

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N° Ref :.....

Centre Universitaire de Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département de sciences et Technique

**Projet de Fin d'Etude préparé en vue de l'obtention du diplôme
LICENCE ACADEMIQUE
en Hydraulique
Spécialité : Sciences Hydrauliques**

Thème

**Contribution à la détermination de la méthode optimale pour l'estimation de
l'évapotranspiration potentielle dans la région de Mila**

Préparé par :

TEFFAHA SOMIA

KIHAL KELTOUM

BOUTANA HASNA

Dirigé par :

M^{EM}. CHEBBAH .L

Année universitaire : 2013/2014

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي

بَدَأَ خَلْقَ الْإِنسَانِ

مِنْ عَلَقٍ

مِثْلِ خَلْقٍ



Remerciements

AVANT TOUS NOUS REMERCIONS ALLAH PARCE QU'IL DONNE A NOUS
L'OCCASION DE L'ÉTUDE, IL NOUS A DONNÉ UN GRAND COURAGE POUR
PASSER TOUS LES MOMENTS DIFFICILES, ET POUR RÉALISER CE TRAVAIL.

NOUS REMERCIONS VIVEMENT NOTRE MÈRES, PÈRES ET FRÈRES

NOUS TIEN GRAND SENTIMENTS À TOUS NOTRE AIMONS

NOUS REMERCIONS BEAUCOUP NOTRE ENCADREUR *M^{em}* KABOUR.

CHEBBAHL POUR LEUR CONFIANCE, LEUR AIDE POUR LA RÉALISATION DE
CE TRAVAIL, ET POUR LEURS CONSEILS

NOUS REMERCIONS ÉGALEMENT TOUS LES ENSEIGNANTS DU DÉPARTEMENT
D'HYDRAULIQUE DU CENTRE UNIVERSITAIRE DE MILA.

NOUS REMERCIONS TOUS LES PERSONNES DE L'ANBT « MILA » ET LA
DIRECTION HYDRAULIQUE « MILA » ET L'ANRH DE CONSTANTINE, POUR LEUR
CONTRIBUTION PAR LES INFORMATIONS QUI NOUS AVONS EU BESOIN POUR
LA RÉALISATION DE CE TRAVAILLE.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur l'évaporation	2à7
Introduction	2
I.1) Cycle hydrologique	3
I.2) C'est quoi l'évaporation	3
I.3) Transpiration	3
I.4) Notion de évapotranspiration	3
I. 5) Définition de l'ETP	3
I.6) Objectifs de l'ETP	3
I.7) Les facteur de l'ETP	4
I.8) Unités des grandeurs physiques	6
Conclusion	6
Chapitre II : Mesure de l'évapotranspiration potentielle	7à16
Introduction	7
II .1) Méthodes de mesure directe.....	7
II.2) Méthode de mesure indirecte	10
Conclusion	16
Chapitre III : Présentation du site d'étude	17à28
Introduction	17
III.1. Situation géographique du site d'étude	17
III.2 : Etude climatique de site d'étude :	18
III.3. Les indices climatiques	25
Conclusion	28
Chapitre IV : Résultats et discussions	29à44
Introduction	29
IV.1 : Résultats de déférentes méthodes	29
IV.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des valeurs mesurée de l'évaporation par bac d'évaporation classe A	38

IV.3 Analyse comparatif des résultats de l'ETP de différentes méthodes par rapport à l'ETP du Bac d'évaporation :	40
Conclusion	44
Conclusion générale	45

Liste des figures

Figure N° :	Page:
Figure I.1 : cycle de l'eau	02
Figure I.2: illustration du phénomène d'évapotranspiration	03
Figure II.01 : Bac d'évaporation (classe A) du Weather Bureau (D'après Remenieras – 1972)	07
Figure II.2 : bac d'évaporation cubique de 1m d'arête (enterré)	07
Figure II.03. Evaporomètre de Piche (D'après Remenieras – 1972)	08
Figure .II.04 : Evaporomètre de wild	09
Figure II.05 : Atmomètre à sphère poreuse type Livingston	09
Figure II.06 : Schéma d'une cuve lysimétrique (Musy et Soutter, 1991).	10
Figure II.07 : Evolution du coefficient correctif mensuel	14
Figure II.08: Carte des coefficients correctifs régionaux	14
Figure III.1 : Situation géographique du site d'étude	17
Figure .III.2 : Histogramme de la distribution annuelle des précipitations de la station de Beni Haroun (2007 ; 2013)	19
Figure.III.3 : Représentation graphique de la répartition mensuelle des précipitations de la station de Beni -Haroun (2007-2013)	20
Figure III.4: Représentation graphique des températures à la station de Beni Haroun, période 2007-2013.	21
Figure III.5 : Représentation graphique de la variation mensuelle de la vitesse de vent de la station de Beni -Haroun (2007à2013).	22
Figure III.6 : Représentation graphique de la variation mensuelle de l'évaporation dans la station de Beni -Haroun (2007à2013).	23
Figure III.7 : Représentation graphique de la variation de Hr% dans la station de Beni -Haroun (2007,2013).	24
Figure III.8 : Abaque de De Martonne	26
Figure III.9: Climagramme de L. Emberger	27
Figure. IV.1 : Présentation graphique de l'ETP (Turc) de station de Beni-Haroun, séries (2007-2013)	35
Figure IV.2 : Présentation graphique de l'ETP(Thornthwaite) de station de Beni Haroun, séries (2007-2013)	32

