



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Ikram SAYAH

Le : jeudi 17 septembre 2020

Etude d'une installation de pompage solaire photovoltaïque destinée à l'irrigation.

Jury :

Pr.	Rachid ATHMANI	Pr	Université de Biskra	Président
Pr.	Noureddine MOUMMI	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Labeled ADNANE	MCA	Université de Biskra	Examineur

Dédicaces

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.

Je dédie ce travail en signe de reconnaissance, de respect et avec ma profonde gratitude et grand amour.

À ma très chère mère qui a consacré sa vie à bâtir la mienne, pour ces sacrifices quelle est endurés pour faire de moi ce que je suis aujourd'hui, ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, Je leur serai éternellement reconnaissante.

À la mémoire de mon cher père avec lequel je n'aurais pas le plaisir de partager cet évènement, mais qui est et qui demeurera dans mon cœur et à jamais. J'espère que je saurai à la hauteur des valeurs que tu as semées en nous. Que Dieu le Tout-puissant lui accorde sa miséricorde.

À mes frères qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

À tous mes collègues de la promotion de Master Génie Mécanique, option Energétique.

À mes chères amies pour leur aide matériel et leur soutien moral.

Remercîments

Louange à DIEU le Tout puissant, de nous avoir donner le courage, la volonté, la patience et la santé pour achever ce travail.

J'exprime en particulier toute ma gratitude et ma reconnaissance à l'endroit de mon maître de mémoire, Pr. Nouredine Moummi, Enseignant-chercheur en Génie Mécanique Energétique à l'Université de Biskra, pour son accompagnement, ses conseils et ses orientations judicieuses qui ont beaucoup contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à transmettre mes remerciements les plus chaleureux à Monsieur le président jury et également à tous les membres du jury pour avoir accepté de participer à l'évaluation de ce modeste travail.

Nos vifs remerciements s'adressent à tous les enseignants de la faculté des sciences et de la technologie département de Génie Mécanique.

Je voudrais exprimer 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.

Résumé

L'irrigation par pompage à petite échelle est l'une des utilisations les plus intéressantes de l'énergie solaire. Le présent travail traite de l'étude et le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque destiné à l'irrigation d'un hectare de palmier dattier par la méthode de la goutte à goutte dans la région de Biskra au sud Algérien. L'étude cible la ville de Tolga comme lieu pilote du projet. Cette ville dispose un fort ensoleillement et également une grande réserve d'eau souterraine favorise l'utilisation d'un pompage solaire dit « au fil du soleil ». L'intermittence du soleil a permis d'opter un stockage hydraulique par l'intermédiaire d'un réservoir surélevé.

Le calcul de l'irradiation solaire moyenne journalière et la détermination des besoins en eau d'un hectare de palmier nous a permis de faire le choix de la configuration de notre système et par la suite le dimensionnement du générateur photovoltaïque. Après avoir présenté la zone du projet et défini les paramètres nécessaires à notre étude, à savoir, le climat, les caractéristiques des plantes (palmiers), la nature du sol, les sources d'eau et l'ensoleillement.

A partir de ce travail nous avons constaté que le fait que cette énergie est disponible juste au point d'utilisation, l'agriculteur est libéré des problèmes liés à l'approvisionnement en carburant, ou bien à l'existence des lignes de transport de l'électricité. Ce qui l'encourage d'améliorer la production et la qualité des dattes et par conséquent de développer de façon substantielle le secteur agricole et l'économie nationale.

Mots clés : Pompage solaire, photovoltaïque, au fil du soleil, irrigation, goutte à goutte, palmier, Tolga-Biskra.

Abstract

Small-scale pumped irrigation is one of the most interesting uses of solar energy. The present work deals with the study and dimensioning of a photovoltaic pumping system for the drip irrigation of a hectare of date palm in the region of Biskra in southern Algeria. The study targets the city of Tolga as a pilot site for the project. This city has a high level of sunshine and also a large reserve of underground water which favors the use of a solar pumping system called “au fil du soleil”. The intermittency of the sun made it possible to opt for hydraulic storage via an elevated reservoir.

The calculation of the average daily solar irradiation and the determination of the water needs of a hectare of palm trees allowed us to choose the configuration of our system and then the dimensioning of the photovoltaic generator. After having presented the project area and defined the parameters necessary for our study, namely, the climate, the characteristics of the plants (palm trees), the nature of the soil, the water sources and the sunshine.

From this work we found that the fact that this energy is available just at the point of use, the farmer is freed from the problems related to fuel supply, or the existence of electricity transmission lines. This encourages him to improve the production and quality of dates and consequently to develop the agricultural sector and the economy of the area and Algeria in general.

Keywords: Solar pumping, photovoltaic, solar wire, irrigation, drip, palm, Tolga-Biskra.

Table des matières

Dédicaces	i
Remercîments	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xi
Nomenclature	xiii
Liste des abréviations	xvi
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1.Introduction	4
I.2.Travaux expérimentaux réalisés.....	4
I.3.Conclusion.....	18

Chapitre II : Généralité

II.1. Introduction.....	20
II.2. Différents types de système photovoltaïque	20
II.2.1. Système autonome (off grid).....	20
II.2.2. Système photovoltaïque raccordé au réseaux (on grid)	21
II.2.3. Système hybride	22
II.3. Différentes méthodes de pompage photovoltaïque.....	22
II.3.1. Pompage au fil du soleil	22
II.3.2. Pompage avec batteries	23
II.4. Etude des différents composants du système de pompage photovoltaïque	25
II.4.1. Le générateur photovoltaïque.....	26

II.4.2. Le groupe motopompe.....	35
II .4.3. L'électronique de commande et de contrôle	40
II .4.4. Le stockage.....	41
II .5. Généralité sur l'irrigation.....	42
II .5.1.Irrigation de surface	42
II .5.2. Irrigation par aspersion.....	43
II .5.3. Irrigation par goutte à goutte	44
II .6. Conclusion	46

Chapitre III : Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque

III.1. Introduction	48
III.2. Notion hydraulique	48
III.2.2. Hauteur manométrique totale.....	48
III.2.3. Niveau statique (N_s).....	49
III.2.4. Niveau dynamique (N_d).....	49
III.2.5. Rabattement(S_0).....	49
III.3. Le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque	49
III.3.1. Estimation des besoins en eau.....	51
III.3.2. Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise.....	51
III.3.3. Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise	51
III.3.4. Détermination de l'énergie solaire disponible	52
III.3.5. Taille du générateur photovoltaïque	52
III.3.6. Choix des composants.....	55
III.4. Conclusion	56

Chapitre IV : Etude de cas

IV.1. Introduction	58
IV.2. Présentation de la zone d'étude	58
IV.2.1. Cadre géographique	58
IV.2.2. Cas d'application : la ville de Tolga	58

IV.2.3. Hydrogéologie	59
IV.2.4. Pédologie	60
IV.2.5. Climatologie de Biskra	61
IV.3. Dimensionnement.....	64
IV.3.1. Estimation des besoins en eau	64
IV.3.2. Rayonnement solaire	67
IV.3.3. Hauteur manométrique totale.....	67
IV.3.4. Dimensionnement de la station de pompage	68
IV.4. Conclusion.....	73
Conclusion Générale	74
Références bibliographiques	77
Annexes.....	I
Annexe A.....	II
Annexe B.....	IV
Annexe C.....	VI
Annexe D.....	IX
Annexe E.....	XIII

Liste des figures

N° de la figure	Titre de la figure	Page
Chapitre I		
Figure (I.1)	Caractéristiques électriques de la pompe 95PR12N/9	05
Figure (I.2)	Schéma du calcul de la taille du générateur	05
Figure (I.3)	Calcul du coût de m ³ d'eau pompée par les deux systèmes (photovoltaïque/ électrogène)	06
Figure (I.4)	Comparaison des coûts de m ³ d'eau pompée par les deux systèmes (photovoltaïque / électrogène) en fonction du nombre d'année d'exploitation	06
Figure (I.5)	Coût d'investissement initial des deux systèmes (photovoltaïque /électrogène)	07
Figure (I.6)	Comparaison des coûts de m ³ d'eau pompée par les deux système : photovoltaïque /électrogène (réduction de 20% du coût de panneau solaire)	07
Figure (I.7)	Schéma de branchement	08
Figure (I.8)	Caractéristique I(V) du générateur PV (20 modules pour T=25°)	09
Figure (I.9)	Caractéristique P(V) du générateur PV (20 modules pour T=25°)	10
Figure (I.10)	Variation de l'éclairement durant une journée	10
Figure (I.11)	Hauteur de la pompe en fonction du débit pour diverses vitesses de rotation	11
Figure (I.12)	Variation du débit de la pompe en fonction de l'éclairement	11
Figure (I.13)	Rendement du système en fonction de l'éclairement	12
Figure (I.14)	Localisation de la localité de ADJAKPATA	14
Figure (I.15)	Photo de la pompe à motricité humaine de ADJAKPATA	15
Figure (I.16)	Coût du mètre cube d'eau	15
Figure (I.17)	Coût du mètre cube d'eau dû à l'exploitation	16
Figure (I.18)	La configuration du système d'irrigation	17

Figure (I.19)	Besoin en eau d'irrigation par hectare de palmier dattier	17
Figure (I.20)	La puissance crête pour chaque mois avec les différentes inclinaisons	18
Figure (I.21)	Volume d'eau pompée et volume d'eau consommée	18
Chapitre II		
Figure (II.1)	Classification des systèmes photovoltaïques	20
Figure (II.2)	Système photovoltaïque connecté au réseau	21
Figure (II.3)	Système de pompage hybride éolien-photovoltaïque	22
Figure (II.4)	Pompage au fil du soleil (stockage de l'eau)	23
Figure (II.5)	Pompage avec batteries (stockage électrique)	24
Figure (II.6)	Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batteries	25
Figure (II.7)	Installation type	26
Figure (II.8)	Composants d'un champ du module photovoltaïque	26
Figure (II.9)	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	27
Figure (II.10)	Courbe courant-tension d'un module photovoltaïque	30
Figure (II.11)	Association en parallèle des panneaux	31
Figure (II.12)	Association en série des panneaux	31
Figure (II.13)	Association mixte des panneaux	31
Figure (II.14)	Groupement de N_s modules en série et N_p en parallèle.	32
Figure (II.15)	Groupement des panneaux	32
Figure (II.16)	Influence de l'ensoleillement sur la courbe I(V)	33
Figure (II.17)	Influence de la température sur la courbe I(V)	34
Figure (II.18)	Effet d'ombrage sur les cellules	35
Figure (II.19)	Défaut des points chauds	35
Figure (II.20)	Classification des pompes	36
Figure (II.21)	Pompe submersible centrifuge à étages multiples	36
Figure (II.22)	Pompe à piston (Jack pump) : pour de grandes profondeurs et de petits débits	37
Figure (II.23)	Pompe de surface	38

Figure (II.24)	Pompe immergée	39
Figure (II.25)	Moteur à courant continue	40
Figure (II.26)	Les différents systèmes d'irrigation	42
Figure (II.27)	Irrigation par planches	43
Figure (II.28)	Irrigation par bassin	43
Figure (II.29)	Irrigation à la raie	43
Figure (II.30)	Irrigation plein champ par aspersion	43
Figure (II.31)	Irrigation goutte à goutte	44
Figure (II.32)	Equipements du système goutte à goutte	45
Chapitre III		
Figure (III.1)	Hauteur manométrique totale	49
Figure (III.2)	Pompage d'eau par la technique d'irrigation « goutte à goutte »	50
Figure (III.3)	Chaine de conversion d'un pompage PV au fil du soleil	50
Figure (III.4)	Courbe typique des performances d'une pompe en conditions d'utilisation	55
Chapitre IV		
Figure (IV.1)	Localisation de la ville de Tolga-Biskra-Algérie (via Google Earth)	59
Figure (IV.2)	Cycle d'évapotranspiration	65

Liste des tableaux

N° du tableau	Titre du tableau	La page
Chapitre I		
Tableau (I.1)	Relevé de la première série de mesure	12
Tableau (I.2)	Relevé de la deuxième série de mesure	13
Chapitre II		
Tableau (II.1)	les avantages et les inconvénients des pompages au fils du soleil et avec batteries	24
Tableau (II.2)	Caractéristiques des différentes technologies des cellules PV	28
Tableau (II.3)	Tableau (II.3) : caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges.	37
Chapitre IV		
Tableau (IV.1)	La précipitation moyenne mensuelle de la région de Biskra durant la période (1989-2018)	61
Tableau (IV.2)	Températures moyennes mensuelles (minimales, maximales et moyennes) de la région étudiée durant la période (1989-2018)	62
Tableau (IV.3)	La vitesse moyenne mensuelle du vent de la région de Biskra durant la période (1989-2018)	62
Tableau (IV.4)	L'humidité moyenne mensuelle de la région de Biskra durant la période (1989-2018)	63
Tableau (IV.5)	La somme de l'insolation réelle mensuelle moyenne de la région de Biskra durant la période (1989-2018)	63
Tableau (IV.6)	L'évaporation moyenne mensuelle de la région de Biskra durant la période (1989-2018)	64
Tableau (IV.7)	Les besoins journaliers moyens en eau des palmiers/ hectare	67
Tableau (IV.8)	Les valeurs de l'irradiation globale mensuelle pour une inclinaison optimale	67
Tableau (IV.9)	Les caractéristiques techniques de la motopompe et de contrôleur	69

Tableau (IV.10)	Caractéristiques électriques du module photovoltaïque (VICTRON 330 Wc-24V)	70
Tableau (IV.11)	Vérification de la comptabilité du contrôleur avec la configuration des panneaux	73

Nomenclature

Symboles	Désignation	Unité
Q	Débit volumique	m^3/s
HMT	La hauteur manométrique totale	m
ΣPdc	Pertes de charge (linéaires et singulières)	mCE
$H_{géo}$	Hauteur géométrique	m
N_s	Niveau statique	m
N_d	Niveau dynamique	m
S_0	Rabattement	m
E_h	Energie hydraulique	kWh/j
g	La gravité terrestre	m/s^2
ρ	La masse volumique d'eau	kg/m^3
V	Volume d'eau	m^3/j
E_e	Energie électrique	KWh/j
η_{MP}	Le rendement du groupe motopompe	%
η_{ond}	Le rendement d'onduleur	%
$\overline{R_b}$	Facteur de conversion	[-]
\overline{H}_d	La composition diffuse	Wh/m ² /j
\overline{H}_b	La composante directe	Wh/m ² /j
ρ_s	L'albédo au sol	[-]
β	L'angle d'inclinaison	[°]
W	L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan horizontal	[°]
\hat{W}	L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan incliné	[°]
\overline{H}_T	L'irradiation globale journalière moyenne mensuelle pour une inclinaison optimale	Wh/m ² /j
P_c	La puissance de sortie du générateur	W
η_g	Le rendement du générateur sous les conditions standards de mesure CSM	%
A	La surface active du générateur	m ²

G	L'éclairement dans les conditions standards de mesure (CSM)	W/m ²
η_{PV}	Rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation	%
G_d	Irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules	kWh/m ² /j
F_m	Facteur de couplage	[-]
γ	Coefficient de température des cellules	°C
T	Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement	°C
P_{elec}	La puissance crête du générateur photovoltaïque	W
P_M	La puissance de module photovoltaïque	W
N_M	Nombre totale de modules	[-]
N_{MS}	Nombre de modules en série	[-]
N_{MP}	Nombre de modules en parallèle	[-]
V_{ch}	La tension exigée à l'entrée du convertisseur de puissance.	V
V_m	La tension fournie par le module photovoltaïque au point de la puissance maximale	V
P_h	La puissance hydraulique	kWh/j
P	Précipitation	mm
T_{min}	Moyennes des températures minimales mensuelles exprimées	°C
T_{max}	Moyennes des températures maximales mensuelles exprimées	°C
T_{moy}	La moyenne des températures mensuelles exprimées	°C
V	Vitesse du vent	m/s
H_r	Humidité relative de l'air	%
I	Insolation	Heure
$Evapo$	Evaporation	mm
ET	Evapotranspiration	mm
ETP	Evapotranspiration potentielle	mm
ET_0	Evapotranspiration de référence	mm
ETR	Evapotranspiration réelle	mm
BI	Besoin net	mm

BI_{brut}	Besoin brut	mm
eff	L'efficience d'irrigation	%
K_c	Le coefficient cultural	[-]
Q_h	Débit horaire	m^3/h
N_h	Le nombre d'heure d'ensoleillement maximal	Heure
P_{max}	Puissance maximale	W
V_{mp}	Tension à P_{max}	V
I_{mp}	Courant à P_{max}	A
I_{sc}	Courant de court-circuit	A
V_{oc}	Tension à circuit ouvert	V
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature	°C
$V_{oc.géné}$	Tension circuit ouvert du générateur photovoltaïque	V
$V_{max.cont}$	Tension maximale du contrôleur	V
$I_{max..cont}$	Intensité maximale du contrôleur	A

Liste des abréviations

Abréviations	Signification
ONM	Office Nationale de la Météorologie
ITIDAS	Institut Technique de Développement de L'Agonomie Saharienne
ITAS	Institut Technique Agronomie Saharien
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
AGIRE	Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et agriculture

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie. Comme nous le savons, environ 68 % de la production mondiale d'énergie provient de gisement des ressources non renouvelables (combustibles fossiles) comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Les études et les prévisions récentes nous alertent que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à l'épuisement inéluctable de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre qui pouvant hypothéquer l'avenir de l'humanité. Ce qui rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie ainsi que l'utilisation et le développement des énergies renouvelables. On distingue plusieurs sources d'énergie renouvelables, l'énergies solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la géothermie et la biomasse.

La production d'énergie basée sur l'énergie solaire photovoltaïque possède un potentiel important parmi toutes les énergies renouvelables disponibles. Elle est propre, silencieuse, inépuisable, gratuite et disponible sur une grande partie du globe terrestre, en plus l'absence et le manque en mouvement des pièces mécaniques lui confèrent un niveau de fiabilité inégalable (la durée de vie d'un module photovoltaïque est estimée généralement par les experts à 30 ans).

Son exploitation sur l'échelle planétaire dépasse les centaines de gigawatt et pourra être la première source de l'énergie électrique. Grâce à sa souplesse et sa facilité d'installation et de maintenance, l'énergie photovoltaïque est incontestablement la solution technique et économique la plus adaptée pour les sites non raccordés au réseau de la distribution centralisée et pour les pays en voie de développement, et même les pays occidentaux. Parce que l'électricité fournie dans ces mêmes zones a permis d'améliorer les conditions de vie de ces populations, de renforcer leurs sédentarisation et de valoriser leurs terres.

L'eau est une source de vie pour l'homme, les animaux et la végétation, en effet constitue aujourd'hui l'un des défis majeurs qui est le cas de l'Algérie.

La démographie galopante et la recherche du bien-être et du développement économique en Algérie implique un accroissement des besoins en eau, pour la consommation domestiques (de personnes), pour l'agriculture (l'élevage et irrigation) et pour l'industrie, et aussi un accroissement

Introduction Générale

de la demande en énergie ou la baisse des revenus de la rente pétrolière de plus en plus. Ceci constitue un inconvénient majeur, en particulier pour les agriculteurs. L'utilisation des systèmes de pompage solaire photovoltaïque en Algérie s'avère une solution très fiable et très pratique pour l'exhaure de l'eau surtout dans les sites isolés. Cette source d'énergie est abondante notamment dans le grand sud, qui est caractérisé par de très fort apport solaire avec une différence de température diurne-nocturne très importante et par l'existence dans ces régions d'un potentiel hydraulique souterrain peu profond. En effet, la majorité de ces localités se situent dans des zones agricoles rurales, enclavées, dispersées et lointaines du réseau d'électricité conventionnelle (rural profond) et aux quels le problème d'alimentation en énergie électrique est posé, l'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque permettrait donc de fournir en l'électricité ces sites et éviterai la création de nouvelle lignes électriques qui demande généralement un lourd investissement. Une autre coïncidence très importante favorise l'utilisation de ce type d'énergie est que l'intensité maximale du rayonnement solaire correspond généralement à la période la plus importante en besoin d'eau.

Le présent travail se donne comme objective l'étude d'un système de pompage solaire photovoltaïque en vue d'irrigation d'une palmeraie dans la ville de Biskra au sud de l'Algérie.

Ce mémoire renferme quatre chapitre. Le premier chapitre présente une revue bibliographique enrichie des travaux ayant rapport avec les applications des systèmes de pompage photovoltaïque. Le deuxième chapitre présente un état de l'art sur le domaine envisagé, ainsi que des notions sur les différents types de systèmes de pompage photovoltaïque, ses propriétés technologiques et ses composants principaux et aussi les différentes techniques d'irrigation.

La constitution générale et la définition de toutes les étapes à suivre pour le dimensionnement d'un système de pompage solaire photovoltaïque ont été entreprise dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant par la méthode dite « au fil de soleil ». Nous avons présenté tout d'abord la zone d'étude et défini son périmètre agricole et tous les paramètres nécessaires à la conception et au dimensionnement de notre système d'irrigation.

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1.Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons à une étude bibliographique à travers laquelle nous pouvons voir les différentes techniques utilisées et nous donnons un aperçu général sur les systèmes de pompage photovoltaïque. Des récapitulations de beaucoup travaux de recherche ont été rapportées en soulignant les principaux résultats obtenus dans ce domaine.

I.2.Travaux expérimentaux réalisés

En 2008 **Mohamed Lakhdar Louazene [1]** dans une étude qui traite les aspects techniques et économiques d'une installation de pompage d'eau utilisant une source d'énergie solaire photovoltaïque, destinée à l'irrigation au niveau de la Wilaya de Ouargla. L'auteur a commencé par donner des explications générales sur le gisement solaire et quelques notions fondamentales d'astronomie, il a traité aussi l'importance de l'inclinaison des panneaux solaires sur l'énergie récolté. Puis, il a présenté les principales caractéristiques et les technologiques des éléments constitutifs d'un générateur photovoltaïque. Ensuite, il a fait une présentation des éléments théoriques de l'installation permettant par la suite, le dimensionnement et la réalisation d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant par la méthode dite « au fil de soleil » afin d'irriguer une surface d'un hectare de palmiers. Pour effectuer et présenter les calculs, ils ont utilisé Microsoft Excel.

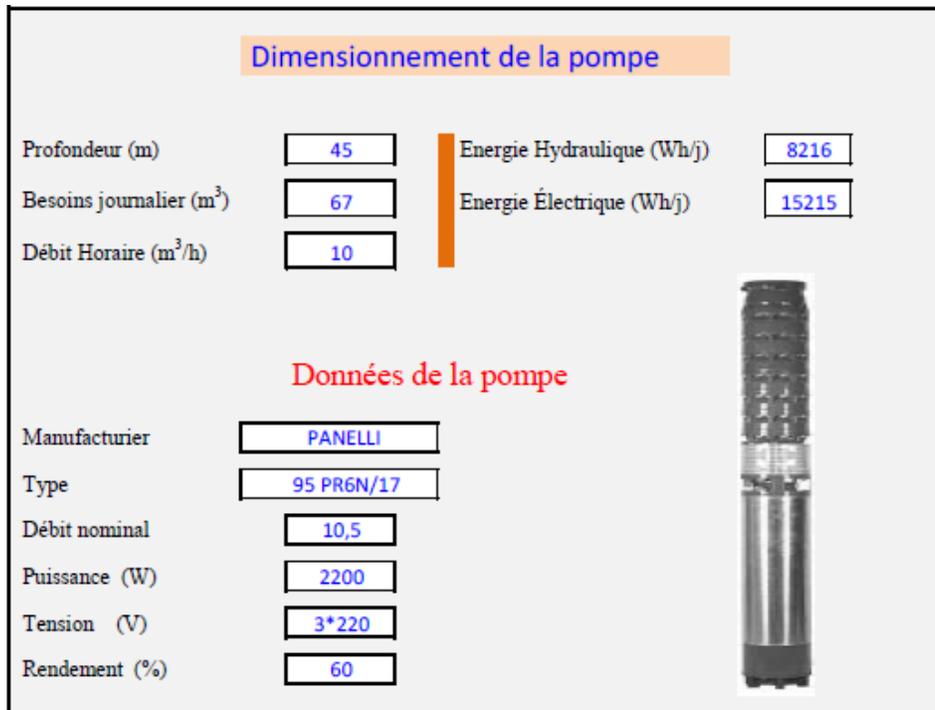


Figure (I.1) : Caractéristiques électriques de la pompe 95PR12N/9 [1].

