



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Hydraulique*

Spécialité : *Hydraulique Urbaine*

Par : Mammeri Abdelkrim

Thème

**Optimisation du Champ Photovoltaïque dans un Système
de Pompage Solaire Installé dans la région d'Adrar**

Soutenu publiquement le : 23/06/2016

Devant le jury :

Mr. Mecheri Bachir	M.A.A	Univ. Ghardaïa	Président
Mr. Bouaraour Kamel	MCA	Univ. Ghardaïa	Examineur
Mr. Ammar Hachemi	MRB	URAER. Ghardaïa	Examineur
Mr. Maouedj Rachid	M.R.A	URER/MS Adrar	Encadreur

Année universitaire 2017/2018

Remerciements

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre Dieu de nos avoir donnée le courage, la patience et la force durant toutes ces années d'étude.

Le présent travail a été réalisé à l'Unité de recherche en énergies renouvelables au milieu saharienne (URER/MS) d'ADRAR, sous la direction du Docteur Maouedj Rachid.

J'adresse mes plus vifs remerciements en particulier à notre Encadreur Dr. Maouedj Rachid, Maitre de recherche "A" à l'unité de recherche des énergies renouvelables au milieu saharienne d'ADRAR, qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils très précieux et ses encouragements.

J'adresse mes remerciements à Monsieur le président de jury et Messieurs les membres de jury d'avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer au jury de ce mémoire.

Mes vives reconnaissances et remerciements vont également à tous les professeurs de département d'Hydraulique à tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de prêt ou de loin à ma formation et à tous ceux qui m'ont enrichi de leur connaissance.

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	01
Chapitre I	Généralités sur l'énergie solaire PV
I.1. Introduction.....	04
I.2. L'énergie solaire.....	05
I.3. Mesure du rayonnement solaire.....	06
I.4. L'effet photovoltaïque.....	07
I.5. La cellule photovoltaïque.....	08
I.5.1. Principe de fonctionnement.....	08
I.6. Le module photovoltaïque.....	09
I.6.1. Caractéristiques électriques des modules.....	10
I.7. Le générateur photovoltaïque.....	10
I.7.1. Association en série.....	11
I.7.2. Association en parallèle.....	11
I.8. Les systèmes photovoltaïques.....	12
I.8.1. Système photovoltaïque d'alimentation électrique.....	12
I.8.2. Système P.V raccordé au réseau.....	13
I.8.3. Système photovoltaïque de pompage d'eau.....	14
I.9. Inclinaison optimale des panneaux solaire.....	14
I.10. Azimut α du soleil (orientation).....	14
I.11. Le temps solaire vrai.....	15
I.12. Conclusion.....	16
Chapitre II	Généralité sur le pompage
II.1. Introduction.....	17
II.2. Les ressource en eau.....	17
II.2.1. Les eaux de surface.....	17
II.2.2. Les eaux souterraines.....	18
II.2.3. Les types des nappes aquifères.....	18
a. Nappe captive.....	18
b. Nappe libre.....	19
II.3. Les caractéristiques statique et dynamique du puits.....	20
II.3.1. Puits hydrauliques et tests de pompage.....	20
II.3.2. Programme des essais.....	22
II.3.3. Le courbe caractéristique.....	23
II.3.3.1. Le débit caractéristique.....	24
II.3.3.2. Le niveau statique.....	24
II.3.3.3. Le niveau dynamique.....	24
II.4. Les pompes hydrauliques.....	25
II.4.1. Les pompes photovoltaïques.....	25
II.4.2. Fonctionnement et constitution.....	26
II.4.2.1. Partie moteur.....	26
a. Transmission.....	26
b. Transmission mécanique.....	26
c. Transmission électrique.....	27
II.4.2.2. Partie hydraulique.....	27

II.4.3. Classification.....	27
II.4.3.1. Selon le mode de fonctionnement.....	28
II.4.3.1.1. Les pompes centrifuges.....	28
a) Principe de fonctionnement.....	28
b) Constitution.....	29
c) Caractéristiques d'une pompe centrifuge.....	30
II.4.3.1.2. Les pompes volumétriques.....	31
a) Principe de fonctionnement.....	31
b) Constitution.....	31
II.4.3.1.3. Les pompes volumétriques rotatives.....	31
II.4.3.1.4. Les pompes volumétriques alternatives.....	32
a) Caractéristiques d'une pompe volumétrique.....	32
II.4.3.2. Comparaisons entre les pompes centrifuges et les pompes volumétriques.....	33
II.4.3.3. Selon le mode d'utilisation.....	34
II.4.3.3.1. Les pompes de surface.....	34
II.4.3.3.2. Les pompes immergées.....	35
II.4.4. Caractéristiques d'une pompe centrifuge.....	35
II.4.4.1. Représentation graphique.....	35
II.4.4.2. Couplage de pompes.....	36
II.4.4.2.1. Couplage en série.....	36
II.4.4.2.2. Couplage en parallèle.....	37
II.4.4.3. Rognage des roues.....	38
II.4.4.4. Lois de similitude hydraulique.....	38
II.5. Le pompage photovoltaïque.....	39
II.5.1. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque.....	39
II.5.2. Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.....	40
II.5.2.1. Les besoins en eau des cultures.....	40
II.5.2.1.1. Détermination des besoins en eau des cultures.....	41
II.5.2.1.1.1. Les données climatiques.....	41
II.5.2.1.1.2. L'évapotranspiration potentielle ou pratique.....	41
II.5.2.1.1.3. Détermination de l'évapotranspiration potentielle.....	41
II.5.2.2. La hauteur manométrique totale.....	42
II.5.2.2.1. Calcul des pertes de charge.....	42
II.5.2.2.1.1. Régimes d'écoulement.....	42
II.5.2.2.1.2. Calcul des pertes de charge linière.....	44
a. Régime laminaire.....	45
b. Régime turbulent.....	45
b.1. Conduites lisses.....	45
b.2. Conduites rugueuses.....	46
II.5.2.2.1.3. Calcul des pertes de charges singulières.....	46
II.5.2.2.1.3.1. Coefficient K à valeur constante.....	47
II.5.2.2.1.3.2. Coefficient k dépendant du diamètre utilisé.....	48
II.5.2.3. Cavitation d'une pompe.....	49
II.5.2.3.1. Description du phénomène.....	49
II.5.2.3.2. Expression de la condition de non cavitation.....	50
II.5.2.4. $NPSH_{disp}$ et $NPSH_{req}$	50
II.5.2.5. La puissance hydraulique d'une pompe.....	51
II.5.2.6. Estimation de l'ensoleillement.....	52
II.5.2.7. Estimation du champ photovoltaïque requis (W_c).....	52

II.6. Conclusion.....	53
Chapitre III	Expérimentation d'une poursuite solaire discontinue à deux positions pour panneaux PV
III.1. Introduction.....	54
III.2. Situation géographique de la wilaya d'Adrar.....	54
III.3. Situation démographique.....	55
III.4. Climat.....	55
III.4.1. La température.....	55
III.4.2. Le vent.....	56
III.4.3. La Précipitation.....	56
III.4.4. Humidité relative de l'air.....	56
III.5. Relief.....	56
III.6. Concept de poursuite solaire discontinue à deux positions autour d'un axe vertical..	57
III.7. Méthodologie.....	57
III.8. Résultats et discussion.....	60
III.9. Conclusion.....	64
Chapitre IV	Application de la poursuite solaire discontinue à deux positions au pompage PV
IV.1 : Introduction.....	65
IV.2. Composition du banc d'essai expérimental.....	66
IV.3. Les caractéristiques techniques de la pompe à eau et de son contrôleur.....	66
IV.3.1. Pompe (C-SJ5-8).....	66
IV.3.2. Contrôleur (PS 150).....	66
IV.4. Les panneaux PV.....	67
IV.5. Le banc d'essai expérimental.....	67
IV.6. Résultat et discussion.....	69
IV.7. Conclusion.....	77
Conclusion générale	78
Références Bibliographiques	

Chapitre I	Généralités sur l'énergie solaire PV	
Fig. I.1 :	Spectre d'irradiante solaire.....	06
Fig. I.2 :	Cellule photovoltaïque.....	08
Fig. I.3 :	Principe de fonctionnement d'une cellule.....	09
Fig. I.4 :	Panneau photovoltaïque.....	09
Fig. I.5 :	Composition d'un champ PV.....	11
Fig. I.6 :	Caractéristique d'un groupe des modules en série.....	11
Fig. I.7 :	Caractéristique d'un groupe des modules en parallèle.....	12
Fig. I.8 :	Système photovoltaïque autonome.....	12
Fig. I.9 :	Système hybride solaire / éolien.....	13
Fig. I.10 :	Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	13
Fig. I.11 :	Système de pompage solaire.....	14
Fig. I.12 :	Schéma de principe de la terre et des angles rentrant dans le calcul de l'irradiance.....	15
Chapitre II	Généralité sur le pompage	
Fig. II.1 :	Nappes aquifère captive.....	19
Fig. II.2 :	Nappes aquifère libre.....	19
Fig. II.3 :	Cône de dépression au niveau d'un forage.....	20
Fig. II.4 :	La courbe caractéristique du puits.....	23
Fig. II.5 :	Le niveau statique et dynamique dans le cas d'une nappe libre.....	24
Fig. II.6 :	Exemple d'installation avec une pompe centrifuge.....	28
Fig. II.7 :	Illustration d'une pompe centrifuge à volute.....	29
Fig. II.8 :	Illustration d'une centrifuge à turbine.....	30
Fig. II.9 :	Caractéristiques d'une pompe centrifuge a et b.....	30
Fig. II.10 :	courbes caractéristiques du couple en fonction de la vitesse (a) et du débit en fonction de la vitesse (b).....	32
Fig. II.11 :	Choix d'une pompe selon la HMT et le débit demandés.....	33
Fig. II.12 :	Exemples de courbes débit - HMT pour quelques pompes.....	34
Fig. II.13 :	Caractéristique d'une pompe.....	36
Fig. II.14 :	Caractéristique du réseau pour trois configurations d'élévation d'eau.....	36
Fig. II.15 :	caractéristique de deux pompes fonctionnant en série.....	37
Fig. II.16 :	Caractéristique de deux pompes fonctionnant en parallèles.....	38
Fig. II.17 :	Configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque au fil de soleil.....	40
Fig. II.18 :	Régime laminaire.....	43
Fig. II.19 :	Régime turbulent.....	43
Fig. II.20 :	Les profils des vitesses.....	44
Fig.21.	Diagramme de Moody.....	46
Chapitre III	Expérimentation d'une poursuite solaire discontinue à deux positions pour panneaux PV	
Fig. III.1 :	Concept de la poursuite solaire discontinue à axe vertical avec deux positions.....	57
Fig. III.2 :	Schéma global du support d'un pyranomètre prévu pour le banc d'essai expérimental.....	58
Fig. III.3 :	Schématisation des principaux détails de fixation du pyranomètre sur le support orientable.....	58
Fig. III.4 :	Photo montrant l'installation des trois pyranomètres.....	59
Fig. III.5 :	Evolution de l'éclairement solaire mesuré sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesuré sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions fixes ($\gamma=-90\text{deg}$ et $\gamma=+90\text{deg}$) lors de la journée du 22 juin 2011.....	60
Fig. III.6 :	Evolution de l'éclairement solaire mesuré sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesuré sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions fixes ($\gamma=-90\text{deg}$ et $\gamma=90\text{deg}$) lors de la journée du 29 juin 2011.....	61

Fig. III.7 : Evolution de l'éclairement solaire mesuré sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesuré sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions fixes ($\gamma=-46\text{deg}$ et $\gamma=46\text{deg}$) lors de la journée du 26 octobre 2011.....	61
Fig. III.8 : l'évolution de l'éclairement solaire mesuré sur un plan orienté plein sud et l'outre pivotant entre deux positions.....	63
Chapitre IV Application de la poursuite solaire discontinue à deux positions au pompage PV	
Fig. IV.1 : Concept de la poursuite solaire discontinue à axe vertical avec deux positions.....	65
Fig. IV.2. Photo du banc d'essai expérimental installé sur la plate forme des essais de l'URER/MS.....	67
Fig. IV.3. Photo de l'installation de système de pompage.....	68
Fig. IV.4. Différente positions de système (Est, Ouest).....	68
Fig. IV.5. Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma=-44^\circ$ et $\gamma=+44^\circ$) pour les jours 14/02/2015 et 16/02/2015.....	71
Fig. IV.6. Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma=-44^\circ$ et $\gamma=+44^\circ$) pour les jours 22/02/2015 et 27/02/2015.....	71
Fig. IV.7. Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma=-44^\circ$ et $\gamma=+44^\circ$) pour les jours 01/02/2015 et 03/02/2015.....	72
Fig. IV.8. Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma=-90^\circ$ et $\gamma=+90^\circ$) pour les jours 01/07/2016 et 30/06/2016.....	72
Fig. IV.9. Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma=-44^\circ$ et $\gamma=+44^\circ$) pour les jours 02/02/2015 et 13/02/2015.....	73
Fig. IV.10. Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma=-90^\circ$ et $\gamma=+90^\circ$) pour les jours 08/07/2016 et 29/06/2016.....	73
Fig. IV.11. Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma=-90^\circ$ et $\gamma=+90^\circ$) pour les jours 09/07/2016 et 28/06/2016.....	73
Fig. IV.12. Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma=-90^\circ$ et $\gamma=+90^\circ$) pour les jours 28/07/2016 et 24/06/2016.....	74
Fig. IV.13. Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma=-90^\circ$ et $\gamma=+90^\circ$) pour les jours 29/07/2016 et 07/06/2016.....	74
Fig. IV.14. Quantités d'eau journalière du système de pompage, avec un changement de l'orientation, une fois orienté plein et l'autre pivotant entre deux positions.....	77

Chapitre II**Généralité sur le pompage**

Tab. II.1. Coefficient de perte de charge K à valeur constante quel que soit le diamètre du réseau.....	47
Tab. II.2. Coefficient x selon l'accessoire utilisé.....	48
Tab. II.3. Coefficient ft selon le diamètre nominal.....	49

Chapitre III**Expérimentation d'une poursuite solaire discontinue à deux positions pour panneaux PV**

Tab. III.1. Les angles d'orientation considérée pour les différents mois.....	59
--	----

Chapitre IV**Application de la poursuite solaire discontinue à deux positions au pompage PV**

Tab. IV.1. Jours de comparaison sélectionnés.....	70
Tab. IV.2. Gain en eau pour les jours de comparaison.....	75

Nomenclature

E	Energie d'un photon	W/m^2
h	Constante de planck	J/s
c	Vitesse de la lumière	m/s
λ	Longueur d'onde de la radiation	μm
ϕ	Latitude	dég
δ	Déclinaison	dég
γ	Azimuth	dég
Z_r	Rabattement dans un puits d'observation à une distance r du puits	m
Q	Débit de pompage	m^3/h
T	Transmissivité	m^2/s
r	Diamètre du puits	m
t	Temps	jours
S	Coefficient de stockage	
ΔZ	Rabattement mesuré durant un cycle logarithmique de temps	m
η	Rendement	%
HMT	Hauteur manométrique totale	m
g	Constante de la gravité	m/s^2
P_c	Puissance crête	w/m^2
ETP	Evapotranspiration potentielle	mm
H_g	Hauteur géométrique	m
ΔP_c	Pertes de charge	m
Hr	Hauteur de réservoir	m
Nd	Niveau dynamique	m
Re	Nombre de Reynolds	sans unité
μ	Viscosité dynamique du liquide	Poiseilles
U	Vitesse du liquide	m/s
ρ	Masse volumique du liquide	Kg / m^3
λ	Coefficient de perte de charge	
L	Langue de canalisation	m
ε	Rugosité dynamique	Pa/s
K	Coefficient de perte de charge	
x	Coefficient de perte de charge singulier	
ft	Coefficient selon le diamètre nominal	
NPSH	Net Positive Suction Head	m
E_{hyd}	Energie hydraulique	kwh
E_{elec}	Energie électrique	kwh
P_{hy}	Puissance hydraulique	kw
P_{elec}	Puissance électrique	kwc
R_p	Rendement des groupes motopompes	%
CH	Constante hydraulique	$kg.s.h / m^2$
TSV	Tempe solaire vraie	h
β	Angle d'inclinaison	deg

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet les besoins énergétiques des pays industrialisés ne cessent d'augmenter, par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est la consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de recherche et développement.

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque (qui sera étudiée dans ce mémoire). L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre.

La moitié de la population des pays en voie de développement n'ont pas d'accès à l'eau potable. Cette dernière est à l'origine de 80 % des maladies et de la pauvreté dans ces pays. Les efforts pour surmonter ce problème ont donné à des programmes tels que le pompage de l'eau une priorité importante. Dans beaucoup de régions, ce but peut être réalisé seulement par l'utilisation des nappes souterraines. Dans les régions éloignées des réseaux électriques, il y a des diverses possibilités pour se servir de ces nappes : pompes à main, pompes diesel, pompes solaires, etc.

Aujourd'hui, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est une technologie naissante caractérisée par des coûts graduellement en baisse. Depuis les premières installations à la fin des années 70, les systèmes de pompage solaire ont eu une grande part

dans les projets d'application de l'énergie solaire et ils appartiennent de nos jours aux applications les plus significatives de l'énergie photovoltaïque. Ceci peut être principalement attribué au fait qu'il n'est pas économiquement faisable de relier de tels sites éloignés au réseau électrique.

L'exploitation de l'énergie photovoltaïque offre un approvisionnement en énergie inépuisable mais surtout une énergie propre et non polluante, ce qui constitue un avantage certain. L'utilisation de l'énergie solaire pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation reste toujours le souci quotidien des populations des régions rurales et sahariennes. Ces derniers reçoivent un fort ensoleillement et l'eau se trouve naturellement stockée sous forme de nappes d'eau souterraines ; l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque pour le pompage de l'eau est une solution bien adaptée pour ces régions, ce système est justifiée économiquement où l'énergie fournie par le générateur est stockée sous forme d'eau pompée durant la journée au lieu d'être emmagasinée sous forme d'énergie électrique.

L'énergie photovoltaïque est une possibilité de développement efficace et durable tant que le soleil brille encore, c'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires. L'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement.

Sachant que le but essentiel de toutes les recherches de notre équipe est l'amélioration globale des performances des systèmes de conversion photovoltaïque, lorsqu'un générateur photovoltaïque alimente une charge, quelle que soit sa nature, ceci n'implique pas forcément une mauvaise rentabilité du système global, mais l'équivalence entre le rendement admissible et le coût moyen d'exploitation détermine le degré d'efficacité d'utilisation de l'énergie solaire.

Plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité de systèmes photovoltaïques ainsi que des techniques ont été appliquées afin d'avoir une bonne adaptation et un rendement élevé. Parmi ces techniques, on trouve la technique de "Poursuite Solaire Discontinue à Deux Positions".

La mémoire est organisée de la façon suivante :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique pour donner l'état de l'art dans le domaine envisagé, ainsi que des notions sur les différents systèmes PV et sur les différentes parties constituant notre système de pompage et la présentation du générateur PV et le groupe motopompe.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des généralités sur le pompage hydraulique et les ressources en eau et leurs caractéristiques, ainsi que le dimensionnement des systèmes de pompes photovoltaïques.

Le troisième chapitre fera l'objet de l'étude expérimentale d'une poursuite solaire discontinue à deux positions pour un panneau photovoltaïque. Les résultats obtenus sur des tests expérimentaux seront discutés et interprétés.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des différentes étapes de la réalisation, l'installation et l'expérimentation d'un système de pompage photovoltaïque, ainsi qu'on a présentés et interprétés les résultats des tests expérimentaux.

Finalement une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans ce présent mémoire.

CHAPITRE I

Généralités sur l'énergie solaire PV

I.1. Introduction

Les énergies renouvelables sont une réalité quotidienne au service du développement et de l'environnement. Et avec une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou à accès difficiles. De plus, le phénomène de sécheresse qui a sévi au pays Maghreb Arabe en général et dans les zones semi-arides et arides pluviales en particulier au début des années 1980, le pompage d'eau en utilisant l'énergie solaire, est reconnu comme étant l'un des moyens efficaces de prévention active pour irriguer des terrains agricoles, l'adduction en eau potable des populations.

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photo-électrique, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Le développement de la technologie des modules solaires a contribué efficacement dans la nouvelle ère du système pompage. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité.

Les systèmes photovoltaïques ne contiennent aucune pièce mobile. Ils sont fiables, requièrent peu d'entretien, sont silencieux et ne produisent aucune émission de polluants. Ce sont des systèmes modulaires : les éléments de base (modules de cellules solaires) sont vendus dans un vaste éventail de capacités d'alimentation électrique qui vont d'une fraction de watt (par exemple les montres et les calculettes à pile solaire) à plus de 300 watts. L'interconnexion des modules permet d'obtenir la puissance qu'exige votre application. Certaines centrales PV de démonstration produisent une puissance allant jusqu'à plusieurs mégawatts, bien que la plupart des systèmes installés soient de dimension beaucoup plus modeste.

Toutefois, les prévisions de baisse des prix des modules photovoltaïques ont été trop optimistes et l'industrie photovoltaïque se trouve dans une situation difficile. En effet, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production trop faibles entraînent des coûts élevés qui freinent le volume des ventes. On peut espérer que, dans les années à venir, la technologie photovoltaïque arrive à "maturité" (procédés simplifiés, meilleurs rendements de production) et qu'alors l'augmentation du volume de production réduise le coût des modules. Afin de pouvoir obtenir un bon

dimensionnement d'un système photovoltaïque, il est indispensable d'évaluer le gisement solaire et l'apport énergétique.

I.2. L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [1], les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360 W/m². Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet électrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation [1][2]:

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (I.1)$$

h : la constante de planck en J/s,

c : la vitesse de la lumière en m/s.

λ : la longueur d'onde de la radiation en nm.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [2].

Une façon commode d'exprimer cette énergie est:

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (I.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique figure (I.1) compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm) [1]. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm),
- 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm).

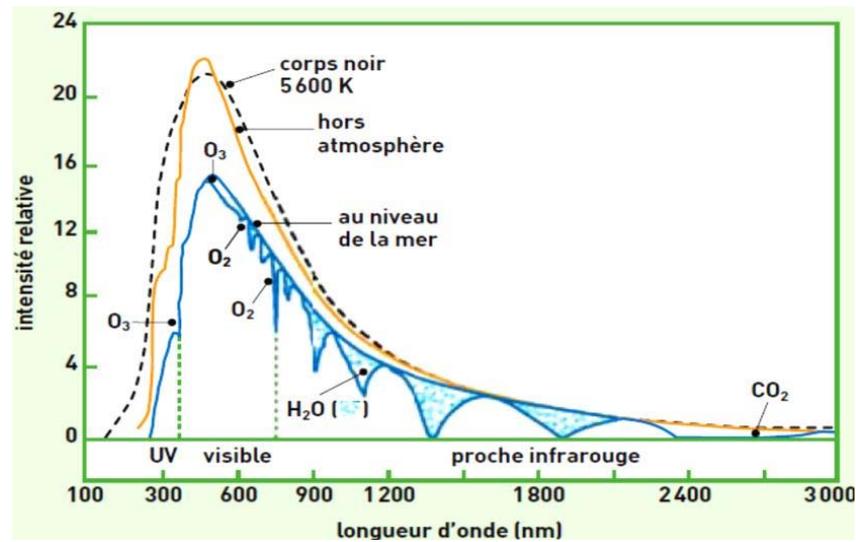


Fig. I.1 : Spectre d'irradiance solaire [1].