Figure IV.3 : Présentation graphique de l'ETP (Blanney-Cridle) de station de Beni-Haroun, séries (2007-2013)	33
Figure IV.4 : Présentation graphique de l'ETP (Blanney-Cridle) de station de Beni-Haroun, séries (2007-2013)	34
Figure IV.5 : Présentation graphique de l'ETP (Penman) de station de Beni Haroun, séries (2007-2013)	36
Figure IV.6 : Présentation graphique de l'ETP(ANRH) de station de Beni Haroun, séries (2007-2013)	38
Figure. IV.7 : Bac d'évaporation Colorado classe A (ANBT-Beni Haroun)	39
Figure IV.8 : Présentation graphique de l'ETP (Bac d'évaporation) de station de Beni- Haroun, séries (2007-2013)	40
Figure IV.9 : Evapotranspiration annuelle (mm/an) obtenues par les différentes méthodes dans la station de Beni Haroun (2007-2013)	41
Figure IV.10 . Courbes des corrélations des résultats obtenus par différentes méthodes par rapport au Bac d'évaporation Colorado	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau N° :	Page :
Tableau (I-1) : les unités principales pour calcule l'ETP	06
Tableau II.01: Valeurs des coefficients a et b de l'équation $aF + b$	13
Tableau II.2 : Coefficient d'évaluation des durées théorique d'insolation pour la formule de l'ANRH.	15
Tableau.III.1: caractéristiques des stations climatiques	18
Tableau (III.2): Précipitation moyenne annuels de la station de Beni-Haroun (2007-2013)	19
Tableau.III.3: moyennes mensuelles des précipitations (en millimètres) de la station de Beni Haroun (2007-2013).	19
Tableau.III.4: Température moyenne mensuelle en °C à la station de Beni-Haroun (2007-2013).	21
Tableau.III.5 : la variation mensuelle de vitesse du vent pour la station Beni Haroun (2007-2013).	22
Tableau.III.6 : la variation mensuelle de l'évaporation en (mm) de station de Beni Haroun (2007-2013)	23
Tableau.III.7: La variation mensuelle de l'humidité relative moyenne en (%) de la station de Beni Haroun (2007-2013).	24
Tableau. IV.1 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Turc à la station de Beni Haroun (2007-2013)	30
Tableau. IV.2 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Thorntwaite à la station e Beni Haroun (2007-2013)	31
Tableau. IV.3 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Blanney-Cridle à la station de Beni Haroun (2007-2013)	33
Tableau.IV.4 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Blanney-Cridle (USDA) à la station de Beni-Haroun (2007-2013)	34
Tableau. IV.5 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Panman FAO à la station de Beni Haroun (2007-2013)	35
Tableau.IV.6 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon ANRH à la station de Beni Haroun (2007-2013)	37
Tableau. IV.7 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Bac d'évaporation à la station de Beni -Haroun (2007-2013)	38
Tableau IV.8 : valeurs des variations annuelles de l'ETP selon les différents formules à la station de Beni-Haroun	39

Liste des abriviations

ETP : Evapotranspiration potentielle.

ET0 : Evapotranspiration référence.

ETM : Evapotranspiration maximale.

ETR : Evapotranspiration réelle.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydraulique.

ANBT : Agence Nationale des Barrages et Transferts.

FAO: Food and Agriculture organization.

ONM : Office National de Météorologique.

USDA :United states département of agriculture.

Introduction générale

Les phénomènes de renouvellements et les mouvements des eaux sur la terre forment un circuit fermé (cycle de l'eau). Ce cycle comprend plusieurs cheminements regroupés le phénomène de précipitation et la direction de l'eau après ce phénomène, ruissellement et infiltration, et aussi le phénomène d'évaporation sous l'effet d'ensoleillement solaire et autres facteurs...etc. Ce dernier paramètre est le plus important des trois ; Il conditionne l'abondance ou la disette en eau pour la végétation, cette connaissance est l'un des moyens fondamentaux d'intervention pour réussir en aménagement d'un territoire en agriculture, en urbanisation, en lutte contre l'érosion, ou tout autre projet qui vise à protéger l'environnement et à accroître l'exploitation maximum du potentiel naturel.

