

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'Sila

FACULTE SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES
AGRONOMIQUES
N° : 08/DSA/VCDPGR/2023



DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE
ET DE LA VIE
FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES
OPTION : SCIENCE DU SOL

Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique

par: **KABACHE Zakiya** et **RAHABI Hadjer**

Intitulé

Etude comparative des différentes méthodes
d'estimation de l'évapotranspiration
en zone aride (Cas de la région de M'sila)

Soutenu devant le jury composé de:

Mme HOCEINI Faiza	MCA	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Présidente
Mme BEDDAL Dalila	MCB	Université Med BOUDIAF - M'SILA	Promotrice
M. SAAD Ahmed	MCB	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Examineur

Année universitaire : 2022 /2023

Remerciements

Je remercie Allah, le tout puissant, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et la patience et tout ce dont j'avais besoin pour réaliser le travail imposé et rédiger ce mémoire.

Nous vifs remerciements et nous respects les plus distingués vont à notre encadreur **Dr. BEDDAL Dalila** également à saluer sa disponibilité durant cette période difficile. Enfin nous la remercions pour la confiance qu'elle nous a accordée, elle était accompagnée d'un soutien sans lequel il nous aurait été difficile d'achever ce travail.

C'est avec un grand plaisir que nous adressons nos remerciements, **Dr. HOCEINI Faiza** pour nous avoir honneur en acceptant de Présider le jury. Nous remercions **Dr. SAAD Ahmed** d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous vifs remerciements vont également à l'ensemble du personnel de **l'O.N.M d'Alger** pour l'acquisition des données climatiques.

Nous n'oublierons pas le personnel du département, particulièrement Monsieur **Cherief Abdelkader chef du département d'agronomie** et tous les enseignants du département, Université Mehmed Boudiaf.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Dédicace



Je dédie le présent mémoire :

*- À l'esprit pur qui voulait grand-chose à voir le fruit
De mon mieux. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir
en sa sainte miséricorde.*

Mon Très cher père : ALI

- A ma très chère mère : Massouda

*Femme combattante, voici une fois encore le fruit de
Tes multiples efforts. Tu es une mère formidable, tous
Les mots du monde ne peuvent exprimer mon amour
et ma reconnaissance envers toi.*

- A mes très chers frères : Omar Fateh Hamza et Atef

-A mes sœurs : Donia Nabila et Nawal

A mon binôme kabache zakíya

A tous mes camarades et mes amis (Donia, Mouna)

A toute ma famille

A tous mes enseignants

✍ Hadjer

Dédicace



Je dédie le présent mémoire :

*- À l'esprit pur qui voulait grand-chose à voir le fruit
De mon mieux. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir
En sa sainte miséricorde.*

Mon Très cher père : Attallah

- A ma très chère mère : Ambarka

*Femme combattante, voici une fois encore le fruit de
Tes multiples efforts. Tu es une mère formidable, tous
Les mots du monde ne peuvent exprimer mon amour
et ma reconnaissance envers toi.*

- A mes très chers frères : Ameer, Omar, Fateh , Tahar

-A mes sœurs :Fouzia ,Sabah , Zahra

A mon binôme Rahabi Hadjer

A tous mes camarades et mes amis

A toute ma famille

A tous mes enseignants

✍ Zakíya

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Liste d'abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des Photo	
Introduction générale	1
<i>Chapitre I. Aperçu bibliographique</i>	
I.1 Généralités sur le cycle de l'eau	3
I.1.1 Définition du cycle de l'eau.....	3
I.1.2. Eléments du cycle de l'eau	4
I.1.2.1. Evaporation.....	4
I.1.2.2 .Précipitation	4
I.1.2.3. Infiltration.....	4
I.1.2.4. Ruissellement	4
I.2. Evapotranspiration	4
I.2.1. Définition.....	4
I.2.2. Mécanisme de l'évapotranspiration.....	5
I.2.3. Types des l'évapotranspiration	5
I.2.3.1 l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	5
I.2.3.2. L'évapotranspiration maximale (ETM).....	5
I.2.3.3. L'évapotranspiration réelle(ETR)	5
I.2.4. Les facteurs contrôlant le mécanisme de l'évapotranspiration.....	6
I.2.4.1. Température	7
I.2.4.2. Hygromètre	7
I.2.4.3. L'insolation.....	7
I.2.4.4. Pression de l'air	7
I.2.4.5. Le vent	7
I.3. Méthode d'estimation de l'évapotranspiration.....	8
I.3.1. Méthodes directes	8
I.3.1.1. Bac d'évaporation « classe A ».....	8

I.3.1.2.Le bac Colorado.....	9
I.3.1.3.Evaporamètre de Piche	9
I.3.1.4. Lysimètre.....	10
I.4.Méthodes indirectes.....	10
I.4.1.Méthode de Thornthwaite (1944).....	11
I.4.2.Formule de TURC (1945)	11
I.4.3.la formule de Penmen (1998)	12
I.4.4.Formule de BOUCHET (R.J.) (1963)	12

Chapitre II Présentation de la zone d'étude

Introduction.....	
II.1. Situation géographique	13
II.2.La géologie	14
II.3. Le réseau hydrographique.....	15
II.4.Pédologie	15
II.5.Végétation	16
II.6.Le Relief	17
II.7.Description de station météorologie M'sila	17
II.7.1Pluviomètre	17
II.7.2.Anémomètre	18
II.7.3.Psychromètre	18
II.7.4.Thermomètre.....	19
II.7.5. EvaporimètrePiche.....	19
II.7.6.Thermomètre de mesure de température du sol	20
II.8.1.Etude climatique	20
II.8.1.1.Précipitations.....	20
II.8.1.2.Température.....	21
II.8.1.3.Humidité relative.....	22
II.8.1.4.Vent	22
II.8.1.5.Evapotranspiration	23
II.8.2.Synthèses bioclimatique	24
II.8.2.1.Indices d'aridité annuel de DE MARTONNE	24
II.8.2.2.Climatogramme d'Emberger	24

II.8.2.3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls & Gaussen (1957).....	25
--	----

*Chapitre III Application des formules empiriques d'estimation de
l'évapotranspiration*

Introduction.....	27
III.1. Méthodologie de travail	27
III.2. Application des formules empiriques	27
III.3. Résultats d'application.....	28
III.3.1. Résultats de la formule de Thornthwaite	28
III.3.1.1. A l'échelle annuelle.....	28
III.3.1.2. A l'échelle mensuelle	29
III.3.2. Résultats de la formule de Turc	29
III.3.2.1. A l'échelle annuelle.....	29
III.3.2.2. A l'échelle mensuelle	30
III.3.3. Résultats de la formule de Penman-Monteith	31
III.3.3.1. A l'échelle annuelle.....	31
III.3.3.2. A l'échelle mensuelle	31
III.3.4. Résultats de l'évapotranspiration par la formule de Bouchet	32
III.3.4.1. A l'échelle annuelle	32
III.3.4.2. A l'échelle mensuelle	32
III.4. Comparaison entre les différentes formules d'estimation de l'évapotranspiration.....	33
III.4.1. Critères statistiques de comparaison.....	34
III.4.1.1. Ecart relatif	34
a- Echelle annuelle.....	35
b- Echelle mensuelle	36
III.4.1.2. Coefficient de corrélation r.....	37
III.5. Comparaison des résultats avec d'autres travaux	38
Conclusion	39
Conclusion générale	40
Références bibliographiques	
Annexe	
Résumé	

Liste des abréviations

A : Fonction complexe de l'indice

ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

C° : degréCelsius

EP : Evaporation Piche

ET : Evapotranspiration

G: flux de chaleur dans le sol par conduction en $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{j}$

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

K°:kelvin

P: pression atmosphérique en Kpa

PDRMM :Projet de Développement Rural des Zones Montagneuses de M'sila

pa: Masse volumique de l'air kg/m^3

R : Constante des gaz parfaits en $\text{J}/(\text{kg}.\text{K})$

Ta: Température de l'air en Kelvin(K)

Z: l'altitude par rapport la mer(m)

HCDS : Haut-commissariat pour le développement de la steppe.

HR : Humidité relative %

ETM:L'évapotranspiration maximale

ETP:L'évapotranspiration potentielle

ETR : L'évapotranspiration réelle

FAO: Food and agriculture d'organisation

ONM:Office national de météorologie

RFU: Réserve facilement utilisable

Tmin: Température minimal

Tmax : Température maximal

T_{moy}: Température moyenne

Liste des figures

Chapitre I. Aperçu bibliographique

Figure I.1: Cycle del'eau	3
Figure I.2: Le processus de l'évapotranspiration	4
Figure I.3: Mécanisme de l'évaporation	5
Figure I.4: schématisation simplifiée de l'ETP et ETM.....	6
Figure I.5: Bac classe A.....	8
Figure I.6: Le bac de Colorado	9
Figure I.7: L évaporomètre Piche	9
Figure I.8: Lysimètre	10

Chapitre II .Présentation de la zone d'étude

Figure II.1: Situation géographique de M'sila	13
FigureII.2: Situation géographique de la zone Ghzel.....	14
FigureII.3 : Carte Géologique de la région du Hodna.....	14
Figure II.4 : Carte Hydrographique du Bassin d'El Hodna.....	15
Figure .II.5. Carte pédologique de Hodna	16
Figure II.6: Types végétation de la zone de M'sila	16
Figure II.7: Répartition des précipitations saisonnières de la région de M'sila (1988- 2016).....	21
Figure II.8: Les variations des températures moyennes mensuelles, minimales etmaximales dans la région de M'sila (1988-2016).....	22
FigureII.9: Les variations moyennes mensuelles de la vitesse des vents pour la commune de M'sila (1996/2016).....	23

Figure II.10:Climatogramme d’Emmbergerde la zone de M'sila durant (1988-2016)
.....**25**

Figure II.12:Diagramme Ombrothermique pour la station de M’Sila(1988-2016)..**26**

*Chapitre III. Application des formulesempiriques d'estimation de
l'évapotranspiration*

Figure.III.1. Evapotranspiration annuelle par Thornthwaite durant la période
(1988-2016).....**28**

Figure.III.2: Evapotranspiration annuelle par Turc durant le période (1988-2016) **30**

Figure.III.3. Evapotranspiration annuelle par Penman durant le période (1988-2016)
.....**31**

Figure.III.4: Evapotranspiration annuelle par Piche durant le période (1988-2016)
.....**32**

Figure. III.5 : Valeurs mensuelles de l’ETP estimées par les différentes formules
(1988/89-2016)**36**

Figure.III.6 : Corrélation entre ETP mesurée et celle estimée par les formules
utilisées (1988-2016)**38**

Liste des photos

Chapitre II: Présentation de la zone d'étude

Photo II.1. Pluviométrie de la station météorologique Ghazel	17
photo II.2. L'anémomètre de la station météorologique Ghazel	18
photo II.3 Abri météorologique de la station Ghazel contenant un Psychromètre ...	18
photo II.4. Evaporomètre Piche de la station météorologique Ghazel	19
photo II.5. Thermomètre de mesure de température du sol profond station météorologique Ghazel	20

Liste des tableaux

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Tableau II.1 : Caractéristique de la station météorologique de M'sila.....	13
Tableau II.2 : Précipitation moyennes mensuelles en (mm) de la station de M'sila (1988-2016)	20
Tableau II.3 : Températures moyennes mensuelles de la station de M'sila (1988-2016).....	21
Tableau II.4 : Humidité relative (Hr) moyenne de l'air exprimée en % à la station de M'Sila (1996/2016)	22
Tableau II.5: L'évaporation moyennes mensuelles et annuelles à la station de M'Sila (1996/2016).....	23

Chapitre III: Application de l'évaporation mesure avec méthode d'estimation de l'évapotranspiration

Tableau.III.1. Distribution mensuelle de l'évapotranspiration par la formule Thornthwaite durant le période (1988-2016).....	29
Tableau III.2 : Valeurs mensuelles d'évapotranspiration calculées par la formule Turc durant le période (1988-2016).....	30
Tableau III.3. Valeurs mensuelles d'évapotranspiration calculées par la formule Penman –Monteith durant le période (1988-2016).....	31
Tableau III.4. Valeurs mensuelles de l'évapotranspiration calculées par la formule de Bouchet durant le période (1989-2016)	33
Tableau.III.5: Récapitulatif de l'ETP annuelle calculées par les différentes formules (1988-2016).....	34
Tableau III.6: Ecart relatif des différentes méthodes d'estimation de l'ETP à l'échelle annuelle	35

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'Algérie est un pays semi-aride à aride où l'accès à l'eau est limité dans le temps (**Meddi et al., 2010; Bakreti et al., 2013 ; Zamoum et Souag-Gamane, 2019**). Ainsi, suite aux changements climatiques recensés depuis plus de quatre (04) décennies, le recours à l'irrigation dans le secteur agricole est une nouvelle stratégie adoptée pour garantir et améliorer le rendement agricole (**Baahmed et al., 2015; Elouissi et al., 2017; Berhail et al., 2021**). Néanmoins, la gestion quantitative et durable des ressources en eau est devenue indispensable pour préserver cette ressource.

La wilaya de M'sila est située au centre-Est de l'Algérie dans l'étage bioclimatique aride. Sa position dans la région steppique lui offre une réputation agropastorale. Cependant, l'investissement économique que connaît la wilaya de M'sila dans les projets agricoles (cultures maraîchères, arboriculture) se trouve entravés par l'insuffisance des ressources hydriques (**Saidati, 2006**). Pour mieux gérer et préserver la ressource en eau, il est indispensable de bien connaître les quantités d'eau à apporter à une culture donnée afin de choisir le système d'irrigation adéquat (**Boudjema et Hafsi, 2020**). Cela doit être passé par l'estimation de la quantité perdue par évapotranspiration ; une composante principale de calcul des besoins en eau des cultures agricoles afin de fournir à la plante la dose d'irrigation nécessaire pour garantir la production végétale.

Dans ce travail, nous allons tester l'efficacité des trois (03) formules empiriques de Thornthwaite (1944), Turc (1962), et Penman-Monteith-FAO (1998) dans l'estimation de l'évapotranspiration potentielle dans la région de M'sila durant la période de 1988 à 2016 (soit 28 ans). Les résultats obtenus vont être comparées avec les mesures réelles enregistrées par l'évaporomètre de Piche afin de trouver la meilleure formule la plus proche à la valeur observée et qui sera représentative de la région de M'sila.

Pour aboutir à cet objectif, Nous acheminons le plan de travail suivant :

- Le premier chapitre concerne les notions de base du processus d'évapotranspiration et les différents méthodes d'estimation.
- Le deuxième chapitre est une description des principaux traits caractéristiques de la région de M'sila : Localisation, géologie, relief, pédologie, couverture végétale et climat. Ainsi qu'une description de la station météorologique de Ghzel (wilaya de M'sila).

- Le troisième chapitre est une application des trois (03) formules empiriques déjà retenues pour calculer l'évapotranspiration potentielle sur la base des données climatiques de la station de Ghzel (Wilaya de M'sila). Par la suite, les résultats vont être comparés aux valeurs observées enregistrées par l'évaporomètre de Piche en utilisant des critères statistiques pour choisir la méthode d'estimation la plus adéquate.

Nous finissons notre modeste travail par une conclusion générale des résultats trouvés et nous proposons des perspectives et recommandations pour aider les gestionnaires et les autorités locales dans la gestion quantitative des ressources en eau.

CHAPITRE I

Aperçu bibliographique

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons voir le mécanisme d'évapotranspiration sous ses différents concepts et tous les paramètres liés à ce dernier.

I.1.Généralités sur le cycle de l'eau

I.1.1 Définition du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau appelé aussi cycle hydrologique est un phénomène naturel qui représente tous les mouvements de l'eau (**Figure I.1**) et son changement d'état sur la terre (océans, atmosphère, lacs, cours d'eau, les nappes d'eaux souterraines et les glaciers (**Métivier, 2010 in Ouadah, 2022**)).

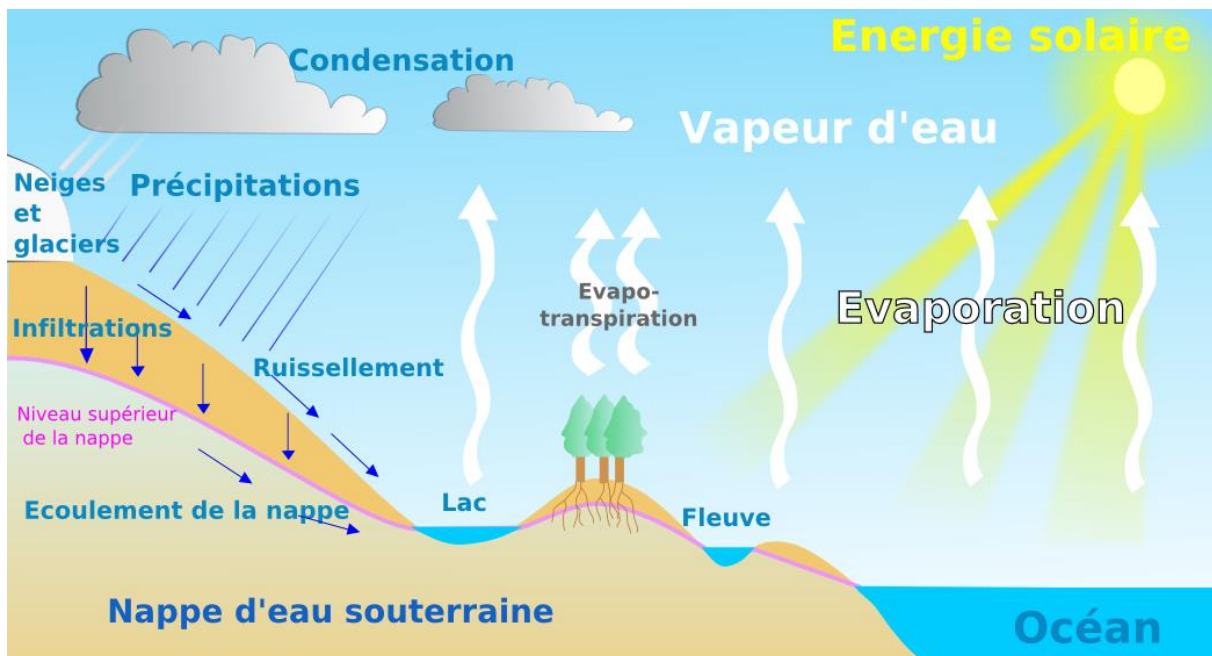


Figure I.1: Cycle de l'eau

I.1.2.Éléments du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est un cercle continu fermé qui n'a ni début ni fin (**Fig I.1**). On commence arbitrairement par :

- **Evaporation**: Est le processus physique de transformation de l'eau de la phase liquide à la phase gazeuse sous l'effet de la chaleur (**Pare, 2006 in Bensaci et Bouzaine, 2018**). L'eau s'évapore des surfaces d'eau libre (exemple : lacs, rivières, mer, océans) et du sol.
- **Précipitations** : Elles représentent toutes les eaux météorologiques qui tombent sur la surface de la terre, sous différentes formes ; liquide (bruine, pluie), solide (neige, grésil, grêle) (**Bonnet et al., 1970 in Saad Allah, 2018**).
- **Infiltration** : Est le flux d'eau qui peut pénétrer dans le sol à partir de sa surface et peut aller profondément pour alimenter les nappes d'eau souterraines (**Roche, 1963**).
- **Ruissellement**: ce sont les eaux qui s'écoulent à la surface du sol après saturation du sol en eau sous l'effet de la pesanteur et le flux résultant de la circulation de l'eau (**Cosandey et Robinson, 2012**).

I.2.L'évapotranspiration

I.2.1 Définition

L'évapotranspiration (ET) est la combinaison de deux processus ; un processus physique qui est l'évaporation directe (E) de l'eau des surfaces d'eau libre et du sol. Le deuxième processus est de nature biologique résultant de la transpiration végétale (T) (**Djegui et al., 2002**). Ce processus est essentiel pour le cycle de l'eau, car il joue un rôle important dans la régulation de la température de la surface terrestre et dans le maintien de l'humidité des sols (**Allen et al., 1998**).

