

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche**  
**Scientifique**  
**Université Kasdi Merbah Ouargla**  
**Faculté des Hydrocarbures et des Énergies Renouvelables et**  
**Sciences de Terre et de l'univers**  
**Département des Hydrocarbures et des Energies Renouvelables et**  
**Sciences de Terre et de l'univers**  
**Spécialité : Energies Renouvelables**



**Mémoire**  
**Licence professionnel**

**THEME**

**Optimisation d'un système de pompage  
photovoltaïque .application aux sites  
sahariens**

**Présenté par :**  
**Abbassi Fatima**

**Devant le jury Composé de :**

Mr. Benmanine Djamel	Professeur.	Président	Ukm Ouargla
Mr. Douak Mohamed	MAA.	Encadreur	Ukm Ouargla
Mr. Belloufi Fouad	MCA.	Examineur	Ukm Ouargla

**Année Universitaire :**

**2018/2019**

## **Dédicaces**

Pour ma mère, à mon père ..

Pour tous mes frères ..

Pour tous ceux qui étaient prêts à nous  
enseigner ..

Pour tous les amis ..

Je dédie ce travail.

## Remerciements

Avant de faire de quelconques développements au sujet de cette expérience professionnelle, il apparaît opportun de débiter ce mémoire par des remerciements aux personnes qui m'ont beaucoup aidé au cours de ce mémoire.

Je tiens à la fin de ce travail à remercier ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la foi et de m'avoir permis d'en arriver là.

On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination.

Les années d'étude m'ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple.

Ce parcours, en effet, ne s'est pas réalisé sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour lesquelles les réponses nécessitent de longues heures de travail.

Je remercie infiniment M. dawak Mohammed, mon encadreur de mémoire dont la disponibilité, le savoir-faire et le soutien ne m'ont jamais fait défaut. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé. Surtout pour son encadrement, sa compréhension et sa gentillesse durant tout le long de mon mémoire.

Je remercie très sincèrement Monsieur Arbaoui Mohammed, professeur à l'université de ouargla, pour ses informations ses conseils et ses encouragements.

Je remercie tous mes enseignants sans exception pour leurs aides et leurs encouragements, durant ma période d'étude.

Monsieur le président, les membres de jury qui ont par leur présence m'honorer afin d'évaluer cette recherche

Je tiens à remercier aussi l'université de nous donner l'opportunité de vivre une expérience aussi enrichissante tout sur le plan humain que professionnel, tout en gardant la possibilité de poursuivre les études.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance et mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont eu la gentillesse de me prodiguer soutien, critiques, suggestions et encouragements pour l'accomplissement du présent travail. Je remercie aussi tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

## Liste des figures

Figure 1. 1 : Schéma d'une cellule photovoltaïque .....	15
Figure 1. 2 : Cellule PV monocristalline.....	16
Figure 1. 3 : Cellule PV polycristalline.....	17
Figure 1. 4 : Cellule photovoltaïque amorphe.....	18
Figure 1. 5 : Cellule tandem .....	19
Figure 1. 6 : multi-jonction .....	19
Figure 2. 1 : Schéma synoptique simplifié de Pompage PV .....	23
Figure 2. 2 : Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie.....	24
Figure 2. 3 : Hauteur manométrique total .....	25
Figure 2. 4 : Schéma de converge vers le PPM.....	26
Figure 2. 5 : Groupement de Ns module en série et NP en parallèle .....	27
Figure 2. 6 : Illustration d'une centrifuge à turbine.....	28
Figure 2. 6 : Le couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse .....	29
Figure 2. 8 : Le débit est proportionnel à la vitesse, toutefois il faut une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir le débit. ....	29
Figure 2. 8 : Pompe volumétrique rotative à palette.....	30
Figure 2. 10 : Le couple est pratiquement constant en fonction de la vitesse.....	30
Figure 2. 11 : Le débit est proportionnel à la Vitesse .....	30
Figure 2. 12 : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC .....	31
Figure 2. 13 : Moteur à courant continu avec balais.....	31
Figure 2. 13 : Diagramme du pompage PV par motopompe à AC .....	32
Figure 2. 15 : Conversion DC / DC.....	33
Figure 2. 16 : Conversion DC / AC.....	33
Figure 2. 17 : Courbe typique des performances d'une pompe en conditions d'utilisation.....	38
Figure 3. 1: Situation géographique de la région d'étude.....	42
Figure 3. 2: Répartition mensuelle des pluies à Ouargla l'année 2018.....	43
Figure 3. 3: Température moyenne mensuelle à Ouargla l'année 2018.....	44
Figure 3. 4: Evaporation mensuelle moyenne à Ouargla l'année 2018 .....	45
Figure 3. 5: Vitesse moyenne mensuelle des vents à Ouargla l'année 2018 .....	45
Figure 3. 6 : Algorithme de dimensionnement.....	52

## Liste des symboles

Symbole	Unité	Définition
$I_{ph}$	A	Photo- courant
$K$	J/K	La constante de boltzman
$I_s$	A	Courant de saturation
$I$	A	Courant de la cellule
$V$	V	Tension à la borne de cellule
$N_p$	-	Nombre des modules parallèles
$N_s$	-	nombres des modules en série
$E_r$	W/m <sup>2</sup>	Eclairement de référence
$E$	W/m <sup>2</sup>	Eclairement
$\eta$	%	Rendement d'une cellule solaire
$Q$	m <sup>3</sup> /h	Débit
HMT	m	Hauteur manométrique totale
$H_g$	m	hauteur géométrique
$H_s$	m	Hauteur statique
$\lambda$		Coefficient des pertes de charge linéaires
$E_h$	kwh/J	Énergie hydraulique
$C_h$	kg. s. h/m <sup>2</sup>	Constante hydraulique
$Q$	m <sup>3</sup> /Jour	Volume d'eau
$H_{MP}$	$m$	Hauteur manométrique total
$g$	9.81m/s <sup>2</sup>	La gravité terrestre
$\rho$	1000kg/m <sup>3</sup>	Densité de l'eau
$E_e$	kwh/J	Energie électrique
$\eta_{MP}$	-	Le rendement du groupe motopompe
$\eta_{Conv}$	-	Le rendement de convertisseur
CSM,	1000w/m <sup>2</sup>	éclairage
$P_c$	W	La puissance crête.
$\eta_g$	-	Le rendement du générateur
$A$	m <sup>2</sup>	La surface active du générateur
$\eta_{PV}$	-	Le rendement du générateur
$G_d (\beta)$	Wh/m <sup>2</sup> /j	L'irradiation moyenne journalière incidente

$F_m$	-	Facteur de couplage
$\Gamma$	$C^\circ$	Coefficient de température des cellules.
$T$	$C^\circ$	Température moyenne journalière des cellules
$Q_h$	$m^3/h$	le débit horaire
$P_C$	Wc	La puissance crête du générateur.
$P_M$	W	La puissance du module PV.
$V_{Ch}$ (l'onduleur).	V	La tension nominale de la charge
$V_M$	V	La tension nominale du module.

## *Lexique*

<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>GPV.</b>	Générateur Photovoltaïque
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking.
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et Observation.
<b>DC</b>	Courant Continu (Direct Current).
<b>AC</b>	Courant Alternatif (Alternative Current)
<b>DC/AC</b>	un convertisseur pour un moteur à courant alternatif
<b>DC/DC</b>	un convertisseur pour un moteur à courant continu
<b>MCC</b>	moteur a courant continu

## Liste des tableaux

Tableau 2. 1: Diagramme d'estimation des besoins en eau. ....	35
Tableau 3. 1 : Répartition mensuelle des pluies à Ouargla l'année 2018 .....	42
<i>Tableau 3. 2</i> : Température moyenne mensuelle à Ouargla l'année 2018 .....	43
<i>Tableau 3. 3</i> : Evaporation mensuelle moyenne à Ouargla l'année 2018.....	44
<i>Tableau 3. 4</i> : Vitesse moyenne mensuelle des vents à Ouargla l'année.....	45
<i>Tableau 3. 5</i> : Recensement des forages à Ouargla l'année 2018.....	46
<i>Tableau 3. 6</i> : Les besoins journaliers moyens mensuels en eau des arbres d'olivier /jour.....	47
Tableau 3. 7: Valeurs moyenne d'insolation mensuelle .....	48
<i>Tableau 3. 8</i> : Les valeurs de l'ongle journalier mensuel optimal .....	48
<i>Tableau 3. 9</i> : Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle pour une inclinaison Optimale.....	48
<i>Tableau 3. 10</i> : Caractéristiques de l'onduleur. ....	50
Tableau 3. 11: Coût total de l'investissement. ....	54

## Sommaire

Dédicaces .....	
Remerciements .....	
Liste des figures .....	
LISTE DES SYMBOLES .....	
Liste des tableaux .....	
Sommaire .....	
Introduction .....	12

### Chapitre 1 : généralité sur système PV

1.1. Introduction : .....	14
1.2.La cellule photovoltaïque .....	14
1.2.1. Historique .....	14
1.2.2 Principe général .....	15
1.2.3 Les panneaux solaires : .....	15
1.2.4 Les types des panneaux .....	16
1.2.4.1 Silicium monocristallin : .....	16
1.2.4.2 Silicium poly cristallin : .....	16
1.2.4.3 Silicium amorphe (a-si) : .....	17
1.2.4.4.Cellule Tandem : .....	18
1.2.4.5 Cellule multi-jonction : .....	19
I.3 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque .....	19
I.3.1. Avantages .....	19
1.3.2. Inconvénients .....	20
1.4 CONCLUSION : .....	20

### Chapitre 2 : Le pompage photovoltaïque

2.1 Introduction : .....	22
2.2 Méthodes de pompages : .....	22

2.2.1 Pompage « au fil du soleil » .....	22
2.2.2 Pompage avec batteries .....	23
2.3 Notions hydrauliques : .....	24
2.3.1 Le débit Q : .....	24
2.4 Commande MPPT .....	25
2.4.1 Principe Recherche du point de puissance maximale (MPPT) : .....	26
2.5 Les composants d'un système de pompage PV : .....	26
2.5.1 Le générateur photovoltaïque : .....	27
2.5.2 Le groupe électropompe .....	28
2.5.2.1 Pompes .....	28
2.5.2.2 Pompe centrifuge : .....	28
2.5.2.3 Pompe volumétrique : .....	29
2.5.3 Les moteurs électriques .....	30
2.5.3. L'électronique de commande et de contrôle .....	32
2.5.4 La partie stockage .....	33
2.6 Dimensionnement complet de l'installation .....	34
2.6.1 Estimations des besoins en eau .....	34
2.6.2 Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise .....	35
2.6.3 Détermination de l'énergie solaire disponible .....	36
2.7 Taille du générateur photovoltaïque .....	36
2.7.1 Méthode analytique .....	36
2.7.2 Méthode graphique .....	38
2.8 Conclusion .....	39

### **Chapitre 3 : Application d'un système de pompage PV sur le site de Ouargla**

3.1 Introduction .....	41
3.2 Présentation de la région : .....	41

3.3 Milieu physique :.....	42
3.3.1 Climatologie .....	42
3.3.1.1 Pluviométrie.....	42
3.3.1.2 Températures.....	43
3.3.1.3 Evapotranspiration .....	44
3.3.1.4 Vents .....	45
3.4 Les ressources hydriques :.....	46
3.4.1.la nappe Phréatique :.....	46
3.4.2.la nappe de Miopliocène :.....	46
3.4.3.La nappe de Sénonien :.....	46
3.4.4. La nappe Albienne (Continental Intercalaire) : .....	46
3.5 Recensement des forages à l'année 2018 :.....	46
3.6 Oléiculture en Algérie :.....	46
3.7 Oléiculture dans la wilaya d'Ouargla :.....	47
3.8 Evolution des superficies et production oléicoles :.....	47
3.9 Système de pompage solaire .....	47
3.9.1 Estimation des besoins en eau : .....	47
3.9.2 Valeurs moyenne d'insolation mensuelle :.....	48
3.9.3 Inclinaison optimal d'un panneau solaire :.....	48
3.10 Technique de dimensionnement : [19] .....	49
3.10.1- Détermination de la charge (calcul de l'énergie quotidienne requise):.....	49
3.10.2- Énergie requise pour la pompe : [2][16] .....	49
3.10.3 Calcul du champ photovoltaïque : [2] .....	49
3.10.4 Choix de l'onduleur DC/AC : [20].....	50
3.11 Application et résultats :.....	51
3.12 Algorithme de dimensionnement : .....	51
3.13 Bilan économique :.....	54

3.14 Conclusion.....	54
Conclusion.....	55
Références bibliographiques .....	57

## **Introduction :**

L'énergie est le moteur de toute activité humaine, le pilier de l'économie moderne. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins de plus en plus élevés de l'industrie et des consommateurs et pour remédier à certaines problématiques des énergies classique (fossiles), la solution est le recours aux énergies renouvelables. Celles-ci ne sont évidemment pas nouvelles, avec l'avènement de la révolution industrielle, elles ont été marginalisées au profit des sources d'énergie fossile que l'on pensait plus prometteuses. La consommation accrue des énergies ces dernier temps à cause de développement industriel dans différents pays, a largement augmenté le taux des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution atmosphérique et le réchauffement climatique. De plus la flambée des cours du brut et les risques du nucléaire ont fait prendre conscience de la nécessité d'une organisation de la société qui respecte l'environnement dans lequel nous vivons. (1)

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse. Leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes ; ce sont les énergies de l'avenir. Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. (2)

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable d'où son nom. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants, provoqués principalement par le soleil et la lune. Parmi les énergies renouvelables qui on prit un élan remarquable ces dernière années, le solaire photovoltaïque, et ça grâce aux multiples avantages. (1)

L 'Algérie dispose également d'un important potentiel en énergie solaire et qui n'attend qu'une bonne exploitation. Le grand sud, notamment le Sahara algérien, est caractérisé par de très forts apports solaires avec un gradient de température diurne-nocturne très important. (2)

En dépit de coût de l'installation qui est relativement important, en revanche l'utilisation de certaines applications rentabilisera le coût dans un temps très réduit. Parmi ces applications on trouve le pompage solaire photovoltaïque. Il représente une solution efficace pour l'approvisionnement en eau dans les régions arides où il y a une pénurie d'eau et dans les zones isolées où il y a absence de réseau électrique. Néanmoins les performances d'une installation de pompage photovoltaïque dépendent de la commande appliquée à ce système. (1)

Dans ce travail, on aborde justement la problématique d'approvisionnement d'eau, pour l'irrigation par pompage solaire. Pour ceci, on présume l'existence d'un forage ; et on réalise une étude complète du système de pompage solaire (constituants et dimensionnement). En plus d'une étude économique qui vérifie la rentabilité du système sur 30 ans, tout en comparant avec l'énergie conventionnelle. Pour ce faire, notre travail est partagé en trois chapitres. Dans le premier, on énonce les notions fondamentales de l'énergie solaire et ses principes. Ensuite à travers le second chapitre, on présentera. Enfin, on abordera les calculs et dimensionnement, qui sera appliqué sur un exemple réel. On termine bien sûr par une conclusion générale.

