

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LARECHERCHESCIENTIFIQUE



Université Echahid Hamma Lakhdar
El-Oued



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique & de génie civil

MEMOIRE

*Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique
Option : Ouvrages hydrauliques*

THEME:

**CONTRIBUTION A L'ADAPTATION DES FORMULES
EMPIRIQUES CALCULANT LES PARAMETRES
CLIMATIQUES DU BILAN HYDRIQUE DANS LES
REGIONS ARIDES (CAS DE LA VALLEE D'OUED-SOUF)**

Dirigé par:

◆ Mr. KHECHANA Salim

PrésentéPar:

- ◆ Mr. BELAHCEN Mohammed Hanafi
- ◆ Mr. KHETTA Salah Eddine
- ◆ Mr. LACHHEB Mohammed Faouzi

Juin 2021

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier avant tout le bon Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la force d'élaborer ce travail.

C'est avec beaucoup de reconnaissance que nous adressons nos sincères remerciements à l'égard de notre promoteur [le Docteur KHECHANA Salim](#) pour avoir proposé ce thème et d'avoir suivi et dirigé ce travail, nous le remercions infiniment, pour son aide, ses conseils, ses orientations ainsi que ses remarques et ses critiques qui nous ont été d'un apport précieux, nos remerciements s'étendront aussi aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Nous adressons nos vifs remerciements à tous nos professeurs de l'université d'El-Oued qui ont contribué à notre formation durant notre parcours universitaire.

Enfin à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'étude sans oublier les responsables de l'ONM d'El Oued et Mr. Sahraoui B de la DRH d'El Oued pour son aide et soutien.

Et encore merci à tous.

ملخص

تتطلب الإدارة المستدامة للموارد المائية فهماً جيداً لشروط التوازن المائي بمنخفض وادي سوف الذي يتميز بالحرارة الشديدة وندرة الأمطار (متوسط هطول الأمطار السنوي أقل من 75 ملم) وهي منطقة شديدة الجفاف، يعتبر التبخر النتح أهم العوامل المدرجة في حساب الموازنة المائية. وهذا ما دفعنا إلى اختيار موضوعنا المتمثل في دراسة الصيغ التجريبية لتقييم التبخر النتح المتضمن في حساب الموازنة المائية لمنطقة الدراسة. قمنا بفحص العديد من الصيغ التجريبية لتقييم التبخر، وهي كالتالي : صيغة بنمان- مونتياث المعتمدة من طرف منظمة الفاو ، بلايني و كريدل ، تورك ، ثورنثوايت و علاقة الوكالة الوطنية للموارد المائية (ANRH). بعد القيام بدراسة مقارنة بين القيم التبخر النتح المقاسة والقيم المحسوبة بواسطة الصيغ المختلفة، وجدنا أن صيغة بنمان- مونتياث المعتمدة من طرف منظمة الفاو هي الأقرب والأنسب لمنطقة الدراسة، لذلك، نوصي باختبارها وتجربتها في مناطق مماثلة لها نفس الخصائص المناخية. في النهاية قمنا بحساب الموازنة المائية التي اتسمت بالعجز على مدار العام مما يلزمنا بسقي المحاصيل على مدار العام و بكميات مناسبة.

الكلمات المفتاحية : التبخر ، التبخر النتح ، الموازنة المائية ، الصيغ التجريبية ، العوامل المناخية ، الإدارة المستدامة للموارد المائية ، دراسة مقارنة.

Résumé

La gestion durable des ressources en eau nécessite une bonne compréhension des conditions d'équilibre hydrique dans la vallée d'Oued Souf, qui se caractérise par une chaleur extrême et une rareté des pluies (les précipitations annuelles moyennes sont inférieures à 75 mm), qui est une zone très sèche, et l'évapotranspiration est le facteur le plus important inclus dans le calcul du bilan hydrique. Cela nous a incité à choisir notre sujet d'étude qui est "L'adaptation des formules empiriques pour évaluer l'évapotranspiration impliquée dans le calcul du bilan hydrique de la zone d'étude. Nous avons examiné plusieurs formules pour évaluer l'évapotranspiration, qui sont les suivantes: la formule Penman-Montieth approuvée par la FAO, Blaney et Criddle, Turc, Thornthwaite et la relation de l'Agence nationale des ressources Hydriques (ANRH). Après avoir mené une étude comparative entre les valeurs mesurées d'évapotranspiration et les valeurs calculées par les différentes formules, nous avons constaté que la formule Penman - Montieth adoptée par la FAO est la plus proche et la plus appropriée de la zone d'étude, par conséquent, nous recommandons qu'elle soit testée dans des zones similaires avec les mêmes caractéristiques climatiques. Au final, nous avons calculé le bilan hydrique qui s'est caractérisé par un déficit tout au long de l'année, ce qui nous oblige à arroser les cultures tout au long de l'année et en quantités appropriées.

Mots clés: évaporation, évapotranspiration, bilan hydrique, formules empiriques, facteurs climatiques, gestion durable des ressources en eau, étude comparative.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	
Résumé	
Table des matières	i
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	v
Liste des abréviations	vii
Introduction générale	01
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	
Introduction	04
I.1 Situation géographique	04
I.2 Evolution de la population	06
I.3 Activité économique d'El-Oued	07
I.4 Ressources hydriques	09
I.5 Situation climatologique	09
I.5.1 La température	09
I.5.2 La précipitation	10
I.5.3 Détermination des périodes sèches et de l'étage bioclimatique de la région d'El-Oued	11
I.5.4 L'évaporation	14
I.5.5 L'humidité	15
I.5.6 La durée d'insolation	16
I.5.7 Le vent	17
Conclusion	18
CHAPITRE II : GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE	
Introduction	20
II.1 Stratigraphie régionale	20
II.1.1 Formation de la Secondaire	20
II.1.1.1 Le Barrémien	20
II.1.1.2 L'Aptien	21
II.1.1.3 L'Albien	21
II.1.1.4 Le Vraconien	21
II.1.1.5 Le Cénomaniens	21
II.1.1.6 Le Turonien	21
II.1.1.7 Sénonien	22
II.1.1.7.1 Sénonien lagunaire	22

II.1.1.7.2 Sénonien carbonaté	22
II.1.2 Formation de la Tertiaire	22
II.1.2.1 L'Eocène	22
II.1.2.2 Le Mio-pliocène	22
II.1.3 Formations du Quaternaire	23
II.1.4 Interprétation des coupes géologiques	25
II.1.4.1 Coupe N°01.....	25
II.1.4.2 Coupe N°02.....	26
II.1.4.3 Coupe N°03.....	27
II.1.5 Tectonique	28
II.1.6 Relief	28
II.2 Cadre hydrogéologique	29
II.2.1 La nappe d'eau de surface (nappe libre)	30
II.2.2 La nappe de complexe terminale	30
II.2.2.1 Nappe de sable	30
II.2.2.2 Nappe calcaire	32
II.2.2.3 Nappe continentale intercalaire	32
Conclusion	33
CHAPITRE III: MOYENS DE MESURE ET METHODES D'ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION	
Introduction.....	35
Quelques définitions et concepts de base	35
III.1 Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration.....	38
III.1.1 Méthodes directes (moyens de mesure)	38
III.1.1.1 Bac d'évaporation « classe A »	39
III.1.1.2 Le bac Colorado	39
III.1.1.3 Evaporomètre de Piche	39
III.1.2 Méthodes indirectes (formules empiriques)	40
III.1.2.1 Formule de TURC	40
III.1.2.2 Formule de Blaney et Criddle.....	42
III.1.2.3 Formule de Thornthwaite (1944).....	44
III.1.2.4 Formule dite de l'ANRH	45
III.1.2.5 Formule de Penman- Monteith (FAO)	47

Conclusion	49
CHAPITRE IV COMPARAISON DE L'EVAPORATION MESUREE AVEC CELLE DES METHODES D'ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION	
IV.1 Introduction.....	51
Quelques définitions.....	51
IV.2 Evolutions mensuelles de l'évaporation mesurée et les ETP estimées par les formules empiriques.....	55
IV.3 Discussions des résultats	56
IV.3.1 Comparaison des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration.	56
IV.3.1.1 Comparaison graphique	58
IV.3.1.2 Comparaison avec l'erreur relatif	58
IV.3.1.3 Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée avec le logiciel "SPSS" ..	59
IV.3.1.4 Comparaison des moyennes par T-Test Pour échantillons indépendants..	64
IV.3.1.5 Comparaison selon les Paramètres Climatiques	64
IV.4 Calcul du bilan hydrique	65
IV.4.1 Facteurs influençant le bilan hydrique	65
Conclusion	67
Conclusion générale	68
Bibliographie	
ANNEXES	
Annexe N° 01	I
Annexe N° 02	II
Annexe N° 03	III

LISTE DE TABLEAUX

Titre	Page
Tableau I.1 : Estimation de la population.	7
Tableau I.2 : Répartition mensuelle de la température(1996-2020).	9
Tableau I.3 : Précipitations mensuelles, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).	10
Tableau I.4 : Evaporation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).	14
Tableau I.5 : Humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).	15
Tableau I.6 : Insolation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).	16
Tableau III.1 : Calcul de l'ETP par la formule de Turc.	42
Tableau III.2 : Calcul de l'ETP par la formule de Blaney&Criddle.	43
Tableau III.3 : Coefficient de correction f(h) pour une latitude de 33.5° N.	44
Tableau III.4 : Calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaite.	45
Tableau III.5 : Calcul de l'ETP par la formule de l'ANRH.	46
Tableau III.6 : Calcul de l'ETP par la formule de Penman&Montieth (FAO).	48
Tableau IV.1 : Les valeurs de l'ETP des six modèles.	55
Tableau IV.2 : Les valeurs de l'erreur relatif des cinq modèles.	58
Tableau IV.3 : Statistiques descriptives	60
Tableau IV.4 : Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée	61
Tableau IV.5 : Équation linéaire entre l'ETP mesurée et celle de différentes formules.	62
Tableau IV.6 : Résultats du T. test pour la différence entre les moyennes.	64
Tableau IV.7 : Calcul de bilan hydrique.	64

LISTE DES FIGURES

Titre	Page
Figure I.1: Situation géographique de la wilaya d'El-oued	5
Figure I.2: Situation géographique de la zone d'étude	6
Figure I.3 Répartition Générale des Terres (Source :D.S.A /W.d'El-Oued).	8
Figure I.4: Température moyenne mensuelle à la station de Guemmar au cours la période 1996 – 2020	10
Figure I.5: Précipitations moyenne mensuelles enregistrées à la station de Guemmar au cours la période 1996 – 2020	11
Figure I.6: Diagramme ombrothermique de « GAUSSEN» pour la région d'El oued.	12
Figure I.7: Diagramme d'Emberger de la station d'El-Oued (1996-2020)	13
Figure I.8: Evaporation moyenne mensuelle pour la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)	14
Figure I.9: L'humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)	15
Figure I.10: Durée d'insolation moyenne, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)	16
Figure II.1 : Plan Géologique de Grand Erg Oriental, (Khechana, S. 2014).	24
Figure II.2: Coupe géologique N° 1 (A.N.R.H, 1989) extrait à partir des logs lithologiques des forages	25
Figure II.3: Coupe géologique N° 2, Extraite à partir des logs lithologiques des forages (A.N.R.H, 1989)	26
Figure II.4: Coupe géologique N° 3 (A.N.R.H, 1989) extrait à partir des logslithologiques des forages	27
Figure II.5 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO, 1972)	29
Figure II.6: Coupe hydrogéologique de la région d'El Oued (Zidane, M L et Soufi, M. 2018)	31
Figure III.1: bac «classe A»	39
Figure III.2 : Le bac de colorado	39
Figure III.3 : Evaporomètre Piche	40
Figure III.4: Estimation de l'ETP avec la formule de Turc	42
Figure III.5: Estimation de l'ETP avec la formule de Blaney&Criddle	44
Figure III.6: Estimation de l'ETP avec la formule de Thornthwaite	45
Figure III.7: Estimation de l'ETP avec la formule de l'ANRH	46
Figure III.8: Estimation de l'ETP avec la formule de Penman&Montei	49
Figure IV. 1 : Illustration des limites haute et basse de la réserve utile (GCHP2E, 2016)	53
Figure.IV.2 Schéma d'un bilan hydrique	55
Figure IV.3 : Evolutions moyennes mensuelle des ETP estimées et de l'évaporation de Piche, pour la région d'Oued Souf au cours de la période	56

(1996 - 2020).	
Figure IV.4 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & $ETP_{Bl/Cr}$	59
Figure IV.5 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{ANRH}	59
Figure IV.6 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{Thornt}	59
Figure IV.8 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{Penman}	59
Figure IV.9 : régression linéaire entre les valeurs de l'ETP mesurées et l'ETP calculées par les cinq formules	63

LISTE DES ABREVIATIONS

ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydriques

CI: Continental Intercalaire

CT: Complexe Terminal

DSA : Direction des Services Agricoles.

DRH : Direction des Ressources Hydriques.

FAO : Food and Agriculture Organization.

ONM : Office National Météorologique.

Introduction générale

La plupart des pays en voie de développement Comme notre pays, se plaignent d'un manque évident d'études et de recherches liées au climat, en particulier ceux qui s'intéressent aux bilans hydriques qui jouent un rôle dans la croissance économique et agricole en particulier, qui a un rôle de premier plan dans la détermination des besoins en eau des plantes et les cultures, c'est ce qui nous a motivé à choisir ce sujet intéressant et important, et pour notre choix d'Oued Souf, est dû à son importance économique en termes d'agriculture, car il se classe parmi les premiers au niveau national dans la production de certaines cultures agricoles telles que pommes de terre et dattes.

L'évaporation dans une région représente l'intégralité de l'eau qui pénètre dans l'atmosphère de manière gazeuse depuis la surface de la terre et sur celle-ci, la perte d'eau est susceptible de se produire dans les mêmes conditions lorsqu'elle n'est plus un facteur limitant. Il est clair que la connaissance de ces deux données est nécessaire pour étudier la circulation de l'eau ou pour déterminer les besoins en eau des cultures.

L'évaporation est une variable clé du cycle hydrologique, nous permettant de comprendre les mécanismes qui régissent la relation entre les eaux de surface et les eaux souterraines. D'autre part, l'étude de ce paramètre est d'une grande importance pour évaluer les besoins en eau d'irrigation et les fluctuations des niveaux de mesure de la pression des eaux souterraines, après le changement climatique.

Cependant, le développement social et économique important que connaît la région d'Oued Souf et ses investissements dans des projets agricoles est entravé par l'insuffisance des ressources en eau et ce déficit en eau nécessite également une gestion rationnelle.

Notre choix de la zone d'étude n'est pas venu par hasard, mais parce que tout d'abord, comme mentionné précédemment, elle se caractérise par son importance économique. Cela se caractérise également par un climat sec avec peu de précipitations, ce qui en fait une zone dépendante de l'irrigation sur les eaux souterraines comme seule source d'irrigation et qui donne à la plante ce dont elle a besoin au bon moment.

L'estimation de l'évapotranspiration est une étape essentielle dans la modélisation de la production agricole et la planification de l'irrigation. Dans notre étude, une comparaison de cinq méthodes d'estimation de l'évapotranspiration a été faite: Blaney-Criddle, Thornthwaite, Turc, Penman et Monteith - approuvées par FAO et la formule approuvée par l'agence nationale des ressources en eau (ANRH).

L'étude comparative entre les différentes équations empiriques et entre les mesures prises par l'évaporomètre Piche a montré que la formule de Penman et Monteith approuvée par FAO est la méthode la plus appropriée pour calculer l'ETP comme alternative au manque de données ou au manque de mesures, non seulement pour la zone d'étude mais dans toute zone avec les mêmes conditions et caractéristiques climatiques.

Nous avons adopté des outils statistiques tels que l'erreur relative et l'équation linéaire pour déterminer le coefficient de corrélation, le test T, la moyenne arithmétique et l'écart type, et au final nous avons calculé le bilan hydrique qui souffre d'un déficit tout au long de l'année.

Nous avons tenté de faire de cette étude une référence au profit des étudiants et des chercheurs universitaires spécialisés dans le domaine de l'hydrologie et de l'agriculture, et ce, en adoptant une méthode simple et facile, et son matériel est pleinement expliqué et illustré par les illustrations.

Nous nous sommes appuyés sur les données climatiques obtenues de la station météorologique de l'ONM de l'aéroport de Guemar pour une période de 25 ans (1996 à 2020).

Nous avons divisé notre mémoire en quatre chapitres détaillés comme suit:

- le premier chapitre : nous avons introduit la zone d'étude, qui est la vallée du Souf, qui est située dans le sud-est de l'Algérie, qui se caractérise par sa forte chaleur et la rareté des pluies.
- Le deuxième chapitre : nous avons présenté une étude géologique et hydrogéologique de la zone d'étude.
- Le troisième chapitre est consacré au calcul de l'évapotranspiration avec les différentes formules empiriques évoquées ci-dessus.
- le quatrième chapitre, une étude comparative de différentes formules empiriques et la sélection de la formule optimale et la plus adaptée à utiliser dans la zone d'étude, ainsi que des zones climatiquement similaires, et à la fin nous avons calculé le bilan hydrique de la région, s'appuyant sur les producteurs de pommes de terre et de palmiers en tant que produits distincts pour la région.

CHAPITRE I
PRÉSENTATION DE LA
ZONE D'ÉTUDE

Introduction

Dans ce chapitre, nous traiterons des généralités sur la zone d'étude, les caractéristiques les plus importantes de cette région, en termes de géographie, démographie, climat, activité économique et agricole.

Présentation de La zone d'étude

I.1 Situation Géographique

La wilaya d'Oued Souf est située dans le Sahara est d'Algérie, willaya depuis 1984, couvert une superficie totale de 37652 Km², et une population de 700905 habitants, se trouver à environ 700Km ou Sud -Est d'Alger (figure I.1), et 350 Km à l'Oust de Gabes (Tunisie). Après le nouveau découpage administratif publié dans le dernier numéro du Journal Officiel du 18 décembre 2019, n°78, l'arrêté présidentiel précisant les noms, le siège et la numérotation des Etats nouvellement créés, et ce après avoir été signé par le Président de la République, Monsieur Abdelmadjid Tebboune, Elle est limitée par :

- Les Wilayas de Biskra, Khenchela et Tébessa au nord,
- La Tunisie à l'est,
- Les Wilayas d' El Meghair et Touggourt à l'ouest,
- La Wilaya de Touggourt au Sud.

Notre zone d'étude présente la vallée d'Oued Souf, à 7° E et 33.5° N. Cette dernier se n'est pas un bassin versant mais une unité de ressources en eau qui est délimité par :

- Le grand arg orientale au sud,
- Une série de chotts au nord et à l'est,
- Oued Righ et ligne de palmeraie de Biskra à Touggourt à l'ouest.