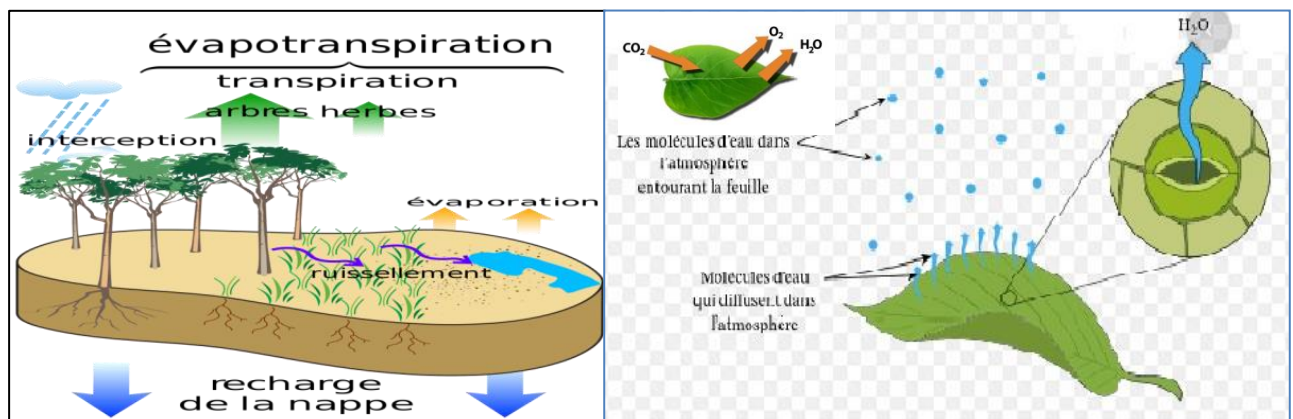


Figure I.2 Processus de l'évapotranspiration

I.2.2 Mécanismes de l'évapotranspiration

Sous l'effet de la température les liaisons entre les molécules d'eau se disloquent (Fig I.3) en s'échappant dans l'atmosphère à l'état de vapeur.

La transpiration est le principal moteur de la circulation de la sève. Lors de la photosynthèse les stomates s'ouvrent afin de laisser rentrer du CO₂ (voir Figure I.2). Il y a alors mise en contact de la solution des feuilles avec l'air extérieur. La différence entre le potentiel hydrique atmosphérique et celui des feuilles induit la sortie de l'eau (présente dans les feuilles) dans l'atmosphère (voir Figure I.2). La régulation de l'ouverture des stomates influence donc directement l'intensité de la transpiration (Curé, 1941).

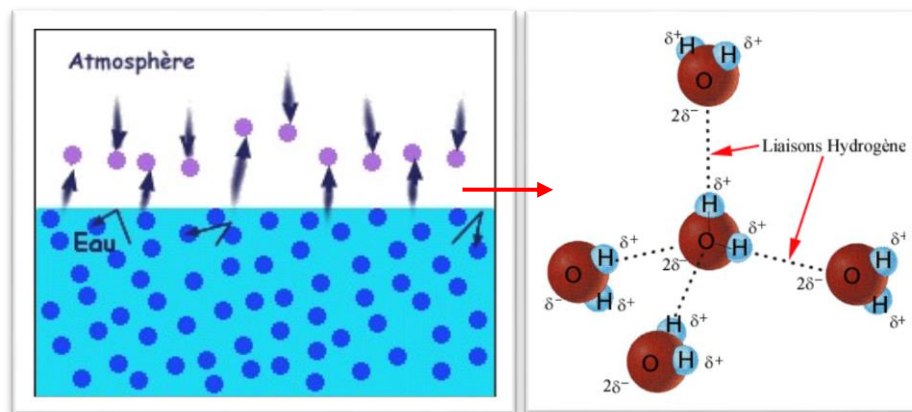


Figure I.3 Mécanisme de l'évaporation

I.2.3 Types d'évapotranspiration (ET)

Il existe trois (03) principaux type de l'évapotranspiration;

I.2.3.1 l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Elle est nommée aussi évapotranspiration de référence (ET₀). Est la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée dans des conditions climatiques données par une surface d'eau libre et un couvert végétal pour lequel l'eau n'est pas facteur limitant (Cosandey et Robinson., 2012) (voir Fig I.3).

I.2.3.2 L'évapotranspiration maximale (ETM)

Elle est définie à différents stades de développement végétatif d'une culture donnée (voir Fig I.3), lorsque l'eau est en quantité suffisante et que les conditions agronomiques sont optimaux. (Cosandey et Robinson., 2012).

$$ETM = ETP \cdot K_c \dots \dots \dots (1)$$

Avec :

ETM : Évapotranspiration maximale (mm/jour)

ETP : Évapotranspiration potentielle (mm/jour)

K_c: Coefficient cultural

K_c intègre les effets des 4 caractéristiques primaires qui distinguent une culture donnée: la hauteur de la culture, la résistance de surface sol - végétation, l'albédo, l'évaporation de sol (**Allen et al., 1998**). Les facteurs qui influent sur la valeur de **k_c** sont : les caractéristiques de la culture, les dates de plantation ou de semis, le rythme de son développement et la durée de son cycle végétatif, les conditions climatiques, en particulier au début de la croissance et la fréquence des pluies ou des irrigations (**Boudjelal, 2007**).

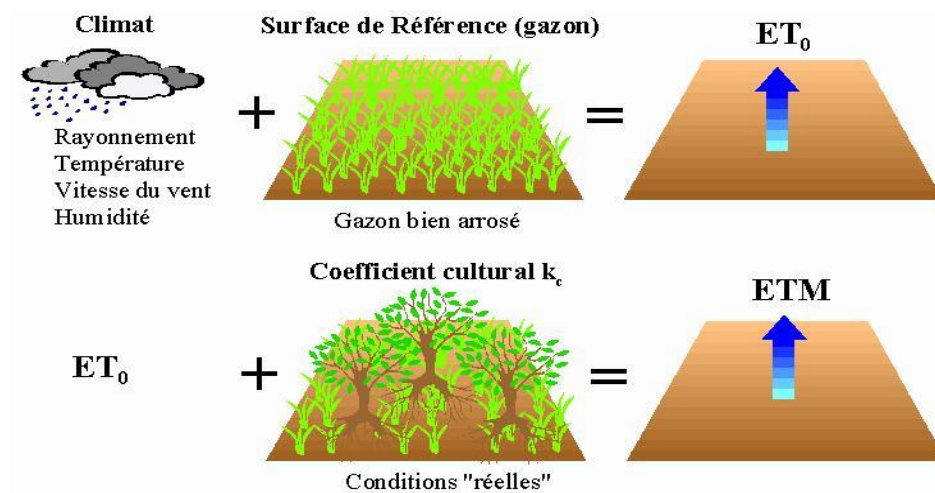


Figure I.4: Schématisation simplifiée de l'ETP et ETM (FAO, 1998)

I.2.3.3. L'évapotranspiration réelle (ETR)

C'est la quantité d'eau réellement évapotranspirée dans des conditions réelles du milieu dont l'alimentation en eau de la plante peut être limitée par des contraintes d'ordre physique (nature du sol), chimique (concentration des solutions) biologique (régulation stomatique) (**Ardoin, 2000**).

I.2.4. Facteurs contrôlant le mécanisme de l'évapotranspiration

Différents éléments climatiques influencent sur le mécanisme de l'évapotranspiration. A savoir :

I.2.4.1. Température

Est un élément primordial qui déclenche le processus de l'évapotranspiration notamment l'évaporation directe. La température est proportionnelle avec l'évapotranspiration, autrement dit sur l'évaporation directe et sur l'ouverture des stomates.

I.2.4.2. Hygrométrie

Elle décrit la quantité de vapeur d'eau dans l'air. L'humidité varie en fonction de la température et de la pression de l'air (**Bensaci et Bouziane, 2018**).

La transpiration végétale est inversement proportionnelle à l'humidité c'est-à-dire qu'elle augmente quand l'humidité de l'air décroît (**Djegui et al., 2002**). Autrement dit, lorsque la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère ambiante est inférieure à celle des feuilles.

Le psychromètre est l'appareil utilisé pour déterminer simultanément la température de l'air et de l'humidité (%).

I.2.4.3 L'insolation

Son influence est en durée (durée d'insolation (h)) et en intensité (Rayonnement solaire global et net ($Kw.cm^{-2}.j$)). L'évapotranspiration s'accroît sous l'influence de la lumière. Les instruments de mesure sont le pyranomètre et le héliographe (**Réméniéras, 1976**).

I.2.4.4 Pression de l'air

La pression atmosphérique représente le poids d'une colonne d'air par unité de surface considérée. Elle intervient dans le calcul de l'humidité. Plus la pression totale au-dessus d'un liquide est élevée, sa tension de vapeur est grande ce qui ne favorise pas l'évaporation. La variation de la pression barométrique est généralement suivie d'autres variations, comme celles de la température et du régime du vent (**Ardoin, 2000**).

I.2.4.5 Le vent

Le vent joue un rôle prépondérant dans le processus d'évaporation par le bais de sa vitesse mais aussi de sa structure verticale et de ses turbulences. Cependant, les turbulences

permettent entre autre l'ascension de l'air humide, tandis que l'air sec descend et se charge d'humidité. Par conséquence, il va se saturer plus ou moins rapidement et par conséquent stopper le processus d'évaporation. Par contre, l'augmentation de la vitesse du vent augmente le taux de transpiration. Ceci est également lié au concept du gradient de concentration de la vapeur d'eau. Signifiant que la vapeur d'eau à proximité immédiate de la plante est emportée par le vent à un taux plus élevé. Cela augmente le gradient de concentration de vapeur d'eau entre les feuilles et l'atmosphère environnante (Ardoin, 2000).

I.3.Méthode d'estimation de l'évapotranspiration

Il existe deux méthodes qui nous permettent pour calculer l'évapotranspiration sont :

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

I.3.1.Méthodes directes

Il s'agit en général des appareils et instruments de mesure de l'évaporation directe ou de l'évapotranspiration. Parmi ces appareils, on cite :

I.3.1.1 Bac d'évaporation « classe A »

L'office national de météorologie (ONM) a adapté cet évapomètre de dimensions internationales uniformes. Il est de forme cylindrique de diamètre 121,9 cm et de profondeur 25,4 cm (Voir Fig.I.5) où l'eau doit être située entre 5,1 à 7,6 cm du rebord pour remédier aux lacunes des débris végétaux et autres (Charles, 1975 in Lachreb et al., 2021). 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. La quantité d'eau perdue par évaporation est mesurée à l'aide d'une jauge à crocher 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.

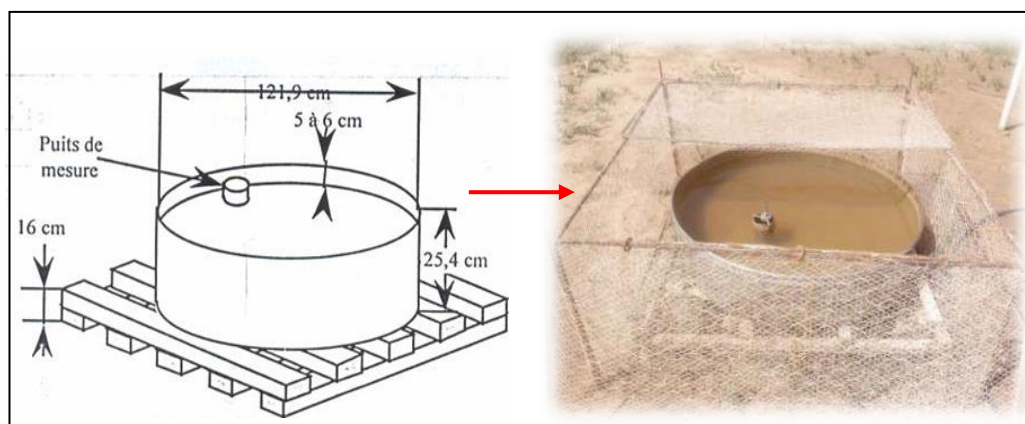


Figure.I.5: Bac classe A

I.3.1.2 Bac Colorado

Est de forme carrée de 91.4cm de côté et de 46 à 91cm de profondeur (voir Fig. I.6). Il est enterré de manière à ce que son rebord soit à 10cm au-dessus de la surface du sol (Lachheb *et al.*, 2021). Donc, il représente mieux l'inertie thermique.

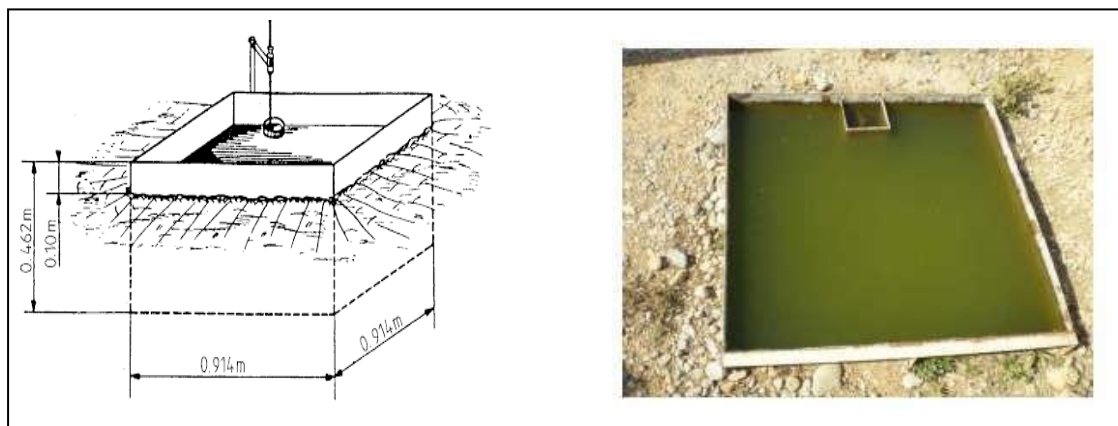


Figure I.6 : Le bac de Colorado

I.3.1.3. Evaporomètre de Piche

Il est constitué d'un tube cylindrique en verre de 25 cm de long et 1,5 cm de diamètre (voir Fig.I.7). Le tube gradué est ouvert en bas et fermé en haut par une feuille circulaire de papier filtre normalisé de diamètre 30 mm et d'épaisseur 0,5 mm, maintenue en place par capillarité et retenue par des ressorts. L'appareil est rempli d'eau distillée, est évaporée progressivement avec du papier filtre ; la baisse du niveau d'eau dans le tube permet de calculer la vitesse d'évaporation. L'appareil est installé sous capot, les mesures sont également très dépendantes des conditions de ventilation (Lachheb *et al.*, 2021).

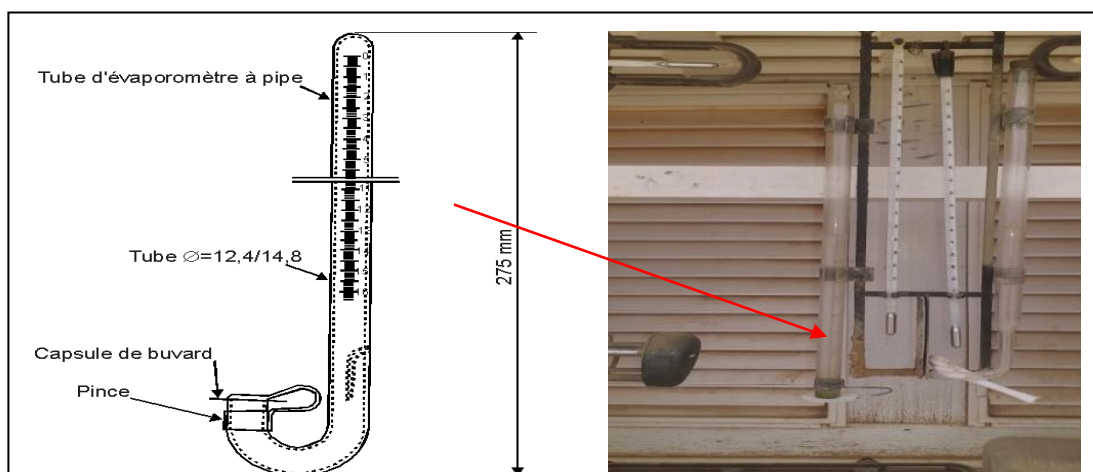


Figure.I.7: Evaporomètre de Piche

I.3.1.4.Lysimètre

Ils consistent en une cuve étanche enterrée, aux parois verticales, ouverte à sa partie supérieure et remplie du sol à étudier (Riou, 1984). La surface du sol est ainsi soumise aux agents climatiques. Les lysimètres ont été améliorés dans le but d'étudier l'évapotranspiration. Ils disposent de limnimètres pour mesurer l'eau ruisselée et l'eau drainée à travers cette parcelle de sol. Un dispositif de pesée avec une bascule enregistreuse ou des lysimètres flottants ont permis de mesurer les variations de poids auxquelles on assimile la perte par évaporation. Ces lysimètres présentent l'avantage de transmettre une analyse très fine dans le temps (Pare et al., 2006 in Boutoutaou, 2022)

L'évolution de l'humidité des sols entre deux profils est obtenue à partir de prélèvements d'échantillons de sol à différentes profondeurs ou en utilisant des sondes (voir Fig I.8) sensibles à l'humidité du sol, du type tensiomètre ou humidimètre à neutrons (Bertuzzi et al., 1994).

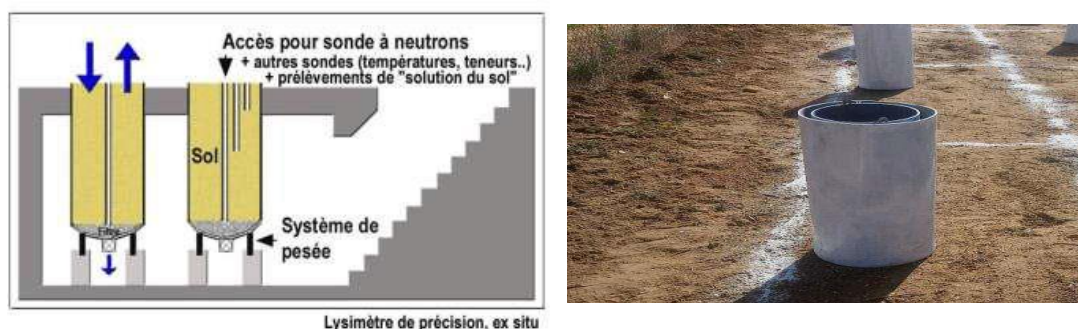


Figure I.8: Lysimètre

I.3.2. Méthodes indirectes

Il s'agit de l'utilisation des formules empiriques développées pour estimer l'évapotranspiration: L'utilisation de ces modèles nécessite la connaissance de certaines données climatiques telles que, la température moyenne de l'air, l'humidité relative, la radiation solaire globale et la vitesse du vent. De nombreuses formules empiriques ont été proposées pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle. Ci-dessous quelques formules les plus utilisés et qui vont être utilisés dans ce travail.

I.3.2.1. Formule de Thornthwaite (1948)

Thornthwaite a introduit la notion d'évapotranspiration potentielle ou ETP qui représente L'ETP représente la quantité d'eau maximale susceptible d'être évaporée par une végétation couvrant complètement et uniformément le sol, alimentée en eau de façon optimale et s'étendant sur une surface assez grande (Ardoin, 2000).

L'expression de la formule de Thornthwaite s'écrit :

$$ETP = 16. \left(\frac{10.T}{I} \right)^a . F(\lambda) \dots \dots \dots (2)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = 0,49 + (1,79.10^{-2}) \times I - (7,71.10^{-5}) \times I^2 + (6,75.10^{-7}) \times I^3$$

Avec :

T: Température moyenne de l'air pour la période considérée.

I : indice thermique annuel.

F(λ) : Terme correctif fonction de la durée théorique de l'insolation ,la latitude et du mois.

a : Fonction complexe de l'indice

I.3.2.2. Formule de TURC (1953)

Est une formule complexe donnant l'évapotranspiration potentielle observée sur les cases lysimétriques de quelques stations situées en Europe, en Afrique du nord et en Asie. Cette évapotranspiration est fonction de l'insolation, de la température, et de l'humidité relative (Halimi, 1980). La formule de Turc s'écrit :

$$\text{Si } H_r \geq 50\% \quad ETP = 0,4. \frac{T}{T+15} . (I_g + 50) \dots \dots \dots (3)$$

$$H_r < 50\% \quad ETP = 0,40. \left(\frac{T}{T+15} \right) . (I_g + 50) . \left(1 + \frac{50-H_r}{70} \right) \dots (4)$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

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

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

Hr : l'humidité relative de l'air (%).

I.3.2.3. Formule de Penman

Elle est la plus complétée et la plus complexe (Allen *et al.* 1998), est basée sur la notion du bilan énergétique. Son expression s'écrit:

$$ETP = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{cste}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \dots\dots\dots(5)$$

$$\Delta = \frac{4098 e_{sat}(T)}{(T+237.3)^2},$$

Avec:

ETP: évapotranspiration potentielle (mm/j).