I.3. Mesure du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire disponible au niveau du sol est quantifié, pour divers lieux, principalement par des mesures météorologiques. Historiquement, ces mesures ont été enregistrées grâce à des héliographes de Campbell-Stokes: une boule de verre focalise les rayons sur un papier qui noircit. Ces mesures fournissaient un nombre d'heures d'ensoleillement, c'est-à-dire la durée pendant laquelle le rayonnement direct dépasse un certain seuil (par ailleurs mal déterminé, entre 150 et 250 W/m²). Cette information est évidemment peu précise, mais on en dispose de nombreuses mesures depuis très longtemps en météorologie. C'est pourquoi un modèle basé sur des corrélations a été développé pour tenter d'en tirer une quantification énergétique. L'évaluation d'installations solaires nécessite des données d'irradiation, c'est-à-dire du flux d'énergie incidente sur une surface donnée par unité de temps et de surface, exprimée en W/m² (ou son intégration sur une durée déterminée, l'irradiation, en kWh/m² ou MJ/m²) [3].

Dans notre unité de recherche, On utilise les pyranomètres. Ces derniers mettent à profit l'effet de serre dans une double coupole de verre, et utilisent des thermopiles pour déterminer la différence de température du senseur noir avec l'ambient. Ils enregistrent une très large fraction du spectre, et sont les plus précis (de l'ordre de 1% lorsqu'ils sont soigneusement calibrés). Mais leur prix reste élevé.

En météorologie, les mesures les plus couramment disponibles portent sur le rayonnement global dans le plan horizontal. L'évaluation de l'énergie incidente sur un plan quelconque est effectuée par des modèles de transposition, dont nous parlerons plus loin, qui font intervenir également la composante directe, ou la composante diffuse, ce qui revient au même puisque dans le plan horizontal, on a la relation : $\text{Global} = \text{Direct} + \text{Diffus}$.

Le moyen le plus simple pour mesurer la composante diffuse est d'utiliser un solarimètre, devant lequel on cache le rayonnement direct, soit par un arceau placé le long de la trajectoire diurne du soleil, soit par un cache mobile faisant un tour en 24 heures. Très peu de stations météorologiques en sont équipées, car ils nécessitent une surveillance et un réglage périodique de l'arceau ou du cache.

I.4. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, qui a démontré qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en énergie électrique. A cette époque, les appareils électriques n'existaient pas encore donc il n'y avait pas d'utilisation pratique de cette découverte.

En 1905, Albert Einstein a écrit que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre la création d'un courant électrique.

Il faut attendre le XXème siècle pour voir se développer aux États-Unis une série de travaux et de réalisations se rapportant à l'énergie solaire. Les laboratoires de Bell Telephone (États-Unis) vont en 1954 mettre au point la première cellule photovoltaïque de rendement acceptable (environ 6%), ce rendement sera par la suite augmenté grâce à la découverte que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des impuretés et atteindra, au début des années 1960, 15% [4].

Lors de la course vers l'espace, les photopiles ont fait des progrès intéressants. En effet les photopiles sont une solution idéale pour combler les besoins en électricité des satellites.

En 1973, suite au choc pétrolier, l'énergie solaire subit un essor considérable.

Au début des années 90, la prise de conscience des limites de l'électrification rurale conventionnelle (le réseau câblé), oblige les marchés du photovoltaïque à s'ouvrir afin d'atteindre les campagnes de façon plus rentable.

I.5. La cellule photovoltaïque

La cellule solaire est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par un processus appelé « effet photovoltaïque ».

La structure la plus simple d'une cellule solaire comporte une jonction entre deux zones dopées différemment, un semi conducteur de type N (les électrons sont majoritaires et les trous minoritaires) et un semi conducteur de type P (les trous qui sont majoritaires et les électrons qui sont minoritaires) séparés par une zone de charge d'espace (ou zone de transition) d'un même matériau (homo jonction P-N) ou entre deux matériaux (hétéro jonction).

Les cellules sont présentées sous forme circulaire (diamètre 10cm) ou carrée (coté 10 cm).



cellule photovoltaïque
(monocristalline)

Fig. I.2 : Cellule photovoltaïque.

I.5.1. 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 PN a été formée [5].

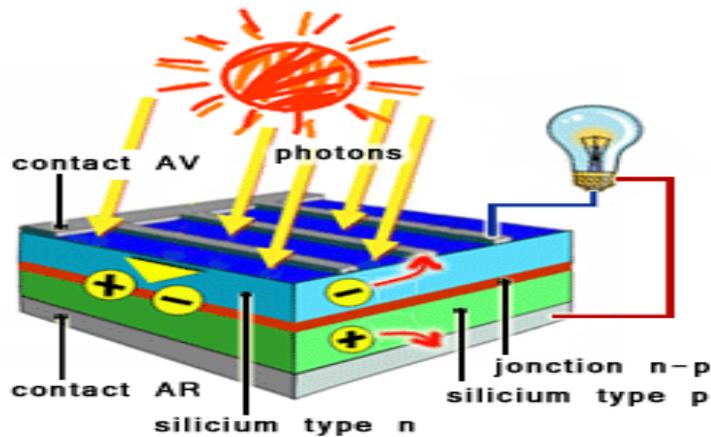


Fig. I.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule [5].

I.6. Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. Les connections en séries de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la même tension.

Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique.

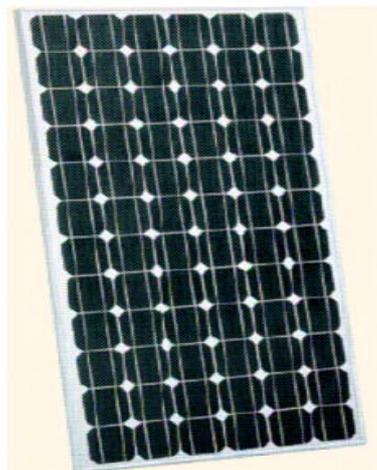


Fig. I.4 : Panneau photovoltaïque [6].

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque [6].

I.6.1. Caractéristiques électriques des modules

La puissance-crête (W_c) d'un module photovoltaïque est la puissance électrique maximale qu'il peut fournir, dans les conditions de mesures normalisées suivantes:

- Lorsqu'il est connecté à une charge optimale;
- Lorsqu'il reçoit du soleil une puissance de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Ceci correspond approximativement à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil le midi par temps clair;
- Lorsque la température à la jonction des cellules est de 25°C .

Il s'agit donc de conditions idéales conventionnelles qui sont très rarement remplies dans la pratique.

Le courant de sortie (A) est affecté principalement par l'intensité de la lumière. La tension de sortie (V) du module varie peu. La puissance maximale (P_m) de ce module se situe autour de 16 volts à 25°C et autour de 15 volts à 47°C . L'influence de la température est visible surtout au niveau de la tension [7].

I.7. Le générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules assemblés en série et en parallèle selon la puissance demandée. Chaque module est lui-même constitué de cellules photovoltaïques généralement montées en série.

La tension délivrée par une cellule PV étant très faible, pour avoir des tensions compatibles avec les charges à alimenter, il faudra associer plusieurs cellules. Celles-ci sont encapsulées dans une même structure pour former un module.

Actuellement la puissance d'un module est de quelques watts crêtes à plusieurs dizaines de watts crêtes. Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série-parallel des modules pour avoir un générateur PV.

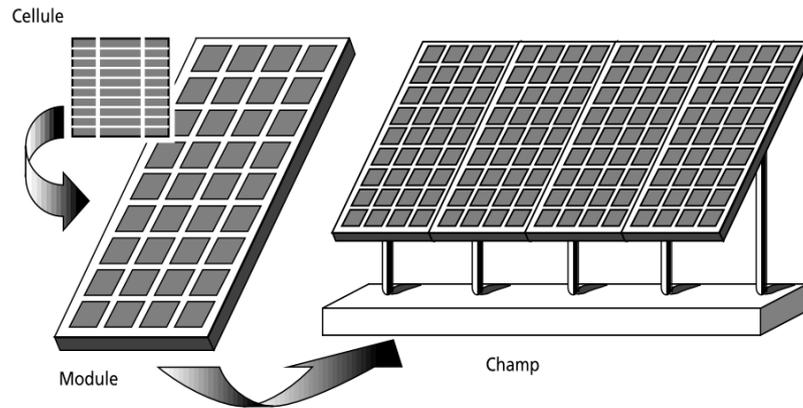


Fig. I.5 : Composition d'un champ PV [25].

I.7.1. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

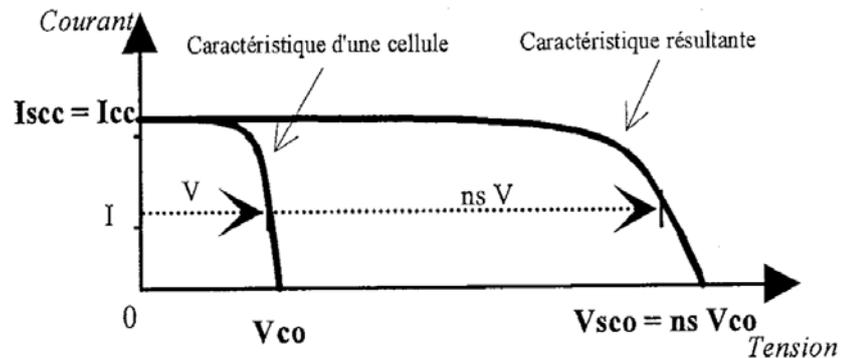


Fig. I.6 : Caractéristique d'un groupe des modules en série [7].

I.7.2. Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

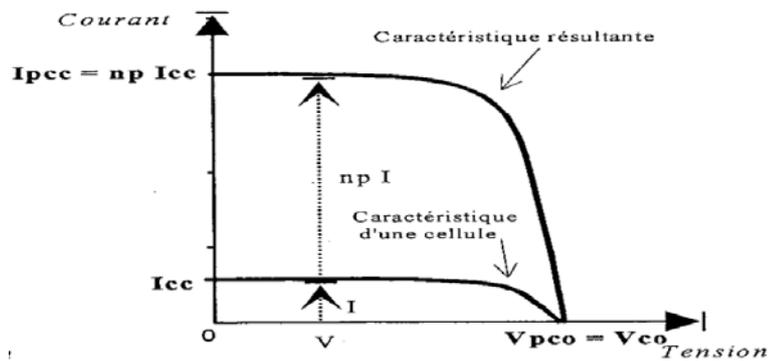


Fig. I.7 : Caractéristique d'un groupe des modules en parallèle [7].

I.8. Les systèmes photovoltaïques

Les modules PV sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV. L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu. Elle peut aussi être utilisée en reliant directement les modules à la charge sans les batteries (ex.: pour une pompe solaire, l'eau sert de stockage), ou en les branchant sur un réseau électrique. Il est également possible de combiner la sortie du champ PV avec d'autres sources d'énergie telles une génératrice ou une éolienne qui serviront d'appoint, si l'ensoleillement n'est pas suffisant.

I.8.1. Système photovoltaïque d'alimentation électrique

Un système photovoltaïque peut fonctionner hors du réseau d'électricité conventionnelle (Offerte par SONELGAZ). C'est un système autonome qui exige l'utilisation de batteries pour le stockage d'énergie.

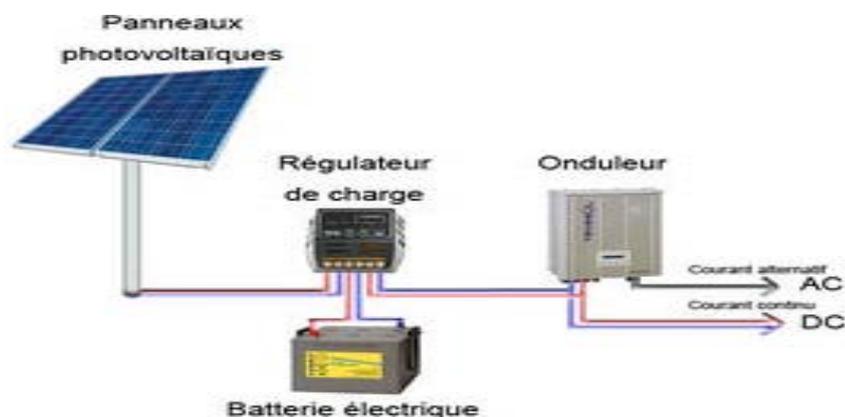


Fig. I.8 : Système photovoltaïque autonome.

Diverses sources peuvent être combinées et complémentaires dans un tel système (système autonome hybride).

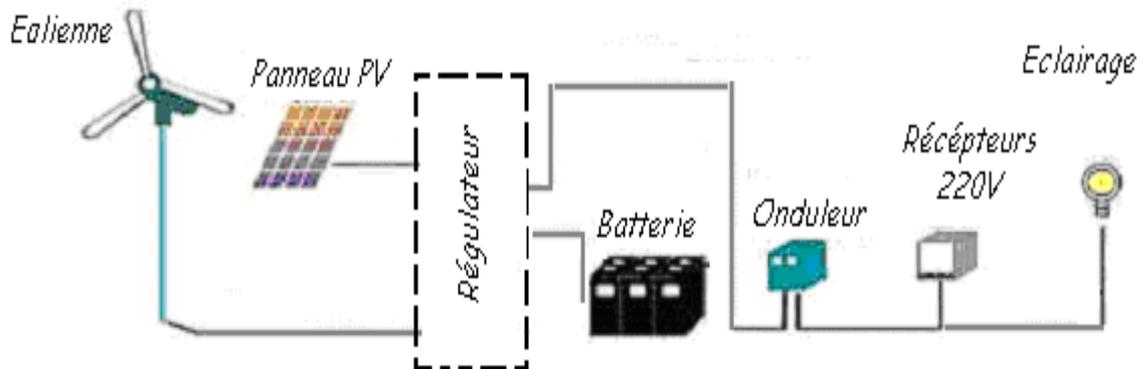


Fig. I.9 : Système hybride solaire / éolien.

I.8.2. Système P.V raccordé au réseau

Le courant généré peut être utilisé localement et les surproductions sont injectées au réseau. La centrale de distribution électrique se charge également d'équilibrer l'offre et la demande.

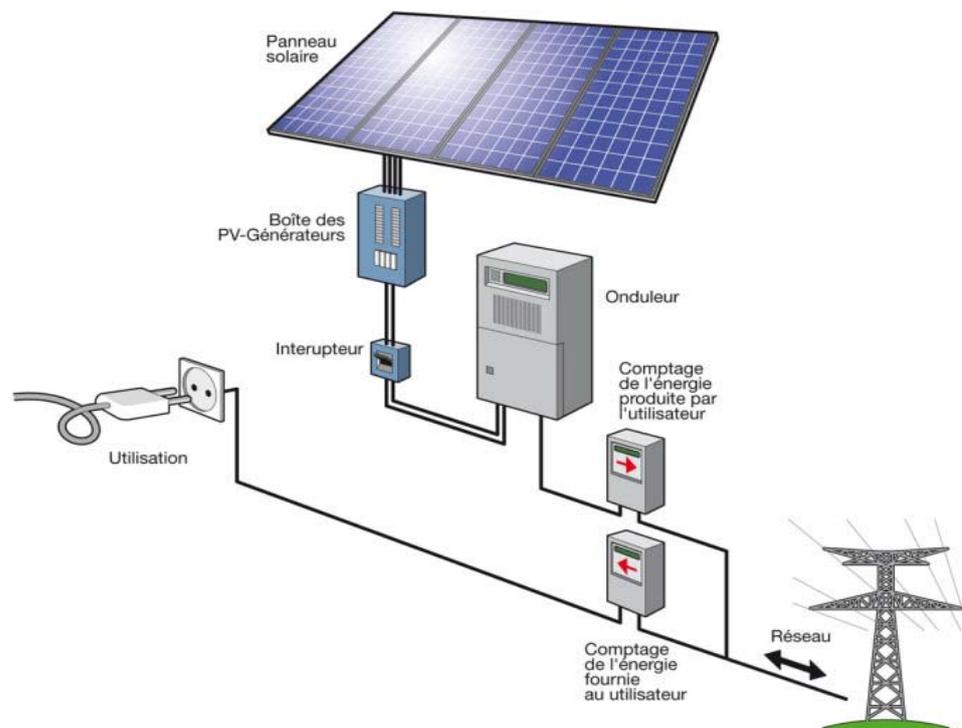


Fig. I.10 : Système photovoltaïque raccordé au réseau.

I.8.3. Système photovoltaïque de pompage d'eau

Le pompage solaire représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent (alimentation en eau pour un usage domestique, pour l'irrigation agricole, ...etc.). D'autre part, l'énergie photovoltaïque ne présente aucun risque de pollution de l'eau, contrairement aux générateurs diesel où des écoulements de combustible peuvent se produire.



Fig. I.11 : Système de pompage solaire.

I.9. Inclinaison optimale des panneaux solaire

Pour une installation solaire en site isolé, c'est-à-dire sans raccordement à un réseau électrique, l'inclinaison optimale est généralement celle qui permet d'optimiser la production des panneaux solaires pendant le mois le moins ensoleillé. En effet, le dimensionnement de vos panneaux est basé sur ce mois.

I.10. Azimut α du soleil (orientation)

L'azimut solaire est l'angle que fait le plan vertical du soleil avec le plan méridien du lieu. On le mesure à partir du Sud, vers l'Est ou vers l'Ouest (0° pour le Sud, 180° pour le Nord). Les lignes verticales du diagramme figurent les angles azimutaux de 10° en 10° .
Élévation du soleil ou hauteur : γ

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal. Les lignes horizontales du diagramme figurent les hauteurs angulaires de 10° en 10° au-dessus de l'horizon (0° pour le plan horizontal et 90° pour le zénith).

$$\gamma_{\max} = 90 - \Phi + \delta \quad (I.3)$$

Comme le Soleil se « déplace » dans le ciel pendant la journée, son élévation se modifie sans cesse.

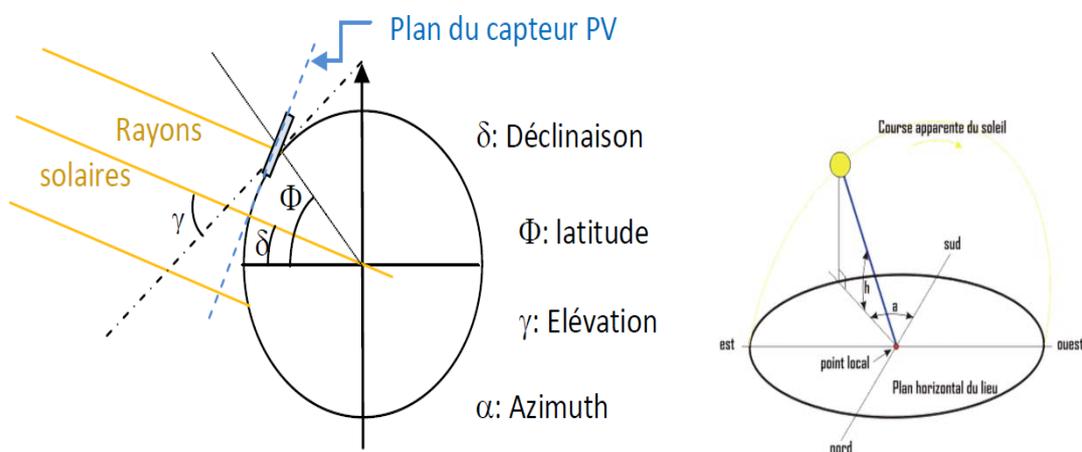


Fig. I.12 : Schéma de principe de la terre et des angles rentrant dans le calcul de l'irradiance. Vue locale de l'utilisateur avec azimut et élévation [26].

Lorsque le rayonnement touche une surface horizontale, l'angle d'incidence du capteur doit être pris en compte. On introduit alors un rendement d'utilisation en comparant la surface d'un plan horizontal avec un plan incliné perpendiculaire au Soleil et pour la même puissance de rayonnement.

I.11. Le temps solaire vrai

Le temps solaire vrai est une mesure du temps chronologique, que l'on peut associer à tout point donné de la surface ou de l'atmosphère terrestres : sa valeur à une date donnée est celle de l'angle dièdre que forment le demi-plan méridien passant par ce point et le demi-plan méridien passant par le centre du Soleil, convertie en "heures" (abr.:h), "minutes" de temps (abr.:min) et "secondes" de temps (abr.:s) selon les conventions $1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3\,600 \text{ s}$;

cette valeur est donc négative ou positive suivant que le méridien du Soleil se trouve à l'est ou à l'ouest de celui du point considéré. (Pour mesurer le temps solaire vrai associé aux points de l'axe des pôles, il est nécessaire de leur attribuer arbitrairement un méridien).

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre on a parlé sur l'énergie solaire photovoltaïque et leurs applications ; et aussi la présentation de l'irradiation solaire globale pour un site donné est fonction de plusieurs facteurs; astronomiques et météorologiques. Donc cette irradiation est influencée par des paramètres climatiques ; alors il important de faire une étude préliminaire du climat pour un site donné avant tout expose d'exploitation de l'énergie solaire.

CHAPITRE II

Généralités sur le pompage

II.1. Introduction

L'évolution de la vie a été possible grâce à la présence de l'eau. Cependant, bien qu'existant en quantité abondante, seule une petite portion de cette eau est réellement disponible pour la consommation humaine ou animale.

Les eaux salées des mers et des océans représentent près de 97% du volume total d'eau de notre planète, et une grande partie des 3% restants se trouve bloquée sous forme de neige, de glaciers ou d'eaux souterraines profondes.

La quantité d'eau douce sous forme liquide représente environ 0,6% du volume total d'eau, dont seulement 0,014% est facilement exploitable en tant qu'eaux de surface ou nappes phréatiques peu profondes. Cette ressource n'est d'ailleurs pas répartie équitablement sur la terre.

La source primaire d'eau douce provient des précipitations. Le total mondial des précipitations est d'environ 500000 km³ par an, dont seul un cinquième de cette quantité retombe sur les terres. Environ 65% des eaux de pluies continentales s'évaporent et retournent vers l'atmosphère. Le reste s'écoule dans les rivières et forme les lacs en surface ou s'écoule dans le sol, où elles se stockent éventuellement dans les nappes phréatiques. Ces réserves d'eau peuvent prendre plusieurs centaines, voire des milliers d'années pour se constituer [1].

Pour être amenées en surface, les eaux souterraines ont besoin d'être pompées. Par conséquent, la nécessité d'une pompe et donc d'une source fiable d'énergie s'impose. Les profondeurs de pompage peuvent être tout à fait variables (de quelques mètres à 100 mètres). Il peut aussi y avoir des limitations de la quantité d'eau à extraire de la nappe. Cela est fonction des caractéristiques de la nappe qui doivent être déterminées en effectuant un test de pompage adéquat.

II.2. Les ressource en eau

II.2.1. Les eaux de surface

Qu'elles soient sous forme de lacs, de nappe souterrain ou de rivières, les eaux de surface sont facilement accessibles, mais leur qualité peut ne pas être appropriée ni à la consommation humaine, ni à l'agriculture, ni à l'industrie. Cela est dû au fait que l'eau de surface peut être polluée plus directement par des matières organiques décomposées

d'origines humaine, animale et végétale ou par des matières minérales nocives en provenance de l'industrie, des mines et de l'agriculture. La pollution bactériologique (qui peut contenir des germes pathogènes) est souvent favorisée par les conditions particulières (humidité, éléments nutritifs, chaleur et énergie solaire) qui se retrouvent dans les eaux de surface.

II.2.2. Les eaux souterraines

Les eaux souterraines se retrouvent sous plusieurs formes. Elles peuvent être sous forme de nappe libre, où le niveau de l'eau dans le forage correspond à celui de la nappe phréatique. Certaines nappes aquifères se retrouvent confinées par un plafonnement de couche imperméable. Celles-ci sont souvent réalimentées à partir d'un niveau plus élevé, et contiennent ainsi de l'eau sous pression. Il existe également des nappes perchées où l'eau se trouve emprisonnée dans des cavités lenticulaires imperméables, souvent tout près de la surface.

