

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Département d'Hydraulique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Par

ELHADJ BELHADJ ELMEHDI

Thème :

UTILISATION DU POMPAGE SOLAIRE A L'APPROVISIONNEMENT EN EAU D'IRRIGATION DES OASIS DE LA SAOURA

Soutenue le 03/02/2024, devant le jury composé de :

Karim EZZIANE	Professeur	UHB de Chlef	Président
Boualem REMINI	Professeur	USD de Blida 1	Rapporteur
Saaed HAMMOUDI	Professeur	UHB de Chlef	Co-rapporteur
Mohamed RIABI	MCA	UHB de Chlef	Examineur
Ayoub ZEROUAL	MCA	ENSH de Blida	Examineur
Abdelkader BOUDERBALA	MCA	UDB Khemis Meliana	Examineur

Remerciements

La partie expérimentale de ce travail a été effectuée à l'UDES-MS (Unité de Développement des Equipements Solaires en Milieu Saharien) d'Adrar. J'exprime mes remerciements à l'équipe de la division pompage photovoltaïque pour l'aide et le soutien pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier particulièrement le professeur B. REMINI de l'université Saad Dahleb de Blida pour avoir dirigé ce travail malgré ses nombreuses occupations et surtout de sa patience, qu'il trouve ici mes respects.

Egalement, je remercie le professeur Saad Hamoudide l'université Hassiba Ben Bouali de Chlef d'avoir accepté la codirection de ce travail.

Mes vifs remerciements vont au Professeur Karim EZZIANE, vis recteur chargé de la post-graduation de l'université Hassiba Ben Bouali de Chlef pour son assistance administrative et d'avoir accepté la présidence du jury désigné pour examiner ce travail.

J'exprime ma reconnaissance et mes remerciements au Dr. RIABI Mohamed, Dr. ZEROUAL Ayoub ainsi que Dr. BOUDERBALA Abdelkader pour avoir consacré de leurs temps pour examiner ce travail.

Je remercie vivement mon cher ami Dr. REZZOUG Cherif pour ses encouragements permanents et pour ses précieux conseils. Egalement, je remercie Dr. YAHIAOUI Abdelhalim pour l'attention prêtée à ce travail et pour son soutien inestimable.

J'apprécie beaucoup les aides précieuses de mes collègues du département d'hydraulique de l'université de Bechar messieurs, Benmoussa Y., Merzougui T. et Mekkaoui A.

Je ne peux oublier de remercier ma femme, non pour ses encouragements pour que ce travail aboutisse, mais pour ses reproches et critiques parfois et des encouragements en d'autres moments.

Dédicaces

Ce modeste travail est dédié, en signe de reconnaissance, à ma petite famille.

A ma femme,

Mes deux filles, Hiba et Rania

Et à mes deux garçons, Yacine et Djarwad.

ملخص: إن السقي بالغمر هو الطريقة المستخدمة في الزراعة الصحراوية. في واحات الساورة يتم ذلك من خلال وسيلة تسمى "الفقارة" حيث يتم نقل المياه من خلال أنفاق عن طريق الجاذبية من مصدر المياه الجوفية إلى الواحات. في منطقة الساورة حيث المياه الجوفية حرة وضحلة، تُروى محاصيل الخضروات المزروعة، وخاصة الطماطم، بشبكة من الفقارات. إن التخلي عن شبكة الفقارات وتدهورها وكذلك هبوط منسوب المياه الجوفية قد أثر بشكل كبير على حالة هذه الفقارات وبالتالي على الزراعة في هذه المنطقة.

يعد توافر إمكانات الطاقة الشمسية من الحلول الواعدة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة للحفاظ على أنظمة السقي بالفقارة. لذلك يمكن أن يكون الضخ الشمسي حلاً مناسباً لزيادة معدلات تدفق الفقارات والتغلب على مشكلة عدم توفر الطاقة. خاصة وأن الواحات المروية بعيدة عن شبكة الكهرباء الوطنية.

تهتم الدراسة المقترحة بتكييف أنظمة الضخ الشمسي المستقلة لتزويد المحاصيل بمياه الري عن طريق زيادة معدلات تدفق الفقارات المهتدة. وهذا يتطلب دراسة الموارد المائية المتوفرة واحتياجات مياه الري للمحاصيل المحلية.

يتطلب تكييف نظام الضخ المناسب دراسة تجريبية في الموقع على نموذج ضخ أولي. من الضروري رسم منحنيات خصائص التشغيل لكل نظام يتم اعتباره، أي نظام المضخات الفردية أو المزدوجة، المستقلة أو عن طريق التتبع، من أجل تحديد أفضل ظروف التشغيل. مع العلم أن هذه الخصائص تتغير مع الوقت بسبب عدم استقرار شدة أشعة الشمس أثناء النهار. تظهر النتائج أن التدفقات التي تجلبها هذه الأنظمة إلى الفقارات كبيرة وتضمن عملها.

Résumé : L'irrigation par submersion est une méthode très utilisée en agriculture saharienne. Dans les oasis de la Saoura, celle-ci est effectuée à travers un moyen dit « foggara » où l'eau est acheminée par des galeries par écoulement gravitaire de la nappe jusqu'aux oasis.

Dans la région de la Saoura où la nappe est libre et à faible profondeur, les cultures potagères pratiquées et essentiellement les tomates sont irriguées par un réseau de foggaras. Le délaisement et la dégradation du réseau de foggaras ainsi que l'affaissement du niveau de la nappe ont influencés considérablement l'état de ces foggaras et par conséquent l'agriculture dans cette région.

La disponibilité du potentiel énergétique solaire constitue un atout promoteur dans les régions arides et semi-arides pour préserver les systèmes de foggaras. Le pompage solaire peut donc constituer une solution convenable afin de renforcer les débits des foggaras et de surpasser le problème d'indisponibilité de l'énergie. D'autant plus que les oasis irriguées se trouvent éloignées du réseau électrique national.

L'étude proposée consiste à adapter les systèmes de pompage solaire autonome à approvisionner les cultures en eau d'irrigation en renforçant les débits des foggaras menacées. Ceci passe par une étude des ressources hydrauliques disponibles et des besoins en eau d'irrigation des cultures locales.

L'adaptation du système de pompage approprié nécessite une étude expérimentale sur site sur un prototype de pompage. Le tracé des courbes caractéristiques de fonctionnement pour chaque configuration considérée à savoir un système de pompes simples ou couplées autonome ou par poursuite est nécessaire afin de déterminer les meilleures conditions de fonctionnement. Sachant que ces caractéristiques sont variables dans le temps du fait de l'instabilité de l'intensité d'ensoleillement durant la journée. Les résultats montrent que les débits apportés aux foggaras par de tels systèmes sont considérables et assurent le fonctionnement des foggaras.

Mots clés : Foggaras, Irrigation, Saoura, climat aride, pompage solaire

Abstract: Flood irrigation is the most method used in Saharan agriculture. In the oases of the Saoura, this is carried out through a means called "foggara" where the water is conveyed by galleries by gravity flow of the water table to the oases.

In the Saoura region where the water table is free and shallow, the vegetable crops grown, mainly tomatoes are irrigated by a network of foggaras. The abandonment and degradation of the network of foggaras as well as the subsidence of the level of the water table have considerably influenced the state of these foggaras and consequently agriculture in this region.

The availability of solar energy potential is a promotional asset in arid and semi-arid regions to preserve foggara systems. Solar pumping can therefore be a suitable solution to increase the flow rates of foggaras and overcome the problem of unavailability of energy. Especially since the irrigated oases are far from the national electricity grid.

The proposed study consists of adapting autonomous solar pumping systems to supply crops with irrigation water by increasing the flow rates of the threatened foggaras. This requires a study of the available hydraulic resources and the irrigation water needs of local crops.

The adaptation of the appropriate pumping system requires an experimental study on site on a pumping prototype. The drawing of the operating characteristic curves for each configuration considered, namely a system of single or coupled pumps, autonomous or by tracking, is necessary in order to determine the best operating conditions knowing that these characteristics are variable over time due to the instability of the solar intensity during the day. The results show that the flows brought to the foggaras by such systems are considerable and ensure the functioning of the foggaras.

Liste des figures :

- Figure 1.1** : Localisation de la vallée de la Saoura.
- Figure 1.2** : La coupe stratigraphique du Sahara Septentrional (Askri et Al, 2001).
- Figure 1.3**: Schéma géologique et structural de la basse Saoura (Bouima, 1986).
- Figure 1.4** : Schéma des axes des plis et des flexures des synclinaux et anticlinaux des monts de l'Ougarta. (Merzougui, 2011)
- Figure 1.5** : La répartition des stations pluviométriques et hydrométriques de la Saoura.
- Figure 1.6** : Courbe des températures moyennes mensuelles inter-annuelles du bassin de Guir, la station Djorf Torba (1985-2013)
- Figure 1.7** : Courbe des températures minimales, maximales et moyenne mensuelles inter-annuelles du bassin de Zouzfana de la station de Taghit (1985-2013).
- Figure 1.8**: Courbe des températures minimales, maximales et moyenne mensuelles inter annuelles du bassin de Saoura de la station de Béni Abbès (1985-2013).
- Figure 1.9**: Courbe des températures minimales, maximales et moyenne mensuels inter-annuelles du bassin de Béchar, station de Béchar (1985-2013).
- Figure 1.10** : Précipitations annuelles de la station de Taghit en cours de la période (1985 – 2013)
- Figure 1.11**: Précipitations annuelles de la station de Béni Abbès en cours de la période (1985 – 2013)
- Figure 1.12**: Précipitations annuelles de la station de Djorf Torba en cours de la période (1985 – 2013)
- Figure 1.13**: Précipitations annuelles de la station de Béchar en cours de la période (1985 – 2013)
- Figure 1.14**: Comparaison entre les Précipitations annuelles des 04 stations (1985–2013)
- Figure 1.15** : Vitesse moyennes des vents Béchar (1985-2013)
- Figure 1.16** : Répartition des fréquences selon les directions
- Figure 1.17**: Abaque de DE-MARTONNE
- Figure 1.18** : Climagramme de L'Emberger.
- Figure 1.19**: L'évaporation mensuelles inter annuelle de la station de Béchar série (1985-2013)
- Figure 1.20**: Evapotranspiration de la station de Béchar (1985-2013)
- Figure 1.21**: Evapotranspiration de la station de Djorf Torba (1985-2013)
- Figure 1.22** : Evapotranspiration de la station de Taghit (1985-2013)
- Figure 1.23**: Evapotranspiration de la station de Béni Abbès (1985-2013)
- Figure 1.24** : Courbe de comparaison des évapotranspirations des stations Béchar, Djorf Torba, Taghit et Béni Abbès (1985-2013)
- Figure 1.25** : Carte du bassin versant de l'oued Saoura (Clément, 2007).
- Figure 1.26** : Coupe schématique, des grands transferts hydrodynamiques dans le bassin sédimentaire du Nord Ouest saharien de l'Algérie (Merzougui, 1998).
- Figure 2.1** : Schéma descriptif d'une foggara
- Figure 2.2** : Réseau ramifié des foggaras autour de la ville d'Adrar sur image Satellite.
- Figure 2.3** : Vue d'ensemble des éléments de la foggara
- Figure 2.4** : Kiel El Ma avec son Louh (Boutadara. Y, 2009)
- Figure 2.5** : Schéma de fonctionnement d'une foggara
- Photo A.1** : Le vieux ksar au milieu de la palmeraie de Béni Abbès (2008).
- Figure A.1** : Carte de repérage de Béni Abbès
- Photo A.2** : Oued Saoura traverse Béni Abbès (2008).
- Figure A.4** : Schéma de répartition de l'eau de la source.
- Figure A.5** : Schéma simplifié d'une foggara de Béni Abbès.
- Figure B.1** : localisation de la commune de Béni Ounif.
- Photo B.3** : Le débouché à la sortie de la foggara de Béni Ounif (2008).
- Photo B.4**: Les travaux de réhabilitation des foggaras de Béni Ounif (2008).
- Photo B.5** : Réhabilitation des seguias de l'oasis de Béni Ounif (2008).
- Figure B.2** : La carte des réseaux des eaux souterraines et de surface de l'oasis de Béni Ounif
- Figure B.3** : Kharrouba ou bien Kial.
- Figure C.1** : Localisation de l'oasis de Boukais.
- Photo C.1** : Système de seguia de partage de l'eau Boukais (2014).
- Figure C.2**: schéma du Majen et seguia de partage oasis de Boukais.
- Photo C.4** : Bassin d'accumulation des eaux de l'oasis de Boukais « Majen » (2014).

Figure D.1: Localisation de Taghit

Figure D.2: L'oasis de Taghit (image Google Earth 2017)

Figure D.3 : Ksar de Taghit (Rezzoug C. 2017).

Figure D.4: La palmeraie de Taghit (Rezzoug C. 2017).

Figure D.5: Puits d'aération d'une foggara à l'oasis de Taghit (Rezzoug C. 2017).

Figure D.6: Anciens bassins d'accumulation des eaux du ksar et de palmeraie (Rezzoug C. 2017).

Figure D.7: Schéma de l'ensemble source, foggara, puits, bassin et seguia d'une foggara de Taghit.

Figure D.8 : Puits traditionnel de la palmeraie de Taghit (Rezzoug C. 2017).

Figure D.9: Dégradation des canaux d'irrigation dans la palmeraie de Taghit (Rezzoug C.2017).

Figure E.1 : Situation géographique de l'oasis d'Ouakda.

Photo E.1 : L'oasis d'Ouakda après sa dégradation (2013).

Figure E.2 : Distribution des puits de foggaras -l'oasis d'Ouakda (2011).

Figure E.3 : Distribution des puits de foggaras -l'oasis d'Ouakda.

Figure 4.1 : Spectre solaire hors atmosphère et au sol.

Figure 4.2: les trois composantes du rayonnement incident

Figure 4.3 : a) coordonnées horizontales b) coordonnées horaires

Figure 4.4 : Types de pompes solaire.

Figure 4.5 : Pompe à piston (*Jack pump*) : pour de grandes profondeurs et de petits débits d'eau

Figure 4.6 : Cheminement de l'écoulement dans une pompe centrifuge à étages multiples

Figure 4.7 : Pompe submersible centrifuge à étages multiples

Figure 4.8 : a) Le couple augmente très b) Le débit est proportionnel à la Vitesse ;

Figure 4.9: Pompe centrifuge flottante.

Figure 4.10 : Courbe du couple en fonction de la vitesse du moteur asynchrone bipolaire.

Figure 5.1 : caractéristiques électriques du module pour différentes valeurs d'éclairement et de température (UDTS-50).

Figure 5.2 : Schéma du banc d'essai.

Photo 5.1 : Photo du système de pompage PV (2016).

Figure 6.1 : Intensité d'ensoleillement : a- moi de Mars, b- mois de Mai.

Figure 6.2 : Evolution du débit dans la journée.

Figure 6.3 : Evolution du débit en fonction de l'éclairement.

Figure 6.4 : a- Système de pompage. b- système équivalent.

Figure 6.5 : Mesure du coefficient de frottement

Figure 6.6 : Courbe caractéristique de la conduite.

Figure 6.7 : Caractéristique HMT-Q à différents instants de la journée.

Figure 6.8 : Points de fonctionnement.

Figure 6.9 : influence de l'HMT sur le débit en fonction de l'ensoleillement.

Figure 6.10 : Puissance hydraulique et rendement de la pompe à différents instants de la journée et à différentes HMT.

Figure 6.11 : Performances du système de pompage.

Figure 6.12 : Rendement et débit en fonction de l'heure locale.

Liste des tableaux :

- Tableau I.1** : Caractéristiques des stations climatiques de la Saoura.
- Tableau 1.2** : températures minimales, maximales et moyennes mensuelles interannuelles de la station Djorf Torba (1985-2013).
- Tableau 1.3** : températures minimales, maximales et moyennes mensuelles interannuelles de la station de Taghit (1985-2013).
- Tableau 1.4** : températures minimales, maximales et moyennes mensuelles interannuelles de la station de Béni Abbès (1985-2013).
- Tableau 1.5** : Températures minimales, maximales et moyennes mensuelles interannuelles de la station de Béchar (1985-2013).
- Tableau 1.6** : précipitations moyennes mensuelles interannuelles des stations de la Saoura.
- Tableau 1.7** : Précipitations moyennes saisonnières en (mm).
- Tableau 1.8** : vitesse des vents moyens de Béchar série (1985-2013)
- Tableau 1.9** : fréquences des vents selon les directions.
- Tableau 1.10** : humidité relative moyenne mensuelle interannuelle en (%) de station de Béchar.
- Tableau 1.11** : nébulosité moyenne mensuelle de la station météorologique de Béchar sur une période d'observations de (1985 à 2013).
- Tableau 1.12** : évaporations mensuelles inter-annuelles de Béchar (1985-2013)
- Tableau 1.13** : Valeurs de l'ETP mensuelle selon THORNTWAITE - station de Béchar (1985-2013).
- Tableau 1.14** : Valeurs de l'ETP mensuelle selon THORNTWAITE de la station de Djorf Torba.
- Tableau 1.15** : Valeurs de l'ETP mensuelle selon THORNTWAITE de la station de Taghit.
- Tableau 1.16** : Valeurs de l'ETP mensuelle selon THORNTWAITE de la station de Béni Abbès.
- Tableau 1.17** : Valeurs de l'ETR mensuelles selon TURC
- Tableau 1.18** : valeurs de l'ETR mensuelles selon COUTAGNE
- Tableau 2.1 : Unités de mesure du débit de la foggara d'après (Remini.B, 2008).
- Tableau 2.2 : Tableau des sous multiples de Habba
- Tableau 2.3 : Tableau des sous multiples de Kirat.
- Tableau A.1** : Inventaire des foggaras situées à proximité de l'oasis de Béni Abbès.
- Tableau C.1** : Nombre de forages au niveau de Boukais. (DHW Bechar 2012)
- Tableau D.1**. Nombre et état des foggaras des palmeraies de Taghit.
- Tableau D.2** : Evolution physico-chimique des eaux des palmeraies de Taghit.
- Tableau 4.1** : Albédo de quelques matériaux
- Tableau 5.1** : Fiche de dimensionnement N°1.
- Tableau 5.2** : Données climatique de la région d'Adrar
- Tableau 5.3** : Caractéristiques du champ PV
- Tableau 5.4** : Évaluation de la ressource solaire et calcul de la charge RETScreen[®] - Projet d'installation photovoltaïque
- Tableau 5.5** Modèle énergétique RETScreen[®] - Projet d'installation photovoltaïque
- Tableau 5.6** : Caractéristiques du module PV
- Tableau 5.7** : Résultats du 1^{er} jour d'essais.
- Tableau 5.8** : Résultats du 1^{er} jour d'essais.
- Tableau 5.9** : Résultats du 3^{ème} jour d'essais.
- Tableau 5.10** : Résultats du 4^{ème} jour d'essais.
- Tableau 5.11**: Résultats du 5^{ème} jour d'essais.
- Tableau 5.12**: Résultats du 6^{ème} jour d'essais.

Liste des Notations :**Notations latines**

AH	Angle horaire	en degrés °
TSV	temps solaire vrai donné en heur quand $\Delta H=0$	
Z	Distance zenitale	en degrés °
h	La hauteur du soleil	-
aZ	Azimut	en degrés °
Wc	Puissance du générateur	watts-crête
C _h	constante hydraulique	Kg. s.h/m ²
Ea	Energie du champ PV	W. h
E _{élect}	Energie électrique	KW. h
E _{ensol}	Durée d'enseillement	H
E _{hyd}	Energie hydraulique	W h
E _{pompe}	Energie électrique	W h
g	Constante de la Gravité (9,81)	m/s
Hg	Hauteur géométrique	m
I	Intensité de courant	A
N _d	Niveau dynamique	m
N _s	Niveau statique	m
Ps	Perte de charge	m
Q	Débit	m ³ /h
P _{min}	Pression minimum	kg/cm ²
P _{max}	Pression maximum	kg/cm ²
R	Résistance hydraulique de la conduite	- s ² /h
P _h	Puissance hydraulique	watt
Cos φ	Facteur de puissance	-
P _a	Puissance absorbée	watt
P _u	Puissance utile	watt

Notations grecques

δ	Déclinaison	en degrés °
λ	Coefficient de frottement de la conduite	-
ρ	Masse volumique de l'eau	Kg/m ³
η _{MP}	Rendement de motopompe	%
η _p	Rendement de la pompe	%

Abréviations

UDES	Unité de développement des équipements solaires
S.E.E.S-M.S	Station d'Expérimentation des Équipements Solaires en Milieu Saharien
NOCT	Nominal Operating Cells Temperature
STC	Service Température Cells
UDTS	Unité de Développement de Technologie du Silicium
HMT	Hauteur Manométrique Totale
TSV	Temps Solaire Vrai donné en heur quand AH=0
Da	Durée astronomique du jour
PV	Photovoltaïque
CC	Courant Continu
CA	Courant Alternatif
DHW	direction d'hydraulique de wilaya
ANRH	agence nationale des ressources hydrauliques
Nj	Numéro du jour dans l'année

Sommaire

Résumé.	i
Liste des figures.	ii
Liste des tableaux.	v
Liste des Notations.	vi
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : GEOLOGIE ET HYDRO-CLIMATOLOGIE DE LA SAOURA	3
1.0. INTRODUCTION	3
1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA SAOURA	3
1.2. RELIEF DE LA SAOURA	4
1.3. LA GEOLOGIE DE LA SAOURA	5
1.3.1. Aperçu Géologique Régional :	5
1.4. CLIMATOLOGIE DE LA SAOURA	12
1) Température	14
2) Les précipitations	18
3) Les vents	23
4) Humidité relative	24
5) Nébulosité	24
6) Indice d'aridité	24
7) L'évaporation	28
8) L'évapotranspiration	28
1.5. HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE DE LA SAOURA	35
A) Eaux de surface	35
1. Barrage Djorf Torba	35
2. Digue de stockage	36
3. Les oueds	36
B) Eaux souterraines :	37
1. Nappe turonienne d'Ouakda	37
2. Nappe du quaternaire d'Ouakda	38
3. Nappe jurassique de Mougheul	38
4. Nappe du Grand Erg Occidental	38
5. Nappe de la hamada du Guir	38
6. Nappes des formations paléozoïques	38
7. Nappes des terrasses alluviales et d'inféro-flux	39
1.6. CONCLUSION	39
Chapitre 2 : SYSTEME DE CAPTAGE TRADITIONNEL DES EAUX PAR FOGGARA	41
2.1. INTRODUCTION	41
2. 2. HISTORIQUE DE LA FOGGARA :	41
2.3. ETYMOLOGIE « FOGGARA »	42
2.4. NAISSANCE D'UNE FOGGARA :	42
2.4.1. Une source :	43
2.4.2. Puits Amont	43
2.4.3. Puits Aval	43

2.5. COMPOSITION DE LA FOGGARA :	43
2.5.1. <i>Le Puits « Hassi » :</i>	43
2.5.2. <i>La Galerie « N'fad » :</i>	45
2.5.3. <i>L'Aghisrou :</i>	45
2.5.4. <i>Canal Principal « Majra » :</i>	45
2.5.5. <i>Peigne Répartiteur « Kasria » :</i>	47
2.5.6. <i>Rigole « Seguia » :</i>	47
2.5.7. <i>Bassin « Majen » :</i>	47
2.6. MESURE ET PARTAGE DU DEBIT DE LA FOGGARA :	47
2.6.1. <i>Outil de mesure :</i>	49
2.6.2. <i>Unité de mesure :</i>	49
2.6.3. <i>Mesure du débit :</i>	51
2.6.4. <i>Partage du débit :</i>	51
2.7. FONCTIONNEMENT DE LA FOGGARA :	52
2.8. TYPE DE FOGGARA :	53
2.8.1. <i>Foggara de l'Erg :</i>	53
2.8.2. <i>Foggara du plateau :</i>	53
2.8.3. <i>Foggara du Jardin :</i>	53
2.8.4. <i>Groupement de foggaras :</i>	53
Chapitre 3 : INVENAIRE DES OASIS DE LA VALLEE DE LA SAOURA	
	54
3.1. INTRODUCTION :	54
A- L'OASIS DE BENI ABBES :	54
A.1. <i>Introduction :</i>	54
A.2. <i>Situation géographique</i>	55
A.3. <i>Géomorphologique</i>	56
A.4. <i>Agriculture de l'oasis de Béni Abbès</i>	57
A.5. <i>Sources et répartition de l'eau à Béni Abbès</i>	58
A.5.1. <i>L'eau d'irrigation</i>	59
A.5.2. <i>Mode d'irrigation traditionnelle</i>	60
A.5.3. <i>La gestion de l'eau</i>	61
B. L'OASIS DE BENI OUNIF :	63
B.1. Introduction	63
B.2. Ressources En Eau De L'oasis	64
a) <i>Eau de surface</i>	64
b) <i>Nappes souterraines de Béni Ounif</i>	64
B.3. Foggaras de Béni Ounif	64
B.3.1. <i>Réhabilitation des foggaras</i>	65
B.3.2. <i>Seguia (Souagui pour plusieurs)</i>	66
B.3.3. <i>Kharrouba</i>	68
B.4. Les Puits	68
B.5. Abandon De La Palmeraie	68
C. L'OSIS DE BOUKAIS :	70
C.1. Introduction	70
C.2. Présentation De L'oasis De Boukais	70
C.3. Type De Source D'eau	71
C.4. Le Partage et le Droit A L'eau :	71
C.4.1. <i>Le rôle des seguias</i>	72
C.4.2. <i>Kharrouba et le partage des eaux</i>	73
C.4.3. <i>Le bassin de stockage : El bassane « Majen »</i>	74
C.4.4. <i>Le principe de partage de l'eau</i>	74
C.5. Les Forages	75
D. L'OASIS DE TAGHIT	76
D.1. INTRODUCTION	76
D.2. MATERIEL ET METHODES	77
D.2.1 <i>Le vieux ksar de Taghit</i>	77

D.2.2 Faune et flore de Taghit	78
D.2.3 Palmeraie de Taghit	78
D.2.4 Sources d'eau de Taghit	78
D.3. RESULTAS ET DISCUSSION	79
D.3.1 Foggara de source	79
D.3.2 Puits traditionnels	81
D.3.3 Problèmes de foggara de Taghit	81
D.3.4 Problème de la salinité dans l'oasis de Taghit	82
D.4. Conclusion	83
E. L'OASIS DE OUKDA :	84
E.1. Introduction	84
E.2. Les Ressources D'eau D'irrigation :	85
E.3. Situation Actuel de L'oasis	85
E.4. L'irrigation Traditionnelle De L'oasis D'ouakda	85
E.5 Les Puits	88
E.6. Les Forages	88
Chapitre 4 : SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES ET POTENTIEL	
ENERGETIQUE SOLAIRE	
4.1. Introduction.	89
4.2. Energie solaire.	89
4.2.1. Définition du rayonnement solaire.	90
4.2.2. Composante de rayonnement solaire.	91
4.2.2.1. Le rayonnement direct.	91
4.2.2.2. Le rayonnement diffus.	92
4.2.2.3. L'albédo au sol.	92
4.2.2.4. Le rayonnement global.	92
4.2.3. Paramètres influents sur le rayonnement solaire.	93
4.2.3.1. Angle horaire.	93
4.2.3.2. Déclinaison.	93
4.2.3.3. Hauteur du soleil au dessus de l'horizon.	94
4.2.3.4. Azimut.	94
4.2.3.5. Temps solaire vrai TSV.	94
4.2.3.6. Durée astronomique du jour DA.	95
4.3. La conversion de l'énergie solaire.	96
4.3.1. Le solaire thermique.	96
4.3.2. Le solaire photovoltaïque.	96
4.3.3. Principe de fonctionnement.	97
4.3.3.1. La cellule photovoltaïque.	97
4.4. Système photovoltaïque.	98
4.4.1. Module photovoltaïque.	99
4.4.2. Batterie d'accumulateurs.	100
4.4.3. Conditionneurs de l'énergie.	101
4.4.4. Pompe solaire.	101
4.4.4.1. Type de pompe.	102
4.4.4.2. La pompe volumétrique.	103
4.4.4.3. La pompe centrifuge.	104
4.4.4.4. Caractéristique de la pompe centrifuge immergée.	105
4.4.4.5. Pompe centrifuge flottante.	106
4.4.5. Type de moteurs.	107
4.4.5.1. Moteurs à courant alternatif.	107
4.4.5.2. Couplage générateur PV groupe de pompage.	109
4.4.5.3. Rendement du groupe Motopompe – générateur.	109
4.5. Dimensionnement d'une pompe photovoltaïque.	110
4.5.1. Données de base.	110
4.5.1.1. Débit.	111
4.5.1.2. Hauteur manométrie totale.	111
4.5.1.3. Niveau statique.	111
4.5.1. Niveau dynamique.	111

Chapitre 5 : Expérimentation d'une Pompe Solaire	112
5.1. Introduction.	112
5.2. Calcul de l'énergie quotidienne requise.	114
5.2.1. Energie requise pour la pompe.	114
5.2.2. Analyse de besoin et des conditions d'exploitation.	115
5.2.3. Estimation des besoins en eau.	115
5.3. Dimensionnement du système de pompage.	116
5.3.1. Fiche de dimensionnement n°01-Estimation de la charge.	117
5.3.2. Fiche de dimensionnement n°02-Définition des conditions du site.	118
5.3.3. Fiche de dimensionnement n°03-Dimensionnement du champ PV.	120
5.3.4. Dimensionnement du champ et des éléments de conditionnement de l'électricité.	120
5.3.5. Résultats du logiciel RETScreen.	121
5.3.6. Caractéristique du site d'essais.	124
5.3.7. Caractéristique du système de pompage.	124
a) modules.	124
b) groupe motopompe.	125
c) convertisseur de courant.	127
d) le puits.	128
e) la conduite de refoulement.	128
5.3.8. Appareillage de mesure et de régulation.	128
5.4. Description du banc d'essais.	129
5.4.1. But des essais.	131
5.4.2. Procédure expérimentale.	131
5.4.3. Résultats du 1 ^{er} essai.	131
5.4.4. Résultats du 2 ^{ème} essai.	131
5.4.5. Caractéristique $Q = f(E_c)$	133
5.4.6. Procédure D'essai Et Instruction D'emploi :	137
CHAPITRE 6: Résultats Expérimentaux et Discussions	138
6.1. Introduction.	138
6.2. Paramètre intervenants dans la caractérisation.	138
6.2.1. Eclairement ou ensoleillement E_c [W/m^2].	139
6.2.2. Débit de pompage.	140
6.2.3. Calcul de la caractéristique de la conduite.	140
a) conduite équivalente.	141
b) coefficient de frottement de la conduite λ .	143
c) résistance hydraulique de la conduite.	143
6.3. Courbe caractéristique : $H = f(Q)$.	146
6.4. Courbes caractéristiques $P = f(Q)$ et $\eta = f(Q)$.	149
6.5. Performances de la pompe.	152
Conclusion Générale.	156
Références bibliographiques et Webographies.	158

INTRODUCTION GENERALE

Tout comme l'air et la lumière, l'eau représente un besoin essentiel à la vie de tout être. Sa disponibilité de manière quantitative et qualitative s'avère de plus en plus importante. Sa garantie exige la disponibilité de source d'énergie permanente et suffisante.

Les Oasis en milieu saharien tel que la Saoura au sud-ouest de l'Algérie, représentent un facteur très important pour le maintien et la sédentarisation des habitants locaux. Parce que la subsistance des oasis constitue l'unique artère de survie de ces habitants du fait qu'ils constituent une source considérable d'aliments pour eux.

Les oasis à leur tour sont condamnés par la disponibilité de source d'eau suffisante et permanente afin d'assurer les besoins de potabilité et d'irrigation des habitants et des cultures locales. A cause de sa rareté, l'eau est collectée et gérée par un système de partage traditionnel très strict.

Le transfert de l'eau par gravité depuis la source jusqu'à l'oasis par un réseau de foggaras permet de réduire les pertes par évaporation. Ces foggaras sont exposées à des problèmes tant humains que naturels qui menacent leur existence. Parmi lesquels, l'abaissement du niveau statique de la nappe dû au pompage excessive.

Aussi, ces dernières années, l'Algérie compte une insuffisance d'énergie électrique de plus en plus accentuée. Encore plus en été dans les régions sahariennes isolées et éloigné du réseau électrique national. En conséquence, la recherche d'autres sources d'énergie devient impérative.

En milieu saharien, l'énergie solaire peut constituée une solution de substitution, sinon d'appoint à l'énergie électrique du réseau national. Cet apport d'énergie est tellement important qu'il peut combler le manque constaté. D'autant plus que ces régions sont caractérisées par des intensités et des durées d'ensoleillement assez suffisantes pour produire l'énergie électrique nécessaire aux besoins énergétiques.

La caractérisation des pompes ordinaire s'effectue par la recherche de leurs points de fonctionnement sur les courbes caractéristiques. Sachant que l'alimentation de la pompe est constante.

La particularité d'une pompe solaire photovoltaïque est la non constance de l'alimentation du fait de la variation de l'ensoleillement journalier. Cependant, la caractérisation d'une pompe solaire s'effectue par la recherche d'une plage de fonctionnement et non un point de fonctionnement.

L'objet de ce document est **d'adapter un système de pompage solaire autonome pour maintenir le débit de foggara en cas de tarissement de la nappe**. Ceci consiste à caractériser la pompe solaire par le tracé des courbes caractéristiques en passant par des essais expérimentaux sur un système de pompage photovoltaïque installé à l'Unité de Développement des Energies Renouvelables (UDES) en milieu saharien d'Adrar.

Pour ce faire, notre travail s'étalera sur six parties.

Dans le premier chapitre, on présente la zone d'étude, la Saoura ainsi que son hydrogéologie et sa climatologie. On effectue ensuite un exposé des potentialités des ressources hydrauliques disponibles dans cette région.

L'eau des oasis de la Saoura est gérée par un système de captage par foggaras. Celles-ci sont commandées par des méthodes de mesure et de partage des débits très stricts qui seront détaillées dans le deuxième chapitre.

Ensuite, on présente un inventaire des principaux oasis encore existants avec leurs modes d'alimentation et de gestion d'eau, dans le troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre, on expose une vue générale sur l'énergie solaire et sa conversion ainsi qu'une description des différents composants constituant les systèmes photovoltaïques. Ensuite, dans le cinquième chapitre de ce manuscrit, on présente les matériels et procédure expérimentale, ainsi que le dimensionnement des composantes du système de pompage et l'évaluation de la surface active du champ photovoltaïque nécessaire. Cette étude passe par l'établissement d'un bilan énergétique sur une journée de la plus grande consommation en eau (débit max). Egalement, les essais de caractérisation de la pompe sont effectués sur un système de pompage photovoltaïque installé à la S.E.E.S-M.S d'Adrar.

En fin le sixième chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus et leurs discussions.

Chapitre 1

GEOLOGIE ET HYDRO-CLIMATOLOGIE DE LA VALEE DE LA SAOURA

I.0. INTRODUCTION

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter le milieu sur lequel porte l'étude menée, en fonction de la géologie et l'hydroclimatologie. L'étude de ces facteurs conduit à une bonne compréhension de la richesse exceptionnelle qui caractérise la Saoura.

La géologie de la région est représentée par des terrains allant du carbonifère au quaternaire. Le terrain est constitué de plusieurs ensembles de niveaux et de formations différentes (Merzougui, 1998).

Le climat auquel est soumise la Saoura est du type saharien, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers froids avec des faibles précipitations. La région de la Saoura est le pays du soleil, elle reçoit seulement de 50 à 100 mm de pluie par an (Mekideche, Touat et Younsi, 1995).

I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA SAOURA

La Saoura est une région désertique se situe dans la partie Nord-Occidentale du Sahara algérien. Elle est limitée au Nord par les Monts des Ksour et le haut Atlas marocain, à l'Ouest par la hamada du Draa, à l'Est par les oasis du Tidikelt et au Sud par le plateau du Tanezrouft. Elle tire son nom du grand oued Saoura, connue aussi par ces oasis de palmiers, qui se propagent sur le long de la vallée de la Saoura et le Grand Erg Occidental comme un collier de perles.

La vallée de la Saoura traverse le Sahara, elle s'insère entre les sables du Grand Erg occidental et la hamada du Guir. Elle doit sa fertilité à la présence de nombreuses sources, se localise tout le long de son parcours. La vallée de la Saoura prend naissance au niveau d'Igli par le conflit du Zouzfana à l'Est et le Guir à l'Ouest. Cette vallée est le cordon ombilical de toutes les oasis de la

Saoura, commençant par celle d'Igli et arrivant à celle de Kerzaz, après un parcours de 400 Km (Schoeller, 1945).

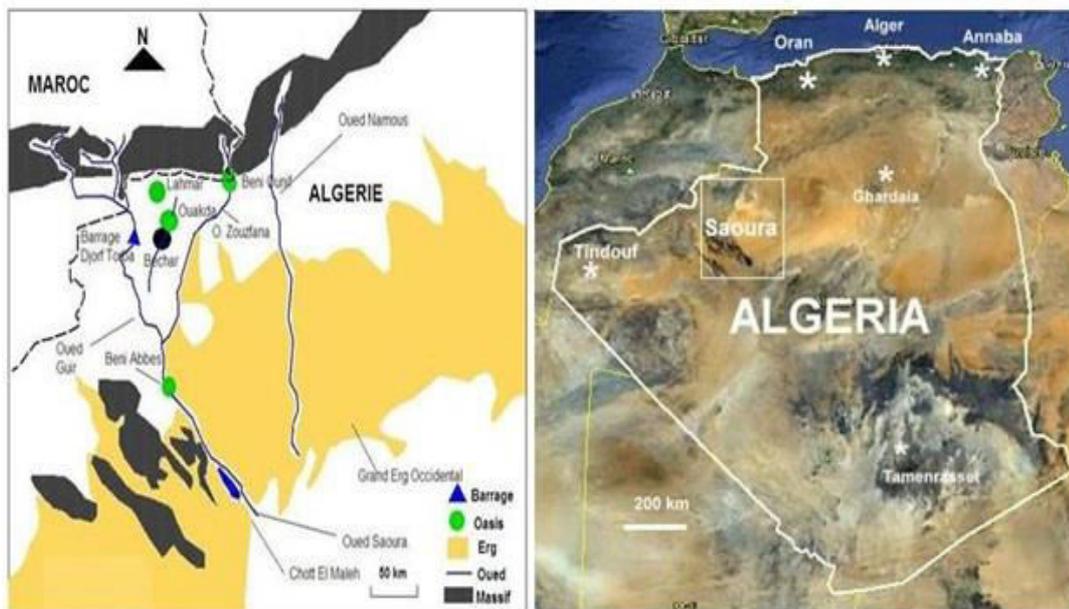


Figure I.1 : Localisation de la vallée de la Saoura.

I.2. RELIEF DE LA SAOURA

Le territoire de La Saoura est caractérisée par cinq types de relief, y compris:

- **Les montagnes :** barren souvent seulement après les périodes de précipitations, certains d'entre eux caractérisés par un peu d'élévation, elles sont constituées par : le Djebel Antar (1953 m) et Grouz (1835 m) au Nord et le Djebel Béchar (1206 m), et cela commence dès le début de Zouzfana au Nord jusqu'à Igli au Sud et qui traverse la périphérie de Taghit.

- **Les plateaux et hamadas :**

- Plateaux : ils sont séparés par des affleurements secondaires et tertiaires (les deux Bargas) qui caractérisent avec leurs crêtes abruptes et parallèles, d'une longueur de 130 km et de large de 1 à 2 km, cette bande s'étend de Toumiet au Nord-Est de Béchar jusqu'à Tiderdatine au pied de la hamada du Guir, les deux Bargas suivent jusqu'à Béchar la même direction que l'oued (Conrad et Roche, 1965).

- Hamadas : elles sont de vastes étendues rocailleuses, comme la hamada de Guir. Les hamadas sont des plateaux tabulaires, constitués essentiellement de pierres en dalles rocheuses comme les ergs, les hamadas peuvent s'étaler sur des grandes surfaces. Ainsi, la hamada de Guir située au Nord-ouest couvre un vaste territoire et domine les vallées environnantes (Merzougui,

1998). Les autres hamadas plus petites, celle d'Oum Es-Sebah dans le bassin de Béchar est dominée par des buttes ruiniformes appelées (gara). Les plateaux hamadiens surplombants les dépressions, sont érodés et caractérisés par des contours irréguliers (Fortas, 2016).

- **Les regs et ergs** : les regs forment des surfaces planes de graviers ou de débris de roches, où se mêlent sable, limon et argile. Ils couvrent les trois-quarts de la surface du Sahara. A l'exception des "dayas", dépressions argileuses qui retiennent l'eau et où s'installe une végétation permanente de buissons ligneux et épineux, ce sont les zones les plus pauvres du désert. Ils s'achèvent parfois en hamadas. Les ergs existants portent les noms de : Grand Erg Occidental, Erg Erraoui, Erg El Atchane et l'Erg Iguidi (Merzougui, 1998).

- **Les vallées** : elles sont des dépressions façonnées par les cours d'eau importants. Les principaux sont celles de la Zouzfana, du Guir et de la Saoura.

I.3. LA GEOLOGIE DE LA SAOURA

La géologie facilite la quantification des aquifères et tous les types des nappes d'eau. L'existence des eaux souterraines est conditionnée par un critère géologique, qui comprend des conditions lithologiques et structurales, assurant un rôle décisif dans l'existence ou non de l'aquifère. Le second critère est d'ordre climatique ou paléo-climatique local ou régional, qui détermine les conditions de recharge des nappes souterraines (Castany, 1980).

La région d'étude est considérée comme une partie de la plate-forme saharienne, qui est vide, monotone et stable. Sur le plan événement géologique, cette région s'inscrit également dans une zone de transition entre la plate-forme saharienne et le domaine atlasique.

La région de Béni Abbès et Kerzaz se rattache à la chaîne d'Ougarta. Cette dernière s'individualise nettement dans le Sahara algérien, et forme un relief allongé sur 400 Km de longueur et de 200 Km de largeur. Cette région montre souvent les meilleurs affleurements, d'une gamme de terrains très variés, allant du précambrien à l'actuel (Merzougui, 2011).

I.3.1. Aperçu Géologique Régional :

De nombreux travaux géologiques ont été consacrés à l'étude du paléozoïque de la région de Béchar (Alimen, Menchikoff, Petter, Poueyto, 1952).

Outre des nombreuses contributions et des travaux de recherche et d'exploitation sur les combustibles solides et liquides (pétrole et charbon), réalisés par des compagnies spécialisées dans le domaine (les Houillères sud Oranais, BRMA, la SN Répal, la SONAREM et la

SONATRACH). La région de Béchar fait partie de la plateforme saharienne où nous pouvons distinguer les grands ensembles suivants :

- ✓ L'Atlas Saharien au Nord, représenté par les monts jurassiques de djebel Grouz, d'orientation EW au Sud des ksours du Nord (Lahmar, Mougheul et Boukais).
- ✓ La hamada de Guir à l'Ouest, où affleurent les calcaires lacustres du pliocène au Sud et les formations quaternaires au Nord.
- ✓ Le Grand Erg Occidental, au Sud-Est.
- ✓ Les chaînes du paléozoïque inférieur de l'Ougarta, au Sud.

Nous pouvons noter des structures tectoniques (anticlinorium d'oued Zouzfana, anticlinal de Chebkat Menouna WSW-ENE) et de nombreux bassins.

- Le bassin salifère crétacé (au Nord-Ouest de Béchar).
- Les bassins houillers (Wesphalien-Stephanien) : Béchar-Kenadsa, abadla-Gharassa et Mézarif-Nekheila.
- Le bassin jurassique de Chebket Fendi.

Pour une meilleure compréhension du cadre géologique, nous débordons les limites de la région d'étude, car les formations géologiques se prolongent et se superposent les unes sur les autres.

Cette région est constituée d'une large gamme de terrains géologiques variés, appartenant à une fourchette de temps, allant du précambrien à l'actuel. Elle est scindée en deux parties (Alimen, Menchikoff, Petter, Poueyto, 1952).

Partie méridionale : appartenant à la vieille plateforme saharienne, faiblement ébranlée par l'Hercynien.

Partie septentrionale : fait partie du domaine atlasique, déformée énergiquement par l'hercynien et violemment reprise par l'Alpin.

A) Précambrien

Il comprend des flyshs et des grauwares recoupés par des roches magmatiques. L'ensemble est coiffé par des ignimbrites (Chikkaoui, 1974).

Il est représenté par un matériel volcano-détritique dit « série verte » composé d'une alternance de débris de roches et conglomérat à galets de socle représentée par la figure (figure 1.2). Les terrains Précambriens Apparaîtront à la surface aux cœurs de quelques anticlinaux comme : Sebkhah el Mellah, Boukbaissat, et Kahal Tabalbala (Chikkaoui, 1974).

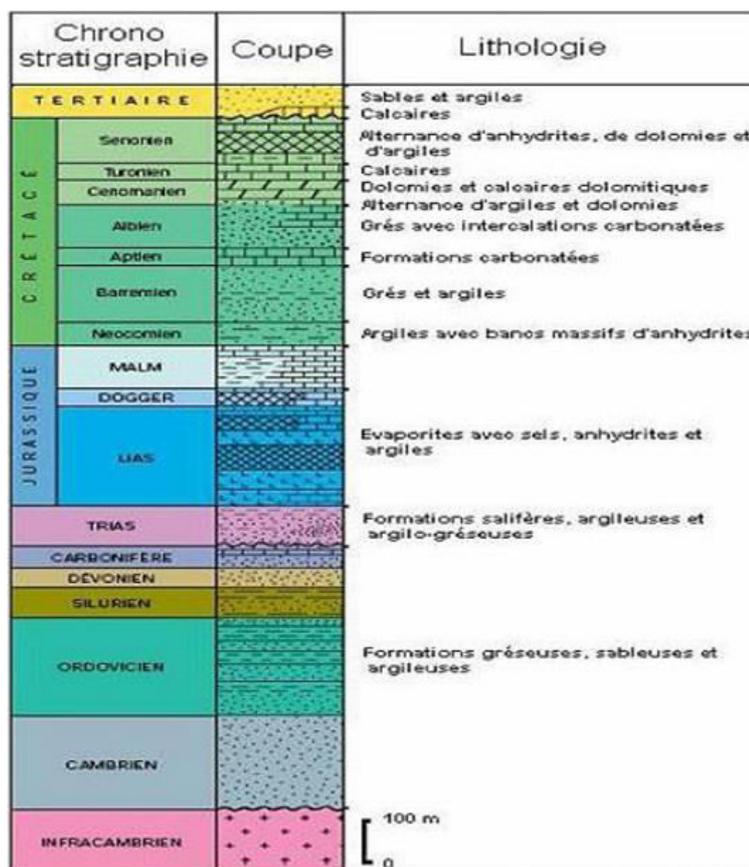


Figure I.2 : La coupe stratigraphique du Sahara Septentrional (Askri et Al, 2001).

B) Le Paléozoïque

Emporte sur le socle précambrien. Le paléozoïque est caractérisé par un substratum imperméable.

Le paléozoïque correspond à une puissante série de plus de 7000 m d'épaisseur. Le cambrien est silico clastique, l'ordovicien est gréseux interrompu par des horizons argileux. Les deux étapes forment l'ossature de la chaîne. Le silurien est argileux, le dévonien et le carbonifère tendre ne sont conservés que dans les structures synclinales (Merzougui, 1998).

- **Le Cambro-Ordovicien (600- 1250 m) :** Il affleure largement dans le site de Talzaza (Au niveau des ksour du Nord : Lahmar, Boukais et Mougheul). D'autres affleurements sont connus au niveau de Megsem el Aris (Menchikoff, 1933). Il s'agit d'une formation de grès et de quartzites.

Il comprend les formations suivantes :

- Formation de Sebkh El Melah (350-400 m) : il s'agit de grès arkosiques, peu indurés, à feldspaths abondants et à granulométrie homogène et moyenne.

- Formation d'Ain Néchéa (800 m) : elle est constituée essentiellement par des grès quartzeux et des quartzites en dalles métriques à intercalations de grès argileux en plaquettes.

- **Ordovicien (1100-1400 m)** ; se compose de cinq formations :

- Formation de Foug Tineslem au niveau de Béni Ounif (1140-1200 m) : caractérisée par des grès glauconieux verdâtres en plaquettes, à intercalations de silstones, et des lentilles de calcaire gréseux.