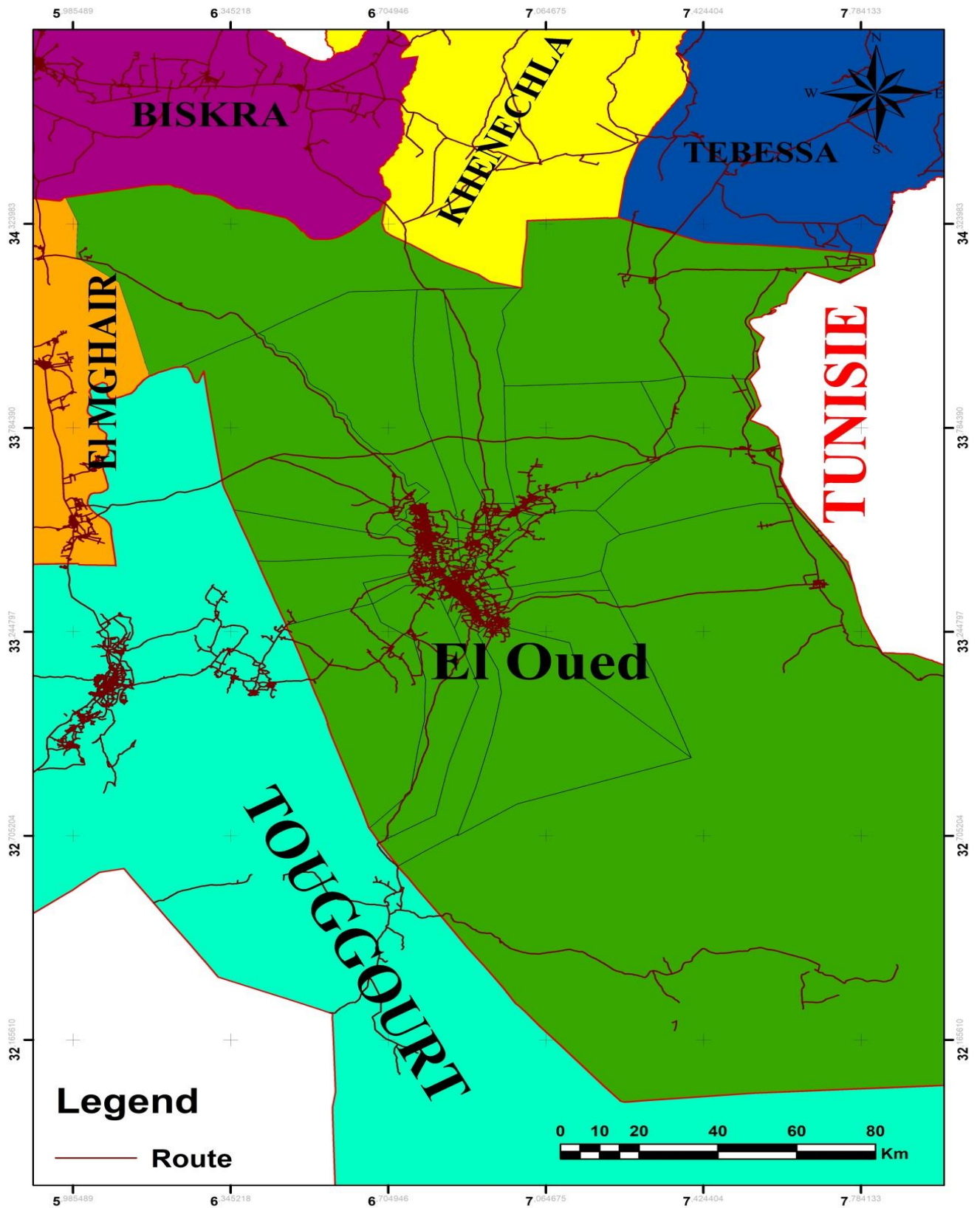


Figure I.1: Situation géographique de la wilaya d'El-oued

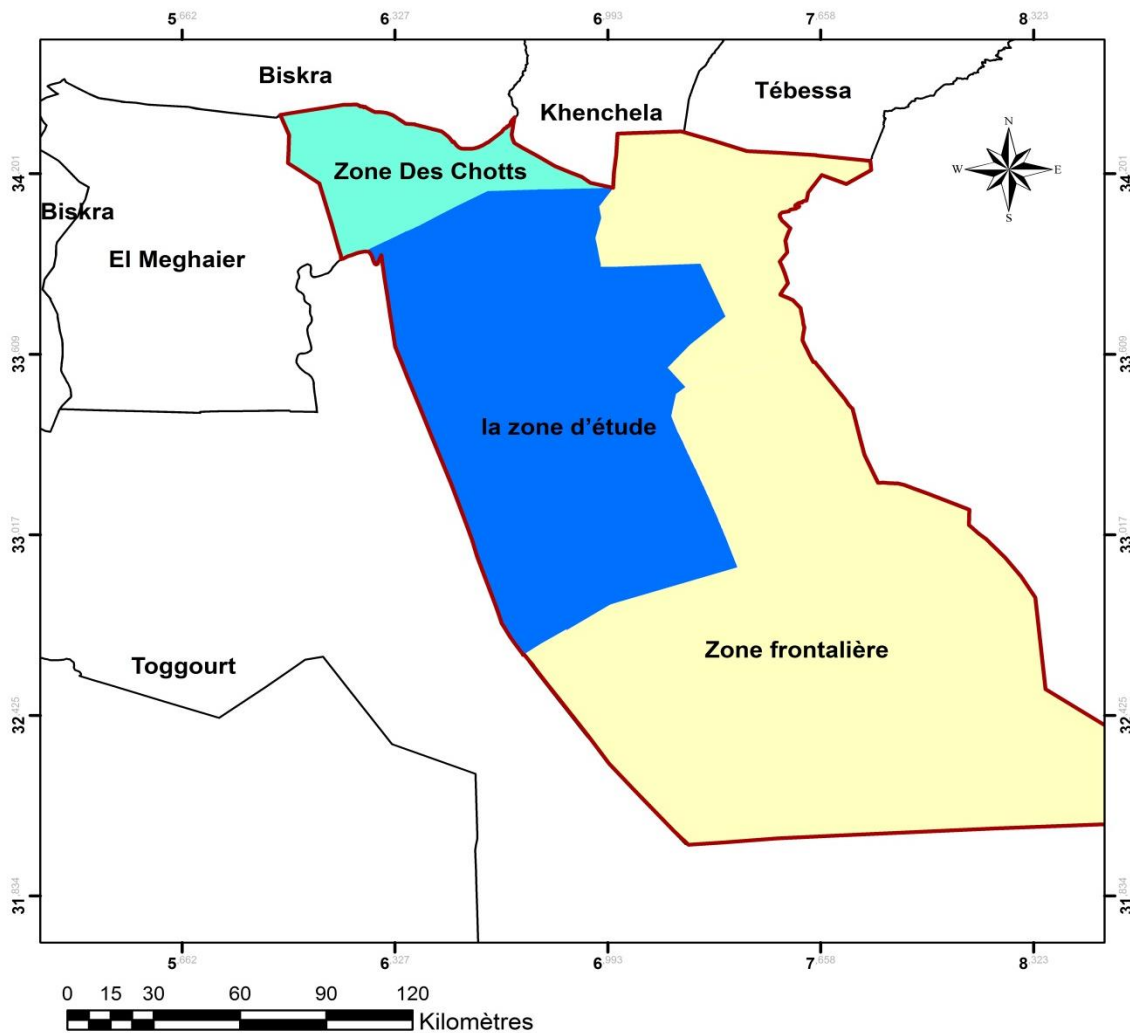


Figure I.2: Situation géographique de la zone d'étude

I.2 Evolution De La Population

La zone d'étude comprend 18 communes qui représentent une population totale de 661470 habitants, dont la superficie occupée est de 11738 Km².

Selon le tableau 1, nous remarquons que la commune la plus peuplée est celle d'El-Oued (2 478,51 hab/km²), suivie par la commune de Hassani Abdelkerim (566,21 hab/km²), par contre la commune d'El-Ogla à la plus faible densité de population (6,53 hab/km²).

Tableau I-1 Estimation de la population

N°	Commune	Population(hab)	Superficies(km ²)	Densité de la population (hab/km ²)
01	El-Oued	190 845	77	2 478,51
02	Kouinine	14 825	116	127,80
03	Reguiba	60 935	1966	30,99
04	Guemar	59 430	1264	47,02
05	Taghzout	19 000	539	35,25
06	Ourmes	7 755	443	17,50
07	Debila	34 920	78	447,69
08	HassaniAbdelkerim	32 840	58	566,21
09	HassiKhalifa	44 410	1112	39,94
10	Trifaoui	11 645	474	24,57
11	Magrane	32 885	618	53,21
12	SidiAoun	16 315	480	33,99
13	Robbah	30 385	499	60,89
14	Nakhla	18 475	700	26,39
15	El-Ogla	8 835	1352	6,53
16	Bayadha	44 730	139	321,80
16	MihOuansa	24 500	1111	22,05
18	OuedAllenda	8 740	712	12,27
Total		661470	11738	56.35

Situation Au 31/12/2020 Source :D.P.S.B /W.d'El-Oued.

I.3 Activité économique d'El-Oued

Les manifestations de la vie quotidienne traduisent un système d'organisation qui tient compte des possibilités économiques, de la vocation agricole, commerciale et artisanale. Les principales activités, exercés dans la région d'El-Oued sont :

1. La commerce

Grâce à la position géographique entre trois Etats (Algérie, Tunisie, Libye), El-Oued a acquis une position stratégique exceptionnelle, La ville d'El-Oued seule compte 13409 commerçants.

On peut dire que la ville d'El Oued est un centre d'échange commercial, très actif, ainsi elle constitue le centre d'achat de toute la région d'El-Oued, d' où l'importance de son marché.

2. L'artisanat

El Oued à toujours était un centre artisanal, notamment pour les objets liés à Artisans de production de biens et l'Artisans d'art. Il s'agit des tailleurs, des tapissiers, des maçons, des cordonniers, des menuisiers, des bijoutiers et des forgerons.

3. L'industrie

L'industrie a connu un développement remarquable ces derniers temps, le nombre de travailleurs ayant atteint 12133 travailleurs. Par 7% de l'effectif total, cela se traduit par l'émergence de plusieurs pôles multi-activités dans ce domaine de nombreuses industries ainsi que l'augmentation du nombre de PME productrices. Les communes de (Kouinine, Taghzout) sont à l'avant-garde en termes de pourcentage élevé de travailleurs employés Secteur industriel. Où la municipalité (Kouinine) arrive en tête du classement des travailleurs totaux, et cela est dû à la zone industrielle L'installation moderne sur le sol de la commune, dans laquelle plusieurs investissements ont été enregistrés, on retrouve alors la ville (Taghzout) en deuxième place sur le total des travailleurs, en raison de la propagation de petits ateliers, ainsi qu'à proximité de la région Zone Activité à (Quinin) de la commune de (Taghzout).

4. L'agriculture

L'état de la vallée étudiée se distingue par son caractère agricole, les terres exploitées représentant 40 % de la superficie totale (178 3472 km²) comme le montre le Figure I.3. Ces dernières décennies Souf a connue le développement de cultures maraîchères de plein champ, essentiellement la pomme de terre. La wilaya d'El Oued est classée première zone productrice en pomme de terre au niveau national où elle alimente le marché national à environ 40%.

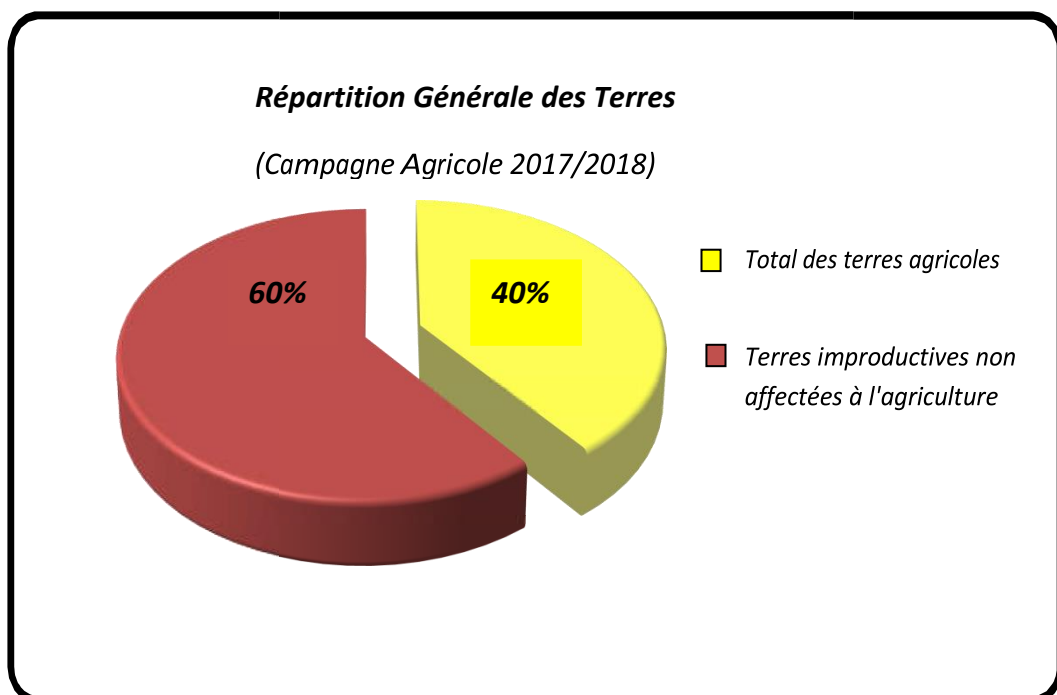


Figure I.3 Répartition Générale des Terres (Source :D.S.A /W.d'El-Oued).

I.4 Ressources Hydriques

Dans la région d'étude, la rareté des précipitations et l'augmentation de la demande sur l'eau, pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et pour l'industrie, nécessite le recours des ressources en eau souterraines, les prélèvements des eaux de complexe terminal et de continentale intercalaire augmentent chaque année.

I.5 Situation Climatologique

Le climat de la région est considéré comme un climat désertique et se caractérise par un été chaud et sec. La température atteint parfois 54 ° C, et un hiver froid et sec où la température atteint un peu temps jusqu'à 3 ° C. Nous avons obtenus toutes les données liées au climat (pluie, température, humidité, etc.) de la station conditions météorologiques à l'aéroport de Guemmar pour la période allant de 1996 à 2020 Il se résume comme suit:

I.5.1 La Température

En raison de la nature de la région, la chaleur est très importante, car c'est l'un des facteurs les plus importants qui jouent un rôle précisez l'activité agricole de la zone.

D'après ce qui est montré dans le tableau I.2 représentatif des variations mensuelles de température et la figure I.4, on note que la valeur maximale a été enregistrée au mois d'août à 43,90 ° C et la valeur la plus basse a été enregistrée au mois de janvier à 5,6 ° C.

Autrement dit, une différence de température de plus de 35 ° C, ce qui est une grande différence qui a un effet direct sur les cultures.

La température annuelle moyenne pour la période (1996-2020) est estimée à 23,3 ° C.

Tableau I.2 Répartition mensuelle de la température (1996-2020).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Max	17,9	20,9	25,6	30,1	35,5	41,3	43,9	37,5	38,0	30,1	23,8	19,4
Min	5,6	6,7	10,9	14,9	19,5	24,3	27,5	27,3	23,3	17,6	10,9	6,5
Moy	11,8	13,8	18,3	22,5	27,5	32,8	35,7	32,4	30,7	23,8	17,4	13,0

Source:ONM2021

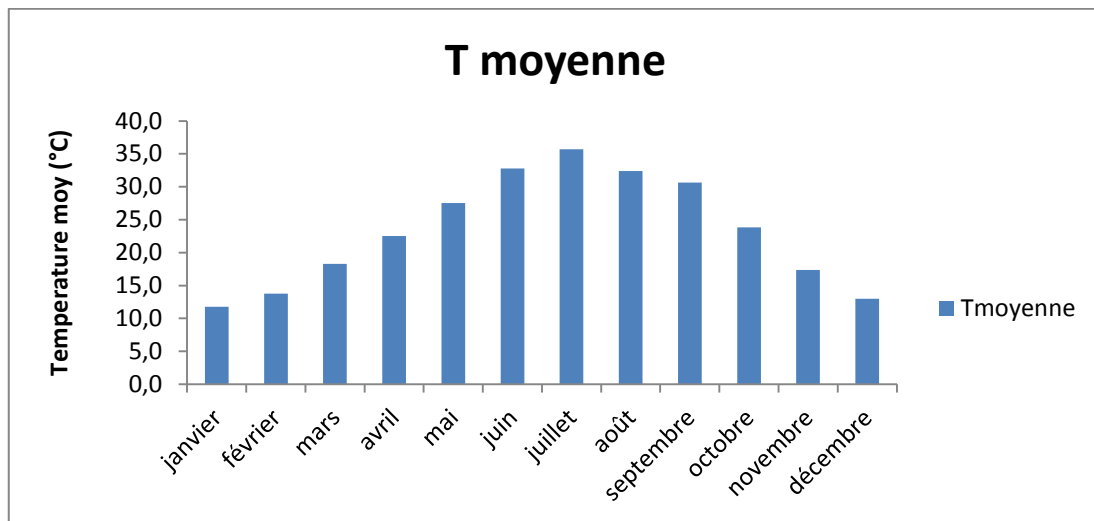


Figure I.4: Température moyenne mensuelle à la station de Guemmar au cours la période 1996 - 2020

I.5.2 La Précipitation

La région d'Oued Souf est caractérisée par des faibles précipitations en général, elle enregistre la plus grande valeur en hiver et la plus faible en été.

La précipitation annuelle moyenne est estimée (0,4 :16,4) mm, ce qui est une valeur faible dans une zone dans laquelle elle est située la valeur d'évaporation est très élevée car la valeur d'évaporation maximale a été enregistrée en juillet, en plus de la spécificité sols sableux à haute perméabilité.

La pluviométrie est définie comme une fluctuation observée d'année à autre et de mois à autre, avec des périodes exceptionnel là où la pluie tombe, provoquant la perte de grandes surfaces agricoles.

Tableau I.3 Précipitations mensuelles, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
p(mm)	16,4	5,4	6,4	5,9	4,8	1,5	0,4	1,5	6,5	8,4	10,6	7,2

Source: ONM 2021

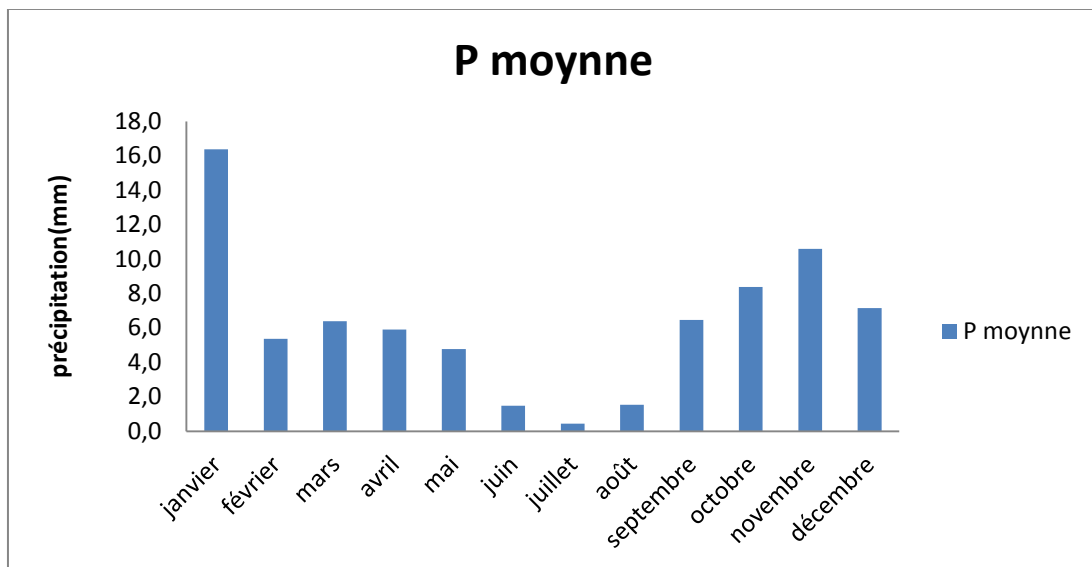


Figure I.5: Précipitations moyenne mensuelles enregistrées à la station de Guemmar au cours la période 1996 – 2020

I.5.3 Détermination des périodes sèches et de l'étage bioclimatique de la région d'El-Oued

Le diagramme d'ombrothermique de GAUSSEN permet déterminer les périodes sèches et humides d'une région quelconque à partir des séries de précipitation et de température (paramètres en valeurs moyennes mensuelles). Le principe de calcul est selon l'équation suivante (Saad Allah, 2018) :

$$P = 2T$$

P: Précipitation moyenne mensuelle (mm)

T: température moyenne mensuelle (°C)

Si la courbe des précipitations est au-dessus de la courbe de la température la période est humide si non elle est sèche. On constate, d'après figure I.6 suivant, que la région d'El-Oued est totalement sèche tout au long de l'année, aucune période humide n'était observée. Ceci confirme l'aspect saharien de la région.

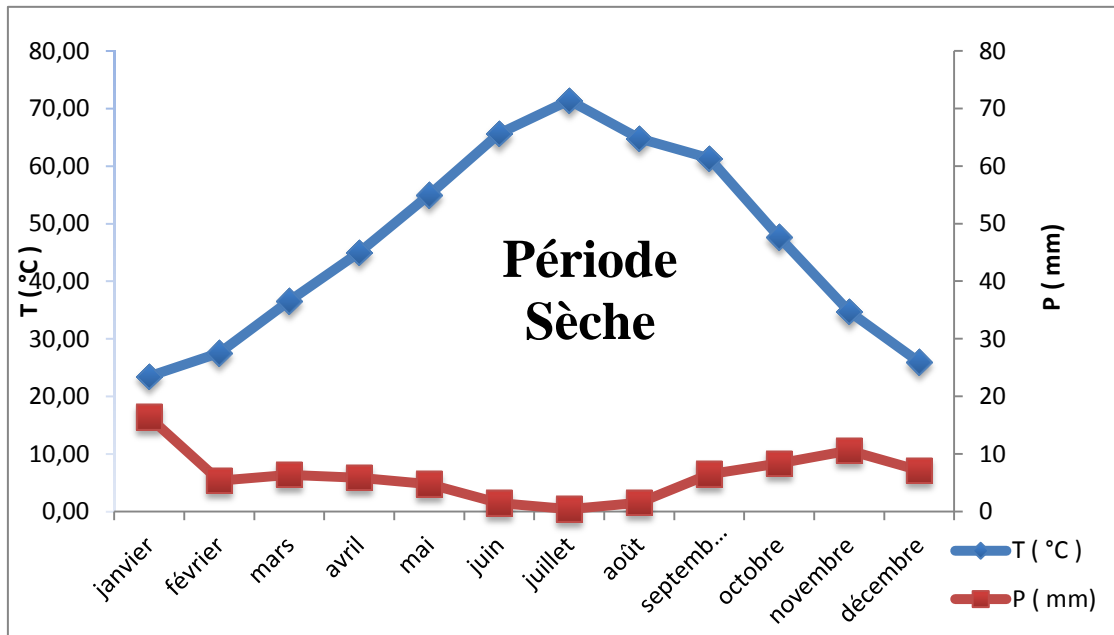


Figure I.6: Diagramme ombrothermique de « GAUSSEN» pour la région d'El oued.

Diagramme d'Emberger

Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, L. Emberger (1955) a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q_2 (figure.I-5). Ce quotient dépend de la précipitation moyenne annuelle et les moyennes des températures min et max, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds (Bouselsal, 2016).

$$Q_2 = 3.43 \cdot \frac{P}{M - m}$$

Q_2 : facteur des précipitations d'Emberger

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

M : moyenne des max du mois le plus chaud (°C).

m : moyenne des min du mois le plus froid (°C).

Pour le cas de la station de El-Oued au cours la période 1996 - 2020, on trouve

pour $Q_2 = \frac{3.43 \times 75}{35.7 \times 11.8} = 10.76 \text{ mm} / ^\circ\text{C}$

$t(m)=11.8 \text{ }^\circ\text{C}$ que la région se trouve dans l'étage bioclimatique « saharienne très chaud », voir figure I.7.

