

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Civil et Hydraulique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم : الهندسة المدنية والري
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de
Doctorat en sciences en : Hydraulique
Spécialité : Hydraulique

THEME

Optimisation d'une installation de pompage hybride en vue de l'irrigation

Présentée par :

MEBREK Naima

Soutenue publiquement le 11/01/2021 devant le jury composé de :

Mr. MASMOUDI Ali	Professeur	Président	Université de Biskra
Mr. BOUZIANE Mohamed Tewfik	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Mm DEMNATI Fatma	Professeur	Co- Rapporteur	Université de Biskra
Mr. BOUBAKER Zoubir	Professeur	Examineur	ENSA ALGER
Mr. BOUNACEUR Farid	Professeur	Examineur	Centre Universitaire de Tissemsilt

Résumé

Les pays du Maghreb et en particulier l'Algérie ont un potentiel solaire élevé. Cette énergie renouvelable présente à l'heure actuelle une réponse aux problèmes environnementaux et aux émissions de gaz à effet de serre qui menacent la planète entière et une solution durable à la crise actuelle de l'énergie, avec la hausse du prix du baril de pétrole.

En Algérie, la consommation de l'énergie électrique dans le secteur agricole représente une part non négligeable par rapport à la consommation nationale. Les fermes agricoles dans les régions sahariennes utilisent le groupe diesel pour satisfaire les besoins en énergie électrique en cas d'absence de réseau. Par ailleurs, les ressources d'énergie provenant des gisements de combustible fossile sont épuisables, ce qui a conduit à la recherche d'autres moyens d'énergie renouvelable.

Les résultats obtenus pour l'étude de pompage entre deux cas : le premier, est le système de pompage (banc d'essai HM 310) alimenté par un réseau électrique, le deuxième cas, il est alimenté par un générateur photovoltaïque, ont montré que l'efficacité des deux systèmes est similaire.

Cela prouve que l'utilisation d'une source photovoltaïque pour l'irrigation est le meilleur compromis économique pour un développement agricole durable dans les régions arides isolées

Mots-clés: optimisation : pompage, système hybride, efficacité, photovoltaïque, irrigation.

Summary

The Maghreb countries and in particular Algeria have a high solar potential. This renewable energy currently presents an answer to environmental problems and greenhouse gas emissions that threaten the entire planet and a lasting solution to the current energy crisis, with the rise in the price of a barrel of oil.

In Algeria, the consumption of electrical energy in the agricultural sector represents a significant share compared to national consumption. The agricultural farms in the Saharan regions use the diesel group to meet the needs for electrical energy in the absence of a network. In addition, the energy resources from fossil fuel deposits are exhaustible, which has led to the search for other means of renewable energy.

The results obtained for the pumping study between two cases: the first, is the pumping system (banc d'essai HM 310) powered by an electrical network, the second case, it is powered by a photovoltaic generator, showed that the efficiency of the two systems is similar

This proves that the use of a photovoltaic source for irrigation is the best economic compromise for sustainable agricultural development in isolated arid regions.

Keywords: optimization, pumping, hybrid system, efficiency, photovoltaic, irrigation.

المخلص

تمتلك البلدان المغاربية وخاصة الجزائر طاقة شمسية عالية. تقدم هذه الطاقة المتجددة حاليًا إجابة للمشكلات البيئية وانبعثات غازات الدفيئة التي تهدد الكوكب بأكمله والحل الدائم لأزمة الطاقة الحالية، مع ارتفاع سعر برميل النفط.

في الجزائر، يمثل استهلاك الطاقة الكهربائية في القطاع الزراعي حصة كبيرة مقارنة بالاستهلاك الوطني. تستخدم المزارع الزراعية في المناطق الصحراوية مجموعة الديزل لتلبية احتياجات الطاقة الكهربائية في غياب شبكة. بالإضافة إلى ذلك، فإن موارد الطاقة من رواسب الوقود الأحفوري قابلة للاستنفاد، مما أدى إلى البحث عن وسائل أخرى للطاقة المتجددة.

النتائج التي تم الحصول عليها لدراسة الضخ بين حالتين: الأولى، هي نظام الضخ (banc d'essai HM 310) مدعوم من شبكة كهربائية، والحالة الثانية، يتم تشغيله بواسطة مولد فلتاني، أظهرت أن تشابهه كفاءة النظامين.

هذا يثبت أن استخدام مصدر الطاقة الضوئية للري هو أفضل حل وسط لتحقيق التنمية الزراعية المستدامة في المناطق القاحلة المعزولة.

الكلمات المفتاحية: التحسين، الضخ، النظام الهجين، الكفاءة، الطاقة الكهروضوئية، الري.

DÉDICACE

À MES TRÈS CHERS PARENTS, SOURCE INÉPUISABLE DE TENDRESSE, DE PATIENCE
ET DE SACRIFICE. QUOIQU'JE PUISSE DIRE ET ÉCRIRE, AUCUNE DÉDICACE NE
SAURAIT EXPRIMER MES RESPECTS, MA RECONNAISSANCE ET MON PROFOND
AMOUR. PUISSE DIEU VOUS PRÉSERVER ET VOUS PROCURER SANTÉ ET BONHEUR.

À MES SŒURS NACHIDA, SOUNYA, FARIDA, NAWEL
ET LEURS PETITES FAMILLES

À MES FRÈRES SMAIL, OMAR, MOURAD, SOUFIANE
ET LEURS PETITES FAMILLES

À MON MARIE MOHAMED KHEMISSI
ET MES TRÈS CHÈRES ENFANTS ABD EL HAKIM ET LYNA

À TOUTE MA FAMILLE ET TOUS MES AMIES

Remerciements

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre **Dieu** de nos avoir donné la force et le courage pour finalisé ce travail.

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mon directeur de thèse, **Monsieur BOUZIAN Mohamed Tewfik**, professeur à l'université de Biskra, pour toute son aide. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse

Je remercie également, **Madame DEMNATI Fatma**, 'MCA' à l'université de Biskra qui m'a Co-encadrée tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions, elle m'a aussi données de nombreux conseils pour bien rédiger cette thèse. J'espère qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie, **Monsieur MASMOUDI Ali**, professeur à l'université de Biskra, m'a fait l'honneur de s'intéresser à ce travail et d'en présider le jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je tiens à remercier **Monsieur BOUBAKER Zoubir** Professeur à l'ENSA Alger pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse

Je remercie également **Monsieur BOUNACEUR Farid** Professeur au Centre Universitaire de Tissemsilt pour l'honneur qu'il m'a fait d'être dans mon jury de thèse.

Je remercie tous les personnes de laboratoire des énergies renouvelables du département électronique de l'université de Biskra.

Je remercie également mes très chers parents, mes sœurs et mes frères, ma chère amie hakima et aussi à toutes mes chères amies (dalila, sabah, fifi, inesse, fatima, kaltoume et abla), qui m'ont soutenue et prié pour moi afin que cette thèse voit enfin la lumière.

Aussi, à tous mes collègues de travail au département des sciences agronomiques.

Il me sera très difficile de remercier tout le monde car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Mes remerciements vont à mon marie qui a tout fait pour m'aider.

Sommaire

Sommaire	I
Liste des tableaux.....	V
Liste des figures.....	VI
Nomenclature.....	IX
Introduction Générale	1
PREMIERE PARTIE: ETAT DE L'ART	
CHAPITRE 1 : Énergies renouvelables	4
I.1.Introduction.....	4
I.2. Source des énergies renouvelables.....	4
I.2.1. Source soleil.....	4
I.2.2. Source vent.....	6
I.2.3. Source hydraulique.....	7
I.2.4. Source géothermique.....	8
I.2.5. Source biomasse.....	8
I.3. Situation actuelle des énergies renouvelables dans le monde et en Algérie.....	9
I.3.1. Situation des énergies renouvelables dans le monde.....	9
I.3.2. Consommation énergétique dans le monde.....	11
I.3.3. Situation des énergies renouvelables en Algérie.....	12
I.3.4. Consommation et production de l'énergie en Algérie	14
I.3.5. Programme national de développement des énergies renouvelables.....	15
I.3.6. perspective des énergies renouvelables en Algérie.....	18
I.3.7. Situation des énergies renouvelables dans la wilaya de Biskra.....	18
I.4. Potentiels énergétiques en Algérie.....	20
I.4.1. Potentiel solaire de l'Algérie.....	21
I.4.2 Potentiel éolien de l'Algérie.....	22
I.4.3. Potentiel Géothermique de l'Algérie.....	24
I.4.4. Potentiel de l'Hydroélectricité de l'Algérie.....	25
I.4.5. Potentiel de la Biomasse de l'Algérie.....	26
I.5.Conclusion.....	27

CHAPITRE 2 : systemes de pompage hybride

II.1.Introduction.....	29
II.2. Généralités sur les systèmes hybrides.....	29
II.3. Dimensionnement d'un Système hybride.....	30
II.3.1. Système hybride photovoltaïque et éolien.....	31
II.3.2.Système hybride photovoltaïque et diesel.....	32
II.3.3. Système hybride éolien et diesel.....	33
II.4.Conclusion.....	34

CHAPITRE 3 : Utilisation des energies renouvelables dans l'agriculture

III.1.Introduction.....	35
III.2.Généralités des énergies renouvelables dans l'agriculture.....	35
III.3. Utilisation des énergies renouvelables dans l'agriculture dans le monde.....	36
III.4. Utilisation des énergies renouvelables dans l'agriculture en Algérie.....	36
III.4.1. Incidences socioéconomiques que peuvent apporter l'énergie renouvelable au sud d'Algérie.....	40
III.4.2.Composition du système solaire.....	41
III.4.3. Pompe applicable au système solaire.....	42
III.4.4. Test de la pompe solaire.....	42
III.5. Ressources en eaux en Algérie.....	43
III.6. Pompes et systèmes d'irrigation.....	45
III.6.1. Besoin en eau selon les sols.....	46
III.6.2. Critère de choix d'un système d'irrigation.....	47
III.6.3.Classification des systèmes d'irrigation.....	47
III.6.3.1. Irrigation gravitaire ou de surface.....	47
III.6. 3.2. Irrigation par aspersion.....	51
III.6. 3.3. Irrigation par goutte à goutte.....	54
III.6. 4. Système d'irrigation dans le monde, en Algérie et à Biskra.....	55
III.6. 4.1. Irrigation dans le monde.....	55
III.6. 4.2. Système d'irrigation dans l'Algérie.....	57
III.6. 4.3. Système d'irrigation dans la wilaya de Biskra.....	57
III.7. Pompage de l'eau dans les régions arides.....	58

III.7.1. Pompages manuel.....	59
III.7.2. Pompage d'eau par groupe électrogène au diesel.....	60
III.7.3. Pompage d'eau par le réseau.....	61
III.7.4. Pompage éolien.....	62
III.7.5. Pompage par énergie solaire photovoltaïque.....	64
III.8. Conclusion.....	65

DEUXIÈME PARTIE: APPLICATION

CHAPITRE 4: Méthodes d'optimisation

IV.1. Introduction.....	66
IV.2. Applications des systèmes à énergie renouvelable au pompage de l'eau.....	66
IV.2.1. Systèmes de pompage photovoltaïque autonome.....	66
IV.2.2. Pompage éolien autonome.....	69
IV.2.3 Pompage autonome hybride.....	69
IV.3. Système de pompage adopté.....	71
IV.4. Modélisation du système de pompage hybride globale.....	72
IV.4.1. Modélisation de l'irradiation Solaire.....	72
IV.4.2. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	80
IV.5. Conclusion.....	86

CHAPITRE 5 : Choix d'un système hybride

V.1. Introduction.....	87
V.2. Caractéristiques de la région d'étude.....	87
V.2.1. Situation géographique.....	87
V.2.3. Données climatiques.....	88
V.3. Définition du type du climat dans la région de Biskra.....	93
V.4. Besoins en eau des cultures.....	94
V.5. Simulation du générateur photovoltaïque.....	95
V.6. Caractéristique du panneau solaire utilisé.....	97
V.7. Étudier les caractéristiques (Courant-Tension et Puissance-Tension).....	98
V.8. Résultats et discussions.....	99

Sommaire

V.8.1. Influence de l'éclairement	99
V.8.2. Influence de la température	100
V.8.3. Comparaison entre les Résultats obtenus avec alimentation par réseau électrique (RE) et ceux de photovoltaïque PV.....	101
V.9. Conclusion.....	104
Conclusion Générale et perspectives	105
Références Bibliographiques	107
Annexes	

Liste des tableaux

Titre	Page
Tableau I.1 : Puissance photovoltaïque installée dans le grand Sud.	13
Tableau I.2 : Projet de puissance en 2008 dans le grand Sud	13
Tableaux 1.3 : La répartition de la puissance installée par application	21
Tableaux 1.4 : Potentiel solaire en Algérie	21
Tableau I.5 : Potentiel hydroélectrique Algérien.	25
Tableau I.6 : Configuration de la palmeraie algérienne entre 1983 et 2003.	26
Tableau I.7 : Estimation quantitative des sous-produits du palmier dattier par rapport à l'année 2005.	27
Tableau III.1: Potentiel solaire en Algérie.	37
Tableau III.2 : Production de l'électricité par type centrales.	39
Tableau III.3 : Capacité de rétention en eau pour différentes textures de sol selon leur contenu en matière organique.	46
Tableau III.4 : Superficies irriguées dans le monde.	56
Tableau III.5 : Modes d'irrigation par région en Algérie	57
Tableau III.6: Répartition de la superficie irriguée par nature de ressource en eau	58
Tableau III.7: Répartition de la superficie irriguée par nature de ressource en eau	58
Tableau IV.1 : Caractéristiques du module PV	97

Liste des figures

Titre	Page
Figure I.1 : Options viables de systèmes de pompage à énergie solaire (Fraenkel, 1994).	6
Figure I.2: Développement de la taille des aérogénérateurs les 20 dernières années (Zejli et Benchrifa, 2010).	7
Figure I.3 : Part de la production d'électricité renouvelable dans les pays de l'UE en 2002 et objectifs 2010 [Multon et <i>al.</i> ,2004).	11
Figure I.4: Évolution de la puissance moyenne des activités énergétiques humaines (Multon et <i>al.</i> , 2004).	12
Figure I.5 : Label énergétique européen (Kharchi, 2013).	14
Figure I.6: Pénétration des ER dans la production nationale en TWh (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2017).	17
Figure I.7 : Structure du parc de la production nationale en MW (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2019).	17
Figure I.8 : Rayonnement solaire de tous les mois (15 du mois) (Chabane et <i>al.</i> , 2013).	19
Figure I.9: Carte potentiel éolien de Biskra (Chabane et <i>al.</i> , 2013).	20
Figure I.10 : Le pompage d'eau pour l'irrigation des palmiers dattiers par l'énergie solaire dans la wilaya de Biskra (photo originale).	20
Figure I.11 : Carte de Potentiel solaire national (Ministère d'énergie et des mines, 2017).	22
Figure I.12: Carte de Potentiel éolien national (Ministère d'énergie et des mines, 2017).	23
Figure I.13 : Carte des températures des eaux de la nappe du Continental Intercalaire (Ouali, 2015).	25
Figure III.1 : Répartition de la consommation du secteur de l'agriculture par activité (Ministère d'énergie et des mines, 2017).	38
Figure III.2 : Répartition de la consommation du secteur de l'agriculture par type d'énergie (Ministère d'énergie et des mines, 2017).	38
Figure III.3 : Production totale en énergie électrique (Ministère d'énergie et des mines, 2017).	39
Figure III.4 : Schéma représente le pompage solaire pour l'irrigation (Himri, 2009)	41
Figure III.5 : Composition de système solaire.	42
Figure III.6 : Courbe de rendement de la pompe solaire (Exemple déréférence) (JICA, 2014).	43
Figure III.7 : Électrification au solaire photovoltaïque.	43
Figure III.8 : Différentes méthodes d'irrigation pratiquées (Battude, 2017).	47
Figure III.9 : Irrigation gravitaire par plusieurs lignes (photo originale).	48
Figure III.10 : Irrigation gravitaire par une seule ligne (photo originale).	48
Figure III.11 : Irrigation par planche (photo originale).	49
Figure III.12 : Irrigation par sillons (photo originale).	50

Figure III.13 : Irrigation par aspersion.	51
Figure III.14: Enrouleurs utilisation et entretien du système de pompage.	52
Figure III.15 : Pivot (rampes pivotante) (photo originale).	53
Figure III.16 : Pivot (rampes frontales) (photo originale).	53
Figure III.17: Irrigation par goutte à goutte (localisée) (Mathieu et <i>al.</i> , 2007).	55
Figure III.18 : Pompe à main alternatif (Fraenkel, 1994).	60
Figure III.19 : pompe à main semi-rotative (Fraenkel, 1994).	60
Figure III.20 : Moteur diesel à entraînement par courroie, accouplé à une pompe centrifuge (Fraenkel, 1994).	61
Figure III.21 : Le rendement des différentes éoliennes.	64
Figure III.22 : Exemples d'installations de pompes solaires (Frenkel, 1994).	65
Figure IV.1 : Système de pompage au fils du soleil (Fraenkel, 1994).	67
Figure IV.2 : System de pompage photovoltaïque autonome avec batterie (Fraenkel, 1994).	68
Figure IV.3 : System de pompage éolien autonome (Fraenkel, 1994).	69
Figure IV.4 : System de pompage hybride photovoltaïque /diesel (Hamdani, 2011).	71
Figure IV.5 : Mouvement de la terre autour du soleil (Hamdani, 2011).	72
Figure IV.6 : Repère équatorial (Hamdani, 2011).	73
Figure IV.7 : Repère horizontal (Hamdani, 2011).	74
Figure IV.8 : Éclairement direct, diffus et globale sur un plan incliné.	80
Figure IV.9 : Schéma équivalent d'une cellule solaire (Boukhers ,2016).	81
Figure IV.10 : Schéma équivalent à une diode sans résistance shunt (Boukhers ,2016).	82
Figure IV.11 : Schéma équivalent à deux diodes (Helali, 2013).	83
Figure IV.12 : Schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt (Helali, 2013).	84
Figure IV.13 : Influence de l'ensoleillement sur les courbes I-V et P-V (module Isofoton110w).	85
Figure IV.14 : Influence de la température sur les courbes I-V et P-V (module Isofoton110w).	85
Figure V.1: limites géographique de la wilaya de Biskra (Boukria, 2010).	88
Figure V.2: Températures moyennes annuelle de la période (1998-2018).	89
Figure V.3: Précipitations moyennes annuelle (mm) durant la période (1998-2018) (Source : Aéroport, Station Biskra .02-04-2019).	90
Figure V.4 : vitesses moyennes annuelle des vents (m/s) dans la région de Biskra enregistrées durant la période (1998– 2018).	91
Figure V.5 : Courbes de l'humidité relative moyenne annuelle (%) de la région. de Biskra enregistrées durant la période (1998-2018) (Source : Aéroport, Station Biskra .02-04-2019).	92
Figure V.6 : Insolation moyenne annuelle durant la période (1998-2018). (Source : Aéroport , Station Biskra .029-04-2019).	92

Figure V.7: le point de projection de la wilaya de Biskra dans le climagramme D'Emberger (1998-2018).	94
Figure V.8 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque.	95
Figure V.9: Banc d'essai HM 310.	96
Figure V.10: Système de pompage pour les deux cas d'alimentation.	96
Figure V.11: Schéma de 4 modules (Mebrek, 2016).	97
Figure V.12 : Relation entre courant -tension d'un module photovoltaïque.	98
Figure V.13 : Relation entre la puissance et la tension d'un module photovoltaïque.	98
Figure V.14 : Influence des différents éclairagements sur la tension.	99
Figure V.15 : Influence simultanée de l'éclairément sur la puissance.	100
Figure V.16: Influence simultanée des différentes températures sur le courant.	100
Figure IV.17: Influence simultanée des différentes températures sur la puissance.	101
Figure V.18: Caractéristique hauteur-débit d'un banc d'essai alimenté par RE.	102
Figure V.19: Caractéristique hauteur-débit d'un banc d'essai alimenté par PV.	102
Figure V.20 : Caractéristique rendement-débit d'un banc d'essai alimenté par RE.	102
Figure V.21 : Caractéristique rendement -débit d'un banc d'essai alimenté par PV.	102

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
CA	Courant Alternatif	-
CC	Courant Conticu	-
PV	Photovoltaïque	-
SER	Source d'énergie renouvelable	-
SEH	Système d'Énergie Hybride	-
C	Constante des pertes de charge	-
Cr	Couple résistant	(N.M)
Cs	Couple statique	(N.M)
D	Diamètre de la pompe	(m)
D	Éclairement diffus	(W/m ²)
d	Diamètre de la canalisation	(mm)
δ	Déclinaison solaire	(°)
ΔH	Perte de charge	(m)
ΔHc	Perte de charge de la canalisation	(m)
E	Éclairement standard	(W/m ²)
ζ	Coefficient des pertes de charge singulières	-
f	Fréquence des courants alternatifs	(Hz)
g	Gravité	(m ² /s)
G	Éclairement global	(w/m ²)
Ω _d	Vitesse de rotation	(tr/min)
γ	Poids volumique	(kg/m.s)
H	HMT nominale	(m)
H	Angle horaire du soleil	(°)
h ₀	Altitude du soleil	(°)
Hg	Hauteur géométrique	(m)
Hp	Hauteur de pompage	(m)
Hth	Hauteur théorique	(m)

Sommaire

i	Angle d'incidence	($^{\circ}$)
I	Courant fourni par le GPV	(A)
I_{ph}	Photo courant créer par la cellule	(A)
I_0	Courant de diode	(A)
I_{sc}	Courant de court-circuit	(A)
I_{cell}	Courant de lacellule PV	(A)
I_{bat}	Courant de la batterie	(A)
K^J	Constante global (caractéristique de la machine)	-
M	couple de torsion	(N.m)
l	Longueur de la canalisation	(m)
λ	Coefficient des pertes de charge	-
m	Masse	(kg)
m_A	Masse atmosphérique	(kg)
N	Vitesse de la pompe	(tr/min)
η	Rendement (%)	(%)
P	Pression	(N/m²)
P	Puissance	(W)
$P(v)$	Puissance fournie par le générateur	(W)
P_a	Puissance absorbée	(kw)
P_u	Puissance utile	(kw)
P_{max}	Puissance maximale	(W)
Q	Debit nominale	(m³/s)
R_s	Résistance série	(ohm)
R_{sh}	Résistance Shunt	(ohm)
T	Température de la cellule	(K)
T	Température standard = 25° C	

Introduction

générale

Introduction Générale

Il est à ce jour évident que l'eau et l'énergie sont des ressources capitales pour l'amélioration des conditions et les approvisionnements énergétiques durables sont essentiels pour réduire la pauvreté, assurer le développement viable, protéger l'environnement et améliorer les conditions de vie (Maldague, 2001).

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées 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. Actuellement, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution (Al anfaf, 2016). Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures (Cid Pastor, 2006).

Depuis la fin du XX^e siècle, le monde est confronté à des enjeux énergétiques et climatiques sans précédent pour lesquels de fortes alternatives sont attendues. Relever ces défis devra passer par une période de transition où le recours aux énergies renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique, et la modération de la consommation dans les comportements seront les principaux vecteurs du changement (Abbes, 2012).

Une grande partie de l'énergie utilisée aujourd'hui dans le monde (plus de 80 %) provient de gisements de combustibles fossiles. Ces gisements constitués au fil des âges sont épuisables. Ainsi, d'après les chiffres de l'industrie BP (Global, 2014), les réserves mondiales seront épuisées vers 2084. L'épuisement de ces ressources associée au réchauffement climatique qu'occasionne leur exploitation, doivent nous amener à envisager le développement des énergies renouvelables (Semassou et *al.*, 2013).

Compte tenu des enjeux énergétiques actuels tels que l'épuisement inévitable des ressources fossiles de la planète, leurs effets environnementaux négatifs...etc., d'autres énergies que l'on qualifie de renouvelables, durables, propres et vertes telles que le solaire photovoltaïque, éolien, hydraulique, géothermie, biocarburant...etc. sont actuellement développées (Al anfaf, 2016 ; Himri et *al.*, 2009).

Bien que l'électricité semble être une source d'énergie renouvelable évidente pour le pompage d'eau, on constate le développement d'autres formes d'énergies renouvelables (solaire photovoltaïque, éolien, biocarburant...) car une grande partie de population vit éloignée d'un réseau électrique.

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau (Bakelli et *al.*, 2011). Ces problèmes sont spécialement accentués dans les zones désertiques et semi-désertiques (Kebour et *al.*, 2017). Le déficit en eau dans les zones arides et semi-arides est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage hybride représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent ((Zeitouny et *al.*, 2018).

L'Algérie a une superficie de 2.381.740 km², dotée de potentialités naturelles importantes (des terres fertiles et riches en eau, nappes fossiles non renouvelables) faiblement exploitées, elle dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde (Djafouret et Aida, 2009, Maafi, 2000)). La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m²/an au Nord et 2263 KWh/m²/an au Sud du pays (Bouzidi, 2010).

Les besoins du secteur agricole en énergie ne cessent d'augmenter en fonction de l'accroissement de la population et des surfaces des terres cultivables. L'approvisionnement en énergie des exploitations agricoles reste problématique à cause de l'éloignement, des coûts élevés, des produits énergétiques et de la connexion au réseau électrique. Les énergies renouvelables peuvent contribuer à la résolution de ce problème et ce par les nombreuses solutions et possibilités qu'elles offrent (Bouzidi, 2020).

A la faveur du programme de développement des énergies renouvelables 2011-2030 adopté par le Gouvernement en février 2011, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie. La tendance est de consommer au niveau local, l'énergie produite. Dans un tel contexte, afin de diminuer le pourcentage d'utilisation des énergies traditionnelles à la consommation globale, il convient

de lever les difficultés liées à l'emploi des énergies propres (Zeitouny et *al.*, 2018). L'une de ces difficultés est l'optimisation de la combinaison de plusieurs énergies (comme par exemple le soleil, le vent, ...etc.) et l'utilisation des dispositifs de stockage pour pallier au caractère intermittent de ces énergies. On peut réinjecter l'énergie provenant des sources renouvelables directement sur le réseau électrique, en prévoyant, soit un dispositif de stockage (des batteries par exemple), soit un système de gestion intelligente afin de mettre en adéquation la production avec l'usage de l'énergie (Bentouba et Bourouis, 2016).

Les modèles énergétiques prospectifs suscitent de plus en plus d'intérêt. Ils constituent une aide précieuse d'aide à la décision concernant les réglementations énergétiques. Il faut noter que ces modèles ne font pas de prédictions mais permettent notamment d'évaluer sur le long terme plusieurs scénarios possibles d'évolution du système énergétique, d'anticiper les évolutions et les impacts des prix de l'énergie à moyen et long terme et d'estimer les émissions de polluants (Ammar, 2017).

C'est dans ce contexte que se situe la problématique de cette thèse : l'optimiser d'un système multi-sources (hybride) pour satisfaire les besoins en eau pour l'irrigation.

Nous nous sommes intéressés à la modélisation énergétique d'une installation de pompage hybride en vue de l'irrigation. Nos travaux dans cette thèse ont porté sur :

- l'étude de pompage entre deux cas : le premier, est le système de pompage (banc d'essai HM 310) alimenté par un réseau électrique le deuxième cas, il est alimenté par un générateur photovoltaïque
- l'établissement du système hybride adéquat au pompage.

Le présent travail est divisé en deux parties: la première partie consiste à l'étude de l'état de l'art comprends dans son premier chapitre un aperçu général sur les énergies renouvelables dans le monde et particulièrement en Algérie. Le deuxième chapitre porte sur une étude des systèmes de pompage hybride, cependant le troisième chapitre est consacré à l'utilisation des énergies renouvelables dans le secteur agricole.

La seconde partie application comprend deux chapitres, d'où le premier englobe les méthodes d'optimisation et le second explique le choix d'un système hybride dans la région de Biskra, et nous terminons par une conclusion générale et quelques perspectives pour des travaux futurs dans ce domaine.

Première partie:
État de l'art

Chapitre I :

Énergies renouvelables

I.1. Introduction

La production d'énergie électrique utilise principalement des combustibles fossiles (nucléaire). La production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO₂ (Alonso, 2003).

L'énergie représente une seule et même grandeur physique avec des caractéristiques très diverses. Aussi le choix d'une forme d'énergie renouvelable dépendra du but poursuivi (production d'électricité, de chaleur, de carburant,...etc.) et des différentes ressources d'un site (Duffie, 2011).

Les énergies renouvelables (E.R.) sont des sources d'énergie non polluantes qui limitent le gaz à effet de serre avec peu ou pas de déchets (aussi bien dans l'environnement immédiat que sur le reste de la planète), sans Nuisances sonores (sauf pour les éoliennes, bruit des pales), et de très faibles nuisances visuelles (Franco,2012).

Ces deux dernières décennies, les ER étaient surtout utilisés pour alimenter des sites isolés (montagne ou zone désertique) ou dans des pays où la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables était subventionnée (Berrah, 2013).

I.2. Sources des énergies renouvelables

I.2.1. Source soleil

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie solaire que l'en consomme l'humanité en une année (Celik, 2003).

Les recherches d'après la guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille, mais il faudra attendre la crise énergétique des années soixante-dix pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres. Le rendement des cellules solaires diminue quand leur température augmente (Bouzidi, 2010).

Pour que l'homme utilise la source d'énergie renouvelable, ils vont intervenir plusieurs mécanismes de transformation suivant le principe de la chaîne énergétique (voir Figure I.1) :

- Le captage, dispositif qui permet à récupérer l'énergie de la source sous une forme exploitable.
- La transformation permet de produire le type d'énergie attendue (électricité, chaleur,...). Cette étape n'est pas réalisée dans le cas d'une utilisation directe de l'énergie captée (pompes à chaleur, moulins à vent mécaniques).
- Le transport qui achemine l'énergie de la source à l'usage, le dispositif de production n'étant pas toujours situé à proximité.
- Le stockage qui permet de compenser les fluctuations de la production, car l'énergie produite n'est pas disponible à la demande ; l'objectif visé est toujours de répondre à la demande des usagers (Fraenkel, 1994). Les modules photovoltaïques convertissent directement l'énergie solaire en électricité. Les applications sont multiples : radio, téléphone, télévision, éclairage, pompe, irrigation, force motrice et couvre une vaste gamme de puissance allant de quelques watts à plusieurs mégawatts (Zeraïa, 2004).

Pour le pompage de l'eau, il y a deux techniques principales de transformation de l'énergie solaire en énergie motrice pour la mise en marche des pompes. La première technique est celle utilisée dans les systèmes solaires thermodynamiques, elle consiste à utiliser le rayonnement du soleil pour la mise en marche d'un moteur (machine à vapeur ou moteur à cycle Stirling). Tandis que la deuxième est celle adoptée dans les systèmes solaires photovoltaïques qui consiste à utiliser les cellules photoélectriques pour transformer directement le rayonnement solaire en électricité nécessaire pour l'alimentation des pompes. Le cycle le plus performant pour la transformation de l'énergie solaire pour le pompage de l'eau est indiqué sur le diagramme de la Figure I.1 (Fraenkel, 1994).

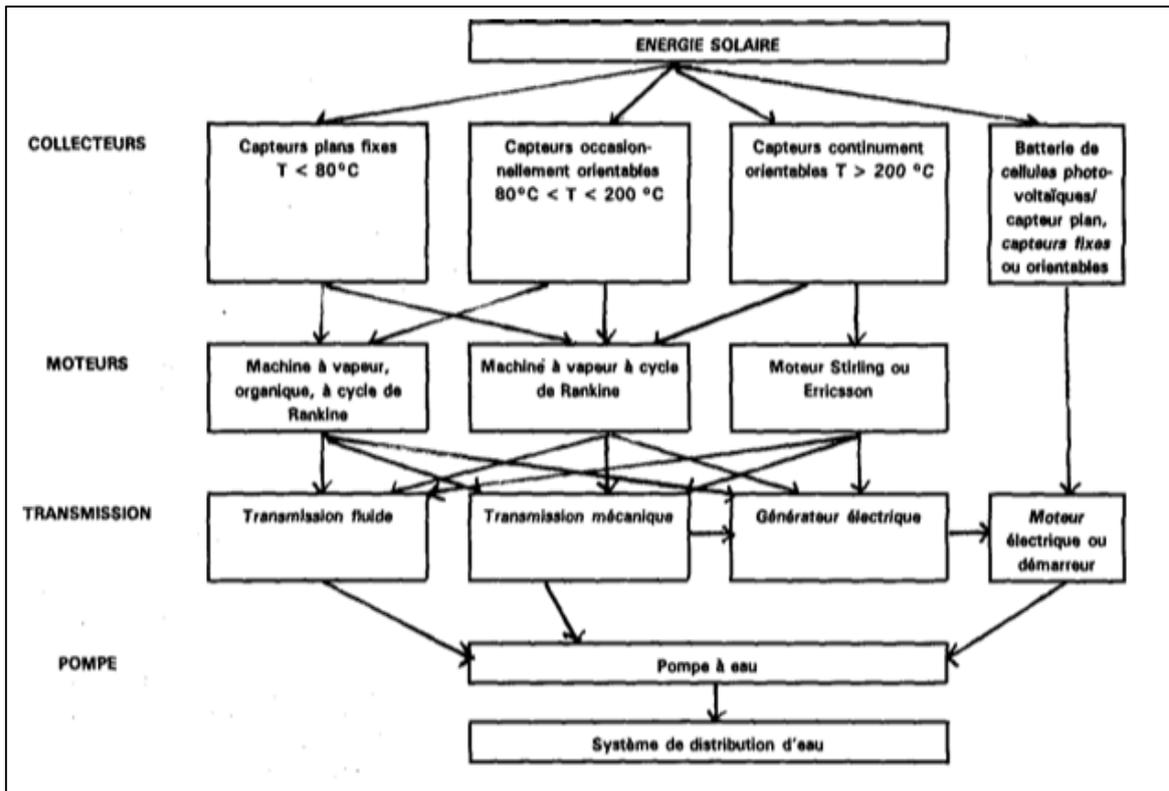


Figure I.1 : Options viables de systèmes de pompage à énergie solaire (Fraenkel, 1994).