Rn : Radiation nette MJ/m²/j

G : Flux de chaleur du sol en MJ/m²/j

γ: Constante psychométrique $\gamma = 0.665 \cdot 10^{-3}$ en Kpa/°c

T: Température moyenne journalière (°C) ;

e_s : Pression saturante de vapeur d'eau (KPa) ;

e_a : Pression actuelle de vapeur d'eau (KPa) ;

Δ : pente de la courbe de la pression de vapeur ;

u_2 : vitesse de vent à 2m du sol en (m/s) ;

Ayant la vitesse du vent à 10m du sol nous utiliserons la formule suivante, avec z l'altitude à laquelle la vitesse est mesurée (ici 10 mètres)

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$$

I.3.2.4. Formule de BOUCHET (R.J.) (1963)

Cette formule permet d'évaluer l'évapotranspiration à partir d'une mesure de l'évaporation par l'évaporomètre Piche pour la période considérée (jour, décade, mois) suivant l'équation (8) donnée ci-dessous:

$$ETP = \alpha \cdot \lambda(\theta) \cdot Ep \dots\dots\dots(8)$$

$\alpha = 0.37$ dans le cas où le Piche est placé dans un abri à 2 m au-dessus du sol

λ : Coefficient fonction de la température θ (voir tableau de l'annexe).

θ : Température moyenne entre la température de l'air et la température du point de rosée θ_r

E_p : Evaporation piche (mm/(jour ,décade ,mois)).

CHAPITRE II

Présentation de la zone d'étude

Introduction

Ce chapitre est une synthèse des caractéristiques géographiques, hydrographiques, climatiques, géologiques de la région de M'sila.

II.1 Situation géographique de la zone d'étude

La ville de M'sila est située au Nord Est de la Wilaya de M'sila à une distance d'environ 248Km au Sud Est de la capitale d'Alger (Fig.II.1).Elle est limitée : au nord par la Commune d' Elaach(wilaya de Bordj Bou Arreridj), au sud par la commune Ouled Madhi, à l'Ouest ; par la commune de Ouled Mansour et à l'Est par les communes de Metarfa.

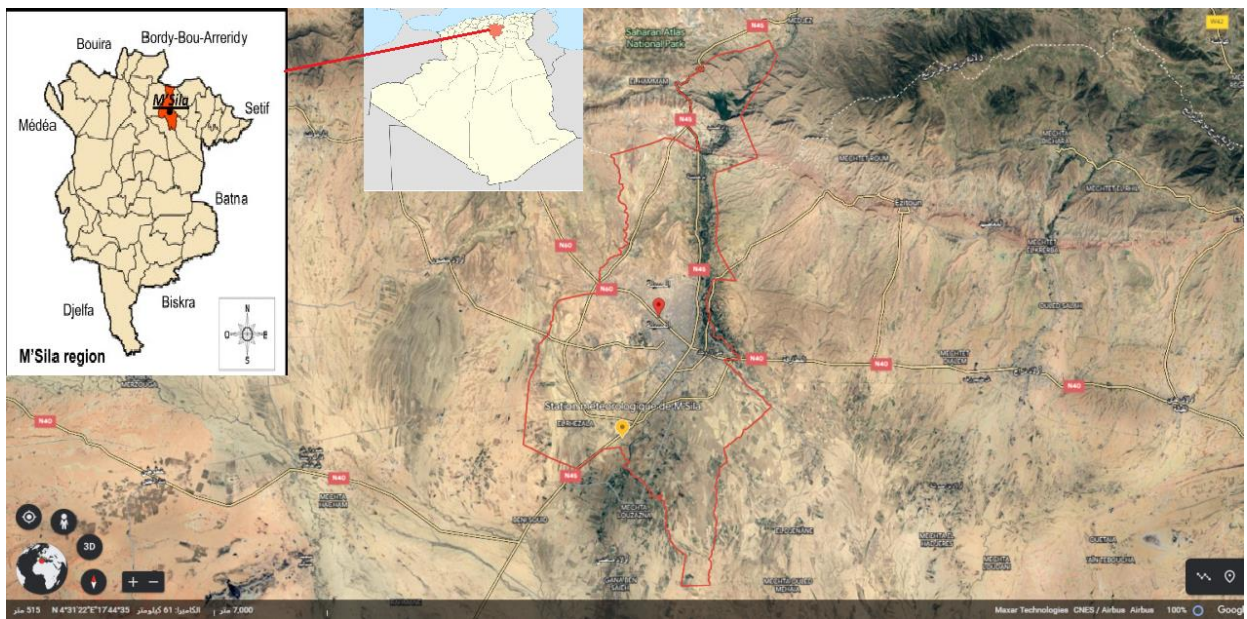


Figure II.1: Situation géographique de M'sila (Source : Image satellite Google Earth2022).

La station Météorologique de Ghzel est située à environ 9Km au sud du centre de la ville de M'sila, sur la rive droite d'Oued M'sila (voir Fig II.1 et II.2).Les coordonnées géographiques de la station sont indiquées au tableau suivant:

Tableau II.1 : Caractéristique de la station météorologique de M'sila

Nom	Latitude	Longitude	Altitude(m)
Ghzel	35°40'N	04°30'E	441m

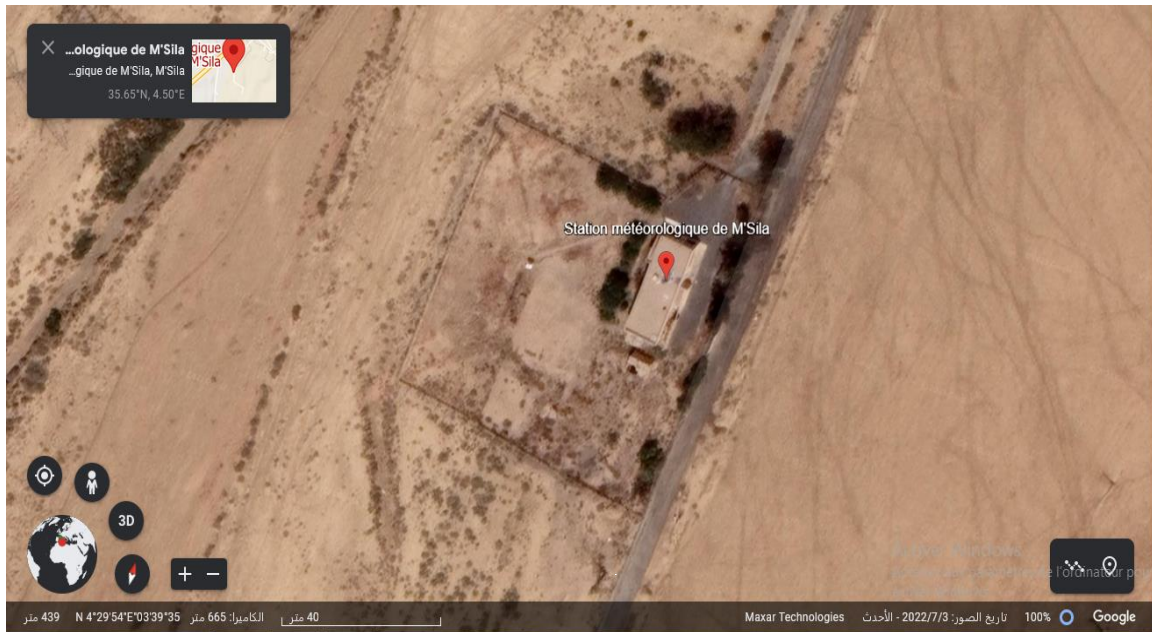


Figure II.2 : Situation géographique de la station météorologique de Ghzel (Source : Image satellite Google Earth 2022)

II.2 La géologie

La région de M'sila fait partie de la plaine alluviale du Hodna entre les piémonts de l'atlas Saharien au sud et à l'ouest, de l'atlas Tellien au nord et la chaîne des Aurès à l'Est (Fig II.03) (Bakhti et Lagraa, 2017).

Les études géologiques et géophysiques indiquent que la région de M'sila est caractérisée par la présence d'un remplissage détritique très hétérogène, daté du Miot-Plion-Quaternaire, constitué des sables, graviers et galets dans une matrice argilo-limoneuse (Houerou et Claudin, 1972 in Bakhti et Lagraa, 2017).

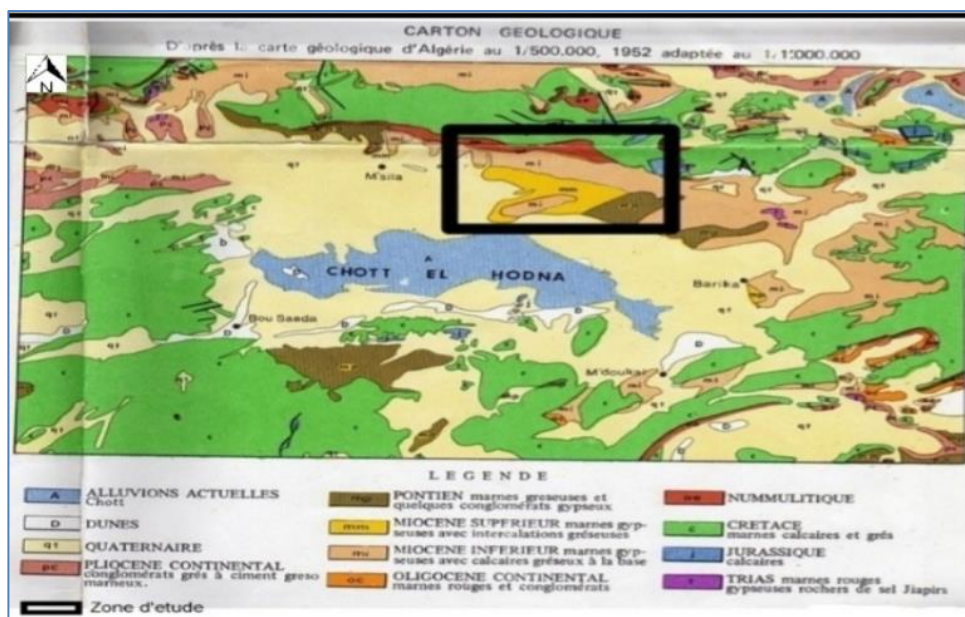


Figure II.3: Carte Géologique de la zone d'étude (Source : Houerou et Claudin, 1972)

II.3. Le réseau hydrographique

La plaine alluviale du Hodna couvre une superficie de 4500 Km² dans le bassin endoréique hédéen du Chott répertoire par l'ANRH sous le N°05. Selon les informations prises de l'Agence Nationale Hydrique (ANRH) M'sila, Le réseau hydrographie est très dense, représenté par des Oueds a écoulement temporaire, à savoir:

- Oued K'Sob.
- Oued Lougmane.
- Oued Mouilha.
- Oued Kerma.

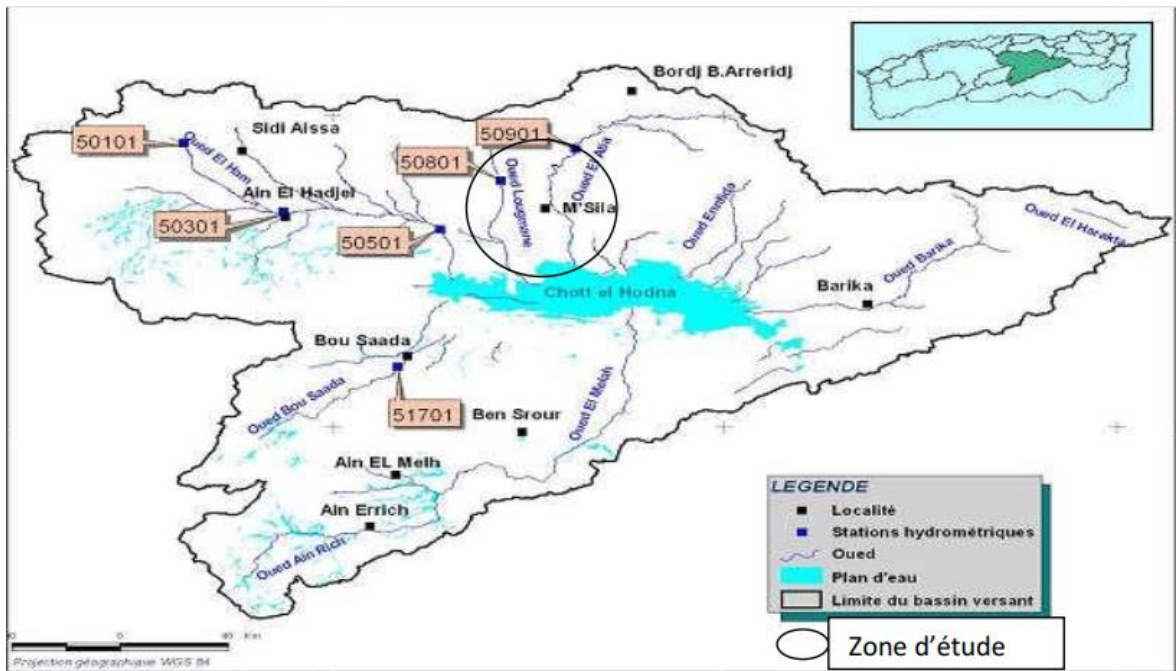


Figure II.4 : Carte hydrographique du Bassin d'El Hodna (Source : extrait de carte hydro-climatologique de l'Algérie du nord)

II.4.Pédologie

Selon la carte pédologique de Hodna citée ci-après (Fig. II.5), divers types de sol existent dans la zone de M'sila. Sur les pentes les sols sont de type alluviaux peu évolués ne dépassent pas les 50 cm d'épaisseur. L'horizon supérieur est brun foncé limono-argileux à structure granuleuse. Cet horizon devient en profondeur plus rougeâtre et plus lourd, avec une quantité importante de cailloux. Dans les dépressions des montagnes, les sols sont profonds avec un horizon proche de la surface brun foncé à structure granuleuse et à texture limoneuse, poreuse en profondeur il devient plus clair, plus rougeâtre et plus

lourd (40% d'argile). Les parties ouest et nord-ouest de la ville de M'Sila sont caractérisées par une terrasse de cailloux (FAO, 1975).

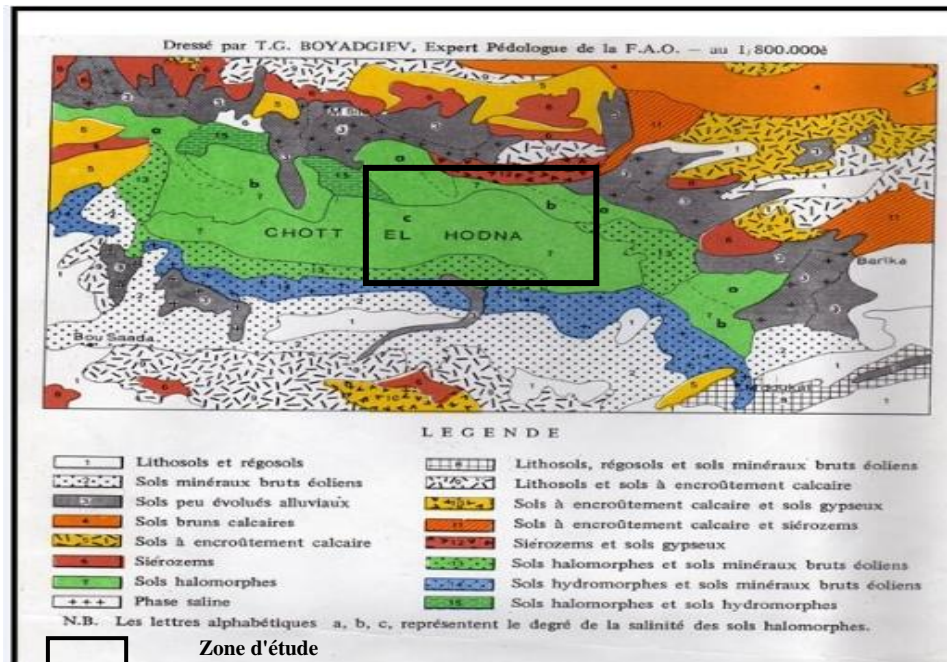


Figure .II.5. Carte pédologique de Hodna(Source : FAO, 1975)

II.5.Végétation

Selon les documents du haut-commissariat pour le développement de la steppe (HCDS), la végétation naturelle de parcours M'Sila est caractérisée par une couverture basse et clairsemée, plus ou moins dégradée, composée de petits plants en touffes plus ou moins dispersées. Les faciès les plus dominants sont principalement des faciès à : *Stipa tenacissima*, *Artemisia herba alba*, *Salsola vermiculata* (Fig .II.6).

Les formations d'Alfa (*Stipa tenacissima*) sont caractéristiques des étages bioclimatiques semiarides à hiver frais et froid, et l'étage aride supérieur à hiver froid. Les formations à armoise blanche (*Artemisia herba alba*) s'étalent sur les zones d'épandage dans les dépressions (Aidoud et Nedjraoui, 1992).



Figure II.6. Quelques exemples d'espèces steppiques de la flore de M'sila

II.6. Le Relief

La plaine du Hodna est située dans une dépression à une altitude moyenne de 400 m. Les hautes plaines se trouvant à partir de 500 m d'altitude, occupent près de 65% de la superficie de la wilaya. Au sud de l'Atlas tellien, l'ensemble des Hautes plaines offre un paysage de steppes unique; à l'Ouest ces steppes s'étirent sur près de 500 Km sur une largeur de 100 Km à 200 Km; et à l'Est, elles s'étendent sur près de 200 Km, et en raison d'un relief plus élevé (800 m à 1000 m) on parle plutôt de Hauts plateaux. C'est une région de transition où l'élevage des ovins y est la principale activité (PDRMM, 2008 in Achouri et Tadjine, 2013).

II.7. Description des instruments utilisés dans la station météorologique de M'sila

La station météorologique de Ghzel (W. M'sila) dispose de plusieurs instruments de mesure, nous allons décrire tous les appareils lors de nos visites à la station:

II.7.1 Pluviomètre

Pluviomètre est un instrument permettant de mesurer la quantité de précipitations (pluie, neige, grêle) tombante sur une zone donnée pendant une période de temps donnée (Jour). Il se compose d'un entonnoir en métal ou en plastique qui rassemble les précipitations et les dirige dans un récipient gradué, généralement en verre ou en plastique transparent pour permettre une lecture facile des mesures. Le pluviomètre indiqué en photo II.1 est de type augets basculeurs. Les données recueillies par les pluviomètres sont utilisées pour évaluer les conditions météorologiques et pour aider à planifier les activités agricoles.



Photo II.1. Pluviomètre de la station météorologique de Ghazel (cliché pris le 27/02/2023)

II.7.2. Anémomètre

Est un instrument de mesure de la vitesse et de la direction du vent. Il existe plusieurs types d'anémomètre, mais l'un des plus courants est l'anémomètre à coupelles (Voir photo II.02). L'anémomètre à coupelles est constitué de trois ou quatre coupelles disposées sur un axe horizontal. Les coupelles sont orientées à 120 ou 90 degrés les unes des autres et tournent autour de l'axe horizontal en fonction de la force et la direction du vent.



Photo II.2. L'anémomètre de la station Ghazel (Cliché pris le 27/02/2023)

II.7.3. Psychromètre

Est un instrument de mesure utilisé pour mesurer l'humidité relative de l'air. Il se compose de deux thermomètres : l'un est sec et l'autre est enveloppé dans une mèche de coton humide. Les deux thermomètres sont placés côte à côte, et le mouvement de l'air autour de la mèche humide provoque une évaporation qui refroidit le thermomètre humide (Voir photo II.3). En comparant les lectures des deux thermomètres, on peut déterminer l'humidité relative de l'air. Plus l'écart entre les deux températures est grand, plus l'air est sec, et inversement.

