigation avec le coefficient **Ea** qui représente l'efficacité de l'application.

$$\mathbf{Ibrute = Inette/Ea}$$

Conclusion :

On sait que pour déterminer les besoins en eau des cultures, il faut tenir compte de tous les éléments ci-après : climat, culture, système agronomique et intensité culturale, milieu et exposition, sol, eau disponible dans le sol, fertilité du sol, méthode et pratiques de culture d'irrigation.

CHAPITRE III

POMPAGE CLASSIQUE (CONVENTIONNEL)

Introduction

La mise en œuvre de procédés de transformation de matière nécessite très souvent le transport de fluides. L'acheminement d'un fluide d'un point à un autre peut être réalisé en utilisant les forces de gravité, de vide ou des pressions, mais ces solutions sont limitées dans leurs applications. Dans la plupart des cas, on a recours aux pompes, permettant de travailler à des débits réguliers, contrôlés et sur des distances et des hauteurs importantes dans ce chapitre on a présenté une vue générale sur les pompes et indiqué ses types et les domaines d'utilisation...etc.

1. Généralité Sur les pompes

On appelle pompe tout appareil qui aspire un fluide d'une région à basse pression pour le refouler vers une région à plus grande pression. Ainsi d'après cette définition on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide liquide. L'augmentation de la pression du fluide véhiculé par la pompe a lieu à la suite de la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe.

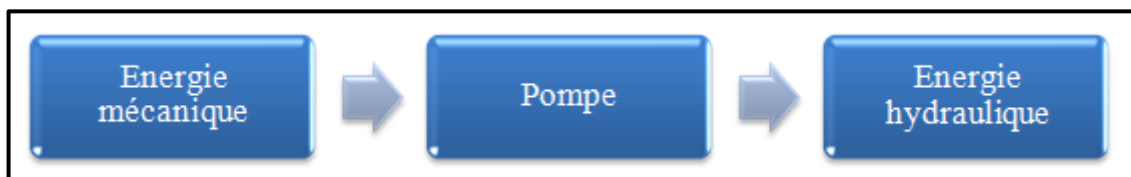


Figure 1 : Principe de conversion d'une pompe hydraulique

2. Principe de la pompe

Le principe de la pompe est apparu dès que l'homme a su construire un habitat artificiel pour se protéger des éléments naturels. Le besoin en eau nécessaire à sa survie l'obligea à trouver un système de transport de cette eau, du puits ou de la rivière à son habitat. Il faudra attendre la fin du XVIII ème siècle pour que les premières pompes soient réellement construites et utilisées.

3. Classification des pompes

On peut classer les pompes de plusieurs façons. Principalement, sur les mouvements retransmis aux organes des pompes, qui sont comme tous les mouvements mécaniques de deux grands types :

- roto-dynamiques
- volumétriques

3.1. Pompes roto-dynamiques

Dans ces machines, le fluide trouve un passage libre entre l'entrée et la sortie de la machine. Toutes les pompes roto-dynamiques possèdent un organe tournant, appelé roue, impulsor, ou rotor, capable de tourner librement et de façon continue au sein du fluide et permettre en même temps au fluide de traverser de manière régulière. Ainsi le transfert d'énergie entre le rotor et le fluide, transfert directement lié au taux de variation du moment cinétique, a lieu lui aussi de manière continue.

Pompes volumétriques : Dans ces machines volumétriques (à déplacement positif), un certain volume de fluide est, dans une première étape, forcé dans un espace fini où il est enfermé sous pression par un moyen mécanique. Il est ensuite, dans une seconde étape, relâché ou forcé en dehors de cet espace, et le cycle reprend de nouveau. Donc, dans ce type de machine, l'écoulement du fluide est intermittent et le débit dépend des dimensions de l'espace qui reçoit le fluide et de la fréquence avec laquelle il est rempli et vidé.

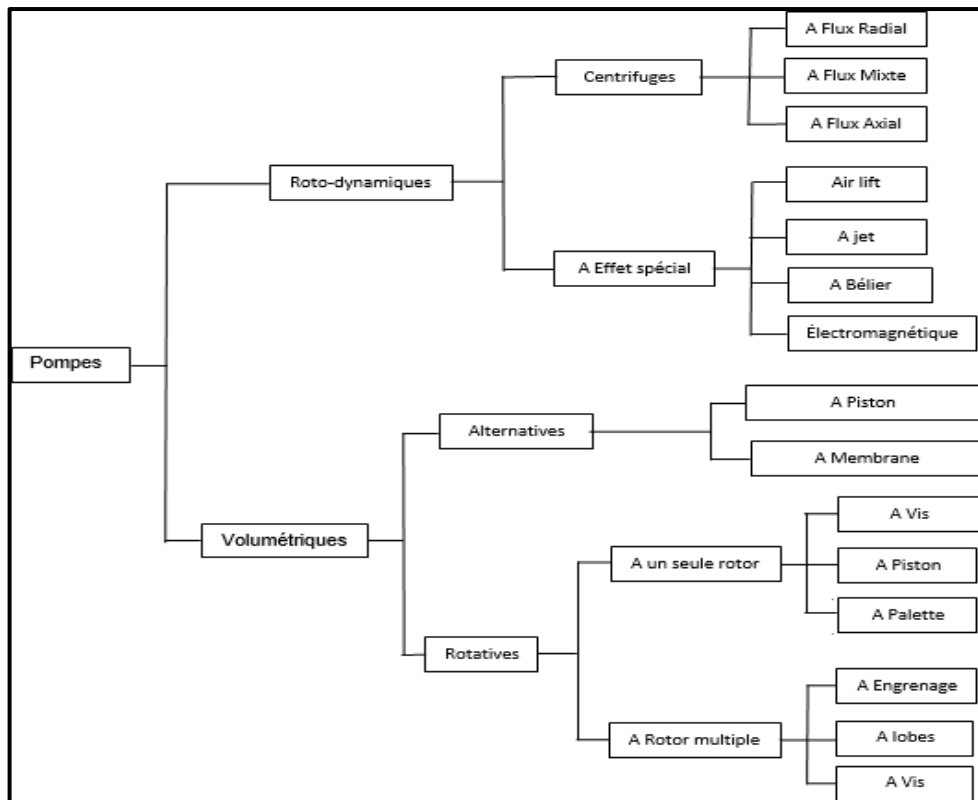


Figure 2 : Classification des pompes hydrauliques

En plus de la classification illustrée dans la figure ci-dessus, les pompes peuvent également être classées en fonction du type de fluide pompé, nombre d'étages, la géométrie de la volute et ainsi de suite. Voici les bases les plus courantes pour les classifications supplémentaires des pompes :

- Forme de la volute de la pompe : simple volute, double volute
- Géométrie d'aspiration : seule aspiration, double aspiration, entrée axiale, entrée latérale, etc.
- Disposition de l'arbre : l'arbre de pompe peut être horizontal, vertical ou incliné.
- Pression de refoulement ou de la consommation d'énergie : les pompes sont parfois classées comme basse pression, haute pression ou haute énergie.

-
- Nombre d'étages : dans les cas de radiale et des pompes centrifuges mixtes débit, ils peuvent être classés comme une seule étape, à double étage ou plusieurs étages.
 - Type de moteur principal : dans la plupart des cas, les pompes sont entraînées par des moteurs électriques, mais dans certains cas, ils peuvent être entraîné par des moteurs diesel ou à vapeur ou des turbines à gaz.
 - Condition de fonctionnement : comme la pompe submersible, pompe à moteur humide, pompe de secours, et la pompe auxiliaire.

4. Catégories des pompes :

Généralement les pompes véhiculant des liquides se divisent en deux catégories principales :

- Les pompes centrifuges dont Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.
- Les pompes volumétriques dont l'écoulement résulte de la variation d'une capacité occupée par le liquide.

4.1. Pompes centrifuges

4.1.1. Principe de fonctionnement

Une pompe centrifuge est constituée par:

- Une roue à aubes tournant autour de son axe ;
- Un distributeur dans l'axe de la roue ;
- Un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur et la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine. Il acquiert une grande énergie cinétique qui se transforme en énergie de pression dans le collecteur où la section est croissante. L'utilisation d'un diffuseur (roue à aubes fixe) à la périphérie de la roue mobile permet une diminution de la perte d'énergie.

4.1.2. Amorçage :

Les pompes centrifuges ne peuvent s'amorcer seules. L'air contenu nécessite d'être préalablement chassé. On peut utiliser un réservoir annexe placé en charge sur la pompe pour réaliser cet amorçage par gravité.

Pour éviter de désamorcer la pompe à chaque redémarrage il peut être intéressant d'utiliser un clapet anti-retour au pied de la canalisation d'aspiration.

4.1.3. Roue de la pompe centrifuge

Il existe trois formes principales de roues :

- Roue fermée ;
- Roue semi-ouverte ;
- Roue ouverte.

La hauteur engendrée par la roue est fonction du carré de la vitesse périphérique. En conséquence, pour une hauteur donnée à réaliser, plus la vitesse de rotation sera grande plus le diamètre sera faible et inversement. Plus le débit est important, plus la section d'entrée et la largeur de sortie sont grande.

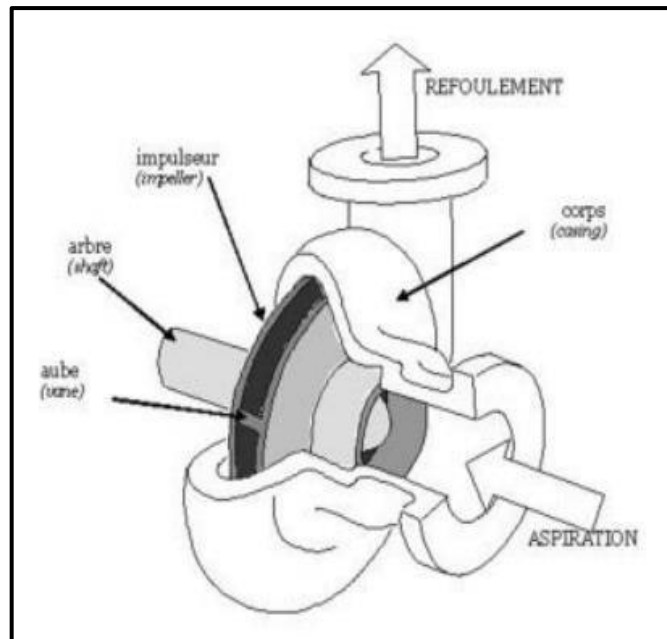


Figure 3 : Schéma d'une pompe centrifuge



Figure 4 : Disposition monobloc vitesse variable

4.2. Pompes volumétriques

4.2.1. Principe de fonctionnement

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace UN élément mobile rigoureusement ajusté. Leur fonctionnement repose sur le principe suivant :

- Exécution d'un mouvement cyclique ;
- Pendant un cycle, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin. Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement.
- On distingue généralement :
 - Les pompes volumétriques rotatives : constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement.
 - Les pompes volumétriques alternatives : la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif.

Les pompes volumétriques sont généralement auto-amorçantes. Dès leur mise en route elles provoquent une diminution de pression en amont qui permet l'aspiration du liquide. Les pompes volumétriques permettent d'obtenir des hauteurs manométriques totales beaucoup plus élevées que les pompes centrifuges. La pression au refoulement est ainsi plus importante. Le débit est par contre généralement plus faible mais il ne dépend pratiquement pas des caractéristiques du réseau. Le rendement est souvent voisin de 90 %.



Figure 5 : Pompe Volumétrique A Membrane (Alternative)



Figure 6 : Pompe volumétrique (rotative).

4.2.2. Utilisation

Ce sont les pompes les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût. Néanmoins, il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas:

- L'utilisation de liquides visqueux : la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles.
- L'utilisation de liquides "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tels que le vin, le lait et la bière).
- L'utilisation comme pompe doseuse : la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.
- Ces types d'application nécessitent l'utilisation de pompes volumétriques.
- Contrairement à la plupart des pompes volumétriques, les pompes centrifuges admettent les suspensions chargées de solides.

5. Vitesse et diamètre spécifique d'une pompe

La classification la plus répandue des pompes roto-dynamiques, dépend directement de forme du rotor, en référant à la définition du diamètre spécifique et de la vitesse spécifique, deux nombres adimensionnels issus de la similitude des turbomachines:

5.1. Notion de la vitesse spécifique

La vitesse spécifique (N_s) est un indice de conception principalement utilisé par les concepteurs de la pompe. Il est un indice adimensionnel utilisé pour décrire la géométrie des roues de pompes et de les classer en fonction de leur type.