1.2.2. Source vent

L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de stockage ou de production de remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité. La production électrique éolienne peut être prévue avec une assez bonne précision. Sa part dans la production mondiale d'électricité atteignait 4,4 % en 2017 et était estimée à 4,7 % en 2018. Les principaux pays producteurs sont la Chine (31 % du total mondial en 2018), les États-Unis (23 %) et l'Allemagne (9 %).

Depuis plus de vingt ans, nous avons assisté à une diminution progressive des coûts et un accroissement de la fiabilité mécanique des aérogénérateurs. La Figure I.2 montre la puissance unitaire des aérogénérateurs utilisés dans les parcs éoliens et ayant été de 10 kW en moyenne en 1977-78 a atteint 50 kW en 1984-85, puis 1,5 MW pour certaines éoliennes en 1996-97. Actuellement, cette puissance dépasse les 4 MW (Zejli et Benchrifa, 2010).

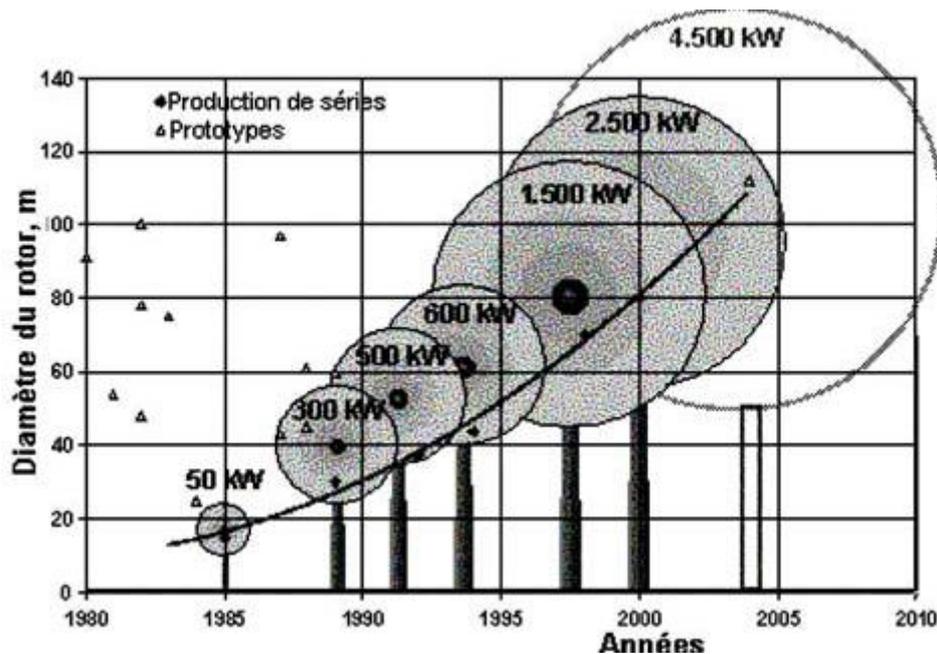


Figure I.2: Développement de la taille des aérogénérateurs les 20 dernières années (Zejli et Benchrifa, 2010).

L'électricité produite par l'énergie éolienne ces dernières années s'est considérablement développée de manière très remarquable, la capacité mondiale a atteint 159 213 MW, dont 38 312 MW ajoutés en 2009 avec un taux de croissance de 31,7%. L'ensemble des éoliennes installées à la fin de 2009 dans le Monde produit 340 TW.h par an. L'équivalent de la demande totale en électricité de l'Italie, septième plus importante économie mondiale, est égal à 2% de la consommation électrique mondiale (Ammar, 2017).

I.2.3. Source hydraulique

Le principe consiste à utiliser l'énergie mécanique de l'eau pour faire tourner une turbine et un alternateur pour produire de l'électricité. Cette forme d'énergie est essentiellement produite en contrebas des barrages hydrauliques et parfois en travers des cours d'eau et canaux artificiels à l'aide de microcentrales. La puissance produite dépend de la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau. Il existe aussi de par le monde d'autres procédés de génération électrique à travers l'exploitation de l'eau comme l'utilisation des mouvements des vagues marines et des marées, ou des courants sous-marins (Multon et *al.*, 2004).

I.2.4. Source géothermique

La géothermie s'intéresse à l'exploitation des sources d'eau chaude en profondeur. Elle constitue l'une des principales ressources d'énergie renouvelable dans le monde. Il existe à travers le monde deux types principaux de géothermie: la géothermie haute énergie, (températures supérieures à 150 °C) et la géothermie basse énergie (température comprise entre 30 °C et 150 °C) (Ouali et *al.*, 2006).

C'est une énergie très propre et peu coûteuse mais très localisée dans de rares régions où il existe des anomalies géothermiques (Ouali, 2015).

I.2.5. Source biomasse

Le principe consiste à transformer des matières ou déchets renouvelables d'origine végétale ou organique en énergie en les brûlant, en les laissant pourrir (fermentation), ou en les transformant chimiquement (Smil, 1991).

L'incinération en tant que combustible du bois, des déchets agricoles, domestiques, ou industriels, est largement utilisée à travers tous les pays, pour produire de la chaleur essentiellement dans la mesure où une tonne de déchets organiques secs équivaut à une tonne de charbon.

Par contre la transformation chimique de certains déchets par putréfaction sert à produire du biogaz composé essentiellement de méthane (Bousdira, 2010).

La biomasse n'est considérée comme une source d'énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. Ainsi, par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres.

La biomasse couvre près de 10% des besoins mondiaux en énergie. Deux tiers de la consommation mondiale d'énergie issue de la biomasse sont consacrés à la cuisine et au chauffage dans les pays en voie de développement (Bousdira, 2010).

I.3. Situation actuelle des énergies renouvelables dans le monde et en Algérie

I.3.1. Situation des énergies renouvelables dans le monde

L'énergie n'est pas en soi un objectif de développement. Elle doit être regardée comme un moyen d'y parvenir. L'accroissement de la consommation énergétique est nécessaire à la fois, pour accroître les activités productives ; et pour répondre à un grand nombre de besoins domestiques, tant il est vrai que l'on a besoin d'énergie dans tous les domaines de la vie. À cet égard, l'énergie intervient pour beaucoup dans l'amélioration des conditions de vie (Maldague, 2001).

La conversion de la lumière en électricité, appelée *effet photovoltaïque*, est découverte par Edmond Becquerel en 1839, mais il faut attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène physique.

En 1875, Werner von Siemens expose devant l'Académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

En 1913, William Coblentz dépose le premier brevet pour une cellule solaire, qui ne pourra jamais fonctionner.

En 1916, Robert Millikan est le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire, mais pendant les quarante années suivantes, personne ne fera beaucoup de progrès en énergie solaire car les cellules photovoltaïques ont un trop mauvais rendement pour transformer la lumière du soleil en énergie. Le phénomène reste encore une découverte anecdotique.

Pendant l'année 1954, trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque à « haut rendement » (9 %) et les laboratoires 'Bell' construisent le premier panneau solaire mais il était trop coûteux pour être produit en série. C'est la conquête spatiale qui fera réellement progresser l'énergie solaire ; le panneau solaire est le seul moyen non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie, de plus l'énergie solaire est une source d'énergie constante pour les satellites en orbite.

En effet, c'est en 1958 qu'a lieu le premier lancement d'un satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque. L'industrie spatiale investira beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaires. C'est la première utilisation importante de la technologie solaire photovoltaïque

En novembre 2015, l'Alliance solaire internationale (ou ISA, pour International solaralliance) est créée. Le projet est porté par Narendra Modi, alors Premier Ministre de l'Inde.

En 2017, au niveau mondial, la production d'électricité solaire photovoltaïque atteignait 443,6 TWh, soit 1,7 % de la production mondiale d'électricité ; en 2018, elle est estimée à 585 TWh ; l'Agence internationale de l'énergie estime qu'avec les installations existantes fin 2018, cette part est passée à 2,6 %, et prévoit qu'elle pourrait atteindre 16 % en 2050. En 2018, quatre pays concentrent plus des deux tiers de la puissance installée photovoltaïque : la Chine (35 %), les États-Unis (12 %), le Japon (11 %) et l'Allemagne (9 %).

Il faudrait l'équivalent de la production d'une surface photovoltaïque de 100.000km² (soit la superficie de l'Islande) pour couvrir la totalité des besoins mondiaux en électricité. %) (Ghzaïel et Jeday; 2007).

Plusieurs recherches ont traité l'utilisation des énergies renouvelables (E.R.) tels que le pompage d'eau d'irrigation par l'énergie solaire (Helikson et *al.*, 1991), dimensionnement et optimisation technico économique d'un système d'énergie hybride avec système de stockage (batteries) (El Khadimi et *al.*, 2004), l'étude de la variation du coût de revient d'eau pompée par le système photovoltaïque (au fil du soleil) (Ghzaïel et Jeday, 2007) et potentiel du développement d'énergie solaire pour l'eau pompée en Jordanie (Anagreh et *al.*, 2009).

La Figure I.3 montre le taux de production d'électricité renouvelable des pays de l'UE en 2002 et leurs engagements pour 2010.

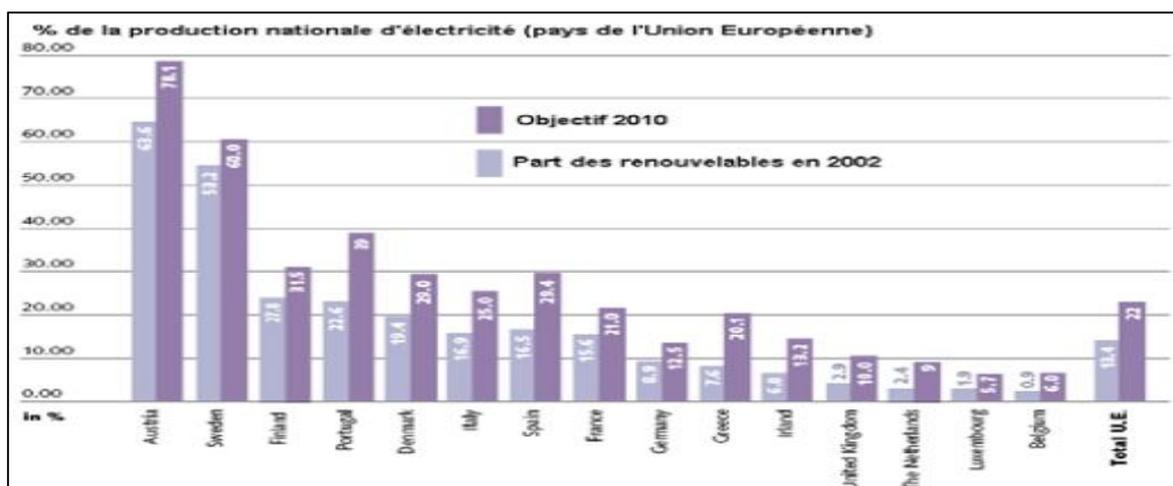


Figure I.3 : Part de la production d'électricité renouvelable dans les pays de l'UE en 2002 et objectifs 2010 (Multon *et al.*, 2004).

I.3.2. Consommation énergétique dans le monde

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Les recherches après-guerre ont permis d'améliorer la performance de photovoltaïque et leur taille, mais il faudra attendre la crise énergétique des années soixante-dix pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie et ses applications terrestres. Notons que le processus de conversion est indépendant de la chaleur, au contraire, le rendement des cellules solaires diminue quand leur température augmente (Bouzidi, 2011).

La Figure I.4 permet de prendre conscience du niveau d'activité énergétique de l'humanité et surtout de son décollage à l'ère industrielle (la puissance moyenne est effectuée en divisant la quantité d'énergie manipulée annuellement par la durée d'un an). Elle atteint aujourd'hui 1/8000^{ème} de la puissance moyenne solaire qui entre dans l'atmosphère et qui nous est accessible. En imaginant que les 10 milliards d'êtres humains qui pourraient vivre prochainement sur la terre consomment autant d'énergie que chaque Américain aujourd'hui,

l'humanité « manipulerait » l'équivalent de $1/1000^{\text{ème}}$ de l'énergie solaire interceptée par la terre (Multon et al., 2004).

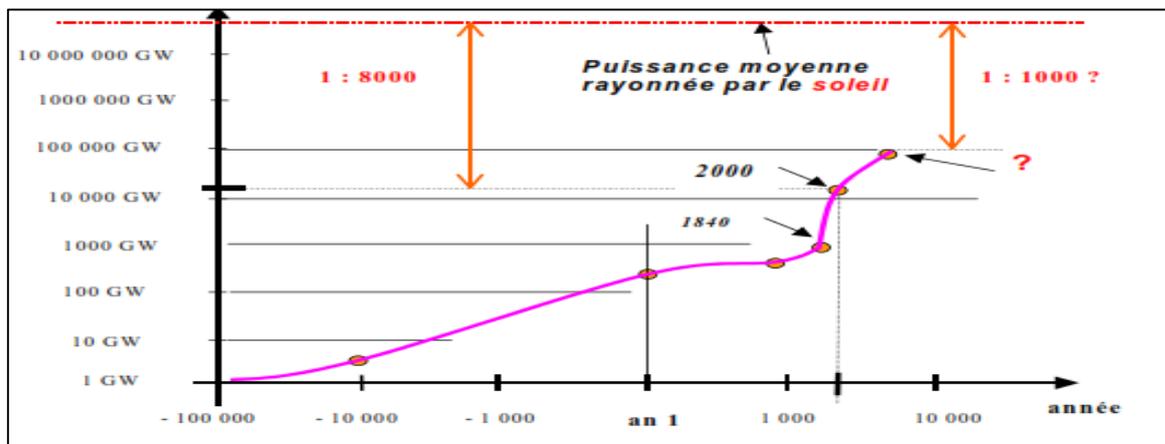


Figure I.4: Évolution de la puissance moyenne des activités énergétiques humaines (Multon et al., 2004).

L'Espagne possède depuis 2009 la plus puissante centrale solaire thermodynamique d'Europe Andasol d'une puissance de 150MW. Quelque 400 000 miroirs, soit une superficie de 1,5 million de mètres carrés, recueillent l'énergie du Soleil et approvisionne en électricité 45 000 foyers.

En 2017, la part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale d'énergie était estimée à 18,1 %, dont 7,5 % de biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, etc.) et 10,6 % d'énergies renouvelables « modernes » : 4,2 % de chaleur produite par les énergies renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire), 3,6 % d'hydroélectricité, 2 % pour les autres énergies renouvelables électriques (éolien, solaire, géothermie, biomasse, biogaz) et 1 % pour les biocarburants (Arthouros et Rana, 2019).

I.3.3. Situation des énergies renouvelables en Algérie

Le secteur économique de l'énergie en Algérie occupe une place prédominante dans l'économie de l'Algérie, les hydrocarbures à eux seuls représentent 60 % des recettes du budget et 98 % des recettes d'exportation.

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un

programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011 et révisée en mai 2015.

La production et la consommation d'énergie, y compris dans le secteur de l'électricité, sont tirées des hydrocarbures à plus de 99 %.

Cependant, l'État Algérien commence à envisager des solutions écologiques en investissant dans les énergies renouvelables. Selon le Programme Algérien de Développement des énergies Renouvelables et d'Efficacité Énergétique (PENREE) de 2012, l'Algérie vise une puissance installée d'origine renouvelable de 22.000 MW d'ici l'an 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique si les conditions du marché le permettent. Mais trois ans après ce plan, les réalisations se font attendre : le rapport annuel du « Global Wind Energy Council » sur l'éolien ne mentionne même pas l'Algérie, et celui de l'Agence internationale de l'énergie sur le solaire annonce seulement que l'Algérie a installé 300 MW.

Dans notre pays, les premières expériences sont apparues avec le programme d'électrification rurale solaire qui a concerné 20 villages répartis dans les 04 wilayas du Sud : Tamanrasset, Tindouf, Illizi et Adrar. Le Tableau I.1 indique la puissance installée pour chaque wilaya (Hadj Arab et *al.*, 2005).

Tableau I.1: Puissance photovoltaïque installée dans le grand Sud.

Wilaya	Puissance (kW)
Tamanrasset	149703
Illizi	23813
Tindouf	85882
Adrar	25145
Total	284543

(Source : Hadj Arab et *al.* , 2005).

Des fermes éoliennes sont en projet à Tindouf, Timimoun, Adrar pour 100 MW au total (Tableau I.2) Afin de réaliser cet objectif, des mesures et dispositifs d'encouragement d'investissement ont été élaborés (Bentouba et *al.*, 2007).

Tableau I.2: Projet de puissance en 2008 dans le grand Sud.

Wilaya	Projet de puissance 2008 MW	Type : Solaire / Éolien
Hassi R'Mel	150	Solaire
Timimoun	10	Éolien
Tindouf	10	Éolien
Béchar	30	Éolien
Autres wilaya	50	Éolien

(Source : Bentouba et al., 2007).

I.3.4. Consommation et production de l'énergie en Algérie

Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, le marché local doit atteindre 500MW cette année 2010, amenant la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables à 5% de l'électricité totale produite (Brauntein, 2010).

L'analyse de la consommation finale du secteur de l'industrie montre que la consommation des combustibles est plus importante, soit 83% du bilan global de l'industrie ; l'usage des procédés de fabrication (fours, séchoirs, chaufferies) est prédominant. L'électricité vient en deuxième position, elle représente que 15% des consommations d'où la force motrice est l'usage dominant. Une croissance modeste pour l'industrie moins de 4%/an et une baisse sensible dans les matières premières du Textiles et Papiers, caractérisant une contre-performance la plus marquée en 2010 avec un TUC de 50%. Par ailleurs, des baisses significatives en énergie respectifs de -1%/an et -4%/an entre la période 2000-2015 (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2017).

Le certificat énergétique est un document officiel portant sur la performance énergétique d'un bâtiment (délivré en Europe mais pas encore en Algérie). Il est exprimé sous forme d'une quantité de kWh par m² par an (la consommation du bâtiment est exprimée en kilowatt-heure par mètre carré par an). Ce chiffre est complété d'un label, afin de visualiser facilement cette performance. En moyenne, l'habitat en Algérie se situe à la D voir (Figure I.5), en consommant plus que 151 kWh/an pour le chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire et éclairage (Kharchi, 2013).



Figure I.5 : Label énergétique européen (Kharchi, 2013).

I.3.5. Programme national de développement des énergies renouvelables

Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22.000MW entre 2011 et 2030 dont 12.000MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10000MW à l'exportation. L'exportation de l'électricité est toutefois conditionnée par l'existence d'une garantie d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financements extérieurs (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2017).

D'après le Ministère de l'Énergie et des Mines (2017), il y a deux types de Projets qui sont :

- Les Projets du Programme Nationale de l'Efficacité Énergétique (PNEE) ;
- Les Projets du Programme Nationale des Énergies Renouvelables (PNER).

Consciente de l'intérêt grandissant des énergies renouvelables et de leurs enjeux, l'Algérie a intégré leur développement dans sa politique énergétique par l'adoption d'un cadre juridique favorable à leur promotion et à la réalisation d'infrastructures y afférentes.

Le développement des énergies renouvelables est encadré par un ensemble de textes législatifs :

- ❖ La loi n°99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie;

- ❖ La loi n°02-01 du 5 février 2002, relative à l'électricité et la distribution publique du gaz par canalisations;
- ❖ La loi n° 04-09 du 14 août 2004, relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.
- ❖ Loi n° 09-09 du 30 décembre 2009 portant la loi de finances pour 2010, notamment son article 64 portant création du fond national pour les énergies renouvelables et la cogénération (FNER);
- ❖ Loi n° 11-11 du 18 juillet 2011 portant la loi de finances complémentaire pour l'année 2011, notamment son article 40 modifiant l'article 63 de la loi n° 09-09 ;
- ❖ Loi n° 14-10 du 30 décembre 2014 portant loi de finances pour 2015, notamment son article 108 qui prévoit la fusion des deux Fonds spéciaux « Le Fonds Rational pour la Maîtrise de l'Énergie (FNME) et le Fonds national pour les Énergies Renouvelables et la cogénération (FNER) » ;
- Décret exécutif n° 13-218 du 18 juin 2013 fixant les conditions d'octroi des primes au titre des coûts de diversification de la production d'électricité;
- Décret exécutif n° 15-69 du 11 février 2015 fixant les modalités de certification de l'origine de l'énergie renouvelable et de l'usage de ces certificats;
- Décret exécutif n° 15-319 du 13 décembre 2015 fixant les modalités de fonctionnement du compte d'affectation spéciale n° 302-131 intitulé «Fonds national pour la maîtrise de l'énergie et pour les énergies renouvelables et de la cogénération ».

Le gouvernement Algérien a procédé à l'adoption d'une série de mesures de soutien visant la promotion des énergies renouvelables à travers la mise en place d'un cadre juridique favorable et d'un Fond National pour la Maitrise de l'Énergie, pour les Énergies Renouvelables et la Cogénération (FNMEERC) qui est alimenté annuellement de 1% de la redevance pétrolière et du produit de certaines taxes.

Le soutien proposé par le gouvernement pour la promotion des énergies renouvelables s'effectue à travers deux modes :

- Pour les installations raccordées au réseau, le soutien de l'État s'effectue à travers le mécanisme du tarif d'achat garanti (feed-in tarif) : ce système garantit aux producteurs d'énergie renouvelable de bénéficier de tarifs leur octroyant une rentabilité raisonnable de leur investissement sur une durée d'éligibilité de 20 ans pour le solaire et l'éolien et 15 ans pour la cogénération. Au-delà de cette durée, les installations peuvent encore fonctionner sans bénéficier de ce mécanisme. Toutefois, la production sera rémunérée au tarif du marché. Les surcoûts engendrés par ces tarifs seront supportés par le FNER au titre des coûts de diversification, le distributeur qui achète cette énergie au tarif d'achat garanti se fait donc rembourser à hauteur de la différence entre le tarif d'achat garanti et un tarif de référence qui est le prix moyen de l'électricité conventionnelle.
- Pour les autres applications, le soutien de l'État se fait par le biais d'une participation à l'investissement (niveau et montant fixés par la réglementation). Le soutien aux énergies renouvelables intervient à travers une contribution à l'investissement par le FNER à hauteur d'un certain niveau et concerne les installations photovoltaïque et éoliennes hors réseau, le résidentiel et la géothermie (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2017).

Les surcoûts engendrés par ces tarifs seront supportés par le FNMEERC au titre des coûts de diversification, le distributeur qui achète cette énergie au tarif d'achat garanti se fait donc compenser à hauteur de la différence entre le tarif d'achat garanti et un tarif de référence qui est le prix moyen de l'électricité conventionnelle.

D'autres formes d'aide sont prévues. Il s'agit de :

- ❖ L'acquisition et mise à disposition des terrains éligibles à l'implantation de centrales E.R.;
- ❖ L'accompagnement dans tout le processus d'acquisition des autorisations nécessaires ;
- ❖ L'identification du potentiel de toutes les régions concernées par les E.R. Le programme des E.R. est défini ainsi pour les différentes phases (voir Figure I.6)
- ❖ d'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12.000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10.000MW (Figure I.7).

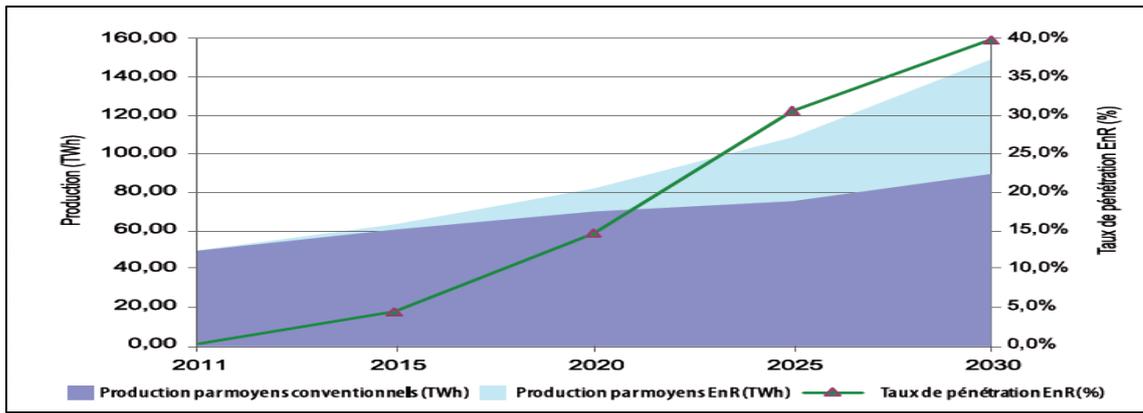


Figure I.6: Pénétration des ER dans la production nationale en TWh (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2017).

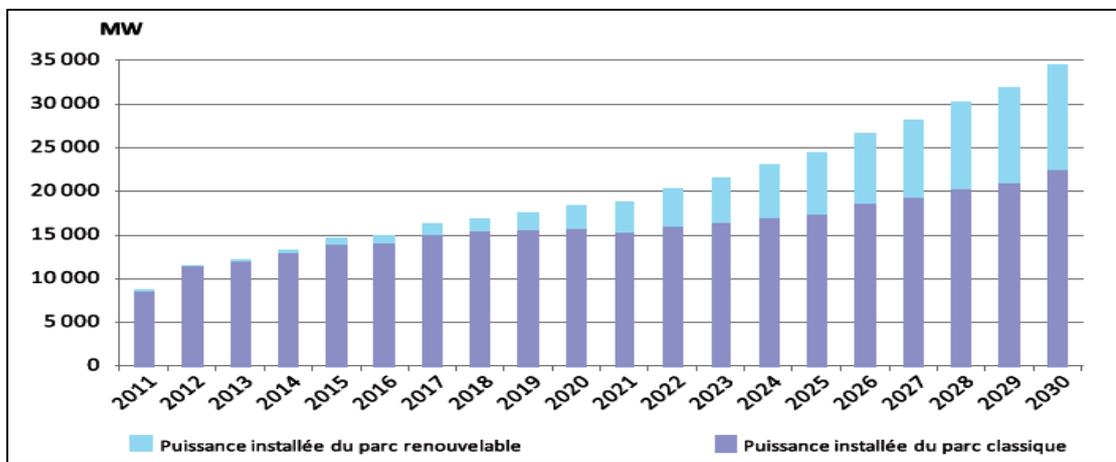


Figure I.7 : Structure du parc de la production nationale en MW (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2019).

I.3.6. Perspective des énergies renouvelables en Algérie

Au temps actuel, le pétrole et le gaz sont deux sources énergétiques vitales pour l'économie de notre pays, la prospérité future dépend du secteur des hydrocarbures: assurer des approvisionnements énergétiques suffisants pour répondre à la croissance de la demande, avec des prix raisonnables, reste le défi majeur pour notre pays. Aujourd'hui l'économie Algérienne est totalement dépendante du pétrole et du gaz, mais il est encore temps d'emprunter une nouvelle trajectoire, en développant des énergies alternatives (Cherf, 2013).

Le gouvernement Algérien a adopté fin février 2015 son programme de développement des énergies renouvelables 2015-2030. Une première phase du programme

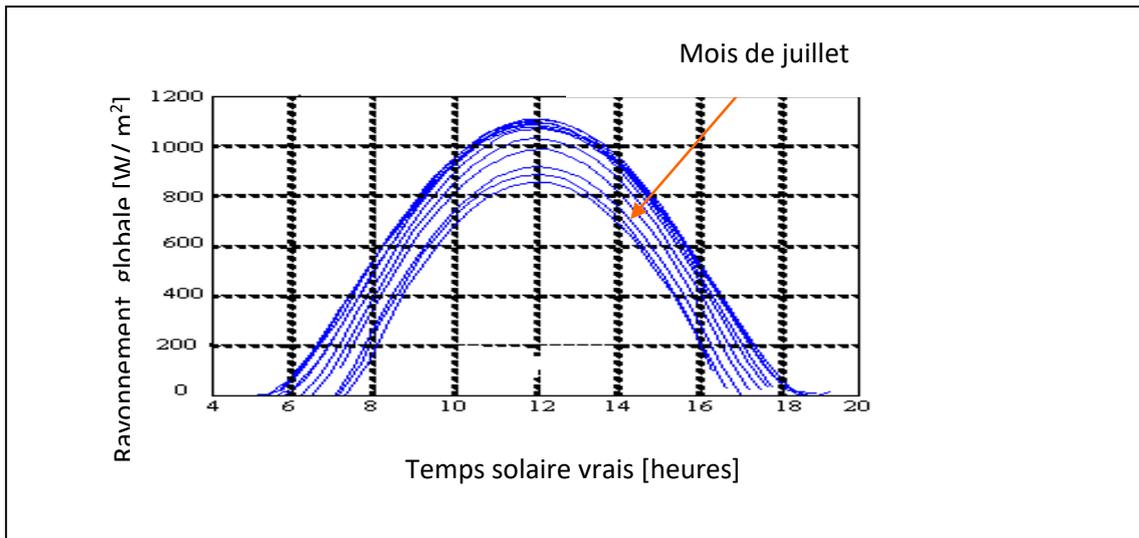
a démarrée en 2011, elle avait permis la réalisation de projets pilotes et d'études sur le potentiel national (M.E.M., 2017). Le nouveau programme précise les objectifs d'installations d'ici à 2030 :

- 13.575MW de solaire photovoltaïque,
- 5 010MW d'éolien,
- 2000MW de solaire thermodynamique (CSP),
- 1000MW de biomasse (valorisation des déchets),
- 400MW de cogénération,
- 15MWde géothermie (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2019).

I.3.7. Situation des énergies renouvelables dans la wilaya de Biskra

Les potentiels énergétiques renouvelables dans la wilaya de Biskra sont représentés par le potentiel solaire et le potentiel éolien.

La wilaya de Biskra est estimée en troisième zone en gisement solaire en Algérie. Biskra est doté d'un fort potentiel de rayonnement solaire, caractérise par une saison d'été très chaude (qui s'étale du mois de juin au moins de septembre) avec une température moyenne mensuelle de 22°,44°. L'irradiation moyenne journalière sur plan horizontal est importante sur la période avril –aout comparativement aux autres mois de l'année, elle est 4,96kWh/m² jour au horizontal. L'estimation du rayonnement solaire pour la région de Biskra est donnée dans la Figure I.8 qui représente les valeurs mensuelles du rayonnement global sur plan incliné en fonction des temps (Chabane et *al.*, 2013).



**Figure I.8 : Rayonnement solaire de tous les mois (15 du mois)
(Chabane et *al.*, 2013).**

De sa position géographique, la région de Biskra est caractérisée par un ensoleillement exceptionnel et un potentiel solaire remarquable assuré par des valeurs élevées de rayonnement sur toute l'année.

L'ensoleillement est très fort au mois de juillet, ainsi que la durée d'insolation. En effet, l'ensoleillement d'un site est exprimé par la fraction d'insolation (σ) définie par le rapport:

$$\sigma = \frac{n}{d}$$

Où (n) est le nombre d'heures ensoleillées ou durées d'insolation, et (d) la durée du jour.

La wilaya de Biskra est dotée d'un gisement éolien considérable avec une vitesse moyenne annuelle de vent de l'ordre de 5,1m/s à 5,9m/s pour une hauteur de 10 mètres et une vitesse moyenne mensuelle généralement élevée pendant la période estivale de novembre à janvier dépassant les 6m/s par rapport aux autres mois de l'année (Figure I.9).

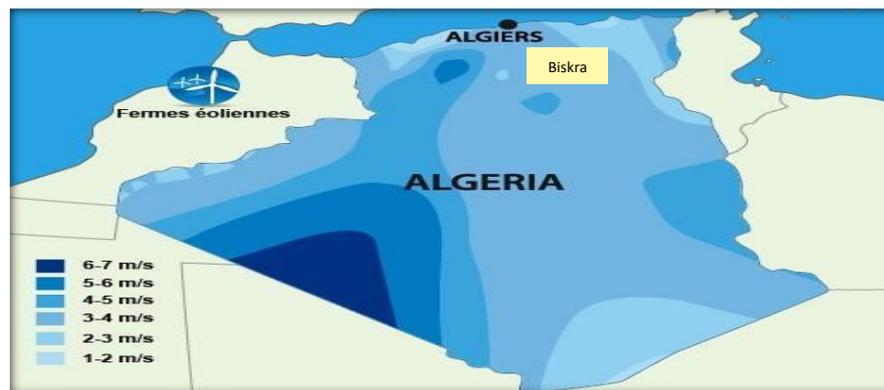


Figure I.9 : Carte potentiel éolien de Biskra (Chabane et *al.*, 2013).

Biskra occupe un espace très important, elle est située en troisième zone de gisement solaire en Algérie. L'énergie solaire est la plus utilisée pour l'irrigation et le pompage dans la wilaya de Biskra qui est une région d'important potentiel agricole.



Figure I.10 : Le pompage d'eau pour l'irrigation des palmiers dattiers par l'énergie solaire dans la wilaya de Biskra (photo originale).

I.4. Potentiels énergétiques en Algérie

L'Algérie est un pays très vaste d'un climat très diversifié, ayant deux grandes zones géographiques distinctes, le Nord méditerranéen et le Sud saharien, peut devenir un bon concurrent dans cette course de recours aux énergies renouvelables (Rekioua et *al.*, 2007). D'après le Tableau 1.3 qui montre la répartition de la puissance installée par application; nous remarquons que la plus grande puissance est donnée à électrification avec un pourcentage de 58%.

Tableaux 1.3 : La répartition de la puissance installée par application.