***Chapitre I :***  
***Généralité sur système PV***

## **Chapitre I**

### **Généralité sur système PV**

#### **1.1. Introduction :**

La pluralité des énergies renouvelables s'exprime à deux niveaux. Premièrement, il existe plusieurs sources « inépuisables » ou du moins possédant une capacité de régénération plus rapide que leur utilisation : mouvement terrestre, vent, soleil etc. Certaines d'entre elles sont employées depuis longtemps, à l'instar du bois, d'autres ont été découvertes plus récemment (géothermie, hydrothermie)... Deuxièmement, les possibilités de transformation de ces sources en énergie utile aux activités humaines sont variées (chauffage domestique, réfrigération industrielle, cuisson de la nourriture, électricité alimentant les ordinateurs, les véhicules, carburants etc.). Le terme anglais « renouvelable énergie » reflète également cette diversité, non pas par la marque du pluriel, mais par le caractère indénombrable du mot énergie : l'énergie ne se produit pas ex nihilo, elle ne fait que se transformer, d'où des potentiels multiples, posant des problèmes juridiques distincts.

L'énergie solaire se caractérise par la chaleur et la lumière. La chaleur peut être utilisée directement pour chauffer des bâtiments, de l'eau au moyen de capteurs, pour sécher des fourrages ou dans des installations de climatisation solaire. La chaleur solaire, comme n'importe quel type de chaleur peut aussi être convertie en énergie mécanique puis en électricité dans des centrales électriques thermiques. Le soleil permet également de générer de l'électricité par son rayonnement grâce à l'effet photovoltaïque. Les équipements peuvent néanmoins poser des problèmes de toxicité des matériaux utilisés. Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins. Ils sont très fiables, silencieux et rentables dans les régions éloignées. [5]

Dans ce chapitre, on va donner un aperçu général sur les énergies renouvelables, et précisément sur les systèmes solaires photovoltaïques qui représentent l'actualité des énergies renouvelables.

#### **1.2. La cellule photovoltaïque**

##### **1.2.1. Historique**

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

® 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

® 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

® 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

® 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

® 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

® 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. [1]

### 1.2.2 Principe général

L'effet photovoltaïque, c'est la transformation de l'énergie solaire « photon » en électricité « Volt ». Il a été découvert en 1839, par le physicien français A. BECQUEREL.

Une cellule photovoltaïque est principalement constituée à partir de silicium dopé (semi-conducteur: jonction P-N). Lorsqu'une cellule est exposée au rayonnement électromagnétique solaire, les photons de la lumière transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Cette énergie permet aux électrons de libérer des atomes, générant ainsi des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ces charges sont alors maintenues séparées par un champ électrique qui constitue une « barrière de potentiel ».

Une fois les charges P et N isolées, il suffit de fermer le circuit entre ces 2 zones (P et N) pour mettre en mouvement les électrons et créer ainsi un courant électrique. [2]

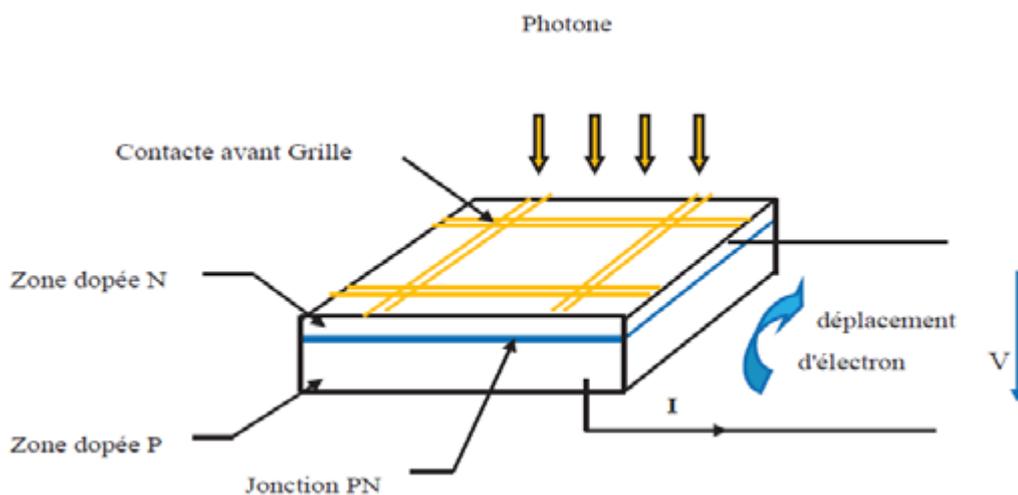


Figure 1. 1 : Schéma d'une cellule photovoltaïque

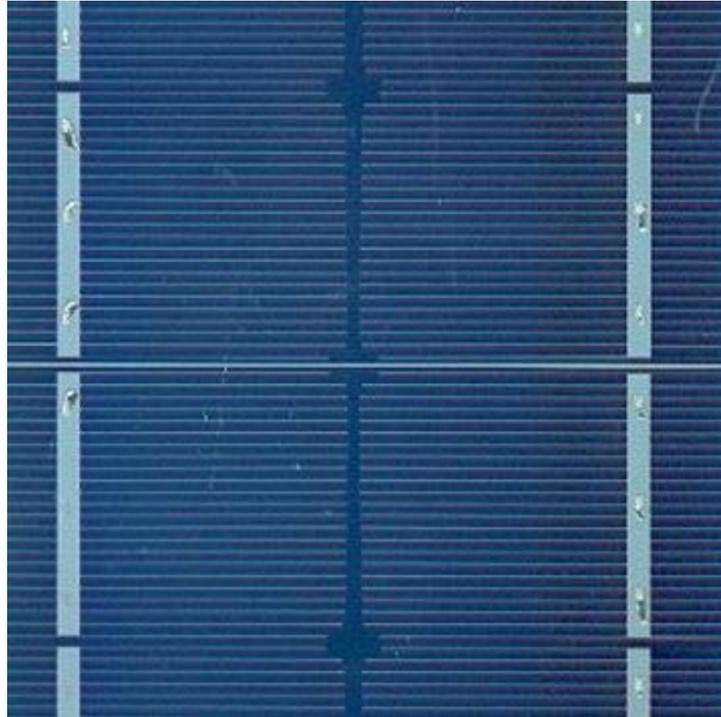
### 1.2.3 Les panneaux solaires :

Un panneau solaire est formé de plusieurs cellules photovoltaïques mises en série pour obtenir la tension désirée. Chaque cellule produit un courant continu dont la puissance dépend de la surface de la cellule. Une cellule délivre une tension de 0,5 Volt. Les différentes cellules sont montées en série pour former des modules qui délivrent des tensions normalisées

## 1.2.4 Les types des panneaux

### 1.2.4.1 Silicium monocristallin :

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes. [4]



*Figure 1. 2* : Cellule PV monocristalline

Avantage:

- ✓ Bon rendement  $Wc/m^2$  (~150  $Wc/m^2$ ), ce qui permet un gain de place si nécessaire.

Inconvénients :

- ✓ Coût élevé.
- ✓ Rendement faible sous un faible éclaircissement.

### 1.2.4.2 Silicium poly cristallin :

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%. [4]



**Figure 1. 3 :** Cellule PV polycristalline

Avantages :

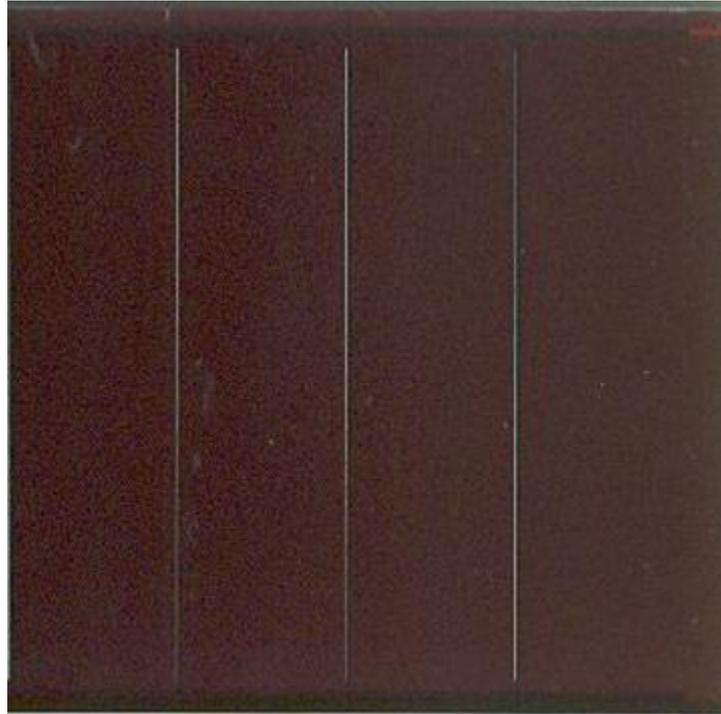
- ✓ Bon rendement de conversion, environ 100 Wc/m<sup>2</sup>
- ✓ Moins cher que le monocristallin.

Inconvénient :

- ✓ Rendement faible sous un faible éclairement

#### **1.2.4.3 Silicium amorphe (a-si) :**

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière. [3]



**Figure 1. 4 :** Cellule photovoltaïque amorphe

Avantages :

- ✓ Fonctionnement avec un éclairage faible.
- ✓ Moins chères que les autres.
- ✓ Possibilité d'intégration sur supports souples ou rigides.

Inconvénients :

- ✓ Rendement faible en plein soleil.
- ✓ Un rendement  $Wc/m^2$  plus faible ( $\sim 60 Wc/m^2$ ), ce qui nécessite de couvrir des surfaces plus importantes

#### **1.2.4.4.Cellule Tandem :**

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbantes dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines

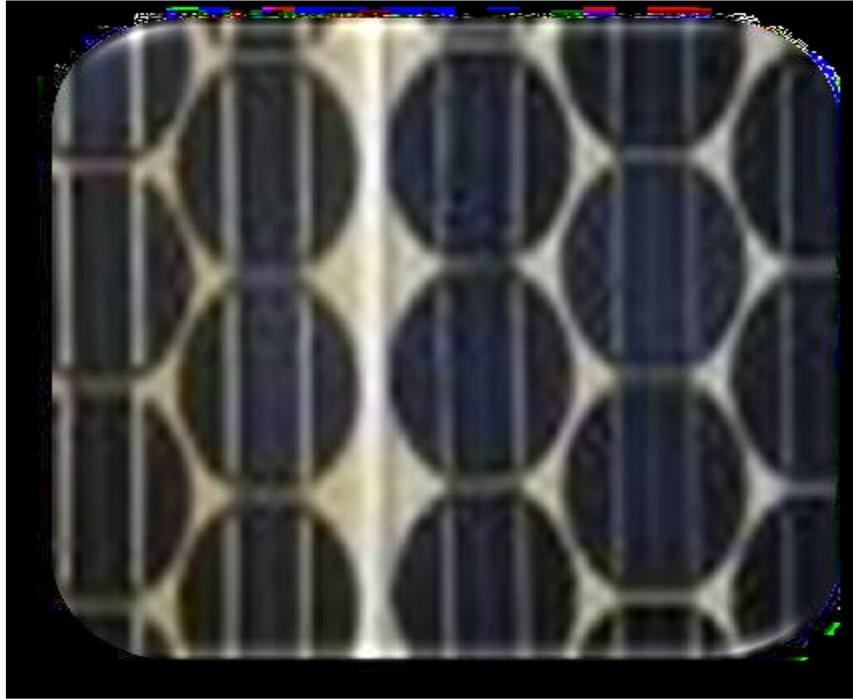


Figure 1. 5 : Cellule tandem

#### 1.2.4.5 Cellule multi-jonction :

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. D'un autre côté, en deçà de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie véhiculé par le photon est perdu. D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible, de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire

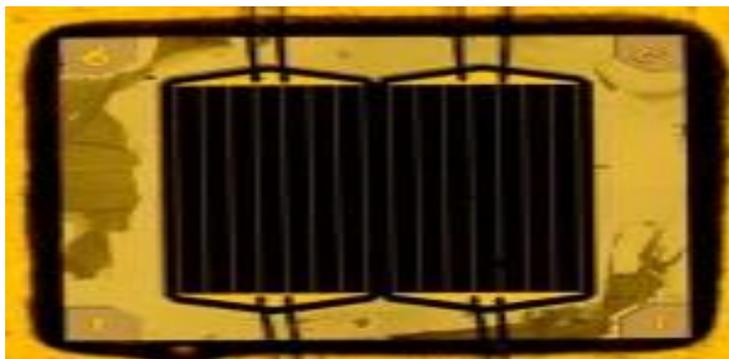


Figure 1. 6 : multi-jonction

### I.3 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

#### I.3.1. Avantages

Les avantages de l'électricité solaire photovoltaïque sont multiples :

- ✓ La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.

- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- ✓ L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse.
- ✓ La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- ✓ L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- ✓ Modulaires, ses composants se prêtent à une utilisation innovante et esthétique en matière d'intégration architecturale (implantés sur ou en éléments de toiture ou de façade, sous forme de brise-soleil, en verrière...)
- ✓ L'électricité solaire photovoltaïque a pour qualité sa fiabilité, la durée de vie des capteurs supérieure à 25 ans, son autonomie, son faible impact sur l'environnement.
- ✓ Technologie encore émergente, son coût lui permet d'être souvent compétitive par rapport aux solutions classiques dans les sites éloignés du réseau électrique ne demandant pas de très grosse quantité d'électricité fournie, ou dans des sites urbains lorsqu'elle évite des coûts de raccordement au réseau électrique public .
- ✓ Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible, car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.