- Formation de Kheneg El Aatène (1140-1300 m) : constituée de grès quartzeux avec intercalations de passées argileuses.

- Formation de Grouz (1230-1300 m) : ce sont des schistes, des grès quartzeux, des grès ferrugineux et des calcaires fossilifères.

- Formation de Bou M'haoud (1150-1220 m) ; comprend des grès quartzeux en plaquettes intercalés d'aleurolites, des schistes et des calcaires lenticulaires.

- Formation de Bzazil Elkalba (BEK) au Nord d'Ouakda (1110-1200 m) ; caractérisée par une argile conglomératique.

- **Silurien (1000-1250 m)** : la formation d'Ouled Ali à Béni Abbès est caractérisée par des affleurements restreints, représentée par des schistes noirs armés de bancs calcaires.

- **Dévonien (1700-2000 m)** : présente dans le Touat au Sud de kerzaz, elle est caractérisée par des formations de calcaire et des grès ferrugineux emportant essentiellement dans la région de Zaouïet Kounta.

Le dévonien est subdivisé en six formations - Formation de Zmeilet argilo-silteuse (Merzougui, 2011) :

- Formation de Saheb El Djir argileuse ;

- Formation de Dkhissa argilo-gréseuse dans sa partie inférieure et gréseuse dans sa partie supérieure ;

- Formation de l'Oued Tiferguenit argilo-gréseuse ;

- Formation de Chefar El Ahmar représentée par des calcaires ;

- Formation de Merhouma; argilo gréseuse ;

- **Carbonifère** : Il affleure le long de la vallée de la Saoura, caractérisé par des divers sédiments de marin profond jusqu'à continental, il se trouve le carbonifère inférieur subdivisé en un ensemble argilo-gréseux emporte d'une formation argileuse datée du viséen au niveau de Boukais jusqu'à Ouakda, le carbonifère supérieur, depuis Igli jusqu'à Ouarourout au Nord de Béni Abbès. Dans cette dernière le tournaisien est représenté par des grés, des argiles et des

calcaires rougeâtres à Goniatites. Ces affleurements sont connus sous le nom de la formation d'Azzel Matti.

C) Mésozoïque

Il domine la majeure partie de Touat et une partie de la plaine de Béni Ounif. Leurs territoires reposent en discordance angulaire sur les terrains de paléozoïque au Sud de la région de Mougheul.

D) Le crétacé

Il est connu dans la partie Nord-Ouest de la chaîne, au niveau de Tadaout El- Beghile, qui est une partie de Kem Kem, il s'agit de grès, d'argile et de calcaire, cumulant une épaisseur de 40m (Merzougui, 2011).

❖ Crétacé inférieur Continental intercalaire

Dans le Gourara, le Touat et le Tidikelt, le Continental intercalaire est daté du Crétacé inférieur, grâce à des découvertes paléontologiques assez nombreuses. Il existe une lacune très importante, allant du permien au jurassique supérieur, entre le Continental post-tassilien, plissé, d'âge stéphanien (Bonnet, 1983) et les assises continentales fossilifères, qui forment le plateau de Tidikelt.

❖ Crétacé supérieur

Emporte la partie centrale de la plaine de Béni Ounif. Il est constitué généralement par une double dalle calcaire dure surmontant des argiles et des grès rouges, des calcaires plus ou moins dolomitiques parfois pétris de coquilles marines.

- **Le cénozoïque** : il forme les dépôts de la hamada du Guir (40 à 50 m), discordants sur les différents termes du paléozoïque. Il se compose de dépôts fluvio-lacustres couronnés d'une carapace silico-carbonatée (Roche, 1973).

- **Le quaternaire** : il se compose d'un groupe des dépôts de Sébkhas et des dunes de sable (Conrad et Roche, 1965). Le Grand Erg Occidental au sud de la Saoura, à l'ouest au niveau de Kenadsa et sebgha Elmaleh.

E) Tectonique

Aujourd'hui, la tectonique des chaînes d'Ougarta et Grouz est très complexe, elle cumule sûrement plusieurs pauses tectoniques panafricaines et hercyniennes (Fabre, 1983). Toutefois, on esquisse ces tectoniques en :

- **Style souple** : les terrains constituant la chaîne de Grouz sont organisés selon une succession de plis synclinaux larges et anticlinaux serrés, orientés NW-SE (Menchikoff, 1933). Les structures sont le résultat de deux phases majeures : la première série est SW-NE ; suivie

d'une autre phase N.S (Menchikoff, 1933). Ces phases ont donné naissance à : (Merzougui, 2011)

- l'anticlinorium de Kahal Tabalbala. ;
- l'anticlinorium central d'Ougarta ;
- l'anticlinorium de Kerzaz ;
- **Style cassante** : cette catégorie de tectonique se matérialise dans le terrain par des failles normales et inverses a travers de la basse Saoura.
 - Les failles ont trois principales directions : NW – SE ; NE – SW et E – W, (Merzougui, 1998).
 - Les charnières des plis sont fortement fracturées. Les cartes aéromagnétiques suggèrent deux grandes failles que la chaîne d'Ougarta a pour limite : au Sud-Ouest, la faille sud-ougartienne (Figure I.3).

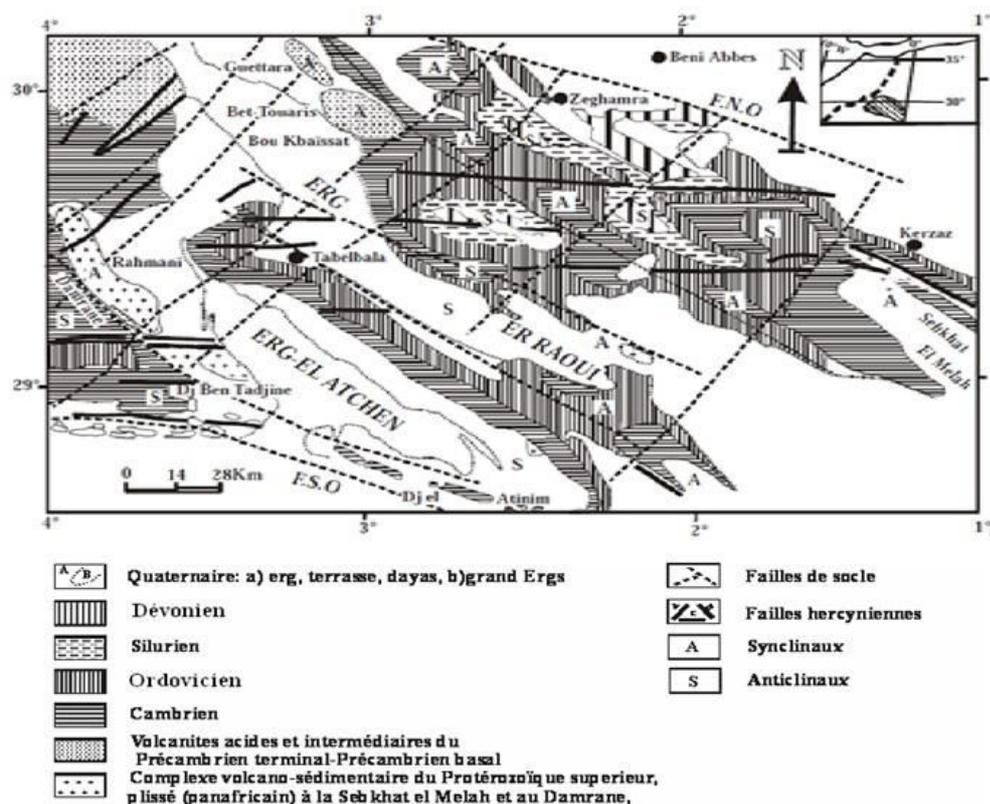


Figure I.3: Schéma géologique et structural de la basse Saoura (Bouima, 1986).

- **Terrasses moyennes (le Saourien)** : elles contiennent le Pleistocène moyen et le Pleistocène supérieur (ou Saourien), après le pleistocène moyen s'instaure un climat aride, voir hyper aride, interrompu au Saourien. Les deux couches sont formées d'une série d'encroûtement surmontée par des sables fluviaux-éoliens avec des passées marneuses, c'est une sédimentation lacustre (Merzougui, 2011).

- **Terrasses supérieures (Holocène ou Guirien) :** il comporte des sables et graviers à stratifications entrecroisées avec présence de sables fins. La terrasse Guirienne apparaît comme une très basse terrasse : ses alluvions sableuses et marneuses, rarement consolidées furent très vulnérables et le plus souvent ont été détruites par l'érosion éolienne et fluviale. Les sédiments Guiriens se différencient des sédiments Saouriens par deux caractères : la coloration systématique des sables et la faible puissance de ces dépôts (5 à 6 m en moyenne et 8 à 9 m exceptionnellement) (Bentaeb, 2003).

- **Le Grand Erg Occidental :** la formation du Grand Erg occidental serait ainsi postérieure au Mazzérien et plus précisément l'erg serait développé au cours des cycles Ougartien, Saourien et Guirien. Les dunes du Grand Erg recouvrent actuellement la majeure partie des terrains fluviaux lacustres Mazzeriens, leur étude granulométrique a révélé que les sables des parties hautes dérivent graduellement du sable de la base par remaniement éolien. La mise en place de l'erg occidental ayant débuté au cours de l'aride post- villafranchien (Merzougui, 2011).

- **Plissement :** il se matérialise dans le terrain par des argiles et des calcaires rougeâtres, est nettement visible dans quelque puits creusé dans la palmeraie d'Ouakda. Les charnières des plis sont fortement fracturées.

- **Failles et Fractures :** à Béni Abbès, deux types de failles sont repérés par l'aéromagnétisme. Le premier type concerne des failles anciennes, de direction NW qui mettrait en contact des compartiments de socle de composition différente (Bouima, 1986). Ces failles seraient liées au développement de la dépression marginale du craton. Sur le plan structural, la région de Béni Abbès appartient à l'anticlinorium central d'Ougarta. Ce système est compliqué par des failles plus transverses E-W, NW-SE et NE-S. Ces différentes formations primaires sont affectées par des fractures diversement orientées. Les principales orientations des plans de fractures relevées sont classées par ordres décroissants d'importance (Merzougui, 1998) :

À partir des différentes relations existant entre les quatre (4) familles de failles déterminées sur l'image satellitaire. Nous avons pu reconstituer leur chronologie.

Familles de fractures N 110° - 140° ;

Familles de fractures : N 000° - 020° ;

Familles de fractures : N 080° - 100° ;

Familles de fractures : N 030° - 070° ;

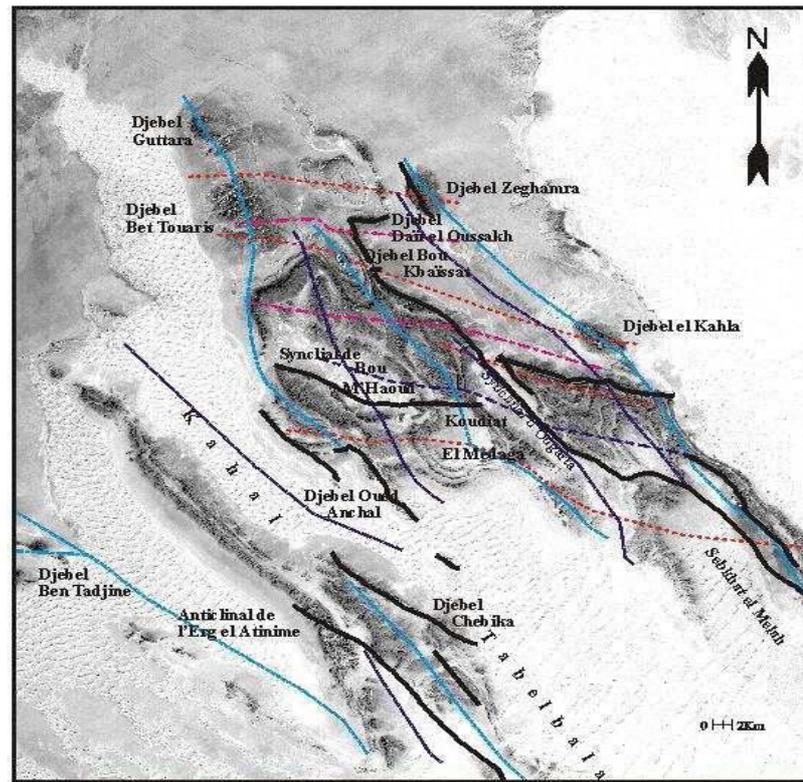


Figure I.4 : Schéma des axes des plis et des flexures des synclinaux et anticlinaux des monts de l'Ougarta. (Merzougui, 2011)

- **Les fissures :** les fissures et les diaclases observées dans la dalle hamadienne et la formation de Guir sur le plateau de la rive droite de la Saoura sont le résultat de la néotectonique, la dissolution des calcaires par l'effet hydrique et la charge, que subissent les formations indurées. Sur le plan hydrogéologique elles jouent un grand rôle, car elles facilitent l'infiltration de l'eau en direction des nappes, participant à leur alimentation (Ait Kaci, 1990).

- **Néotectonique :** la néotectonique des formations calcaires du Mio- Pliocène de la hamada du Guir est dictée par la tectonique ancienne existante, à cet effet, les différentes fracturations et failles favorisent généralement des sources ou Foggaras au niveau de l'Oasis de Béni Abbès, telle que la grande source. La néotectonique, c'est la réactivation des failles anciennes pendant le tertiaire (SONAREM, 1980).

I.4. CLIMATOLOGIE DE LA SAOURA

L'objectif d'étude climatique (Température, pluviométrie, ETP, vent) est de :

- Connaissance de manière efficace le climat qui règne la région d'étude.
- Les facteurs mesurés (pluviométrie, température,...) sont indispensables pour schématiser le mode de fonctionnement hydrologique du système aquifère, on distingue deux zones :

1 -La zone de transition : dont les limites sont de Béni Ounif au Nord et Igli au Sud, très chaude en été (+49°C) et froide en hiver (2 et 3°C).

Les précipitations sont de l'ordre de 80 mm/an à Béni Ounif. Les vents de sable sont fréquents et souvent violents.

2- La zone désertique : qui s'étend dans les régions de Béni Abbès et Tabelbala. Les précipitations sont de l'ordre de 40 mm/an. Les vents de sable sont très fréquents.

Le bassin versant de la Saoura présente une faible couverture en station climatique, les données climatiques utilisées sont de quatre stations différentes, une station se situe au Nord de Béchar se rapportent à la période allant de (1985 à 2013) (Tableau I.1), une au niveau du barrage Djorf Torba, la troisième station localisée au niveau de Taghit et la quatrième station localisée à la ville de Béni Abbès.

Tableau I.1 : Caractéristiques des stations climatiques de la Saoura.

Station	Code	X	Y	Z	Paramètre relevé
Djorf Torba	13-01-01	31°00'30"N	02°44'26"W	580	T, P
Béchar	13-01-32	31°35'53N	02°13'32W	774	T, P
Béni abbès	13-01-31	30°07'56"N	02°10'27"W	502	T, P
Taghit	13-01-31	30°67'36"N	02°08'57"W	542	T, P

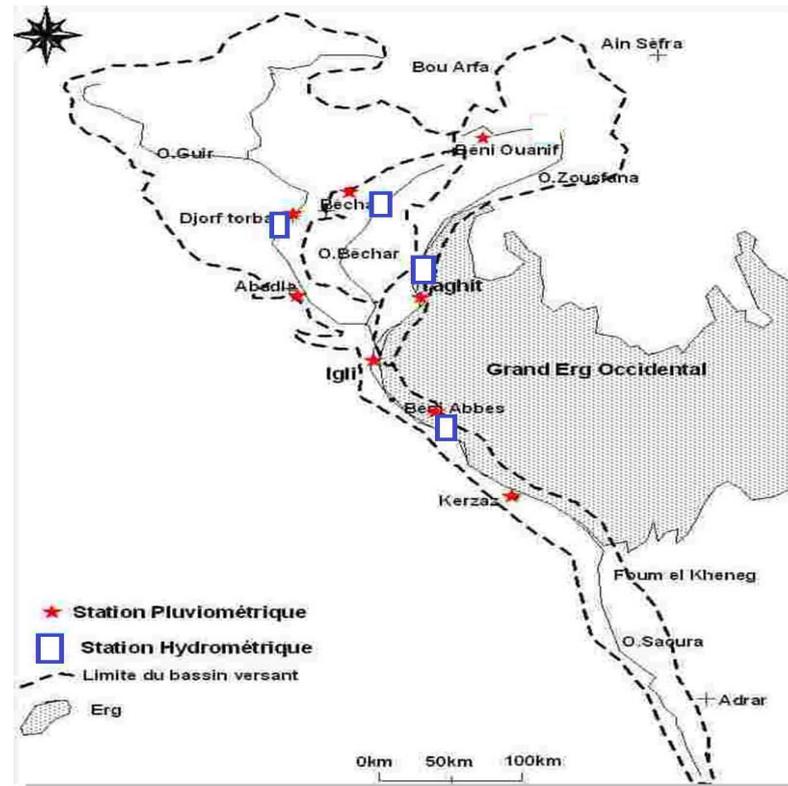


Figure I.5 : La répartition des stations pluviométriques et hydrométriques de la Saoura.

1) Température

La température est un élément fondamental du climat, sa variation influe sur la transformation de l'eau en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux. Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique, c'est un facteur principal qui conditionne le climat de la région (Benhamza, 2013).

Pour étudier les températures, nous avons une série de données relevées aux stations de Béchar, Djorf Torba, Béni Abbès, et Taghit. La série est de 1985 jusqu'à 2013.

- Pour le bassin de Guir:

Tableau I.2 : températures minimales, maximales et moyennes mensuelles inter-annuelles de la station Djorf Torba (1985-2013).

T C°	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	annuelle
Max	36,54	31,22	22,95	19,89	17,46	20,5	23,24	31,22	33,25	37,45	41,23	42,88	29,81
Min	19,45	17,88	11,23	5,9	4,22	9,11	10,98	14	15,02	21,03	27,54	31	15,61
Moy	26,45	23,1	16,88	14,02	12,1	15,21	16,97	22,1	24,56	29,23	35,46	35,76	22,65

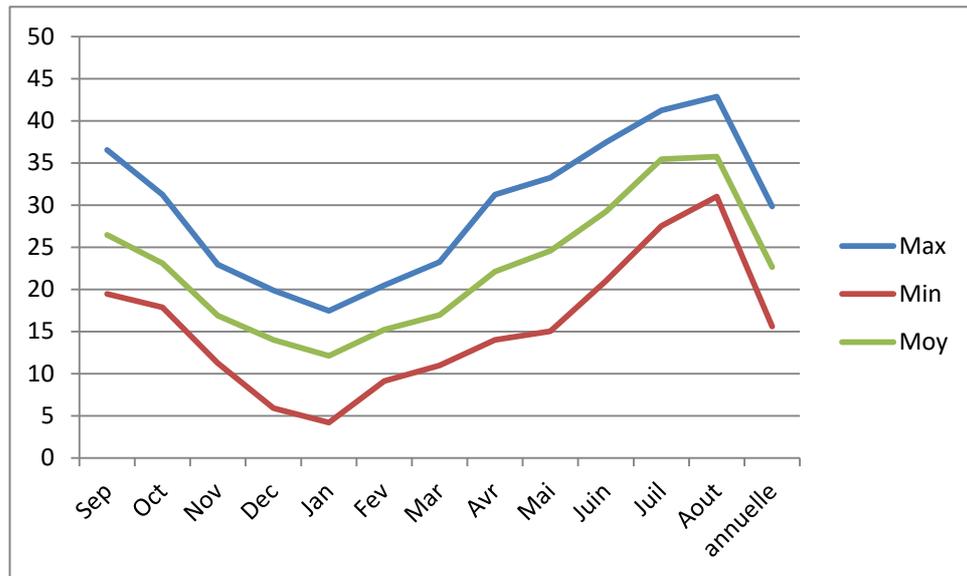


Figure I.6 : Courbe des températures moyennes mensuelles inter-annuelles du bassin de Guir, la station Djorf Torba (1985-2013)

- Les températures maximales présentent un minimum en janvier (**17,46°C**) et un maximum en août (**42,88°C**).
- Les températures minimales présentent un minimum en janvier (**4,22°C**) et un maximum en août (**31,0°C**).
- Les températures moyennes présentent un minimum en janvier (**12,1°C**) et un maximum en août (**35,76°C**).

- Pour le bassin de Zouzfana:

Tableau I.3 : températures minimales, maximales et moyennes mensuelles inter-annuelles de la station de Taghit (1985-2013).

T C°	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	annuelle
Max	37,12	31,22	23,45	19,86	20,13	23,77	25,2	32,1	34,5	37,21	42,5	42,8	30,8
Min	21,3	18,2	12,87	8,7	5,55	9,74	11,9	13,8	18,11	23,98	27,54	31,2	16,9
Moy	29,01	24,03	18,69	14,1	11,28	18,01	18,6	22,7	26,03	30,54	36,04	36,18	23,8

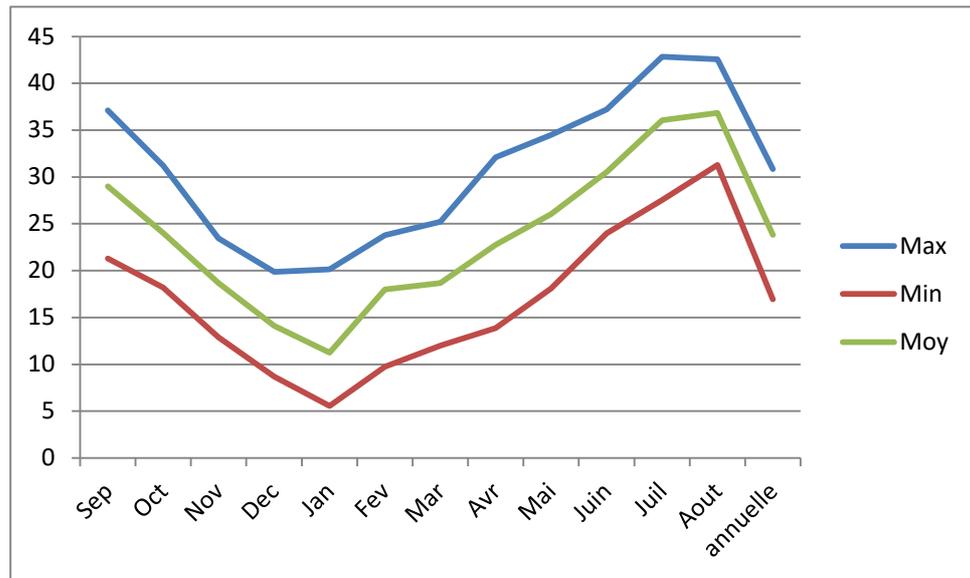


Figure I.7 : Courbe des températures minimales, maximales et moyenne mensuelles inter-annuelles du bassin de Zouzfana de la station de Taghit (1985-2013).

- Les températures maximales présentent un minimum en janvier (**20,13°C**) et un maximum en août (**42,8°C**).
- Les températures minimales présentent un minimum en janvier (**5,55°C**) et un maximum en août (**31,2°C**).
- Les températures moyennes présentent un minimum en janvier (**11,28°C**) et un maximum en août (**36,18°C**).

- Pour le bassin de Saoura :

Tableau I.4 : températures minimales, maximales et moyennes mensuelles inter-annuelles de la station de Béni Abbès (1985-2013).

T C°	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	annuelle
Max	40,12	32,75	25,41	20,98	19,87	23,01	26,03	31,24	33,98	38	43,01	41,65	31,3
Min	24,76	18,54	11	7,4	5,35	7,01	12,12	14,04	19,87	25,33	30,02	32	17,2
Moy	32,5	24,98	18,55	14,3	11,98	15,45	18,95	22,65	27	31,5	35,87	37,06	24,2

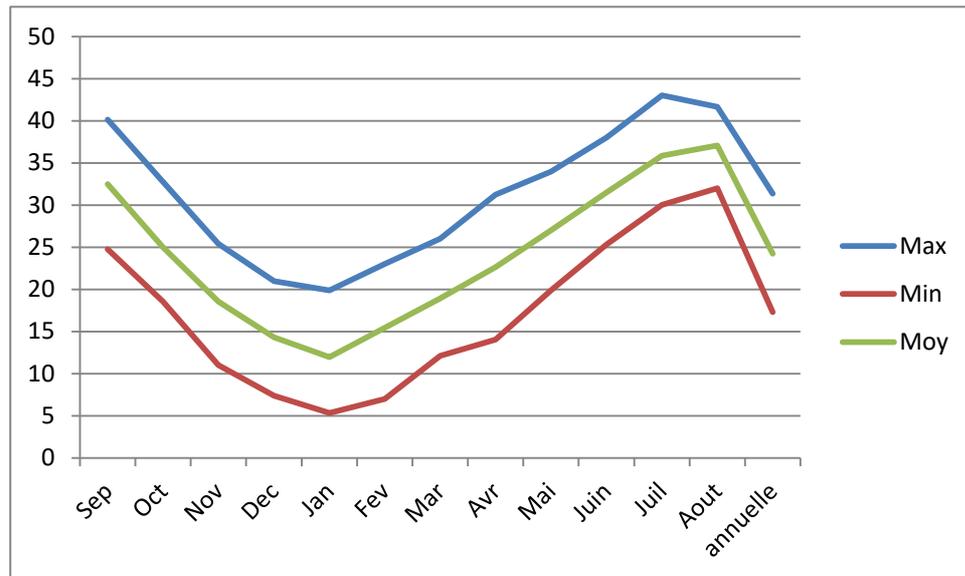


Figure I.8: Courbe des températures minimales, maximales et moyenne mensuelles inter annuelles du bassin de Saoura de la station de Béni Abbès (1985-2013).

- Les températures maximales présentent un minimum en janvier (**19,87°C**) et un maximum en juillet (**43,01°C**).
- Les températures minimales présentent un minimum en janvier (**5,35°C**) et un maximum en août (**32,0°C**).
- Les températures moyennes présentent un minimum en janvier (**11,98°C**) et un maximum en août (**37,08°C**).

Tableau I.5: Températures minimales, maximales et moyennes mensuelles inter-annuelles de la station de Béchar (1985-2013).

- Pour le bassin de Béchar :

T C°	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	annuelle
Max	33,65	30,01	22,45	17	15,07	20,45	24,97	28	30,12	34,98	41,08	37,69	27,95
Min	14	11,58	7,01	3,9	3,01	4,67	10,21	9,89	13,24	18,02	17,33	17,41	10,85
Moy	26,88	21,96	15,48	11,03	10,54	12,9	18,32	19,67	23,46	29,86	31	29,56	20,88

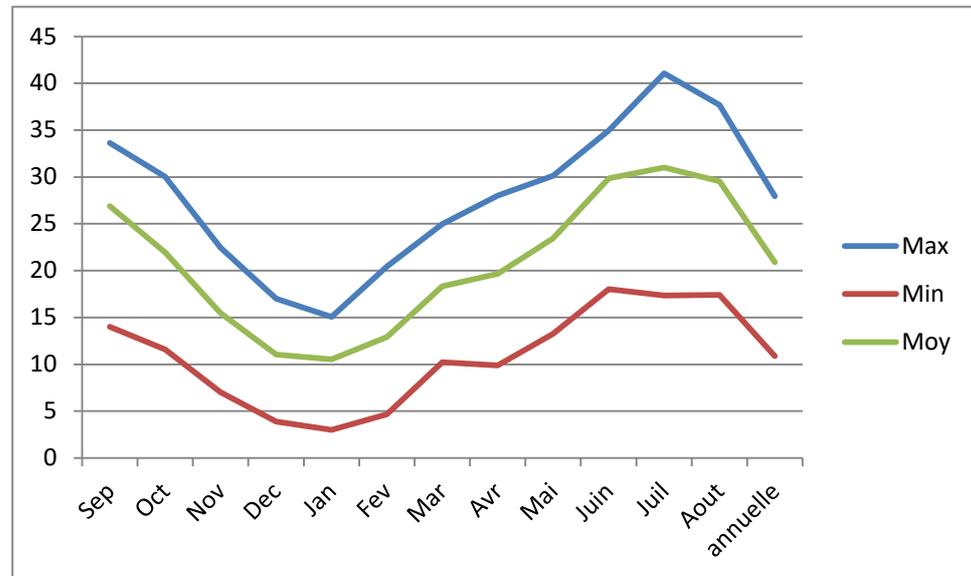


Figure I.9: Courbe des températures minimales, maximales et moyenne mensuels inter-annuelles du bassin de Béchar, station de Béchar (1985-2013).

- Les températures maximales présentent un minimum en janvier (**15,07°C**) et un maximum en juillet (**41,08°C**).
- Les températures minimales présentent un minimum en janvier (**3, 01°C**) et un maximum en juin (**18,02°C**).
- Les températures moyennes présentent un minimum en janvier (**10,54°C**) et un maximum en juillet (**31,0°C**).

2) Les précipitations

Généralement, les précipitations sahariennes sont rares, de faible importance quantitative, de courte durée et qu'elles ont un pourcentage élevé des pluies avortées à cause de la siccité de l'atmosphère (Kolli, Aissani, 2012). D'une façon générale que la pluviométrie décroît du Nord au Sud, elle suit dans l'ensemble des altitudes du bassin de la Saoura de 20 à 30 mm (Dubief, 1953).

Le tableau ci-dessous donne une série des pluies annuelles recueillies aux stations météorologiques de la Saoura sur une période qui s'étale de 1985 à 2013.

Tableau I.6 : précipitations moyennes mensuelles interannuelles des stations de la Saoura.

Station	Taghit	Béni Abbès	Djorf Torba	Béchar
Année	P (mm)	P (mm)	P (mm)	P (mm)
1984-1985	31.4	26.6	32.88	35,24
1985-1986	24.3	61.3	13.2	26,45
1986-1987	14.4	33.0	7.4	15,8
1987-1988	9.5	15.3	38.4	14,32
1988-1989	23.9	16.5	10.3	27,01
1989-1990	44.6	21.3	15.7	47,36
1990-1991	23.3	81.0	17.7	28,94
1991-1992	22.2	73.9	26.0	27,56
1992-1993	47.8	88.7	12.1	51,21
1993-1994	49.2	126.8	51.1	43,33
1994-1995	153.3	111.09	30.2	172,24
1995-1996	18.3	54.3	146.0	15,26
1996-1997	27.12	31.1	27.4	77.2
1997-1998	35,24	13.2	31.4	26.6
1998-1999	26,45	7.4	24.3	61.3
1999-2000	15,8	38.4	14.4	33.0
2000-2001	14,32	10.3	9.5	15.3
2001-2002	27,01	15.7	23.9	16.5
2002-2003	47,36	17.7	44.6	21.3
2003-2004	28,94	26.0	23.3	81.0
2004-2005	27,56	12.1	22.2	73.9
2005-2006	51,21	51.1	47.8	88.7
2006-2007	43,33	30.2	49.2	126.8
2007-2008	172,24	106.0	153.3	180.09
2008-2009	15,26	9.1	18.3	54.3
2009-2010	27.12	31.1	27.4	77.2
2010-2011	37.23	32.8	37.2	50.03
2011-2012	29.14	24.07	35.02	49.17
2012-2013	41.01	34.75	29.27	71.12

Les précipitations constituent la principale « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants.

Les précipitations de la zone sont peut abondantes et irrégulières, souvent brèves (averses), mais de forte intensité, occasionnant de violentes crues. Durant les mois de septembre et février, les hauts sommets environnants, essentiellement le djebel Grouz et celui de l'Antar se coiffent d'une calotte de neige.

Tableau I.7 : Précipitations moyennes saisonnières en (mm).

Saison	P annuelle	Automne		Hiver		Printemps		Eté	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Béchar	81.03	38,11	47.03	22,30	27.52	11,91	14.69	06,71	08,28
Béni Abbès	32,78	13,95	42.55	09,28	28.30	06,03	18.39	03,52	10.73
Djorf Torba	75.21	34.71	46.15	25.32	33.66	09.84	13.08	05.34	07.10
Taghit	35.1	15.64	44.56	11.14	31.73	05.22	14.87	03,1	08.83

La saison la plus arrosée pour les quatre stations est l'automne, est la plus sèche est l'été.

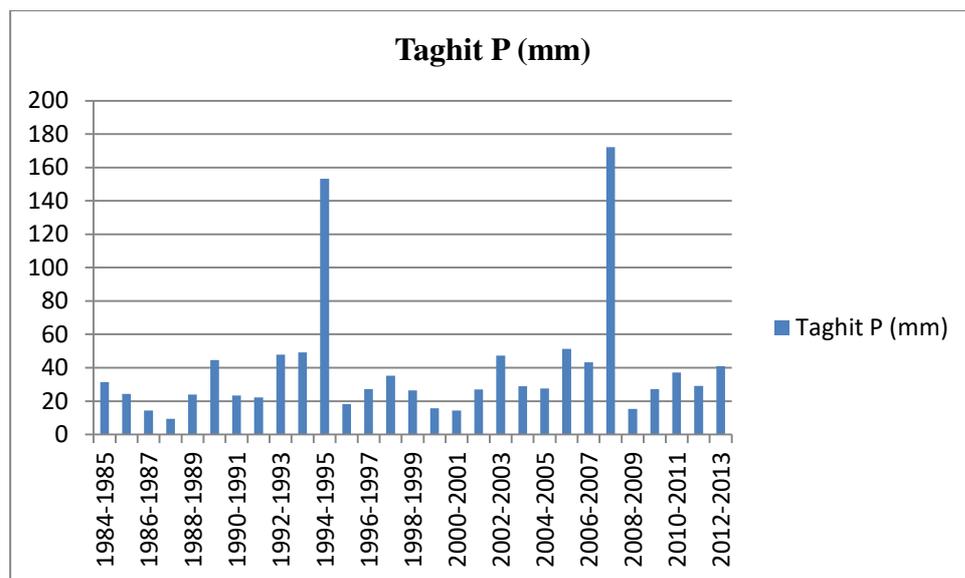


Figure I.10 : Précipitations annuelles de la station de Taghit au cours de la période (1985 – 2013)

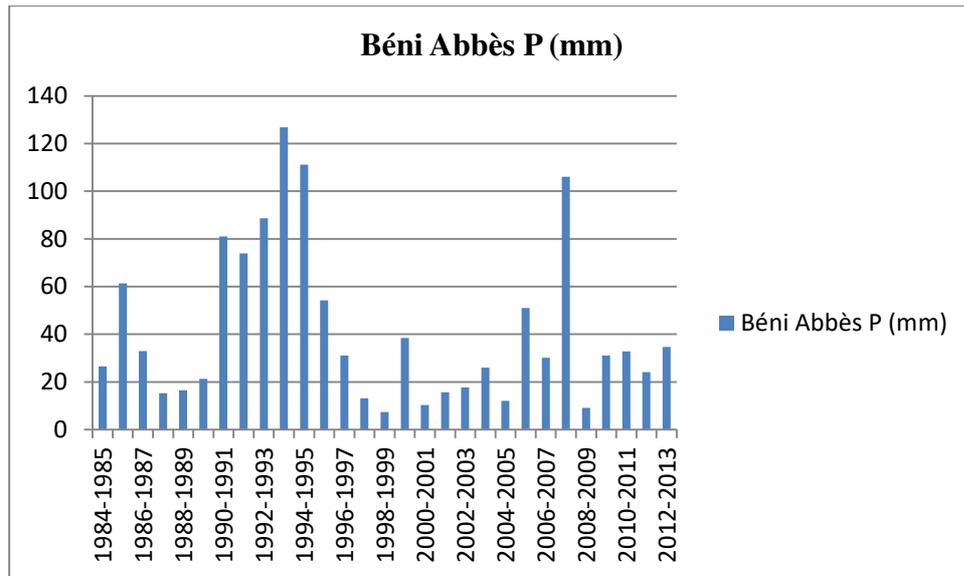


Figure I.11: Précipitations annuelles de la station de Béni Abbès en cours de la période (1985 – 2013)

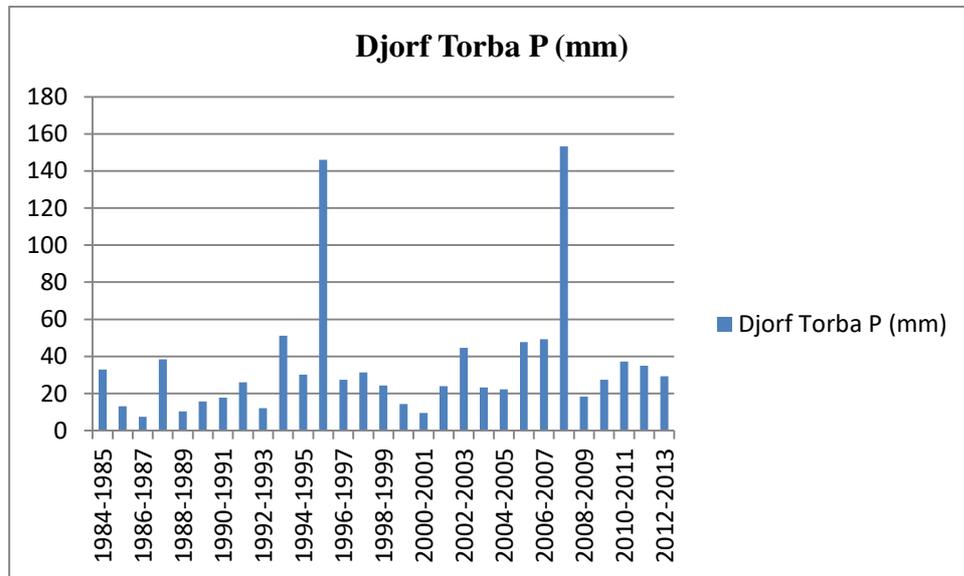


Figure I.12: Précipitations annuelles de la station de Djorf Torba en cours de la période (1985 – 2013)

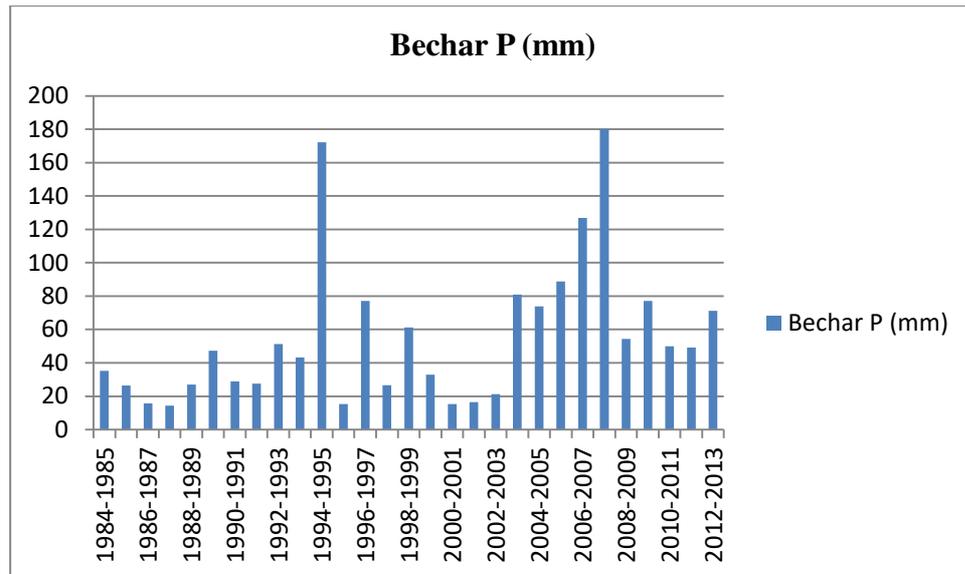


Figure I.13: Précipitations annuelles de la station de Béchar en cours de la période (1985 – 2013)

Le cumul par saison, nous permet de constater que la saison d'automne est la plus pluvieuse avec 18.92 mm. En été, la pluviométrie est très faible.

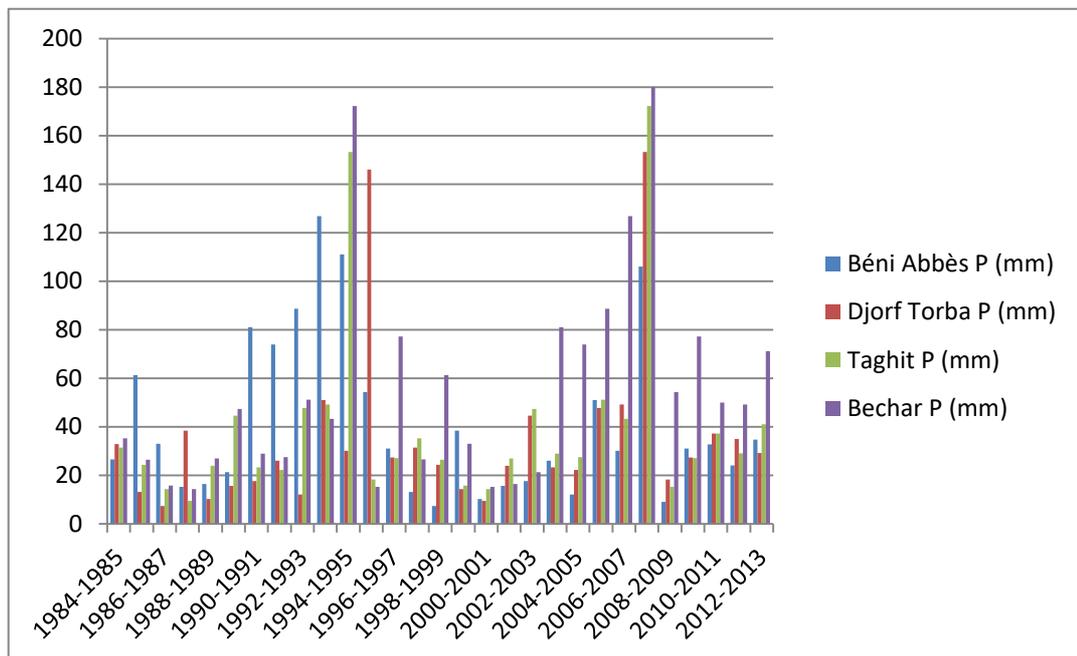


Figure I.14: Comparaison entre les Précipitations annuelles des 04 stations (1985–2013)

D'après le diagramme de comparaison des quatre stations, nous constatons que la station de Béchar (d'oued Béchar) la plus pluvieuse par rapport aux autres stations. L'analyse de la courbe des variations interannuelles des précipitations, sur une période de 28 ans (1985-2013), montre

que l'année 2008 est la plus arrosée et que l'année 2000 est la plus sèche, les précipitations moyennes interannuelles sont de 45 mm/an.

3) Les vents

Au Sahara, le vent est un facteur climatique aussi important que la température et l'évaporation. Dans la région d'étude, la fréquence du vent est considérée comme étant relativement élevée et cela durant toute l'année. Pour l'étude des vents de la zone de Béchar, nous avons représenté les données dans la station de Béchar sur le tableau I.8.

Tableau I.8 : vitesse des vents moyens de Béchar série (1985-2013)

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Vitesse (m/s)	2,5	3,1	3,6	4,6	5,2	4,5	4,2	3,9	3,2	2,4	2,4	2,4

Les valeurs des vitesses du vent le plus élevé dans les mois avril -mai avec des moyennes mensuelles respectivement de 4.6 et 5.2 m/s).

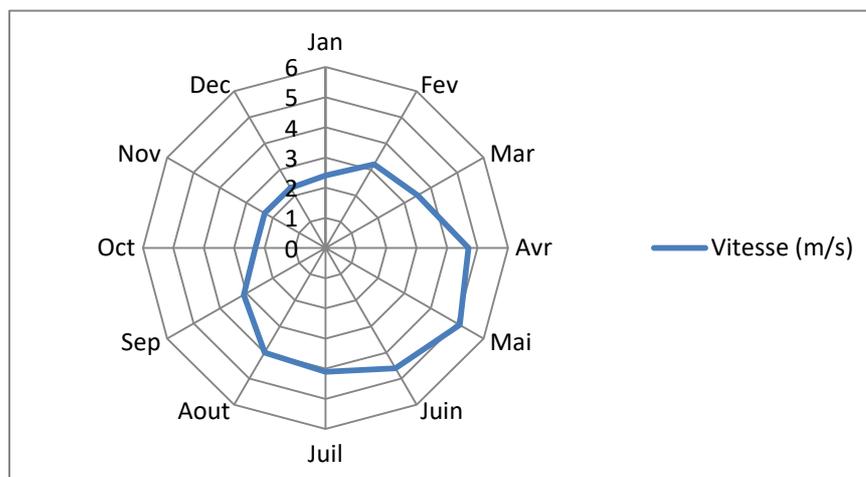


Figure I.15 : Vitesse moyennes des vents Béchar (1985-2013)

Tableau I.9 : fréquences des vents selon les directions.

Direction	Nord	Nord-est	Est	Sud-est	Sud	Sud-ouest	Ouest	Nord-Ouest
Fréquence(%)	10,15	9,44	9,93	5,56	8,92	10,61	7,95	4,56

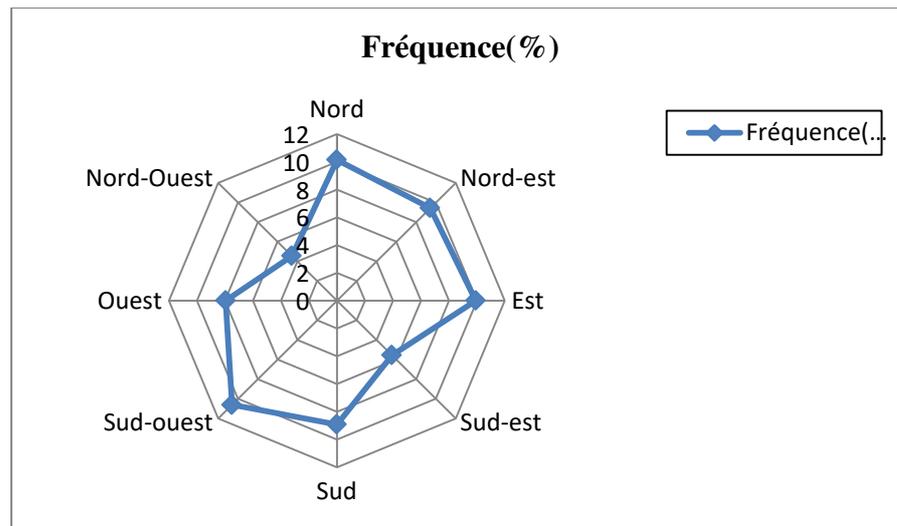


Figure I.16 : Répartition des fréquences selon les directions

4) Humidité relative

Pour l'étude des humidités relatives de la zone de Béchar, nous avons représenté les données de la station de Béchar sur le tableau I-10.

Tableau I.10 : humidité relative moyenne mensuelle interannuelle en (%) de station de Béchar.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
Humidité (%)	26	33	43	46	45	40	29	29	26	19	14	17

Nous remarquons que l'humidité relative atteint sa valeur maximale au mois de décembre à une moyenne de 46%.

5) Nébulosité

Tableau I.11 : nébulosité moyenne mensuelle de la station météorologique de Béchar sur une période d'observations de (1985 à 2013).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
N (octa)	2.4	2.1	2.4	2.8	2.3	1.7	1.5	2.3	2.6	2.4	2.6	2.0

6) Indice d'aridité

Indice de DE MARTONNE ou d'aridité (figure I.17) : pour avoir une idée sur le climat dominant la zone d'étude, quelques indices et diagramme ont été introduits. En 1923, un indice d'aridité noté A a été défini par le géographe DE MARTONNE se basant sur les températures et les précipitations selon la relation suivante :

$$A = \frac{P}{T + 10}$$

P : la précipitation moyenne annuelle en mm

T : la température moyenne annuelle en C °

* Pour la station de Béchar: P = 54.44mm, T = 20,88 C°

$$A = 54.44 / (20.88 + 10) \Rightarrow A = 1.76$$

* Pour La station de Djorf Torba : P = 29.06mm, T = 22,65 C°

$$A = 29.06 / (22,65 + 10) \Rightarrow A = 0.89$$

* Pour La station de Béni Abbès : P = 22.21 mm, T = 24,2 C°

$$A = 22.21 / (24.2 + 10) \Rightarrow A = 0.65$$

* Pour La station de Taghit : P = 31.72mm, T = 23,8 C°

$$A = 31.72 / (23,8 + 10) \Rightarrow A = 0.94$$

L'indice d'aridité est compris entre 0.60 et 1.80 cela traduit que le climat est Hyper aride.