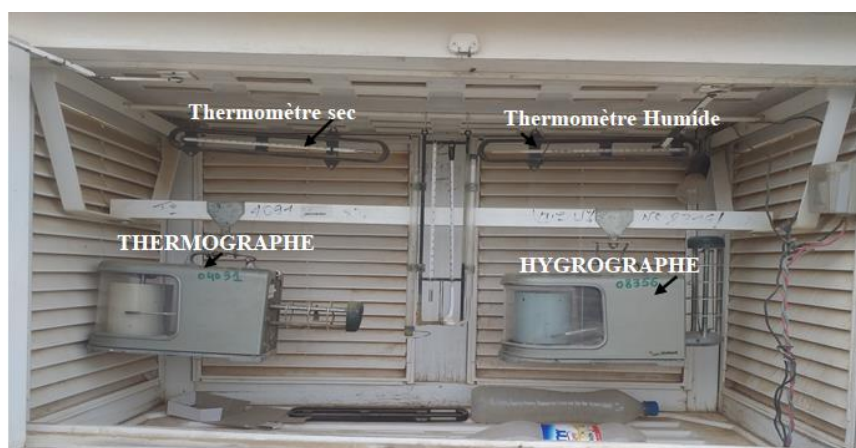


Photo II.3. Abri météorologique de la station Ghazel contenant un Psychromètre (cliché pris le 27/02/2023)

II.7.4. Thermomètres

Est l'instrument de mesure de la température de l'air. Les thermomètres les plus courants sont à mercure et à alcool (Voir photo II .3).Le thermomètre à mercure qui est à sec permet l'enregistrement de la température max durant la journée. Alors que le thermomètre à alcool qui est humide indique la température minimale enregistrée durant la journée. Ces thermomètres sont placés dans un abri météorologique (voir photo II.3) et posés légèrement inclinés.

II.7.5.Evaporimètre Piche

Est un appareil de mesure de l'évaporation, est constitué d'un tube cylindrique de 275 mm de hauteur et de 12,4/14,8 mm de diamètres gradué, rempli avec de l'eau distillée et dont l'ouverture est recouverte d'un papier buvard absorbant de 3 cm de diamètre retenu par une pince (Photo II.4), à travers lequel se fait l'évaporation. L'évaporation à la surface externe du papier est constamment remplacée par l'eau provenant du tube ce qui laisse un espace vide mesurable du côté scellé. L'opérateur peut alors mesurer la perte de liquide par unité de temps en suivant la descente du liquide.



Photo II.4.Evaporomètre Piche de la station Ghazel (Cliché pris le 27/02/2023).

II.7.6. Thermomètre de mesure de température du sol

Est un appareil utilisé pour mesurer la température du sous-sol à différentes profondeurs. A la station météorologique de Msila, la prise de température du sol se fait à différentes profondeurs (à 0,3m et 0,6m) (photo II.5). Ce thermomètre est généralement utilisé avec des sondes sensibles à l'humidité du sol, de type tensiomètre ou humidimètre à neutrons permettant le suivi de l'humidité du sol à différentes profondeurs et par conséquent estimer l'évapotranspiration.

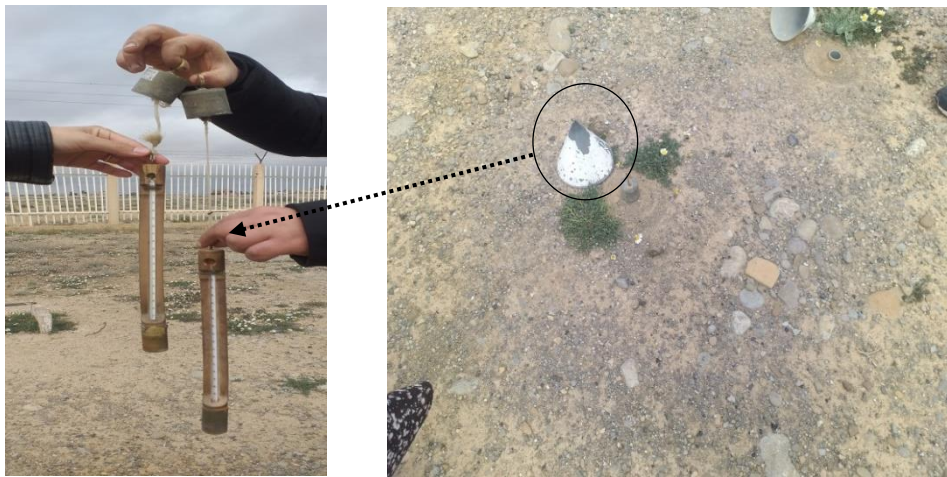


Photo II.5. Thermomètre de température du sol profond du sol station ghazel (cliché pris le 27/02/2023)

II.8. Etude climatique

De par sa position, la région de M'sila est soumise à l'influence du relief. Pour identifier son régime climatique, les données climatiques de la station de Ghzel ont été collectées de l'agence nationale de météorologie (O.N.M) d'Alger

II.8.1. Etude des éléments climatiques

II.8.1.1 Précipitations

La distribution temporelle des précipitations dans la région de M'sila durant la période (1988-2016) soit 28 ans, est mentionnée au tableau II.2 suivant.

Tableau II.2: Précipitation moyennes mensuelles (mm) de la station de Ghzel (1988-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	moy
P(mm)	26.0	22.2	18.6	18.3	17.1	13.4	15.2	20.8	23.5	8.5	3.4	7.7	194.7

(Source : ONM ,2023)

Les résultats du tableau II.2 montrent que les précipitations moyennes annuelle dans la région de M'sila est de l'ordre de **194.7mm**.

La précipitation maximum est enregistré en septembre avec valeur **26mm** et le minimale enregistré avec valeur **3,4mm** en le mois d'Aout.

La répartition saisonnière des précipitations est donnée dans la figure suivante:

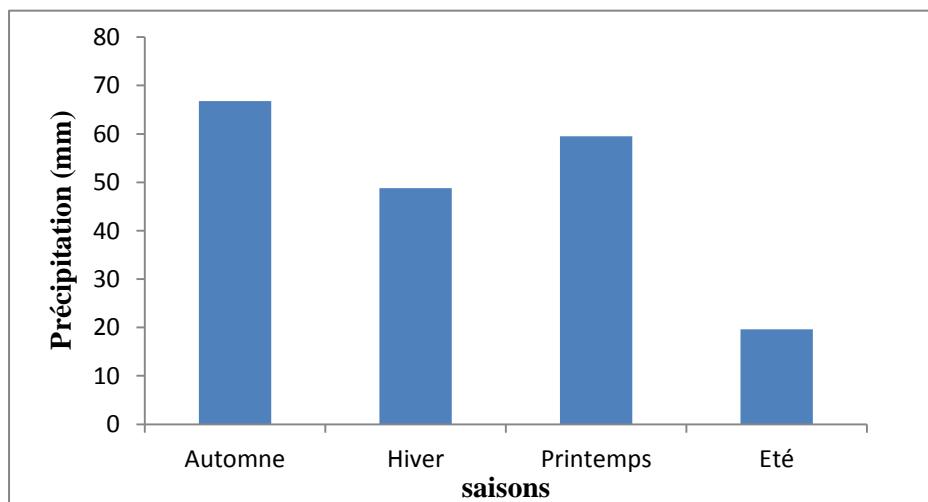


Figure II.7: Répartition des précipitations saisonnières de la région de M'sila (1988-2016)

L'analyse de la **figure II.7** montre que le régime saisonnier des précipitations dans la région de M'sila est de type **APHE** (Automne, Printemps, Hiver, Eté) dont la saison d'automne est la plus arrosée, alors que l'été est la saison la plus sèche.

II.8.1.2. Température

La distribution temporelle de la température enregistrées à la station de Ghzel durant la période (1988-2016) sont illustrées au tableau II.3 et Figure II.8 suivants.

Tableau II.3 : Températures moyennes mensuelles et annuelles de la station de Ghzel (1988-2016)

T(°C)	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aout	Moy annuel
T moy	26.6	19.6	13.8	9.7	8.4	10.3	13.3	17.9	22.6	28.4	31.7	31.4	21.7
T max	38.8	33.3	25.8	19.4	19.8	21.2	27.7	31.8	35.9	40.7	42.3	43.4	31.6
T min	13.0	7.0	-1.9	-3.9	-0.2	-1.4	2.0	4.5	8.1	14.4	18.2	18.3	7.3

(Source: ONM, 2023)

Les résultats du tableau II.3 et de la figure II.8 montrent que la température moyenne annuelle est de **21,7°C** dont le maximum est enregistré en saison estivale (mois d'Aout) avec **43.4°C**. La température minimale est enregistrée en saison d'hiver où la température a diminué jusqu'à **-3.9°C** au mois de Décembre. On remarque que l'écart de température entre T_{max} et T_{min} est très important.

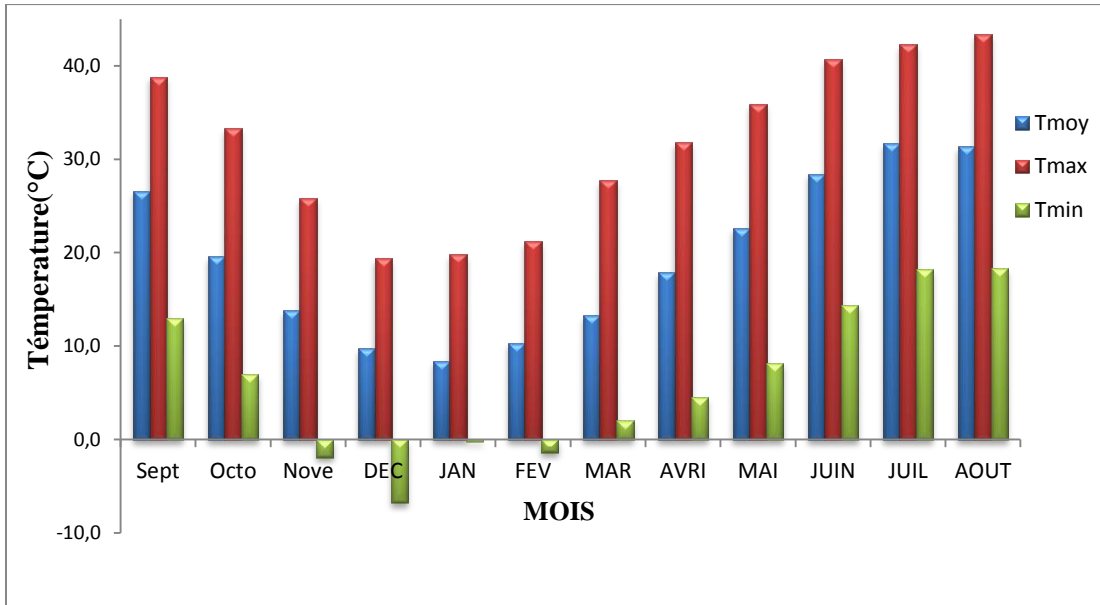


Figure II.8: Les variations des températures moyennes mensuelles, minimales et maximales dans la région de M'sila (1988-2016)

II.8.1.3 Humidité relative

La distribution temporelle de l'humidité relative enregistrée à la station de Ghzel durant la période (1988-2016) est illustrée au tableau II.4.

Tableau II.4 : Humidité relative (Hr) moyenne de l'air à la station de Ghzel (1988-2016).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jull	Aout	Année
Hr(%)	52.9	60.1	70.9	75.3	74.2	67.3	60.6	56.4	48.9	41.6	35.9	38.1	56.9

(Source: ONM, 2023)

L'humidité moyenne annuelle est de 57 % d'environ ; les valeurs les plus élevées sont enregistrées en mois de novembre, décembre et janvier (**H>70%**). Alors que durant les mois de juillet et août l'humidité relative est faible (inférieure **40%**), c'est le taux le plus faible dans l'année.

II.8.1.4. Le vent

La distribution temporelle de la vitesse moyenne du vent (m/s) enregistrée à la station de Ghzel durant la période (1988-2016) est illustrée dans la figure II.9 ci-dessous.

L'analyse de la **figure II.9** montre que la vitesse moyenne du vent dans la région de M'sila est faible, avec une moyenne de **4,3 m/s**. Les basses vitesses sont observées en automne, alors que les plus élevées sont enregistrées au printemps et en été.

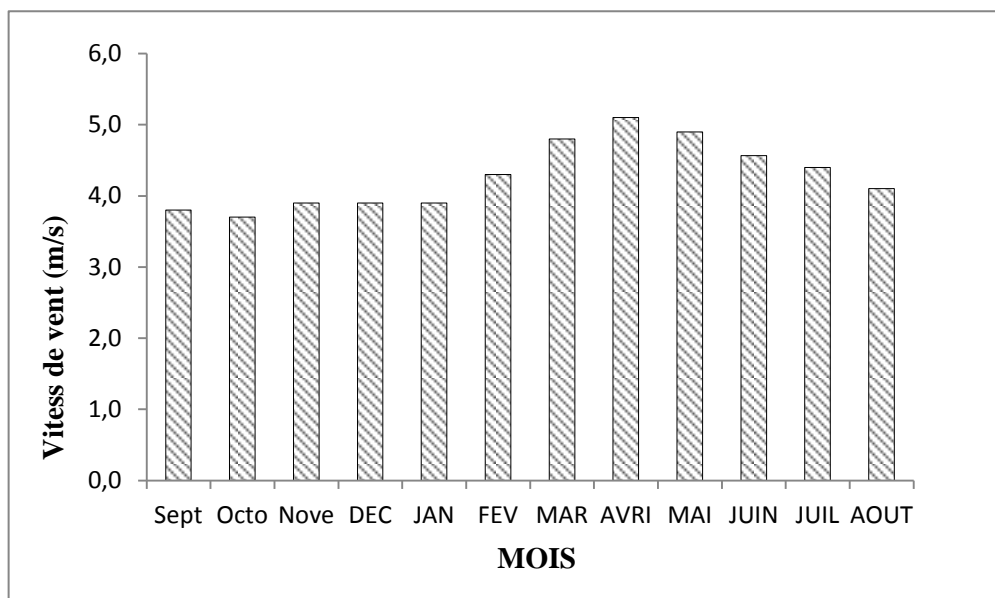


Figure II.9 Les variations moyennes mensuelles de la vitesse des vents pour la commune de M'sila(1988-2016)

II.8.1.5. Evapotranspiration

Est une évaporation enregistrée par l'appareil PICHE et transformée par la formule de Bouchet en évapotranspiration. Sa distribution temporelle durant la période (1988-2016) est illustrée au tableau II.5 ci-après.

Tableau II.5 Valeurs mensuelles de l'évapotranspiration calculée par la formule de Bouchet durant le période (1988-2016)

MOIS	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aout	Année
ETP (mm)	139.4	85.9	44.7	34.1	35.8	44.2	72.3	97.6	133.3	193.5	259.4	236.4	1376.6

Les résultats du tableau II.5 montre que l'évaporation moyenne annuelle durant la période (1988-2016) est de 1376.6 mm dont le maximum de 259.4 mm est enregistré en saison d'été (mois de Juillet), alors que la plus faible valeur d'évaporation est en hiver

(mois de décembre et janvier) de 34.8 mm d'environ. Donc l'évapotranspiration augmente avec l'évolution mensuelle de la température.

II.8.2 Synthèses bioclimatique

Pour identifier le climat de la région de M'sila, plusieurs indices climatiques ont été utilisés.

II.8.2.1. Indice d'aridité annuel de DE MARTONNE

L'indice d'aridité de De Martonne, noté I, permet de déterminer le degré d'aridité d'une région. Son expression est donnée par la relation suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \dots\dots\dots(1)$$

Où :

P : Précipitations moyenne annuelle (mm) ;

T:Température moyenne annuelle(°C).

I=6,14 **5<I<10** donc le climat de la zone de M'sila est **aride**.

II.8.2.2. Climatogramme d'Emberger

Il a été mis en point pour caractériser les différents climats méditerranés grâce au quotient pluviométrique d'Emberger (Q_2) (**Amandier, 2013**).

Ce quotient est déterminé comme suit :

$$Q_2 = 2000 \frac{P}{(M^2 - m^2)} \dots\dots\dots(2)$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

M : température moyenne maximale du mois le plus chaud(°K).

m: Température moyenne minimale du mois le plus froid(°K).

Après application de la formule, la valeur de **$Q_2=14.04$** .

La valeur de Q_2 et la température minimale (m) sont portés sur le Climatogramme. L'intersection des deux points localise la région de M'sila dans l'étage climatique **aride a hiver froid** (voir Fig II.10).

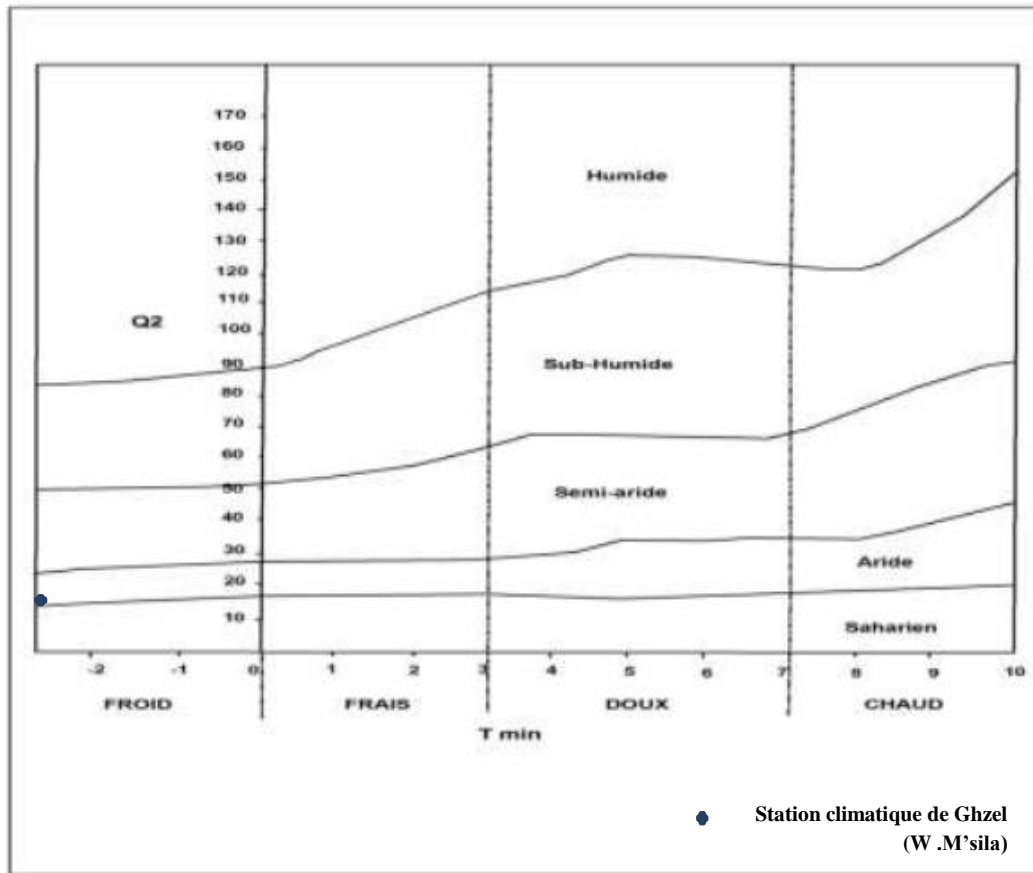


Figure II.10 :Climatogramme d'Emmberger de la zone de M'sila durant (1988-2016)

Les deux (02) méthodes indiquent le même étage climatique de la région de M'sila qui est **aride**.

II.8.3.Diagramme ombrothermique de Bagnouls& Gaussen (1957)

Ce diagramme indique la durée et l'intensité de la période sèche selon la position de la courbe des précipitations par rapport à celle de la température. Selon Bagnouls& Gaussen, un mois est dit sec si le total mensuel des précipitations exprimées en mm est égal ou inférieur au double de la température moyenne ($P=2T$).

L'intersection des deux courbes de précipitations et celle de la température de la région de M'sila est illustré dans la figure II.11 suivante

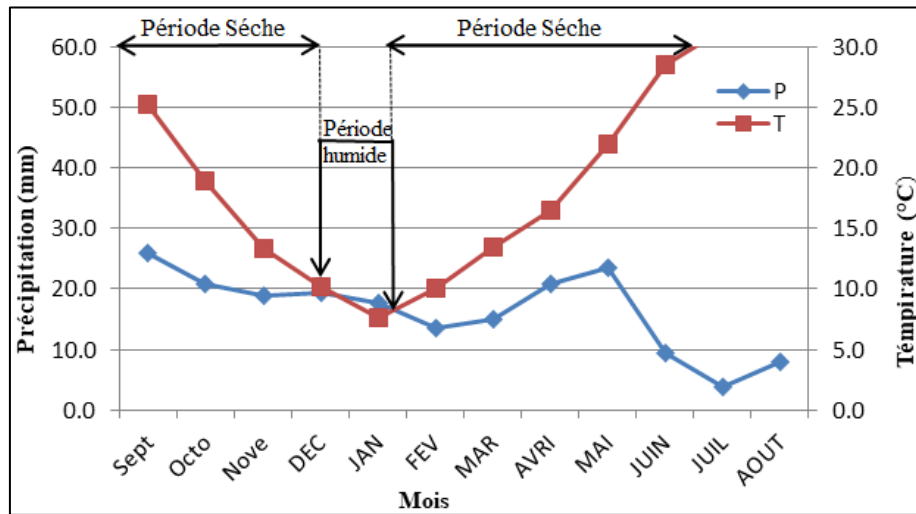


Figure II.11 : Diagramme Ombrothermique pour la station météorologique de M'Sila (1988-2016)

Le diagramme ombrothermique de la station de M'Sila (figure II.11) montre l'existence de deux (02) périodes durant l'année ; une période sèche qui s'étale sur la grande partie de l'année (environ 11 mois à partir du mois de Février. Alors que la période humide est seulement de 1 mois d'environ durant la saison d'hiver (fin du mois de Décembre jusqu'à la fin du mois de Janvier), ce qui caractérise le climat aride de la région de M'sila.