Application	Puissance installée (KW)	Pourcentage
Electrification	1353	58 %
Télécommunication	498	21 %
Pompage	288	12 %
Eclairage public	48	2 %
Autres	166	7 %

(Source : Ministère de Énergies et des Mines, 2011)

I.4.1. Potentiel solaire de l'Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 Kwh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2650 KWh/m²/an au sud du pays (Tableau I.4).

Tableaux 1.4 : Potentiel solaire en Algérie.

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

(Source : Ministère de Énergies et des Mines, 2011)

En Algérie, cela fait longtemps que l'on entend parler des bienfaits de l'énergie solaire mais l'exploitation de cette énergie reste assez marginale car il n'y a pas assez de moyens débloqués pour aider cette industrie récente à émerger dans un des plus gros pays producteur de gaz et de pétrole. Les politiciens se sentant préoccupés par le réchauffement climatique sont rares ou sont marginalisés. Un premier chantier a tout de même été démarré il y a peu de temps. Il s'agit d'une centrale photovoltaïque hybride d'une capacité de 15 mégawatts (35% de cette capacité est assurée par des panneaux solaires) implantée dans la petite ville de Hassi R'mel (Figure I.11) (M.E.M, 2017).

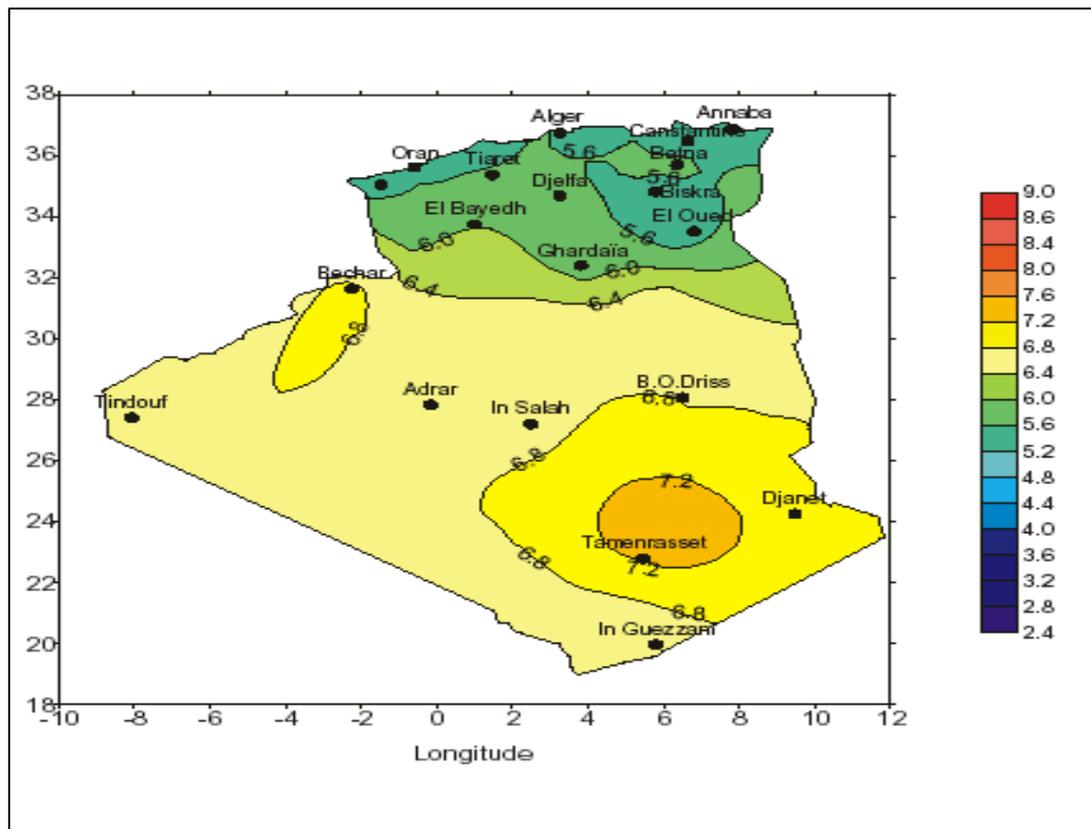


Figure I.11 : Carte de Potentiel solaire national (Ministère d'Énergie des Mines, 2017).

I.4.2 Potentiel éolien de l'Algérie

Un autre domaine des énergies renouvelables est à développer et promouvoir en Algérie, c'est l'énergie éolienne. Un projet portant sur la réalisation d'une ferme éolienne à Adrar a été attribué au consortium Algéro-Français. Ainsi le fabricant français d'éoliennes Vergnet a remporté un appel d'offres international auprès de la Compagnie d'Engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), une filiale du groupe Sonelgaz, concernant l'installation du premier parc éolien à Adrar au sud-ouest du pays. Ce complexe éolien aura une puissance de 10 MW et devrait être mis en service courant 2012, mais après plus d'une année et demi de retard pour le lancement de cette ferme éolienne, elle n'a été mise en service que le 03 juillet 2014, alors que d'autres projets programmés dans le plan du gouvernement sont en attente de concrétisation 2000 mégawatts seront produits à partir de l'énergie éolienne (Ministère d'Énergie des Mines, 2017).

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord (Ministère d'Énergie des Mines, 2017).

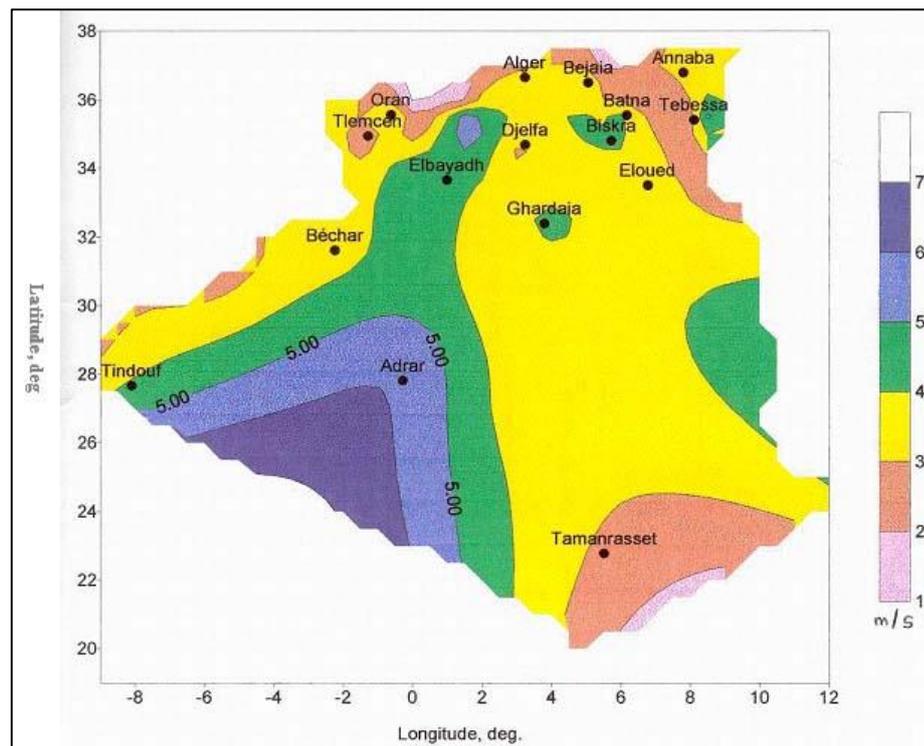


Figure I.12: Carte de Potentiel éolien national
(Source : Ministère d'Énergie et des Mines, 2017)

En effet, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s (Figure I.12), qui augmentent au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5m/s (M.E.M., 2017).

La ressource éolienne provient du vent, lequel est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre : une différence de pression se crée entre certaines régions de la planète, en fonction du réchauffement ou du refroidissement local, mettant ainsi des masses d'air en

mouvement. Exploitée depuis l'Antiquité puis longtemps négligée, cette énergie connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne maintient un taux de croissance de 30% par an depuis une dizaine d'années. L'Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, comptait environ 29000MW pour 40000MW de puissance installée dans le monde en 2003. En 2013 ce chiffre est multiplié par quatre, soit 121000 et 319000MW de puissance installée dans le monde (Ammar, 2017).

I.4.3. Potentiel Géothermique de l'Algérie

En Algérie, les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord Algérien, ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales (Ouali, 2005 cité par Ammar, 2017), parmi les sources les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66 °C) à Mascara.

Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions de l'Oranie, de la Kabylie et du Constantinois respectivement.

La température d'une eau souterraine augmente de 1°C par 30 mètres lorsque le gradient géothermique est normal. La carte montre que les températures varient avec la profondeur (Figure I.13).

Les températures sont croissantes de l'Ouest vers l'Est de la nappe telle que :

- Dans les régions de Touggourt, Hassi Messaoud et Ouargla la température des eaux du continental intercalaire dépassent les 60°C.
- La température moyenne est de 40°C se trouve au Centre de la nappe.
- Le minimum de la température se trouve à la périphérie Ouest qui correspond aux régions d'affleurements de la nappe (Adrar, Timimoune et In Salah), ou la température est en dessous de 30°C.
- La valeur maximale atteinte est de 84°C dans la région de Touggourt, la valeur minimale mesurée est de 19°C dans la région d'Adrar (Ouali, 2015).

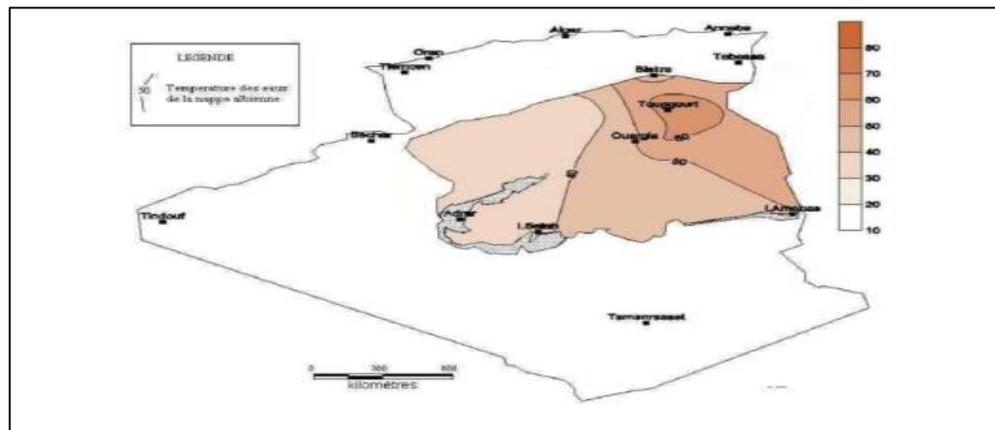


Figure I.13 : Carte des températures des eaux de la nappe du Continental Intercalaire (Ouali, 2015).

I.4.4. Potentiel de l'hydroélectricité de l'Algérie

On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2011). Plus de 70 barrages sont actuellement en exploitation pour une capacité de stockage évaluée à 8,4 milliards de m³.

Le gouvernement a décidé de fermer à terme les centrales hydroélectriques du pays et de consacrer les deux barrages produisant de l'électricité, en l'occurrence le Barrage d'Ighil Emda à Kherrata (Bejaia) et celui d'Erraguén à Jijel, à l'irrigation et à l'alimentation de la population en eau potable (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2011).

Le tableau ci-dessous récapitule le potentiel hydroélectrique Algérien.

Tableau I.5 : Potentiel hydroélectrique Algérien.

Centrale	Puissance installée (MW)
Darguina	71.5
Ighil Emda	24
Mnasouria	100
Erraguene	16
Souk El Djemâa	8.085
Tizi Meden	4.458
Ighzernchebel	2.712
Ghrib	7.000
Gouriet	6.425
Bouhanafia	5.700
Oued Fodda	15.600
Beni Behde	3.500
Tessala	4.228

(Source : M.E.M., 2011).

I.4.5. Potentiel de la Biomasse de l'Algérie

I.4.5.1. Potentiel de la forêt

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes Équivalent Pétrole). Le potentiel récupérable est de l'ordre de 3,7 Millions de TEP (Boudghene, 2007). Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10% (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2011).

I.4.5.2. Biomasse phoenicicole en Algérie

En plus des superficies et du nombre de palmiers très intéressants, l'Algérie dispose d'une grande diversité phoenicicole. L'inventaire variétal réalisé par Hannachi et *al.* (1998) révèle l'existence de 940 cultivars dans l'ensemble de la palmeraie Algérienne.

La superficie phoenicicole, le nombre de palmiers et la production dattier ont connu une évolution importante après la mise en place d'un Programme National de Développement Agricole (PNDA) à la fin des années quatre-vingt-dix. En effet, sur vingt ans (Tableau II.6) la configuration de la plantation a doublé en superficie et en nombre (Bousdira, 2010).

Tableau I.6 : Configuration de la palmeraie Algérienne entre 1983 et 2003.

	1983	1999	2003	Taux d'accroissement en 20 ans
Superficie phoenicicole (ha)	71000	100120	128800	44,8
Nombre de palmiers	7659000	11670330	14605030	47,5
Production (tonne)	181539	427580	492217	63,1

(Source : Bousdira, 2010).

Le calcul des quantités annuelles de sous-produits générés par palmier et à l'échelle régionale (Ghardaïa) et à l'échelle nationale (Algérie) comme le montre le tableau I.7, montrent que les sous-produits du palmier dattier sont disponibles relativement en quantités appréciables. D'autant plus que ce calcul n'inclut pas tous les déchets de la fin de saison de collecte (spathe, spadice, tronc, noyau) (Bousdira, 2010).

Tableau I.7 : Estimation quantitative des sous-produits du palmier dattier par rapport à l'année 2005.

		palmes	Pédicelles	Bois (palmes+ Pédicelles)	Déchets des dattes
Poids/palmier (Unité : Kg)	Min	11.7	0.4	12.1	5
	Max	27	5.5	32.5	75
	Moy	14.4	0.6	15	8.4
Poids /échelle Local : Ghardaïa (unité : tonne)	Min	13 591.9			
	Max	31 365.9			
	Moy	16 728.5	683	17 411.5	9 275
Poids /échelle nationale : Algérie (unité : tonne)	Min	17 0878.9			
	Max	39 4335.8			
	Moy	210 312.4	9 057	219 369.4	123 054.3

(Source : Bousdira, 2010).

Le palmier dattier est la biomasse dominante dans les zones arides et semi-arides. La conduite de cette biomasse engendre une quantité considérable de déchets de différentes natures.

Conclusion

L'Algérie possède un potentiel gigantesque d'énergie renouvelable à savoir ; l'énergie solaire, éolienne, géothermique et biomasse. Ces ressources alternatives d'énergie peuvent contribuer d'une part non négligeable dans production nationale d'énergie.

Dans le domaine du pompage par énergie renouvelable l'Algérie a un large intervalle de choix entre différentes ressources d'énergie renouvelable à savoir le pompage éolien, le pompage photovoltaïque, le pompage hybride ...etc. Le choix de tel ou tel système dépend de : l'endroit, l'éloignement par rapport au réseau électrique, la charge globale du système et le prix du Kwh et litre du carburant.

La production d'électricité à partir de chacune des énergies renouvelables citées est un objectif très souvent limité par le prix de revient final du KWh électrique produit. Le bénéfice potentiel du système hybride relève de la complémentarité des deux sources afin de minimiser le cout en optimisant leurs dimensions.

En effet, l'Algérie est en train de réaliser quels bénéfices elle pourrait tirer d'un fort développement des énergies renouvelables. Notre pays possède le plus fort taux d'ensoleillement dans le Sud Saharien.

Chapitre II:

*Systemes de pompage
hybride*

II.1.Introduction

Il existe deux types de système de production hybride, le système alterné et le système parallèle (Rekioua et *al.*, 2007).

Un Système d'Énergie Hybride (SEH) est un système qui associe au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs diesel, et au moins une source d'énergie renouvelable (Gao et *al.*, 2013).

Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les SEH sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées (Abbes, 2012).

II.2. Généralités sur les systèmes hybrides

Le but d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et si possible de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergies renouvelables, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie. D'un point de vue technologique, la fiabilité n'est pas seulement une question de respect des normes pour l'alimentation en électricité, mais aussi de maintenance, compte tenu des conditions particulières des régions isolées (Abada, 2011).

Les performances d'un SEH, son rendement et sa durée de vie, sont influencés en partie par sa conception, c'est-à-dire l'architecture, le dimensionnement des composants, le type de composants, ... etc. et d'autre part par le choix de la stratégie de fonctionnement. Parmi les paramètres permettant d'évaluer ces performances nous citons (Bakelli et *al.*, 2011) :

- La consommation spécifique du groupe électrogène,
- Le nombre et la durée des pannes,
- Le nombre d'arrêt pour l'entretien,
- Le coût du kWh.

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesel et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SEH peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charges, et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures (Belgacem, 2012).

Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus : un bus à CC pour les batteries, les sources et les charges à CC, et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution. Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels (Campana et *al.*, 2014).

À part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charges différées, charges optionnelles, charges de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un SEH avec des batteries de stockage et des charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelables et des générateurs diesel), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite, il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source (Rekioua et *al.*, 2008).

II.3. Dimensionnement d'un Système hybride

Pour structurer un système hybride, trois critères peuvent être pris en compte :

- ❖ La présence ou non de sources d'énergie classique, comme un groupe électrogène, une micro turbine à gaz, ...etc.
- ❖ La présence ou non de dispositifs de stockage ; la présence d'un stockage permet de satisfaire la demande des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une source primaire à convertir en électricité (soleil, vent). Ces dispositifs peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoir d'hydrogène, ...etc.

❖ La structure du système peut contenir des modules photovoltaïques, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique ou une combinaison de ces sources ; un critère important pour la sélection des sources utilisées est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le profil de consommation de la charge électrique alimentée. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle.

La conception d'un système d'énergie hybride (SEH) exige la sélection et le dimensionnement de la combinaison la plus appropriée des différents composants du système, ainsi que l'implémentation d'une stratégie de fonctionnement efficace. Les logiciels de dimensionnement sont des outils indispensables pour l'analyse et la comparaison des différentes combinaisons possibles des sources utilisées dans les SEH. Les principaux facteurs pour le dimensionnement sont :

- ❖ Les conditions environnementales du site (ensoleillement, température, humidité, vitesse du vent) ;
- ❖ Le profil de la courbe de charge (consommation) ;
- ❖ Les ressources financières ;
- ❖ La disponibilité de la technologie et le support technique.

Toutefois, il existe plusieurs logiciels de dimensionnement des systèmes d'énergie hybrides et systèmes d'énergie renouvelable parmi lesquels : HOMER, RESCREEN, PVSYST (PV seul), RETSCREEN, SOMES, RAPSIM, SOLSIM, HYBRID2... Tous ces logiciels ont pour but d'optimiser les systèmes hybrides, mais les stratégies d'optimisations sont différentes (Ammar, 2015).

II.3.1. Système hybride photovoltaïque et éolien

Les Systèmes Hybrides sont généralement des Systèmes PV où les panneaux solaires sont combinés avec d'autres sources d'énergie, comme par exemple une éolienne ou un groupe électrogène (Stoyanov, 2011). Dans le cas d'un système hybride avec éolienne, l'énergie produite par celle-ci, et qui possède son propre contrôleur, vient compléter la charge des batteries. La plupart des systèmes hybrides associent l'énergie photovoltaïque

avec l'éolien et un groupe électrogène dans le cas d'un système avec option back-up (Ould Mahmoud, 2008).

Les systèmes hybrides assurent un approvisionnement continu en électricité fiable. Les systèmes de pompage sont flexibles, modulaires et peuvent être dimensionnés selon les besoins en eau et les ressources naturelles disponibles (Rekioua et Matagne, 2012). Certains systèmes peuvent fonctionner en configuration hybride avec d'autres systèmes de fourniture d'énergie tel que l'éolien, un groupe électrogène ou un raccordement au réseau.

En 2015, une étude de cas réalisée dans sept pays a conclu que, dans tous les cas, la génération de coûts peut être réduite en hybridant des mini-réseaux et des réseaux isolés. Cependant, les coûts de financement des réseaux électriques à moteur diesel à énergie solaire photovoltaïque sont cruciaux et dépendent dans une large mesure de la structure de propriété de la centrale (Ammar, 2017).

D'autres hybrides solaires incluent les systèmes de vent solaire. En effet, La combinaison de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire présente l'avantage que les deux sources se complètent, car les durées de fonctionnement maximales de chaque système se produisent à différents moments de la journée et de l'année. La génération d'énergie dudit système hybride est plus constante et fluctue moins que chacun des deux sous-systèmes constitutifs.

L'énergie solaire photovoltaïque intermittente / non jetable à faible taux de prévalence atteint avec le stockage de l'électricité pompé peut fournir l'énergie la moins chère disponible toute la journée sur demande.

II.3.2. Système hybride photovoltaïque et diesel

Les systèmes d'énergie solaire hybride sont des systèmes d'énergie hybrides qui combinent l'énergie solaire d'un système photovoltaïque avec une autre source génératrice d'énergie (Kaabeche et al., 2006). Un type commun est un système diesel photovoltaïque hybride, qui combine des générateurs solaires photovoltaïques (PV) et diesel, ou des groupes électrogènes diesel, puisque le PV n'a qu'un coût marginal et est traité en priorité dans le réseau. Les groupes

électrogènes diesel sont utilisés pour combler constamment l'écart entre la charge actuelle et la puissance réelle générée par le système photovoltaïque.

Aujourd'hui, il est possible de diminuer de plus de 50% la consommation en carburant en ajoutant des panneaux solaires à des générateurs diesel. Pendant la journée, les panneaux solaires fourniront la plupart de l'électricité nécessaire et les générateurs tourneront au ralenti ou seront éteints. Un système hybride combiné à des batteries permet d'éteindre complètement les groupes électrogènes pendant la plus grande partie de la journée. Ce n'est que lors d'une journée nuageuse ou pendant la nuit que les générateurs reprendront du service (Hadjaïssa et al. ,2016).

Cette solution peut être appliquée à des exploitations agricoles, à des communautés d'habitations ou à de grands complexes industriels ou miniers. Il est possible de mettre en œuvre un système d'économie de carburant pour une consommation aussi réduite que 50kW, mais habituellement ce type d'installation s'applique à des consommations d'énergie allant de 200 kW à plus de 20 MW. Pour des communautés d'habitations la solution hybride diesel-solaire peut être installée de manière combinée avec des compteurs à carte prépayée. Des systèmes de générateurs de secours au diesel peuvent également être installés pour des consommations à un seul chiffre kW (maisons, par ex.) (Kadri et Mostefaï, 2007).

II.3.3. Système hybride éolien et diesel

Un système d'alimentation hybride éolien-diesel combine des générateurs diesel et des éoliennes, généralement aux côtés d'équipements auxiliaires tels que le stockage d'énergie, des convertisseurs de puissance et divers composants de commande, pour produire de l'électricité. Ils sont conçus pour augmenter la capacité et réduire le coût et l'impact environnemental de la production d'électricité dans les communautés et les installations éloignées qui ne sont pas reliées à un réseau électrique. Les systèmes hybrides éolien-diesel réduisent la dépendance au carburant diesel qui crée de la pollution et coûte cher à transporter (Drouilhet et Shirazi, 2002).

Des systèmes de production d'énergie éolienne-diesel ont été en développement et ont été testés dans plusieurs endroits durant la fin du XXe siècle. Un nombre croissant de sites viables ont été développés avec une fiabilité accrue et des coûts de supports techniques minimisés dans des communautés éloignées (Stayanov, 2011).

II.4.Conclusion

Dans ce chapitre, les différents systèmes hybrides sont décrits. La production d'électricité à partir de chacune des énergies renouvelables est très souvent limitée par le prix de revient final du KWh électrique produit.

Le bénéfice potentiel du système hybride relève de la complémentarité des deux sources afin de minimiser le cout en optimisant leurs dimensions.

Dans le but de mettre en relief cette complémentarités, on examine le comportement du système hybride face à la variation dans le temps d'une part et la disponibilité énergétique tant du côté éolien que solaire, et d'autre part de la demande énergétique. Lorsque les sources sont prises indépendamment, le dimensionnement de la source considérée requière la prise en compte de la période la plus critique du point de vue disponibilité énergétique. Pour illustrer l'analyse énergétique du système hybride, pour l'utilisation dans l'agriculture qui est l'objet de la troisième partie.

Chapitre III:

*Utilisation des énergies
renouvelables dans
l'agriculture*

III.1.Introduction

Tous les secteurs d'activité étaient touchés par le changement climatique, l'environnement et le développement d'énergies renouvelables. L'agriculture est souvent décrite comme « le secteur d'activité le plus pollueur de l'environnement », de l'eau en particulier par l'utilisation massive de produits phytosanitaires et de pesticides, mais on ne note que rarement qu'elle est aussi un secteur gourmand en énergie (Campana et *al.*, 2014).

Le secteur agricole dispose d'agro ressources, de cultures, de résidus de culture et d'espace. Ainsi les préoccupations environnementales, le besoin massif d'énergie et les ressources présentes sur les territoires ruraux pourraient être combinés afin de faire de ce secteur un exemple pour le développement des énergies renouvelables (E.R.).

Les énergies renouvelables sont utilisées dans le domaine de l'agriculture, en particulier dans l'irrigation agricole par le pompage de l'eau (PRR, 2008).

Les systèmes de pompage photovoltaïque de l'eau (PVWP) représentent une solution réalisable et renouvelable pour promouvoir la gestion durable des ressources en eau et le développement du secteur agricole (Campana et *al.*, 2017)

III.2. Généralités des énergies renouvelables dans l'agriculture

Face à la diminution des ressources fossiles, aux changements climatiques, à l'émission des gaz à effet de serre et aux principes du développement durable, tous les pays du monde, qu'ils soient développés ou en voie de développement cherchent des alternatives à ces disfonctionnements. L'espace mondial est en face à un contexte urgent concernant ces disfonctionnements. Ainsi, les États recherchent des alternatives et élaborent des lois, des règles et des principes pour améliorer la qualité de vie, éviter les désordres environnementaux et préserver la planète. Les économies d'énergie, les ressources renouvelables et les énergies renouvelables deviennent des solutions à envisager à multiplier par les États (Olsson et *al.*, 2015).

III.3. Utilisation des énergies renouvelables dans l'agriculture dans le monde

Le développement des E.R en milieu agricole est étroitement lié avec les retombées économiques que l'agriculteur peut espérer en cas d'investissement. Encore faut-il être capable d'estimer ces retombées (Himri et *al.*, 2009).

À partir du moment où un investissement est rentable et peut être mis en place en milieu agricole, des agriculteurs s'en saisiront. Celui-ci était dû à un double phénomène. D'un côté, des tarifs d'achat de l'électricité PV élevés, garantis sur 20 ans. De l'autre, un effondrement du prix des modules PV grâce à d'importants progrès technologiques et au développement rapide de la filière en Chine. En l'espace de 3 ans, entre 2008 et 2010, la capacité PV installée a été multipliée par dix pour atteindre 850MW (Mambrini, 2014).

L'importance de la transmission des savoir-faire est une donnée bien intégrée par le secteur agricole. De nombreuses structures et institutions existent pour assister les agriculteurs, faciliter leur travail et leur ouvrir de nouvelles perspectives collectives.

III.4. Utilisation des énergies renouvelables dans l'agriculture en Algérie

Les énergies solaires sont prometteuses pour le pompage d'eau et l'irrigation des cultures, dans les régions agricoles du Sud Algérien comme la wilaya d'Oued Souf, Biskra, Adrar où l'agriculture connaît un regain d'intérêt. Dans ces milieux où il existe un manque en électricité (Bouzidi, 1999), beaucoup de forage d'eau sont demandés, et un important ensoleillement et des vents sont disponibles toute l'année (Kendouci et *al.*, 2013).

En effet la wilaya de Biskra dispose de tous ces critères pour lancer un programme des énergies renouvelables (Bentouba et Bourouis, 2016).

Les systèmes de pompage photovoltaïques que l'on peut installer dans le Sud Algérien sont donc composés généralement des éléments suivants avec un devis estimatif qui ne dépasse pas 400000 Da, soit 4000 euros pour un débit d'eau de 50-70 m³ (Bentouba et *al.*, 2007).

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (Hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700kWh/m²/an au Nord et 2263kWh/m²/an au Sud (Bentouba et al., 2007.). Les distances existantes entre les localités, dispersion de la population dans le sable rendre le raccordement au réseau électrique classique très coûteux (Tableau III.1).

Tableau III.1: Potentiel solaire en Algérie.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne Reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

(Source : Bentouba et al., 2007)

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 (Fraenkel, 1994).

D'après la Figure III.1., il s'avère que le gasoil est prépondérant, sa consommation représente en moyenne 40% du bilan énergétique de la pêche et de l'agriculture et 3% du bilan d'énergie national, alors que la consommation de l'électricité pour l'irrigation et l'élevage représente 11% du bilan agricole et 2% du bilan national, soit 4% de gaz naturel pour le chauffage des locaux et des serres agricoles et 0.3% du bilan national (Ministère d'Énergie et des Mines, 2017).

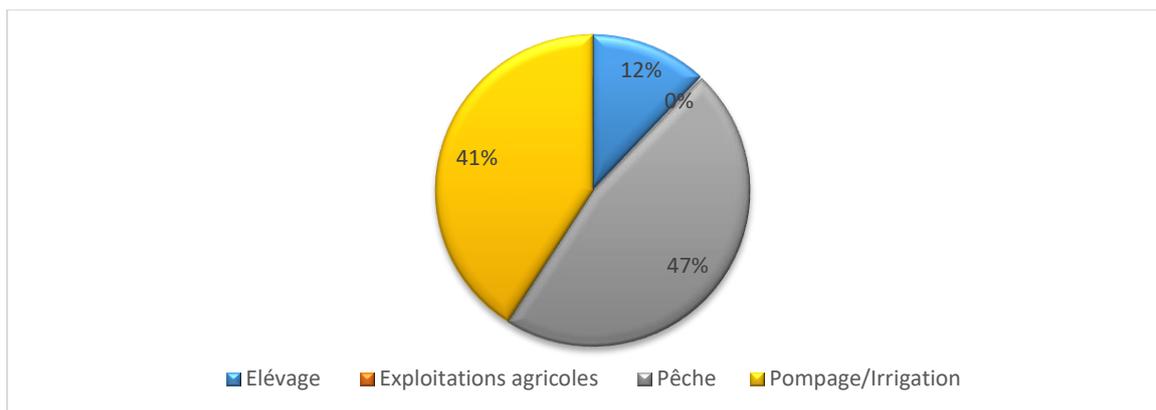


Figure III.1 : Répartition de la consommation du secteur de l'agriculture par activité (Ministère d'Énergie et des Mines, 2017).

Entre 2000 - 2015, la consommation d'énergie du secteur agricole a augmenté d'une moyenne 6.25% par an. Par produit ; soit 5% par an en gasoil ; 10% par an en électricité ; 5% par an en GN (gaz naturel) et 8% par an en fuel lourd). Par activité ; 10% par an en élevage ; 11% par an en exploitation ; 5% par an en irrigation et 8% par an en pêche) (Figure III.2).

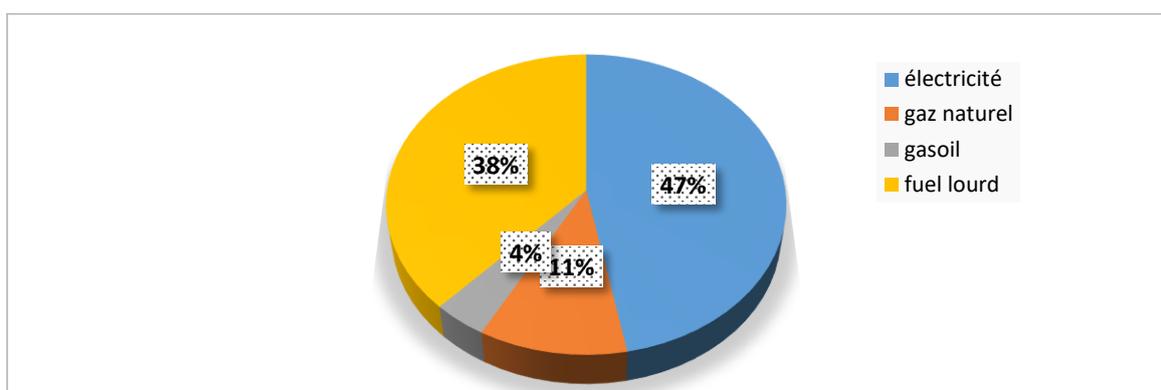


Figure III.2 : Répartition de la consommation du secteur de l'agriculture par type d'énergie (Ministère d'Énergie et des Mines, 2017)

La Figure III.3 montre que la production totale en énergie électrique a atteint 60,5 TWh en 2015, soit une hausse de 6,9% par an. Environ 97% de cette énergie a été produite par le réseau interconnecté du Nord, le reste a été réalisé par le pôle d'Adrar et les réseaux isolés du Sud. (Tableau III.2).