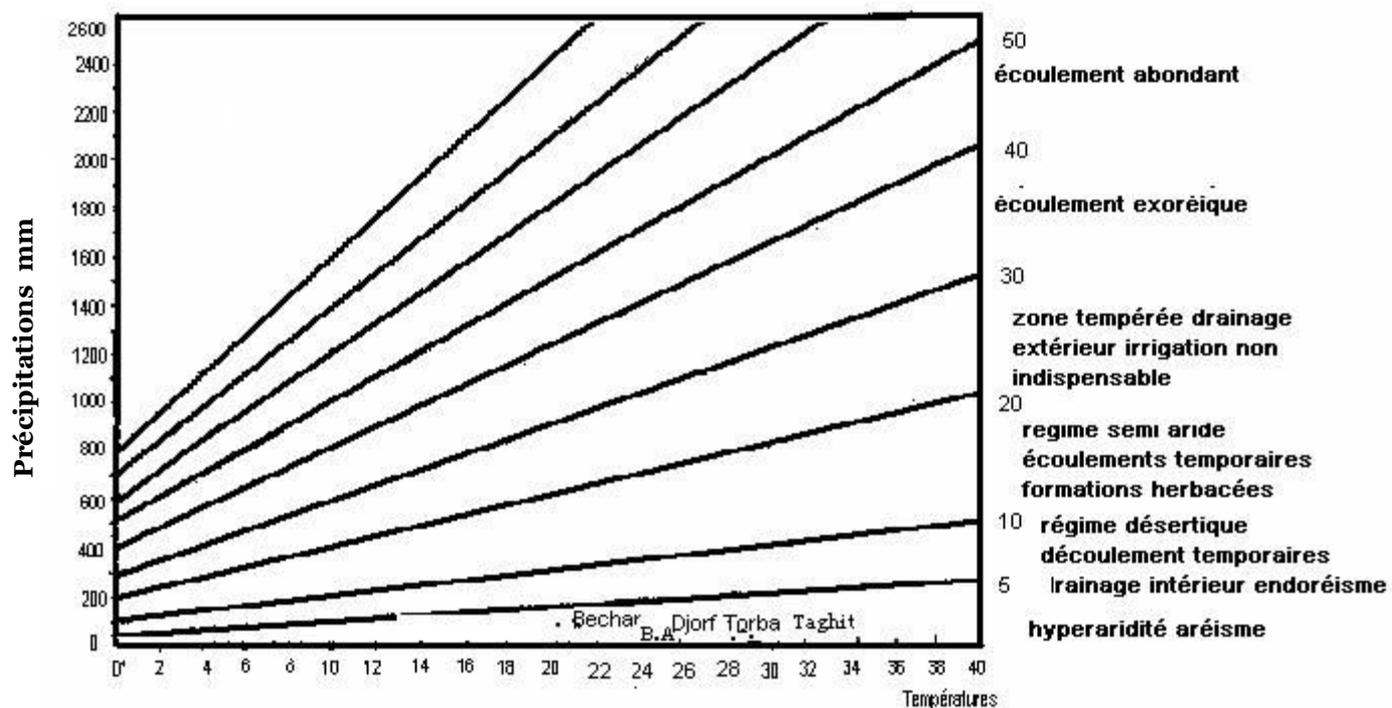


Figure I.17: Abaque de DE-MARTONNE

- Un climat Saharien (hyper aride) défini bien par l'indice de MARTONNE.

Climagramme de L. Emberger figure (1.18) : c'est un abaque dont les abscisses portent les moyennes de minima de la saison froide et les ordonnées portent les valeurs du quotient pluviométrique.

$$Q_2 = \frac{2000.P}{M^2 - m^2} \quad [I.1]$$

Q_2 : le quotient pluviométrique d'Emberger.

P: la précipitation moyenne interannuelle en mm.

M : la moyenne des maxima du mois le plus chaud en degré Kelvin (°K)

m: la moyenne des minima du mois le plus froid en degré Kelvin (°K)

* Pour la station de Béchar:

$$P = 54.44 \text{ mm}$$

$$M = 31 + 273.15 = 304,15 \text{ °K.}$$

$$m = 10.54 + 273.15 = 283,69 \text{ °K.}$$

$$Q_2 = 9,05$$

La température moyenne des minima de la saison froide est de 6.34 °C. Après report des coordonnées (6.34, 9.05). Le point obtenu caractérise bien un climat saharien à hiver tempéré.

* Pour la station de Djorf Torba:

$$P = 29.06 \text{ mm}$$

$$M = 35.76 + 273.15 = 308.91 \text{ °K.}$$

$$m = 12.1 + 273.15 = 285.25 \text{ °K.}$$

$$Q_2 = 4,13$$

La température moyenne des minima de la saison froide est de 8.1 °C. Après report des coordonnées (8.1, 4.13). Le point obtenu caractérise bien un climat saharien à hiver tempéré.

* Pour la station de Béni Abbès:

$$P = 22.21 \text{ mm}$$

$$M = 37.08 + 273.15 = 310.23 \text{ °K.}$$

$$m = 11.98 + 273.15 = 285.13 \text{ °K.}$$

$$Q_2 = 2,97$$

La température moyenne des minima de la saison froide est de 6.61 °C. Après report des coordonnées (6.61, 2.97). Le point obtenu caractérise bien un climat saharien à hiver tempéré.

* Pour la station de Taghit :

$$P = 31.72 \text{ mm}$$

$$M = 36.18 + 273.15 = 309.33 \text{ °K.}$$

$$m = 11.28 + 273.15 = 284.43 \text{ } ^\circ\text{K.}$$

$$Q_2 = 4,3$$

La température moyenne des minimas de la saison froide est de $5.86 \text{ } ^\circ\text{C}$. Après report des coordonnées (5.86, 4.3). Le point obtenu caractérise bien un climat saharien à hiver tempéré

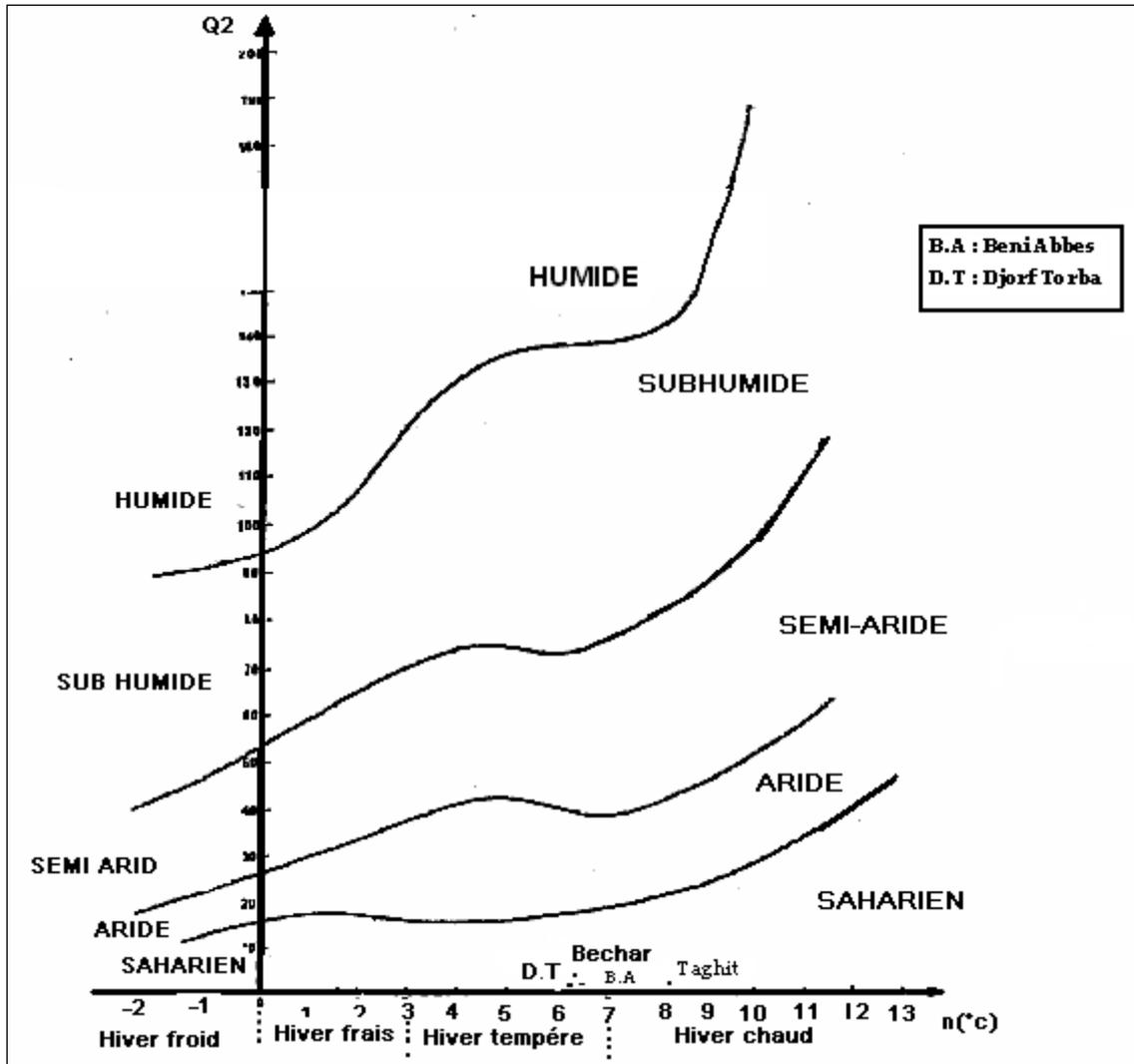


Figure I.18 : Climagramme de L'Emberger.

La Saoura est caractérisée par : un climat Saharien (hyper aride) défini bien par l'indice de DE .MARTONNE, ainsi que par le climagramme de l'Emberger.

7) L'évaporation

L'évaporation est une des composantes fondamentales du cycle hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique du bassin versant de la Saoura. Les valeurs de l'évaporation enregistrée de la station de Béchar sont dans le tableau.I.12, d'une série s'étalent de 1985-2013 :

Tableau I.12 : évaporations mensuelles inter-annuelles de Béchar (1985-2013)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Evap (mm)	60.2	90.7	107.4	90.6	86.4	89.6	102.4	113	143.1	234	217.1	292.1

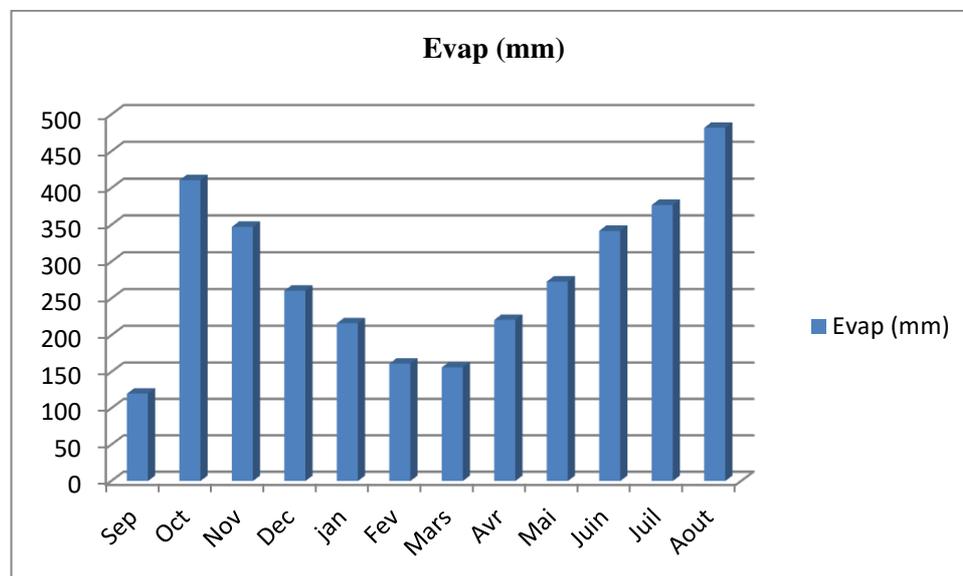


Figure I.19: L'évaporation mensuelles inter annuelle de la station de Béchar série (1985-2013)

Sur ce tableau, nous distinguons bien deux périodes différentes: une première période en septembre où la hauteur d'eau évaporée ne dépasse pas les **150 mm**. Alors que pour la deuxième période, l'évaporation est plus importante et elle dépasse les **150 mm** avec un maximum de **292.1 mm** en août. Cette variation est due au cycle saisonnier de la température qu'on a déjà mentionné.

8) L'évapotranspiration

L'évapotranspiration peut être considérée comme étant la somme des deux termes :

- La transpiration végétale

- L'évaporation du sol

L'intensité de l'évapotranspiration est fonction de la radiation solaire, la température, l'humidité relative de l'air, l'humidité de sol, le vent, la couverture végétale, et les travaux du sol.

a- L'évapotranspiration potentielle : c'est la consommation de l'eau sous l'action de l'évaporation du sol et la transpiration des plantes d'un couvert végétale en plein développement, occupant le sol entièrement et sous les méthodes optimums d'alimentation en eau, sous l'influence d'aucun facteur limitant.

Méthode de calcul : plusieurs auteurs ont cherché à établir une formule convenable estimant l'ETP avec les moins erreurs et intégrant une grande partie du nombre des facteurs climatiques qui régissent le phénomène. Parmi les méthodes les plus usuelles la méthode de THORNTHWAITE.

Formule de THORNTHWAITE : l'ETP est donné par la relation;

$$ETP = 16 \left(10 \cdot \frac{t}{I} \right)^a \quad (1.2)$$

Ou ETP : évapotranspiration potentielle en mm

t : température moyenne de la période considérée en °C.

a : fonction complexe de l'indice I.

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.70 \times 10^{-2} I + 0.49$$

Dans laquelle I est l'indice thermique annuel obtenue en somment les 12 valeurs mensuelles de i ; donc i étant calculé par la formule :

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

-SERA à proposé de simplifier la formule en : **a = 0.016.I + 0.5**

Les résultats de calcul de l'ETP mensuelle représentée dans les tableaux suivants :

- Station de Béchar :

Tableau I.13 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon THORNTWAITE - station de Béchar (1985-2013).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
TC°moy	26,88	21,96	15,48	11,03	10,54	12,9	18,32	19,67	23,46	29,86	31	29,56
indice i	12,86	9,494	5,698	3,404	2,956	4,101	7,386	7,662	10,25	14,56	15,18	14,5
ETP	74,73	39,71	13,71	4,691	3,496	6,914	23,54	25,41	46,59	96,79	105,5	95,86

Avec : $I = 165,723$

$a = 3,153$

Donc :

ETP = 536,9mm.

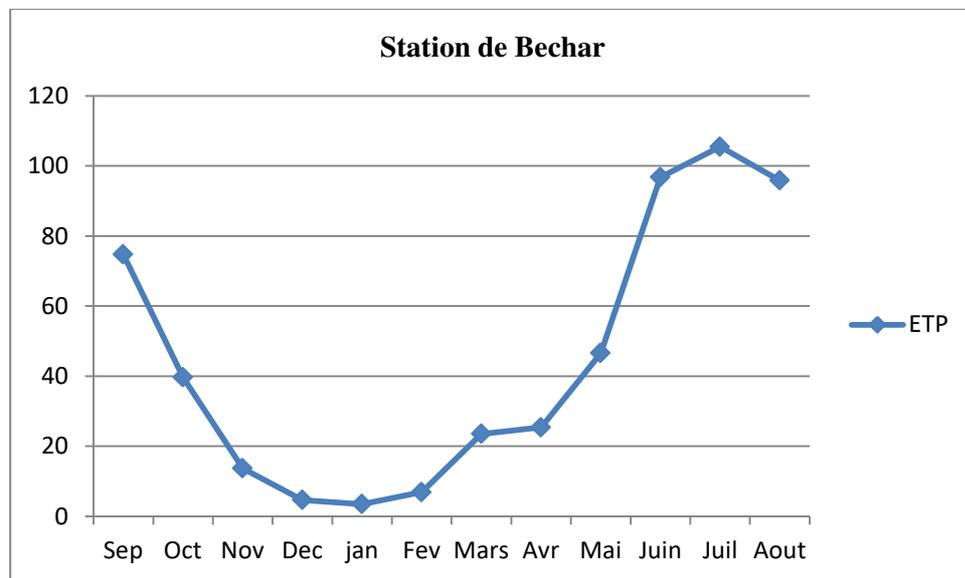


Figure I.20: Evapotranspiration de la station de Béchar (1985-2013)

- Station de Djorf Torba :

Tableau I.14 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon THORNTWAITE de la station de Djorf Torba.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T °Cmoy	26,45	23,1	16,88	14,02	12,1	15,21	16,97	22,1	24,56	29,23	35,46	35,76
indice i	13,4	10,02	6,412	4,539	3,368	4,882	6,48	9,281	10,68	14,11	18,68	20,52
ETP	119,8	74,74	36,21	20,67	12,73	23,26	36,84	66,00	82,84	130,38	205,4	239,43

Avec : $I = 122,374$

$a = 2,458$

Donc : **ETP = 1048,39399 mm**

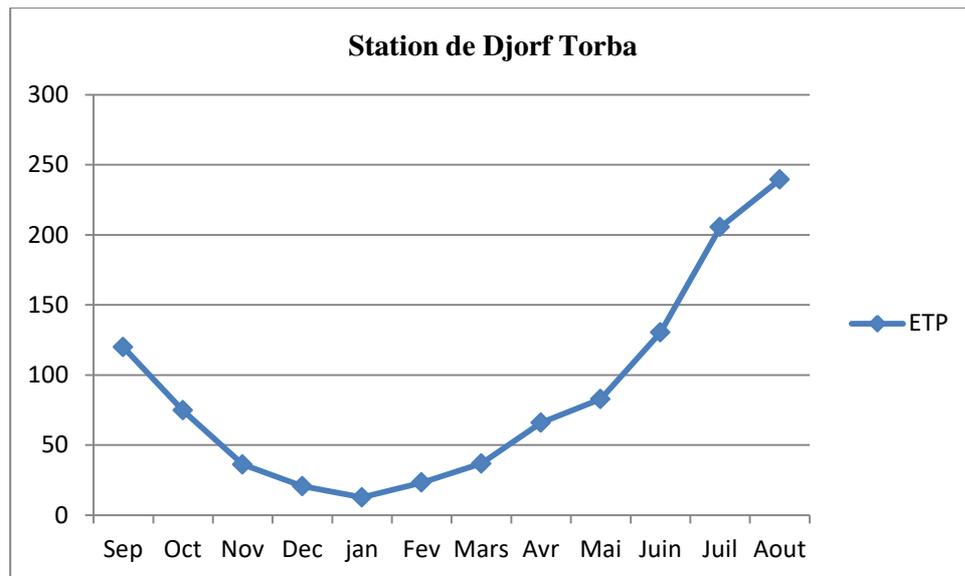


Figure I.21: Evapotranspiration de la station de Djorf Torba (1985-2013)

- Station de Taghit :

Tableau I.15 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon THORNTWAITE de la station de Taghit.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
TC° moy	29,01	24,03	18,69	14,1	11,28	18,01	18,6	22,7	26,03	30,54	36,04	36,18
indice i	9,49	5,70	3,40	1,04	4,10	7,37	7,66	10,25	14,56	15,18	14,5	8,62
ETP	157,37	85,02	35,14	18,09	12,29	21,05	37,40	63,04	100,36	153,04	215,84	230,16

Avec : $I = 101894$

$a = 2.130$

Donc : **ETP = 1128,8 mm**

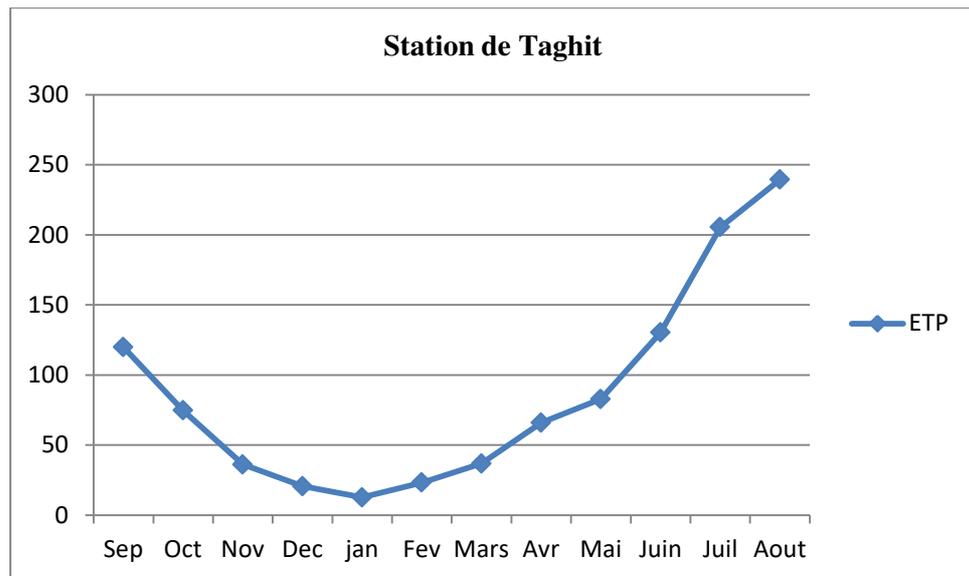


Figure I.22 : Evapotranspiration de la station de Taghit (1985-2013)

- Station de Béni Abbès :

Tableau I.16 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon THORNTWAITE de la station de Béni Abbès.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
TC° moy	12,41	14,33	15,16	18,34	18,77	22,79	25,47	27,09	31,69	32,02	36,01	36,88
indice i	3,96	4,92	5,36	7,15	7,41	9,94	11,76	12,91	16,37	16,63	19,87	20,6
ETP	32,5	24,98	18,55	14,3	11,98	15,45	18,95	22,65	27	31,5	35,87	37,06

Avec : $I = 136,902$

$a = 2,69043$

Donc : **ETP = 1243,998 mm**

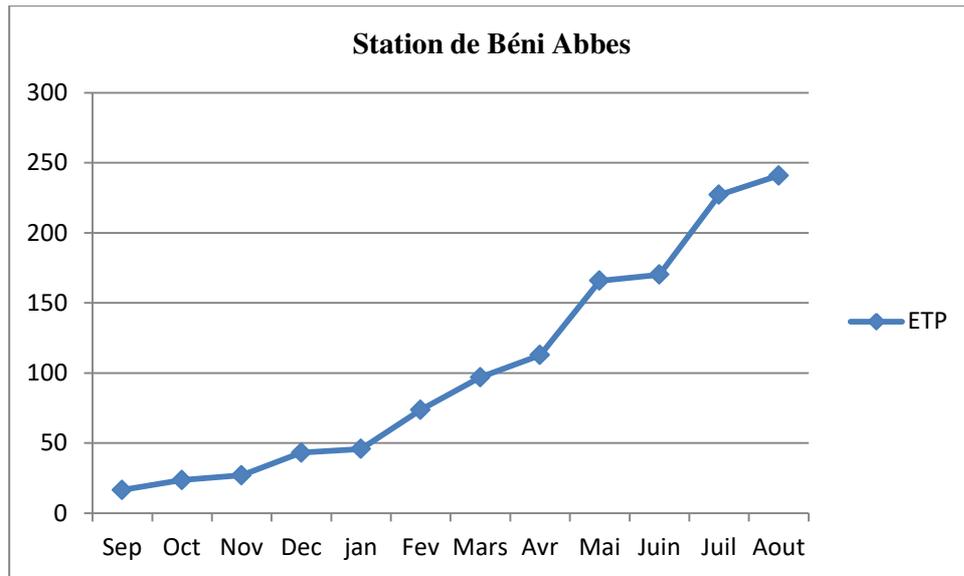


Figure I.23: Evapotranspiration de la station de Béni Abbès (1985-2013)

A cause de la variabilité des températures pour les différentes stations qu'on a vues avant les valeurs de l'ETP sont différentes d'une station à l'autre.

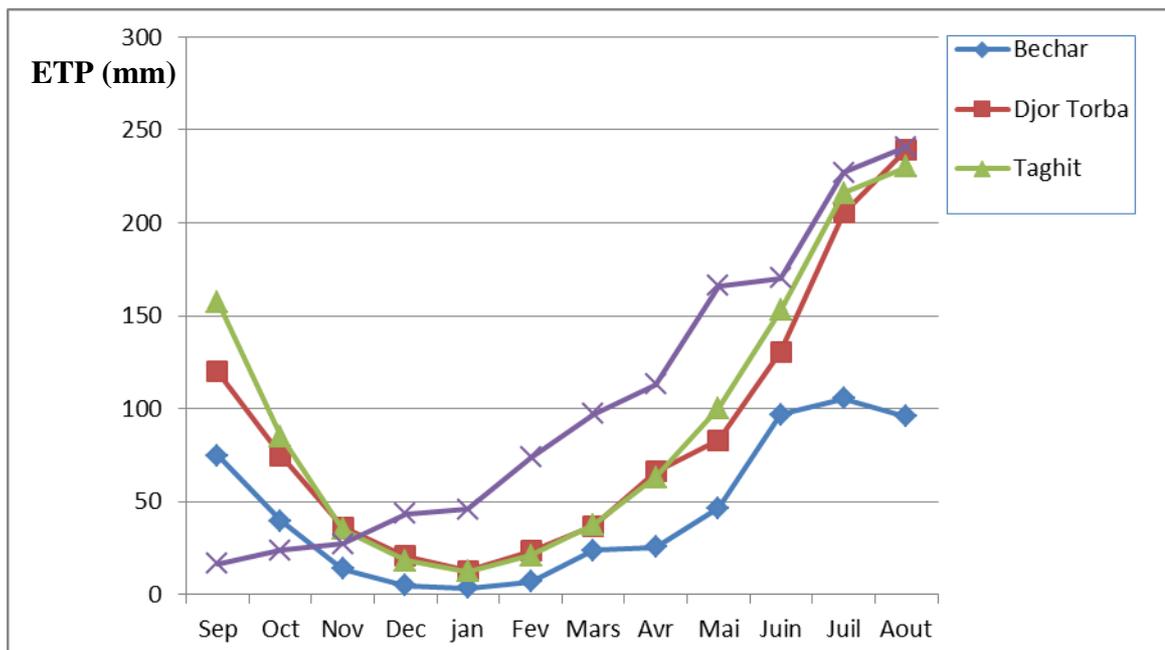


Figure I.24 : Courbe de comparaison des évapotranspirations des stations Béchar, Djorf Torba, Taghit et Béni Abbès (1985-2013)

La figure ci-dessus montre la différence de l'évapotranspiration entre les stations, avec une valeur maximale à la station de Taghit (1128,8 mm).

a) Calcul l'évapotranspiration réelle ETR

- Formule de TURC :

La formule de TURC est applicable pour tous les climats, elle est en fonction des précipitations et de la température moyenne annuelle.

$$ETR = P / \left[\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T : température moyenne annuelle C°

Les résultats de calcul de l'ETR représentés dans le tableau (I.17)

Tableau I.17 : Valeurs de l'ETR mensuelles selon TURC

Station	Béchar	Taghit	Djorf Torba	Béni Abbès
L	1265.46	1551.56	1429	1618.56
ETR	57.33	33.43	30.63	23.41

- Formule de COUTAGNE: (I.4)

$$ETR = P - \lambda p^2 \quad \text{Avec : } P(\text{en m})$$

La formule de COUTAGNE n'est valable que si la quantité des précipitations répond à la condition suivante : $1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$

$$\lambda = 1 / (0.8 + 0.16T)$$

Avec T : température moyenne annuelle C° ;

Tableau I.18 : valeurs de l'ETR mensuelles selon COUTAGNE

Station	Béchar	Taghit	Djorf Torba	Béni Abbès
λ	0.27	0.24	0.25	0.24
Condition ($1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$)	vérifier	Non vérifier	Non vérifier	Non Vérifier
ETR(m)	0,0536	-	-	-

Seule la station de Béchar qui accepte la formule de COUTAGNE d'une valeur de l'ETR = 0.0536 m = 53.6 mm.

Les valeurs de l'ETR obtenues par les deux méthodes TURC et COUTAGNE ne sont pas différentes.

ETR calculée est plus proche de la réalité car ses valeurs sont inférieures aux précipitations.

I-5. HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE DE LA SAOURA

Située en zone saharienne, la Saoura se caractérise par la faiblesse de ses ressources hydriques, qu'elles s'agissent des eaux souterraines ou des eaux de surface.

Les eaux souterraines représentent l'unique ressource d'approvisionnement d'eau pour les oasis de la Saoura, elles sont considérées comme la pierre angulaire de la création des oasis de la région. On expose dans ce travail pour le volet hydrogéologique régional, en basant sur les données qui résultent des autres études réalisées dans le domaine.

Les ressources hydriques au niveau de la Saoura sont représentées par :

A) Eaux de surface

1. Barrage Djorf Torba

C'est un ouvrage important, situé à 70 km à l'ouest de Béchar, la capacité initiale de la retenue du barrage est de 360 millions de m³, réalisé en 1969 pour la mise en valeur de la plaine d'Abadla, en 2005, sa capacité réelle était de 190 millions de m³, avec un volume régularisé de 100 hm³/an, dont 16 millions de m³ sont destinés à l'alimentation en eau potable de la ville de Béchar et environ 50 millions de m³/an pour l'irrigation du périmètre agricole d'Abadla.

Il est alimenté par plusieurs grandes et petites vallées du Maroc. La plus grande vallée c'est « Zelmou », qui est appelée dans notre région « Guir », il est le principal affluent d'oued Saoura (200 Mm³). La longueur de cours d'eau est d'environ 550 Km. Au niveau d'Igli, oued Guir rejoint oued Zouzfana (6 Mm³) pour former l'oued Saoura qui traverse les oasis de Béni Abbès, Louata et Kerzaz.....

Parmi les causes de raréfaction des crues de la Saoura, c'est la réalisation du barrage Djorf Torba. Actuellement les oasis de la vallée de la Saoura gagnent seulement 6 Mm³ d'eau par rapport 206 Mm³. Avant la réalisation du barrage, M. Roche en 1973 a décrit dans sa thèse, que les eaux au long d'oued Saoura ont des concentrations en sel relativement faibles, ne dépassent pas les 2g/l. Yousfi en 1992 a trouvé des valeurs de la salinité deviennent supérieur à 5 g/l.

2. Digue de stockage

- Digue d'Ouakda : située au Nord Est de la ville de Béchar, elle a été construite en 1993 sur le cours d'oued Béchar et rénovée en 1995. Sa capacité est de 400.000 m³, elle est destinée principalement à l'irrigation des périmètres agricoles de la plaine d'Ouakda (Kabour, Mekkaoui, 2011).
- Digue de Mougheul : située au Nord de la ville de Béchar, elle est en cours de réalisation. Sa capacité est de 500.000 m³, elle est destinée principalement à l'irrigation des périmètres agricoles de la plaine de Mougheul.

3. Les oueds

Les oueds qui existent dans la zone d'étude sont : l'oued Zouzfana, l'oued Guir, l'oued Saoura, l'oued Béchar et l'oued Daoura. Les eaux apportées par les crues des oueds sont très chargées en limon. Elles jouent donc un grand rôle dans la fertilisation des sols des oasis de la région.

a) Oued Zouzfana : cet affluent du Saoura prend naissance à l'extrémité occidentale des monts de ksour, par 1600 m d'altitude environ. L'oued Zouzfana de longueur 174 km draine une superficie de 3750 km², il est situé au long de l'Atlas Saharien, limité au Nord par les monts de Figuig, au Sud Ouest par le djebel Béchar, il traverse l'oasis de Taghit au Sud puis il s'enfonce dans le Sahara jusqu'à Igli, là où il se fusionne avec oued Guir pour former oued Saoura.

b) Oued Guir : l'oued Guir de longueur 400 km draine un bassin dont la surface avoisine 27000 km², les eaux étaient totalement perdues dans les zones désertiques où elles provoquaient des inondations et parfois des dégâts aux palmeraies (Merzougui, 2011).

c) Oued Saoura : l'oued Saoura de longueur 450 km et de largeur moyenne 100 m, est une convergence d'oued Zouzfana et oued Guir au niveau de commune Igli (figure I.25). Les écoulements provoqués généralement par les précipitations sur le haut bassin, déferlent plus ou moins loin en aval, beaucoup atteignent une cuvette fermée (la Sebkhah el Mellah), par l'intermédiaire de l'oued Es Souireg qui descend vers le Nord-Ouest à la sortie du Foug el Kheneg (Merzougui, 2011).

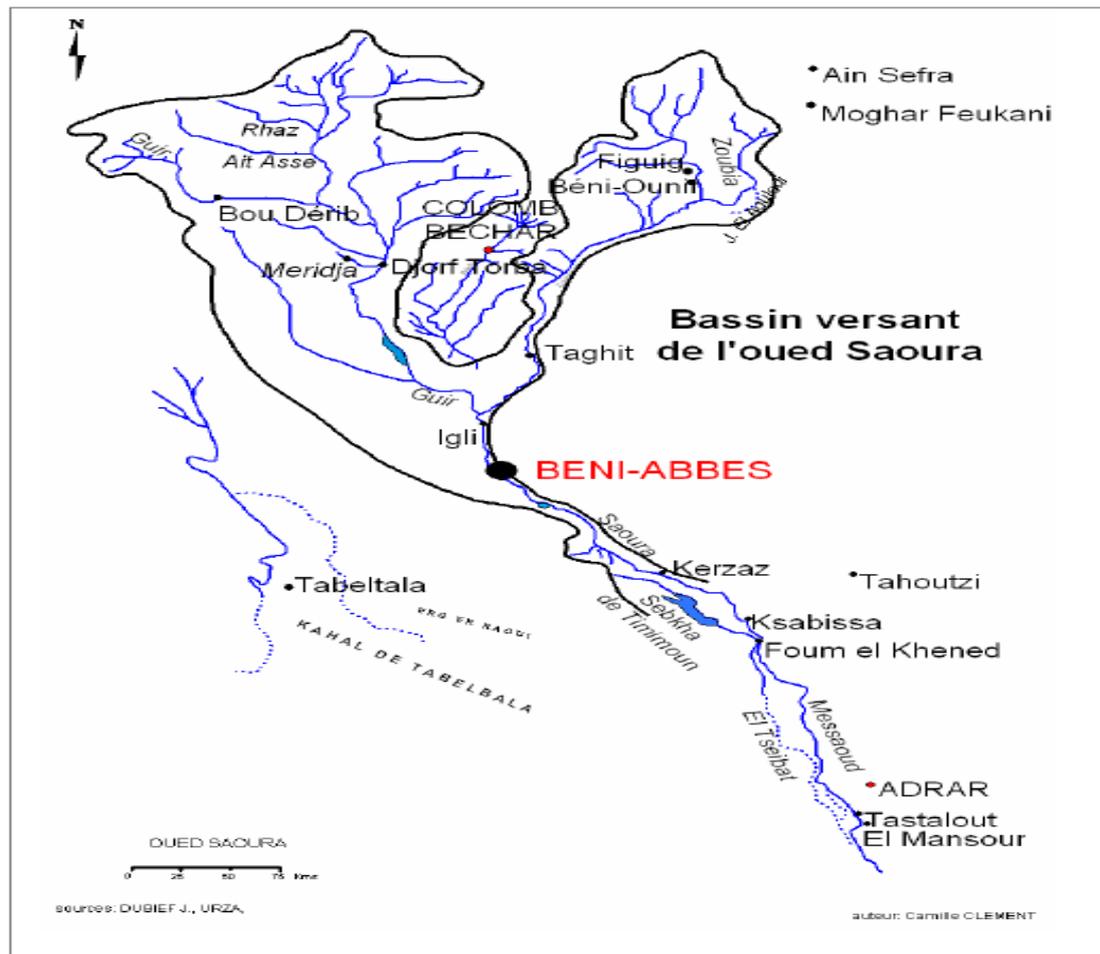


Figure I.25 : Carte du bassin versant de l'oued Saoura (Clément, 2007).

d) Oued Béchar : l'oued Béchar de longueur 290 km draine un vaste bassin de 357 km² environ, il est situé au pied du versant Sud d'Atlas Saharien, limité au Nord par la chaîne montagneuse djebel Grouz, au Sud Ouest par les montagnes d'Ougarta, à l'Ouest par la hamada de Guir et à l'Est par la hamada d'oued Namous.

B) Eaux souterraines :

On note l'existence des aquifères qui sont :

1- Nappe turonienne d'Ouakda

Les calcaires turoniens représentent un aquifère à caractère important par son extension de 2018 km², malgré son épaisseur relativement faible de 25 à 45 mètres. Le champ de captage de cette nappe se situe au niveau d'Ouakda et compte 5 forages (Hassi 20 ; Ouakda V ; Hycobar III ; Ouakda II ; Ouakda III), produisant un débit total de 97 l/s en 2005 (Lefkir, 2005).

2- Nappe du quaternaire d'Ouakda

Par sa lithologie le quaternaire renferme une nappe, alimentée par son impluvium et par l'oued Béchar. Elle est actuellement exploitée par 211 points d'eau dont 186 puits et 25 forages. Le volume d'eau extrait de cette nappe est de 784.574,08 m³/an (un débit de 24,85l/s en 2007) (Merzougui, 2012).

3- Nappe jurassique de Mougheul

Le champ captant de Mougheul, situé au Nord à 70 km de la ville de Béchar, est formé de cinq forages de profondeur variant entre 45 à 100 m. Ces forages implantés dans le jurassique, produisent un débit d'exploitation de 75 l/s (Malki, 2012), ce qui influe négativement sur le rabattement de la nappe et l'assèchement de la grande source qui alimente l'oasis. Aujourd'hui, la conduite d'alimentation en eau potable du champ captant Mougheul vers Béchar est arrêtée à cause du tarissement de la nappe.

4- Nappe du Grand Erg Occidental

Hydro-géologiquement bien définie, elle s'intègre dans un vaste système aquifère, limité Au Nord par la flexure Sud Atlasique, au Sud-est, elle s'équilibre avec les eaux du continental intercalaire où ces eaux sont captées dans des systèmes de foggaras. Cette dernière est alimentée par les oueds septentrionaux, principalement par les oueds de l'Atlas Saharien. La grande source, dite usuellement « source de Sidi Othmane », capte les eaux souterraines de cette nappe, avec un débit de 26 l/s à 33 l/s (Roche, 1973 ; Merzougui, 2009), elle assure un rôle double, l'alimentation en eau potable et l'irrigation de la palmeraie. Elle représente à cette localité l'exutoire par excellence de cette nappe (Mekkaoui, 2005).

5- Nappe de la hamada du Guir

La hamada se situe sur la rive droite de la vallée de la Saoura, c'est un plateau faiblement incliné, depuis Boudenibe (1150 m) jusqu'aux chaînes d'Ougarta (650 m) avec une largeur de 110 km et une longueur de 200 km. Le plateau est orienté NW-SE, les calcaires constituant l'aquifère, dont la recharge est complexe, assurée d'une part, par les périodes humides du quaternaire, d'autre part, par un système des oueds (oued aicha, oued El Abiod, oued Alarfedj). Cette nappe montre un écoulement dans l'ensemble suivant l'allongement de la hamada NW-SE (Combes, 1966).

6- Nappes des formations paléozoïques

Elles ne sont connues que localement, au niveau des villages Zéghamra et Ougarta, dont les aquifères sont le cambrien et l'ordovicien. Ces nappes sont alimentées partiellement par les eaux des pluies et la vallée de la Saoura.

7- Nappes des terrasses alluviales et d'inféro-flux

L'inféro-flux de la vallée de la Saoura constitue le niveau de base d'eaux souterraines. Ce niveau est alimenté par les crues de l'oued Saoura, qui s'infiltrent dans les sables de son lit, le long de la vallée de la Saoura. La profondeur du niveau piézométrique varie généralement de zéro (Guelta) à trois mètres au-dessous du sol. Le gradient hydraulique de l'inféro-flux peut être assimilé à petite échelle à la pente du profil longitudinal de la vallée de la Saoura (figure I. 26), il est de 0.65 /1000 de Marhouma à Sebka el Melah (Roche, 1973).

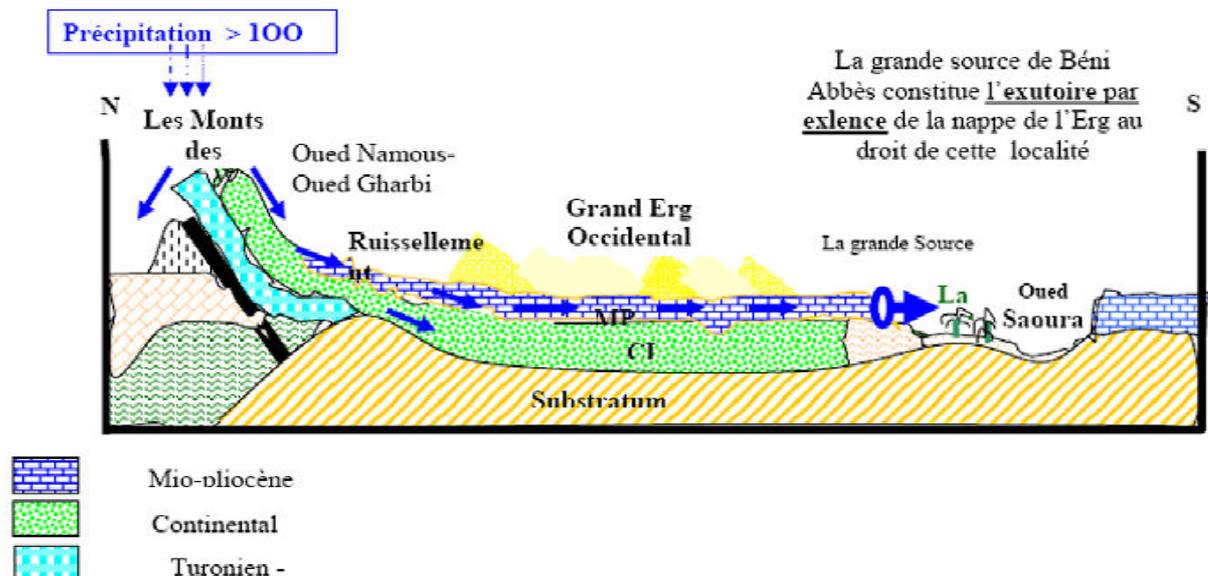


Figure I.26 : Coupe schématique, des grands transferts hydrodynamiques dans le bassin sédimentaire du Nord Ouest saharien de l'Algérie (Merzougui, 1998).

I.6. CONCLUSION

La Saoura est un Carrefour des civilisations, trait de vie dans le Sahara, et une Grande vallée façonnée par l'oued éponyme. Ces dernières années, elle est touchée par une sécheresse qui a détruit de nombreuses palmeraies.

Cette zone est située au Sud du massif de l'atlas. Les différentes formations de la zone présentent des conditions de réservoir par excellence. Les terrains primaires pourront contenir une superposition d'aquifères.

Le climat y est typiquement désertique, chaud, ensoleillé et aride, les températures diurnes sont très élevées, pouvant dépasser 40°C, et l'amplitude thermique entre le jour et la nuit est souvent supérieure à 35 ou 40°C. Les précipitations sont très rares et irrégulières ; la région reçoit en moyenne moins de 80 mm de pluie par an. Les pluies peuvent survenir sous la forme d'averses

très brutales, et l'eau ruisselle dans les oueds. Des vents brûlants, comme le sirocco. La végétation est très rare, c'est le domaine des ergs (désert de dunes) et des regs (désert de cailloux).

De point de vue quantitatif et qualitatif, les aquifères de la Saoura possèdent une quantité d'eau importante, qui a un impact efficace sur l'environnement et sur les habitants quel que soit positivement ou négativement selon leur existence.

Chapitre 2

SYSTEME DE CAPTAGE TRADITIONNEL DES EAUX PAR FOGGARA

2.1. INTRODUCTION

Le système de captage des eaux par foggaras est composé d'une succession de puits pour l'évacuation et l'entretien et d'une galerie souterraine qui draine l'eau de la nappe pour l'amener à la surface du sol.

L'eau sortie à la surface par gravité sera distribuée équitablement entre les copropriétaires de la foggara par un partiteur appelé « Kasria ». L'eau ainsi partagée sera acheminée par des rigoles appelées « Seguias » vers le jardin de chaque copropriétaire ou repartagée une deuxième fois par une autre Kasria plus petite. Arrivée au jardin, l'eau sera accumulée dans un bassin appelé « Majen » pour irriguer ensuite les palmiers dattiers et les différentes parcelles de cultures « Guemoun » du jardin.

2. 2. HISTORIQUE DE LA FOGGARA :

Le système de captage des eaux souterraines « Foggara » se trouve dans plusieurs pays mais sous différentes appellations. On le trouve en Chine sous le nom de « Karez », en Iran « qanat », au Pakistan « Kharez », au Yémen « Sahrij », à l'Oman « Falej », en Syrie sous le nom de « Kanawat », en Tunisie « Ngoula », au Maroc sous le nom de « Khettara » et en Espagne « Minas ». On trouve aussi des adductions similaires en Azerbaïdjan, Arménie et dans l'ancienne Egypte.

D'après plusieurs auteurs, cette technique aurait pris naissance en Iran. Hérodote mentionne l'existence de ce système en Mésopotamie au V^{ème} siècle avant J.C. Polybe signale aussi ce système en Perse au III^{ème} et au II^{ème} siècle avant J.C. ce qui atteste l'origine lointaine de

cette technique, puis a suivi l'axe de diffusion de l'islâm qui s'est ensuite propagé vers l'Est et l'Ouest. Les rares documents trouvés justifient que les Foggaras sont introduites au Sahara Algérien entre le X^{ème} et XII^{ème} siècle par El Malik El Mansour, qui aurait creusé la première Foggara appelée Hennou (actuellement elle débite 3,2 l/s) à Tamentit localité située à 15 km au sud de la ville d'Adrar. Donc ce système est très répondu. Il représente un patrimoine hydraulique mondial. En Algérie, La majorité des foggaras se trouvent dans la wilaya d'Adrar. Mais, on la trouve aussi au Nord de la wilaya de Tamanrasset dans la région d'In Salah. Dans la wilaya de Bechar, dans la partie Sud-Est à Beni Abbes et Igli, et aussi quelques traces de « l'existence de la foggara dans la wilaya de Laghouat et à Boussaada (Saadi, 1984) .

2.3. ETYMOLOGIE « FOGGARA »

L'étymologie du mot exact "Foggara" n'est pas connue. Mais d'après plusieurs historiens, le mot " Foggara " provient du mot arabe "Fagra" c'est-à-dire « Eventrer », dans le sens de creuser la terre pour sortir de l'eau ou du terme arabe "Fakra" c'est-à-dire vertèbre. Les puits sont alignés comme une colonne vertébrale "Fagratte" . D'autres pensent que ce terme provient du mot arabe "El Fokr", la pauvreté. C'est-à-dire, que celui qui creuse une foggara se trouve dans l'obligation d'y investir tellement qu'il finit par tomber dans le besoin avant d'en bénéficier. Mais, la désignation la plus correcte d'après la littérature arabe semble provenir du mot arabe "Fadjara el ardh", faire jaillir la terre, qui désignerait la sortie de l'eau de la roche, en modifiant la prononciation de la lettre arabe « dj » de Fadjara en « g » qui devient « Foggara ».

2.4. NAISSANCE D'UNE FOGGARA :

Plusieurs hypothèses concernant le point d'impact de la naissance d'une foggara sont proposées, on cite :

2.4.1. Une source :

La foggara a son point d'origine dans une source. Celle-ci a pu se tarir ou bien les copropriétaires ont voulu augmenter le débit, une tranchée a été alors pratiquée dans la nappe aquifère. Cette tranchée établie dans le sens d'écoulement de la nappe, elle part de l'aval vers l'amont, l'approfondissement progressif de la tranchée, la difficulté d'évacuer les déblais et la possibilité de construire un tunnel dans la couche des grès ont conduit au puits. Le puisatier s'est alors transporté à la surface du sol. Il a creusé jusqu' la nappe et relie ces différents puits par une galerie souterraine (A.SAIDI, 1983).

2.4.2. Puits Amont

Les propriétaires qui ont voulu creuser une foggara et après le choix d'un point en amont ont creusé le premier puits pour s'assurer de la disponibilité de la ressource. Puis, les puits se succèdent de l'amont vers l'aval. Raccordés par la galerie jusqu'à la sortie de l'eau en surface, le point de sortie est choisi aussi en aval par les copropriétaires.