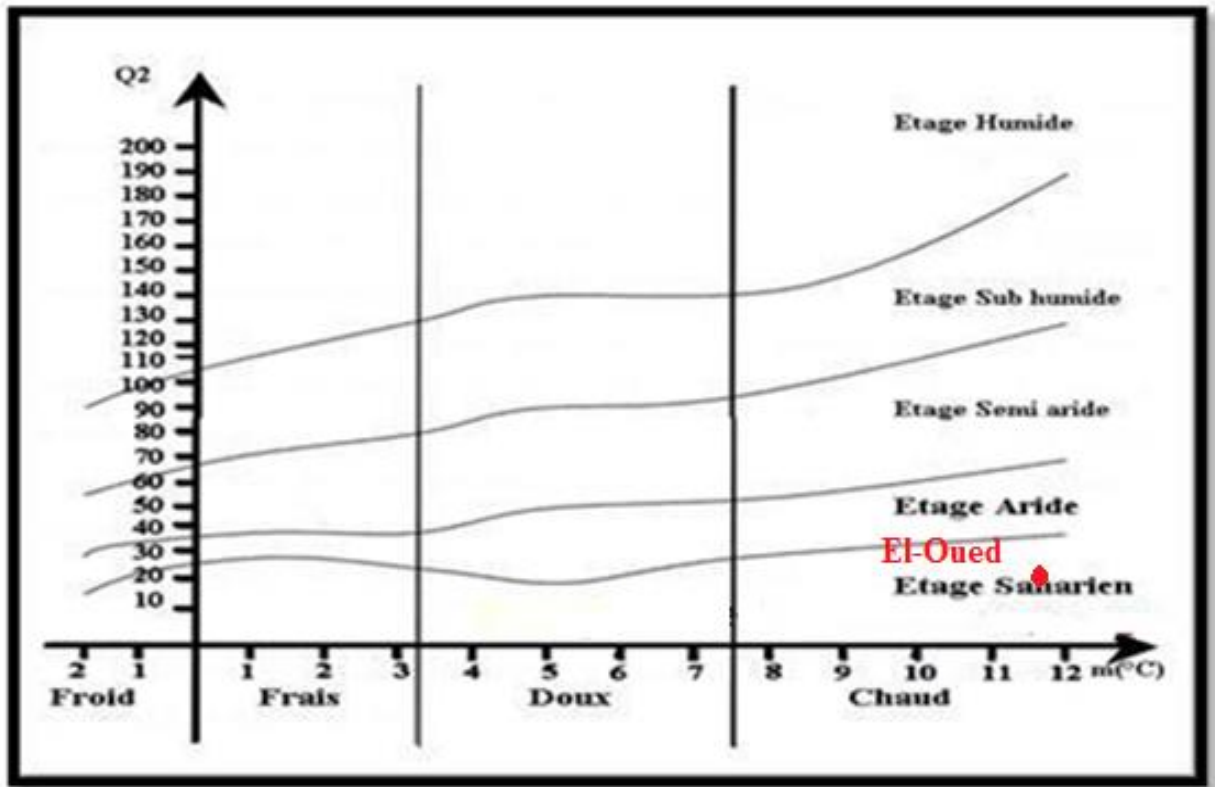


Figure I.7: Diagramme d'Emberger de la station d'El-Oued (1996-2020)

L'indice d'aridité de De Martonne (1926)

L'indice d'aridité de De Martonne ($\text{mm}/^{\circ}\text{C}$) est un indicateur utile pour caractériser le phénomène d'aridité en exprimant le caractère restrictif pour certaines formations végétales (Koussa, 2017):

$$\text{IDM} = P / (T + 10), \text{ où}$$

P est la quantité annuelle de précipitations,

T est la température moyenne annuelle de l'air.

De Martonne a proposé six grands types de climats selon les valeurs de cet indice.

- $\text{IDM} < 5$ Aridité absolue désert sans culture,
- 5 à 10 désert (aride) désert et steppe ; aucune culture sans irrigation,
- 10 à 20 semi-aride formations herbacées, steppes ou savanes. Irrigation nécessaire pour les cultures exigeant de l'humidité,
- 20 à 30 semi-humide prairie naturelle ; irrigation généralement non nécessaire,
- 30 à 40 humide les arbres jouent un rôle de plus en plus grand dans le paysage,
- $\text{IDM} > 40$ humide la forêt est partout la formation climatique. Les cultures de céréales tendent à être remplacées par les herbages.

Cet indice ne doit être utilisé que pour un découpage en grandes zones climatiques. Pour notre cas nous avons calculé cet indice comme suit:

$$\text{IDM} = p / T + 10 = 75 / 23.30 + 10 = 2.25 < 5 \text{ (climat hyper aride).}$$

I.5.4 L'évaporation

Le facteur d'évaporation a enregistré des valeurs importantes ces dernières années entre (84,7–339,4) mm. Son interprétation est la suivante: l'intensité de la chaleur et des précipitations, car ces deux facteurs ont connu une augmentation significative sans oublier l'effet celle sur le couvert végétal représente les changements relatifs d'évaporation pour la période (1996-2020).

Tableau I.4 : Evaporation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Evapor (mm)	99,4	157,5	157,5	204,2	270,7	301,3	339,4	300,2	193,9	147,3	103,2	84,7

Source:ONM2021

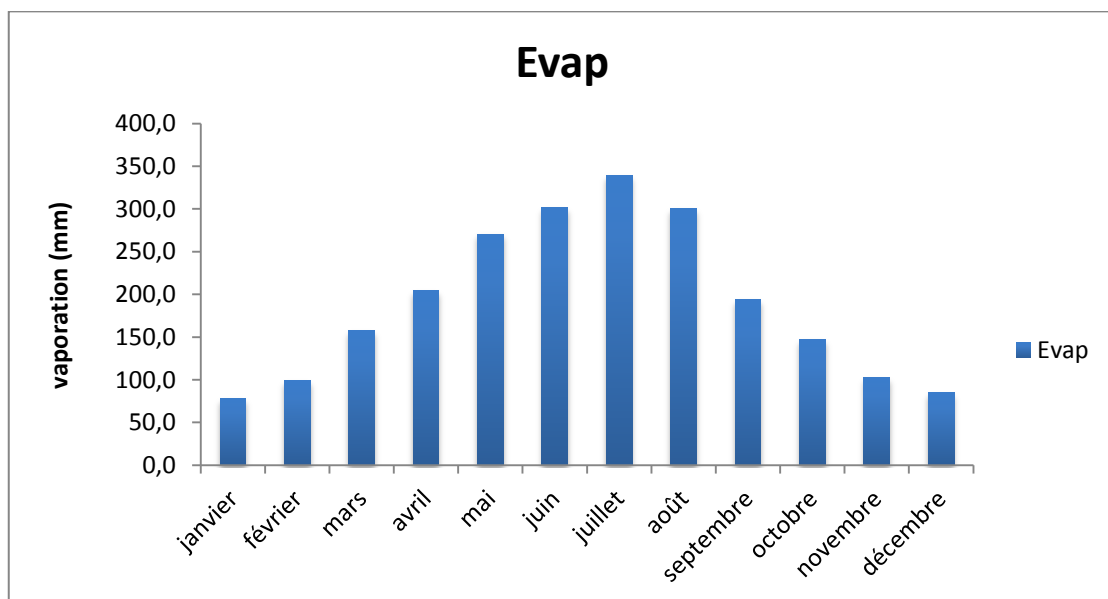


Figure I.8: Evaporation moyenne mensuelle pour la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

I.5.5 L'humidité

L'humidité est liée à la température et à la présence de plans d'eau, et elle varie selon les saisons. La zone où l'on peut dire que la wilaya d'El-Oued connaîtra Cinq mois humides d'octobre à le mois de février où le taux d'humidité dépasse 50%, le maximum du mois de décembre est de 63.5%.

Tableau I.5 : Humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Humidité %	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46,0	50,8	58,9	63,5

Source:ONM2021

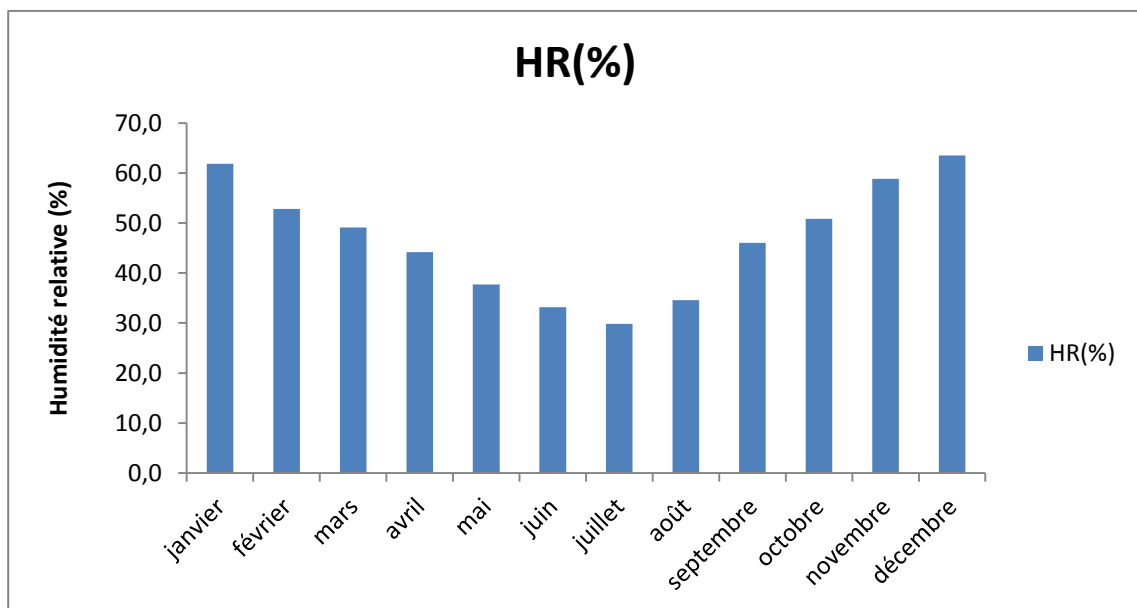


Figure I.9: L'humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

I.5.6 La durée d'insolation

L'insolation est la durée d'apparition du Soleil, elle est exprimée en heures. Elle varie en fonction de latitude et le taux de couverture nuageux. La région d'El-Oued reçoit une quantité d'insolation relativement très forte. On note que le mois de juillet et le plus ensoleillé d'une durée mensuelle de 356,2 heures et que le mois de décembre et le mois le moins ensoleillé d'une durée de 232 heures. Voir Tableau I.6 et figure I.10.

Tableau I.6 : Insolation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ensol (Heur)	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232

Source:ONM2021

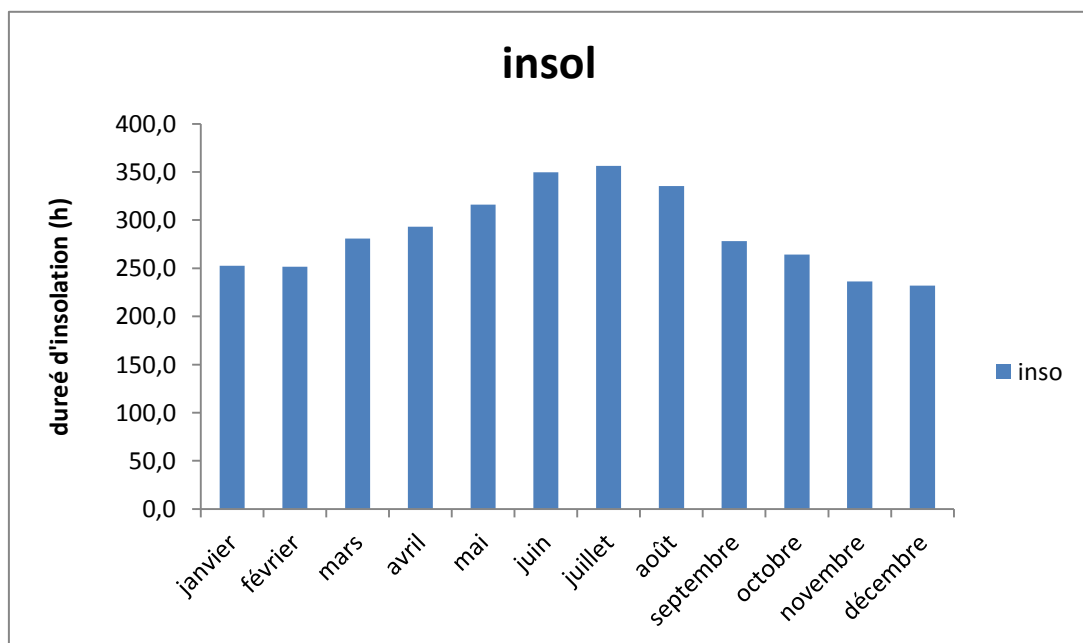


Figure I.10: Durée d'insolation moyenne, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)

I.5.7 Le Vent

Selon la rose des vents, figure I.11 observée pour les vents dans une direction est-nord-est, Il est le dominant suivi des vents du sud-ouest et se caractérise par sa température élevée et est connu localement sous le nom de al-shehili.

Dans la zone d'étude, les vents jouent un rôle important en raison de leur surface lorsqu'ils travaillent pour former des dunes Sablonneux. Dans la région, on distingue trois types de vents:

a. Al-Shehili

Il souffle en été du côté sud, et il est chargé d'air chaud, donc il fonctionne pour se soulever de la température, qui affecte négativement les cultures car elle accélère les processus d'évaporation et de transpiration, et ses plages de vitesse entre 10-17 km / h.

b. Al Dhahrawi

Sa vitesse varie entre 13-16 km / h, car il a des vitesses élevées, qui souffle au printemps dans la direction du nord-ouest est qu'il paralyse la circulation et travaille à enterrer les Ghitans avec du sable.

c. El-bahri

Ce sont des vents qui soufflent à l'automne, qui sont chargés d'un degré d'humidité considérable, avec une direction Est - Ouest, la vitesse varie entre 10 et 11 km / h.

Conclusion

Compte tenu de l'immensité de la zone d'étude et de sa distinction avec son climat désertique chaud et sec en été et froid et peu de pluie en hiver et son couvert végétal représenté dans les palmiers et certaines cultures saisonnières comme la culture de pommes de terre et de melons, et avec la présence de certains vents dominants tels que le Sirocco (al-shehili) chaud, qui affecte l'augmentation du phénomène d'évaporation et l'évapotranspiration.

CHAPITRE II
GÉOLOGIE ET
HYDROGÉOLOGIE

Introduction

La connaissance des caractéristiques géologiques est une nécessité pour chaque étude. C'est un outil qui nous aide à étudier le bilan hydrique.

La région d'étude est exactement dans la partie Nord de la plateforme saharienne caractérisée par des formations détritiques particulièrement sableuses, elles apparaissent sous forme de dunes et anti dunes. Car le sous-sol de la région étant sableux et assurant l'infiltration et la circulation souterraines des eaux, est essentiellement représenté par des formations sablo-gréseuses du Continental Intercalaire, et des accumulations sableuses Fulvio- lacustres de tertiaire continental.

Sur l'ensemble de la région d'El-Oued, les formations Mio-pliocènes sont recouvertes par une considérable épaisseur de dépôts Quaternaires présentés sous forme de dunes donnant naissance à un immense Erg qui lui-même fait partie de l'extension du grand Erg oriental.

II.1 Stratigraphie régionale

D'après (Cornet 1964, Bel 1968) et les coupes de sondages établies à partir des forages, les profondeurs des étages varient d'une région à une autre.

Sur la base des logs de forage de l'Albien faite par l'ANRH (1993) sur la région d'Oued Souf, nous citons les principales strates repérées dans cette région, en allant de la plus ancienne vers le plus récente.

II. 1.1 Formation de la Secondaire

II.1.1.1 Le Barrémien

Cet étage est capté par tous les forages du continental intercalaire réalisés dans cette région; il présente une lithologie d'alternance de grès avec passages d'argiles et parfois des intercalations de calcaire dolomitique, on rencontre également des sables avec présence de silex. L'épaisseur moyenne de cet étage est de l'ordre de 200 à 230 mètres (Sahraoui, 2016).

II.1.1.2 L'Aptien

Comme le Barrémien, ce dernier est constitué principalement par des formations dolomitiques, marneuses et marno-calcaires. D'après les coupes géologiques des forages réalisés dans la région, l'Aptien est le seul étage dont l'épaisseur ne dépasse pas les 30 mètres (Boulifa, 2012).

II.1.1.3 L'Albien

Cet étage est constitué par une alternance de marnes, de grès de sables et par des calcaires avec passages de silex et d'argile. La limite inférieure est constituée par le toit de la barre aptienne, alors que sa limite supérieure se caractérise par l'apparition des faciès argilo carbonatés. D'après les coupes de sondages des forages Albien, l'épaisseur de cet étage varie de 100 à 150 mètres; dans d'autres endroits elle peut atteindre 200 mètres (Sahraoui, 2016).

II.1.1.4 Le Vraconien

C'est une zone de transition entre l'Albien sableux et le Cénomaniens argilo-carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo-dolomitiques. On rencontre aussi des sables avec passages des grès à ciment calcaires. Cet étage constitue la couverture de l'albien par des niveaux argileux. L'épaisseur de cet étage dans toute la zone d'étude varie entre 250 m et 300 m.

II.1.1.5 Le Cénomaniens

Les forages réalisés dans cette région ont montré que cet étage est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. La limite inférieure de cet étage est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de dolomies qui le distingue nettement, tandis que sa limite supérieure caractérisée par l'apparition d'évaporites et de calcaires correspond à la base du Turonien. L'épaisseur de cet étage dans toute la zone d'étude est environ 120 m (Bouselsal, 2016)

II.1.1.6 Le Turonien

Cet étage représente la base du complexe terminal. Il est généralement carbonaté et constitué par des calcaires dolomitiques et des dolomies microcristallines compactes avec des intercalations de calcaires et parfois de marnes. Les forages de la région

montrent clairement que son épaisseur varie d'un endroit à un autre, elle dépasse parfois 650 m.

II.1.1.7 Sénonien

La plupart des études géologiques effectuées à travers le Sahara algérien montrent que le Sénonien est formé de deux ensembles très différents de point de vue faciès : l'un correspond au sénonien lagunaire, situé à la base, et le sénonien carbonaté situé à la partie supérieure.

II.1.1.7.1 Sénonien lagunaire

Le sénonien lagunaire est caractérisé par un faciès évaporitique avec des argiles ou ces dernières sont aisément différenciables de celles du Turonien. Il est constitué également d'anhydrite, de calcaires dolomitiques, d'argiles et surtout de bancs de sel massif dont l'épaisseur avoisine les 150 mètres.

La limite supérieure de cette formation coïncide avec le Turonien de la dernière intercalation anhydritique.

II.1.1.7.2 Sénonien carbonaté

Ce second sous étage est constitué par des dolomies, des calcaires dolomitiques, avec des intercalations marno-argileuses et en grande partie par des calcaires fissurés et de dolomies vacuolaires. Son épaisseur dépasse parfois 300 mètres. Il faut mentionner par ailleurs l'existence d'une continuité lithologique entre le Sénonien carbonaté et l'Eocène qui présentent tous les deux des calcaires de même nature avec la présence de nummulites.

II.1.2 Formation de la Tertiaire

II.1.2.1 L'Eocène

Cet étage est formé par des sables et des argiles parfois. Nous rencontrons du gypse et des graviers. Dans la région d'El-Oued cet étage est carbonaté à sa partie inférieure, alors que sa partie supérieure est marquée par des argiles de types lagunaires. L'épaisseur de cet étage varie entre 150 m et 200 m.

II.1.2.2 Le Mio-pliocène

Ce dernier repose en discordance indifféremment sur le primaire, d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens et l'Eocène d'autres part. Il

appartient à l'ensemble appelé communément complexe terminal (CT). La plupart des coupes de sondages captant cet horizon, montre que le Mio-Pliocène est constitué par un empilement de niveaux alternativement sableux, sablo-argileux avec des intercalations gypseuses, marneuses et des passages de grés et de calcaires. Cet horizon est composé de quatre niveaux :

- Niveau Argileux:

Il présente une faible épaisseur, son existence n'affecte que la partie centrale de Sahara oriental.

- Niveau Gres-Sableux

C'est le plus puissant par rapport aux autres, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara. C'est en fait à ce niveau que se trouve le principal horizon aquifère- appelé aussi complexe terminal (CT).

- Niveau Argilo-Sableux

Il ne présente pas un grand intérêt du point de vue hydrogéologique ; ses limites demeurent toujours confondues

- Niveau Sableux

Ce niveau constitué le deuxième horizon aquifère du complexe terminal. Donc du point de vue hydrogéologique les deux niveaux sableux (b et d) présentent un grand intérêt. Ils correspondent à la nappe des sables du complexe terminal.

II.1. 3 Formations du Quaternaire

Elles se présentent sous forme des dunes de sable dont le dépôt se poursuit sans doute encore de nos jours. Les terrains quaternaires représentent la couverture superficielle qui se localisent surtout au niveau des dépressions et couvrent la plus grande extension au niveau du bas Sahara, ils sont formés d'un matériel alluvial et éolien d'où on trouve la formation des alluvions sableuses et argileuses.