Pour extraire l'eau de surface, il est nécessaire de creuser soit un puits de grand diamètre (égal ou supérieur à 0,80m), soit un forage étroit plus profond. Les puits de grand diamètre peuvent être creusés manuellement.

En présence de sols compacts, le renforcement des parois peut ne pas être nécessaire, mais ordinairement une paroi en béton ou en d'autres matériaux est installée à mesure que le puits est creusé.

II.2.3. Les types des nappes aquifères

a. Nappe captive

L'aquifère est limité par deux limites lithologiques. Le substratum et le toit. Le toit étant une limite lithologique imperméable qui met l'aquifère sous pression. Dans ce cas, les tubes crépines doivent se situer qu'entre ces deux limites lithologiques et ce malgré la ligne piézométrique fictive ou du niveau d'eau qui se situe au dessus du toit de l'aquifère.

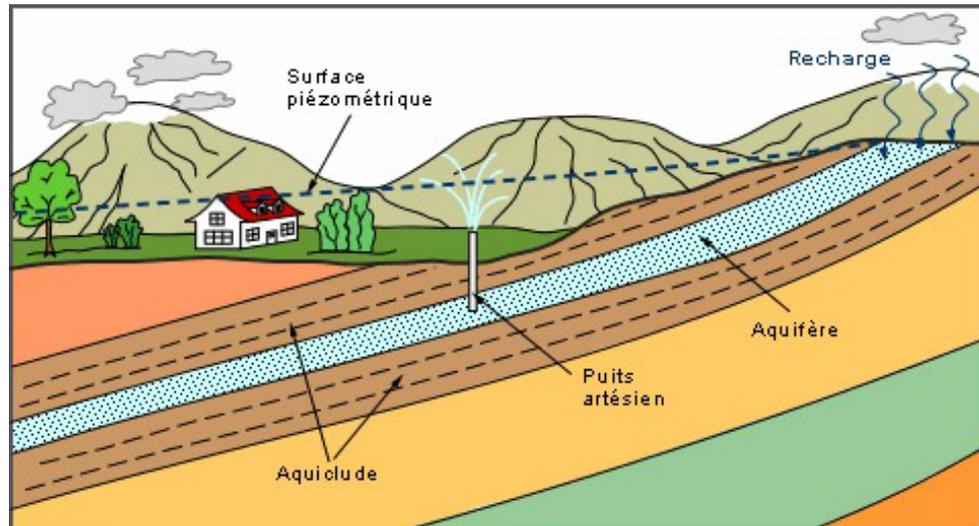


Fig. II.1 : Nappes aquifère captive.

b. Nappe libre

La limite supérieure de la zone saturée étant non fixe (fluctuante) puisqu'elle n'est pas lithologique mais piézométrique.

Dans ce cas, les tubes crépines doivent être placés en dessous de cette limite et même au dessous du niveau dynamique rabattu après stabilisation et ce pour éviter le dénoyage des crépines lors de l'exploitation de l'ouvrage.

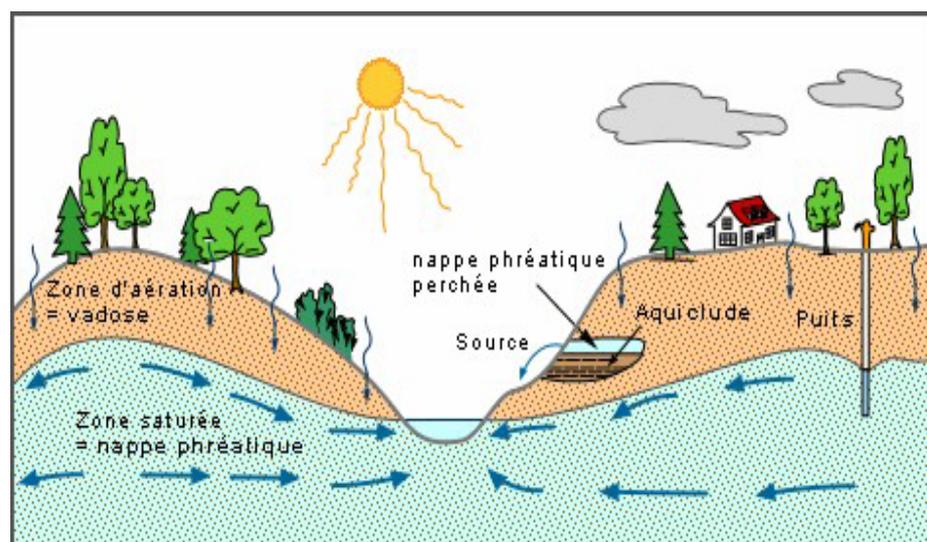


Fig. II.2 : Nappes aquifère libre.

II.3. Les caractéristiques statique et dynamique du puits

L'ouverture d'un puits doit être suivie d'un essai de caractérisation qui permet d'établir trois valeurs : la profondeur statique, H_S , correspondant à un débit nul, la profondeur dynamique, H_D , correspondant à la profondeur utilisée à l'essai, et la valeur du débit d'essai, Q_T , pour lequel on choisit normalement une valeur proche du maximum que peut fournir le puits.

II.3.1. Puits hydrauliques et tests de pompage

Lorsque l'eau est pompée d'un puits, l'eau de surface converge vers le point de pompage et la surface de l'eau (ou niveau piézométrique dans le cas des aquifères emprisonnés) crée un cône standard de dépression. Le rabattement est plus prononcé près du forage et diminue à mesure qu'on s'en éloigne.

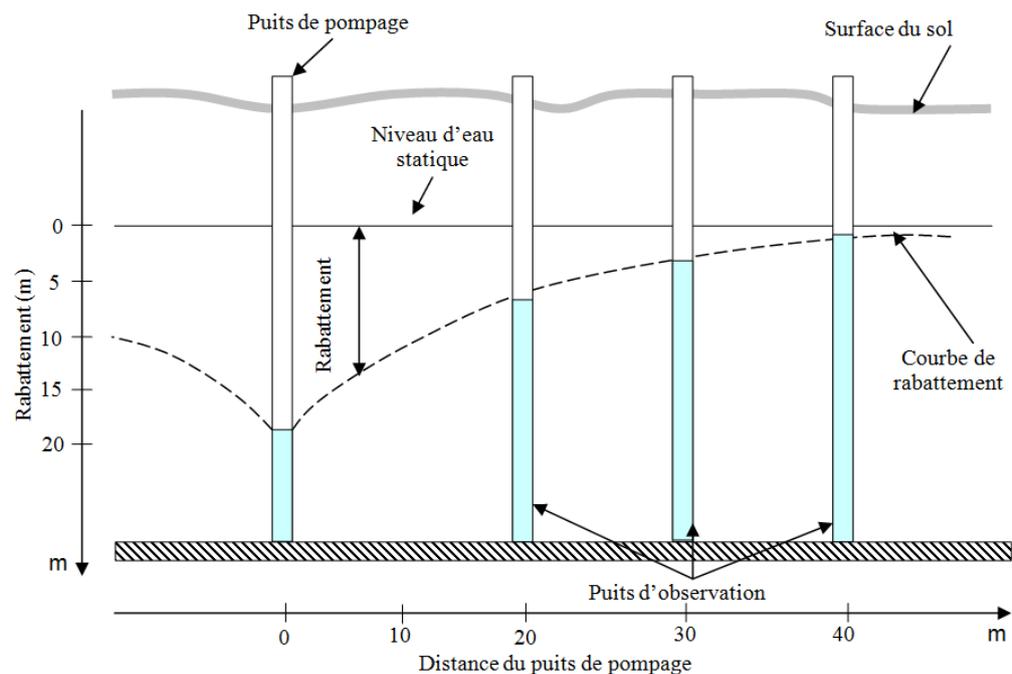


Fig. II.3 : Cône de dépression au niveau d'un forage.

En utilisant les caractéristiques du sol et du débit de pompage, la loi de Darcy, appliquée à l'espace tridimensionnel, peut être utilisée pour déterminer l'ampleur du cône de dépression. D'autre part, la valeur de la conductivité effective du forage peut être déterminée avec des mesures précises du cône de dépression et du débit de pompage. Les deux caractéristiques les plus importantes du sol sont la conductivité hydraulique K et le coefficient

de transmissivité T . Ce dernier est le taux d'écoulement de l'eau à travers une bande verticale de l'aquifère large de 1 mètre sous un gradient hydraulique de 1.

Pour un taux d'extraction stable donné, la distance à laquelle le cône se trouve sous le niveau de l'eau du forage est appelée le rabattement. La relation entre le rabattement et le rendement (débit constant refoulé par la pompe) est approximativement linéaire. Théoriquement, ceci veut dire que, si le rabattement est doublé, le rendement le sera également. La capacité spécifique d'un puits (son rendement par unité de rabattement) est ainsi constante, quel que soit le débit de pompage, aussi longtemps que la nappe aquifère n'est pas asséchée.

Les comportements du rabattement et du cône de dépression peuvent être décrits par les méthodes analytiques suivantes :

L'équation de Theis est utilisée pour décrire le cône de dépression. Cette formule est [1]:

$$Z_r = \frac{Q}{4.\pi.T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (\text{II.1})$$

Où Z_r est le rabattement dans un puits d'observation à une distance r du puits où s'effectue le pompage. Le débit de pompage Q et la transmissivité T doivent être exprimés dans des unités similaires. Le terme sans dimension u est donné par [1]:

$$u = \frac{r^2 . S}{4.T.t} \quad (\text{II.2})$$

Où t est le temps en jours depuis le début du pompage et S est le coefficient de stockage (volume d'eau disponible par unité de colonne d'eau lorsque le niveau de la nappe ou la surface piézométrique est abaissé d'une unité de distance).

Les équations de Cooper Jacob [1]:

$$T = \frac{2,3.Q}{4.\pi.\Delta Z} \quad (\text{II.3})$$

et

$$S = \frac{2,25.T.t_0}{r^2} \quad (\text{II.4})$$

Sont des approximations de celles de Theis où ΔZ est le rabattement mesuré durant un cycle logarithmique de temps (exemple entre 10 et 100 minutes) et S est le coefficient de stockage.

Les équations de Theis et de Cooper Jacob sont utilisées principalement pour obtenir une estimation de T et S à partir des données du débit de pompage et du rabattement.

Les relations ci-dessus et d'autres plus complexes peuvent être utilisées au cours des tests de pompage qui sont effectués pour déterminer si le débit de pompage proposé pour le forage se trouve dans la gamme de rendement de sécurité. Le rendement de sécurité est le débit maximal qui peut être extrait sur une longue période sans abaissement du niveau de la nappe. Cela veut dire que le rendement de sécurité ne doit pas excéder le débit de recharge de la nappe.

Des méthodes analytiques variées sont disponibles pour s'assurer que le débit de pompage proposé est supportable pour la capacité de recharge de l'aquifère et ne dépasse pas le seuil maximal même durant les périodes de saisons sèches. Pour mesurer le débit maximal ou critique du puits ou du forage, un pompage d'essai à débit constant de longue durée (24 à 72 heures) et avec mesurage du rabattement à intervalles réguliers est habituellement exécuté. L'objectif principal est d'assurer que le débit proposé pour le forage est supportable et que la capacité de recharge de la nappe est suffisante pour le maintenir en tout temps. Il en résulte une condition d'équilibre stable pour le cône de dépression. Les données à recueillir sont le débit de pompage, le rabattement au niveau du forage et, si possible, le rabattement à des points loin du puits.

Une méthode d'essai de pompage simple sur cinq heures permet également d'évaluer certaines des caractéristiques du complexe aquifère/ point d'eau. Cette opération consiste en un pompage par paliers successifs à débit constant mais toujours plus élevé pendant une durée précise.

Un premier palier de pompage de deux heures est exécuté à débit Q_1 puis le rabattement S_1 est mesuré. Un deuxième palier d'une heure, à débit $Q_2 > Q_1$, est immédiatement enchaîné et le rabattement S_2 est mesuré. Un troisième palier d'une heure, à débit $Q_3 > Q_2$, est immédiatement enchaîné et S_3 est mesuré. La remontée du niveau est ensuite mesurée pendant une heure. Ces données permettent de tracer la courbe caractéristique S/Q en fonction du temps pour le point d'eau et d'estimer son débit critique.

II.3.2. Programme des essais

La réception de l'ouvrage se fait lorsque les essais de pompage soient terminés la liste des essais de réception est généralement prévue contractuellement:

- un essai de nappe à quatre paliers de débits avec arrêt entre chaque palier de débit (remontée) d'une durée qui ne peut être inférieure à la moitié du temps de pompage (4 à 8 heures).
- Un essai de nappe à débit constant, en régime transitoire, d'une durée d'au moins 72 heures. Le débit d'exhaure est le plus près possible du régime d'exploitation de l'ouvrage.

Cet essai ne peut être entrepris qu'après une période de repos de l'ouvrage pendant 12 heures consécutives.

II.3.3. Le courbe caractéristique

La courbe caractéristique est le véritable du puits à sa réception. Une altération importante de ses caractéristiques, au cours de son exploitation, signifie la présence de problèmes qu'ils convient d'identifier et d'éliminer s'ils entravent le bon fonctionnement de l'ouvrage. La courbe caractéristique de tout ouvrage doit être contrôlée périodiquement.

La courbe caractéristique c'est la courbe débit / rabattement à chaque fin de palier pour un débit Q_1 , mesure un rabattement R_1 . Pour les quatre paliers de débits on obtient quatre couples (Q_n, R_n) . Ces quatre couples de valeurs nous permettent de tracer une courbe (droite) qui passe par l'origine o intersection de l'axe des ordonnées (rabattements) avec l'axe des abscisses (débits) et les quatre points des couples.

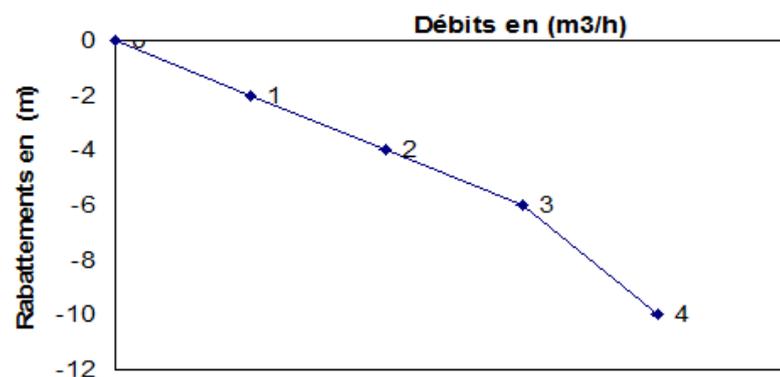


Fig. II.4 : La courbe caractéristique du puits.

II.3.3.1. Le débit caractéristique

C'est point à partir duquel il y a changement de régime de circulation des filets d'eau qui passe du régime laminaire au régime turbulent. Il signifie également une extraction d'eau plus rapide que les possibilités de transmissivité de la nappe. Cette courbe montre que probablement l'aquifère est limité latéralement.

II.3.3.2. Le niveau statique

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

II.3.3.3. Le niveau dynamique

Le niveau dynamique (N_D) 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. La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement.

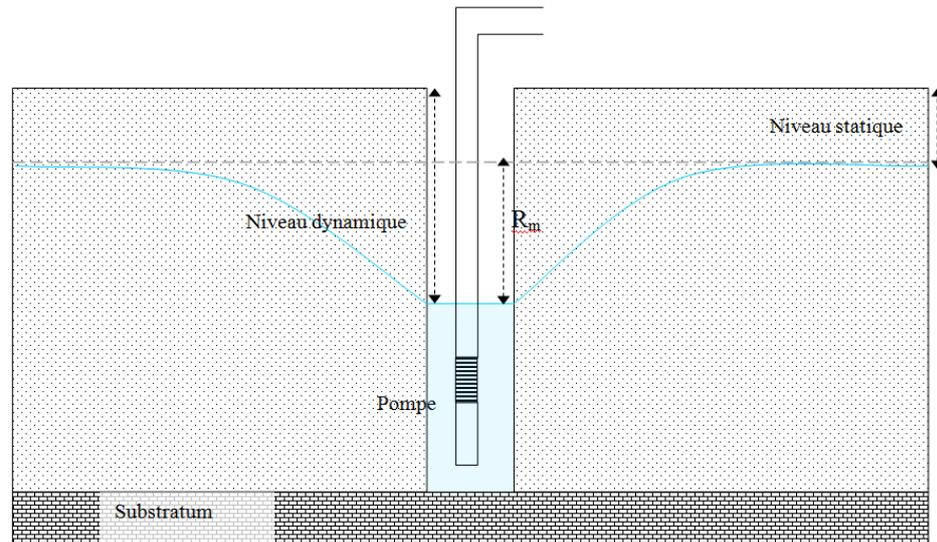


Fig. II.5 : Le niveau statique et dynamique dans le cas d'une nappe libre.

R_m est le rabattement maximal acceptable avant de stopper la pompe.

II.4. Les pompes hydrauliques

L'irrigation par pompage à petite échelle est l'une des utilisations les plus intéressantes de l'énergie solaire. En effet, l'intensité maximale du rayonnement solaire correspond généralement à la période de besoins en eau de pompage les plus importants. D'autre part 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 de lignes de transport de l'électricité facilement accessibles. A l'heure actuelle, les principaux obstacles qui entravent l'utilisation des pompes solaires à plus grande échelle, sont leur coût élevé et le caractère trop récent de cette technologie. La mise au point d'une pompe solaire suffisamment fiable et d'un coût raisonnable - ce qui serait très probable d'ici quelques années - pourrait donner un coup de force à l'agriculture au Tiers Monde. Pour cela il est très important d'étudier les possibilités offertes par cette nouvelle technique prometteuse. Bien qu'à l'heure actuelle sa viabilité économique pour l'irrigation est encore contestée.

II.4.1. Les pompes photovoltaïques

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée « pompe au fil du soleil », utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation. La pompe avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée.

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

II.4.2. Fonctionnement et constitution

Les pompes permettent de déplacer un liquide d'un point à un autre. Pour déplacer ce liquide il faut lui communiquer de l'énergie. Les pompes remplissent cette fonction. Le moteur qui alimente les pompes transforme l'énergie thermique ou électrique en énergie mécanique pour permettre le mouvement des organes des pompes. Cette énergie mécanique est retransmise au fluide. Cette énergie fluide se traduit sous forme de débit (énergie cinétique) et de pression (énergie potentielle). Ces énergies vont s'échanger et se consommer dans les circuits de l'installation.

Ils sont constitués de : partie moteur, de la transmission et de la partie hydraulique.

II.4.2.1. Partie moteur

Le moteur (à courant continu ou alternatif) convertit l'énergie électrique en énergie mécanique et fournit la puissance nécessaire à la pompe.

a. Transmission

Elle transmet la puissance générée par le moteur à la partie hydraulique.

Il y a plusieurs façons de transmettre l'énergie fournie par une machine motrice à la pompe. La méthode plus courante consiste à utiliser un accouplement mécanique rotatif (arbres, courroies ou engrenages) ou alternatif (bielles de pompe ou leviers).

La puissance transmise peut être définie comme le produit d'une force par une vitesse.

b. Transmission mécanique

Un système de transmission mécanique est pour la plupart du temps utilisé par l'accouplement d'un moteur thermique ou électrique à une pompe. En règle générale, les machines motrices de ce genre sont associées à des pompes centrifuges ou rotors dynamiques qui ont la même vitesse de rotation que le moteur.

La méthode de transmission de la puissance mécanique à n'importe quelle distance consiste à utiliser un arbre tournant à grande vitesse. Il faut alors maintenir le bon alignement

de l'arbre par des paliers de faible équidistance pour éviter le flambage qui pourrait provoquer des vibrations intenses et la destruction de la pièce.

c. Transmission électrique

L'emploi d'un groupe moteur, diesel (ou d'une génératrice à éolienne ou à pile solaire électrique ou hydroélectrique) comme force motrice, garantit une souplesse de transmission (au sens propre) considérable. En effet, il suffit alors d'avoir un câble électrique pour relier la force motrice au groupe motopompe.

Parmi les autres options qui sont techniquement réalisables, mais rarement utilisées, on peut citer les transmissions hydrauliques ou pneumatiques qui agissent par le pompage d'un liquide (de l'eau, de l'huile) ou de l'air dans les canalisations afin de mettre en marche la pompe.

II.4.2.2. Partie hydraulique

La partie hydraulique, elle aussi, cette puissance transmise à l'eau pour le déplacer (aspiration et refoulement). On distingue plusieurs technologies pour transférer l'eau : on note les pompes à palettes, à axes brisés, à vis, à engrenages, à pistons en ligne, à lobes, à membranes, à pistons axiaux et à pistons radiaux.

II.4.3. Classification

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement. On peut classer les pompes de plusieurs façons :

- Soit par les mouvements mécaniques ;
- Soit par le mode de déplacement du fluide ;
- Soit par le mode de fonctionnement ;
- Soit par le domaine d'utilisation.

Le critère de choix reste le domaine d'application qui est bien spécifique et qui tient compte de l'utilisation faite. Dans le corps de ce mémoire, nous nous limiterons seulement au mode d'utilisation et au fonctionnement.

II.4.3.1. Selon le mode de fonctionnement

Ils sont de deux types : volumétrique ou centrifuge.

II.4.3.1.1. Les pompes centrifuges

a) Principe de fonctionnement

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussé vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur.

On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [27].

Ci-dessous est donnée l'illustration d'une pompe centrifuge.

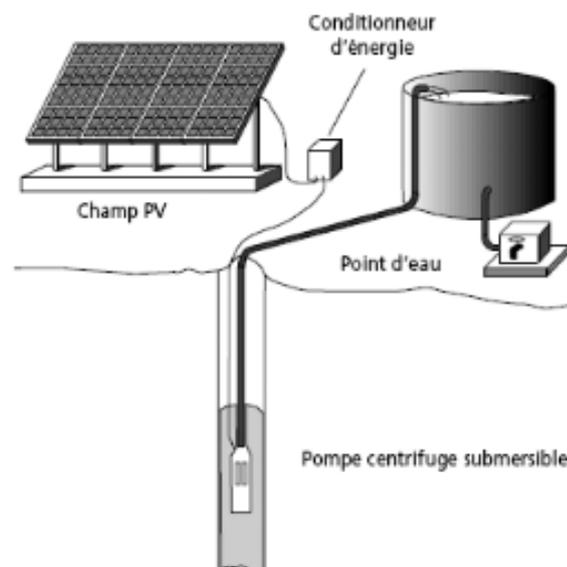


Fig. II.6 : Exemple d'installation avec une pompe centrifuge [27].

b) Constitution

Une pompe centrifuge est constituée par :

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

Le schéma II.7 représente le type de pompe le plus courant, la pompe centrifuge à volute, généralement connue sous le nom simple de "pompe centrifuge". Elle comporte un carter en volute, communiquant avec un canal extérieur en forme de coquille d'escargot à section transversale graduellement variable. L'écoulement de l'eau à la sortie du rotor se transforme en écoulement tangential dans ce canal où il sera ralenti progressivement. Ainsi l'eau sort tangentiellement et passe dans la conduite de refoulement à vitesse réduite et à forte pression.

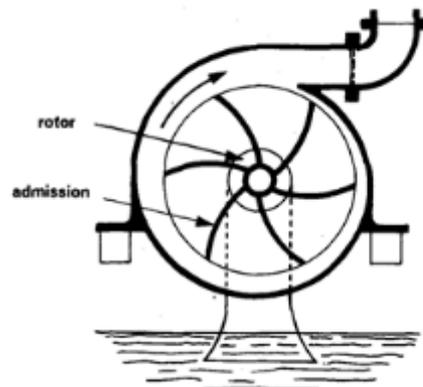


Fig. II.7 : Illustration d'une pompe centrifuge à volute [27].