2.4.3. Puits Aval

Les copropriétaires creusent le premier puits en aval, puis un deuxième puits raccordé par une galerie, puis un troisième puits et ainsi de suite. Les puits se multiplient en s'enfonçant dans la nappe aquifère. Cette théorie est la plus adaptée, puisque au premier cas, l'origine d'une source n'est pas admise de point de vue hydrogéologique. Puisque la formation aquifère est composée dans sa majeure partie par des formations meubles (sable, argile et grès). Pour le deuxième cas, il est très difficile de travailler de l'amont vers l'aval, avec des venues d'eau en puissances dans la galerie creusée en amont.

2.5. COMPOSITION DE LA FOGGARA :

La foggara est composée de plusieurs éléments, on trouve de l'amont vers l'aval (figure 2.1):

2.5.1. Le Puits « Hassi » :

Les puits « Fouaha », sont la partie visible de la foggara. A l'intérieur des villes font un objet esthétique, ils servent à l'accès et au curage de la foggara (évacuation des déblais et remblais) et a l'aération de la foggara. Ils ne jouent aucun rôle hydraulique dans le fonctionnement de la foggara. La distance qui sépare les puits entre eux n'est pas constante. Elle varie d'une région à l'autre (Gourrara, Touat et Tidikelt) et selon le type de terrain traverse. Elle varie entre 07 et 40 m de longueur. La profondeur des puits varie selon le niveau statique de la nappe et la topographie de la région.

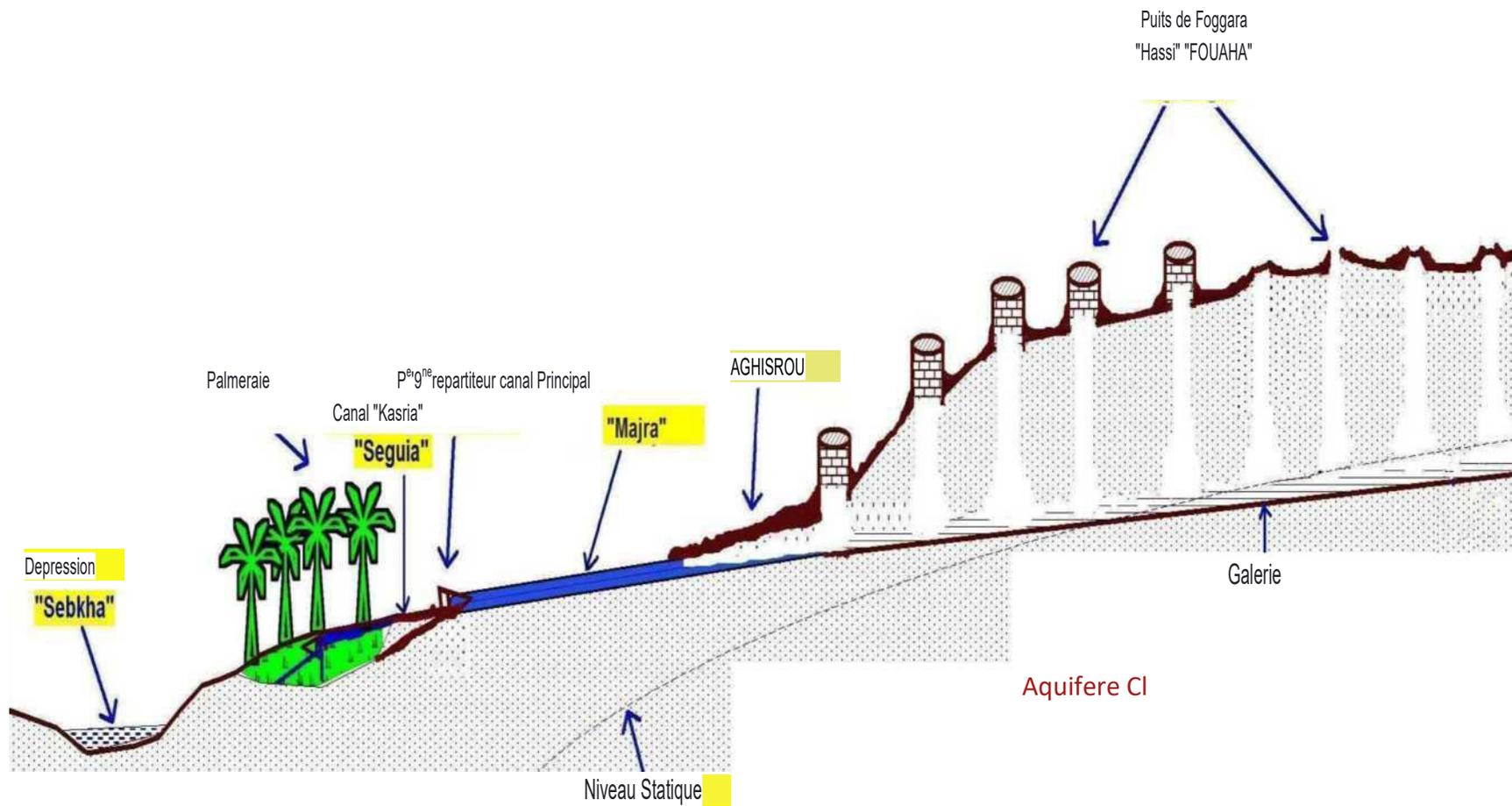


Figure 2.1 : Schéma descriptif d'une foggara.

2.5.2. La Galerie « N'fad »:

La galerie ou « Nfad » est la pièce cardinale de la foggara. C'est une conduite souterraine de plusieurs kilomètres de longueur composée hydro-géologiquement de deux parties : une partie drainante, qui représente la partie la plus intéressante de la foggara, puisque c'est la partie qui pénètre dans l'aquifère et qui draine l'eau vers la deuxième partie ; non drainante. Cette dernière sert à transporter l'eau vers le canal principal. La longueur totale du réseau ramifié de la galerie varie entre 0,07 et 15 km de galerie souterraine (figure 2.2).

La communication entre deux puits, se fait à travers un tunnel. Il sert pour le passage à la galerie et à l'accès aux puits le long de la galerie lors de l'entretien et le nettoyage de la foggara. Il est de l'ordre de 0,5 à 1,5 m de largeur et de 1 à 6 m de hauteur.

L'analyse de l'alignement des foggaras (figure 2.2) montre que les galeries de la majorité des foggaras sont ramifiées, la partie amont de la foggara prennent à la fin la forme de signe «Y».

2.5.3. L'Aghisrou :

C'est la partie où la galerie sort en surface. Il est situé entre le premier puits et le canal principal « Majra ». Généralement recouvert par des plaquettes de ciment ou de roche avec de l'argile. La longueur de l'Aghisrou dépend de la profondeur du premier puits et du niveau de sol. Sa longueur est de quelques mètres à des centaines de mètres.

2.5.4. Canal Principal « Majra » :

Le canal principal « Majra » est un canal de forme rectangulaire qui sert à conduire l'eau vers le peigne répartiteur « Ksaria ». Sa longueur est de quelques mètres à quelques kilomètres. Il est construit par des argiles, actuellement ces canaux sont en ciment et même en PVC, pour minimiser les pertes par infiltration.

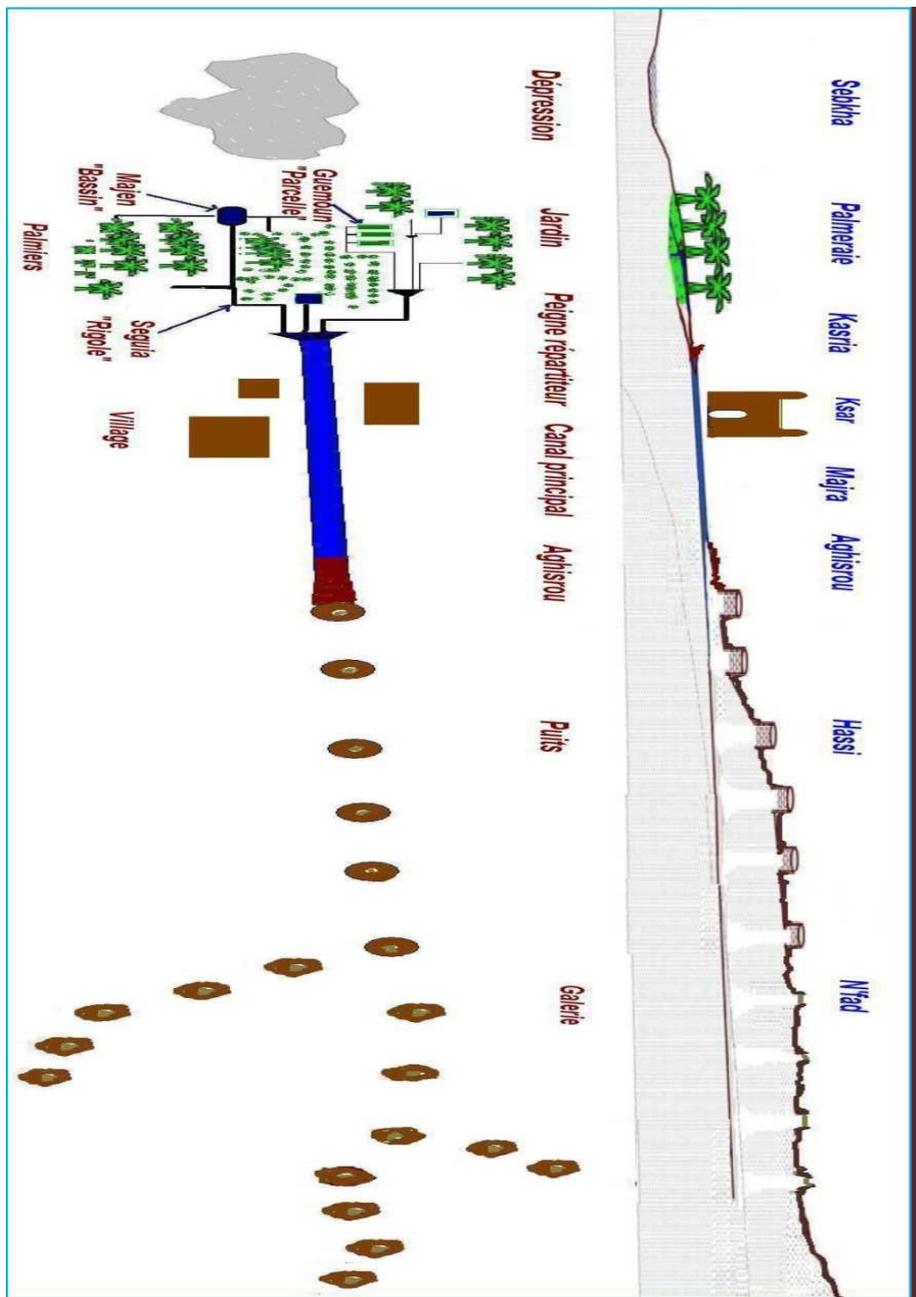


Figure 2.2 : Alignement des foggaras

2.5.5. Peigne Répartiteur « Kasria » :

A la fin du canal principal « Majra », se trouve un partiteur appelé « Kasria » ou «Qasri». C'est un bassin de forme triangulaire ou rectangulaire construit par des argiles. Actuellement en ciment, muni d'un tranquilisateur pour amortir la vitesse de l'eau avant de passer par le Machte « brosse » d'où chaque part d'eau sera canalisée par une Seguia vers le jardin le plus loin dans la palmeraie (figure 2.5).

La « Kasria El Kebira » ou bien peigne principal, représente le point de collecte et de distribution des eaux de la foggara. Puisque l'eau de la foggara doit passer par le peigne principal pour être partager équitablement entre les copropriétaires, on trouve aussi des kasrias secondaires et tertiaires pour partager l'eau entre les copropriétaires.

2.5.6. Rigole « Seguia » :

La part d'eau de chaque copropriétaire est canalisée vers son jardin par une rigole à ciel ouvert appelée « Seguia » construite en terre ou actuellement en ciment et même en PVC pour réduire les infiltrations, de forme circulaire ou rectangulaire. Les seguias se ramifient dans tous les sens dans la palmeraie.

2.5.7. Bassin « Majen » :

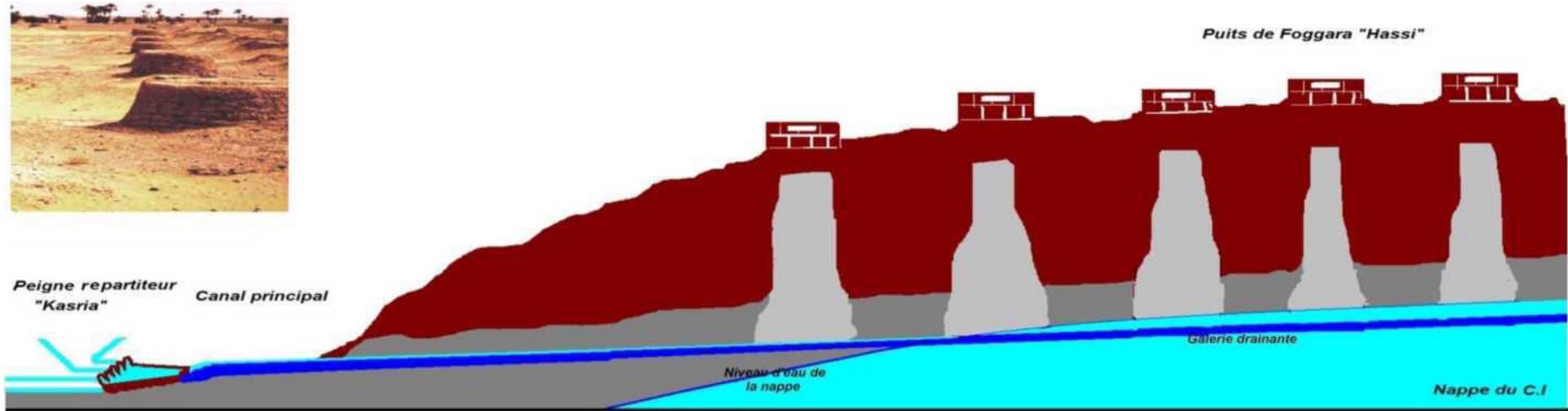
L'eau acheminée vers le jardin du copropriétaire par une seguia est accumulée dans un bassin appelé « Majen », d'une forme rectangulaire ou carre, situé à un point élevé par rapport au niveau des terres a irriguées, construit en ciment pour minimiser les pertes par infiltration. Il sert à l'alimentation permanente du jardin.

2.6. MESURE ET PARTAGE DU DEBIT DE LA FOGGARA :

Après chaque opération de nettoyage et d'entretien, une opération de remesure et de répartition du débit de la foggara s'effectue.

Chaque foggara possède un registre « Zemam » dont lequel sont inscrits les noms, les parts des copropriétaires ainsi que toute modification, achat, vente ou location d'une ou des parts d'eau de la foggara.

Le Chahed « Temoin » qui détient le registre « Zemam » annonce la mesure du débit d'une Kasria principale ou secondaire à la demande d'un ou des copropriétaires. Ou bien après chaque opération de nettoyage et d'entretien d'une foggara.



Kasria et Seguias



Aghisrou



Galerie drainante



Puits de foggara vue de bas



Galerie drainante

Figure 2.3 : Vue d'ensemble des éléments de la foggara.

2.6.1. Outil de mesure :

La mesure du débit de la foggara se fait par un outil de fabrication traditionnel appelé «Louh» dans la région de Gourara, « Chegfa ou Halafa » dans la région de Tidikelt et « Kiel Asfar ou Chegfa » dans le Touat. C'est une plaque de cuivre de différentes formes et diamètres, plane au Touat de 57 x 18 cm (figure 2.4) et de forme cylindrique au Tidikelt de 15 cm de haut et de 25 à 30 cm de diamètre. L'outil est percé d'une rangée de trous de différents diamètres qui correspondent aux multiples et sous multiples de l'unité de mesure.



Figure 2.4 : Kiel El Ma avec son Louh (Boutadara. Y, 2009).

2.6.2. Unité de mesure :

L'unité de mesure du débit « Habba » « Habbazrig » « Habbamaabout » change de nom dans chaque région. Elle s'appelle kherga dans le Tidikelt, Tmen, Majen, Sba, Aud, Kherga dans la Gourara et Sbaa, Majen, Habba dans le Touat. L'unité de mesure n'est pas la même dans toute la région. Elle diffère d'une région à l'autre et même d'une foggara à l'autre dans le même ksar. D'où les différents outils utilisés pour la mesure du débit pour chaque foggara. Dans le Touat elle est de l'ordre de 0.058 l/s (A.Mehdaoui, 2011), alors qu'elle est de 0.133 l/s dans le Tidikelt (H.A.Hamadi, 1982). Le tableau 2.1 ci-dessous donne les différents débits dans la région d'Adrar.

Tableau 2.1 : Unités de mesure du débit de la foggara d'après (Remini.B, 2008).

Palmeraie	Unité	Débit l/s
Timimoun	Tmen	0.0261
Deloul	Majen	0.0166
Charouine	Sbaa	0.0833
Tinerkouk	Aud	0.0633
Aougrout	Kherga	0.0683
OuledSaid	Habba	0.0433

La Habba vaut 24 Kirat « Carat » tableau 2.2 et le HabbaZerigt vaut 24 Kirat. Tellement l'eau est précieuse, ils ont utilisé l'unité de mesure de l'or « le carat » pour le partager. La codification suivante utilisée pour la mesure du débit.

Tableau 2.2 : Tableau des sous multiples de Habba.

Valeur	Quantité	Equivalent	Symbole
Habba	1	24 Kirat	•
HabbaZerig	1	24 Kirat	•
HabbaMaaboud	1	24 Kirat	•
Un Kirat de Habba	1/24	1/24 de Habba	•
Deux Kirat de Habba	1/12	2/24 de Habba	• •
ToisKirat de Habba	1/8	3/24 de Habba	• • •
Quatre Kirat de Habba	1/6	4/24 de Habba	
Six Kirat de Habba	1/4	6/24 de Habba	:
Huit Kirat de Habba	1/3	8/24 de Habba	
Douze Kirat de Habba	1/2	12/24 de Habba	
Vingt-quatreKirat de Habba	1	24/24 de Habba	

Tableau 2.3 : Tableau des sous multiples de Kirat.

Valeur	Quantité	Equivalent	Symbole
Kirat	1	24 Kirat de Kirat	•
Un Kirat de Kirat	1/24	1/24 de Kirat	•
Deux Kirat de Kirat	1/12	2/24 de Kirat	••
ToisKirat de Kirat	1/8	3/24 de Kirat	•••
Quatre Kirat de Kirat	1/6	4/24 de Kirat	—
Six Kirat de Kirat	1/4	6/24 de Kirat	-- ••
Huit Kirat de Kirat	1/3	8/24 de Kirat	=
Douze Kirat de Kirat	1/2	12/24 de Kirat	=
Vingt quatreKirat de Kirat	1	24/24 de Kirat	= =

2.6.3. Mesure du débit :

Le « Kiel El Ma » le mesureur d'eau nommé par la djemaa du ksar «comite du village» en considération de ses connaissances. Son honnêteté et sa conduite irréprochable, procède à l'opération de mesure à l'aide d'un comptable « El Hassab » et par un ou deux ouvriers.

Kiel El Ma installe l'outil de mesure dans la Kasria El Kebira ou Seghira (la grande ou la petite peigne) ou dans une seguia pour mesurer le débit. Il fixe l'outil par des argiles et procède à la fermeture et à l'ouverture des différents trous de l'outil. Chaque trou correspond à une fraction du débit que le mesureur les connaissent parfaitement. Après plusieurs mesures, il donne le débit de la foggara ou de la seguia au comptable « El hassab » qui fait les calculs de division du débit global entre les parts des copropriétaires et compte la part de chaque copropriétaire. A cet instant, Kiel El Ma fait le travail de répartition du débit entre les canaux. D'ou chaque copropriétaire reçoit sa part d'eau continuellement 24h/24h. Il existe une autre méthode de partage du débit appelée « Nouba » où chaque copropriétaire reçoit un débit dans un temps déterminé (par unité de temps).

2.6.4. Partage du débit :

Le débit initial de la foggara est donné par rapport à « Habba Zrig » c'est-a-dire le débit initial de la foggara après sa mise en exploitation, ou chaque propriétaire a son débit de Habba Zrig. Après plusieurs années d'exploitation, le niveau de la nappe est abaissé, le débit chute, alors le débit mesuré de la foggara s'appel « Habba Maaboud ». Donc c'est le débit réel de la foggara. Alors que Habba Zrig c'est le débit fictif de la foggara.

2.7. FONCTIONNEMENT DE LA FOGGARA :

Le niveau statique de la nappe se trouve au-dessus de la partie (D-F) dans la figure 2.4. L'eau pénètre dans la galerie et se déplace sous l'effet de la pression atmosphérique et du gradient hydraulique vers la partie (C-D). Une stabilisation se fait dans cette partie au point d'intersection du niveau de la nappe et la pente de la galerie, l'eau à partir de ce point s'écoule par gravité vers la partie (B-C).

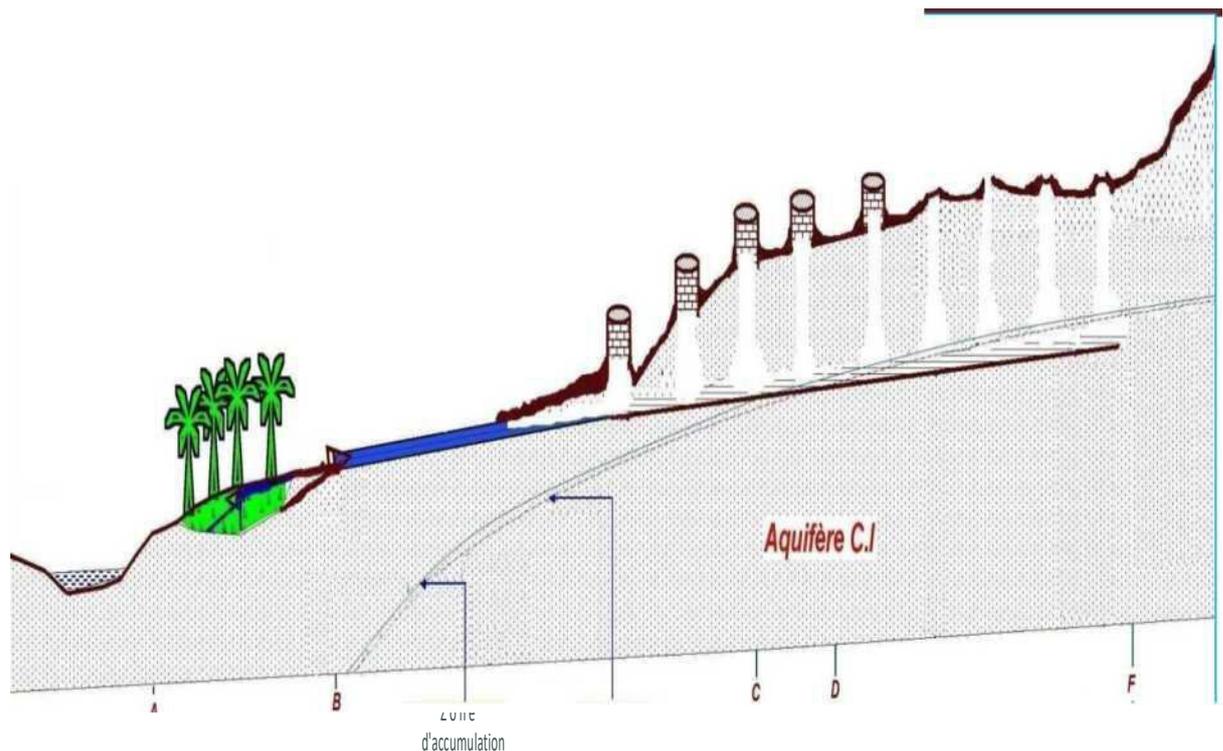


Figure 2.5. : Schéma de fonctionnement d'une foggara.

Au cours du temps, le niveau de la nappe baisse, le point d'intersection se déplace en amont, de la zone (C-D) vers la zone (D-F), la charge hydraulique diminue et le débit de la foggara chute.

Le tarissement de la foggara est atteint lorsque le débit dans le point B est nul. C'est-à-dire que le débit provenant de la partie (C-F) égal au débit perdu par infiltration et par évaporation dans la partie (B-C). Ces pertes sont estimées de 10 à 20 % (A.Salem, PNUD 1988) et de presque 50 % du débit de la foggara (B.Merzougui, ANRH 2004). Lorsque le point d'intersection du niveau de la nappe et de la galerie atteint le point F, à ce point, la foggara est « morte ».

2.8. TYPE DE FOGGARA :

Les foggaras ne diffèrent que par leurs longueurs, ramifications et par région d'existence. Dans le langage local, on désigne une grande foggara par le vocable « Kebira » et une petite foggara par la foggara «Seghira». Il n'existe aucune classification de construction ou de creusement, on trouve :

2.8.1. Foggara de l'Erg :

C'est une foggara creusée près de l'Erg. Avec l'avancement des dunes de sables durant les siècles de l'existence de la foggara, il est très difficile de trouver le puits amont de la foggara recouvert de sable.

2.8.2. Foggara du plateau :

La majorité des foggaras de la région d'Adrar sont alignées Est-Ouest, ils suivent le sens d'écoulement de la nappe du Continental Intercalaire et de la même façon, ils sont orientées vers le plateau de Tademait.

2.8.3. Foggara du Jardin :

C'est une foggara localisée dans la palmeraie. Elle est de petite longueur et qui capte les eaux d'infiltration et de drainage des autres foggaras situées en amont.

2.8.4. Groupement de foggaras :

On peut trouver plusieurs foggaras associées dans une seule foggara. C'est une réunion de deux à six foggaras dans une seule kasria.

Chapitre 3

INVENTAIRE DES OASIS DE LA VALLEE DE LA SAOURA

3.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, on s'intéressera uniquement aux oasis encore actives sinon réhabilitables dans le périmètre de la Saoura. Il faut signaler qu'un nombre inconnu d'oasis se sont disparues à cause principalement de la dégradation du système de captage des eaux par foggara ainsi que du réseau d'irrigation.

Dans ce qui suit, la présentation des oasis sera établie par ordre alphabétique.

A- L'OASIS DE BENI ABBES :

A.1. Introduction :

L'oasis de Béni Abbès est située au bord d'oued Saoura, un des oueds les plus importants, tant par sa longueur que par son débit, qui s'écoule de l'Atlas dans le Sahara algérien. Malgré cette prétendue richesse en eaux superficielles, les eaux souterraines du Grand Erg Occidental représentent la ressource en eau la plus importante et la plus fiable pour Béni Abbès.

L'oasis de Béni Abbès profite d'une source de jaillissement d'eau. Elle a porté l'eau en surface par une série de foggaras. Depuis l'union des tribus de la région autour de la grande source d'eau pour construire le vieux ksar au milieu de la palmeraie de 40 hectares. Cette dernière est menacée à disparaître à cause du tarissement de la nappe et la salinité qui attaque les eaux douces souterraines. Devant cette situation, la dégradation des palmiers est certaine, et sans eau douce l'oasis perd son importance avec le temps.



Photo A.1 : Le vieux ksar au milieu de la palmeraie de Béni Abbès (2008).

Pour entretenir la palmeraie, l'eau est le premier élément nécessaire à cela. Malheureusement, cet élément connaît beaucoup d'insuffisance, tant en quantité qu'en qualité; les puits réalisés par les paysans sont mis hors-service à cause de la salinité qui attaque leur eau et la surexploitation de la nappe par l'utilisation des pompages. Cette salinité se propage d'une façon remarquable depuis l'axe de l'oued jusqu'à ces bordures. Le 2/3 de débit de la source de « Sidi Othmane » est réservé pour l'alimentation en eau potable de la population et le 1/3 du débit total réservé à la palmeraie selon le schéma directeur d'eau de la ville qui s'avère insuffisant (Bentaeb, 2003).

Il existe à proximité de Béni Abbès un grand nombre de foggaras traditionnelles dont l'eau utilisée en irrigation (Une partie de ces foggaras sont alimentées par la grande source de Sidi Othmane : 1/3 de débit total). Ces zones irriguées ne se limitent pas à la palmeraie de Béni Abbès (Ait Kaci, 1990).

A.2. Situation géographique

Les limites administratives de la commune de Béni Abbès sont,

- Au Nord par la commune d'Igli
- Au Sud-Est par la commune de Kerzaz.
- À l'Ouest par la commune de Tabelbala.
- À l'Est par la commune de Tamtert.



Figure A.1 : Carte de repérage de Béni Abbès

Pour une superficie de 13 170 km², Béni Abbès comptait en 2011, 12 683 habitants avec un nombre de ménages estimé à 1 812.

A.3. Géomorphologique

Cette oasis est formée par quatre unités bien distinctes qui sont (Mekkaoui, 2005) :

Le plateau de Sonelgaz : il fait partie de l'immense hamada du Guir, d'une altitude de 600 m, sur lequel est construite la centrale électrique de la ville.

Le plateau de la ville : à une altitude de 600 m, sur lesquels la ville est construite. Il est légèrement incliné vers l'Ouest, c'est-à-dire vers la Saoura.

La vallée de la Saoura : forme un vaste couloir serpenté entre les deux plateaux, où coule oued Saoura. Les bords de cette vallée sont escarpés, avec un fond plat, occupé par des dunes de sable. La rive gauche de la vallée est occupée par des palmiers structurés en forme de scorpion, et contient au centre le vieux ksar.



Photo A.2 : Oued Saoura traverse Béni Abbès (2008).

Les dunes de sable : un système spectaculaire des dunes de sable, appartenant au Grand Erg Occidental circonscrivent la ville du côté Est.

A.4. Agriculture de l'oasis de Béni Abbès

L'oasis se compose principalement des palmiers dattiers, arbres fruitiers et des cultures en sous-strates. Mais l'existence de l'eau est le plus important dans sa création et de maintenir l'équilibre à travers sa gestion, mode d'irrigation et les réseaux de seguias qui permettent de mieux comprendre l'ingéniosité des paysans de l'oasis.

a) Palmiers

Les palmiers sont vieux et généralement moins productifs. Ils sont attaqués par une maladie causée par le Bayoud incurable qu'on ne peut contrôler que par abattage. À cause du niveau de la production, l'entretien des palmiers est limité. La palmeraie de Béni Abbès se situe sur la rive gauche de l'oued Saoura. Elle joue un rôle socio-économique important. La surface agricole de la palmeraie centrale de Béni Abbès est de 40 hectares, pour toute la surface agricole de Béni Abbès (+ 100 hectares). Son irrigation est assurée en majorité par le 1/3 du débit global de la source de "Sidi Othmane". La palmeraie comprend environ 10 000 palmiers dont environ la moitié est délaissée.

Les causes sont multiples dont on compte :

- Entretien insuffisant de la palmeraie,

- Dégradation de l'état des sols et propagation du Bayoud,
- Absence de traitement de lessivage des sols,
- Pollution par les eaux usées,
- Absence de lessivage du sol.

b) Arbres fruitiers

Les arbres fruitiers sont d'un âge variable. Il y a de jeunes arbres, mais la plupart sont bien âgées. L'on y trouve les agrumes (citrus), les grenadiers, les oliviers et les abricotiers.

c) Légumes potagères :

La palmeraie constitue une source d'aliments considérable quant aux cultures potagères saisonnières. On peut citer les oignons, l'ail, les salades vertes, concombres, carottes, radie, courgettes, fève, pastèques, melon, ... etc

A.5. Sources et répartition de l'eau à Béni Abbès

Les eaux souterraines représentent l'unique ressource d'approvisionnement d'eau pour l'oasis de Béni Abbès. Au niveau de cette localité, il est possible de répertorier quatre (04) nappes interconnectées de tailles variées. Celle du Grand Erg Occidental est la plus ample, elle communique par un drain naturel avec les nappes des terrasses alluviales et d'inféro-flux de la Saoura. La nappe de la hamada du Guir, contenue dans les calcaires lacustres du tertiaire, présente des capacités modestes. Enfin, s'ajoutent les nappes fossiles peu connues du paléozoïque. La nappe du Grand Erg Occidental offre une bonne eau et représente le principal nerf du système aquifère, au sein duquel, existe un exutoire par excellence, dite usuellement la grande source de Sidi Othmane ($Q = 33l/s$) (Merzougui, 2008).

Selon un système de partage traditionnel du débit global : 2/3 destinées à l'alimentation en eau potable et 1/3 pour l'irrigation de la palmeraie d'ordre qualitatif et quantitatif (Bentaeb, 2003).

Le problème de salinité des eaux souterraines causé par de plusieurs facteurs humains et naturels, engendrant des sérieux problèmes d'irrigation.

L'eau provenant de la source de la nappe fossile du grand Erg est répartie : 1/3 pour l'irrigation, 2/3 pour l'agglomération par un réseau de distribution de l'eau. Le schéma ci-dessous montre la répartition générale de l'eau de la source. La distribution de l'eau de ville se fait aussi grâce à deux grands forages situés sur le plateau et puisant l'eau dans la nappe d'eau fossile. L'irrigation, quant à elle se fait en partie avec l'eau de la source de Sidi Othmane (figure A.4) et en partie

grâce à des petits forages situés dans les jardins. L'eau est alors issue de la nappe phréatique superficielle (environ 12 m de profondeur) qui est alimentée par les crues de la Saoura et les rares pluies.

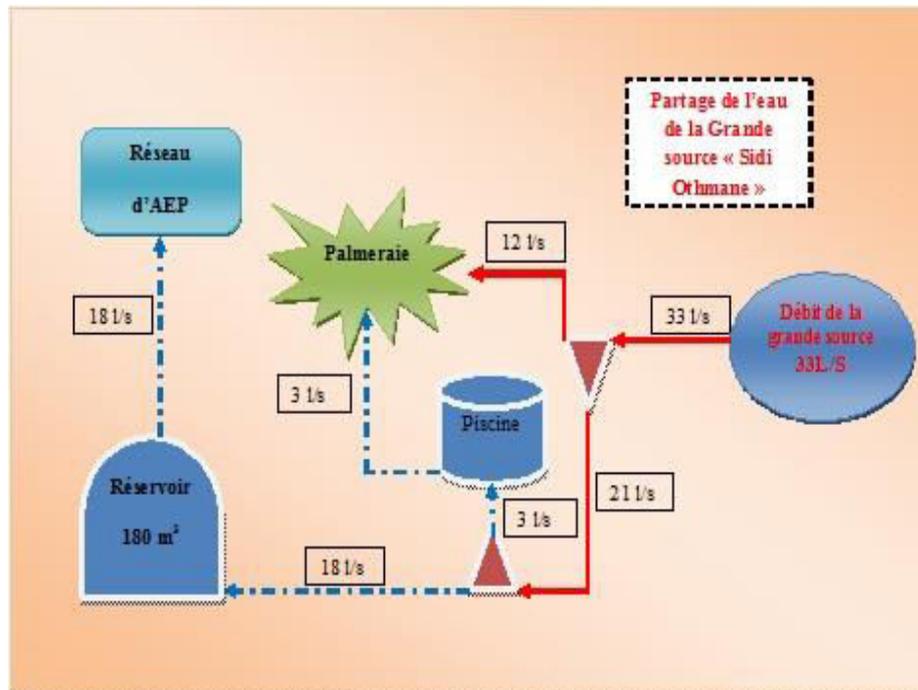


Figure A.4 : Schéma de répartition de l'eau de la source.

A.5.1. L'eau d'irrigation

Au cours des siècles, les oasiens de Béni Abbès ont mis en place une technique d'irrigation efficace et durable, qui a permis aux habitants de vivre dans des conditions d'aridité extrêmes tout en respectant les propriétés particulières de ces écosystèmes instables. Les foggaras de la Saoura ne drainent pas l'eau de la nappe souterraine, mais elles acheminent l'eau des sources jusqu'au majen de partage d'eau (bassin d'accumulation).

Une partie de l'eau d'irrigation passe par la piscine puis elle est acheminée jusqu'à la palmeraie. Le reste va directement dans le système d'irrigation de la palmeraie. La répartition de l'eau pour l'irrigation se fait en temps à Béni Abbès. Chaque partie de la palmeraie est alimentée en eau tous les quarts d'heure. Cette répartition se fait grâce à un système de galeries souterraines qui alimente quasiment toute la palmeraie (foggara de source).

A.5.2. Mode d'irrigation traditionnelle

Actuellement, la superficie totale irriguée au niveau de la palmeraie est de 21 hectares, le reste est presque abandonné, l'irrigation de la palmeraie se fait essentiellement par gravité par un système traditionnel de foggara et seguia. La totalité d'eau d'irrigation est d'origine souterraine assurée en majorité par la grande source d'une part, et d'autre part à travers des puits traditionnels qui captent les eaux de la nappe des terrasses alluviales. Le partage de la quantité réservé à la palmeraie, basé sur les droits de l'eau des propriétaires de la source d'un total de 41 Noubas pour toute la palmeraie (l'unité de mesure, c'est 1 Tighira = 15 minutes, 1 homme = 9 Tighiras = 2 h 15 minutes, Nouba = 12 hommes), avec un tour d'eau périodique.

L'eau en provenance de la grande source est distribuée selon un système conventionnel que les paysans le comprennent parfaitement, au point, il n'y existe pas de conflits entre eux sur la distribution de l'eau « Nouba ». Il est notable qu'il y a des exploitants qui ont de la terre, mais pas un droit suffisant d'eau. En revanche, il y a des gens, qui ont un droit d'eau, mais pas de la terre. La distribution d'eau d'irrigation se fait donc dans un esprit de patrimonial bien conservé et souvent conflictuel. Les sols dans la palmeraie sont décrits selon leur qualité, leurs droits de propriété et leur occupation/utilisation (tableau A.1).

a) Nombre des foggaras dans l'oasis de Béni Abbès

Le nombre des foggaras est de 20 foggaras au niveau de la palmeraie centrale (14 mortes à cause de l'effondrement, de manque d'entretien et de tarissement de la nappe). Pour tout le périmètre agricole au niveau de Béni Abbès, il y a environ 65 foggaras.

Tableau A.1 : Inventaire des foggaras situées à proximité de l'oasis de Béni Abbès (GTZ, 2008).

Paramètre	Unité	valeur
Nombre des systèmes	U	65
Nombre des lignes	U	84
Longueur totale	m	11585
Longueur moyenne	m	138
Longueur maximum	m	1569
Débit moyen	l/S	0,18
Débit maximal	l/S	0,93
Débit total	l/S	4,03
Superficie moyenne	m ²	7151
Superficie maximale	m ²	51000
Superficie totale	m ²	400435

La source de Sidi Othmane n'est plus la seule source d'eau de l'oasis, notamment pour l'irrigation. De nombreux puits et forages se multiplient dans les jardins (118 puits pour tout le périmètre agricole au niveau de Béni Abbès dont 47 puits au niveau de la palmeraie centrale). L'eau est à 3 à 12 mètres de profondeur environ. Elle est moins douce que l'eau de Sidi Othmane (qui provient de la nappe fossile du grand erg). C'est l'eau de la nappe superficielle provenant des crues de la Saoura et des infiltrations des pluies.

A.5.3. La gestion de l'eau

L'eau de la foggara est en général gérée par la jmâa, conseil de l'oasis. Chaque membre de la jmâa peut représenter une ou plusieurs familles qui participent dans la construction de celle-ci. La jmâa possède un rôle de : la gestion des transactions, de la caisse commune qui sert à payer les entretiens, sanction en cas de conflits...).

a) Instrument de mesure de partage de l'eau

Les oasiens de douar d'Ougarta (parmi les douars de Beni Abbès) ont utilisé l'ombre d'une éteule installée sur l'arcade de la porte d'entrée comme un signe de la répartition des parts d'eau entre eux. Ceci n'était bien sûr possible que durant le jour, ce qui ne posait pas de problème grâce à la présence d'un bassin d'accumulation pour stocker les eaux de la nuit. Les irrigants de Zéghamra exploitent les eaux de majen collectif en irrigation par l'utilisation d'une hampe de palmette graduée pour estimer les parts d'eau de chaque propriétaire.

b) Puits des foggaras de Béni abbès

La partie de captage est équipée d'un ensemble de puits et galeries en forme de multi Y qui conduisent les eaux de plusieurs petites sources vers la partie drainante, ce qui fait que la galerie de captage est équipée de deux séries de premiers puits, qui se joignent à la partie d'évacuation des eaux. La forme de Y était destinée à la récupération d'une grande quantité d'eau de la nappe.

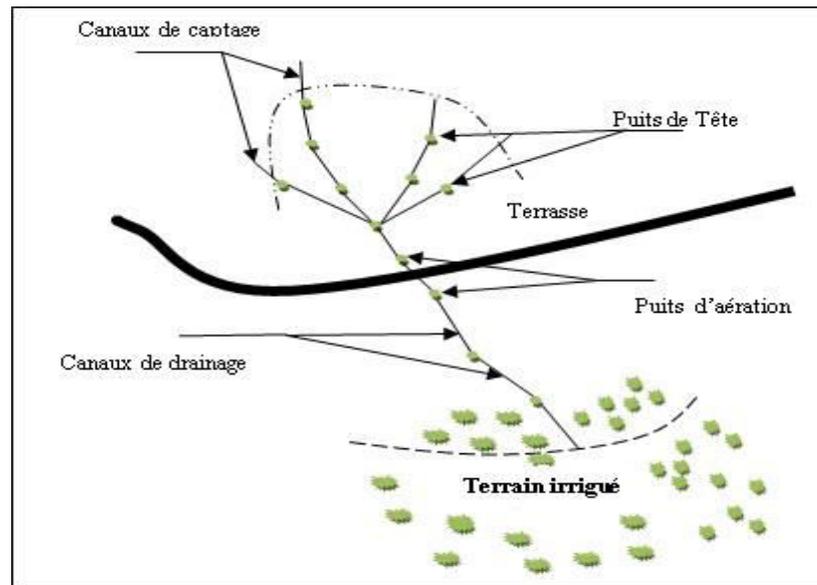


Figure A.5 : Schéma simplifié d'une foggara de Béni Abbès.

c) Distribution des eaux du bassin d'accumulation (majen)

Il existe souvent un bassin d'accumulation pour stocker l'eau de la foggara durant la nuit et la redistribuer le jour. La quantité d'eau dont dispose chacun ayant droit est habituellement calculée en temps; pour les eaux du bassin, ce temps est converti en hauteur d'eau. Pour un temps d'irrigation donné, la hauteur d'eau dans le bassin varie en fonction du débit. Chaque matin, la *jmâa* se réunit donc pour fixer la quantité d'eau dont peut bénéficier chaque personne ayant un droit d'utilisation de l'eau du bassin. Ceci est inscrit sur un bâton gradué (une hampe de palmette graduée), qui est l'instrument de mesure. La mesure de la hauteur d'eau se fait à un endroit précis du bassin.

B. L'OASIS DE BENI OUNIF :

B.1. Introduction

L'oasis de Béni Ounif est totalement dépendante de l'eau souterraine, elle est importante pour la continuation de l'homme et de la terre. L'oasis et l'histoire en sont témoin, elle représente un bon exemple pour discuter l'impact de l'urbanisation et de la modernité irrationnelle sur l'oasis traditionnelle. En fait, les oasisiens reposant entièrement leur agriculture sur l'exploitation des eaux souterraines, les véritables importantes sources d'eau de Béni Ounif sont celles dites artésiennes. Ces sources d'eau sont exploitées par une technique dite "foggara", ce sont des sortes de conduites pour l'écoulement des eaux ou plus simplement des drains. La commune de Béni Ounif est située à 111 km au Nord-Est de la wilaya de Béchar. Elle s'étend sur 16600 km², la population est de 15107 habitants. (APC Béni Ounif 2015).



Figure B.1 : localisation de la commune de Béni Ounif.

Le ksar de Béni Ounif est situé au Nord de la commune de Béni Ounif, sur la rive gauche de l'oued Melias à l'extrémité Nord-Ouest de la palmeraie. Ce ksar est limité au Sud par l'oued Sidi Abdelkader, c'est le premier témoin de la plus ancienne d'agglomération urbaine connue dans la région, habité par des tribus de Beni Ameer depuis le troisième siècle de l'hégire.

À l'oasis de Béni Ounif, c'est l'exploitation de sources artésiennes qui a permis le développement d'une agriculture oasisienne. Le choix d'augmenter l'exploitation des ressources souterraines très peu renouvelables a été retenu malgré les risques liés à l'accroissement des coûts et de la salinité. L'oasis de Béni Ounif est un jardin de palmiers, de variétés très diverses, concentrés autour de source artésienne (aïn) [des eaux qui émergent (sortent) de la terre sans

l'intervention de l'homme]. Les eaux souterraines représentent l'unique ressource d'approvisionnement d'eau pour l'oasis de Béni Ounif (Mansour H, Bekhedda B, 1998).

B.2. Ressources En Eau De L'oasis

a) Eau de surface

Le réseau hydrographique consiste en des oueds à écoulement intermittent, secs la plupart du temps sauf en automne et en hiver, pendant lesquels ils évacuent les eaux de crues.

Le principal veine de la nappe de l'oasis de Béni Ounif c'est l'oued Zouzfana, qui est le grand collecteur d'une vaste région montagneuse prend naissance au sein du Atlas saharien ou la pluviosité étant encore suffisante, dont les eaux viennent se réunir dans la région de Figuig-Béni Ounif. Il s'enfonce alors dans le Sahara jusqu'à Igli, là où il se fusionne avec oued Guir pour former oued Saoura. En plus d'oued Nemous, d'oued Melias, et d'oued Sidi Abdelkader.

b) Nappes souterraines de Béni Ounif

Les eaux souterraines constituent la principale ressource hydrologique de l'oasis, généralement, les forages et les principaux ouvrages captent la nappe de L'Albien (Crétacé inférieur), ce sont des grès, dont la qualité est excellente, la nappe de l'inféro-flux d'oued Zouzfana, qui est à l'origine des sources artésiennes et l'eau des puits traditionnels.

B.3. Foggaras de Béni Ounif

Le système d'irrigation de Béni Ounif dispose des foggaras alimentées en eau la palmeraie, ces foggaras sont approvisionnées par une seule source qui assure l'irrigation. Son débit varie beaucoup en fonction de la saison et de la pluviométrie. Chacune d'entre les foggaras (aujourd'hui, au niveau de Béni Ounif, il existe 02 foggaras réhabilitées par la DHW de Bechar) se termine par un bassin d'accumulation d'où partent les seguias principales. À l'entrée du bassin, l'eau est partagée par un réseau gravitaire (seguia ou mesref) en unités de mesure (appelées kharrouba) qui correspondent à 45 mn de débit de source. Le bassin doit accumuler l'eau pour en réguler le débit, rationaliser et contrôler le cycle d'irrigation (celui-ci varie de 3 jours en été à 15 jours en hiver). Le deuxième canal transporte l'eau de la sortie du bassin à l'entrée des parcelles, il se ramifie autant de fois qu'il est nécessaire pour desservir tous les jardins.

Ce système d'irrigation vieux de plusieurs siècles permet d'acheminer l'eau de la nappe phréatique, vers la surface.

Les rôles exacts que les foggaras jouent dans l'irrigation à l'intérieur de l'oasis sont mal connus. La pluparts des palmiers ne survit aujourd'hui que grâce à une irrigation par puits.



Photo B.3 : Le débouché à la sortie de la foggara de Béni Ounif (2008).

Le débouché de la foggara est une partie découverte qui se trouve à quelques mètres en amont du bassin d'accumulation. Il est souvent aménagé de façon à ce que les habitants puissent récupérer l'eau et abreuver le bétail.

B.3.1. Réhabilitation des foggaras

L'eau devient de plus en plus rare. Les raisons sont multiples: sécheresse, augmentation des besoins, pompage abusif des nappes au-delà de la capacité du milieu. La pénurie des ressources hydrauliques est ainsi un enjeu majeur pour les espaces oasiens qui connaissent un déséquilibre entre l'accroissement de la population et les ressources en raison de l'absence d'un ajustement entre la capacité du milieu et le peuplement.