### **1.3.2. Inconvénients**

- ✓ Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- ✓ Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé.
- ✓ S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- ✓ Le rendement électrique diminue avec le temps (20 % de moins au bout de 20 ans).
- ✓ Pollution à la fabrication

### **1.4 CONCLUSION :**

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié la source de production photovoltaïque, la modélisation et la simulation, et effectué nous permet de bien comprendre le principe de fonctionnement du système photovoltaïque, ainsi que les différentes technologies utilisées afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion. Aussi les différentes applications de ce système. Dans le chapitre suivant nous donnerons une vision aux différents systèmes d'énergie photovoltaïque dans le domaine du pompage.

***Chapitre II :***  
***Le pompage photovoltaïque***

**Chapitre 2 :*****Le pompage photovoltaïque*****2.1 Introduction :**

Dans nos jours, la demande d'eau est de plus en plus très importante, en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile voir pratiquement impossible. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie. La réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome, fiable et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier, dans les régions désertiques. En effet, un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est facile à installer, avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service. Ce chapitre traite plus particulièrement les éléments théoriques permettant de dimensionner les stations de pompage courantes.

**2.2 Méthodes de pompages :**

Pour pomper l'eau avec un système photovoltaïque, deux techniques sont possibles :

Dans la première technique, l'énergie solaire est consommée en « temps réel » ; On parle alors d'un « pompage au fil du soleil ». Cette solution nécessite un stockage de l'eau dans un réservoir (l'eau pompée pendant la journée est stockée afin d'être utilisée plus tard, le soir par exemple).

La deuxième méthode consiste à utiliser un stockage de l'énergie, cette fois-ci, via des batteries. L'énergie stockée la journée peut être utilisée plus tard pour pomper l'eau [7].

**2.2.1 Pompage « au fil du soleil »**

Comme on va le constater, la méthode de pompage « au fil du soleil » permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système utilisant des batteries pour stocker de l'énergie d'abord. En effet, dans cette première technique, c'est l'eau elle-même qui est pompée et stockée lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement. On parle alors d'un stockage hydraulique. L'eau est stockée dans un réservoir à une hauteur au-dessus du sol pour qu'elle soit, au besoin ensuite, distribuée par gravité. Il faut bien signaler ici que le réservoir d'eau peut souvent être construit localement. En plus, il ne requiert pas un entretien complexe et peut être réparé localement. La capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours selon les modèles.

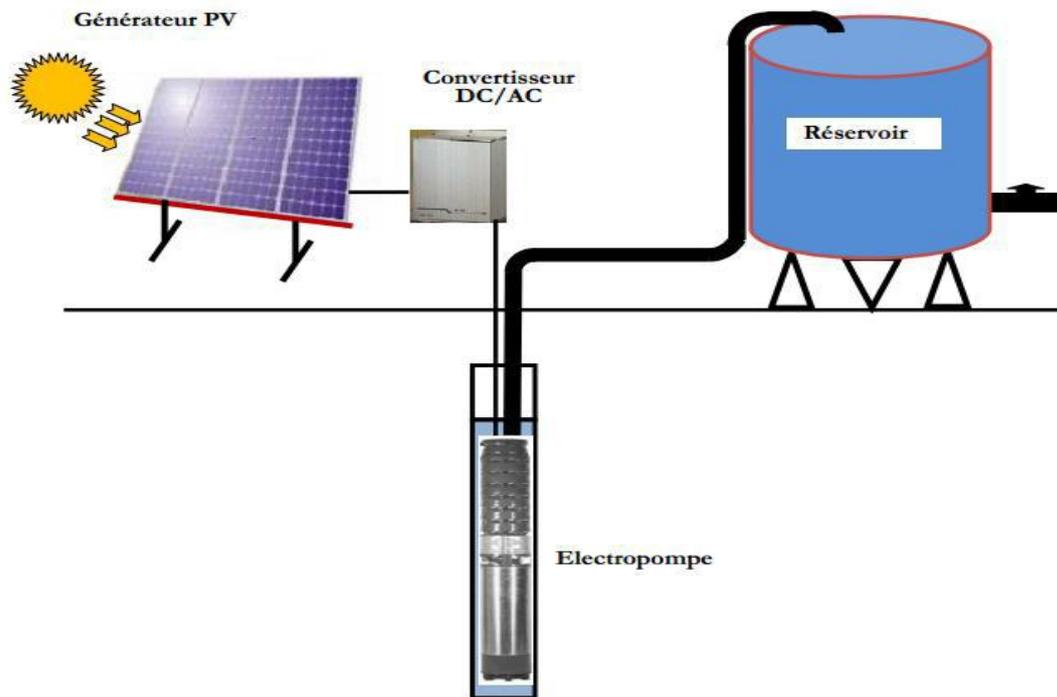


Figure 2. 1 : Schéma synoptique simplifié de Pompage PV

### 2.2.2 Pompage avec batteries

La méthode de pompage d'eau en utilisant l'énergie stockée sur des batteries peut avoir l'avantage de garantir une stabilité d'alimentation des équipements (système présente l'avantage d'un débit régulier, la possibilité de pomper lorsque le soleil est absent). L'énergie emmagasinée peut être utilisée aussi pour d'autres besoins ultérieurs. L'inconvénient majeur, voire handicapant, de cette technique est qu'elle comporte plusieurs composants qui influent négativement sur la fiabilité et le coût global du système. En effet, les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent, en outre, un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30 % de la production d'énergie.

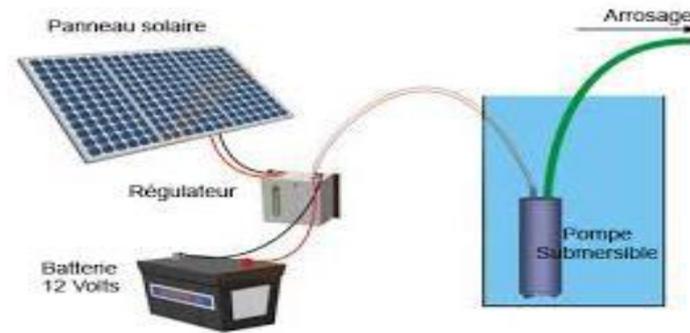


Figure 2. 2 : Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie.

### 2.3 Notions hydrauliques :

Les stations de pompage sont constituées d'une ou plusieurs pompes qui aspirent des volumes d'eau et les refoulent sous une certaine pression dans les canalisations du réseau. Les paramètres nécessaires pour dimensionner la pompe solaire sont le débit d'exploitation et la hauteur à laquelle la pompe devra refouler. Celle-ci est majorée par des pertes de charges et de la pression de refoulement dans la conduite [8].

#### 2.3.1 Le débit Q :

Le débit fourni par une pompe est la quantité d'eau qu'elle refoule durant un intervalle de temps donné. En pompage solaire, le débit est souvent exprimé en m<sup>3</sup> par heure.

#### 2.3.2 La hauteur manométrique totale H<sub>m</sub> :

C'est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur peut être calculée comme suit :

$$H_m = H_g + H_c \quad (2.1)$$

Avec :

**H<sub>g</sub>**: Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation (voir Figure 2.1).

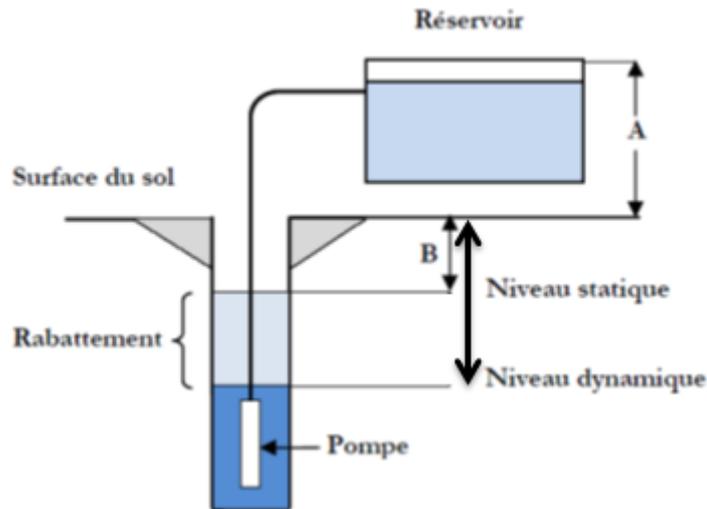


Figure 2. 3 : Hauteur manométrique total

$P_c$  : Pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Elles s'expriment en mètres d'eau et elles sont fonction de la distance des conduites ( $D$ ), de leur diamètre et du débit de la pompe.

Le niveau statique  $N_s$ : Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance entre le sol et la surface de l'eau avant pompage.

Le niveau dynamique  $N_d$ : Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance entre le sol et la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen.

**Rabatement** : La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique.

**Rabatement maximal** : est le rabatement maximal acceptable avant de démarrer la pompe

**Rabatement minimal** : est le rabatement maximal acceptable avant de stopper la pompe.

## 2.4 Commande MPPT

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de Publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application

### 2.4.1 Principe Recherche du point de puissance maximale (MPPT) :

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT).

Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale.

La figure (IV.11) représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. La commande MPPT est associée à un convertisseur statique permettant de faire une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge. (9)

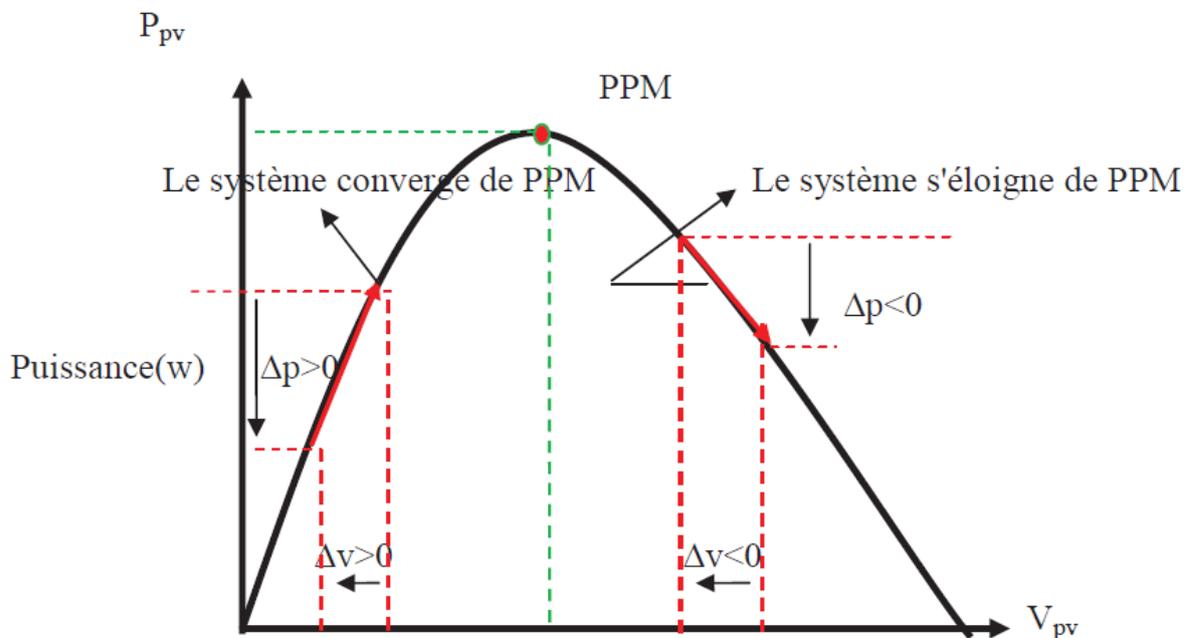


Figure 2. 4 : Schéma de convergence vers le PPM

### 2.5 Les composants d'un système de pompage PV :

Un système de pompage solaire est généralement constitué de [10]:

- ✓ le générateur photovoltaïque,
- ✓ le groupe électropompe,
- ✓ l'électronique de commande et de contrôle,
- ✓ la partie stockage,

### 2.5.1 Le générateur photovoltaïque :

Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. Dans certaines applications, il est possible d'utiliser un ou plusieurs modules de quelques dizaines de cellules. Pour des utilisations plus importantes, les générateurs PV sont groupés dans un champ de plusieurs modules. La courbe de fonctionnement I-V d'une association série-parallèle de modules solaires aura une évolution de fonctionnement semblable à la courbe de la cellule de base, mais en modifiant les échelles sur les deux axes. Les performances d'un générateur PV sont déterminées à partir de ces courbes.