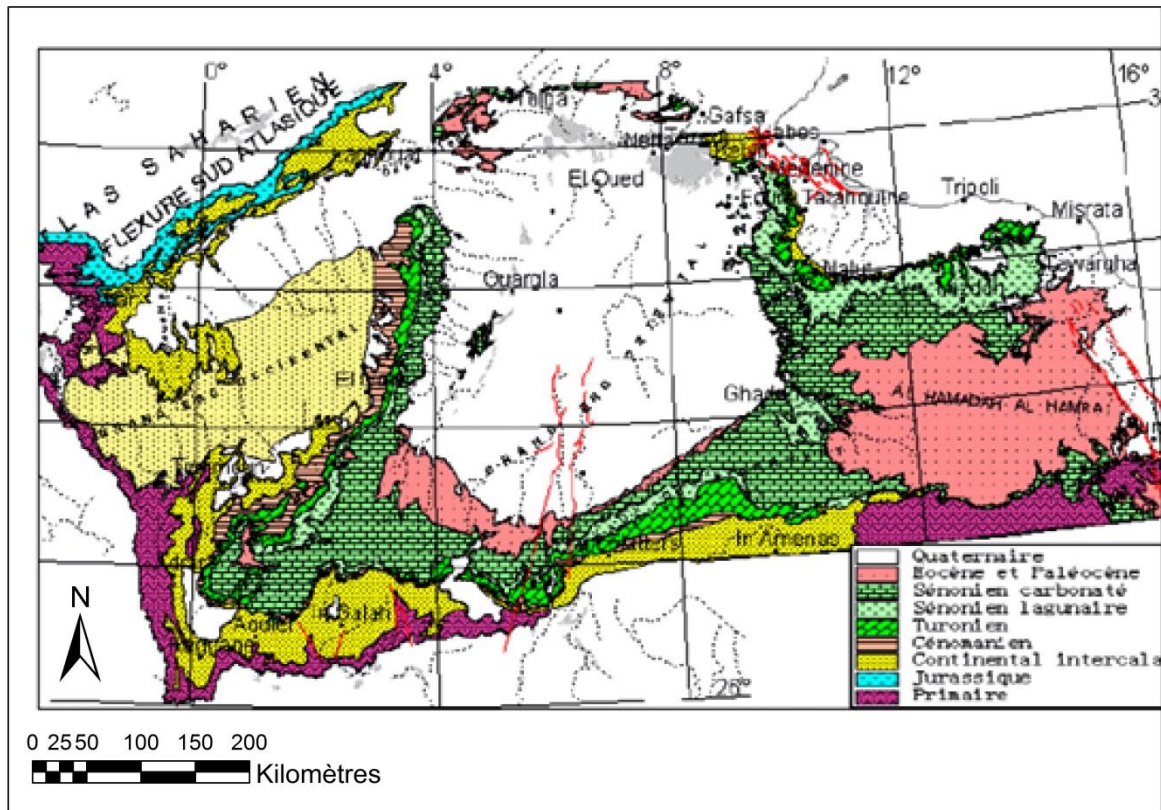


Figure II.1 : Plan Géologique de Grand Erg Oriental, (Khechana, S. 2014).

II.1.4 Interprétation des coupes géologiques

L'objectif de ces coupes géologiques est d'établir une corrélation lithologique du sous-sol, d'identifier l'extension géographique, l'épaisseur approximative des couches ainsi que l'épaisseur utile de la nappe phréatique dans la région d'El-Oued. Ces coupes sont vérifiées ensuite par les sondages électriques verticaux) (Bousalsal , 2009).

II.1.4.1 Coupe N°1

Cette coupe orientée Nord – Sud, faite sous la base de coupes de forages, on remarque que l'épaisseur de formation miopliocène (constituée par des argiles sableuses, de sable et de calcaire) diminue du Nord vers le Sud. Au niveau du H11.104, on remarque l'absence des formations quaternaires correspondant aux formations sableuses ; ce manque ne peut être expliqué que par l'effet d'une érosion éolienne, ces formations tendent à s'épaissir vers le Sud (Figure II.3).

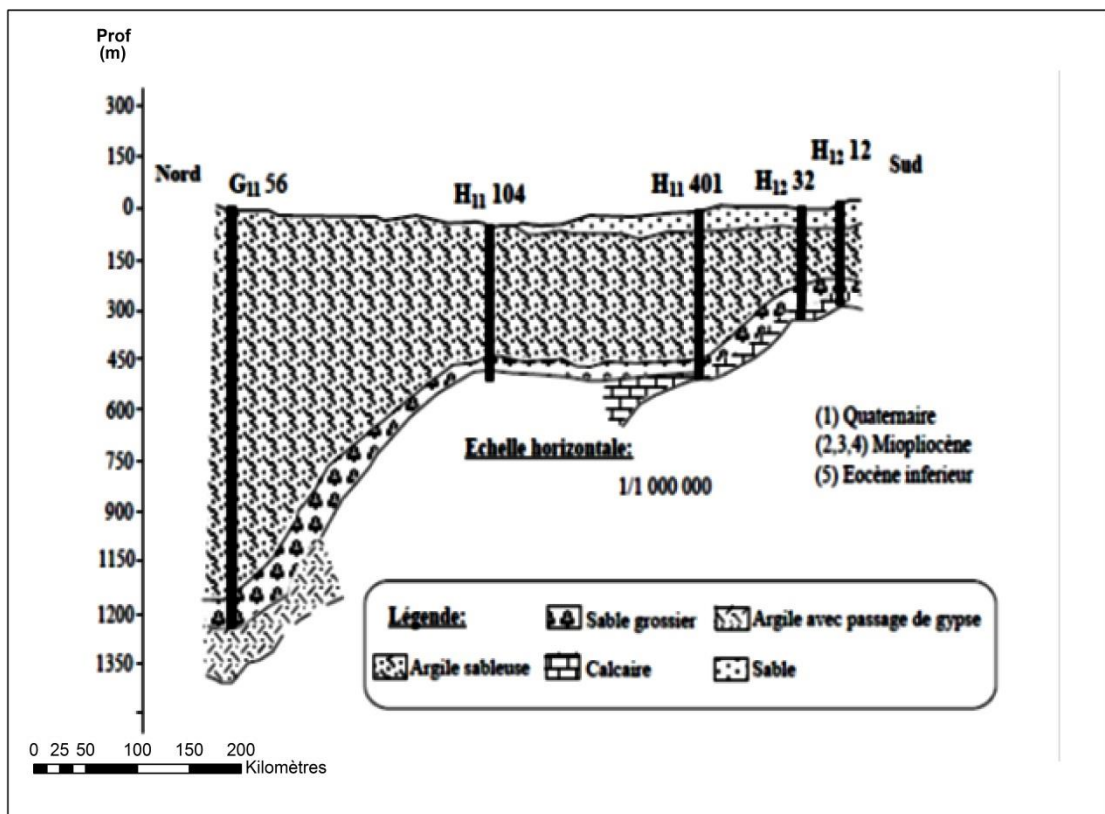


Figure II.2: Coupe géologique N° 1 (A.N.R.H, 1989) extrait à partir des logs lithologiques des forages

II.1.4.2 Coupe N°2

La coupe N° 2 orientée NE-SW, en allant de la région dite Merzaga vers Ouermès, on remarque au niveau du forage (H12-52), l'absence du Quaternaire, ceci ne peut être expliqué que par l'effet d'une érosion éolienne. Les formations miopliocènes sont caractérisées par une épaisseur considérable (plus de 200 m). Cette dernière devient régulière sur tout le reste de la région, au contraire de celle de Quaternaire qui est constituée par des sables qui changent d'une région à une autre (par exemple, au niveau du forage H12-540 l'épaisseur présente presque la moitié de celle de H12 -84) (Figure II.4).

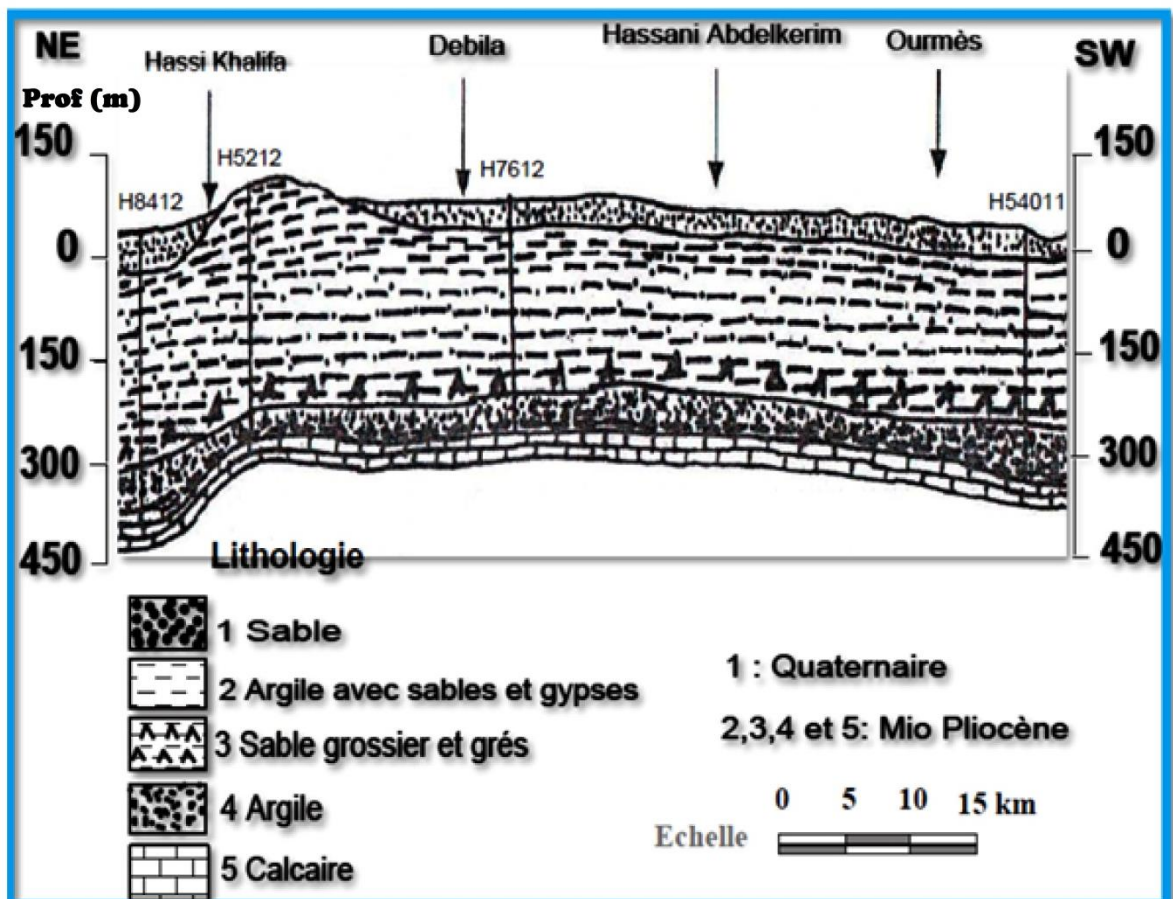


Figure II.3: Coupe géologique N° 2, Extraite à partir des logs lithologiques des forages (A.N.R.H, 1989)

II.1.4.3 Coupe N°03

La coupe N° 3 est orientée du Nord-Ouest vers le Sud-Est, elle est différente des autres surtout du point de vue stratification; cette dernière entre croisée, ce qui donne naissance à des «biseautages". Cette situation est bien visible dans les quatre premiers forages. On constate que l'épaisseur des formations quaternaires, est plus importante au Nord-Ouest qu'au Sud-est. (Figure II.5)

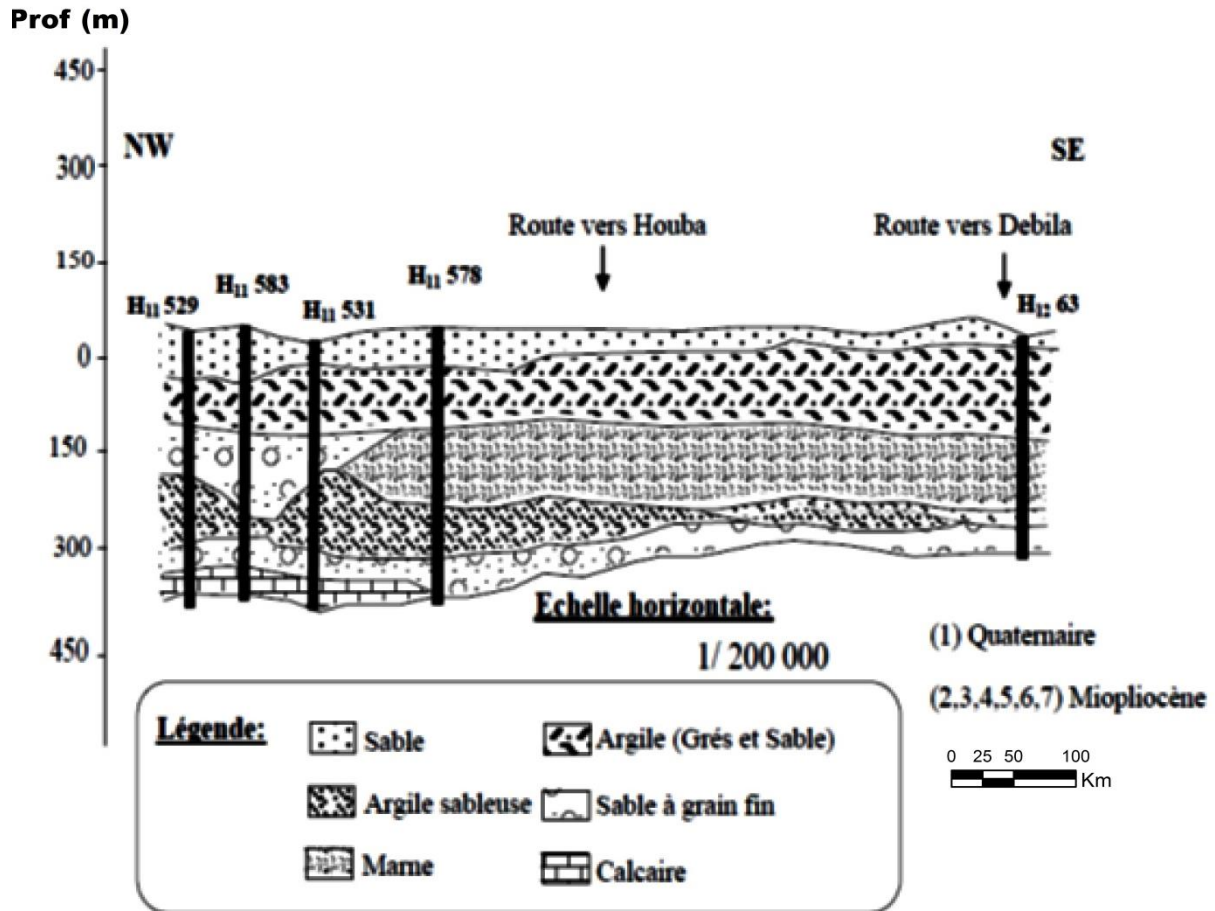


Figure II.4: Coupe géologique N° 3 (A.N.R.H, 1989) extrait à partir des logs lithologiques des forages

II.1.5 Tectonique

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional dont l'extension couvre une superficie de 780 000 km². Ce bassin, vaste zone d'épandage, constitue une importante dépression topographique, laquelle est sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques sub-verticaux.

La série sédimentaire lagunaire recouvrant la plate-forme crétacée forme un vaste synclinal dont le fond a un très grand rayon de courbure. Les courbes sédimentaires semblent s'épaissir du Nord d'El Oued vers le centre de cette dépression, ce qui montre que l'approfondissement suit de près la sédimentation. Donc si nous désirons retracer l'évènement paléogéographique du Souf, il faut noter qu'au cours de la jeunesse de l'immense dépression au début du Quaternaire et sous l'effet de la sédimentation, le centre de celle-ci (dépression) se déplace en fonction du temps vers le Nord tout en donnant naissance à des nouvelles dépressions correspondant actuellement à la zone des chotts, où leur naissance ne s'est effectuée qu'à la fin du Quaternaire.

Ces caractéristiques ont favorisé la formation dans oued Souf et dans tout le bas Sahara de plusieurs formations aquifères à comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs faciès.

L'aquifère Quaternaire d'oued Souf présente une épaisseur moyenne de 40 mètres. Son substratum est structuré en de nombreuses dépressions, dômes et sillons. Il affleure au Nord-Ouest de la région de Foulia et se situe à moins de 10 mètres de profondeur aux extrémités Nord-est de la région d'étude. La série sédimentaire lagunaire recouvrant la plate-forme crétacée forme un vaste synclinal dont le fond est doté d'un très grand rayon de courbure.

II.1.6 Relief

Le relief de la ville d'El Oued est caractérisé par l'existence de trois principales formes :

- Une région sableuse : qui se présente sous un double aspect ; l'Erg et le Sahara.
- Une forme de plateaux rocheux : qui s'étend vers le Sud avec une alternance de dunes et de crêtes rocheuses.

- Une zone de dépression : caractérisée par la présence d'une multitude de chotts qui plongent vers l'Est.

Il est à signaler que l'altitude diminue du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est pour devenir négative au niveau des chotts.

II. 2 Cadre hydrogéologique

Afin d'obtenir des résultats précis dans le domaine du bilan hydrique de la région, nous avons dû à une étude hydrogéologique, à travers laquelle nous apprenons à connaître la source d'eau,

Selon les études réalisées à Oued Souf ce qui prouve que les sources d'eau proviennent de la couche libre de surface et de l'aquifère du complexe terminal C.T Aussi albien et continental intercalaire C.I. Ces études ont montré que les couches de la région formée sont les suivantes, de haut en bas:

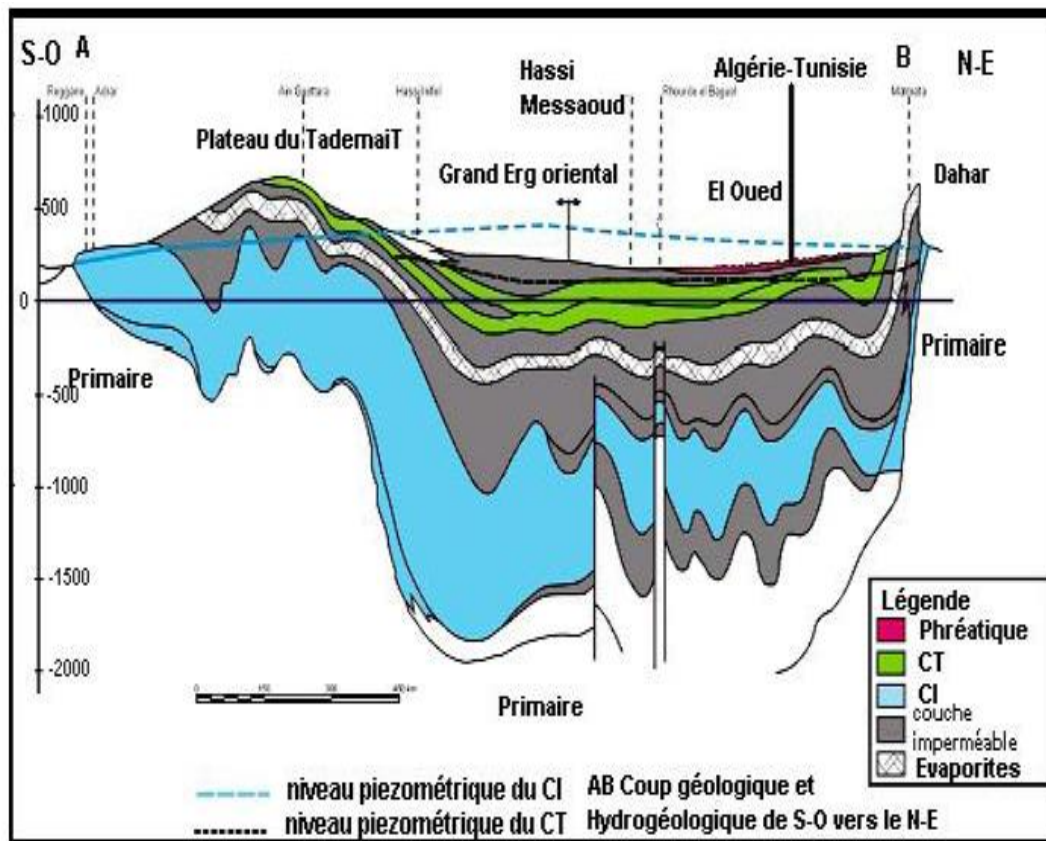


Figure II.5 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO, 1972)

II. 2.1 La nappe d'eau de surface (nappe libre)

Cette couche est présente dans toute la région, correspondant aux formations de surface de la Quatrième période, d'épaisseur de 50 mètres constituée principalement de sable et de grains fins entrelacés avec des tranches d'argile sableuse en gypseuse, cette formation encourage grandement le problème de la remontée et des infiltrations, le niveau d'eau y est à une profondeur de 15 mètres dans la ville El-Oued , à une profondeur de 9 mètres dans la ville de Guemmar et à une profondeur de 3 mètres dans la ville de Sidi Aoun. Les coupes géologiques montrent que cette couche est basée sur une base argileuse imperméable jusqu'à 200mètres d'épaisseur, comme nous l'avons dit, la zone la plus élevée est caractérisée par la perméabilité et la proximité de la surface, car elle est exploitée par plus de 500 puits. En tant qu'un source d'arrosage des zones agricoles. Les études hydrogéologiques réalisées en 1993 montrent la direction de l'écoulement de l'eau de cette couche superficielle, qui part du sud vers les zones de Shotts, c'est-à-dire du sud vers le nord-ouest. En suivant cet axe du sud au nord-ouest, le degré de salinité est plus au nord-ouest qu'au sud par lavage et dissolution de certaines des substances formant des couches dans l'eau, et cela a été confirmé par les études hydrochimiques réalisées en 1993 et 1994, qui montrent que la salinité varie du sud au nord La gamme ouest se situe entre 2 g / L au sud et 6 g / L au nord-ouest(Abdaoui,J,R. 2006).

II. 2.2 la nappe de complexe terminale

II. 2.2 .1 Nappe de sable

Au sein de ces niveaux sableux, vient s'engendrer deux nappes captives, dont la première correspond à la formation supérieure du Complexe Terminal appelée communément réservoir du « Sub-Souf ». Cette nappe constituée de sables grossiers et faisant partie du Complexe Terminal mène progressivement vers le Nord du Sahara en direction de la fosse Sud artésienne, dans la région d'étude elle se trouve à 280 mètres de profondeur.

Il faut mentionner également l'existence d'une deuxième nappe de sables d'âge Pontien. Au-dessus des bancs supérieurs de la nappe des calcaires en contact avec les marnes de l'Eocène inférieurs et des graviers siliceux constituant donc une deuxième nappe captive en continuité avec la nappe du Pontien du Sud Tunisien , la profondeur de

cette nappe varie entre 400 et 450 mètres. Quant à l'épaisseur utile de cette nappe, elle est de 50 mètres environ L'écoulement des eaux dans ces deux dernières nappes se fait du Sud-Ouest vers le Nord-Est, autrement dit vers la zone des chotts (Melghigh et Merouane).