La direction de l'hydraulique de la wilaya de Béchar lança un programme ciblant l'entretien, le curage et la réhabilitation de foggaras des oasis de Béni Abbès et Béni Ounif, et le bétonnage des seguias en terre qui restent dans les oasis (plus de 800 ml pour des canaux de deux foggaras de Béni Ounif, et plus de 1200 ml de seguias étaient réhabilitées en 2008 selon le service d'hydro-agricole de la direction d'hydraulique de Béchar). D'après les résultats des deux dernières campagnes de jaugeages de débits des foggaras effectuées durant les années 1996 et 2008, le débit global des deux foggaras réhabilitées a subi une réduction importante, il diminue de 21 l/s en 1996 à 10 l/s en 2008 soit une réduction du débit de 11 (l/s) qui représente 52 % de 1996.



Photo B.4: Les travaux de réhabilitation des foggaras de Béni Ounif (2008).

La direction d'hydraulique en collaboration avec les autorités locales utilise tous les moyens pour améliorer les efforts fournis pour la restauration et la réhabilitation de ce système d'irrigation ancestral, lutté contre la sécheresse, et l'augmentation des besoins. Par la réhabilitation des seguias principales et le réseau souterrain avec le bétonnage des galeries drainantes des eaux de la source, le curage des seguias secondaires qui jaillissent l'eau vers les parcelles des irrigants. Après cet entretien et curage les autorités ne jamais interférées dans le processus de distribution et de gestion de l'eau de foggara, il reste toujours le rôle coutumier de Jmaa locale des irrigants.

B.3.2. Seguia (Souagui pour plusieurs)

Le rôle des canaux d'irrigation dans le développement soutenable des territoires se pose de façon particulièrement aiguë dans les pays méditerranéens du Sud, en particulier pour la phoeniculture développée dans les oasis (Battesti V, 2005).

La seguia est le moyen utilisé pour distribuer l'eau dès sa sortie de la foggara ou de puits, elle est artificielle, donc construite par l'homme.



Photo B.5 : Réhabilitation des seguias de l'oasis de Béni Ounif (2008).

Dans notre oasis comme toutes les oasis de la région, les seguias sont presque toutes bétonnées, qui étaient remplacées des seguias non bétonnées (creusées dans la terre). Les deux façons de faire ont chacune des conséquences, aussi positives que négatives. En effet, la seguia bétonnée conduit les eaux jusqu'au point cible, pratiquement sans aucune perte d'eau, et gagne le temps de Kharouba, alors que la seguia non bétonnée permet la dispersion d'une certaine quantité d'eau vers l'extérieur, donc le propriétaire verra que la quantité qu'il a demandé à diminuer. Ce qui est déconcertant, c'est que des arbres et des palmiers vivaient de ces eaux dites perdues, alors que maintenant avec le bétonnage, le profit se fait de moins en moins pour les plantes qui étaient sur le chemin des seguias.

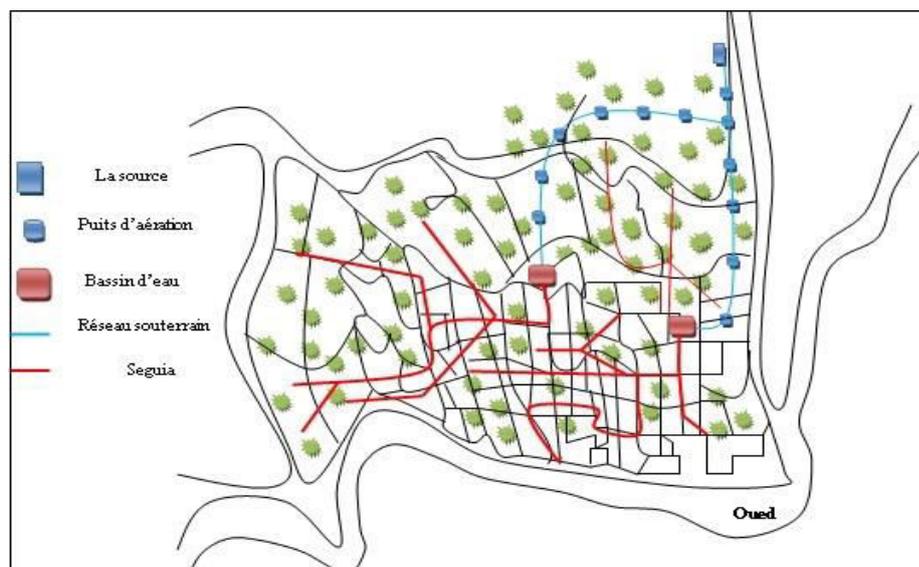


Figure B.2 : Carte des réseaux des eaux de l'oasis de Béni Ounif (Rezzoug C, 2014).

B.3.3. Kharrouba

Constitue la plus simple part d'eau, le temps de chaque kharrouba est de 45 min. L'instrument Kharrouba : est une montre dite hydraulique qui sert à mesurer le temps d'écoulement d'eau pour gérer les parts. Cet instrument est sous forme d'un récipient demi-sphérique en cuivre qui a un petit trou dans le fond. Pour commencer la mesure, on place le récipient sur une surface d'eau, au fur et à mesure il commence à se remplir à travers le trou jusqu'à son écoulement, et par conséquent, la fin d'une part et le commencement d'une autre.

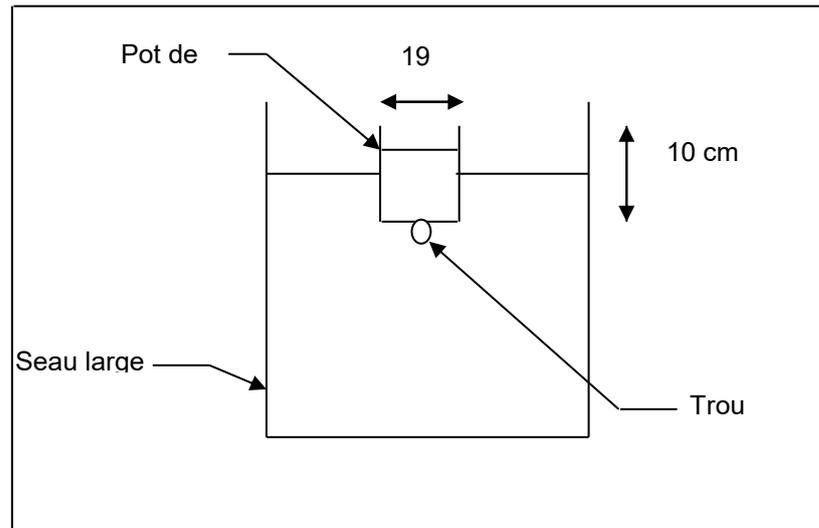


Figure B.3 : Kharrouba ou bien Kial.

Aujourd'hui pour gérer l'eau des foggaras les propriétaires utilisent d'autres méthodes de gestion d'eau c'est le stockage des eaux dans des bassins pour assurer le contrôle de gestion des parts d'eau par la personne et non pas à la Kharrouba.

B.4. Les Puits

Les puits constituent un système d'adduction individuelle, d'apparition relativement récente dans l'oasis. Ils exploitent les eaux froides et fortement salées d'une nappe phréatique superficielle. La majorité des puits est forée à une trentaine de mètres de profondeur et ils sont tous équipés de motopompes fonctionnant grâce à l'électricité ou au gasoil.

La forte salinité de l'eau des puits constitue un handicap pour la culture dans les secteurs concernés. Plusieurs agriculteurs se contentent aujourd'hui de la culture du palmier, la seule à supporter un taux aussi élevé de salinité.

B.5. Abandon De La Palmeraie

Actuellement, dans l'oasis de Béni Ounif et à cause de l'urbanisation, le nombre de parcelles non cultivées ne cesse d'augmenter. Seules quelques exploitations persistent grâce au pompage. Les palmiers ne sont plus entretenus avec une forte mortalité et le dépérissement prend de plus en plus de l'ampleur. La strate basse de l'oasis est complètement dégradée (il ne reste que quelques micro-parcelles de cultures céréalières – blé tendre, orge; et des parcelles encore plus petites de maraîchage). Seuls survivants de la crise hydrique, quelques palmiers-dattiers maintenus grâce à leurs systèmes racinaires puissants qui puisent profondément l'eau dans la nappe. Parmi les causes de l'abandon de l'oasis c'est la dégradation de la palmeraie à cause de plusieurs facteurs comme :

- La croissance démographique et l'urbanisation accrue.
- La destruction et endiguement des foggaras seulement deux étaient réhabilitées.
- La surexploitation de la nappe par l'utilisation des systèmes modernes d'irrigation.
- Manque de main d'œuvre d'entretien qualifiée.
- L'abandon de la vocation agricole de la palmeraie a favorisé son déclin (disparition du système oasisien : 50 % de l'oasis).

C. L'OASIS DE BOUKAIS :

C.1. Introduction

Les 3 ksour (Lahmar, Boukais, Mougheul,) appelés respectivement ksour du Nord se situent à 50 Km au Nord du chef lieu de Béchar. Ces trois villages sont tous à vocation agro-pastorale, l'élevage de la chèvre et des vaches est prédominant. Leurs ressources sont uniquement agricoles, l'existence de points d'eau permanents permet d'entretenir des jardins fertiles dont les produits sont destinés à une consommation locale. Boukais est la plus importante commune et la plus peuplée, Boukais est connue par ses vestiges touristiques, palmeraie et son Ksar très ancien avec une architecture arabo-musulmane. Boukais est très visitée grâce à son saint patron Sid Hadj Ali.

Les ksour du Nord situées dans une région montagneuse, elles sont entourées d'une chaîne de montagnes à savoir :

- Djebel Antar 1953m
- Djebel Grouz 1835m

Les limites de la commune de Boukais :

- Au Nord Est par la commune Mougheul
- Au Nord et Ouest par le Maroc.
- À l'Est par la commune de Lahmar.
- Au sud par la commune de Kenadsa.

Irrigué par la source « aïn » de Sid El Hadj (21 l/s au mois d'avril 2013), Boukais offre un bon exemple de petite palmeraie, et possédant plusieurs étages de végétation.

C.2. Présentation De L'oasis De Boukais

Le village de Boukais est une oasis de 1237 habitants (APC de Boukais 2015), elle occupe une superficie de 1760 km², entourée par des massifs montagneux, riche en palmiers; dont l'agriculture constitue l'une de la plus importante ressource des habitants (la palmeraie est de 35 hectares et l'oasis cultivée 7 hectares). L'oasis de Boukais, dont le ksar et sa palmeraie constituent le noyau d'évolution urbanistique du village, et recèlent un riche patrimoine architectural ayant résisté aux aléas du temps et se distinguent par l'attachement de la population locale à ses traditions ancestrales.

La commune de Boukais est située dans le Nord Est de la ville de Béchar, d'une distance près de cinquante kilomètre. Sa situation géographique près des oueds et palmeraie et son climat frais lui avait permis d'être l'un des pôles touristique les plus importants dans la région Sud-Ouest.



Figure C.1 : Localisation de l'oasis de Boukais.

C.3. Type De Source D'eau

L'oasis de Boukais bénéficie d'une quantité d'eau assez importante grâce à l'utilisation de la seule source exploitée quelque soit pour l'irrigation ou bien pour la consommation de population. La seule source d'eau de Boukais est celle dite artésienne de l'aquifère du Turonien (la source de Sid Alhadj Ali), la moyenne du débit de la source de Sid Alhadj Ali variant entre 15 et 21 l/s. le débit de la source est plus ou moins régulier et constant, bien que diminuant lors des sécheresses prolongées ; il s'agit d'une source d'émergence : l'eau jaillit du fond d'un puits, fermé de façon précaire, expliquée techniquement comme étant une eau souterraine soumise à une pression suffisante pour que celle-ci la fasse monter au-dessus du fond d'une fissure ou ouverture dans la formation imperméable située au-dessus de la formation aquifère. Ce qui veut dire en tout simplicité ; des eaux qui émergent de la terre sans l'intervention de l'homme. En récapitulation, l'eau de cette source assure un rôle vital pour l'agglomérat et pour la palmeraie. Toutefois, la gestion de cette eau n'est nullement souple. Le mode d'irrigation pratiqué dans l'oasis est celui de la submersion par gravité.

C.4. Le Partage et le Droit A L'eau :

Boukais connaît une technique d'irrigation ancestrale fondée le long des siècles par les usagers et dont les soubassements techniques et institutionnels se sont maintenus jusqu'à présent en témoignant d'une haute efficacité, constitué d'un ensemble de règles réellement mises en pratique par un ensemble d'individus pour organiser des activités de gestion et de mobilisation des eaux d'irrigation.

Le système hydraulique dit "traditionnel" est basé principalement sur l'irrigation. Le volume des eaux régularisées par la source constitue une attention certaine et indéniable par les habitants du ksar. En plus des règles généralement admises et acceptées de la Shari'a relatives au droit d'eau (propriété, droit de la soif, droit d'irrigation), les coutumes locales ont établi des règles, strictement respectées, relatives à la propriété, la vente, la location, la surveillance et la juridiction. Le partage de l'eau est sous forme de parts de droits d'eau correspondant à la participation de chaque individu aux frais de construction ou d'entretien : d'un bassin, d'un canal d'amené (segua principale) des eaux de source, d'un canal de dérivation (segua secondaire)... etc. Les droits d'eau collectifs (un partage collectif), sont aujourd'hui morcelés, plus inégalement répartis, et les règles de distributions de l'eau plus compliquées qui ont obligé certains agriculteurs à abandonner l'irrigation de leurs parcelles faute de droits d'eau suffisants ou du fait d'un tour d'eau trop espacé dans le temps.

C.4.1. Le rôle des seguias

Les seguias sont des ouvrages destinées à l'irrigation des terres par les eaux superficielles, se composant d'une prise sur la source, de canaux de distribution et de ramifications secondaires au niveau des parcelles cultivées. Elle est artificielle, donc construite par l'homme. Pour l'oasis de Boukais on trouve plus de 18000 ml de segua, presque 8000 ml sont bétonnées.



Photo C.1 : Système de segouia de partage de l'eau Boukais (2014).

Les usagers travaillent en coordination pour curer, entretenir et réhabiliter les seguias principales et mesrefs (des canaux creusés d'un degré inférieur captent l'eau des seguias). Tous les irrigants doivent participer soit directement soit indirectement en se faisant représenter par une autre personne qu'ils paient aux travaux d'entretien. Les travaux peuvent se faire collectivement pour certains canaux et individuellement pour d'autres, les participants munis d'une pelle et d'un panier pour ramasser les déblais. Pour la répartition des eaux d'irrigation au niveau de chaque mesref est assurée par un homme désigné par les propriétaires bénéficiés de ce mesref. La topographie du site qui contrôle la disposition du réseau. Les seguias et mesrefs nécessitent une pente minimale assez considérable (0,3% en moyenne).

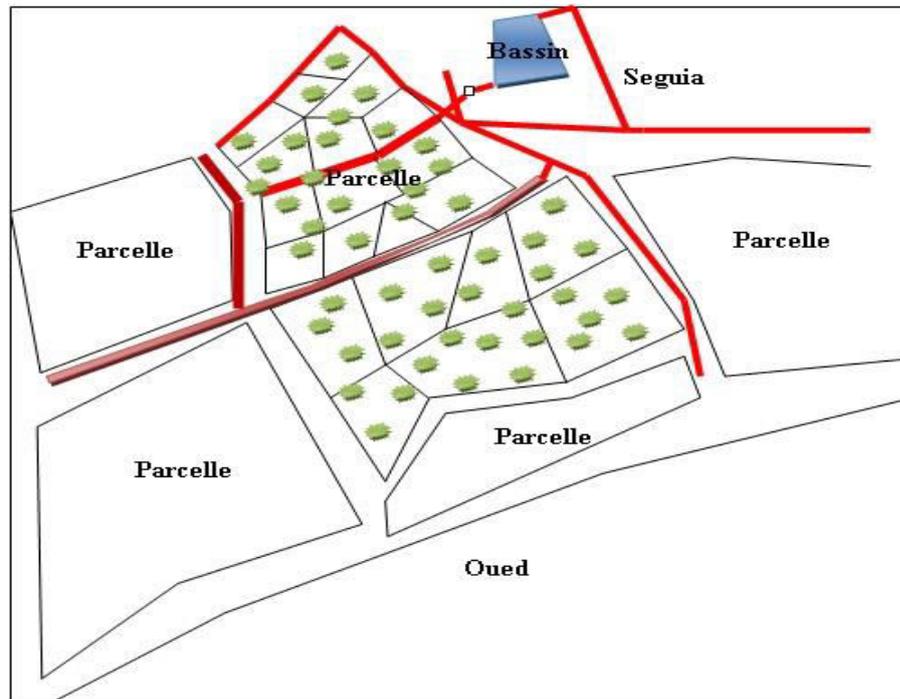


Figure C.2: schéma du Majen et seguia de partage oasis de Boukais.

C.4.2. Kharrouba et le partage des eaux

Le mode de distribution de l'eau dépend de sa disponibilité au niveau de la source. Dans les cas de l'abondance de l'eau surtout en hiver, elle est répartie entre les parcelles sans tour d'eau particulier. Le premier agriculteur arrivé irrigue ses parcelles et laisse ensuite passer l'eau au suivant qui l'attend. Cependant, dans les autres situations, un tour d'eau est appliqué par semaine et consiste à un partage en nombre de jour et nuit.

C.4.3. Le bassin de stockage : El bassane « Majen »

C'est un bassin en béton armé pour stocker les eaux d'amenées de la source, Il est sous forme d'une piscine. Le bassin situé dans la palmeraie de Boukais a une superficie qui atteint jusqu'à 450 m² avec une hauteur qui peut dépasser 1.40 mètre. Le bassin contient une règle (bâton) graduée pour mesurer les kharroubas par les doigts (Bekhedda R, 2008).



Photo C.4 : Bassin d'accumulation des eaux de l'oasis de Boukais « Majen » (2014).

Le grand bassin de Boukais est percé à sa base par un trou terminé avec une vanne de 200 mm pour fermer chaque soir, cela ouvre au lever du jour, pour le début d'un nouveau tour d'eau. Durant le partage d'une durée de 24 heures, l'objectif de l'existence d'un Majen, c'est que le propriétaire n'a pas besoin d'irriguer son jnan la nuit, il peut stocker sa quantité d'eau nocturne pour irriguer la journée qui suit (Bekhedda R, 2008).

C.4.4. Le principe de partage de l'eau

Contrairement à l'ordre de priorité de classement des familles, dans le partage de l'eau, qui est constant. La quantité d'eau des parts n'est stable et dépend de :

- L'héritage de l'eau.
- Contribution dans l'entretien et la maintenance de la source et les seguias.
- Relation et action commerciales.
- Le système d'irrigation pour le cas du ksar de Boukais a été basé sur deux volés :
 - 1- Irrigation dépend de l'eau qui s'écoule directement de la source, et son partage a été défini par des parts dictées par l'horloge solaire comme suit :
 - 2- L'irrigation dépend de l'eau stockée, pendant la nuit, dans le bassin « majen », et son partage a été défini par des dictées sur règle graduée :

C.5. Les Forages

La création des forages (tableau C.5) a donc été inévitable pour maintenir l'alimentation en eau des extensions privées hors la palmeraie centrale de Boukais, Parce que la palmeraie centrale de l'oasis reste toujours tributaire de la source artésienne. Or, ces forages sont équipés avec un système de pompage. Le coût beaucoup plus élevé de l'exhaure a rendu indispensable la mise en place du système d'économie de la ressource et de valorisation accrue. Celle-ci est passée par la

modernisation du système d'irrigation, notamment par l'étanchéisation du réseau. Aujourd'hui, les eaux de forages sont de plus en plus sollicitées et ce pour différents usages : domestique et industriel.

Tableau C.5 : Nombre de forages au niveau de Boukais. (DHW Bechar 2012)

Commune	Lieu_dit	Désignation	Type
BOUKAIS	BOUKAIS	BOUKAIS 1	FORAGE
BOUKAIS	BOUKAIS	BOUKAIS 2	FORAGE
BOUKAIS	BOUKAIS F1	Boukais F1	FORAGE
BOUKAIS	BOUKAIS F3	Boukais F3	FORAGE
BOUKAIS	BOUKAIS F4	Boukais F4	FORAGE
BOUKAIS	BOUKAIS F5	Boukais F5	FORAGE
BOUKAIS	BOUKAIS SECTEUR II	Boukais Secteur II	FORAGE
BOUKAIS	BOUKAIS SONAREM	Boukais Sonarem	FORAGE

D. L'OASIS DE TAGHIT

D.1. Introduction

À 93 Km au Sud-Est de Béchar et à 1000 km au Sud d'Alger, Taghit se trouve sur l'ancienne route qui relie l'Algérie au Niger par le Tanezrouft (figure D.1). Elle est composée de cinq petite

palmeraies ; Zaouïa Fougania, Taghit, Barrebi, Bakhti et Zaouïa Tahtania. Taghit est une des plus belles oasis du Sahara, véritable nid de verdure à la lisière du Grand Erg Occidental.

Au niveau de la Saoura, les oasis souffrent presque des mêmes problèmes, la surexploitation des nappes, la salinisation des sols et des eaux, la parcellisation des jardins à cause de l'héritage (plus de 80% des parcelles ne dépassent pas 1 Ha) et l'abandonnement des terres par leurs propriétaires et ils sont certainement ce que souffre l'oasis qui nous intéressent dans ce travail.

L'un des sujets qui touche au domaine de l'environnement est sans aucun doute les systèmes traditionnels de captage et de partage des eaux dans l'oasis [1]. Pendant des siècles, les paysans de Taghit exploitent les eaux souterraines du Grand Erg Occidental et l'inféoflux d'oued Zousfana pour fournir leurs besoins fondamentaux de l'eau et de la nourriture d'une manière indiquant leur intelligence et d'expérience héritée depuis des générations. Cependant, l'intervention des techniques modernes d'irrigation trop irrationnelle conduit à un déséquilibre significatif dans l'oasis, qui a fait souffrir pour des générations et est encore dépliée ses conséquences jour après jour.



Figure D.1: Localisation de Taghit

D.2. MATERIEL ET METHODES

D.2.1 Le vieux ksar de Taghit

Au-dessous du Grand Erg Occidental, le ksar de Taghit est relié avec la palmeraie par un système de seguia et galeries souterraines jaillissent les eaux des sources vers les jardins de la palmeraie traditionnelle (figure D.2). Aujourd'hui le ksar de Taghit (figure D.3) souffre de plusieurs problèmes: chaque tentative de restauration a échoué en raison d'un manque d'expertise et d'une mauvaise planification, manque de main-d'œuvre qualifiée, l'assèchement de la plupart des sources qui alimentent le ksar, Prédominance du tissu urbain moderne au détriment du vieux ksar et la dégradation et la faiblesse du rendement financier de la population.



Figure D.2: L'oasis de Taghit (image Google Earth 2017)



Figure D.3 : Ksar de Taghit (Rezzoug C. 2017).

D.2.2 Faune et flore de Taghit

Les chiffres découverts par la conservation des forêts de Béchar donnent en chiffres 1500 ovins (la race D'man), 200 caprins, 200 ânes et une trentaine de chevaux. Dans chaque foyer, on élève des poules, des pigeons, et de rares lapins. Les nomades, utilisant les terrains de parcours, possèdent, en plus aux chèvres et moutons, des dromadaires.

D.2.3 Palmeraie de Taghit

En raison de la disponibilité de l'eau, les majens et les seguias, ainsi que la condensation des palmiers, des arbres fruitiers et la clôture des parcelles, l'oasis et les paysans sont bénéficiaire de la création d'un microclimat plus frais, qu'il peut soulager les rigueurs de la chaleur du désert. La palmeraie de Taghit a une superficie de 180Ha à partir de Zaouia Fougania jusqu'à ZaouiaTahtania avec plus de 100 000 pieds de palmiers (figure D.4), seulement 45 000 pieds sont productifs et plus de 4600 arbres fruitiers. Il y a 500 fellahs sur tout le territoire agricole de Taghit.



Figure D.4: La palmeraie de Taghit.

D.2.4 Sources d'eau de Taghit

Les oasiens exploitaient les eaux de la nappe du Grand Erg Occidental par 45 sources dont 22 sources sont aujourd'hui fonctionnelles, les fellahs jaillissent ces eaux par un ensemble de galeries souterraines appelées foggaras de sources (figure D.5). Ils utilisent les eaux de la nappe d'inféro-flux d'oued Zousfana à travers des puits traditionnels (d'une hauteur qui ne dépasse pas 15 m) équipés actuellement par des motopompes. Mais l'apport des procédés modernes de

captage des eaux (forages et motopompes), les techniques ancestrales d'irrigation se dégradent d'une année à l'autre et leur avenir est menacé [2].



Figure D.5: Puits d'aération d'une foggara à l'oasis de Taghit.

D.3. RESULTAS ET DISCUSSION

D.3.1 Foggara de source

La foggara est une conduite souterraine qui jaillisse les eaux de la nappe jusqu'à la surface par gravité. À travers une série de foggaras souterraines, les oasisiens de Taghit exploitent les eaux des sources artésiennes pour irriguer la palmeraie et pour assurer l'eau de consommation de la population des différentes agglomérations de Taghit par simple gravité. A la sortie de chaque foggara se trouve un canal principal à ciel ouvert terminée par un bassin d'accumulation appelé localement majen (figure D.6), puis ils sont distribués les eaux accumulées à travers d'un réseau hiérarchie de canaux (seguias) secondaires conduit l'eau vers les jardins des propriétaires (figure 7), qui ont participé à la création de ces foggaras que ça soit par leur argent ou par leurs efforts physiques. Le processus de la division et de distribution de l'eau au sein de l'oasis sont soumis à un ensemble complexe de coutumes et traditions en fonction de l'effort de chaque personne dans la réalisation et la restauration des foggaras. A taghit, il y a plus de 70 bassins d'accumulation. Ce qui explique le problème de l'individualisme et causant de lourdes pertes à l'oasis de Taghit.



Figure D.6: Anciens bassins d'accumulation des eaux du ksar et de palmeraie.

Tels que l'ancienne architecture du ksar, le système de la foggara fait partie du patrimoine culturel et physique de l'oasis difficile à ignorer et gaspiller.

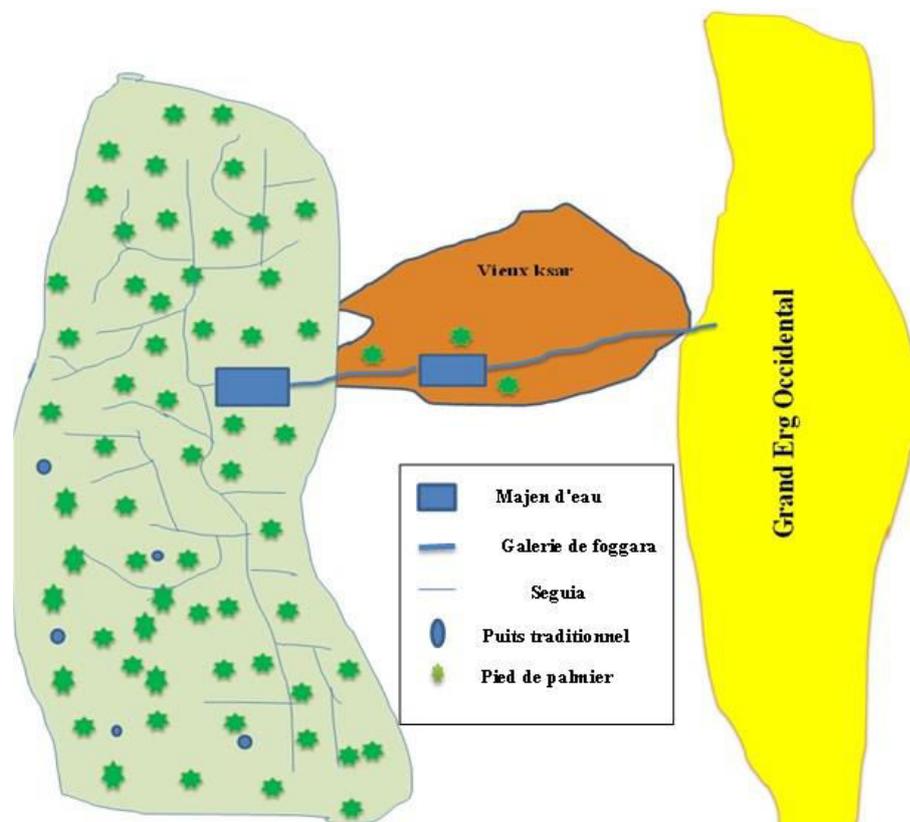


Figure D.7: Schéma de l'ensemble source, foggara, puits, bassin et seguia d'une foggara de Taghit.

À l'oasis de Taghit et ces palmeraies y a 25 foggaras de source (tableau D.1), seulement 5 sont opérationnelles jusqu'à maintenant.

Tableau D.1. Nombre et état des foggaras des palmeraies de Taghit.

Palmeraie	Nombre de foggaras	Longueur totale (m)	Débit (l/s)	Etat de foggara
Zaouia fougania	3	2140	3.33	Débit symbolique
Taghit	4	5300	3.2	Non opérationnelles
Barrebi	9	1260	3.7	4 opérationnelles
Bakhti	6	1970	2.8	Non opérationnelles
Zaouïa Tahtania	3	400	3.33	1 opérationnelle

D.3.2 Puits traditionnels

À Taghit, il y a plus de 300 puits traditionnels d'une hauteur allant de 3 m à 15 m et d'un diamètre de 2 m de moyenne. La plupart de ces puits sont protégés avec des buses en béton ou en pierres (figure D.8). Ils obtiennent les eaux de la nappe d'inféro-flux d'oued Zousfana dont la majorité sont équipés de motopompes qui contribuent au tarissement de la nappe. Généralement, les puits traditionnels sont des propriétés privées, chaque propriétaire a la liberté d'arrosage leur champ quand il veut.



Figure D.8 : Puits traditionnel de la palmeraie de Taghit.

D.3.3 Problèmes de foggara de Taghit

Pendant des siècles, l'oasis a maintenu ses spécificités sociale, culturelle et religieuse. Elle a réussi à conserver leurs coutumes et traditions, et restent encore occupantes d'une place

importante dans la vie de la population. Cependant, elle se tenait impuissante devant la conquête anarchique des techniques modernes d'irrigation, qui ont eu un impact profond sur la destruction de la palmeraie, la nappe et tout le système de gestion sociale et traditionnel des parts d'eau.

L'oasis souffre aujourd'hui de plusieurs problèmes, les plus importants sont le manque d'eau que ce soit pour la palmeraie ou pour l'alimentation en eau potable de la population suite au tarissement remarquable des nappes d'eau. Ainsi que le manque de main-d'œuvre qualifiée pour réhabiliter les foggaras et ses canaux, dégradation des systèmes de captage et de partage des eaux telle que les canaux d'irrigation et les bassins d'accumulation ainsi que les foggaras de captage (figure D.9). L'abandonnement des parcelles à cause de divisions des jardins par l'héritage, le vieillissement des pieds de palmiers, l'immigration de la jeunesse vers des secteurs plus rentables que l'agriculture à l'intérieur de la palmeraie.



Figure D.9: Dégradation des canaux d'irrigation dans la palmeraie de Taghit.

D.3.4 Problème de la salinité dans l'oasis de Taghit

Aujourd'hui, l'obstacle le plus important pour le développement de l'agriculture dans l'oasis de Taghit est le manque d'eau d'irrigation et le taux élevé de salinité de l'eau, qui a forcé la plupart des paysans à cultiver la nouvelle plaine d'Elouina et demander à l'Etat de construire une digue pour fournir de l'eau à leurs cultures.

Pour étudier l'impact de l'utilisation irrationnelle des pompes sur la salinité du sol de l'oasis, on se concentre principalement sur les analyses physicochimiques menées dans l'oasis pendant deux périodes différentes, la première en 2008 et la deuxième en 2015 réalisées par les services de l'ANRH de Bechar (Agence Nationale des Ressources en Eau de Bechar) [4].

Tableau D.2 : Evolution physico-chimique des eaux des palmeraies de Taghit.

Année	Zone	Type	PH	cd ms/cm	RS mg/l	Ca ⁺² mg/l	Mg ⁺² mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻² mg/l	TH °F	TAC °F
Période de 2008	TAGHIT	puits	7.62	0.72	440	75	19	37	12.8	70	140	26	8
	ZAOUIA	Forage	7.52	1.41	870	88	49	130	5.5	221	280	42	10
	FOGANIA												
	ZAOUIA	Forage	7.12	0.79	530	70	44	34	12.8	80	150	35	13
	TAHTANIA												
	BAKHTI	Forage	7.08	0.71	490	79	27	23	9.5	47	160	31	11
ZAOUIA	puits	6.9	1.48	920	101	49	90	14	203	190	45	13	
TAHTANIA													
Période de 2015	TAGHIT	puits	7.65	1.14	740	111	27	50	16.1	87	170	36	10
	ZAOUIA	Forage	7.58	1.6	1028	121	72	184	6.9	290	401	58	11.3
	FOGANIA												
	ZAOUIA	Forage	7.01	1.54	680	85	62	43	13.6	120	210	43	24
	TAHTANIA												
	BAKHTI	Forage	7.14	1.02	645	102	43	35	12.6	66	231	54	20
ZAOUIA	puits	7.1	1.59	1030	123	45	102	22	257	265	59	17	
TAHTANIA													

En comparaison des résultats des analyses de l'année 2015 par rapport à celles de 2008, on remarque une augmentation alarmante des concentrations en sel des eaux souterraines des différentes palmeraies. Les causes principales de ce saut sont la surexploitation des nappes d'eau par les motopompes, l'abandonnement des terres à l'intérieur de la palmeraie, le manque d'entretien des jardins, l'exploitation des eaux usées domestiques dans l'irrigation.

D.4. Conclusion

Pendant des siècles, Les Paysans de Taghit pouvaient maintenir le milieu fragile dans une région aride et hostile par la consommation rationnelle de l'eau qui est la cause principale de la création de l'oasis et son environnement, par l'exploitation de cette source avec des techniques traditionnelles par une gestion collective de captage et de partage de l'eau. Mais l'intervention des motopompes et individualisme a provoqué la perturbation de ce milieu. Les autorités locales à travers leur quête pour préserver la survie de la population dans leurs zones, en travaillant pour faire revivre les anciennes techniques de la gestion rationnelle de l'eau grâce à des règles modernes en tenant compte de la superficie plantée pour chaque personne. La chose la plus importante a été faite dans la plupart des palmeraies, est le creusement d'un seul forage et la construction d'un seul bassin avec une distribution collective. Aujourd'hui, il est nécessaire qu'on travaille sur la restauration des moyens et des systèmes traditionnels d'irrigation et de sensibiliser les paysans de leur importance pour maintenir la source d'eau rare pour la survie de l'oasis.

E. L'OASIS DE OUAKDA :

E.1. Introduction

L'oasis d'ouakda se situe à 7 Km au Nord-Est de la ville de Béchar avec une population de 7053 habitants (APC Béchar 2011). Elle se trouve à la périphérie d'oued Béchar et est caractérisée d'un climat aride à tendance saharienne. Elle est limitée au Nord par les massifs septentrionaux (Djebel Antar 1960 m) et Djebel Horriet (1461 m), et la hamada d'Oum Sbaâ, au Sud par la ville de Béchar, à l'Est par Djebel Béchar (1500 m), et au Nord Ouest par les Ksour du Nord.

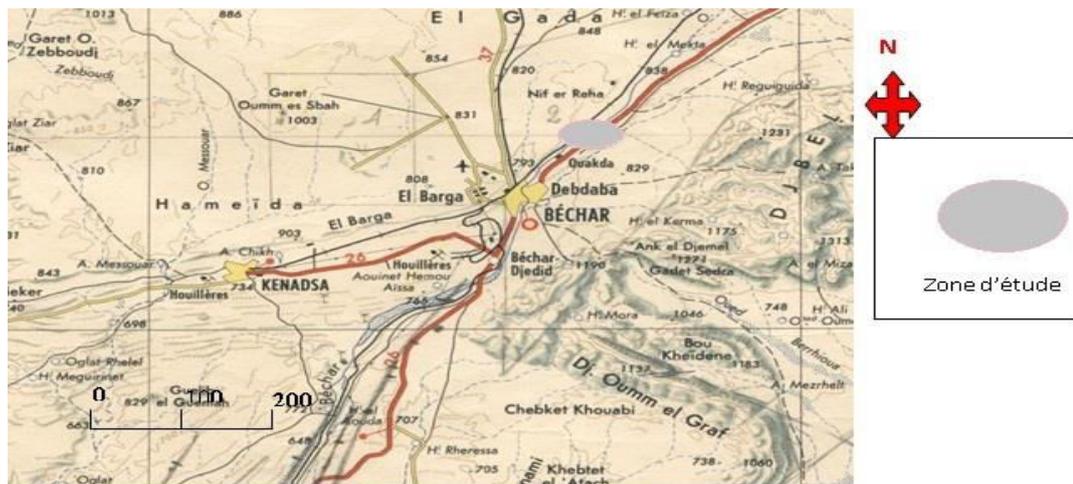


Figure E.1 : Situation géographique de l'oasis d'Ouakda.



Photo E.2 : L'oasis d'Ouakda après sa dégradation (2013).

Face aux risques naturels et anthropiques, pénible sur la ressource d'eau, les oasisiens d'Ouakda ont élaboré des systèmes d'irrigation et des règlementations de gestion, qui ont assuré la survie

de leur écosystème oasien. De nos jours, ces systèmes hydro-agricoles traditionnels connaissent des difficultés de gestion et d'entretien en raison de leur ancienneté mais aussi du fait des transformations socio-économiques et des perturbations engendrées par la politique hydro-agricole moderne.

E.2. Les Ressources D'eau D'irrigation :

Les ressources hydriques au niveau de l'oasis sont représentées par :

a) Eaux de surface

Digue d'Ouakda : située au Nord Est de la ville de Béchar, elle a été construite en 1993 pour exploiter les eaux d'oued Béchar dans l'irrigation de la plaine d'ouakda. Sa capacité est de 400.000 m³ (Kabour A, Mekkaoui A, 2011).

b) Eaux souterraines

1- Nappe turonienne d'Ouakda : Cet aquifère est le plus important dans la région de Béchar, représente par Les calcaires du turonien qui s'étalent et affleure sur tout le bassin de Béchar-Kenadsa. Géographiquement, elle est délimité au Nord par l'occident sud atlasique, au Sud par la falaise Turonienne, à l'Est par Djebel Béchar et à l'Ouest par Tinerhir. En plus à l'Ouest, le bassin de Béchar se raccorde au bassin d'errachidia- boudnib situé au territoire marocain.

2- Aquifère des alluvions et des calcaires lacustres du turonien : Les formations quaternaires alluvionnaires affleurent sur une grande étendue, sont en relation directe avec l'oued Bechar et ces effluents, ces affleurements reposent sur un substratum constitué par des marnes gypsifères et salifères du Sénonien.

c) Eaux d'assainissement de l'oasis

Les rejets d'eaux usées sans épuration d'une population de plus de 7000 habitants, les eaux usées urbaines collectés sont déversés sans épuration dans le niveau le plus bas de la palmeraie et puis dans l'oued Béchar (DHWB, 2009).

E.3. Situation Actuel de L'oasis

La palmeraie centrale d'Ouakda au-dessous du ksar à proximité d'oued Béchar, sur une superficie de 30 Ha en deux gradins donne l'impression d'un paysage uniforme lié à l'exceptionnelle densité des palmiers dattiers. La palmeraie est exploitée par les paysans à travers des micro-parcelles (Jnan) d'une superficie qui ne dépasse pas 1 Ha, ils s'appuient sur les eaux souterraines

exploitées par des foggaras. Ces jardins sont entourés par des murs en pisé et en feuilles de palmier, leurs hauteur ne dépassent pas les deux mètres afin de déterminer la propriété et de préserver l'intimité de chaque famille. La plupart des familles passent leur temps de la journée à l'intérieur du jnan.

La palmeraie d'Ouakda est aujourd'hui en déclin et en voie de dégradation prononcée, avec perte de surface, et maladie du Bayoud. Ses productions sont de mauvaise qualité, avec un niveau de commercialisation très faible. Une dizaine de propriétaires sont encore actifs au sein de cette palmeraie, déclin qui a fait "sortir" les paysans de l'oasis pour chercher en amont (dans la plaine d'Ouakda à proximité de la route Nationale N° : 06) des terres fertiles afin d'y développer des périmètres agricoles rentables.

E.4. L'irrigation Traditionnelle De L'oasis D'ouakda

Ouakda est une région de très longue tradition d'agriculture irriguée, tant à partir des eaux de surface que des eaux souterraines. En 1991, la superficie agricole totale de la plaine d'Ouakda était, d'après la DSA de la wilaya de Béchar de 200 Ha repartis de part et d'autre de l'oued Béchar (Nif Er Reha et Ouakda), et en 2007 la superficie agricole de la plaine d'Ouakda est de 281 Ha (Daoudi T, 2014). Aujourd'hui cette surface dépasse les 350 Ha, cette extension alourdit les besoins en eau d'irrigation (augmentation de l'exploitation des eaux souterraines (Daoudi T, 2014).



Figure E.3 : Distribution des puits de foggaras -l'oasis d'Ouakda (2011).

L'irrigation traditionnelle de l'oasis d'Ouakda était composée généralement de petites foggaras familiales, qui sont des galeries ne dépassent pas les 200 m. Cet art traditionnel était perturbé depuis les années quatre vingt (1980) par des forages qui ne cessent de se multiplier, l'oasis d'Ouakda, a connu le début d'une régression très importante du couvert végétal surtout au niveau de la palmeraie.

En 1970, toutes les foggaras sont encore en service. L'abaissement de la nappe phréatique conjuguée au coût élevé de la construction et de l'entretien des foggaras (surtout la partie drainante) a conduit à une très nette diminution de leur nombre.

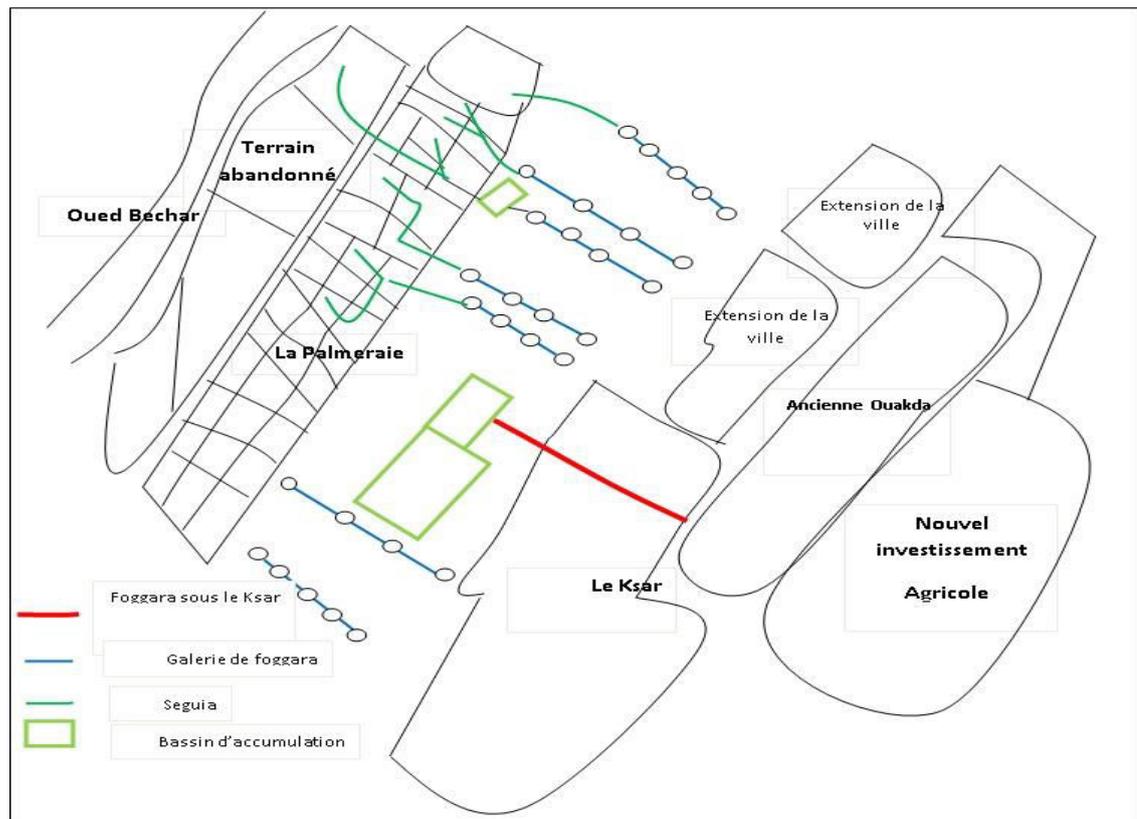


Figure E.4 : Distribution des puits de foggaras -l'oasis d'Ouakda.

Après les années soixante-dix les paysans ont développé des techniques de jaillissements pour assurer une gestion durable des ressources. Là où les oasisiens utilisent des nouveaux systèmes d'accumulation des eaux des foggaras comme les bassins d'accumulation d'eau de dimensions (10×8 m²) et les puits du chadouf pour augmenter le débit des foggaras (approfondir le premier puits de foggara).

L'oasis dissimulée sur ce vaste territoire survit grâce aux eaux des nappes phréatiques. Ces eaux souterraines profondes viennent occasionnellement à la surface, les résidents creusant des foggaras dans ces coteaux aquifères et développant des réseaux souterrains pour irriguer les

oasis. Cette méthode d'irrigation qui a donné de très bons résultats au niveau de la gestion des ressources en eau dans l'oasis. Les eaux issues des foggaras sont acheminées gravitairement par un réseau des conduites (canaux construit sous sol en argile avec des regards de visite chaque 06 ou 08 mètres) puis partagées entre les parcelles par un ensemble de canaux à ciel ouvert (les seguias) qui acheminent l'eau jusqu'à l'entrée des parcelles.

Les systèmes des foggaras connaissent des difficultés croissantes et finissent par disparaître. Les champs captant des galeries sont surexploités par des forages qui assèchent les sources souterraines. Les différentes crues qui ont frappé la région et plus particulièrement la crue de 2008 ont accéléré l'effondrement des foggaras.

E.5 Les Puits

L'importance de ces systèmes d'irrigation individuels (parfois collectifs) dans l'ensemble des parcelles de l'oasis était indéniablement restreinte, comparé à celles des autres systèmes.

E.6. Les Forages

Les infrastructures modernes (système de captage et de distribution de l'eau en particulier) sont coûteuses et nécessitent le recours à des moyens énormes. Le pompage motorisé est complètement généralisé dans l'oasis d'Ouakda.

L'effet conjugué de la vague de sécheresse et la surexploitation de la ressource, au moyen de motopompes à haut débit (environ 40 m³/heure) et de profondeur qui dépasse les 300 m, ont procuré aux maraîchers des quantités d'eau supérieures à leurs besoins, en dépit de l'augmentation sensible des surfaces cultivées, mais au prix de graves perturbations pour l'environnement hydrogéologie de l'oasis et en péril le développement des oasis notamment dans la région de la Saoura où la ressource est déjà rare. La multiplication anarchique des forages équipés par des pompes privées a été de plus en plus intense au cours des dernières années au moment où les apports d'eaux superficielles ont marqué un grand déficit.

Actuellement on dénombre plus de 80 puits et forages équipés de station de pompage (plus 120 puits et forages recensés par la DHW de Béchar).

Chapitre 4

SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES ET POTENTIEL ENERGETIQUE

4.1. INTRODUCTION

Actuellement, le pétrole constitue la source d'énergie mondiale la plus importante. En plus de son impact sur l'environnement; il devient de plus en plus cher. Cependant, la recherche d'autres sources d'énergies est orientée vers des sources propres, gratuites et inépuisables. C'est ce qu'on appelle les énergies renouvelables.

Les énergies dites renouvelables connues actuellement sont :

- Energie hydroélectrique
- Energie éolienne.
- Energie de Biomasse.
- Energie Géothermique.
- Energie solaire.

4.2. ENERGIE SOLAIRE :

4.2.1. Définition du rayonnement Solaire :

Le soleil est une source d'énergie inépuisable qui ne présente aucun inconvénient sur l'environnement. Néanmoins sa collecte et son stockage nécessitent un savoir-faire et des investissements importants.