Donc il est très important d'estimer ou de quantifier cette perte par évaporation. La détermination de l'**ETP** basée sur deux méthodes l'une directe par des instruments spéciaux (Bac d'évaporation, Lysimètre...), et l'autre indirecte par des formules empiriques (Turc, Penman, Thornthwaite...), les disponibilités climatiques agissent directement sur le choix des formules.

L'objectif de ce travail est l'estimation de l'**ETP** pour la station de Beni-Haroun (Wilaya de Mila), par différentes méthodes empiriques, et trouver la formule optimale pour cette zone. La comparaison des résultats de ces modèles avec les valeurs des mesures directes à l'aide du Bac d'évaporation Colorado, permet de tirer des conclusions valables dans cette station.

Notre travail s'articule sur quatre chapitres essentiels:

- Le premier chapitre : Généralités sur l'évapotranspiration.
- Le deuxième chapitre: Mesure de l'évapotranspiration potentielle
- Le troisième chapitre: Présentation du site d'étude.
- Le quatrième chapitre: Résultats et discussions.



*Chapitre I : Généralité sur
l'évapotranspiration*

Introduction :

L'eau est la source principale et originale de toute vie, elle se présente dans la nature sous trois états : solide, liquide et gazeuse, et dans trois grands réservoirs : l'atmosphère, le sol et les réservoirs océaniques (océane, mer, lac)

L'eau est soumise à des phénomènes des pertes par l'homme (l'industrie ...), et par deux phénomènes naturels : évaporation (phénomène physique) dans les sols nus, l'eau à surface libre...etc. transpiration (phénomène physiologique) dans les couverts végétaux. ces dernière qui sont composés entre eux pour due un grand phénomène du cycle d'eau s'appelle évapotranspiration.

On distingue trois types de l'ET sont :

1. Evapotranspiration réel désigné par **ETR**.
2. Evapotranspiration maximal désigné par **ETM**.
3. Evapotranspiration potentiel désigné par **ETP**.

L'objectif de ce chapitre est l'explication du troisième type (**ETP**).

I.1) Cycle hydrologique :

Est un concept englobe les phénomènes du mouvement et des renouvellements des eaux sur la terre ; dans ce cycle nous citerons l'évaporation (océan, sol nus), la transpiration (des plantes), la précipitation (pluie, neige), le ruissellement, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et l'écoulement souterrains. (**Figure I.1**)

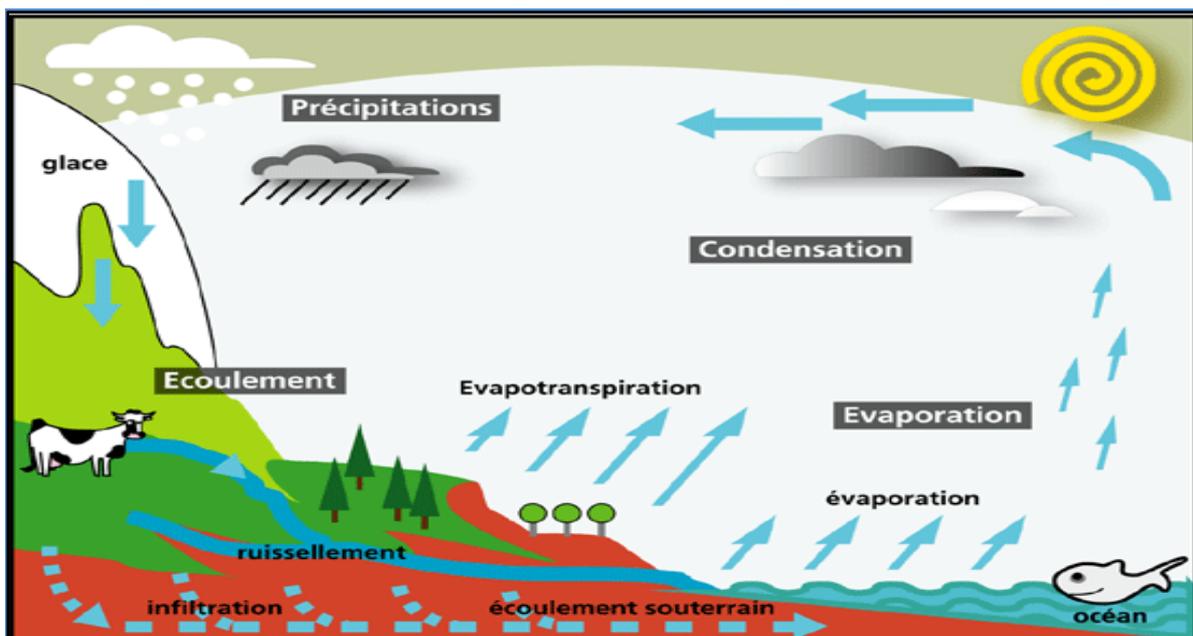


Figure I.1 : cycle de l'eau

I.2) C'est quoi l'évaporation ?