Dans la zone à fortes exploitations telle que la ville d'El-Oued, l'extraction des eaux se fait par pompage. Par contre dans les régions où l'exploitation est moindre à Taleb Laarbi et Douar El Maa, la nappe est exploitée à ce jour artisanalement. C'est le cas de la nappe Pontienne.

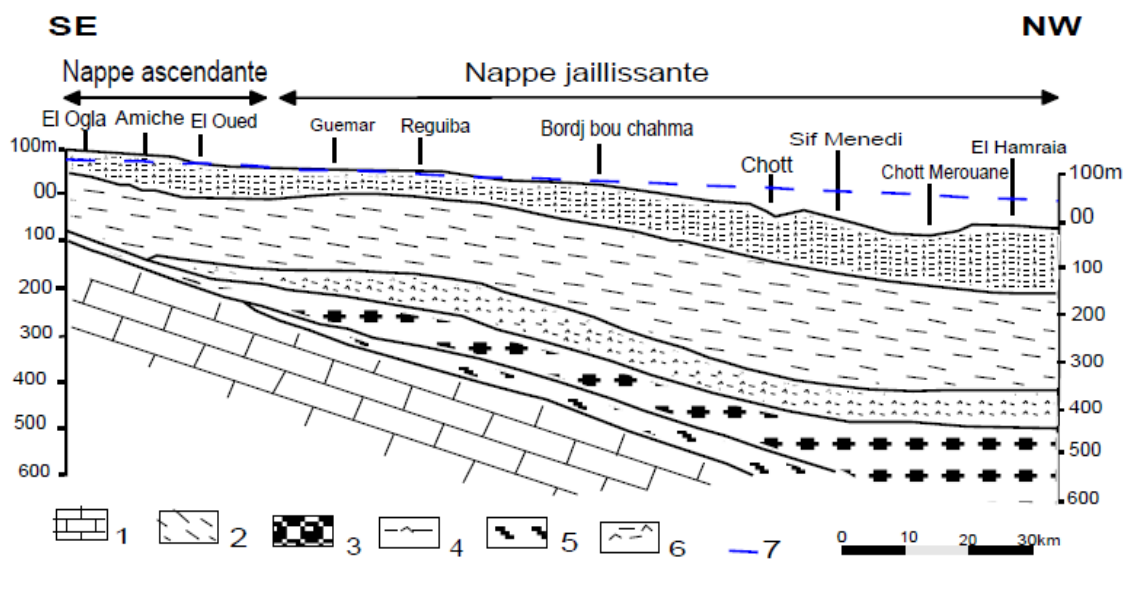


Figure II.6: Coupe hydrogéologique de la région d'El-Oued

(Zidane, M L et Soufi, M. 2018)

1. calcaire de l'Eocène inférieur marin et de l'Eocène moyen évaporitique.
2. Argiles sableuses et marnes de la base du continental terminal.
3. Sable grossiers à graviers du Pontien inférieur.
4. Argile set gypse dominants.
5. Argiles et sable dominants.
6. Argile, sable et gypse (3 derniers étages appartenant au Mio-Pliocène supérieur).
7. Niveau hydrostatique de la nappe du Pontien inférieur.

II. 2.2 .2 Nappe calcaire

Selon les puits réalisés dans la région, les formations carbonatées de l'éocène inférieur correspondent à des profondeurs comprises entre 500 et 800 Mètres, mais compte tenu de la salinité élevée de son eau, cette couche ne représente aucun avantage hydrogéologique.

II. 2.2 .3 Nappe continentale intercalaire

Dans la région d'étude, l'aquifère du continental intercalaire se présente sous forme d'une nappe artésienne, et elle constitue la plus grande réserve d'eau souterraine dans le Sahara algérien. Cette nappe est surmontée par celle du complexe terminal qui se présente sous forme d'une nappe libre.

On définit l'aquifère du Continental Intercalaire comme les formations continentales du Crétacé inférieur, comprises entre l'Albien et le Néocomien, constituées de sables, de grès avec intercalations d'argiles dont la profondeur du toit varie de 700 à 1200 m environ.

Le Continental Intercalaire est surmonté par les dépôts du crétacé supérieur à savoir: Cénomaniens, Turoniens et Sénoniens salifères qui peuvent atteindre une épaisseur de l'ordre de 220 m.

Le réservoir aquifère du Continental Intercalaire est particulier par son volume considérable du à la fois à son extension sur plus de 600.000 km² et son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. De grandes quantités d'eau y ont été stockées pendant les périodes pluvieuses du Quaternaire.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté de la topographie de la zone d'étude, qui est caractérisée par des dunes de sable dont la hauteur dans certaines zones atteint plus de 100 mètres, ce qui est considéré comme un obstacle face à l'activité humaine, qu'elle soit urbaine ou agricole, en raison de la faiblesse de la pente, qui rend difficile la réalisation du réseau d'assainissement et de drainage. Nous avons également présenté les formations géologiques de la zone d'étude et au final les couches hydrogéologiques.

CHAPITRE III

MOYENS DE MESURE ET

MÉTHODES

D'ESTIMATION DE

L'ÉVAPOTRANSPIRATION

Introduction

L'évapotranspiration très importante dans le bilan hydrique. La précision de son estimation reste donc très utile, puisque à partir de l'évapotranspiration va dépendre les besoins en eau des cultures, et donc des régimes d'irrigation nécessaires au bon développement des cultures. Nous allons présenter dans ce chapitre les différents moyens de mesure et les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration.

Quelques définitions et concepts de base

1. L'évaporation

L'évaporation est un passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux. Ce phénomène est donc une vaporisation progressive. Explication : lorsqu'il existe un volume libre au-dessus d'un liquide, une fraction des molécules composant le liquide est sous forme gazeuse. à l'équilibre, la quantité de matière sous forme gazeuse définit la pression de vapeur saturante dans le cas d'un liquide (solvant) pur, et qui dépend de la température. Cette pression peut être partielle ou totale.

2. Transpiration

La transpiration est le processus physiologique naturel par lequel l'eau stockée sous forme d'humidité du sol est extraite par les racines des plantes, passe à travers leur corps et est évaporée par les stomates de leurs feuilles.

La quantité d'eau stockée par une plante n'atteint pas l'un pour cent de celle qu'elle perd ainsi durant sa période de croissance. D'un point de vue hydrologique, les plantes se comportent, par conséquent, comme des pompes tirant l'eau du sol et la remontant vers l'atmosphère. Il est difficile de procéder à des estimations précises de la quantité d'eau transpirée en raison des nombreuses variables responsables du processus. Les estimations disponibles doivent être utilisées avec prudence, en tenant compte des conditions dans lesquelles elles ont été obtenues. Il faut disposer des relations appropriées entre les facteurs climatiques et la transpiration si on veut faire un usage général de données obtenues dans une région climatique particulière.

La transpiration est contrôlée par des facteurs physiologiques et environnementaux. Les stomates ont tendance à s'ouvrir ou à se fermer en réponse aux conditions environnementales comme la lumière ou l'obscurité et le chaud ou le froid.

Les facteurs environnementaux influant sur la transpiration sont essentiellement les mêmes que pour l'évaporation, quoique légèrement différents. D'un point de vue pratique, le gradient de pression de vapeur, la température, la radiation solaire, le vent, l'humidité disponible dans le sol sont les plus importants facteurs influençant la transpiration.

3. Évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) désigne tous les processus par lesquels l'eau en phase liquide ou solide à la surface de la Terre devient de la vapeur d'eau. Elle combine évaporation et transpiration.

L'évaporation implique le transfert d'eau vers l'atmosphère à partir de surfaces telles que les eaux libres, les sols nus, la neige (glace) et la végétation. La transpiration découle de la circulation de l'eau à l'intérieur des plantes et la perte subséquente d'eau sous forme de vapeur à travers les stomates de leurs feuilles. Le terme ET est généralement utilisé parce que l'évaporation et la transpiration se produisent simultanément et qu'il n'y a pas de moyen facile de les distinguer. Par exemple, lorsqu'une plante est petite et que la superficie végétale est faible par rapport à la surface du sol, c'est l'évaporation qui domine (Hajji, 2020).

4. Évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence (ET₀) est un concept utilisé dans différentes méthodes d'estimation. C'est une valeur pour une végétation choisie, dans des conditions hydriques réelles, permettant ensuite de déduire l'évapotranspiration pour d'autres couverts végétaux. Cet usage pratique d'une culture de référence est lié à la faible variation de l'évapotranspiration potentielle selon les différents végétaux, dans de généralement pour les besoins de l'agriculture.

5. Évapotranspiration maximale

L'évapotranspiration maximale d'une culture est la quantité maximale d'eau qu'elle est susceptible d'évaporer lorsqu'elle est placée dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique et pour un sol proche de la capacité au champ. Elle dépend de la couverture du sol par la culture et de son état physiologique. Elle fait alors intervenir les coefficients culturaux (k_c) qui retranscrivent les particularités de

chaque type de plante à un stade développement donné. Prise en compte par l'évapotranspiration référence (ET_0). Elles sont présentées dans l'équation :

$$ET_0 = (K_{cb} + K_e) \cdot ET_0 \text{ (1.02)}$$

- k_{cb} : Coefficient cultural de base ;
- k_e : Coefficient d'évaporation du sol

6. Évapotranspiration potentielle ETP

L'évapotranspiration potentielle peut se définir comme l'évapotranspiration qui se produirait d'une surface maintenue humide sous des conditions d'absorption de rayonnement régional, de transfert de vapeur et de chaleur, dont l'aire est assez petite pour que les transferts de chaleur et de vapeur d'eau de la surface n'aient pas d'influence significative sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère (Audin, 2004).

L'estimation de l'ETP est relativement simple et nécessite au plus quatre paramètres atmosphériques mesurables : la température de l'air, la vitesse du vent, le rayonnement net et l'humidité relative de l'air. De nombreux modèles d'estimation de l'ETP ont été développés (Hajji, 2020).

7. Évapotranspiration réelle ETR

L'évapotranspiration réelle est la quantité totale d'eau qui s'évapore du sol/substrat et des plantes lorsque le sol est à son taux d'humidité naturel. L'évapotranspiration réelle explique l'échange d'eau et d'énergie entre le sol, la surface terrestre et l'atmosphère.

En 1956, Penman définit l'Évapotranspiration potentielle comme : l'évaporation d'une pelouse rase suffisamment étendue, en bon état et convenablement alimentée en eau (Audin, 2004). Selon les auteurs et les méthodes, différents paramètres météorologiques, physiques ou biologiques sont inclus ou non dans la définition de l'Évapotranspiration potentielle : par exemple l'espèce végétale, la constance des flux d'énergies, l'ouverture des stomates, la constance de l'humidité relative.

Ces deux notions ETR et ETP sont utiles et nécessaires pour étudier les bilans de circulation de l'eau et notamment pour déterminer les besoins en eau des cultures ou calculer l'effet oasis d'une zone où l'évapotranspiration est plus importante (qui peut être une zone urbaine). Les plantes de milieux arides peuvent fortement réduire leur évapotranspiration quand elles manquent d'eau. Les plantes des zones tropico-équatoriales pluvieuses ne le peuvent généralement pas.

Elles sont présentées dans l'équation suivante:

$$ETR = k_s ETM = k_s k_c ET_0$$

Où :

- k_c : coefficient cultural ;
- k_s : coefficient de stress ;
- ET_0 : évapotranspiration de référence ;
- ETM : évapotranspiration maximal.

III.1 Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration

Il existe deux méthodes qui nous permettent de connaître cette composante essentielle du bilan hydrique en particulier dans les domaines d'irrigation ainsi que la gestion des ressources hydriques ; dans notre étude il s'agit de la valeur de l'Evapotranspiration climatique.

En outre, on peut classer ces méthodes en deux types parues qui sont :

- Les méthodes directes (instruments et appareils de mesure)
- Les méthodes indirectes (utilisation des formules empiriques)

III.1.1 Méthodes directes (moyens de mesure)

III.1.1.1 Bac d'évaporation « classe A »

L'ONM a adapté un instrument d'évaluation de l'E.T.P, cet évaporomètre est de norme internationale, il est de forme cylindrique de diamètre 121,9 cm et de profondeur 25,4 cm. Pour y remédier aux lacunes des débris végétaux et autres, les climatologues, ont adapté que l'eau doit être située entre 5,1 à 7,6 cm du rebord. Pour permettre à l'air de circuler librement sous le bac, le niveau de l'eau du bac dernier se trouve placé à 15,2 cm au-dessus du sol. Est mesuré à l'aide d'une jauge à crocher. La différence entre les deux mesures ou prélèvements représente la quantité d'eau perdue par évaporation, en tenant compte des quantités d'eau ajoutées par les intensités de pluie et par les recharges effectuées pour maintenir le niveau de l'eau dans le bac (Charles. R, 1975).

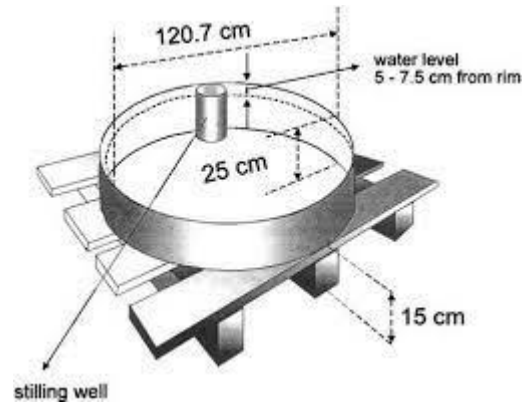


Figure III.1: bac «classe A»

III.1.1.2 Le bac Colorado

Le bac Colorado est un bac carré de 91.4cm de côté, et de 46 à 91cm de profondeur. Il est enterré de manière à ce que son rebord soit à 10cm au-dessus de la surface du sol. De fait, il représente mieux l'inertie thermique. Il existe des variantes du bac Colorado, notamment la version ORSTOM.

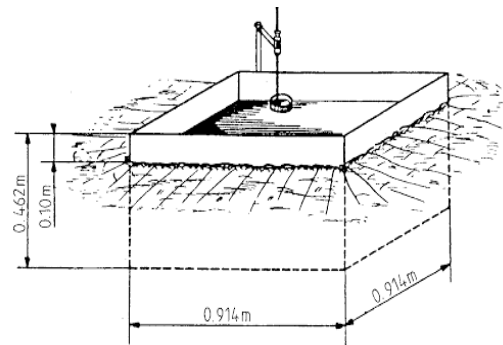


Figure III.2 : Le bac de colorado

III.1.1.3 Evaporomètre de Piche

Il est constitué par un tube cylindrique en verre de 25 cm de long et 1,5 cm de diamètre; ce tube gradué est fermé à sa partie supérieure, tandis que son ouverture inférieure.

Il est obturée par une feuille circulaire de papier filtre normalisé de 30 mm de diamètre et 0,5 mm d'épaisseur fixée par capillarité et maintenue par un ressort.

L'appareil ayant été rempli d'eau distillée, celle-ci est évaporée progressivement par la feuille de papier filtre ; la diminution du niveau de l'eau dans le tube permet de calculer le taux d'évaporation. Cet appareil est installé sous abri ; aussi la mesure dépend-elle beaucoup des conditions d'aération.



Figure III.3 : Evaporomètre Piche

III .1.2 Méthodes indirectes (formules empiriques)

En raison de la multiplicité des méthodes d'estimation des quantités d'évaporation / transpiration, certaines nécessitent un équipement spécial ou les calculs sont très complexes, nous nous bornons à clarifier les équations les plus courantes que nous pouvons appliquer dans les zones aride.

Nombreuse formules ont été établies pour calculer l'ETP à partir de quatre éléments climatiques fondamentaux: température, humidité relative, insolation et vitesse du vent.

Pour notre cas on utilise les formules de Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman modifiée par FAO plus la formule de l'ANRH. Les données climatiques utilisées sont celles de la station (ONM) de Guemar sur une période de (25) ans (1996-2020).

III.1.2.1 Formule de TURC

Turc rechercha à partir de 1945 une expression algébrique représentant au mieux l'évaporation mensuelle et même décadaire observée sur les cases lysimétrique de Versailles, Rothamsted, Groningen et d'autres stations situées en Ecosse, en Afrique du Nord et aux Indes. Il aboutit ainsi, vers 1953, à une formule complexe donnant l'évapotranspiration potentielle en fonction de l'insolation et de la température.

En 1962, Turc a proposé les formules simplifiées suivantes : Lorsque l'humidité relative mensuelle est supérieure à 50%, on peut évaluer avec une

approximation suffisante l'évapotranspiration potentielle mensuelle d'un périmètre irrigué par la formule suivante :

$$ETP = 0.40. (IG + 50). \frac{t}{t + 15}. C$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

Ig : Radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale (quelques calories/cm²/jour).

t : Température moyenne mensuelle du mois considéré (C°).

Le coefficient 0.40 est le résultat du produit 0.013 j Donc :

Pour le mois de 31 jours on a : 0.013 x 31 = 0.40

Pour le mois de 30 jours on a : 0.013 x 30 = 0.39

Pour le mois de février le coefficient est 0.37

La radiation solaire globale n'est mesurée qu'en un petit nombre de stations, on devra souvent l'évaluer à partir de la radiation maximale théorique Iga, calculée d'après les données astronomiques et d'après le rapport h/H de la durée d'insolation effective (mesurée par un héliographe) à la durée du jour astronomique (en heures). On emploie souvent la formule suivante dérivée de celle d'Angström :

$$IG = IGA \left(0.10 + 0.62 \frac{h}{H} \right)$$

Avec :

h : Durée d'insolation réelle (heures).

H : Durée astronomique du jour (heures).

Iga et H ne dépendent que de la latitude.

Si l'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est inférieure à 50%, on multiplie l'ETP calculée par le facteur correctif (c) suivant

$$C = \left(1 + \frac{50 - H_r}{70} \right)$$

Hr: est l'humidité relative moyenne de l'air pendant le mois considéré (%). En pratique, le terme correctif ci-dessus n'intervient que dans le cas des climats désertiques ou subdésertiques.

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau III.1

Tableau III.1 : calcul de l'ETP par la formule de Turc

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	11,8	13,8	18,3	22,5	27,5	32,8	35,7	32,4	30,7	23,8	17,4	13
Es	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232
Vv	3	3,2	4,1	4,6	4,6	4,5	4,2	3,8	3,7	2,9	2,9	3,1
P	16,4	5,4	6,4	5,9	4,8	1,5	0,4	1,5	6,5	8,4	10,6	7,2
H	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46	50,8	58,9	63,5
h	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232
H	337,3	233,3	357,4	502,2	425,5	255,6	276,5	453,2	490,4	325,8	234,7	369,3
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
lgA	670,5	447,6	749,0	1017,0	755,7	448,6	663,9	1003,3	838,7	474,8	584,9	965,3
lg	431,8	379,9	499,6	551,1	484,1	461,3	649,8	641,0	445,9	324,2	470,3	549,7
K	1	1	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,2	1,1	1	1	1
ETPTurc	70,6	79,1	122,4	156,2	162,5	174,0	254,0	230,5	140,9	90,8	97,5	89,9
ETP Anne (mm)	1668,37											

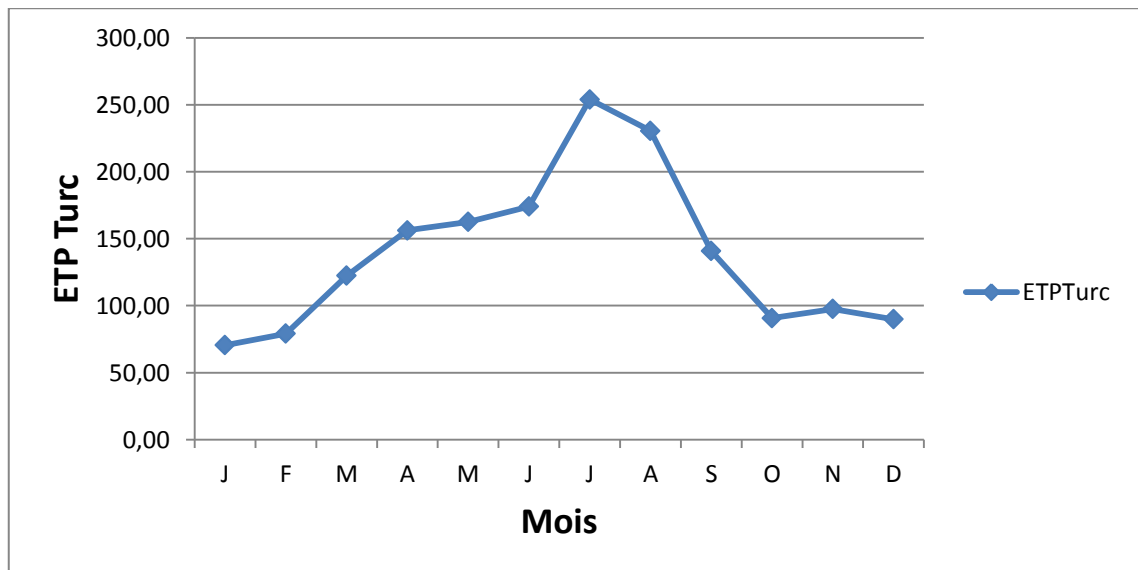


Figure III.4: Estimation de l'ETP avec la formule de Turc

III.1.2.2 Formule de Blaney et Criddle

A la suite de nombreuses expérimentations, Blaney - Criddle ont développé leur équation empirique liant évaporation et transpiration et moyenne de la température et la quantité de lumière du jour ont été largement utilisées et ont donné des résultats positifs dans le sud de la France et dans le Sahara égyptienne.

La formule est la suivante:

$$ETP = K (0,46t + 8,13) P$$

Où:

ETP : Evapotranspiration potentielle en mm.

t: température moyenne (en degré Celsius) durant la période considérée (généralement le mois).