Il faut de noter que la vitesse spécifique est définie uniquement au point de rendement maximal. Une bonne compréhension de la façon de calculer et d'interpréter la vitesse spécifique pour une pompe particulière fournit un meilleur aperçu des raisons pour lesquelles les roues de pompes sont façonnées de manière différente, pourquoi différentes pompes ont une forme différente des courbes de performance.

La formule pour la vitesse spécifique de la pompe N_s , en unités SI, est :

$$N_s = \frac{N \sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

Où :

- N : Vitesse de motopompe, (tr/min) ;
- Q : Débit nominal, plein diamètre, (m³/s);
- H : HMT nominale, plein diamètre, (m).

La vitesse spécifique d'une pompe particulière peut être calculée à partir de la courbe de la pompe ; tout en choisissant N , Q et H sur la courbe à plein diamètre, le meilleur point de rendement ; et l'application de l'équation (I.1). Une fois N_s pour une pompe particulière a été calculée, sa valeur ne changera pas, même si la pompe fonctionne à une vitesse différente. De toute évidence, si la pompe fonctionne à une vitesse différente, la charge totale de la pompe (HMT) et le débit changent mais la vitesse spécifique ne change pas, car elle est définie par l'équation.

En effet, il est le fait que la vitesse spécifique ne changera pas car elle est la base pour le calcul des lois des similitudes qui permettent de prédire les performances de la pompe à des variations de vitesses de la pompe ou du diamètre de la roue.

5.2. Notion du diamètre spécifique

On peut associer à la vitesse spécifique N_s un diamètre spécifique. Pour une pompe de diamètre D dont le fonctionnement est défini par (Q , H , N), le diamètre spécifique est le diamètre de la machine du même type qui, tournant à la vitesse N , fournit en similitude un débit unitaire de 1

m³/s sous une hauteur unitaire de 1 m. En désignant par DS le diamètre spécifique d'une pompe, on obtient.

$$D_s = \frac{DH^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{Q}}$$

Où :

- D : diamètre de la pompe, (m) ;
- Q : débit nominal, plein diamètre, (m³/s) ;
- H : HMT nominale, plein diamètre, (m).

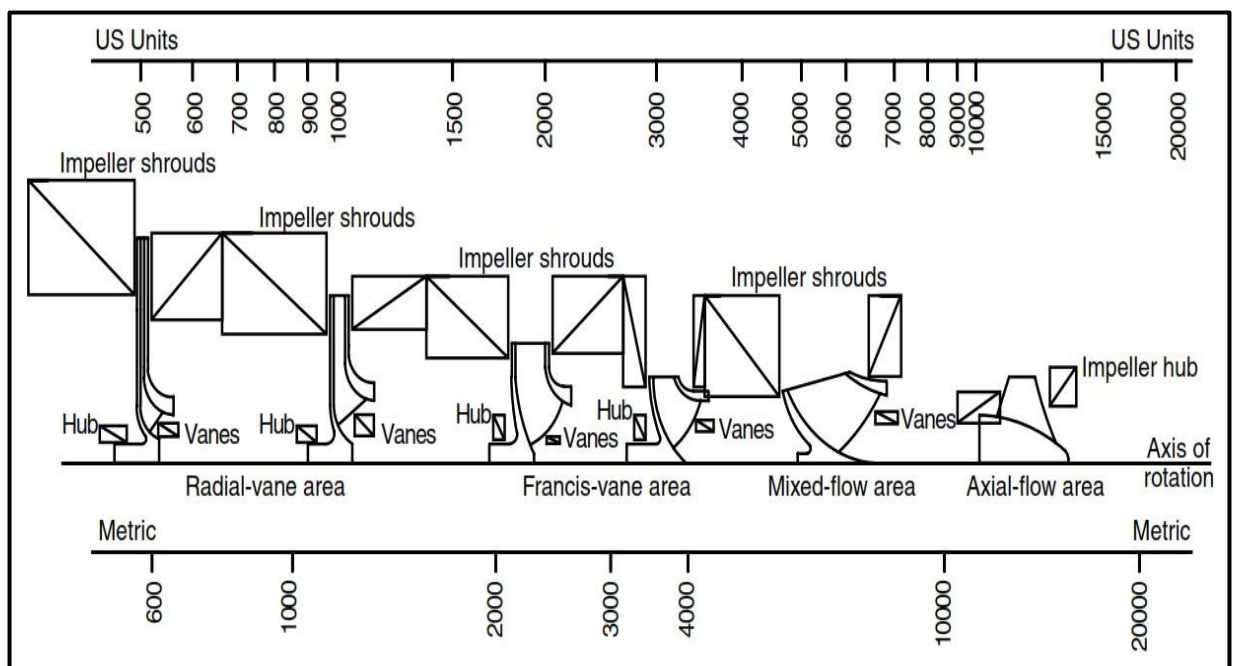


Figure 7 : Classification des turbopompes en fonction de la vitesse spécifique.

6. Lois de similitude

Les lois de similitude d'une pompe centrifuge sont des règles qui régissent les performances de la pompe lorsque la vitesse ou le diamètre de la roue change. La base pour le calcul des lois d'affinité est qu'une vitesse spécifique de la pompe, une fois calculée, ne change pas. Si les performances d'une pompe à une vitesse donnée et le diamètre de la roue sont connus, il est possible de prédire la performance de la pompe même si la vitesse de la pompe et le diamètre de la roue et sont changés.

Il existe deux ensembles de lois d'affinité :

Avec le diamètre de la roue, D, maintenue constante, le premier ensemble de lois est la suivante :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3$$

Avec la vitesse, N, maintenue constante, la deuxième série de lois est :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$$

Où :

- Q : Débit (m³/s) ;
- H : Hauteur totale (m) ;
- P : Puissance (w) ;
- N : Vitesse de la motopompe (tr/min) ;
- D : Diamètre extérieur de la roue(m).

Le fabricant ou l'utilisateur fait usage de la deuxième série de lois d'affinité ci-dessus pour calculer le rognage exact de la roue de la pompe. Si les performances de la pompe à un diamètre spécifique de la roue sont connues, les performances de la pompe à d'autres diamètres de la roue peuvent être déterminées.

7. Caractéristiques des pompes

- Débit égale à le volume de liquide pompé par unité de temps (l/s, m³/s, m³/h).
- Hauteur d'élévation totale ou Hauteur Manométrique Totale HMT notée H(m).

7.1. Rendement global de la pompe

Comme toute machine entraînée, une pompe consomme une puissance supérieure à celle qu'elle fournit. Le rendement d'une telle machine est le rapport de la puissance hydraulique acquise par le fluide à celle disponible sur l'arbre :

- HMT: hauteur manométrique totale(m) ;
- Q: débit (m³/h) ;
- Pa: puissance fournie par le moteur (w);
- g: constante de la gravité (9,81m/s²) ;
- ρ : la masse volumique de l'eau (1000kg/m³).

7.2. Couplage des pompes

Dans l'utilisation pratique des pompes, on recherche souvent soit à augmenter la hauteur HTM soit à augmenter le débit. Donc, deux possibilités existantes :

- Couplage en série ;
- Couplage en parallèle.

7.2.1. Couplage en série



Figure 8 : Système de couplage en série.

Le système couplé fournit est : $H_1 + H_2$ avec un débit Q.

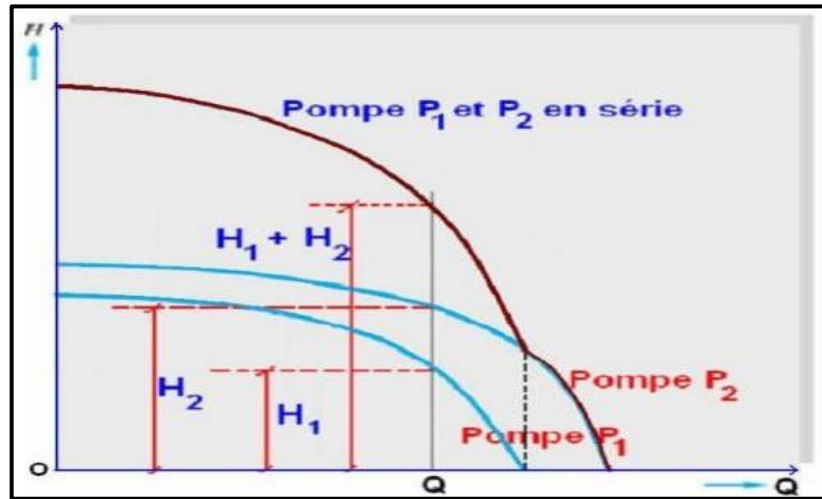


Figure 9 : Point de fonctionnement de pompes en série.

7.2.2. Couplage en parallèle

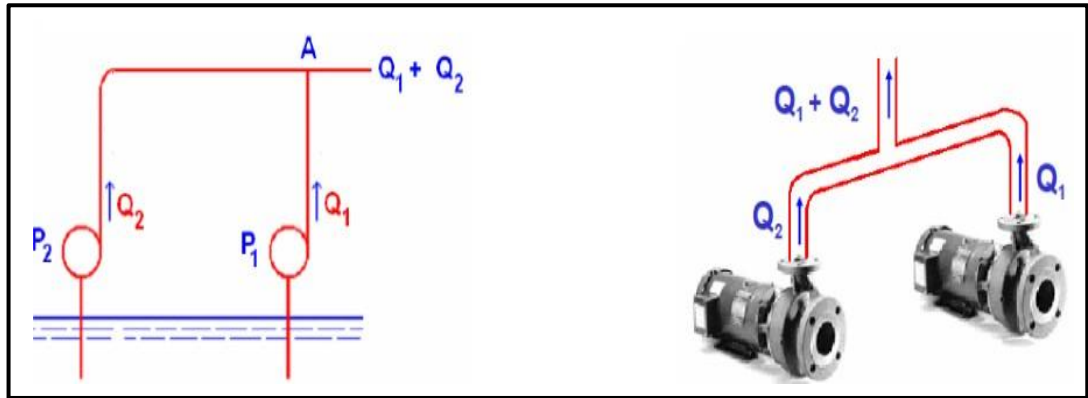


Figure 10 : Système de couplage en parallèle.

Le système couplé fournit $Q_1 + Q_2$.

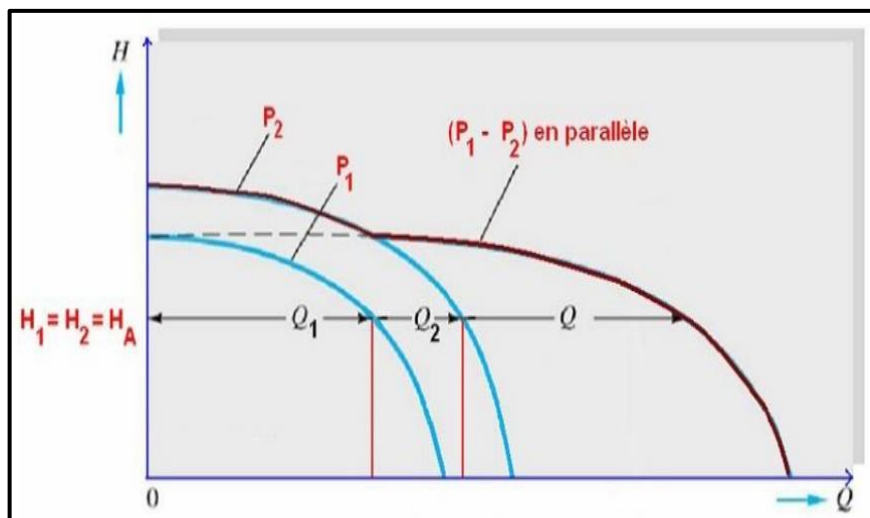


Figure 11 : Point de fonctionnement de pompe en parallèle.

Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons vu un aperçu sur les différents types des pompes, leurs caractéristiques et les domaines d'utilisation. Il reste de connaître les capacités de la région en eau pour définir quel est le type de pompe adéquat, ce que nous présente dans le deuxième chapitre.

CHAPITRE IV

POMPAGE SOLAIRE (PHOTOVOLTAIQUE)

Introduction

Le développement de l'exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance ces dernières années. La production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques de l'énergie. L'énergie photovoltaïque est la plus appropriée pour avoir un monde propre et non pollué. Elle se caractérise par la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Parce qu'on n'utilise pas de combustible pour cette conversion autre que le soleil, les systèmes photovoltaïques ne rejettent pas de pollution de l'air ou de l'eau nuisible dans l'environnement, n'épuisent les ressources naturelles et ne mettent pas en danger la santé des animaux ou des humains. Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur le potentiel énergétique solaire important en Algérie. Ensuite, nous présentons une étude générale et une modélisation d'une cellule PV, ainsi que la présentation des différents paramètres caractérisant un élément photovoltaïque (cellule, module, string ou champ PV). Aussi nous avons évoqué quelques caractéristiques importantes des cellules photovoltaïques.