L'évaporation est définie comme étant le passage de l'eau de l'état liquide ou solide à l'état gazeux ; Les principales sources de vapeur d'eau sont les plans d'eau et couverts végétaux.

I.3) Transpiration :

La transpiration concerne les plantes, c'est permet à la vapeur d'eau s'échapper du couvert végétale vers l'atmosphère.¹

I.4) Notion de évapotranspiration :

C'est la perte nette d'eau (sous forme de vapeur) par unité de surface du sol directement par évaporation de la surface du sol, et indirectement par la transpiration des feuilles.² (**Figure I.2**).

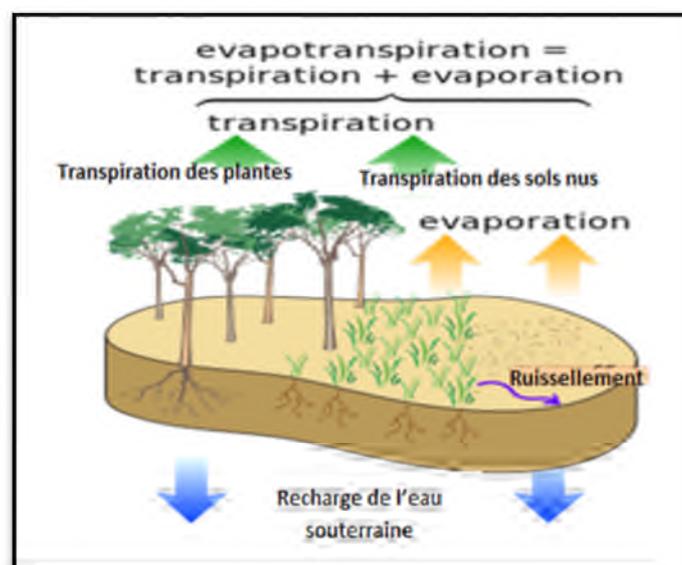


Figure I.2: Illustration du phénomène d'évapotranspiration.

I.5) Définition de l'ETP :

L'évapotranspiration de référence (ET_0) est définie comme étant «les pertes d'eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance et abondamment ».³

I.6) Objectifs de l'ETP :

1. L'ETP permet de continuer la circulation de l'eau à partir des racines jusqu'à la hauteur (transpiration due à une force négative pour l'alimentation en eau pour tous les organes des plantes).⁴
2. L'opération de transpiration est assurée par l'approvisionnement en minéraux fondus de sol à façon durable (car dans cette opération l'arbre de l'eau est entraîné totalement vers le haut avec une force assurée par l'arrivée de l'eau chargée avec les minéraux au plus haut).⁴

3. Les particules des vapeurs aspiré le chaud de milieu et de la lame (entre les feuilles) .⁴ c.-à-d. l'**ETP** fait l'opération de réfrigération.
4. L'**ETP** est très important dans le cycle de l'eau car l'eau évaporée de la terre peut précipitée ensuite sous l'effet de la condensation.

I.7) Les facteur de l'ETP :

Généralement l'**ETP** est conditionnée par des facteurs végétatifs, et climatiques (météorologique) et des conditions dépendent au sol.

I.7.1) Facteurs végétatifs :

Les facteurs essentiels qui conditionnent la quantité d'eau qui stockée dans couverts végétaux sont les suivant :

a. Morphologie des végétaux et capacité de stockage :

La capacité de stockage varie en fonction du type de végétale et selon sa morphologie par le biais de l'agencement des feuilles et lalongueur de branche.¹

b. Densité des peuplements :

On définit généralement plusieurs indicateurs de densité des peuplements qui sont généralement basés sur l'estimation de la surface foliaire totale du couvert végétal (proportion en plan de la surface du sol cachée par la végétation) ou sur le calcul du rapport entre la surface totale des feuilles du couvert végétal et la surface couverte par la végétation.¹

c. Ages des peuplements :

Il joue un rôle semblable à celui de la densité de couverture en ce sens que la capacité de stockage augmente rapidement avec l'âge mais finit par atteindre un seuil.¹

d. Variation saisonnière :