En utilisant l'équation ci-dessous, pour un groupement mixte formé à partir d'un nombre  $N_s$  module en série et  $N_p$  module en parallèle [11] :

$$I = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_0 \left[ \exp \left( \frac{N_s \cdot V + \frac{I \cdot N_s \cdot R_s}{N_p}}{\eta \cdot N_s \cdot V_T} \right) - 1 \right] + \frac{N_s \cdot V + \frac{I \cdot N_s \cdot R_s}{N_p}}{\frac{N_s \cdot R_p}{N_p}} \quad (2.2)$$

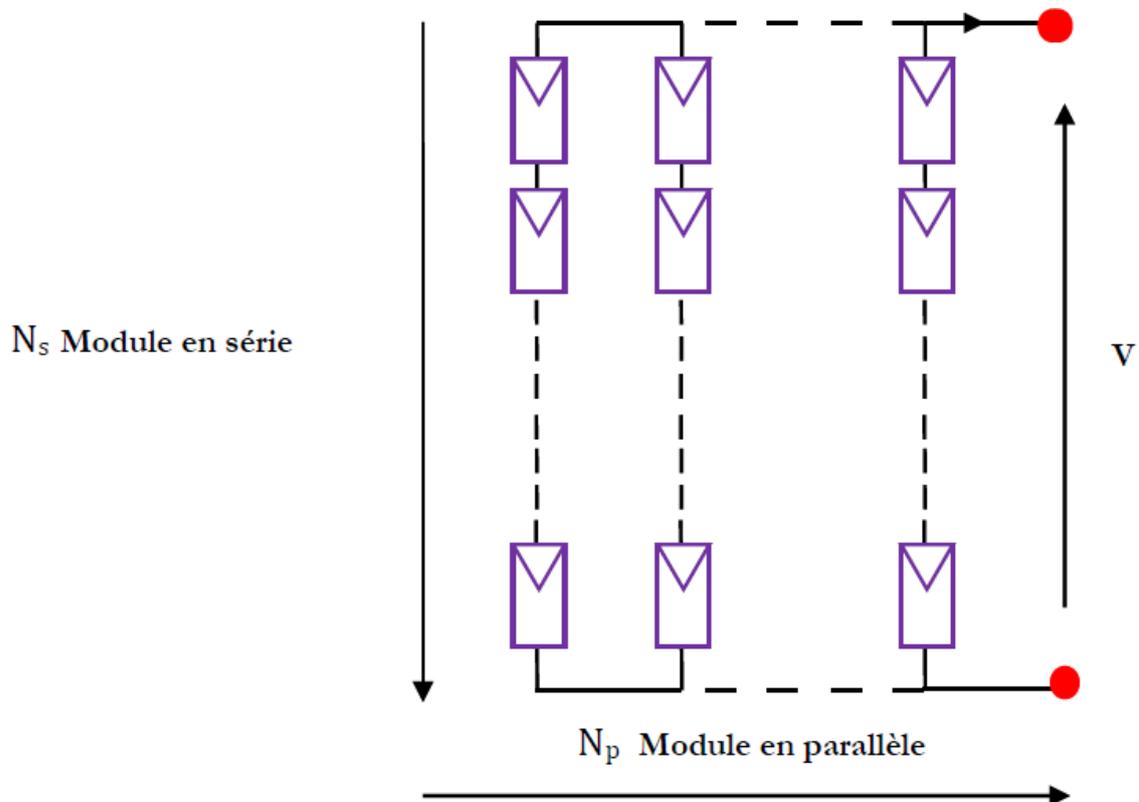


Figure 2. 5 : Groupement de  $N_s$  module en série et  $N_p$  en parallèle

## 2.5.2 Le groupe électropompe

### 2. 5.2.1 Pompes

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement : elles sont soit de type volumétrique ou bien de type centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : pompe à aspiration et pompe à refoulement.

### 2.5.2.2 Pompe centrifuge :

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres).

#### ▪ 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.

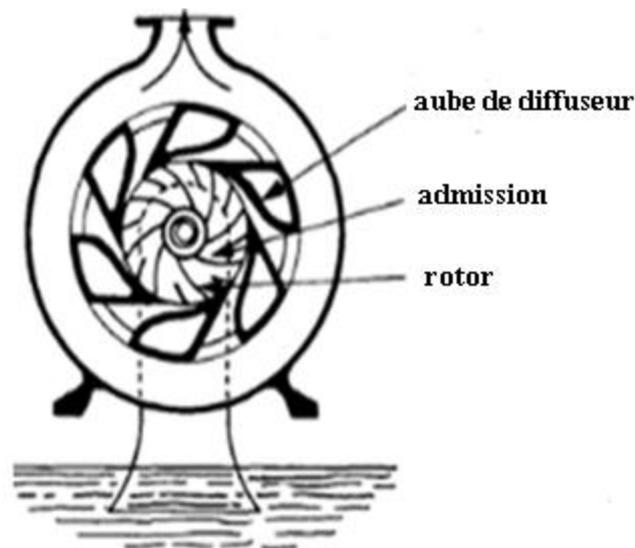
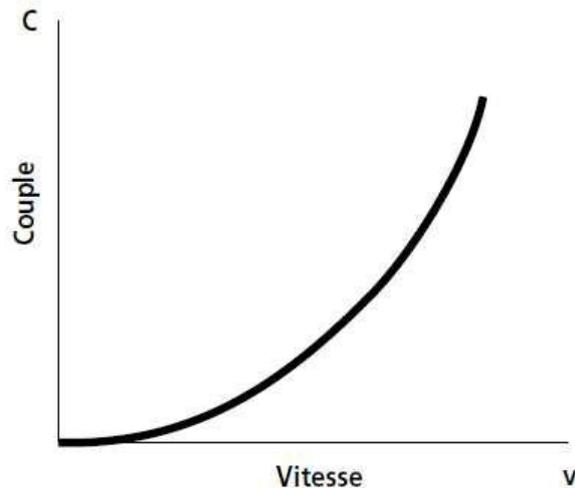
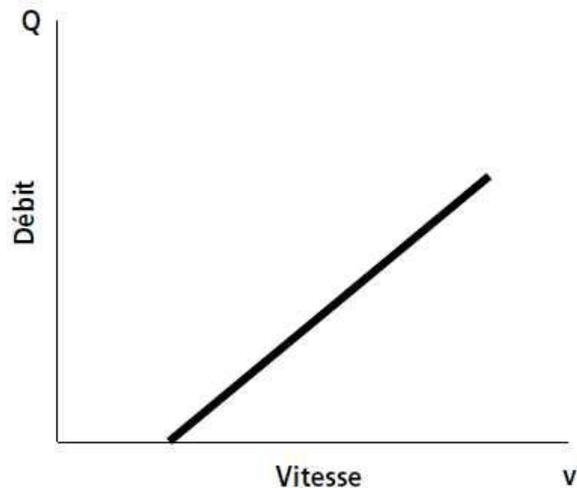


Figure 2. 6 : Illustration d'une centrifuge à turbine.

- **Caractéristiques d'une pompe centrifuge:**



**Figure 2. 7 :** Le couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse



**Figure 2. 8 :** Le débit est proportionnel à la vitesse, toutefois il faut une vitesse minimale

### 2.5.2.3 Pompe volumétrique :

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.

Le couple de démarrage est pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la  $H_m$  (3 à 5 fois le couple nominale). La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau inférieure à  $5\text{m}^3/\text{h}$ .

- **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 l'exécution d'un mouvement cyclique, 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. La particularité des pompes volumétriques c'est leur étanchéité est ça grâce à une séparation interne entre l'orifice d'admission et l'orifice de refoulement ce qui permet de prévoir le débit d'une pompe volumétrique avec exactitude [Ait 11], [Mec 12]. (12)

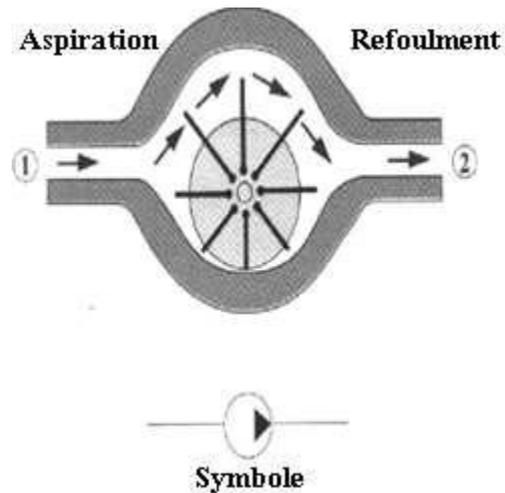


Figure 2. 9 : Pompe volumétrique rotative à palette.

- **Caractéristiques d'une pompe volumétrique [Mok 11] :**

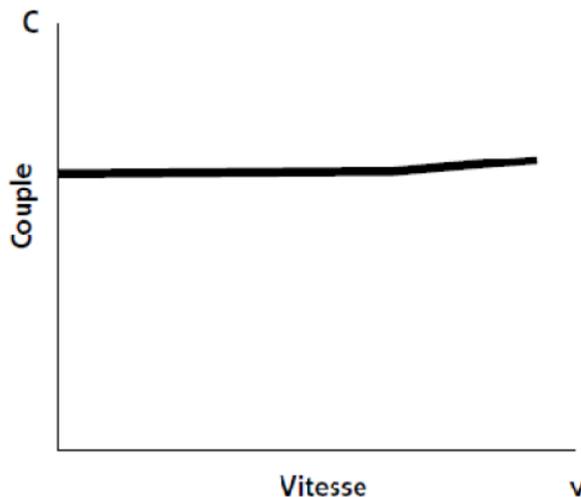


Figure 2. 10 : Le couple est pratiquement constant en fonction de la vitesse

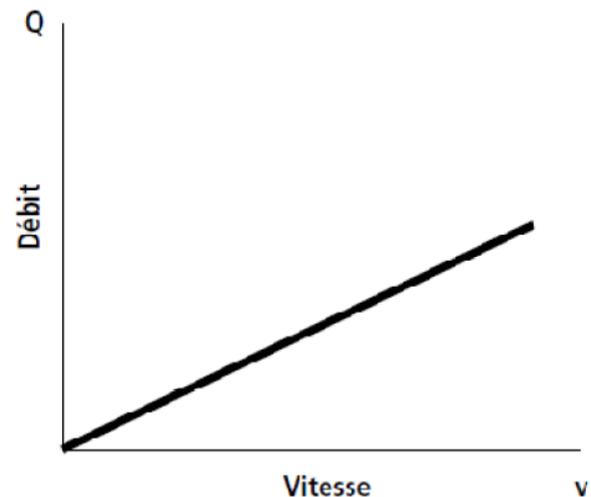


Figure 2. 11 : Le débit est proportionnel à la Vitesse

### 2.5.3 Les moteurs électriques

Un moteur électrique est un dispositif électromécanique permettant la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique. La plupart des machines électriques fonctionnent grâce au magnétisme, il existe deux types de moteurs : à courants continu et alternatif [13].

- **Moteur à courant continu avec balais :** les moteurs à courant continu utilisés pour des applications de pompage solaire sont les moteurs série, avoir un couple de démarrage suffisant pour vaincre la résistance de démarrage d'une pompe et bien répondre à un courant variable. Le couplage est direct ou avec optimisation du

générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandé par son rapport cyclique (Figure 3.4). L'installation ainsi définie nécessite une électronique relativement simple mais présente l'inconvénient du moteur à courant continu qui demande un entretien régulier. Les balais doivent être changés périodiquement. Ceci est particulièrement problématique dans le cas des pompes à moteur immergé où la pompe doit être retirée du forage pour changer les balais, il est utilisé particulièrement pour le pompage dans les puits ouverts.

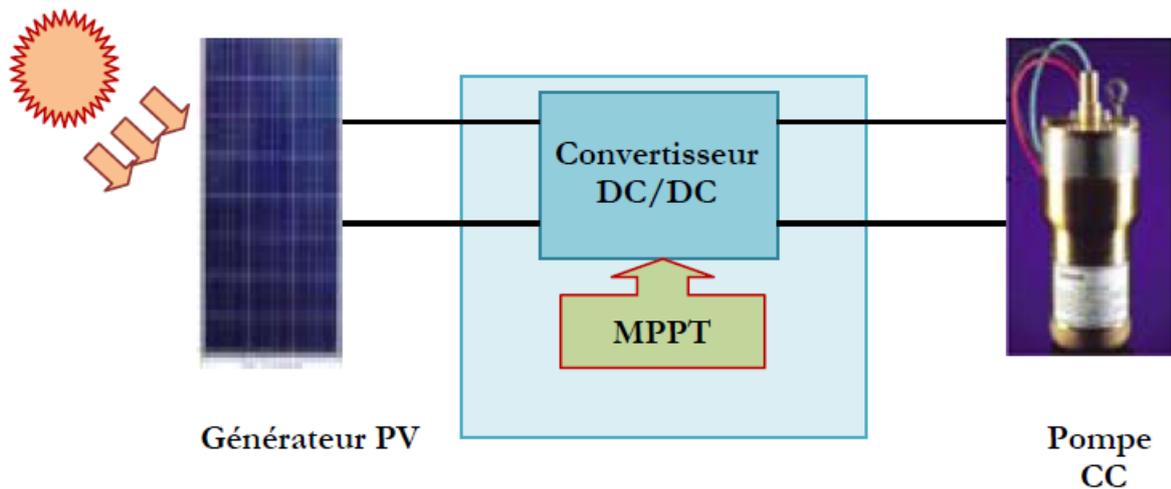


Figure 2. 12 : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC

- **Moteur à courant continu, sans balais (Brushless) :** Ce type de moteur électrique comporte non seulement les avantages des moteurs à courant continu mais également ceux des moteurs à courant alternatif : fort couple au démarrage et durée de vie élevée (due à l'absence des paliers et des balais) mais leur utilisation reste limitée à des faibles puissances.

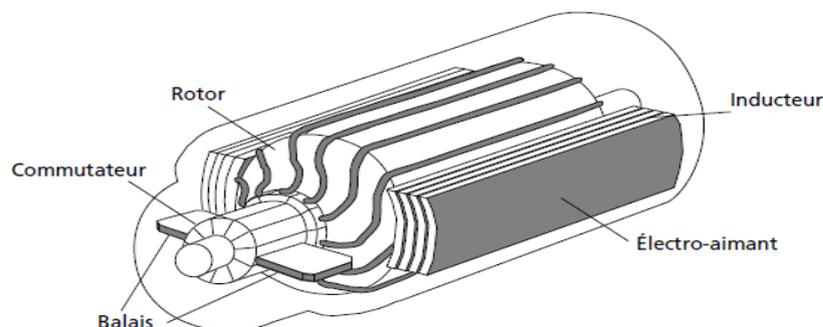


Figure 2. 13 : Moteur à courant continu avec balais.

- **Moteur à courant alternatif :** Les moteurs alternatifs asynchrones (rotor à cage) sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. Par exemple, les pompes sur réseau utilisent depuis longtemps ce type de moteur. Il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. L'arrivée d'onduleurs efficaces a permis l'utilisation de ce type de moteurs dans les applications de pompage solaire. L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé) plus robuste et moins cher (aussi faible besoin de maintenance) devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur PV (voir figure 2.5).