L'énergie solaire est un rayonnement électromagnétique émis par le soleil. Aux limites extérieures de l'atmosphère (c'est-à-dire en amont), il est de 1353 W/m^2 valeur connue sous le nom de constante solaire. A fur et à mesure qu'il traverse l'atmosphère terrestre, l'énergie se perd par l'intermédiaire des quatre mécanismes suivant (figure 4.1) :

- Absorption de la lumière par les divers gaz constituants ;
- Diffusion par leurs molécule ;
- Absorption et diffusion par les aérosols et les poussières ;
- Transmission à travers la couche atmosphérique.

Au moment où il atteint la surface de la terre, le rayonnement solaire aura perdu une grande partie de son intensité.

La quantité annuelle du rayonnement solaire reçue à la surface de la terre atteint environ $4,5 \cdot 10^{11} \text{ GW-h}$. Ce qui représente l'équivalent de plus de 10000 fois la consommation énergétique mondiale. A titre d'exemple, l'Algérie reçoit annuellement une énergie de l'ordre de $13,5 \cdot 10^8 \text{ GW-h}$ tandis que la consommation mondiale se chiffre à $36 \cdot 10^6 \text{ GW-h}$.

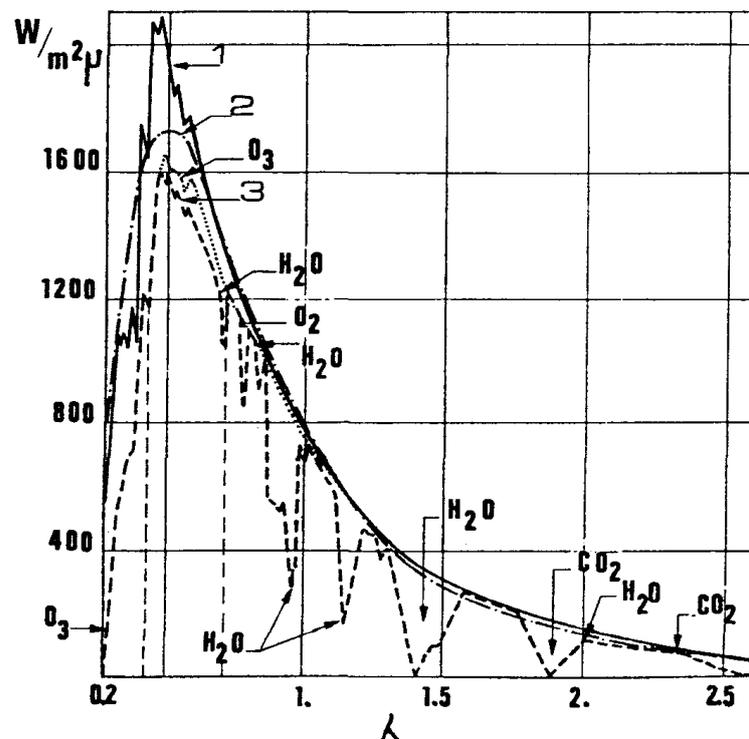
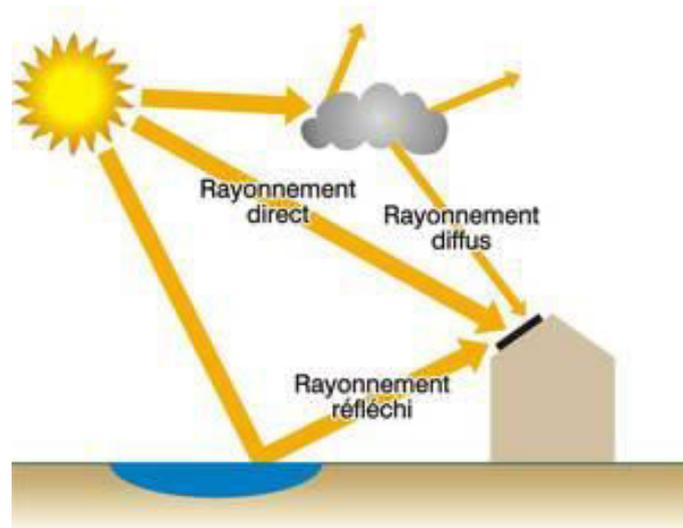


Figure 4.1 : Spectre solaire hors atmosphère et au sol.

4.2.2. Composantes du rayonnement solaire :

Au niveau du sol, l'ensoleillement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales (figure 4.2) : les trois composantes du rayonnement incident sont:



Figuer4.2: les trois composantes du rayonnement incident.

- le rayonnement direct,
- le rayonnement diffus,
- l'albedo, ou réfléchi.

4.2.2.1. Le rayonnement direct :

C'est l'éclairement énergétique reçu par une surface réceptrice normale aux rayons solaires. C'est le rayonnement provenant directement du disque solaire en temps de ciel clair. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

Pour un plan faisant un angle quelconque avec la direction du soleil, il faut tenir compte de l'effet cosinus.

4.2.2.2. Le rayonnement diffus :

C'est l'éclairement énergétique provenant de toute la voute céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil. Pour une inclinaison quelconque, il faut tenir compte de la proportion du ciel qui est vue par le plan considéré.

4.2.2.3. l'Albédo au sol :

C'est la part du rayonnement solaire réfléchi par le sol. Il dépend directement de la nature du sol (neige, prairie, terre, sable, ...etc).

Le rayonnement réfléchi par le sol n'est évidemment à prendre en compte qu'en dehors du cas particulier du plan horizontal. A titre d'exemple, le tableau 4.1 montre quelques valeurs d'Albedo

Tableau 4.1 : Albédo de quelques matériaux

Matériau	Albédo
- Neige	
(neuve)	0.82
molle	0.65
- sable (fin)	0.37
- de rivière	0.43
- jaune	0.35
Bois	0.22
Aluminium	0.85
Fer galvanisé	0.35

4.2.2.4. Le Rayonnement Global :

Un plan reçoit donc de la part du soleil un flux global qui résulte de la superposition des trois composantes directe, diffuse et albédo.

La valeur de ce flux global sur une surface varie notablement selon sa position et son orientation. Il peut être mesuré par un pyranomètre.

4.2.3. Paramètres influants sur le rayonnement solaire :

Le calcul du rayonnement solaire nécessite la connaissance de quelques données telles que :

4.2.3.1. Angle horaire :

Est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui passant par la direction du soleil. Si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich (figure 4.3); l'angle a une valeur comprise entre 0 et 360° compté à partir de midi. Soit:

$$AH = \frac{1}{15}(TSV - 12) \quad (4.1)$$

Où : AH : est donné en degrés

TSV : étant le temps solaire vrai donné en heure quand AH = 0

Le soleil est au sud, il est midi solaire = 12h TSV.

4.2.3.2. Déclinaison :

Est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial (figure 4.3). Elle varie au cours de l'année, en atteignant ses deux valeurs extrêmes : -23° 27' au solstice d'hiver ; +23° 27' au solstice d'été. Elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne.

On calcule sa valeur à toute époque de l'année par la formule approximative.

$$\delta = 23.45^\circ + \sin \left[\frac{360}{365(284 + N_j)} \right] \quad (4.2)$$

Où : N_j : numéro du jour dans l'année.

4.2.3.3. Hauteur du soleil au-dessus de l'horizon :

Est l'angle formé par le plan fondamental et la direction du soleil (figure 4.3a). On appelle ainsi distance zénithale $Z = 90 - h$.

Elle est donnée par la relation suivante

$$\sin(h) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(AH) \quad (4.3)$$

Où : L : est la latitude du lieu, qui se détermine par l'angle que ferait la direction passant par le centre de la terre et ce lieu et le plan équatorial.

δ : est la déclinaison

AH : est l'angle horaire

h : est la hauteur du soleil

1.2.3.4. Azimut :

C'est l'angle formé par le plan méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil perpendiculaire au plan fondamental (figure 4.3b).

L'azimut du soleil s'écrit /1/

$$\sin(aZ) = \cos(\delta) \frac{\sin(AH)}{\cos(h)} \quad (4.4)$$

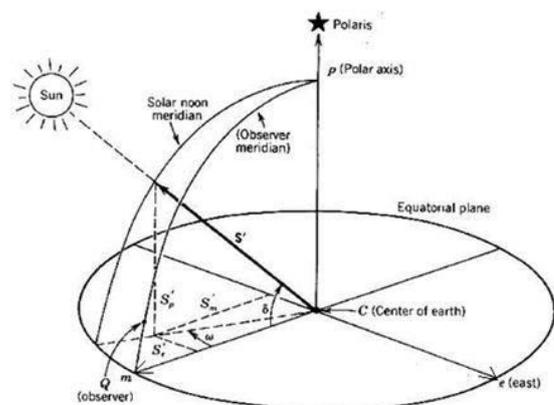
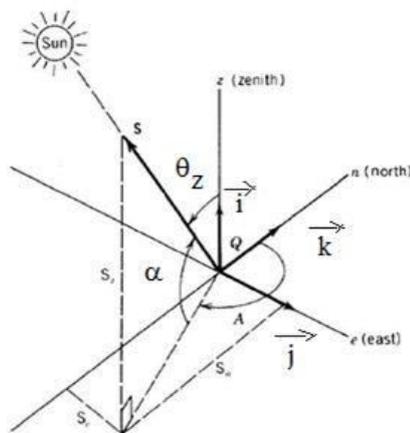


Figure 4.3 : a) coordonnées horizontales

b) coordonnées horaires

4.2.3.5. Temps solaire vrai TSV :

On calcule le temps solaire vraie (TSV) par la formule suivante:

$$TSV = 12 - \frac{AH}{15} \quad (4.5)$$

4.2.3.6. Durée astronomique du jour DA :

Au lever et au coucher, la hauteur du soleil est nulle $h = 0$. Donc :

$$AH = \text{arcCos}[-\text{tg}(\delta)\text{tg}(L)] \quad (4.6)$$

Ce qui donne :

$$AH_{\text{levée}} - AH_{\text{couchée}} = TSV_{\text{levée}} - TSV_{\text{couchée}} = DA \quad (4.7)$$

$$DA = TSV_{\text{couchée}} - TSV_{\text{levée}} \quad (4.8)$$

4.3. LA CONVERSION DE L'ENERGIE SOLAIRE :

4.3.1. Le solaire thermique :

Le solaire thermique utilise le soleil tout comme le photovoltaïque mais de façon différente. Un panneau solaire thermique a pour but de transmettre la chaleur émise par le soleil à un circuit d'eau secondaire. Les rayons du soleil traversent la vitre, à l'intérieur une plaque absorbante qui a pour but de capter les rayons infrarouges. Derrière cette plaque qui est tant chaude, passe un circuit d'eau qui récupère cette chaleur. Par la suite, ce circuit alimente un circuit secondaire qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire au en chauffage. La circulation de l'eau peut se faire par simple phénomène physique, l'eau chaude est moins dense que l'eau froid.

Le solaire thermique est le moyen le plus répandu d'utiliser l'énergie solaire. L'échelle des températures obtenues avec des capteurs-plans correspond à la température de l'eau chaude utilisée dans les habitations. Un certain nombre de pays disposent d'un bon ensoleillement ont depuis longtemps développé cette technique à l'échelle de série.

Les installations les plus nombreuses se trouvent au Japon où leur nombre dépasse 2 millions et demi. L'Inde compte aujourd'hui plus de 150.000 chauffe-eaux solaires. Dans l'état de Floride au U.S.A., plus de 25.000 installations sont en service.

4.3.2. Le solaire photovoltaïque :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839. Mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après-guerre, ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille, mais il faudra attendre la crise énergétique des années soixante-dix (70) pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

4.3.3. Principe de fonctionnement :

4.3.3.1. La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

a) Photopile :

L'irradiation globale peut enfin être mesurée de façon très élégante par une photopile au silicium cristallin, chargée sur une faible résistance, de valeur telle que la photopile travaille au voisinage de son point de court – circuit. C'est à dire, dans la partie de la caractéristique où le courant est exactement proportionnel à l'irradiation. Les cellules de référence sont calibrées avec soin auprès de laboratoires agréés. Des simulateurs solaires de classe A permettent de calibrer des étalons secondaires.

b) Le semi-conducteur :

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du « band gap » en électronvolt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 eV à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin (C-Si) et 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si).

Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons particules de lumière en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule.

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie du band gap vont libérer un électron négatif, laissant un « trou » positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges

électriques de signes opposés(positive et négative) et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique E, de part et d'autre de la cellule.

c) Accumulation de l'énergie PV :

Le stockage a pour but de mettre en réserve une certaine quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Il est caractérisé par :

- sa nature (forme d'énergie stockée),
- sa capacité (quantité d'énergie stockée, directement liée à la notion de durée du stockage si on rapporte cette énergie stockée à l'énergie moyenne consommée),
- le rendement de stockage (rapport de l'énergie cédée à l'énergie introduite).

Il y a plusieurs forme de stockage :

- électrochimique comme les batteries d'accumulation,
- indirecte (par utilisation d'installation ayant pour rôle de stocker de l'énergie sous forme utilisable tels que l'eau, la glace, l'air comprimé).
- réseau électrique (ce type de stockage est utilisé lorsque les besoins en été et en hiver sont disproportionnés; en outre il est utilisé pour des centrales de très fortes puissances).

Le stockage par accumulateurs est le système le plus communément utilisé.

Les deux principaux types d'accumulateurs utilisables actuellement sont:

- Les accumulateurs au plomb,
- les accumulateurs au cadmium-nickel (accumulateurs à électrolyte alcalin).

4.4. Les Systèmes photovoltaïques

La conversion photovoltaïque est le seul moyen connu de convertir directement la lumière en énergie électrique.

Les cellules photovoltaïques ou photopiles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Le matériau de base est le silicium.

4.4.1. Modules photovoltaïques

Le module PV est l'élément commercial principal du marché photovoltaïque. Un module PV est classé en fonction de la puissance fournie dans des conditions normalisées d'essai. Ces conditions sont de 1 kW/m^2 de rayonnement solaire et une température des cellules PV de 25°C .

La puissance mesurée dans ces conditions est appelée capacité nominale et est exprimée en watts-crête (Wc).

Les modules PV sont intégrés à des systèmes conçus pour des applications précises. Les composants ajoutés aux modules constituent les «infrastructures connexes» et peuvent être classifiés dans les quatre catégories suivantes :

- Batterie d'accumulateurs : éléments de stockage qui emmagasine sous forme chimique l'énergie produite par les modules PV, pour la restituer sous forme électrique selon les besoins (la nuit ou lors de jours couverts) ;
- Onduleur : dispositif électrique utilisé pour convertir en courant alternatif(CA) ;le courant électrique continu(CC) produit par les modules PV ;
- Contrôleur : dispositif électrique qui gère le stockage de l'énergie dans les accumulateur et la distribution vers la charge(contrôle la charge et la décharge des accumulateurs) ;
- Structure portante : supporte requis pour monter ou installer les modules PV et les autres composants du système.

Selon le type d'application, certaines infrastructures connexes d'un système PV ne sont pas nécessaires. Par exemple, un onduleur n'est pas utile s'il n'y a pas de charge en courant alternatif(CA).Pour les applications en réseau, les batteries d'accumulateurs ne sont plus nécessaires puisque le réseau peut agir comme élément de stockage, en absorbant les surplus d'électricité.

De même, elles ne sont généralement pas utilisées pour des applications de pompage de l'eau ou le stockage de l'énergie peut se faire sous la forme d'une simple réserve d'eau accumulée pendant les heures d'ensoleillement. Par contre certains systèmes requièrent d'autres

infrastructures connexes particulières. Par exemple, les systèmes autonomes peuvent inclure une génératrice diesel ; et un système de pompage PV comprend une pompe CC ou CA.

Il existe essentiellement deux technologies de fabrication de modules photovoltaïques : la production de cellules issues de plaques de silicium cristallin et les modules obtenus directement par des procédés en couches minces. Dans le premier cas, des tranches de silicium monocristallin, de silicium poly cristallin ou de silicium en ruban sont utilisées pour produire des cellules solaires dans des chaînes de production utilisant des procédés et machines propres à l'industrie des semi-conducteurs au silicium. La première grande utilisation du PV ayant été la charge de batteries d'accumulateurs, la plupart des modules sur le marché sont conçus pour fournir un courant continu(CC) d'un peu plus de 12 volts(V). Un module PV se compose donc généralement d'un circuit de 36 cellules en série, encapsulées dans un laminage de verre et plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique. Les modules en silicium cristallin courantes ont un rendement de conversion (énergie électrique produit Vs. Energie solaire incidente) de l'ordre de 11 à 15%.

4.4.2. Batteries d'accumulateurs

Si un système hors réseau doit fournir de l'énergie à la demande et non seulement lorsqu'il y a du soleil, des batteries d'accumulateurs sont requises pour stocker l'énergie. L'accumulateur d'usages le plus courant est du type plomb-acide et comprend deux catégories. les accumulateurs plomb-calcium et les accumulateurs plomb-antimoine. Les accumulateurs nickel-cadmium peuvent aussi être utilisés, plus particulièrement s'ils doivent subir des écarts importants de température. A cause de la nature variable de radiations solaire, les accumulateurs doivent pouvoir résister sans dommage à de nombreux cycles de charge et de décharge. La profondeur de décharge auquel un accumulateur peut être soumis dépend de son type. Ainsi, les accumulateurs plomb-calcium sont utilisés pour des applications où la décharge est inférieure à 20% par cycle (décharge faible). Les accumulateurs nickel-cadmium et quelques types d'accumulateurs plomb-antimoine, peuvent être utilisés pour des applications où la charge pourrait excéder 80% (décharge profonde).

Selon les conditions du site et la présence d'une génératrice d'appoint, les batteries d'accumulateurs sont dimensionnées pour permettre une période d'autonomie du système de quelque jours à quelques semaines. Les batteries sont caractérisées par leur tension, qui pour la plupart des applications est un multiple de 12 V, et leur capacité exprimée en ampère-heure (Ah).

4.4.3. Conditionneurs de l'énergie :

Le matériel de conditionnement de l'énergie électrique peut se définir comme tout circuit qui modifie l'énergie provenant des modules PV pour la rendre compatible avec les caractéristiques de courant et de tension de la charge. Ce matériel peut inclure le régulateur de recharge de batteries qui régularise les cycles de recharge et de décharge des batteries d'accumulateurs. Ou encore l'optimiseur de puissance fournie qui maintient la tension des modules PV à la tension de puissance maximale.

L'onduleur convertit la courant de sortie (CC) des modules PV ou des batteries d'accumulateurs en courant alternatif (CA). Le courant CA est utilisé par la plupart des appareils et moteurs électriques.

Il est aussi le type d'énergie utilisé par les réseaux électriques et par conséquent, tout système PV qui y est connecté doit ainsi utiliser ce type d'équipement ;

Redresseur, chargeur de batteries – convertit en courant CC, le courant CA produit par une génératrice pour recharger des batteries d'accumulateurs.

4.4.4. Pompes solaire :

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. La première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules. La pompe sans batterie, plus communément appelée « pompe au fil du soleil », utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu' au moment de son utilisation.

La pompe avec batterie assure une autonomie parfaite. Elle permet de s'affranchir des aléas du soleil (absence d'ensoleillement, nuage, vent de sable ...etc.) et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

Lorsque le débit de pompage est conditionné par la demande par un pompage régulier durant toute la journée, l'utilisation d'un réservoir de stockage pour l'eau sera nécessaire afin de pouvoir fournir à la demande d'eau.

Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie. Le stockage se fait de manière hydraulique. L'eau étant pompée lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement dans un réservoir au dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au moment de besoins nocturne ou d'absence d'ensoleillement. Les réservoirs peuvent souvent être construits localement et la capacité de stockage peut varier d'un jour à plusieurs jours.

4.4.4.1. Types de pompe :

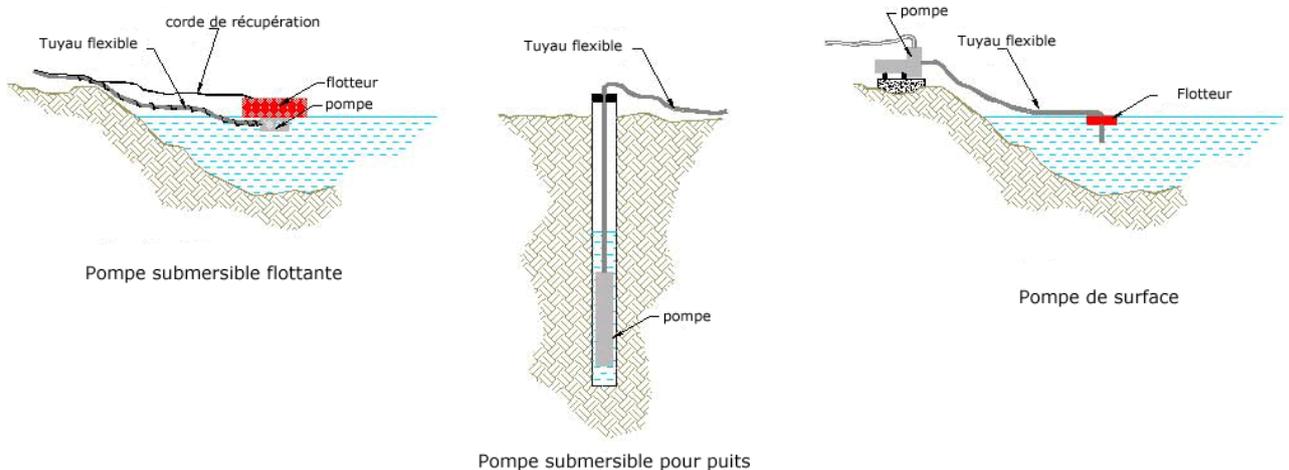


Figure 4.4 : Types de pompes solaires.

On trouve une grande variété de pompes à énergie solaire. Si la réserve d'eau est un étang-réservoir, on peut y installer une pompe flottante. Dans les puits, on utilise souvent une pompe centrifuge submersible. Dans les étangs-réservoirs, les ruisseaux et les puits peu profonds, on peut employer une pompe de surface centrifuge à amorçage automatique ou une pompe volumétrique.

4.4.4.2. La pompe volumétrique

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

Les pompes volumétriques incluent les pompes à vis, les pompes à palettes, les pompes à piston et les pompes à diaphragme. Les deux derniers types sont utilisés dans les puits ou les forages profonds (plus de 100 mètres).

L'entraînement est habituellement assuré par un arbre de transmission très long, à partir d'un moteur électrique monté en surface.

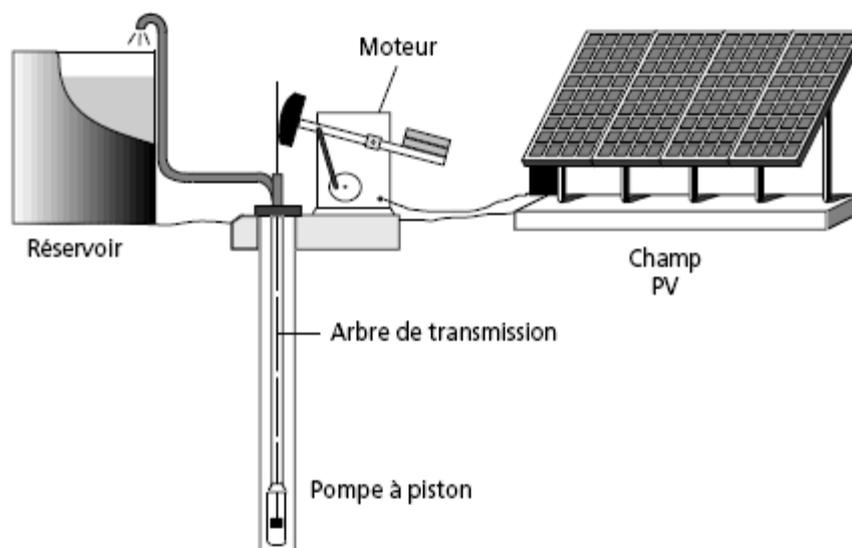


Figure 4.5 : Pompe à piston (*Jack pump*) : pour de grandes profondeurs et de petits débits d'eau.

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes multi-pales.

4.4.4.3. La pompe centrifuge :

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force dite centrifuge d'où l'appellation de ce

type de pompes. Afin d'augmenter la pression de refoulement, donc la hauteur de refoulement, plusieurs étages d'aubages peuvent être juxtaposés sur le même arbre de transmission. Chaque étage fait passer l'eau à l'étage suivant en relevant la pression jusqu'à l'étage final, délivrant un volume d'eau à pression élevée. Ces pompes incluent les pompes submersibles avec moteur de surface ou submergé, les pompes flottantes et les pompes rotatives à aspiration.

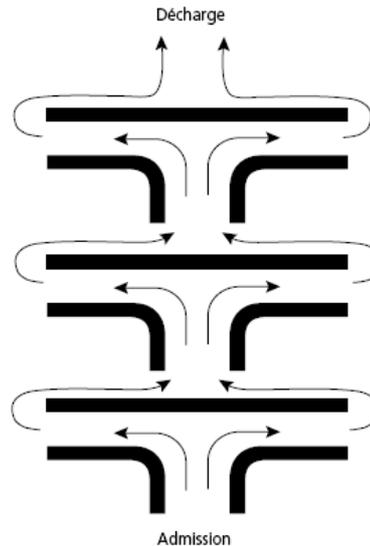


Figure 4.6 : Cheminement de l'écoulement dans une pompe centrifuge à étages multiples

La pompe centrifuge est conçue pour une HMT relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à Q , HMT, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres).

Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir un débit de départ non nul.

Le rendement de la pompe centrifuge est fonction du débit. Elle fonctionne de façon plus efficace à une certaine HMT et à une vitesse de rotation prédéterminée. Il est donc important de bien concevoir le dimensionnement de la pompe selon les conditions du site d'installation.

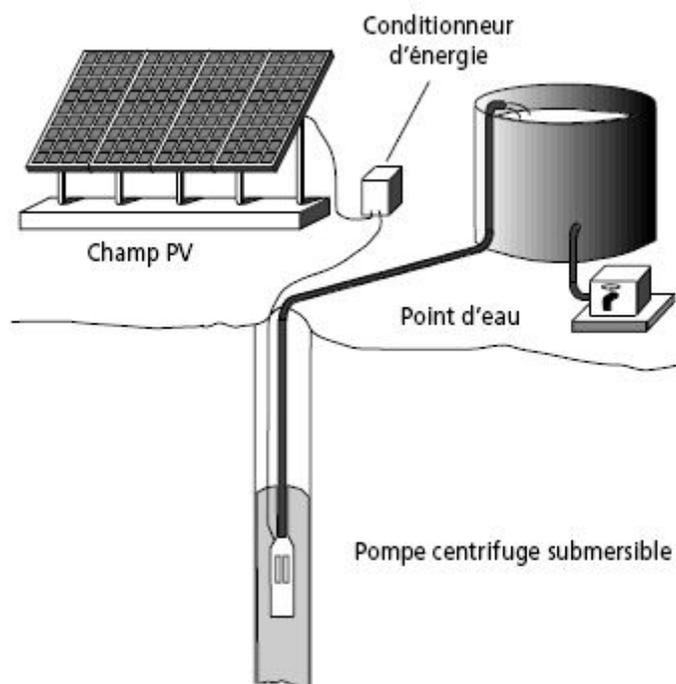


Figure 4.7 : Pompe submersible centrifuge à étages multiples

Les pompes centrifuges sont très utilisées pour les applications avec énergie photovoltaïque parce que le moteur peut fournir une vitesse de rotation rapide à peu près constante. De plus, ces pompes peuvent également s'adapter à de petits forages, ce qui permet de capter les nappes phréatiques profondes qui ont souvent un niveau d'eau dynamique entre 30 et 100 mètres.

4.4.4.4. Caractéristiques de la pompe centrifuge immergée :

Le corps de pompe est en acier inoxydable, les roues et les diffuseurs étant, soit en acier inoxydable, soit en matériau synthétique. Ces matériaux présentent une très bonne résistance à l'abrasion. Le corps d'aspiration est protégé par une crépine contre les grosses impuretés (> à 3 mm). Un clapet anti-retour est intégré à la tête de pompe, qui est taraudée pour le raccordement au tuyau de refoulement. La lubrification est assurée par l'eau pompée.

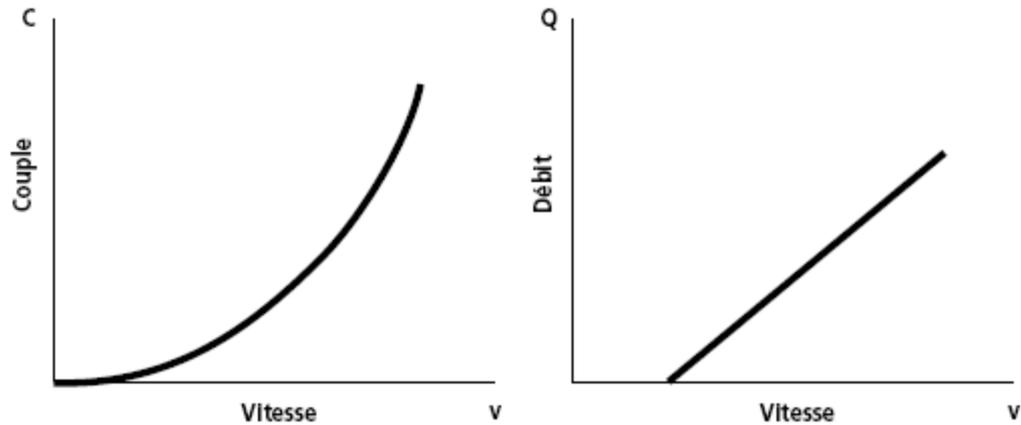


Figure 4.8 : a) Le couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse.

b) Le débit est proportionnel à la vitesse ; Toutefois, il faut une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir un débit.

- Le nombre d'étages est lié à la hauteur manométrique totale de refoulement.
- Le type d'aubage de chaque étage est lié à la puissance hydraulique à fournir pour la HMT nominale.
- Les rendements hydrauliques des pompes solaires sont élevés (utilisation de technologies de pointe). Ils sont de l'ordre de 55% à 60% au point de fonctionnement nominal.
- La durée de vie peut être estimée entre 5 et 7 ans (elle est liée surtout à la qualité de l'eau).
- L'entretien courant consiste au nettoyage des étages (boue, sable, déchets si la pompe est installée dans un puits). La fréquence de celui-ci dépend de la qualité de l'eau pompée.

1.4.4.5. Pompe centrifuge flottante :

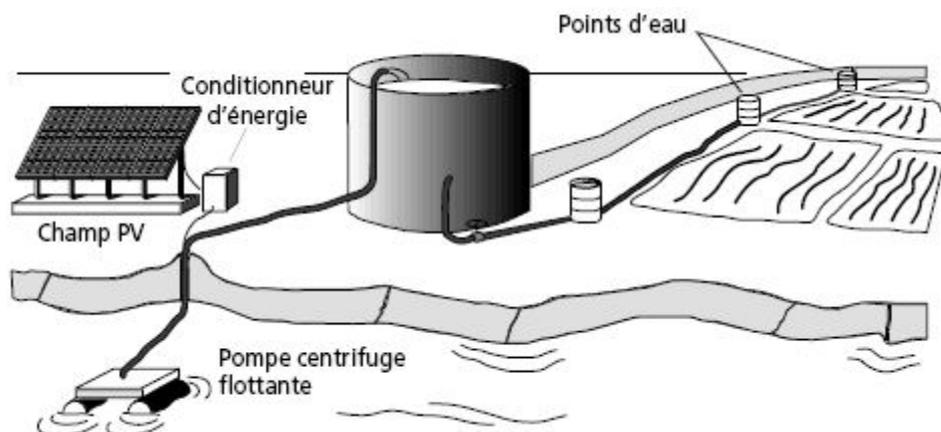


Figure 4.9: Pompe centrifuge flottante.

Les pompes centrifuges solaires sont aussi utilisées pour l'irrigation de petits maraîchages lorsque la HMT est faible, c'est-à-dire à partir d'un plan d'eau de surface, telle une rivière, et où la demande en eau est élevée.

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

4.4.5. Types de Moteurs :

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant. Toutefois, l'évolution de convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et, surtout, moins coûteux.

4.4.5.1. Moteur à courant alternatif

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

Les moteurs alternatifs asynchrones sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. Par exemple, les pompes sur réseau utilisent depuis longtemps ce type de moteur. De dimension compacte, il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. Depuis quelques années, l'arrivée d'onduleurs efficaces permettant un contrôle de la vitesse de ces moteurs a permis leur utilisation pour des applications de pompage solaire.

Le moteur alternatif pour le pompage solaire est habituellement de type asynchrone, triphasé et à rotor en court-circuit (rotor à cage). Celui-ci tourne autour de deux paliers lubrifiés par le liquide de refroidissement dont est rempli le moteur. Le stator est noyé dans une résine, qui lui assure une bonne tenue mécanique, une bonne dispersion calorifique et une étanchéité parfaite. Ces moteurs sont conçus pour être immergés et utilisés dans une eau d'une température maximale d'environ 35 °C. Ils doivent nécessairement être alimentés par un onduleur qui convertira le courant continu des modules PV en courant alternatif. Dans le cas d'un moteur bipolaire à un courant triphasé de fréquence f , la vitesse de rotation du moteur, dite vitesse de synchronisme, est de 2900 à 3 000 tr/mn (fréquence de 50 à 60 Hz).

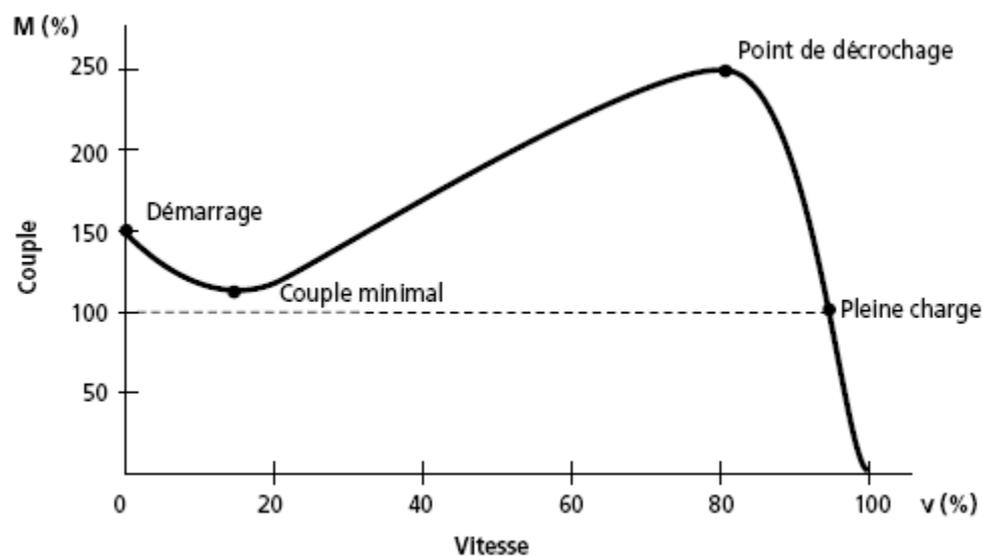


Figure 4.10 : Courbe du couple en fonction de la vitesse du moteur asynchrone bipolaire.

Au démarrage, le moteur développe un couple d'environ 150% du couple nominal. En pleine charge, la vitesse du moteur reste relativement constante pour une grande variation du couple. Si la charge mécanique excède 250%, le moteur s'arrêtera (point de décrochage). Les moteurs de petite puissance (<10kW) atteignent leur couple maximal (point de décrochage) à environ 80 % de la vitesse synchrone. La vitesse nominale est d'environ 4% de la vitesse synchrone (glissement de 4%).

Le rendement moyen d'un moteur asynchrone est de 85 %. À ceci il faut ajouter le rendement de l'onduleur qui est de 90%-95% sur une plage de fonctionnement importante. Le rendement moyen du moteur/onduleur sera donc de 80 % sur une plage de fonctionnement relativement importante.

De plus, ces onduleurs sont équipés pour suivre le point de puissance maximal du champ photovoltaïque permettant un pompage solaire au fil du soleil relativement efficace.

4.4.5.2. Couplage Générateur PV – Groupe de Pompage :

Parce qu'il est souvent plus économique de construire un réservoir pour stocker l'eau plutôt que de stocker l'électricité dans les batteries, le moteur d'une pompe solaire fonctionnera habituellement «au fil du soleil», c'est-à-dire qu'il sera couplé directement au générateur photovoltaïque, sans batterie.

Dans ce cas, il est important que la puissance fournie par le générateur PV soit utilisée le plus complètement possible au point de fonctionnement maximal du groupe motopompe sur la plage de fonctionnement la plus large possible. Le choix d'un régulateur ou d'un onduleur dépendra étroitement de ces caractéristiques.

L'emploi d'une batterie fixe le point de fonctionnement du groupe motopompe sur une plus petite plage de fonctionnement. Ainsi, la pompe fonctionne à couple constant, donc à rendement constant dans le cas d'une pompe volumétrique. Le démarrage d'une pompe centrifuge sera également plus efficace, la puissance de démarrage, plus élevée, pouvant être fournie dès le départ. Néanmoins, l'emploi d'une batterie ne rend pas inutile l'utilisation d'un régulateur de charge. Les caractéristiques de sortie de l'électricité fournies par la batterie sont plus homogènes, mais une adaptation à la charge variable d'une pompe sera nécessaire dans la plupart des cas.

4.4.5.3. Rendement du Groupe Motopompe – Générateur :

Généralement, le rendement d'un moteur à courant continu (CC) série est de 80% à 85% et celui d'un moteur à courant alternatif AC asynchrone est de 80%, sur une plage de fonctionnement importante.

Le rendement hydraulique des pompes solaires est de l'ordre de 45% à 60%, mais ce rendement décroît beaucoup hors du point de fonctionnement nominal et est particulièrement évident pour une pompe centrifuge.

Il est nécessaire de tenir compte de la variation de la HMT, donc de la désadaptation possible de la pompe, lors de la conception d'une installation. Notamment, une mauvaise

évaluation du calcul de la HMT lors de la conception pourrait entraîner le choix d'une pompe mal adaptée et ne pouvant fonctionner au point de fonctionnement maximal.

Le choix d'un adaptateur de puissance adéquat permet d'améliorer le rendement pour une certaine variation de la HMT mais n'ajuste pas le fonctionnement d'une pompe mal conçue. Les caractéristiques du site et de l'utilisation de l'eau devront donc être établies avec attention afin de bien choisir les composants de la pompe .

Dans de bonnes conditions d'utilisation, et pour un système bien conçu, on peut s'attendre à un rendement du groupe motopompe oscillant entre 35% et 45%.

4.5. DIMENSIONNEMENT D'UNE POMPE PHOTOVOLTAÏQUE :

Cette étape de situer les besoins en eau pour l'application en question et d'évaluer les conditions locales d'exploitation de la pompe. On effectue ensuite le dimensionnement des différents composants de la pompe solaire et le choix des caractéristiques de ces éléments pour l'application donnée.

4.5.1. Données de base :

Les données suivantes seront nécessaires de la pompe solaire (à usage domestique ou agricole) et ses composants. Ceci donne une définition des données utilisées en pompage en général et explique les particularités du pompage photovoltaïque.

4.5.1.1. Débit:

Le débit (Q) est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. En pompage, le débit est habituellement donné en litres par heure (m^3/h) ou gallons par heure (gph).

En pompage solaire, le débit (ou le besoin en eau) est souvent exprime en m^3 par jour. Il exprime la consommation moyenne journalière.

4.5.1.2. Hauteur manométrique totale :

La hauteur manométrique totale (**HMT**) d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur peut être calculée comme suit : **HMT = Hg + Pc**

Où Hg est la hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation (**Hr + Nd**).

Pc = pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Elles correspondent au plus à 10 % de la hauteur géométrique totale.

4.5.1.3. Niveau statique :

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

4.5.1.4. Niveau dynamique :

Le niveau dynamique (N_d) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen. La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement.

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

Chapitre 5

EXPERIMENTATION D'UNE POMPE SOLAIRE

5.1. INTRODUCTION :

En matière de ressources, la Saoura est connue pour être une région de grande potentialité hydraulique par la présence de la nappe du continental intercalaire dont le débit est estimé à une moyenne de 36 m³/s.

Sa situation géographique de pentes très modérées lui confère les caractéristiques suivantes :

- le climat est du type désertique continental.
- les précipitations sont très faibles en moyenne 17 mm/an
- les températures trop élevées en été et faibles en hivers avec des écarts considérables.
- l'évaporation est très élevée pendant toute l'année avec maximum en été jusqu'à 720 mm à Adrar et une moyenne mensuelle de 416 mm.
- Les vents sont très forts et varient de 1à6m/s et sont de prédominance des vents d'est et de Nord-Est. Ces caractéristiques imposent à la région une demande hydrique pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation supérieure aux moyennes conventionnelles.
- La durée d'ensoleillement journalière est importante 7 à 8 heures en hivers et 11à 12 heures en été avec un éclairement qui dépassent les 15 kW/m².

Cette dernière constitue donc une source d'énergie gratuite et renouvelable qui peut combler l'insuffisance du réseau électrique national marqué dans la région. En outre, le caractère agricole de la région d'Adrar connue par ses productions de tomates dans les zones isolées, incite à utiliser l'énergie solaire et en particulier le pompage photovoltaïque pour l'irrigation des palmeraies et des champs de tomates et les cultures potagères.

Cependant, la technologie associée à l'énergie solaire et renouvelable en général, nécessite une connaissance adéquate des modes de fonctionnement et d'utilisation des équipements solaires. Sans quoi, ces équipements, se trouvent confrontés à des problèmes techniques liés à une mauvaise utilisation ce qui rend leur utilisation inadéquate.

Dans le but d'une meilleure utilisation de ses pompes photovoltaïques largement utilisées dans le domaine d'irrigation agricole dans la région, nous essayons dans ce qui suit de caractériser ces équipements. Autrement dit, trouver les modes de fonctionnement des pompes photovoltaïques en fonction des données climatiques et les conditions d'utilisations locales.

La caractérisation des pompes ordinaires, consiste à tracer leurs courbes caractéristiques telles que $H = f(Q)$, $P = f(Q)$ et $\eta = f(Q)$ représentant ainsi la variation des paramètres géométriques et cinématiques. La multitude des paramètres de fonctionnement des pompes exige leur étude séparément. C'est à dire, étudier la variation de deux paramètres en se fixant les autres.

Le caractère aléatoire des paramètres de fonctionnement des pompes photovoltaïques rend leur étude délicate. Encore plus, lorsque ces paramètres ne peuvent être mesurés ou contrôlés. Les paramètres qui interviennent dans le fonctionnement de ces pompes sont l'éclairement, la hauteur de refoulement, le débit, le rendement

Le renforcement des foggaras par des systèmes de pompage solaire à travers la Saoura vise l'analyse et le diagnostic des différents paramètres nécessaires pour l'amélioration du système d'irrigation classique des ksour et la palmeraie d'oasis (FOGGARAS) de la wilaya, de plus la rentabilité économique du potentiel énergétique solaire mobilisable de la région pour vu de valoriser les travaux de recherches et développement dans ce domaine ainsi que la concrétisation du programme FRNDA destiné pour les région du sud.

La caractérisation hydrologique des ouvrages destinés pour le renforcement des foggaras sont (débit, profondeur, hauteur statique, hauteur dynamique ainsi que le débit développé par puits de renforcement, etc.)

La gamme de système de pompage solaire actuellement compétitive disponible sur le marché a déjà fait les preuves d'endurance et de bon fonctionnement sur le terrain (milieu saharien) est très large, à savoir elle est d'une puissance allant de 500 Wc jusqu'à une puissance de 5000 Wc installés.

La caractérisation de telles pompes passe donc par le tracé de leurs courbes caractéristiques ainsi que celle de la conduite de refoulement et rechercher ensuite le point de fonctionnement. Pour ce faire, on envisage de mener deux types d'essais sur deux prototypes de pompes photovoltaïques qui refoulement d'un même puits à une même hauteur géométrique.

5.2. CALCUL DE L'ENERGIE QUOTIDIENNE REQUISE :

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

5.2.1. Energie requise pour la pompe :

$E_{elec} = \text{Constante hydraulique} \times \text{le débit journalier} \times \text{HMT/Rendement du groupe Motopompe}$

$$E_{elec} = \frac{C_h \times Q(m^3) \times HMT(m)}{\eta_{MP}} \quad (5.1)$$

Où E_{elec} est habituellement exprimé en kW-h

$$C_h = \frac{9,81(m/s^2) \times 1000(kg/m^3)}{3600(s/h)} = 2,725 \text{ kg/m}^2$$

Où $g = \text{constante de la gravité } (9,81 \text{ m/s}^2)$

$\rho = \text{la densité de l'eau } (1000 \text{ kg/m}^3)$

$\eta_{MP} = \text{rendement des groupes motopompes de } 30\% \text{ à } 45\%, \text{ selon le type de pompe et de moteur.}$

5.2.2. Analyse des besoins et des conditions d'exploitation

L'analyse des besoins et des conditions d'exploitation permet de déterminer la puissance et le type de pompe choisie pour la situation donnée.

Cette étape permet d'estimer de manière pratique les paramètres qui déterminent le système de pompage. Nous nous limitons ici à fournir une méthode générale qui permet de

dimensionner approximativement les éléments d'une pompe afin de donner un ordre de grandeur de ces éléments et de comparer les coûts.

Il y a trois paramètres techniques qui délimitent l'évaluation d'une pompe solaire. Afin d'obtenir l'évaluation la plus exacte possible, il est essentiel que ces trois paramètres soient estimés le plus précisément possible.

Ces trois paramètres sont :

1. la quantité d'eau requise par jour,
2. la disponibilité de l'eau,
3. la ressource solaire.

Les ressources solaires peuvent être estimées assez facilement avec un faible degré d'erreur. Par contre, l'évaluation de la quantité d'eau requise et la disponibilité de l'eau sont parfois difficiles à estimer et varient souvent de saisons en saison et d'année en année. Les facteurs comme l'accroissement d'une population dans une localité et un niveau dynamique variable du puits ou du forage, selon le débit et les saisons, compliquent ce qui au premier abord peut paraître simple.

5.2.3. Estimation des besoins en eau :

La demande en eau est également primordiale dans les domaines de l'agriculture et de l'industrie s'il en existe.

5.3. DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE POMPAGE :

Puisque la pompe photovoltaïque nous a été imposée, il importe donc de faire le dimensionnement de la surface du champ photovoltaïque nécessaire à sa mise en marche. En d'autres termes, ceci impose à chercher le nombre de panneaux solaires et la taille des accessoires en fonction des données climatiques de la région d'Adrar.

Les méthodes de dimensionnement des systèmes photovoltaïques s'appuient sur deux méthodes à trois étapes successives. La première consiste à déterminer le nombre de module à

travers la puissance crête. Tandis que la deuxième, elle détermine la surface nécessaire du champ PV.

Les étapes sont les suivantes :

Etape 1 : Calculer l'énergie consommée par jour ($W-h/j$),

Etape 2 : Calculer l'énergie à produire en tenant compte des rendements de conversion ($W-h/j$).

Etape 3 : En divisant sur l'irradiation journalière et la puissance fournie par un module (1ère méthode) ou sur la surface d'un module (2ème méthode), on détermine la taille du champ PV.

5.3.1. Fiche de dimensionnement n°1 – Estimation de la charge

• Choisir ou définir la charge, c'est-à-dire déterminer la production journalière requise et la HMT.

– Débit (production journalière) (m³) : les besoins journaliers en eau pour l'irrigation.

Tableau 5.1 : Fiche de dimensionnement N°1.

Débit					
Irrigation					
Type	Surface		m ³ /jour		Total (m ³ /j)
- palmerais	1		58		
Total					58

HMT					
Niv. statique	Rabatt	Niv dynam	Haut. geom	Pert tuyau	HMT
Ns (m)	RS (m)	Nd (m)	Hg (m)	Pc (%)	(Hg+10%Hg)
8,30	0	8,3	8,3	10 %	9,13

Hg = Hr + Ha (hauteur géométrique).

Ha = Hr – Ns = 12,6 - 8,30 = 4,3 m

Ha : hauteur d'aspiration.

Hr : hauteur de refoulement.

Selon notre fiche de dimensionnement, pour ce banc d'essais à la commune d'Adrar le débit journalier requis sera de 58 m^3 par jour. La HMT de la station a été calculée à 9,13 m. On prend 15 mètres théoriquement. La pompe sera utilisée dans les limites de hauteur recommandées et les tuyaux auront un diamètre suffisant pour minimiser les pertes à la friction.