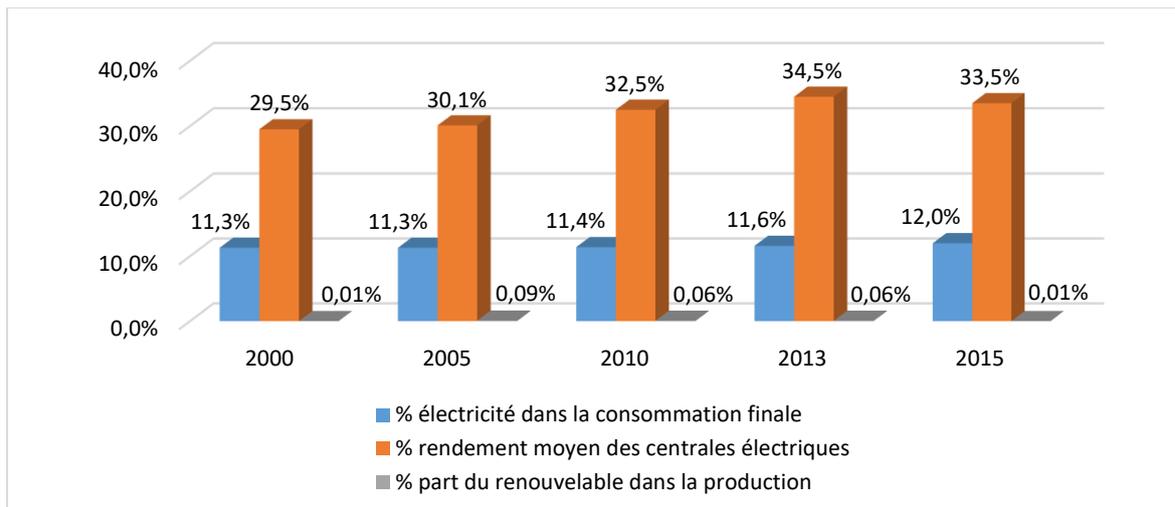


Figure III.3 : Production totale en énergie électrique (Ministère d'Énergie et des Mines, 2017).

Tableau III.2 : Production de l'électricité par type centrales.

Année	2000	2005	2010	2015
Centrale Hybride	0%	0%	0,001%	2%
Cycle Combiné	0%	3%	34%	47%
Diesel	1,5%	8%	9%	4%
Hydraulique	0,2%	2%	4%	3%
Turbine Gaz	35%	45%	43%	33%
Turbine Vapeur	63%	50%	21%	17%

(Source : Ministère d'Énergie et des Mines, 2017).

Cette détérioration de l'efficacité énergétique est due à une mauvaise optimisation du taux d'utilisation des capacités (TUC) du système de production national par ailleurs l'augmentation de la population et l'industrialisation stimulera parallèlement la croissance économique du pays (Ministère d'Énergie et des Mines, 2017).

III.4.1. Incidences socioéconomiques que peuvent apporter l'énergie renouvelable au Sud d'Algérie

Le développement d'utilisation d'énergie renouvelable en Algérie, et au Sud Algérien en particulier, est une stratégie d'intégration de toute la région dans une économie qui a créé la richesse et le développement du cadre de vie des habitants. Ce qui constitue un facteur de stabilité important qui s'articule sur :

- Des ressources naturelles non épuisables ; des ressources énergétiques très importantes.
- Des ressources humaines ; une population jeune.
- Des compétences technologiques ; universités, laboratoire de recherche.
- Un environnement non polluée.
- Des capacités de financement via plusieurs programmes: programme de développement des régions Sud, programme relance économique, programme 2005-2009, et le fameux programme de développement des dix wilayas du sud. Protection de l'environnement surtout que le Sahara dispose d'importants sites et circuits touristiques qui sont toujours vierges et non pollués (Bentouba et *al.*, 2007).

La disponibilité d'une importante énergie solaire (Himri, 2009) et la situation géographique de L'Algérie peut rendre l'application du pompage de l'eau par l'intermédiaire des pompes solaires photovoltaïques comme une solution pour l'irrigation des surfaces agricoles et pour l'alimentation en eau potable en sites isolés (Bouzidi, 1999).

Le rôle d'un système hybride est la production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter 'une puissance énergétique', mais un outil de développement social et économique des zones rurales (Kebour et *al.*, 2017). Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, seulement ces quelques dizaines ou centaines de kWh peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté (Saheb-Koussa et Belhamel, 2007).

Le pompage d'eau nécessite une quantité d'énergie importante. Le soleil constitue une source d'énergie quasiment infinie qui, avec l'organisation et le matériel adéquats, permet de pomper de l'eau n'importe où sans infrastructure énergétique (Himri, 2009).

Système de pompage d'eau solaire avancé. Le système était spécifiquement conçu pour utiliser l'énergie solaire pour faire circuler l'eau (Figure III.4).

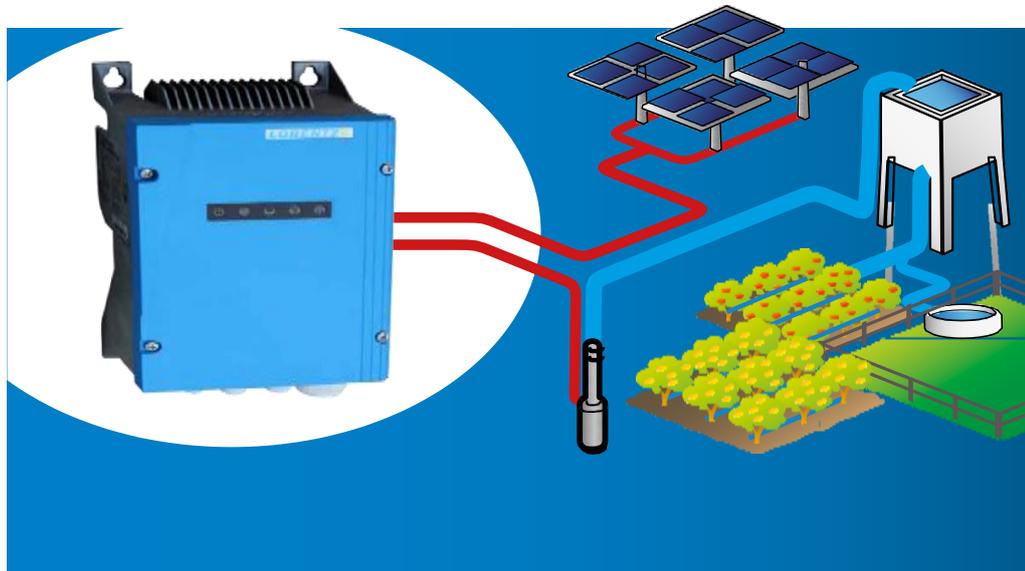


Figure III.4 : Schéma représente le pompage solaire pour l'irrigation (Himri, 2009)

III.4.2. Composition du système solaire

Le système solaire pour l'unité de pompe se compose de trois parties principales comme suit (Figure III.5) :

- Module solaire : Il s'agit d'un certain nombre de panneaux qui convertissent l'énergie solaire en électricité. Le nombre de panneaux et la puissance de ceux-ci sont déterminés en fonction de la puissance électrique nécessaire.
- Contrôleur : C'est le dispositif qui commande le fonctionnement de la pompe, et indique l'état de fonctionnement tel que marche-arrêt, l'énergie électrique générée, l'état inhabituel du niveau d'eau, et la mal fonction. En général, le dispositif de commande est placé sous le module solaire.
- Pompe : C'est la pompe qui est entraînée par l'énergie solaire. Une pompe submersible électrique ou une pompe centrifuge est applicable au système solaire.

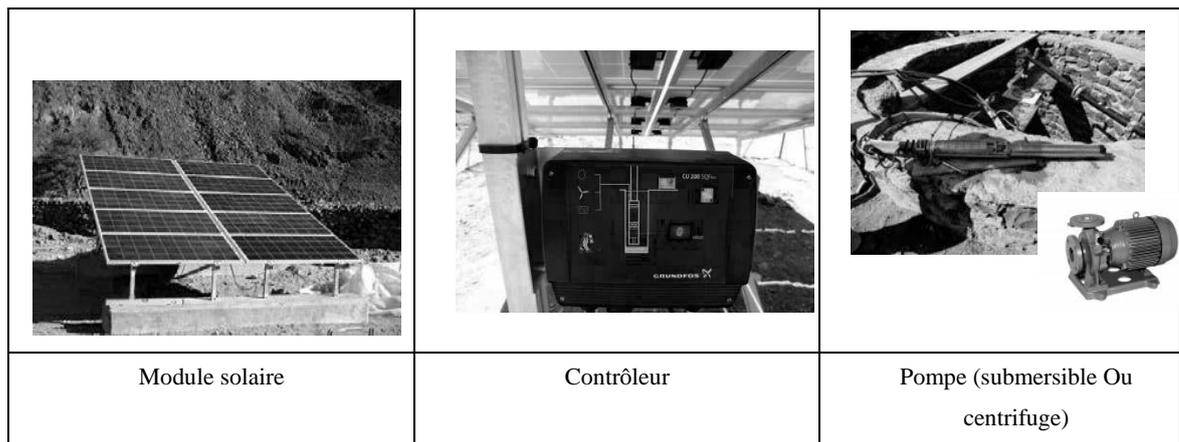


Figure III.5 : Composition de système solaire.

III.4.3. Pompes applicables au système solaire

Un système solaire a été appliqué au forage pour l'eau potable ; par conséquent, une pompe submersible a été utilisée. Lorsque le système solaire est appliqué au puits de surface à des fins d'irrigation, soit une pompe submersible ou une pompe centrifuge peuvent être utilisées en accord avec l'état du niveau d'eau. Si le niveau d'eau est bas, une pompe submersible est recommandée ; au contraire, si le niveau d'eau est élevé, une pompe centrifuge est adoptable (JICA, 2014).

III.4.4. Test de la pompe solaire

Après l'installation de la pompe solaire, sa performance doit être vérifiée en procédant à un essai de pompage. La figure III.6 représente la courbe de rendement qui a été préparée sur la base des résultats de l'essai de pompage et qui montre la relation entre la puissance électrique générée et le débit de la pompe. Comme cela est clairement montré dans ce graphique, le débit de la pompe dépend de l'énergie électrique générée. Le débit est faible lorsque l'énergie électrique générée est faible, et il augmente en fonction de l'augmentation de la puissance électrique. Dans ce cas, le débit atteint près de 7 m³/h lorsque le courant électrique généré est de 1 kW (JICA, 2014).

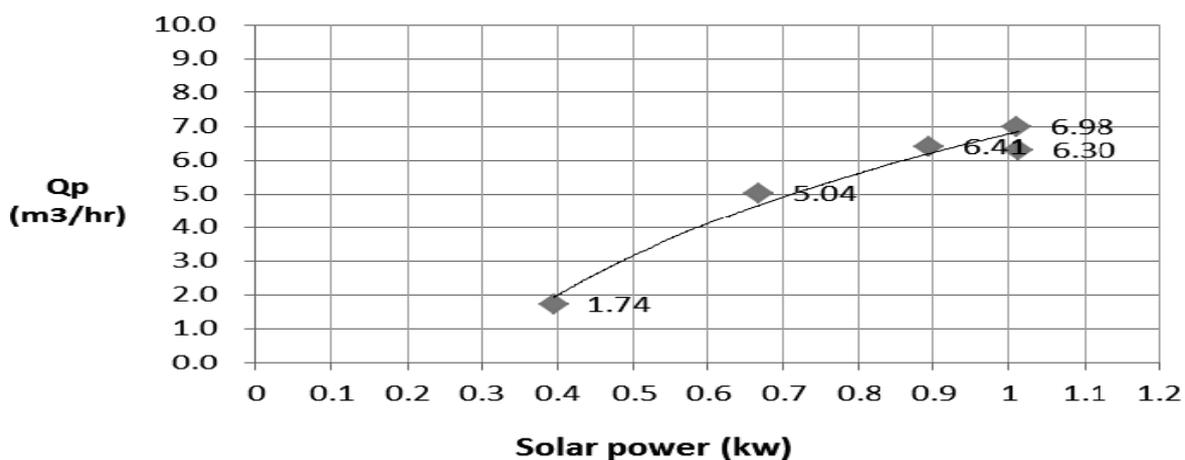


Figure III.6 : Courbe de rendement de la pompe solaire (JICA, 2014).

La Figure III.7 montre l'électrification au solaire photovoltaïque au niveau national, on remarque que tout le programme national est constater dans le sud de pays.

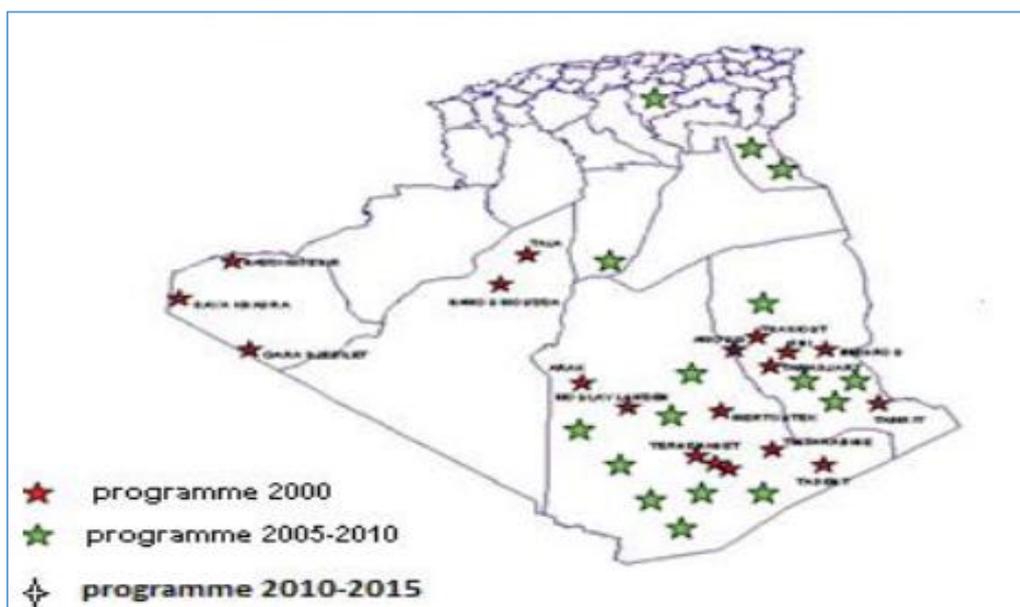


Figure III.7 : Électrification au solaire photovoltaïque

III.5. Ressources en eaux en Algérie

L'eau est un constituant essentiel des êtres vivants, donc de la plante. Mais près de 98 % du volume d'eau total absorbé par la plante ne font que circuler des racines vers les feuilles d'où ils s'échappent sous forme de vapeur d'eau. C'est la transpiration. L'intensité de cette transpiration est liée au climat et à la surface des feuilles. Les 2% restant représentent

l'eau de constitution. Cependant, la plante ne peut puiser l'eau dont elle a besoin que dans le sol (Sedrati, 2011).

De l'indépendance à 1999, trente ouvrages ont été construits, portant la capacité de mobilisation des eaux de pluie à 2,5 milliards de m³. Actuellement, 68 barrages sont en exploitation, à l'échelle nationale, d'une capacité de 7,1 milliards de m³. Les réserves emmagasinées, au 21 juillet 2013, s'élevaient à 5,4 milliards de m³. Ce qui représente un taux de remplissage de 78%. « 2012 a été une année exceptionnelle avec un pic d'apport pluviométrique. Nous sommes très à l'aise, si l'on se réfère aux années 2000, durant lesquelles l'Algérie a connu un stress hydrique énorme. Une dizaine de barrages étaient complètement vides et le reste remplis à moins de 50%, a rappelé M. Baraki. La consommation annuelle du pays en eau brute est d'environ 1,5 milliard de m³. Les volumes stockés, à ce jour, suffiront donc amplement pour trois années, même sans aucune chute de pluie de saison. Une perspective fortement improbable. « Nous sommes dans une situation confortable en eau de surface », a réitéré notre interlocuteur qui cite le dessalement de l'eau de mer, qui procure un quota supplémentaire de 900 millions de m³. « D'ici deux à trois ans, le programme fonctionnera à l'optimum. Nous puiserons moins des réserves de barrages », a-t-il ajouté. Malgré une conjoncture fortement favorable, l'ANTB ne freine pas la dynamique sur laquelle elle s'est placée depuis plusieurs années. Elle tend à augmenter davantage les capacités de stockage de la ressource en eau superficielle et à la préserver.

À l'horizon 2015, vingt projets seront livrés. Il s'agit de 12 barrages d'une capacité de 1078,6hm³, de deux adductions d'une longueur de 315 kilomètres, de cinq transferts étendus sur 253 kilomètres et d'un tunnel long de 3,6 kilomètres. Par des opérations de désenvasement et de surélévation des barrages, l'Agence gagne en capacité de mobilisation des eaux de pluie. Ces actions ont conduit, à titre illustratif, à un gain de 70 millions de m³ au barrage Ghrib, de 7 millions de m³ à Béni Amrane et d'un million de m³ à Foug El Gueis.

Des projets de même ordre sont envisagés à Bouhnia et Foug El Gherza. L'ANTB s'est fixé comme objectif, sur instigation du ministère de tutelle, de dégager, durant le prochain quinquennat, 45 millions de m³ de vase. Les cadres de l'ANTB mettent en évidence, par ailleurs les réalisations accomplies en matière des systèmes hydrauliques, notamment dans le segment transferts. « C'est un système unique. Peu de pays se permettent de transférer l'eau sur plus de 500 kilomètres. Cela relève d'une volonté politique », relève Ali Madani,

directeur général adjoint. L'Agence assure, en outre, le suivi technique de vingt études de faisabilité de barrages (Cherf, 2013).

III.6. Pompes et systèmes d'irrigation

L'irrigation est l'application de l'eau au sol dans le but de rafraîchir le sol et l'atmosphère, par ce moyen réaliser les conditions les plus favorables pour la croissance des plantes. Mais quel que soit l'origine de l'eau (cours d'eau naturel, nappe souterraine, eau de barrage) et son mode de transport (canaux, conduite sous pression), le problème qui se pose est comment répartir cette eau sur le sol de façon que les plantes en tirent le maximum de profit. Cependant le moyen de répartition de l'eau sur le sol ne doit pas toujours répondre à ce critère d'une production maximale, donc on doit essentiellement envisager un choix minutieusement détaillé du mode d'irrigation et de la technique d'arrosage et compatibilité avec les contraintes de la région d'étude (FAO, 2014).

L'irrigation est défini généralement comme l'apport d'eau au sol dont le but d'assurer l'humidité nécessaire des plantes, cependant selon une définition plus large et plus détaillée, l'irrigation est l'application de l'eau au sol dans l'un des buts suivantes :

- Fournir l'humidité à la croissance des plantes et les garantissent contre toute sécheresse.
- Rafraîchir l'atmosphère du sol et par conséquent réaliser les conditions les plus favorables aux développements des plantes.
- Supprimer et diluer les sels dans le sol.
- Réduire les risques d'appauvrissement du sol.

L'agriculture est de loin l'industrie ayant la plus grande consommation d'eau l'irrigation des régions agricoles représente 70% de l'eau utilisée dans le monde entier. Dans plusieurs pays en voie de développement, l'irrigation représente jusqu'à 95% de toutes les utilisations d'eau, et joue un rôle important dans la production de nourriture et la sécurité alimentaire (Lenntech, 2015).

III.6.1. Besoin en eau selon les sols

Le type de sol est facteur important à considérer lors de la conception et de la gestion d'un système d'irrigation. Un sable faiblement pourvu en matière organique retiendra à peine 5% de son poids en eau par contre, un sol limoneux pourra en retenir près de 30%.

Cette quantité d'eau retenue influence directement les fréquences d'irrigation. Par exemple, une argile aura assez d'eau en réserve en début de saison pour approvisionner une culture pendant un mois, alors qu'un sable grossier n'aura de réserve que pour quelques jours (FAO, 1976).

La matière organique joue un rôle déterminant dans la rétention d'eau comme une éponge, elle retient l'eau des précipitations pour la restituer à la demande des besoins de la culture.

Comme le démontrent les données du tableau III.3 avec, un bon taux de matière organique, le sol joue un rôle tampon en retenant l'eau des précipitations pour une utilisation subséquente par la plante.

Tableau III.3 : Capacité de rétention en eau pour différentes textures de sol selon leur contenu en matière organique.

Type de sol	Sol sans matière organique	Sol avec 4% à 6% matière organique
	Millimètre d'eau retenu par mètre de profondeur de sol (mm/m) pour un sol à capacité au champ	Millimètre d'eau retenu par mètre de profondeur de sol (mm/m) pour un sol à capacité au champ
Sable	45	161
Sable loameux	70	147
Loam Sableux	98	146
Loam	137	165
Loam limoneux	206	230
LoamArgileux	253	294
Argile Sableuse	218	270
Argile	202	252

(Source : Weill et Duval, 2009).

III.6.2. Critère de choix d'un système d'irrigation

Le choix d'une technique d'irrigation repose sur un ensemble de critères et de contraintes qui ont été étudié par (Doorenbos et Kassam , 1987):

- Topographie (pente du terrain, relief, géométrie de la parcelle).
- Ressource en eau (quantité, qualité, débit dont on dispose).
- Nature des cultures et nature du sol (perméabilité).
- Facteurs sociologique, culturels et économiques (Tiercelin, 1998).

III.6.3. Classification des systèmes d'irrigation

Les systèmes d'irrigation peuvent être classés en deux grandes: l'irrigation gravitaire et l'irrigation sous pression catégorie (Figure III.8). Cette dernière est classée en deux types : l'irrigation goutte à goutte et l'irrigation par aspersion (Battude, 2017).

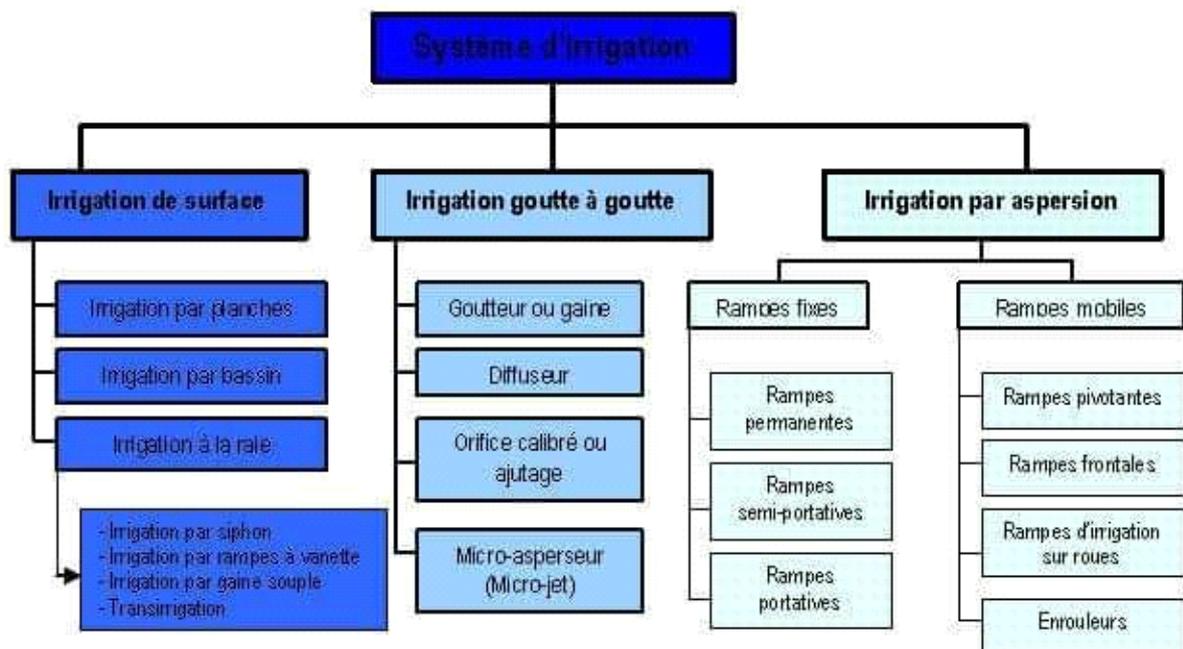


Figure III.8: Différentes méthodes d'irrigation pratiquées (Battude, 2017).

III.6.3.1. Irrigation gravitaire ou de surface

Selon Tiercelin et Vidal (2006), les techniques d'irrigation de surface sont dites aussi techniques d'irrigations traditionnelles du fait qu'elles sont utilisées par l'homme depuis l'antiquité.

L'irrigation gravitaire regroupe l'ensemble des techniques d'arrosage dans lesquelles la répartition de l'eau à la parcelle se fait entièrement à l'air libre, par simple écoulement à la surface du sol. La répartition de l'eau est assurée grâce à la topographie du terrain et aux propriétés hydriques du sol (ruissellement, infiltration et capillarité). (Figure III.9 et Figure III.10).



Figure III.9: Irrigation gravitaire par plusieurs lignes (photo originale).



Figure III.10 : Irrigation gravitaire par une seule ligne (photo originale).

A. Types d'irrigation gravitaire

A.1. Irrigation par planche

L'irrigation par planche est l'apport d'eau sur des longues parcelles en pente et rectangulaire avec des conditions de drainage à l'extrémité basse du champ (Figure III.11). Les planches sont disposées dans le sens de la plus grande pente, 9 à 20 mètres de large, 90

à 400 mètres de long avec de petites levées de terre entre les bandes pour canaliser l'eau durant l'irrigation (Irrigazette, 2015).

Le terrain entre les planches doit être nivelé perpendiculairement à la direction de l'eau. L'irrigation par planche convient très bien pour la plupart des types de cultures et de sols mais elle est favorisée par les sols ayant une vitesse d'infiltration lente (**Disponible sur le site : <http://www.tpe-agriculture-france-mail.e-monsite.com>**).



Figure III.11 : Irrigation par planche (photo originale).

A.2. Irrigation par bassins

Les bassins sont généralement de forme rectangulaire, nivelés et entourés par une digue pour éviter le ruissellement. La mise en eau des bassins est généralement ni dirigée, ni contrôlée et elle peut être efficace si un débit important est disponible pour recouvrir rapidement la parcelle. Elle convient mieux aux sols peu filtrants et aux cultures denses à enracinement profond. Le nivellement de terrain est très important pour obtenir une uniformité et une efficacité élevées pour toutes les techniques d'irrigation de surface. (**Disponible sur le site : <http://www.tpe-agriculture-france-mail.e-monsite.com>**).

A.3. Irrigation par sillons / à la raie

Les sillons sont des petites rigoles en terre, aménagées dans le sens de la pente du terrain (Figure III.12) pour transporter l'eau entre les rangées de cultures. L'eau s'infiltré dans le sol, principalement par les côtés du sillon, tout le long de son trajet dans le sens de la pente du terrain.



Figure III.12 : Irrigation par sillons (photo originale).

B. Avantages de l'irrigation gravitaire

L'irrigation gravitaire présente les avantages suivants :

- Bonne adaptation à l'épandage d'eaux usées.
- Coût d'investissement relativement faible.
- Besoins en énergie faibles ou nuls.
- Insensibilité du vent.
- Possibilité d'utilisation d'eaux salées.
- Possibilité de faire le lessivage pour éviter ou traiter les problèmes de la salinité.

C. Inconvénients

L'irrigation par aspersion comporte aussi quelques inconvénient, dont :

- Efficience d'arrosage à la parcelle généralement faible.
- Inadaptation aux sols très filtrants.
- Besoins importants en main d'œuvre.
- Tassement du sol.
- Cette méthode n'est jamais utilisée dans les terrains qui n'ont pas le même niveau

III.6.3.2. Irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion est une technique qui consiste à amener l'eau sur le sol sous forme de pluie (Mouhouche, 2004). Cette technique requiert obligatoirement une mise en pression préalable d'eau. Ce mode d'irrigation a vu se développer différents types de matériel d'aspersion, à commencer par les couvertures totales puis intégrales les rampes pivotantes et frontales, enfin les enrouleurs avec canon asperseur.

L'irrigation par aspersion s'est rapidement développée après la seconde guerre mondiale, notamment en Europe et aux Etats-Unis avec les améliorations techniques de rendement et de la baisse de coûts (Figure III.13).

L'irrigation par aspersion est recommandée dans les cas suivants :

- Sols de faible profondeur, ne pouvant être correctement nivelés pour une irrigation de surface, tout en conservant une profondeur suffisante.
- Sols trop perméables, qui ne permettent pas une répartition uniforme de l'eau dans cadre d'une irrigation avec ruissellement en surface.
- Terrains à pente irrégulière avec microrelief accidenté, ne permettant pas l'établissement d'une desserte gravitaire à surface libre.



Figure III.13 : Irrigation par aspersion.

A. Types d'irrigation par aspersion

A.1. Irrigation par l'enrouleur

Les enrouleurs sont des machines d'irrigation à tambour et à tuyau flexible. Ils sont actuellement désignés par "enrouleurs" à cause de leur principe de fonctionnement. En effet, le porte asperseur est placé à l'une des extrémités du flexible et l'autre extrémité est fixée sur le tambour sur lequel il s'enroule. Ainsi, l'irrigation s'effectue peu à peu sur une bande en tirant le porte asperseur. L'enrouleur peut également fonctionner avec une rampe. Le débit peut atteindre 50 m³/h et la portée du jet de l'asperseur peut dépasser 100 m de rayon.



Figure III.14: Enrouleurs utilisation et entretien du système de pompage.

Les éléments essentiels à considérer pour le choix et le dimensionnement des équipements d'une installation d'arrosage par enrouleur sont :

- Le débit d'équipement.
- La longueur du tuyau flexible de l'enrouleur.
- La pression minimale à l'entrée de la parcelle.

A.2. Irrigation par pivot (rampe pivotante ; rampe frontale)

Les systèmes de rampe pivotante et de rampe frontale sont des installations utilisées essentiellement dans les grandes exploitations (Figure III.15 et Figure III.16). Elles possèdent un mécanisme d'entraînement programmable qui sert à déplacer les éléments. Le

système de rampe pivotante est constitué d'une conduite avec arroseurs, supportée à l'une de ses extrémités par une tour à pivot central, une série de tours munies de roues et un moteur électrique (ou hydraulique). La conduite peut mesurer de 100 à 500m, pouvant irriguer jusqu'à 75ha. L'ensemble permet d'irriguer une surface circulaire, mais nécessite un capital d'investissement élevé. Les débits sont de l'ordre de 250 à 850m³/h pour une pression de 6 bars.

- Le système de rampe frontale diffère de la rampe pivotante par le fait que tous les tours sont mobiles et le déplacement se fait latéralement. L'alimentation en eau se fait soit par un fossé creusé au milieu ou au bord du champ, soit par un tuyau flexible. Il nécessite un investissement aussi important sinon supérieur à celui du système à rampe pivotante. La consommation énergétique de ces deux systèmes est élevée.
- Les autres types d'installations sont: l'aile traînée ou remorquée, bras tournant ou arroseur géant, et le canon automoteur (machine automotrice d'irrigation à tuyau flexible: enrouleurs) (Aouata, 2015).



Figure III.15 : Pivot (rampes pivotante) (photo originale).



Figure III.16 : Pivot (rampes frontales) (photo originale).

B. Avantages de l'irrigation par aspersion

Il y a plusieurs avantages de l'irrigation par aspersion:

- Facilité de mesure des consommations d'eau.
- Plus facile à déplacer d'une culture à l'autre.
- Permet l'irrigation sur grandes surfaces facilement.
- Économie à long terme (pas des tuyaux à acheter fréquemment).

C. Inconvénients de l'irrigation par aspersion

Selon Weill et Duval (2009), les inconvénients d'irrigation par aspersion sont :

- Possible contamination les légumes feuilles.
- Très affecté par le vent.
- Favorise les mauvaises herbes.
- Coût d'investissement élevé.
- Beaucoup de perte d'eau.
- A éviter en cas d'utilisation des eaux salées.

III.6.3.3. Irrigation par goutte à goutte

L'irrigation par goutte à goutte ou irrigation localisée est l'ensemble d'apport d'eau localisé au voisinage des racines des plantes, avec des doses réduites mais à fréquences élevées. Dans son principe l'irrigation goutte à goutte n'est en fait qu'une amélioration des techniques traditionnelles.

Cette technique est une méthode perspective d'irrigation des cultures agricoles. Selon Mathieu et *al.* (2007), elle consiste à délivrer l'eau en goutte à la surface de sol. L'eau est canalisée dans des tuyaux en plastique munis d'orifices appelés goutteurs (Figure III.17).



Figure III.17: Irrigation par goutte à goutte (localisée) (Mathieu et al. , 2007).

A. Avantages de l'irrigation goutte à goutte

Ce mode d'irrigation présente les avantages suivant :

- Bonne adaptation à tous les types de sols.
- Automatisation très poussée permise par le réseau sous pression.
- Suppression des surfaces perdues en canaux et rigoles.
- Économie d'eau par rapport les autres systèmes d'irrigation.
- Facilité de mesures des consommations d'eau, permettant la facturation du volume.
- Possibilité de mélanger facilement des engrais et pesticides à l'eau d'irrigation.

B. Inconvénients de l'irrigation goutte à goutte

Ce système d'irrigation présente aussi les inconvénients suivants :

- Coûts d'investissement élevés.
- Exigence d'un certain niveau de compétence de la part de l'irrigant.
- Exigence d'un environnement technique permettant de garantir la maintenance des équipements.
- Obturation des goutteurs.

III.6.4. Systèmes d'irrigation dans le monde, en Algérie et à Biskra

III.6.4.1. Irrigation dans le monde

La consommation d'eau agricole est très variable d'un pays à l'autre. Elle n'intéresse que 273 millions d'hectares dans le monde éparpillés très irrégulièrement sur tous les

continents. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les pays qui irriguent le plus ne sont pas les pays au climat aride ou semi-aride.

Dans ces régions, en effet, il ne peut y avoir de culture sans irrigation. Aussi, toutes les surfaces cultivées demeurent réduites en superficie, limitées par la faiblesse de ressources en eau, et localisées là où ces ressources sont disponibles, c'est le cas de pays comme l'Égypte par exemple où l'agriculture s'est développée sur les bords du Nil, ou de certains pays de l'Amérique latine comme le Mexique.

À l'inverse, dans les régions qui reçoivent suffisamment d'eau de pluie, la superficie des terres cultivées peut être très importante, surtout si le relief le permet. Bien que l'irrigation n'y soit pas indispensable, elle est néanmoins utilisée et ce d'autant plus facilement que l'eau est disponible, afin de diversifier et d'améliorer les cultures, d'obtenir des récoltes multiples, Ou encore d'augmenter les rendements. Même si elle n'est pas systématique, l'irrigation peut donc être conséquente. C'est ce qui se passe au Japon, en Chine, en Inde et en Pakistan (Milos, 1971).