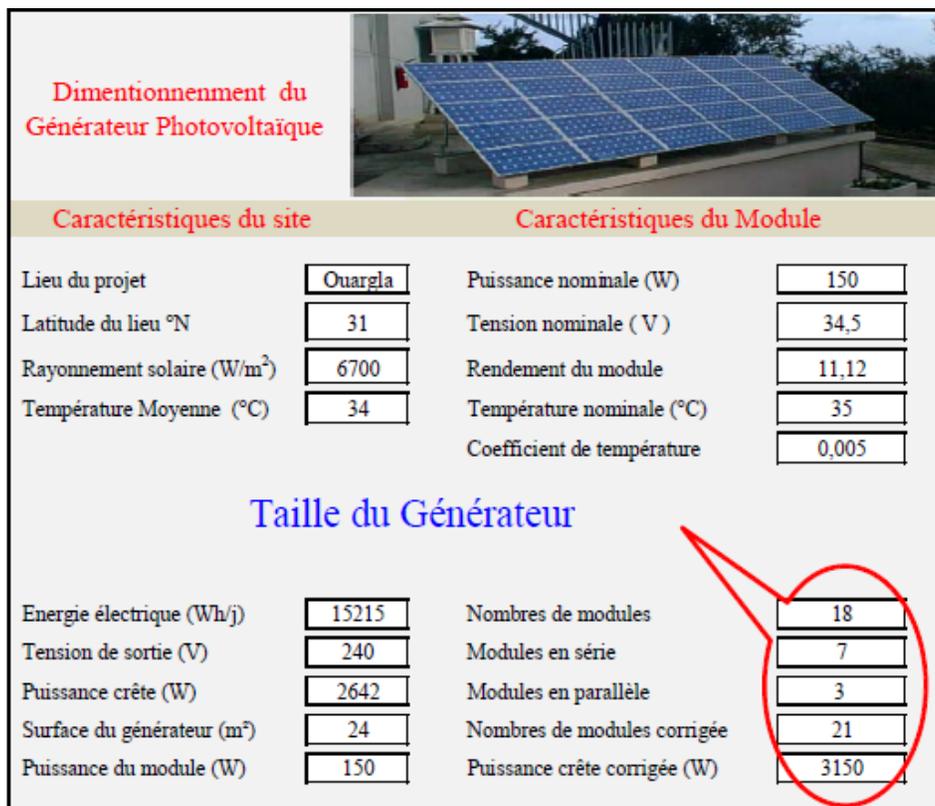


Figure (I.2) : Schéma du calcul de la taille du générateur [1].

Enfin une étude comparative technico-économique entre les deux sources énergétiques pour le pompage d'eau, groupe électrogène classique et générateur solaire photovoltaïque réalisée par Microsoft Excel a permis de mieux voir les avantages et les inconvénients de chaque source.



Figure (I.3) : Calcul du coût de m³ d'eau pompée par les deux systèmes (photovoltaïque/électrogène) [1].

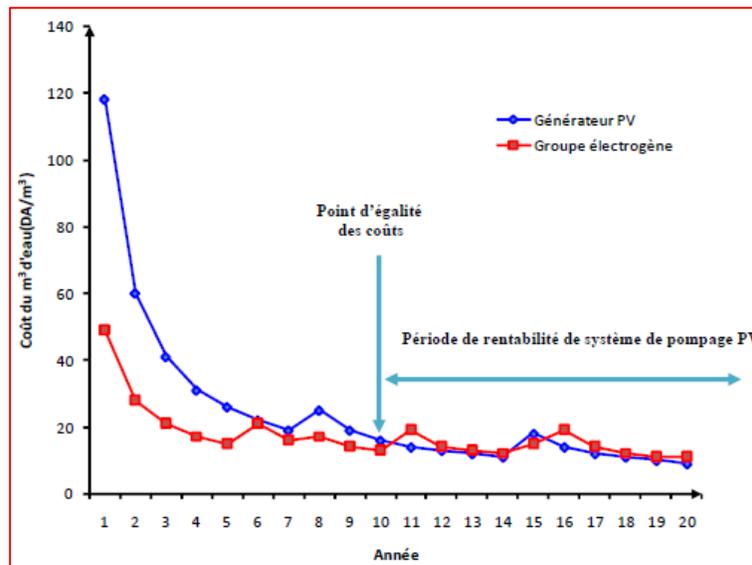


Figure (I.4) : Comparaison des coûts de m³ d'eau pompée par les deux systèmes (photovoltaïque / électrogène) en fonction du nombre d'année d'exploitation [1].

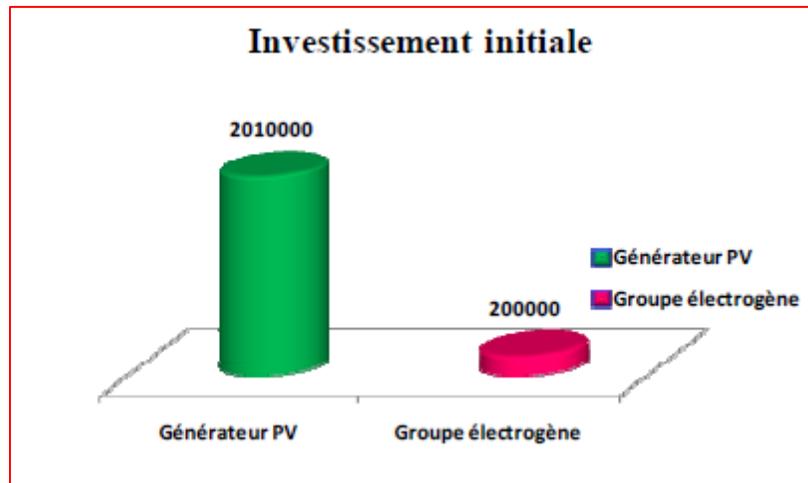


Figure (I.5) : Coût d'investissement initial des deux systèmes (photovoltaïque /électrogène) [1].

On remarque clairement d'après les figures (I.4) et (I.5) que l'investissement initial du pompage par le groupe électrogène est moins couteux que la solution photovoltaïque qui devienne rentable après environs 10 ans d'exploitation.

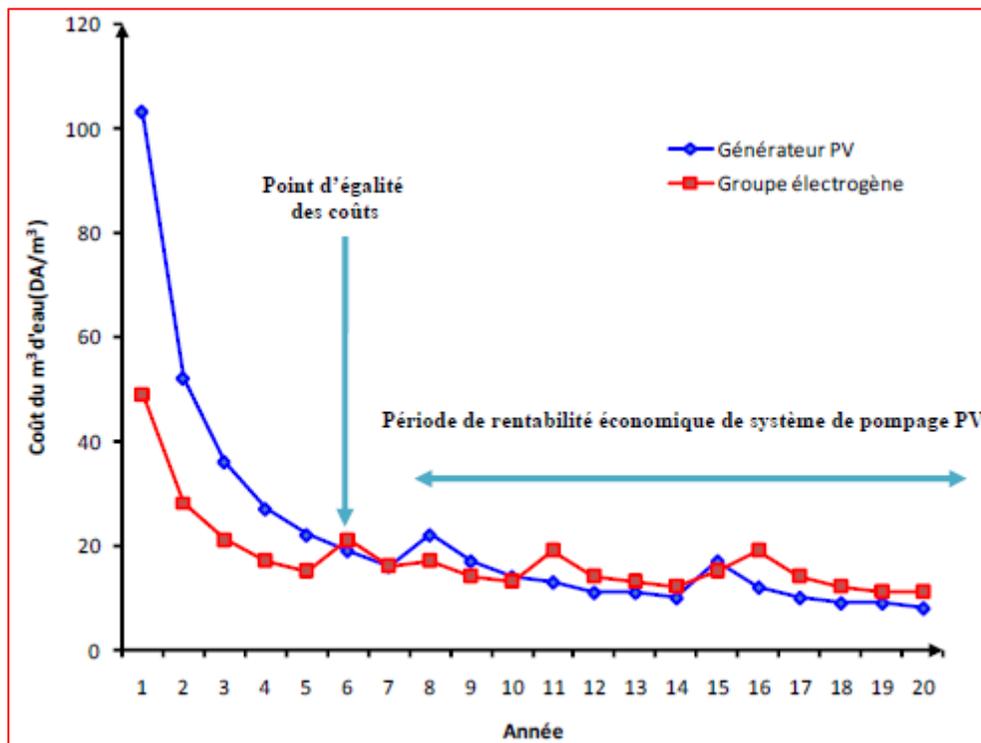


Figure (I.6) : Comparaison des coûts de m³ d'eau pompée par les deux systèmes : photovoltaïque /électrogène (réduction de 20% du coût de panneau solaire) [1].

La figure (I.6) montre que l'écart d'investissement initial devient moins important lorsque les coûts des panneaux solaires sont réduits (20% environ) et que la rentabilité du système est beaucoup plus rapide (après 6 ans environ).

La présente étude fait par **Lary Ligring [2]** en 2012 dont le thème est « Etude pour la mise en place de pompage solaire d'un champ de neuf hectares pour une irrigation goutte à goutte à Seheba au Tchad » vise à proposer une solution économiquement viable pour augmenter la production agricole. L'étude vise également à partir de cet exemple pour analyser la possibilité de généraliser cette alternative de production agricole sur tout le Tchad, puis de proposer une analyse institutionnelle pour la mise en œuvre d'une telle politique de production.

Dans un premier temps, un recensement de toutes les données techniques permettant d'évaluer le potentiel énergétique et le potentiel de production en eau (eau de surface, nappe souterraine) a été effectué sur le site. Dans un deuxième temps, une analyse et un dimensionnement de chacun des éléments constitutifs d'un système de pompage solaire photovoltaïque d'un champ de neuf hectare pour une irrigation goutte à goutte a permis d'avoir 26 modules photovoltaïques de 256W et 12 V, une pompe centrifuge PS4000 C-SJ17-4 de puissance 3.5 KW et un château de stockage d'eau de capacité 90 m³.

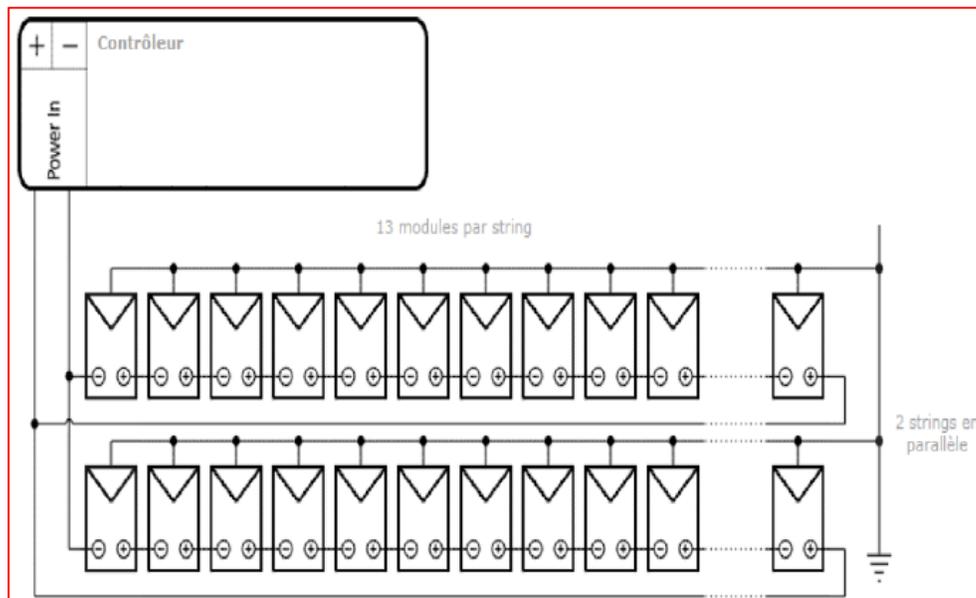


Figure (I.7) : Schéma de branchement [2].

Une analyse de la rentabilité économique de l'installation de pompage photovoltaïque par la méthode de la valeur actuelle nette (VAN) et du taux de rendement interne (TRI) montre que ce projet économiquement enrichit son investisseur.

L'étude fait par **Soula Youcef [3]** en 2016 avait pour but le dimensionnement et l'optimisation d'un système solaire de pompage d'eau afin d'améliorer ces performances. Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, la simulation et l'expérimentation d'un système de pompage au fils du soleil. Pour cela il a structuré son travail comme suit.

Dans le premier chapitre, un état de l'art sur les systèmes solaires de pompage d'eau : leurs principes de fonctionnement, leurs constitutions, leurs avantages et inconvénients...etc. Une modélisation mathématique de chaque élément constituant le système de pompage solaire a été présenté dans le deuxième chapitre. Dans le troisième chapitre, une étude des performances d'un système de pompage photovoltaïque a été entreprise par voie de la simulation et la modélisation analytique. Ils ont préliminairement validé les modèles décrit dans le deuxième chapitre, puis ils ont analysé l'influence des variations climatiques du générateur photovoltaïque.

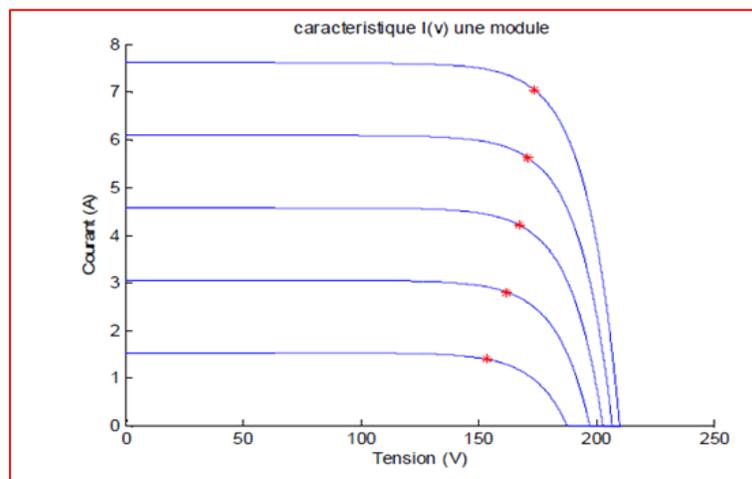


Figure (I.8) : Caractéristique I(V) du générateur PV (20 modules pour $T=25^{\circ}$) [3].

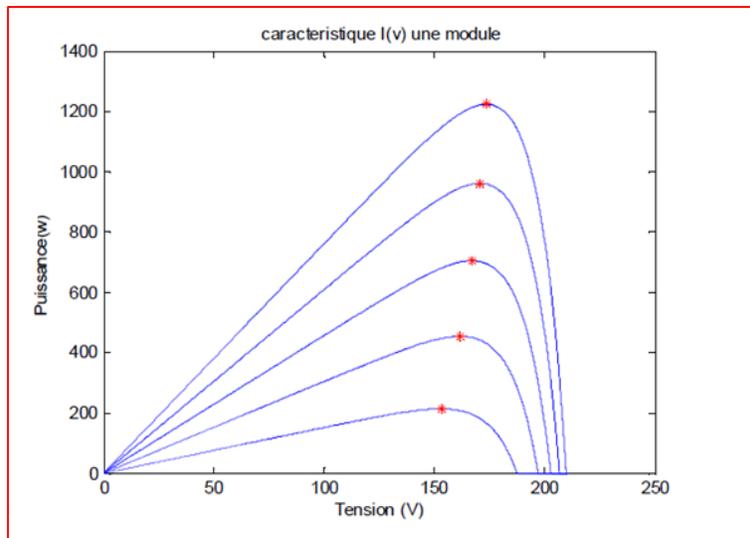


Figure (I.9) : Caractéristique P(V) du générateur PV (20 modules pour T=25°) [3].

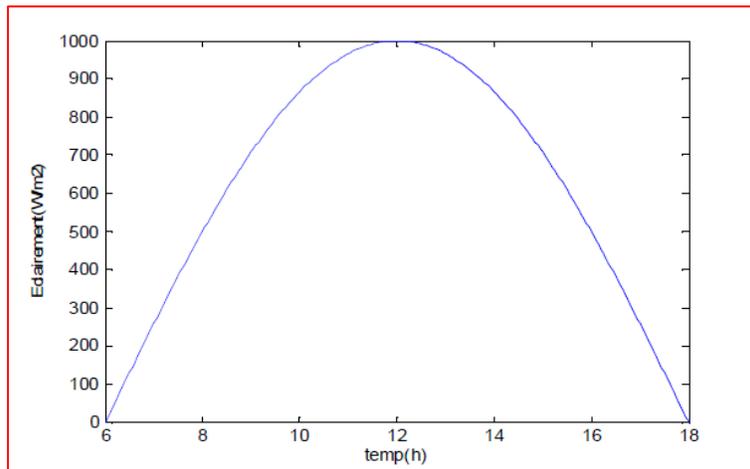


Figure (I.10) : Variation de l'éclairement durant une journée [3].

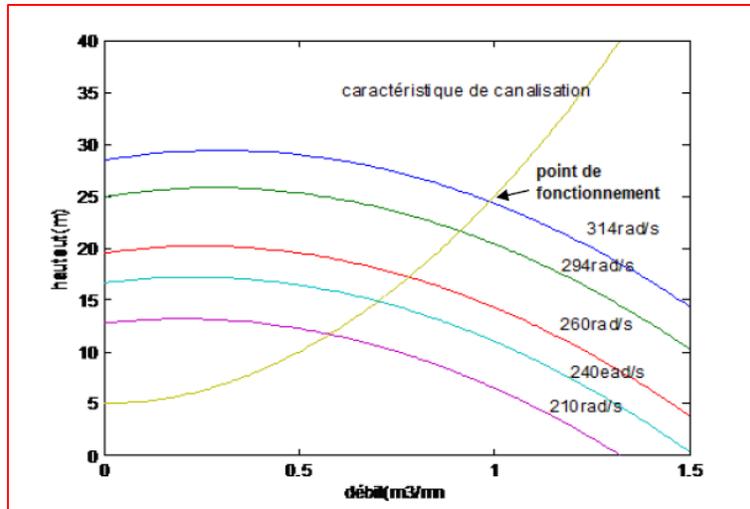


Figure (I.11) : Hauteur de la pompe en fonction du débit pour diverses vitesses de rotation [3].

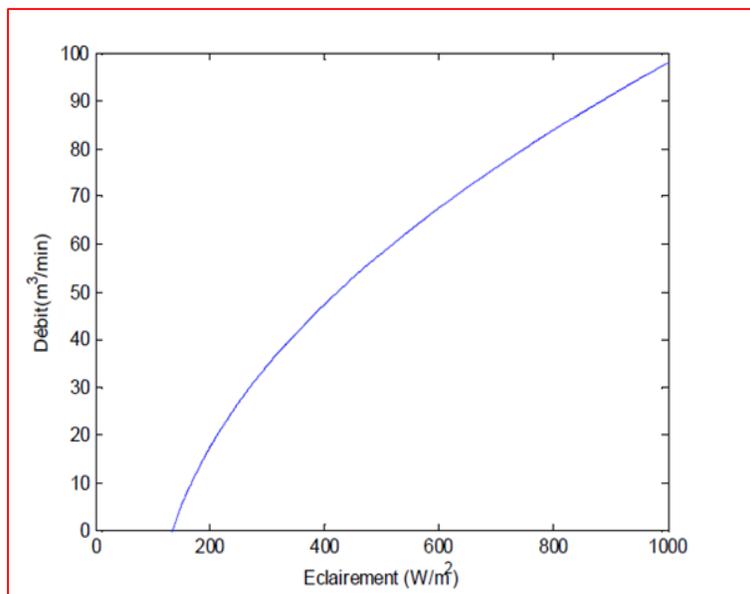


Figure (I.12) : Variation du débit de la pompe en fonction de l'éclairage [3].

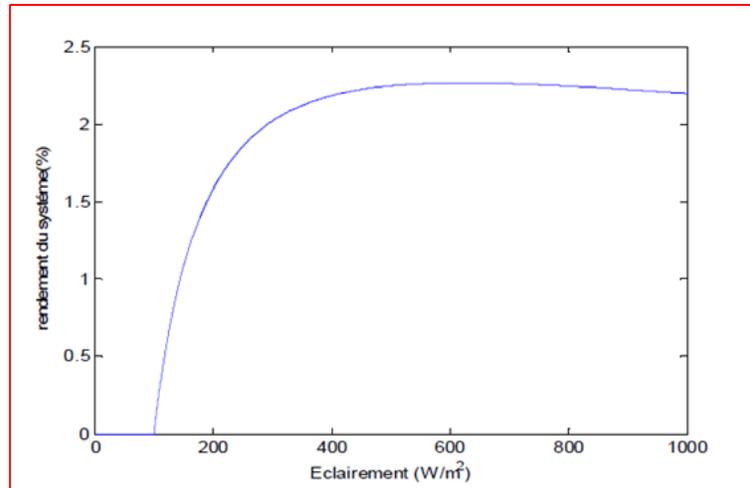


Figure (I.13) : Rendement du système en fonction de l'éclairement [3].

Ensuite, une validation expérimentale a été effectuée dans la deuxième partie du chapitre trois au sein de la centrale de recherche appliquée en énergie renouvelable à Ghardaïa. L'auteur a réalisé deux séries de mesure au cours de deux différentes journées pour examiner l'influence des conditions climatiques (éclairement et la température) sur le fonctionnement du système de pompage photovoltaïque.

Tableau (I.1) : Relevé de la première série de mesures [3].

L'heure de mesure (h)	Débit $Q(m^3/h)$	Eclairement (w/m^2)	Courant $I(A)$	tension $V(v)$	Hauteur $H(m)$
08 :43 :10	1.31	417	1.09	225	20
09 :43 :10	2.37	625	1.79	213	20
10 :43 :10	3.05	789	2.29	203	20
11 :43 :10	3.33	893	2.49	196	20
12 :43 :10	5.90	925	4.68	204	20
13 :43 :10	5.88	893	5.68	203	20
14 :43 :10	5.59	766	4.38	197	20
15 :43 :10	4.74	603	3.48	201	20
16 :43 :30	3.78	475	2.59	208	20

Tableau (I.2) : Relevé de la deuxième série de mesures [3].

L'heure de mesure (h)	Débit Q(m ³ /h)	Eclairement (w/m ²)	Courant I(A)	tension V(v)	Hauteur H(m)
08 :45 :56	3.22	453	1.29	207	10
09 :45 :56	4.04	616	1.79	205	10
10 :45 :56	0.91	253	0.80	181	10
11 :45 :56	5.73	1083	2.98	199	10
12 :45 :56	5.14	947	2.69	189	10
13 :45 :56	4.95	894	2.59	188	10
14 :45 :56	0.73	206	0.59	195	10
15 :45 :56	3.59	544	1.59	193	10
16 :45 :56	1.65	287	0.80	196	10

Lafia Seidou Imorou [4] en 2017, le présent travail traite de l'étude et le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du Bénin. Il s'inscrit dans l'optique de contribuer à l'amélioration des conditions d'accès à l'eau potable en milieu rural. La présente étude cible la localité d'ADJAKPATA comme lieu pilote du projet. En effet, dans cette localité l'hydraulique villageoise mise en place pour l'approvisionnement en eau potable des populations a un faible débit d'exploitation et n'arrive pas à satisfaire la demande en eau de la population, malgré la disponibilité de l'eau dans le forage.

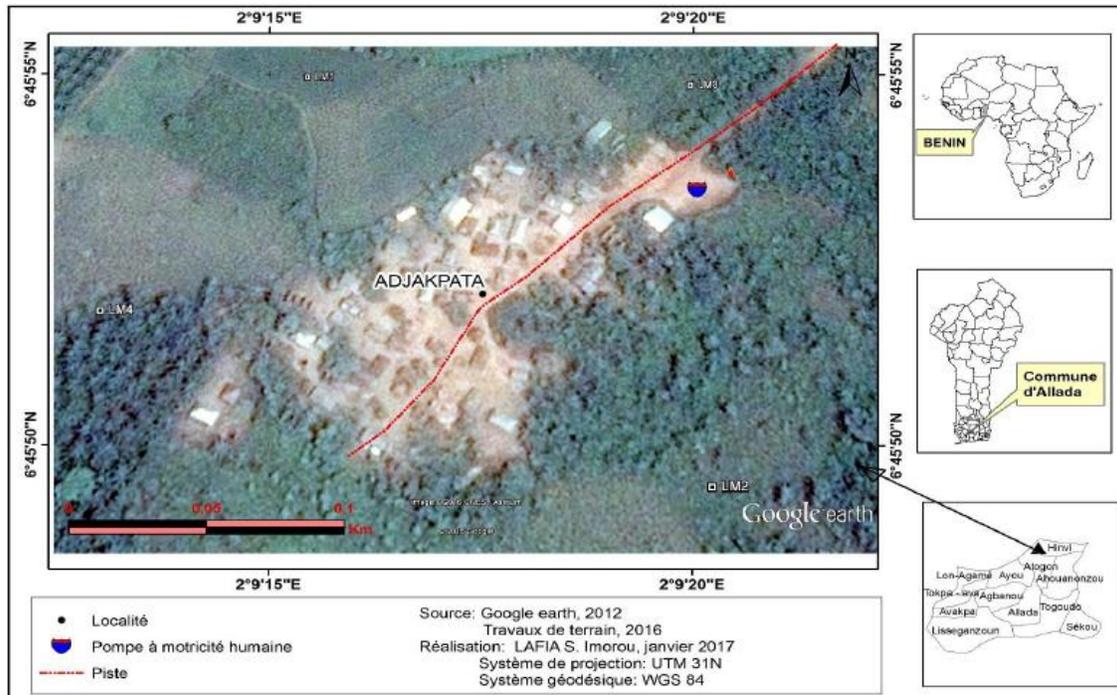


Figure (I.14) : Localisation de la localité de ADJAKPATA [4].