1. Le rayonnement solaire

Le soleil est l'origine de toute forme d'énergie sur terre. La production d'électricité photovoltaïque dépend de l'ensoleillement du lieu et de la température, autrement dit de sa localisation géographique, de la saison et de l'heure de la journée. Le spectre solaire est similaire à un corps noir à une température de 5800 K qui est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm . Il se décompose en trois bandes distinctes comme suit :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ($< 0,4 \mu\text{m}$)
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$)
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$)

La densité de la puissance solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370 W/m^2 . Cependant, en traversant l'atmosphère, cette quantité s'atténue et perd son intensité. A la surface de la terre, la densité de puissance solaire est égale à 1000 W/m^2 . Elle variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu [1]. La figure I-1 présente l'analyse spectrale du rayonnement solaire.

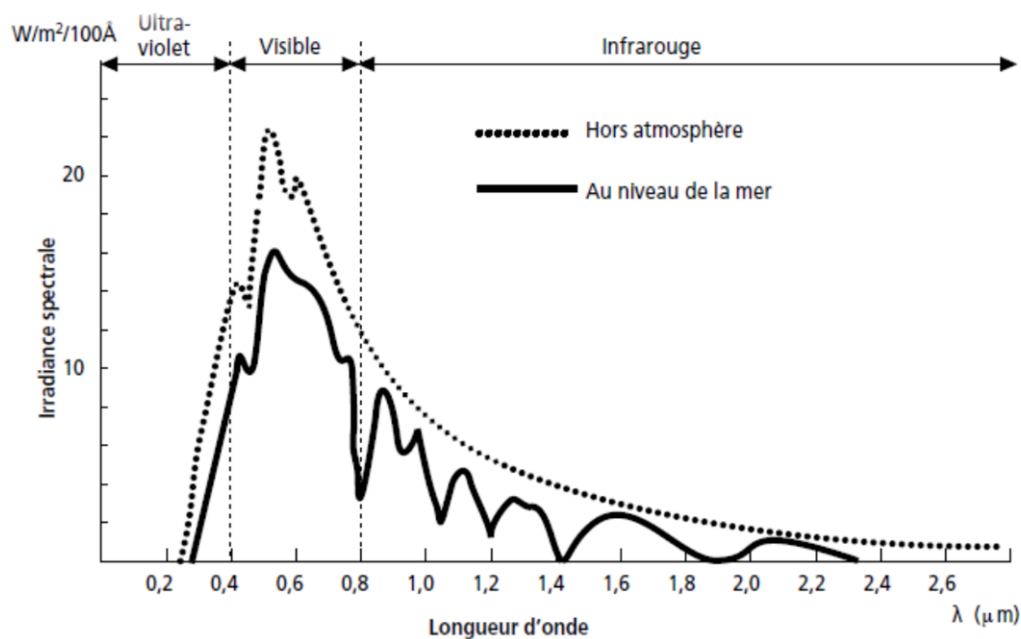


Figure 12 : Analyse spectrale du rayonnement solaire (Belhadj M, 2008)

3. Potentiel énergétique solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays. Le tableau I.1 présente la répartition du potentiel solaire en Algérie par région [2].

Tableau 08 : Potentiel solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

4. Système photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque ou photopile. Elle est fabriquée avec des matériaux semi-conducteurs qui peuvent convertir la puissance des photons lumineux du soleil directement en puissance électrique.

4.1. Structure d'une cellule PV

La cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une couche dopé p (positive) où la conduction électrique se fait par les trous, et l'autre dopé n (négative) où la conduction se fait par des électrons créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont

absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges négatives) et des trous (charges positives). Alors une différence de potentiel est créée entre les deux couches [3] ; comme l'illustre la figure I-2,

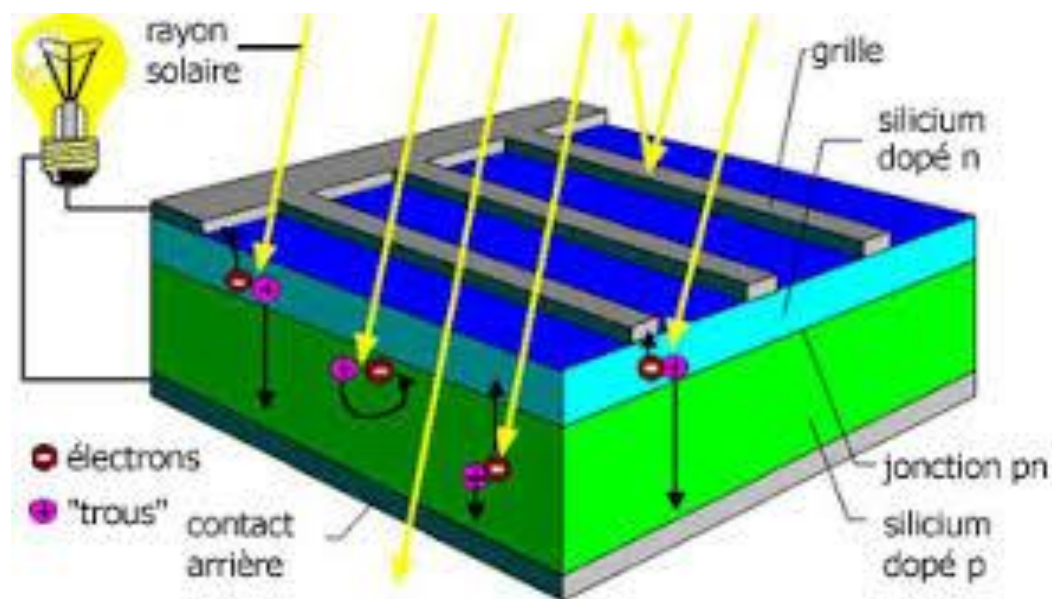


Figure 13 : Structure typique d'une cellule solaire au silicium.

Une fois exposé à la lumière, chaque photon qui pénètre dans la cellule solaire génère une paire électron-trou. Les particules se séparent alors du champ de la région d'espace et se déplacent vers les contacts de la cellule : les trous vers la base et les électrons vers l'émetteur vers l'avant de la cellule (face exposée au soleil). Les porteurs de charges seront ensuite collectés via la grille métallique et véhiculés sur les deux barres métalliques épaisses et une charge reliée à cette cellule peut récupérer de l'énergie électrique générée.

4.2. Les principales technologies de cellules photovoltaïques

On distingue trois grandes familles de cellules solaires [5][6] :

- Le silicium cristallin.
- Les cellules à pérovskites
- Les cellules organiques.

1.1.1. Le silicium

- **Les cellules photovoltaïques** sont fabriquées à partir du silicium cristallin. Il existe trois formes de cristaux :
- **Le silicium monocristallin** : Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. Elle a comme avantage :
 - Un bon rendement, de 16 à 24 % (en 2015) ($\sim 150 \text{ W/m}^2$),
 - Un nombre de fabricants élevé. Cependant, elle a :
 - Un coût élevé,
 - Un rendement plus faible sous un faible éclairement ou un éclairement diffus,
 - Baisse du rendement quand la température augmente.
- **Le silicium poly-cristallin** : Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. Elle a comme avantages :
 - Cellule carrée permettant un meilleur foisonnement dans un module ;
 - Bon rendement de conversion, environ 100 W/m^2 , mais un peu moins que le monocristallin ;
 - Rendement de 14 à 18 % ; et lingot moins cher à produire que le monocristallin.

Cependant, elle a : un rendement faible sous un faible éclairement ou soleil diffus.

- **Le silicium amorphe** : Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe sont fabriquées par dépôts sous vide, à partir de plusieurs gaz, une des techniques les plus utilisées étant la PECVD. La cellule est grise très foncée. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ». Elle a comme avantages :
 - De fonctionner avec un éclairement faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 20 à 3 000 lux),
 - D'être un peu moins chère que les autres techniques,
 - D'être intégrable sur supports souples ou rigides.

Elle a cependant pour inconvénients :

- Un rendement faible en plein soleil, de 5 à 7 %
- Une nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio W/m^2 plus faible, environ 60 W/m^2)

- Une performance qui diminue avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois), pour se stabiliser ensuite (-10 à -20 % selon la structure de la jonction)

1.1.1. Une cellule photovoltaïque à pérovskites

Une cellule photovoltaïque à pérovskites est un type de cellule photovoltaïque qui a un élément chimique ayant une structure de pérovskite, le plus souvent un hybride organique-inorganique de plomb ou un halogénure d'étain, dans sa couche active. L'efficacité des cellules photovoltaïques utilisant ces matériaux est en constante augmentation depuis la fin des années 2000. Elle est passée de 3,8 % en 2009 à 22,1 % au début de 2016, ce qui en fait en 2016 la technologie solaire ayant eu le développement le plus rapide de l'histoire. Cependant avec un potentiel encore important d'amélioration de la performance et des coûts de production faibles, les cellules à pérovskite sont devenues commercialement attractives, et des start-ups annoncent déjà des modules sur le marché d'ici 2017.

3.2.3. Les cellules organiques

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Elle a un rendement à minima de 15 %. Elles restent à l'état de recherche.

3.3. Courbes et grandeurs caractéristiques

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque correspond bien à une photodiode. Le principe du générateur la cellule PV est représenté dans la figure 14.

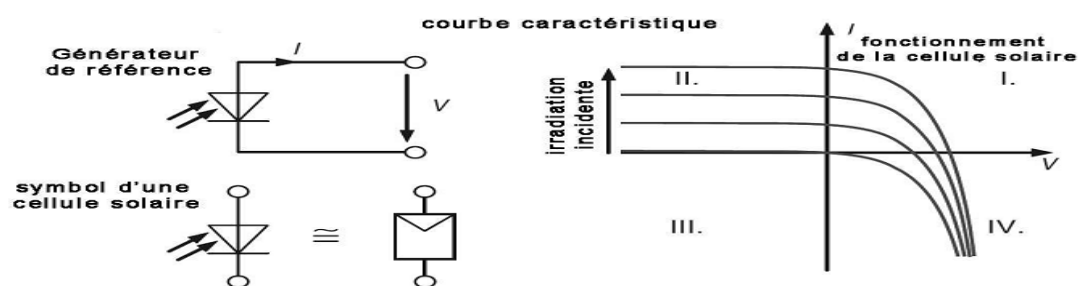


Figure 14 : Courbe caractéristiques d'une cellule PV en mode générateur.

Il faut noter que comparativement à une photodiode, le sens de la tension est conservé par contre celui du courant est inversé pour préserver la convention génératrice [7].

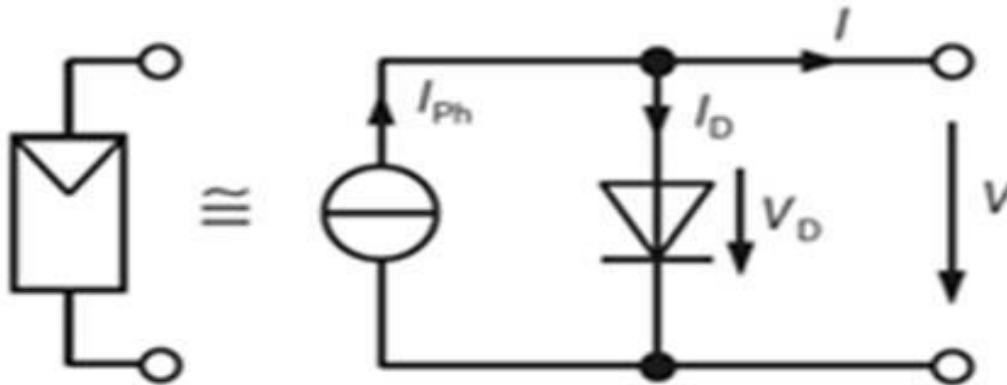


Figure 15 : Schéma équivalent d'une cellule PV

A partir du schéma équivalent présenté en figure I-3, l'équation de la courbe caractéristique est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s (e^{V/mV_T} - 1)$$

Avec : I_{ph} est le photo-courant, I_s le courant de saturation de la diode, m le facteur d'idéalité compris entre 1 et 2, V la tension aux bornes de la cellule PV, I le courant produit par cette dernière et V_T la tension thermique de la diode.