Le schéma II.8 représente un autre type, à savoir la pompe dite "centrifuge à turbine" ou "turbo pompe". Elle comporte un diffuseur à aubes dont la section augmente progressivement (six dans le cas de la figure) afin de ralentir la vitesse de l'eau tout en augmentant sa pression. Pour la turbine représentée sur la figure, les filets liquides sont déviés à la sortie des aubes pour suivre une trajectoire moins tangentielle et plus radiale afin à faciliter son passage dans le canal entourant le diffuseur, à section constante avant de sortir à la partie supérieure.

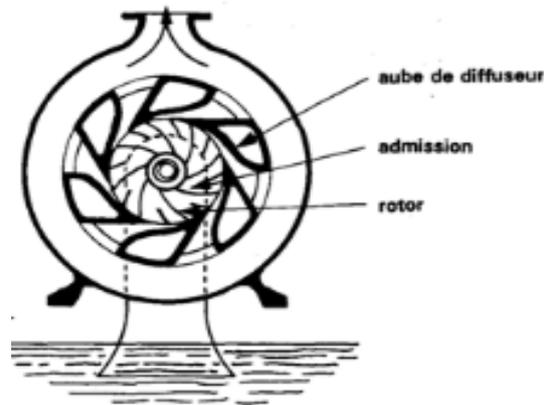


Fig. II.8 : Illustration d'une centrifuge à turbine [27].

c) Caractéristiques d'une pompe centrifuge

On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [12]

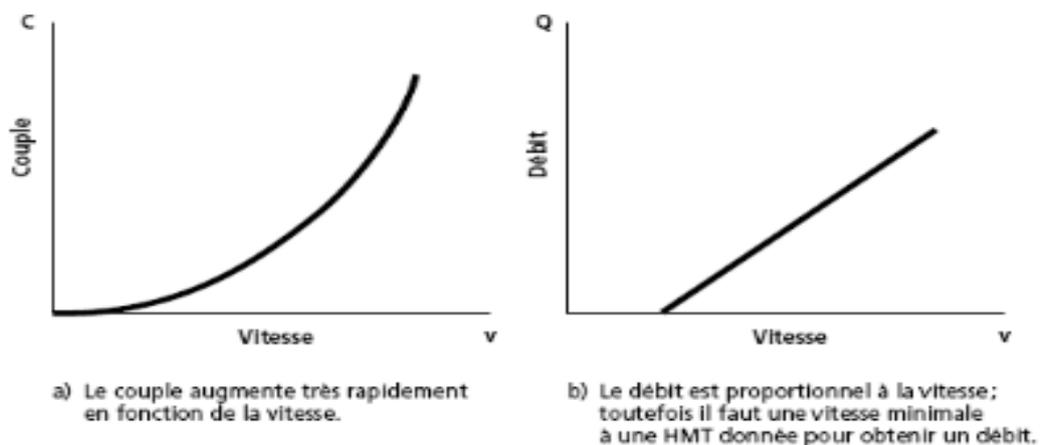


Fig. II.9 : Caractéristiques d'une pompe centrifuge a et b [12][27].

Les figures au-dessus montrent les paramètres de fonctionnement de la vitesse en fonction du couple d'une part, et en fonction du débit d'autre part.

Il existe aussi dans la même technologie, les pompes centrifuges flottantes.

II.4.3.1.2. Les pompes volumétriques

a) Principe de fonctionnement

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

L'écoulement résulte de la variation d'une capacité occupée par le liquide. L'eau est pratiquement incompressible. Par suite, si un piston coulisse parfaitement dans un tuyau plein d'eau, l'eau sera déplacée le long du tuyau sous l'effet du mouvement du piston. De même, si le tuyau plonge en partie ou en totalité dans l'eau, au moment où l'on soulève le piston le vide est produit dans la partie inférieure du tuyau, et l'eau monte dans le tuyau par aspiration.

Le débit de ces pompes est en général un débit continu ou quasi-continu. Le principal avantage des machines rotatives c'est qu'elles se prêtent aisément à la mécanisation et aux grandes vitesses de fonctionnement. Cet avantage est un facteur important, car à dimensions égales, plus une pompe est rapide, plus son débit est fort et plus elle est productive et rentable. En outre, dans un régime continu de fonctionnement les risques de coups de bélier et de cavitation sont bien moins importants que dans le cas des machines à mouvement alternatif.

b) Constitution

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté.

On distingue généralement les pompes volumétriques rotatives et les pompes volumétriques alternatives.

II.4.3.1.3. Les pompes volumétriques rotatives

Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de la pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement.

Ces pompes se subdivisent en :

- Pompes à palettes ;

- Pompes à engrenages ;
- Pompes à rotors hélicoïdaux excentrés ;
- Pompes péristaltiques.

II.4.3.1.4. Les pompes volumétriques alternatives

La pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif. On distingue :

- Les pompes à piston ;
- Les pompes doseuses.

a) Caractéristiques d'une pompe volumétrique

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse [1].

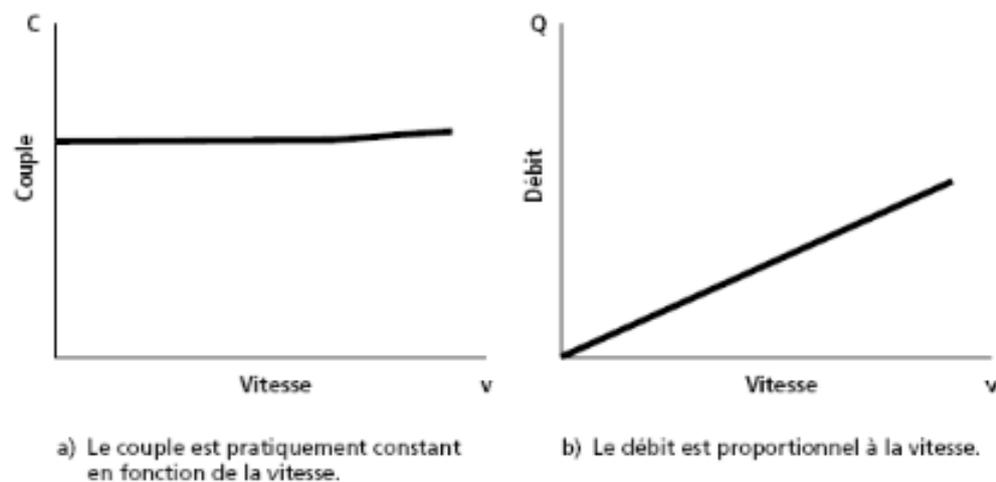


Fig. II.10 : Courbes caractéristiques du couple en fonction de la vitesse (a) et du débit en fonction de la vitesse (b) [1][27].

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

II.4.3.2. Comparaisons entre les pompes centrifuges et les pompes volumétriques

Pour de petites HMT et de faibles débits journaliers ($HMT - Q < 25 \text{ m}^3/\text{j}$), les pompes à main peuvent s'avérer plus intéressantes. On utilisera alors un seau pour pomper l'eau. L'utilisation de pompes mécaniques sur cette plage d'utilisation se limitera principalement aux pompes volumétriques de faible puissance.

Pour les hauteurs de moins de 7 mètres, l'emploi de pompes à aspiration sera préféré. Cette pompe est généralement de type centrifuge à ailettes.

Pour de faibles débits et une puissance disponible variable (par exemple, couplage éolien), l'emploi d'une pompe à cavité (volumétrique) permet un débit plus constant.

Pour une HMT moyenne, comprise entre 10 et 50 mètres, la pompe immergée centrifuge est généralement la plus efficace. Mais son rendement est très étroitement lié à la HMT et son dimensionnement est critique.

Pour les HMT supérieures à 35 mètres et de faibles débits journaliers ($< 20 \text{ m}^3$), la pompe volumétrique sera la plus utilisée, surtout si une forte variation du rabattement de la nappe (donc de la HMT) est constatée.

Pour des débits plus élevés, l'emploi d'une pompe centrifuge est souvent le seul choix possible.

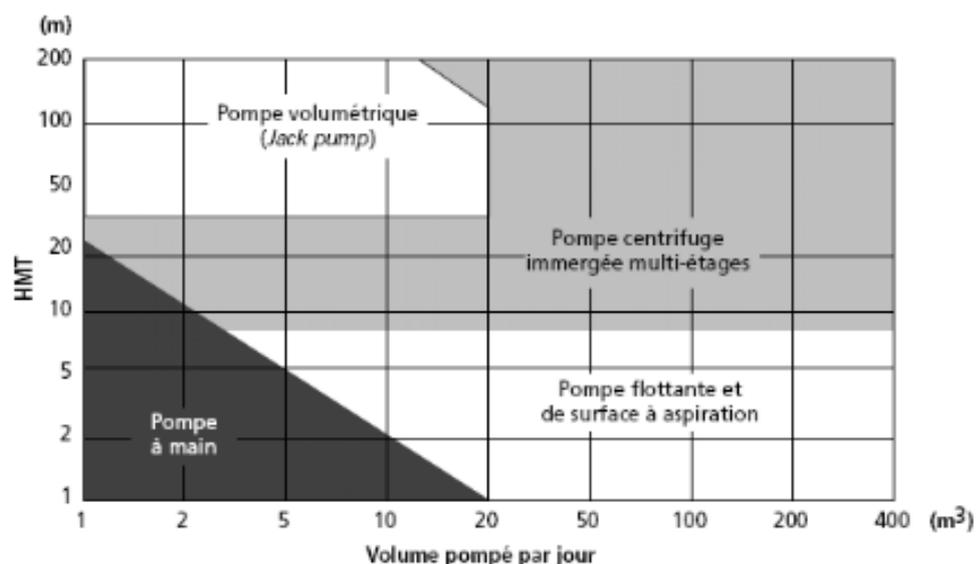


Fig. II.11 : Choix d'une pompe selon la HMT et le débit demandés [27].

Le choix d'une pompe se portera également sur sa capacité à répondre aux conditions variables du site. Nous avons vu que le débit d'une pompe volumétrique est moins affecté par la variation de la HMT alors que la pompe centrifuge verra son débit diminuer rapidement à mesure que la HMT augmente. La hauteur de refoulement d'une pompe centrifuge est fonction du carré de la vitesse du moteur. À mesure que la HMT augmente, le rendement de la pompe diminue très rapidement ; le moteur devrait tourner beaucoup plus rapidement pour fournir un même débit.

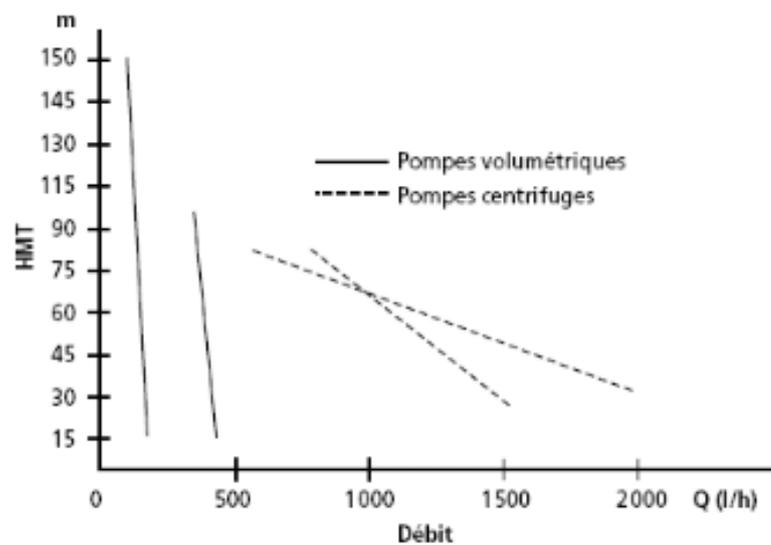


Fig. II.12 : Exemples de courbes débit - HMT pour quelques pompes [27].

II.4.3.3. Selon le mode d'utilisation

En fonction de l'emplacement physique de la pompe, nous distinguons : les pompes à aspiration et les pompes à refoulement.

II.4.3.3.1. Les pompes de surface

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.

II.4.3.3.2. 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.

II.4.4. Caractéristiques d'une pompe centrifuge

II.4.4.1. Représentation graphique

D'un point de vue hydraulique, les trois principaux paramètres qui caractérisent une pompe centrifuge sont :

- le débit volumique Q
- la hauteur manométrique H
- le rendement η

Afin de caractériser une pompe, la hauteur manométrique et le rendement sont tracés en fonction du débit (Fig. II.13 et Fig. II.14).

Le point de fonctionnement se situe à l'intersection de la caractéristique de la pompe et de celle du réseau $H_{\text{pompe}} = \Delta H_{\text{réseau}}(Q)$ (voir Figure II.13). Idéalement, la caractéristique du circuit coupe la courbe de la pompe pour un débit qui correspond à son rendement maximal. Une dispersion de 25% autour de ce point est cependant acceptable.

Les pertes de charges étant de la forme [8]:

$$\Delta H = k \frac{V^2}{2g} \quad (\text{II.5})$$

La caractéristique du réseau est une parabole [8]:

$$\Delta H_{\text{réseau}} = H_{\text{géo}} + \alpha Q^2 \quad (\text{II.6})$$

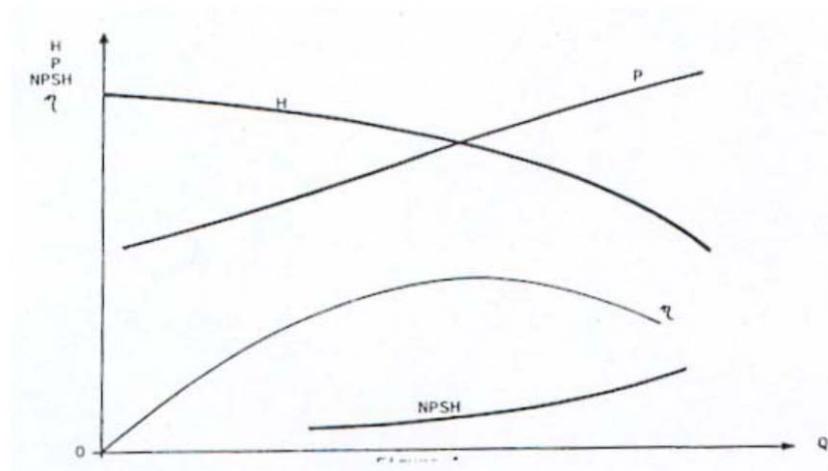


Fig. II.13 : Caractéristique d'une pompe [27].

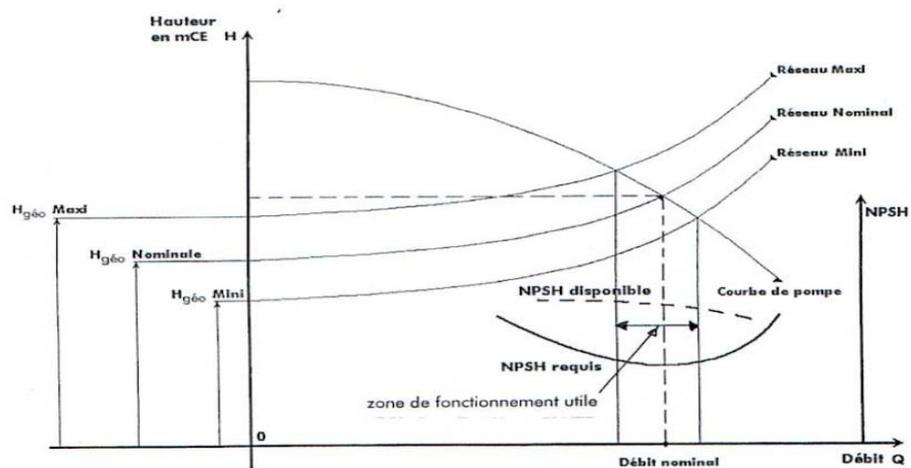


Fig. II.14 : Caractéristique du réseau pour trois configurations d'élévation d'eau [27].

II.4.4.2. Couplage des pompes

Au sein d'un réseau, les pompes peuvent être couplées de manière à obtenir un gain de débit ou de hauteur manométrique.

II.4.4.2.1. Couplage en série

Des pompes couplées en série ont un débit identique et provoquent des élévations de pression successives. On a donc [27]:

$$HMT = \sum_{pompes} HMT_i(Q_v) \tag{II.7}$$

Le couplage en série permet donc d'obtenir une hauteur manométrique très importante. Il est néanmoins plus intéressant d'utiliser des pompes multi-étagées pour lesquelles le couplage en série est effectué à l'intérieur d'un même corps de pompe (jusqu'à plusieurs dizaines de roues). Ceci permet de limiter les pertes de charge qui surviennent lors du passage du fluide d'une pompe à une autre.

On peut coupler des pompes identiques ou des pompes différentes, il faut veiller dans ce cas à ce que le débit ne dépasse pas le débit maximal de l'une d'elles. Une pompe utilisée au-delà de son débit maximal se comporterait en turbine et absorberait une partie de l'énergie fournie par les autres pompes.

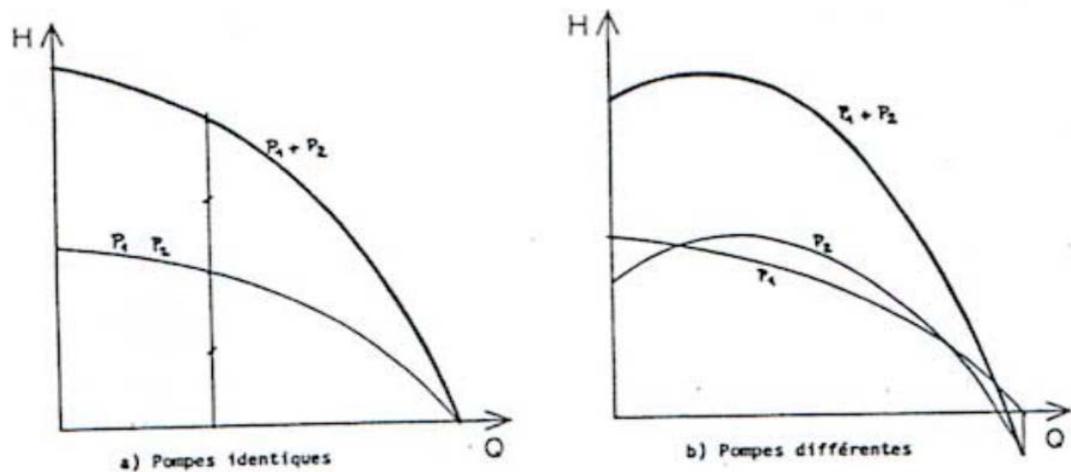


Fig. II.15 : caractéristique de deux pompes fonctionnant en série [27].

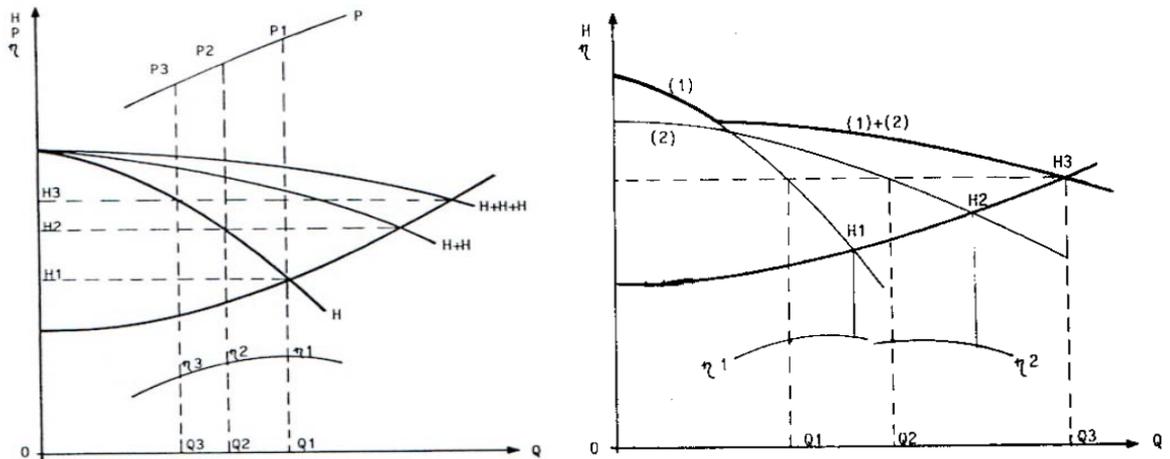
II.4.4.2.2. Couplage en parallèle

Des pompes couplées en parallèle contribuent chacune au débit global tout en fonctionnant à la même hauteur manométrique. On a donc ici [27]:

$$Q_v = \sum Q_{v,i}(HMT) \quad (II.8)$$

Ce type de couplage est intéressant si l'on a besoin d'un débit trop important pour être obtenu par une seule pompe. Il est également intéressant de coupler des pompes en parallèle afin de pouvoir les commander en cascade si l'on a besoin d'un débit variable. On peut aussi chercher à pouvoir alterner entre une pompe à gros ou à petit débit. Dans le cas de l'utilisation de pompes différentes, il faut veiller à ce que la hauteur manométrique nécessaire ne soit pas

plus élevée que la hauteur manométrique maximale de l'une des pompes. Dans le cas contraire, sa contribution au débit serait négligeable.



a) Pompes identique en parallèles.

b) Pompes différentes en parallèles.

Fig. II.16 : Caractéristique de deux pompes fonctionnant en parallèles [27].

II.4.4.3. Rognage des roues

Le rognage de roue consiste à réduire le diamètre extérieur de la roue sans modifier le corps de pompe. Cette pratique permet d'abaisser la caractéristique de la pompe afin de l'adapter au mieux à des conditions de charge et de débits précis. Les aubes doivent être affûtées de nouveau pour retrouver un profil de bord de fuite adéquat.

En théorie, le débit et la hauteur manométrique varient proportionnellement au carré du diamètre de la roue. On a alors [9]:

$$\frac{Q_v}{Q_{v0}} = \frac{H}{H_0} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \quad (\text{II.9})$$

L'erreur commise est faible tant le rognage ne dépasse pas 15% du diamètre initial.

II.4.4.4. Lois de similitude hydraulique

Les lois de similitude des turbomachines permettent de démontrer que les pompes peuvent être classées en fonction de leur forme géométrique, indépendamment de leur taille. C'est ainsi qu'il est possible, à partir d'un modèle réduit, de connaître les performances de toutes les pompes de forme géométriquement semblables au modèle.

En utilisant ces lois, on peut prévoir le fonctionnement d'une pompe centrifuge se basant sur sa caractéristique d'origine, c.à.d, celle qui est généralement connue et qui correspond à son fonctionnement nominal. Pour cela, un ensemble de formules peut être utilisé, à savoir [10]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{II.10})$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^3 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \quad (\text{II.12})$$

Avec:

Q_1 , H_1 et P_1 ; sont respectivement, le débit, la *HMT* et la puissance de la pompe correspondants à la vitesse N_1 et Q_2 , H_2 et P_2 ; sont ceux correspondants à la vitesse N_2 .

II.5. Le pompage photovoltaïque

La structure de pompage est équipée d'un moteur asynchrone entraînant une pompe centrifuge, l'ensemble est alimenté par un générateur photovoltaïque (GPV) à travers un convertisseur statique (onduleur). Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie [03]. Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol.

II.5.1. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur et un sous-système de pompage (moteur et pompe), la tuyauterie et accessoires et enfin un réservoir d'eau (Fig. II.17). Pour les systèmes de pompes photovoltaïques fonctionnent au fil du soleil, le stockage de l'eau dans les réservoirs est la solution la plus adoptée par rapport au stockage électrochimique dans les batteries. Le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie photovoltaïque est utilisé pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation.