Pour ce faire, ils ont procédé dans un premier temps à la recherche documentaire sur le thème. Ensuite, ils ont réalisé une enquête et une interview auprès de la collectivité locale de gestion du système d'hydraulique villageois de la localité afin de collecter les données indispensables pour l'évaluation des besoins en eau et la prise en compte de l'avis des populations dans le cadre de la réalisation du système de pompage photovoltaïque. Ils ont présenté par la suite la démarche analytique adoptée pour le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque et du réseau d'adduction et de distribution d'eau pour la localité de Adjakpata.

L'analyse économique a permis d'évaluer les coûts inhérents de l'installation du système de pompage par l'énergie solaire photovoltaïque. Les principaux coûts évalués sont : le coût d'investissement, le coût de renouvellement, les coûts d'entretien et de maintenance

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



Figure (I.15) : Photo de la pompe à motricité humaine de ADJAKPATA [4].

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

Figure (I.16) : Coût du mètre cube d'eau [4].

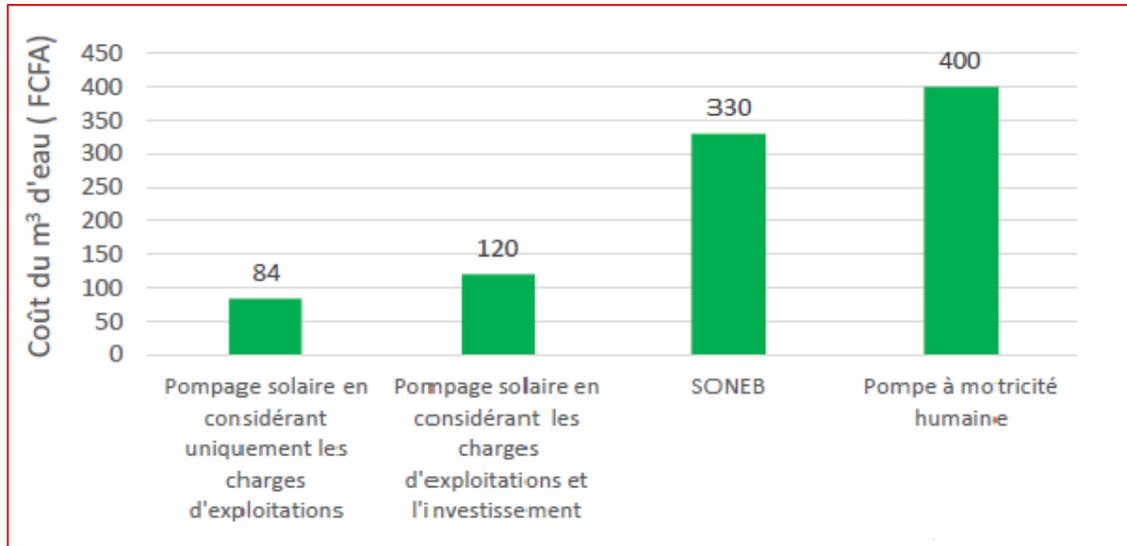


Figure (I.17) : Coût du mètre cube d'eau dû à l'exploitation [4].

L'étude technico-économique présentée par **Hadjou Smir Hachmi et Ghogueur Amine [5]** en 2018 dont le but est l'amélioration de la production et de la qualité des dattes d'une part et d'autre part l'économie d'énergie électrique et la réduction des gaz à effet de serre avec l'utilisation de pompage solaire.

Dans le premier chapitre, l'auteur a abordé quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des systèmes photovoltaïques. Dans le deuxième chapitre, une présentation et définition des plusieurs paramètres climatiques de la zone d'étude (exploitation de l'ITAS situé dans la ville de Ouargla) tels que température, précipitation, insolation, vent, évaporation ... qui sont nécessaires à la conception et au dimensionnement des systèmes de pompage solaire et d'irrigation de palmier dattier. Dans le même contexte, l'importance du taux de salinité (du sol et de l'eau) de la région révélée par les analyses physicochimiques a conduit d'ajouter une station de filtration en tête du système d'irrigation. Dans le troisième chapitre, le fort ensoleillement de la zone d'étude a conduit de choisir parmi les différentes techniques de pompage solaire et d'irrigation un pompage solaire au fils du soleil et une irrigation de goutte à goutte ce qui a permis de dimensionner et concevoir ce système dans le dernier chapitre. Ils ont par la suite fait une étude économique du projet pour vérifier la rentabilité du système de pompage solaire photovoltaïque comparé avec les énergies conventionnelles. Les résultats montrent que le système de pompage

solaire reviendra à long terme (20 ans) beaucoup moins cher que le pompage électrique classique (le réseau sonal gaz ou avec gasoil).

Le travail présenté dans cet article par **A. Djafour et M.S. Aida [6]** fait l'objet d'une étude d'un système de pompage photovoltaïque qui peut être utilisé pour l'irrigation dans une région saharienne (Ouargla-Algérie). Pour la réalisation de ce travail ils ont considéré l'interaction de quatre sous-systèmes : le climat, les caractéristiques des plantes, les caractéristiques du sol et le système photovoltaïque.

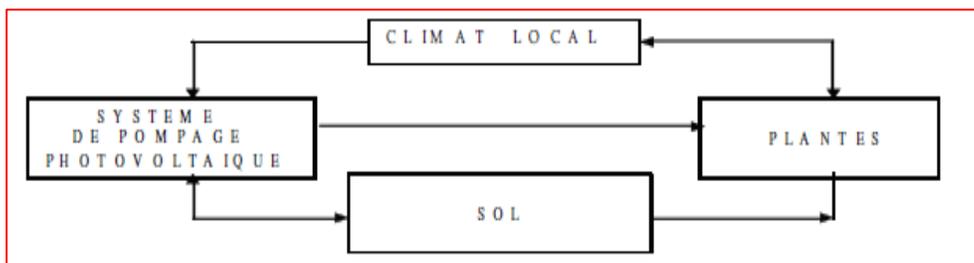


Figure (I.18) : La configuration du système d'irrigation [6].

Pour arriver à ce but ils ont procédé leur travail comme suit : premièrement, ils ont calculé l'irradiation solaire moyenne journalière sur le plan des modules à partir des données de l'insolation moyenne mensuelle pour une période de 7 ans, deuxièmement ils ont déterminé les besoins journaliers en eau des cultures (les palmiers dattiers) avec l'utilisation des techniques modernes d'irrigation.

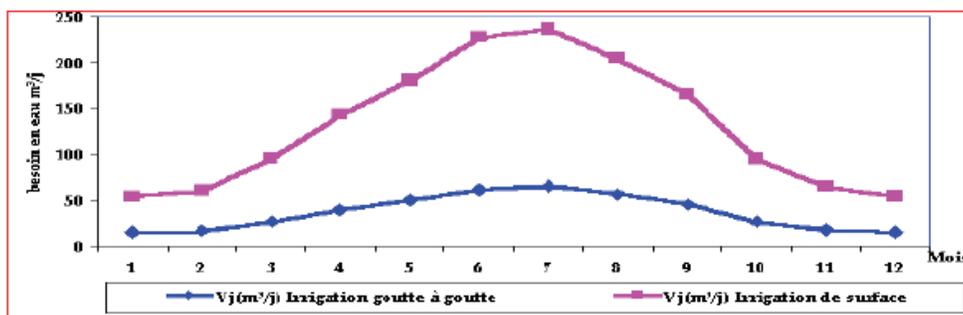


Figure (I.19) : Besoin en eau d'irrigation par hectare de palmier dattier [6].

Enfin, ils ont choisi la configuration du système de pompage solaire et dimensionné le générateur photovoltaïque.

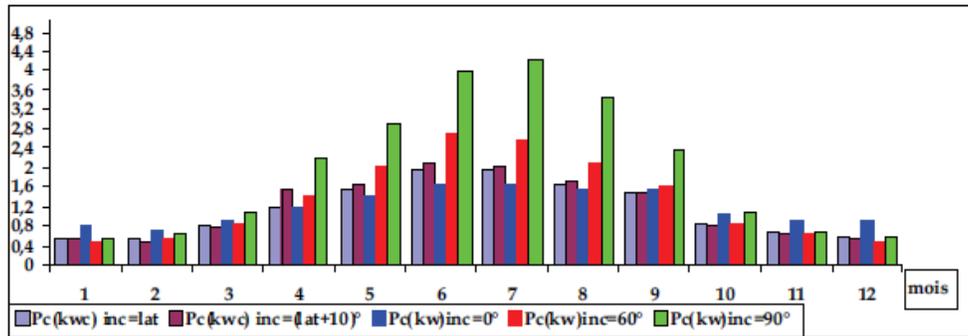


Figure (I.20) : La puissance crête pour chaque mois avec les différentes inclinaisons [6].

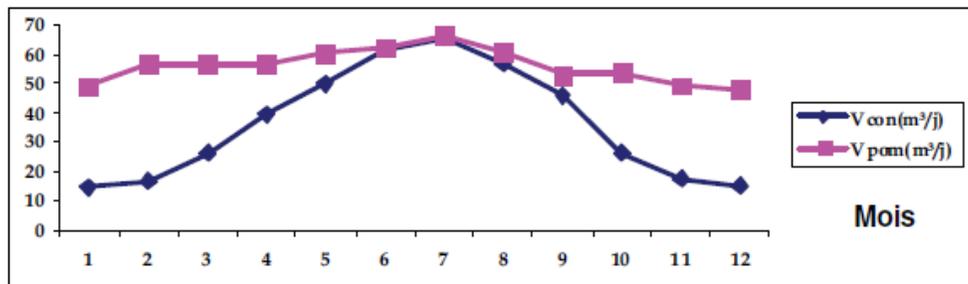


Figure (I.21) : Volume d'eau pompée et volume d'eau consommée [6].

I.3.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une recherche bibliographique sur le système de pompage photovoltaïque. Nous avons présenté quelques travaux, articles et actualités contenant différentes applications de pompage photovoltaïque et les techniques utilisées.

Chapitre II : Généralité

II.1. Introduction

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant de l'énergie solaire pour l'irrigation. La performance du pompage photovoltaïque dépend des caractéristiques du site (ensoleillement, température, obstacles géographiques), du rendement des modules photovoltaïques, mais aussi des caractéristiques des autres équipements (onduleur, moteur, pompe... etc.). Dans ce chapitre nous allons citer les différents types des systèmes photovoltaïques et les différentes méthodes de pompage solaire d'eau, ensuite nous allons présenter tous les éléments théoriques de notre installation de pompage photovoltaïque et d'irrigation.

II.2. Différents types de système photovoltaïque

Il existe trois types des systèmes photovoltaïques : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau.

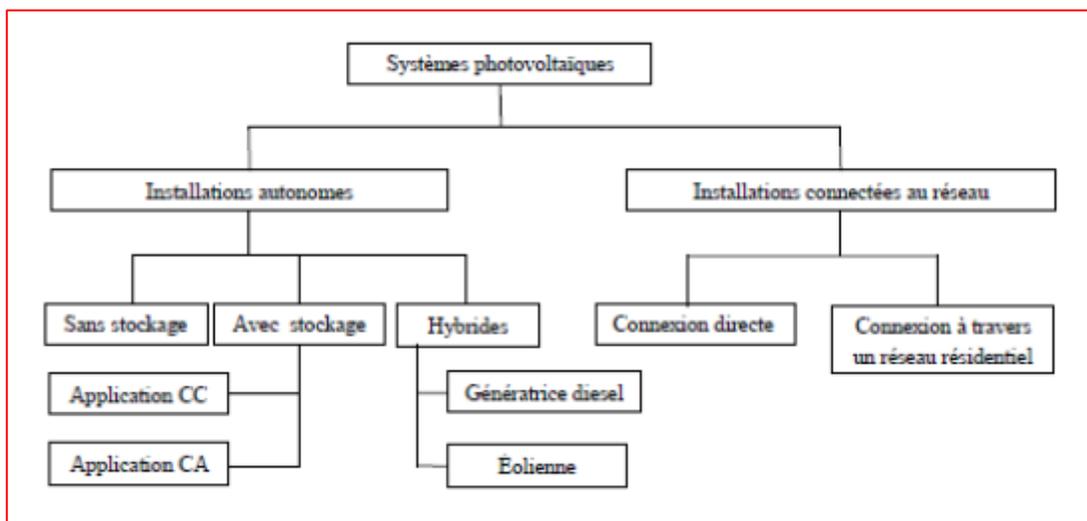


Figure (II.1) : Classification des systèmes photovoltaïques [7].

II.2.1. Système autonome (off grid)

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau [8].

Les deux types de système photovoltaïques autonomes sont :

II.2.1.1. Système autonome avec stockage

Système autonome avec stockage c'est le système le plus répandu. Le composant de stockage permet d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe divers composants de stockage, dont les plus répandus, les batteries électrochimiques [8].

II .2.1.2. Système autonome sans stockage

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour le démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de rayonnement solaire. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de système autonome ou le stockage de l'eau dans réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique [8].

II.2.2. Système photovoltaïque raccordé au réseaux (on grid)

Ces systèmes permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Dans ce type de système les accumulateurs ne sont pas nécessaires parce que l'énergie est emmagasinée dans le réseau même.

Les systèmes raccordés au réseau sont rarement économiques car le coût actuel de la technologie photovoltaïque est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle [9].

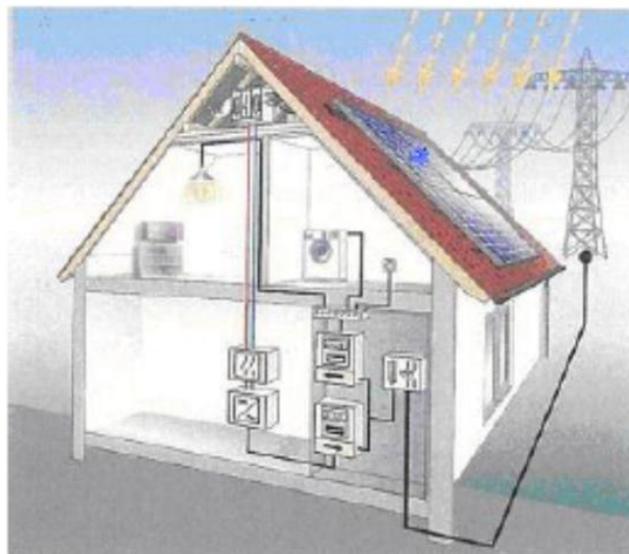


Figure (II.2) : Système photovoltaïque connecté au réseau [7].

II.2.3. Système hybride

Les systèmes hybrides sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. Ils sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, dans le cas de l'absence de l'éclairage solaire ou pour diminuer l'investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs [8].

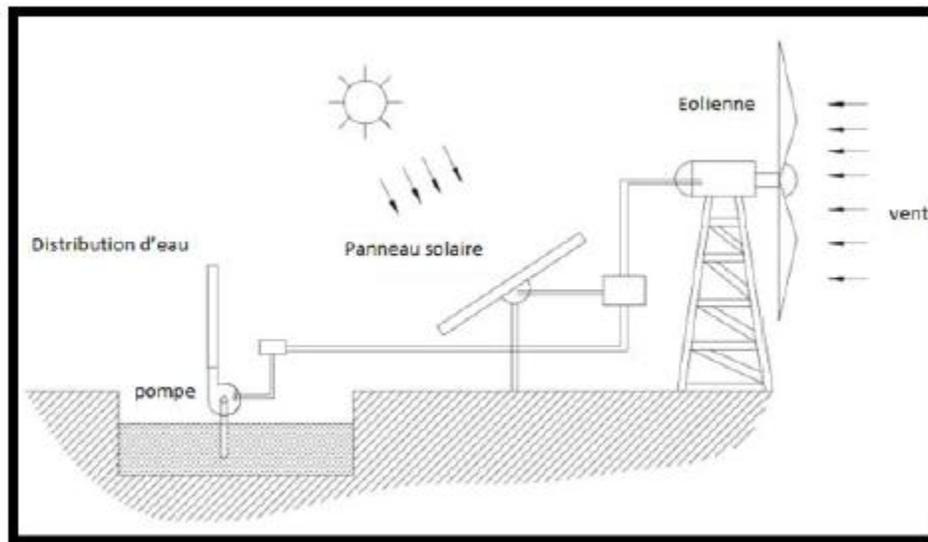


Figure (II.3) : Système de pompage hybride éolien-photovoltaïque [10].

II.3. Différentes méthodes de pompage photovoltaïque

Le pompage photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie :

II.3.1. Pompage au fil du soleil

Dans cette technique c'est l'eau pompée qui est 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 bien déterminée du sol pour qu'elle serait ensuite distribuée par gravité au besoin.

Le réservoir d'eau peut être construit et réparé (il ne demande pas un grand entretien) localement. La capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours selon les modèles [11].

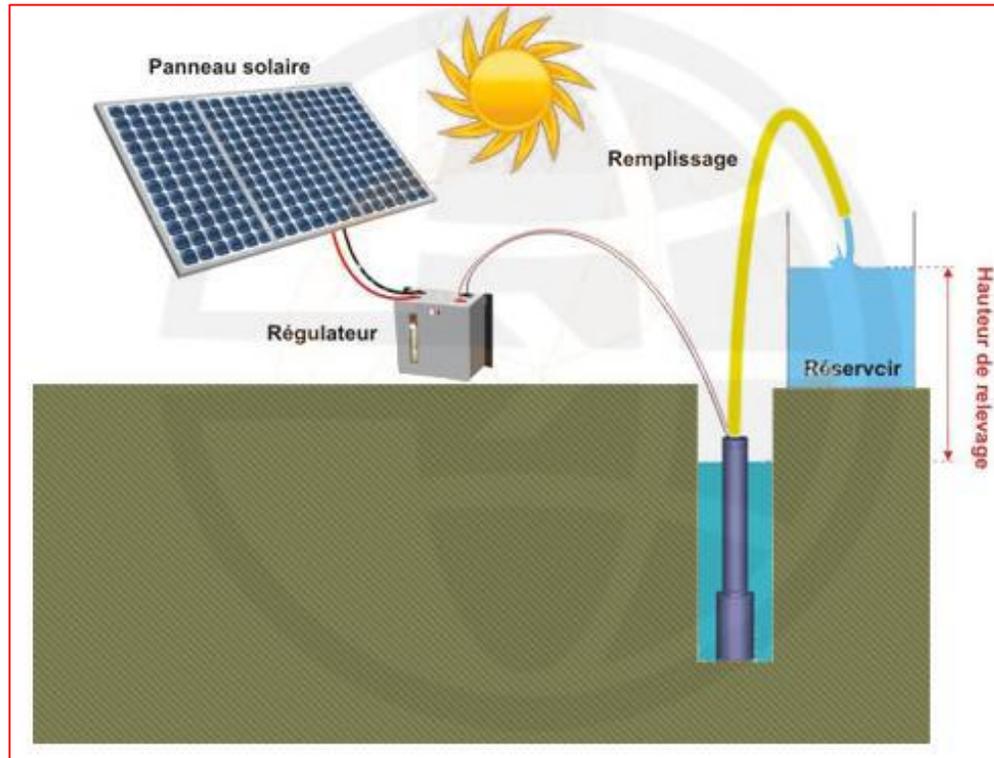


Figure (II.4) : Pompage au fil du soleil (stockage de l'eau) [11].

II.3.2. Pompage avec batteries

Cette technique consiste à utiliser un stockage d'énergie via des batteries. Ces batteries stockent l'énergie produite par les cellules photovoltaïques lors des périodes d'ensoleillement afin de pouvoir restituer cette énergie pour pomper l'eau en temps voulu. Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin [4].

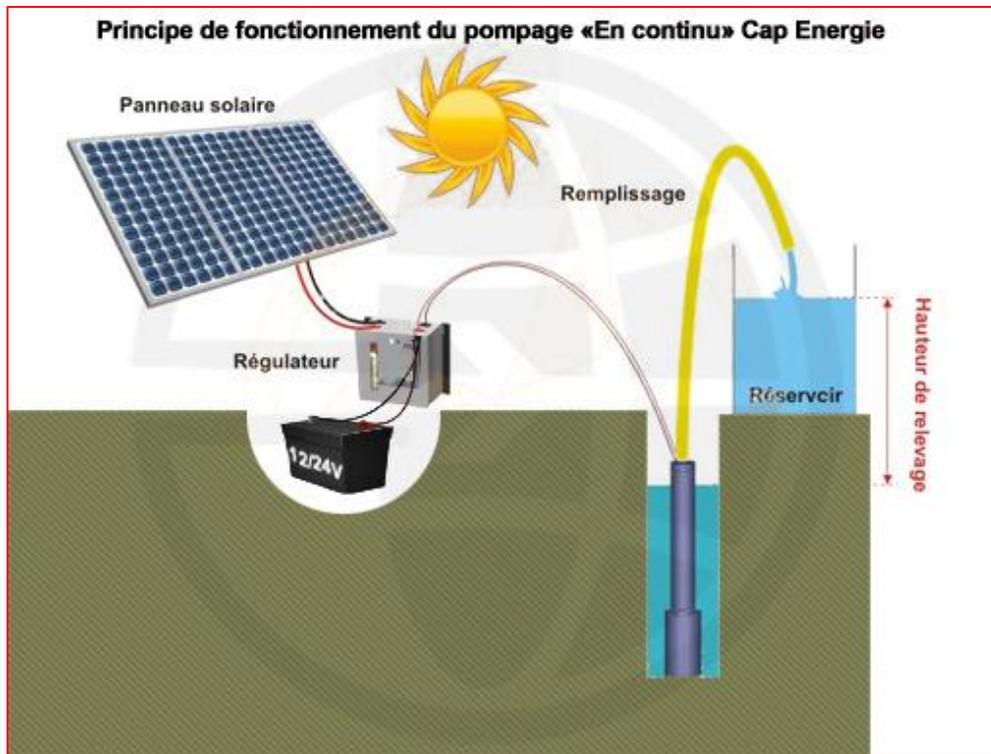


Figure (II.5) : Pompage avec batteries (stockage électrique) [11].

Tableau (II.1) : Les avantages et les inconvénients des pompes au fils du soleil et avec batteries [4].

Méthodes de pompage	Avantages	Inconvénients
Pompage au fil du soleil	<ul style="list-style-type: none"> • Economie du coût des batteries et par conséquent leur maintenance • Système PV plus simple, plus fiable et moins coûteux • Meilleur rendement énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> • Perte d'énergie au début et à la fin de la journée • Le débit de la pompe n'est pas constant et le rabattement du forage peut-être trop élevé durant certaines périodes de la journée
	<ul style="list-style-type: none"> • Débit de la pompe régulier et à pression fixe 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé d'entretien et maintenance des batteries

Pompage avec batterie	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de pomper l'eau lorsque le soleil est absent 	<ul style="list-style-type: none"> • Changement des batteries tous 5 à 7 ans • Les batteries introduisent un certain degré de perte de rendement d'environ 20 % à 30% de la production d'énergie • Coût élevé du système PV
------------------------------	--	--

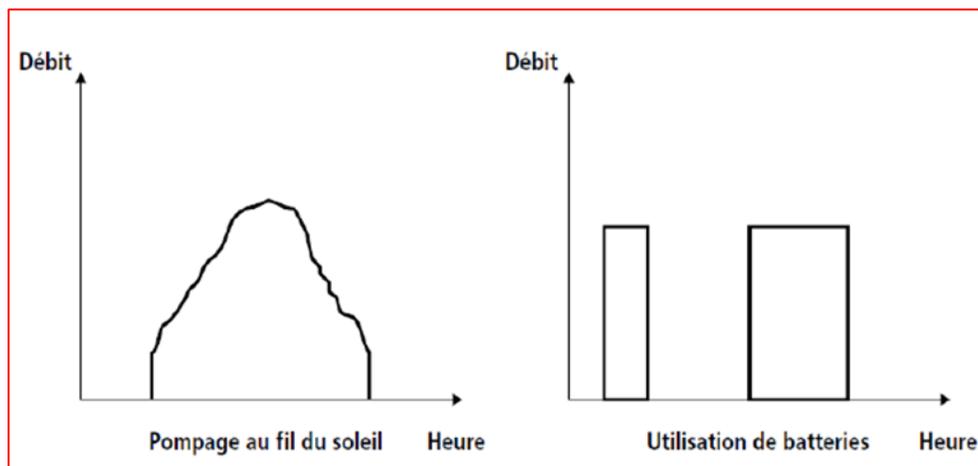


Figure (II.6) : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batteries [2].