5. La chaîne d'énergie du pompage de l'eau :

A. Introduction :

Cette ressource présente les diverses solutions technologiques que peut employer un système de captage d'eau potable basé sur des pompes. Plusieurs sources d'énergie et organes de transformation sont comparés, et deux études de cas sont proposées, l'une dans le cas d'un réseau d'eau potable collectif fonctionnant à l'énergie électrique, l'autre dans le cas d'une pompe individuelle alimentée par une éolienne ou un panneau solaire.

5.1.Problématique :

L'eau est une ressource essentielle et il faut pouvoir extraire l'eau quel que soit l'endroit de la planète. L'organe essentiel pour l'extraction de l'eau est la pompe. Selon la source d'énergie disponible (solaire,

électrique, éolienne) et selon l'utilisation (zone urbaine, zone rurale) l'architecture de la chaîne d'énergie et le choix des pompes sera différent. Cette ressource a pour objectif de :

- classer les différentes solutions d'extraction de l'eau,
- donner les solutions qui permettent de transformer l'énergie électrique en énergie hydraulique,
- donner les éléments de conception du réseau hydraulique pour un système d'extraction de l'eau pour l'utilisation collective,
- donner l'architecture et le rendement des différents composants pour extraire l'eau destinée à un usage individuel ou villageois.

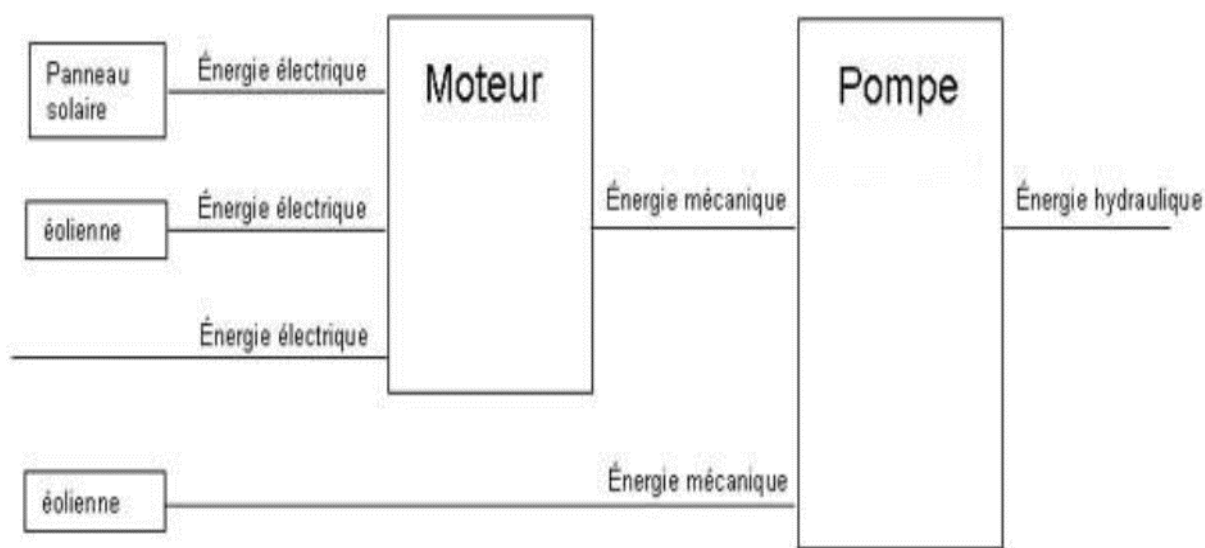


Figure 16 : Montre les différentes solutions qui permettent de disposer de l'énergie hydraulique

1.1. Domaines d'utilisation de différentes sources d'énergies

Nous pouvons considérer deux grands domaines d'utilisation de l'eau :

-Extraction d'eau potable en zone urbaine. Dans ce cas, l'eau extraite d'une source est ensuite traitée puis envoyée dans un réseau appelé réseau d'eau potable. L'eau est extraite à l'aide de pompes commandées par des moteurs électriques. La source d'énergie électrique est celle présente dans les villes,

- Extraction d'eau pour un usage individuel, rural ou villageois (dans les pays en voie de développement). Les coûts de raccordement à un réseau urbain (env 30 000€/km) peuvent vite devenir élevés dès que l'on s'éloigne des villes. Différentes solutions technologiques sont alors utilisées pour extraire l'eau :

- Eolienne de pompage,
- Aérogénérateur + pompe immergée,
- Pompage solaire (photovoltaïque), Thermique.

1.2.Les organes de transformation de l'énergie électrique en énergie hydraulique

1) La pompe :

La pompe est un organe de base d'un système d'extraction d'eau. Elle peut être :

- Centrifuge ou volumétrique,
- Immergée ou en surface.

- **Les pompes centrifuges** : Les pompes centrifuges utilisent les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie mécanique d'un moteur est transmise au fluide. La vitesse donnée au fluide va donner de l'énergie cinétique à celui-ci. L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie de pression.

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont les suivantes :

Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage ; cela est particulièrement intéressant dans le cadre de l'utilisation de modules photovoltaïques car la pompe tourne même par très faible ensoleillement.

- Grâce à son extrême simplicité, le système peut être couplé directement sur une machine tournante : moteur électrique, essence, diesel... Il n'y a pas ou presque pas d'aspiration : elles doivent être amorcées pour fonctionner, de manière à éviter tout risque de destruction si fonctionnement à sec. Certaines sont auto-amorçantes.

- Elles peuvent être aussi bien immergées que disposées en surface.

- Plusieurs étages (cage + roue à ailettes) peuvent être superposés pour obtenir de grandes pressions.

Des documentations complètes de pompes immergées sont disponibles sur le site du fabricant Salmson [8].

- **Les pompes volumétriques** : Les pompes volumétriques utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palette et à engrenage.

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m³/h) et aux grandes hauteurs,

- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont auto-amorçantes,

- Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique $I = f(V)$ de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable. Pour pallier le problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.

- **Les pompes de surface ou immergées** : Le choix d'une pompe se fera en fonction des caractéristiques hydrauliques de l'installation envisagée (débit, hauteur manométrique totale, etc.) mais également en fonction des conditions particulières d'utilisation (puits, forage, pompage de rivière, etc.).

- **Les pompes de surface** : une pompe à pistons placée en surface ne pourra pas relever l'eau au-delà d'un maximum théorique de 10,33 mètres (car elle fonctionne par aspiration et la hauteur de la colonne d'eau est donc proportionnelle à la dépression, qui ne peut dépasser la valeur de la pression atmosphérique !). Au-delà de cette hauteur, il faut s'orienter vers une pompe immergée. Cependant, on peut utiliser des pompes centrifuges avec une pression absolue à l'aspiration inférieure à 1 MPA.

- **Les pompes immergées** : l'eau peut être extraite à plusieurs centaines de mètres. Les pompes centrifuges qui ont une forme adaptée aux puits et qui peuvent débiter à forte pression sont souvent utilisées.

- **Le moteur** : La pompe nécessite une énergie mécanique en entrée. Cette énergie mécanique est fournie dans la plupart des cas par un moteur. Les deux types de moteurs disponibles sont les moteurs à courant continu et les moteurs asynchrones. Quelques avantages et inconvénients de chacun sont donnés ci-dessous :

Tableau 09 : Quelques avantages et inconvénients de deux moteurs (moteurs à courant continu ; et moteurs asynchrones)

	Moteur à courant continu	Moteur asynchrone
Avantages	Facilité de régulation (variation de vitesse, couple, ...) Rendement de 90%	Fiabilité, nécessite peu d'entretien rendement de 90%
Inconvénients	Coût d'entretien : le système balai/collecteur est à changer	Difficulté et coût de régulation (nécessite la réalisation de commandes vectorielles)

Le meilleur compromis pour actionner une pompe immergée est le moteur asynchrone. Les sources d'énergie disponibles sur les sites d'extraction d'eau sont différentes. Ceci induit plusieurs modes de fonctionnement du moteur asynchrone. Il fonctionne sur une source de tension alternative en monophasé, diphasé ou en triphasé. Si la source d'énergie est continue, un onduleur est utilisé pour transformer le signal en alternatif.

Selon le mode fonctionnement, les caractéristiques mécaniques seront différentes. Le graphe ci-dessous compare les caractéristiques d'un moteur monophasé et d'un moteur triphasé pour des dimensions (longueur – diamètre) identiques [9].

1. Les différentes architectures envisageables :

1) Architecture du réseau collectif - connexion au réseau électrique :

L'eau dans son usage domestique suit un cycle d'utilisation qui peut se résumer en 4 étapes :

- Extraction de l'eau,
- Traitement de l'eau,
- Utilisation domestique de l'eau,
- Epuration et rejet de l'eau traitée.

60% de l'eau potable distribuée en France provient des ressources en eau souterraine. Cette eau est extraite grâce à des motopompes immergées. Le dimensionnement du groupe de pompage dépend du réseau à alimenter. Un exemple d'architecture de réseau est donné ci-dessous. Cette architecture type permet d'aborder de manière qualitative les différents points de conception.

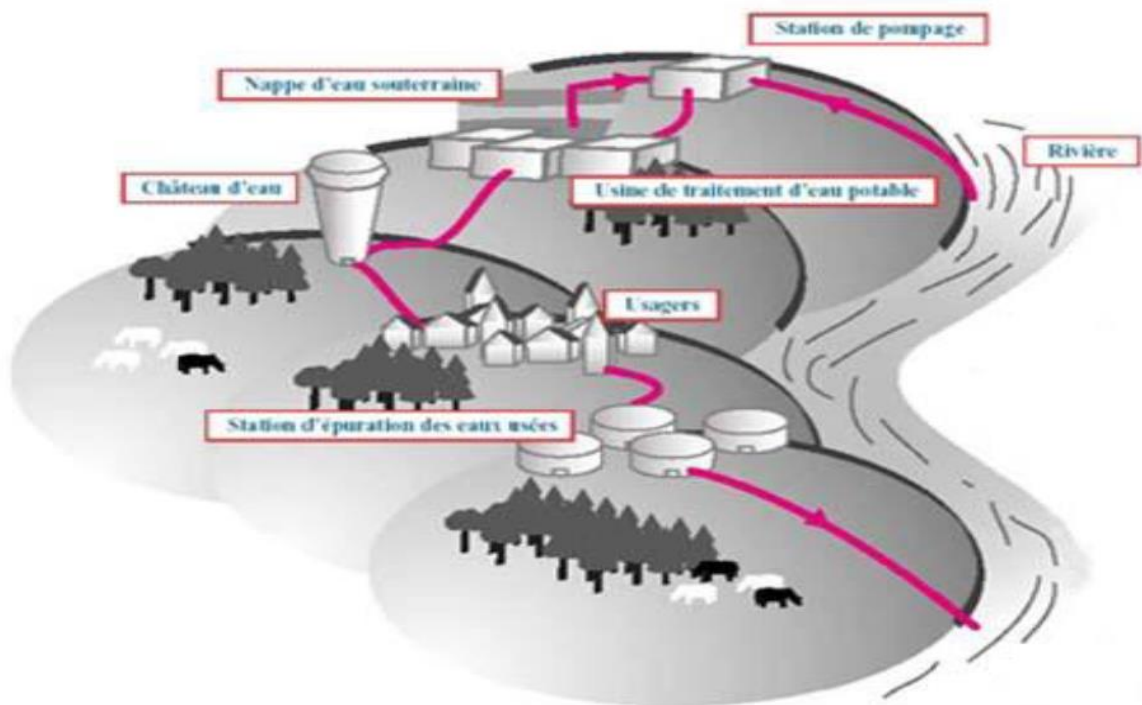
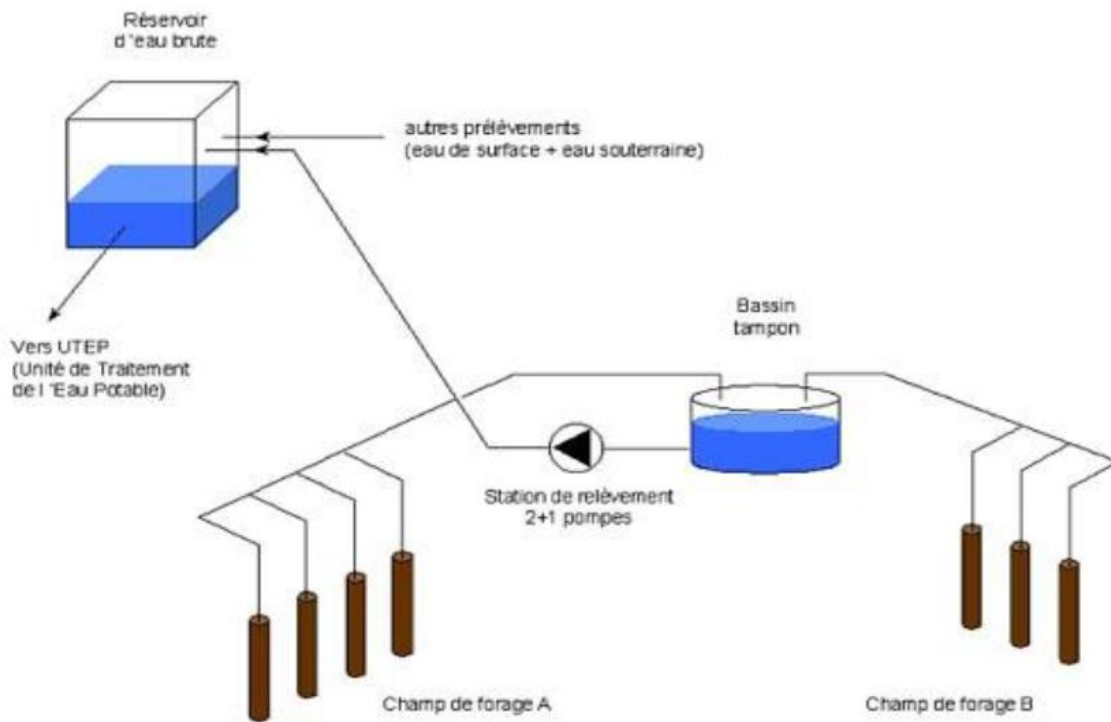