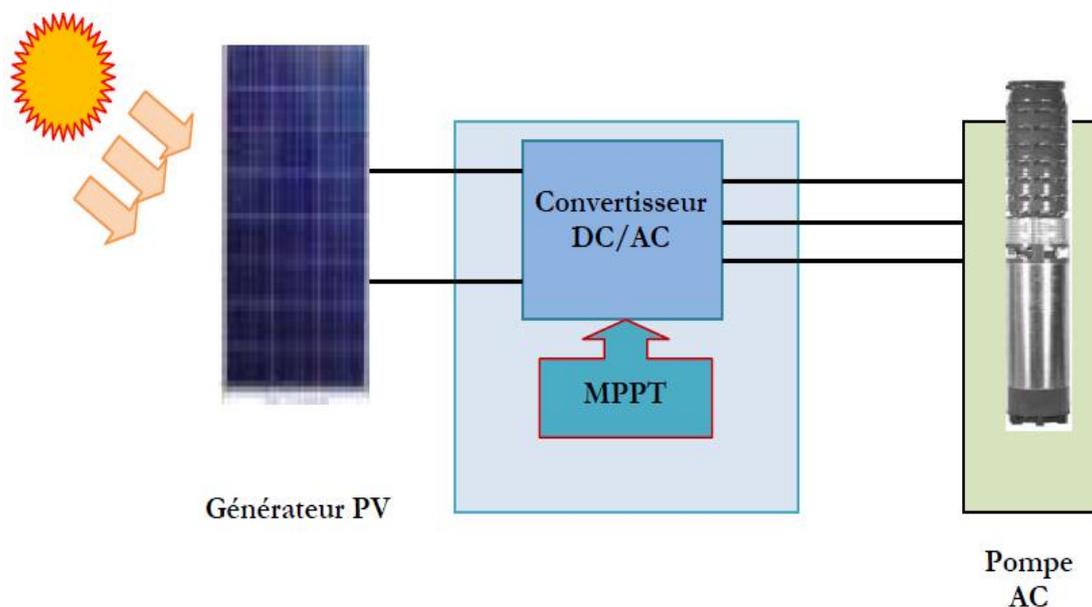


Figure 2. 14 : Diagramme du pompage PV par motopompe à AC

### 2.5.3. L'électronique de commande et de contrôle

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

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge (pompe alimentée par moteur à courant continu), la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge comme décrit dans la figure 2.4. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle commandé par son rapport cyclique, le

transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible.

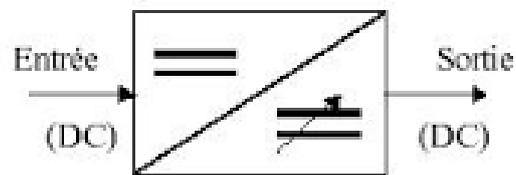


Figure 2. 15 : Conversion DC / DC.

▪ **Le convertisseur DC/AC (onduleur) :**

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par les panneaux solaires en un courant alternatif triphasé pour actionner le groupe moteur pompe. L'onduleur fonctionne évidemment avec un circuit de génération des signaux PWM commandé par un circuit de régulation et de protection. Le convertisseur DC/AC assure le transfert optimal de puissance du générateur solaire vers le groupe moteur pompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits. Le rendement de l'onduleur est généralement élevé pour valoriser au mieux l'énergie produite par le générateur. Il est de l'ordre de 95 % au point de fonctionnement nominal.

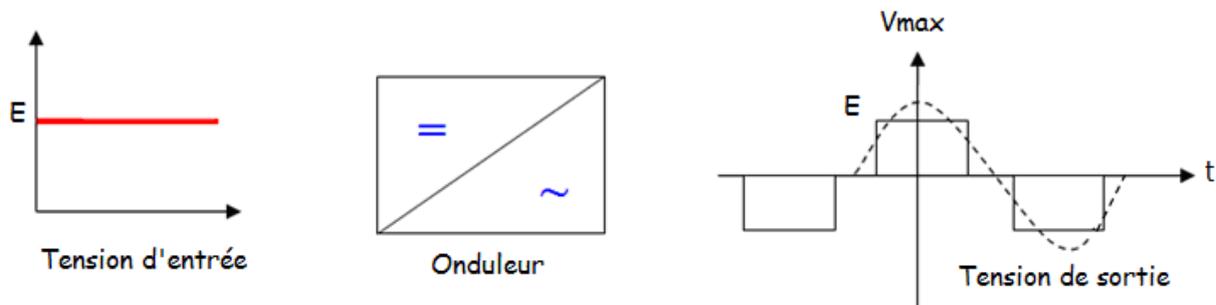


Figure 2. 16 : Conversion DC / AC.

### 2 .5.4 La partie stockage

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles.

Aussi, le système de stockage avec batterie génère un coût additionnel, des problèmes de maintenance de la batterie et de l'obligation de la remplacer après 3 à 5 ans d'usage. De plus,

le rendement énergétique est meilleur quand il n'y a pas d'accumulateurs. Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement.

## **2.6 Dimensionnement complet de l'installation**

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.

### **2.6.1 Estimations des besoins en eau**

Pour une région saharienne, les besoins en eau peuvent être définis en utilisant les valeurs du tableau suivant [10]:

<b>Humains</b>
Par personne 5 à 10 litres/jour minimum
Conditions de vie normale 30 litres/jour
<b>Animaux</b>
Moutons et chèvres 5 litres/jours
Cheval 40 litres/jour
Ane 20 litres/jour
Chameau 20 litres/jour
<b>Irrigation</b>
Agriculture maraichère 60m <sup>3</sup> /hectare/jour
Riz 100 m <sup>3</sup> /hectare/jour
Sucre de canne 65 m <sup>3</sup> /hectare/jour
Coton 55 m <sup>3</sup> /hectare/jour

*Tableau 2. 1: Diagramme d'estimation des besoins en eau.*

### 2.6.2 Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise

Une fois les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits sont définis, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire à partir de la relation [10] :

$$E_h = C_h \cdot Q \cdot H_{MT} \quad (2.3)$$

Avec :

$E_h$  : Énergie hydraulique [kwh/J]

$C_h$  : Constante hydraulique [kg. s. h/m<sup>2</sup>]

$Q$  : Volume d'eau [ $\text{m}^3/\text{Jour}$ ]

$H_{MP}$  : Hauteur manométrique total [m]

Où :

$$C_h = g \cdot \rho / 3600$$

$g$  : La gravité terrestre [ $9.81\text{m/s}^2$ ]

$\rho$  : Densité de l'eau ( $1000\text{kg/m}^3$ )

▪ **Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise :**

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur

Donnée pendant une journée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$E_e = E_h / (\eta_{MP} \times \eta_{Conv}) \quad (2.4)$$

Où :

$E_e$  : Energie électrique exprimé en [ kwh/J]

$\eta_{MP}$  : Le rendement du groupe motopompe, en général entre 30% et 60%.

$\eta_{Conv}$  : Le rendement d'onduleur.

### 2.6.3 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 à l'inclinaison  $\beta$  des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal. Ce dernier doit se faire de manière à optimiser la conversion de l'énergie solaire en électrique.

## 2.7 Taille du générateur photovoltaïque

Deux méthodes sont utilisées pour le dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque : une méthode analytique et une méthode graphique. Ces méthodes permettent de dimensionner une installation de pompage photovoltaïque pour satisfaire les besoins en eau d'une consommation bien déterminée.

### 2.7.1 Méthode analytique

Une fois connus le volume journalier  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{jour}$ ], la hauteur manométrique totale  $H_{MT}$  et l'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan du générateur, la puissance nominale correspondante du générateur photovoltaïque  $P_c$  est calculée par l'expression suivante [14] :

La puissance fournie par le générateur PV dans les conditions standards de mesure CSM, (éclairage de [ $1000\text{w/m}^2$ ] et la température  $25^\circ\text{C}$ ).

$$P_C = \eta_g \cdot A \cdot G \quad (2.5)$$

Avec :

$P_C$  : La puissance de sortie du générateur (w) sous CSM (puissance crête).

$\eta_g$  : Le rendement du générateur à la température de référence (25°C).

$A$  : La surface active du générateur (m2).

$G$  : L'éclairement solaire.

L'énergie électrique journalière est donnée par l'équation :

$$E_e = \eta_{PV} \cdot A \cdot G_d (\beta) \quad (2.6)$$

Où :

$\eta_{PV}$  : Le rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation

$G_d (\beta)$  : L'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à L'inclinaison  $\beta$  [kWh/m2/j].

Le rendement  $\eta_{PV}$  est calculé par la formule suivante :

$$\eta_{PV} = F_m [1 - \gamma(T - T_r)] \eta_g \quad (2.7)$$

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 maximale.

$\gamma$  : Coefficient de température des cellules.  $\gamma$  prend des valeurs entre 0,004 et 0,005 /°C pour des modules au silicium mono et poly cristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

$T$  : Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement

▪ **Calcul de la puissance, en watts crêtes, que doit avoir le champ.**

En substituant les équations (2.5), (2.7) et (2.8) dans (2.6), nous obtenons la puissance crête du générateur :

$$P_C = \frac{G}{F_m [1 - \gamma(T - T_r)] G_d (\beta)} \cdot \frac{E_h}{\eta_{MP} \times \eta_{con}} \quad (2.8)$$

### 2.7.2 Méthode graphique

Le calcul de la puissance du générateur photovoltaïque peut être effectuée de deux manières : soit par des expressions analytiques comme celle donnée ci-dessus, ou bien en utilisant les abaques de rendement des pompes fournis par le constructeur qui donne en fonction de l'irradiation globale la puissance nécessaire développée  $P_c$  par les panneaux pour faire fonctionner la pompe dans cette gamme de débit, et de  $H_{MT}$ . Ces dernières sont assez pratiques (voir Figure 2.5) et résument les performances des différentes pompes en fonction des conditions de leur utilisation [15].

Les abaques :

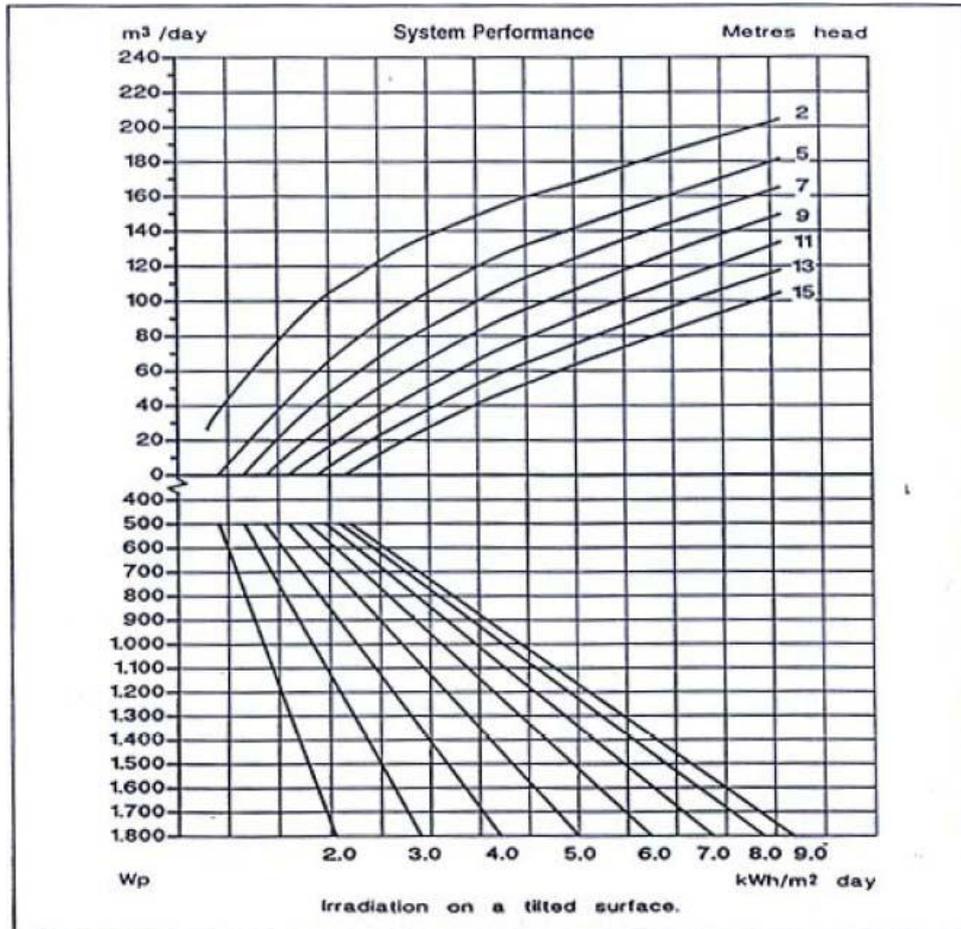


Figure 2.17 : Courbe typique des performances d'une pompe en conditions d'utilisation.

Ce sont des graphiques à lecture directe facilitant les calculs numériques. Graphiques servant à déterminer spontanément des résultats obtenus par des calculs dans un système de lignes prédéfinies et préparées d'avance. Les abaques s'exploitent par une lecture directe sans avoir à effectuer de tracés complémentaires en lisant directement les données se situant à l'intersection des droites correspondante par la lecture du point concourant en relation avec les besoins de l'intervenant.

Les constructeurs d'équipement élaborent de tels diagrammes sur la base des données calculées ou mesurées. Ce genre de graphes donne la configuration possible d'une électropompe. A titre d'exemple, la figure 2.6 montre les caractéristiques de l'électropompe SP14A-3 donnée par le constructeur GRANDFOS.

**2.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, deux techniques de pompage PV ont été présentées : pompage au fil de soleil et pompage avec batterie. Nous avons montré l'intérêt du pompage dit « au fil du soleil ». Nous avons également pu conclure que les systèmes de pompage photovoltaïque les plus courants, selon l'état de l'art actuel, sont constitués d'une pompe centrifuge menue d'un moteur à induction triphasé. Le moteur est alimenté par un générateur photovoltaïque sans batteries, via un onduleur triphasé à fréquence variable conçu spécifiquement pour cette application. Nous avons aussi donné les définitions importantes et nécessaires pour la compréhension de l'étude pratique présentée au chapitre suivant.

***Chapitre 3:***  
***Application d'un système de***  
***pompage PV sur le site***  
***d'Ouargl***

**Chapitre 3 :**

***Application d'un système de pompage PV sur le site d'Ouargla***

**3.1 Introduction**

Dans la partie précédente de ce travail, nous avons bien détaillé l'étude et le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque. Il est alors intéressant d'appliquer les techniques étudiées sur un site réel pour valider la méthode choisie et de tirer des conclusions.

Pour cette étude pratique, nous avons choisi la vallée de la wilaya d'Ouargla. Ouargla est une ville au sud-est Algérien. Elle est caractérisée par un climat saharien, une énergie d'ensoleillement de plus de 5 kWh/m<sup>2</sup> par jour et des ressources importantes d'eau souterraine [1].