Les besoins alimentaires nécessitent une expansion de la superficie irriguée, estime la FAO, de 202 millions d'hectares entre 1997 et 1999 à 242 millions en 2030 (FAO, 2004)

Les superficies irriguées utilisent 1500Km³ d'eau. Les plus vastes sont indiquées dans le Tableau III.4. Les pays où les superficies irriguées sont les plus vastes, les techniques d'irrigation sont dominées par l'archaïsme. Ces pays (Chine, Inde et Pakistan) totalisent à eux seuls 58% des terres irriguées dans le monde.

Tableau III.4 : Superficies irriguées dans le monde.

Pays	Superficies irriguées (MHa)	%
Chine	76	28,8
Inde	4	16,2
Europe	4	12
Autre pays	31	11,2
USA	30	9,6
Moyen Orient et Afrique. Nord	25	8,7
Pakistan	23	5,8
Amérique latine et Caraïbe	15	5,4
Afrique subsaharienne	14	2,3
Total	264	100

(Source : Zella, 2007).

III.6.4.2. Système d'irrigation en Algérie

L'Algérie couvre une superficie de 2381740 Km², dont approximativement, 2124300 Km² de désert. Le Nord, zone potentiellement agricole couvre 257440 Km² et se situe dans les étages climatiques subhumide à semi arides. Les superficies irriguées s'élèvent à 498.430 ha soit 6,64% de la SAU et les terres irrigable à 1.154.000 ha (hors Sahara) dont 607.000 ha facilement irrigables et 547.000 ha irrigable moyennant des travaux. Les superficies concernées par la grande hydraulique, essentiellement les périmètres irrigués varient entre 50.000 et 90.000 ha.

Par ailleurs, sur total de 498.430 ha irrigué, les quatre wilayas du Sud s'accaparent 30% de la SAU irriguée. La wilaya de Biskra occupe la première place avec 13,24 %, suivi de la wilaya de M'sila avec 5,64% puis la wilaya d'Adrar avec 5,54% et celle d'El Oued avec 5,3%. Ce sont particulièrement ces zones d'irrigation qui nécessitent une rénovation de leur technique d'irrigation sachant que l'agriculture pluviale est quasi impossible. (Chabaca, 2007).

L'Algérie est divisée en 4 régions géographiques, l'Est, le Centre, l'Ouest et le Sud. La répartition de la superficie irriguée selon les régions et les modes d'irrigation est indiquée au Tableau III.5. Elle montre l'importance des surfaces irriguées dans la région est par rapport au centre et surtout à l'Ouest. Le sud vient en deuxième position après l'Est, notamment grâce aux zones de mise en valeur des terres.

Tableau III.5 : Modes d'irrigation par région en Algérie.

	Est	Centre	Ouest	Sahara	Total	%
Aspersion	32026	12625	20282	21054	85987	25.45
Localisé	42272	11523	22708	6672	38175	24.60
Gravitaire	66801	19232	14077	68777	168887	49.95
Total	141099	43380	57067	69503	338049	

(Source : Chabaca, 2007).

III.6.4.3. Systèmes d'irrigation dans la wilaya de Biskra

La wilaya de Biskra est un pôle agricole le plus important dans le développement de l'agriculture Algérienne. D'où sa surface global est de 2.150.979.00 ha et la superficie agricole utile est de 185.473.80 ha (Direction de l'Hydraulique Agricole, 2018).

Il y a plusieurs systèmes d'irrigation dans la wilaya de Biskra. Le Tableau III.6, montre que l'irrigation qui utilise les forages occupe la plus grande superficie.

Tableau III.6: Répartition de la superficie irriguée par nature de ressource en eau.

Source	Nombre	Superficie (ha)
À partir des forages	13.677 dont 351 forages publics.	84.955.00
À partir des puits	3.573	11.989.00
À partir des prises au fil de l'eau	70	3.722.00

(Source : Direction de l'Hydraulique Agricole, 2018).

Concernant les systèmes d'irrigation les plus utilisés à Biskra, le Tableau III.7 montre que l'agriculture dans la wilaya de Biskra est basée essentiellement sur l'irrigation gravitaire suivi par l'irrigation goutte à goutte.

Tableau III.7: Répartition de la superficie irriguée par systèmes d'irrigation

Système d'irrigation	Superficie irriguée (ha)
Gravitaire	66.807.00
Aspersion	2.525.00
Goutte à goutte	31.347.00

(Source : Direction de l'Hydraulique Agricole, 2018.)

III.7. pompage de l'eau dans les régions arides

Dans les régions arides et sahariennes, il arrive que certains villages soient situés de telle façon que leur approvisionnement en eau se fasse entièrement par gravité, à partir des sources ou de systèmes de galeries et puis souterraine (foggara). Mais dans certains villages et certaines fermes isolées ; il est indispensable d'utiliser des pompes pour extraire l'eau des puits, des forages, des réservoirs ou pour assurer sa circulation dans les conduites de distribution et l'irrigation des terres (Ammar, 2017).

À ce jour, nous distinguons plusieurs techniques de pompage d'eau à savoir :

- Le Pompage manuel ;
- Le Pompage d'eau par groupe électrogène au diesel.
- Pompage d'eau par le réseau (électropompes).

- Le pompage éolien.
- Le pompage solaire photovoltaïque.
- Le pompage hybride.

III.7.1. Pompages manuel

La plus courante des pompes de ce type est la pompe à main alternative ; l'eau est muée par la poussée directe d'un piston, d'un plongeur ou d'une cuvette se déplaçant dans un cylindre vertical ou horizontal fermé. Par un jeu de soupapes, le mouvement alternatif du piston produit un courant d'eau plus ou moins régulier, à sens unique.

Dans le type le plus simple, le piston, dans un sens, pousse l'eau du cylindre vers une conduite de refoulement, pendant que derrière lui le cylindre se remplit d'eau arrivant par le tuyau d'aspiration ; le retour du piston en sens contraire fait passer vers le côté de refoulement l'eau qui se trouvait du côté de l'aspiration par rapport au piston (Ammar, 2017). Il existe deux types de pompes manuelles (pompe à main alternative et pompe à main semi-rotative) :

III.7.1.1. Pompe à main alternative

Ce type de pompe est utilisable sur des puits de toutes profondeurs (Figure III.18). Si le niveau statique de l'eau souterraine est à moins de 5 m au-dessous de la surface du sol, le corps de pompe est, en général, placé à la surface ; s'il est à plus de 5m le corps de pompe est fixé à un tuyau de descente et placé dans le puits (Bossmann, 2005 cité par Ammar, 2017).

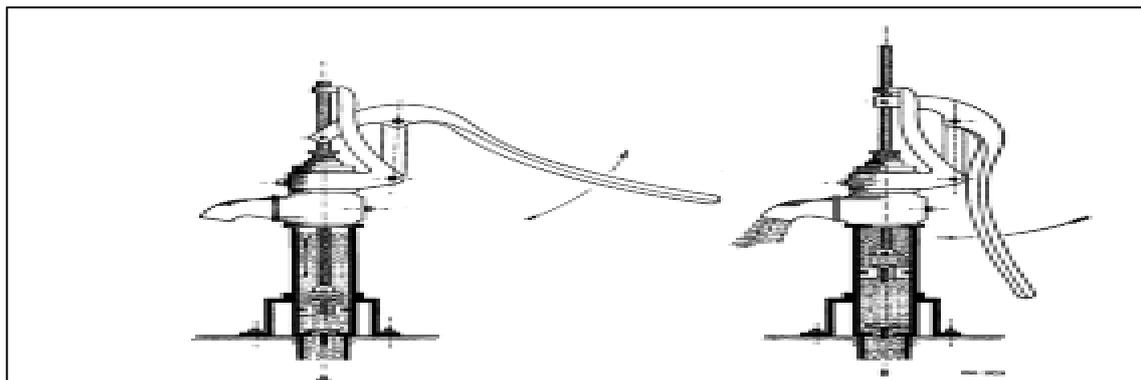


Figure III.18 : Pompe à main alternatif (Fraenkel, 1994).

III.7.1.2. Pompes à main semi-rotatives

La pompe semi-rotative, à double ou à quadruple est souvent employée dans les installations particulières des régions rurales, n'exigeant qu'une faible élévation de l'eau provenant de puits, de citernes et de réservoirs souterrains jusqu'à des réservoirs en charge. La figure ci-dessous montre le fonctionnement d'une pompe semi-rotative à double effet. Dépourvues de clapet de pied, ces pompes ne conviennent que pour des colonnes d'aspiration très courtes. L'adaptation d'un clapet de pied et d'une crépine à l'extrémité du tuyau d'aspiration permet de pomper l'eau à 6m de profondeur. Le débit dépend du nombre de balancements par minute (Fraenkel, 1994).

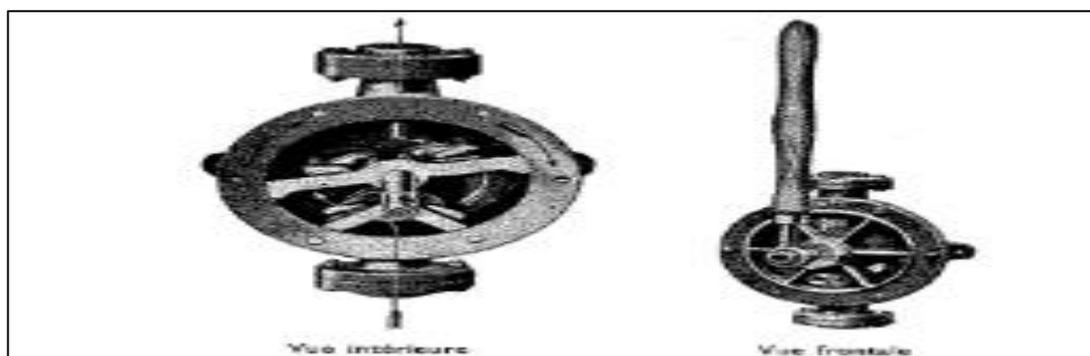


Figure III.19 : Pompe à main semi-rotative (Fraenkel, 1994).

III.7.2. Pompage d'eau par groupe électrogène au diesel

Dans les régions où il n'y a pas encore une alimentation en énergie électrique, la source principale d'énergie est le moteur à combustion interne sous ses deux types, le moteur

à essence à allumage par étincelle, et le moteur diesel à allumage par compression (Fraenkel, 1994).

Les moteurs à essence sont principalement utilisés pour les applications portables, qui peuvent être malmenées et montées sur une remorque. La vitesse de rotation est réglable et sa gamme utile disponible dépend de la caractéristique de couple de la pompe. Les petits moteurs peuvent fonctionner jusqu'à 5000/6000tr/min, les gros moteurs à 3000tr/min. Une grande variété de taille est disponible, jusqu'à 150kW (Nesbitt, 2006 cité par Ammar, 2017).

Les moteurs diesel sont utilisés pour les installations fixes ainsi que des machines portables. Ils sont utilisés sur des sites où de l'électricité ne sont pas disponibles ou ne sont pas capables de supporter la charge de la pompe. La vitesse disponible à partir de moteurs diesel est plus faible ; petits moteurs environ 3000tr/min, les grands moteurs vers le bas à 600tr/min. Les petits moteurs diesel de 5kW sont disponibles, les grandes installations fixes utilisent des moteurs jusqu'à 5MW (Ammar, 2017).

Dans certains cas, on peut être amené à installer des pompes directement actionnées par un moteur thermique (essence ou diesel) (Figure III.20).

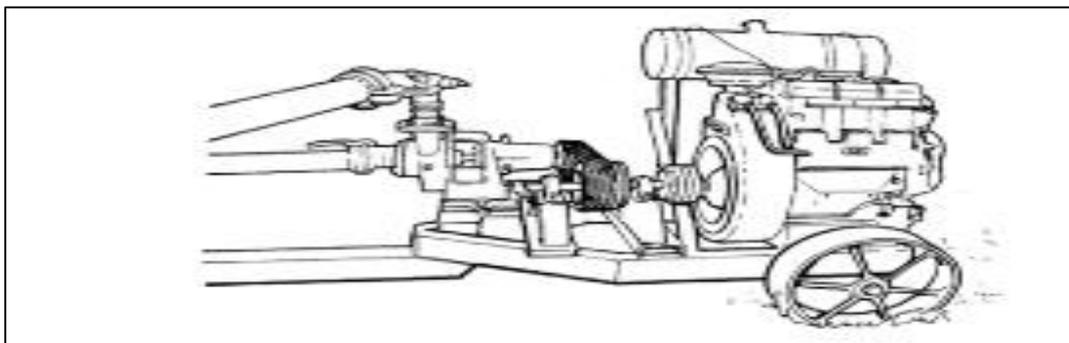


Figure III.20 : Moteur diesel à entraînement par courroie, accouplé à une pompe centrifuge (Fraenkel, 1994).

III.7.3. Pompage d'eau par le réseau

La puissance du réseau est une source d'énergie centralisée qui peut être générée à partir de l'hydro-électricité, générateur nucléaire, géothermique, diesel, charbon, gaz, biomasse, et d'autres sources d'énergies renouvelables. Le charbon, l'hydro-électricité, le géothermique, le gaz et l'énergie nucléaire sont généralement les plus utilisés. Un obstacle

majeur pour les sources d'énergie centralisées du réseau dans beaucoup de pays en voie de développement est le manque d'infrastructure. Le coût d'extension du réseau est très élevé 5 000\$-10 000\$/km (Argaw, 2003)

Il y a deux principaux avantages d'utilisation des sources d'énergie du réseau pour pomper l'eau : il n'y a aucun besoin de batteries d'accumulateurs, et l'alimentation d'énergie peut être fiable à moins qu'il y ait des problèmes de production de coupure ou de fluctuation. Les coûts de maintenance sont habituellement très faibles tant que le système est conçu correctement (Ammar, 2017).

Le moteur et la pompe devraient être correctement adaptés et un contrôleur pour réguler parfaitement les fluctuations de la tension. Un système de contrôle intégré de niveau d'eau doit être installé pour commander le fonctionnement à sec de la pompe. Les charges d'investissement de tels systèmes dépendent du coût d'extension du réseau et de la taille du transformateur utilisé. Habituellement la puissance des lignes de transport d'énergie à haute tension du réseau n'est pas utilisée pour de petits systèmes de pompage parce que le transformateur abaisseur est cher. Les frais d'exploitation dépendent principalement des tarifs de l'électricité contribuant aux coûts de pompage.

Un autre avantage à l'utilisation de l'énergie du réseau pour des applications de pompage de l'eau est qu'il n'y a pas besoin d'espace supplémentaire autre qu'une petite chambre pour le boîtier de commande (Argaw et *al.*, 2003).

III.7.4. Pompage éolien

Un système éolien ou avec un autre terme un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique (Gülich, 2008).

La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines (Lopez, 2008).

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire (Gülich, 2008).

On peut aisément classer les éoliennes en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal (Gülich, 2008).

A. Système à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité car elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles (Gülich, 2008).

B. Système à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent (Gülich, 2008). Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères.

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal (Frenkel, 1994).

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Quant aux éoliennes à marche rapide, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente, elles sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique (Figure III.21).

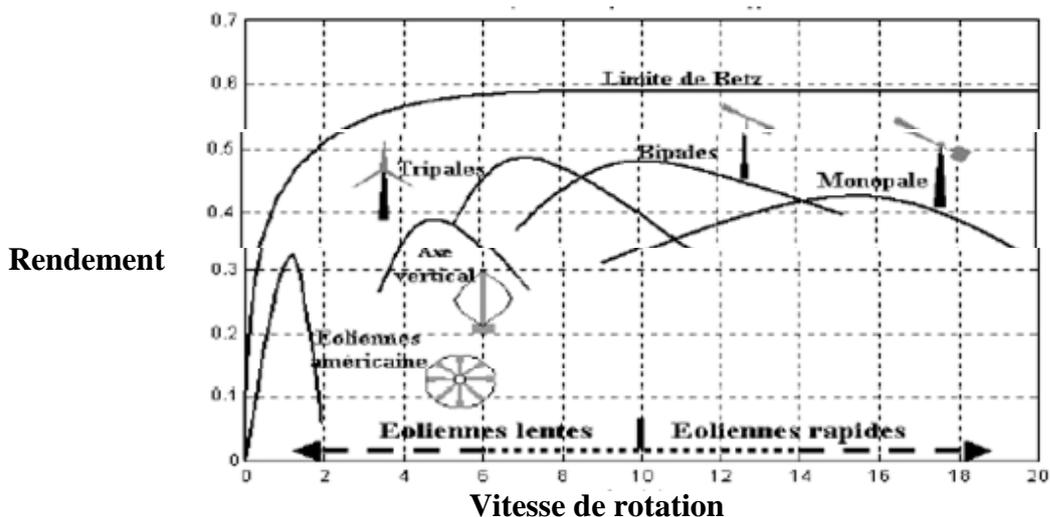


Figure III.21 : Le rendement des différentes éoliennes (Frenkel, 1994).

III.7.5. Pompage par énergie solaire photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire par voie photovoltaïque est l'une des meilleures façons de récolter l'énergie solaire. Un système de pompage est composé de panneaux photovoltaïques, pompe et moteur (Figure III.22). En fonction du système adopté, des batteries de stockages, un contrôleur de charge peut être envisagé. Si le moteur de la pompe choisie marche avec un courant alternatif, il est recommandé d'installer un convertisseur (DC-AC) du courant continu vers le courant alternatif (Frenkel, 1994).

Les systèmes de pompage photovoltaïques sans batterie de stockage ont l'avantage d'être moins coûteux ce qui nécessite moins d'entretien par rapport aux systèmes avec batterie. Cependant, les batteries de stockage ont l'avantage de fournir une performance constante pendant les heures hors ensoleillement. L'ajout d'un réservoir de stockage d'eau dans les systèmes de pompage photovoltaïques est plus économique que les systèmes avec batterie (Ammar, 2017).

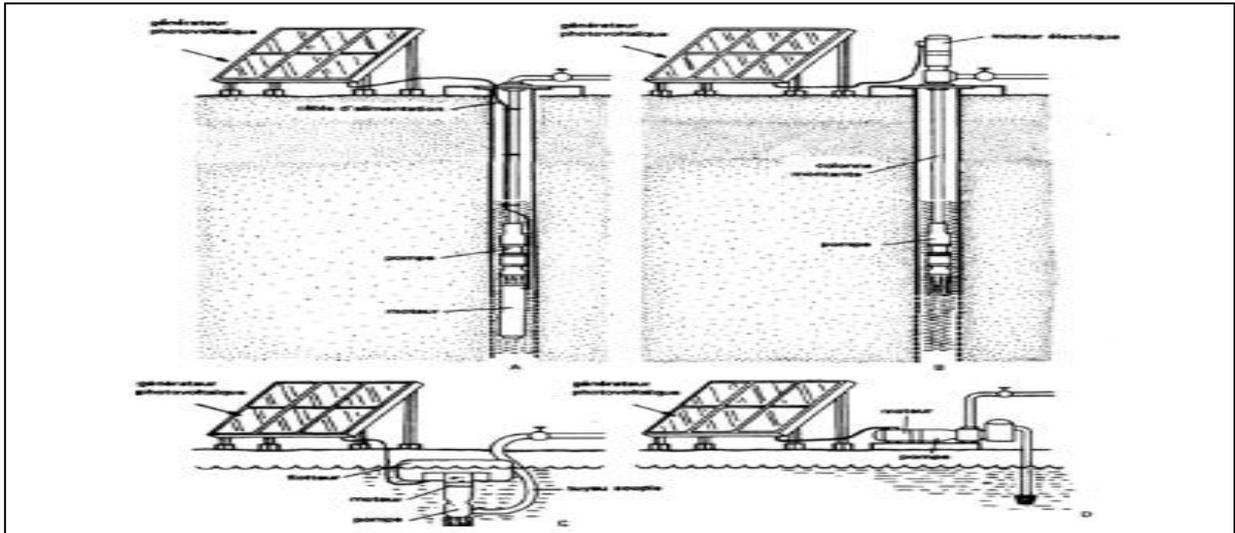


Figure III.22 : Exemple d'installation de pompes solaires (Frenkel, 1994)

A. groupe motopompe immergé B. pompe immergée avec moteur en surface

C. groupe motopompe flottant D. moteur et pompe installés en surface

III.8. Conclusion

Différents systèmes de pompage de l'eau de l'archaïque au moderne sont présentés dans ce chapitre. Ces systèmes peuvent être applicables surtout dans les zones arides et semi-arides.

Les superficies irriguées en Algérie durant les années 2016 /2017 sont de 1.36 million d'hectares (DSA, 2018), ce chiffre est très faible par rapport à la capacité agricole ce pays. De ce fait, le gouvernement Algérien encourage les programmes d'énergie renouvelable surtout dans le domaine agricole pour pomper l'eau d'irrigation.

L'utilisation d'énergie renouvelable dans l'irrigation en Algérie est principalement le pompage solaire et éolien.

La wilaya de Biskra comme une région agricole au sud d'Algérie elle utilise l'énergie renouvelable pour l'irrigation comme le pompage solaire et éolienne.

Le choix de la technologie doit tenir compte des critères suivants : capacité de pompage (débit et puissance) la friabilité et la Security.

Deuxième partie:
Application

Chapitre IV:
Méthodes d'optimisation

IV.1. Introduction

Les énergies solaires sont prometteuses pour le pompage d'eau et l'irrigation des cultures, dans les régions agricoles du sud algérien comme la wilaya d'Oued Souf, Biskra, Adrar où l'agriculture connaît un regain d'intérêt (Bouzidi, 1999). Dans ces milieux où il existe un manque en électricité, beaucoup de forage d'eau sont demandés, et un important ensoleillement et des vents sont disponibles toute l'année (Kendouci et *al.*, 2013, Bentouba et Bourouis, 2016). En effet la wilaya de Biskra dispose de tous ces critères pour lancer un programme des énergies renouvelables en irrigation des cultures.

L'optimisation consiste à définir un modèle mathématique qui permet de décrire le comportement théorique d'un système quelconque et ses performances dépendent de son aptitude à le faire d'une manière la plus réaliste et la plus précise que possible (El Khashab et Al Ghamedi, 2015).

Ainsi, dans cette partie, nous allons présenter les systèmes de pompage photovoltaïque autonome et Le pompage éolien autonome et les différentes formules de modélisation du système de pompage hybride globale

IV.2. Applications des systèmes à énergie renouvelable au pompage de l'eau

IV.2.1. Systèmes de pompage photovoltaïque autonome

L'utilisation du photovoltaïque comme source d'énergie pour le pompage d'eau est considérée comme l'un des domaines les plus prometteurs pour l'application de l'énergie solaire. Les systèmes photovoltaïques de pompage d'eau exigent seulement qu'il y ait suffisamment de soleil.

Les systèmes de pompage photovoltaïques autonomes sont particulièrement appropriés à l'approvisionnement en eau dans des régions isolées où l'électricité n'est pas disponible.

IV.2.1.1. Pompage au fils du soleil

Il s'agit de pomper l'eau tant que le soleil est présent vers un réservoir, ce dernier fonctionne comme régulateur de la consommation. La pompe solaire est branchée directement sur les panneaux solaires par l'intermédiaire d'un régulateur ou d'un convertisseur. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable, directement fonction du rayonnement solaire, d'où l'expression « au fil du soleil » (Labouret et Villos, 2009) (figure IV.1). L'eau pompée peut être employée dans beaucoup d'applications telles que l'utilisation domestique et l'irrigation. Ce sont les systèmes de pompage photovoltaïques les plus économiques (Ammar *et al.*, 2012).

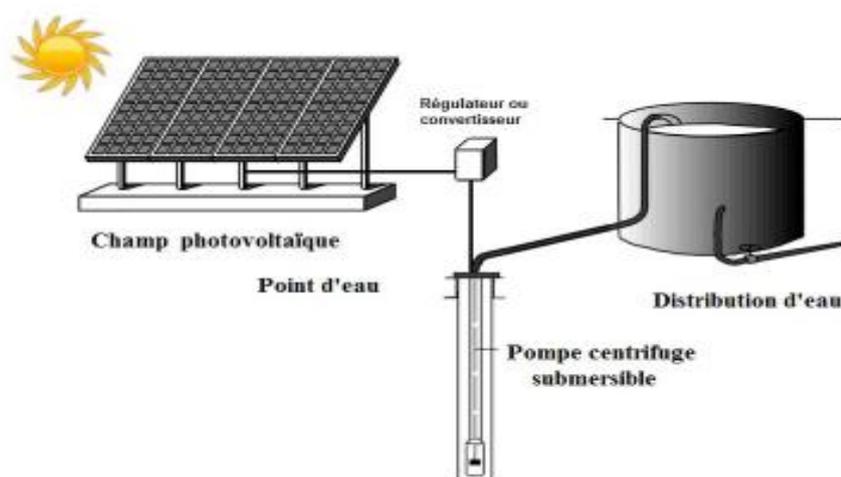


Figure IV.1 : Système de pompage au fils du soleil (Fraenkel, 1994).

IV.2.1.2. Le pompage photovoltaïque autonome avec batterie

Le pompage photovoltaïque autonome avec batterie est représenté dans la Figure IV.2. C'est la configuration la plus courante des systèmes de pompage photovoltaïques car dans ce système, une batterie est connectée aux bornes du générateur photovoltaïque et le moteur à courant continu fonctionne à une tension à peu près constante, et par conséquent, le moteur à courant continu est exploité à proximité de son point de fonctionnement optimal (Betka, 2005).

Ce système présente deux avantages par rapport au système au fil du soleil :

- L'eau peut être pompée jour et nuit, donc le débit d'eau est plus grand.
- Le moteur à courant continu fonctionne à son point de fonctionnement optimal, et par conséquent, l'efficacité du système est améliorée.

Un inconvénient majeur d'un tel système est le coût d'un système supplémentaire et le manque de fiabilité dû à la batterie (Labouret et Viloz, 2009).

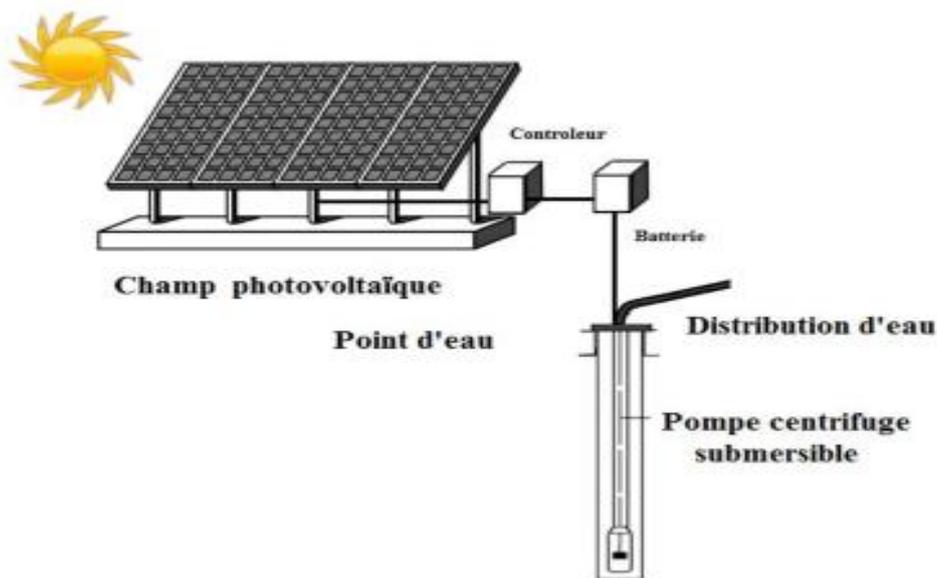


Figure IV.2 : Système de pompage photovoltaïque autonome avec batterie (Fraenkel, 1994).

D'autres systèmes peuvent exister en fonction de la nature du régulateur ou de convertisseur ces derniers dépendent du type de moteur utilisé :

- Si le moteur utilisé est un moteur à courant continu (DC) le convertisseur sera un système avec poursuite de point maximal (MPPT) ;
- Si le moteur utilisé est un moteur à courant alternatif (AC) le convertisseur sera un onduleur (Fraenkel, 1994).

IV.2.2. Pompage éolien autonome

Plusieurs systèmes de pompage éoliens existent, mais le plus courant est celui dont la configuration est la suivante (figure IV. 3) : un rotor éolien, muni de 2 à 3 pales est couplé à une génératrice alimentant un groupe motopompe. Généralement les deux machines électriques, soit de type asynchrone, alors que la pompe peut être de surface ou submersible.

Pour un site isolé et assez bien venté. L'utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau peut s'avérer indispensable et très compétitive par rapport à d'autres sources d'énergie (Adouane, 2014).

Du point de vue du taux d'accroissement des performances ainsi que la diversification des configurations des solutions électriques, le système de pompage électrique se montre plus utilisé, et surtout dans les puits profonds à grand débit (Guettaf, 2013).

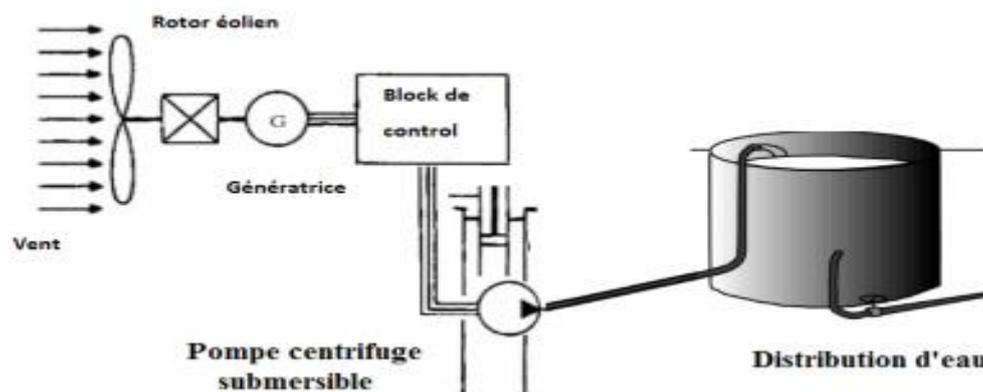


Figure IV.3 : Système de pompage éolien autonome (Fraenkel, 1994).

IV.2.3. Pompage autonome hybride

Une des limites d'un système autonome purement photovoltaïque, est qu'il fournit une puissance donnée, variable selon la saison, mais que l'on ne peut pas dépasser, au risque de détruire la batterie par décharge profonde. Or, le profil de consommation qui dépend de l'application de pompage et pas forcément en phase avec les saisons (Labouret et Villos, 2009).

Avoir un système hybride, c'est disposer d'une autre source d'électricité autonome qui vient compléter l'apport photovoltaïque. Les systèmes hybrides peuvent être une combinaison des technologies d'énergies renouvelables (principalement vent et solaire) et des systèmes conventionnels tels que le diesel, et les batteries d'accumulateurs.

La combinaison des systèmes renouvelables avec la puissance du réseau pour un système de pompage de l'eau n'est pas habituellement la meilleure option (excepté comme des démonstrations) parce que la puissance du réseau est habituellement fiable et l'option « meilleur marché » pour des applications de pompage de l'eau. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides de production d'électricité PV, éolien, et diesel sont utilisés pour le pompage de l'eau et deviennent plus attrayants pour des applications autonomes (Argaw *et al.*, 2003).

Pendant que les technologies éoliennes et PV avancent, les systèmes hybrides deviennent plus prometteurs et meilleur marché que les systèmes autonomes éoliens ou PV.

Les systèmes hybrides peuvent ainsi fournir une source d'énergie fiable pour une communauté entière dans beaucoup de pays en voie de développement.

Les systèmes hybrides possibles pour des applications autonomes de pompage de l'eau sont :

- Système de pompage hybride photovoltaïque-éolien.
- Système de pompage hybride photovoltaïque-diesel.

IV.2.3.1. Système de pompage hybride photovoltaïque-éolien

Les sources d'énergie (vent et solaire) sont mutuellement indépendantes, les systèmes hybrides photovoltaïques éoliens offrent une plus grande fiabilité pour un système de pompage de l'eau que l'une des technologies éoliens ou PV. Par exemple, en hiver quand l'énergie solaire est faible ou la nuit, assez d'énergie éolienne est habituellement disponible pour compenser (Bouzidi, 2010).

IV.2.3.2. Système de pompage hybride photovoltaïque /diesel

Dans le cas d'un système d'énergie renouvelable, la production d'énergie électrique est réalisée en fonction des ressources (vent, soleil) et non de la demande. Dans le cas des installations autonomes (voir Figure IV.4), il est donc nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels (Fraenkel, 1994).

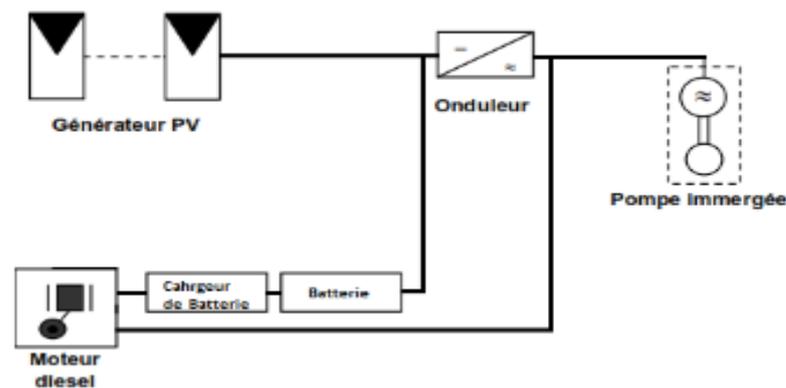


Figure IV.4 : Système de pompage hybride photovoltaïque /diesel (Fraenkel, 1994).

Quand l'approvisionnement en diesel est possible, le groupe électrogène est plus confortable que d'autres sources alternatives, car on y a recours à volonté. Et il permet en outre de recharger la batterie lorsqu'elle est faible.