P : pourcentage de la durée moyenne du jour pendant la même période, par rapport à la durée moyenne du jour pour l'année.

K : Coefficient dépendant du stade végétatif de la culture et de la température moyenne (de la zone climatique).

On peut résumer les résultats de calcul de l'ETP dans le tableau III.2:

Tableau III.2 : calcul de l'ETP par la formule de Blaney-Criddle

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	11,8	13,8	18,3	22,5	27,5	32,8	35,7	32,4	30,7	23,8	17,4	13,0
Es	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,5	278,1	264,3	236,2	232,0
Vv	3,0	3,2	4,1	4,6	4,6	4,5	4,2	3,8	3,7	2,9	2,9	3,1
P	16,4	5,4	6,4	5,9	4,8	1,5	0,4	1,5	6,5	8,4	10,6	7,2
H	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46,0	50,8	58,9	63,5
p	7,1	7,0	8,4	8,8	9,7	9,7	9,8	9,3	8,4	7,9	7,1	7,0
Kc (palmier)	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Kc (p-terre)	0,8	0,5	0,5	0,7	0,9	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9
ETP B/c	106,3	110,8	152,1	173,1	215,2	246,6	267,8	237,8	206,4	167,9	125,4	107,9
ETP anne(mm)	2117,2											

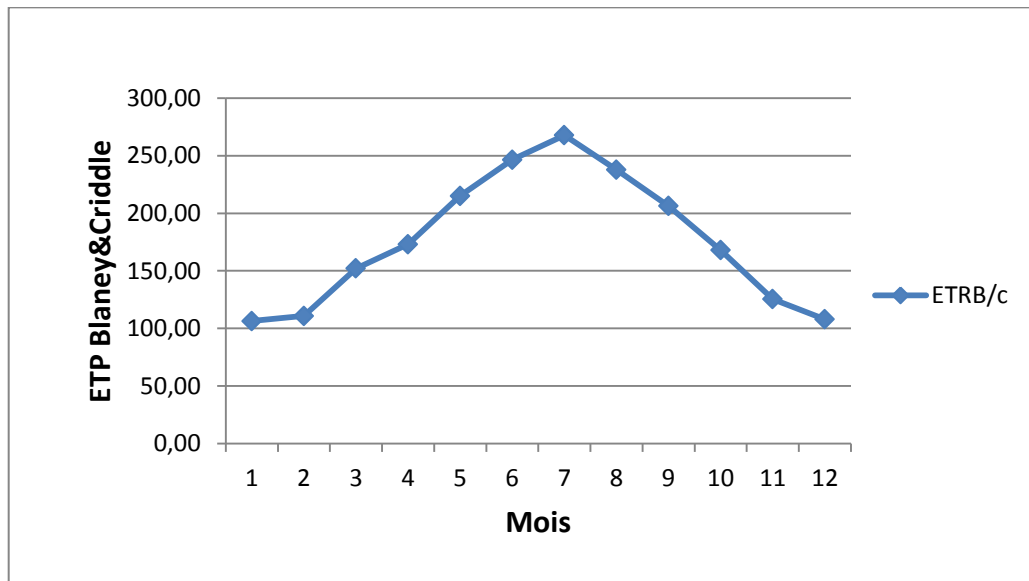


Figure III.5: Estimation de l’ETP avec la formule de Blaney & Criddle

III .1.2.3 Formule de Thornthwaite (1944)

La formule de Thornthwaite a été la première équation publiée pour estimer l'évapotranspiration de la transpiration, elle a été développée à partir de mesures sur des cases slysmétriques dans l'est des États-Unis et est exprimée par la formule suivante :

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

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm)

I : indice thermique annule, c'est la somme de douze indices mensuels

$$I = \sum_1^{12} i \quad , \quad i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

t: température moyenne mensuelle °C.

K: terme correctif qui tiens compte de la latitude de lieu

a: fonction complexe de l'indice I

$$a = \frac{1.6}{100}I + 0.5$$

Tableau III.3: coefficient de correction f(h) pour une latitude de 33.5° N

(voir Annexe1)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
K	1.03	0.97	0.88	0.86	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.2	1.22	1.15

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau III.4:

Tableau III.4 : calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaite

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	11,8	13,8	18,3	22,5	27,5	32,8	35,7	32,4	30,7	23,8	17,4	13
Es	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232
Vv	3	3,2	4,1	4,6	4,6	4,5	4,2	3,8	3,7	2,9	2,9	3,1
P	16,4	5,4	6,4	5,9	4,8	1,5	0,4	1,5	6,5	8,4	10,6	7,2
H	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46	50,8	58,9	63,5
i	3,669	4,651	7,13	9,749	13,21	17,25	19,61	16,933	15,61	10,61	6,606	4,25
a	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
ETPnc	12,66	18,92	39,06	66,41	111,2	174,8	217,4	169,43	147,5	76,72	34,32	16,2
K	0,88	0,855	1,03	1,09	1,195	1,2	1,22	1,155	1,03	0,97	0,875	0,86
ETPcThor	11,14	16,18	40,23	72,39	132,9	209,8	265,2	195,69	151,9	74,41	30,03	14
ETP anne(mm)	1213,83											

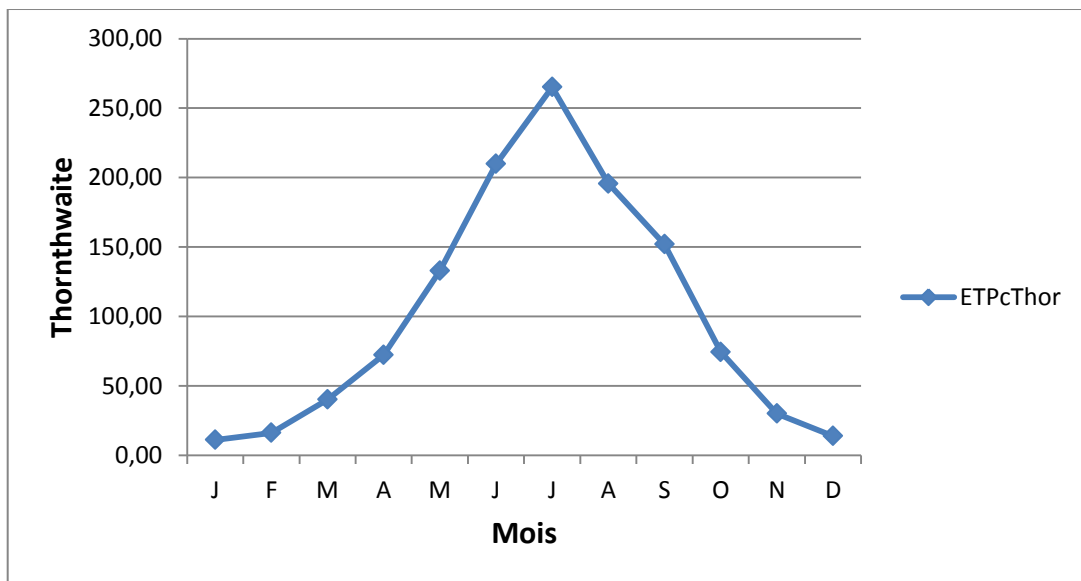


Figure III.6: Estimation de l'ETP avec la formule de Thornthwaite

III.1.2.4 Formule dite de l'ANRH

La formule qui permet d'estimer l'ETP mensuelle est la suivante (voir méthodes d'estimation indirectes à la première partie) (Boudjerada ,2015) .

$$ETP_{ANRH} = Kr \times Km (H - 187) (0.032 t + 0.077)$$

L'application de cette formule a permis d'obtenir les résultats qui ont été consignées dans le tableau III.5 et reportées dans le Figure III.7.

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm).

t : Température moyenne mensuelle (C°).

H : urée théorique mensuelle d'insolation (h/mois) et elle exprime en fonction de Y.

Km : Coefficient mensuel dont ses valeurs sont données (Annexe 2).

Kr : Coefficient régional qu'on peut lire sur (Annexe 3).

On résume les résultats obtenus dans le tableau III.5:

Tableau III.5 : calcul de l'ETP par la formule de l'ANRH

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	11,8	13,8	18,3	22,5	27,5	32,8	35,7	32,4	30,7	23,8	17,4	13
Es	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232
Vv	3	3,2	4,1	4,6	4,6	4,5	4,2	3,8	3,7	2,9	2,9	3,1
P	16,4	5,4	6,4	5,9	4,8	1,5	0,4	1,5	6,5	8,4	10,6	7,2
H	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46	50,8	58,9	63,5
a	-0,02	-0,01	-0,001	0,01	0,02	0,025	0,02	0,014	0,003	-0,01	-0,02	-0,03
b	315	307	371	389	429	429	436	414	370	351	311	308
H	309,4	343,8	456,4	519,3	605,8	624,2	614,4	565,02	469,9	405,7	315,5	290
Kr	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Km	0,96	1,22	1,11	1,17	1,02	1	0,97	0,97	0,98	0,9	0,9	0,86
ETPANRH	61,44	114,1	227,8	356,3	470,1	566,4	581,4	469,67	337,7	189,8	84,31	50,1
ETP anne(mm)	3509,20											

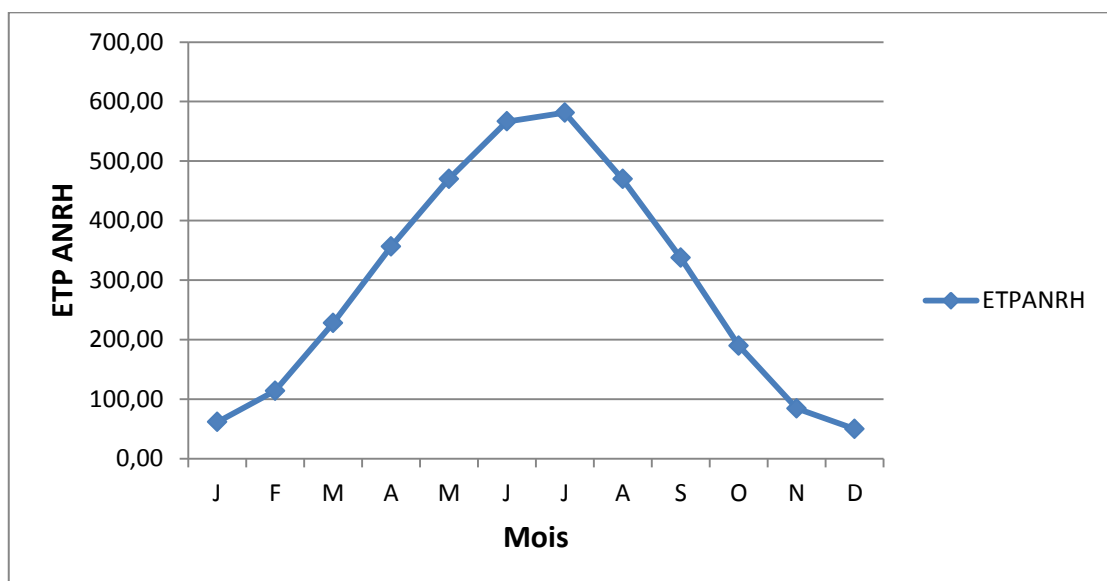


Figure III.7: Estimation de l'ETP avec la formule de l'ANRH

III.1.2.5 Formule de Penman- Monteith (FAO)

La formule de Penman – Monteith (FAO) est une combinaison du bilan énergétique et de la méthode de transfert de masse. Parmi les différentes méthodes de calcul des ETP, elle est recommandée par la FAO. Cette formule brute se présente comme suit (Boudjerada ,2015) :

$$ET_0 = C[W \times R_n + (1 - W) \times f(u) \times (e_a - e_d)]$$

Où :

W x Rn : Paramètre de rayonnement.

(1-W) x f (u) x (ea – ed) : Paramètre d'aérodynamique.

ET0 (mm/jour) : représente l'évapotranspiration de la culture de référence.

W: facteur de pondération lié à la température.

Rn (mm/jour) : représente le rayonnement net en évaporation équivalente.

(ea – ed) : c'est la différence entre la tension de vapeur réelle moyenne, les deux étant exprimées en millibars.

f (u) : c'est la fonction liée au vent.

C : c'est le facteur de correction pour compenser les conditions météorologiques diurnes et nocturnes.

Rnl = f (u) x f(ed) x f (n/N) : Rayonnement de grande longueur d'ordre en **mm/jour**.

f(ed) = 0,34 – 0,044 ed: Correction rendant compte de l'effet de la tension de vapeur sur le rayonnement de grande longueur d'onde.

f (u) = 0,27 (1+u/100) : Valeur de la fonction du vent, d'après le parcours du vent (**Km/jour**) à une hauteur de **2 m**.

f (n/N) = 0,1 + 0,9 n/N : Correction rendant compte du rapport entre les heures réelles et astronomiques sur le rayonnement de grande longueur d'onde.

ed = ea HR : Tension de vapeur en millibars.

Rn = Rns – Rnl: Rayonnement net en mm/jour.

Ra : Rayonnement extra- terrestre exprimé en évaporation équivalente en mm/jour.

Dans notre mémoire, le calcul de l'ET0 est effectué à l'aide des logiciels CROPWAT8.0 publié par le FAO.

Pour l'exploitation du logiciel, nous avons introduit les informations mensuelles de la station météorologique données par l'ONM, la méthode adoptée emploie les informations homogènes et fiables suivantes :

- Température : Les températures moyennes mensuelles (min et max) sont données en degré Celsius.
- Humidité de l'air : l'humidité relative de l'air exprime en pourcentage %.
- Insolation journalière : L'insolation journalière donnée en heures d'insolation.
- Vitesse de vent : La vitesse du vent peut être introduite en m/s.

Le premier utilise par l'ONM, nous permet de calculer seulement l'évapotranspiration de référence. Les résultats de calcul par ce logiciel sont représentées dans le tableau III.6 se dessous:

Tableau III.6 : calcul de l'ETP par la formule de Penman - Monteith (FAO)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T min	5,6	6,7	10,9	14,9	19,5	24,3	27,5	27,3	23,3	17,6	10,9	6,5
T max	17,9	20,9	25,6	30,1	35,5	41,3	43,9	37,5	38	30,1	23,8	19,4
Vv(m/s)	3	3,2	4,1	4,6	4,6	4,5	4,2	3,8	3,7	2,9	2,9	3,1
H	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46	50,8	58,9	63,5
Es(h/mois)	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232
Es(h/j)	8,14	8,91	9,06	9,77	10,2	11,66	11,49	10,82	9,27	8,53	7,87	7,48
ET0 (mm)	74,44	96,55	161,8	214,6	281,6	331,7	359,7	292,5	233,6	155,3	98,37	76,9
ETP anne(mm)	2376,94											

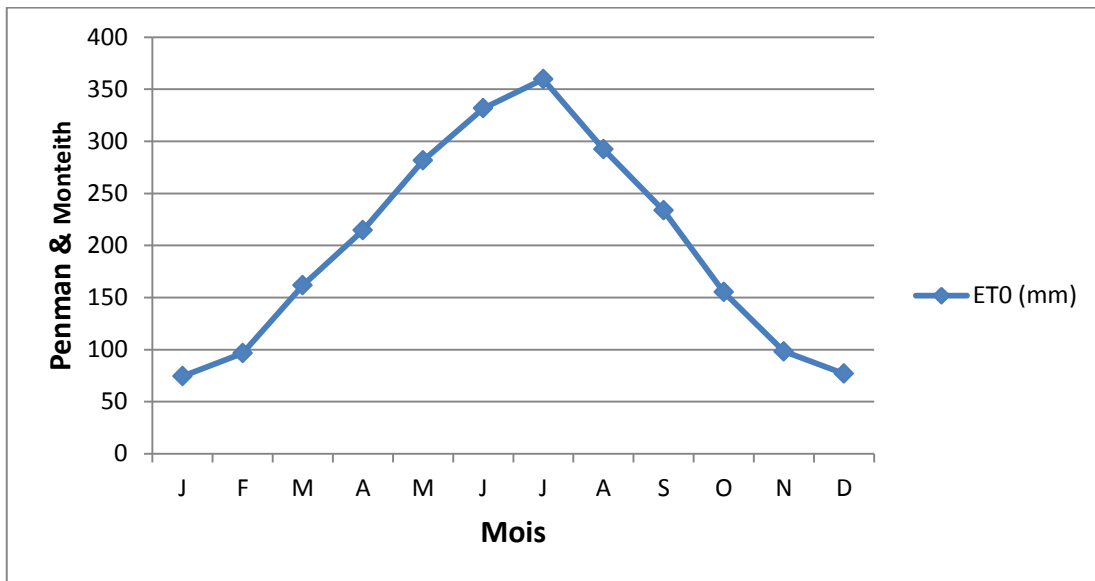


Figure III.8: Estimation de l'ETP avec la formule de Penman-Monteith

Conclusion

Dans ce chapitre on a essayé d'illustrer toutes les procédés et formules qui ont été utilisées dans la littérature pour l'estimation de la valeur de l'ET, en mettant l'accent sur les appareils, les instruments de mesure, ainsi que toutes les relations mathématiques délivrées par plusieurs chercheurs spécialisés tels que celle de Turc, Penman-Monteith (FAO), ANRH, Blaney-Criddle et de Thornthwaite.

La nécessité de recours à l'utilisation des formules empiriques reste toujours indispensable en cas de l'absence de plusieurs paramètres météorologiques. Pour ça on doit adapter une de ces formules selon notre zone d'étude et pour cela on va faire une comparaison entre ces formules empiriques, qui est l'objectif du prochain chapitre.

CHAPITRE IV

COMPARAISON DE

L'ÉVAPORATION

MESURÉE AVEC CELLE

DES MÉTHODES

D'ESTIMATION DE

L'ÉVAPOTRANSPIRATION

IV.1 Introduction

Les mesures de l'évaporation à partir de l'évaporomètre de Piche installé à l'Aéroport de Guemar (ONM), ont été confrontées avec les valeurs de l'Evapotranspiration Potentielle (ETP) estimées par certaines méthodes tels que: Thornthwaite (1944), Turc (1962), et Penman-Monteith (FAO)...ect; en se basant sur les mesures météorologiques collectées de la station comme la température, l'humidité relative, la vitesse du vent et la durée d'insolation.

Cette confrontation permet d'identifier quelles sont les méthodes d'estimation d'ETP qui donnent des estimations les plus proches des mesures réelles. Ceci s'avère nécessaire pour estimer les besoins en eau nécessaires à la croissance des végétations et des cultures agricoles et de l'appliquer ensuite sans risque sur les régions à climat similaire au climat saharien de la région d'Oued Souf.

Quelques définitions

1. L'humidité du sol

L'humidité du sol joue un rôle important dans le maintien de la vie sur la terre, sa première utilisation est de permettre la croissance de la végétation.

Elle est déterminée essentiellement par la valeur de la capacité au champ (volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir) et de la valeur du point de flétrissement (volume minimal d'eau dans le sol pour qu'une plante ne meure pas).

2. La réserve utile RU d'un sol

La Réserve Utile (RU) d'un sol correspond à la quantité d'eau comprise entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement. La capacité au champ est le volume maximal d'eau retenu par les forces de capillarité d'un sol (plus la quantité d'eau dans ce dernier est faible, plus les forces de capillarité ne sont élevées). Le point de flétrissement correspond à la teneur en eau d'un sol en dessous de laquelle la plante ne peut plus vaincre la tension exercée par les forces de capillarité et satisfaire ses besoins en eau. La réserve utile dépend de la profondeur d'enracinement de la plante, de la densité apparente, de la texture du sol ainsi que de la teneur en éléments grossiers. Elle est mesurée horizon par horizon, dans la tranche du profil prospectée par les racines. La RU (en mm) se calcule par l'équation suivante (J.Beauchamp, 2006) :

$$RU = (W_{cc} - W_{pfp}) * h * Da / 100$$

W_{cc} : humidité à la capacité au champ (mm),

W_{pfp} : humidité au point de flétrissement (mm),

Da : densité apparente & h : épaisseur du sol (mm).

La RU peut être calculée par la formule de F.Rawls comme suit:

$$RU = (W_{330} - W_{15000}) * Da * Z$$

Où:

W_{330} : la teneur en eau du sol à -330 hPa (mm/m), c'est-à-dire la capacité au champ.

W_{15000} : la teneur en eau à -15000 hPa (mm/m), c'est-à-dire le point de flétrissement .

Ar : la teneur en argile (%) ;

Sa : la teneur en sable (%) ;

MO : la teneur en matière organique (%) ;

Z : l'enracinement (m).

La réserve utile est composée de deux fractions : la RFU (Réserve Facilement Utilisable) et la RS (Réserve de Survie). Au-delà de cette dernière, le point de flétrissement permanent est atteint.

Le rapport RFU/RU est variable de 1/3 à 2/3 (P.Duchaufour, 2000). En climat tempéré, la RU s'épuise progressivement pendant la période végétative et se reconstruit en hiver.

Les variations de stock de la RU dépendent donc des précipitations et de l'évapotranspiration :

- Lorsque les précipitations sont supérieures à l'Evapotranspiration Réelle (ETR), la RU se remplit,
- Lorsque les précipitations sont inférieures à l'ETR, la RU ne peut se remplir.
- Quand la capacité maximale de la RU est dépassée, une partie de l'eau descend vers la nappe.

3. La réserve facilement utilisable

La RFU représente l'eau facilement mobilisable par les cultures, elle dépend de la profondeur du sol et de l'enracinement de la végétation. C'est " celle que les plantes peuvent facilement utiliser par leur tension osmotique sans avoir à freiner l'ETR " (Salim Kh 2016).

Bouchet et Hallaire (1964), examinant la notion de réserve facilement utilisable (RFU), ont conclu que les variations du rapport de la RFU à la réserve utile (RU) pouvaient s'expliquer par le niveau d'évapotranspiration potentielle instantané précité et par les caractéristiques de diffusion de l'eau du sol vers les racines et à travers la plante ; ces auteurs envisageaient la possibilité, pour ce rapport RFU/RU, de pouvoir varier entre 0 et 1. (Salim Kh 2016).