Dans ce chapitre, nous étudions le dimensionnement d'un système de pompage PV fonctionnant par la méthode dite « au fil de soleil ». Le stockage de l'eau est réalisé par le biais d'un réservoir afin d'irriguer une surface d'un hectare de palmiers. Pour effectuer et présenter les calculs, nous avons utilisé Microsoft Excel.

**3.2 Présentation de la région :**

La région d'Ouargla couvre une superficie de 163,233 km<sup>2</sup>, pour une population de 557,500 habitants, elle est limitée :

- Au Nord par la wilaya de Djelfa et la wilaya d'El-Oued,
- Au Sud par la wilaya de Tamanrasset et la wilaya d'Illizi,
- A l'Est par la frontière tunisienne,
- A l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa.

Ouargla se situe au Sud-est du pays (Algérie) (figure 3) dans une cuvette, au fond de la basse vallée de l'Oued Mya, à environ 800 km au sud de la capitale Alger. La ville de Ouargla se caractérise par :

- Altitude : 164 m,
- Latitude : 31°57 N,
- Longitude : 5°19 E. [16]

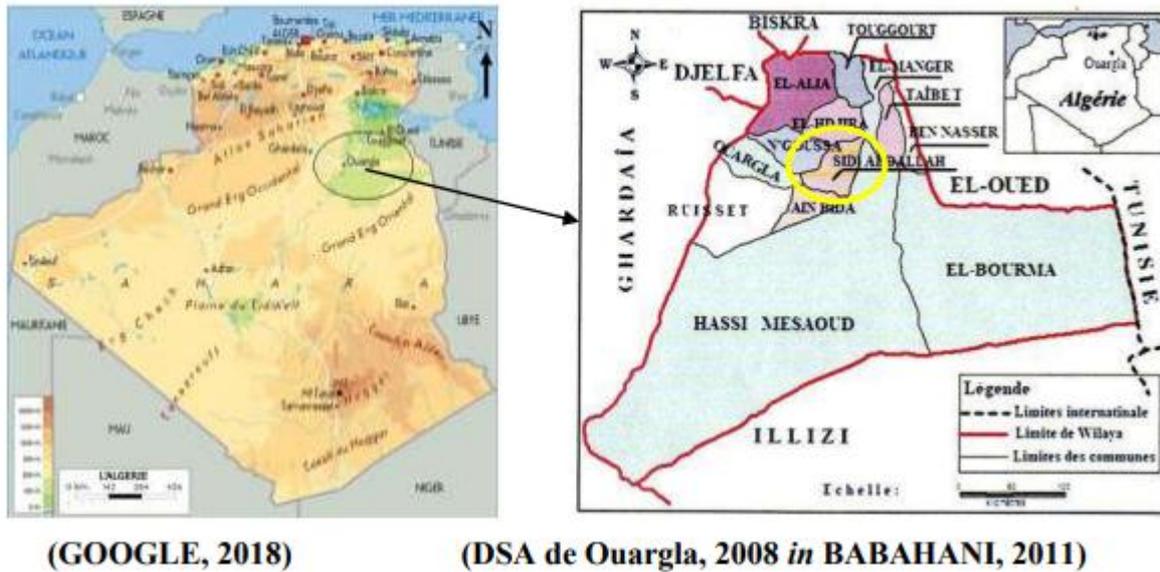


Figure 3. 1: Situation géographique de la région d'étude.

### 3.3 Milieu physique :

#### 3.3.1 Climatologie

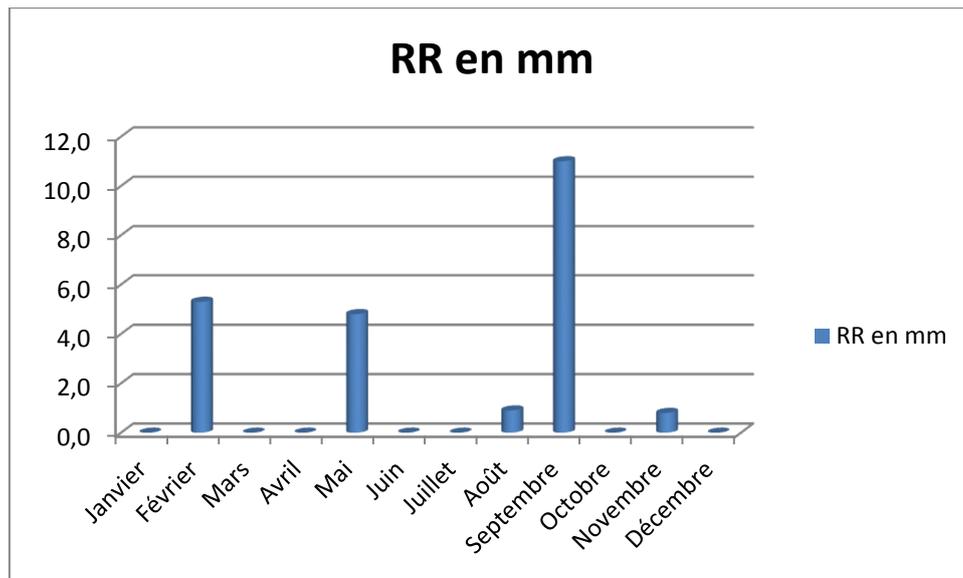
La région de Ouargla est caractérisée par un climat de type saharien avec des températures élevées, une faible pluviométrie et une forte évaporation.

##### 3.3.1.1 Pluviométrie

Les précipitations moyennes annuelles sont de 43 mm. Janvier est le mois le plus pluvieux avec 9 mm. Le mois d'août est le plus sec de l'année avec moins de 1 mm (figure3.2). (17)

Tableau 3. 1 : Répartition mensuelle des pluies à Ouargla l'année 2018

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
Répartition des pluies (mm)	0.0	5.3	0.0	0.0	4.8	0.0	0.0	0.9	11.0	0.0	0.8	0



**Figure 3. 2:** Répartition mensuelle des pluies à Ouargla l’année 2018

**3.3.1.2 Températures**

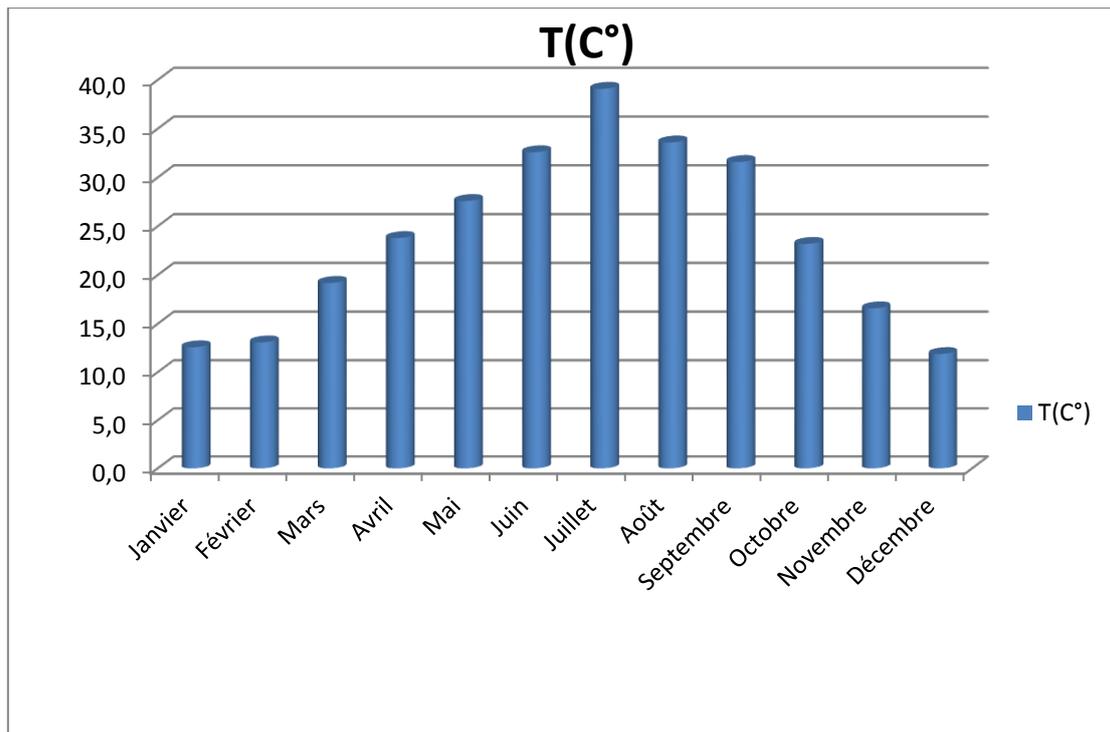
Les températures sont de type saharien. La moyenne mensuelle du mois le plus chaud est

De 36°C (mois de juillet). Janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de

11.4°C (figure 3.3). (17)

**Tableau 3. 2 :** Température moyenne mensuelle à Ouargla l’année 2018

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
Température (°C)	12,6	13,1	19,2	23,8	27,6	32,6	39,1	33,6	31,6	23,2	16,6	11,9



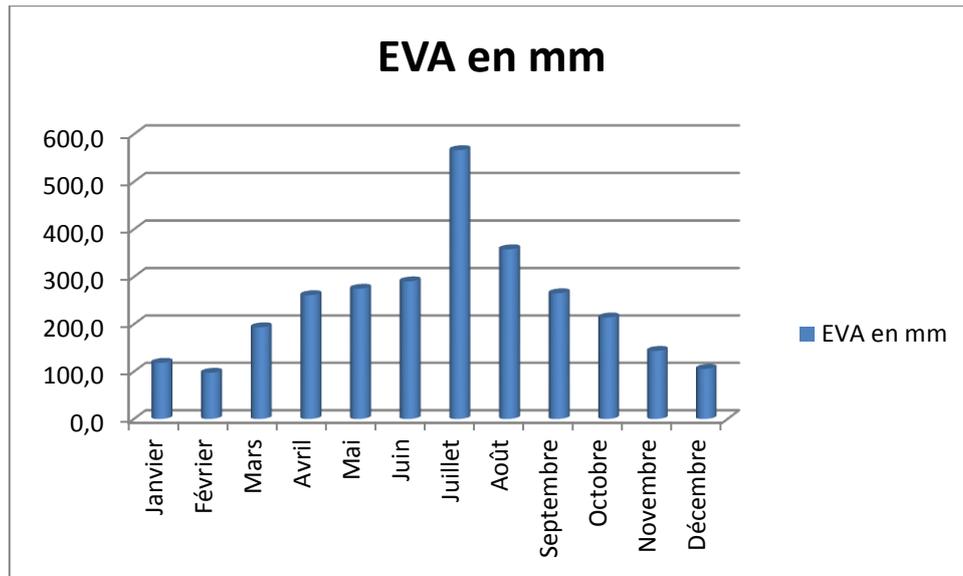
**Figure 3. 3:** Température moyenne mensuelle à Ouargla l’année 2018

**3.3.1.3 Evapotranspiration**

L'évaporation est très élevée sur la vallée de Ouargla. En effet, elle est de 110 mm en moyenne sur le mois de janvier et de 350 mm sur le mois de juillet, soit une valeur moyenne annuelle de d'environ 2100 mm (Figure 3.4). (17)

**Tableau 3. 3:** Evaporation mensuelle moyenne à Ouargla l’année 2018

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
Evapora- -tion (mm)	118. 6	97.5	193. 6	261. 4	275.	290.6	566. 6	358. 1	265. 4	214. 3	143. 7	105. 6



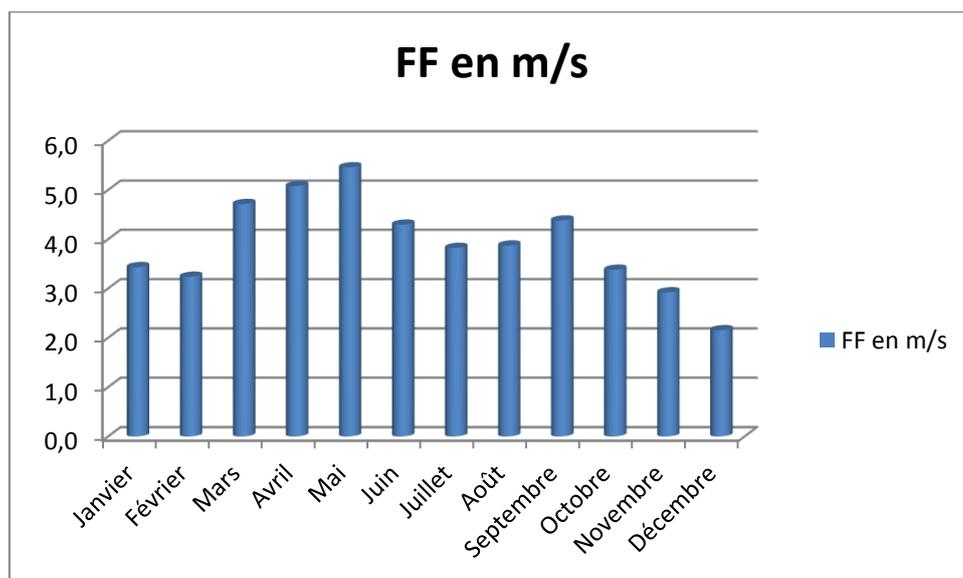
**Figure 3. 4:** Evaporation mensuelle moyenne à Ouargla l'année 2018

### 3.3.1.4 Vents

Les vents ont une vitesse moyenne de 3,6 m/s (tableau 3.4). Cette vitesse est plus élevée pendant l'été (juin, juillet et août) avec plus de 4.2 m/s. Elle est cependant moins élevée durant les mois d'hiver avec une vitesse moyenne de 2,9 m/s. La direction dominante des vents est Sud-Nord.(17)

**Tableau 3. 4:** Vitesse moyenne mensuelle des vents à Ouargla l'année

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
Vent (m/s)	3.4	3.2	4.7	5.1	5.5	4.3	3.8	3.9	4.4	3.4	2.9	2.2



**Figure 3. 5:** Vitesse moyenne mensuelle des vents à Ouargla l'année 2018

### **3.4 Les ressources hydriques :**

Les eaux souterraines représentent la principale source d'eau dans la région de Ouargla, elles sont constituées de nappes aquifères différentes dont la profondeur varie entre 13-1580m.