IV.3. Système de pompage adopté

Le choix d'un système de pompage à énergie renouvelable ou hybride dépend de plusieurs paramètres à tenir en compte à savoir :

- ✓ L'emplacement ou l'endroit de l'application de pompage (zone géographique).
- ✓ Disponibilité de ressources renouvelable (gisement solaire, gisement éolien) et non renouvelable (réseau électrique, diesel).
- ✓ L'éloignement par rapport aux réseaux électriques.

- ✓ Nature et profile de consommation suite au pompage d'eau (AEP, irrigation).
- ✓ Système de pompage existant.

IV.4. Modélisation du système de pompage hybride globale

IV.4.1. Modélisation de l'irradiation Solaire

IV.4.1.1. Mouvement de la terre

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont il est l'un des foyers. La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé l'équateur. (Figure IV.5) (Bouden, 2008).

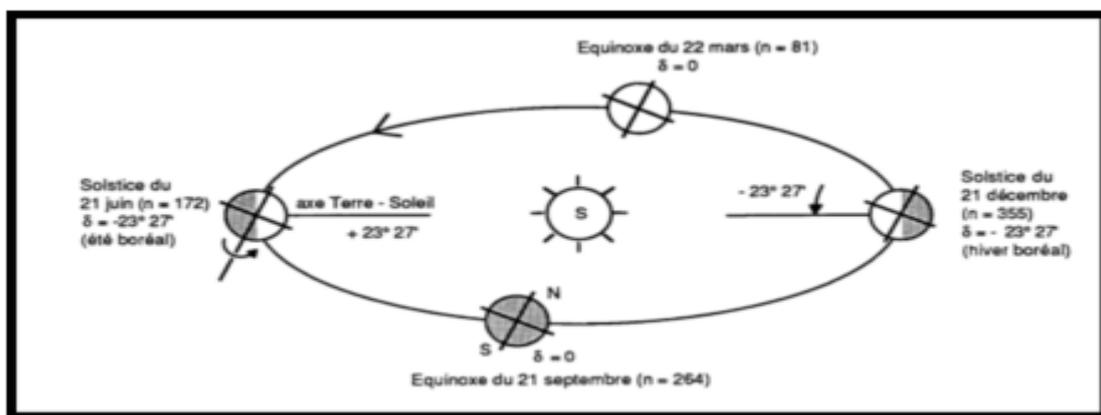


Figure IV.5 : Mouvement de la terre autour du soleil (Hamdani, 2011).

IV.4.1.2 Modélisation des paramètres géométriques et atmosphériques

a) Position du Soleil

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différentes.

b) Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (δ , H) (Figure IV.6).

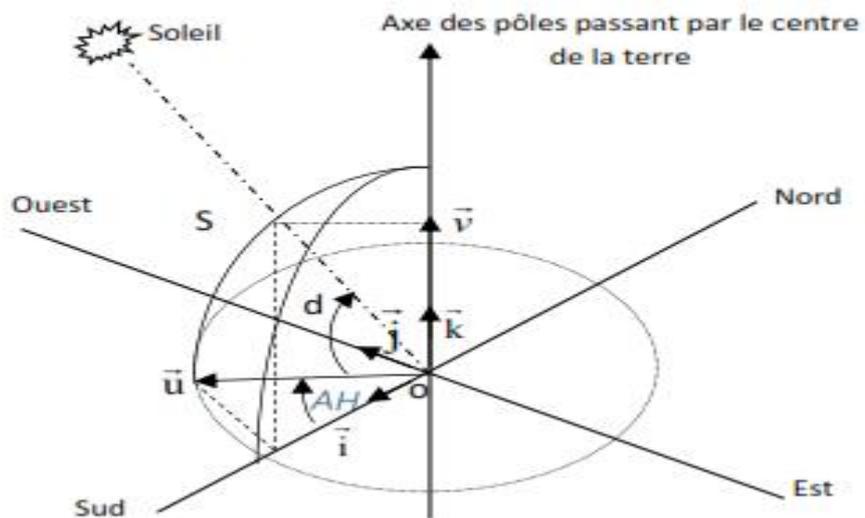


Figure IV.6 : Repère équatorial (Hamdani, 2011).

➤ Déclinaison du soleil

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial.

$$\sin(\delta) = 0.398 \times \sin \left\{ \frac{360}{365} \times (N' - 82) + 2 \sin \left[\frac{360}{365} \right] \times (N' - 2) \right\} \quad (\text{IV.1})$$

La déclinaison varie de $-23^{\circ}27'$ au solstice d'hiver à $+23^{\circ}27'$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes (Chenni, 2007).

➤ Angle horaire du soleil

C'est l'angle compris entre le Méridien origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel.

$$H = 15(TSV - 12) \quad (\text{IV.2})$$

c) Coordonnées horizontales

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et le vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont à la hauteur h et l'azimut (Figure IV.7).

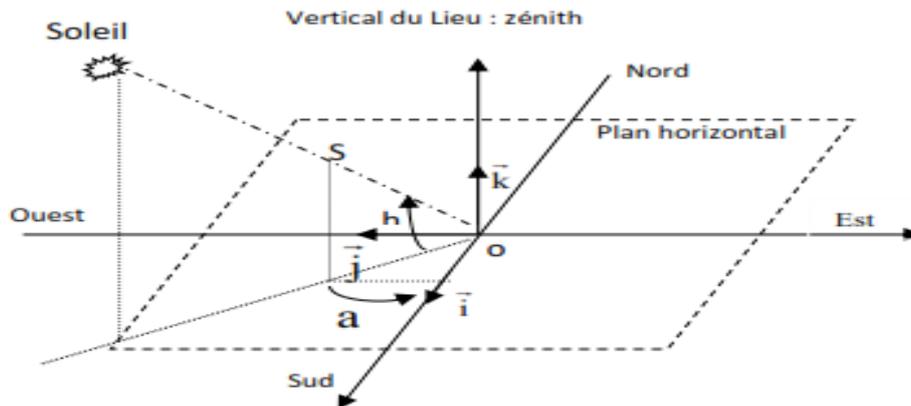


Figure IV.7 : Repère horizontal (Hamdani, 2011).

➤ Hauteur du soleil

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal.

$h = 0$: correspond au lever et au coucher du soleil, la hauteur du soleil varie entre $+90^\circ$ et -90° . La hauteur du soleil a été adoptée par Capderou (Hamdani, 2011).

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(H) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (\text{IV.3})$$

➤ Azimut du soleil

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule (IV.4) pour calculer l'azimut du soleil (Helali, 2013) :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(H)}{\cos(h)} \quad (\text{IV.4})$$

L'azimut est compris entre -180 et 180° .

d) Orientation d'un Plan

Un plan quelconque est défini par deux angles (α , γ).

γ : Hauteur du plan, c'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal.

α : Azimut du plan, c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud. L'inclinaison β du plan par rapport au plan horizontal est donnée par :

$$\beta = 90 - \gamma \quad (\text{IV.5})$$

e) Angle D'incidence sur un Plan

L'angle d'incidence i est l'angle entre la direction du soleil et la normale du plan. Cet angle est déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident et la normale en coordonnées horizontales (Chenni, 2007) :

$$\cos(i) = \sin(\alpha - a) \cos(\gamma) \cos(h) - \sin(\gamma) \sin(h) \quad (\text{IV.6})$$

En coordonnées horaires :

$$\cos(i) = \sin(\alpha) \cos(\gamma) \sin(H) \cos(\delta) + \cos(\alpha) \cos(\gamma) (\cos(H) \cos(\delta) \sin(\emptyset) - \sin(\delta) \cos(\theta)) + \sin(\gamma) (\cos(H) \cos(\delta) \cos(\emptyset) \sin(\delta) \sin(\emptyset)) \quad (\text{IV.7})$$

f) Masse Atmosphérique

On appelle masse d'air m_A la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante (Hamdani, 2011):

$$m_A = \frac{1}{\sin(h) + 9.40 \times 10^{-4} [\sin(h) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (\text{IV.8})$$

En 1989, Kasten et *al.* (Cité par Zeghib, 2005), donnent une expression pour m_A qui est devenue largement utilisée. Le modèle de R.sun utilise cette formule avec une légère correction de la hauteur du soleil.

$$m_A = \frac{p/p_0}{\sin(h_0^{ref}) + 0.50572(h_0^{ref} + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (\text{IV.9})$$

p/p_0 : est la correction de l'altitude Z (m)

$$p/p_0 = \exp\left(-\frac{Z}{8434.5}\right) \quad (\text{IV.10})$$

h_0^{ref} : est l'altitude du soleil corrigée par la composante de la réfraction atmosphérique.

$$h_0^{ref} = h_0 + \Delta h_0^{ref} \quad (\text{IV.11})$$

$$h_0^{ref} = 0.061359 \times (0.1594 + 1.123 \times h_0 + 0.065656 \times h_0^2) / (1 + 28.9344 \times h_0 + 277.3971 \times h_0^2) \quad (\text{IV.12})$$

h_0 : est l'altitude du soleil.

g) Épaisseur Optique de L'atmosphère

Kasten, en 1980 a utilisé les données spectrales publiées par Feussner .Il a proposé aussi l'expression pour δ_R connue sous le nom de "pyrhéliométrique de Kasten", dont la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte (cité par Ammar, 2017).

$$\delta_R = 9.4 + (0.9 \times m_A) \quad (\text{IV.13})$$

IV.4.1.3. Modèle de Capderou

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs des troubles. À partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directe et diffuse par ciel clair (Hamdani, 2011).

a) Éclairement reçu sur un plan horizontal par ciel clair

La connaissance du facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les irradiances par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement direct traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné par :

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (\text{IV.14})$$

T_0 : est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante (Guettaf, 2013):

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varnothing) + 0.1(2 + \sin(\varnothing)) A_{he} - 0.2z - (1.22 + 0.14A_{he})(1 - \sin(h)) \quad (\text{IV.15})$$

$$A_{he} = \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right)(j - 121)\right) \quad (\text{IV.16})$$

z : l'altitude de lieu.

T_1 : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 , et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche :

$$T_1 = 0,89 \times Z \quad (\text{IV.17})$$

T_2 : est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption (il dépend à la fois de la nature et de la quantité des aérosols). En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom β , T_2 est donné par la formule suivante:

$$T_2 = (0,9 + 0.4A_{he})(0.63)^z \quad (\text{IV.18})$$

L'éclairement direct par ciel clair obtenu sur un plan horizontal est donné par :

$$I = I_0 \sin(h) C_{t-s} \exp \left[-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89z} \sin(h) \right)^{-1} \right] \quad (\text{IV.19})$$

L'éclairement diffus incident sur un plan horizontal.

$$a=1.1$$

$$b = \log(T_L^* - T_0) - 2.8 + 1.02(1 - \sin(h))^2 \quad (\text{IV.20})$$

$$D = I_0 C_{t-s} \exp(-1 + 1.06 \log \sin(h)) + a - \sqrt{a^2 + b^2} \quad (\text{IV.21})$$

L'éclairement global reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$G=I+D$$

b) Éclairement global reçu sur un plan incliné

L'éclairement direct est la projection de la composante normale sur un plan incliné.

$$I = I_n \cos(i) = I_0 C_{t-s} \exp \left[-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89z} \sin(h) \right)^{-1} \right] \cos(i) \quad (\text{IV.22})$$

D'où :

I_n : L'éclairement direct normal,

i : l'angle d'incidence

L'éclairement diffus du ciel est composé de trois parties :

La composante directe ou circumpolaire. Elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demi-angle au sommet compris entre 3° et 15°. Elle peut être considérée aussi qu'elle provient directement du soleil.

$$b = \log(T_L^* - T_0) - 2.28 - 0.5 \log(\sin(h)) \quad a = 3.1 - 0.4b \quad (\text{IV.23})$$

$$\delta_d = I_0 C_{t-s} \exp(-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2}) \quad (\text{IV.24})$$

La composante isotrope qui correspond à un ciel de luminance uniforme est la suivante :

$$\delta_i = D - \delta_d \sin(h) \quad (\text{IV.26})$$

Avec : D est le diffus sur un plan horizontal.

La composante du cercle de l'horizon provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6°. Elle est associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques.

$$b = \exp(0.2 + 1.75 \log(\sin(h))) \quad (\text{IV.25})$$

$$a = \log(T_L^* - T_0) - 3.1 - \log(\sin(h)) \quad (\text{IV.26})$$

$$\delta_h = I_0 C_{t-s} \frac{-0.02a}{a^2 + ab + 1.8} \exp(\sin(h)) \quad (\text{IV.27})$$

Le diffus du ciel est l'éclairement diffus incident en provenance du ciel.

$$d_{ciel} = \delta_d \cos(i) + \delta_i \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} + \delta_h \cos(\gamma) \quad (\text{IV.28})$$

L'éclairement diffus du sol est caractérisé par l'albédo du sol qui indique la réflexion de la lumière incidente.

IV.4.1.2. Simulation du rayonnement solaire

La Figure IV.8, représente l'irradiation solaire directe, diffuse et globale sur un plan incliné de 32.28° calculés par le modèle de Capdorou sous matlab. L'irradiation solaire augmente dès le lever du jour pour atteindre un maximum au midi solaire avant de décroître de nouveau jusqu'à s'annuler à la tombée de la nuit.

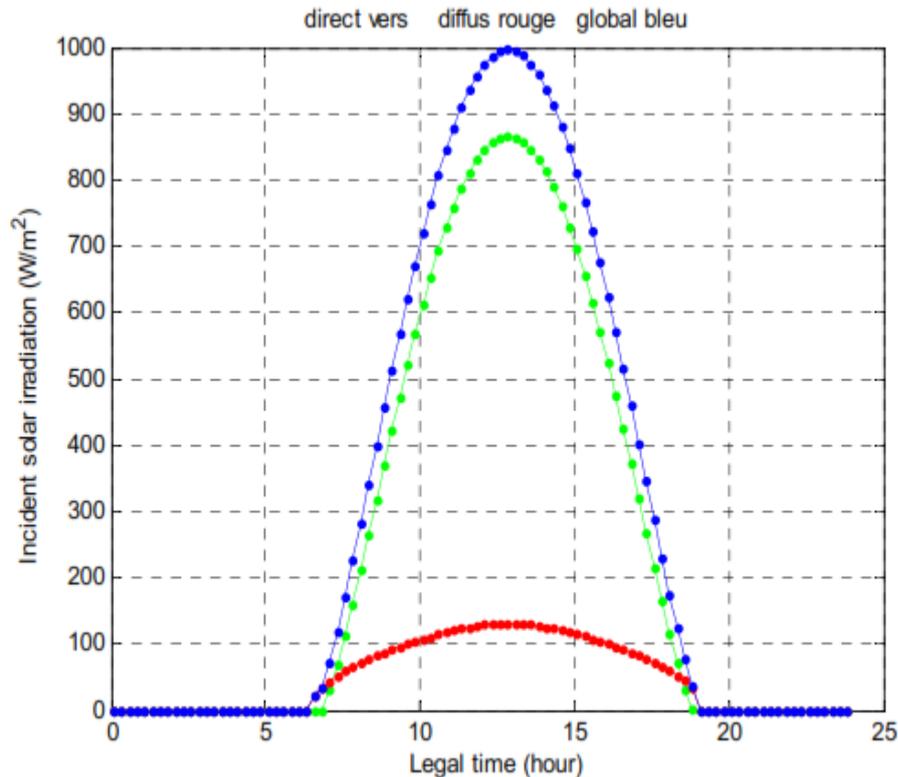


Figure IV.8 : Éclairement direct, diffus et globale sur un plan incliné.

IV.4.2. Modélisation du générateur photovoltaïque

IV.4.2.1. Modèle d'une cellule solaire réelle

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie à savoir : Ekstein (1990, cité par Ammar, 2017) et Duffie et Beckmann (1991) ont employés le modèle à quatre paramètres.

Dans ce qui suit on récapitule les différents modèles électriques des cellules photovoltaïques rencontrées dans la littérature.

a) Modèle à une diode (à une seule exponentielle)

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique (Helali, 2013). La cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant :

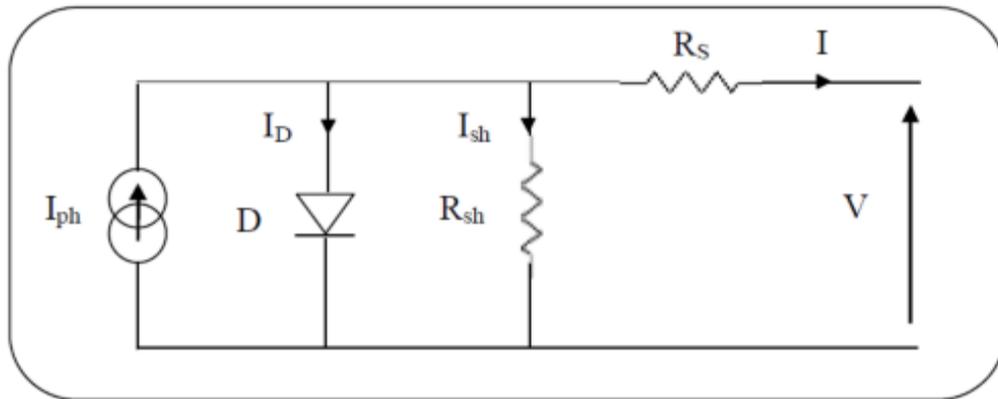


Figure IV.9 : Schéma équivalent d'une cellule solaire (Boukhers ,2016).

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances (série et shunt) (Helali, 2013).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles,
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{IV.29})$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (\text{IV.30})$$

Le courant qui passe dans la résistance Rsh est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{IV.31})$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{AKT}} - 1 \right] - \left(\frac{V+R_S I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{IV.32})$$

Avec :

- A : le facteur d'idéalité de la jonction $1 < A < 3$
- K : constant de Boltzmann ($1,38.10^{-23}$ J/K)
- q : charge de l'électron $\Rightarrow 1,602.10^{-19}$
- T : température de la cellule en degré kelvin
- I_d : courant de la diode
- I_{ph} : photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).
- I_0 : courant de diode, présente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction P - N de la cellule.
- R_S : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi- conducteur, ainsi les résistances ohmiques et contact au niveau des connections des cellules.
- R_{Sh} : résistance shunt représente les fuites autour de la jonction P-N dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

b) Modèle à une diode sans résistance shunt

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode (Helali, 2013).

La Figure 10 illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode

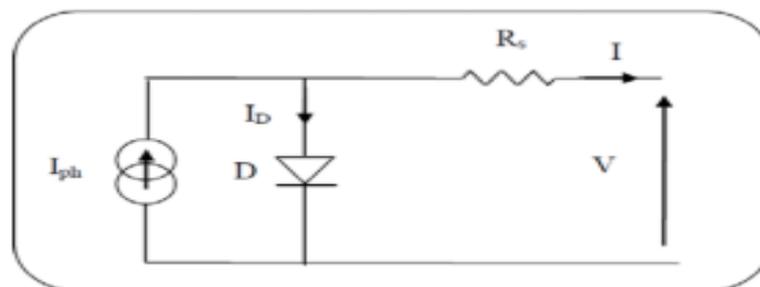


Figure IV.10 : Schéma équivalent à une diode sans résistance shunt (Boukhers , 2016).

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - ID$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (\text{IV.33})$$

c) Modèle à deux diodes (à deux exponentielles)

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant (Figure IV.11), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série (Helali, 2013).

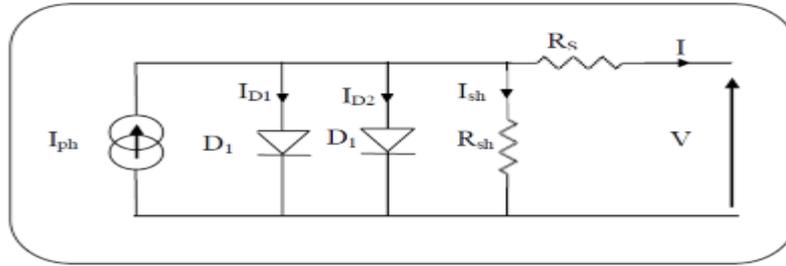


Figure IV.11 : Schéma équivalent à deux diodes (Helali, 2013).

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \quad (\text{IV.34})$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_{D1} = I_{01} \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT}} - 1 \right) \quad (\text{IV.35})$$

$$I_{D2} = I_{02} \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT}} - 1 \right) \quad (\text{IV.36})$$

Avec : I_{01} , I_{02} : courant de saturation des diodes

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{IV.37})$$

d) Modèle à deux diodes sans résistance shunt

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique (Figure IV.12), qui compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la polarisation de la cellule et une résistance série (Helali, 2013).

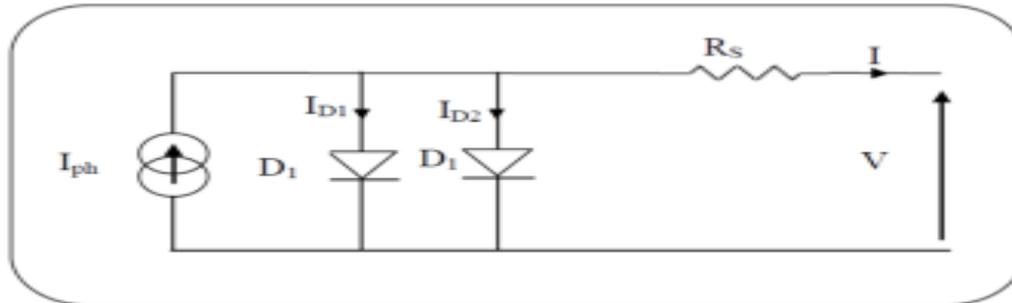


Figure IV.12 : Schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt (Helali, 2013).

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles.

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) \quad \text{(IV.38)}$$

III.4.2.2. Influence de l'ensoleillement et de la température

Le courant produit par la photopile I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire E . Par contre, la tension V aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même (Diaf, 2002). La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec l'éclairement. Ceci implique donc que :

- la puissance optimale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement (Figure IV.13).
- les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension (Figure IV.14).

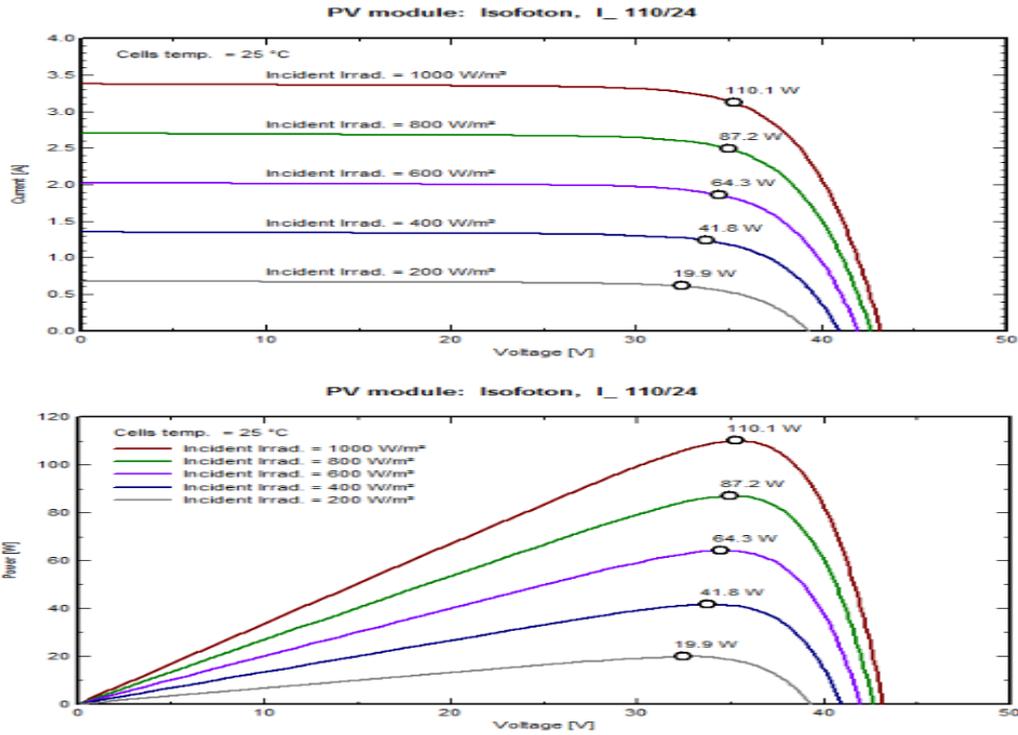


Figure IV.13 : Influence de l'ensoleillement sur les courbes I-V et P-V (module Isoton110w).

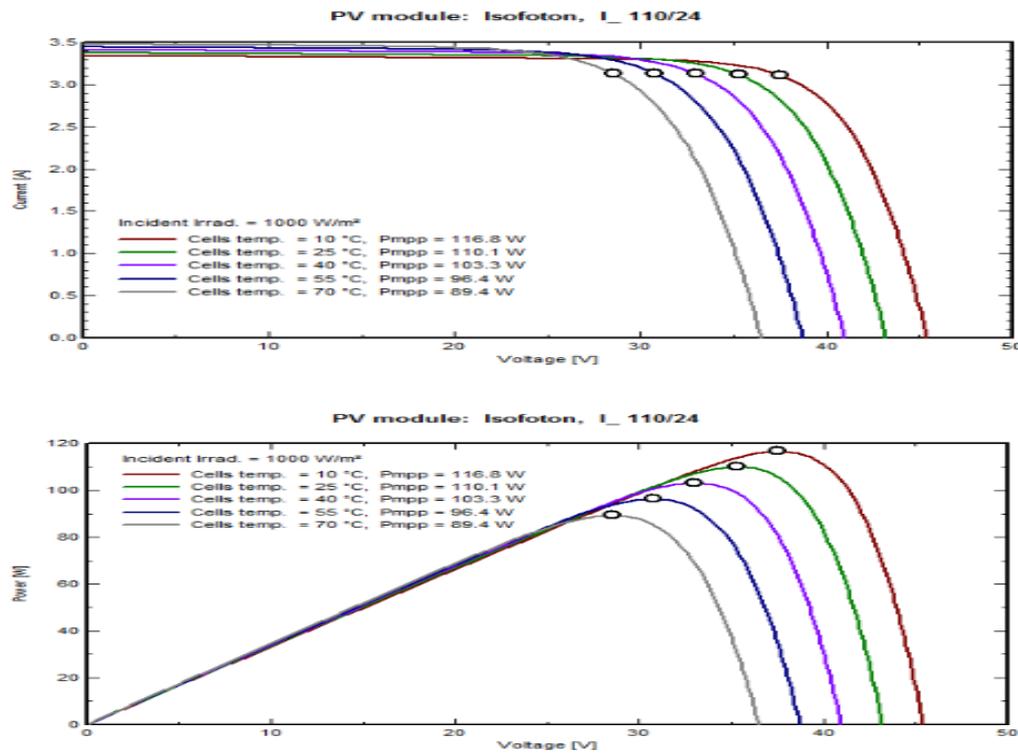


Figure IV.14 : Influence de la température sur les courbes I-V et P-V (module Isoton110w).

V.5. Conclusion.

D'après le modèle établi du système hybride global, nous constatons que le modèle en question paraît utile pour la simulation des systèmes hybrides de pompage néanmoins le système hybride nécessite :

- Un dimensionnement optimal de ce système ;
- Donnée de l'irradiation et de la température à temps réel ;
- Calcul de débit pompe pendant la journée qui dépend du profil de charge qui change d'une saison à une autre et en fonction des besoins en eau des cultures.

Chapitre V

Choix d'un système hybride

V.1. Introduction

Les systèmes d'énergies hybrides (SEH) utilisent différentes sources d'énergie comme le photovoltaïque et le générateur diesel. Ce type de système peut représenter une solution très intéressante pour les sites isolés surtout pour le pompage d'eau. L'étude du comportement dynamique du système ainsi que son optimisation serait la solution appropriée.

On va présenter dans ce présent chapitre l'efficacité d'un système de pompage hybride, il s'agit d'un système sous-alimentation électrique et d'une autre sous-alimentation photovoltaïque. Le dimensionnement d'un tel système implique la détermination des caractéristiques nominales des sources et du système de stockage, pour des ressources énergétiques et des contraintes d'utilisation données. Nous avons réalisés des essais de performance sur la pompe centrifuge et sur la boucle d'essai du banc HM310 et on a réalisé les courbes caractéristiques $[(H - Q), (P_{ab} - Q), (I - Q)]$.

V.2. Caractéristiques de la région d'étude

V.2.1. Situation géographique

La wilaya de Biskra est située à l'Est de notre pays (Algérie) et au Sud des Aurès. Elle s'étend jusqu'à la zone du Chott Melghir au Sud-Est et jusqu'à l'Erg oriental au Sud-Ouest. Biskra occupe une superficie de 21.671.2 Km². Elle se localise dans les coordonnées géographiques 34° 48' Nord et 05° 44' Est. Latitude 34,8°N. Son altitude est de 125 mètre par rapport au niveau de la mer. Elle comprend 12 daïra et 33 communes, avec une densité de l'ordre de 30 Hab. /km².

La wilaya se situe au centre-est de l'Algérie aux portes du Sahara. Elle est limitée par les wilayas suivantes : Batna au Nord, M'Sila au Nord- Ouest, Khenchela au Nord- est et Djelfa, El Oued et Ouargla au Sud (Figure V.1).



Figure V.1: limites géographique de la wilaya de Biskra (Boukria, 2010).

V.2.2. Données climatiques

La wilaya de Biskra est caractérisée par un climat toujours peu pluvieux et parfois sec avec une pluviosité très irrégulière et inférieure à 200 mm/an (Dubost, 2002).

Les principaux facteurs climatiques comme la température, les précipitations et les vents sont traités d'une manière particulière. Il est à rappeler que compte tenu de son importance la synthèse climatique est faite pour cette région.

V.2.2.1. Température :

Du fait de la pureté de leur atmosphère et souvent aussi de leur position continentale, les déserts présentent de forts maximums de température et de grands écarts thermiques.

La température est un facteur favorable lorsqu'il y a suffisamment d'eau, et de fait les mares, les suintements ou les oueds représentent un milieu biologique très riche. Mais en milieu sec la température devient un facteur aggravant car, elle augmente la vitesse de l'évapotranspiration. (Ozenda, 2004).

La température représente un facteur limitant de toute première importance car elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère. (Ramade, 2003).

D'après la FigureV.2, on constate que la région de Biskra est caractérisée par une température moyenne maximale de 41,2°C pour le mois de juillet sur une période de 20 ans (1998-2018) et une température moyenne minimale est de 6,8°C enregistrée pour le mois de Janvier et une température moyenne annuelle de 34,8 °C enregistrée le mois de juillet et 11,8°C pour le mois de Janvier.

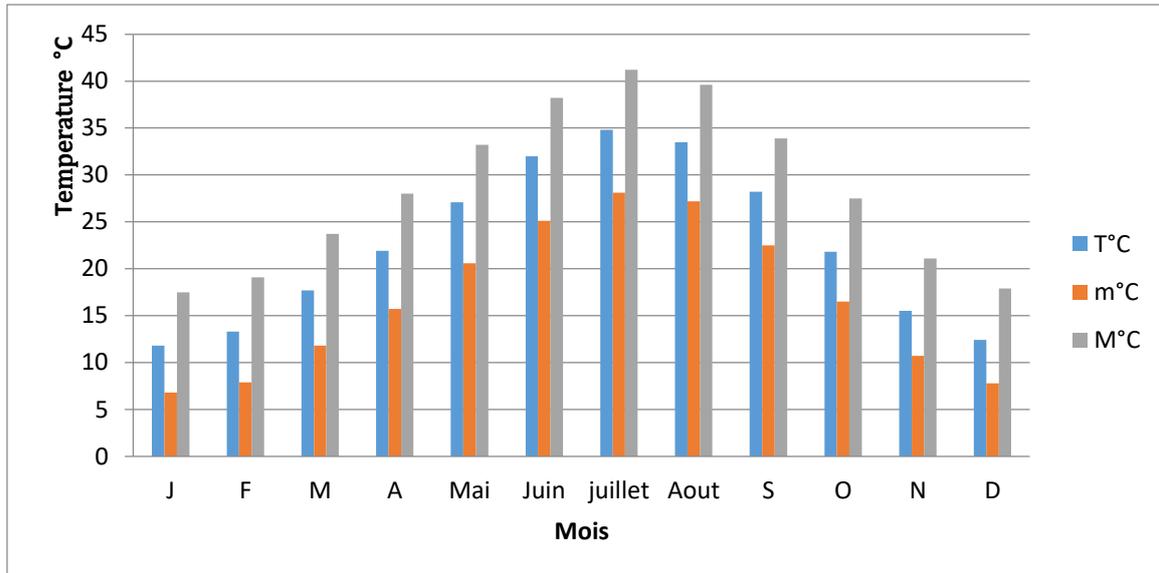


Figure V.2: Températures moyennes annuelle de la période (1998-2018).

V.2.3.2. Précipitation :

Elle constitue un facteur écologique d'importance fondamentale, non seulement pour le fonctionnement et la répartition des écosystèmes terrestres, mais aussi pour Certains écosystèmes limniques tels que les mares et les lacs temporaires et les lagunes saumâtres soumises à des périodes d'assèchement. (Ramade, 2003).

Notre région d'étude est caractérisée par des précipitations faibles, irrégulièrement réparties en printemps et en hiver avec un maximum pendant le mois de Mars (91,1mm) a 2004 durant la période de 20 ans (1998-2018) et un totale maximale de pluviométrie (295mm) dans la même année (voir la FigureV.3).