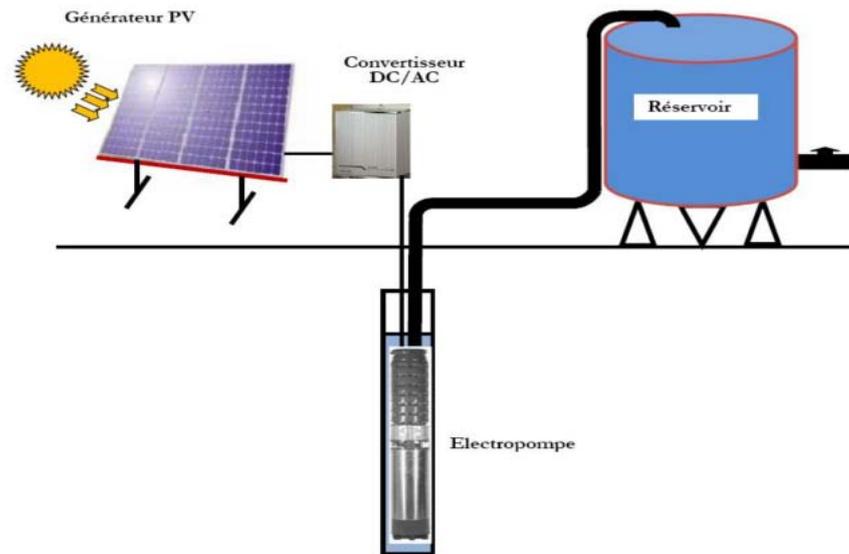


Fig. II.17 : Configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque au fil de soleil.

II.5.2. Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

Il y a trois paramètres techniques qui délimitent l'évaluation d'une pompe solaire. Afin d'obtenir l'évaluation la plus exacte possible, il est essentiel que ces trois paramètres soient estimés le plus précisément possible. On entend par dimensionnement le calcul de la puissance crête P_c , du générateur photovoltaïque et le choix de la pompe répondant au service requis dans les conditions de référence définies par trois valeurs :

1. la quantité d'eau requise par jour, c'est à dire le volume journalier à pomper
2. la disponibilité de l'eau,
3. le rayonnement solaire journalier reçu par le générateur G_d (en kWh/m^2).

II.5.2.1. Les besoins en eau des cultures

Chez les plantes, comme chez tous les organismes vivants, la vie se traduit par un certain nombre de phénomènes qui concourent à leur évaluation et à leur développement.

Parmi les phénomènes fondamentaux de la vie chez les plantes, nous retiendrons leur respiration, leur transpiration et leur nutrition, ces phénomènes qui consistent tous en des échanges entre la plante et le milieu extérieur (sol et atmosphère) et qui ont besoin pour se produire de la chaleur et d'humidité.

II.5.2.1.1. Détermination des besoins en eau des cultures

Dans un premier temps, la détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance de divers paramètres concernant aussi bien la plante elle-même que les données climatiques et pédologique (les paramètres physiques et hydriques du sol) de la région.

- Les données climatiques donneront les indications nécessaires concernant les besoins en eau de la culture ;
- Les paramètres pédologiques permettront d'estimer la réserve en eau utile du sol;
- Les données culturelles préciseront la réserve en eau facilement utilisable par la plante.

II.5.2.1.1.1. Les données climatiques

Le climat est un facteur essentiel et influant sur le développement des plantes car les végétaux subissent l'influence des paramètres tel que le froid, la chaleur, la neige, le vent, et surtout la rareté de l'abondance des pluies.

II.5.2.1.1.2. L'évapotranspiration potentielle ou pratique

L'évapotranspiration potentielle correspond à la quantité évapotranspirée par une végétation bien pourvue en eau, couvrant parfaitement le sol de manière uniforme et en période active de croissance. Dans un climat donné, le rendement maximal des cultures ne peut être atteint que si la végétation ne souffre d'aucun défaut en eau et peut par conséquent répondre en totalité à la demande de l'atmosphère, c'est la raison pour laquelle l'exploitant doit connaître nécessairement cette demande avec précision, c'est à dire l'*ETP*. Pour cela, on peut avoir recours à deux voies de mesures de l'*ETP*, soit à l'aide de dispositifs appropriés, soit en procédant à son évaluation par des formules empiriques faisant intervenir des données atmosphériques plus ou moins nombreuses.

II.5.2.1.1.3. Détermination de l'évapotranspiration potentielle

De nombreuses formules existent permettant, à partir des données climatiques, de calculer les valeurs de l'évapotranspiration potentielle par mois, par décade et même par jour. Ces formules découlent de données statiques ou expérimentales et sont surtout intéressantes pour déterminer les quantités d'eau à distribuer sur un périmètre à irriguer et au niveau d'une région donnée.

Parmi les différentes méthodes qui permettent le calcul de l'*ETP*, on trouve a :

1. La formule de BLANEY ET CRIDDLE ;
2. La formule de PENMAN ;
3. La formule de THORNTHWAITE ;
4. La formule de TURC.

Le choix de la formule la plus adéquate est fonction de la disponibilité des paramètres climatiques nécessaires et valables pour la zone du projet (proximité et représentativité de la station climatique).

II.5.2.2. La hauteur manométrique totale

La pompe est l'organe permettant d'assurer le débit qui traverse le réseau en provoquant une élévation de pression du fluide qui la traverse. Plutôt que de travailler en termes de pression, on définit la hauteur manométrique HMT, différence algébrique entre la hauteur totale de charge au refoulement (aval) et la hauteur totale de charge à l'aspiration (amont) [27]:

$$HMT = Hg + \Delta Pc \quad (II.13)$$

Où :

Hg : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation ($H_r + N_d$). Pour une pompe de surface sur un plan d'eau, Hg sera choisi en fonction de la hauteur de la pompe à son niveau le plus bas.

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

II.5.2.2.1. Calcul des pertes de charge

II.5.2.2.1.1. Régimes d'écoulement

Si on injecte un petit volume de colorant dans l'axe d'une canalisation horizontale parcourue par de l'eau, on observe suivant le débit du liquide (c'est-à-dire suivant sa vitesse puisque la section est constante) les phénomènes suivants:

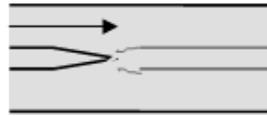


Fig. II.18 : Régime laminaire.

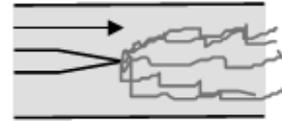


Fig. II.19 : Régime turbulent.

✓ Faibles débits: la trajectoire du filet de colorant est rectiligne. Les couches de liquide s'écoulent concentriquement les unes sur les autres sans qu'il y ait de mélange.

Le régime d'écoulement est dit laminaire.

✓ Forts débits: le colorant se mélange rapidement à l'eau par création de mouvements tourbillonnaires. Les forces dues à la viscosité ne sont alors plus suffisantes pour empêcher la naissance d'une multitude de tourbillons.

Le régime d'écoulement est dit turbulent.

Pour distinguer quantitativement les deux types de régimes observés, on utilise un critère basé sur le nombre de Reynolds Re (nombre sans unité ou adimensionnel) [11]:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} = \frac{4 \cdot \rho \cdot Q_v}{\mu \cdot \pi \cdot D} \quad (\text{II.14})$$

Avec : μ , D , U et ρ sont respectivement la viscosité dynamique du liquide en Poiseuilles, le diamètre de la canalisation en m , la vitesse du liquide en m/s et la masse volumique du liquide en Kg/m^3 .

On définit les régimes d'écoulement suivants [11]:

Si $Re < 2000$ le régime est LAMINAIRE ;

Si $2000 < Re < 3000$ le régime est intermédiaire ;

Si $Re > 3000$ le régime est TURBULENT.

Le profil des vitesses suivant la section est une parabole pour le régime laminaire ($U_m = 0.5 \cdot U_{\max}$) ; par contre, pour le régime turbulent, le profil montre un aplatissement au centre de la canalisation ($U_m = 0.8 \cdot U_{\max}$).



Fig. II.20 : Les profils des vitesses.

On retiendra les points suivants:

- ❖ Le régime turbulent est favorisé par les éléments suivants:
 - Un débit de liquide élevé ;
 - Un faible diamètre de canalisation.
- ❖ Quand le régime est turbulent, les frottements augmentent donc la perte de charge augmente dans une canalisation.

En conclusion, il faut retenir que dans les applications industrielles courantes c'est le régime turbulent qui s'applique. Le régime laminaire est observé seulement pour des liquides très visqueux.

II.5.2.2.1.2. Calcul des pertes de charge linière

Expérimentalement on constate que les pertes de charge linière dépendent des éléments suivants:

- ❖ Longueur de la canalisation: la perte de charge est logiquement directement proportionnelle à la longueur de la canalisation: elle augmente quand la longueur de canalisation augmente.
- ❖ Viscosité du liquide: plus le liquide est visqueux, plus les frottements donc la perte de charge augmente.
- ❖ Diamètre intérieur: quand le diamètre diminue, la perte de charge augmente considérablement. Le liquide a plus de difficultés à s'écouler donc les frottements augmentent pour un débit identique.
- ❖ Débit: plus le débit augmente, plus les forces de frottements n'augmentent pour un diamètre identique.
- ❖ Rugosité de la canalisation: la rugosité correspond à la notion habituelle de présence plus ou moins importante d'aspérités sur une surface. On constate ici que lorsque la rugosité d'une

canalisation augmente les frottements seront plus nombreux donc la perte de charge augmentera. La perte de charge est donc fonction du matériau de la canalisation.

La rugosité absolue correspond à la hauteur géométrique moyenne des aspérités d'une canalisation. Pour les pertes de charge le facteur déterminant est la rugosité relative $\frac{\varepsilon}{D}$.

On donne les valeurs indicatives suivantes de rugosité absolue ε en *mm* :

Acier: 0,045 ; fonte: 0,26 ; fer galvanisé: 0,15 ; béton: 0,3 à 3 ; verre, plastique, cuivre, inox: 0,0015.

Il est possible de démontrer que la perte de charge générale J est donnée par l'expression suivante [27]:

$$J = \lambda \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{L}{D} \quad (\text{II.15})$$

Avec : λ ; est le coefficient de perte de charge, U ; la vitesse de l'eau dans la conduite en *m/s*, L ; la longueur de canalisation en *m*, D ; diamètre de conduite en *m* et, g ; est la constante de la gravité (égale à $9,81 \text{ m/s}^2$).

a. Régime laminaire

Dans ce cas $\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$ (La rugosité n'intervient pas).

b. Régime turbulent

On distingue encore le cas des conduites lisses (la rugosité est très faible et n'intervient donc pas) et des conduites rugueuses.

b.1. Conduites lisses

Relation de Blasius : $\lambda = 0.316 \cdot \text{Re}^{-1/4} \quad (3 \times 10^3 < \text{Re} < 10^5) \quad (\text{II.16})$

Relation de Nikuradze : $\lambda = 0.0032 + 0.221 \text{Re}^{-0.237} \quad (10^5 < \text{Re} < 3 \times 10^6) \quad (\text{II.17})$

Relation de Karman-Nikuradze : $\frac{1}{\lambda} = [2 \text{Log}(\text{Re} \sqrt{\lambda}) - 0.8]^2 \quad (3 \times 10^3 < \text{Re} < 10^6) \quad (\text{II.18})$

b.2. Conduites rugueuses

λ est fonction de Re et de la rugosité relative $\frac{\epsilon}{D}$. Pour des rugosités très importantes, λ est même essentiellement fonction de la rugosité.

Le diagramme de Moody est un abaque permettant de regrouper l'ensemble des régimes d'écoulement: les variables utilisées sont λ , Re et $\frac{\epsilon}{D}$.

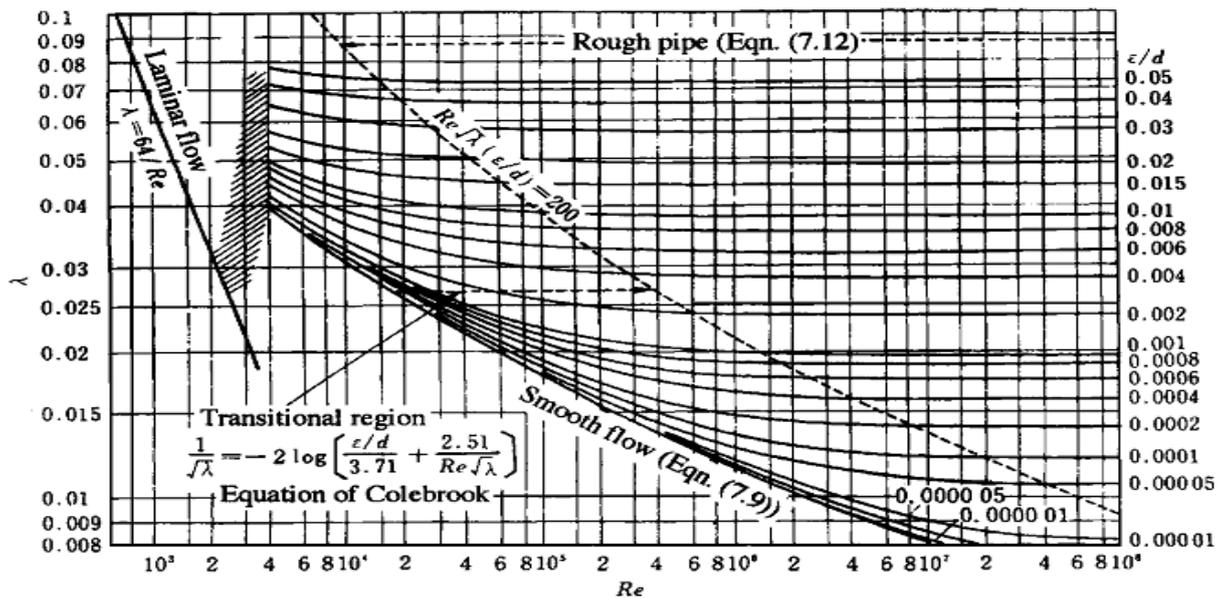


Fig.21. Diagramme de Moody [28].

II.5.2.2.1.3. Calcul des pertes de charges singulières

Les pertes de charges singulières correspondant un accident de parcours dans les réseaux hydrauliques et sont exprimées par la relation suivent:

$$\Delta P_{A \rightarrow B} = \frac{K \cdot U^2 \cdot \rho}{2} \tag{II.19}$$

Avec :

K : est un coefficient (sans unité) dépendant du type d'accident, ρ et U sont respectivement la masse volumique du liquide en Kg / m^3 et la vitesse du fluide en m^2 / s .

On constate que les pertes de charge par accidents dépendent du débit et du diamètre de la même manière que les pertes de charge générales:

- ✓ Débit: une augmentation de débit provoque une augmentation des pertes de charge.
- ✓ Diamètre: une augmentation de diamètre (coude, orifice de vanne) provoque une diminution des pertes de charge.

Le coefficient K est caractéristique de l'accident: il faut retenir que la perte de charge augmente quand ce coefficient augmente. On observe logiquement que par exemple le coefficient augmente si l'angle d'un coude augmente ou si la variation de diamètre est plus importante dans le cas d'un rétrécissement.

L'utilisation d'abaques est fréquente pour déterminer la perte de charge locale; ces abaques permettent de trouver pour un accident et un débit donnés la longueur équivalente de canalisation L_{eq} de même diamètre produisant la même perte de charge.

D'autres abaques fournissent la valeur des coefficients K en fonction du type d'accident et des caractéristiques de cet accident (angle d'un coude par exemple).

Les pertes de charge modulaires sont classées en deux catégories :

- Celles qui sont à valeur constante quel que soit le diamètre du réseau utilisé, tel que les changements de section (réductions, entrées et sorties de canalisations).
- Celles qui varient en fonction du diamètre de réseaux, dont la perte de charge est de essentiellement par frottement et turbulence se produisant comme par exemple dans une vanne.

II.5.2.2.1.3.1. Coefficient K à valeur constante

Dans cette catégorie, les coefficients de module de charge sont fonction principalement du changement de section.

Tab. II.1 : Coefficient de perte de charge K à valeur constante quel que soit le diamètre du réseau [28].

Désignation	K
Sortie canalisation	1
Compteur à disque	10
Compteur rotatif	10
Compteur à piston	15
Compteur à turbine	7.5

II.5.2.2.1.3.2. Coefficient k dépendant du diamètre utilisé

Les facteurs de perte de charge placés dans cette catégorie dépendent à la fois du type d'équipement et du diamètre du réseau [28].

$$K = ft.4.x \quad (\text{II.20})$$

Avec :

ft : Coefficient selon le diamètre nominal.

Tab. II.2 : Coefficient x selon l'accessoire utilisé [28].

Accessoire	x
Robinet vanne	8
Robinet à soupape	340
Robinet à soupape, angle (45° type Y)	55
Robinet à soupape, angle (90°)	150
Vanne papillon (2" à 8")	45
Vanne papillon (10" à 14")	35
Vanne papillon (16" à 18")	25
Robinet boisseau sphérique orifice non réduit	3
Clapet de non retour à soupape	600
Clapet de non retour à battant	50
Clapet de non retour à disque (2" à 8")	40
Clapet de non retour à disque (10" à 14")	30
Clapet de non retour à disque (16" à 18")	20
Clapet- crépine avec filtre	420
Coude standard 90°	30
Coude standard 45°	16
Coude long rayon 90°	16
Coude d'équerre	20
Coude à 180° (rayon court)	50

Tab. II.3 : Coefficient f_t selon le diamètre nominal [28].

Diamètre nominal en (cm)	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5	3	4
f_t	0.00675	0.00325	0.00575	0.0055	0.00525	0.00475	0.0045	0.0045	0.00425

Diamètre nominal en (cm)	5	6	8	10	12	14	16	18	20
f_t	0.00400	0.00375	0.00350	0.0035	0.00325	0.00325	0.00325	0.0030	0.0030

II.5.2.3. Cavitation d'une pompe

II.5.2.3.1. Description du phénomène

La cavitation est la vaporisation du liquide contenu dans la pompe quand il est soumis à une pression inférieure à la tension de vapeur correspondant à sa température.

Des bulles apparaissent dans les zones où la pression est la plus faible (entrée des aubes de roue des pompes centrifuges) : elles sont transportées dans les zones de pressions plus fortes où se produit leur condensation. Des implosions se produisent alors à des fréquences élevées et créent des surpressions locales très élevées (jusqu'à des centaines de bars)

La cavitation est un phénomène à éviter absolument, car il entraîne de graves conséquences:

- Erosion du matériau pouvant aller jusqu'au perçage des aubes de turbine des pompes centrifuges
- Augmentation du bruit et des vibrations générés par la pompe
- Chute des performances des pompes avec diminution importante de la hauteur manométrique totale, du débit et du rendement

II.5.2.3.2. Expression de la condition de non cavitation

Pour qu'il n'y ait pas cavitation, il faut que $P_{asp} > P^o(\theta)$.

En appliquant la relation de Bernoulli entre la surface du réservoir d'alimentation et le point d'aspiration de la pompe, on parvient à la relation suivante:

$$P_{asp} = P_A + \rho \cdot g \cdot Z_A - \rho \cdot g \cdot J_{asp} - \rho \cdot \frac{U_{asp}^2}{2} > P^o(\theta) \quad (\text{II.21})$$

En supposant que le réservoir d'alimentation est de grande dimension ($U_A \rightarrow 0$) et que Z_{asp} est nul. On en déduit donc:

$$\frac{P_A \cdot P^o(\theta)}{\rho \cdot g} + Z_A - J_{asp} - \frac{U_{asp}^2}{2 \cdot g} > 0 \quad (\text{II.22})$$

II.5.2.4. $NPSH_{disp}$ et $NPSH_{req}$

En fait la condition écrite plus haut n'est pas assez restrictive; il ne suffit pas d'écrire que la pression à l'orifice d'aspiration de la pompe soit supérieure à la tension de vapeur.

En effet il existe des zones à l'intérieur de la pompe où la pression est encore plus faible. Pour les pompes centrifuges cet endroit se situe dans le prolongement de l'arbre. Cette pression n'est pas calculable par l'utilisateur car elle dépend de la perte de charge entre l'aspiration et ce point: elle dépend donc des caractéristiques de la pompe et augmente avec le débit.

Le problème consiste maintenant à définir un critère permettant de savoir si le risque de cavitation existe dans un circuit donné. On définit donc comme grandeur le NPSH (Net Positive Suction Head) du circuit ou $NPSH_{disp}$ (NPSH disponible) par la relation suivante [29]:

$$NPSH_{disp} = \frac{P_A - P^o(\theta)}{\rho \cdot g} + Z_A - J_{asp} \quad (\text{II.23})$$

De son côté le constructeur fournit une autre courbe caractéristique en fonction du débit: le $NPSH_{req}$ (NPSH requis) qu'il a déterminé après essais pour prendre en compte les pertes de charge de la pompe. Cette grandeur est celle permettant un fonctionnement sans risque de cavitation [29].

Il n'y a pas de cavitation si $NPSH_{disp} > NPSH_{req}$

On prend généralement une sécurité supplémentaire d'environ 1 m.

II.5.2.5. La puissance hydraulique d'une pompe

Pour véhiculer d'un point à un autre une certaine quantité d'eau, la pompe doit transmettre au liquide de l'énergie. Cette quantité d'énergie sera la même quelle que soit la technologie et est donnée par la puissance de la pompe. Cette puissance se calcule à l'aide du théorème de Bernoulli avec le bilan énergétique du système en considérant tous les paramètres tels que l'altitude de pompage, l'altitude de refoulement, la longueur et le diamètre des tuyaux.

Cependant, afin de simplifier au maximum tous ces calculs, les praticiens utilisent deux paramètres qui caractérisent tout système de pompage dans un réseau : Débit (Q) et Hauteur Manométrique Totale (HMT).

La puissance absorbée sur l'arbre de la pompe est alors donnée par la formule suivante (cas de l'eau, poids spécifique égale à 1) [1]:

$$E_{hyd} = \frac{\rho \times g \times Q(m^3 / j) \times Hmt(m)}{3600} \quad (II.24)$$

Où :

E_{hyd} : est l'énergie hydraulique de la pompe exprimée en *Kwh* ;

ρ : est la densité de l'eau (égale à $1000 \text{ Kg} / \text{m}^3$) ;

g : est la constante de la gravité (égale à $9,81 \text{ m} / \text{s}^2$).

La puissance du moteur nécessaire pour entraîner la partie hydraulique est toujours supérieure à la puissance absorbée par l'arbre compte tenu des pertes divers dues à la transmission, d'erreurs de calcul des pertes de charge produite au niveau de la pompe et du couple de démarrage.

Énergie requise pour la pompe [1]:

$$E_{elec} = \frac{P_{hy}}{R_p} = \frac{CH \times Q(m^3 / j) \times HMT(m)}{R_p} \quad (II.25)$$

Où E_{elec} : est habituellement exprimé en kWh ;

R_p : en général le rendement des groupes motopompes est de 30% à 45%, selon le type de pompe et de moteur [1];

$$CH = g \times \varrho = \frac{9.81(m.s^2) \times 10^3(kg / m^3)}{3600(s / h)} = 2.725 \quad kg.s.h / m^2 \quad (II.26)$$

Où

g : constante de la gravité (9,81 m/s²);

ϱ : la densité de l'eau (1000 kg/m³).

II.5.2.6. Estimation de l'enseillement

Consulter la carte d'enseillement de votre région. Toujours choisir la période de l'année la moins enseillée afin d'obtenir la production d'électricité requise durant cette période.

L'enseillement est habituellement exprimé en kWh/m²/j ou en heures de plein enseillement (heures \times 1000W/m²).

Comme il n'y a pas de batterie, le champ doit être dimensionné de façon à satisfaire à la charge pour les conditions d'enseillement les plus faibles. Le facteur d'utilisation nominal sera égal au nombre d'heures de soleil maximum durant le mois d'exploitation où l'enseillement est le plus faible. Vous devrez estimer vos besoins en électricité et établir la durée de la période d'enseillement minimal de notre région.