II.4. Etude des différents composants du système de pompage photovoltaïque

Le système de pompage photovoltaïque est généralement composé de [4] :

- Le générateur photovoltaïque ;
- Le groupe motopompe ;
- L'électronique de commande et de contrôle ;
- La partie stockage ;

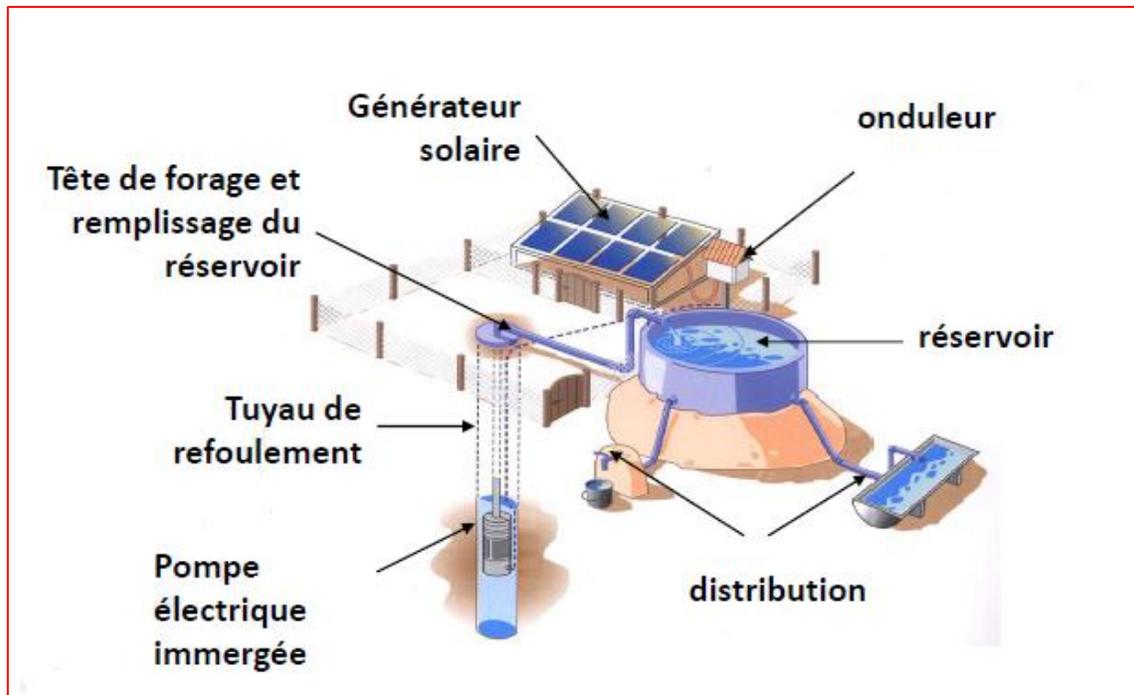


Figure (II.7) : Installation type [12].

II.4.1. Le générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque (GPV) est une combinaison de :

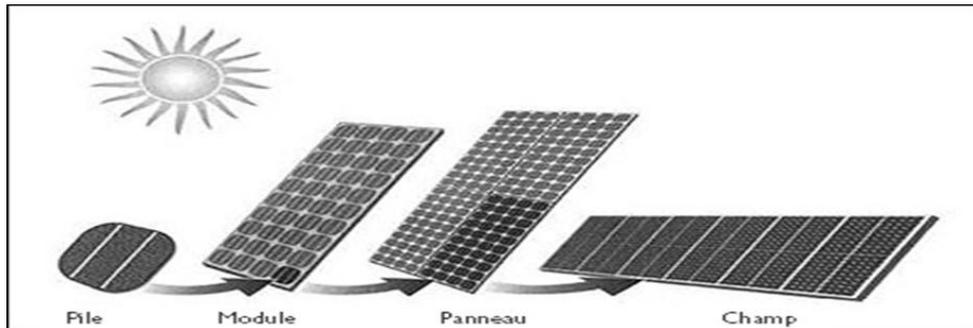


Figure (II.8) : Composants d'un champ du module photovoltaïque [13].

II.4.1.1. La cellule

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui convertissent les irradiations provenant du soleil en électricité à courant continu. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs [4].

II.4.1.1.1. Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule [14].

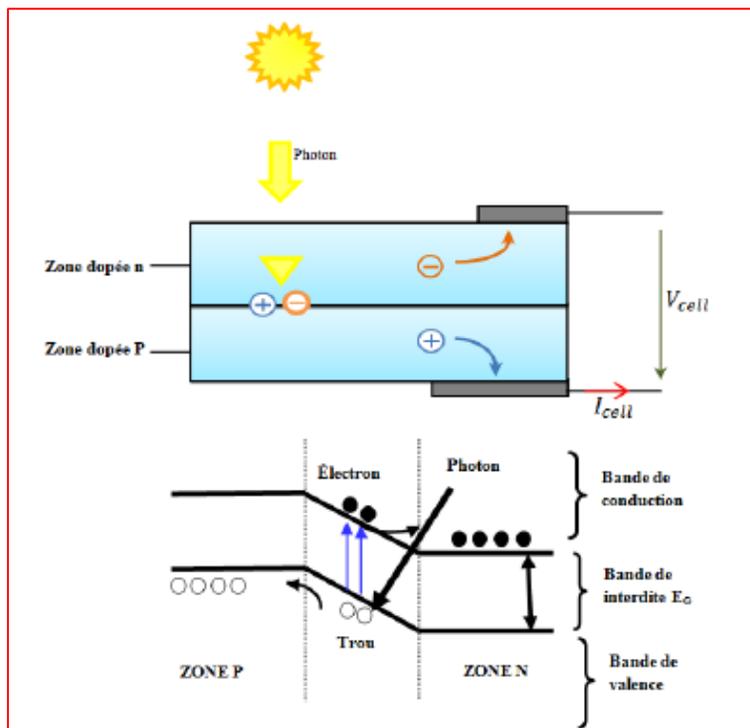


Figure (II.9) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [15].

II.4.1.1.2. Technologies des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8% et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent [16].

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

Tableau (II.2) : Caractéristiques des différentes technologies des cellules PV [4], [17].

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

		se stabilise après quelques mois		
Tellure de Cadmium (Cdte)	8% (16% en laboratoire)	<ul style="list-style-type: none"> • Absorbe 90% des photons incidents • Très polluant 		
Arséniure de Gallium (GaAs)	18% à 20% (27.5% en laboratoire)	Lourd : fissure facilement	Système de concentrateurs aérospatiaux (satellites)	
Cellules organiques	$\leq 5\%$	<ul style="list-style-type: none"> • Faible coût de fabrication • Rendement encore trop bas 		

II.4.1.2. Le module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est d'abord un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Par définition c'est un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique suffisante lors de son exposition à la lumière. Il est, en lui-même un système complexe composé de cellules photovoltaïques, d'intercalaires, de diodes by-pass, de connecteurs, d'une boîte de jonction, de câbles, d'un verre de protection sur la face avant du module et d'un verre ou d'un film en fluorure polyvinyle sur la face arrière du module [18].

II.4.1.2.1. Les caractéristiques d'un module photovoltaïque

- **La puissance crête P_c** : C'est la puissance maximale produite par un module photovoltaïque dans les conditions standard : ensoleillement de 1000W/m^2 à l'horizontale, température ambiante 25°C , masse d'air optique (AM) égale à 1.5
- **La caractéristique (I-V)** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension.
- **La tension à circuit ouvert V_{oc}** : Tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairage 'plein soleil'
- **Le courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par le module en court-circuit pour un éclairage 'plein soleil'
- **Le point de fonctionnement optimum (U_{opt}, I_{opt})** : Point où la puissance est maximale ;
 $P_m = U_{opt} \times I_{opt}$
- **Le rendement maximal** : Rapport entre la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Le facteur de forme** : $f = P_m \times V_{oc} \times I_{cc}$ [4].

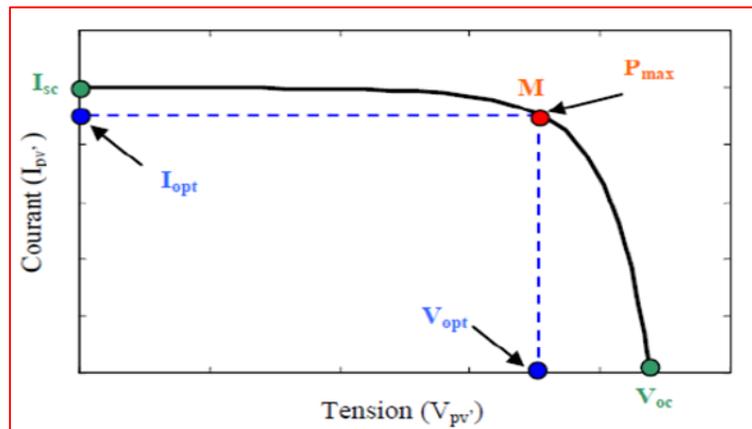


Figure (II.10) : Courbe courant-tension d'un module photovoltaïque [19].

II.4.1.3. Le panneau solaire photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison spécifique [20].

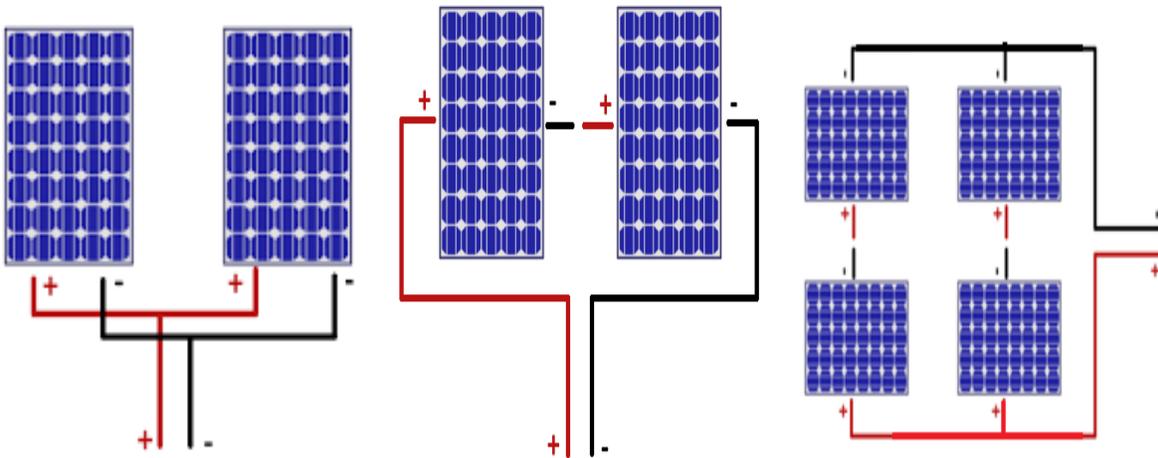
II.4.1.4. Le champ photovoltaïque : est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands [20].

➤ **Association en parallèle, série et mixte**

Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du générateur, en associe ' N_p ' modules en parallèle.

Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur, en associe ' N_s ' modules en série.

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelque MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de les monter en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [14].



Figure(II.11) : Association en parallèle des panneaux [9].

Figure(II.12) : Association en série des panneaux [9].

Figure (II.13) : Association mixte des panneaux [9].

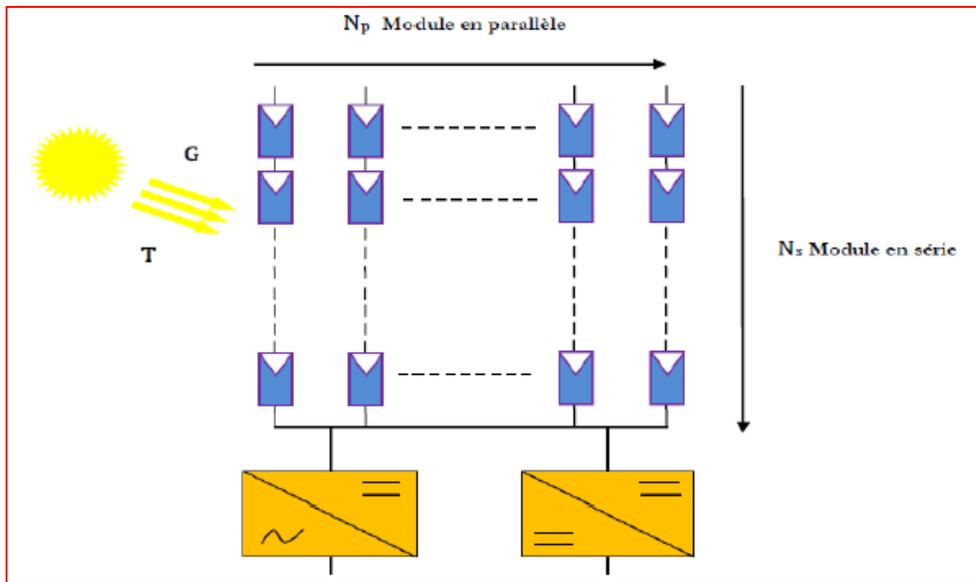


Figure (II.14) : Groupement de N_s modules en série et N_p en parallèle [19].

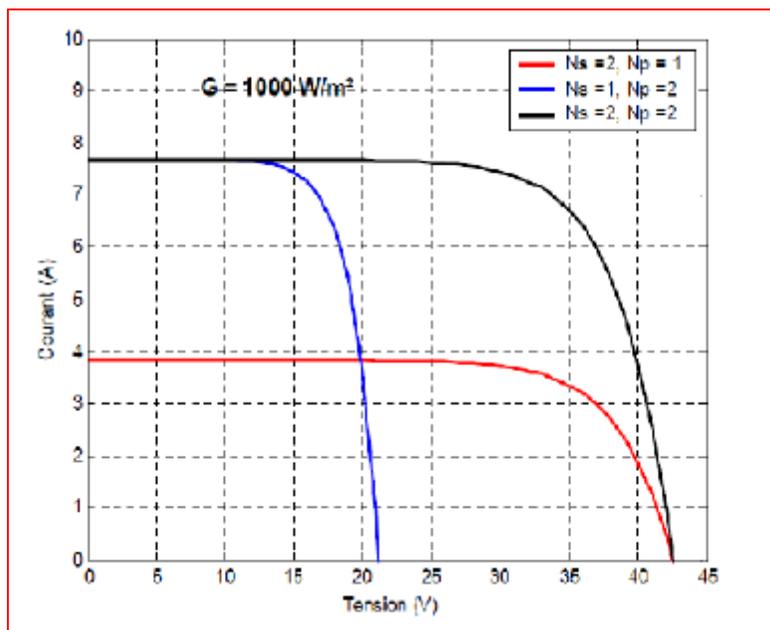


Figure (II.15) : Groupement des panneaux [14].

➤ Facteur de limitation du rendement

▪ Effet de l'ensoleillement

L'augmentation de l'éclairement se traduit par un déplacement de la caractéristique $I=F(V)$ suivant l'axe des courants pour une température constante [21].

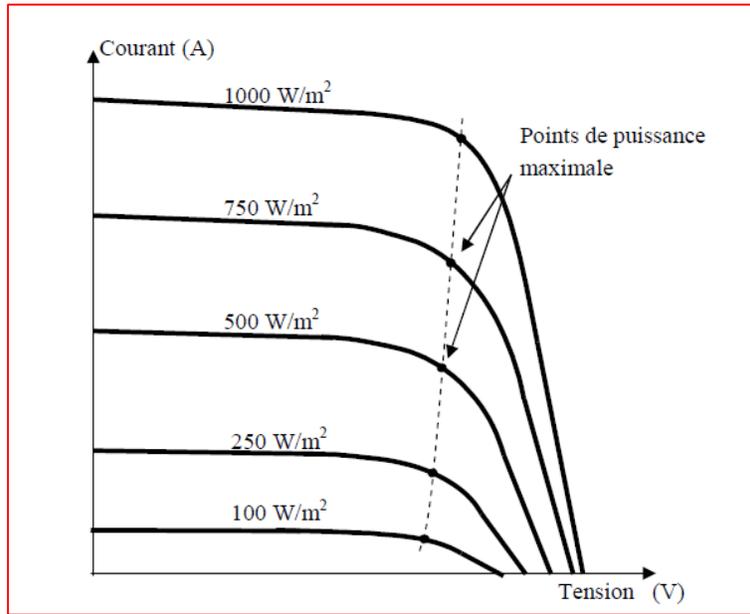


Figure (II.16) : Influence de l'ensoleillement sur la courbe $I(V)$ [22].

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'éclairement. Par contre, la tension à circuit ouvert varie très peu en fonction de l'éclairement [21].

▪ Effet de la température

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température [23].

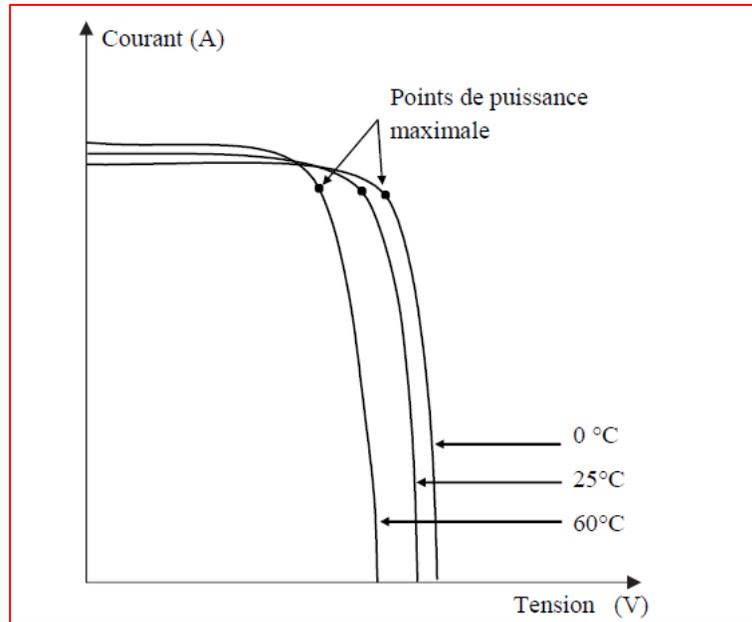


Figure (II.17) : Influence de la température sur la courbe I(V) [22].

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension à circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue [21].

▪ Effet d'ombrage sur les modules

Le problème majeur de mise en série est l'ombrage partiel, lorsque l'un des panneaux se retrouve à l'ombre, cette partie sous-irradiée du module peut se trouver polarisée en inverse et devenir réceptrice. Cet échauffement local peut donner lieu à des « points chauds » (hot spot en anglais) elle va s'échauffer ceci provoque l'augmentation de la tension avec un blocage de la circulation du courant produit par les autres modules et risque de se détruire. Pour éviter ce problème et protéger les cellules, on place des diodes en série appelé diode « by-pass » de façon à court-circuiter les cellules ombrées [24].

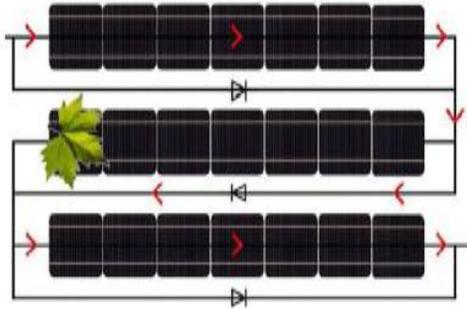


Figure (II.18) : Effet d'ombrage sur les cellules [24].



Figure (II.19) : Défaut des points chauds [24].

- **Effet d'ombrage sur l'énergie totale d'un champ photovoltaïque**

Dans la conception des projets de panneaux photovoltaïques pour produire l'électricité, l'ombre est le plus grand ennemi. Si un coin du panneau solaire est ombragé, ce problème peut perdre de l'énergie, et peut même diminuer cette énergie à la moitié. Donc, il faut calculer la distance entre les panneaux avec soin afin de s'assurer que dans les pires conditions les panneaux ne seront pas couverts les uns des autres. [24]

II.4.2. Le groupe motopompe

II.4.2.1. La pompe

Une pompe est une machine servant à véhiculer un fluide qui peut être de l'eau ou quelconque (pétrole, huile ...) en l'aspirant pour le refouler à une certaine pression [23].

La classification des pompes peut se faire selon différents critères : conception de la pompe, sa position dans le système et le type du moteur utilisé.

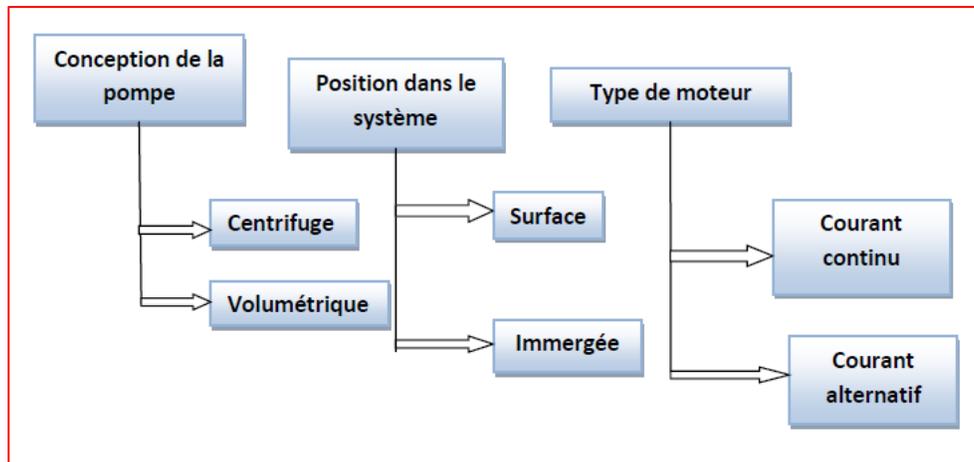


Figure (II.20) : Classification des pompes [25].

II.4.2.1.1. Classification selon la conception de la pompe

a) Les pompes centrifuges

Transmettent l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinée avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression [4].

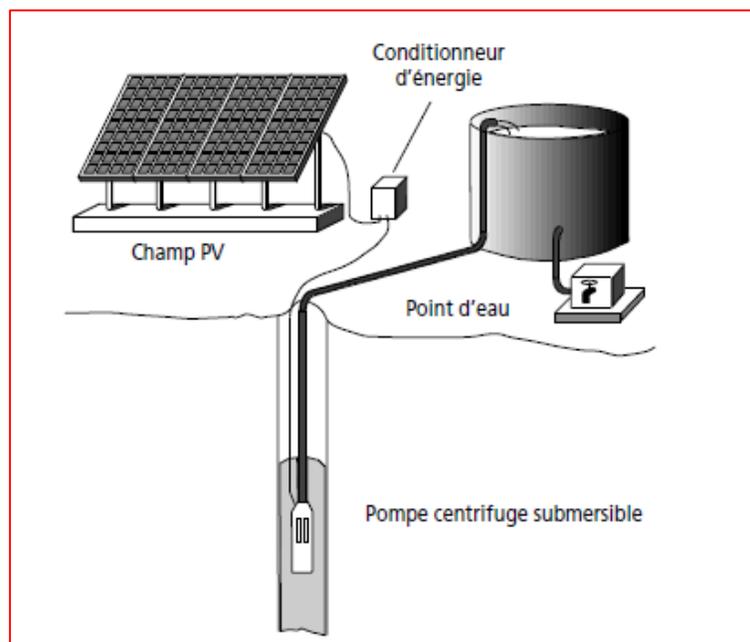


Figure (II.21) : Pompe submersible centrifuge à étages multiples [26].

b) Les pompes volumétriques

Transmettent l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de va et vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. Ces pompes aspirent le fluide par l'accroissement d'un volume puis refoulent par diminution de ce même volume [4].