Dans ces conditions, nous avons choisi, pour notre cas, une pompe immergée avec un moteur CA. L'efficacité de la pompe choisie est de 40%, et l'efficacité du moteur CA, d'environ 80% au point de fonctionnement nominal. Le total de l'efficacité du groupe motopompe (R_p) sera donc de 32%.

$$E_{\text{elec}} = 2,725 \times \frac{58(\text{m}^3 / \text{j}) \times 15(\text{m})}{0,32} = 7408,59 \text{ Watt-heures} \quad (5.5)$$

Ainsi, la charge moyenne quotidienne est de 7408,59 wattheures (soit 7,40 kW-h). À 135 volts, ceci équivaut à 54,88 ampères-heures par jour.

5.3.2. Fiche de dimensionnement n°2 – Définition des conditions du site

- Recueillir les données sur le site.
- Recueillir les données sur l'ensoleillement mensuel moyen selon différentes inclinaisons du champ.
- Recueillir les données sur les moyennes mensuelles de température ambiante.

Par manque de disponibilité de données météorologiques du site étudié, nous avons jugé utile de prendre, sans grande erreur, les données spécifiques du site d'Adrar. D'autant plus que les deux sites ont la même latitude et presque la même longitude. Ces données sont disponibles sur le site du logiciel RETscreen.

Station météorologique la plus proche du projet	-	Adrar
Latitude du lieu du projet	N	27.9
Longitude	E	-2
Système de positionnement du champ PV	-	Fixe
Inclinaison du champ PV	°	28.0
Orientation du champ PV p/r à l'azimut	°	0.0

Tableau 5.2 : Données climatiques de la région d'Adrar.

Mois	Moyenne mensuelle du rayonnement quotidien sur l'horizontale (kWh/m²/j)	Température moyenne mensuelle (°C)	Moyenne du rayonnement quotidien sur le champ PV (kWh/m²/j)
janvier	4.42	12.4	6.27
février	5.22	16.0	6.64
mars	6.50	19.4	7.34
avril	7.22	23.6	7.22
mai	7.67	28.1	7.02
juin	8.14	33.6	7.12
juillet	8.03	36.0	7.16
août	7.56	35.4	7.28
septembre	6.50	31.6	6.95
octobre	5.36	25.0	6.50
novembre	4.42	18.2	6.02
décembre	3.83	12.9	5.50
			Annuel
Rayonnement solaire sur l'horizontale		MWh/m ²	2.28
Rayonnement solaire sur surface inclinée		MWh/m ²	2.46
Température moyenne		°C	24.4

Choisir le mois où l'ensoleillement maximal est le plus fort et les besoins en eau sont au maximum.

Ensoleillement = 8,14 heures ou 8,14 kWh/m².

5.3.3. Fiche de dimensionnement n°3 – Dimensionnement du champ PV

- Choisir l'inclinaison du champ.
- Estimer l'ensoleillement minimal pendant la période de fonctionnement.
- Déterminer l'efficacité approximative du champ.
- Estimer la capacité, en watts-crête, que doit avoir le champ.
- Déterminer la configuration du champ, réajuster selon les spécifications des modules.

Comme le système fonctionne en toute saison, on incline le champ à un angle égal à la latitude, soit 28°. En se reportant à la fiche n°2, on constate que le nombre moyen d'heures de soleil maximal pour cette inclinaison est 8,14 heures de soleil par jour. En supposant des pertes de 20 % attribuables à la température et à la poussière, la dimension théorique de celui-ci sera de :

$$W_c = \frac{E_{elec}}{Ensoleil(1 - pertes)} = \frac{7408,59}{8,14(1 - 0,20)} = 1137,68 \text{ Wc} \quad (5.6)$$

Comme il a été déterminé que le point de fonctionnement du champ serait autour de 130 volts à cause des caractéristiques de l'onduleur, le champ sera composé de multiples de 8 modules en série. La puissance du générateur étant de 1137,68 Wc, Im sera donc l'environ 8,71 A. le choix du type de module déterminera le nombre de module en parallèle.

5.3.4. Dimensionnement du champ et des éléments de conditionnement de l'électricité :

Tableau 5.3 : Caractéristiques du champs PV.

Eelec	Ensoleil	Pertes	Pchamp	tension	intensité	config
W-h	Heures	%	Wc	V	I	S x P
7408,59	8,14	20	1136,7	130	8,8	8 x 3

Le champ aura donc une puissance de 1,2 kWc et sera composé de 24 modules de 50 Wc.

5.3.5. Résultats du Logiciel RETScreen :

Tableau 5.4 : Évaluation de la ressource solaire et calcul de la charge RETScreen® - Projet d'installation photovoltaïque

Latitude du site et position du champ PV		Données	Notes/Plage
Station météorologique la plus proche du projet	-	Adrar	voir la base de données météorologiques
Latitude du lieu du projet	°N	27.9	-90,0 à 90,0
Système de positionnement du champ PV	-	Fixe	
Inclinaison du champ PV	°	28.0	0,0 à 90,0
Orientation du champ PV p/r à l'azimut	°	0.0	0,0 à 180,0

Données mensuelles					
Mois	Portion d'utilisation du système dans le mois (0 - 1)	Moyenne mensuelle du rayonnement sur l'horizontale (kWh/m ² /j)	Température moyenne mensuelle (°C)	Moyenne du rayonnement quotidien sur le champ PV (kWh/m ² /j)	Fraction solaire mensuelle (%)
janvier	1.00	4.42	12.4	6.27	100%
février	1.00	5.22	16.0	6.64	100%
mars	1.00	6.50	19.4	7.34	100%
avril	1.00	7.22	23.6	7.22	100%
mai	1.00	7.67	28.1	7.02	100%
juin	1.00	8.14	33.6	7.12	100%
juillet	1.00	8.03	36.0	7.16	100%
août	1.00	7.56	35.4	7.28	100%
septembre	1.00	6.50	31.6	6.95	100%
octobre	1.00	5.36	25.0	6.50	100%
novembre	1.00	4.42	18.2	6.02	100%
décembre	1.00	3.83	12.9	5.50	100%
			Annuel	Période d'utilisation	
Rayonnement solaire sur l'horizontale		MWh/m ²	2.28	2.28	
Rayonnement solaire sur surface inclinée		MWh/m ²	2.46	2.46	
Température moyenne		°C	24.4	24.4	

Caractéristiques de la charge		Données		Notes/Plage		
Type d'application	-	Pompage de l'eau				
Utilisation du calculateur de charge détaillée?	oui/non	Oui				
Description	Application pour le pompage de l'eau	Unité	Quantité	Eau utilisée par unité		Eau quotidienne requise (m ³ /j)
Palmeraie	Irrigation	ha	1.0	m ³ /j/ha	58.0	58.00
Besoin quotidien en eau	m ³ /j		58.00			
Hauteur d'aspiration	m		8.3			
Rabatement	m		0.0			
Hauteur de refoulement	m		0.0			
Hauteur piézométrique	m		0.0			
Pertes de charge par frottement	%		10%			5% à 10%
Hauteur manométrique	m		9.13			
			<i>Quotidien</i>	<i>Annuel</i>		
Demande énergétique équivalente	kWh		1.40		512.33	

[retour à la feuille Modèle énergétique](#)

Tableau 5.4 **Modèle énergétique RETScreen® - Projet d'installation photovoltaïque**

Caractéristiques du site		Données	Notes/plage
Nom du projet		Doctorat	
Lieu du projet		U. de Chlef	
Station météorologique la plus proche du projet	-	Adrar	compléter la feuille Ressource solaire
Latitude du lieu du projet	°N	27.9	-90,0 à 90,0
Rayonnement solaire annuel (surface inclinée)	MWh/m ²	2.46	
Température moyenne annuelle	°C	24.4	-20,0 à 30,0
Demande en eau pour les mois considérés	m ³	21 170.0	
Demande énergétique équivalente pour le pompage	MWh	0.512	

Paramètres du système		Données	Notes/plage
Type d'application	-	Pompage de l'eau	
Système de génération et de pompage de référence			
Source	-	Autre pompe mécanique	
Pompe à eau PV			
Type de moteur	-	CA	
Rendement du système de pompage	%	32%	15% à 75%
Champ PV			
Type de module PV	-	Défini par l'utilisateur	
Manufacturier de modules PV / # de modèle			voir la base de données de produits
Rendement nominal du module PV	%	11.0%	4,0% à 15,0%
Température nominale des cellules en opération	°C	46	40 à 55
Coefficient de température du module PV	% / °C	0.04%	0,10% à 0,50%
Régulateur du champ PV	-	Fixe	
Pertes diverses du champ PV	%	0.0%	0,0% à 20,0%
Puissance nominale du champ PV suggérée	kWp	1.12	
Puissance nominale du champ PV	kWp	1.12	
Surface du champ PV	m ²	10.2	
Conditionnement de l'énergie			
Rendement moyen de l'onduleur	%	95%	80% à 95%
Puissance de l'onduleur (CC à CA) suggérée	kW (CA)	1.1	
Puissance de l'onduleur	kW (CA)	1.1	
Pertes diverses du conditionnement de l'énergie	%	0%	0% à 10%

Production annuelle d'énergie (12.00 mois considérés)		Données	Notes/plage
Eau fournie	m ³	21 164	
Rendement au m ²	kWh/m ²	50.3	
Rendement global du système PV	%	2.0%	
Énergie renouvelable fournie	MWh	0.512	
	kWh	512	compléter la feuille Analyse des coûts

5.3.6. Caractéristiques du site d'essais :

Les essais ont été menés au laboratoire de pompage photovoltaïque de la station d'expérimentation des équipements solaires en milieu saharien sise à Adrar. Cependant, les données du site prises en compte pour le dimensionnement sont celle publié par cet établissement.

5.3.7. Caractéristiques du système de pompage :

a) modules :

Les modules photovoltaïques souvent utilisés dans la station d'expérimentation sont produits par l'unité de développement des technologies du silicium UDTs. Cependant, leurs caractéristiques sont les suivantes.

Tableau 5.5 : Caractéristiques du module PV

Caractéristiques	UDTS 50
Surface totale du module (m ²)	0,426
Tension en circuit ouvert V _{co} (V)	21,6
Courant de court-circuit I _{cc} (A)	3.18
Tension au point de puissance maximale V _m (V)	17,5
Courant au point de puissance maximale I _m (A)	2.9
puissance maximale P _m (W)	49,5
Facteur de forme	0,72
Rendement de conversion aux STC (%)	11
NOCT (°C)	46
Résistance série (Ω)	0,77
Coefficient de variation du courant avec la température (A/°C)	0,01538
Coefficient de variation de tension avec la température (V/°C)	0,0838

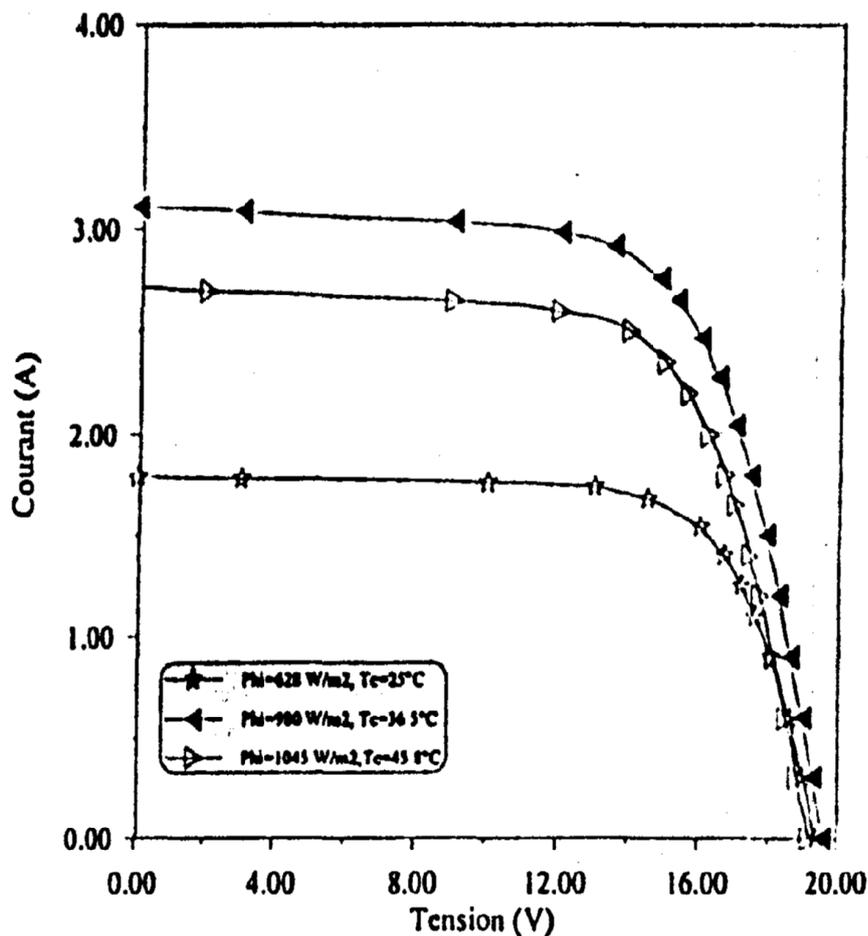


Figure 5.1 : caractéristiques électriques du module pour différentes valeurs d'éclairement et de température (UDTS-50).

b) groupe moto-pompe :

Le système de pompage en question présente un groupe moto-pompe immergé. Le moteur électrique est à courant alternatif à allumage direct à vitesse de rotation variable. Ce type de système de pompage est dit « au fil du soleil ». C'est à dire que la vitesse de rotation du moteur est réglée en fonction de l'éclairement disponible. Autrement dit, le moteur ne peut fonctionner au-dessous d'une valeur minimale d'éclairement ne pouvant fournir le courant de démarrage.

- Capacité du système

Une valeur d'ensoleillement et une hauteur manométrique requise en mètres sont données pour un certain système de pompage solaire.

Attention : utiliser la valeur de l'ensoleillement sur une surface inclinée, des courbes des facteurs d'inclinaison.

A partir des courbes caractéristiques, la quantité d'eau en m^3 /jour débitée par un système de pompage solaire peut être déterminée en reliant le point de la puissance P_w produite par un panneau solaire donnée à la valeur d'ensoleillement et à la hauteur manométrique requise.

En reliant le point de la quantité d'eau requise en m^3 /jour à la hauteur manométrique requise et à la valeur d'ensoleillement, il est possible de déterminer la puissance nécessaire en P_w produite par le panneau solaire.

- Débit instantané :

A partir des courbes ci-dessus, la quantité d'eau maximale en m^3 /h et la hauteur manométrique en mètres d'un système d'une puissance donnée en P_w peuvent être déterminées.

Partir de l'axe de la puissance du courant continu.

Puissance maximale du courant continu = $0,8 \times P_w$ dans des conditions normales.

Variation typique : $\pm 5\%$ à 1000 W.

- Pompe :

La pompe est une pompe centrifuge multicellulaire à roues mobiles radiales directement couplée à un moteur immergé GRUNDFOS. La pompe est réalisée entièrement en acier inoxydable et lubrifié à l'eau. La tête de pompe est taraudée et contient à clapet de retenue.

- Moteur :

Le moteur immergé GRUNDFOS, type MS 402, est un moteur asynchrone bipolaire à rotor en court-circuit du type chemisé avec des paliers à glissement.

Le moteur est réalisé entièrement en acier inoxydable AISI 304.

Le palier de butée est suspendu d'une manière hydrodynamique et gyroscopique. Les paliers radiaux sont construits en céramique/carbure de tungstène et l'arbre est en acier inoxydable AISI 431.

Le stator est chemisé hermétiquement dans l'acier inoxydable AISI 304.les enroulements sont noyé dans la résine synthétique.

En usine, le moteur est rempli d'un liquide antigel et anticorrosif qui lubrifie les paliers et dissipe la chaleur.

Le moteur est protégé contre le gel jusqu'à une température de -20°C.

- **Données électriques :**

Données nominales, 50 Hz :

Tension : 3×65 V

Puissance : 550 W, 0,75 Cv.

Courant : 8,8 A.

Cos φ : 0,87.

Spécification maximale :

Puissance : 1200 W

c) convertisseur de courant :

Puisque le moteur est à courant alternatif, alors que les modules photovoltaïques fournissent du courant continu, il est nécessaire de prévoir un appareil électronique qui permet la conversion du courant continu des modules en courant alternatif. Cette fonction est assurée par un convertisseur de courant dc/ca ; avec des caractéristiques suivant :

Puissance max : 2000VA

Tension d'entrée : 105-120Vdc

Tension de sortie : 8-80V3 ϕ

Fréquence : 6-60 Hz

d) le puits :

La pompe solaire en question est destinée à refouler de l'eau à partir d'un puits creusé dans une surface près du laboratoire de pompage photovoltaïque de la station d'expérimentation des équipements solaires. Ce puits est équipé d'un petit réservoir à sa surface et remet l'eau dans le puits à travers une conduite de retour pour former un circuit hydraulique fermé. Cette disposition est adoptée afin d'assurer un niveau statique permanent ce qui simule la nappe libre qui alimente la région d'Adrar.

Les caractéristiques du puits sont :

Niveau statique :	8,30 m
Niveau dynamique :	8,30 m
Lame d'eau :	7,22 m
Profondeur totale :	15,52 m
Diamètre du puits :	1,35 m
Profondeur de la pompe :	12,6 m

e) la conduite de refoulement :

Pour refouler l'eau jusqu'au petit réservoir installé à la surface du puits, on utilise une conduite de refoulement. Elle est en acier galvanisé de diamètre 60mm. Elle regroupe plusieurs tronçons de même diamètre et singularités telles que des coudes et les appareils de mesures, de régulation et de mesure. En l'occurrence, un compteur d'eau, un manomètre et un débitmètre sont installés le long de la conduite.

5.3.8. Appareillage de mesure et de régulation :

Pour effectuer des mesures sur le système de pompage, certains appareils de mesure sont utilisés.

a) Manomètre : pour mesurer la pression à l'amont de la vanne de régulation du débit. Ses caractéristiques sont :

$$P_{\max} = 5 \text{ kg/cm}^2 \qquad P_{\min} = -1 \text{ kg/cm}^2$$

Echelle: 1/10

b) Compteur d'eau : pour compter le volume d'eau pompé par jour, l'installation est équipé d'un compteur d'eau à affichage numérique.

c) débitmètre numérique : Il est de marque Schlumberger de débit nominal $10\text{m}^3/\text{h}$ et de diamètre intérieur 40 mm. Il permet de mesurer le débit refoulé instantané. Pour mesurer le débit dans un deuxième système de pompage de même dimension, on a utilisé un bidon de 10 litres et un chronomètre.

d) Pyranomètre : pour mesurer l'éclairement, un pyranomètre est utilisé. Il est installé à côté des modules photovoltaïques avec la même inclinaison.

Le pyranomètre mesure le rayonnement global (direct + diffus) de toute l'hémisphère céleste dans la bande de longueur d'onde 0,3 à $3\mu\text{m}$. Le pyranomètre d'Eppley est une thermophile adaptée à cet usage. La surface réceptrice comporte deux anneaux concentriques en argent ; l'anneau intérieur est recouvert de noir, l'anneau extérieur recouvert de blanc.

e) thermocouple type k : la température ambiante de service du système de pompage est mesurée par un thermocouple de type k pour les températures positives.

f) acquisition de données : tous les appareils de mesures numériques (pyranomètre, débitmètre, thermocouple) ainsi que pour mesurer les tension et courant du moteur, une acquisition de données de type Hydra Fluk de 22 voies est utilisée. Elle permet de relever des mesures toutes les 30 secondes et les transmettre à un microordinateur pour les traiter.

5.4. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI:

Le banc d'essai est représenté sur la figure 5.2. La pompe solaire immergée (1) a des paramètres variables : Q; H; n, est entraînée par un moteur (2) asynchrone à vitesses variables et de puissance nominale 550 W (0,75 Cv).

La pompe (1) aspire l'eau du puits (3) d'une profondeur totale = 15,52 m et un diamètre 1,35 m avec un niveau statique 8,30 m. Elle se situe à une profondeur de 12,6 m et aspire l'eau pour la refouler à travers une conduite en acier galvanisé équipée d'un compteur d'eau (4). Les pressions sont lues au moyen de manomètre (5). Egalement, pour mesurer le débit instantané, on utilise le débitmètre numérique (6). Une vanne (7) montée à l'extrémité de la conduite afin de contrôler les pressions de refoulement et la régulation du débit. L'eau est refoulée à travers la conduite jusqu'à un réservoir (8) qui va la restituer au puits pour fermer le circuit.

Pompe

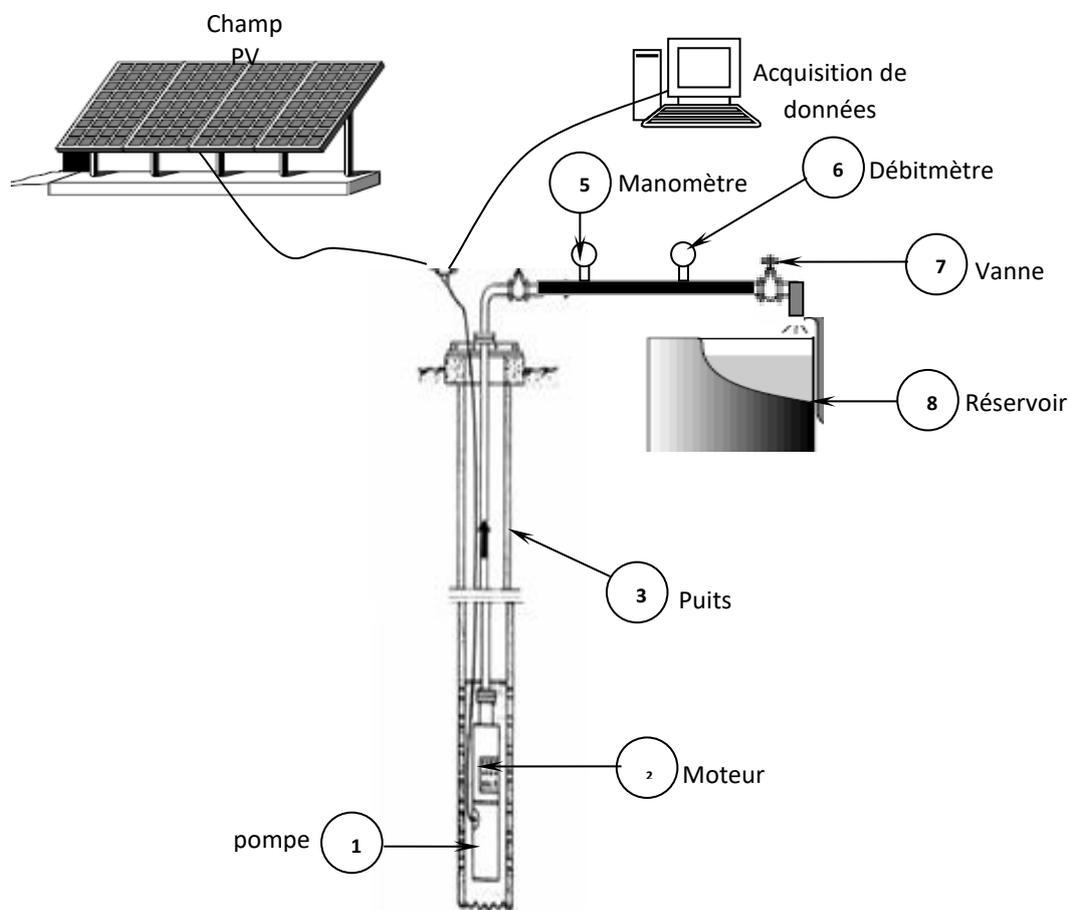


Figure 5.2 : Schéma du banc d'essai.



Photo 5.1 : Photo du banc d'essai (2016).

5.4.1. But des essais :

Le but escompté des essais en visages est de caractériser la pompe solaire SP5-A7. Autrement dit, chercher les meilleures conditions de fonctionnement qui permettent un rendement optimal selon les conditions climatiques de site (durée et intensité d'ensoleillement) et les données géométriques du puits (débit, HMT).

Pour ce faire, on doit tracer le comportement de la pompe en fonction des paramètres sus cités et chercher ensuite les points de fonctionnement de la pompe.

5.4.2. Procédure expérimentale :

Vu les variations aléatoires de certains paramètres tels que l'ensoleillement et la vitesse de rotation, il est difficile de tracer les caractéristiques de telles pompes. On essayera donc de maintenir quelques paramètres constants, pour voir la variation des autres. Cependant, deux types d'essais sont menés sur deux systèmes de pompage de même taille qui travaillent dans les mêmes conditions.

5.4.3. Caractéristique $HMT = f(Q)$

Pour tracer la caractéristique $HMT = f(Q)$, on a procédé comme suit. Pour faire varier la hauteur de refoulement on peut jouer sur la perte de charge locale causée par la vanne placée à l'extrémité de la conduite de refoulement. En effet, le coefficient de perte de charge d'une vanne dépend du degré de fermeture de celle-ci. Le manomètre placé à l'amont de la vanne donne donc la pression différentielle et la hauteur géométrique peut être calculée. Du fait que le débit varie en fonction de l'éclairement, qui dépend à son tour de l'heure de la journée, les premiers essais ont été effectués dans un intervalle de temps court pour considérer un éclairement constant et donc une vitesse de rotation constante. Ainsi, pour chaque degré de fermeture de la vanne (pour chaque HMT), on enregistre le débit instantané affiché sur le débitmètre numérique ainsi que la pression différentielle correspondante sur le manomètre.

Le même essai a été répété en plusieurs heures de la journée pour montrer l'effet de l'intensité d'ensoleillement sur la caractéristique de la pompe.

Les résultants issus de ses essais sont présentés sur les tableaux suivants :

Tableau 5.6 : Résultats du 1^{er} jour d'essais.

Pression P (kg/cm ²)	1 ^{er} jour des essais						
	Débit Q (m ³ /h)						
	09h : 00	10h : 00	11h : 00	12 h: 00	14h : 00	15h : 00	16h : 00
0	4,3	5,4	6,8	6,6	6,3	6,4	6,1
0,5	3,5	5,1	5,4	6	5,3	6,1	5,8
1	2,3	4,05	4,6	5,2	4,5	5,3	5,3
1,5	1,5	3,2	3,8	4,2	4,1	4,7	4,4
2	0,8	2,5	3	3,6	3,6	3,6	3,5
2,5	0,2	1,8	2,3	2,4	2,7	3,1	2,8
3		1,4	1,9	2,2	2,3	2,6	2,1
3,5		0,9	1,4	1,5	1,8	2,1	1,8
4		0,6	1,1	1,2	1,2	1,8	1,4
4,5		0,4			0,9	0,98	0,9
5					0,5	0,6	0,4

Tableau 5.7 : Résultats du 2^{ème} jour d'essais.

Pression P (kg/cm ²)	2 ^{ème} jour des essais						
	Débit (Q) (m ³ /h)						
	09h : 00	10h : 00	11h : 00	12 h: 00	14h : 00	15h : 00	16h : 00
0	4,2	5,6	6,7	7	6,2	6,3	6
0,5	3,3	4,8	6,2	6,4	5,5	6	5,6
1	2,0	3,8	5,2	5,6	4,8	5,4	5,2
1,5	1,1	3,1	4,3	4,5	4,2	4,6	4,2
2	0,5	2,3	3,6	4,1	3,4	3,5	3,4
2,5	0	1,7	2,6	2,8	2,7	3,14	2,9
3		1,3	2	2,2	2,1	2,5	2,2
3,5		0,8	1,5	1,7	1,7	2 ,07	1,7
4		0,5	1 ,1	1,3	1,3	1,75	1,2
4,5		0,2	0,7	1	0,9	0,95	0,8
5			0,4	0 ,6	0,6	0,55	0,2

5.4.4. Caractéristique $Q = f(Ec)$

Le deuxième groupe d'essais a été mené sur un autre système de pompage de mêmes caractéristiques que le premier. La seule particularité dans cet essai, est que le débit est mesuré par l'intermédiaire d'un seau de 10 litres et d'un chronomètre.

Cet essai consiste à montrer la variation du débit en fonction de l'intensité d'ensoleillement pour un degré de fermeture de la vanne (HMT=Cte).L'essai a été répété à plusieurs reprises toute en variant la fermeture de la vanne par jour.

Le mode opératoire consiste donc à maintenir la fermeture de la vanne en une position pendant l'essai et mesurer le débit en fonction de l'ensoleillement toutes les 30 minutes le long de la journée. Le même essai a été répété pour plusieurs fermetures. Les mesures effectuées permettent de relever pour chaque position de la vanne et toutes les 30 minutes, la pression différentielle et le débit.

Les résultats de ces essais sont présentés sur les tableaux suivants :

Tableau 5.8 : Résultats du 3^{ème} jour d'essais.

Heur H	Volume cumulé Vc (m ³)	Pression P (kg/cm ³)	Volume V (m ³)	Temps T (S)	Débit Q (m ³ /s)	Tours pour la fermeture de la vanne
8h: 30	2610.63	0	0,01	13.81	7,2411.10 ⁻⁴	3×2/3
9h: 00	2612.58	0	0,01	9.31	1,0741.10 ⁻³	
9h: 30	2614.40	0	0,01	8.53	1,1723.10 ⁻³	
10h: 00	2616.34	0	0,01	6.78	1,4749.10 ⁻³	
10h: 30	2620.21	0	0,01	6.68	1,4970.10 ⁻³	
11h: 00	2623.21	0	0,01	6.56	1,5243.10 ⁻³	
11h: 30	2625.85	0	0,01	6.38	1,5673.10 ⁻³	
12h: 00	2628.98	0	0,01	6.07	1,6474.10 ⁻³	
13h: 00	2636.19	0	0,01	5.5	1,8181.10 ⁻³	
13h: 30	2638.30	0	0,01	6.22	1,6077.10 ⁻³	
14h: 00	2640.80	0	0,01	6.57	1,52207.10 ⁻³	
14h: 30	2643.75	0	0,01	6.63	1,50829.10 ⁻³	
15h: 00	2646.64	0	0,01	6.72	1,48809.10 ⁻³	
15h: 30	2649.88	0	0,01	6.94	1,4409.10 ⁻³	
16h: 00	2659.22	0	0,01	7.22	1,3850.10 ⁻³	
16h: 30	2664.56	0	0,01	7.69	1,3003.10 ⁻³	

Tableau 5.9 : Résultats du 4^{ème} jour d'essais.

Heure	Volume cumulé Vc (m ³)	Pression P (Kg/cm ²)	Volume V (m ³)	Temps T (s)	Débit Q (m ³ /s)	Nombre de tours de fermeture de la vanne
08:30	2549.6	0	0,01	9.39	1,0649.10 ⁻³	$\left(\frac{2}{3}\right)$ tour
09:00	2553.03	0	0,01	8.22	1,2165.10 ⁻³	
09:30	2559.51	0	0,01	7.41	1,3495.10 ⁻³	
10:00	2665.26	0	0,01	7.21	1,3869.10 ⁻³	
10:30	2568.29	0	0,01	6.25	1,6.10 ⁻³	
11:00	2571.09	0	0,01	6.06	1,6501.10 ⁻³	
11:30	2574.17	0	0,01	5.94	1,6835.10 ⁻³	
12:00	2576.85	0	0,01	5.66	1,7667.10 ⁻³	
13:30	2586.55	0	0,01	6.12	1,6339.10 ⁻³	$2 \times \left(\frac{2}{3}\right)$ tour
14:00	2588.89	0	0,01	6.19	1,6155.10 ⁻³	
14:30	2592	0	0,01	6.25	1,6.10 ⁻³	
15:00	2594.94	0	0,01	6.43	1,5552.10 ⁻³	
15:30	2597.97	0	0,01	6.75	1,4814.10 ⁻³	
16:00	2602.68	0	0,01	7.15	1,3986.10 ⁻³	
16:30	2603	0	0,01	7.65	1,3071.10 ⁻³	

Tableau 5.10: Résultats du 5ème jour d'essais.

Heure	Volume cumulé Vc (m ³)	Pression P (kg/cm ²)	Volume V (m ³)	Temps T (s)	Débit Q(m ³ /s)	nombre de tours de fermeture
08h: 00	2660.99	0	0,01	19.03	5,2548.10 ⁻⁴	$5 \times \left(\frac{2}{3}\right)$ tour
08h: 30	2662	0	0;01	12.81	7,8064.10 ⁻⁴	
09h: 00	2663.25	0	0,01	10.88	9,1911.10 ⁻⁴	
09h: 30	2665.09	0.2	0,01	9.1	1,0989.10 ⁻³	
10h: 00	2667.39	0.3	0,01	8.44	1,1848.10 ⁻³	
10h: 30	2669.57	0.32	0,01	8.23	1,2150.10 ⁻³	
11h: 00	2671.37	0.4	0,01	8.15	1,2269.10 ⁻³	
11h: 30	2674.22	0.41	0,01	7.91	1,2642.10 ⁻³	
12h: 00	2676.59	0.51	0,01	7.31	1,3679.10 ⁻³	
13h: 00	2682.21	0.51	0,01	7.63	1,3106.10 ⁻³	
13h: 00	2683.01	3.7	0,01	33,60	2,9761.10 ⁻⁴	$6 \times \left(\frac{2}{3}\right)$ tour
13h: 30	2683.1	4.8	0,01	140,40	7,1225.10 ⁻⁵	
14h: 00	2683.23	5	0,01	153,30	6,5231.10 ⁻⁵	
14h: 30	2683.35	5	0,01	157,41	6,3528.10 ⁻⁵	
15h: 00	2683.47	5	0,01	161,53	6,1908.10 ⁻⁵	
15h: 30	2683.58	4.8	0,01	168	5,9523.10 ⁻⁵	
16h: 00	2686.55	4.8	0	.	.	
16h: 30	2686.55	3.6	0	.	.	

Tableau 5.11: Résultats du 6^{ème} jour d'essais.

Heurs h	Volume cumulé (C.E) Vc (m ³)	Pression P (kg/cm ²)	Volume V (m ³)	Temps T (S)	Débit Q (m ³ /s)	Tours de fermeture de la vanne
08 ^h : 30	2695.61	0.01	0,01	11.90	8,4033.10 ⁻⁴	7/3
09 ^h : 00	2697.48	0.01	0,01	9.31	1,0741.10 ⁻³	
09 ^h : 30	2699.84	0.01	0,01	7.62	1,3123.10 ⁻³	
10 ^h : 00	2705.12	0.01	0,01	6.94	1,4409.10 ⁻³	
10 ^h : 30	2706.01	0,01	0,01	6.83	1,4641.10 ⁻³	
11 ^h : 00	2707.75	0.01	0,01	6.75	1,4814.10 ⁻³	
11 ^h : 30	2710.35	0.01	0,01	6.26	1,5974.10 ⁻³	
12 ^h : 00	2712.50	0.01	0,01	6.44	1,5527.10 ⁻³	
13 ^h : 00	2718.51	0.01	0,01	6.40	1,5625.10 ⁻³	
13 ^h : 30	2721.40	0.01	0,01	6.31	1,5847.10 ⁻³	
14 ^h : 00	2724.13	0.01	0,01	6.81	1,4684.10 ⁻³	
14 ^h : 30	2726.76	0.01	0,01	7.16	1,3966.10 ⁻³	
15 ^h : 00	2729.31	0.01	0,01	7.50	1,3333.10 ⁻³	
15 ^h : 30	2731.95	0.01	0,01	7.75	1,2903.10 ⁻³	
16 ^h : 00	2734.20	0.01	0,01	8.13	1,2300.10 ⁻³	
16 ^h : 30	2736.01	0.01	0,01	8,80	1,1363.10 ⁻³	

5.4.5. Procédure D'essai et Instruction d'emploi :

La procédure recommandée pour la relève d'un point de fonctionnement :

1. relever les pressions de refoulement.
2. relever les valeurs du manomètre, et du débitmètre numérique.

Il faut tout d'abord quatre (4) personnes pour réaliser cet essai :

- le premier fait le réglage de la vanne (fermeture et ouverture) et la vérification des pressions.
- le deuxième lire les valeurs affiche dans le débitmètre.
- le troisième prend les valeurs initiales de l'intensité et la fréquence de générateur (Ig, Vg).
- le quatrième notera les résultats obtenus de chaque personne de trois.

Chapitre 6

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSIONS

6.1. Introduction :

Les méthodes de caractérisation des pompes ordinaires passent par l'établissement des relations entre certains paramètres de fonctionnement tels que l'HMT, la puissance et le rendement en fonction du débit. Du fait qu'il est possible d'étudier ces paramètres séparément en faisant varier les autres à notre guise. Cependant, la caractérisation des pompes solaires est difficile du fait qu'il est impossible d'étudier ses paramètres séparément, si non ne peuvent être contrôlé. Les paramètres qui interviennent dans la caractérisation des pompes solaires sont l'intensité d'ensoleillement E_C , l'HMT, le débit Q est la puissance électrique du moteur.

6.2. Paramètre intervenants dans la caractérisation :

Puisque les fonctionnements de la pompe solaire sont liés à son lieu d'installation, à l'éclairement, et à la charge journalière, c'est à dire au débit Q et la hauteur de refoulement, il est utile de montre la variation de ces paramètres lors d'une journée type.

Ainsi, il est possible par la suite d'étudier la réponse de la pompe à ses paramètres.

6.2.1. Eclairage ou ensoleillement E_c [W/m^2] :

L'éclairage ou l'ensoleillement représente l'énergie émise par le soleil recueillie sur une surface d'un m^2 . Elle dépend de l'altitude du lieu et de la journée dans l'année et de l'heure dans la journée ainsi que de l'orientation de la surface de captage.

En effet, les courbes ci-dessous montrent la variation de l'éclairage dans la journée des essais. Elle a la forme d'une cloche. Les faibles valeurs se situent aux alentours du levée et du coucher du soleil les maxima sont localisé au milieu de la journée durant une période de plusieurs heures selon la longueur de la journée. La courbe montre aussi un axe de symétrie localisé au milieu de la journée. C'est le midi au temps solaire vrai.

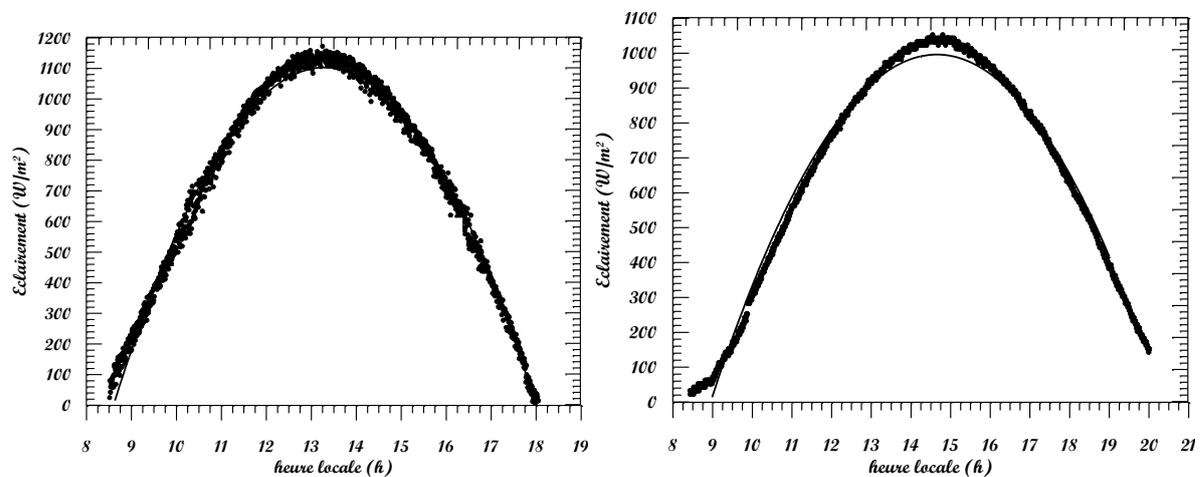


Figure 6.1 : Intensité d'ensoleillement : a- moi de Mars, b- mois de Mai.

La comparaison entre les deux courbes d'ensoleillement de deux journées distantes de 1,5 mois, montre une infime différence en intensité d'ensoleillement. Mais la durée d'ensoleillement au mois de mai est plus grande du fait que la journée est plus longue (de la levée au coucher du soleil).

6.2.2. Débit de pompage :

La courbe ci-dessous montre la variation du débit de pompage en m^3/h le long de la journée d'essai pour une hauteur de refoulement fixe. D'après la figure 6.2, Il est visible que, comme l'intensité d'ensoleillement, le débit varie selon une forme d'une cloche. Il atteint ses maxima au alentours de midi temps solaire vrai. Alors que les faibles débits sont localisés aux

extrémités de la journée. Cela s'explique par le fait que l'intensité d'ensoleillement agit directement sur la vitesse de rotation de la pompe. Donc, loin du milieu de la journée où l'ensoleillement est faible, la vitesse de rotation de la pompe est faible, le débit instantané présente ses minimums. On peut dire que le débit de pompage instantané varie dans le même sens que l'ensoleillement (figure 6.3).

D'autre part, la production journalière d'eau peut être estimée par calcul de l'aire de la surface au-dessous de la courbe du débit de pompage.

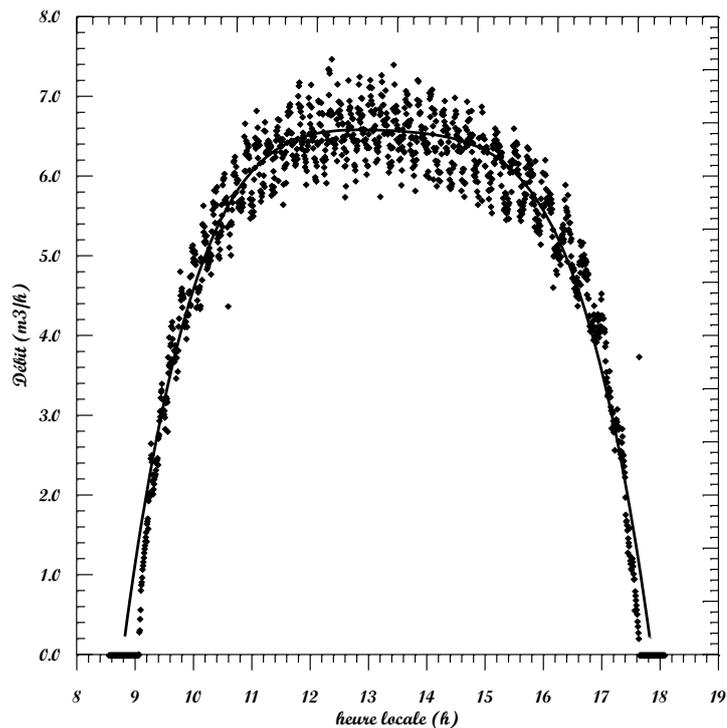


Figure 6.2 : Evolution du débit dans la journée.

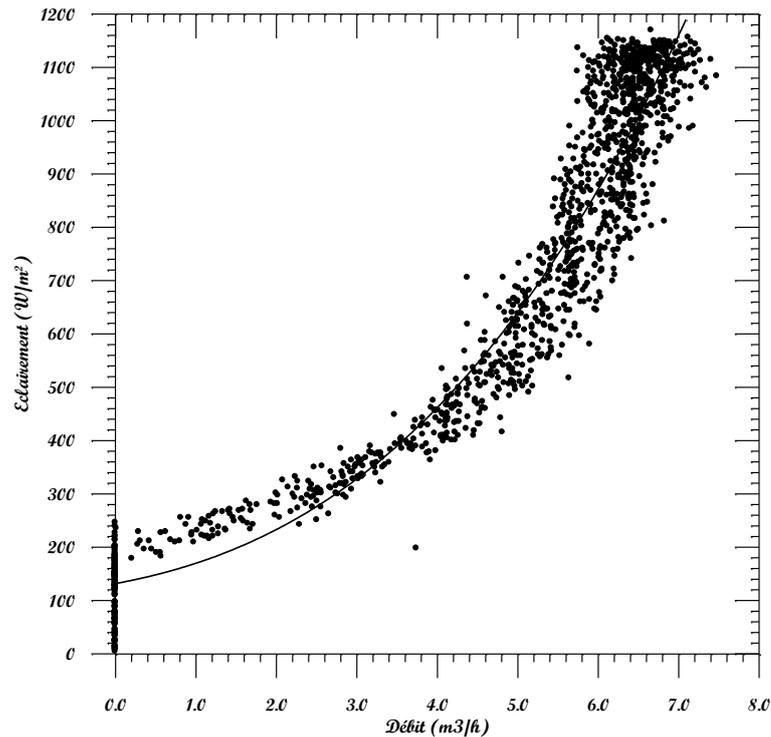


Figure 6.3 : Evolution du débit en fonction de l'éclairement.

6.2.2. Calcul de la caractéristique de la conduite :

Afin de pouvoir trouver le point de fonctionnement de la pompe pour chaque hauteur de refoulement, il est nécessaire de tracer d'abord la courbe caractéristique de la conduite de refoulement. Cette dernière est constituée d'un certain nombre de tronçons linéaires de même diamètre induisant ainsi des pertes de charge linéaire et certaines singularités comme les coudes et les appareils de mesure. Pour cela, et afin de simplifier le problème, on envisage de trouver une conduite linéaire équivalente qui génère la même perte de charge.

a) conduite équivalente :

La conduite équivalente aura donc une perte de charge totale égale aux pertes singulières et linéaires (1 coude + 2 manomètres + compteur d'eau + longueurs des tronçons).

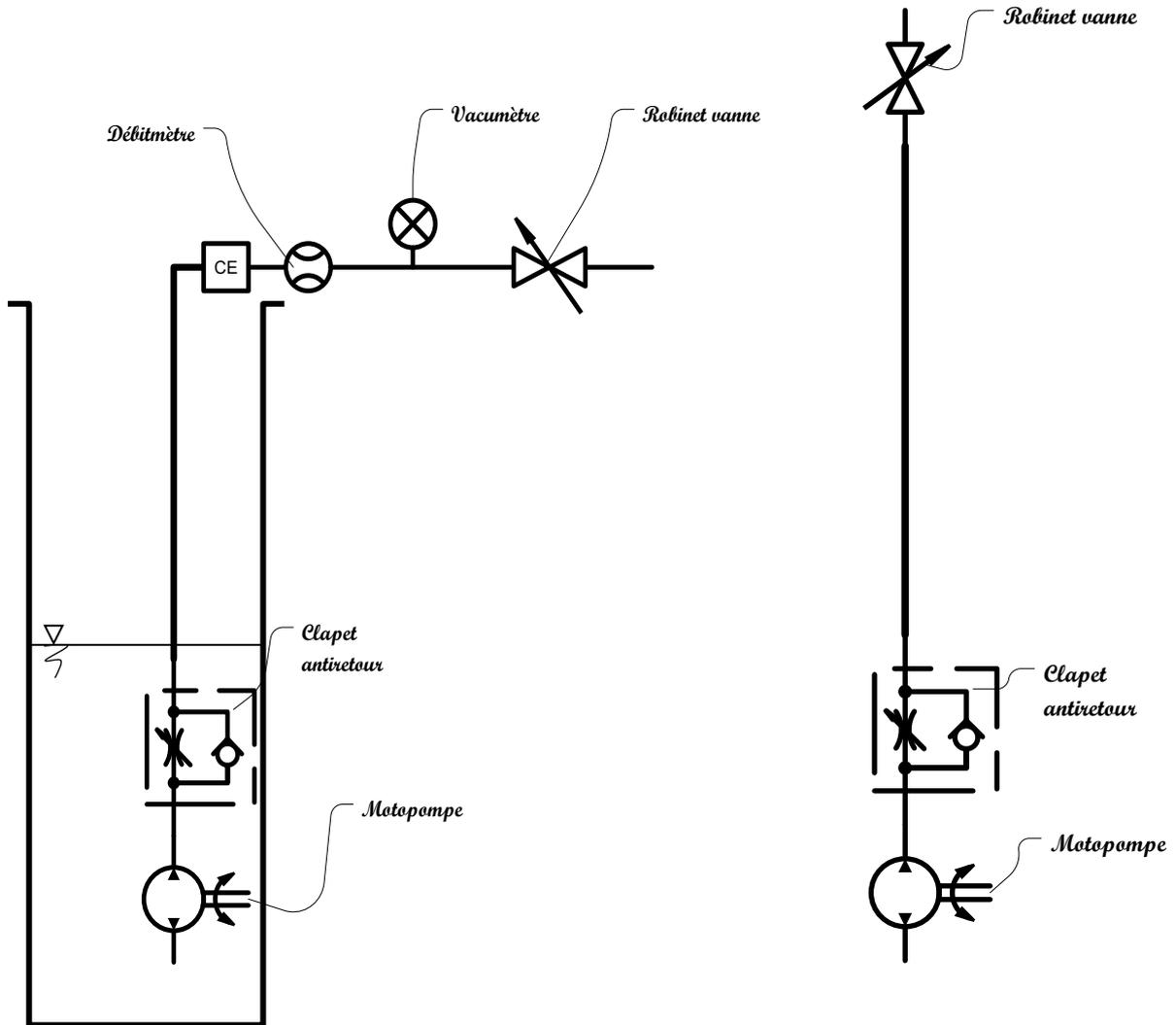


Figure 6.4 : a- Système de pompage.

b- système équivalent.