CHAPITRE III

Application des formules empiriques d'estimation de l'évapotranspiration

Introduction

Après avoir présenté les expressions des trois (03) formules empiriques retenues dans la partie bibliographique à savoir : Thornthwaite , Turc et Penman ; nous comparons dans ce chapitre leurs résultats d'application aux valeurs observées à base du Piche pour sélectionner le meilleur modèle adéquat de la région de M'sila.

III.1. Méthodologie de travail

Pour choisir la meilleure formule empirique adaptée aux conditions climatiques de la région de M'sila, la méthodologie de travail est la suivante :

- 1- Calcul de l'évapotranspiration potentielle par les trois (03) formules empiriques suivantes: Thornthwaite, Turc et Penman-Monteith.
- 2- Calcul de l'évapotranspiration enregistrée à la station de Ghzel (W. M'sila) sur la base de l'évaporomètre de Piche.
- 3- Comparaison des résultats d'application des formules empiriques aux valeurs observées en utilisant des paramètres statistiques.
- 4- Choix de la meilleure formule représentative de la région de M'sila.

III.2. Application des formules empiriques

L'évapotranspiration potentielle a été calculée par les formules mentionnées au chapitre I.

La période d'étude pour l'ensemble des formules empiriques est de 28 ans (1988/89-2015/16). Le choix de cette période est basé sur la disponibilité des données climatiques au niveau de la station météorologique de Ghzel.

Les données climatiques recueillies sont de nature mensuelle. Certaines données climatiques comme la Température, Humidité relative, la vitesse du vent, l'évaporation par Piche ont été collectées des services de l'agence nationale de météorologie (O.N.M) d'Alger. Alors que la durée d'insolation a été téléchargée du site de meteoblue <https://www.meteoblue.com> et les données relatives à la radiation et la pression atmosphérique proviennent du site de la NASA <https://power.larc.nasa.gov>.

III.3 Résultats d'application

III.3.1. Résultats de la formule de Thornthwaite

III.3.1.1 A l'échelle annuelle

Les résultats de calcul de l'évapotranspiration potentielle par la formule Thornthwaite à l'échelle annuelle durant la période (1988-2016) sont récapitulés dans la Figure III.1 suivante.

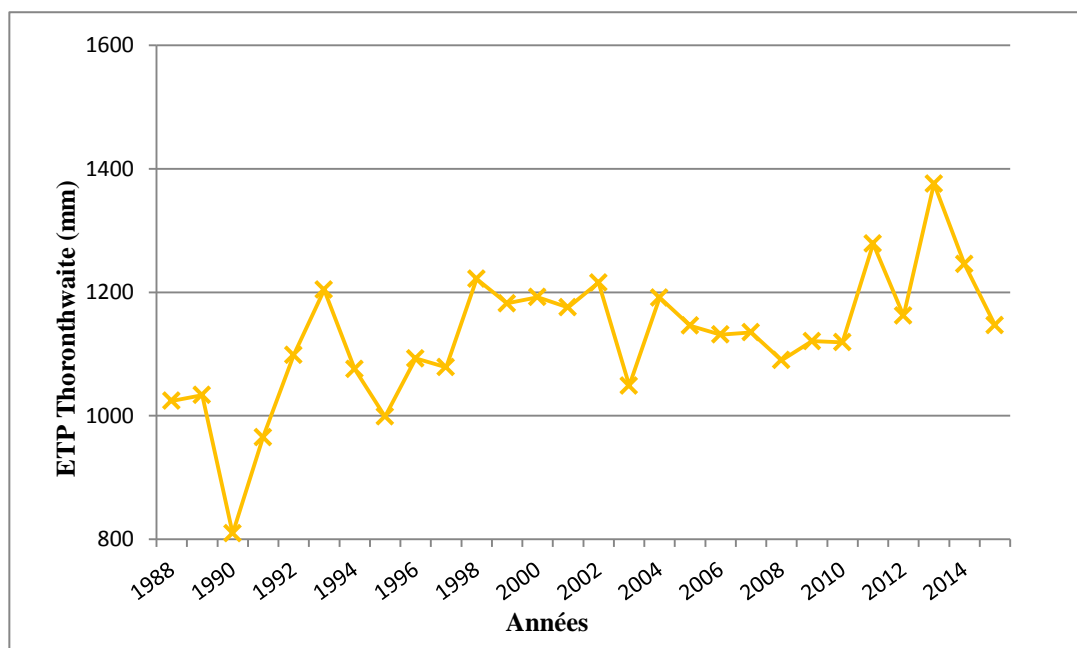


Figure.III.1. Evapotranspiration annuelle par Thornthwaite durant la période (1988-2016)

Le graphe de la variation annuelle de l'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite montre que la moyenne annuelle durant la période (1988-2016) est de 1127 mm dont le maximum de 1375 mm est enregistré en 2013. Alors que la valeur la plus faible (809 mm) est observée en 1990. Cette variation de l'ETP est liée directement à la variation de la température moyenne annuelle autrement dit la température moyenne annuelle de l'année 1990 est la plus faible (18,8°C) et celle la plus élevée est observée en 2013 avec 21,4°C. Donc, la température est le seul élément descriptif de l'ETP par Thornthwaite.

III.3.1.2 A l'échelle mensuelle

La distribution de l'évapotranspiration mensuelle par Thornthwaite est indiquée au tableau III.1 suivant.

Tableau.III.1. Distribution mensuelle de l'évapotranspiration par la formule Thornthwaite durant le période (1988-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
ETP (mm)	126.3	73.8	28.9	12.3	10.4	14.4	33.6	57.6	116.1	185	245	223.6	1127.1

Les résultats du tableau III.1 montrent que les variations mensuelles de l'évapotranspiration sont bien marquées avec un minimum en saison d'hiver de 10.4 à 14.4 mm qui coïncide avec des valeurs de température mensuelles les plus faibles (de l'ordre de 12°C). L'évapotranspiration potentielle augmente progressivement jusqu'à atteindre son maximum en saison d'été ; plus précisément au mois de juillet et Aout où la température moyenne mensuelle peut atteindre 43°C et l'ETP est de 245 mm seulement au mois de juillet.

III.3.2. Résultats de la formule de Turc

III.3.2.1 A l'échelle annuelle

Les résultats de calcul de l'évapotranspiration potentielle par la formule de Turc à l'échelle annuelle durant la période (1988-2016) sont récapitulés dans la Figure III.2.

La variation annuelle de l'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Turc durant la période (1988-2016) montre que la moyenne annuelle est de 1417 mm dont le maximum de 1557 mm enregistré en 2001. Alors que la valeur la plus faible (1225.5 mm) est observée en 1995. Cette variation de l'ETP est liée à la fois à la température moyenne annuelle, la radiation globale et l'humidité relative. Lorsque la température augmente, la radiation solaire augmente surtout en climat aride comme celui de la région de M'sila par conséquence l'ETP augmente. Ainsi, l'humidité relative de l'air dans la région aride de M'sila est généralement inférieure à 50% ce qui favorise le processus de l'évapotranspiration.

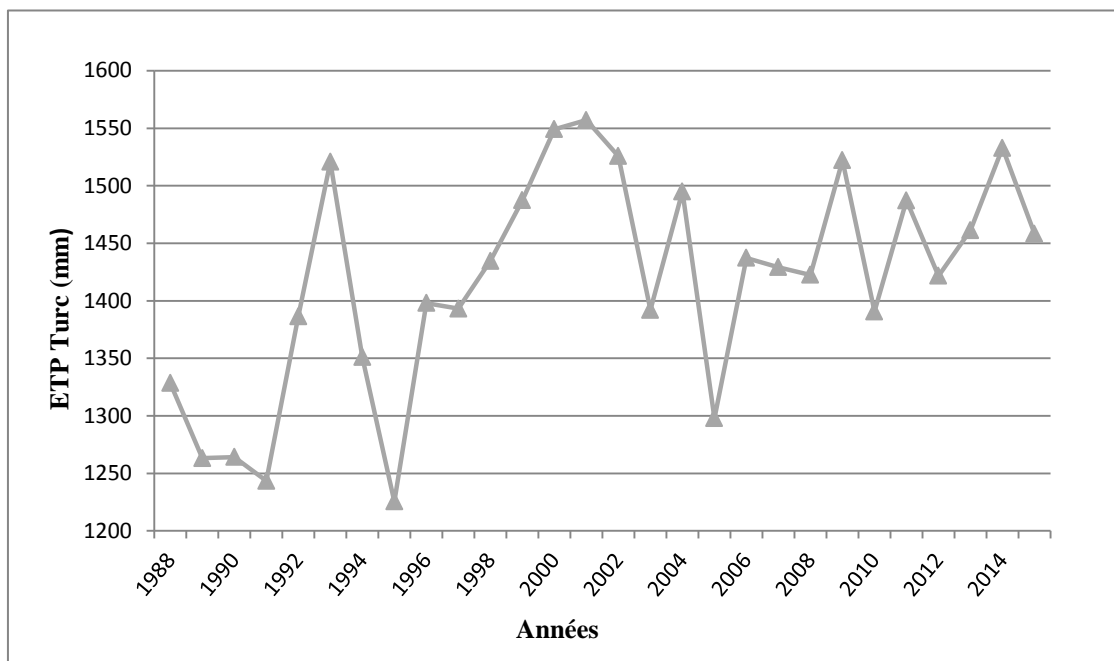


Figure.III.2: Evapotranspiration annuelle par Turc durant le période (1988-2016)

III.3.2.2 A l'échelle mensuelle

La distribution de l'évapotranspiration mensuelle par Turc est indiquée au tableau III.2 suivant.

Tableau III.2 : Valeurs mensuelles d'évapotranspiration calculées par la formule Turc durant le période (1988-2016)

MOIS	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aout	Année
ETP (mm)	160	113.2	72.9	44	36.3	43.6	68.6	99	141.8	187.5	227.4	222.8	1417

Les résultats du tableau III.2 montrent que les variations mensuelles de l'évapotranspiration sont bien marquées. L'ETP augmente progressivement à partir du mois de Mars jusqu'à atteindre son maximum de 227 mm au mois de juillet puis elle diminue significativement avec la diminution de la température moyenne pour atteindre les plus faibles valeurs (de l'ordre de 41 mm) en saison d'hiver. Nous remarquons aussi que l'écart de l'ETP entre la valeur maximale et celle minimale est très marquant (191mm) ce qui montre l'effet aride du climat sur le processus de l'évapotranspiration.

III.3.3. Résultats de la formule de Penman-Monteith

III.3.3.1 A l'échelle annuelle

Les résultats de calcul de l'évapotranspiration potentielle par la formule de Penman-Monteith à l'échelle annuelle durant la période (1988-2016) sont récapitulés dans la Figure III.3.

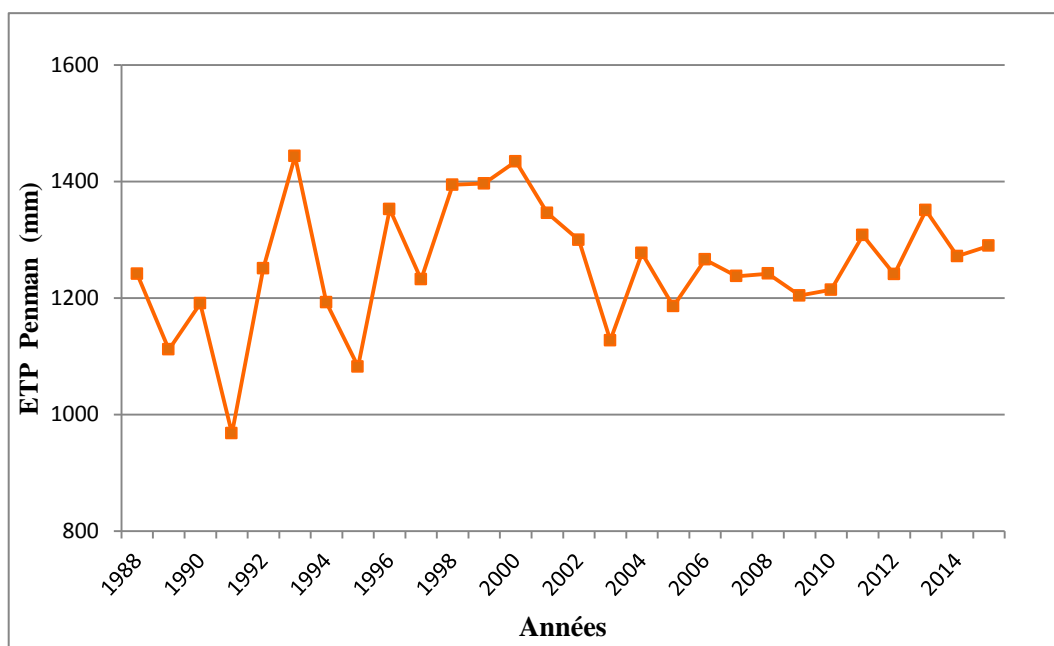


Figure.III.3. Evapotranspiration annuelle par Penman durant le période (1988-2016)

L'analyse des résultats de la figure III.3 ci-dessus montre que l'ETP annuelle par la formule de Penman varie autour de 1255 mm dont la plus grande valeur 1444mm environ est enregistrée en 1993. La plus faible valeur d'ETP de 967 mm est enregistrée en 1991. Cette variation de l'ETP est liée aux éléments climatiques complexes caractéristiques de la formule de Penman comme la pression atmosphérique, la vitesse du vent, la température et la radiation solaire qui influencent directement sur l'ETP.

III.3.3.2 A l'échelle mensuelle

La distribution de l'évapotranspiration mensuelle par Turc est indiquée au tableau III.3 suivant.

Tableau III.3. Valeurs mensuelles d'évapotranspiration calculées par la formule Penman –Monteith durant le période (1988-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Année
ETP (mm)	118.6	84.5	51.4	42.7	46.5	56.3	85.9	106.9	125.8	159.3	198.4	178.9	1255.4

Les résultats du tableau III.3 montrent que la variation mensuelle de l'évapotranspiration varie entre 43mm environ au mois de décembre et 198mm au mois de juillet. L'écart de l'ETP entre la valeur maximale et celle minimale est de 155mm ce qui montre l'effet aride du climat sur le processus de l'évapotranspiration.

III.3.4. Résultats de l'évapotranspiration par la formule de Bouchet

Est obtenue sur la base de l'évaporation enregistrée par le Piche et a transformé par la formule de Bouchet en évapotranspiration. Cette dernière est dite évapotranspiration observée.

III.3.4.1. A l'échelle annuelle

Les résultats de calcul de l'évapotranspiration par la formule de Bouchet à l'échelle annuelle durant la période (1988-2016) sont récapitulés dans la Figure III.4.

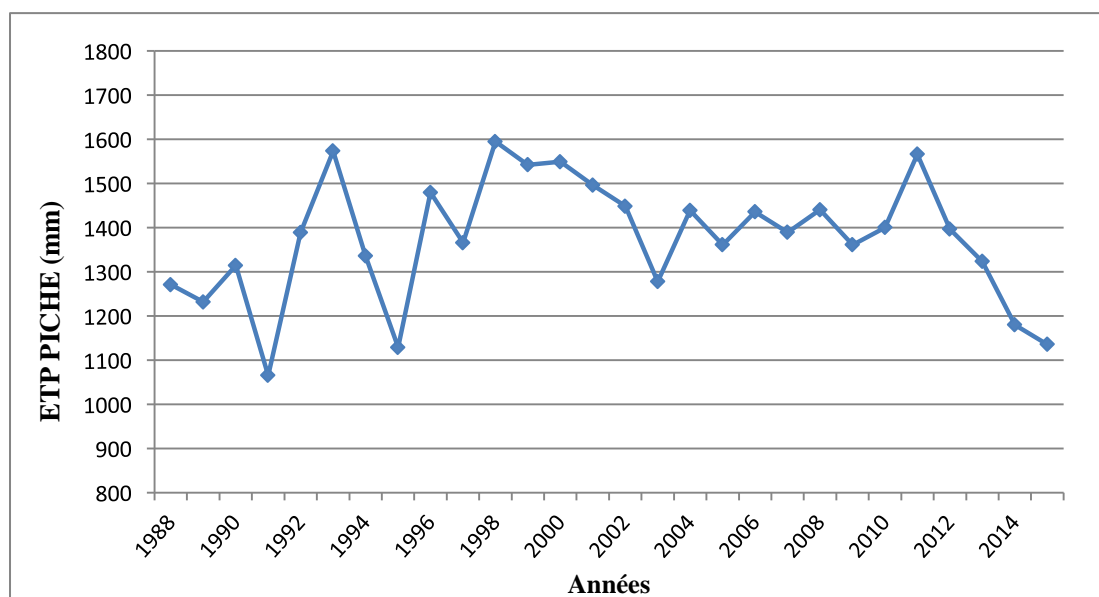


Figure.III.4: Evapotranspiration annuelle par Piche durant le période (1988-2016)

La variation annuelle de l'évapotranspiration enregistrée par Piche durant la période (1988-2016) (Fig III.4) montre que la moyenne annuelle est de 1388 mm dont le maximum de 1580 mm enregistré en 1993/94. La valeur la plus faible de 1070 mm est observée en 1991/1992. La température est le seul facteur correctif de l'évapotranspiration.

III.3.4.2. A l'échelle mensuelle

La distribution mensuelle de l'évapotranspiration calculée par la formule de Bouchet est indiquée au tableau III.4 suivant.

Tableau III.4. Valeurs mensuelles de l'évapotranspiration calculées par la formule de Bouchet durant le période (1989-2016)

MOIS	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aout	Année
ETP (mm)	139.4	85.9	44.7	34.1	35.8	44.2	72.3	97.6	133.3	193.5	259.4	236.4	1376.6

Les résultats du tableau III.4 montrent que les variations mensuelles de l'évapotranspiration sont bien marquées ; l'évapotranspiration atteint son minimum en période hivernale avec 34.5 environ mm en décembre et janvier puis elle augmente progressivement jusqu'à atteindre des valeurs maximales en période d'été avec un maximum de 259 mm enregistrée au mois de juillet. Nous remarquons aussi que l'écart de l'ETP entre la valeur maximale et celle minimale est très significatif (225 mm) ce qui montre l'impact de la température en climat aride de la région de M'sila sur le processus d'évapotranspiration.

III.4. Comparaison entre les différentes formules d'estimation de l'évapotranspiration

Les résultats de calcul de l'évapotranspiration par chaque formule à l'échelle annuelle durant la période (1989-2016) sont récapitulés dans le tableau III.5.

L'analyse comparative des valeurs d'évapotranspiration calculée par les formules précédentes permet de mettre en évidence :

- ✓ L'ensemble des formules empiriques donnent des valeurs de l'évapotranspiration qui se rapprochent entre elles. Néanmoins, les résultats de la formule de Penman sont les plus proches aux valeurs de Piche.
- ✓ Les années qui enregistrent des valeurs maximales et minimales de l'évapotranspiration diffèrent d'une formule à une autre. Cependant, les formules de Thornthwaite et Turc enregistrent des minimums en 1990/91 et 1995/96 respectivement alors que les maximums sont en 2001/02 et 2013/14 respectivement.