La transpiration augment avec la croissance des feuilles, puis cesse à la chute de ces dernières .⁶

I.7.2) Facteurs climatiques :

a. La température :

La transpiration faire lorsque le soleil augmenté où une quantité de l'eau transformée à vapeur ; ce gaz peut sortie à partir des surfaces poreuses des feuilles des plantes.⁴

b. La pression atmosphérique :

La pression atmosphérique agit, quant à elle, sur le taux d'évaporation à différentes altitude mais son influence est minime. En générale, on admet que l'évaporation augmente lorsque la pression atmosphérique diminue.⁵

c. Vitesse et turbulence du vent :

Le vent assure le remplacement de l'air plus ou moins saturé au contact de la surface évaporante par nouvelles couches ayant une température et une humidité généralement plus faibles. Il favorise donc l'évaporation, d'autant plus que sa vitesse et sa turbulence sont grandes ; toutefois, si ces paramètres atteignent une valeur limite au-dessus de laquelle la vapeur d'eau est dispersée au fur et à mesure de sa formation, tout accroissement de ceux-ci, au-delà de cette limite, sera sans effet.¹⁰

d. L'humidité :

L'humidité de l'air joue également un rôle dans l'évaporation. Plus l'air est humide et moins il est apte à absorber de l'humidité supplémentaire. Enfin, plus la température de l'air est élevée plus l'évaporation est intense.⁶

e. Rayonnement solaire :

Quantité de chaleur disponible : l'évaporation **1g** de **H₂O** nécessite l'apport de **550** (cals).⁷

I.7.3) Facteurs dépend sol/eau :**a) Teneur en eau du sol :**

Plus le sol est sec et plus les flux évaporés seront faibles. A l'inverse, un sol saturé peut même évaporer de l'eau à un taux supérieur à celui d'une surface d'eau libre vu que le microrelief du sol peut constituer une surface évaporante plus importante que celle d'un lac ou d'un réservoir.⁷

b) Couleur du sol et albédo :

Les sols de couleur claire présentant des valeurs d'albédo élevées vont absorber moins de rayonnement que des sols foncés. Toutefois, dans le cas où la quantité d'eau n'est pas un facteur limitant, les écarts entre l'évaporation d'un sol clair et celui d'un sol foncé ne sont généralement que de l'ordre de quelques %, l'avantage étant donné au sol foncé.⁷

d) Qualité de l'eau :

La qualité de l'eau et influe sur le taux d'évaporation telle, que le taux d'évaporation est moindre pour l'eau salée que pour l'eau douce.

« On admet que l'évaporation diminue à raison de **1%** pour chaque augmentation de **1%** de la concentration en sel dans l'eau.

Toutes choses égales d'ailleurs, l'eau de mer aurait un taux d'évaporation

inférieur de 2à3% à celui de l'eau douce ». ¹⁰

I.8) Unités des grandeurs physiques :

Les grandeurs dérivées utilisées fréquemment dans les calculs de l'ET dans le tableau (I-1).

Tableau I. les unités principales pour calcule l'ETP

Grandeur		Unité	
	Symbole	Désignation	
Volume	V	Mètre cube	m ³
Vitesse	v	Mètre par second	m/s
Température	T	Kelvin	k
Rayonnement global	RG ou Iga	Calorie par centimètre carré par jour	Cal/cm ² /j
Evapotranspiration potentiel	ETP	Milli mètre	mm
Précipitation	P	Milli mètre	mm
Superficie	S	Mètre carré	m ²
Pression	P	Atmosphère ou bar	ATM ou bar

Conclusion :

L'ETP est très important pour continue le cycle de l'eau car l'eau évaporée à partir du sol ou cour d'eau, ou transpirée par les plantes se précipitée ultérieurement sous l'effet de la condensation.

L'ETP c'est les pertes de l'eau par évaporation et transpiration d'une surface végétale.

L'évaporation est la conversion de l'eau, de l'état liquide ou solide à l'état gazeuse le passage de l'eau à partir d'un couvert végétale s'appelle la transpiration, l'ensemble de ces phénomènes donne l'évapotranspiration.

L'ETP conditionné par plusieurs facteurs, météorologiques (humidité, rayonnement solaire, la vitesse du vent ...etc.) ; et végétatifs (morphologie des plants ...etc.) ; et qualité de l'eau et couleur de sol.

A grayscale photograph of a hand holding a pen, writing on a notepad. The text is written in a cursive script. The background is a plain, light color.