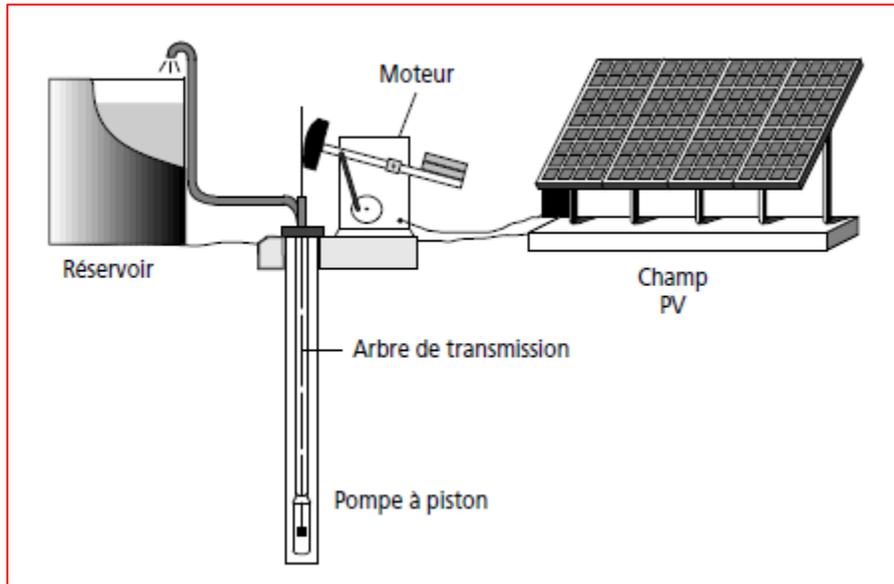


Figure (II.22) : Pompe à piston (Jack pump) pour de grandes profondeurs et de petits débits [26].

Tableau (II.3) : Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges [4].

Les pompes volumétriques	Les pompes centrifuges
<ul style="list-style-type: none"> • Faible débit et une grande hauteur manométrique totale • Le débit et la puissance absorbée sont proportionnels à la vitesse • Le couple est fonction de la <i>HMT</i> • Le couple de démarrage est de 3 à 5 fois le couple nominal 	<ul style="list-style-type: none"> • Grand débit • Le débit est proportionnel à la vitesse lorsqu'elle atteint une certaine valeur • La puissance absorbée est proportionnelle au cube de la vitesse • Le couple est fonction du carré de la vitesse

	<ul style="list-style-type: none"> • La pression est proportionnelle à la vitesse • Couple de démarrage est quasiment nul qui est intéressant dans l'application du système photovoltaïques car la pompe peut tourner à un faible ensoleillement et le moteur peut avoir une vitesse de rotation rapide, à peu constant
--	---

II.4.2.1.2. Classification selon la position de la pompe

a) Les pompes de surface

Le terme surface définit la position d'une pompe par rapport au liquide à pomper. Elle est dite pompe de surface, car prévue pour être posée en dehors du liquide à aspirer [25].

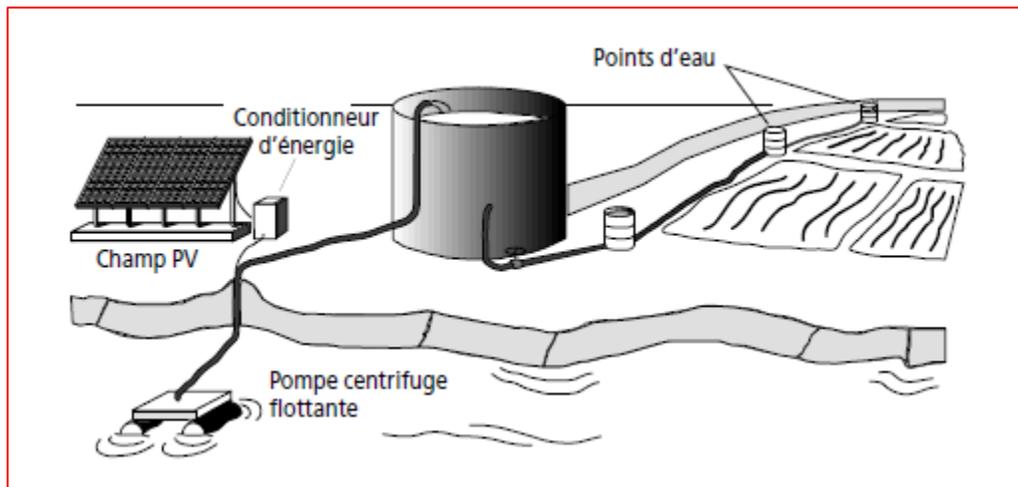


Figure (II.23) : Pompe de surface [26].

b) Les pompes immergées

Les pompes de refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface. La transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur [25].

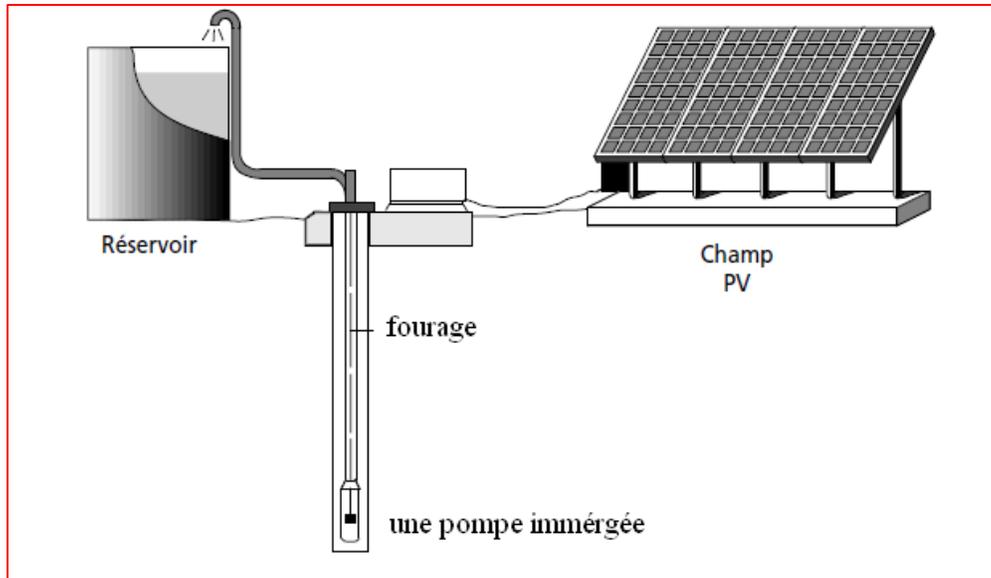


Figure (II.24) : Pompe immergée [25].

II .4.2.2. Le moteur

Le moteur d'un groupe électropompe converti l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans le cas où le moteur est à courant alternatif, un convertisseur électronique appelé onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant du générateur photovoltaïque en courant alternatif [17].

a) Moteur à courant continu

Un moteur à courant continu est une machine destinée à transformer l'énergie électrique disponible sous forme de tension et de courant continus, ou tout au moins unidirectionnels, en énergie mécanique. Comme toute machine tournante, le moteur à courant continu comporte une partie fixe, le stator et une partie mobile, le rotor, séparé par un entrefer. Le stator porte des aimants qui sont chargés de créer le champ magnétique dans l'entrefer.

L'énergie électrique appliquée à un moteur, est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un induit (habituellement le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un inducteur (habituellement le stator). La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu est effectuée à l'aide de balais composés de charbon et de graphite ou par commutation électronique [10].

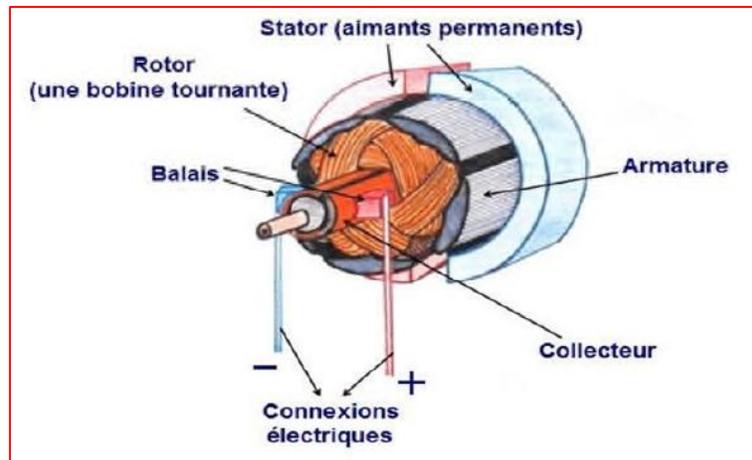


Figure (II.25) : Moteur à courant continu [8].

b) Moteur à courant alternatif

Le moteur à courant alternatif est utilisé de plus en plus pour les systèmes de pompage. Le coût peu élevé du moteur, son faible besoin de maintenance et l'efficacité accrue des onduleurs solaires le rendent particulièrement attrayant pour les systèmes de pompage plus importants où le coût additionnel de l'onduleur est moins significatif.

Les moteurs alternatifs asynchrones sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. De dimension compacte, il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. Depuis quelques années, l'arrivée d'onduleurs efficaces permettant un contrôle de la vitesse de ces moteurs a permis leur utilisation pour des applications de pompage solaire [10].

II .4.3. L'électronique de commande et de contrôle

a) Le convertisseur DC/DC (hacheur)

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque 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 photovoltaïque et la charge. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle commandé par son rapport cyclique, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible [16].

b) Le convertisseur DC/AC (onduleur)

Le convertisseur DC/AC assure le transfert optimal de puissance du générateur solaire vers le groupe motopompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puit. 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 [16].

Caractéristique de fonctionnement les plus important :

- Tension et courant d'entrée/sortie.
- Forme de l'onde.
- Limites de la tension d'entrée.
- Basse de consommation et haut rendement.
- Puissance de sortie.
- Capacité du sur charge.
- Facilité la réparation et la maintenance.
- Fonctionnement dans les points de puissance maximale.
- Conditions ambiants (température de fonctionnement) [16].

II .4.4. Le stockage

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. Le réservoir ne requiert pas d'entretien complexe et est facile à réparer localement. Aussi, le système de stockage avec batterie génère un coût additionnel, des problèmes de maintenance des batteries et de l'obligation de les remplacer après 3 à 5 ans d'usage. De plus, le rendement énergétique est dégradé avec des accumulateurs [10].

II .5. Généralité sur l'irrigation

Les systèmes d'irrigation peuvent être classés en deux grandes catégories : l'irrigation gravitaire et l'irrigation sous pression.

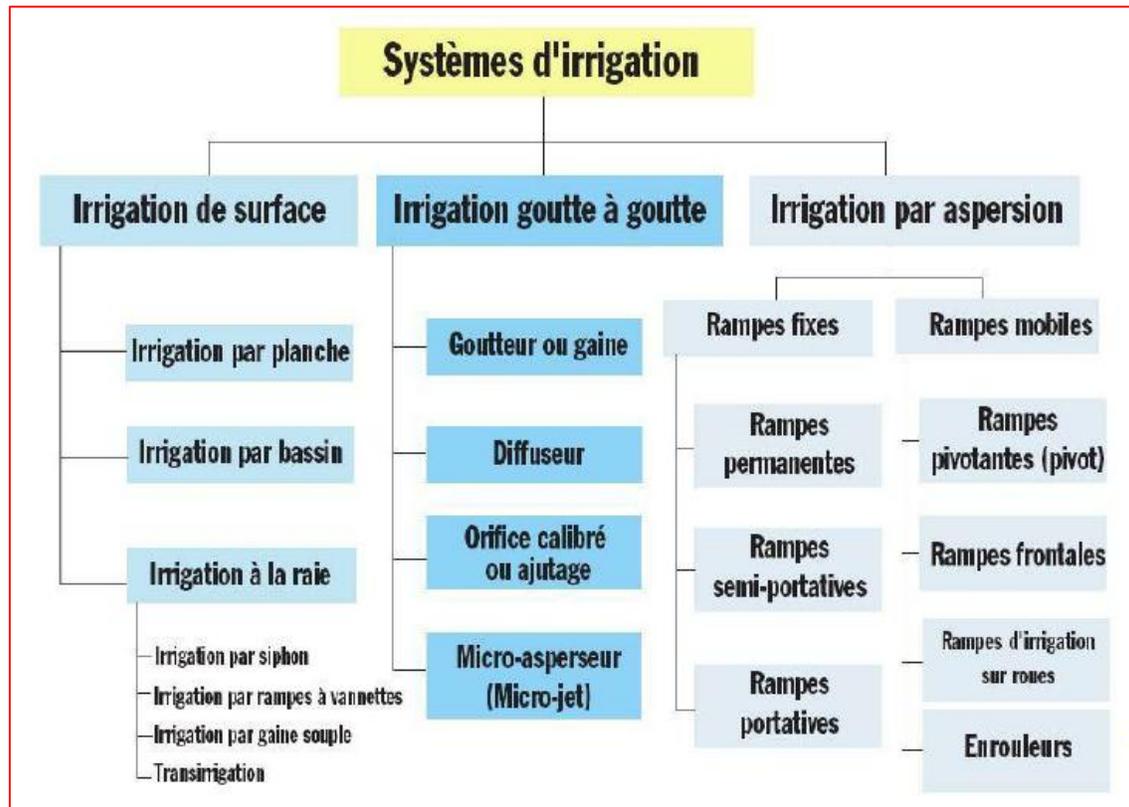


Figure (II.26) : Les différents systèmes d'irrigation [27].

II .5.1. Irrigation de surface

L'irrigation de surface consiste à mener l'eau au point le plus haut du terrain et à la laisser écouler par gravité. L'eau est ensuite distribuée au champ, soit par submersion (irrigation par bassins), ou dans des sillons en terre (irrigation par sillons) ou bien par ruissellement à la surface d'une planche d'arrosage (irrigation par planches) [28].

		
Figure (II.27) : Irrigation par planches [27].	Figure (II.28) : Irrigation par bassin [27].	Figure (II.29) : Irrigation à la raie [27].

II .5.2. Irrigation par aspersion

La technique d'irrigation par aspersion est conçue sur le modèle de la pluie naturelle. L'eau est refoulée sous pression dans un réseau de conduites, ensuite elle est diffusée par des asperseurs rotatifs sous la forme d'une pluie artificielle [28].



Figure (II.30) : Irrigation plein champ par aspersion [27].

II .5.3. Irrigation par goutte à goutte

L'irrigation par goutte à goutte, appelée aussi micro-irrigation, consiste à amener l'eau sous pression dans un système de canalisations, généralement en PVC. Cette eau est ensuite distribuée en gouttes au champ par un grand nombre de goutteurs répartis tout le long des rangées des plantations. La zone humidifiée du sol est celle située au voisinage immédiat des racines des plantes [19].



Figure (II.31) : Irrigation goutte à goutte [27].

II.5.3.1. Nécessité de l'irrigation en goutte à goutte

L'irrigation améliore l'établissement des arbres, l'utilisation des éléments nutritifs, la surface du feuillage et la santé des arbres, il améliore également la taille et qualité du fruit.

L'irrigation goutte à goutte est fondée sur le concept de la prévention plutôt que le soulagement du stress hydrique.

La réponse des cultures à cette approche est positive :

- La technique est facilement automatisée.
- L'arrosage peut se faire par temps venteux ou pendant la pulvérisation.
- Le feuillage n'est pas mouillé, ce qui réduit les problèmes de maladies.
- L'eau n'entre pas en contact avec le produit, donc le risque de la salubrité des aliments lié à l'eau de qualité inférieure est réduit [29].

II .5.3.2.Equipement du système goutte à goutte

L'installation est composée d'une source d'eau, d'une station de pompage, d'une unité de tête, des canalisations principales et secondaires, de porte rampes et rampes, et enfin de distributeurs [27].

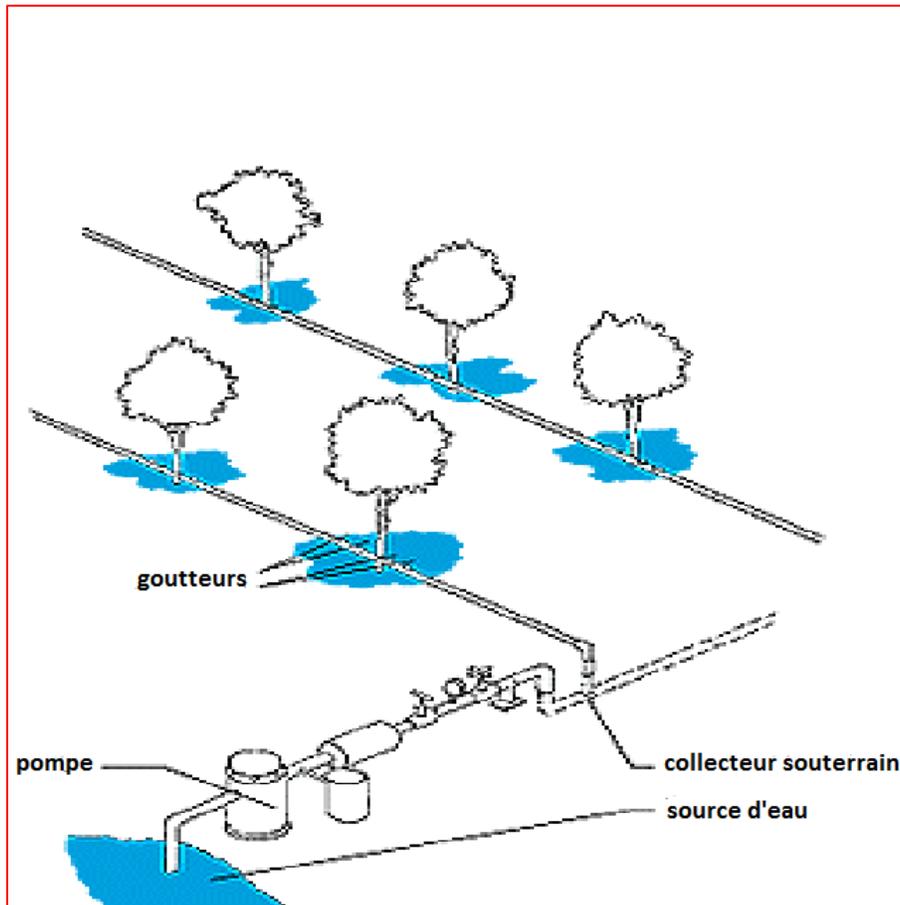


Figure (II.32) : Equipements du système goutte à goutte [27].

- **L'unité de pompage** : puise l'eau de la source et la refoule à la pression désirée dans le réseau de distribution pour assurer le bon fonctionnement des goutteurs.
- **L'unité de tête ou de contrôle en tête** : consiste en une série de vannes pour contrôler le débit et la pression dans le réseau. Elle peut aussi comporter un filtre pour la clarté de l'eau. Les filtres couramment utilisés sont les filtres à crépines et les filtres de sable pour retenir les matières en suspension dans l'eau.
- **Les conduites principales, secondaires et les rampes** : transportent l'eau de l'unité de tête pour la délivrer aux champs d'irrigation. Elles sont en PVC ou en polyéthylène. Elles doivent

être enterrées dans le sol pour éviter leur dégradation sous l'effet du rayonnement solaire. Les rampes sont des tuyaux de 12 à 32 mm de diamètre.

- **Les goutteurs ou distributeurs** : sont des dispositifs qui ont pour rôle de délivrer le débit désiré à la plante. Plusieurs types de goutteurs ont été mis sur le marché ces dernières années [28].

II .6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini les différents types de systèmes photovoltaïque. Suite, par les deux techniques de pompage : pompage au fil du soleil et le pompage avec batteries. Des rappels sur la notion d'effet photovoltaïque et de la cellule solaire photovoltaïque a été présentée afin de déterminer les paramètres essentiels contribuant à l'estimation des énergies captées pour la fonction des systèmes de pompage d'eau. Enfin on a présenté les caractéristiques et les principes de fonctionnement des différents composants constituant le système de pompage photovoltaïque et le système d'irrigation et on a montré que la technique da le goutte à goutte est la plus adaptée à notre étude. Dans le chapitre suivant nous déroulons les méthodes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.

Chapitre III : Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque

III.1. Introduction

Les bons choix des équipements d'une installation de pompage photovoltaïque nécessitent ce qu'on appelle le dimensionnement. Pour cela, nous consacrons ce chapitre pour présenter les calculs nécessaires et les étapes à suivre permettant la détermination du matériel le mieux adapté à notre étude.

III.2. Notion hydraulique

III.2.1. Débit : Le débit (Q) est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. Il est exprimé en m^3/h , $Lmin^{-1}$ ou Lh^{-1} . En pompage solaire, le débit est souvent exprimé en m^3/h [12].

III.2.2. Hauteur manométrique totale : La hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe est la différence de pression en mètre de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement [12].

La hauteur manométrique totale dépend de la hauteur géométrique d'élévation et des pertes de charge. Les pertes de charge dites de friction dépendent du diamètre, de la longueur, de la rugosité de la conduite, et du débit, tandis que les pertes de charge singulières sont dues à la présence d'accidents sur la canalisation tels que les vannes, les coudes, clapets, les filtres, les débitmètres, etc [4].

Cette hauteur peut être calculée comme suit [4] :

$$HMT = H_{géo} + \Sigma Pdc \quad \text{(III.1)}$$

HMT : Hauteur manométrique totale (m).

ΣPdc : Pertes de charge (linéaires et singulières).

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

III.2.3. Niveau statique (N_s) : Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage [12].

III.2.4. Niveau dynamique (N_d) : Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à 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 [12].

III.2.5. Rabattement (S_0) : C'est la différence entre le niveau dynamique et le niveau statique [4].

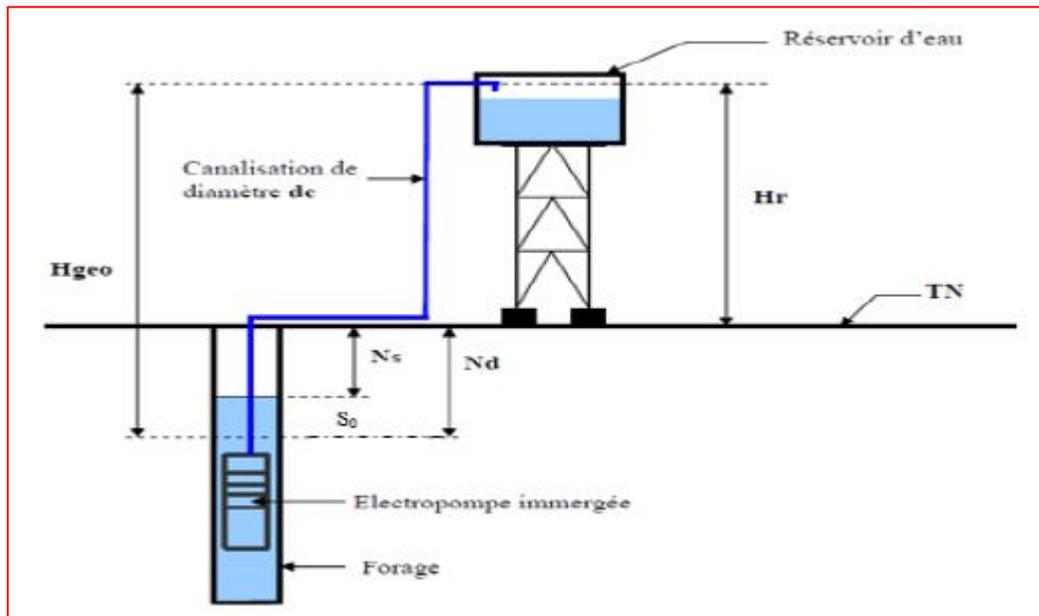


Figure (III.1) : Hauteur manométrique totale [4].

III.3. Le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

Du fait qu'un système de pompage d'eau est constitué d'une multiplicité d'organe de fonctionnement, le dimensionnement de l'ensemble du système de pompage est important pour satisfaire les besoins en eau [15].