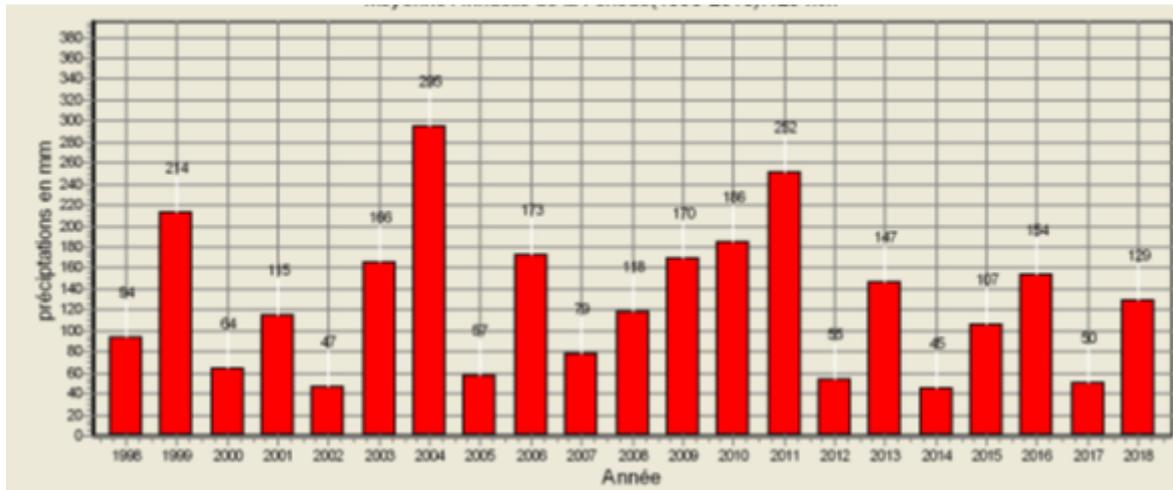


Figure V.3: Précipitations moyennes annuelle (mm) durant la période (1998-2018).

(Source : Aéroport, Station Biskra .02-04-2019)

V.2.3.3.Vent

Il constitue en certains biotopes un facteur écologique limitant. Sous l'influence de vents violents, la végétation est limitée dans son développement. (Ramade, 2003).

Il intervient des fois par sa violence, par les particules qu'il transporte et qui peuvent déchirer les parties aériennes des plantes, et par les remaniements qu'il provoque dans le sol.

Cependant son action peut être quelquefois favorable, par exemple lorsqu'il provoque un important dépôt de sable sur des sols salés qui étaient stériles, ou bien lorsqu'il contribue à la dispersion des végétaux et de leurs semences. (Ozenda, 2004).

La FigureV.4, montre que la vitesse moyenne mensuelle annuelle maximale du vent est de 5.2m/s pour le mois d'Avril et la vitesse moyenne mensuelle annuelle minimale est de 3.5 m/s pour le mois d'Aout et Octobre.

Le vent maximal moyen est de 8,1m/s pour le mois de Juin(2002), par contre la vitesse de vent minimale moyenne est de 1,2/s pour le mois de Décembre(2015) pour la durée de 20ans (1998-2018).

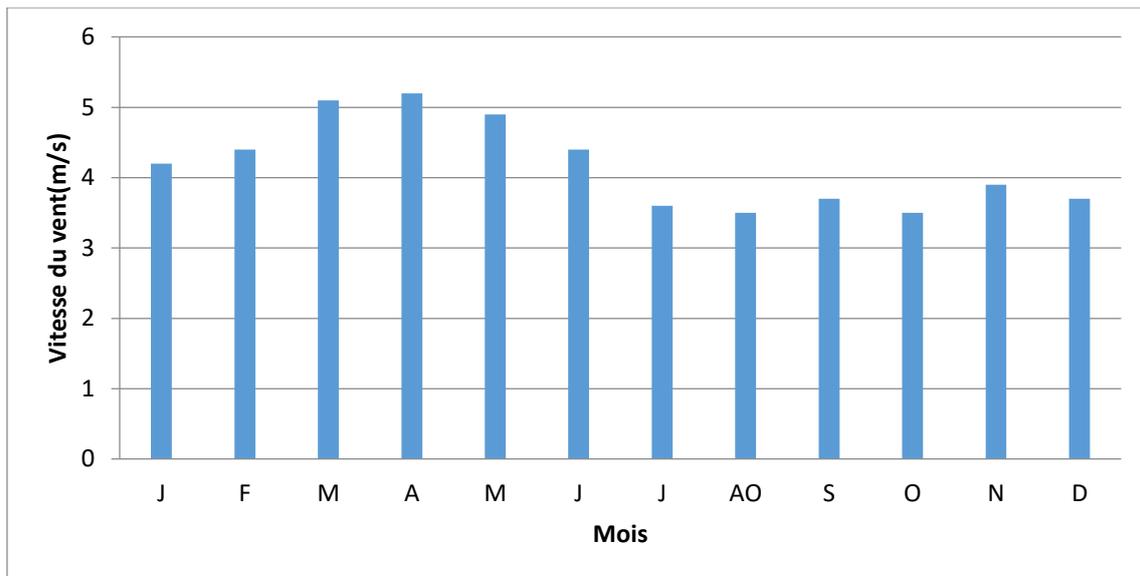


Figure V.4 : vitesses moyennes annuelle des vents (m/s) dans la région de Biskra enregistrées durant la période (1998– 2018).

V.2.3.4. Humidité relative

Selon Ramade (2003), c'est le rapport entre la teneur en vapeur d'eau de l'air et la masse théorique de vapeur d'eau que peut renfermer l'atmosphère à saturation compte tenu de la température et de la pression barométrique existante.

Selon la Figure V.5, on remarque que durant les 20 ans (1998-2018) l'humidité moyenne mensuelle maximale est de 60,3% pour le mois de décembre, et l'humidité moyenne minimale est de 26,9 % en Juillet.

Dans la région de Biskra, durant la période (1998-2018) le pourcentage de l'humidité maximale est de 67,8% (année 2004) pour le mois de Décembre et l'humidité minimale est de 22,5% (année 2007) pour le mois de Juin.

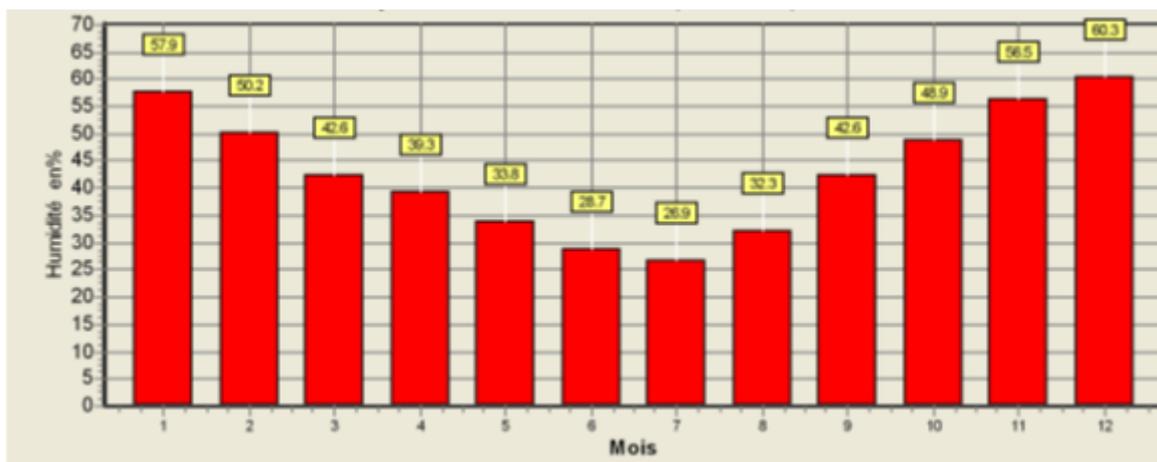


Figure V.5 : Courbes de l'humidité relative moyenne annuelle (%) de la région de Biskra enregistrées durant la période (1998-2018)

Source : Aéroport, Station Biskra .02-04-2019)

V.2.3.5. Ensoleillement

Ramade (2003), la photopériode contrôle la germination des végétaux, l'entrée en dormance et la reprise d'activité de l'apex des rameaux, leur croissance, la chute automnale des feuilles et enfin la floraison.

D'après la Figure V.6, on constate que : pour la période (1998-2018) ; le nombre moyen annuel d'heures d'insolation est (275,9 heures) par an. Le minimum est enregistré en décembre (218 heures) et le maximum en juillet (357,8 heures).

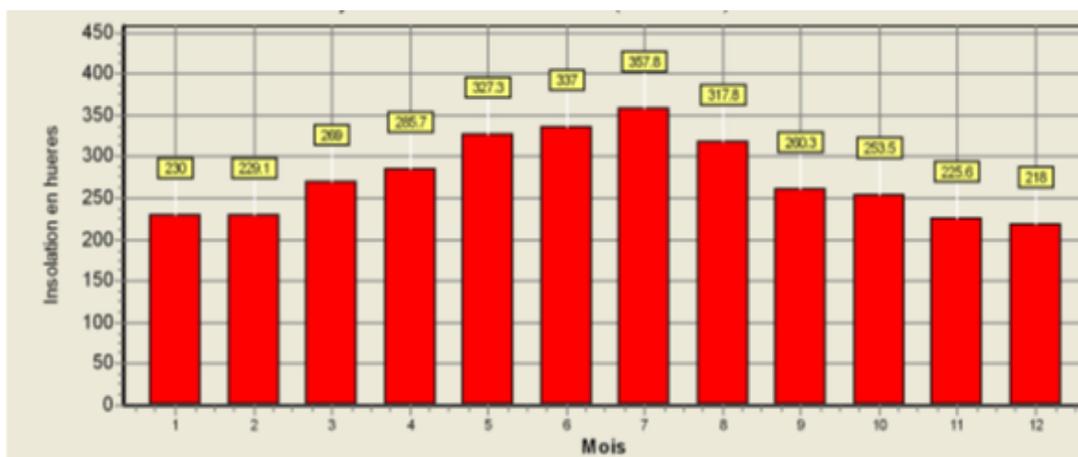


Figure V.6 : Insolation moyenne annuelle durant la période (1998-2018).

(Source : Aéroport , Station Biskra .029-04-2019).

V.3. Définition du type du climat dans la région de Biskra

Afin de déterminer l'étage bioclimatique de la région de Biskra, nous avons calculé le quotient pluviométrique d'Emberger (Q2) avec des données climatiques calculées durant la période 1998-2018.

Le quotient pluviométrique d'Emberger (Q2) est déterminé par la combinaison des 3 principaux facteurs du climat. Il est donné par la formule suivante :

$$Q2 = 2000P/M2 - m,$$

Avec :

P : pluviométrie annuelle moyenne en mm

M : moyenne des maximal du mois le plus chaud en degrés

m : moyenne des minimal du mois le plus froid en degrés

Stewart (1969) en transformant cette équation a obtenu pour le climat méditerranéen la formule suivante :

$$Q2 = KP/M - m$$

K : constante qui est à 3,43 ; les températures en degrés Celsius pour M et m ; P est la pluie en mm. Le facteur M-m est l'expression de l'évaporation, en général elle est d'autant plus forte que (M-m) est plus grand (Emberger in Letrech- Belarouci)

D'après les données climatiques de Biskra, pour la période qui s'étale de 1998-2018 nous avons

- La précipitation annuelle moyenne **P = 129,2 mm**
- température maximale **M = 43,5 °C**
- La température minimale **m = 6,8 °C**

Donc $(Q2 = 3,43 \cdot [129,2 / (43,5 - 6,8)] = 12,07$

Dans ce cas le quotient pluviométrique est : **Q2 = 12,07**

D'après la projection du point obtenue sur le climagramme d'Emberger nous pouvons dire que la wilaya de Biskra est dans l'étage bioclimatique saharien et à hiver tempéré (Figure V.7).

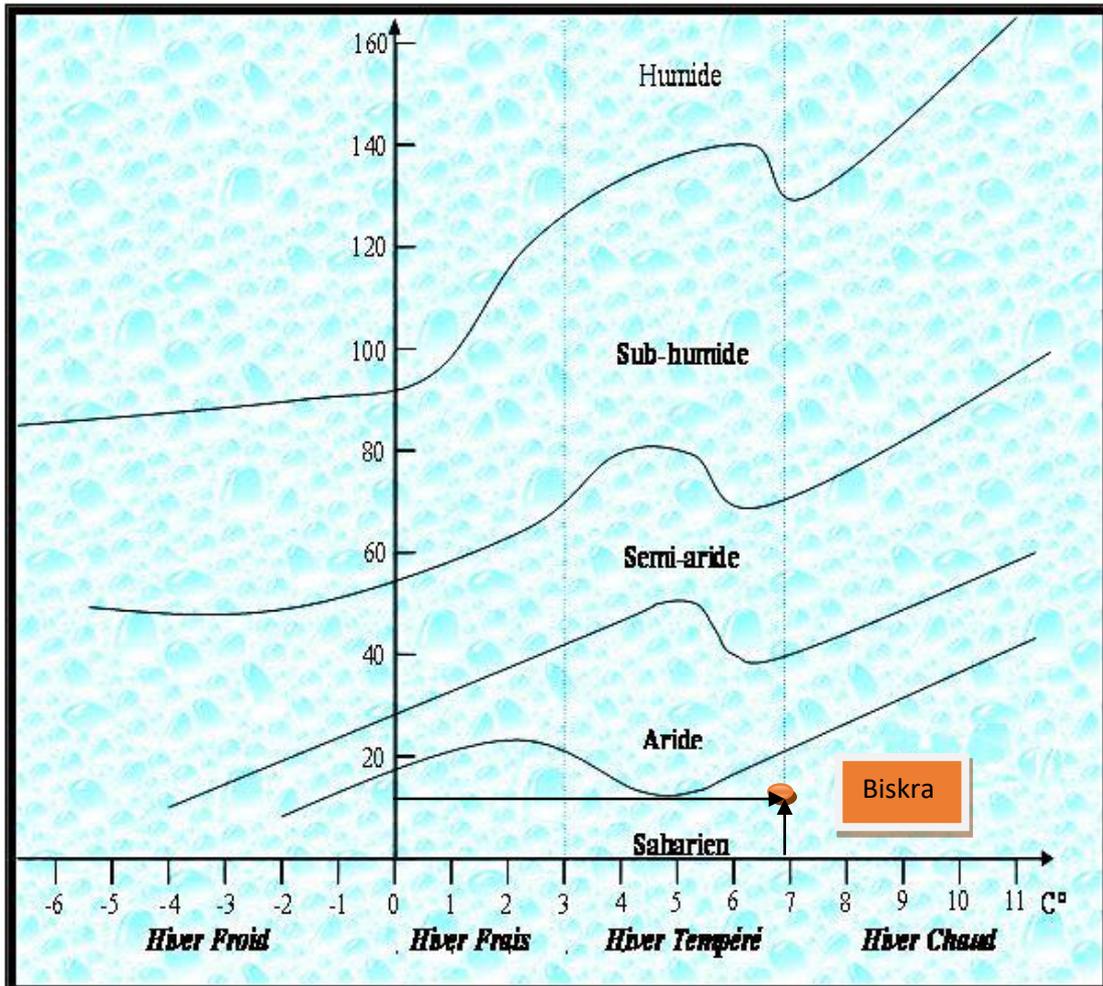


Figure V.7: le point de projection de la wilaya de Biskra dans le climagramme D'Emberger (1998-2018).

V.4. Besoins en eau des cultures

La première étape du dimensionnement d'un système est l'estimation des besoins eau pour l'irrigation des cultures. Les besoins en eau pour l'irrigation dépendent de plusieurs paramètres tels que : le type des cultures, climat (température, humidité, vitesse du vent), sol, saison de l'année et la technique d'irrigation employé (irrigation localisée ou par aspersion) (Ammar, 2015).

Les besoins en eau des cultures pour chaque stade végétatif sont généralement estimés en fonction de l'évapotranspiration. Cette dernière est subdivisée en deux, Il y a l'évapotranspiration potentielle ET_0 et l'évapotranspiration réelle, la relation entre ces deux paramètres joue un rôle important dans la détermination des besoins en eau, c'est ainsi que le k_c est défini comme (Djafour ,2000) : $ET_r = K_c \times ET_0$ V.1

V.5. Simulation du générateur photovoltaïque

On peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc Figure V.8 comportant quatre paramètres. Deux variables d'entrées qui sont :

- L'ensoleillement dans le plan des panneaux E (W/m^2),
- Température de jonction des cellules T_j ($^{\circ}C$)

Ainsi que deux variables de sortie :

- Courant fourni par le GPV I (A),
- Tension aux bornes du GPV V (V).

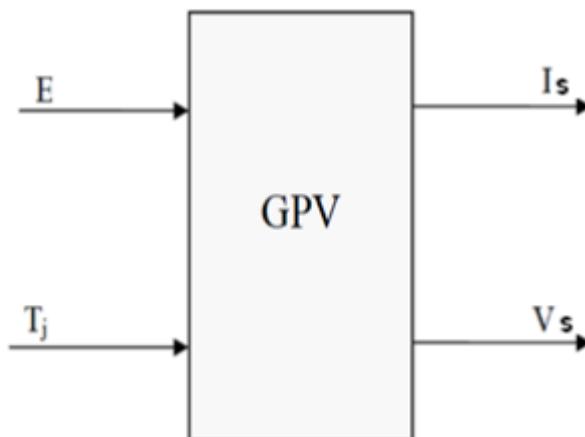


Figure V.8: Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

Une étude a été réalisée au niveau du laboratoire des énergies renouvelables du département électronique de l'université de Biskra ($34^{\circ}50'46.27''N-5^{\circ}44'49.69''E$), situé dans le sud-est d'Algérie dont le but est de déterminer l'efficacité d'un système de pompage

hybride, il s'agit d'un système sous-alimentation électrique et d'une autre sous-alimentation photovoltaïque. Le matériel employé pour cette étude est le banc d'essai HM 310 (Figure V.9) qui sert à étudier le comportement d'un système de pompage. Plusieurs essais de mesure peuvent être réalisés tels que : Mesures de débit, Mesures de pression, Mesures de température, Mesures de vitesse de rotation, Calculs de rendement (Camara, 2011).



Figure V.9: Banc d'essai HM 310 (photo originale).

Cet essai est basé sur deux grands axes, le premier est l'alimentation du système de pompage (Banc d'essai HM310) par le réseau électrique (A) et l'alimentation par un générateur photovoltaïque (B) (Figure V.10).

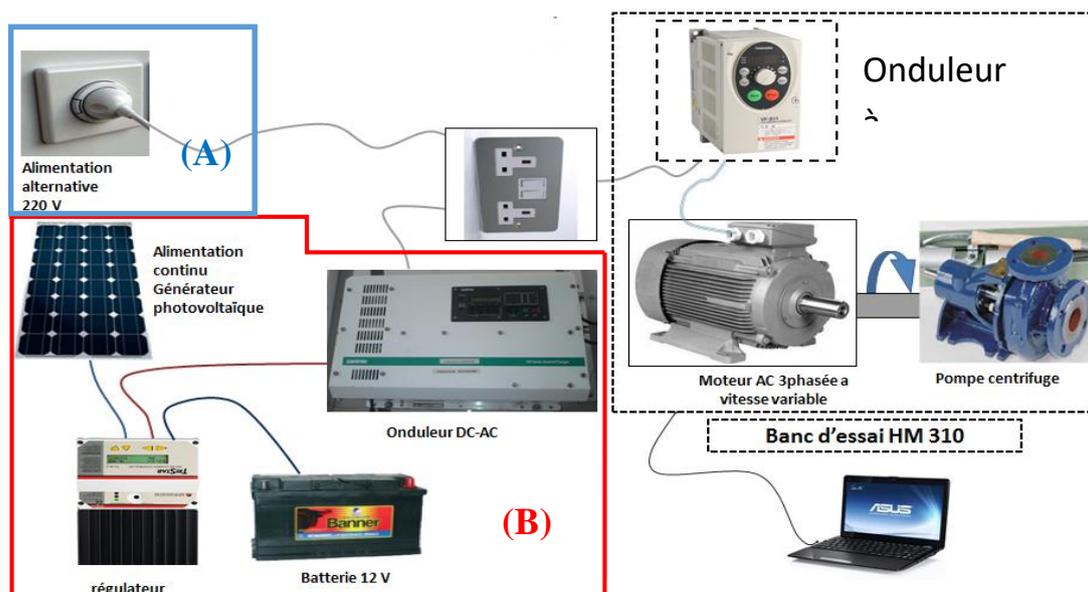


Figure V.10: Système de pompage pour les deux cas d'alimentation.

V.6. Caractéristique du panneau solaire utilisé

La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 22 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. Les modules peuvent être connectés en série (Figure V.11 a) et en parallèle (Figure V.11 b) afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il est important de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à la poussière) peuvent endommager les cellules de façon permanente (Madani, 2006).



a-En série



b- En parallèle

Figure V.11: Schéma de 4 modules (Mebrek, 2016).

Par ailleurs les caractéristiques du module PV utilisés dans cette étude sont illustrées dans Tableau suivant :

Tableau V.1 : Caractéristiques du module PV.

I_{max}	5.07 A
V_{max}	17.52 V
V_{oc}	22.2 V
I_{cc}	5.61 A
E	1000 W/m ²
T	25°C

V.7. Étudier les caractéristiques (Courant-Tension et Puissance-Tension)

L'objectif est de réaliser un générateur photovoltaïque qui va servir à étudier les caractéristiques (I-V et P-V) ainsi que leurs comportements.

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série et en parallèle donne un générateur photovoltaïque, dont le point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe avec une valeur de $I_m=26$ ou la puissance produit est maximale (Figure V.12).

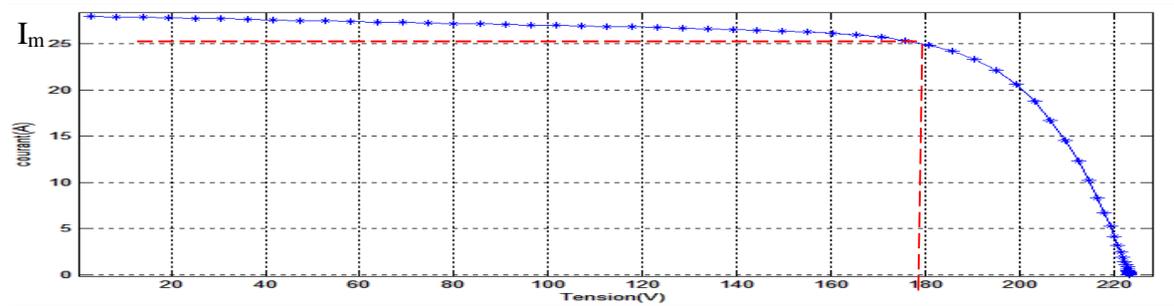


Figure V.12 : Relation entre courant -tension d'un module photovoltaïque.

Le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe où la puissance produit de la tension et la tension du courant ,est maximisée .Il se situe au milieu de la caractéristique et la puissance maximale qui est obtenue par la formule suivante : $\frac{dp}{dv} = 0$, les résultats ont révélé une valeur de 4500W (Figure V.13)

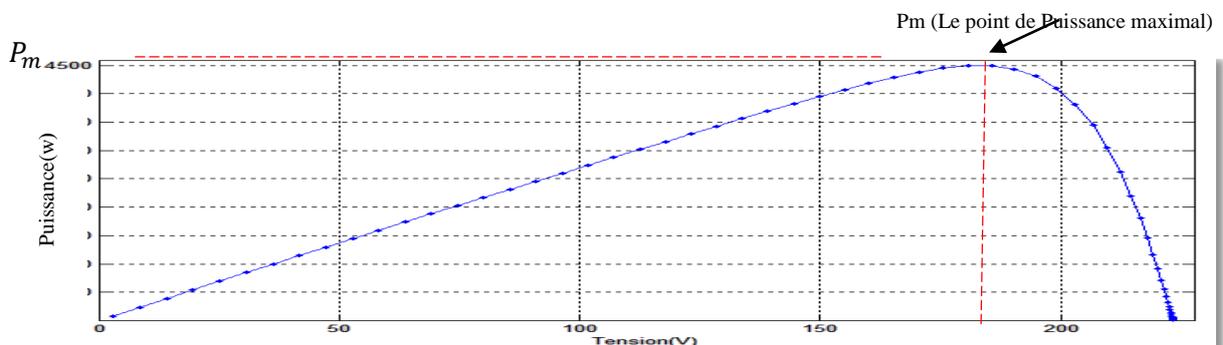


Figure V.13 : Relation entre la puissance et la tension d'un module photovoltaïque.

V.8. Résultats et discussions

Les essais de performance sur la pompe centrifuge et sur la boucle d'essai du bancHM310, ont permis de réaliser les courbes caractéristiques [(H - Q), (P_{ab} - Q), (η - Q)].

V.8.1. Influence de l'éclaircement

La Figure V.14 montre que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que la tension de circuit ouvert avec une température constante à différents éclaircements (Les données sont en Annexe1).

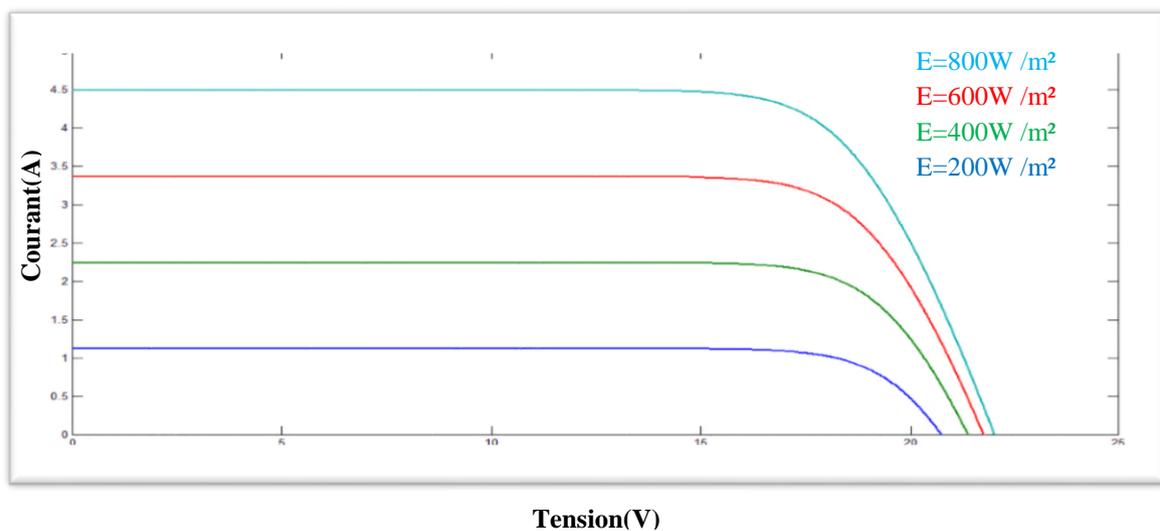


Figure V.14 : Influence des différents éclaircements sur la tension.

Par contre la Figure V.15 donne la puissance et l'éclaircement qui sont proportionnelles, lorsque nous avons maintenu une température constante à différents éclaircements (les données sont en Annexe2).

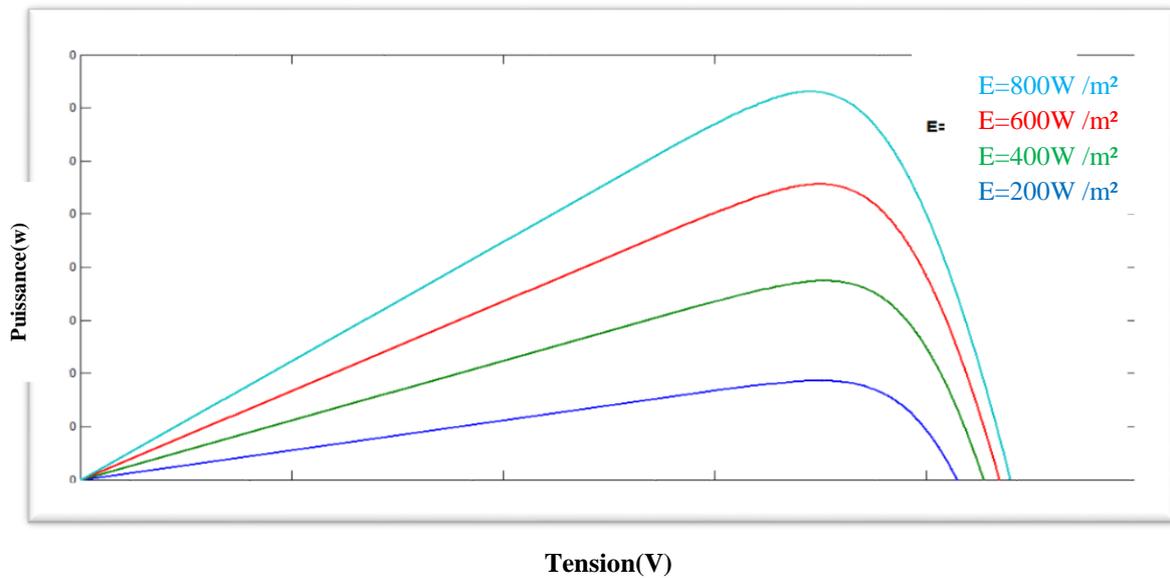


Figure V.15 : Influence simultanée de l'éclairement sur la puissance.

V.8.2. Influence de la température

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant pour différentes températures (Figure V.16). On a remarqué que les courbes caractéristiques présentent des allures différentes selon les différentes températures. La tension à vide a diminué avec la température, à l'inverse du courant de court-circuit. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du courant de court-circuit, et la puissance nominale fournie par un module varie très légèrement avec la température de jonction (les données sont en Annexe3).

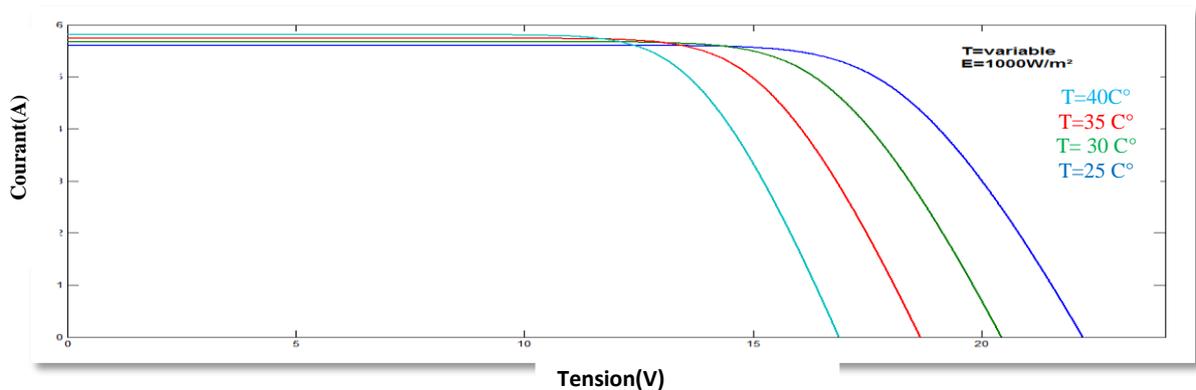


Figure V.16 : Influence simultanée des différentes températures sur le courant.

Concernant les résultats obtenus pour l'influence des températures sur la puissance (les données sont en Annexe4), on a remarqué que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit, cependant, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue (Figure V.17).

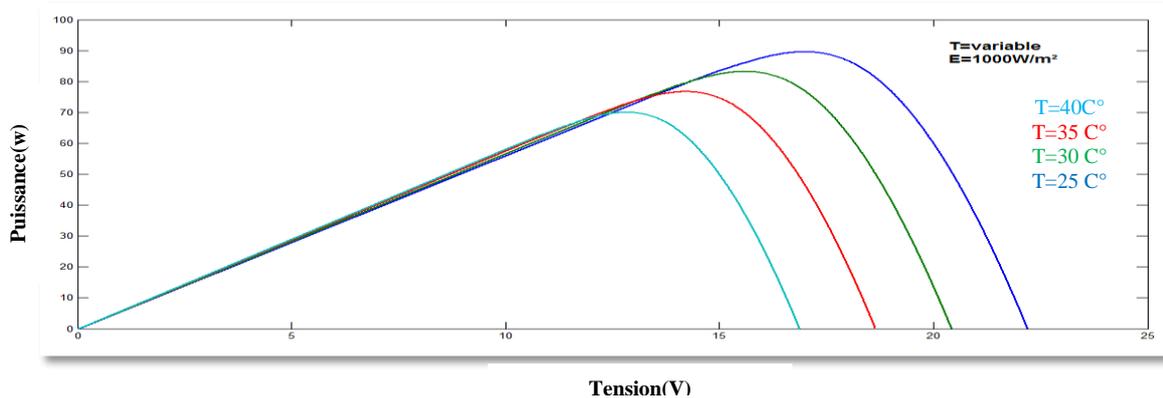


Figure V.17: Influence simultanée des différentes températures sur la puissance.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25°C. Mahammedi, (2014), a montré que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C. Cependant Zeitouny et al. (2018) ont signalé que la performance des cellules photovoltaïques est significativement affectée par la température.

Généralement les paramètres environnementaux ont un effet direct sur les performances et l'efficacité de la conservation énergétique (Necaibia et al., 2018).