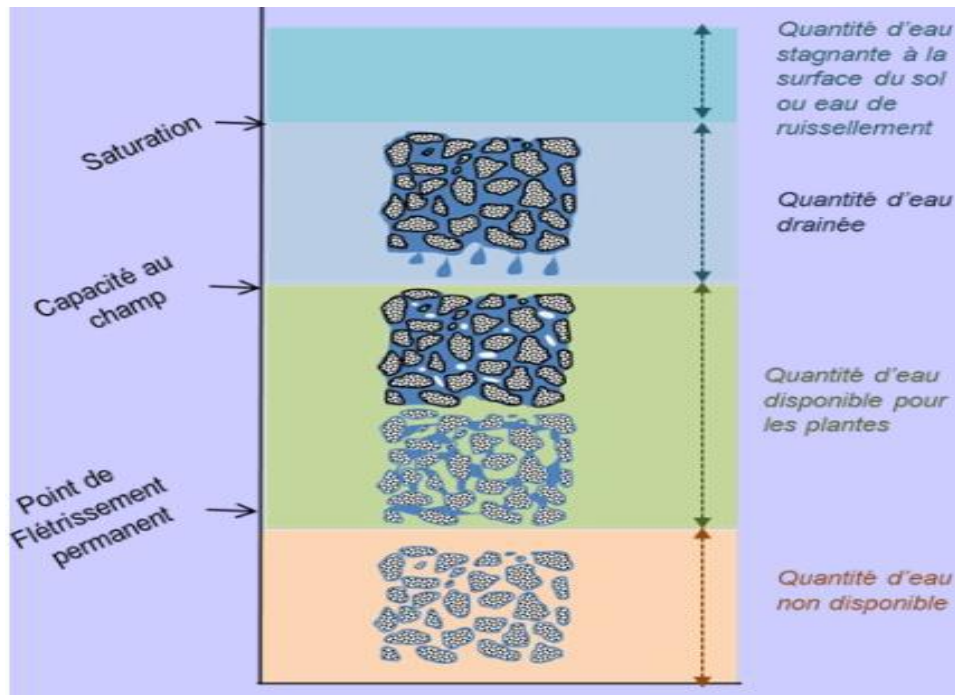


Figure IV. 1 : Illustration des limites haute et basse de la réserve utile (GCHP2E, 2016)

4. La capacité au champ

La capacité au champ c'est le volume maximal d'eau que peut retenir le sol dans les microporosités, les macroporosités étant drainées. On parle aussi de capacité de rétention en eau du sol. La capacité de rétention de l'eau par un sol varie selon sa texture et sa compaction. Pour connaître la capacité au champ du sol, il faut attendre deux à trois jours de ressuyage après saturation du sol par les pluies et faire la mesure avec un appareil de mesure de l'humidité. Il semble que ce point de flétrissement puisse varier de 1,5 à 2,5 selon les types de sol et le climat.

5. Le point de flétrissement

Elle correspond à l'humidité pour laquelle la force de succion du sol équilibre la force de succion des cellules des racines ; le débit d'eau du sol à la plante s'annule. C'est également une notion variable selon la nature de la plante. On convient en général de la définir comme correspondant à une pression de succion dans le sol de 15 atmosphères, bien que certaines plantes soient capables d'extraire par leurs racines de l'eau à des tensions bien supérieures. L'humidité au point de flétrissement correspond approximativement au pF 4.2, cette humidité est plus délicate à mesurer. En l'absence des données précis on admettra qu'elle vaut la moitié de l'humidité à la capacité de rétention : $H_{pf} = 1/2 H_{cc}$.

6. La densité apparente

La densité apparente est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol. Elle est, en effet, liée à la nature et à l'organisation des constituants du sol. Elle permet en outre, de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines, la cohésion des horizons et la réserve en eau du sol (Khechana.S et al, 2016).

7. Le bilan hydrique

Le concept de balance ou bilan hydrique exprime l'équilibre des changements entre toutes les ressources en eau (précipitations, ruissellement) qui entrent dans un système (stockage) et celles qui le quittent (évapotranspiration), dans l'espace et dans le temps.

Le bilan hydrique permet de mesurer le stress hydrique et l'éventuel déficit hydrique, notamment pour prévoir les sécheresses ou, à l'inverse, les inondations. La quantité disponible est généralement moindre dans les régions arides que dans les climats humides.

Le bilan hydrique prend en compte les entrées d'eau, les sorties d'eau, la capacité de stockage.

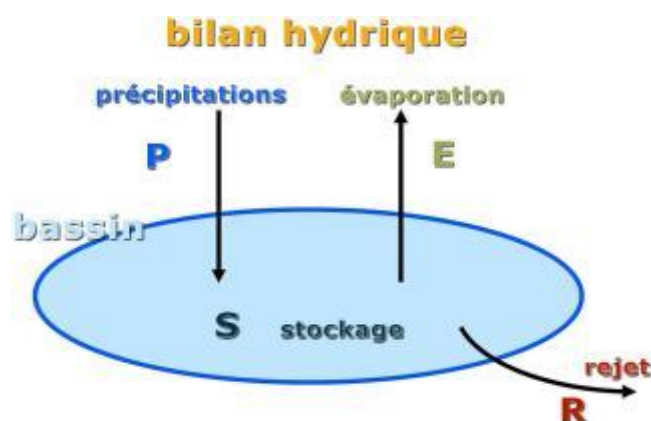


Figure IV.2 Schemat d'un bilan hydrique

Source: <https://www.aquaportail.com/definition-4407-bilan-hydrique.html>

IV.2 Evolutions mensuelles de l'évaporation mesurée et les ETP estimées par les formules empiriques.

Nous pouvons représenter les valeurs de l'ETP mesurées et les résultats calculées par les formules empiriques dans le tableau se dessous.

Tableau IV.1: Les valeurs de l'ETP des six modèles

Mois	ETP piche	ETPB_C	ETP Thor	ETP_Turc	ETPANRH	ETP Penman
janvier	99,4	106,3	11,1	70,6	61,4	74,4
février	157,5	110,8	16,2	79,1	114,1	96,6
mars	157,5	152,1	40,2	122,4	227,8	161,8
avril	204,2	173,1	72,4	156,2	356,3	214,6
mai	270,7	215,2	132,9	162,5	470,1	281,6
juin	301,3	246,6	209,8	174,0	566,4	331,7
juillet	339,4	267,8	265,2	254,0	581,4	359,7
août	300,2	237,8	195,7	230,5	469,7	292,5
septembre	193,9	206,4	151,9	140,9	337,7	233,6
octobre	147,3	167,9	74,4	90,8	189,8	155,3
novembre	103,2	125,4	30,0	97,6	84,3	98,4
décembre	84,7	107,9	14,0	89,9	50,1	76,9

IV.3 Discussion des résultats

IV.3.1 Comparaison des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration

IV.3.1.1 Comparaison graphique

Les valeurs moyennes mensuelles au cours de la période (1996 – 2020) de l'évaporation mesurée EP (Piche) et ceux estimées ETP (Thornthwaite), ETP (Turc), ETP (Penman-Monteith(FAO)), ETP (Blaney-Criddle) et ETP (ANRH) sont présentées par la Figure IV.3.

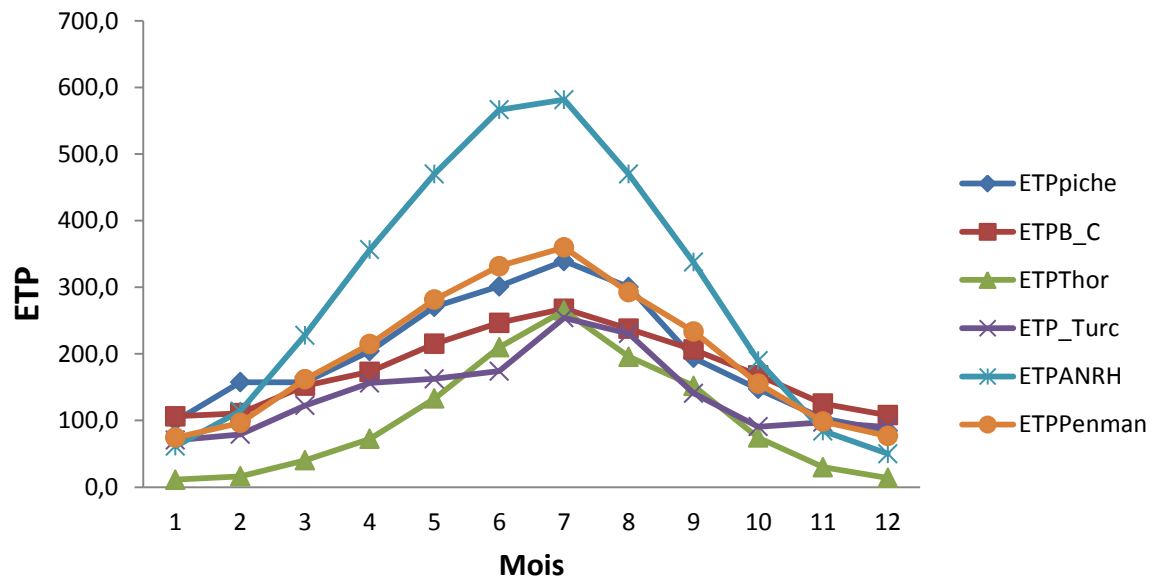


Figure IV.3 : Evolutions moyennes mensuelle des ETP estimées et de l'évaporation de Piche, pour la région d'Oued Souf au cours de la période (1996 - 2020).

On note que :

- La formule de Thornthwaite sous-estime l'ETP par rapport aux autres formules.
- La formule de l'ANRH climatique et de culture surestime l'ETP par rapport aux autres formules.
- Les valeurs de l'ETP convergent par rapport à la formule (ANRH) avec de l'ETP obtenue par les formules de Thornthwait, de Turc et de Penman-Monteith ainsi que l'ETP mesurée par le Piche entre le mois de janvier et février, ainsi qu'entre Octobre, novembre et décembre, tandis que la différence

s'approfondit avec l'augmentation entre le mois de mars à septembre, tandis que l'écart enregistré au mois d'août s'est accru.

Cela fait apparaître les valeurs de la formule ANRH le plus loin possible des valeurs de l'ETP mesurée par le Piche ainsi que des autres formules au cours de l'année.

De plus, l'écart de courbe des valeurs ETP estimées avec la formule de l'ANRH est due à la dépendance de cette dernière à la température moyenne comme unique variable climatique, et comme mentionné précédemment, cette relation est utilisée en l'absence de données climatiques, ce qui la rend caractérisée par ces grandes différences avec le reste des relations.

- Concernant le mois de pointe, nous constatons que la plus grande valeur de l'évapotranspiration potentielle correspond au mois de Juillet, les six formules présentent la même tendance d'évolution d'évapotranspiration.
- Pour la période mars- août, ainsi que octobre, novembre et décembre les valeurs données par la formule de Penman-Monteith(FAO) sont plus proches des valeurs de l'ETP mesurées que des valeurs données par les formules de Turc, Thornthwaite, ANRH, alors que la formule de Blaney-Criddle traduit bien l'évolution de l'ETP mesurée pour les mois de janvier et mars et septembre avec des résultats assez similaires.
- La formule ANRH a concordée l'ETP mesuré à la valeur la plus basse enregistrée en décembre. mais le reste des formules, a été enregistré au mois de janvier.

Nous concluons de la figure ci-dessus que les valeurs de la formule de Penman-Monteith (FAO) semblent les plus proches des valeurs mesurées de l'ETP au cours de l'année.

IV.3.1.2 Comparaison avec l'erreur relatif

Les résultats obtenus par l'application des différentes approches d'estimation de l'ETP, à l'échelle mensuelle ont été comparés à l'ETP (Piche), en se basant sur les valeurs de l'écart relatif « ER ». Ainsi, des corrélations linéaires ont été établies entre les résultats des différents modèles par rapport à l'ETP (Piche).

L'erreur relatif est défini par :

$$ER = \frac{ETP\ Piche - ETP_i}{ETP\ Piche} \times 100(\%)$$

ETPi : ETP calculée par les méthodes de Thornthwaite, Turc, Blaney-Criddle et Penman-Monteith(FAO) et L'ANRH

Plus les valeurs de « ER » sont faibles, plus la méthode d'estimation de l'ETP donne une estimation satisfaisante de cette composante.

Les valeurs de l'ETP des cinq modèles avec l'erreur relatif nous les représentons dans le tableau IV.2.se dessous:

Tableau IV.2: Les valeurs de l'erreur relatif des cinq modèles

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ER Turc	29.02	49.78	22.30	23.50	39.96	42.24	25.16	23.22	27.35	38.38	5.47	-6.14
ER B/cc	-6.98	29.63	3.44	15.24	20.52	18.16	21.11	20.79	-6.43	-14.01	-21.50	-27.36
ER Thornoth	88.80	89.73	74.45	64.55	50.91	30.36	21.87	34.81	21.64	49.48	70.90	83.52
ER ANRH	38.19	27.57	- 44.65	-74.49	-73.65	-88.00	-71.31	-56.45	-74.18	-28.88	18.30	40.90
ER Penman	25.11	38.70	-2.70	-5.07	-4.01	-10.08	-5.99	2.56	-20.49	-5.42	4.68	9.21

D'après le tableau, nous trouvons que :

- Pour Thornthwaite ER est entre [+21.64 à +88.8] %.
- Pour Turc ER est entre [-6.14 à +49.78] %.
- Pour Penman- Monteith(FAO) ER est entre [-20.49 à +38.7] %
- Pour Blaney-CriddleER est entre [-27.36 à +29.63] %.
- Pour ANRH ER est entre [-88 à +40.9] %.

Les erreurs de chaque méthode nous les représentons dans les figures suivantes:

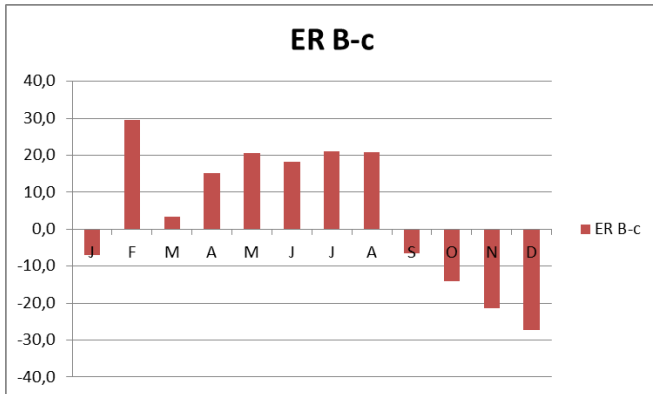


Figure IV.4 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & $ETP_{Bl/Cr}$

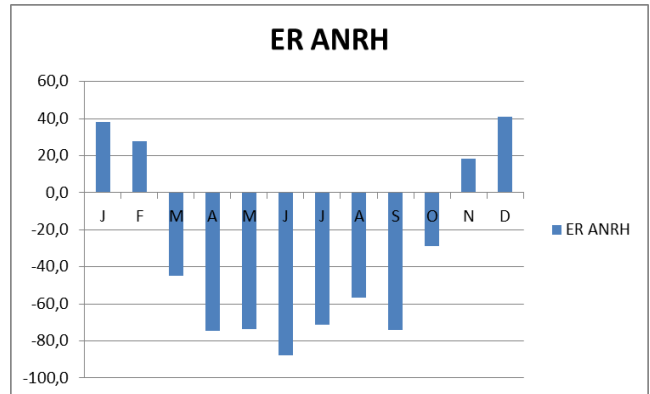


Figure IV.5 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{ANRH}

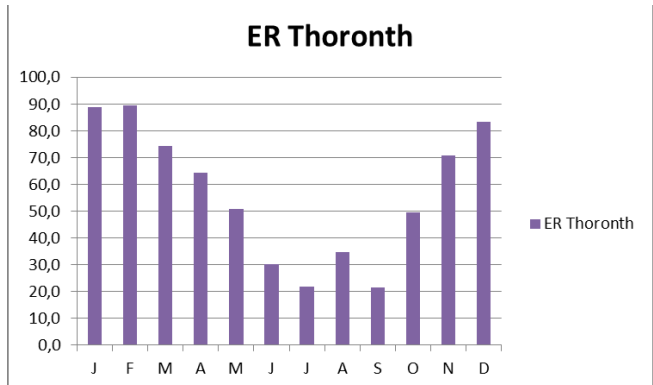


Figure IV.6 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{Thornt}

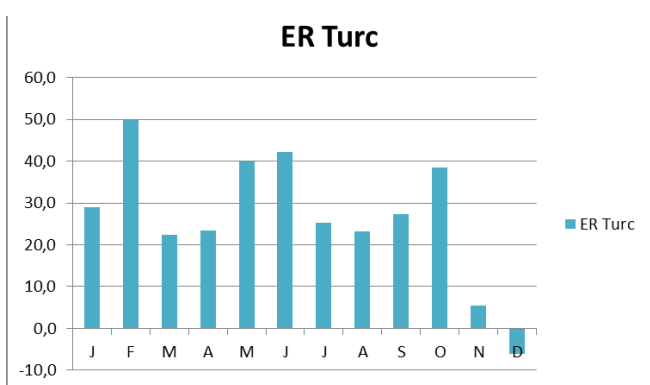


Figure IV.7 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{Turc}

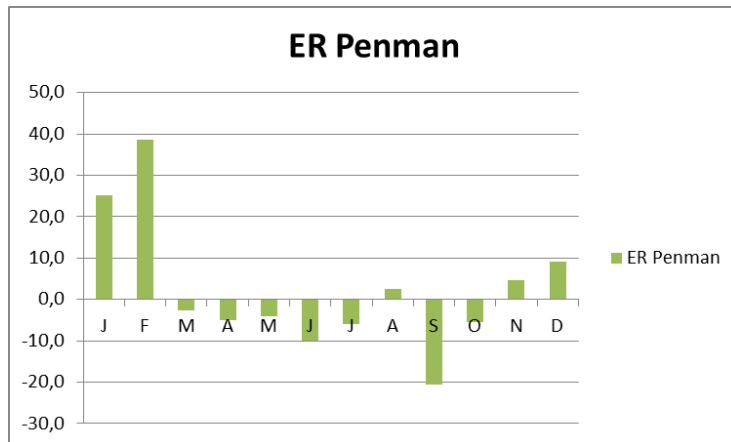


Figure IV.8 Erreur relatif entre ETP_{Piche} & ETP_{Penman}

On confirme encore une fois que la méthode de Penman- Monteith (FAO) présente pour chaque mois le minimum d'erreur relative.

IV.3.1.3 Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée avec le logiciel "SPSS"

a-Statistiques descriptives

Pour mieux préciser, nous avons entré les valeurs obtenues par les formules de Thornthwaite, de Turc, de Penman-Monteith (FAO), de Blaney et Criddle et de ANRH ainsi que l'ETP mesurée par le Piche in situ, dans logiciel d'analyses statistiques SPSS version 22, et après avoir effectué l'analyse statistique, les résultats étaient les suivants :

Tableau IV.3 Statistiques descriptives

Formule	Moyenne	Ecart type	Minimum	Maximum
ETP PICHE	196,6	87,29	84,70	339,40
ETP TURC	139,03	59,29	70,60	254,00
ETP Blaney - Criddle	176,44	57,71	106,30	267,80
ETP Penman- Monteith	198,09	102,14	74,40	359,70
ETP Thornthwaite	101,15	87,63	11,10	265,20
ETP ANRH	292,43	197,61	50,20	581,40

Analyse descriptive

Les valeurs ETP ANRH varient entre 50.20 et 581.40, avec une moyenne de 292,43 et écart-type de 197.61, ce qui est surestimée que les valeurs de l'ETP Piche en termes de moyenne arithmétique ainsi que de valeur maximum.

Il est à noter que les données ETP estimées à la Formule de Thornthwaite, dont les valeurs sont comprises entre 11.10 et 265.20, avec une moyenne de 101.15 et écart-type de 87.63, sont les moins importantes en termes de moyenne arithmétique, la valeur maximale et minimale.

Ce test a démontré que le modèle Penman-Monteith (FAO) avec une moyenne de 198.09 et écart-type de 102.14, donnait des résultats qui étaient les plus proches des valeurs ETP Piche.

b-Corrélation**Tableau IV.4** Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée

Corrélation de Pearson	ETP TURC	ETP Blaney et Criddle	ETP Penman-Monteith (FAO)	ETP Thornthwaite	ETP_{ANRH}
ETP PICHE	0,928**	0,951**	0,973**	0,936**	0,977**

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

A partir des relations entre l'ETP (Piche) et celles estimées à partir des différentes formules, il apparaît une bonne corrélation significative entre celle-ci et celle obtenue par l'application des différents méthodes d'estimation (sign > 0.9).

Évidemment la meilleure corrélation est obtenu entre l'ETP (Piche) et ANRH- Penman-Monteith (FAO), avec une valeur significative de corrélation respectivement 0.977-0.973, assurant qu'il existe une corrélation très forte entre celui-ci et ETP Piche.

D'après les résultats de logiciel "SPSS", nous trouvons que la méthode de Penman-Monteith (FAO) et de Blaney-Criddle sont les plus proches de celles de Piche (198.0917) en point de vue moyennes annuelles (198.0917,176.4417) et la méthode de Penman-Monteith (FAO) , Blaney-Criddle et ANRH de point de vue corrélation (0.973 , 0.951 et 0.977) respectivement. C'est pour cela qu'on va fait une autre comparaison entre les résultats de Penman-Monteith (FAO) et celles de Blaney-Criddle avec Piche (mesurées).

c-Régression linéaire

Les relations entre l'évaporation ETP mesurée et les méthodes d'estimation d'ETP sont linéaire, chacune peut être représentée par une équation linéaire de la forme $y=ax+b$.