*Chapitre II : Mesures de
l'évapotranspiration potentielle*

Introduction :

L'évaluation de l'**ETP** est très importante pour estimer le besoin en eau pour les cultures, et c'est pour ça on trouve un grand nombre des méthodes d'évaluation de l'**ETP** :

Soit détermination directement (expérimentalement) à l'aide des instruments spéciaux, soit indirectement ou (théoriquement) à partir des applications des formules empiriques qui dépendent du climat.

II.1) Méthodes de mesure directe :

L'**ETP** peut être estimée de manière simple d'après les mesures réalisées avec des dispositifs. Les appareils standards les plus utilisés pour sa mesure ce sont les bacs et lysimètres.

II.1.1) Bac d'évaporation :

L'évaporation peut être mesurée directement à l'aide d'un bac d'évaporation standard circulaire en acier galvanisé de diamètre **D=1.21m** et de hauteur **h=0.255m** (**Figure II.1**). Ce pendant, l'évaporation à partir de ce bac est supérieure à l'évaporation à partir d'un plan d'eau étendu. Afin de ne pas surestimer l'évaporation, l'utilisation de paramètres de correction est nécessaire. (WANIELISTA ET AL, 1997).⁹ On trouve aussi un bac de section carrée (**Figure II.2**)

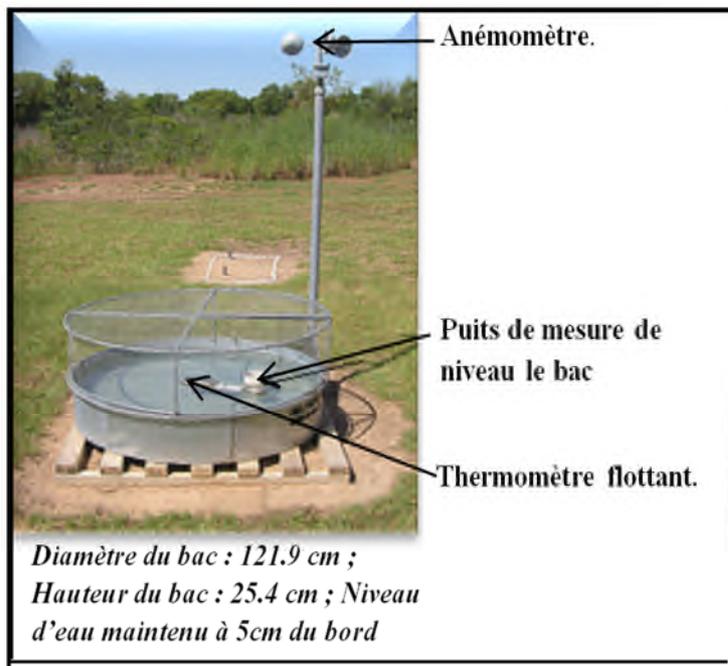


Figure II.01 : Bac d'évaporation (classe A) du Weather Bureau (D'après Remenieras - 1972)



Figure II.2 : bac d'évaporation

Cubique de 1m d'arête (enterré)

II.1.2) Evaporomètre :

Est un instrument pour l'évaluation de l'évaporation devise à deux types :

a)Evaporomètrede Piche :

L'évaporomètre de Piche est constitué par un tube cylindrique en verre de (25cm à15cm) de diamètre ; ce tube gradué est fermé à sa partie supérieure, tandis que son ouverture inférieure est obturée par une feuille circulaire de papier filtre normalisé de 30mm de diamètre et 0.5mm d'épaisseur fixée par capillarité et maintenue par un ressort. L'appareil ayant été rempli d'eau distillée, celle-ci est évaporée progressivement par la feuille de papier filtre ; la diminution du niveau de l'eau dans le tube permet de calculer le taux d'évaporation (en mm par 24heures par exemple).¹⁰ (Figure II.03)

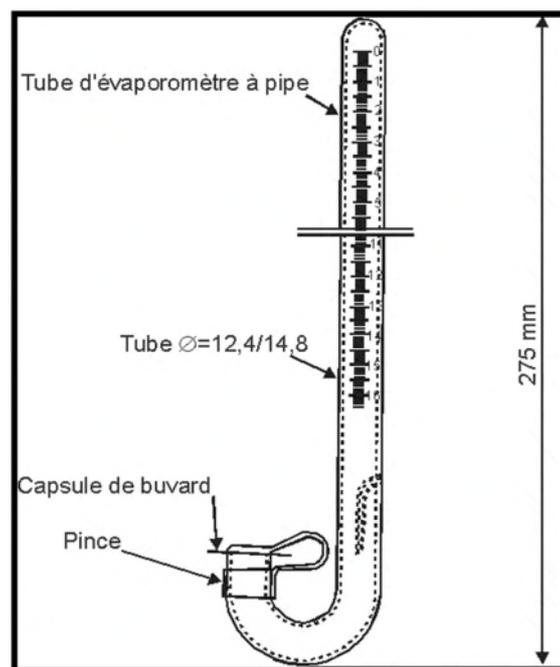


Figure II.03. Evaporomètre de Piche
(D'après Remenieras - 1972)

b) Evaporomètrede Wild :