Figure 17 : D'après la partie "le cycle de l'eau" de l'étude "Les métiers de l'eau " [10]

La figure 18 : illustre une partie du schéma d'alimentation en eau d'une ville de près de 50 000 habitants. Plus particulièrement, les équipements permettant le captage de 30 000 m³ par jour et l'adduction d'une partie des ressources de la ville sont représentés.



La figure 18 : Schéma de mobilisation de la ressource en eau

L'eau est prélevée dans une nappe alluviale à partir de deux champs de forage distincts l'un de l'autre. Chaque champ est constitué de plusieurs forages : l'extraction de l'eau est assurée par des pompes immergées qui la refoulent vers une bache de reprise (un réservoir intermédiaire pouvant aussi être nommé bassin tampon).

Une station de pompage se composant d'un total de 3 pompes en parallèle permet alors le relèvement de l'eau depuis le réservoir intermédiaire vers le réservoir de tête.

L'eau ainsi mobilisée est de l'eau brute c'est-à-dire n'ayant subi aucun traitement physico-chimique depuis son prélèvement. Il est donc nécessaire de la traiter : l'eau brute est ainsi envoyée de manière gravitaire vers une Usine de Traitement de l'Eau Potable (UTEP) [à ne pas confondre avec une Station de Traitement et d'Épuration (STEP) qui traite les eaux usées].

L'eau devenue potable est alors stockée dans un autre réservoir qui permet généralement une alimentation gravitaire des différents usagers (population et industries).

Le détail de cet exemple est dans la ressource « Etude de cas : alimentation en eau d'une ville.

2. Architecture d'un système de pompage d'eau à partir d'une énergie solaire

- L'énergie solaire

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel mais il n'a été exploité que bien plus tard.

Le phénomène mis en œuvre est celui de l'interaction de la lumière avec les atomes de matériaux semi-conducteur comme le silicium. Les photons qui viennent heurter les atomes de silicium induisent un déplacement d'électrons créant ainsi une énergie électrique.

Néanmoins, toute l'énergie solaire ne peut pas être transformée en énergie électrique. En laboratoire, il est possible d'atteindre un rendement de 23%. En pratique, le rendement ne dépasse pas les 15%. Le rendement est limité par :

- La structure du silicium utilisé (monocristalline, poly cristalline, amorphe). La structure Amorphe qui est la moins "organisée" aura le moins bon rendement (8-10%).
- Le niveau d'énergie insuffisant de certains photons pour arracher un électron.
- La réflexion des photons sur le panneau avant de rencontrer le silicium.
- La recombinaison des électrons avec des charges positives.

Une cellule photovoltaïque ne peut pas produire une tension supérieure à environ 0,5 Volt, quelle que soit sa surface. Pour obtenir des niveaux de tension plus élevés, il faut relier les cellules individuelles en série pour que leurs valeurs s'additionnent. Le graphe ci-après montre les caractéristiques courant tension de 33 panneaux solaires en série. La tension maximale disponible d'une cellule est de 22V soit 0.67V par cellule.

Les cercles sur les courbes de la figure 11 indiquent les points de puissance maximale disponible.

Ainsi, quel que soit l'ensoleillement, la puissance maximale est pour une tension de 17,5V. Il est donc intéressant de maintenir une tension constante aux bornes des panneaux.

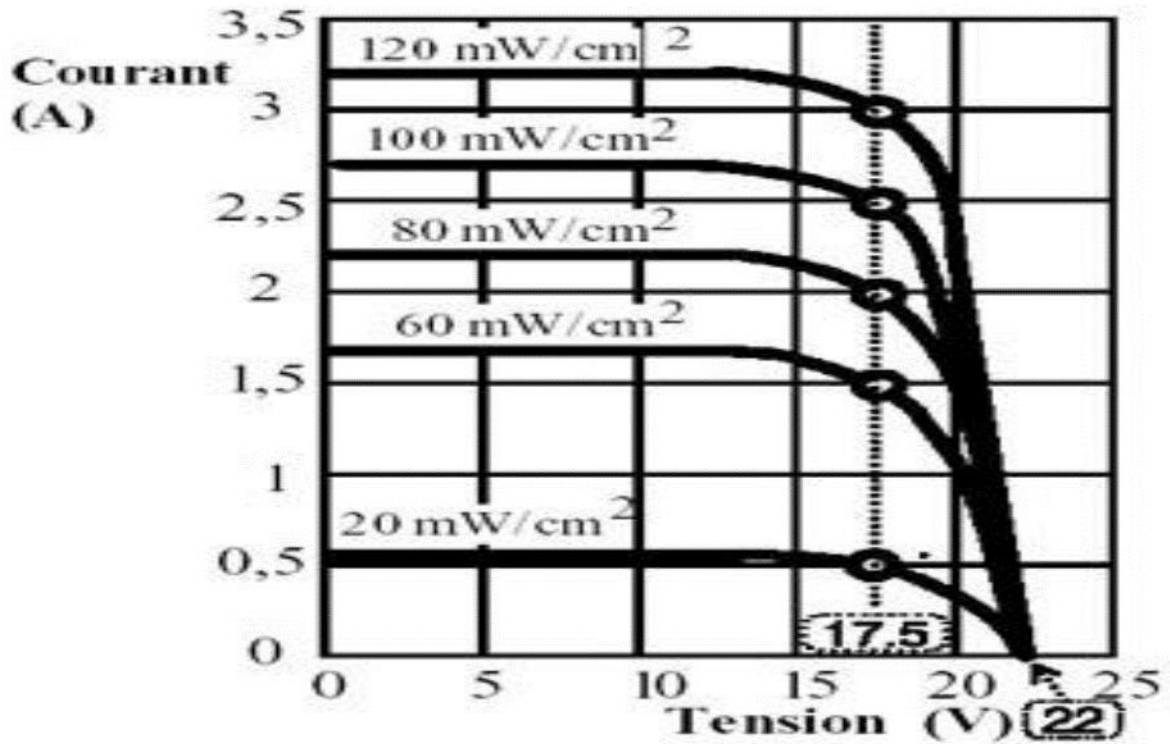


Figure 19: Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

L'énergie produite peut être utilisée ou stockée. Dans le cas du pompage, l'énergie est utilisée pour relever l'eau dans un réservoir qui sert de stockage d'énergie hydraulique. Le stockage hydraulique est très intéressant car il permet de s'affranchir d'un stockage de l'énergie électrique.

En effet, les batteries ont une durée de vie limitée (6 ans à comparer aux 30 ans des panneaux) et sont polluantes.

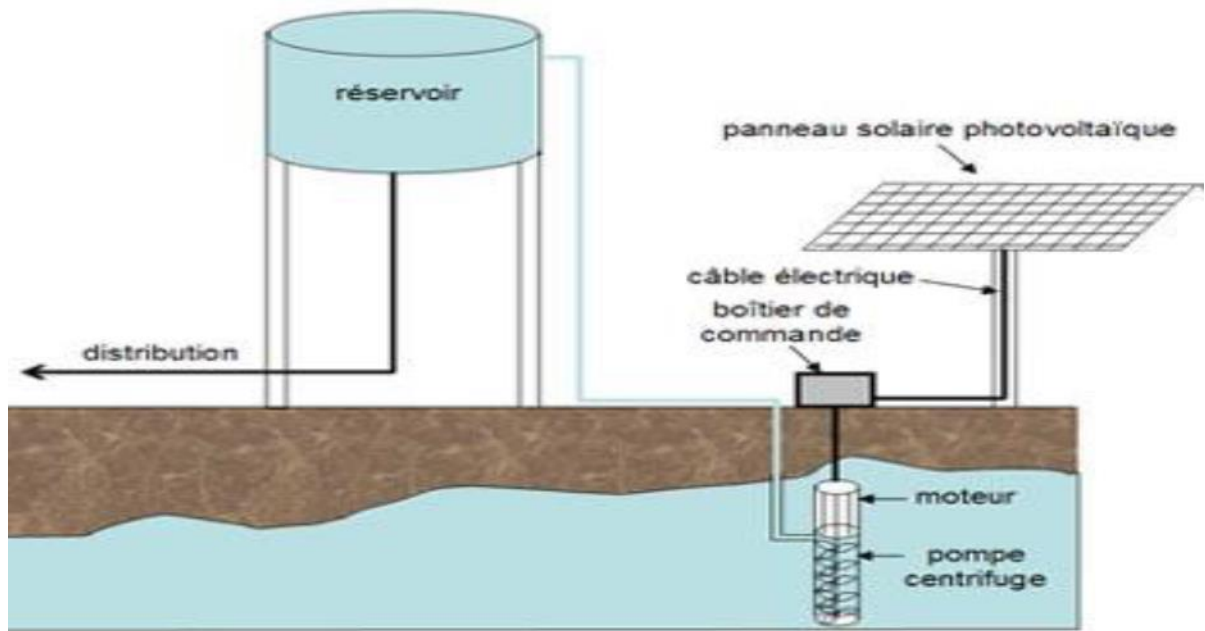


Figure 20 : Installation de production d'énergie hydraulique à partir d'un panneau solaire.