II.5.2.7. Estimation du champ photovoltaïque requis (Wc)

En introduisant le rendement du générateur photovoltaïque qui dépend des pertes dues à la poussière à l'échauffement des modules, au câblage, ...etc.

Puissance du champ photovoltaïque [1]:

$$W_c = \frac{\text{Charge journalière totale (Wh/j)}}{\text{Ensoleillement} \times \text{Re} n_{gen}} \quad (\text{II.27})$$

II.6. Conclusion

Les étapes de dimensionnement explicitées précédemment satisfont à certains critères techniques sélectionnés, mais le facteur coût pourra modifier ceux-ci sensiblement. Ainsi, après avoir estimé une première fois les dimensions de chaque composante, il sera possible de réévaluer ce choix en modifiant certains des paramètres de départ et d'obtenir une installation (par exemple : calcul des besoins en eau ; choix de la pompe...) qui fonctionnera de manière acceptable. C'est l'objectif de la deuxième chapitre, qui consisté à modéliser un moto-pompe pour concevoir une commande convenable pour optimiser le fonctionnement, donc le dimensionnement de la station de pompage photovoltaïque.

CHAPITRE III

Expérimentation d'une poursuite solaire discontinue à deux positions pour panneaux PV

III.1. Introduction

Pour maximiser l'éclairement solaire incident sur le plan d'un capteur solaire, il est nécessaire d'utiliser les systèmes de poursuite solaire. En général il ya deux types de système de poursuite : à un seul axe et à deux axes. Neville [1] a montré théoriquement que pour les régions dont la latitude est proche de 30° ; pour les modules PV inclinés d'un angle égale à la latitude du lieu et orientés plein sud, la puissance délivrée peut être améliorée de 41% par l'utilisation d'une poursuite à deux axes et de 36% moyennant une poursuite à un seul axe. Plusieurs autres travaux publiés par d'autres chercheurs [14-16] montrent que la poursuite solaire reste un moyen très efficace pour améliorer l'output des capteurs solaires. Mais cette technique nécessite des systèmes compliqués et un entretien régulier et minutieux quand ils sont installés en milieu saharien caractérisé par des vents de sables fréquents et des écarts de températures importants.

La faisabilité d'une poursuite solaire discontinue a été étudiée par Huang [17] dans le cas d'un seul axe avec trois positions. Il a montré que l'utilisation d'une poursuite solaire discontinue avec un seul axe et trois positions améliore l'output des panneaux PV de 24.5% par rapport aux panneaux orientés plein sud avec une inclinaison inférieure à 50° . Cette technique nécessite une sonde de position solaire qui permet de déterminer le moment pour commuter le panneau à la prochaine position.

Tomson [18] a étudié les performances des collecteurs solaires en poursuite discontinue à deux positions autour de l'axe nord-sud (l'axe d'inclinaison du panneau) pour les régions nordiques dont la latitude est autour de 60° . Il a montré que le gain énergétique saisonnier est amélioré de 10-20%.

III.2. Situation géographique de la wilaya d'Adrar

Adrar est située entre les latitudes $26^\circ 30'N$ et $28^\circ 00'N$ et les longitudes $0^\circ 30'W$ et $0^\circ 30'E$, elle s'étend de la ville d'Adrar jusqu'à la ville de Reggane sur presque une distance de 170 km [30][32].

La wilaya d'Adrar est localisée dans le sud-ouest du pays, elle s'étend sur une superficie considérable de $427\,968\text{ km}^2$ [30][32].

Elle est limitée :

- ✓ Au nord : la wilaya d'El bayadh
- ✓ Au nord-ouest : la wilaya de Béchar
- ✓ Au nord-est : la wilaya de Ghardaïa
- ✓ À l'ouest : la wilaya de Tindouf
- ✓ Au sud : le Mali et la Mauritanie.
- ✓ Au sud : est la wilaya de Tamanrasset.

III.3. Situation démographique

Durant la période des recensements 1998/2008, la population s'est accrue de 399714 habitants, soit une densité de 1 hab. /km². La population de la wilaya d'Adrar représente 11% de la population du grand sud (3 694 556 Habitants) [30][32].

Le taux d'accroissement moyen/an dans la wilaya d'Adrar durant la période entre les deux recensements 1998/2008 était de 2,6% égal au taux national qui était de 1,6%.

La wilaya, composée de 11 dairas, 28 communes et 299 ksars (villages), recouvre une zone d'environ 427 000 km² et regroupe 432 193 habitants (estimation de 2011) [30][32].

III.4. Climat

La Wilaya d'Adrar est scindée en deux zones climatiques distinctes [31] :

- ✓ Une zone semi désertique (présaharien) de Timimoun jusqu'à l'ouest de Béchar.
- ✓ Une zone désertique (Saharien) de Timimoun vers Timiaouine au sud.

III.4.1. La température

La température est un élément fondamental du climat, sa variation influe sur la transformation de l'eau en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux.

Des écarts de températures considérables entre la saison d'hiver et l'été; le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec une température moyenne de l'ordre de 38.33°C et une température maximale qui dépasse le 45°C, alors que le mois le plus froid c'est le mois de Janvier avec une température moyenne de l'ordre de 12.94°C et avec une température

minimale basse et peut atteindre 0°C, la température moyenne mensuelle est de l'ordre de 25.83°C.

III.4.2. Le vent

À Adrar, la fréquence des vents est très grande durant toute l'année ; en effet le pourcentage des fréquences calmes est de l'ordre de 16 %.

Les vitesses sont très élevées puisque la fréquence des vitesses supérieures à 5 m/s est de l'ordre de 20 à 40 % et que des vitesses supérieures à 20 m/s ne sont pas rares (les tempêtes de sable) [33].

La direction des vents dominants est de secteur Nord-Est et Nord (sauf en juillet et août où ils sont de secteur Est et Nord-Est) avec une fréquence de 25 % pour le Nord- Est et 16 % pour le secteur Nord.

III.4.3. La Précipitation

La faiblesse de la pluviosité est le caractère fondamental dans la région d'Adrar, les précipitations annuelles sont très faibles et ne dépassent guère les 30 mm/an.

III.4.4. Humidité relative de l'air

L'humidité relative est exceptionnellement faible toute l'année avec une moyenne annuelle d'environ 24 %, et particulièrement en saison chaude où le degré hygrométrique de l'air descend souvent en-dessous de 5 %.

III.5. Relief

La wilaya d'Adrar est composée de 04 grandes régions [32]:

- Le Gourara: la région de Timimoun
- Le Touat: la région d'Adrar
- Le Tidikelt: la région d'Aoulef
- Le Tanezrouft : la région de Bordj Badji Mokhtar.

III.6. Concept de poursuite solaire discontinue à deux positions autour d'un axe vertical

La Fig. III.1 présente le schéma descriptif montrant le concept de la poursuite solaire à deux positions autour d'un axe vertical. Cette technique fait appel à un simple mécanisme qui ne consomme pas d'énergie. Le mécanisme ajuste le capteur solaire à deux positions à angle d'inclinaison β fixe égale à la latitude du lieu considéré : Position Est durant la matinée et position Ouest durant l'après-midi.

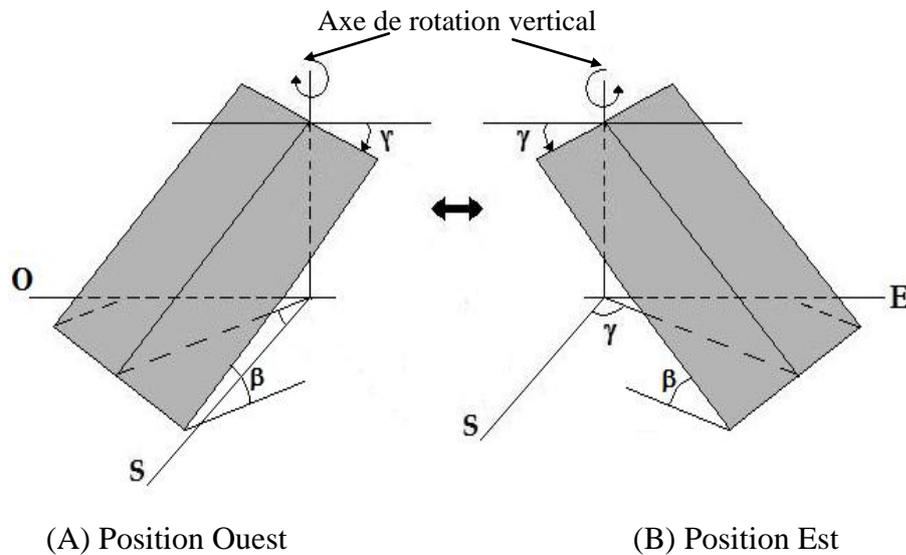


Fig. III.1 : Concept de la poursuite solaire discontinue à axe vertical avec deux positions.

Par rapport à l'orientation plein sud, les deux positions (A) et (B) montrées sur la Fig.III.1 sont obtenues par pivotement autour de l'axe vertical d'un angle azimut γ (négatif vers l'Est et positif vers l'Ouest). L'angle azimut optimal d'une poursuite discontinue à deux positions autour d'un axe vertical peut être déterminé en calculant l'irradiation solaire globale incidente sur la surface du capteur en fonction de la latitude du lieu et de la période de fonctionnement (mois, saison) considérées.

III.7. Méthodologie

Afin de comparer expérimentalement l'irradiation journalière collectée sur une surface plane inclinée à la latitude du lieu et orienté plein sud avec celle collectée sur une surface plane inclinée à la latitude du lieu et sujette à une poursuite solaire discontinue à deux positions autour de midi TSV par rapport à un axe normal à l'horizontale ; on construit le banc d'essai expérimental composé des éléments suivants :

- Trois (03) pyranomètres de mêmes caractéristiques (CM11) ;
- Une (01) Acquisition de données ;
- Trois (03) supports permettent l'installation des trois pyranomètres et assurant la possibilité de changement d'orientation autour de l'axe normal à l'horizontale.

Le pyranomètre de référence sera monté en position fixe ($\beta = 28\text{deg}$ et $\gamma = 0$). Les deux autres pyranomètres seront installés sur un support d'inclinaison fixe ($\beta = 28\text{deg}$) et permettant la rotation autour d'un axe vertical suivant un angle γ négatif pour celui orienté vers l'Est et positif pour celui orienté vers l'Ouest. La réalisation des différents supports a été faite conformément aux dessins descriptifs (Fig. III.2 et Fig. III.3) qui sont établis après consultations de plusieurs références relatives à l'installation de l'instrumentation météorologique.

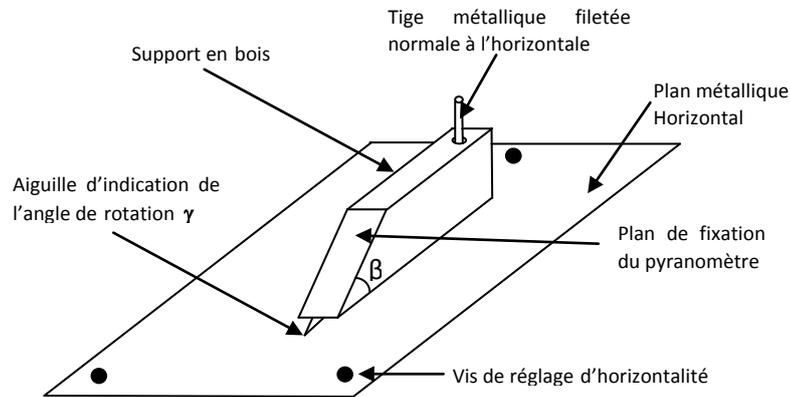


Fig. III.2 : Schéma global du support d'un pyranomètre prévu pour le banc d'essai expérimental.

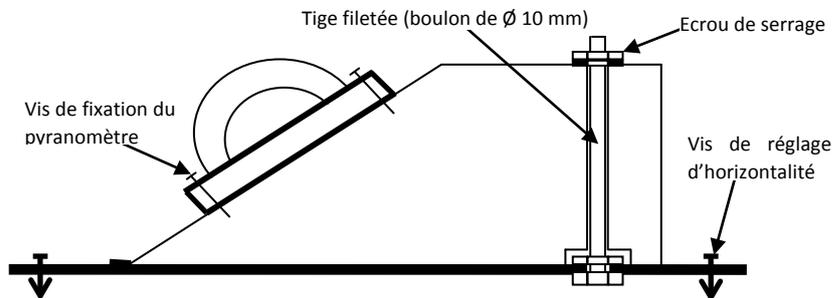


Fig. III.3 : Schématisation des principaux détails de fixation du pyranomètre sur le support orientable.

Le banc d'essai a été installé sur le toit d'une baraque saharienne bien ensoleillée. Comme montrés sur la photo de la Fig. III.4; les trois supports sont fixés après avoir tracé l'axe nord-sud. Les différents pyranomètres sont reliés à une acquisition de données de type Fluke Hydra 2635A dont le pas d'enregistrement a été fixé à 20 secondes. Le pyranomètre de référence est monté en position fixe ($\beta = 28\text{deg}$ et $\gamma = 0$). Pour les deux autres, l'angle de pivotement γ (positif pour l'un et négatif pour l'autre) est fixé selon le mois durant lequel le test est effectué.



Fig. III.4 : Photo montrant l'installation des trois pyranomètres.

La campagne des tests a débuté en juin 2011. Les angles de pivotement considérés pour les différents mois de test sont donnés comme suit :

Tab. III.1 : Les angles d'orientation considérée pour les différents mois.

Le mois	l'angle de pivotement γ (deg)
Janvier	37
Février	44
Mars	54
Avril	72
Mai	87
Juin	90
Juillet	90
Aout	78
Septembre	62
Octobre	46
Novembre	38
Décembre	35

Durant chaque mois on a fait des mesures au cours de quelques jours uniquement (indisponibilité de pyranomètres).

III.8. Résultats et discussion

A titre d'exemple nous montrons en Fig. III.5 les résultats obtenus pour le 22 juin 2011. Cette journée est caractérisée par une matinée sous un ciel légèrement couvert de nuages brumeux avec une composante diffuse assez importante. Ceci se traduit par un faible écart entre la courbe relative au pyranomètre orienté vers l'Est et celle relative au pyranomètre orienté plein sud. Au début de l'après-midi, le ciel est beaucoup plus clair avec un passage nuageux dense à partir de 17h. Les différentes intégrations effectuées sur les courbes de la figure III.5 ont données les résultats suivants :

- L'irradiation journalière incidente sur le plan orienté plein sud est de 6744 Wh/m²/j.
- L'irradiation journalière incidente sur le plan pivotant entre la position Est ($\gamma=-90\text{deg}$) et Ouest ($\gamma=90\text{deg}$) est de 8545 Wh/m²/j.

Le gain qui résulte en optant pour la configuration exploitant le plan pivotant est de l'ordre de **26.7%**. Le résultat obtenu théoriquement par les calculs, est de 29.4% pour la journée représentative du même mois. Si on suppose que le seuil critique pour le démarrage de notre pompe est de l'ordre de 200 W/m² pour une certaine hauteur de pompage, alors le gain énergétique réel sera de l'ordre de 25.5%.

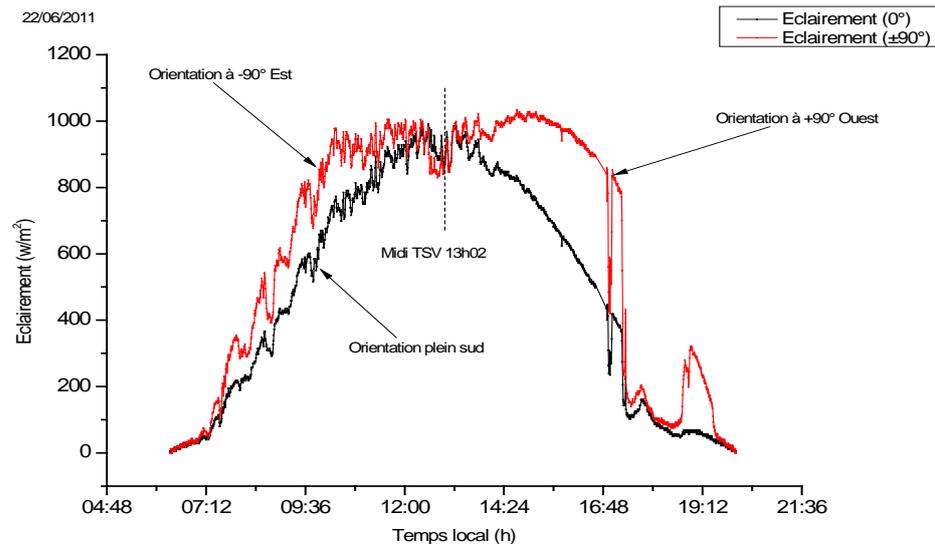


Fig. III.5 : Evolution de l'éclairement solaire mesuré sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesuré sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions fixes ($\gamma = -90\text{deg}$ et $\gamma = +90\text{deg}$) lors de la journée du 22 juin 2011.

Pour une journée à ciel complètement dégagé (aucun passage nuageux); les résultats sont présentés à la Fig. III.6. Durant cette journée la composante directe du rayonnement solaire est plus importante; Le gain énergétique sera alors plus grand. En effet, du lever au coucher du soleil ; le gain est de l'ordre de 39.4%. Si on tient compte du seuil critique du démarrage de notre pompe, le gain énergétique sera alors de 42.8%.

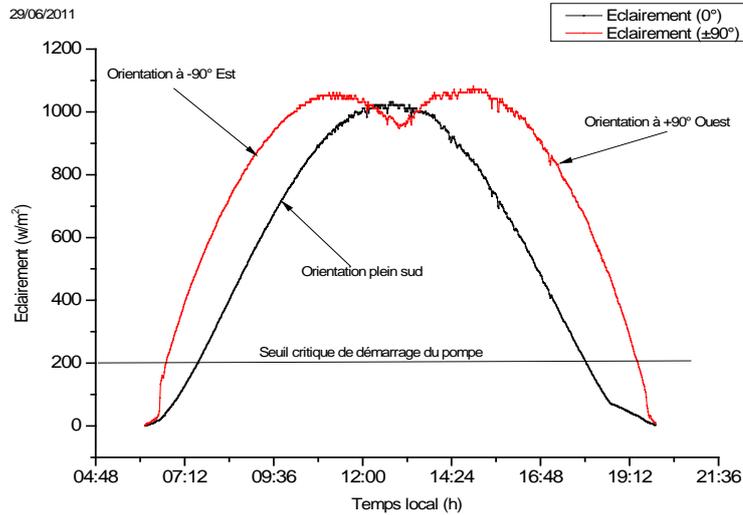


Fig. III.6 : Evolution de l'éclairement solaire mesuré sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesuré sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions fixes ($\gamma = -90^\circ$ et $\gamma = +90^\circ$) lors de la journée du 29 juin 2011.

En dehors de la période estivale; le gain énergétique sera moins important. En effet comme montré sur la Fig. III.7 relative à la journée du 26 octobre 2011; le gain énergétique est de l'ordre de 14.65%.

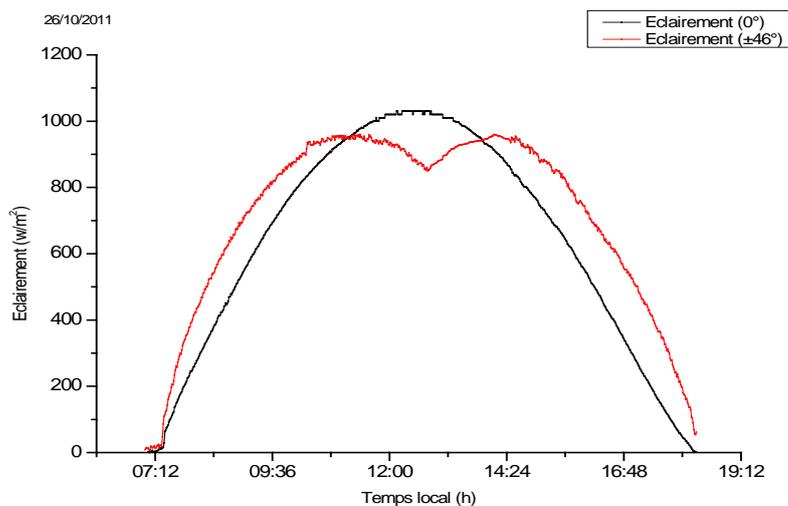
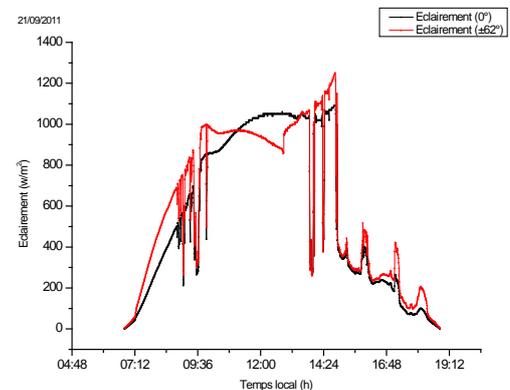
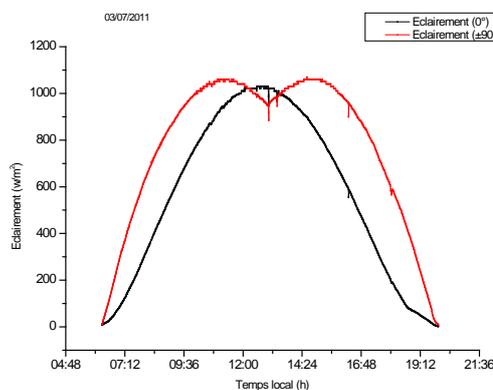
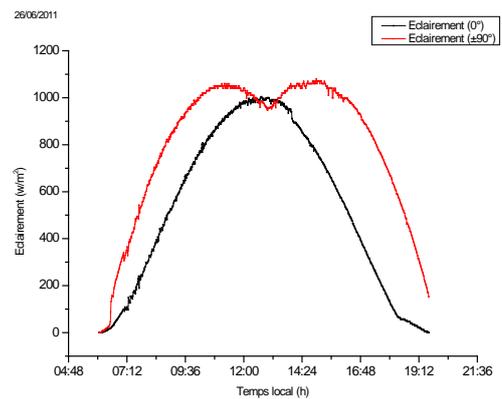
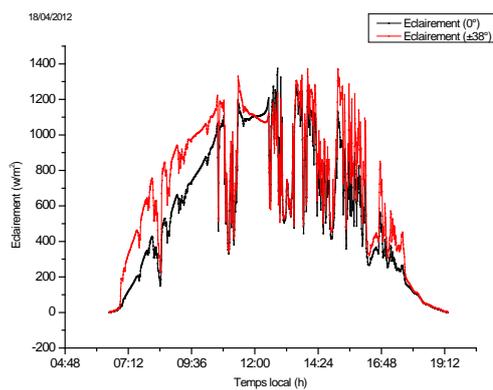
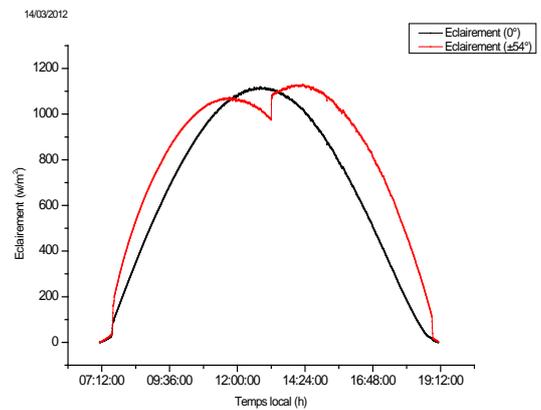
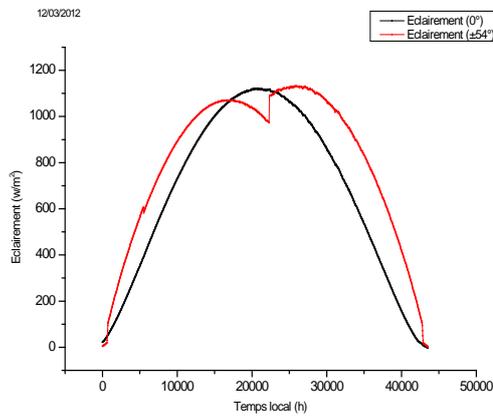


Fig. III.7 : Evolution de l'éclairement solaire mesuré sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesuré sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions fixes ($\gamma = -46^\circ$ et $\gamma = +46^\circ$) lors de la journée du 26 octobre 2011.