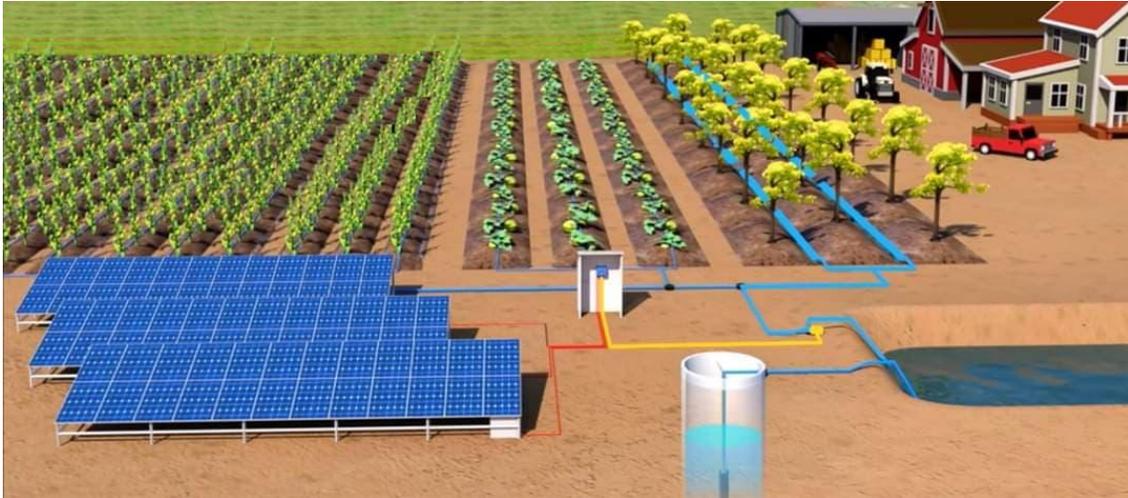


Figure (III.2) : Pompage d'eau par la technique d'irrigation « goutte à goutte » [*].

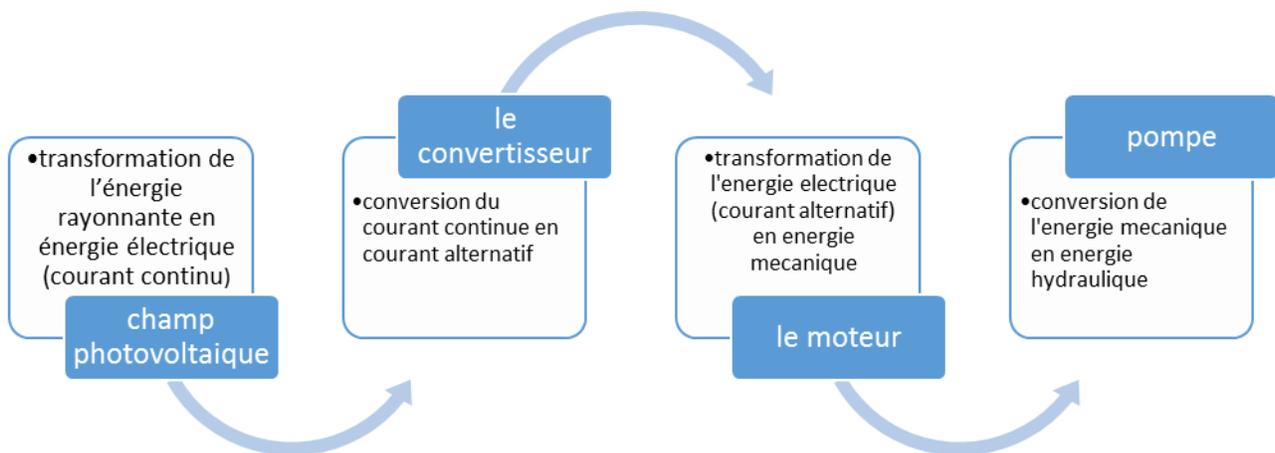


Figure (III.3) : Chaîne de conversion d'un pompage photovoltaïque au fil du soleil [13].

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

- Evaluation des besoins en eau ;
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire ;
- Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise ;
- Détermination de l'énergie solaire disponible ;
- Choix des composants ;

III.3.1. Estimation des besoins en eau

L'une des étapes préliminaires les plus importantes pour l'installation d'un système de pompage d'eau par énergie solaire est la détermination des besoins en eau, cette étape doit permettre de déterminer la puissance du générateur photovoltaïque et le type de pompe choisie pour la situation donnée. Ainsi que l'évaluation des besoins d'eau et des conditions d'exploitation nécessitent des données expérimentales qui ne sont pas faciles à obtenir.

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population rurale dépend essentiellement de son mode de vie, la littérature recommande une valeur située entre 20 et 40 litres par personne et par jour. Les animaux aussi ont besoin d'eau pour leur survie, de l'ordre de 30 litres par tête de bétail. Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme l'ensoleillement, la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évaporation, l'aspiration 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 [15].

III.3.2. 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 [1] :

$$E_h = \rho \cdot g \cdot V \cdot \frac{HMT}{3600} \quad \text{(III.2)}$$

E_h : Energie hydraulique (kWh/j).

g : La gravité terrestre (9.81 m/s²).

ρ : La masse volumique d'eau (kg/m³).

V : Volume d'eau (m³/j).

HMT : Hauteur manométrique totale (m).

III.3.3. 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 [1] :

$$E_e = \frac{E_h}{(\eta_{MP} \cdot \eta_{ond})} \quad (\text{III.3})$$

E_e : Energie électrique exprimé en (KWh/j).

η_{MP} : Le rendement du groupe motopompe.

η_{ond} : Le rendement d'onduleur.

III.3.4. 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 β 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 énergie électrique [1].

III.3.5. Taille du générateur photovoltaïque

Le calcul de la puissance du générateur photovoltaïque peut être effectuée de deux manières :

III.3.5.1. Par la méthode analytique

On doit dimensionner le générateur photovoltaïque, c'est-à-dire déterminer le nombre de modules qui le constituent pour alimenter le moteur d'entraînement. Cette opération consiste simplement à calculer la puissance crête nécessaire au bon fonctionnement de l'installation.

Cette puissance est nécessaire pour produire une certaine quantité d'eau par un groupe motopompe d'un rendement donné sur une certaine hauteur manométrique HMT sous un rayonnement solaire minimum donné dans les conditions standards de mesure CSM (éclairage de [1000 W/m² et la température 25°C) est calculée comme suit [15] :

$$P_{elec} = \eta_g \cdot A \cdot G \quad (\text{III.4})$$

P_{elec} : La puissance de sortie du générateur (W) sous les conditions standards de mesure (puissance crête).

η_g : Le rendement du générateur sous les conditions standards de mesure CSM.

A : La surface active du générateur (m²).

G : L'éclairement dans les conditions standards de mesure (CSM).

L'énergie électrique journalière produite par le champ photovoltaïque est calculée selon la formule suivante :

$$E_e = \eta_{PV} \cdot A \cdot G_d \quad (\text{III.5})$$

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

G_d : Irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules (kWh/m²/j).

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

$$\eta_{PV} = F_m [1 - \gamma(T - T_{ref})] \eta_g \quad (\text{III.6})$$

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.

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

La puissance crête que doit fournir le générateur photovoltaïque est calculée par l'expression suivante :

$$P_{elec} = \frac{G}{F_m \cdot G_d [1 - \gamma(T - T_{ref})]} \cdot \frac{E_h}{\eta_{MP} \cdot \eta_{ond}} \quad (\text{III.7})$$

III.3.5.1.1. Nombres de modules nécessaires

Après le calcul de la puissance crête nécessaire, on détermine le nombre total des modules N_M constituant le générateur photovoltaïque par la formule suivante [15] :

$$N_M = \frac{P_{elec}}{P_M} \quad (\text{III.8})$$

N_M : Nombre totale des modules.

P_{elec} : La puissance crête du générateur en (W).

P_M : La puissance de module photovoltaïque en (W).

III.3.5.1.2. Nombre de modules en série [15]

$$N_{MS} = \frac{V_{ch}}{V_m} \quad (\text{III.9})$$

N_{MS} : Nombre de modules en série.

V_{ch} : La tension exigée à l'entrée du convertisseur de puissance.

V_m : La tension fournie par le module photovoltaïque au point de la puissance maximale.

III.3.5.1.3. Nombre de modules en parallèle [15]

$$N_{MP} = \frac{N_M}{N_{MS}} \quad (\text{III.10})$$

N_{MP} : Nombre de modules en parallèle.

III.3.5.2. Par la méthode graphique

Cette méthode s'appuie sur les abaques de rendement des pompes fournis par le constructeur qui donne en fonction de l'irradiation globale, la puissance nécessaire développée P_{elec} par les panneaux pour faire fonctionner la pompe dans cette gamme, de débit et de HMT . Ces dernières sont assez pratiques et résument les performances des différentes pompes en fonction des conditions de leur utilisation [1].

- **Les abaques**

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 savoir à effectuer de tracés complémentaires en lisant directement les données se situant à l'intersection des

droites correspondantes 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 (III.4)** montre les caractéristiques de l'électropompe SP14A-3 donnée par le constructeur Grandfos [1].

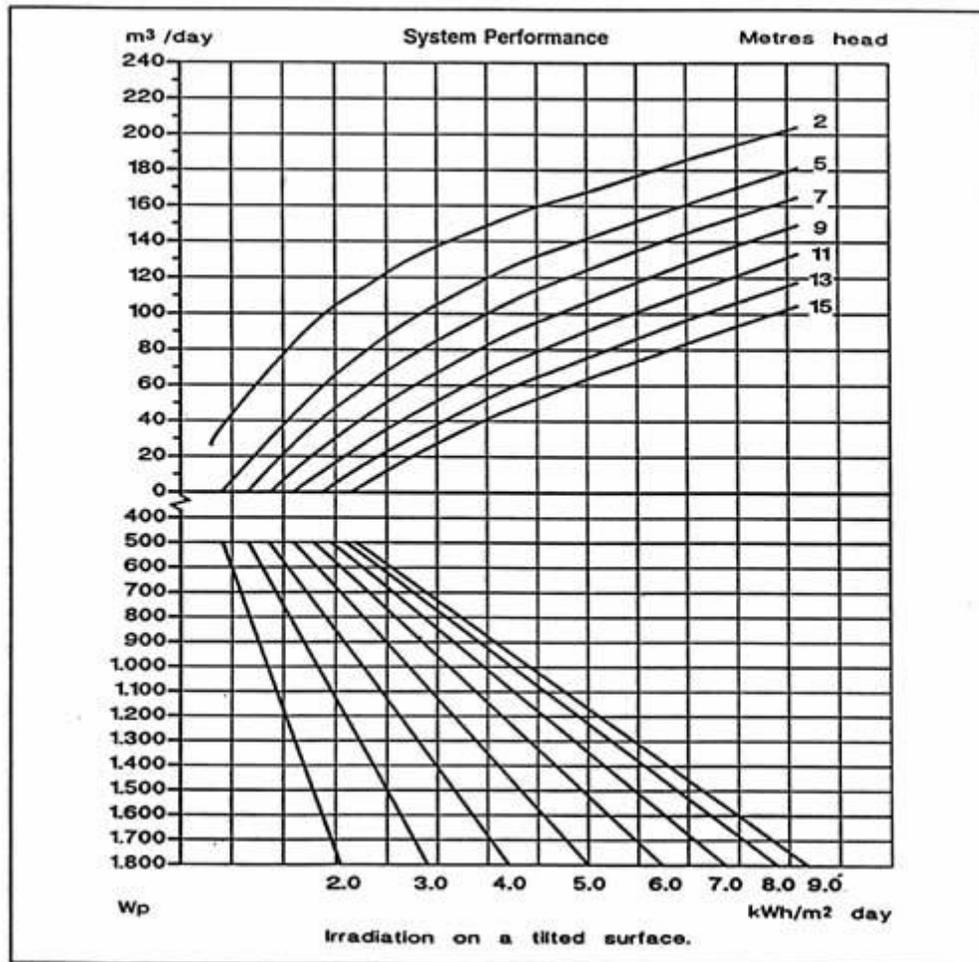


Figure (III.4) : Courbe typique des performances d'une pompe en conditions d'utilisation [1].

III.3.6. Choix des composants

III.3.6.1. Choix de la motopompe

III.3.6.1.1. Dimensionnement de la pompe

Les données de base d'une pompe consistent à connaître le débit, ainsi que la hauteur manométrique totale. En pompage solaire, la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné, sur une certaine hauteur, est exprimée en m³/h [15].

$$Q = \frac{3600}{\rho \cdot g \cdot HMT} \cdot P_h \quad (\text{III.11})$$

La puissance hydraulique P_h nécessaire en fonction de la puissance électrique crête P_{elec} fournie par le générateur photovoltaïque est donnée par :

$$P_h = P_{elec} \cdot \eta_{MP} \cdot \eta_{ond} \quad (\text{III.12})$$

P_h : La puissance hydraulique.

Ce qui donne le débit fourni par la pompe en fonction de la puissance du générateur.

$$Q = \frac{3600 \cdot \eta_{MP} \cdot \eta_{ond}}{\rho \cdot g \cdot HMT} \cdot P_{elec} \quad (\text{III.13})$$

g : La gravité terrestre (9.81 m/s²).

ρ : La masse volumique de l'eau (1000 Kg/m³).

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait les calculs théoriques de tous les équipements à utiliser dans notre installation et aussi les calculs de l'énergie totale nécessaire. Ce qui nous permettra de réaliser l'application de notre système de pompage photovoltaïque dans le chapitre suivant.

Chapitre IV : Etude de cas

IV.1. Introduction

L'application du pompage solaire photovoltaïque est l'une des solutions prometteuses pour l'irrigation des surfaces agricoles et pour l'alimentation en eau potable dans les sites isolés.

Dans ce chapitre, nous sommes intéressés d'appliquer les techniques de pompage solaire photovoltaïque étudiées dans le chapitre précédant sur un site réel. Nous avons choisi la ville de Tolga-Biskra comme une zone d'étude. Cette ville se caractérise par la qualité de ses dattes qui représentent l'activité agricole principale et par la grande disponibilité de l'énergie solaire ainsi que d'une importante réserve d'eau qui se trouve naturellement stockée sous forme de nappes souterraines. Pour cela, nous avons adopté à notre étude un système de pompage pour irrigation d'un hectare de palmier dans la région de Tolga.

IV.2. Présentation de la zone d'étude

IV.2.1. Cadre géographique

La région des Ziban s'étend sur les piémonts de l'Atlas saharien qui se partage en trois massifs montagneux : du Zab, des Aurès et des Néménchas, juste à la flexure de contact entre le bouclier saharien rigide et tabulaire et les plissements très marqués de l'Atlas.

La wilaya de Biskra se situe au Nord-Est du Sahara septentrional, elle s'étend sur une superficie de 21671 km², et compte une population de plus de 869215 habitants.

Elle est limitée au Nord par la wilaya de Batna, au Nord Est par la Wilaya de Khenchela, au Nord-Ouest par la Wilaya de Msila, à l'Est par la Wilaya de Tébessa, à l'Ouest par la Wilaya de Djelfa, au Sud par la Wilaya d'El Oued et Ouargla.

La Wilaya de Biskra est composée de douze daïra, chacune comprenant une ou plusieurs communes, au total trente-trois communes [30].

IV.2.2. Cas d'application : la ville de Tolga

La ville de Tolga est considérée comme l'une des plus importantes oasis dans la région des Ziban après celle de Biskra. Elle s'étend sur une superficie de 1214.30 km². Tolga est limité au Nord par les communes de M'doukel et Bitame (Wilaya de Batna), à l'Est par la commune de Lotaya, au Sud-Est par les communes de Elhadjeb, Bouchagroun et Lichana, au Sud par la

commune de Lioua, au Sud-Ouest par les communes de Bordj Ben Azouz, Foughala et Laghrous, à l'Ouest par les communes de Zarzour et Oules Slimane (Wilaya de Msila) [31].

Elle est caractérisée par un climat froid en hiver, chaud et sec en été. Sa localisation géographique fait d'elle une région à vocation agro-saharienne basée sur les vastes étendues des oasis. L'activité de culture du palmier dattier s'est ancrée dans la région, et elle présente comme l'une des plus importantes régions phoenicicoles en Algérie. Elle est connue mondialement pour la grande qualité de ses dattes, notamment par la variété noble Deglette Nour [32].

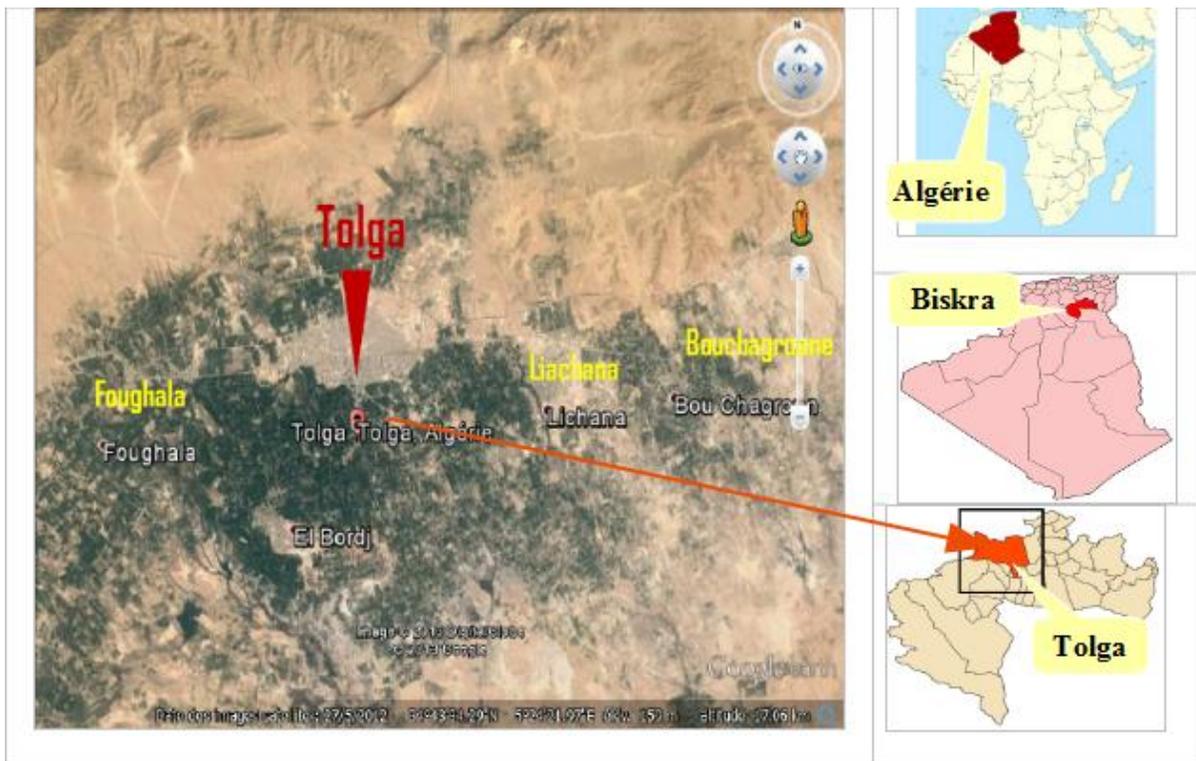


Figure (IV.1) : Localisation de la ville de Tolga-Biskra-Algérie (via Google Earth) [31].

IV.2.3. Hydrogéologie

La Wilaya de Biskra présente des ressources en eau souterraines importantes, représentées par quatre unités aquifères et sont respectivement :

IV.2.3.1. La nappe du Quaternaire (Inféroflux)

Cette nappe qui présente l'unique ressources des régions de Ouled Djellal, sidi khaled et la ville de Biskra, est trop sollicitée vue sa faible profondeur et sa bonne qualité chimique, pour cette raison qu'elle est utilisée pour l'alimentation en eau potable.

La profondeur de cette nappe est comprise entre 20 et 150 m avec un débit oscillant entre 5 et 20 l/s et une qualité chimique qui se situe de bonne à mauvaise selon les zones.

IV.2.3.2. La nappe des sables du Miopliocène (CT)

Cette nappe est fortement exploitée dans la partie Est de la Wilaya et surtout dans la zone de M'Zirâa.

La profondeur de cette nappe varie de 100 à 300 m, avec un débit moyen de 15 l/s.

IV.2.3.3. La nappe des calcaires du Sénono-Eocène (CT)

Cette nappe est constituée essentiellement de calcaires fissurés d'âge Eocène inférieur, elle est la plus sollicitée dans les palmeraies des Ziban, cette dernière est appelée « Nappe de Tolga ». La profondeur de cette nappe varie de 100 m dans la zone de Tolga à 500m dans la zone de Lioua, le débit de cette nappe varie de 10 l/s par pompage jusqu'à 30 l/s dans les zones d'Ourllal et Lioua.

IV.2.3.4. La nappe des Continental Intercallaire (CI)

Cette nappe est représentée également dans la Wilaya par des sources hydrothermales qui sont : la source de Hammame Essalhines dans la commune de Biskra et celle de Sidi El Hadj dans la commune d'El-Outaya.

Son exploitation est très coûteuse en raison de sa profondeur qui dépasse 2000m, la température de l'eau peut dépasser les 60 °C [33].

IV.2.4. Pédologie

D'après des études pédologiques réalisées, les sols de la wilaya de Biskra présentent les caractéristiques suivantes :

- La région du Sud, est surtout caractérisée par les accumulations salées, gypseuses et calcaires.
- La région Est, est définie par les sols alluvionnaires et les sols argileux fertiles.
- La région Nord (ou zones de montagne) est le siège de la formation des sols peu-évolués et peu fertiles.

- Enfin, la plaine située au Nord-Ouest de Biskra où les sols argileux-sodiques sont irrigués par les eaux fortement minéralisées qui constituent le caractère de la pédogénèse de cette région [34].

IV.2.5. Climatologie de Biskra

Les caractères du climat saharien sont dus, tout d'abord, à la situation en latitude, au niveau du tropique, ce qui entraîne de fortes températures, et au régime des vents qui se traduit par des courants chauds et secs. Ce climat est caractérisé notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, une luminosité intense, une forte évaporation et de grands écarts de température [35].

IV.2.5.1. La précipitation

La précipitation pour la région de Biskra est très faible et surtout très variable. On remarque que le mois le plus pluvieux est le mois de Janvier, tandis que le mois de Juillet est le mois le plus sec. Le régime des précipitations dans la région d'étude est présenté dans le tableau suivant :

Tableau (IV.1) : La précipitation moyenne mensuelle de la région de Biskra durant la période (1989-2018). (ONM)

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D	Totale
P (mm)	20.6	12.1	13.9	16.1	11.3	7.9	1.7	4.3	15.9	17.1	16	13.9	150.8

P : Précipitation (mm).

IV.2.5.2. La température

Les températures sont de type saharien, se caractériser par de forts maximums de température en été et très basses en hiver. La région présente aussi des écarts thermiques importants, entre le maximum pendant le jour et le minimum pendant la nuit, dépasse une vingtaine des degrés Celsius. Le tableau (IV.2) montre les températures moyennes mensuelles dans la zone de Biskra.

Tableau (IV.2) : Températures moyennes mensuelles (minimales, maximales et moyennes) de la région étudiée durant la période (1989-2018). (ONM)

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D	Moy annuelle
T_{max}	17	19.1	23.2	26.8	32.4	37.5	40.8	40	34.7	29	22.2	17.9	28.4
T_{min}	6.8	8.2	11.5	15.2	20	24.7	27.9	27.7	23.4	18.2	12	8.1	17
T_{moy}	12	13.8	17.4	20.7	26.2	31.1	34.4	33.8	28.9	23.6	17.1	13	22.7

- T_{min} : Moyennes des températures minimales mensuelles exprimées en (°C).
- T_{max} : Moyennes des températures maximales mensuelles exprimées en (°C).
- T_{moy} : La moyenne des températures mensuelles exprimées en (°C).

IV.2.5.3. Le vent

Le vent est un facteur météorologique non négligeable, il est le plus caractéristique du climat. Ainsi qu'il est l'un des facteurs qui augmente l'évapotranspiration qui contribue à dessécher l'atmosphère. Les données sur la vitesse moyenne du vent pour la région d'étude sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau (IV.3) : La vitesse moyenne mensuelle du vent de la région de Biskra durant la période (1989-2018). (ONM)

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D
$V(m/s)$	3	3.5	3.7	4.1	3.9	3.4	2.9	2.8	2.9	2.9	3	2.8

V : Vitesse du vent (m/s).