Architecture du système

L'architecture d'un exemple de système photovoltaïque est donnée figure I-9 :

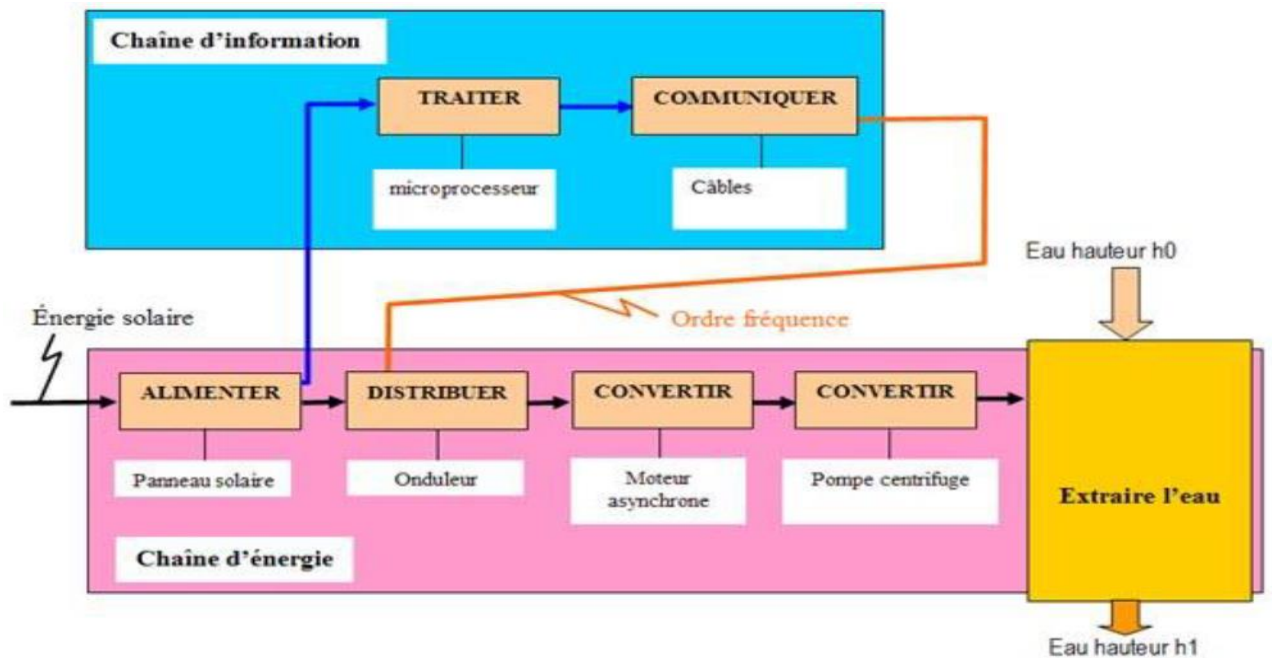


Figure 21: Architecture de la chaîne d'extraction de l'eau à partir d'un panneau solaire

La chaîne d'énergie est composée

- De panneaux solaires qui fournissent de l'énergie électrique continue en fonction de l'ensoleillement. Leur rendement est de 15%,

-D'un onduleur qui transforme la tension électrique d'entrée en une tension de sortie de 230V et 50 Hz. Le rendement de l'onduleur est de l'ordre de 90%,

- D'un moteur asynchrone qui convertit l'énergie électrique en une énergie mécanique Nécessaire à l'entraînement de la pompe. Son rendement est de l'ordre de 90%,

- D'une pompe centrifuge qui transforme de l'énergie mécanique en énergie potentielle Hydraulique. Son rendement est de l'ordre de 60%.

L'eau relevée peut être stockée dans des réservoirs.

La chaîne d'information est composée :

- D'un boîtier de commande généralement muni d'un microprocesseur permettant de gérer la commande de l'onduleur afin de maintenir une tension constante aux bornes des panneaux solaires. Des boîtiers de commande permettent de gérer la distribution de l'énergie vers plusieurs appareils. Il est également possible de raccorder des boîtiers à des ordinateurs via une connexion RS232,

- De câbles.[11]

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE I

METHODE DE DIMENSIONNEMENT

I.1. Méthode simple de dimensionnement

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

- Evaluation des besoins en eau
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire
- Détermination de l'énergie solaire disponible
- Choix des composants.

1.1. Evaluation des besoins en eau

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie.

Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail (M.G. Thomas, 1987).

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale.

La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journalières et l'autonomie requise du système.

1.2. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

Une fois définies les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire à partir de la relation :

$$E_h = g \rho_a V_a h / 3600 \quad (1)$$

Ou :

E_h : énergie hydraulique (Wh/jour)

h : hauteur totale (m)

V_a : volume d'eau (m³/jour)

ρ_a : densité de l'eau (1000 kg/m³)

g : accélération de la pesanteur (9,81m/s²)

Durant le processus de pompage, le niveau d'eau à l'intérieur du puits tend à baisser, jusqu'à ce que la vitesse avec laquelle la régénération du puits arrive à équilibrer la quantité pour que l'on puisse

pomper l'eau de nouveau. L'abaissement du niveau d'eau dans le puits dépend d'un certain nombre de facteurs, comme le type et la perméabilité du sol et l'épaisseur de l'aquifère.

La hauteur totale de pompage est la somme de la hauteur statique et de la hauteur dynamique :

$$h = h_s + h_d \quad (2)$$

Dans le cas de puits qui présentent des variations importantes du niveau d'eau en fonction du débit, on peut ajouter un terme correctif et cette équation devient :

$$h = h_s + h_d + [(h_d - h_s) \cdot Q_a] / Q_p \quad (3)$$

où : h_s : niveau statique (m) Q_p : débit d'essai (m³/h)

h_d : niveau dynamique (m) Q_a : débit apparent (m³/h)

La hauteur statique h_s est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel on doit pomper l'eau.

La hauteur dynamique h_d représente les pertes d'eau dans la tuyauterie. La formule de Darcy-Weisbach [6] permet le calcul de la hauteur dynamique :

$$H_d = K_{ac} (v^2 / 2g) \quad (4)$$

où K_{ac} est un coefficient dépendant du type d'accessoire. Dans le tableau 1, on donne une série de valeurs de K_{ac} pour différents accessoires.

Tableau 10: Coefficient K_{ac} pour différents types d'accessoires dans la tuyauterie

Accessoire	Coefficient K_{ac}
Jonction du réservoir à tuyauterie	
connexion au ras de la paroi	0,5
Jonction de tuyauterie au réservoir	1,0
Coude 45°	0,35 à 0,45
Coude 90°	0,50 à 0,75
Tés	1,50 à 2,00
Vannes de contrôle (ouverte)	3,0

Une autre méthode pour tenir compte des accessoires du circuit est d'ajouter à la longueur réelle de la tuyauterie (seulement pour effet de calcul) des longueurs de tubes de mêmes diamètres que le conducteur en étude, capables de causer les mêmes pertes de charge occasionnée par les pièces qu'elles substituent. De cette façon, n'importe quel accessoire peut être substitué par une longueur fictive (**P. Silvestre, 1983**). En général, on recommande que la hauteur dynamique ne dépasse pas 10 % de la hauteur totale de pompage.

1.3. Détermination de l'énergie solaire disponible

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible et de l'énergie hydraulique nécessaire.

1.4. Inclinaison du générateur photovoltaïque

L'inclinaison β des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire.

1.5. Mois de dimensionnement

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, c'est-à-dire celui dont le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire soit minimum.

Comme idée de principe, à chaque inclinaison β , correspond un mois le plus défavorable. Le mois de dimensionnement à l'inclinaison optimale sera précisément celui qui présente le plus petit rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique. L'irradiation solaire (G_{dm}) et l'énergie hydraulique nécessaire E_h correspondantes à ce mois serviront pour le choix des composantes du système.

1.6. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

La puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque sous les conditions standards de mesure, CSM, (éclairage $G_{ce} = 1000 \text{ W/m}^2$ et température de cellule $T_{c,ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) (**Kenna et al, 1984**) est :

$$P_p = \eta_g A G_{ce} \quad (5)$$

Ou :

P_p : puissance de sortie sous CSM (W)

η_g : rendement du générateur à la température de référence (25 °C) A :

surface active du générateur (m^2)

G_{ce} : éclairage dans les CSM (1000 W/m^2)

L'énergie électrique journalière, E_e , est donnée par :

$$E_e = \eta_{PV} A G_{dm} (\beta) \quad (6)$$

Où :

η_{PV} : rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation

$G_{dm} (\beta)$: irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison β ($\text{kWh/m}^2/\text{jour}$).

Le rendement η_{PV} peut être calculé à l'aide de l'expression :

$$\eta_{PV} = F_m [1 - \gamma (T_c - T_{c \text{ ref}})] \eta_g \quad (7)$$

où F_m : facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximum.

γ : coefficient de température des cellules. \square prend des valeurs entre 0,004 et 0,005 $^{\circ}\text{C}$ pour des modules au silicium mono et polycristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

T_c : température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement.

L'énergie électrique nécessaire est liée avec l'énergie hydraulique par l'expression :

$$E_e = E_h / \eta_{mb} \quad (8)$$

Où

E_h : énergie hydraulique moyen mensuelle (kWh)

η_{MB} : rendement du sous-système moteur-pompe

En substituant les équations (7), (8) et (9) dans (6), nous obtenons pour la puissance crête du générateur :

$$P_p = [(G_{ce} / F_m [1 - \gamma (T_c - T_{c,ref})] G_{dm} . (\beta)] . E_h / \eta_{Mb} \quad (10)$$

1.7. Dimensionnement du moteur

Le moteur doit être capable de supporter la puissance crête du générateur photovoltaïque.

1.8. Dimensionnement de la pompe

Le débit crête Q (m^3/h) est calculé par la relation :

$$Q = 3,6 P_h / g.h \quad (11)$$

Où :

P_h : puissance hydraulique nécessaire (W)

g : accélération de la pesanteur ($9.81m/s^2$)

h : hauteur manométrique totale (m)

La puissance hydraulique crête (P_h) nécessaire en fonction de la puissance électrique crête fournie par le générateur photovoltaïque (P_e) est donnée par :

$$P_h = P_e \eta_{MB} \quad (12)$$

où

η_{MB} : rendement crête du sous-système moteur-pompe

1.9. Dimensionnement des tuyauteries

Le diamètre des tuyauteries peut être estimé en utilisant des tableaux ou des graphes qui expriment les pertes par frottements en fonction du débit pour chaque diamètre de la tuyauterie.

En pratique, il se présente le problème de fixer la hauteur dynamique h_d pour des considérations économiques. En effet, si nous augmentons le diamètre D de la tuyauterie, h_d diminue. Economiquement parlant, une augmentation de D suppose une augmentation des dépenses d'installation, mais en même temps une diminution des pertes d'énergie.

Le diamètre le plus économique sera celui qui réduit au minimum la somme des coûts de la tuyauterie et de l'énergie perdue par frottements (**Mataix C, 1970**). Il est possible d'obtenir analytiquement les diamètres des tuyauteries de pompage qui s'approchent à ceux qui minimisent les coûts des installations par la formule de Bresse (**Silvestre P, 1983**) :

$$D = K \cdot [\text{racine}(Q)] \quad (13)$$

D : diamètre de la tuyauterie (m)
débit crête de la pompe (m^3/s)

K : coefficient qui varie de 0,75 à 1,40

L'équation de continuité est :

$$Q = (\pi \cdot D^2 / 4) \cdot v \quad (14)$$

Choisir la valeur K équivaut à fixer la vitesse moyenne du fluide (v). Enfin en substituant dans l'équation de continuité la valeur de Q prise de la formule de Bresse, nous avons :

$$V = [4 / (\pi \cdot K^2)] \quad (15)$$

CHAPITRE II

ANALYSE ECONOMIQUE

II. Analyse économique

II.1. Calcul des différents coûts d'installation du système photovoltaïque

Dans la deuxième partie nous avons évalué le coût relatif à l'environnement de l'installation et la dernière partie de cette étude économique aboutira à une estimation du coût de mètre cube d'eau pompée par notre système de pompage photovoltaïque et le coût de kWh de l'électricité produite par notre système photovoltaïque (Diaf et al, 2006). L'application de cette analyse économique nécessite la connaissance des caractéristiques suivantes

II.1.1. Équipements et matériels solaires

Les équipements solaires sont les principaux composants du système photovoltaïque étudié, c'est-à-dire les modules photovoltaïques, les éléments d'accumulation électrochimique, le système de régulation, l'électropompe et les diverses fournitures indispensables au montage et au fonctionnement de cette dernière (Structure câbles boîtiers et autres accessoires).

Il est à souligner que la plupart de ces équipements peuvent être soit acquis de l'extérieure qui implique une augmentation notable du coût global de l'installation, soit fabriqués localement en Algérie.

II.1.2. Etude technique et réalisation

Cette rubrique est relative l'étude de conception du système photovoltaïque à mettre en place sur site. C'est à partir des conceptions énergétiques demandées (détermination du profil de consommation) et des ressources énergétiques disponibles sur ce site, suivies préalablement de visites effectuées que cette étude est précisément entamée. À cet effet, les frais octroyés à cette rubrique sont estimés à 3% du coût global.

II.1.3. Travaux de génie civil

Par ailleurs il est indispensable, dans le cadre d'une telle réalisation de prévoir un poste spécifique qui regroupe l'ensemble des frais afférents aux divers travaux de génie civil devant être effectués sur site lors de l'installation photovoltaïque. Le montant octroyé à ce poste est estimé à environ 30% du coût global de l'installation.

1.3.1. Installation

Dans le cadre de l'installation sur site, une équipe de techniciens (installateurs) spécialistes est directement mise en place. Le poste relatif au montage, à l'installation et à la mise en service du système photovoltaïque peut être évalué à 8% du coût global de l'installation, il représente l'ensemble des frais occasionnés à la réalisation et à l'installation de la centrale sur site prévu.

1.3.2. Coût d'un système photovoltaïque

Le calcul du coût d'un système photovoltaïque requiert la connaissance des éléments suivants :

- La durée de vie,
- L'investissement initial,
- Les coûts de maintenance annuels relatifs au système photovoltaïque,
- Les coûts de remplacement des différents sous-systèmes,
- Les profits réalisés.