Tableau.III.5: Récapitulatif de l'ETP annuelle calculées par les différentes formules
(1988-2016)

Année	Thornthwaite	Turc	Penman	Piche	Année	Thornthwaite	Turc	Penman	Piche
1988/89	1024.1	1328.4	1241.2	1271.0	2002/03	1215.7	1525.8	1299.5	1148.6
1989/90	1033.5	1263.2	1111.7	1190.8	2003/04	1048.6	1392.0	1127.3	1178.0
1990/91	<u>809.5</u>	1264.1	1190.9	1214.3	2004/05	1191.3	1495.0	1277.0	1239.2
1991/92	965.3	1243.5	<u>967.4</u>	<u>987.6</u>	2005/06	1145.9	1297.9	1185.8	1161.1
1992/93	1098.6	1386.5	1250.9	1288.7	2006/07	1131.4	1437.2	1266.0	1235.8
1993/94	1204.0	1520.8	<u>1443.7</u>	<u>1473</u>	2007/08	1135.0	1429.1	1237.5	1289.3
1994/95	1075.6	1351.0	1192.4	1210.0	2008/09	1089.9	1422.5	1242.0	1297.6
1995/96	998.8	<u>1225.5</u>	1082.1	1128.7	2009/10	1120.8	1522.1	1204.2	1311.2
1996/97	1092.7	1398.0	1352.8	1479.7	2010/11	1119.0	1390.7	1214.1	1300.4
1997/98	1078.5	1393.1	1232.0	1366.0	2011/12	1278.9	1487.3	1307.7	1466.2
1998/99	1221.7	1434.6	1394.3	1378.8	2012/13	1162.2	1421.7	1240.8	1396.5
1999/00	1182.0	1487.4	1396.7	1342.2	2013/14	<u>1375.9</u>	1461.3	1350.6	1323.4
2000/01	1192.3	1549.2	1434.6	1449.1	2014/15	1245.8	1532.9	1271.8	1179.9
2001/02	1175.6	<u>1557.1</u>	1345.9	1496.2	2015/16	1146.4	1458.3	1289.7	1135.7

III.4.1 Critères statistiques de comparaison

III.4.1.1 Ecart relatif

Les résultats obtenus par l'application des différentes approches d'estimation de l'ETP, ont été comparés à l'ETP Piche, en se basant sur les valeurs de l'écart relatif « ER » à l'échelle annuelle et mensuelle.

L'expression de l'écart relatif « ER » s'écrit :

$$ER = \frac{(ETP(Piche) - ETP_i)}{ETP(Piche)} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

Avec :

ER: Ecart relatif (%).

ETP_i : L'évapotranspiration potentielle estimée par chaque formule empirique ;

ETP: l'évapotranspiration à base Piche.

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

a- Echelle annuelle

Les résultats de l'écart relatif entre l'ETP estimés par les différentes formules empiriques et celui à base de Piche à l'échelle annuelle allant de 1988 à 2016 sont récapitulés au tableau III.6 ci-après.

Tableau III.6: Ecart relatif des différentes méthodes d'estimation de l'ETP à l'échelle annuelle

Années	Turc	Thornthwaite	Penman-Monteith	Années	Turc	Thornthwaite	Penman-Monteith
1988/89	-4,52	19,42	2,3	2002/03	<u>-32,84</u>	<u>-5,84</u>	-13,1
1989/90	-6,08	13,21	6,6	2003/04	-18,17	10,98	4,3
1990/91	-4,10	33,34	1,9	2004/05	-20,64	3,86	-3,0
1991/92	-25,91	2,25	2,0	2005/06	-11,78	1,31	-2,1
1992/93	-7,59	14,75	2,9	2006/07	-16,30	8,44	-2,4
1993/94	-3,22	18,28	2,0	2007/08	-10,85	11,97	4,0
1994/95	-11,65	11,11	1,5	2008/09	-9,63	16,01	4,3
1995/96	-8,57	11,51	4,1	2009/10	-16,09	14,52	8,2
1996/97	<u>5,52</u>	<u>26,15</u>	8,6	2010/11	-6,94	13,95	6,6
1997/98	-1,99	21,04	9,8	2011/12	-1,44	12,78	10,8
1998/99	-4,04	11,40	-1,1	2012/13	-1,81	16,78	<u>11,2</u>
1999/00	-10,81	11,94	-4,1	2013/14	-10,42	-3,97	-2,1
2000/01	-6,91	17,72	1,0	2014/15	-29,92	-5,59	-7,8
2001/02	-4,07	21,43	10,0	2015/16	-28,40	-0,94	<u>-13,6</u>

Les résultats du tableau III.6 indiquent que :

- L'écart relatif entre les valeurs de l'ETP par la formule de Penman et celle de Piche est le plus petit ; variant de (-13.6 à 11.2)%. Par ailleurs, cet écart est positif sur la majorité des années étudiées.
- L'écart relatif entre les résultats de la formule de Thornthwaite et celle de Piche est positif durant la majorité des années d'étude, variant entre (-5.84 à 26.15)%. Cela indique que la formule de Thornthwaite sous-estime les résultats de Piche.

- L'écart relatif entre les résultats par la formule de Turc et celle de Piche est négatif sur la majorité des années d'étude et variant entre (-32.8 et 5.5)%, ce qui signifie que la formule de Turc surestime les valeurs observées.

Ces résultats nous permettent de signaler que les résultats de la formule de Penman sont les plus proches aux valeurs observées par Piche.

b- Echelle mensuelle

Pour illustrer les résultats obtenus à l'échelle annuelle, l'écart relatif a été également appliqué aux données mensuelles des différentes formules d'estimation de l'ETP (voir Figure III.5 suivante).

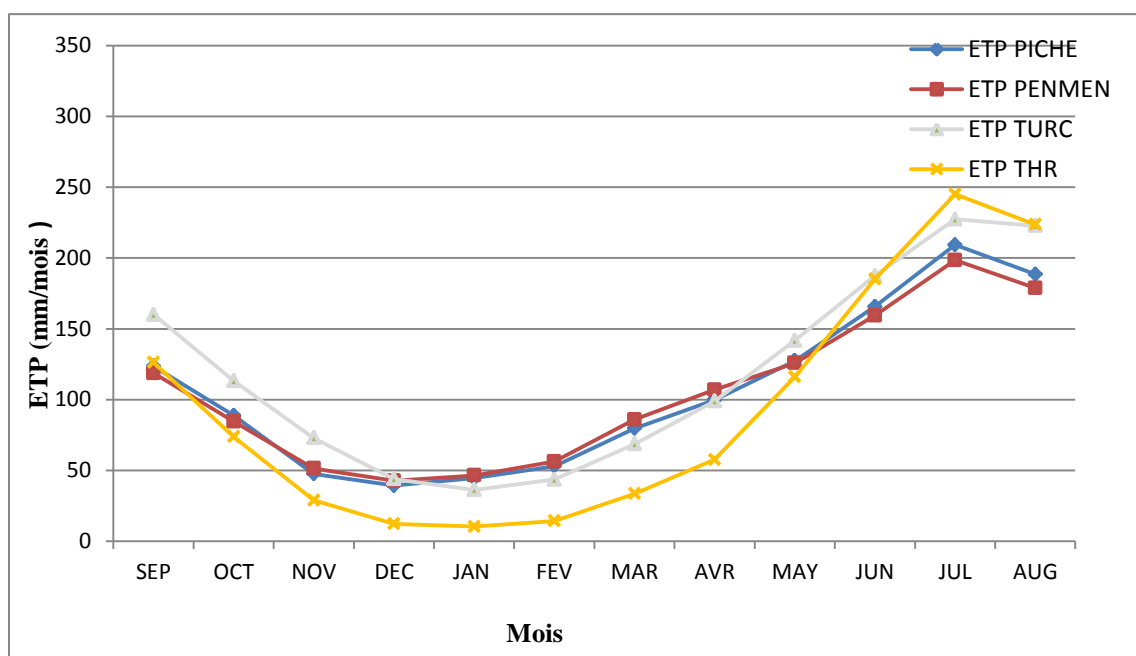


Figure. III.5 : Valeurs mensuelles de l'ETP estimées par les différentes formules (1988/89-2016)

D'après le graphique de la figure III.5 des résultats d'application des différentes formules d'estimation de l'ETP à l'échelle mensuelle, il en ressort que :

- ✓ L'ensemble des courbes d'ETP (Piche, Thornthwaite, Penman-Monteith et Turc) ont des tendances similaires : les faibles valeurs concernent les mois de la saison d'hiver et les fortes valeurs marquent les mois de la saison d'été, avec un maximum au mois de juillet.
- ✓ Un bon rapprochement entre les courbes de Penman-Monteith et celle à base de Piche.

- ✓ La courbe de l'ETP par Thornthwaite est la plus loin de celle de Piche. Cependant, durant la période (Octobre jusqu'au Mai) les valeurs de l'ETP (Thornthwaite) sont nettement inférieures à celles de l'ETP (Piche), ce qui indique que la formule de Thornthwaite sous-estime l'ETP, avec un écart pouvant atteindre un maximum d'environ (76.7%).
- ✓ Durant la saison sèche la courbe de l'ETP par Penman est au-dessous de celle de Piche alors que les courbes des autres formules sont placées au-dessus de celle de Piche. Cela revient au fait que dans la formule de Penman un ensemble de paramètres climatique est mis en jeu simultanément. Néanmoins, la formule de Penman reste la plus proche aux valeurs mesurées par Piche avec un écart moyen de 4.7%.

III.4.1.2 Coefficient de corrélation r

Le coefficient de corrélation est donné par la formule suivante :

$$r = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (ETP_{oi} - \overline{ETP_o})(ETP_{si} - \overline{ETP_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ETP_{oi} - \overline{ETP_o})^2 \sum_{i=1}^n (ETP_{si} - \overline{ETP_s})^2}} \right) \dots\dots\dots (2)$$

Avec :

n: nombre d'observation ;

ETP_{oi}: ETP Piche au temps *i* ;

ETP_{si}: ETP estimé par la formule empirique au temps *i* ;

$\overline{ETP_o}$: ETP Piche durant la période d'observation *n*.

$\overline{ETP_s}$: ETP estimé par la formule empirique durant la période d'observation *n*.

Le coefficient de corrélation (*r*) est primordial qui indique le taux de corrélation entre les valeurs observées et celle estimées. Les valeurs de *r* varient entre -1 et 1, une valeur positive de (*r*) signifie une corrélation directe tandis que la valeur négative montre une corrélation négative. Alors que la variance calculée au moyen du coefficient de détermination R^2 qui est un estimateur global linéaire indiquant comment la précision du modèle suit la variation des valeurs observées. La valeur R^2 varie de 0 à 1 avec un seuil de satisfaction d'un modèle donné est de ($\geq 0,6$). **reference**

Les corrélations entre l'ETP Piche et les estimations d'ETP Thornthwaite, Turc et Penman-Monteith à l'échelle mensuelle sont présentés par le nuage de points (voir Figure.III.6).

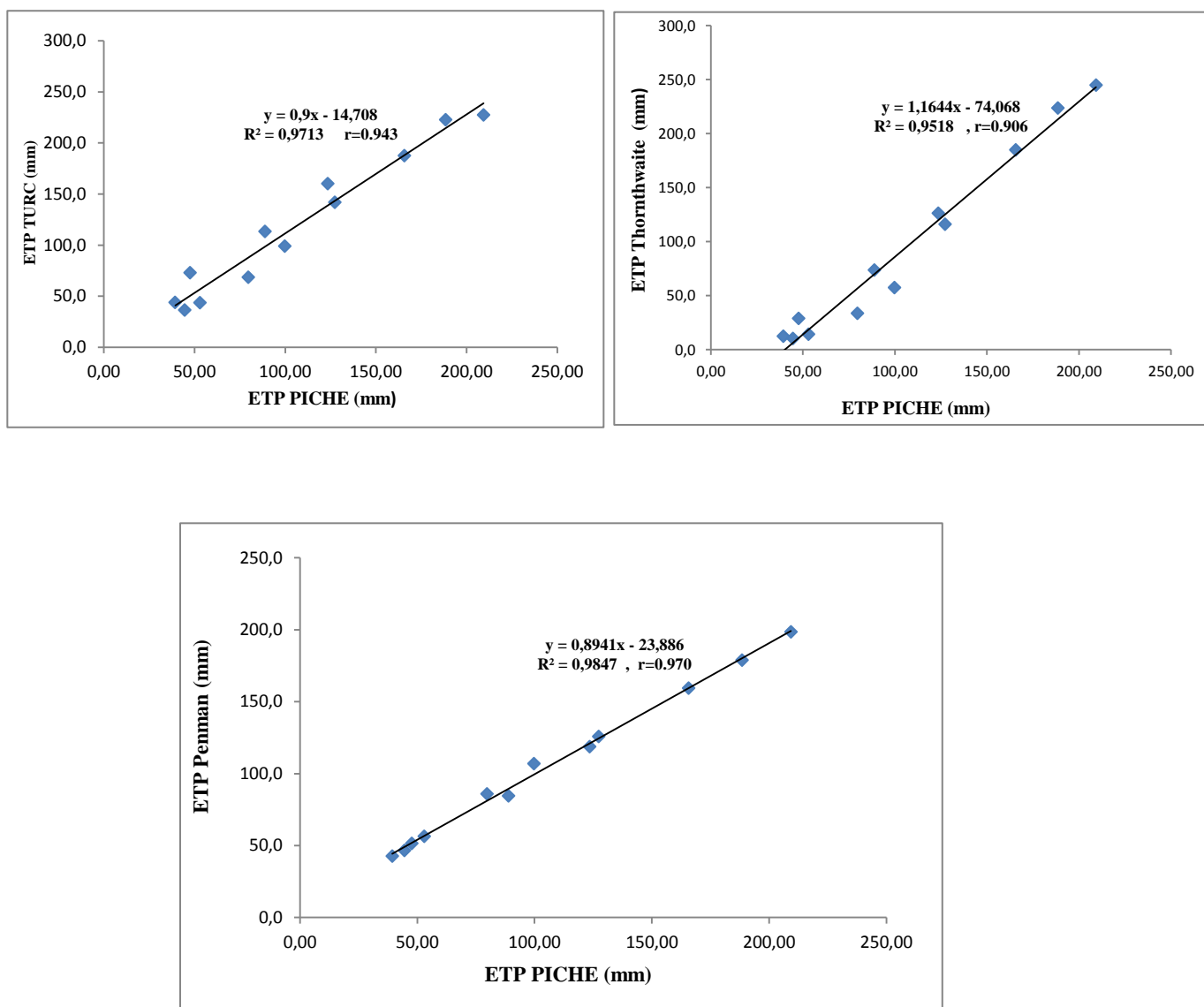


Figure.III.6 : Corrélation entre ETP mesurée et celle estimée par les formules utilisées (1988-2016)

L'analyse visuel des nuages de point entre chaque formule empirique d'estimation de l'ETP à savoir Turc, Thornthwaite et Penman par rapport aux valeurs d'ETP à base de Piche indique :une bonne concordance du nuage de point entre chaque formule empirique d'estimation d'ETP et ETP Piche.

Cette bonne tendance de nuage de point est révélée par une droite linéaire de régression de la forme $y=ax+b$ dont son coefficient de corrélation ($r > 0.9$) est excellent. Cependant, la meilleure corrélation est obtenue par Penman, avec un coefficient de corrélation très élevé ($r = 0.97$).

III.5 Comparaison des résultats avec d'autres travaux

En faisant comparaison des résultats de notre travail avec d'autres recherches antérieures ; il a été trouvé que :

- Saad Allah (2018) a appliqué les mêmes formules dans la région de Ouargla sous un climat saharien durant la période (2003-2015), ils ont trouvé que la formule de Penman est la plus proche à l'ETP Piche à l'échelle mensuelle et annuelle. Le coefficient de détermination R^2 trouvé est de 0.97. ce qui est en accord avec nos résultats.
- Bouteldjaoui et *al.* (2011) a testé l'efficacité des formules empiriques de Turc, Thornthwaite, Blaney-cridel et Penman. Le travail est appliqué à la région de Djelfa sous un climat semi-aride durant la période (1984-2006). Les résultats ont montré que les valeurs de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP) obtenues par le modèle de PenmanMonteith, s'approchent des valeurs de l'ETP de Piche. Mais elle le sous-estime considérablement durant la saison sèche.

Conclusion

Les trois (03) formules empiriques de Thornthwaite, Turc et Penman ont été appliqués pour estimer l'évapotranspiration potentielle de la région de M'sila située dans l'étage bioclimatique aride, et cela durant la période de 28 ans (1988-2016). Les résultats de chaque formule ont été comparés à l'évapotranspiration mesurée à base de Piche. A l'échelle annuelle, les résultats ont indiqué que la formule de Penman est la plus proche à celle de Piche par rapport aux autres méthodes avec une sous-estimation des valeurs observées atteignant les 11.2%. Un autre test à l'échelle mensuelle a été appliqué aux mêmes formules empiriques. Les résultats ont montré une bonne concordance entre chaque formule empirique d'estimation d'ETP et ETP Piche avec un coefficient de corrélation $r > 0.90$ mais la meilleure corrélation a été obtenue par Penman, avec un coefficient de corrélation très élevé ($r = 0.97$). Donc, la formule empirique a prouvé son efficacité pour l'estimation de l'ETP dans la région de M'sila du fait du nombre de paramètres climatiques inclus (pression atmosphérique, vitesse du vent, rayonnement net, température au point de rosée) et qui ont un impact direct sur le déclenchement du processus de l'ETP.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Au terme de ce modeste travail, qui s'inscrit dans l'évaluation des besoins en eau d'irrigation dans le domaine d'hydraulique agricole, avec objectif principal chercher la meilleure formule empirique d'estimation de l'évapotranspiration potentielle appropriée au climat aride de la région de M'sila.

Les formules testées sont la formule de Thornthwaite, formule de Turc et la formule de Penman. L'étude a été réalisée à l'échelle annuelle et mensuelle durant la période (1988/89/14-2015/16) soit 28 ans sur la base des informations sur les éléments climatiques descriptifs de chaque formule empirique. Certaines informations climatiques ont été recueillies de la station météorologique de Ghzel (w. M'sila) alors que d'autres données ont été téléchargées des sites internet.

Les résultats des valeurs d'évapotranspiration potentielle calculées par les formules empiriques retenues ont été comparées aux valeurs observées calculées par la formule de Bouchet sur la base des valeurs de l'évaporation enregistrée par le Piche. L'analyse comparative des valeurs d'évapotranspiration calculées par les formules empiriques ont montré que :

- ✓ L'ensemble des formules empiriques donnent des valeurs de l'évapotranspiration qui se rapprochent entre elles. Néanmoins, les résultats de la formule de Penman sont les plus proches aux valeurs de Piche.
- ✓ L'écart relatif entre les valeurs de l'ETP par la formule de Penman et celle de Piche est le plus petit ; variant de (-13.6 à 11.2)%. cet écart est positif sur la majorité des années étudiées. Néanmoins, la formule de Thornthwaite sous-estime les résultats de Piche dont l'écart relatif est positif durant la majorité des années d'étude, variant entre (-5.84 à 26.15)%. Par ailleurs, la formule de Turc surestime les valeurs observées avec un écart relatif négatif variant de (-32.8 et 5.5)%.
- ✓ A l'échelle mensuelle, L'ensemble des courbes d'ETP (Piche, Thornthwaite, Penman-Monteith et Turc) ont des tendances similaires avec un coefficient de corrélation ($r > 0.9$). Cependant, la meilleure corrélation est obtenue par Penman, avec un coefficient de corrélation très élevé ($r = 0.97$). La méthode Thornthwaite est la plus faible alors que la méthode Turc occupe une position intermédiaire. Cela est dû aux nombres et la nature des paramètres climatiques inclus par chaque formule.

- ✓ Durant la saison sèche la courbe de l'ETP par Penman est au-dessous de celle de Piche alors que les courbes des autres formules sont placées au-dessus de celle de Piche. Cela revient au fait que dans la formule de Penman un ensemble de paramètres climatique est mis en jeu simultanément. Néanmoins, la formule de Penman reste la plus proche aux valeurs mesurées par Piche avec un écart moyen le plus faible (de l'ordre de 4.7%).

Malgré que la formule de Penman tient en compte de plusieurs paramètres climatiques dont la plupart de ces paramètres ne sont pas disponible au niveau de la station météorologique ; elle a prouvé son efficacité en indiquant un écart relatif le plus faible et un coefficient de corrélation de plus élevé. Alors la formule de Penman est représentative pour l'estimation de l'ETP dans notre zone d'étude (la ville de M'sila et son voisinage) et pouvant être utilisée comme alternative en cas d'absence des mesures réelles.

Etant donné que le territoire de la wilaya de M'sila est très large, nous recommandons d'appliquer les mêmes formules sur d'autres lieux à climat différent, pour confirmer les résultats obtenus. et les autres zones de même conditions climatiques.