Ci-dessous on à présenter quelque résultats des jours de teste; les courbes représentent une comparaison de l'évolution de l'éclairement solaire mesuré sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar et celui mesuré sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions fixes; l'angle de pivotement γ selon le mois.



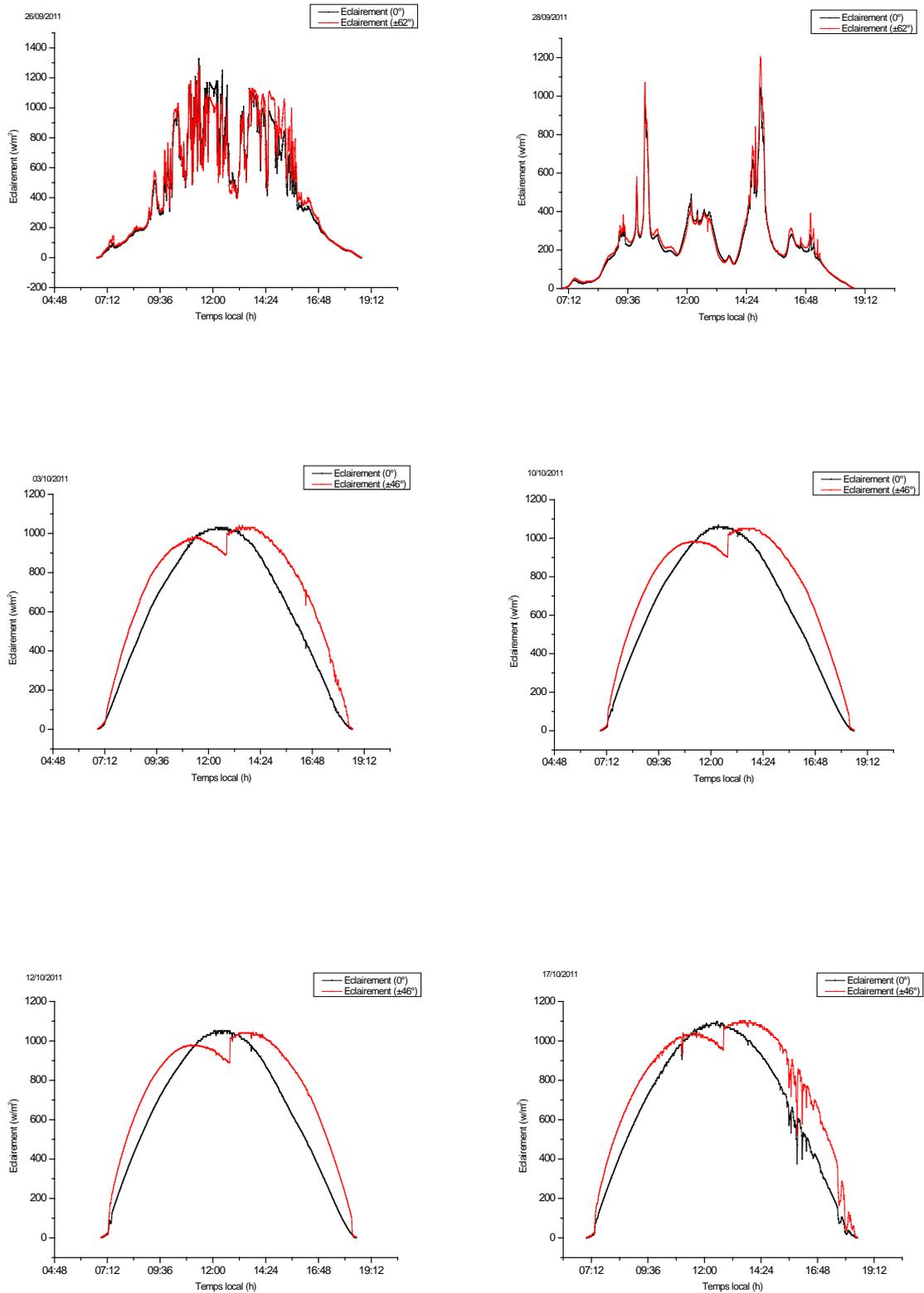


Fig. III.8 : Evolution de l'éclairement solaire mesuré sur un plan orienté plein sud et l'autre pivotant entre deux positions.

III.9. Conclusion

L'analyse des résultats de mesures démontre que la poursuite discontinue à deux positions autour d'un axe vertical améliore nettement l'irradiation solaire incidente sur le panneau solaire installé dans la région d'Adrar. La mise en place de cette technique constitue contribution au bon dimensionnement du générateur photovoltaïque d'un système de pompage et à la réduction de son coût d'installation. Cette technique est beaucoup plus efficace dans les zones caractérisées par une importante composante directe du rayonnement solaire.

CHAPITRE IV

Application de la poursuite solaire discontinue à deux positions au pompage PV

IV.1. Introduction

Dans le précédent chapitre nous avons présenté l'étude expérimentale de la poursuite solaire discontinue à deux positions pour l'amélioration du gain énergétique des panneaux photovoltaïques (à l'aide des pyranomètres). Une campagne de tests expérimentaux a été effectuée dans le but de faire une vérification effective du gain énergétique réalisé en adoptant cette technique. Le dépouillement et l'analyse des différents résultats obtenus ont été effectués au cours de chapitre précédent.

Dans ce chapitre; nous avons entamé l'installation et la réalisation d'un banc d'essai expérimental d'une pompe à eau alimentée par un générateur photovoltaïque. Ce dernier est fixé sur une monture permettant de pivoter manuellement autour d'un axe vertical selon le principe d'une poursuite discontinue à deux positions comme montré sur la Fig. IV.1.

La figure 1 présente un schéma descriptif du système montre le concept de la poursuite solaire à deux positions autour d'un axe vertical. Cette technique fait appel à de simples mécanismes qui ne consomment pas d'énergie. Le mécanisme ajuste le capteur solaire à deux positions à angle d'inclinaison β fixe égale à la latitude du lieu considéré : Position Est durant la matinée et position Ouest durant l'après-midi.

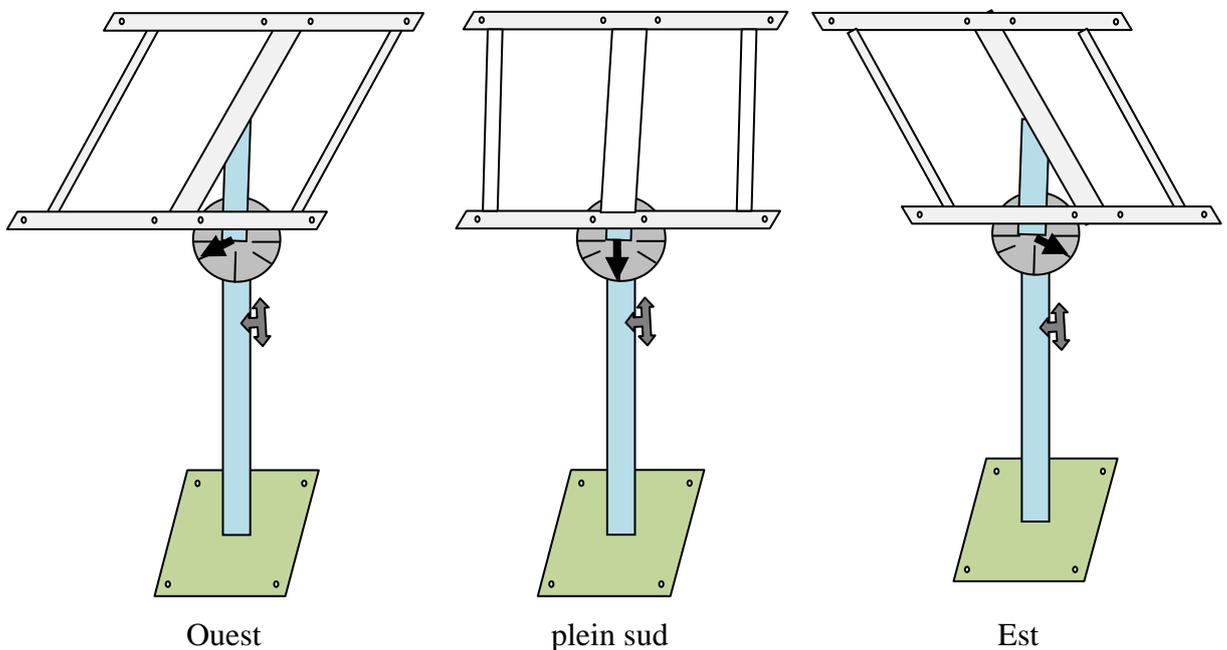


Fig. IV.1 : Concept de la poursuite solaire discontinue à axe vertical avec deux positions.

Par rapport à l'orientation plein sud, les deux positions (Est) et (Ouest) montrées sur la figure IV.1 sont obtenues par pivotement autour de l'axe vertical d'un angle azimut γ (négatif vers l'Est et positif vers l'Ouest).

IV.2. Composition du banc d'essai expérimental

Le banc d'essai expérimental comprend :

- Le générateur photovoltaïque constitué de deux panneaux PV de 75Wc fixé sur une structure mobile;
- La pompe d'eau (**Lorentz PS150 C-SJ5-8**) plongée dans un bac à eau ;
- Un boîtier de commande et d'adaptation électronique (contrôleur) spécial de la pompe;
- Un ensemble des appareils de mesure :
 - Un pyranomètre pour mesurer l'éclairement solaire global incident sur le plan de générateur PV;
 - Des thermocouples de type K pour mesurer la température de la face arrière des panneaux PV et la température ambiante;
 - Un compteur d'eau pour mesurer le débit d'eau pompée;
 - Un capteur de courant pour mesurer le courant électrique à la sortie du générateur PV;
 - Un capteur de tension pour mesurer la tension aux bornes du générateur PV.

IV.3. Les caractéristiques techniques de la pompe à eau et de son contrôleur

IV.3.1. Pompe (C-SJ5-8)

- Corps en acier inoxydable et alimentée au photovoltaïque direct avec options de connexion au courant alternatif.
- Moteurs à courant continu CC sans balais ECDRIVE, conçus pour une utilisation solaire avec plus de 90 % d'efficacité;
- Débit max : 4.0 m³/h;
- Hauteur maximale de pompage : 20 m;
- Puissance maximale : 300W.

IV.3.2. Contrôleur (PS 150)

- Tension max d'entrée 50V ;
- Courant max de sortie 20A ;
- Technologie MPPT pour optimiser la consommation d'énergie des panneaux PV ;

- Alimentation par batterie/panneaux solaires/mixte réseau.

IV.4. Les panneaux PV

Les caractéristiques des panneaux PV qui sont utilisés dans le banc d'essai sont données comme suit :

- Panneau PV (ET-M53675);
- Nombre : 2;
- Puissance max 75Wc;
- Surface : 0.66 m² (hors tout);
- Tension de circuit ouvert $V_{co} = 21.73V$
- Courant de court-circuit $I_{cc} = 4.72A$;
- Tension max $V_M = 17.40V$;
- Courant max $I_M = 4.31A$.

Durant cette première étude expérimentale, le générateur sera manipulé manuellement et sa monture a été réalisée de telle sorte à permettre la fixation de l'angle de pivotement.

IV.5. Le banc d'essai expérimental

Le banc d'essai expérimental est présenté sur la Fig. IV.2. Tous les capteurs utilisés pour mesurer les différents paramètres sont reliés à une acquisition de données qui est programmée pour faire des prélèvements à des intervalles réguliers fixés auparavant. Ces données seront, par la suite, transférées sur ordinateur pour traitements et analyses.



Fig. IV.2 : Photo du banc d'essai expérimental installé sur la plate forme des essais de l'URER/MS.

Dans cette expérience, nous avons installé la pompe dans un bac d'eau pour élever l'eau à une hauteur manométrique totale de 3.95 mètres dans un cycle fermé.



Fig. IV.3 : Photo de l'installation de système de pompage.



Fig. IV.4 : Différentes positions de système (Est, Ouest).

IV.6. Résultats et discussion

Au début, je rappelle que le principe de la poursuite discontinue à deux positions est comme suit : c'est un mécanisme ajuste le capteur solaire à angle d'inclinaison β fixe et égale à la latitude du lieu considéré avec une position Est durant la matinée et position Ouest durant l'après-midi par un angle selon le moins (par exemple ± 44 pour le mois de Février et ± 90 pour le mois de Juin). Ainsi également je rappelle que le gain qui résulte en optant pour la configuration de la poursuite discontinue à deux positions dans la période hiver est de l'ordre de 13.28%.

Dans la période estivale ou l'état du ciel est complètement dégagé (aucun passage nuageux); le gain énergétique sera alors plus grand, il est de l'ordre plus de 41%.

Afin de comparer expérimentalement des performances énergétiques dans un système de pompage PV alimenté par des panneaux inclinés à la latitude du lieu et orienté plein sud avec celles dans un système de pompage alimenté par des panneaux inclinés à la latitude du lieu et sujette à une poursuite solaire discontinue à deux positions autour de midi TSV par rapport à un axe normal à l'horizontale, évidemment par construction deux banc d'essai expérimentale de même puissance et installées dans les même conditions et dans le même endroit.

Par le manque de moyens, nous avons utilisé un seul système de pompage, nous avons opté à comparer entre des jours ont presque même caractéristiques (Irradiation globale journalière sur le plan horizontal, Irradiation normale journalière, Irradiation diffuse journalière sur le plan horizontal et la température ambiante) comme présenté dans le Tab. IV.1.

Tab. IV.1 : Jours de comparaison sélectionnés.

Jour	Azimut (°)	Irradiation globale journalière sur le plan horizontal (kWh/m²/j)	Irradiation normale journalière (kWh/m²)	Irradiation diffuse journalière sur le plan horizontal (kWh/m²/j)	Température ambiante (°C)
01/02/2015	0	4.73	4.98	1.92	17.7
03/02/2015	±44	4.88	5.26	1.93	17
13/02/2015	0	4.99	5.03	2.02	15.9
02/02/2015	±44	4.93	5.09	2	15.7
14/02/2015	0	5.63	8.58	0.88	16.2
16/02/2015	±44	5.67	7.55	1.41	17.2
27/02/2015	0	5.95	7.49	1.46	16.9
22/02/2015	±44	5.98	8.65	0.99	17
29/07/2016	0	8.27	8.93	1.67	35.9
07/06/2016	±90	8.52	8.79	1.71	36.2
28/07/2016	0	8.32	9.28	1.55	35.4
24/06/2016	±90	8.60	9.59	1.48	35.3
09/07/2016	0	8.04	5.53	3.61	41.4
28/06/2016	±90	8.08	5.60	3.45	39.7
08/07/2016	0	7.64	4.34	4.14	40.9
29/06/2016	±90	7.73	4.08	4.37	39.7
01/07/2016	0	8.84	10.33	1.32	39.3
30/06/2016	±90	8.61	8.63	2.21	39.7

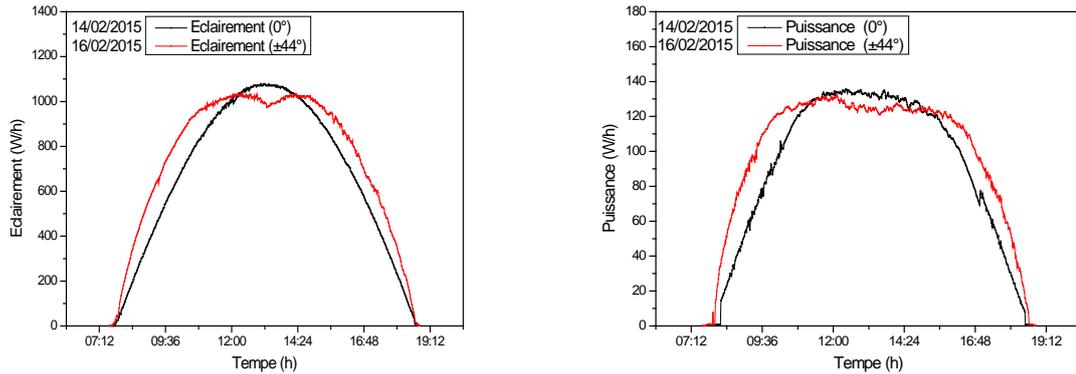


Fig. IV.5 : Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma= -44^\circ$ et $\gamma= +44^\circ$) pour les jours 14/02/2015 et 16/02/2015.

Concernant les résultats obtenus pour les jours 14/02/2015 et 16/02/2015, le gain d'irradiation qui résulte en optant pour la configuration exploitant le plan pivotant est de l'ordre de 11.48%.

Le gain de l'énergie de sortie de générateur PV est l'ordre de 11.54% et le gain pour le débit de l'eau est l'ordre de 13.63%.

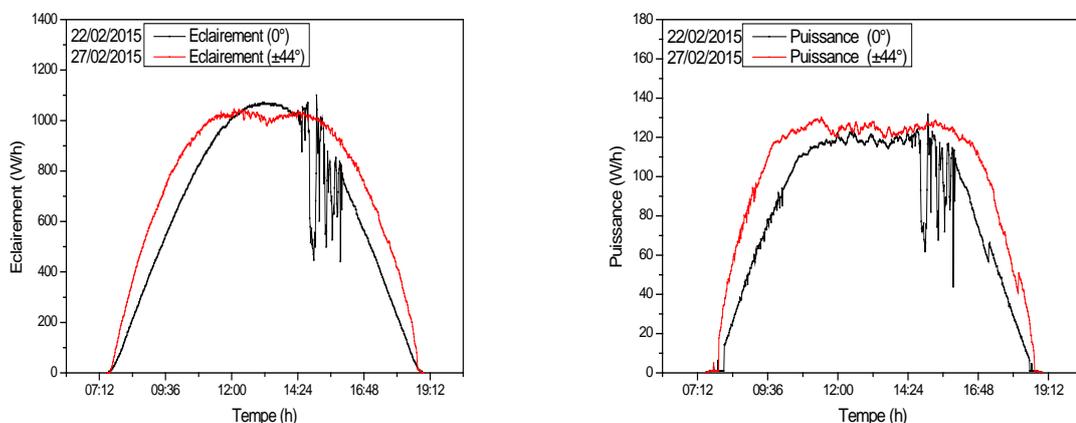


Fig. IV.6 : Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma= -44^\circ$ et $\gamma= +44^\circ$) pour les jours 22/02/2015 et 27/02/2015.

Pour les résultats obtenus pour les jours 22/02/2015 et 27/02/2015, le gain d'irradiation qui résulte en optant la poursuite discontinue est de l'ordre de 17.25%.

Le gain de l'énergie de sortie de générateur PV est l'ordre de 17.34% et le gain pour le débit de l'eau est l'ordre de 21.10%.

Ci-dessous on à présenter quelque résultats obtenus au cours des jours de comparaison.

Les courbe représente l'évolution de l'éclairement solaire et la puissance générée par le générateur solaire mesuré sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesuré sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions fixes γ selon le mois.

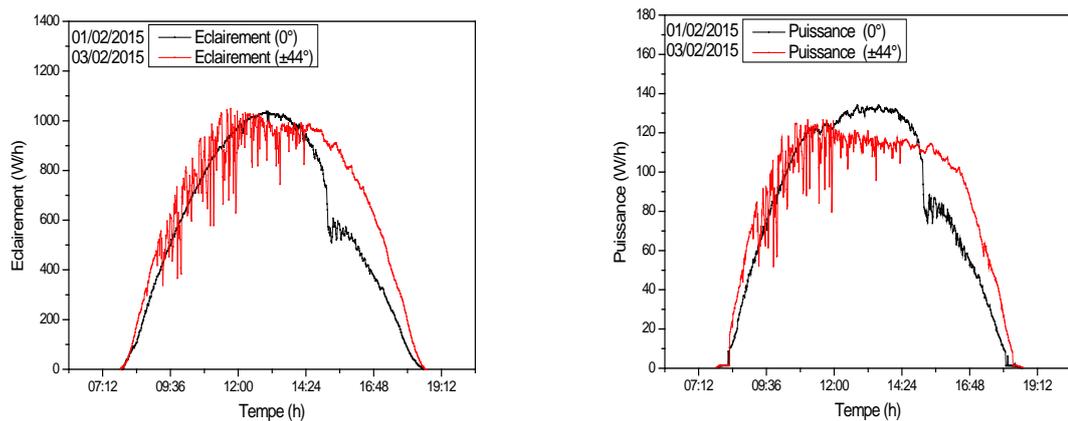


Fig. IV.7 : Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma = -44^\circ$ et $\gamma = +44^\circ$) pour les jours 01/02/2015 et 03/02/2015.

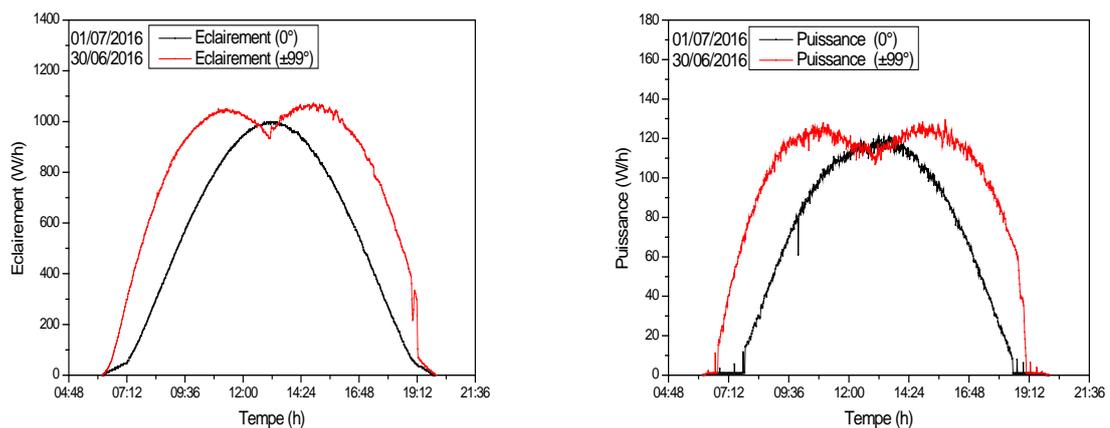


Fig. IV.8 : Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma = -90^\circ$ et $\gamma = +90^\circ$) pour les jours 30/06/2016 et 01/07/2016.