#### **3.4.1. la nappe Phréatique :**

Sa profondeur varie entre 13 et 20 m selon les saisons, parfois elle affleure à la surface (remontée de la nappe).

#### **3.4.2. la nappe de Miopliocène :**

Sa profondeur varie entre 29-192 m. Les eaux de cette nappe ont une température variant entre 23° et 25° et une salinité de 1,8 - 4,5g/l, elle s'écoule de Sud-Sud-Ouest vers Nord-Nord-Est.

#### **3.4.3. La nappe de Sénonien :**

Sa profondeur varie entre 120-430 m, son exploitation est faible à cause de faible rendement de ses puits, la température de leurs eaux est de 30°C.

#### **3.4.4. La nappe Albienne (Continental Intercalaire) :**

Sa profondeur allant de 600 à 1580 m. Elle est constituée d'une réserve importante, son écoulement va du Sud vers le Nord, avec une température élevée variant entre 50°C et 55°C. Les nappes les plus mobilisées sont la nappe Albienne et la nappe du Complexe Terminal (nappe du Miopliocène et Sénonien) dont 570 hectomètres cubes sont mobilisés (BOUAMMAR, 2000). [18]

### **3.5 Recensement des forages à l'année 2018 :**

Le tableau ci-dessous nous donne une idée sur l'évolution des forages dans la vallée de Ouargla l'année 2018. Il est clairement visible que les forages sont majoritairement sur la nappe Mio-pliocène à cause de sa profondeur moins importante et à la qualité de l'eau qu'elle contient [18]

*Tableau 3. 5:* Recensement des forages à Ouargla l'année 2018.

<b>Régions</b>	<b>Nappe</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>N.S (m)</b>	<b>R.S (g/l)</b>
<b>Ouargla</b>	<b>Phréatique</b>	13 – 20	4 – 14	9 - 16,4	-
	<b>Mio-pliocène</b>	29 – 192	3 – 56	0,8 - 38,40	1,66 - 5,1
	<b>Sénonien</b>	120 – 430	0,5 – 40	Art - 29,4	1,79 - 5,11
	<b>Albien</b>	600 – 1580	50 – 228	Art	-

### **3.6 Oléiculture en Algérie :**

L'oléiculture est la première richesse arboricole de l'Algérie. Elle constitue une source de subsistance pour de nombreuses familles. L'olivieraie occupe 45% du verger arboricole total et compte 32 millions d'arbres dont 80% sont destinés à la production d'huile d'olive (MENDIL, 2009), estimée à 55.000-70.000 tonnes/an (VOSSSEN, 2013).

La superficie oléicole algérienne a connu une légère progression en 2014 passant de 348196ha en 2013 à 383443 ; soit une évolution de 10%. La production d'huile d'olive, quant à elle, est passée de 429 980 hl en 2013 à 479700 hl en 2014, soit une évolution de 11.5%. L'Algérie se place ainsi au 8ème rang mondial (CHEIKH, 2016). [19]

### **3.7 Oléiculture dans la wilaya d'Ouargla :**

Dans la région d'Ouargla, l'olivier est considéré comme une nouvelle culture fruitière, cette culture commence à s'étendre dans la zone d'El Alia grâce à un programme d'essai de plantation d'olivier en 2010. Aujourd'hui, elle est répartie partout et potentiellement dans la région de Hassi Ben Abdellah (Sidi Khouiled) et Hassi Messaoud (DSA, 2018). [19]

### **3.8 Evolution des superficies et production oléicoles :**

Dans la wilaya d'Ouargla, l'oléiculture a connu un important développement durant ces dernières années, comme l'indique le tableau (03). On constate que la superficie est relativement fixe et stable depuis 2010 à 2015, celle-ci a doublé entre 2015-2017, et a triplé durant cette année. La production a connu une augmentation relative depuis 2010-2014, puis elle devient importante durant 2014-2016. Durant cette année, la production est plus importante, en comparaison aux années 2010-2013. [19]

### **3.9 Système de pompage solaire**

Nous avons bien signalé dans les paragraphes ci-dessus, que l'implantation des palmiers représente l'activité agricole principale de la population de Ouargla. Le besoin d'eau est bien évidemment très fort. En plus, la vallée de Ouargla se trouve en plein sud avec une valeur d'ensoleillement assez élevée. Pour ces raisons, nous avons choisi l'étude d'un système de pompage appliqué à l'irrigation d'un hectare de palmiers dans cette région. Le système est caractérisé par les trois valeurs suivantes :

- ✓ le volume journalier d'eau à pomper ;
- ✓ le rayonnement solaire journalier reçu par le générateur ;
- ✓ la hauteur manométrique totale de pompage.

#### **3.9.1 Estimation des besoins en eau :**

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question). Cependant, la pratique et l'expérience locale restent toujours très indispensables pour une évaluation correcte des besoins. Les besoins d'eau des palmiers pour la région de Ouargla sont donnés dans le tableau suivant [20] :

**Tableau 3. 6:** Les besoins journaliers moyens mensuels en eau des arbres d'olivier /jour

	Besoin d'eau L/arbre/jour				
L'Age (Anne)	Janvier – Février	Mars	Avril- septembre	Octobre	Novembre- décembre
01	10	20	30	20	10

### Chapitre 3: Application d'un système de pompage PV sur le site d'Ouargl

02	20	30	40	30	20
03	25	40	50	40	25
04	30	50	60	50	30
Plus de 6	50	50	100	50	50

#### 3.9.2 Valeurs moyenne d'insolation mensuelle :

**Tableau 3. 7:** Valeurs moyenne d'insolation mensuelle

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc
Insol(h)	255	249	261	287	284	305	334	322	259	254	240	195
S °(h)	10.2	10.9	11.8	12.7	13.6	13.9	13.8	13.1	12.2	11.2	10.4	10

Le tableau ci-dessus présente les valeurs moyenne d'insolation mensuelle, avec un enregistrement de 13.8 en tant que valeur la plus élevée pour le mois juin de et de 10 en tant que valeur la plus petite pour le mois de décembre.

#### 3.9.3 Inclinaison optimal d'un panneau solaire :

**Tableau 3. 8:** Les valeurs de l'ongle journalier mensuel optimal

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc
$\beta_{opt}$	60	51	35	17	0	0	0	10	28	46	58	61

#### 3.9.4 Rayonnement solaire

Le tableau ci-après donne les valeurs de rayonnement global journalier calculées sur la moyenne mensuelle pour des rayons incidents sur un plan incliné d'un angle optimal saisonnier sur le site de Ouargla.

**Tableau 3. 9:** Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle pour une inclinaison Optimale

Période	Année 2018											
	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Déc
G (Wh/m <sup>2</sup> /j)	3.72	4.65	5.81	6.74	7.21	7.21	7.9	7.21	6.06	4.88	3.84	3.25
Ensoleillem ent (Mois)	253, 4	208, 6	246, 9	262, 3	313, 3	241, 5	284, 5	321, 2	281, 4	247, 9	244, 5	272, 1
Ensoleillem ent (heur)	10.5 5	8.69	10.2 8	10.9 2	7.51	10.0 6	11.8 5	13.3 8	11.7 2	10.3 2	10.1 8	11.3 3
T(°C)	12,6	13,1	19,2	23,8	27,6	32,6	39,1	33,6	31,6	23,2	16,6	11,9

Vu l'emplacement spécifique de la vallée de Ouargla par rapport au mouvement du soleil, l'orientation des modules PV est plein sud avec une inclinaison optimale par rapport au plan horizontal.

Donc l'irradiation moyenne de l'année entière (Pour Ouargla, l'irradiation moyenne annuelle est égale à 5,71 kWh /m<sup>2</sup>/jour).

#### **3.10 Technique de dimensionnement : [19]**

Les étapes de dimensionnement sont organisées comme suit :

- Détermination du profil de charge.
- Dimensionnement du champ photovoltaïque.
- Choix de l'onduleur (au besoin).

Un bilan économique du système (coût / amortissement) est calculé à la fin.

##### **3.10.1- Détermination de la charge (calcul de l'énergie quotidienne requise):**

L'énergie nécessaire pour soulever une quantité d'eau, sur une certaine hauteur pendant une journée, est calculée à partir des données de débit et de HMT requises. Elle est exprimée en watt heure. Ce calcul est fonction d'une constante hydraulique (CH) et est inversement proportionnel au rendement du groupe motopompe utilisé.

##### **3.10.2- Énergie requise pour la pompe : [2][16]**

Elle est donnée par :

$$E_C = C_H \cdot Q \cdot H_{MT} / R_P \quad (3.1)$$

Où

$E_C$  : est habituellement exprimé en kWh.

Q: Débit [m<sup>3</sup>/jour].

$H_{MT}$ : est la hauteur manométrique totale.

CH :est la constante hydraulique dépendant de la gravité terrestre et de la densité d'eau :

$$C_H = g \cdot \rho / 3600 = 9.81 \cdot 1000 / 3600 = 2,725 \text{ (Kg.s.h/m}^2\text{)}$$

Et  $R_P$  :le rendement du groupe motopompe (en général de 30q% à 45%).

$\rho$  : Densité de l'eau (1000kg/m<sup>3</sup>)

Donc :

$$E_C = C_H \cdot Q \cdot H_{MT} / R_P = 2.725 \cdot 63,63 \cdot 45 / 0.60 = 13004.4 \text{ Wh} = 13 \text{ kWh}$$

##### **3.10.3 Calcul du champ photovoltaïque : [2]**

L'énergie produite par un champ photovoltaïque est égale à :

$$E_P = E_C / K \quad (3.4)$$
$$E_P = 13 / 0.65 = 20 \text{ kWh/jour}$$

Où :

EC : est l'énergie consommée (Wh/jour).

K : un coefficient correcteur dépendant de l'incertitude météorologique, de l'inclinaison des modules solaires et du rendement global du système photovoltaïque. Sa valeur théorique est comprise entre 0.55 et 0.75 mais en pratique la valeur moyenne utilisée est de **0.65**.

- **La puissance crête du générateur photovoltaïque :**

### Chapitre 3: Application d'un système de pompage PV sur le site d'Ouargl

La puissance crête du générateur photovoltaïque dépend de l'irradiation quotidienne du lieu d'utilisation :

$$P_{PV} = E_P/I_R \quad (3.5)$$
$$P_{PV} = 20/5.71 = 3.5kW$$

Où

IR : est l'irradiation moyenne journalière, estimée dans notre région à 5.71 kWh/m<sup>2</sup>/j.

#### ▪ Le nombre de modules photovoltaïques : [12]

Le nombre total de modules photovoltaïques est calculé en rapportant la puissance globale du champ à celle (PM) d'un seul module :

$$N = P_{PV}/P_M \quad (3.6)$$
$$N = 3.5 * 1000/250 = 14$$

Le nombre de modules connectés en série sera :

$$N_S = V/V_M \quad (3.7)$$
$$N_S = 240/29.94 = 8$$

Le nombre de branches (modules en parallèle) :

$$N_P = N/N_S = \frac{14}{8} = 1.75 \approx 2 \quad (3.8)$$

Où :

V et V<sub>M</sub> sont respectivement les tensions du système et du module.

La correction de nombre de panneaux donne :

$$N = 8.2 = 16 \text{ panneaux}$$

#### 3.10.4 Choix de l'onduleur DC/AC : [20]

Il a pour rôle, la conversion du courant continu produit par les panneaux en courant alternatif identique à celui du réseau. Il est donc indispensable pour l'alimentation des charges à courant alternatif. Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques de la pompe alimentée (puissance, tension). Pour le besoins de notre étude, le convertisseur choisit est présenté dans le tableau suivant [27]

Les principales caractéristiques de l'onduleur sont estimées comme suit :

**Tableau 3. 10** : Caractéristiques de l'onduleur.

Type D'onduleur	Puissance.MAX (Watts)	Tension de d'entrée(V)	Tension Sortie(V)	Fréquence (Hertz)
Solardrive 4000	4000	240	3*220	0 :65

### **3.11 Application et résultats :**

Nous dimensionnons un système de pompage photovoltaïque, d'approvisionnement en eau pour l'irrigation d'un oasis de 2121 de l'arbre d'olivier.