V.8.4. Comparaison entre les Résultats obtenus avec alimentation par réseau électrique (RE) et ceux de photovoltaïque PV

À propos des courbes de type (H-Q) Figure (V.18 et V19) représentent l'évolution de la hauteur manométrique total développée par la pompe en fonction du débit (les données sont en Annexes5,6,7,8,9,10,11,12), On a constaté que pour un débit nul (robinet vanne de

refoulement fermé) on obtient le point barbotage, alors qu'en augmentant le débit, la hauteur manométrique diminue jusqu'à une valeur H_{min} pour un Q_{max} (robinet vanne complètement ouvert), pour différentes valeurs de vitesse. Les deux alimentations ont donné presque les mêmes résultats

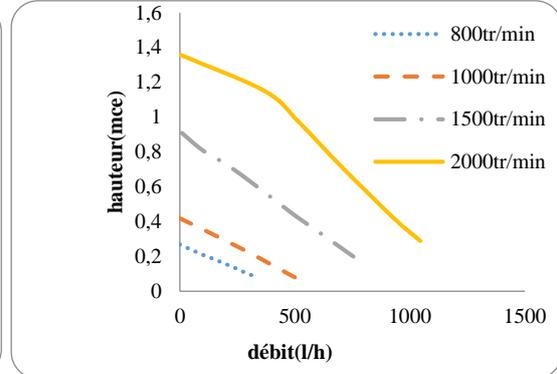
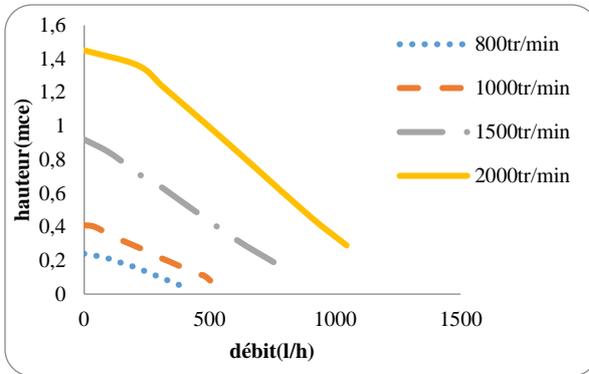


Figure V.18: Caractéristique hauteur-débit d'un banc d'essai alimenté par RE

Figure V.19: Caractéristique hauteur-débit d'un banc d'essai alimenté par PV

Par ailleurs les courbes de type (η - Q) Figure (V.20 et V.21) représentent l'évolution du rendement de la pompe en fonction du débit (les données sont en Annexes 5,6,7,8,9,10,11,12), ont montré que pour un débit nul le rendement est nul, par contre, on augmentant le débit, jusqu'à avoir $Q_{max} = 1000\text{ l/h}$ qui correspond à une valeur 30% de rendement.

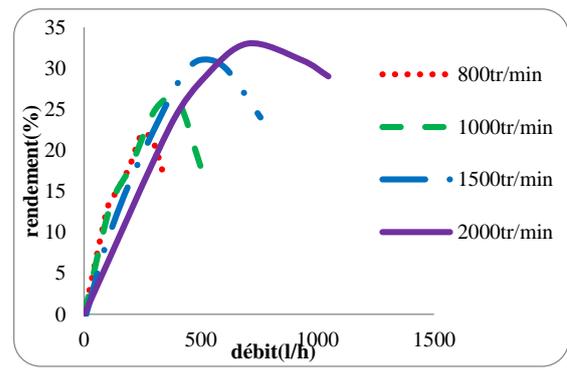
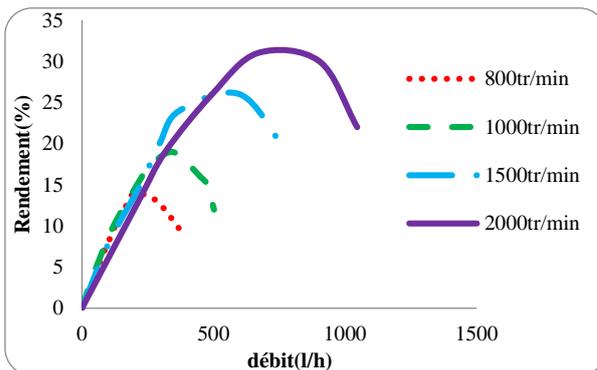


Figure V.20 : Caractéristique rendement-débit d'un banc d'essai alimenté par RE

Figure V.21 : Caractéristique rendement-débit d'un banc d'essai alimenté par PV

Les résultats obtenus avec les 2 cas : alimentation par RE et celle par générateur photovoltaïque montrent qui sont presque identiques, cela va expliquer l'efficacité de l'alimentation par le générateur photovoltaïque.

Des travaux réalisés par Abbas et *al.* (2012) ont montré que le système hybride éolien photovoltaïque avec stockage : dimensionnement et analyse du cycle de vie a permis d'optimiser le dimensionnement d'un système multi-sources avec batteries ainsi que l'évaluation économique et environnementale, un tel système dédié à un habitat résidentiel de 4 personnes « type » basé à La Rochelle et Kadri et *al.* (2007) ont travaillé sur simulation des performances d'un système hybride (photovoltaïque/diesel) et l'évaluation de leurs gaz à effet de serre émis, ils ont trouvés que le PV est une solution très efficace de point de vue énergétique, en raison de pouvoir satisfaire la charge nécessaire dans la ferme agricole durant le temps d'ensoleillement. En plus d'augmenter l'énergie électrique de source PV et minimiser les gaz émis par le groupe électrogène et la consommation du carburant. Ces gaz qui sont les principales sources de l'échauffement climatique, l'effet de serre, et de la pollution de notre environnement.

Par ailleurs Boutelhig et *al.* (2017), dénotent que le pompage d'eau par le système photovoltaïque semble être le mieux adapté pour fournir l'eau à usage domestique dans les régions désertiques d'Algérie. En effet, le système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation d'une palmeraie à Ouargla a montré une grande efficacité (Djafour et Aida 2009). De même BenTouba et Bourouis (2016) signale que 100% de la demande d'électricité pourrait être fournie à la ville de Timiaouine dans l'extrême sud algérien en utilisant une configuration hybride composée d'un système éolien, d'un système solaire PV et d'un générateur diesel utilisé comme système de sauvegarde.

Le coût de la production d'électricité avec ce système a été estimé à 0,176 US \$ / kWh. Les émissions de carbone dans l'atmosphère pourraient être réduites d'environ 593,125 tonnes / an. Par ailleurs des travaux réalisés par Al Anfaf, 2017, montrent que Le potentiel de l'utilisation du système hybride important dans tous les pays d'Afriques et il offre des sérieux avantages économiques et techniques. Les différentes technologies d'énergie renouvelable et durable peuvent être adoptées pour l'électrification des milieux ruraux, y compris le système photovoltaïque, le système diesel ou hybride (photovoltaïque et diesel).

Dans le même contexte Zeitouny et *al.* (2018) dénote que les systèmes d'énergie solaire photovoltaïque / thermique hybrides offrent la possibilité d'une production d'électricité solaire peu coûteuse, efficace et fiable.

Cependant, le choix entre ces options dépend exclusivement de nombreux facteurs, notamment la fiabilité et le coût associé à ces technologies (Kebour et *al.*2017). Actuellement, les énergies renouvelables représentent une part mineure du mix énergétique algérien, mais dans un proche avenir, une grande part de ressources renouvelables nécessite la pleine compréhension des enjeux locaux, en tenant compte du réseau et des conditions climatiques algériennes (Ould Amrouche et *al.*,2017).

III.5. Conclusion

Les résultats obtenus ont montré que l'efficacité des deux systèmes est similaire. Cela prouve que l'utilisation d'une source photovoltaïque pour l'irrigation est le meilleur compromis économique pour un développement agricole durable dans les régions arides isolées.

Le système avec le réseau électrique présent un coût d'investissement relativement faible, mais un coût d'exploitation d'entretien et de maintenance relativement important. Par contre le système photovoltaïque présente un coût d'investissement important, un entretien très réduit et un faible coût d'exploitation. De ce fait, l'énergie solaire photovoltaïque peut être utilisée pour plusieurs applications.

Conclusion

générale

Conclusion générale

Les pays du Maghreb et en particulier l'Algérie ont un potentiel solaire élevé. Les énergies renouvelables telles que l'éolien et le solaire offrent de nombreux avantages, notamment en termes de respect de l'environnement et du potentiel de croissance. Par ailleurs La combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergie pour former un système multi source (hybrides) permet de transcender ces contraintes en fournissant une électricité économique et fiable tout en satisfaisant les exigences écologiques.

Le rôle d'un système hybride est la production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter 'une puissance énergétique'.

Les résultats obtenus de l'étude de pompage entre deux cas : le premier, est le système de pompage (banc d'essai HM 310) alimenté par un réseau électrique, le deuxième cas, il est alimenté par un générateur photovoltaïque, ont montré que :

- Une température constante à différents éclairagements donne un accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que la tension de circuit ouvert, cela explique que l'éclairage est proportionnelle avec la puissance.
- Un éclairage constant pour différentes températures a donné les allures des courbes caractéristiques différentes selon les différentes températures.
- Pour un débit nul (robinet vanne de refoulement fermé) on obtient le point barbotage, alors qu'en augmentant le débit, la hauteur manométrique diminue jusqu'à une valeur H_{min} pour un Q_{max} (robinet vanne complètement ouvert), pour différentes valeurs de vitesse. Les deux alimentations ont donné presque les mêmes résultats.
- Pour l'évolution du rendement de la pompe en fonction du débit, on a montré que pour un débit nul le rendement est nul, par contre, on augmente le débit, jusqu'à avoir $Q_{max} = 1000\text{l/h}$ qui correspond à une valeur 30% de rendement.

On peut dire que l'efficacité des deux systèmes est similaire. Cela prouve que l'utilisation d'une source photovoltaïque pour l'irrigation est le meilleur compromis économique pour un développement agricole durable dans les régions arides isolées.

L'énergie produite par un tel système dépend essentiellement des conditions climatiques et de la stratégie de couplage avec les générateurs thermiques.

Le système avec le réseau électrique présent un coût d'investissement relativement faible, mais un coût d'exploitation d'entretien et de maintenance relativement important. Par contre le système photovoltaïque présente un coût d'investissement important, un entretien très réduit et un faible coût d'exploitation. De ce fait, l'énergie solaire photovoltaïque peut être une solution durable pour les régions désertiques.

Certains points clés, non techniques ne sont pas pris en compte dans cette étude. En perspective, on peut dire que les énergies renouvelables sont prometteuses pour le pompage d'eau et l'irrigation des cultures, dans les régions agricoles du sud Algérien comme la wilaya d'Oued Souf, Biskra et Adrar où l'agriculture connaît un regain d'intérêt et en vue d'une prise de conscience de « l'après pétrole », du respect de l'environnement et du développement durable.

Néanmoins les résultats de ce modeste travail constituent les bases d'un travail à poursuivre et à améliorer pour des autres études qui pourront faire l'objet d'une évaluation du coût de l'énergie par exploitation et à la prise, en prenant en compte ses dépenses journalières. Cela permettra de proposer des solutions optimales encore plus réalistes pour l'application des énergies renouvelables en Algérie.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

Abada S., 2011. " Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic". Diss. Université Laval,.

Abbes D., 2012. "Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome". Thèse de Doc, Univ. de Poitiers : 252p.

Adouane M.,2014. "Etude de la fiabilité des systèmes solaires hybrides dans le sahara". Diss. Ecole nationale supérieure polytechnique.

Al anfaf M. M. M., 2016. "Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges". Thèse de doc., univ.Lorraine, France.

Alonso C., 2003. "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie". Mémoire en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger les recherches, univ. Paul Sabatier – Toulouse III, Décembre 2003.

Ammar H., Bouziane MT. et Bakelli Y., 2012."L'influence de la variation de débit sur les performances d'une pompe solaire. "Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa Algérie, 23 – 28.

Ammar H., 2017. "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système hybride dédié au pompage".thèse de Doc.univ.Biskra, 148p.

Ammar H., Melit A., Adouane M. et Bouziane M.T. 2015. "Techno-economic evaluation of a hybrid PV/diesel water pumping system for different pumping heads". 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC): 1–5.

Anagreh Y. , Bataineh A. , Al-Odat M., 2009. "Solar energy potential in jordan". International Conference and Exhibition on Green Energy & Sustainability for Arid Regions & Mediterranean Countries: 3p

Argaw N., Foster R. and Ellis A. ,2003. "Renewable energy for water pumping applications in rural villages." New Mexico State, United States.

Arthouros Z. et Rana A., 2019. "Renewables 2019 Global Status Report". Paris, REN21 Secretariat. 336 p.

Bakelli Y., Hadj Arab A. et Azoui B., 2011. "Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept". Solar Energy 85: 288–294.

Battude M., 2017. "Estimation des rendements, des besoins et consommations en eau du maïs dans le Sud-Ouest de la France : apport de la télédétection à hautes résolutions spatiale et temporelle". Thèse de Doc, Univ. De Toulouse: 238p.

Belgacem B.G. , 2012. "Performance of submersible PV water pumping systems in Tunisia". Energy for Sustainable Development 16: 415–420.

- Bentouba S. et Bourouis M., 2016.** "Feasibility study of a wind–photovoltaic hybrid power generation system for a remote area in the extreme south of Algeria". *Revue Applied Thermal Engineering* n°99: 713–719
- Bentouba S., Slimani A. et Boucherit M.S., 2007.** "Le pompage photovoltaïque : un outil de développement des régions du sud d'Algérie". *Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda* : 109 – 112.
- Berrah M.K., 2013.** "Statistiques Sur L'environnement". *Collections Statistiques N° 177*
- Betka A., 2005.** "Perspectives for the sake of photovoltaic pumping development in the south." *Diss. Université El Hadj Lakhdar de Batna.*
- Bouchaib S., 2012.** "Revue de Presse : inauguration de la première station photovoltaïque de façade à l'udes ".19 *Le prix national de la meilleure invention de l'année 2012.*: 36.
- Bouden A., 2008.** "Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque." *Université Mentouri Constantine.*
- Boudghene Stambouli A., 2007.** " Overview and perspectives of the Algerian renewable energy". *Programme environnement 2007 conference.*
- Bousdira K., 2010.** "Potentiel énergétique de la biomasse phoenicicole en Algérie : évaluation et recommandations." *CDER Ghardaïa, Algérie*
- Boutelhig A., Melit A. et Hanini S., 2017.** "Groundwater sources assessment for sustainable supply through photovoltaic water puming system, in M'zab valley, Ghardaia". *Energy Procedia*, 141: 76-80.
- Bouzidi B., 2010.** "Contribution à l'amélioration du pompage d'eau par les énergies renouvelables." *Diss. Ecole nationale supérieure polytechnique.*
- Bouzidi B., 2011.** "Viability of solar or wind for water pumping systems in the Algerian Sahara regions – case study Adrar". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 4436–4442.
- Bouzidi B., 2020.** "Les Energies Renouvelables dans le secteur agricole". *Bulletin des Energies Renouvelables Fraenkel bles N°49 – 2020*
- Bouzidi B., Haddadi M. et Belmokhtar O., 2009.** "Assessment of a photovoltaic pumping system in the areas of the Algerian Sahara". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 879–886.
- Bouzidi B., 1999.** "L'Energie Solaire et les Régions Sahariennes- Exemple de la Région d'Adrar". *Rev. Energ. Ren. : Valorisation* ,101-104
- Brauntein A., 2010.** "The loss of power supply probability technique for designing standalone solar electrical (photovoltaic) systems". *IEEE Transaction on power apparatus and systems*, vol. PAS-102, N°5: 1171-1175.
- Camara M., 2011.** "Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs". *Thèse de Doc, Univ. de Paris* : 252p.

Campana P.E., Leduc S., Kim M., Olsson A., Zhang J. et Liu J., 2017. "Suitable and optimal locations for implementing photovoltaic water pumping systems for grassland irrigation in China". *Applied Energy* 185: 1879–1889.

Campana P.E., Zhu Y., Brugiati E., Li H. et Yanet J., 2014 . "PV water pumping for irrigation equipped with a novel control system for water savings". *The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014 ; Energy Procedia* 61 : 949 – 952

Celik N. , 2003. "Energy Output Estimation for Small-Scale Wind Power Generators Using Weibull- Representative Wind Data". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91 :693-707

Chabane F., Moummia N. et Benramachec S., 2013. "Experimental analysis on thermal performance of a solar air collector with longitudinal fins in a region of Biskra, Algeria". *Journal of Power Technologies* 93 (1) (2013) 52–58

Chenni R., 2007. "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire". Doctorat en Sciences en Physique Énergétique". Université Mentouri de Constantine.

Cherf S., 2013. "Les cahiers du cread N°96-2011, NRP " (la Nouvelle Revue de Presse), Avril, N°16.

Cid Pastor A., 2006. "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques". Thèse de Doctorat, Univ. INSA de Toulouse: 123p.

Diaf S., 2002. " Etude et optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque". Diss

Direction de l'Hydraulique Agricole, 2018. Biskra

Djafour A. , 2000. "Etude d'une station de pompage photovoltaïque dans une région saharienne". Diss. Université Kasdi Merbah de Ouargla,

Djafour A. et Aida M.S., 2009. "Étude d'un système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation d'une palmeraie a ouargla". *Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur* Vol. 1 N° 3.

Doorenbos J. et Kassam A.H., 1987. " Réponse des rendements à l'eau". *Bulletin FAO*, n° 33. Organisation des Nations Unies Pour JJ\ alimentation et l'Agriculture - Rome, 235 p.

Drouilhet S. and Shirazi M., 2002. "Wales, Alaska High-Penetration Wind-Diesel Hybrid Power System Theory of Operation". National Renewable Energy Laboratory "NREL" is a U.S. Department of Energy Laboratory:70p.

Dubost.D, 2002. "La révolution hydraulique dans les Oasis impose une nouvelle gestion de l'eau dans les zones urbaines"-Article. :15-20.

Duffie J. , 2011. "Solar Engineering of Thermal Processes". Second Edition, A. wiley, Interscience Publication.

Duffie J.A. et Beckman W.A. , 1991. "Solar engineering of thermal processes". 2nd ed ed. Wiley, New York, 919p

El Khadimi A. , Bchir L. et Zeroual A. , 2004. "Dimensionnement et Optimisation Technico-Economique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque - Eolien avec Système de Stockage". Rev. Energ. Ren., Vol. 7, N°2 : 73 – 83.

El Khashab H. et Al Ghamedi M. , 2015. "Comparison between hybrid renewable energy systems in Saudi Arabia". Journal of Electrical Systems and Information Technology 2: 111–119.

Food and Agriculture Organisation (FAO), 1976. "Les besoins en eau des cultures". Bulletin FAO d'irrigation et de drainage 1976 ; 24 : 198 p.

Fraenkel P.L. , 1994. "Les machines élévatoires". Bulletin FAO d'irrigation et de drainage N°43, Roma. p:265-285.

Franco R. , 2012. "Énergie, économie, environnement, le cas du secteur de l'électricité en Europe entre passé, present et futur". Edition librairie Droz.

Gao X. , Liu J. , Zhang J. , Yan J. , Bao S. et Xu H. , 2013. "Feasibility evaluation of solar photovoltaic pumping irrigation system based on analysis of dynamic variation of groundwater table". Applied Energy 105: 182–193.

Ghzaïel M. et Jeday M.R. , 2007 . "Etude du coût de revient d'eau pompée au moyen de l'énergie photovoltaïque (cas de la Tunisie) ". Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda : 145 – 148.

Global BP., 2014. "Statistical Review of World Energy, 2014". 2014-07-18]. <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.Html>

Guettaf A. , 2013. "Optimisation floue-génétique d'un système de pompage éolien. " Diss. Université Mohamed Khider–Biskra,.

Gülich Johann F. , 2008. "Centrifugal pumps". Berlin: Springer.

Hadj Arab A., Benghanem M. et Gharbi A., 2005. "Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïques". Revue des Energies Renouvelables, Vol. 8, N°2,

Hadjjaïssa A. , Ait cheikh S.M. , Ameur K. et Essounbouli N. , 2016. "A GA-based optimization of a fuzzy-based MPPT controller for a photovoltaic pumping system, Case study for Laghouat, Algeria". IFAC-papersonline 49: 692–697.

Halitim. A ,1988 : Sol des régions arides d'Algérie. O.P.U, Alger, 384p

Hamdani M., 2011. "Étude et Effet de l'Orientation de deux Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa." mémoire de Mag. Univ. Abou-Bakr Belkaïd – Tlemcen. Algérie: p 105.

Hannachi S., Benkhalifa A., Khitri D., 1998. " Inventaire variétal de la palmeraie Algérienne". C.D.A.R.S et U.R.Z.A.

Helikson H.J., Haman D.Z. and Baird Fact C.D., 1991. "Pumping Water for Irrigation Using Solar Energy". Univ. Florida, Sheet EES-63: 9p.

Himri Y., Malik A.S., Boudghene Stambouli A., Himri S. et Draoui B., .2009. "Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13, 1584–1591

JICA (Japan International Cooperation Agency) , 2014. *Annuel Report*.

Kaabeche A., Belhamel M., Ibtouen R., Moussa S. et Benhaddadi M. R., 2006. "Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome ". *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 9, N°3 199 – 209.

Kadri R. et Mostefaï M., 2007. "Intégration d'un Nouveau Système d'Anti-Îlotage Dans la Commande de Système Photovoltaïque Connecté au Réseau". *4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007*.6p.

Kebour O., Hadj Arab A., Hamid A., Abdeladim K., 2017. "Contribution to the analysis of a stand-alone photovoltaic system in a desert environment".*Solar Energy* 151, 68–81

Kendouci M. A., Bendida A., Khelfaouib R. and Kharroubi B., 2013. "The impact of traditional irrigation (Foggara) and modern (drip, pivot) on the resource non-renewable groundwater in the Algerian Sahara". *Energy Procedia* 36, 154 – 162

Kharchi R. , 2013. "L'efficacité énergétique dans le bâtiment". *Bulletin des ER N°28* : 8-9.

Labouret A., et Viloz M., 2009. "Énergie solaire photovoltaïque."4ème édition. Dunod.

Maafi A., 2000. "A survey on photovoltaic activities in Algeria". *Renewable Energy* 20 : 9-17

Madani M. , 2006. " Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaire a couche minces". Thèse de Mag, Univ. de Tlemcen : 152p.

Maldague M. , 2001. "Politique énergétique intégrée en République Démocratique du Congo". *Bulletin de l'ANSD*, volume 2, pp. 27-67.

Mambrini T., 2014. "Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies". Thèse de Doct, Univ. Paris Sud : 178p.

Ministère de l'Énergie et des Mines, "Consommation énergétique final de l'Algérie Chiffres clés" : Année 2015, APRUE, Edition 2017.

Ministère de l'Energie et des Mines, Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, mars 2011.

Multon B. , Robin G. , Ruellan M. et Ahmed H.B. , 2004."Situation énergétique mondiale à l'aube du 3^{ème} millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables". *Revue 3EI n°36* : 15p.

Necaibia A., Bouraiou A., Ziane A., Sahouane N., Hassani S., Mostefaoui M., Dabou R. et Mouhadjer S., 2018. "Analytical assessment of the outdoor performance and efficiency of grid-tied photovoltaic system under hot dry climate in the south of Algeria". *Energy Conversion and Management*, 171: 778–786.

Olsson A. , Campana P.E. , Lind M. et Yan J. , 2015. "PV water pumping for carbon sequestration in dry land agriculture". *Energy Conversion and Management* 102: 169–179.

Ouali S., Khellaf A. et Baddari K. , 2006. "Etude géothermique du Sud de l'Algérie". *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 9 N°4 : 297 - 306

Ouali S. , 2015. "Contribution à l'étude de quelques réservoirs géothermiques en Algérie". Diss.

Ould Amrouche S., Saidj S.H., Boumechta S., Hadj Arab A., Abdeladim K., Bouchakour S., Yassaa N. 2017. "Distributed photovoltaic systems in Algeria and control of DC-DC converters for grid integration". -an overview. *Energy Procedia* 136: 356–36

Ould Mahmoud A., " Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charges mixtes ", Thèse de Doc. Univ. de DAKAR, 2008.

Ozenda P. , 2004. "Flore et végétation Sahara". Ed CNRS, Paris 1991.

PRR (Programme de Radio Rurale) , 2008. Énergies renouvelables utilisées en agriculture. N°3 , ACP-EU Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA), Pays-Bas. 36 p

Ramede F. ,2003. "Elément d'écologie fondamentale". ED :Dunod, Paris.

Rekioua D. et Matagne E. , 2012. "Optimization of photovoltaic power systems: modelization, simulation and control". In: *Green Energy and Technology*. Springer, London ; New York, 283p.

Rekioua D., Roumila Z. et Rekioua T., 2008. " Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel". *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11 N°4 623 – 633.

Rekioua T., Irid M.T. et Roumila Z., 2007. "Dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque – éolienne - diesel". *Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda* : 173 – 176

Saheb-Koussa D. et Belhamel M., 2007. "Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel)". *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen*.pp : 121-128.

Saïd Bentouba a, Mahmoud Bourouis .2016. Feasibility study of a wind–photovoltaic hybrid power generation system for a remote area in the extreme south of Algeria. *Applied Thermal Engineering* 99, 713–719

Semassou C., Nadeau J.P. , Sebastian P. , Pailhès J. et Vianou A., 2013. "Optimisation multicritère en conception de système photovoltaïque pour des maisons individuelles en contexte africain". *Revue des Énergies Renouvelables* Vol. 16 N°2 : 225 – 246.

Smil V., 1991. "General energetics: energy in the biosphere and civilization". In: *Environmental science and technology*. Wiley, New York, 369p.

Stewart P.,1969. " Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique". Bull. Soc.Hist. Natu., Afr. Nord, New York and London, T. 59:23 – 36.

Stoyanov L., 2011. "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables". Thèse de Doct, Univ. De Corse Pasquale Paoli.185p

Toudja T., 2008. "Commande non linéaire robuste d'un moteur synchrone à aimant permanent". Diss. Ecole nationale supérieure polytechnique.

Zeghib I. , 2005. "Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique". Mémoire de Magistère université Mentouri, Constantine.

Zeghib, I. "Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique".Mém. de Magistère

Zeitouny J., Lalau J., Gordon J.M., Katz E.A., Flamant G., Dollet A., Vossier A.,2018. "Assessing high-temperature photovoltaic performance for solar hybrid power plants".Solar Energy Materials and Solar Cells 182, 61–67

Zejli D. et Benchrifa R. , 2010 . "L'énergie éolienne: de la source d'énergie renouvelable la moins prometteuse à la plus convoitée". Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza : 359-368.

Zeraïa H. née Benyahia , 2004. "Optimisation des générateurs électriques d'énergies renouvelables alimentant les systèmes de télécommunications radioélectriques". Mémoire de Mag. p105

Site internet:

FAO. 2014. Guidelines for Planning Irrigation and Drainage Investments (<http://www.fao.org/docrep/007/w1037e/w1037e00.HTM>).

<http://ministryofsolar.com/fr/solar-solutions/hybride-diesel-solaire/>.

<http://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fwww.algerie360.com%2FAlgerie%2Fproduction-denergie-eolienne-en-algerieune-aventure-qui-risque-de-nous-couter-cher%2F>

<http://ministryofsolar.com/fr/solar-solutions/hybride-diesel-solaire/>)

<https://era.dz/salon/fr/content/programme-national-des-energies-nouvelles-et-renouvelables>

<https://www.th-energy.net/english/platform-renewable-energy-and-mining/database-solar-wind-power-plants/>

Site Internet du Ministère Algérien des Energies et des Mines, www.mem-algeria.org

<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-dirrigation-agricole> par R.Barta, I.Broner, J. Schneekloth and R.Waskom, Colorado High Plains Irrigation Practices Guide.

<http://www.fao.org/3/w3094f/w3094f05.htm> (Le petite irrigation dans le zones arides - Critères et options pour des méthodes d'irrigation appropriées).

Annexes

Annexe 1 : résultats du 1^{er} essai (influence de l'éclairement).

E=800W /m²	Courant(A)	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5	0
	Tension(V)	0	5	10	15	20	22
E=600W /m²	Courant(A)	4.5	4.5	4.5	4.5	20	0
	Tension(V)	0	5	10	15	20	21.8
E=400W /m²	Courant(A)	4.5	4.5	4.5	4.5	1.5	0
	Tension(V)	0	5	10	15	20	21.6
E=200W /m²	Courant(A)	4.5	4.5	4.5	4.5	0.5	0
	Tension(V)	0	5	10	15	20	21.4

Annexe 2 : Résultats de 2^{ème} essai (influence de l'éclairement).

E=800W /m²	Puissance(w)	0	25	50	70	40	0
	Tension(V)	0	5	10	15	20	22
E=600W /m²	Puissance(w)	0	15	30	50	30	0
	Tension(V)	0	5	10	15	20	20.8
E=400W /m²	Puissance(w)	0	10	20	30	20	0
	Tension(V)	0	5	10	15	20	20.6
E=200W /m²	Puissance(w)	0	5	10	15	10	0
	Tension(V)	0	5	10	15	20	20.4

Annexe 3 : résultats du 3^{ème} essai (influence de la température).

T=40C°	Courant(A)	5.8	5.8	5.8	3	0
	Tension(V)	0	5	10	15	17
T=35 C°	Courant(A)	5.7	5.7	5.7	5	0
	Tension(V)	0	5	10	15	18
T= 30 C°	Courant(A)	5.6	5.6	5.6	5.5	0
	Tension(V)	0	5	10	15	20.4
T=25 C°	Courant(A)	5.5	5.5	5.5	5.5	0
	Tension(V)	0	5	10	15	22

Annexe 4 : résultats du 4^{ème} essai (influence de la température).

T=40C°	Puissance(w)	0	30	60	0
	Tension(V)	0	5	10	17
T=35 C°	Puissance(w)	0	30	60	0
	Tension(V)	0	5	10	18
T=30 C°	Puissance(w)	0	30	60	0
	Tension(V)	0	5	10	20.4
T=25 C°	Puissance(w)	0	30	60	0
	Tension(V)	0	5	10	22

Annexe 5 : résultats du 1^{er} essai (avec alimentation par réseau électrique).

<i>N</i> (t/min)	<i>P</i> ₁ (Par)	<i>P</i> ₂ (Par)	<i>H</i> (mce)	<i>Q</i> (l/h)	<i>η</i> (%)
800	0,95	1,19	0,26	0	0
	0,95	1,18	0,25	40	3
	0,95	1,17	0,24	72	6
	0,94	1,15	0,23	100	8
	0,94	1,09	0,17	140	11
	0,94	1,07	0,15	180	13
	0,94	1,06	0,14	203	14
	0,94	1,01	0,09	286	13
	0,94	0,99	0,03	386	9

Annexe 6 : résultats du 2^{ème} essai (avec alimentation par réseau électrique).

<i>N</i> (t/min)	<i>P</i> ₁ (Par)	<i>P</i> ₂ (Par)	<i>H</i> (mce)	<i>Q</i> (l/h)	<i>η</i> (%)
1000	0,95	1,36	0,41	0	0
	0,94	1,34	0,4	45	4
	0,94	1,28	0,34	122	10
	0,94	1,17	0,27	230	16
	0,94	1,15	0,25	251	17
	0,94	1,09	0,19	347	17
	0,93	1,01	0,12	452	16
	0,93	0,99	0,11	479	15
	0,93	0,97	0,08	504	12

Annexe 7 : résultats du 3^{ème} essai (avec alimentation par réseau électrique).

<i>N</i> (t/min)	<i>P</i> ₁ (Par)	<i>P</i> ₂ (Par)	<i>H</i> (mce)	<i>Q</i> (l/h)	<i>η</i> (%)
1500	0,93	1,85	0,92	0	0
	0,93	1,77	0,84	103	8
	0,93	1,64	0,71	222	15
	0,92	1,57	0,65	295	20
	0,92	1,49	0,57	366	22
	0,9	1,23	0,33	616	25
	0,89	1,06	0,17	778	19

Annexe 8 : résultats du 4^{ème} essai (avec alimentation par réseau électrique).

N (t/min)	P_1 (Par)	P_2 (Par)	H (mce)	Q (l/h)	η (%)
2000	0,92	2,37	1,45	0	0
	0,92	2,28	1,36	215	13
	0,92	2,15	1,23	317	19
	0,91	1,91	1	495	26
	0,9	1,67	0,77	669	31
	0,88	1,34	0,46	902	30
	0,86	1,15	0,29	1046	22

Annexe 9 : résultats du 5^{ème} essai (avec alimentation photovoltaïque).

N (tr/min)	P_1 (Par)	P_2 (Par)	H (mce)	Q (l/h)	η (%)
800	0,92	1,19	0,27	0	0
	0,92	1,13	0,21	100	13
	0,92	1,11	0,19	140	15
	0,92	1,08	0,16	194	18
	0,92	1,05	0,13	248	22
	0,92	1,02	0,1	296	21
	0,92	1	0,08	341	17

Annexe 10: résultats du 6^{ème} essai (avec alimentation photovoltaïque).

N (t/min)	P_1 (Par)	P_2 (Par)	H (mce)	Q (l/h)	η (%)
1000	0,93	1,35	0,42	0	0
	0,92	1,27	0,35	110	13
	0,92	1,21	0,29	200	18
	0,92	1,14	0,22	306	25
	0,91	1,06	0,15	402	26
	0,91	0,99	0,08	500	18

Annexe 11 : résultats du 7^{ème} essai (avec alimentation photovoltaïque).

<i>N</i> (<i>t/min</i>)	<i>P</i> ₁ (<i>Par</i>)	<i>P</i> ₂ (<i>Par</i>)	<i>H</i> (<i>mce</i>)	<i>Q</i> (<i>l/h</i>)	<i>η</i> (%)
1500	0,93	1,84	0,91	9	0
	0,93	1,74	0,81	100	9
	0,93	1,64	0,71	225	18
	0,92	1,44	0,52	418	29
	0,92	1,36	0,44	497	31
	0,9	1,24	0,34	606	30
	0,89	1,09	0,2	756	24

Annexe 12: résultats du 8^{ème} essai (avec alimentation photovoltaïque).

<i>N</i> (<i>t/min</i>)	<i>P</i> ₁ (<i>Par</i>)	<i>P</i> ₂ (<i>Par</i>)	<i>H</i> (<i>mce</i>)	<i>Q</i> (<i>l/h</i>)	<i>η</i> (%)
2000	0,92	2,28	1,36	0	0
	0,92	2,07	1,15	370	23
	0,91	1,88	0,97	520	29
	0,9	1,62	0,72	701	33
	0,88	1,3	0,42	932	31
	0,86	1,15	0,29	1047	29