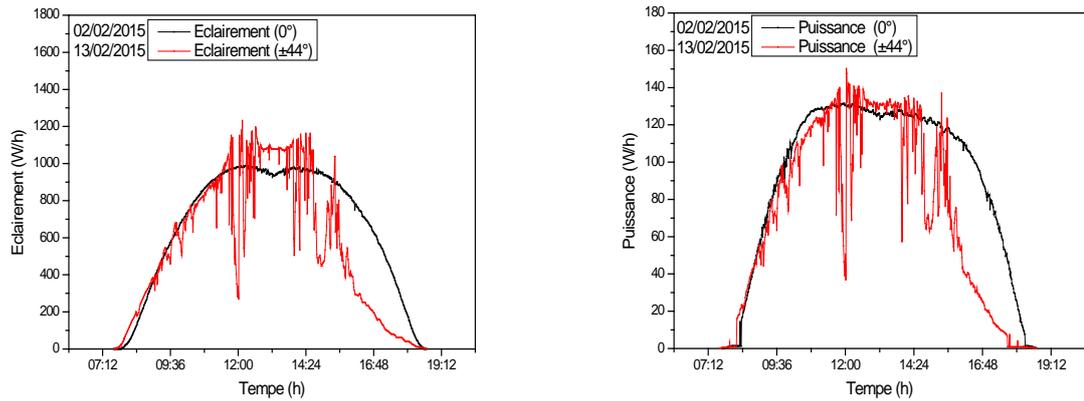


Fig. IV.9 : Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma = -44^\circ$ et $\gamma = +44^\circ$) pour les jours 02/02/2015 et 13/02/2015.

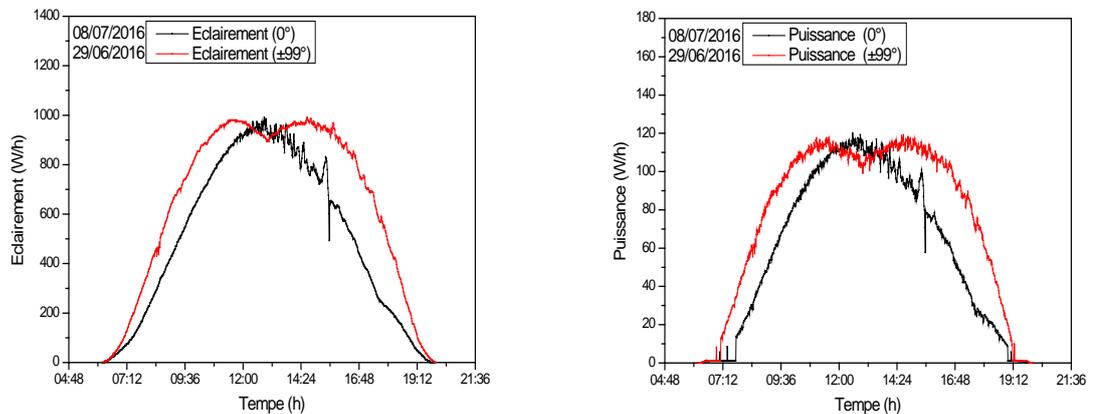


Fig. IV.10 : Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma = -90^\circ$ et $\gamma = +90^\circ$) pour les jours 29/06/2016 et 08/07/2016.

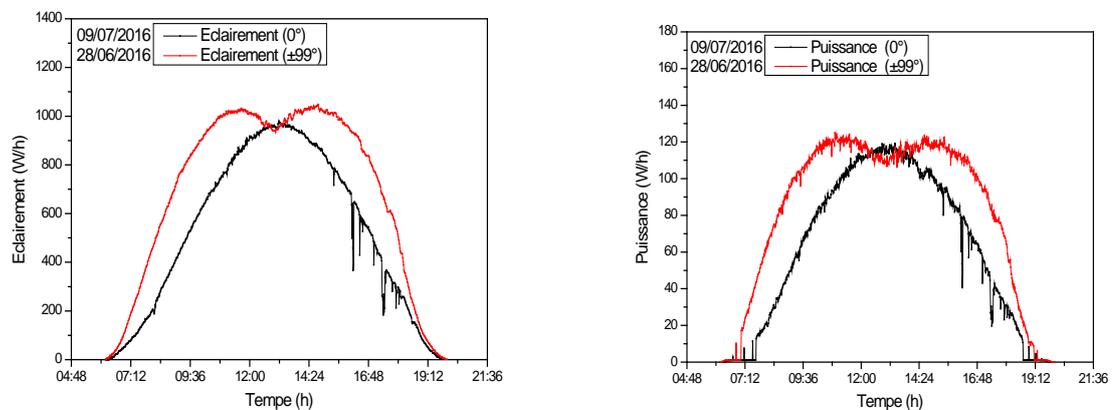


Fig. IV.11 : Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma = -90^\circ$ et $\gamma = +90^\circ$) pour les jours 28/06/2016 et 09/07/2016.

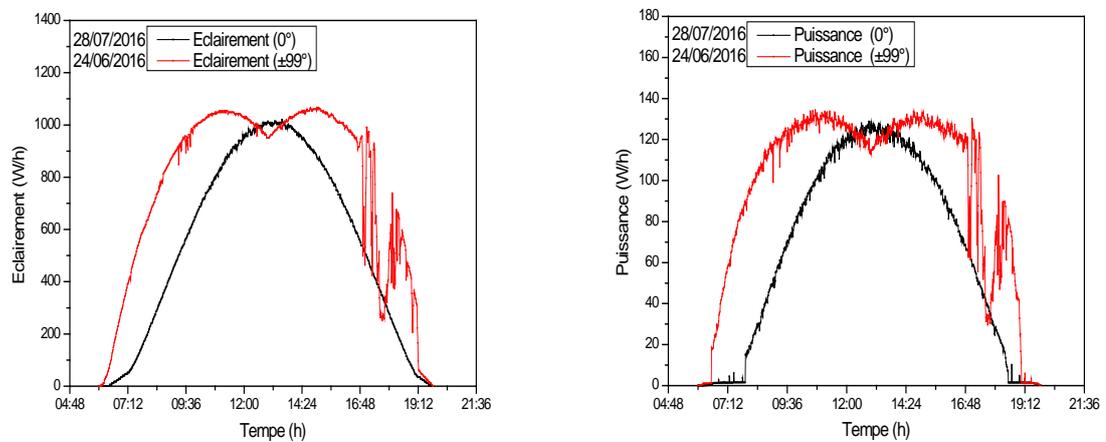


Fig. IV.12 : Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma = -90^\circ$ et $\gamma = +90^\circ$) pour les jours 24/06/2016 et 28/07/2016.

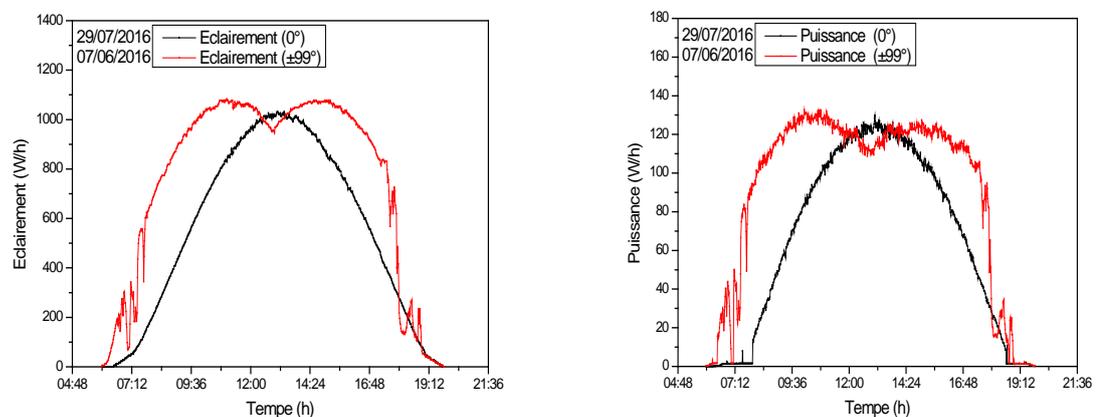
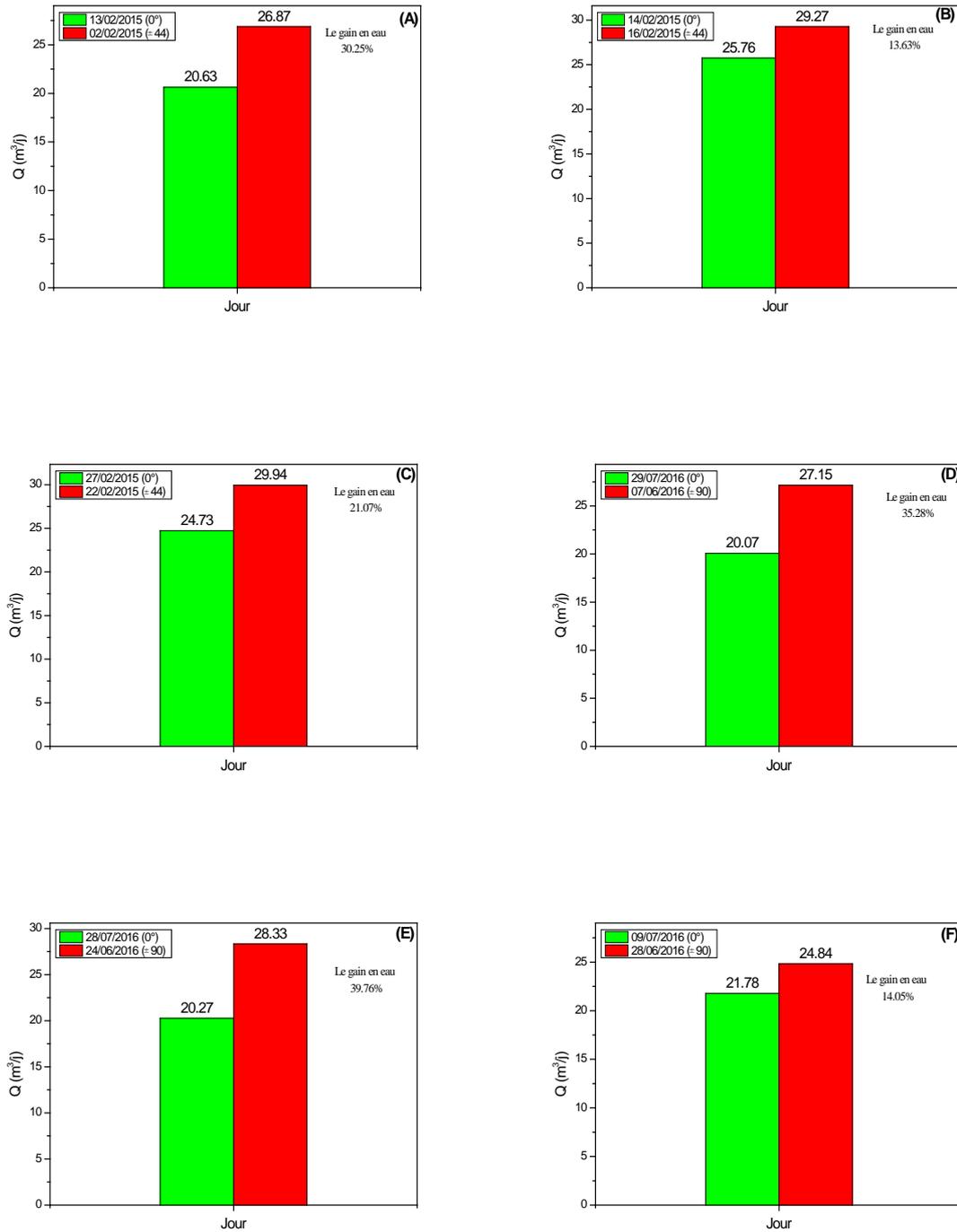


Fig. IV.13 : Evolution des performances mesurées sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar comparé à celui mesurées sur un plan incliné à la latitude d'Adrar et pivotant entre deux positions ($\gamma = -90^\circ$ et $\gamma = +90^\circ$) pour les jours 07/06/2016 et 29/07/2016.

Tab. IV.2 : Gain en eau pour les jours de comparaison.

Jour	Azimut (°)	Irradiation journalière (KWh/m ² /j)	Quantité d'eau journalière pompée (m ³ /j)	Gain en eau (%)	Gain énergétique (%)
01/02/2015	0	6.450	24.21	8.10	12.87
03/02/2015	±44	7.280	26.17		
13/02/2015	0	6.190	20.63	30.25	18.90
02/02/2015	±44	7.360	26.87		
14/02/2015	0	7.540	25.76	13.63	11.54
16/02/2015	±44	8.410	29.27		
27/02/2015	0	7.380	24.73	21.10	17.34
22/02/2015	±44	8.660	29.94		
29/07/2016	0	7.540	20.07	35.28	37.93
07/06/2016	±90	10.400	27.15		
28/07/2016	0	7.530	20.27	39.76	39.44
24/06/2016	±90	10.500	28.33		
09/07/2016	0	7.160	21.78	14.05	32.82
28/06/2016	±90	9.510	24.84		
08/07/2016	0	6.920	20.78	20.69	28.90
29/06/2016	±90	8.920	25.08		
01/07/2016	0	7.450	20.34	37.41	40.94
30/06/2016	±90	10.500	27.95		

La quantité d'eau obtenue par le même système de pompage, avec un changement de l'orientation, une fois orienté plein sud et l'autre pivotant entre deux positions est représentée sur la Fig. IV.14.



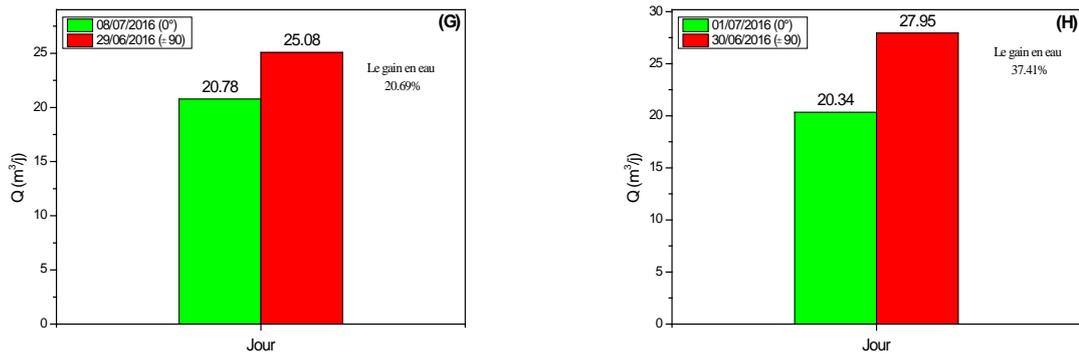


Fig. IV.14 : Quantités d'eau journalière du système de pompage, avec un changement de l'orientation, une fois orienté plein et l'autre pivotant entre deux positions

A titre d'exemple, dans la Fig. IV.14. (A), l'histogramme représente les quantités d'eau journalière obtenue pour les jours 02/02/2015 et 13/02/2015. Le gain en eau qui résulte du système de pompage pivotant entre deux positions par rapport au celle orienté plein sud et incliné à la latitude d'Adrar est de l'ordre de 30.25%.

L'analyse des résultats de mesures a démontré que la poursuite discontinue à deux positions autour d'un axe verticale améliore nettement l'irradiation solaire incidente sur le panneau solaire installé dans la région d'Adrar. Le gain en quantité d'eau journalière est de l'ordre de 14 - 40% en fonction du mois considéré ainsi que de l'état du ciel. En effet seule l'étude expérimentale qui est programmée au cours du prochain exercice nous permettra de statuer sur le problème. Néanmoins ; une première investigation théorique a été effectuée moyennant les résultats de mesures effectués lors de la journée du 29 juin 2011.

IV.7. Conclusion

Nos travaux ont montré que la méthode de poursuite discontinue à deux positions autour d'un axe verticale est performante et que cette nouvelle technique est prometteuse. Ce type de poursuite solaire appliquée aux générateurs photovoltaïques d'un système de pompage offre l'avantage d'une meilleure exposition au rayonnement solaire sans avoir recours à de systèmes électroniques très compliqués et coûteux.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail de recherche qui comprend deux parties et qui porte sur l'optimisation du champ photovoltaïque dans un système de pompage solaire installé dans la région d'Adrar. La première partie présente une étude expérimentale d'une poursuite solaire discontinue à deux positions pour un panneau photovoltaïque et la deuxième partie présente les différentes étapes de la réalisation, l'installation et l'expérimentation d'un système de pompage photovoltaïque avec une poursuite solaire discontinue à deux positions.

D'après la période d'essai du système, nous pouvons noter que :

- La poursuite discontinue à deux positions autour d'un axe vertical améliore nettement l'irradiation solaire incidente sur le panneau solaire installé dans la région d'Adrar.
- La mise en place de cette technique constitue une contribution au bon dimensionnement du générateur photovoltaïque d'un système de pompage et à la réduction de son coût d'installation.
- Le gain en quantité d'eau journalière est de l'ordre de 14 - 40% en fonction du mois considéré ainsi que de l'état du ciel.
- Cette technique est beaucoup plus efficace dans les zones caractérisées par une importante composante directe du rayonnement solaire.

Les perspectives qui pourraient être envisagés à partir des résultats obtenus de cette recherche sont :

- Etude, installation et expérimentation d'un système de poursuite solaire discontinue à trois positions.
- Application du système de poursuite solaire discontinue à trois positions au pompage photovoltaïque.
- Une analyse technico-économique des différentes configurations des systèmes de pompage photovoltaïque de poursuite solaire discontinue à deux positions et à trois positions.

Références Bibliographiques :

- [1] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller et B. sada sy; " Le Pompage Photovoltaïque " IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA 1998.
- [2] S. Abada; " Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic ", Mémoire Maître es Sciences , Université laval, 2011.
- [3] Yaichi Mohammed; " Etude, Contrôle et Optimisation des performances d'une Chaîne de Conversion Photovoltaïque utilisant des Onduleurs Multiniveaux Asymétriques". Thèse de Doctorat; Université Djillali Liabes de Sidi-Belabbes. 2017.
- [4] N. Oleksiy; " Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïque à contacts arrière interdigités ", Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon. Mai 2005.
- [5] http://fr.ekopedia.org/Cellules_photovolta.
- [6] R. Maouedj; " Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah ", Thèse de magister, Université de Tlemcen. Décembre 2005.
- [7] A. Labouret, M. Viloz, " Energie solaire photovoltaïque ", Dunod, 3^{ème} édition, Paris 2006.
- [8] Adamt Truskolanskiles; " Turbopompes : Théorie - Tracé – Construction " 1977.
- [9] J. BONNIN; " Hydrauliques urbaines appliquées aux agglomérations de petite et moyenne importance ". Ed. EYROLLES. Paris. P 219. 1977.
- [10] A. DUPONT; " Hydraulique urbaine ". Tome 2: Ouvrages de transport - Elévation et distribution des eaux 6^{ed}. Ed. Eyrolles. Paris. P 477, 1988.
- [11] P. LE LEC; " Transport des fluides pompes ", Université de Nancy. P 36. 1966.
- [12] B.Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.
- [13] Richard C.Neville; " Solar energy collector orientation and tracking mode ". Solar Energy 20, 7-11, 1978.

- [14] Zhimin Li, Xinyue Liu, Runsheng Tang; " Optical performance of vertical single-axis tracked solar panels "; *Renewable Energy* 36, pp.64-68, 2011.
- [15] M. Kacira, M. Simsek, Y. Babur and S. Demirkol; " Determining Optimum Tilt Angles and Orientations of Photovoltaic Panels in Sanliurfa, Turkey ". *Renewable Energy*, 29, 1265-1275, 2004.
- [16] Ali Al-Mohamad; " Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system ". *Applied Energy*, Pages. 345-354; Volume 79, 2004.
- [17] B. J. Huang, and F. S. Sun; "Feasibility Study of One Axis Three Positions Tracking Solar PV with Low Concentration Ratio Reflector ". *Energy Conversion and Management* 48, 1273-1280, 2007.
- [18] Tomson Teolan; " Discrete two-positional tracking of solar collectors ". *Renewable Energy* 33, 400-405, 2008.
- [19] B.Y.H. Liu and R.C. Jordan; " The long-term average performance of flat-plate solar energy collectors ". *Solar Energy*; 7, 53-74, 1963.
- [20] J.A Duffie, W.A. Beckman; " Solar engineering of thermal processes ". Research supported by the University of Wisconsin. New York, Wiley-Interscience, 1980.
- [21] A. Rabl; "Active solar collectors and their applications ". Oxford University Press, Oxford, 1981.
- [22] M. Capderou; " Atlas solaire de l'Algérie ". Tome 2; Office des Publications Universitaires, Alger, 1985.
- [23] El Y. Chachoua-Harmim et al. " Vérification expérimentale de la faisabilité de la poursuite solaire discontinue à deux positions pour panneaux PV à Adrar ". *Revue des Energies renouvelables* 4/15 581-587. 2012.
- [24] Skoplaki E.and J.A. Palyvos; " On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations ". *Solar energy* 83; 614-624; 2009.
- [25] R. Maouedj; " Etude des performances d'un système hybride (photovoltaïque-éolien), pour la production de l'électricité. Application au site d'adrar ", Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen. Juillet 2013.

- [26] J.Lagorse, " Modélisation et optimisation d'alimentations électriques autonomes stationnaires multi-sources ", Laboratoire SeT (Systèmes et Transports) —Université de Technologie de Belfort Montbéliard, JCGE'08 LYON, 2008.
- [27] Sy M. Mansour Niang & Souleymane Diop " Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîcher ", Institut Supérieur de Technologie Industrielle - DIT Electrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation 2008.
- [28] BELAIB Allel; " Modélisation hydraulique d'un système de transfert d'eau potable – cas du transfert du couloir chlef – tenes-el guelta-a partir du barrage de sidi yacoub ", Thèse de magister, Université hassiba benbouali de chlef.
- [29] Zidi Sayah; " Etude de défaillance d'une pompe à eau centrifuge de type guinard hp ", Thèse de master, Université kasdi merbah ouargla 2016.
- [30] Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière ; « Rubrique Monographie Wilaya d'ADRAR ». ANIREF 27/07/2011.
- [31] Institut national des sols de l'irrigation et du drainage ; « Essai de présentation d'une technique d'irrigation traditionnelle dans la wilaya d'Adrar : la " foggara" ».
- [32] Invest in Algeria; « Wilaya d'Adrar ». ANDI 2013.
- [33] K. Messaitfa, ENERSOLE. Octobre 2001. Adrar. Algérie.

Optimisation du Champ Photovoltaïque dans un Système de Pompage Solaire Installé dans la région d'Adrar

Résumé:

Ce travail porte sur l'étude et l'optimisation du champ photovoltaïque PV d'un système de pompage solaire installé dans la région d'Adrar dans le but de réduire son coût et de l'amélioration de l'énergie solaire incidente sur le plan des panneaux PV, l'étude de la poursuite solaire discontinue a été investie.

La méthode idéale pour maximiser l'irradiation solaire incidente sur la surface d'ouverture des panneaux photovoltaïques du générateur d'un système de pompage solaire est l'utilisation de mécanisme de poursuite solaire. Cette solution est recommandée par un mécanisme simple et économique. Un compromis est obtenu en optant pour une poursuite discontinue. Cette poursuite assure des positions fixes pendant un certain temps durant la journée.

Mots clés: Irradiation solaire, optimisation, panneaux photovoltaïques, pompage solaire, coût du système.

ملخص:

هذا العمل يهدف إلى تحسين أداء الحقل الكهروضوئي لنظام الضخ الشمسي المثبتة في منطقة أدرار من أجل تقليل تكلفته، وتحسين الطاقة الشمسية على مستوى سطح الألواح الكهروضوئية، و عليه سنقوم بدراسة طريقة التتبع الشمسي المتقطع.

الطريقة المثلى لزيادة الاستفادة من الإشعاع الشمسي على السطح المفتوح للألواح الكهروضوئية في نظام الضخ الشمسي هي استخدام آلية التتبع الشمسي. ينصح بهذا الحل من خلال آلية بسيطة واقتصادية. يتم الحصول على حل وسط باختيار التتبع الشمسي المتقطع. هذا الجهاز يضمن وضعيات ثابتة لفترة معينة خلال النهار.

الكلمات المفتاحية: الإشعاع الشمسي، تحسين، ألواح شمسية، ضخ شمسي، تكلفة النظام.