IV.2.5.4. L'humidité relative de l'air

L'humidité relative (H_r , %) ou l'hygrométrie s'exprime par le rapport en pourcentage de la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (P_a), à la pression de vapeur saturante (P_r) dans les mêmes conditions de mesure en température et en pression. L'humidité relative de l'air varie sensiblement en fonction des saisons [36] ; les deux mois Juillet et Août sont les mois les plus secs

par contre Décembre et Janvier sont les mois les plus humides. Généralement l'humidité est relativement faible dans la région de Biskra ce qui s'explique par l'aridité du climat et la concentration des masses d'air chaudes du Sahara. Les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air varient entre 26% et 59%. Les données caractérisant l'humidité relative de l'air de la région de Biskra au cours de la période allant de 1989 à 2018 sont reportées sur le tableau si dessous :

Tableau (IV.4) : L'humidité moyenne mensuelle de la région de Biskra durant la période (1989-2018). (ONM)

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D
H_r (%)	56	49	43	39	33	30	26	30	40	48	54	59

H_r : Humidité relative de l'air (%).

IV.2.5.5. L'insolation

L'insolation est un facteur important dans la mesure où il influence directement le degré d'activité végétative des cultures. Les données concernant l'insolation réelle moyenne mensuelle de la région de Biskra durant la période 1989 - 2018 sont présentées dans Tableau (IV.5) :

Tableau (IV.5) : La somme de l'insolation réelle mensuelle moyenne de la région de Biskra durant la période 1989-2018. (ONM)

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D	Moy
I (h)	224.2	223.4	262.6	285.8	320.8	331.6	356.6	326.7	270	246.9	220.6	217.8	273.9

I : Insolation (heure).

IV.2.5.6. L'évaporation

L'évaporation augmente du mois de Janvier au mois de Juillet et diminue jusqu'au mois de Décembre. Dans la région de Biskra, le maximale de l'évaporation est atteint au mois de Juillet et le minimum au mois de Décembre. Les données de l'évaporation moyennes mensuelles de la région d'étude sont présentées dans le tableau si dessous.

Tableau (IV.6) : L'évaporation moyenne mensuelle de la région de Biskra durant la période (1989-2018). (ONM)

Mois	J	V	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D
<i>Evapo</i>	110.52	134.94	189.42	245.29	317.01	373.08	411.02	376.27	287.85	208.61	141.89	108.58

Evapo : Evaporation (mm).

IV.3. Dimensionnement

IV.3.1. Estimation des besoins en eau

La détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance des données climatiques ou pédologiques de la région et aussi les paramètres concernant la plante elle-même [37].

IV.3.1.1. L'évapotranspiration (ET)

L'évapotranspiration est une combinaison de deux processus : l'évaporation et la transpiration.

L'évaporation, ou plus précisément l'évaporation directe, désigne l'eau qui s'évapore à partir d'un sol (nu) ou d'un plan d'eau. Autrement, l'évaporation est un transfert de l'eau, à partir de la surface du sol, vers l'atmosphère.

La transpiration désigne la transpiration des végétaux à travers les stomates (micropores par lesquels l'eau s'évapore) de leurs feuilles. Les racines des végétaux captent l'eau qui se trouve dans le sol. Une fois parvenue aux feuilles, une partie de l'eau va s'évaporer à travers les stomates des feuilles [38].

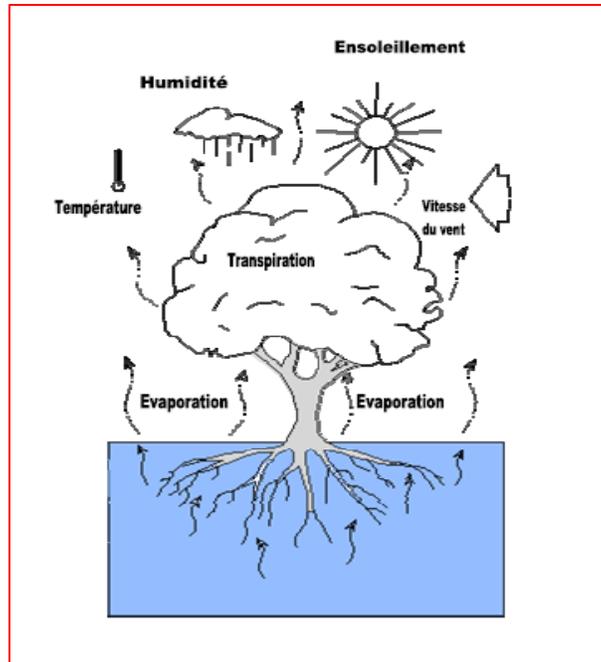


Figure (IV.2) : Cycle d'évapotranspiration [39].

IV.3.1.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP) ou (ET_0)

ETP est considérée comme une donnée climatique, ne dépend que des conditions atmosphériques, de l'énergie disponible à la surface évaporant et la résistance aérodynamique de couvert végétal.

➤ Formule de FAO Penman-Monteith

La formule de Penman-Monteith se distingue parmi les différentes formules par son origine théorique dérivée du bilan de flux énergétique à la surface de couvert végétal, dans un souci de normalisation, la FAO, à travers son groupe d'expert opérants dans différents contextes climatiques, a adapté la formule de Penman-Monteith au conditions d'un couvert de gazon et propose la formule dérivée comme la nouvelle définition de l'évapotranspiration de référence (ET_0) [37].

Il existe bien d'autres équations plus ou moins simples, car réduisant le nombre de paramètres qui entrent en ligne de compte dans le calcul de l' ET_0 , mais elles ne sont utiles que dans le cas où les données météorologiques feraient défaut.

IV.3.1.3. Besoin en eau d'irrigation

Le besoin d'irrigation, noté (BI) est défini comme étant le volume d'eau qui devra être apporté par irrigation. Pour calculer la quantité réelle d'eau à apporter à la culture il faut tenir compte des efficacités de transport, de distribution et d'application de l'eau [37].

$$BI_{brut} = \frac{BI}{eff} \quad (\text{IV.1})$$

$$BI = ETR \quad (\text{IV.2})$$

Pour arriver à calculer les besoins d'irrigation il faut connaître d'abord les besoins en eau réels des cultures (ETR) [37] :

$$ETR = ET_0 \times k_C \quad (\text{IV.3})$$

BI_{brut} : Besoin brute (mm).

BI : Besoin net (mm).

eff : L'efficience d'irrigation (%). Il dépend du système d'irrigation utilisé, dans le cas de l'irrigation localisée ou micro-irrigation : $eff = 80\% - 90\%$.

ETR : Evapotranspiration réelle (mm/jour).

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/jour).

K_C : Le coefficient cultural, le k_C pour un palmier dattier adulte varie en réalité entre (1.21-1.38). Pour notre cas nous avons choisi le K_C proposé par la FAO qui varie entre (0.9-1).

❖ Pour le mois de Juin et avec une efficience de 80% le volume d'eau sera égal :

$$BI_{brut} = \frac{ETP \times k_C}{eff} = \frac{9.39 \times 1}{0.8}$$

$$BI_{brut} = 11.737 \text{ mm/j}$$

Avec :

$$1\text{mm} = 10 \text{ m}^3/\text{hectare}$$

$$V = 11.737 \times 10 = 117.37 \text{ m}^3/\text{j}/\text{hectare}$$

Tableau (IV.7) : Les besoins journaliers moyens en eau des palmiers/ hectare.

Période	L'hiver			Le printemps			L'été			L'automne		
	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N
K_C	0.9	0.9	0.9	0.95	0.95	0.95	1	1	1	0.95	0.95	0.95
ETP	2.22	2.45	3.5	5	6.69	8.41	9.39	9.59	8.6	6.61	4.67	3.14
ETR	2.004	2.207	3.15	4.757	6.358	7.99	9.39	9.59	8.6	6.282	4.442	2.989
BI_{brut}	2.506	2.759	3.937	5.947	7.948	9.987	11.737	11.995	10.758	7.853	5.553	3.736
V	25.06	27.59	39.37	59.47	79.48	99.87	117.37	119.95	107.58	78.53	55.53	37.36

V : Volume d'eau journalier (m^3/j).

IV.3.2. Rayonnement solaire

Les valeurs de l'irradiation globale journalière moyenne mensuelle pour une inclinaison optimale dans la région de Biskra sont présentées dans le tableau suivant : (voir annexe E)

Tableau (IV.8) : Les valeurs de l'irradiation globale journalière moyenne mensuelle pour une inclinaison optimale.

Période	L'hiver			Le printemps			L'été			L'automne		
	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N
$\overline{H_T}$ ($\text{Wh}/\text{m}^2/\text{j}$)	5436	5592	5920	6009	6382	6863	7297	7321	6759	5993	5868	5619

$\overline{H_T}$: L'irradiation globale journalière moyenne mensuelle pour une inclinaison optimale.

IV.3.3. Hauteur manométrique totale

La hauteur manométrique totale est égale à 100 m. Elle correspond à la nappe du l'Eocène qui est la plus utilisée à l'irrigation des palmeraies de la ville de Tolga où elle est appelée « la nappe de Tolga ».

IV.3.4. Dimensionnement de la station de pompage

Le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque concerne : le calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque, le choix de la pompe et le choix de contrôleur répondants au service requis dans les conditions de référence dépendent des deux conditions suivantes [4] :

- Choisir les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.
- Choisir le mois où l'ensoleillement maximal est le plus faible.

Pour notre cas, le débit journalier maximal requis est de 119.95 (m³/j) pendant le mois de Juillet et l'énergie d'ensoleillement la plus faible pour la saison d'été est égale à 6759 (Wh/m²/j) pendant le mois d'Août.

❖ Pour dimensionner la station de pompage, nous suivons les étapes suivantes :

IV.3.4.1. Choix de la pompe

Nous choisissons la pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique totale.

- **Débit horaire**

Il est calculé par la formule suivante :

$$Q_h = \frac{Q(m^3/j)}{N_h} \quad \text{(IV.4)}$$

Q_h : Débit horaire.

Avec N_h : Le nombre d'heure d'ensoleillement maximal.

$$N_h = \frac{6759}{1000} = 6.7 \text{ heures/Jour}$$

Dans notre cas, nous prenons :

$$\begin{cases} h = 6.7 \text{ heures} \\ Q = 119.95 (m^3/j) \end{cases}$$

$$Q_h = \frac{119.95}{6.7} = 17.9 \text{ m}^3/h \approx 18 \text{ m}^3/h$$

Selon le catalogue de LORENTZ la pompe immergée de type PSk2-15 C-SJ17-18 est capable de répondre à nos besoins : un débit horaire égale 18 m³/h et une hauteur manométrique totale égale à 100 m. Les caractéristiques techniques de la motopompe et du contrôleur sont données dans le tableau suivant :

Tableau (IV.9) : Les caractéristiques techniques de la motopompe et de contrôleur [40].

La pompe	
Marque	LORENTZ
Type	Pompe immergée PSk2-15 C-SJ17-18
Débit maxi	22 m ³ /h
HMT maxi	140 m
Moteur triphasé à courant alternatif	
Efficacité maxi	80%
Submersion maxi	300 m
Contrôleur	
Type	PSk2-15
Puissance maxi	15 kW
Tension nominale	380-400-415
Tension d'entrée maxi	850 V
Intensité du moteur maxi	24 A
Efficacité maxi	98 %
Température ambiante	-30 °C-50°C

IV.3.4.2. Calcul de l'énergie hydraulique

$$E_h = \rho \cdot g \cdot V \cdot \frac{HMT}{3600} \quad (\text{IV.5})$$

$$E_h = 10^3 \times 9.81 \times 119.95 \times \frac{100}{3600}$$

$$E_h = 32686.37 \text{ Wh/j}$$

IV.3.4.3. Calcul de l'énergie électrique

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{MP} \cdot \eta_{contrôleur}} \quad (\text{IV.6})$$

$$E_e = \frac{32686.37}{0.8 \times 0.98}$$

$$E_e = 41691.80 \text{ Wh/j}$$

IV.3.4.4. La capacité du réservoir

Tant que la technique de pompage choisit pour notre étude est le pompage dit « au fil du soleil ». Le stockage d'eau est effectué dans un réservoir hydraulique. Son choix doit être fait de sorte que sa capacité réponde au besoin d'eau pendant les jours d'autonomie. Nous avons dimensionné pour deux jours d'autonomie à une hauteur de 5m.

Le réservoir obtenu alors a une capacité utile de 239.9 m³.

IV.3.4.5. La taille du générateur photovoltaïque

Nous avons choisi le panneau photovoltaïque VICTRON 330Wc-24V. Le module est composé de 72 cellules solaires poly-cristallin connectées en série pour produire une puissance maximale égale à 330 W. Les caractéristiques électriques de ce module sont données dans le tableau suivant :

Tableau (IV.10) : Caractéristiques électriques du module PV (VICTRON 330Wc-24V) [40].

Puissance maximale (P_{max})	330 W
Tension à P_{max} (V_{mp})	37.3 V
Courant à P_{max} (I_{mp})	8.86 A
Courant de court-circuit (I_{sc})	9.57 A
Tension à circuit ouvert (V_{oc})	44.72 V
Coefficient de température de I_{sc} (%)	+0.04/°C
Coefficient de température de V_{oc} (%)	-0.35/°C
Coefficient de température de la puissance nominale (P_{max})	-0.45/°C

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	-40 °C à +85 °C
---	-----------------

IV.3.4.5.1. Calcul de la puissance crête

$$P_{elec} = \frac{G}{F_m \cdot G_d [1 - \gamma(T - T_{ref})]} \cdot \frac{E_h}{\eta_{MP} \cdot \eta_{contrôleur}} \quad (\text{IV.7})$$

$$F_m = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (\text{IV.8})$$

$$F_m = \frac{330}{44.72 \times 9.57}$$

$$F_m = 0.771$$

$$P_{elec} = \frac{1000}{0.771 \times 6759 [1 - 0.004(34.4 - 25)]} \times 41691.80$$

$$P_{elec} = 8313 \text{ W}$$

IV.3.4.5.2. Nombres de modules nécessaires

$$N_M = \frac{P_{elec}}{P_M} \quad (\text{IV.9})$$

$$N_M = \frac{8313}{330}$$

$$N_M = 25.19 \text{ soit } 25 \text{ modules}$$

IV.3.4.5.3. Nombre de modules en série

$$N_{MS} = \frac{V_{ch}}{V_m} \quad (\text{IV.10})$$

$$N_{MS} = \frac{415}{37.3}$$

$$N_{MS} = 11.12 \text{ soit } 12 \text{ modules}$$

IV.3.4.5.4. Nombre de modules en parallèle

$$N_{MP} = \frac{N_M}{N_{MS}} \quad (\text{IV.11})$$

$$N_{MP} = \frac{25}{12} = 2.08 \text{ soit } 2 \text{ modules}$$

❖ Correction de la puissance crête

Dans la plupart des cas, les nombres de modules (en séries et/ou en parallèles) calculés ne sont pas des entiers. Il faut donc les arrondir pour trouver la nouvelle puissance corrigée.

La puissance crête corrigée est égale :

$$P_{elec} = 8000 \text{ W}$$

Le nombre de modules nécessaires sera égale :

$$N_M = \frac{8000}{330}$$

$$N_M = 24.24 \text{ soit } 24 \text{ modules}$$

Le nombre de modules en parallèle corrigé est égale :

$$N_{MP} = \frac{24}{12} = 2 \text{ modules}$$

Tableau (IV.11) : Vérification de la comptabilité du contrôleur avec la configuration des panneaux.

	Valeur	Vérification
Tension circuit ouvert du générateur PV ($V_{oc.géné} = N_{MS} * V_{oc}$ d'un module PV)	536.64	$V_{oc.géné} < V_{max.cont}$ OK $I_{MPPTgéné} < I_{max.cont}$ OK
Intensité MPPT du générateur PV ($I_{MPPTgéné}$)	19.14	
Tension maximale du contrôleur ($V_{max.cont}$)	850 V	
Intensité maximale du contrôleur ($I_{max.cont}$)	24 A	

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

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque destinée à l'irrigation d'un hectare de palmier dattier dans la ville de Tolga.

Les résultats de l'étude montrent que la puissance crête du générateur photovoltaïque est de 8000 W, se constitue de 24 modules photovoltaïques en silicium poly-cristallin connectés en série pour produire une puissance maximale égale à 330 W, dont deux branchements 12 modules en série et 2 modules en parallèle.

Conclusion Générale

Ce travail consiste une étude de l'irrigation d'une palmeraie avec un système de pompage solaire photovoltaïque dans la ville de Tolga, la Wilaya de Biskra. Les principales conclusions découlant de ce travail sont :

L'étude des générateurs photovoltaïques permet la connaissance du comportement de ces derniers en fonction de l'éclairement et de la température et leurs effets sur les caractéristiques électriques, et par conséquent sur leur rendement.

La conception d'un système de pompage photovoltaïque nécessite, une bonne connaissance sur la cartographie du rayonnement solaire de site à étudier et une bonne connaissance des principes de fonctionnement des différents composants du système de pompage.

L'analyse des éléments constitutifs d'un système de pompage photovoltaïque pour une irrigation goutte à goutte a permis de dégager les critères optimums pour le choix et le dimensionnement de ces éléments.

Les quantités d'eau nécessaires à l'irrigation sont très variables et dépendent particulièrement du climat local, du type de culture, et de la technique d'irrigation. Dans ce contexte la rationalisation de l'irrigation par la recherche permanente d'une meilleure efficacité de l'eau est une exigence qui s'impose à tous, la goutte à goutte est l'une des techniques la plus adaptées pour des conditions analogues à notre cas. Elle permet une économie de l'eau de 50% à 70% par rapport à l'irrigation gravitaire, dont le but est l'amélioration de la production et de la qualité des dattes.

Le choix et le dimensionnement des éléments d'un système de pompage photovoltaïque destiné à l'irrigation procède d'une estimation des besoins en eau. Cette estimation peut être préalablement calculée, mais en définitive, elle sera approchée du fait que l'on souhaite obtenir une autonomie en cas de mauvais temps. Cette approche conduit ainsi au dimensionnement approximatif de la capacité de stockage d'eau.

Le calcul de la taille du générateur comporte un certain degré d'incertitude due : au critère aléatoire du rayonnement solaire et l'estimation difficile des besoins d'eau demandés. Il est ainsi conseillé de prendre des précautions quant au choix du type de pompe et de la taille du générateur.

Conclusion Générale

Le choix des panneaux solaires et de la motopompe est tributaire de plusieurs facteurs importants : le débit journalier d'eau, la hauteur manométrique totale, la tension, la puissance nécessaire pour le pompage... etc.

Le dimensionnement est une étape primordiale dans les buts de rationalisation et d'amortissement des investissements réalisés.

Le dimensionnement est basé sur une connaissance approfondie des conditions climatiques et géographiques relatives au site du travail.

Le dimensionnement de système de pompage photovoltaïque est basé sur le calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque, le choix de la pompe et le contrôleur répondants au service requis dans les conditions de référence.

Pour un dimensionnement optimal d'une installation de pompage photovoltaïque trois conditions doivent être prises soigneusement en considération :

L'amélioration de la captation d'ensoleillement par les panneaux solaires afin de récupérer le maximum d'énergie possible.

L'exploitation maximale de l'énergie captée afin de tirer le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur photovoltaïque.

Le dimensionnement optimal du système de pompage, une bonne installation, une bonne orientation des modules solaires et un bon dimensionnement permet d'exploiter l'énergie de façon optimale.

L'utilisation d'un stockage d'eau dans des réservoirs hydrauliques au lieu de stocker l'énergie électrique dans des batteries est la meilleure façon de simplifier et de minimiser les coûts d'une part et d'autre part pour protéger l'environnement contre les émissions toxiques des batteries. Ce système de pompage est conçu pour un approvisionnement en eau dit « au fil du soleil ».

Perspective

En perspective, il est raisonnable de prendre en considération le côté économique et tenir en compte l'impact environnemental pour avoir une étude complète. Nous signalons au passage que notre mémoire demande une continuité pour arriver à terme, donc nous souhaitons de tous cœur qu'un éventuel étudiant dans l'avenir proche achèvera ce travail modeste en se penchant aussi sur les deux critères (coût de l'opération et pollution de l'atmosphère).

Références bibliographiques

- [1] **M. L. LOUAZENE.** Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla, Thèse de Magister, Université El Hadj Lakhdar-Batna, Juin 2008.
- [2] **L. LIGRING.** Etude pour la mise en place du système de pompage solaire d'un champ de neuf hectare pour une irrigation goutte à goutte à Seheba au Tchad, Mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie-Ouagadougou 01-Burkina Faso, Octobre 2012.
- [3] **Y. SOULA.** Optimisation et dimensionnement d'un système solaire de pompage d'eau, Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi-Oum El Bouaghi, Juin 2016.
- [4] **I. LAFIA SEIDOU.** Etude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du Bénin : cas de Adjakpata, Mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie-Ouagadougou 01-Burkina Faso, Juin 2017.
- [5] **H. HADJOU SMIR, A. GHOGUEUR.** Etude technico-économique de l'irrigation par pompage solaire photovoltaïque, d'une palmeraie de palmiers : Etude de cas, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Juin 2018.
- [6] **A. DJAFOUR, M.S. AIDA.** Etude d'un système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation d'une palmeraie à Ouargla, Article, Université Kasdi Merbah Ouargla, Université de Constantine.
- [7] **M. ADDOU, A. BEDDIAF.** Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour l'alimentation d'une ferme, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen, Juin 2016.
- [8] **R. AMROUCHE, S. BEDJOU.** Contrôle d'un système de pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016.
- [9] **A. HAMDI.** Conception et dimensionnement d'un système photovoltaïque pour habitation et pompage, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider-Biskra, Juin 2018.
- [10] **A. HACHEMI.** Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système hybride dédié au pompage, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, Février 2017.

Références bibliographiques

- [11] **M. R. BEN TRIA.** Etude d'un système de pompage photovoltaïque pour des puits de parcours (cas de la région de Taïbet-Ouargla), Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Mai 2017.
- [12] Principe de dimensionnement et étude de cas, Pompage au fils du soleil, Cours.
- [13] **A. HMIMAD, L. ZOUYGHY.** Etude d'un système de pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Ecole Supérieure De Technologie-Guelmim, Avril 2014.
- [14] **T. BOUGUERRA.** Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continue et en alternatif, Thèse de Magister, Université Mentouri-Constantine1, Juin 2014.
- [15] **R. KHEZZAR.** Optimisation de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique, Thèse de Doctorat, Université El Hadj Lakhdar-Batna 1, Février 2017.
- [16] **Z. BEN KHELIFA, W. DEROUICHE.** Etude de l'irrigation d'un champ agricole par le pompage photovoltaïque dans la région de Hassi Ben Abdallah Ouargla, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, Mai 2017.
- [17] **S. SALI, A. OUAkli.** Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2017.
- [18] **M. BOUS SAID.** Réalisation des phénomènes de vieillissement des modules photovoltaïques, Mémoire de Licence, Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.
- [19] **S. MADI, S. HEDOUD.** Contribution à la vulgarisation des systèmes photovoltaïques utiliser pour l'irrigation par pivots traditionnels dans la région d'El Oued, Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar-El Oued, 2018.
- [20] **S. BELAID LALOUNI.** Cours énergie solaire photovoltaïque, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2015.
- [21] **F. BANDOu.** Diagnostic de pannes d'un système de pompage photovoltaïque, Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri-Tizi Ouzou, Décembre 2010.
- [22] **A. DAOUD.** Contrôle de la puissance d'un générateur photovoltaïque pour le pompage solaire, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf-Oran, Septembre 2013.

Références bibliographiques

- [23] **N. DEBILI.** Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque, Thèse de Magister, Université Mentouri-Constantine1, 2015.
- [24] **M. SAAD SAOUD.** Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [25] **M. L. DEGLA, B. BEN AHMED.** Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Kasdi Merbah-Ouargla, Mai 2017.
- [26] **J. ROYER, T. DJIAKO, E. SCHILLER, B. SADA SY.** Le pompage photovoltaïque, Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa-Canada.
- [27] **M. R. LAHLOUH, A. AZIZOU.** Etude et réalisation d'un système d'irrigation automatique, Mémoire de Master, Université Djilali Bounnaâma-Khimis Mliana, 2018.
- [28] **C. BROUWER, K. PRINS, M. kay & M. HEIBOEM.** Gestion des eaux en irrigation, manuel de formation n°5 'Méthode d'irrigation', FAO, Italie, 1990.
- [29] **I. AOUATA.** Etude et développement de l'irrigation souterraine en Algérie, Mémoire de Master, Ecole nationale supérieure d'hydraulique-Abraoui Abdallah, Janvier 2015.
- [30] Actualisation de l'inventaire des ouvrages et infrastructures de prélèvement d'eau du domaine public hydraulique à usage agricole-Wilaya de Biskra, AGIRE, Avril 2016.
- [31] **M. E. MATALLAH.** L'impact de la morphologie des tissus urbains sur le confort thermique extérieur-Cas d'étude ville de Tolga-, Thèse de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra, Juin 2016.
- [32] **D. BELAID.** La culture du palmier dattier en Algérie, 2015.
- [33] Inventaire des points d'eau et enquête sur les débits extraits de la Wilaya de Biskra, ANRH, 2008.
- [34] **W. BOUKHELOUF.** La biodiversité des arthropodes (coléoptères) dans le vignoble et olivier au Ziban, Thèse de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra, 2018.
- [35] **A. CHEHMA.** Le Sahara en Algérie, situation et défis, Article, Université Kasdi Merbah-Ouargla, Novembre 2011.