Le tableau IV.5 résume pour chaque méthode les paramètres a et b ainsi le coefficient de **Corrélation** correspondant.

Tableau IV.5 : Équation linéaire entre l'ETP mesurée et celle de différentes formules

Méthode	Équation linéaire	R ²
Turc	ETP (Tu) =0.63 ETP (Piche) +15.15	0.86
Blaney-Criddle	ETP (B-C) =0.63 ETP (Piche) +52.81	0.905
Thornthwaite	ETP (Thor) =0.94 ETP (Piche)-83.6	0.876
Penman-Monteith (FAO)	ETP (Panm) =1.14 ETP (Piche)-25.8	0.947
ANRH	ETP (ANRH) =2.21 ETP (Piche)-142.14	0.955

A partir des relations entre l'ETP mesurée par le Piche et l'estimation dans les différentes formules, il semble qu'il existe une bonne corrélation entre ETP mesurée par Piche et celles qui ont été obtenue en appliquant les différentes formules. Notez que la meilleure corrélation a été obtenue entre l'ETP mesurée et celles de l'ANRH, Penman-Monteith (FAO), Blaney-Criddle, avec le coefficient corrélation respectivement (R²= 0.955, 0.947, 0.905).

Afin d'obtenir la formule de mesure la plus précise et la plus proche l'ETP mesurée par Piche et avec un bon coefficient de corrélation, nous effectuons une comparaison entre les moyennes, en effectuant un test T.

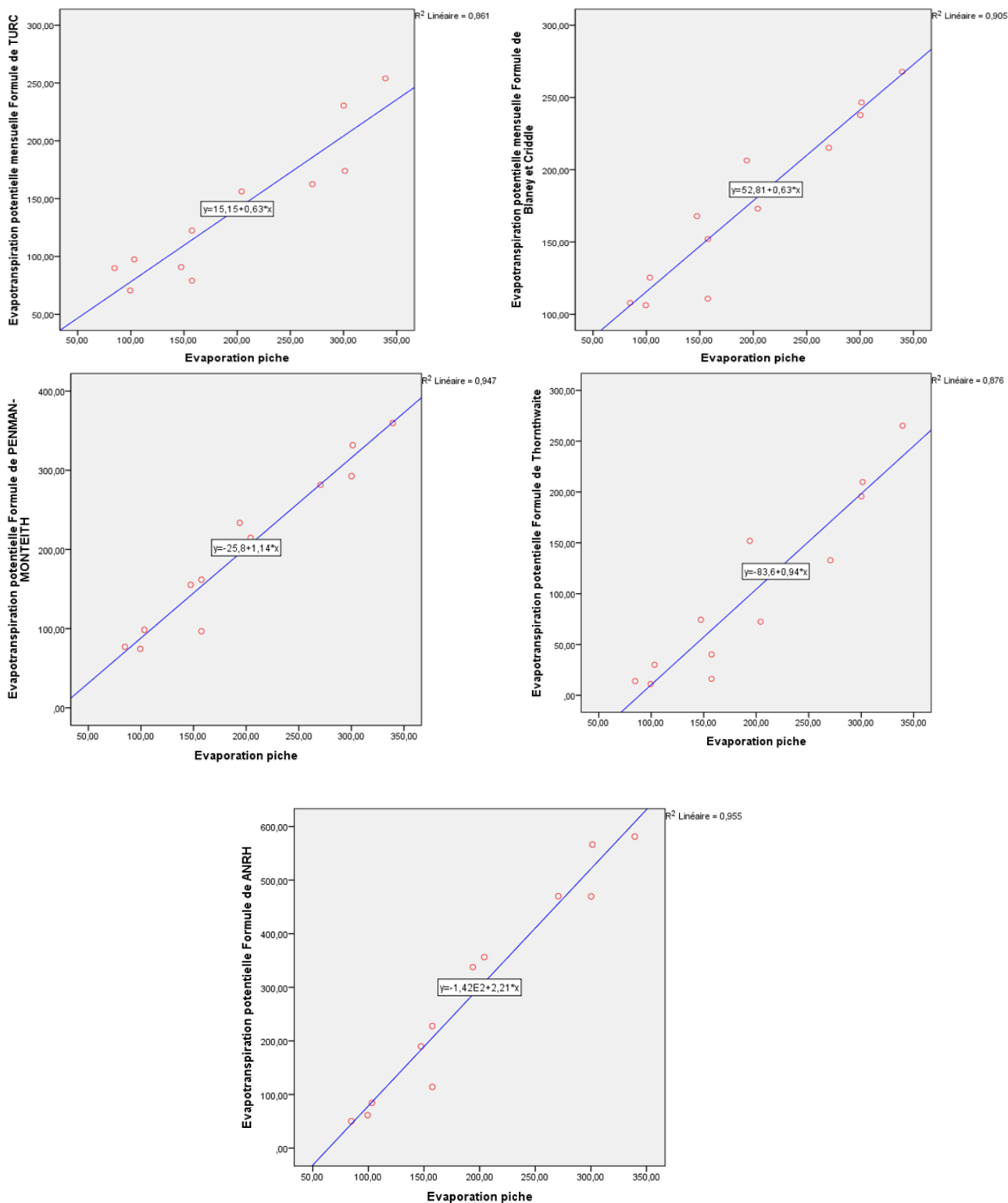


Figure IV.9 : Régression linéaire entre les valeurs de l'ETP mesurées et l'ETP calculées par les cinq formules

IV.3.1.4 Comparaison des moyennes par T-Test Pour échantillons indépendants

Le T-test est un test statistique permettant de comparer les moyennes de la variable indépendant (ETP Piche) et le variable dépendant (ETP des différentes formules). Il s'agit donc de savoir si les moyennes des deux groupes sont significativement différentes au point de vue statistique.

Nous avons entré les valeurs des variables dans logiciel SPSS, et après avoir effectué les analyses, les résultats étaient suivants :

Tableau IV.6 Résultats du T.test pour la différence entre les moyennes

Paramètres Modèles	N	Moyenne	Ecart type	valeur signification	Signification statistique	Différence moyenne
ETP Piche	12	196,6	87,29	0,014	Non < 0.05	95.85
ETP Thornthwait	12	101,15	87,63			
ETP Piche	12	196,6	87,29	0.072	Oui	30.46
ETP Turc	12	139.03	59.29			
ETP Piche	12	196,6	87,29	0.97	Oui	1.48
ETP Penman Monteith	12	198.09	102.14			
ETP Piche	12	196,6	87,29	0.51	Oui	20.20
ETP Blainy et Cridell	12	176,44	57,71			
ETP Piche	12	196,6	87,29	0,139	Oui	95,82
ETP ANRH	12	292,43	197,61			

*Intervalle de confiance de la différence à 95 %

Il ressort clairement des données du tableau IV.6 que l'ETP Piche moyen de (196.6) avec écart-type (87.29) est presque égal à l'ETP Penman-Monteith(FAO) moyen de (198.09) avec écart-type (102.14), la différence des moyennes est estimée à 1.48. De plus, un niveau de signification de (0.97) Supérieur à (0.05), on peut donc dire qu'il n'y a pas de différence significative dans les moyennes entre (Piche ETP) et (ETP Penman Monteith (FAO)).

IV.3.1.5 Comparaison selon les paramètres climatiques

Une simple aperçue sur les précédentes figures nous constatons que les erreurs des formules de Turc, Thornthwaite et de l'ANRH sont des erreurs énormes comparaison avec celles de Blaney-Criddle et de Panman – Montieth (FAO) qui nous avons données des résultats plus proche de ETP mesurées. Et d'un autre coté la formule de Penman-Montieth (FAO) est la seul formule qui utilise plus de données climatiques.

Ce qui nous conduit à l'adapter pour l'estimation de l'ETP pour notre zone d'étude (La vallée d'Oued Souf) parmi les autres formules empiriques.

IV.4 Calcul du bilan hydrique

L'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut donc se faire à l'aide d'une équation de bilan appelée "bilan hydrique" qui représente le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un sol (entité naturelle en générale) et dans le temps.

Le but de calcul de bilan hydrique est la détermination des besoins en eau des plantes, ces besoins sont les doses apportés au plante dans des moments propices, afin de mettre celle-ci dans les meilleures conditions d'humidité requises, pour obtenir son rendement maximal.

IV.4.1 Facteurs influençant le bilan hydrique

L'équation du bilan hydrique se base sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un espace donnés :

$$P = ETR + \Delta S$$

P : précipitation moyenne mensuelle (mm).

ETR : évapotranspiration real mensuelle (mm).

ΔS : représente le déficit agricole (Da) ou l'excédent dans chaque mois (mm).

Un groupe des chercheuses de l'université d'El Oued département d'hydraulique & de génie civil (Khechana.S et al, 2016)- Contribution à l'identification de la réserve facilement utilisable (RFU) dans les régions arides

" Cas de la vallée d'Oued Souf ") a estimé la réserve utile RU dans notre zone d'étude :

$$RU = 28.067\text{mm} \text{ O\`u: } RFU = 18.71\text{mm}$$

En tenant compte les conditions suivantes :

1- Si $P - ETP > 0$; c-a-d : $P > ETP$, dans ce cas $ETR = ETP$.

2- Si $P - ETP < 0$; c-a-d : $P < ETP$, ce cas est subdivisé encore en deux cas :

a- Si $P + RFU > ETP \Rightarrow ETR = ETP$.

b- Si $P + RFU < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

On peut résumer le calcul de bilan hydrique dans le Tableau IV.7.

Tableau IV.7 Calcul de bilan hydrique.

Mois	ETP	P	P-ETP	RU	RFU	ETR	DEFICIT	EXCEDENT
janvier	74.44	16.40	-58.04	28.067	0.00	16.40	58.04	0.00
février	96.55	5.40	-91.15	28.067	0.00	5.40	91.15	0.00
mars	161.75	6.40	-155.35	28.067	0.00	6.40	155.35	0.00
avril	214.55	5.90	-208.65	28.067	0.00	5.90	208.65	0.00
mai	281.55	4.80	-276.75	28.067	0.00	4.80	276.75	0.00
juin	331.68	1.50	-330.18	28.067	0.00	1.50	330.18	0.00
juillet	359.73	0.40	-359.33	28.067	0.00	0.40	359.33	0.00
août	292.50	1.50	-291.00	28.067	0.00	1.50	291.00	0.00
septembre	233.63	6.50	-227.13	28.067	0.00	6.50	227.13	0.00
octobre	155.29	8.40	-146.89	28.067	0.00	8.40	146.89	0.00
novembre	98.37	10.60	-87.77	28.067	0.00	10.60	87.77	0.00
décembre	76.90	7.20	-69.70	28.067	0.00	7.20	69.70	0.00
somme	2376.94	75.00	-2301.94		0.00	75.00	2301.94	0.00

Pour la vérification on utilise les formules suivantes:

$$1. \Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EX$$

$$\text{On a: } \Sigma ETR + \Sigma EX = 75 + 0 = 75 = \Sigma P. \text{ (Verifier)}$$

$$2. \Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DA$$

$$\text{On a: } \Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DA = 75 + 2301.94 = 2376.94 = \Sigma ETP. \text{ (Vérifier)}$$

Donc le bilan est vérifié.

Du tableau se dessus, on constate que le bilan hydrique est déficitaire, c'est-à-dire apporté de l'eau au plante le long de l'année.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une comparaison entre les différentes formules empiriques calculant l'ETP, nous avons trouvés que les résultats de la formule de Penman-Montieth (FAO) est la plus proche des valeurs mesurées que les autres formules, en plus elle utilise plus des données climatiques, qui nous conduit à l'adaptation de cette dernière.

Lors du calcul du bilan hydrique à partir des valeurs d'évapotranspiration calculées en fonction de la formule adoptée dans la zone d'étude, les résultats ont montré la présence d'une pénurie d'eau tout au long de l'année, ce qui nécessite une irrigation permanente des cultures agricoles pour obtenir un bon rendement.

CONCLUSION GENERALE

Le développement de tout projet d'aménagement en agriculture, en urbanisme ou autre, nécessite la quantification d'un bilan hydrique, dans une perspective de gestion durable de la ressource hydrique qui passe obligatoirement par l'estimation des pertes d'eau par évapotranspiration.

L'évapotranspiration est une étape importante du cycle de l'eau dans la nature. C'est le processus de transfert d'humidité du sol vers l'atmosphère par évaporation de l'eau et transpiration des plantes. Le but de ce travail étant de choisir la meilleure méthode parmi cinq méthodes d'estimation du taux d'évapotranspiration celle de Blaney-Criddle, ANRH, Penman-Monteith(FAO) (1998), Turc (1962) et de Thornthwaite (1944). Dans l'absence ou le manque de mesures d'ETP qui sont nécessaires pour déterminer les besoins en eau des plantes irrigués dans une région saharienne hyper aride. La période d'étude se situait entre 1996 et 2020, soit 25 ans, ces données climatiques sont extraites de la station météo de l'aéroport de Guemar.

Les résultats ont montré les cinq séries d'évapotranspiration (Thornthwaite, Penman-Monteith (FAO), Blaney-Criddle, ANRH et Turc) ont toutes les mêmes tendances; les valeurs les plus faibles concernent les mois d'hiver et les valeurs élevées se réfèrent aux mois d'été, avec un maximum pour toutes les séries concernées en juillet. Cependant, l'appariement des valeurs estimées aux mesures est différent. Le bon appariement est avec la méthode Penman-Monteith (FAO) et la moindre qualité est pour la méthode Thornthwaite et de l'ANRH, la méthode Turc et de Blaney-Criddle occupe une position intermédiaire et la méthode Penman – Monteith (FAO) offre une erreur relativement minimale par mois. ce que nous conduit à l'adapter pour l'estimation de l'ETP dans notre zone d'étude (la vallée d'Oued Souf). Nous recommandons pour la suite de cette étude de l'appliquer sur d'autres lieux à climat différent, pour confirmer les résultats obtenus. et les autres zones de même conditions climatiques. et pourquoi ne la généralisée dans autres régions arides et hyper arides.

Références bibliographiques

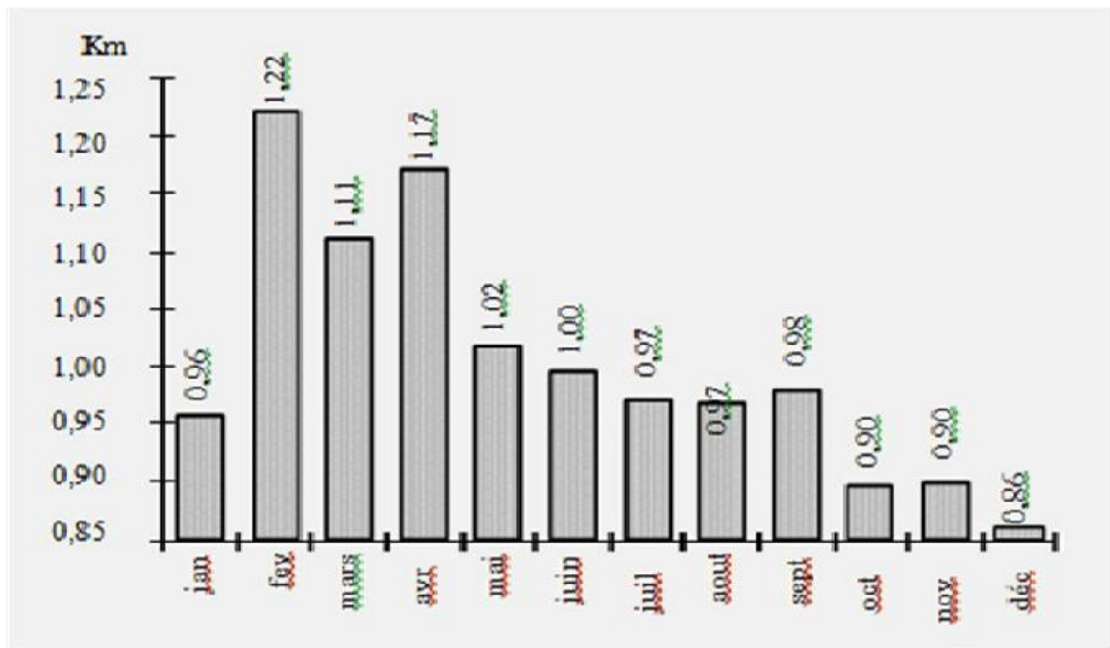
- [01] Abdaoui, J, R. (2006), Le problème de la Remontée Des Eaux et son impact sur l'environnement dans la région d'El Oued souf , Mémoire de Magister en aménagement du territoire, Université Mentouri , Constantine, 189 p.
- [02] Ahmed Skhiri, (2017), Les Bases De L'irrigation , Éditions universitaires européennes , mauritius, 96 p.
- [03] Ben Mansour. S, Korichi, R, (2013), Etude de l'évapotranspiration réelle liée à l'évapotranspiration potentielle et à la production agricole phœnicicole à l'échelle de l'écosystème de l' ITAS , université kasdi Merbah , Ouargla .63 p.
- [04] Boutoutaou &Daddi, (2012), Détermination De L'évaporation Des Surfaces Des Plans D'eau Pour Les Conditions Climatiques De L'Algérie , Algerian journal of arid environment , vol. 2 n° 2, P 99.
- [05] Islem Hajji, (2020), Vers Une Meilleure Modélisation De L'évapotranspiration (Et) Sous Des Conditions Environnementales Diversifiées , Université Laval , Québec, Canada , 89 p.
- [06] Khechana. S, (2014), Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyper-aride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien), Thèse de Doctorat en hydrogéologie. Université d'Annaba, 130 p.
- [07] Mustapha MJEJRA, 2015, Etude De L'évapotranspiration Dans Le Bassin Versant De L'oued Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique , Thèse Doctorat en Géographie, Université Rennes 2 , Tunisie, 299 p.
- [08] Saad Allah Salima, 2018, Estimation de l'évapotranspiration potentielle par différents méthodes. Application à un site à climat saharien (Touggourt-w-Ouargla)- Université Kasdi Merbah Ouargla , Master académique Spécialité: Physique , Ouargla , 46 p.
- [09] Boulifa, K. (2012), Synthèse hydrogéologique sur la region d'El-Oued Sahara nord oriental (Est Algérien)-Mémoire de Magister en Géologie, Université Constantine 1, 169 p.

- [10] Bouselsal, B. (2016), Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued Souf (SE Algérie), Thèse de Doctorat En Sciences- Université Badji Mokhtar, Annaba- 160 p.
- [11] Charles, R. 1975, La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale. ORSTOM. Paris: pp 27-67.
- [12] Boudjerada, I. (2015), Estimation Et Cartographie De L'évapotranspiration Potentielle-Mémoire de Master en Hydraulique, Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique , Arbaoui Abdellah, 59 p.
- [13] OUDIN ,L. (2004) , recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global, Thèse de l'engref, Sc eau, 477p
- [14] Khechana, S et al. (2016), Contribution à L'identification de la Réserve Facilement Utilisable (RFU) Dans les Régions Arides (Cas De La Vallée de Oued Souf) ,recherche scientifique, P 196, 197,198 et 199.
- [15] Koussa,M. 2017 , Apport d'un système d'information géographique pour la gestion des ressources en eau de la région de Djelfa, Thèse de doctorat en Hydraulique, Université Mohamed Khider , Biskra, 90 p.
- [16] (Zidane, M L et Soufi, M. 2018), Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère de Complexe Terminale (CT) de El-Oued (SE Algérie), Université Kasdi Merbah Ouargla , Master en Géologie , Ouargla , 47 p.
- [17] www.aquaportail.com/definition-4407-bilan-hydrique.html 15/03/2021,15:30
- [18] www.aquaportail.com/definition-5213-evapotranspiration-reelle.html 17/03/2021,17:30

Annexes

Annexe 01: Coefficient de correction $f(h)$ pour chaque latitude

Lat°N	0	10	20	30	35	40	45	50
J	1.04	1.00	0.95	0.90	0.87	0.84	0.80	0.74
F	0.94	0.91	0.90	0.87	0.85	0.83	0.81	0.78
M	1.04	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.02	1.02
A	1.01	1.03	1.05	1.08	1.09	1.11	1.13	1.15
M	1.04	1.08	1.13	1.18	1.21	1.24	1.28	1.33
J	1.01	1.06	1.11	1.17	1.21	1.25	1.29	1.36
J	1.04	1.08	1.14	1.20	1.23	1.27	1.31	1.37
A	1.04	1.07	1.11	1.14	1.16	1.18	1.21	1.25
S	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.06
O	1.04	1.02	1.00	0.98	0.97	0.96	0.94	0.92
N	1.01	0.98	0.93	0.89	0.86	0.83	0.79	0.76
D	1.04	0.99	0.94	0.88	0.85	0.81	0.75	0.70

Annexe 02: Valeurs de Coefficient mensuel (Km)

Annexe 03: Valeurs de coefficient régional (Kr) pour chaque station

STATION	Kr	Nom	Kr	N	Kr
Aïn Sefra	1,21	DellysA	0,87	Mostaga	0,87
Annaba	0,91	Djelfa	1,10	Msila	1,12
Arzew	0,97	El	1,15	Naam	1,11
Barika	1,24	ElBaya	1,23	O	0,99
Batna	1,12	ElMili	0,79	OumElBo	0,92
BBArreidj	1,07	Ghazao	0,81	Saida	1,01
Béchar	1,32	Guelm	0,83	S	1,04
Bejaia	0,92	JijelAe	0,79	SidiBelA	0,94
BeniSaf	0,88	Jijelpo	0,79	Skikd	0,86
Biskra	1,26	KsarChel	1,09	SoukAh	0,99
Bou Saada	1,10	Maghn	0,93	Tebess	1,00
Bouira	1,04	Masca	0,95	Tenes	0,95
Chlef	0,93	Mecher	1,14	Tiaret	1,08
Constantine	0,91	Mede	1,05	TiziOuz	0,83
DarElBeida	0,89	Milian	0,97	Tlemcen	0,93