L'investissement initial permet à l'utilisateur de savoir quel est le prix qu'il va payer lors de l'installation de son système. Aussi, d'autres informations très importantes constituent des critères de choix, à savoir

- Le coût du système photovoltaïque sur sa durée de vie,
- Le coût de l'énergie consommée par l'usager sur toute sa durée,

Le coût du kWh consommé dépendra des profits engendrés mais également de l'énergie photovoltaïque consommée par l'utilisation.

- **Coût sur la durée de vie du système**

Le coût sur la durée de vie du système est fonction de l'investissement initial, du coût annuel d'entretien et de maintenance et du coût de remplacement éventuel de certains sous-systèmes.

$$C_{vie} = I_0 + C_{ent/main} + C_{rempl} \quad (16)$$

- **Coût actualisé du système et coût du kWh consommé**

Le calcul du coût de l'énergie prend en compte celui sur la durée de vie, ainsi que les profits réalisés sur toute la durée active du système.

$$C_{actu} = C_{vie} / Fa \quad (17)$$

CHAPITRE III

RESULTATS COMPARATIFS

Résultats comparatifs

Il est souvent et pratiquement très difficile de décider lequel des techniques de pompage d'eau, solaire photovoltaïque ou par groupe électrogène, est plus intéressant par son coût inférieur et sa fiabilité. En effet, plusieurs paramètres spécifiques au site doivent être pris en charge (éloignement du site, caractéristiques du site, coût de l'investissement, approvisionnement en carburant et lubrifiant, conditions d'exploitation...etc.). Néanmoins, une comparaison de coût total peut se faire rapidement en comparant le coût global actualisé du m³ d'eau pompé. Cette comparaison globale est souvent décisive sur l'acceptation ou le rejet du projet d'investissement.

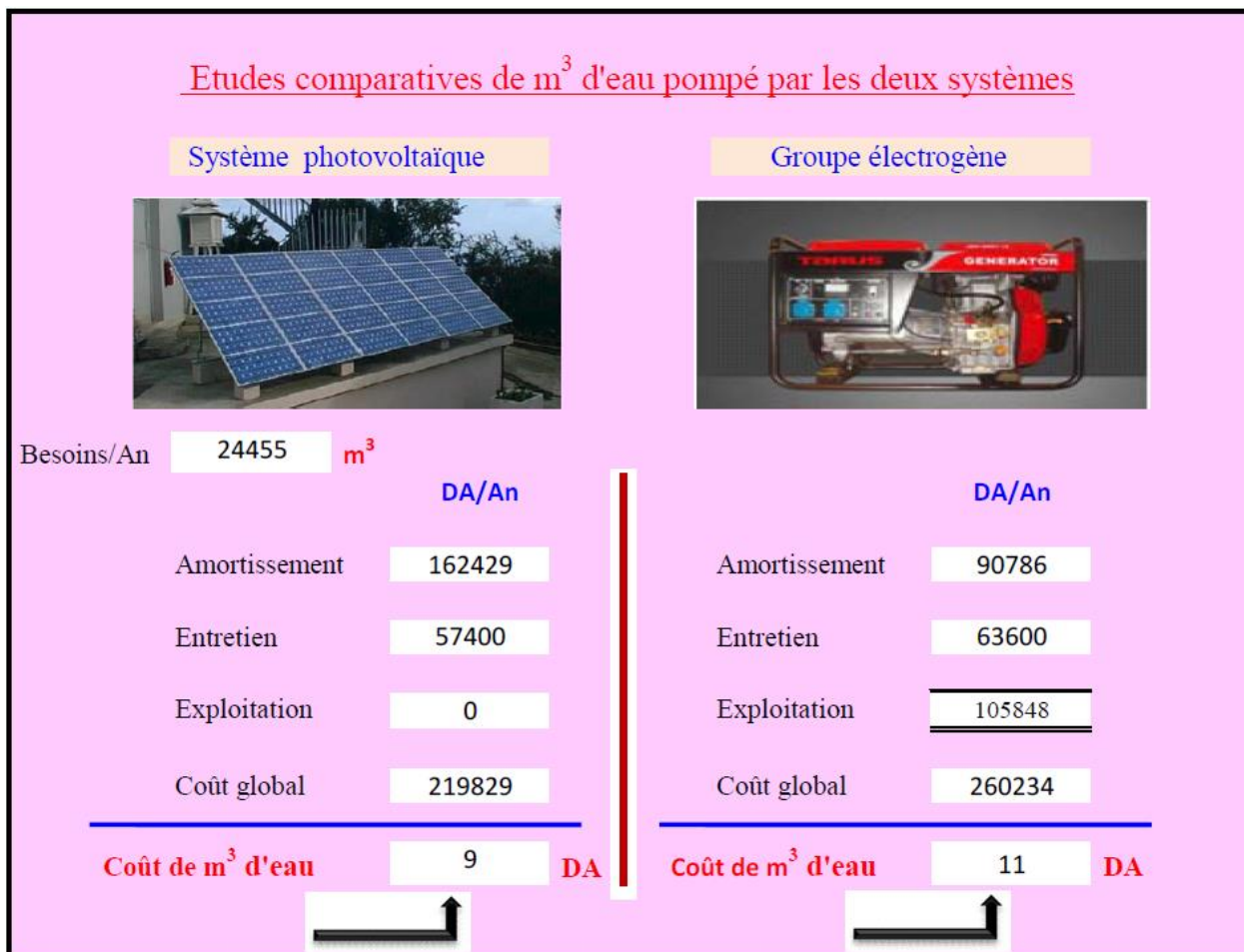


Figure 22 : Calcul du coût de m³ d'eau pompé par les deux systèmes photovoltaïques/électrogène.

Pour mieux comparer les résultats, la feuille de calcul Excel de la présentation 5.10 montre simultanément les coûts **globaux actualisés du m³ d'eau pompé** par les deux systèmes après 20 ans d'exploitation (Bouzidi B et Malek A, 2003). Sur la base de notre cas particulier, nous constatons que le pompage d'eau par énergie solaire photovoltaïque semble plus intéressant.

En effet, en analysant l'évolution du coût d'exploitation selon le nombre d'année d'exploitation, nous remarquons clairement que le pompage par groupe électrogène est moins couteux au début de l'exploitation et qu'au fur et à mesure que les années passent, l'investissement initial de la solution photovoltaïque devient rentable, tout en profitant des avantages de cette énergie propre. La comparaison de la figure 5.11 montre qu'après environ 10 ans d'exploitation, la solution de pompage par énergie photovoltaïque devienne moins coûteuse.

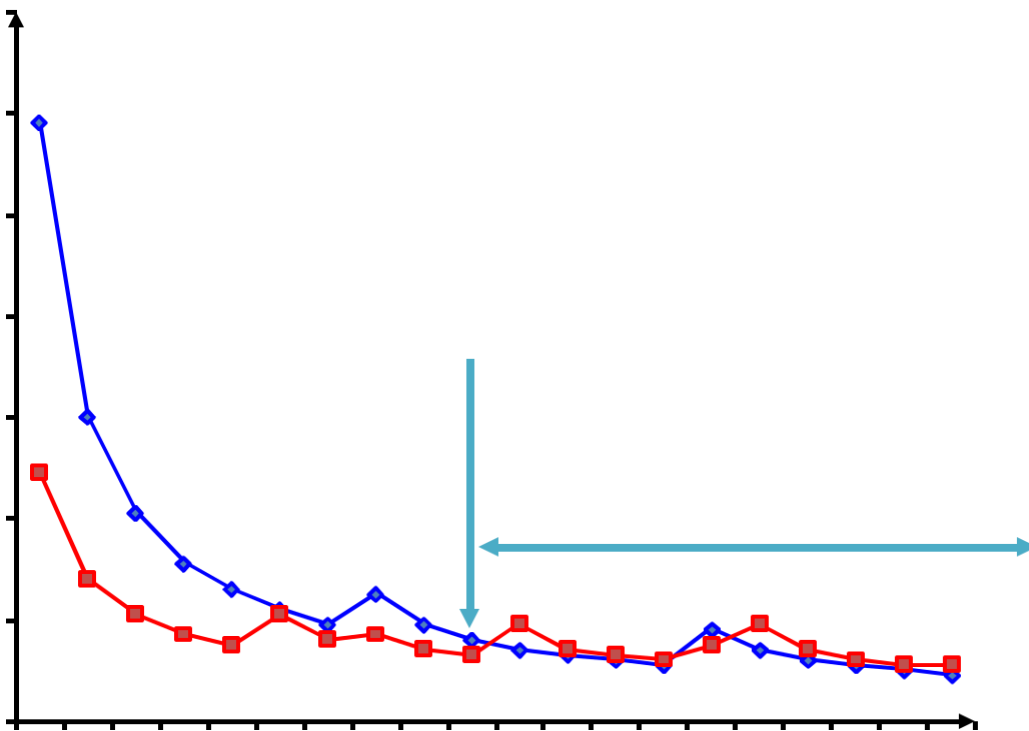


Figure 23 : Comparaison des coûts de m³ d'eau pompé par les deux systèmes photovoltaïque/électrogène en fonction du nombre d'année d'exploitation.

Le point « faible » de la solution de pompage par énergie photovoltaïque reste, comme le montre la figure 23, l'investissement initial. Nous avons bien montré ci-dessus qu'après un certain nombre d'année, cet investissement sera complètement amorti. D'autres indicateurs économiques nous font penser que le coût d'investissement initial des solutions photovoltaïques a tendance à diminuer dans le futur. Pour mieux imaginer la comparaison

entre les deux systèmes, l'exemple de la figure 23, qui supposent une réduction des coûts des panneaux solaires (20 % environ), nous montrent que l'écart d'investissement initial devient moins important et que la rentabilité du système est obtenue beaucoup plus rapidement (après 6 ans environ).

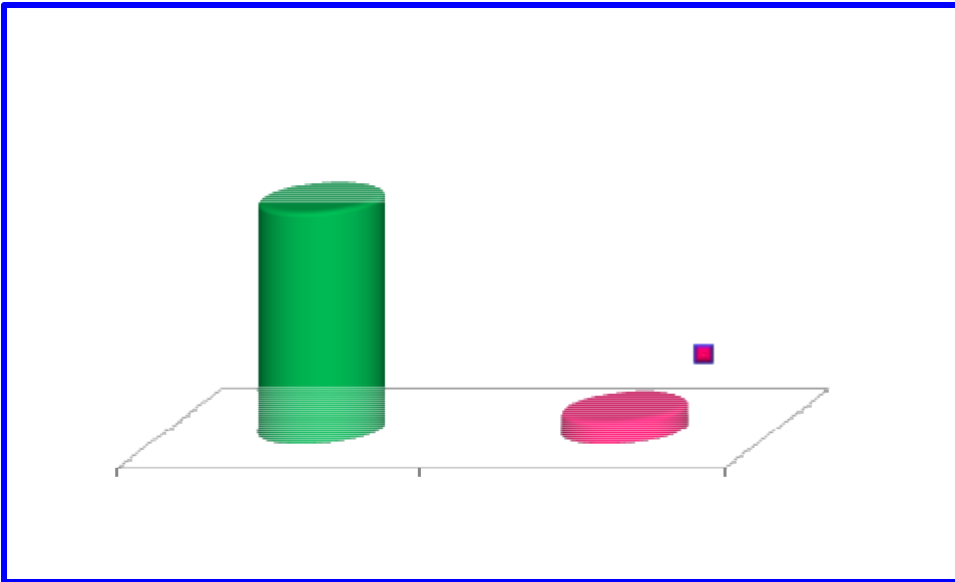


Figure 24 : Comparaison des coûts de m³ d'eau pompé par les deux systèmes photovoltaïque/électrogène en fonction du nombre d'année d'exploitation.

On remarque que l'amortissement du système est atteint au bout de 21 ans. C'est vrai que c'est un peu long, mais il ne faut pas oublier que pendant cette période, on ne paie aucune somme à SONEGAS. Ainsi qu'au-delà de cette période l'énergie sera « gratuite ».