Il est constitué par une balance du type «pèse-lettres » dont le plateau supporte un petit bassin contenant de l'eau (surface : 250cm² ; profondeur : 35mm). On note ou on enregistre les variations de poids du bassin (Figure II.04). Il présente deux principaux inconvénients : le volume d'eau est très faible et le rôle thermique des parois est prépondérant ; le vent peut faire osciller le bassin et fausser les mesures.¹⁰

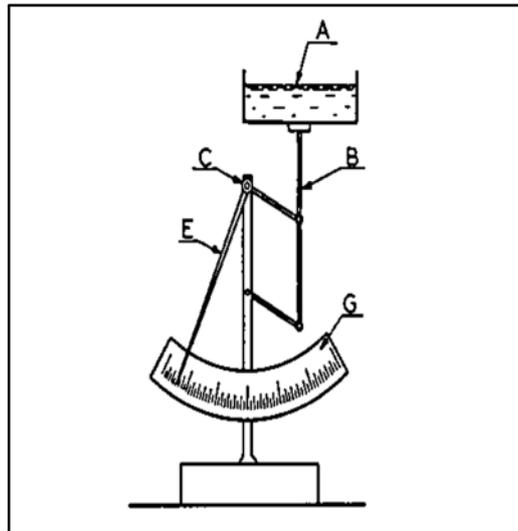


Figure .II.04 : évaporomètre de wild

II.1.3) Corps en porcelaine poreux :

Pour mesurer les variations relatives du pouvoir évaporant de l'atmosphère, les météorologues et les agronomes utilisent couramment des sphères, des cylindres ou des plaques de porcelaine blanche poreuse saturée d'eau ; Le taux d'évaporation d'un tel système est parfois considéré comme voisin de celui des plantes. A titre d'exemple, le schéma de l'atmomètre de Livingston ; c'est une sphère creuse de porcelaine poreuse d'environ **5 cm** de diamètre et d'un centimètre d'épaisseur. Cette sphère est remplie d'eau distillée provenant d'un réservoir gradué qui assure en permanence l'alimentation de la sphère et permet la mesure du volume d'eau évaporée .¹⁰ (Figure II.05)

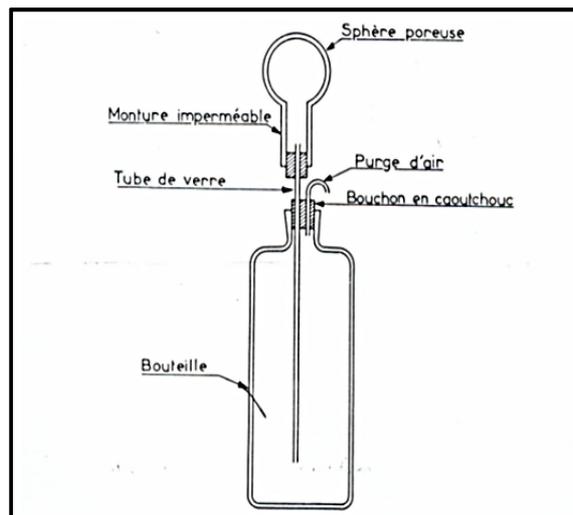


Figure II.05 : Atmomètre à sphère poreuse type Livingston

II.1.4) Lysimètre :

Le lysimètre, qui est l'appareil de mesure de la transpiration des plantes, est une cuve étanche enterrée à parois verticales. Elle est ouverte en sa partie supérieure et remplie de la terre que l'on veut étudier, jusqu'à **10cm** de son bord supérieur. La surface du sol est ainsi soumise aux agents atmosphériques (mesurés dans une station météorologique voisine), y compris la pluie. Le sol contenu dans le lysimètre est à un niveau bien déterminé.⁶(Figure II.06)