L'estimation des besoins en eau des cultures agricoles est l'étape primordiale pour définir par la suite la dose d'irrigation appropriée, choisir le système d'irrigation tout en fournir à la plante la quantité de l'eau qu'elle a besoin au moment opportun selon un calendrier d'irrigation pour préserver d'une part quantitativement la ressource en eau et garantir et multiplier le rendement agricole.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdelkebir, F., et Zerguine, Y. « Evaluation des périmètres agricoles au niveau de la zone de mise en valeur de la commune de M'sila » Mémoire. Master. Dép. Science Agronomiques. Université. M'sila. Promo (2017/2018). P96

AIDOUD A. et NEDJRAOUI D., 1992. The steppes of alfa (*Stipa tenacissima* L) and their utilisation by sheeps. **In.** Plant animal interactions in Mediterrean-type ecosystems .MEDECOS VI, Grèce. pp 62-67

Allies, A. Estimation de l'évapotranspiration par télédétection spatiale en Afrique de l'Ouest: vers une meilleure connaissance de cette variable clé pour la région. Diss. Université Montpellier .2018, p431

Allen, R .G. Pereira, L. S., Raes, D.,Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.

Allen,R . G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome, 300.

Ardoin, S. (2000). Prise en compte des spécificités de l'évapotranspiration en zone semi-aride dans la modélisation globale de la relation pluie-débit. Mémoire de DEA en sciences de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier II, France, 116p.

Baahmed,D., Oudin, L. and Errih, M. (2015). Current runoff variations in the Macta catchment (Algeria): is climate the sole factor? Hydrological sciences journal 60(7-8), 1331-1339.

Bakhti ,F ., et Lagraa , B. (2017). La gestion des déchets recyclables de la commune de M'SILA (Doctoral dissertation, Université de m'sila).

Bakreti, A., Braud, I., Leblois, E. and Benali, A. (2013). Analyse conjointe des régimes pluviométriques et hydrologiques dans le bassin de la Tafna (Algérie Occidentale). Hydrological sciences journal 58(1), 133-151

Benaouira, F. Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux usées épurées destinées à l'irrigation (Cas de la Station d'épuration de M'sila). Université Mohamed Boudaif - M'Sila. 2017, P64.

Ben Mansour, S. Korichi, R. 2013, 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 .P 97

Bensaci, M. D. and M. A. E. Bouziane (2018). Contribution à l'évaluation de l'évapotranspiration de référence en Algérie.

Berhail, S., Tourki, M., Merrouche, I. and Bendekiche, H. (2021). Geo-statistical assessment of meteorological drought in the context of climate change: case of the Macta basin (Northwest of Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-21.

Bertuzzi, P. Bruckler, L., Chanzy, A. (1994). Stratégies d'échantillonnage et estimation de l'évapotranspiration réelle par la méthode du bilan hydrique au sol. Actes des Xèmes Journées Hydrologiques, ORSTOM, Montpellier, 13-14 Septembre 1994 : 13-25.

BOUDJEMA, S., HAFSI, M. (2020) Détermination de l'Evapotranspiration du sol (expérimentalement et à l'aide de formules) dans le cas de nano-irrigation dans les régions arides (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA).

Boudjerada, I. (2015), Estimation Et Cartographie De L'évapotranspiration Potentielle-Mémoire de Master en Hydraulique, Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique, Arbaoui Abdellah, 59 p.

Boudjlel, A. (2007). Détermination des besoins en eau des cultures à l'aide de logiciel cropwat 4.3 dans la wilaya de tipaza. Mémoire d'ingénieur.

Bouchet R.J. 1963 - Evapotranspiration réelle, &apotranspiration potentielle et production agricole. *AM. Agro.*, 1963, 5, p. 743-824.

Bonnet, M. Delarozeire, M. Bouillin. O, Jussrand, Cl. P, Roux. 1970. Calcul automatique des bilans d'eau mensuels et annuels par les méthodes de thornthwaite et de turc, BRGM, PARIS, p21.

Charles, R. 1975, La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale. ORSTOM. Paris: pp 27-67.

Cosandey C., Robinson M., 2012. Hydrologie continentale. Armand Colin, Paris, 447 p

Curé, P. (1941). Évaporation et transpiration Action des alternances de sécheresse et d'humidité sur la structure des plantes. Annales de la faculté des sciences de Toulouse 4e série, tome 5 (1941), p. 49-256.

Djegui, JM. Kouame, K. Silveira, K. (2002). Agro-climatologie, climat et ses composantes eaux et atmosphère. 26 p

Dilmi, B. Mehdi, B. Gestion des ressources en eau dans la commune de M'sila. Département d'hydraulique. Université Mohamed Boudiaf M'sila.2020, P96.

Elouissi, A., Habi, M., Benaricha, B., Boualem, S.A. (2017). Climatechange impact on rainfall spatio-temporal variability (Macta watershed case, Algeria). Arabian Journal of Geosciences 10(22), 496.

Guechi, N Études floristique et ethnobotanique du massif de Maadid (M'Sila, Algérie), Université Mohamed Boudiaf - M'Sila.2022, P227.

Halimi, A. 1980. L'Atlas Blidéen, Climat et étages végétaux. *Edit* : Office des publications universitaire. Alger, 523 p.

Hamadi, H. Chiraz, M. 2003. Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées au nord de la Tunisie : estimation de l'évapotranspiration de référence par différentes formules empiriques (cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte). Revue sécheresse Volume 14, N° 4 : 257-265.

Houerou et Claudin, 1972.

Laborde, J.P. Sophia, A. 2000. éléments d'hydrologie de surface, U.M.R. 5651 "Espace" du C.N.R.S, p204.

Lalani, I. (2007). Contribution à la gestion de la ressource en eau mobilisée choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle ETP dans les régions de Tebessa et Annaba. Diss. Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des sciences de l'ingénieur.

Meddi, M., Assani, A.A., Meddi, H. (2010). Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, Northwestern Algeria. *Water Resources Management* 24(14), 3817-3833.

Métivier, F. (2010). Hydrologie continentale. Notes de cours, problèmes et solutions, 133p

Ouadah, M, 2022. Caractérisation du bilan hydrologique du barrage Sidi M'hamed Ben Taiba, Nord-Ouest d'Algérie (Wilaya d'Ain Defla). Diss. Université Mohamed Boudiaf -M'Sila. P68.

Pare. S 2006. Météorologique Contribution à la détermination d'un terme du bilan hydrologique dans la région d'Errachidia-Tafilalet : Evaluation de l'évapotranspiration de référence et de l'évaporation à travers la zone non saturée de la Plaine de Tafilalet p24-42.

Remenieras, G. (1976). L'hydrologie de l'ingénieur-Editions Eyrolles. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, 2ème édition, 456pp.

Riou, C. (1984). Experimental study of potential evapotranspiration (PET) in Central Africa. *Journal of Hydrology*, 72 : 275-288.

Riquier, J. Formule d'évapotranspiration, En Annexes tables utilisables P ,Madagascar .p18

Roche, M. (1963). Hydrologie de surface. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer (paris),431p

Saad Allah, Salima. Estimation de l'évapotranspiration potentielle par différentes méthodes. Application à un site à climat saharien (Touggourt-w-Ouargla). Diss. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.,p58.

Saad Allah Salima 2018 .Travaux pratiques du cours d'hydrogéologie, Cycle hydrologique et bilans en eau d'un bassin, Université de liège .p7

SAIDATI .B. 2006. Evapotranspiration de référence dans la région de Tafilal et au Sud-Est du Maroc. *AJEAM –RAGEE N° 11:* 1-16.

Sylvain, M .2006. l'ETP penman- monteith à différents pas de temps sur quatre sites du Haut Bassin de l'Ouléma, IRA instit de recherche et développement , AMMA .p34.

Zamoum, S., Souag-Gamane, D. (2019). Monthly streamflow estimation in ungauged catchments of northern Algeria using regionalization of conceptual model parameters. *Arabian Journal of Geosciences* 12(11), 342.

Webographie :

https://fr.vikidia.org/wiki/Cycle_de_l%27eau#/media/File:Cycle_de_l%27eau.pg

<https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89vapotranspiratin>

<https://earth.google.com/web/>

<https://www.meteoblue.com>

<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Les annexes

Tableau 1 : Pluviomètre mensuelle en mm (1988-2016) Station de M'sila

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOU T	Sept	Oct	Nov	DEC
1988	11	2	18	34	34	23	0	0	24	18	27	22
1989	1	8	1	28	14	41	0	26	3	7	20	16
1990	27	0	19	36	100	14	12	0	14	1	20	32
1991	3	31	62	10	11	0	2	11	19	77	15	17
1992	24	11	13	4	44	9	25	0	1	3	35	14
1993	0	16	9	5	30	0	0	0	18	0	41	20
1994	14	26	15	6	0	0	0	14	45	44	9	4
1995	11	7	40	7	0	3	0	1	16	7	11	35
1996	62	26	32	23	46	6	7	3	3	0	6	24
1997	30	7	5	40	36	8	1	33	61	33	50	13
1998	10	18	10	46	60	8	0	2	39	6	9	5
1999	52	6	16	12	1	21	0	12	31	47	26	58
2000	0	0	5	3	25	2	2	2	54	15	7	31
2001	25	2	5	25	0	0	0	5	45	17	15	18
2002	11	6	1	5	5	0	2	16	7	13	26	13
2003	73	11	2	17	29	28	1	3	47	83	29	25
2004	5	5	31	36	75	10	2	29	11	8	11	29
2005	1	18	6	6	0	7	3	3	31	16	28	6
2006	26	50	1	14	26	3	29	5	20	0	29	22
2007	5	12	17	80	26	6	0	4	23	10	5	0
2008	5	5	6	0	16	6	2	3	35	57	10	26
2009	31	17	5	34	2	8	1	3	23	4	6	19
2010	7	32	21	21	3	3	2	6	4	11	8	3
2011	3	8	8	21	13	40	2	5	19	26	12	11
2012	0	2	31	21	4	1	1	4	59	27	9	9
2013	15	10	21	27	14	0	5	7	6	38	29	28
2014	20	7	19	0	50	11	6	2	13	2	27	13
2015	12	25	13	6	6	3	0	16	27	51	0	0
2016	5	8	12	50	22	0	14	0	5	9	16	14

Tableau 2 : Température moyenne mensuelle en(°C) (1988-2016) Station de M'sila

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	Sep	Oct	Nov	DEC
1988	10,2	10	12,7	17,5	22,7	26,4	32,2	31,4	24,9	20,5	14	7,6
1989	7,7	9,9	14,7	14,9	22	24,7	30,5	30,6	25,1	19,7	14,6	12
1990	9,2	12,6	14,3	15,2	20,6	28,4	28,8	28,7	26,7	20,3	13,2	7,3
1991	7	8,3	12,8	14,2	17,9	26,6	31,5	30,3	26	18,1	11,1	7,8
1992	6,6	8,9	12,2	15,3	20,9	23,9	28,7	30,4	26,2	19	13,3	9,1
1993	6,8	8,8	12,2	16	22,1	29,3	31,2	31,2	24,9	20,5	13,2	9,3
1994	9,2	10,3	15,7	15	25	28,9	32,5	33,5	25,3	18,9	13,8	8,9
1995	8,2	12,7	12,5	15,7	23,2	26,8	32	29,8	23,5	20	13,4	10,6
1996	10,4	8,5	12	16	20,9	25,1	30,3	29,6	23,5	17,6	13,5	10,6
1997	9,7	12,3	12,6	16,5	23,5	29,3	31,3	30,3	24,5	19,2	12,3	9,4
1998	8,9	10,8	13,3	16,8	19,6	28,8	32,4	30,5	26,1	17,3	13,1	8,3
1999	8,8	8,8	13,3	18,2	26,1	30	31,9	33,8	26,4	22,2	12,7	8,7
2000	6	10,4	14,8	17,9	25	28	32,4	31	26,2	18,5	13,9	10,1
2001	8,9	10	17,5	17,6	22,3	29,7	32,6	32	26	23,5	13,2	8
2002	7,9	11,2	15,4	18,3	23,3	29,7	31,5	30	25,3	20,6	14	10,6
2003	8,6	8,6	14	18,1	23,3	30	33,9	31,8	25,2	20,5	13,6	8,4
2004	8,4	11,1	13,9	15,5	18	26,9	31	31,6	25,1	21,5	12	9,3
2005	6,2	7,3	14,7	17,9	25,6	29,2	33,4	30,7	24,5	20,4	12,3	8,2
2006	7,1	8,3	14	19,7	24,8	29	31,7	30,7	24,4	22,5	14,6	9,6
2007	8,9	11,6	12,1	16,7	21,8	29	31,7	31,3	25,1	20,1	11,6	8,9
2008	9,1	11,6	13,1	18,4	22,6	27,5	32,7	31,8	25,6	18,7	11,5	7,4
2009	8,5	8,2	12,6	13,1	23,2	28,9	31,9	31,6	25,2	19,9	13,8	10,5
2010	9,7	11,2	14,1	17,9	20,2	27,6	32,6	31,6	25,8	19,1	13,2	9,2
2011	9,1	9,3	13	19	22,3	27,1	32	31,8	27,7	19,4	13,8	9,5
2012	8	6,6	13,7	16,3	24,1	31,3	33,9	33,7	26,6	20,8	14,5	9,2
2013	8,8	8	14	18,4	21	26,9	32	34	30	26,7	23,9	12,9
2014	9,6	11,5	12,8	19,7	23,2	27,6	31,8	32,5	28,1	22,1	15,4	9,1
2015	8,2	8,5	13,9	20,3	25,2	27,9	32,8	31,4	25,9	19,5	13,6	8,8
2016	10	11,4	13	19,2	22,9	28,7	32	30,8	25,9	21,8	13,5	9

Tableau 3: Température moyenne maximales en(°C) (1988-2016) Station de M'sila

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	Sep	Oct	Nov	DEC
1988	21,4	20,2	29,5	28,9	37,1	39,1	43,8	43,1	41,6	33	26,4	19,7
1989	16,9	23,5	26,6	27,2	37,9	36,8	41,6	42,5	39,4	28	25,8	22,1
1990	16,6	25,4	25,8	25,9	34,7	40	41,3	39,8	38,5	32,3	24,2	17,2
1991	18,5	19,5	26,1	26,3	33	39,9	44,4	41,8	37,4	31,8	22,3	21
1992	14,6	19,2	22,4	30	36,7	36,6	39,1	40,3	36,6	32,6	22,1	20,5
1993	16,5	17,7	25,6	29	37,8	43,7	45,3	42,4	37,1	34,6	24,6	18,6
1994	18,8	23,6	27	29	43,6	43	43,6	43,4	39	28	24,7	19,9
1995	19	23,6	26	26,7	35,8	40,1	41,8	43,1	37,3	30,7	27,5	18,8
1996	20,3	17,7	28,2	27,9	35,6	38,8	43,2	42,2	36,5	30,5	26	23,3
1997	19	24,4	25,5	29,3	37,5	43,7	45,2	43,5	38,5	32,4	22,5	17,2
1998	18,7	21,8	26,5	31,4	32	42,5	44,2	42,2	42,2	29,6	26,6	20
1999	18,3	22,7	25,5	34,1	41,7	43,3	43,3	44,7	37,4	31,8	25,7	19,6
2000	20,2	21,7	24,9	35,7	36,4	42,9	43,9	42	41,2	30,2	25,8	20,3
2001	18,6	21,4	33,8	31,6	38,2	41	43	41,7	39,2	34	26,1	20,7
2002	21,2	22,8	28,5	33,8	39,4	41,3	45,6	41,7	36,2	34	26,1	18,5
2003	20	17,8	24,8	36,8	35,7	42,6	45,1	42,8	40,4	39,3	28,6	18,4
2004	18,8	24,7	25,6	26,8	30	41,5	43,1	43,6	39,2	34,5	24,7	21,5
2005	20,2	21,4	32,8	33	37,2	41,9	46,2	44	36,9	32,4	28,3	18,6
2006	16,4	17,8	28,9	32,8	39,7	44,2	43,8	42,1	36,4	36,3	30,8	19,5
2007	22,6	22,3	27,7	28,8	36,9	44,1	42,2	42,2	36,8	34,7	21,4	20,8
2008	19,2	23,4	30,5	34,4	36,2	40,7	45,7	45	39,5	29,3	21,4	17
2009	18,3	18	25,4	28,7	37	39,8	45,2	43,4	40,8	32,7	27	22,8
2010	20	28,7	28,2	30,2	34	42,6	45,3	42,7	36,7	35	23,3	22,1
2011	20,3	20,4	25,6	33	36,1	41,3	43,6	44,6	41	30,9	22,6	18,8
2012	18,4	21,5	26,1	31,7	36,4	43,3	46,2	44,8	38,5	36	28,1	19,3
2013	21,3	19,6	26,8	34,1	27,4	34,1	38	36,1	33	29,6	18,9	14,2
2014	18,8	25,4	23,6	33,3	36,6	39,4	43,3	44,3	41,4	37,2	26,1	18,5
2015	20	17,7	29,4	34,4	41,3	40,2	44,2	45,3	39,4	34,3	24,2	20,4
2016	22,4	23,7	32,7	32,4	43,2	40,3	43,2	43,4	37,4	34	27,4	22

Tableau 4: Température moyenne minimales en(°C) (1988-2016) Station de M'sila

	JAN	FEV	MA R	AV R	MA I	JUIN	JUIL	AOUT	Sep	Oct	Nov	DEC
1988	1,3	-3,5	-0,2	4,5	9,5	16	20,2	18,3	10	7	1,2	-2,9
1989	-2,8	-1	3,3	3,3	4	9,2	19,8	19,1	15,3	8,4	5,9	1,2
1990	1	1,3	0,7	4,2	10	14	16,8	16,8	15,6	8,4	0,3	-2,2
1991	-3,9	-3,6	2,1	3,2	3	13,1	19,9	17,7	14,5	4,4	-0,3	-2,5
1992	-3,6	0	0,8	4	5,8	10,4	16,4	14	15,1	6,5	2	0,2
1993	-2,3	-2	-3,2	3,2	8	18,8	18,6	18,9	11,1	4,6	1,6	-0,2
1994	-0,3	-0,3	4	2,3	8	13,8	20,2	20,7	12,2	10,6	3,2	-2,7
1995	-1,3	1	3,3	2,8	8,9	12,9	20,2	18	12	9,2	2,4	0,9
1996	3,8	-1,6	1,8	3,9	6,9	12,4	18,4	16,5	11,5	6,5	1	-1,1
1997	-0,6	2,2	3	4,9	6,8	12,7	19,3	17	14	6,9	-2	-1,9
1998	-3,3	0,7	1,9	4	6,8	14	20,2	18,9	16	6	0,6	-3
1999	0,2	-1	1,6	4,4	11,2	16,8	17,5	21,2	14,2	11,9	-0,2	-0,2
2000	-2,8	-0,5	3,2	3	13	12,8	18,6	17,2	12,6	8,3	1	-1
2001	-0,9	-0,8	1,9	5	8,4	16	19,8	21	15,6	13,1	3,4	-1,4
2002	-1,8	0,2	4,8	6,8	8	12,2	15	16	13,9	8,6	3,2	1,6
2003	1	-0,8	4,2	5,2	9,3	18,2	21,3	20,8	15,4	9	4,5	-2,3
2004	-1,6	-0,2	0,2	4,1	4,7	13,4	17,2	19,5	11,2	7,3	1,2	-2,8
2005	-7,1	-3,8	-2,4	3,1	9,5	13,7	20,9	15,3	11,9	10,1	-19	-30
2006	-3,8	-0,2	1,4	4,7	13	7,7	21,3	17,6	11,5	10,8	4,8	-0,9
2007	-0,3	-0,1	-0,6	4,2	9,1	12,2	17,8	19,3	14,1	6	-2,5	-1,9
2008	-2	-1,5	-0,9	4	8,4	13,2	18,7	20,5	12,2	8,2	2	-0,8
2009	0	-2	0,5	2,2	7	15,2	22	18,8	13	6,8	2,4	0,5
2010	-2,2	-2,8	1,5	6,8	6,8	15,3	19,9	21,6	12,3	4,1	2	-4,1
2011	-3,4	-1,9	0,7	7	9,4	13,5	18,3	19,8	16,4	8,4	5,4	-0,3
2012	-2,9	-5	2,2	4	8,8	18,9	17,9	20,8	14,4	4,6	2,4	-1,2
2013	-1,2	-3,2	-1,7	3,6	13,5	18,2	23,5	21,9	20,4	17,7	7,9	3,3
2014	0,1	-1,8	1	5,3	8,6	13,8	19,7	19,9	15,8	7,6	5,7	-0,6
2015	-1	-1,5	1,6	4,6	8,8	15,6	20,8	18,6	13,9	8,9	1,7	0,4
2016	-0,3	-0,4	0,4	4,2	5,7	12,8	13,6	18,7	12,8	8,5	2,5	0,2