Et pour compléter la comparaison, les prix du KWh ne sont pas très loin. Signalons qu'ici, on à pas considérer une connexion payante au réseau d'électricité, sinon le prix du KWh offert par la SONELGAZ sera de même ordre.:

Ces résultats sont calculés pour une aide de l'état de 50 % :

Il est clair que l'aide de l'état apportera un plus au système. On remarque sur l'histogramme qu'au bout de 10 ans uniquement, le système est totalement amorti. Ce résultat est très prometteur, car la rentabilité commencera à partir de la 11eme année

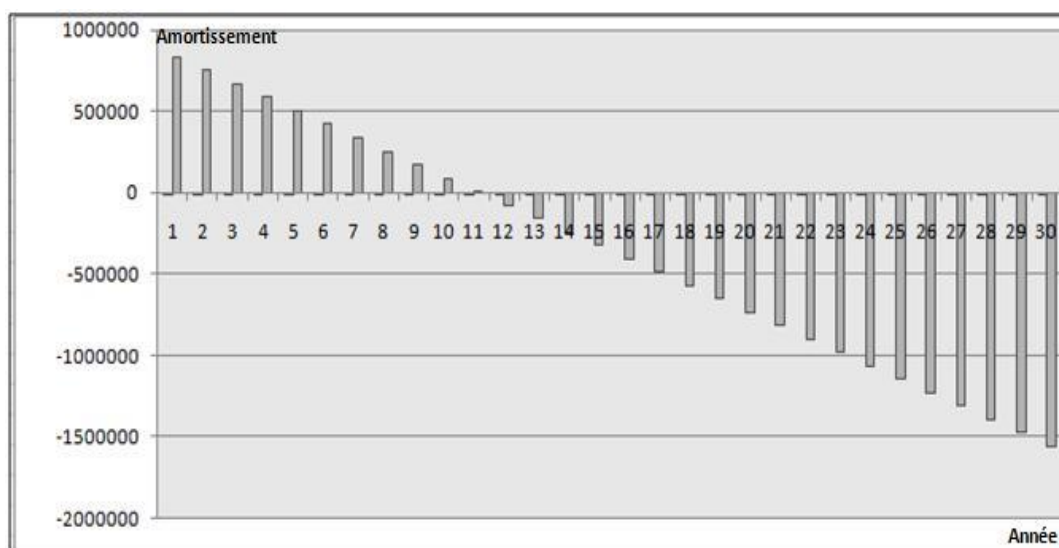
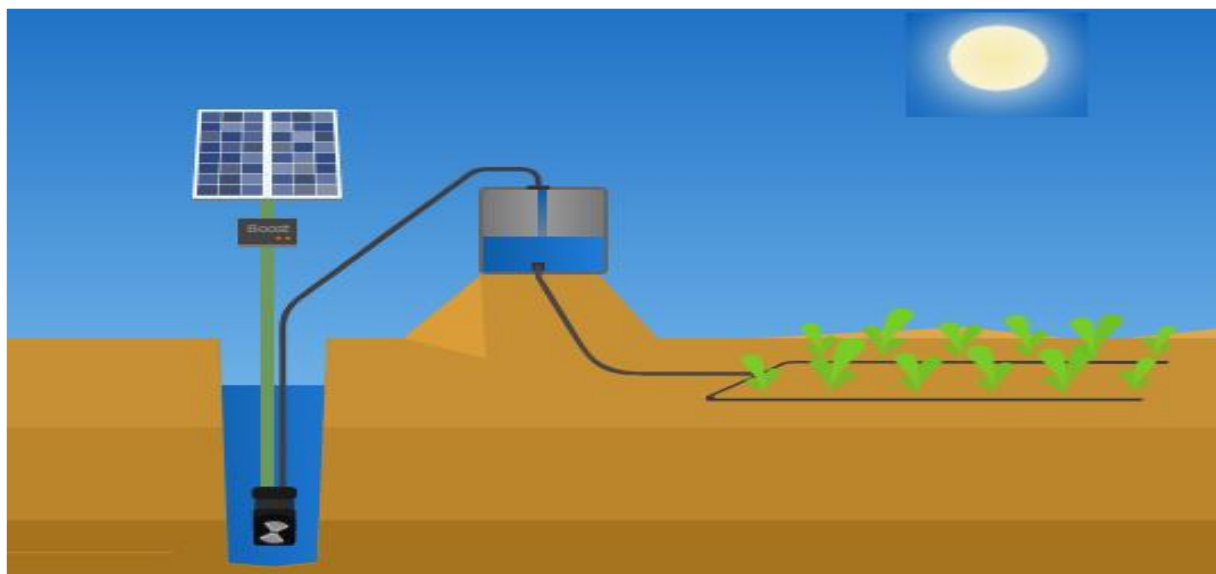


Figure 25 : Histogramme d'amortissement du système de pompage (Avec aide de l'état).

On constate qu'il sera plus intéressant d'utiliser l'énergie photovoltaïque avec l'aide de l'état, que de raccorder les zones isolées et lointaines (avec une densité faible de population) au réseau d'électricité conventionnelle, qui se fait avec des coûts très élevés.

Figure 26: Pompage d'eau pour irrigation.



Au vu de ces résultats obtenus, les deux systèmes de pompage étudiés présentent des avantages et des inconvénients, qui sont résumés sur le tableau 11. Le système photovoltaïque présente un coût d'investissement important, un entretien très réduit et un faible coût d'exploitation. Par contre, le système avec groupe électrogène présente un coût d'investissement relativement faible, mais un coût d'exploitation, d'entretien et de maintenance relativement important.

	Avantages	Inconvénients
Pompage photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible maintenance ▪ Propre ▪ Pas de carburant ▪ Installation facile ▪ Fiable sur le long terme ▪ Faible coût périodique ▪ Système modulable 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût important d'investissement • Le rendement baisse en fonction des irradiations • Sensible au taux d'actualisation • Sensible au taux d'utilisation du système
Pompage diesel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût modéré en capital ▪ Transportable ▪ Installation facile 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance souvent inadéquate • Durée de vie réduite • Prix du carburant élevé

		<ul style="list-style-type: none"> • Fonctionnement journalier limité • Pollution de l'environnement
--	--	--

Tableau 11 : Avantages et inconvénients des deux systèmes de pompage

Etudié Ces avantages et inconvénients doivent être pris en considération lorsqu'un investissement est à effectuer. Lors de notre analyse, des hypothèses sur certains paramètres pouvant variés dans d'importantes proportions ont été apportées. Il s'agit : - des prix variables en fonction de la qualité et de la quantité du matériel ; - des coûts des aménagements dépendant du type d'utilisation et des conditions locales ; - du choix du matériel conditionnant les performances ; - des coûts du carburant et lubrifiant subventionnés. Ces hypothèses influencent d'une manière significative le coût d'exploitation et de ce fait le coût du m³ d'eau pompé.

Le *pompage par énergie solaire photovoltaïque*, ne permet pas forcément d'adapter instantanément le débit en fonction des besoins (variations saisonnières dans les besoins et aussi évolutives dans le temps), présente en sa faveur les avantages certains, comme suit :

- Plus fiable que le diesel,
- Pas d'approvisionnement en carburant (frais d'exploitation nuls),
- Peu d'entretien régulier et obligatoire,
- Faible coût de fonctionnement, limité à l'entretien et la réparation.
 - Du point de vue rentabilité économique et jusqu'à une énergie hydraulique équivalente de l'ordre de 2.000 m⁴, le coût du m³ d'eau pompé par les systèmes de pompage par énergie solaire photovoltaïque est meilleur.

Le *pompage diesel*, quant à lui, permet d'adapter la production aux besoins demandés.

Cependant ses contraintes d'utilisation sont grandes, et en particulier :

- Un entretien périodique,
- Un approvisionnement en carburant,
- Un taux de pannes plus élevé,
- Une surveillance du système pendant le fonctionnement du groupe électrogène.
- Des émissions de gaz à effet de serre.

Les coûts du mètre cube (m³) d'eau pompé dépendent non seulement de la hauteur manométrique totale, mais également d'un certain nombre de paramètres spécifiques au site, qui doivent être pris en

considération. Ces paramètres incluent :

- Le rendement du système,
- L'irradiation du site,
- Le taux d'actualisation,
- La durée de vie des divers constituants du système,
- Le taux d'utilisation du système,
- L'étude technique relative à la source d'eau (forage).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Une étude comparative détaillée entre les deux techniques de pompage d'eau, pompage par énergie solaire photovoltaïque et pompage en utilisant des groupes électrogènes (pompage classique), nous a appris l'importance du calcul du coût du kWh produit. L'exemple applicatif que nous avons utilisé pour mieux comprendre le coût dans chaque technique, nous a montré que la technique de pompage par groupes électrogènes semble être la moins coûteuse au début de l'exploitation. La balance devienne clairement en faveur de la solution de pompage par énergie solaire photovoltaïque après quelques années d'exploitation (**10** ans environ). Le point « faible » de cette dernière solution reste l'investissement initial qui favorise clairement la solution de pompage par groupe électrogène. Cela ne veut pas dire que la technique de pompage par groupe électrogène sera systématiquement la meilleure. En effet, notre étude et analyse ont montré qu'il faut prendre en considérations d'autres facteurs importants lors d'un éventuel investissement.

Enfin, bien qu'il soit plus clair maintenant que ce n'est pas toujours facile de choisir laquelle des deux techniques de pompage d'eau est la meilleure, il semble que l'avenir est pour l'énergie solaire photovoltaïque. En effet, l'augmentation incontrôlée des prix des carburants et l'épuisement inévitable de ce type de ressources classiques favorisent considérablement l'utilisation des énergies renouvelables. Par conséquent, le développement de ce type d'énergie décentralisé, en particulier dans le sud de notre pays, est très recommandé puisqu'il permet l'accès à l'eau facilement et à moindre coût dans n'importe quel endroit.

Le système de pompage photovoltaïque réalisé à l'exploitation à Seb Seb est le système basé sur le moteur à courant alternatif et fonctionnant au fil du soleil. Ce choix a été fait pour les raisons suivantes :

- Disponibilité du moteur à courant alternatif
- Avantages du moteur à courant alternatif : robustesse, entretien nul et prix réduit.
- Élimination du stockage électrique qui comprend plusieurs inconvénients.

Les propriétés du système de pompage solaire sont :

- Un bon rendement,
- Une excellente fiabilité,
- Autonomie de fonctionnement,
- Transfert optimal de puissance du générateur au récepteur,

Les caractéristiques du convertisseur électronique sont :

- Puissance maximale 5500W
- Tension d'entrée maximale 400V DC
- Fréquence variable de 4 à 60 Hz
- Tension de sortie maximale 240V AC

En guise de recommandations :

Les calculs du pré dimensionnement doivent être repris de façon rigoureuse à partir d'une base de données météorologique fournie s'étendant sur plusieurs années et effectuée sur plusieurs régions.

Nous devons également évaluer le coût de réalisation de ce système en cherchant le meilleur compromis entre différents organes du système (pompes, batteries, lampes électriques, modules photovoltaïques, réfrigérateurs, télévision ...).

Enfin, nous espérons que ce travail servira comme une référence pour les études de pompage pour modèle d'irrigation par énergie solaire photovoltaïque.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arab, A., M. Benghanem and A. Gharbi. (2005) “Dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque.” . Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19 – 26.

Belhadj Mohammed. (2008). "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome," Centre Universitaire De Bechar Mémoire de Magister, 2007-2008.

Bouzidi B et Malek A (2003). « Analyse économique des systèmes énergétiques-station de pompage », Rev.Energ.Ren : ICPWE(2003)53-60.

Chenni R.(2007). ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE DANS UN VILLAGE SOLAIRE. Doctorat en Sciences en Physique Energétique. UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE.

Diaf S, M. Haddadi et M. Belhamel (2006). «Analyse technico- économique d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site d'Adrar» Revue des Energies Renouvelables Vol. 9, N°3 (2006) 127–134.

Kenna, J. and B. Gillett (1984). “Solar water pumping: a handbook.” (1984). Intermediate Technology Power & Partners, Reading, 124 p., 1984.

Louazene, Mohamed Lakhdar. (2008) “Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla.”. Mémoire de Magister. UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR – BATNA.101p.

Mataix C (1970). ‘Mecánica de Fluidos y Maquinas hidraulicas’, Castillo, Madrid, 582 p.

Meflah, A. and T. Allaoui. (2012). “Commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque au fil du soleil.” . Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 489 – 499.

Moussi, A. and A. Saadi. (2001) “Etude comparative entre les techniques d'optimisation Des systèmes de pompage photovoltaïque.” *LARHYSS Journal* 1: 157-168.

Silvestre P (1983). ‘Fundamentos de Hidráulica General’, Limusa, Mexico, 381 p., 1983.

Thomas M.G, (1987) “Water Pumping.- The Solar Alternative”, Photovoltaic Design Assistance Center, Sandia National Laboratories, NM 8718 5, Albuquerque, 58 p., 1987.