Références bibliographiques

[36] **M. ROUICI.** Le système d'irrigation pratiqué dans les palmerais de Sidi Okba ; Description et analyse d'efficacité, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.

[37] **K. A. S. KABORE.** Détermination des coefficients culturaux des paramètres de croissance du *Chrysanthellum Indicum* Var. *Afroamericanum* B.L. Turner au Burkina-Faso, Mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie-Ouagadougou 01-Burkina Faso, Septembre 2018.

[38] **F. TRAORE.** Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso, Mémoire de DEA, Université de Liège, 2007.

[39] **K. T. S. MAURICE.** Système photovoltaïque : Dimensionnement pour pompage d'eau pour une irrigation goutte à goutte, Mémoire de DEA, Université de Ouagadougou-Burkina Faso, Février 2007.

[40] <https://www.solaris-store.com/>

[*] Site Inconnu.

Annexes

Liste des annexes

Annexe A : Catalogue de la pompe LORENTZ.

Annexe B : Catalogue du panneau solaire VICTRON poly-cristallin.

Annexe C : Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) par le logiciel CropWat 8.

Annexe D : Calcul des besoins en eau mensuels et journaliers d'un hectare de palmier dattier.

Annexe E : Calcul de l'irradiation journalière de la ville de Biskra.

Annexe A

Pompe immergée LORENTZ PSk2-15 C-SJ17-18

Gamme de système

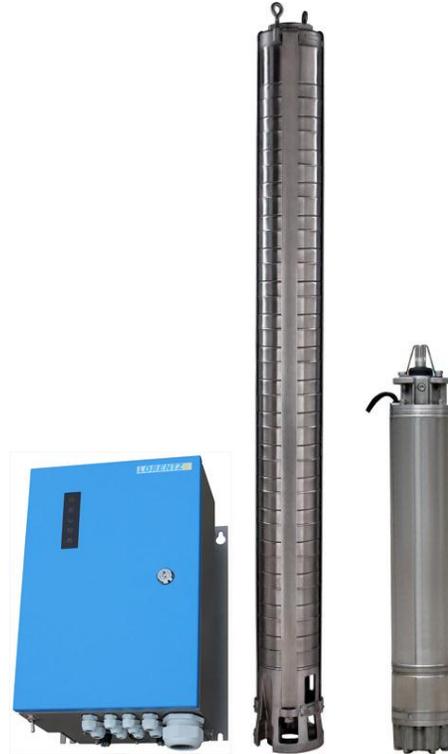
Hauteur manométrique: max 140 m

Débit : max 22 m³/h

Données techniques :

Contrôleur PSk2-15 :

- Contrôleur pour les pompes solaires à haut rendement
- Soutien de puissance hybride (solaire/réseau/générateur) grâce à la SmartSolution de LORENTZ
- Entrées pour compteur d'eau, capteur de pression, interrupteurs digitaux
- Configuration simple avec l'application PumpScanner de LORENTZ pour Android™
- Enregistrement de données et surveillance du système intégré
- Application intégrée pour pression constante, débit constant et quantité quotidienne
- Recherche de point de puissance maximale (MPPT) intégrée



Puissance	max 15 kW
Tension d'entrée	max 850 V
Optimal Vmp	>575 V
Tension nominale	380V-400V-415V
Intensité du moteur	max 24 A
Efficacité	98 %
Température ambiante	-30- 50 °C
Classe de protection	IP54

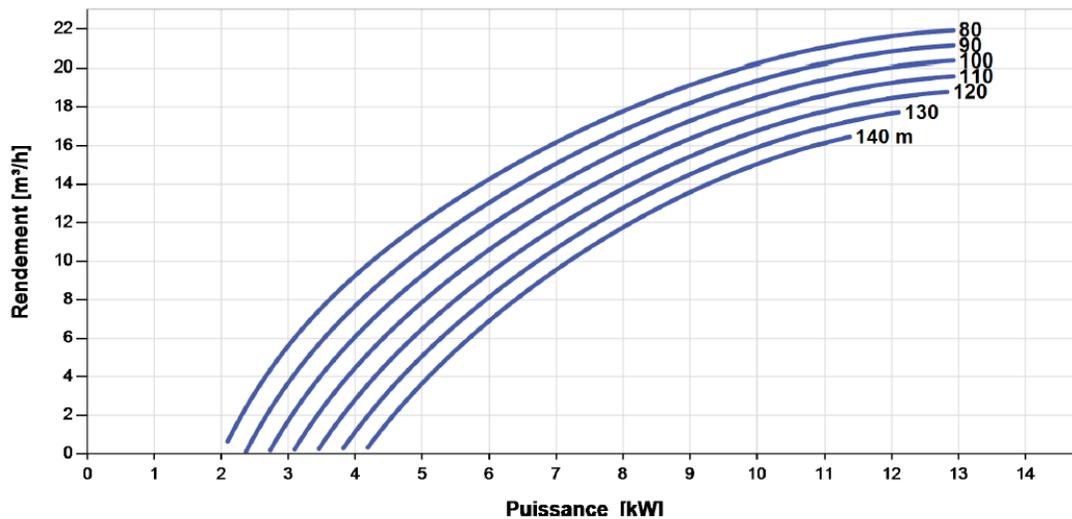
Moteur AC DRIVE SUB 6'' 11 Kw :

- Moteur triphasé à courant alternatif et à haut rendement
- Fréquence : 25...50HZ
- Matériel de haut qualité, acier inoxydable : AISI 304
- Moteur sans électronique à l'intérieur

Vitesse du moteur	1400-2850 rmp
Facteur de puissance	0.87
Classe d'insolation	F
Classe de protection	IP68
Submerssion	max 300m

Graphique de la pompe

Vmp* > 575 V



Annexe B

Panneau solaire VICTRON poly-cristallin 330 Wc-24V



Caractéristiques techniques :

Dimension module	1956*992*40 mm
Poids	22.5 kg
Puissance nominale P_{mpp}	330 W
Tension à puissance max V_{mpp}	37.3 V
Courant à puissance max I_{mpp}	8.86 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	44.72 V
Courant de court-circuit I_{sc}	9.72 A

**Caractéristiques électriques selon STC (valeurs aux conditions de test standardisées (STC) :
irradiation 1000W/m², température de cellule 25°C, masse d'air 1.5).**

Puissance nominale (tolérance+/-3%)	330W
Type de cellules	Poly-cristallin
Nombre des cellules couplées en série	72
Tension maximale système	1000 V
Coefficient de température de P_{mpp} (%)	-0.45/°C
Coefficient de température de V_{oc} (%)	-0.35/°C
Coefficient de température de I_{sc} (%)	+0.04/°C
Température de fonctionnement	-40 °C à +85 °C
Charge de surface maximale	200 kg/m ²
Résistance aux impacts (grêle)	23 m/s, 7 ,53 g
Boite de raccordement	PV-JB002
Type de connecteur	MC4
Longueur des câbles	900 mm
Tolérance de puissance	+/-3%
Cadre	Aluminium
Garantie produit	5 ans
Garantie de puissance	10 ans à 90% + 25 ans 80% de la puissance minimale

Annexe C

CROPWAT 8.0

Le CROPWAT est un logiciel d'aide à la gestion de l'irrigation, il a été mis au point par la FAO en 1992, basé sur la formule de Penman-Monteith modifiée. Il permet le calcul des besoins en eau des cultures et des quantités d'eau d'irrigation. Il offre également la possibilité de développer un calendrier d'irrigation en fonction de diverses pratiques culturales, et d'évaluer les effets du manque d'eau sur les cultures et l'efficacité de différentes pratiques d'irrigation.

ETP calculée par CropWat8

Mois/De c	Temp Min	Temp Max	Humidit é	Vent	Insolati on	Ray.	Eto/Jou r
	°C	°C	%	m/s	heures	MJ/m ² /jou r	mm/jour
janv-01	6,3	17,1	58	2,8	7,5	11	2,23
2	6,9	17,2	57	2,8	7,1	11,1	2,35
3	7,3	16,7	54	3,4	7	11,7	2,75
Mois	6,8	17	56	3	7,2	11,3	2,44
févr-01	7,3	17,5	54	3,4	7,9	13,5	2,97
2	8,2	19,5	47	3,4	8,3	14,9	3,63
3	9,2	20,3	46	3,6	7,7	15,1	4
Mois	8,2	19,1	49	3,5	8	14,5	3,53

Annexes

mars-01	10,4	21,9	45	3,9	8,2	16,7	4,59
2	11,4	23,1	44	3,3	8,4	18	4,71
3	12,8	24,7	40	3,8	8,9	19,7	5,66
Mois	11,5	23,2	43	3,7	8,5	18,1	4,99
avr-01	14,1	25,8	40	4	9,2	21,1	6,19
2	15,2	26,5	39	4,2	9,7	22,5	6,72
3	16,3	28,2	39	4,2	9,7	23,2	7,17
Mois	15,2	26,8	39	4,1	9,5	22,3	6,69
mai-01	18,1	30,3	36	4	10,3	24,5	7,83
2	20,1	32,5	33	4	10,1	24,6	8,53
3	21,7	34,5	31	3,6	10,6	25,6	8,83
Mois	20	32,4	33	3,9	10,3	24,9	8,4
juin-01	23,1	35,5	32	3,6	10,4	25,4	9,01
2	24,5	37,1	31	3,5	10,9	26,2	9,38
3	26,3	39,8	26	3,1	11,8	27,5	9,78
Mois	24,6	37,5	30	3,4	11	26,4	9,39
juil-01	28	41,1	25	3,2	11,3	26,7	10,1
2	27,7	40,2	28	2,9	11,5	26,8	9,42
3	28	41,2	26	2,7	11,7	26,8	9,3
Mois	27,9	40,8	26	2,9	11,5	26,8	9,61
août-01	28,1	40,4	29	2,8	10,8	25,1	8,95

Annexes

2	27,9	40,3	31	3	10,5	24,1	8,92
3	27	39,2	31	2,6	10,4	23,3	8,01
Mois	27,7	40	30	2,8	10,6	24,2	8,63
sept-01	25,2	36,8	38	2,9	9	20,5	7,29
2	23,5	35,1	39	2,9	8,9	19,5	6,74
3	21,5	32,2	44	2,9	8,3	17,8	5,81
Mois	23,4	34,7	40	2,9	8,7	19,3	6,61
oct-01	19,9	30,6	46	2,9	8,3	16,7	5,26
2	18,2	28,9	49	2,9	8,1	15,4	4,65
3	16,5	27,4	49	2,8	8,3	14,6	4,17
Mois	18,2	29	48	2,9	8,2	15,6	4,69
nov-01	13,9	24	53	2,9	7,7	13	3,46
2	11,9	22,1	53	3	7,5	12	3,15
3	10,3	20,4	55	3,1	6,9	10,8	2,83
Mois	12	22,2	54	3	7,4	11,9	3,15
déc-01	8,7	18,3	58	2,7	7,3	10,7	2,29
2	7,6	17,7	60	2,7	6,7	10	2,13
3	7,9	17,8	59	2,9	7,1	10,4	2,26
Mois	8,1	17,9	59	2,8	7	10,4	2,23
Moyenne	17	28,4	42	3,2	9	18,8	5,86

(ITDAS 2019).

Annexe D

Calcul des besoins en eau d'un hectare de palmier

Mois Décade	<i>ETP</i> mensuelle (mm)	K_c	<i>ETR</i> (mm)	Besoins bruts (mm)	Volume D'eau (m ³ /j)
Janvier					
1	22.3	0.9	20.07	25.087	250.87
2	23.5	0.9	21.15	26.437	264.37
3	30.25	0.9	27.225	34.031	340.31
Besoins mensuels	76.05	0.9	68.445	85.555	855.55
Besoins journaliers	2.45	0.9	2.207	2.759	27.59
Février					
1	29.7	0.9	26.73	33.412	334.125
2	36.3	0.9	32.67	40.837	408.37
3	32	0.9	28.8	36	360
Besoins mensuels	98	0.9	88.2	110.24	1102.4
Besoins journaliers	3.5	0.9	3.15	3.937	39.37
Mars					
1	45.9	0.95	43.605	54.506	545.06
2	47.1	0.95	44.745	55.931	559.31
3	62.26	0.95	59.147	73.933	739.33
Besoins mensuels	155.26	0.95	147.497	184.37	1843.7

Besoins journaliers	5	0.95	4.757	5.947	59.47
Avril					
1	61.9	0.95	58.805	73.506	735.062
2	67.2	0.95	63.84	79.8	798
3	71.7	0.95	68.115	85.143	851.43
Besoins mensuels	200.8	0.95	190.76	238.449	2384.492
Besoins journaliers	6.69	0.95	6.358	7.948	79.48
Mai					
1	78.3	0.95	74.385	92.981	929.81
2	85.3	0.95	81.035	101.293	1012.93
3	97.13	0.95	92.273	115.341	1153.41
Besoins mensuels	260.73	0.95	247.693	309.615	3096.15
Besoins journaliers	8.41	0.95	7.99	9.987	99.87
Juin					
1	90.1	1	90.1	112.625	1126.25
2	93.8	1	93.8	117.25	1172.5
3	97.8	1	97.8	122.25	1222.5
Besoins mensuels	281.7	1	281.7	352.125	3521.25
Besoins journaliers	9.39	1	9.39	11.737	117.37
Juillet					
1	101	1	101	126.25	1262.5
2	94.2	1	94.2	117.75	1177.5
3	102.3	1	102.3	127.875	1278.75

Besoins mensuels	297.5	1	297.5	371.875	3718.75
Besoins journaliers	9.59	1	9.59	11.995	119.95
Août					
1	89.5	1	89.5	111.875	1118.75
2	89.2	1	89.2	111.5	1115
3	88.11	1	88.11	110.137	1101.37
Besoins mensuels	266.81	1	266.81	333.512	3335.12
Besoin journaliers	8.6	1	8.6	10.758	107.58
Septembre					
1	72.9	0.95	69.255	86.568	865.68
2	67.4	0.95	64.03	80.037	800.37
3	58.1	0.95	55.195	68.993	689.93
Besoins mensuels	198.4	0.95	188.48	235.598	2355.98
Besoins journaliers	6.61	0.95	6.282	7.853	78.53
Octobre					
1	52.6	0.95	49.97	62.462	624.62
2	46.5	0.95	44.175	55.218	552.18
3	45.87	0.95	43.576	54.470	544.7
Besoins mensuels	144.97	0.95	137.721	172.15	1721.5
Besoins journaliers	4.67	0.95	4.442	5.553	55.53
Novembre					
1	34.6	0.95	32.87	41.087	410.87

Annexes

2	31.5	0.95	29.925	37.406	374.06
3	28.3	0.95	26.885	33.606	336.06
Besoins mensuels	94.4	0.95	89.68	112.099	1120.99
Besoins journaliers	3.14	0.95	2.989	3.736	37.36
Décembre					
1	22.9	0.9	20.61	25.762	257.62
2	21.3	0.9	19.17	23.962	239.62
3	24.86	0.9	22.374	27.967	279.67
Besoins mensuels	69.06	0.9	62.154	77.691	776.91
Besoins journaliers	2.22	0.9	2.004	2.506	25.06

Annexe E

1. Situation géographique et administrative

La wilaya de Biskra se situe dans une zone charnière entre le Tell et le Sahara, son chef-lieu se situe sur :

Tableau (1) : Situation géographique et administrative (ONM).

Longitude [°]	34° 48' N
Latitude [°]	5° 44' E
Altitude [m]	82

2. Le rayonnement solaire hors atmosphère

Le rayonnement solaire extraterrestre (hors atmosphère) est le rayonnement solaire qui frappe la surface de la couche atmosphérique. Pour avoir l'irradiation solaire globale (H_0 : MJ/m². Jour) sur une surface horizontale à la limite supérieure de l'atmosphère on utilise la relation suivante [1] :

$$\overline{H_0} = \frac{24}{\pi} \cdot h_0 (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin W + \frac{\pi}{180} \cdot W \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta) \quad (01)$$

$$h_0 = I_0 [1 + 0.033 \cdot \cos(\frac{360 \cdot N}{365})] \quad (02)$$

I_0 : La constante solaire ; $I_0 = 1367$ (w/m²)

δ : La déclinaison du soleil.

φ : Latitude de lieu.

N : Le numéro du jour de l'année compte à partir du premier Janvier.

W : L'angle horaire pour la journée type N de chaque mois, déterminé à partir de l'équation :

$$W = \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (03)$$

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \cdot \frac{284 + N}{365}\right) \quad (04)$$

Pour une grandeur donnée, le jour type du mois est le jour du mois qui se rapprochant de la moyenne mensuelle de cette grandeur. La liste des jours types proposés par Klein est représentée sur le tableau suivant [1] :

Tableau (2) : Liste des jours types par mois proposés par Klein.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Jour type	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10
N° de jour	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

Pour calculer l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois, on utilise l'équation (01). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau (3) : Les valeurs de l'irradiation journalière moyenne mensuelle hors atmosphère.

Mois	N° de jour	δ La déclinaison [°]	W [°]	$\overline{H_0}$ [Wh/m ² .j]
Janvier	17	-20.9169	74.78	5162.5095
Février	47	-12.9546	80.91	6558.4968
Mars	75	-2.4177	88.34	8287.5369
Avril	105	9.4148	96.54	9988.8842
Mai	135	18.7919	103.51	11108.1983
Juin	162	23.0859	107.02	11533.7151
juillet	198	21.1836	105.44	11297.1689
Aout	228	13.4549	99.46	10397.3448
Septembre	258	2.2168	91.52	8885.0907
Octobre	288	-9.5993	83.33	7052.7559
Novembre	318	-18.9119	76.39	5482.4571

Annexes

Décembre	344	-23.0496	73	4768.7528
----------	-----	----------	----	-----------

2.1. L'indice de clarté

Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté. Les valeurs de ce dernier varient selon les endroits et les saisons [1] :

Indice de la clarté horaire : $K_T = I/I_0$

Indice de la clarté journalière : $K_T = H/H_0$

Indice de la clarté moyenne mensuelle : $K_T = \bar{H}/\bar{H}_0$

2.2. Calcul de l'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface horizontale

2.2.1. Fraction d'insolation [1]

$$\sigma = \frac{\bar{S}}{\bar{S}_0} \quad (05)$$

Avec :

$$S_0 = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (06)$$

Tableau (4) : Valeurs moyenne d'insolation mensuelle.

Mois	Insolation (h)	Durée d'insolation astronomique $\bar{S}_0(h)$	Durée d'insolation mesurée $\bar{S}(h)$	Fraction d'insolation σ
Janvier	224.2	9.97	7.2	0.72
Février	223.4	10.79	8	0.74
Mars	262.6	11.78	8.5	0.72
Avril	285.8	12.87	9.5	0.73
Mai	320.8	13.80	10.3	0.74

Annexes

Juin	331.6	14.27	11	0.77
Juillet	356.6	14.06	11.5	0.81
Aout	326.7	13.26	10.6	0.79
Septembre	270	12.20	8.7	0.71
Octobre	246.9	11.12	8.2	0.73
Novembre	220.6	10.19	7.4	0.72
Décembre	217.8	9.73	7	0.71

$\bar{S}(h)$: Duré d'insolation moyenne journalière (mesurée).

$\bar{S}_0(h)$: Durée d'insolation astronomique du jour.

D'après la formule de Black, l'indice de clarté est obtenu par la relation :

$$K_T = \frac{H}{H_0} = a + \sigma b \quad (07)$$

H_0 : L'irradiation solaire globale mensuelle hors atmosphère (J/m². Jour).

H : L'irradiation solaire globale mensuelle au sol (J/m². Jour).

σ : La fraction d'insolation.

a et b : Sont les paramètres du modèle pour la région Saharienne d'Algérie :

$$\begin{cases} a = 0.3 \\ b = 0.43 \end{cases}$$

L'irradiation diffuse journalière moyenne \bar{H}_d par la corrélation de Beeckman :

$$k_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = c - d \cdot K_T \quad (08)$$

Pour la région Saharienne : $\begin{cases} c = 0.91 \\ d = 0.98 \end{cases}$

Tableau (5) : Les valeurs de l'irradiation globale journalière sur une surface horizontale.

Mois	K_t	\bar{H}	K_d	\bar{H}_d
Janvier	0.6096	3147.0657	0.3125	983.4580
Février	0.6182	4054.4627	0.3041	1232.9621
Mars	0.6096	5052.0824	0.3125	1578.7757
Avril	0.6139	6132.1760	0.3083	1890.5498
Mai	0.6182	6867.0881	0.3041	2088.2814
Juin	0.6311	7278.9276	0.2915	2121.8073
Juillet	0.6483	7323.9545	0.2746	2011.1579
Aout	0.6397	6651.1814	0.2830	1882.2843
Septembre	0.6053	5378.1454	0.3168	1703.7964
Octobre	0.6139	4329.6868	0.3083	1334.8424
Novembre	0.6096	3342.1058	0.3125	1044.4080
Décembre	0.6053	2886.5260	0.3168	914.451

2.3. Calcul de l'irradiation globale journalière sur une surface inclinée

En utilisant le modèle de Liu et Jordan pour le calcul de l'irradiation globale journalière sur une surface inclinée \bar{H}_T [1]:

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \cdot \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (09)$$

\bar{R}_b : Facteur de conversion donné par la relation suivante :

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \dot{W} + \left(\frac{\pi}{180} \right) \cdot \dot{W} \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin W + \left(\frac{\pi}{180} \right) \cdot W \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta} \quad (10)$$

\bar{H}_d : La composition diffuse.

\bar{H}_b : La composante directe donnée par la relation suivante :

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \quad (11)$$

ρ : L'albédo au sol.

β : L'angle d'inclinaison.

W : L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan horizontal.

\hat{W} : L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan incliné.

$$W = \cos^{-1}(-\tan \varphi . \tan \delta) \quad (12)$$

$$\hat{W} = \text{Min}[W; \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) . \tan \delta)] \quad (13)$$

2.3.1. Inclinaison d'un angle égal à la latitude

Les valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation globale incidente sur un plan incliné d'un angle égal à la latitude géographique de lieu [1].

Tableau (6) : Les valeurs de l'irradiation globale journalière pour une inclinaison égale à la latitude.

Mois	\hat{W}	\bar{R}_b	\bar{H}_b	\bar{H}_T
Janvier	74.78	1.8808	2163.6077	5063.1375
Février	80.91	1.5671	2821.5006	5670.8823
Mars	88.34	1.2699	3473.3067	6006.1690
Avril	96.54	1.0167	4241.6262	6225.4723
Mai	103.51	0.8458	4778.8067	6157.8826
Juin	107.02	0.7717	5157.1203	6138.96
Juillet	105.44	0.8043	5312.7966	6332.7466
Aout	99.46	0.9410	4768.8971	6408.9596
Septembre	91.52	1.1636	3674.349	5994.9527
Octobre	83.33	1.4617	2994.8444	5728.2654

Novembre	76.39	1.7912	2297.6978	5171.0529
Décembre	73	1.9865	1972.075	4840.3957

2.3.2. Inclinaison optimale d'un panneau solaire

Le calcul de l'angle d'inclinaison optimale pour une irradiation maximale reçue sur un capteur incliné, se fait par la variation de l'angle d'inclinaison dans le jours type du mois afin d'identifier l'angle pour lequel l'énergie reçue atteint sa valeur maximale [1].

Tableau (7) : Les valeurs de l'irradiation globale journalière pour une inclinaison optimale.

Mois	\dot{W}	\bar{R}_b	\bar{H}_T
Janvier	74.78	2.1163	5591.8047
Février	80.91	1.6490	5920.1082
Mars	88.34	1.2706	6009.0903
Avril	92.99	1.0575	6381.6562
Mai	103.51	0.9991	6862.8111
Juin	107.02	1.0031	7296.9866
Juillet	105.44	0.9992	7320.7549
Aout	96.25	1.0219	6759.0053
Septembre	90.25	1.1646	5993.3933
Octobre	83.33	1.5045	5868.1502
Novembre	76.39	1.9784	5619.6307
Décembre	73	2.2803	5436.0597