Tableau 5 : Humidité relative en % (1988-2016) de la Station de M'sila

	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	AVR	MAY	JUN	JUL	AUG
1989	41.88	49	65.44	75.94	70.62	62	55.94	54.56	41.81	41.62	30.06	35.31
1990	48.19	56.56	58.25	69.44	79.06	59.06	59.88	57.5	57.31	41.44	39.38	40.38
1991	38.75	48.25	69.25	73	71.62	70	65.75	58.38	52.88	44.06	34.06	33.94
1992	50	62.19	66.56	75.56	75.81	67.38	67.12	61	56.06	47.62	45.94	34.06
1993	39.56	51.81	61.12	72.56	65.06	71.19	58.5	51.38	47.62	41.19	31.06	30.12
1994	43.75	48.5	68.56	72.44	75.06	62.88	54	52.38	34.25	31.25	22.88	24.81
1995	48.06	66.25	68.12	75.12	78.06	69.25	62.62	53.19	42.75	44.62	31.62	36
1996	48.94	53.88	61.38	72.88	73.75	72.81	67.75	61	56	54.25	41.38	39.12
1997	52.12	54.5	59.5	70	72.5	62.56	53.31	55.06	42.56	33.25	29.75	37.5
1998	54.81	60.94	71.31	76.19	75.25	65.62	55.81	51.06	53.88	34.88	27.69	35.31
1999	46.31	56.88	66.5	72.62	74.88	75.62	63.88	51.88	40.31	37.5	32.19	29.06
2000	43.94	50	63.31	77.5	68.94	63.12	56.06	45.56	43.56	35.56	26.5	27.12
2001	41.44	61.19	61.62	63.62	68	64.69	49.88	48.88	44.94	28.75	25.81	29.81
2002	49.88	51.25	68.81	72.5	69.12	57.94	55.06	47.81	39.06	26.75	31.38	38.75
2003	45.06	45	66.19	73.69	78.75	74	63.31	57.5	49.5	37.25	28.5	32.56
2004	51	59	67	77.88	75.94	62.88	60.81	59.25	62.19	48.56	37.25	39.06
2005	47.69	48.5	73.19	77.56	73.62	74.44	60.56	56.81	40.56	38.25	30.56	36.19
2006	48.62	59.19	67.88	78.94	76.81	73.38	62.25	53.5	54.31	37.38	34.38	37.88
2007	45.94	43.88	65.25	77.06	69.31	69.94	63.19	63.38	53.38	42.38	30.25	35.75
2008	48.62	61.12	67.88	75.5	70.38	65	59.88	47.44	48.62	41.38	30.12	31
2009	46.06	65.94	69.81	80.5	79.19	73.12	64	65.25	49	39.62	32.62	34.81
2010	58.12	59.25	58.44	70.5	71.56	69.62	59.81	60.62	52.94	45.06	32.75	37.81
2011	46.44	53	69.19	66.31	71.81	70.75	65.38	56.75	55.75	50.94	41.5	33.75
2012	46.69	60.5	67.25	77.69	74.19	73.25	61.62	63.44	49.5	38.44	31.25	25.31
2013	41.69	51.19	68.88	73.94	73.06	68.5	65.12	55.5	56.19	41.94	37.06	35.69
2014	49.5	46.19	68.44	74.81	72.31	67.38	66.88	49.44	46.38	40.88	33	32.38
2015	43	47.06	59.38	77.06	73	73.94	62.06	45.06	38.75	38.62	26.75	35.44
2016	53.75	62.62	68.81	64.19	66.31	64	60.44	53.94	48.06	39.44	32.44	34

Tableau 6 : vitesse du vent mensuelle en m/s (1996-2016) de la Station de M'sila

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	Sep	Oct	Nov	DEC
1996	4.4	4.5	2.5	3.9	2.8	2.5	2.2	2.7	1.7	3.7	3	4.9
1997	4.4	3.5	3.5	4.5	5	6.3	6.1	5.4	3.7	3.8	4.3	4.9
1998	3.9	3.2	4.5	5.9	5.1	4.3	4.8	6.1	4.5	4.1	3.7	3.3
1999	4.3	4.8	4.6	5.4	4.7	4.5	4.6	3.9	4.5	3.7	4.2	4.3
2000	2.6	2.3	4.3	7	5.1	4.9	5.4	3.4	3.4	4.6	4.4	3.9
2001	5.2	4.7	5	5.1	5.5	5.5	5.1	4.1	4.3	3	3.4	3.4
2002	2.7	4.2	5	5.7	6.1	4.7	5.2	4.3	4.5	4.3	5.3	4.7
2003	4.3	4.6	4.2	5.8	3.3	4	4.9	4.1	4.5	4.6	4	5.1
2004	4.4	3.9	5.3	5.1	5.5	3.7	4.2	3.7	3.6	3.2	3.6	4.2
2005	4	4.1	4	5.8	5.1	4.6	5.2	4.7	3.6	3	3.6	3.2
2006	4	4	5	4.9	3.7	5.5	3	4	3.3	3.6	3.9	2.7
2007	2.7	4.9	5	4.5	4.9	5.3	4.2	3.9	3.2	4.1	3.8	4.6
2008	2.9	3.5	5.3	5.6	5.2	4.5	3.7	3.2	3.6	2.1	3	2.7
2009	3.9	4	4.1	4	4.3	3.3	3.7	3.3	3.2	3.4	3	4.3
2010	4.4	4.3	4.4	3.8	4.5	4.3	3	3.2	3.7	3.3	3.8	3.4
2011	3	5.1	4.3	4.4	4.7	4.3	4.5	3.3	3.8	3.3	3.8	3.8
2012	3.7	4.7	4.5	5.8	4.1	3.9	5	5.4	4.3	4.6	3.8	4.3
2013	5.2	5.3	6.7	4.8	6	5	4	4	4	4	5	3
2014	4	4	5	5	5	5	4	4	3	3	4	5
2015	5	6	6	4	5	4	4	4	5	4	4	2
2016	3	5	5	5	5	5	4	4	4	4	5	4

Tableau 7 : Evaporation mensuelle en mm (2006-2016) de la Station de M'sila

Années	SEP	OCT	NEV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JULL	AOUT
1989	190	147	80	56	50	90	160	176.8	214	209.9	320	300.4
1990	196.2	136.6	98.9	81.0	67.8	112.0	121.3	145.9	160.6	276.6	305.5	272.9
1991	250	162	94	58	59	87	120	160	167	250	300	260
1992	190	127	70.5	61	48	60	88	114.6	113	176	230	260
1993	188	145	74	60	63	67.5	122	162.0	219	300	320	289
1994	220	200	97	65	113	120	110	180	280	310	280	274.7
1995	234.6	88.4	51	40.4	47.4	88.2	108.5	104.8	181.4	199.0	298.5	260.7
1996	198.5	124.1	118.6	57.4	63.8	57.3	90.3	125.3	139.8	178.5	273.3	277.7
1997	190.0	158.1	106.3	75.1	72.5	90.7	120	180.5	234.0	342.9	310.7	230.7
1998	165.5	131.2	110.9	84.6	62.3	83.6	137.3	163.9	175.1	253.3	344.7	289.6
1999	223	200	102.1	86.2	71.3	99.2	149.2	208	212	300	260	343
2000	190	280	77	53.9	47.5	86.6	126.5	180	190	210	215.2	190
2001	192.1	115.3	91.6	84.5	64.2	95.4	179.5	158.7	180	190.5	280	220
2002	178.3	125.9	74.4	64.4	51.6	95.9	150.8	175.5	180.2	200	200	130
2003	205.3	157.6	94.4	68.9	53.4	56.6	105.6	146.7	170	230.1	260.5	250
2004	177.2	125.8	68.5	49.2	48.8	54.1	105.4	115.9	120	155.2	210	196.6
2005	139.3	104.7	43.6	32.7	37.4	43	89.7	78.1	179.1	188.5	210	200
2006	122.9	85.1	52.8	34.7	51.3	36.6	97.7	156.5	143	222.3	200	190.5
2007	122.1	131.2	58.4	32.3	38.6	43.2	83.3	89.7	140.1	215	211	195
2008	114.1	91.1	44	38	45.1	73.7	103.6	124.4	155.3	199	190	110
2009	160.8	90.2	69.7	32.7	36.9	40	85.4	96.6	152	200.1	290	290.5
2010	150.1	104.3	70.8	50.6	54.6	62.6	109.4	135.4	120	180	230	240
2011	129.8	130.4	73.7	45.2	59.8	66.7	112.7	97.3	125.1	190.1	230	230
2012	162.8	112.3	52.6	34	66.8	68.1	78.2	100.7	132	200	250	220
2013	175.3	140.7	57.7	35.1	69.9	79.6	98.9	120.5	150	185.1	190	180
2014	208.4	141.3	85.5	59.8	64.0	85.3	115	146.2	184.3	237.5	290.9	274.4
2015	190.2	161.7	90.7	70.9	58.9	82.8	134.3	166.1	182.7	235.2	260.1	231.2
2016	141.9	110	58.1	37.3	51.2	57.1	95.4	111.0	144.1	197.8	222.3	206.2

Tableau 8: Les valeurs de radiation globale en (kwh/m²/jour) de la station de m'sila

	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	AVR	MAY	JUN	JUL	AUG
1989	6.41	4.84	3.52	2.59	2.22	2.87	3.47	4.93	5.68	6.54	6.37	6.59
1990	5.92	4.9	3.92	2.84	2.3	2.36	4.22	4.54	5.6	5.63	6.61	6.38
1991	6.02	4.95	4	2.61	2.16	2.78	3.17	3.96	5.47	6.28	6.53	6.56
1992	6.16	5.15	3.49	3.08	2.59	2.77	3.94	4.42	5.68	6.13	6.59	6.28
1993	6.52	5.39	3.73	2.93	2.4	3.17	3.25	4.69	5.95	6.48	6.98	6.8
1994	6.26	4.82	3.7	2.55	2.59	2.67	3.75	5.02	6.26	7.06	7.54	6.71
1995	6.4	4.92	3.72	2.99	2.8	2.62	3.96	4.51	6.05	6.64	6.48	6.89
1996	6.11	4.94	3.94	2.86	2.27	2.41	3.1	4.45	5.51	6.27	6.6	6.58
1997	6.21	5.1	3.99	2.87	2.12	2.36	4.05	5.41	5.67	6.68	7.12	6.79
1998	6.01	4.72	3.66	2.48	2.38	2.81	3.81	5.16	6.06	6.67	7.2	7.62
1999	6.59	4.99	3.74	2.77	2.39	2.44	3.75	4.78	6.62	6.82	6.78	6.91
2000	6.26	5.24	3.92	2.46	1.97	3.04	4.32	5.17	6.25	6.57	7.29	7.18
2001	6.21	4.75	3.42	2.73	2.4	2.87	4.19	5.45	6.56	7.11	7.99	7.44
2002	6.75	5.51	4.45	3.04	2.65	3.13	4.25	5.36	6.27	7.37	7.82	7.51
2003	6.47	5.89	4.59	2.84	2.65	2.44	3.46	5.16	6.17	7.28	7.84	7.56
2004	6.81	5.62	3.86	2.97	2.53	3.14	3.93	5.13	6.2	6.61	7.74	7.78
2005	6.7	5.74	4.04	3.29	2.32	3.36	3.69	4.99	5.92	7.56	7.49	7.65
2006	7.03	5.43	4.36	3.12	2.58	2.68	3.56	5.53	6.18	6.44	7.31	7.7
2007	7.23	5.62	4.69	3.31	2.24	3.11	3.67	5.03	5.25	7.19	7.85	8.1
2008	6.86	5.4	4.19	3.33	2.75	3.36	3.96	5.31	6.74	6.51	7.65	7.35
2009	7.1	4.9	3.79	3.26	2.49	2.54	4.1	5.43	6.01	7.36	7.8	7.56
2010	6.86	5.28	4.82	3.45	2.6	2.85	3.39	4.88	6.01	6.68	7.74	7.87
2011	7.05	5.6	4.35	2.9	2.6	2.84	3.79	4.93	6.19	6.61	7.54	7.65
2012	7.11	5.78	4.54	3.13	2.75	3.23	4.14	4.81	5.95	7.43	7.61	7.63
2013	6.93	5.52	4.3	3.12	2.82	2.93	3.6	4.72	6.3	7.32	7.99	7.5
2014	7.05	5.25	4.47	3.25	2.66	2.83	3.9	4.86	6.82	7.37	7.7	7.59
2015	7.1	5.25	4.59	2.85	2.54	2.79	3.3	5.32	6.55	7.47	7.78	8.01
2016	6.59	5.47	4.14	3.45	2.91	3.09	3.72	5.17	6.07	7.1	7.97	7.86

Table 9: Valeur de x en fonction de o (0 à 30")(formule de Bouchet)

o	λ	o	λ	o	λ	o	λ	o	λ	o	λ
0,0 °C	1,82	5,0	2,08	10,0	2,36	15,0	2,84	20,0	3,49	25,0	4,32
0,5	1,85	5,5	2,10	10,5	2,40	15,5	2,90	20,5	3,57	25,5	4,41
1,0	1,87	6,0	2,12	11,0	2,44	16,0	2,96	21,0	3,64	26,0	4,50
1,5	1,89	6,5	2,15	11,5	2,49	16,5	3,02	21,5	3,72	26,5	4,59
2,0	1,91	7,0	2,18	12,0	2,54	17,0	3,08	22,0	3,82	27,0	4,68
2,5	1,93	7,5	2,21	12,5	2,59	17,5	3,14	22,5	3,89	27,5	4,77
3,0	1,96	8,0	2,24	13,0	2,64	18,0	3,20	23,0	3,98	28,0	4,85
3,5	1,99	8,5	2,27	13,5	2,69	18,5	3,27	23,5	4,06	28,5	4,94
4,0	2,02	9,0	2,30	14,0	2,74	19,0	3,34	24,0	4,15	29,0	5,04
4,5	2,04	9,5	2,33	14,5	2,79	19,5	3,42	24,5	4,24	29,5	5,12

Table 10: Les valeurs de F(λ) en fonction de la latitude de la région d'étude

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1,04	.94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5	1,02	.93	1,03	1,02	1,05	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	.99	1,02
10	1,00	.91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	.98	.99
15	.97	.91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	.95	.97
20	.95	.90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	.93	.94
25	.93	.89	1,03	1,06	1,15	1,14	1,17	1,13	1,02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1,03	1,06	1,15	1,15	1,17	1,12	1,02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1,03	1,07	1,16	1,15	1,18	1,13	1,02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1,03	1,07	1,16	1,16	1,18	1,13	1,02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1,03	1,07	1,17	1,16	1,19	1,13	1,03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1,03	1,08	1,18	1,17	1,20	1,14	1,03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1,03	1,08	1,18	1,18	1,20	1,14	1,03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	1,03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1,03	1,09	1,19	1,20	1,22	1,15	1,03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	1,03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	.97	.86	.85
36	.87	.85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	1,03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1,03	1,10	1,22	1,23	1,25	1,17	1,03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1,03	1,10	1,23	1,24	1,25	1,17	1,04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1,03	1,11	1,23	1,24	1,26	1,18	1,04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1,03	1,11	1,25	1,26	1,27	1,19	1,04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1,03	1,12	1,26	1,27	1,28	1,19	1,04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1,02	1,12	1,26	1,28	1,29	1,20	1,04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1,02	1,13	1,27	1,29	1,30	1,20	1,04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1,02	1,14	1,30	1,32	1,33	1,22	1,04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1,02	1,14	1,31	1,33	1,34	1,23	1,05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1,02	1,14	1,32	1,34	1,35	1,24	1,05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1,02	1,15	1,33	1,35	1,37	1,25	1,06	.92	.76	.70
Lat. S.												
5	1,06	.95	1,04	1,00	1,02	.99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10	1,08	.97	1,05	.99	1,01	.96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15	1,12	.98	1,05	.98	.98	.94	.97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20	1,14	1,00	1,05	.97	.96	.91	.95	1,00	1,00	1,08	1,09	1,15
25	1,17	1,01	1,05	.96	.94	.88	.93	.98	1,00	1,10	1,11	1,18
30	1,20	1,03	1,06	.95	.92	.85	.90	.96	1,00	1,12	1,14	1,21
35	1,23	1,04	1,06	.94	.89	.82	.87	.94	1,00	1,13	1,17	1,25
40	1,27	1,06	1,07	.93	.86	.78	.84	.92	1,00	1,15	1,20	1,29
42	1,28	1,07	1,07	.92	.85	.76	.82	.92	1,00	1,16	1,22	1,31
44	1,30	1,08	1,07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1,17	1,23	1,33
46	1,32	1,10	1,07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1,17	1,25	1,35
48	1,34	1,11	1,08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1,18	1,27	1,37
50	1,37	1,12	1,08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1,19	1,29	1,41

تتطلب الإدارة المستدامة لموارد المياه التمكن الجيد من شروط الميزان الزراعي. التبخر هو عامل مهم لفقدان الماء في هذا الميزان. يعد تقدير هذه المعلمة ضروريًا لفهم الاحتياجات المائية للنباتات والمحاصيل وبالتالي تخطيط الجداول الزمنية. الهدف من هذا العمل المتواضع هو اختبار فعالية الصيغ التجريبية الثلاثة لـ Penman و Turc و Thornthwaite و Monteith- في تقدير التبخر المحتمل في منطقة المسيلة الواقعة في الإقليم المناخي الجاف، وذلك خلال فترة 28 عامًا (1988/89 إلى 2015/16). في المقياس السنوي، أشارت النتائج إلى أن صيغة Penman هي الأقرب لمعادلة Piche مع انحراف نسبي يتراوح من (-13.6 إلى 11.2)%. على الأكثر. على المقياس الشهري، أظهرت النتائج تطابقًا جيدًا من قبل Penman مع معامل ارتباط مرتفع جدًا ($r = 0.97$) وانحراف نسبي تصل إلى 4.7%. بعد ذلك، أثبتت الصيغة التجريبية فعاليتها في تقدير ETP في منطقة المسيلة.

الكلمات المفتاحية: التبخر، الكامنة، تقدير، صيغة، تجريبية، مناخ، جاف، المسيلة.

Résumé Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone aride (Cas de la région de M'sila)

La gestion durable des ressources en eau nécessite une bonne maîtrise des termes du bilan agricole. L'évapotranspiration est un facteur important de perte en eau de ce bilan. L'estimation de ce paramètre est nécessaire pour comprendre les besoins en eau des plantes et des cultures et par conséquent programmer le calendrier d'irrigation. L'objectif de ce modeste travail est de tester l'efficacité des trois (03) formules empiriques de Thornthwaite, Turc, et Penman-Monteith- dans l'estimation de l'évapotranspiration potentielle dans la région de M'sila située dans l'étage bioclimatique aride, et cela durant une période de 28 ans (1988/89 à 2015/16). A l'échelle annuelle, les résultats ont indiqué que la formule de Penman est la plus proche à celle de Piche avec un écart relatif variant de (-13.6 à 11.2)% au maximum. A l'échelle mensuelle, les résultats ont montré une bonne concordance par Penman avec un coefficient de corrélation très élevé ($r = 0.97$) et un écart relatif pouvant atteindre 4.7%. Alors, la formule empirique a prouvé son efficacité pour l'estimation de l'ETP dans la région de M'sila.

Mots clés: Evapotranspiration, potentielle, estimation, formule, empirique, zone ,aride, M'sila.

Abstract Comparative study of different methods for estimating evapotranspiration in arid zones (Case of the M'sila region)

Sustainable management of water resources requires a good grasp of the terms used in the agricultural balance sheet. Evapotranspiration is a major factor in water loss. Estimating this parameter is necessary to understand the water requirements of plants and crops, and consequently to program the irrigation schedule. The aim of this modest work is to test the effectiveness of the three (03) empirical formulas of Thornthwaite, Turc, and Penman-Monteith- in estimating potential evapotranspiration in the M'sila region, located in the arid bioclimatic zone, over a 28-year period (1988/89 to 2015/16). On an annual scale, the results show that Penman's formula is the closest to Piche's, with a maximum relative deviation of (-13.6 to 11.2)%. On a monthly scale, the results showed good agreement by Penman, with a

very high correlation coefficient ($r = 0.97$) and a relative deviation of up to 4.7%. The empirical formula therefore proved its effectiveness for estimating ETP in the M'sila region.

Keywords: potential, evapotranspiration, estimation, empirical, formula, arid, climate, M'sila