Les données suivantes caractérisent le système :

**Projet** : Irrigation d'un oasis de 2121 de l'arbre d'olivier.

**Site** : Ouargla

**Irradiation quotidienne** : 5.71 kWh/m<sup>2</sup>/jour.

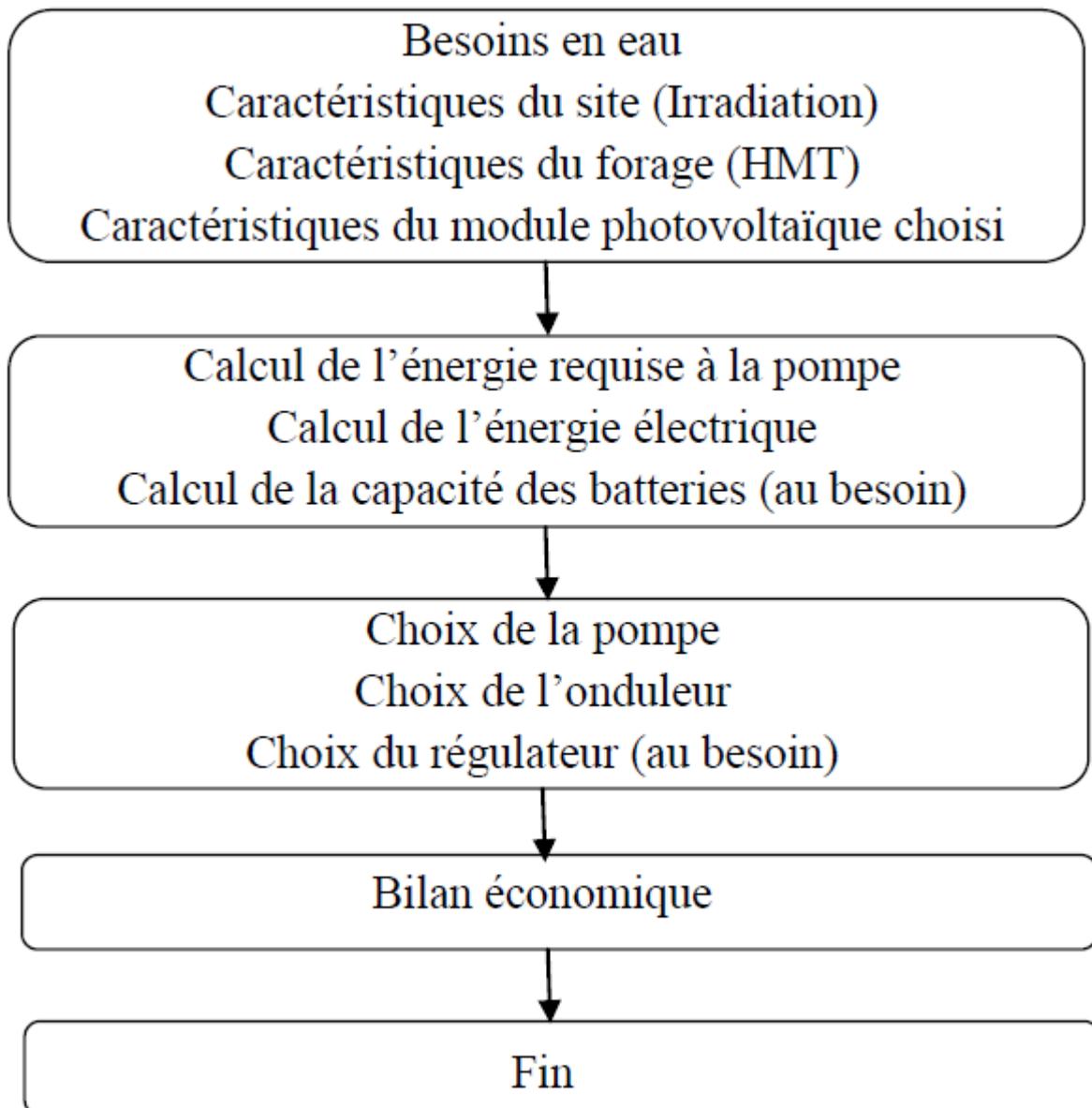
**Débit maximum** : 63.63 m<sup>3</sup>/arbre/an. (pour 2121 arbre : 63.63 m<sup>3</sup>/jour)

**Forage** : HMT = 45m.

- **Module photovoltaïque choisi** : [25]

- Poly-cristallin IBC Solo Sol
- Puissance nominale : 250 Watt.
- Tension nominale : 29.94 Volt.

### **3.12 Algorithme de dimensionnement :**



*Figure 3. 6 : Algorithme de dimensionnement.*

**Résultats du dimensionnement** : L'algorithme est programmé sur Matlab, les résultats obtenus pour l'application sont comme suit :

- **Energie hydraulique** : 13 Wh/j.
- **Energie électrique** : 20 Wh/j.
- **Nombre total de modules** : 16.
- **Modules en série** : 8.
- **Modules en parallèle** : 2.

**Choix du matériel :**

- **Choix de la pompe**

On choisit la pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique totale [17], on calcule le débit horaire par la formule suivante :

$$Q_h = \frac{Q \left( \frac{m^3}{jour} \right)}{h} \quad (3.14)$$

Avec : h : nombre d'heures d'ensoleillement maximal (Environ 7 heures). Q : débit voulu (63.63 m<sup>3</sup>/jour). Ceci donne un débit horaire d'environ 9.5 m<sup>3</sup>/h. Sachant que la hauteur manométrique totale est de 35 m, alors on choisit la pompe immergée Lorentz PS2-600 [28]. Qui a les caractéristiques suivantes :

- **Type** : Lorentz PS2-600.
- **Débit nominal** : 12 m<sup>3</sup>/h.
- **Tension d'entrée** : 150 v.
- **immersion** : Jusqu'à 150 m

- **Choix de l'onduleur :**

Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques de la pompe alimenté (puissance, tension). Pour notre étude, l'onduleur choisi est [26]:

- **Type** : Victon phoenix **240 / 500 VA**

### 3.13 Bilan économique :

Afin de voir leur rentabilité à long terme. On calcule le coût du KWh. Les coûts des différents composants sont donnés dans le tableau suivant [26].

**Tableau 3. 11:** Coût total de l'investissement.

Composants	Prix (DA)	Quantité	Cout total(DA)
Module photovoltaïque	23885.15	16	382162.4
Fixation du module	24000.00	16	384000
Pompe	258958.00	01	258958.00
Onduleur	22300.93	01	22300.93
Géniecivil, accessoires	20000.00	01	20000.00
		Cout total	106742133

On remarque que le coût total du système est relativement cher, mais sa rentabilité à long terme nous donne une autre vision. N'oublions pas que l'état algérien fait de grands efforts afin de promouvoir l'agriculture, notamment dans le sud. Plusieurs aides (subventions) sont données aux agriculteurs. Ces derniers demandent, fortement que le pompage photovoltaïque ait une subvention de 50%. Ceci reste en négociation, mais donne une bonne amélioration dans ce domaine. Pour montrer la rentabilité, on calcule le prix du KWh du système photovoltaïque, et on le compare au prix à payer si le système fonctionnait avec l'électricité conventionnelle (Sonelgaz). On s'intéressera aussi à l'amortissement du système sans et avec aide de l'état.

### 3.14 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats d'une étude qui a conduit au dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque pour irriguer un hectare de l'arbre d'olivier située sur la vallée d'Ouargla. Selon l'étude, le générateur photovoltaïque adéquat est constitué de 21 modules photovoltaïques en silicium poly cristallin d'une puissance crête de 250 WC chacun. Ainsi, la puissance crête du générateur PV est de 3150 WC. Une étude économique est faite afin de montrer l'efficacité de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque comparée à l'énergie conventionnelle.

### Conclusion

Dans ce travail, on a étudié le système de pompage solaire. On a traité un exemple réel situé à la région de Ouargla. D'abord, l'énergie solaire photovoltaïque est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde. D'autre part, la demande d'énergie électrique, essentiellement pour les besoins des zones rurales et les sites isolés, ne cessent d'augmenter, en particulier, les systèmes de pompage d'eau. Classiquement sur ce type de site, on utilise l'énergie conventionnelle par groupe électrogène. Mais cette énergie présente plusieurs contraintes, comme le transport du combustible et les entretiens périodiques pour les moteurs diesels.

En générale, La problématique qui se pose est le cout de l'énergie exprimé par le cout du KWh, Ou par le cout de mètre cube d'eau pompé dans la littérature.

On a démontré au cours de notre étude, que le cout du KWh du système de pompage solaire est proche du cout de KWh offert par la Sonalgaz. Et l'espoir qu'il soit réduit est grand, vu que l'état Algérien propose des aides importants aux agriculteurs, au cours de ces dernières années.

On a constaté qu'on considérant une subvention de l'état de 50%, le cout du KWh est réduit considérablement.

Il est a signalé, qu'une bonne installation, une bonne orientation des modules solaires et un bon dimensionnement permet d'exploiter l'énergie de façon optimale. Ce qui augmente le rendement du système est réduit par conséquence, le cout du KWh.

Il est intéressant de voir les méthodes qui optimise la production d'énergie, par exemple introduire un système de poursuite du point de puissance maximal (MPPT), d'intégrer aussi l'irrigation par point ou pourquoi pas, le système traditionnel « El-foggara ». Afin d'avoir un système d'irrigation fiable et à moindre cout.

Ce système de pompage solaire est conçu pour un approvisionnement en eau dit « au fil du soleil ». C'est à dire une durée de pompage tout au long de la journée. Pour mieux analyser les contraintes de l'exploitation d'un système de pompage d'eau, nous avons présenté plusieurs résultats obtenus d'une étude qui a conduit au dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque pour irriguer un hectare de palmiers situé sur la vallée de Ouargla. Nous avons montré que le site de Ouargla présente un climat favorable à ce type d'énergie nouvelle ; la vallée de Ouargla est étendue sur une surface de plus de 163 233 k m<sup>2</sup> avec un ensoleillement de plus de 5 kWh/m<sup>2</sup> / jour, ainsi que des ressources importantes d'eau souterraine. Une autre coïncidence très importante favorise encore l'utilisation de ce type d'énergie pour le pompage d'eau à Ouargla est que la demande d'eau, surtout dans l'agriculture, atteint son maximum par temps chaud et sec où c'est justement le moment où l'on a accès au maximum d'énergie solaire.

Enfin, bien qu'il soit plus claire 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.

**Références bibliographiques**

- [1] Clarence Semessou, AIDE A LA DECISION POUR LE CHOIX DE SITES ET SYSTEMES ENERGETIQUES ADAPTES AUX BESOINS DU BENIN, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de l'Université Bordeaux 1 ED 209, DECEMBRE 2011.
- [2] Abdeallah jelali, « INTERCONNEXION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE SUR LE RESEAU ÉLECTRIQU », Mémoire Fin de Etude, L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES, AOÛT 2012.
- [3] S.abada « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic », Mémoire Maître ès Sciences, Université Laval, 2011.
- [4] M. Bessem abdelghani, « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque », Mémoire Fin de Etude, Master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2018.
- [5] Febvre Claire, « Energies renouvelables : comparaison entre le droit des Etats-Unis et de l'Union européenne », Mémoire Fin de Etude, Master de droit européen comparé, UNIVERSITÉ PANTHEON-ASSAS, 2010.
- [6] Boukhres Djamil, « OPTIMISATION D'UN SYSTEME D'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE APPLICATION AU POMPAGE », Mémoire Fin d'Etude, Master, Université Mentouri de Constantine, 2017.
- [7] A. Labonne, « Alimentation d'une pompe à Burkina Faso »,2004.
- [8] B. Molle, « Les stations de pompage individuelles pour l'irrigation », juin 1996.
- [9] Bouziane Khaoula, Gaddouri Hanane «Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque optimisé Mémoire de fin d'Etude, UNIVERSITE LARBI TEBESSI – TEBESSA ,2016 / 2017
- [10] J. Royer, T. Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, 2002.
- [11] Y. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED432, 2004.
- [12] Boudrahem Lyes, Djouadi Lamine «Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque » Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2011-2012
- [13] B. Multon, H. B. Ahmed, N. Bernard, « Les moteurs électriques pour applications de grande série », Pierre-Emmanuel CAVAREC Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan, Revue 3EI juin 2000.
- [14] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque », Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19 – 26.

- [15] S. LABED. « Le pompage photovoltaïque et le développement des régions sahariennes », Colloque International sur les Ressources en Eau Souterraines dans le Sahara (CIRESS) Ouargla - 12 et 13 décembre 2005. *Pompage Photovoltaïque 'Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19-26.*
- [16] Degla Mohammed, Larbi Ben Ahmed Bachir « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque », mémoire de fin d'étude, université kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [17] Société A N R H Ouargla 2018.
- [18] Diab Nawel, « Analyse de fonctionnement des exploitations phoenicicoles dans la région de Ouargla, mémoire de fin d'étude, université kasdi Merbah Ouargla, 2009/2010.
- [19] Fellah Souad, « Caractérisation des variétés d'olives dans la zone de Hassi Ben Abdellah « cas de l'exploitation de BENSACI » », mémoire de fin d'étude, université kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [20] <https://agronomie.info/زراعة-الزيتون-الري/> (consulté mai 2019)
- [21] A. DJAFOUR, « Etude d'une station de pompage photovoltaïque dans une région saharienne », Thèse de magistère, université de Ouargla, 2000.
- [22] J. Royer, T. Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa.
- [23] F. Lasnier, T. G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4.
- [24] B. Molle, « Les stations de pompage individuelle pour l'irrigation », juin 1996.
- [25] B. Azoui et M. Djarallah, « Dimensionnement et expérimentation d'un système photovoltaïque de pompage d'eau utilisant un moteur à aimants permanents sans balais collecteur », Journée d'Etude sur l'Energie Solaire, Mardi 01 mars 2005, Bejaia.
- [26] [www.grundfos.com](http://www.grundfos.com)
- [27] <https://www.solaris-store.com> (Consulté en Mai 2019)
- [28] [www.panellipumps.it](http://www.panellipumps.it)

ملخص

تعتبر طاقة شمسية من أهم لطاقت المتجددة التي تستعمل في المناطق النائية، المعزولة أو البعيدة عن شبكة توزيع الطاقة الكهربائية لما لها من فوائد كثيرة. من بين المجالات التي تستعمل فيها نجد مجال ضخ المياه، لكن هناك عدة مشاكل تعرقل استعمالها نذكر من بينها غلاء تكلفتها ومردود ضعيف، إن تطور المغناط الدائمة و الإلكترونيك الاستطاعة أعطت دفع ملحوظ في تطوير الآلات الكهربائية الدوارة بسرعات متغيرة في هذا المنوال تم إنجاز هذه المذكرة التي من خلالها قمنا بنمذجة، محاكاة، تحكم في نظام ضخ المياه، هذا النظام يتكون من عدة أجزاء تشارك فيما بينها، و هي مولد الطاقة الدراسة تتضمن أيضا تقنية متابعة نقاط الاستطاعات الشمسية، موج التوتر، المحرك التزامني بمغناطيس دائم و المضخة المضخة، هذه التقنية تضمن أيضا التكيف بين المولد الشمسي و الحموله – الأعظمية الذي يضمن رفع مردود المحرك لتخفيض ثمن تحويل الطاقة و همك عدة تقنيات و خوارزميات لفعل هذا العمل

RESUME

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès sûr à l'eau potable. Mais les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible est un coup élevée. Le développement des aimants permanent, surtout ceux de types de terres rares, et l'évolution de l'électronique de puissance ont permis des progrès importants dans le développement des machines à vitesse variable. Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, la simulation, la commande et l'optimisation d'un système de pompage solaire. Ce système est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir les panneaux photovoltaïques, l'onduleur de tension, le moteur synchrone à aimant permanent, la pompe centrifuge et le circuit hydraulique.

Abstract

The use of solar in isolated sites for different applications, such as water pumping presents many interests for third world countries which are in real need for drinking water. However photovoltaic generators do have two main disadvantages namely: High cost, bad efficiency. The developments of permanent magnet and power electronics have helped in variable speed machine development. The work presented in this memory is related to modelisation, simulation, control and optimisation of pumping solar systems. The chain of this system is composed of photovoltaic panels, voltage inverter, permanent magnet synchronous motor, centrifugal pump and a hydraulic circuit