La perte de charge locale de chaque singularité aura donc une longueur équivalente déterminée en fonction de son diamètre $L_{\text{éq}} = f(D)$. On a comme suit:

1. coude à 90° bridé ou soudé :

$$\varnothing = 60 \text{ mm} \rightarrow L_{\text{éq}} = 1,34 \text{ m} ;$$

2. tronçon de 0,23 m ;

3. compteur d'eau avec une perte de charge linéaire équivalent égale à 0,5 m ;

4. manomètre avec faible perte de charge presque 0,19 m ;

5. deux tronçons de conduite avec une longueur de 0,06 m :

$$L_{\text{éq}} = 0,06 \times 2 = 0,12 \text{ m} ;$$

En plus, la conduite de refoulement est de 12,6 m de longueur ;

Donc $L_{\text{éq}} = 12,6 + (2 \times 0,19) + (2 \times 0,06) + 0,5 + 0,23 + 1,34$

$$L_{\text{éq}} = 15,17 \text{ m}$$

b) Coefficient de frottement de la conduite λ :

Afin d'estimer les pertes de charge linéaire de la conduite d'une manière rigoureuse, il est préférable de calculer son coefficient de frottement λ . En appliquant le théorème de Bernoulli entre les deux points (1) et (2) :

Le principe suivi pour le calcul de ce coefficient est le suivant :

A deux instants distants et à vanne complètement ouverte, on mesure le débit et la pression différentielle entre les extrémités d'un tronçon de la conduite. Le coefficient λ peut donc être calculé à partir de la loi de Darcy-Weisbach.

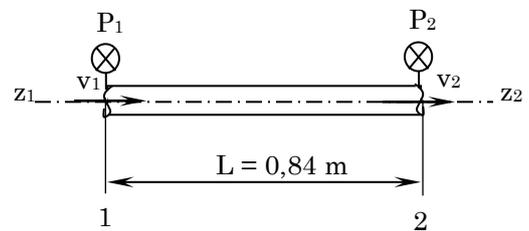


Figure 6.5 : Mesure du coefficient de frottement

La première mesure effectuée à 8 h 30, permet de calculer le coefficient de frottement comme suit :

Entre les deux extrémités du tronçon horizontal, le théorème de Bernoulli s'écrit :

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H \quad (6.1)$$

Z_1, Z_2 : l'énergie potentielle (les cotes) exprime en mètre.

$P_1/\rho g, P_2/\rho g$: énergie de pression.

$V_1^2/2g, V_2^2/2g$: énergie cinétique.

ΔH : perte de charge pour une conduite circulaire de diamètre D et de longueur L .

$Z_1 + Z_2$ puisqu'ils ont la même cote.

$$V_1 = V_2$$

$$(Z_1 - Z_2) + \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2g} = \Delta H$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta p}{\rho g} = \Delta H_{\text{linéaire}}$$

$$\text{D'autre part, selon Darcy, } \Delta H = \frac{8\lambda l}{\pi^2 D^5 g} Q^2 \quad (6.2)$$

A l'instant où la vanne est totalement ouverte, on a :

$$Q = 0,8116 \text{ l/s à } 8^{\text{h}} : 30$$

$$\Delta P = 0,01 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Rightarrow \lambda_0 = \frac{\Delta H \pi^2 D^5 g}{8lQ^2}$$

$$\Rightarrow \lambda_0 = \frac{(0,1) \cdot 10 \cdot \pi^2 (0,06)^2 \cdot 10}{8(0,845)(0,8116 \cdot 10^{-3})^2} = 1,7218$$

Pour vérifier cette valeur, on refait le même calcul à 12 h lorsque la vanne est ouverte à la même hauteur de refoulement.

A 12 h : 00 :

$$\Delta P = 0,05 \text{ kg/cm}^2$$

$$P = 0,5 \text{ m}$$

$$Q = 1,7605 \text{ l/s}$$

$$\Rightarrow \lambda_1 = \frac{0,5 \pi^2 (0,06)^5 \cdot 10}{8(0,845)(1,7605 \cdot 10^{-3})^2} = 1,8296$$

$$\overline{\lambda}_0 = \frac{\lambda_0 + \lambda_1}{2} = 1,7757$$

On prend un coefficient de frottement de la conduite $\lambda = 1,7757$.

Cette valeur est très proche à celle de l'acier galvanisé.

c) Résistance hydraulique de la conduite :

La résistance hydraulique de la conduite peut être calculée selon la loi de Darcy-Weisbach comme suit :

$$R_h = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L_{\text{éq}}}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot g} = \frac{8 \cdot 1,7 \cdot 15,17}{\pi^2 (0,06)^5 \cdot 9,81} = 2,743 \cdot 10^6 \text{ s}^2/\text{m}^5 \quad \text{si } Q \text{ est en (m}^3/\text{s)}$$

$$R_h = 0,21165 \text{ h}^2/\text{m}^5 \quad \text{si } Q \text{ (m}^3/\text{h)}$$

$$\Rightarrow \Delta H = R \cdot Q^2 + H_g = 0,21165 \cdot Q^2 + 8,30$$

La hauteur manométrique sera égal à chaque débit à la somme de la hauteur géométrique H_g , la perte de charge linéaire $R \cdot Q^2 + 8,30$ et la perte de charge locale de la vanne $\frac{\Delta P}{\rho g}$.

$$\text{HMT} = H_g + RQ^2 + \frac{\Delta P}{\rho g}$$

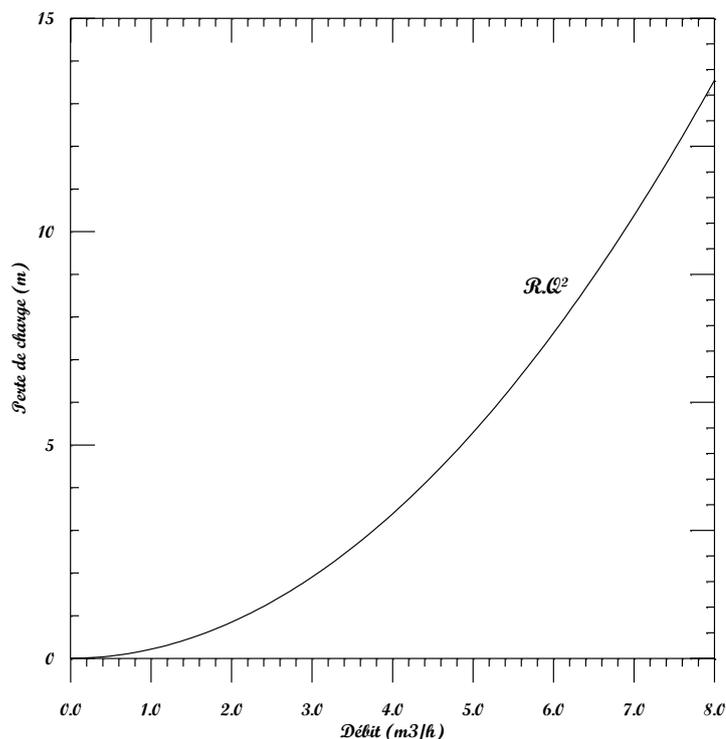


Figure 6.6 : Courbe caractéristique de la conduite.

6.3. Courbe Caractéristique : $H = f(Q)$

Pour montrer le comportement de la pompe solaire vis-à-vis de la hauteur de refoulement, plusieurs tests ont été opérés à différents instants de la journée et à différentes fermetures de la vanne. Souvent, cette caractéristique est tracée à une vitesse de rotation constante. Cependant, du fait de la variation de l'ensoleillement, il est difficile de maintenir une vitesse constante.

Pour surpasser cette difficulté, il est nécessaire donc de mener les tests dans un temps aussi court que possible afin de considérer l'ensoleillement constant et par la suite la vitesse de rotation constante.

En effet, les courbes de la figure (6.7) montrent les profils de l'HMT en fonction du débit pour différents instants de la journée. Il est remarquable que de manière générale, le débit décroît lorsque l'HMT augmente. Autrement dit, à une hauteur géométrique donnée, l'HMT décroît en fonction du débit du fait que ce dernier influe sur les pertes de charge linéaire et singulière. L'allure des courbes H-Q s'avère parabolique ce qui est confirmé par la théorie.

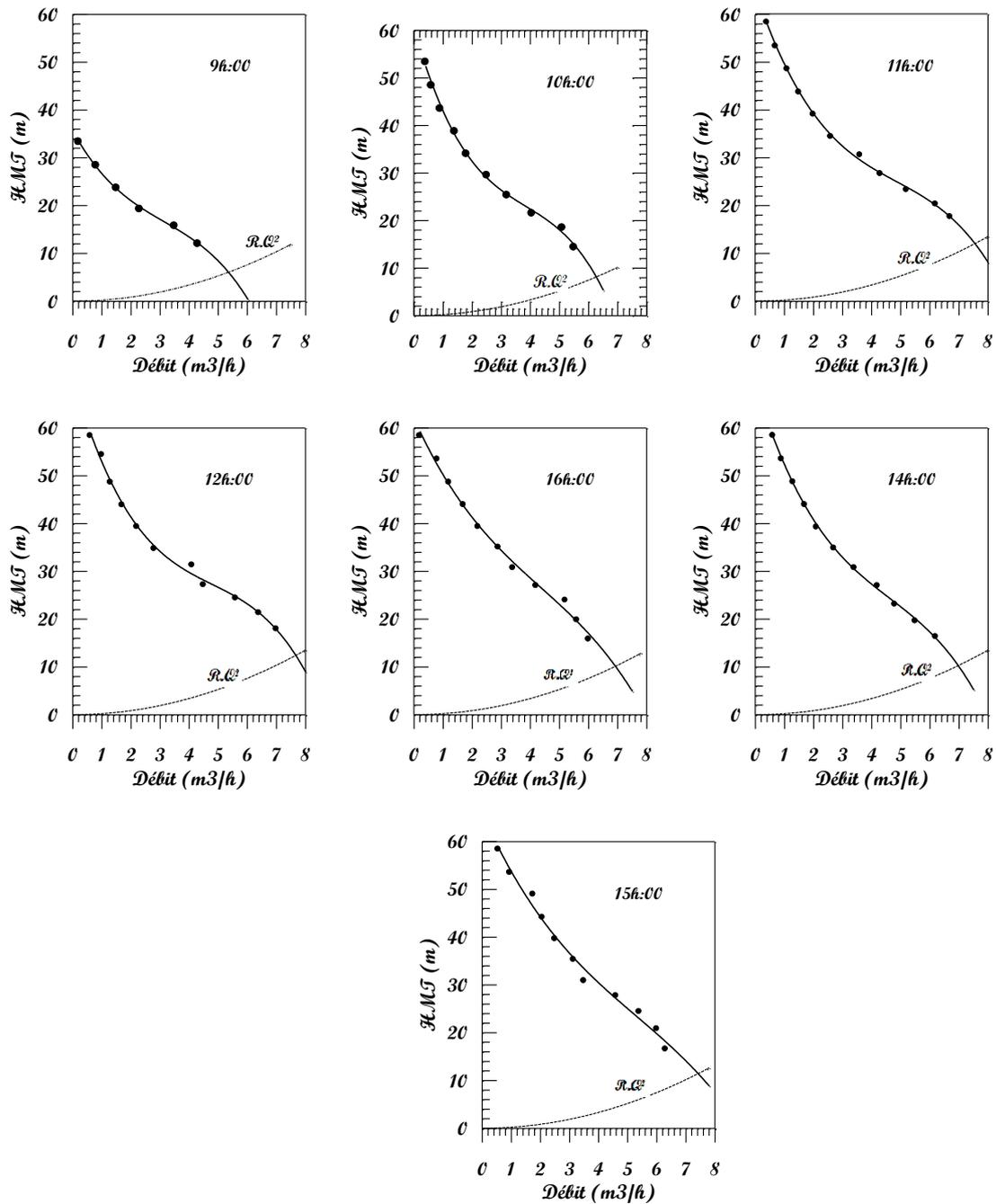


Figure 6.7 : Caractéristique HMT-Q à différents instants de la journée.

En outre, lorsque l'ensoleillement augmente en intensité, les courbes H-Q gardent la même allure mais changent d'amplitudes. Cela est dû au fait que lorsque l'ensoleillement augmente, la vitesse de rotation augmente et par la suite l'H-Q change d'amplitude.

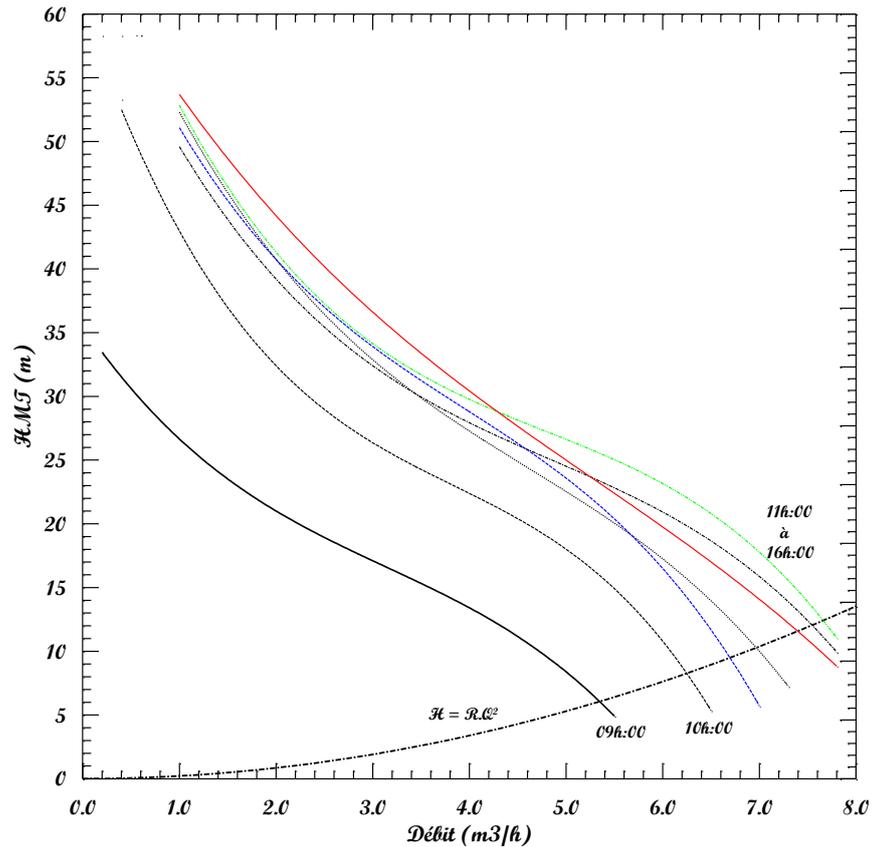


Figure 6.8 : Points de fonctionnement.

L'intersection de la caractéristique de la conduite de refoulement $R.Q^2$ avec les courbes HMT-Q détermine les points de fonctionnement. Il est visible d'après les courbes de la figure 3.8 que, pour une même hauteur de refoulement, le point de fonctionnement change de position dans la journée. Il présente une translation durant la matinée pour tendre vers un point de fonctionnement presque stable durant la période de la moitié de la journée. On peut donc avoir, pour les mêmes conditions de travail plusieurs point de fonctionnement de la pompe.

L'instabilité du point de fonctionnement peut s'expliquer par le fait que, durant les périodes loin de midi, l'ensoleillement reste faible comparativement à la puissance nominale de la pompe. Cependant, la pompe tourne à une vitesse largement inférieure à sa vitesse de rotation nominale. Plus on s'approche de midi où l'ensoleillement est comparable à la puissance nominale, le point de fonctionnement se stabilise. On peut dire qu'à chaque valeur d'ensoleillement, la pompe change de vitesse.

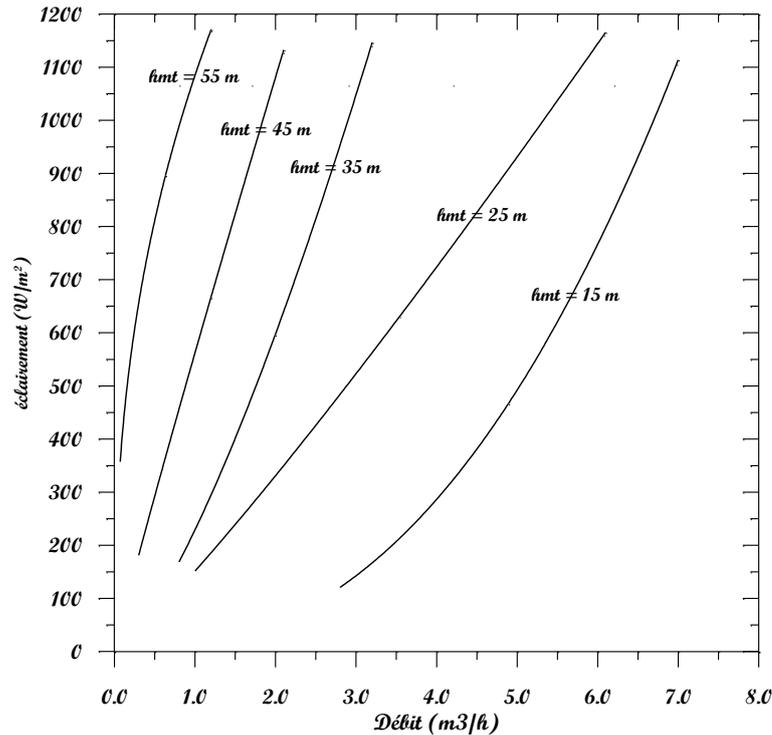


Figure 6.9 : influence de l'HMT sur le débit en fonction de l'ensoleillement.

Si pour le même site de service du système de pompage la hauteur de refoulement change, le comportement de la pompe change. En effet, les courbes de la figure 3.9 présentent l'effet de l'HMT (15m, 25m, 35m, 45m et 55m) sur la production journalière (débit) pour différentes intensités d'ensoleillement. Il est visible que, plus la hauteur de refoulement augmente, plus la production journalière de l'eau diminue. Aussi, pour un même ensoleillement (vitesse de rotation constante), le débit change lorsque la hauteur change. Si pour un même ensoleillement la hauteur double, le débit décroît de plus de la moitié.

6.4. Courbes Caractéristiques $P = f(Q)$ et $\eta = f(Q)$:

La mise en évidence de la courbe caractéristique P-Q passe par la mesure de la puissance hydraulique P_h . Or cette dernière ne peut être mesurée directement à l'aide d'appareil de mesure approprié sur le banc d'expérimentation. D'autre part, l'acquisition de donnée permet de mesurer le courant et la tension d'alimentation du moteur de la pompe toute les 30 secondes.

On peut donc exploiter ces mesures pour évaluer la puissance absorbée par la pompe.

Sachant que le moteur électrique est à courant alternatif, à allumage direct avec un $\text{Cos}\varphi = 0,8$ et un rendement de 80 %, la puissance de la pompe callée sur un même arbre que le moteur sera évalué comme suit :

Puissance absorbée par la pompe = Puissance utile du moteur = puissance absorbée \times rendement.

$$\text{Puissance absorbée } Pa = V.I.\sqrt{3}.\text{Cos}\varphi \quad (6.3)$$

$$\text{Puissance utile } Pu = 0,8.V.I.\sqrt{3}.\text{Cos}\varphi \quad (6.4)$$

Par ailleurs, nous savons que la puissance hydraulique d'une pompe peut être calculée par la relation suivante :

$$P_h (\text{W}) = \frac{\rho.g.Q.HMT}{\eta_p} = 0,8.V.I.\text{Cos}\varphi \quad (6.5)$$

Donc le rendement de la pompe est :

$$\eta_p (\%) = 100. \frac{\rho.g.Q.HMT}{0,8.V.I.\text{Cos}\varphi} \quad (6.6)$$

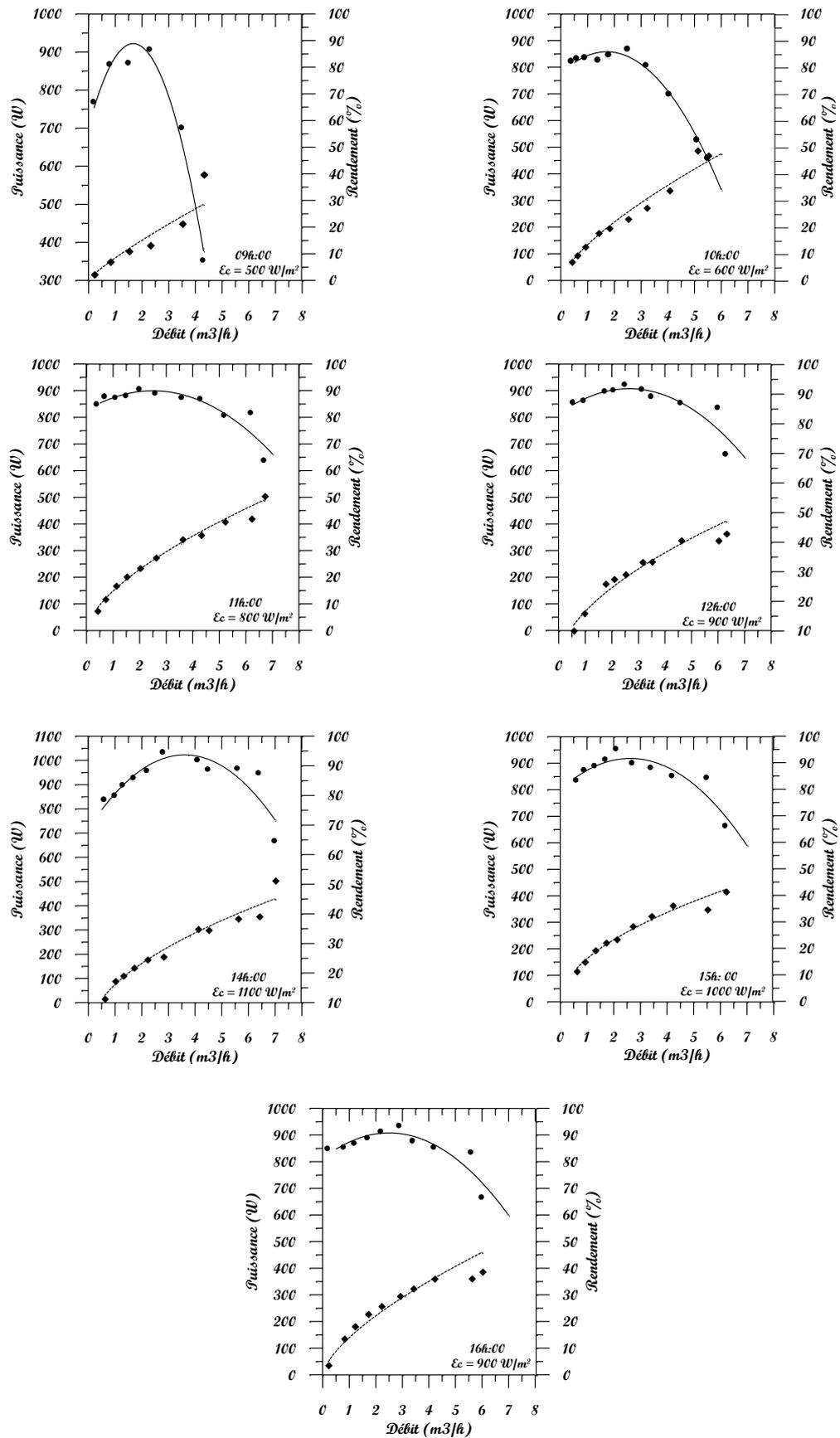


Figure 6.10 : Puissance hydraulique et rendement de la pompe à différents instants de la journée et à différentes HMT.

Les courbes de la figure ci-dessus montrent l'évolution de la puissance hydraulique de la pompe ainsi que son rendement en fonction du débit à différentes heures de la journée.

Pour pouvoir tracer les caractéristiques de la puissance et de rendement en fonction du débit, les essais ont été menés aux heures 9h, 10h, 11h, 12h, 14h, 15h et 16h. Les essais ont été effectués dans un intervalle de temps aussi court que possible pour assurer un ensoleillement constant durant l'essai. Car de cette manière, on peut supposer que la vitesse de rotation est constante durant l'essai. Il en est de même pour les autres heures d'essais.

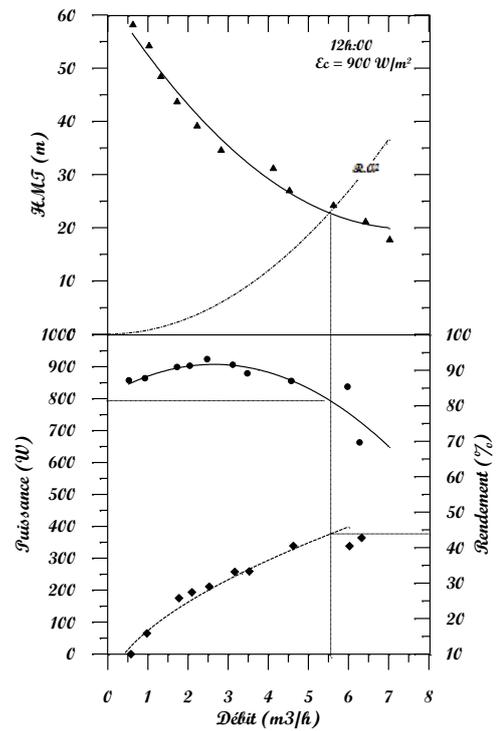
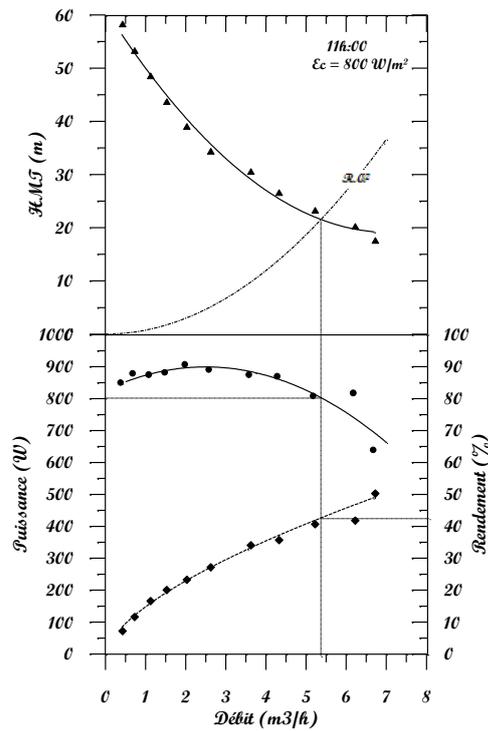
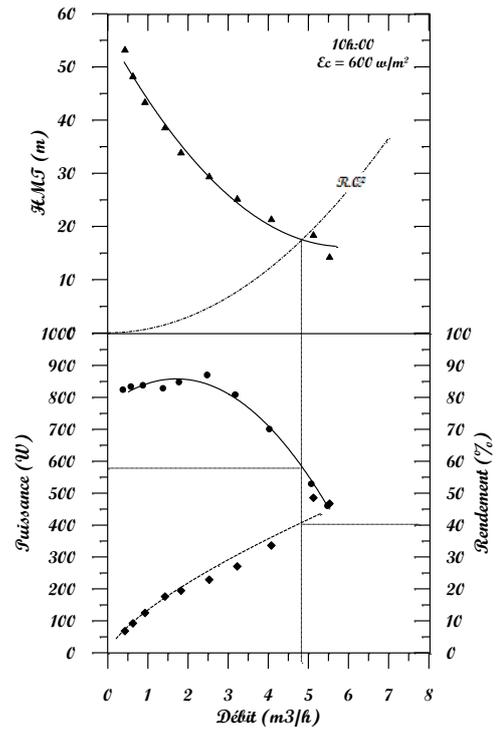
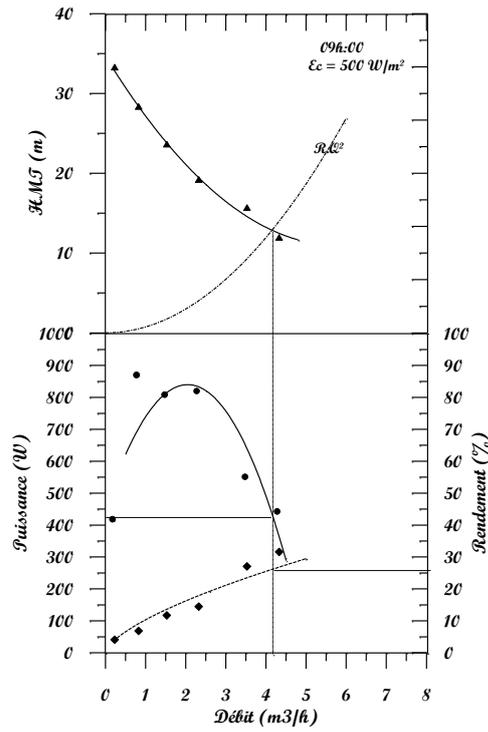
Les courbes de puissance et de rendement présentent la même tendance durant les différentes heures de la journée. Sauf qu'elles diffèrent en amplitude. Il est visible que durant les premières heures de la journée où l'ensoleillement n'est pas assez intense, la puissance hydraulique décroît de manière très rapide lorsque le débit augmente. Cela s'explique par le fait qu'aux moments de faible ensoleillement, la vitesse de rotation de la pompe est faible et par la suite et la puissance et le rendement sont faibles. Encore plus, lorsque le débit augmente, la puissance hydraulique chute rapidement à cause des pertes de charge linéaire générées par la fermeture de la vanne.

Il est notable que, plus l'ensoleillement est intense, plus la puissance et le rendement sont meilleurs et la chute devient plus lente. Aussi, au-delà de 11h, les deux caractéristiques de puissance et de rendement se stabilisent et gardent un régime de fonctionnement constant jusqu'à 16h. Après 16h, les caractéristiques seront les mêmes que de la matinée du fait de la symétrie de l'ensoleillement durant la journée.

6.5. Performances de la pompe :

Les courbes de la figure (6.11) montrent les profils des caractéristiques H-Q, P-Q et η -Q à différentes heures de la journée à savoir 9h, 10h, 11h, 12h, 14h, 15h et 16h.

Ces heures ont été choisies selon la disponibilité du système de pompage. Elles s'avèrent suffisantes pour la caractérisation sur toute une journée du fait que l'ensoleillement est symétrique.



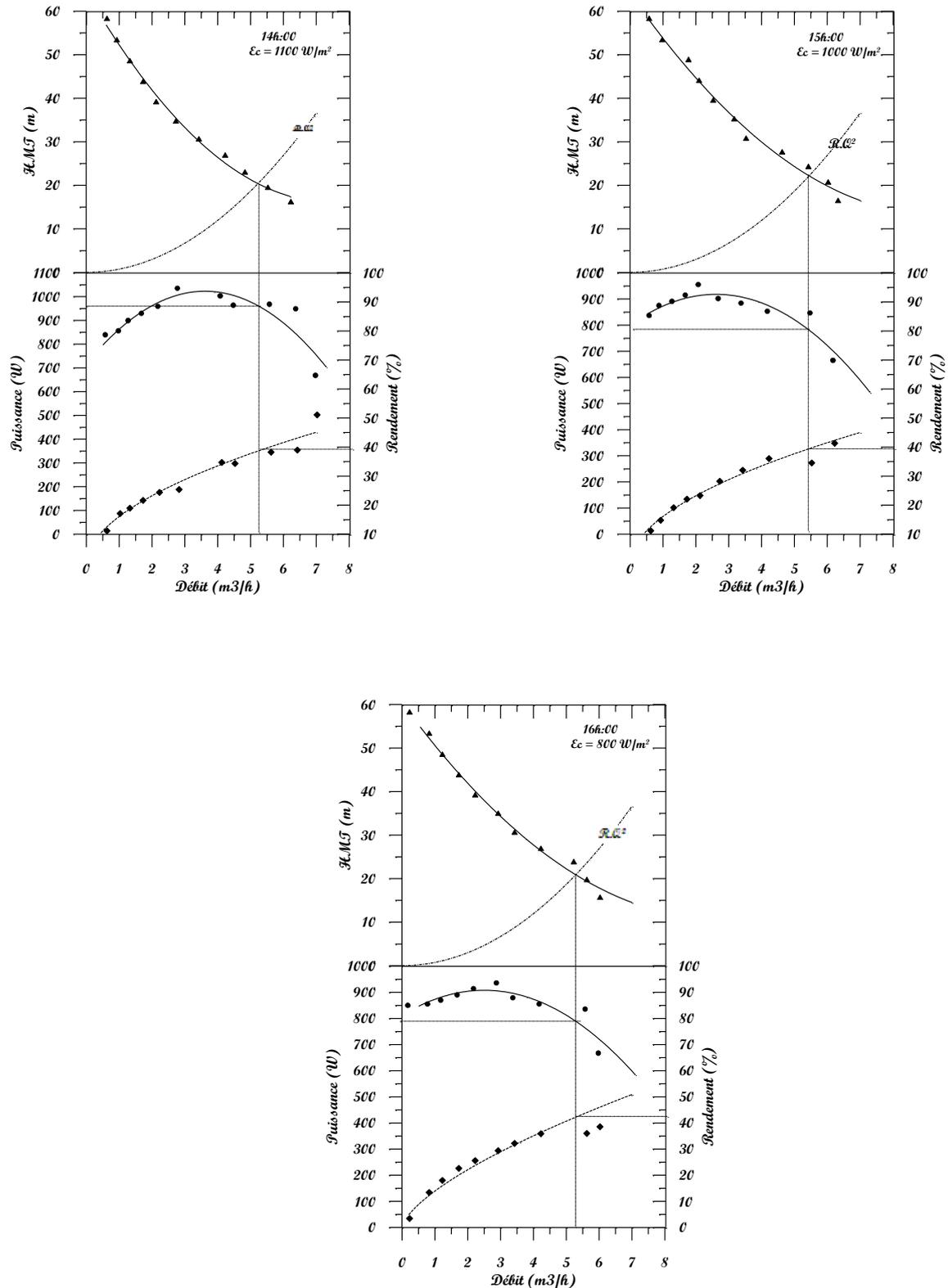


Figure 6.11 : Performances du système de pompage.

Il est visible que le point de fonctionnement change de position d'heure en heure pour une même hauteur de refoulement. Ce changement est notable durant les premières heures après la levée du soleil. Il en est de même pour les heures qui devancent le couchée. Néanmoins, ce point de fonctionnement se stabilise dans une marge infime de 11h à 16h. Cette période est caractérisée par un ensoleillement fort de manière à pouvoir assurer la puissance nominale de la pompe.

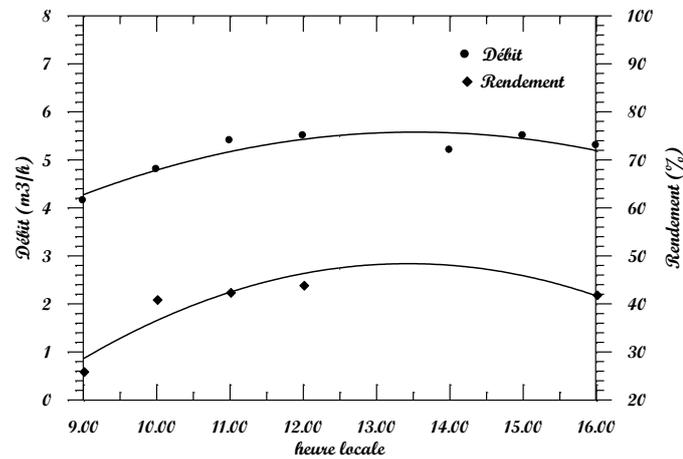


Figure 6.12 : Rendement et débit en fonction de l'heure locale.

Il est remarquable aussi que, dans cette période, la courbe de rendement atteint ses maxima. Le rendement max est localisé à 15h. On peut dire donc, plus on s'approche du milieu de la journée astronomique (midi TSV), plus le régime de fonctionnement se stabilise à un rendement maximal.

CONCLUSION GENERALE

Dans le présent travail, l'intérêt est porté à l'étude des systèmes de collecte et de partage des eaux dans les oasis de la Saura au sud-ouest algérien. Ces systèmes connaissent des problèmes d'existence liés au mode de gestion et de captage des eaux. En effet, le diagnostic de certains oasis de la Saoura révèle qu'il est impératif d'intervenir et apporter de solutions techniques pour remédier au problème d'assèchement des foggaras faute de tarissement de la nappe. Cette dernière souffre de manque de recharge et de renouvellement à cause des faibles précipitations d'une part et de la surexploitation de la nappe d'autre part.

La solution technique proposée dans cette étude est l'utilisation de système de pompage solaire afin d'assurer l'alimentation du réseau de foggaras. Cette solution doit être consolidé par l'établissement des caractéristiques dimensionnelles d'une pompe solaire destinée à l'irrigation dans les zones sahariennes.

La caractérisation est effectuée en passant d'abord par une vérification du dimensionnement du champs photovoltaïque alimentant cette pompe puis, des courbes caractéristiques ont été tracées à travers des essais à différentes hauteurs de refoulement et conditions de services,.

Pour faire varier la hauteur de refoulement, on a profité de la fermeture progressive de la vanne pour créer un surplus de perte de charge locale.

Les résultats des essais indiquent que :

- Le dimensionnement des systèmes photovoltaïque et des systèmes de pompage en particulier, et une opération logique et mathématique.
- La puissance nécessaire à l'alimentation de la pompe dépend des paramètres de dimensionnement hauteur de refoulement, débit requis et surtout de l'ensoleillement.

- Un système de pompage situé à Adrar, n'aura pas le même dimensionnement s'il était installé à Alger pour une même hauteur de refoulement et un même débit.

D'autre part, il est notable que pour une même hauteur de refoulement ;

- le débit varie constamment selon l'heure de la journée, du mois et de la saison. En général, il suit la même tendance que l'ensoleillement. Plus l'ensoleillement augmente, plus le débit instantané est important.
- Il est possible d'avoir des points de fonctionnement de la pompe très distincts. Sauf que ce point se stabilise au alentour de midi TSV.

Il en est de même pour la puissance hydraulique et le rendement.

- Pour n'importe quelle hauteur de refoulement, les débits max sont localisés entre 11h et 16h. C'est à dire au milieu de la journée proche de midi TSV.

Pour une même hauteur et à différentes heures de la journée, il est à noter que :

- Quoi qu'elles ont la même allure, les courbes de puissance hydraulique présentent une différence notable en amplitudes selon l'heure de la journée.
- Egalement, les courbes de rendement montrent que le rendement de la pompe varie avec le temps pour une même hauteur de refoulement. Il est plutôt faible dans la matinée ou l'ensoleillement et modéré alors qu'il atteint ses maximas à midi TSV.
- Plusieurs régimes de fonctionnement de la pompe peuvent avoir lieu. Toutefois, le régime se stabilise dans la plage 11h-16h autour de midi.

Il est préférable donc de faire fonctionner le système de pompage autour de midi TSV lorsque l'ensoleillement est à son max. On préfère donc, de perdre un volume d'eau infime par arrêt du système dans les beaux matins et les soirs pour prolonger, sinon, préserver une longue durée de vie du système.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. Driff, Optimisation d'une centrale Photovoltaïque, Diplôme de post graduation spécialisé, SEES-MS, Adrar, 1992.
- [2] A. Dupont, hydraulique urbaine, Tome 2, Edition Eyrolles, 2^{ème} Edition, Paris, 1988.
- [3] M. Carlier, Hydraulique Générale & Appliquée, Eyrolles, Paris, 1986.
- [4] Ch. Chauliguet, P. Baratcabal et J.P. Betellier, L'énergie Solaire dans le Bâtiment, Eyrolles, Paris, 1981.
- [5] J. Bonnin, Hydraulique Urbaine appliqué aux agglomérations de petite et moyenne importance, Eyrolles, Paris, 1986.
- [6] Conference Proceeding, Séminaire International de Génie Mécanique – Algérie, SIGMA'2, 28 & 29 Avril, 2002, Algérie.
- [7] RETscreen International, Analyse de Projets d'Energie Propre, Manuel d'ingénierie et d'Etude de Cas, Ministère des ressources Naturelles, Canada, 2004.
- [8] Renewable Energy, An official publication of the World Renewable Energy Network, Affiliated to UNESCO, 2002.
- [9] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller et B. S. Sy, Le pompage Photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des Ingénieurs et des Techniciens, Université d'Ottawa, Canada, 1998.
- [10] M. Sadok, Contribution a l'étude des performances d'une installation Photovoltaïque de puissance, thèse de Magister en énergies renouvelables, Centre de développement des énergies renouvelables, Bouzaréah, Algérie, 1995.
- [11] B. Aissaoui, A. Bouchiba, Contribution du pompage solaire a l'alimentation en eau potable, Mémoire de fin d'études en hydraulique, Centre Universitaire de Bechar, 2004/2005.
- [12] C. Rezzoug, A. Hadji, contribution à l'étude et à la réalisation d'une petite station de pompage pédagogique, Mémoire de fin d'études en hydraulique, Centre Universitaire de Bechar, 2004/2005.
- [13] A. Hadj Arab et Col, Banc d'essais de systèmes de pompage photovoltaïque, Enersol'01-Adrar-Algérie, 2001.
- [14] A. Mehdaoui, recueils des travaux scientifiques et leurs valorisation, pour le dossier de promotion au poste d'attache de recherche Ingénieur Principal, station d'expérimentation des équipements solaires en milieu saharien ADRAR 2001.
- [15] Alain Ricaud, Photopiles solaires, presses polytechniques et universitaires romandes 2000.
- [16] Michel CAPDEROU, Atlas solaire de l'ALGERIE Tome 2, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme, office des publications universitaires 2004.
- [17] Serge DIETTE, Cours d'hydraulique du Batiment, Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme, couverture : Richard 1978.
- [18] Remini B., Achour B. and Kechad R., The Fogarra : a traditional system of irrigation in arid regions, GeoSci. Eng., 2014, LX(2), 32-39.

- [19] Rezzoug Ch., B. Remini, S. Hamoudi, The fate of water in the oasis of Ouakda between traditional systems and modern (region of Bechar, Southwest, Algeria), *J. fundam Appl. Sci.*, 2017, 9(1), 2017, 261-273.
- [20] Kishta A. M., Designing, Modelling and testing a solar water pump for developing countries, PhD thesis, Iowa University (USA), 2002.
- [21] Yaichi M., Maameri, A. and Fellah, M. K., Monitoring and evaluation of a PV pumping system performance installed in the Algeria's Sahara city of Adrar, *Int. J. Elec. Eng. And Inf.*, 2016, 8(2), 253-267.
- [22] Shinde V. B. and Wandre, S., S., Solar photovoltaic water pumping system for irrigation: A review, *Afr. J. Agr. Res.*, 2015, 10(22), 2267-2273.
- [23] Falcon S. and al., Development oh solar powered water pumping system, *Int. J. Innov. Res. In Sci. Tech.*, 2015, 1(12), 493-502.
- [24] Narale P. D., Rathore N. S. and Kothari S., Study of PV water pumping system for irrigation of horticulture crops, *Int. J. Eng. Sci. Inv.*, 2013, 2(12), 54-60.
- [25] Roy A., Islam W., Hasan S. M. and Nadjmulhoque S. M., Prospect of solar pumping in the northern area of Bangladesh, *Amer. J. Ren. Sust. En.*, 2015, 1(4), 172-179.
- [26] ABIDI S., REMINI B. 2011. Les foggaras de Touat : la fierté de la population locale [The foggaras of Touat: The pride of the local population]. *Annales des Sciences et Technologie (Ouargla University)*. Vol. 3. No. 2 p. 107– 113.
- [27] Benkhalifa A. Taghitbe a case study model for sustainable development? Workshop 'Knowledge and know-how and their impact on the valorization and sustainable management of resources', Taghit, Algeria. 2005.
- [28] Boualem REMINI, The role of the gallery in the functioning of the foggara, *Journal of wtaer and land development*, 2016, No. 29 (III–VI): 49–57
- [29] GOBLOT H. 1979. Les qanats une technique d'acquisition de l'eau [Qanats: a technique for acquiring water]. Paris. Mouton. ISBN 2-7193-0459-X pp. 231.
- [30] LIGHTFOOT D.R. 1996. Moroccan khattara: traditional irrigation and progressive desiccation. *Geoforum*. Vol. 27. No. 2 p. 261–273.
- [31] National Water Resources Agency (A.N.R.H) Bechar. Hydrogeological study of the region of Bechar. Internal report, Algeria. 2015.
- [32] REMINI B., ACHOUR B. 2013a. Foggaras of Ahaggar: Disappearance of a hydraulic heritage. *Larhyss Journal*. No. 14 p. 149–159.
- [33] REMINI B., ACHOUR B. 2013b. The foggaras of In Salah (Algeria): The forgotten heritage. *Larhyss Journal*. No. 15 p. 85–95.
- [34] REMINI B., ACHOUR B. 2013c. The triple foggara of Ouled Said (Algeria): The ingenuity of the Saharan peasantry. *Larhyss Journal*. No. 15 p. 113–122.
- [35] Remini B., Achour B. The foggara in Algeria: A global hydraulic heritage. *Journal of Water Sciences*. France, Volume 23, Number 2, p. 105-117. 2010.

- [36] REMINI B., ACHOUR B., ALBERGEL J. 2011. Timimoun'sfoggara (Algeria): An heritage in danger. *Arabian Journal of Geosciences*.Vol. 4. No. 3. DOI 10.1007/s12517-010-0139-9 p. 495–506.
- [37] REMINI B., ACHOUR B., KECHAD R. 2010. Les types de foggaras en Algérie [The types of foggara in Algeria]. *Revue Sciences de l'eau (Canada-France)*. Vol. 23. No. 2 p. 105–117.
- [38] REMINI B., ACHOUR B., KECHAD R. 2012a. Traditional techniques for increasing the discharge from qanats in Algeria.*Irrigation and Drainage Systems*.Vol. 25.No. 4 p.293–306. DOI: 10.1007/S10795-012-9125-6.
- [39] REMINI B., ACHOUR B., KECHAD R. 2014a. The collecting of groundwater by the qanats: A millennium technique decaying. *Larhyss Journal*. No. 20 p. 259–277.
- [40] Rezzoug C., B. Remini, Hamoudi S. The future of traditional water management after the invasion of modern irrigation systems.Oasis of Boukais, Southwest Algeria. *Five Continents Volume 4 / Number 10*. 2014.
- [40] REZZOUG C., REMINI B., HAMOUDI S. 2016. L'irrigation moderne dans l'oasis Lahmar (Bechar, Algérie): Problematique et consequences, *Larhyss Journal*. No. 25 p. 259–267.
- [41] REZZOUG C (2018). Traditional hydro-agricultural techniques and practices in the Oases of Saoura: Current situation and prospects, doctoral thesis. University of Chlef. Algeria.
- [42] REZZOUG C, REMINI B, HAMOUDI S (2017). The knowledges of traditional irrigation in the oasis of Kerzaz in south-west Algerian: legacy and development. *J. Fundam. Appl. Sci*, 9(1), 261-273.
- [43] SALMI S. MAMOUNI A (2014).Ancestral study of hydro-agricultural irrigation techniques in the Lahmar oasis (Bechar W), University of Bechar, Algeria.
- [44] H. Djarfour, A. Okbaoui (2017), Optimisation des Caractéristiques des Pompes PV Couplées et leur Contribution à Préserver les Systèmes de Captage par Foggara, Mémoire de Master en hydraulique urbaine, Université Tahri M. de Bechar, Algérie.

RÉFÉRENCES WEBOGRAPHIQUES :

WWW.énergiesnouvelles.com

WWW.RETscreen.net

WWW.Outilssolaires.com

WWW.googleimag.com