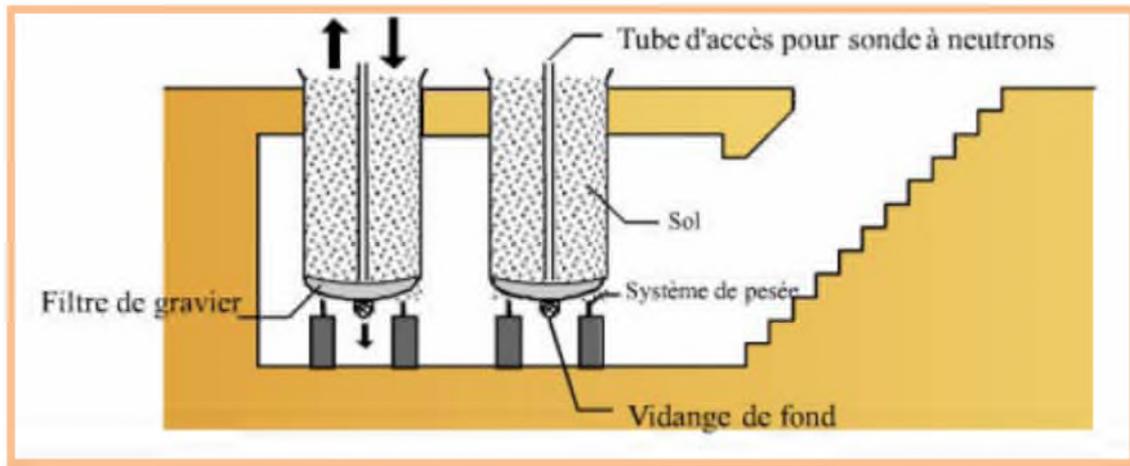


Figure II.06 : Schéma d'une cuve lysimétrique (Musy et Soutter, 1991).

II.2) Méthode de mesure indirecte :

Il existe plusieurs formules empiriques pour calculer l'**ETP**, ces formules sont obtenues sur la base des expériences faites dans les régions de caractère climatique différent.

Parmi les formules empiriques on cite la formule de Turc, Thornthwaite, Penman, ANRH ...etc.

II.2.1) Formule de Turc :

L. Turc rechercha à partir de **1954** une expression algébrique représentant au mieux l'évaporation mensuelle et même décadaire observée sur les cases lysimétriques de Versailles, Rothamsted, Groningen et d'autres stations situées en Ecosse, en Afrique du Nord et aux Indes. Il aboutit ainsi, vers **1953**, à une formule complexe donnant l'évapotranspiration potentielle en fonction de l'insolation et de la température.

En **1962**, L. Turc a proposé les formules simplifiées suivantes.¹⁰

1) Lorsque l'humidité relative mensuelle est supérieure à **50%**, on peut évaluer avec une approximation suffisante l'évapotranspiration potentielle mensuelle d'un périmètre irrigué par la formule suivante :

$$ETP = 0.40(Ig + 50) \frac{t}{t + 15}$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle (**mm**).

Ig : Radiation solaire globale du mois considérée en **calories/cm²/jour**.

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

Le coefficient **0.40** est varié selon le nombre des jours des mois où il c'est le résultat du produit **0.013 j**

Donc :

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

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

Pour le mois de février le coefficient est **0.37**

La radiation solaire globale n'est mesurée qu'en un petit nombre de stations, on devra souvent l'évaluer à partir de la radiation maximale théorique **I₀**, calculée d'après les données astronomiques et d'après le rapport $\frac{h}{H}$ de la durée d'insolation effective (mesurée par un héliographe) à la durée du jour astronomique (en **heures**).

On emploie souvent la formule suivante dérivée de celle d'Angström :

$$I_g = I_{ga} \left(0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right)$$

Avec :

h: Durée d'insolation réelle (**heures**).

H : Durée astronomique du jour (**heures**).

I_{ga} et **H** ne dépendent que de la latitude.

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

$\left(1 + \frac{50 - hr}{70} \right)$ C.-à-d. L'**ETP** donnée par la formule :

$$ETP = 0.40 \times (I_g + 50) \times \frac{t}{t + 50} \times \left(1 + \frac{50 - Hr}{70} \right)$$

Hr est l'humidité relative moyenne de l'air pendant le mois considéré (en %).

En pratique, le terme correctif ci-dessus n'intervient que dans le cas des climats désertiques ou subdésertiques.

Remarque :

La formule de Turc est une revanche de une relation qui peut être appliquée dans les régions tempérées pour estimer l'**ETP**.

II.2.2) Formule de Thornthwaite :

Cette formule déjà assez ancienne (**1944**) est basée sur de nombreuses expériences effectuées sur des cases lysimétriques.

L'évapotranspiration potentielle est donnée par la relation suivante ^{.10}:

$$ETP = Ct^a$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration mensuelle en centimètre pour un mois fictif de **30** jours et une durée théorique d'ensoleillement de **12** heures sur **24**.

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

C et **a** sont des fonctions de l'indice thermique annuel, constantes pour un lieu donné.

a: est calculé par la relation suivante :

$$a = 67.5 \times 10^{-8} I^3 - 77.1 \times 10^{-6} I^2 + 0.01790 I + 0.492$$

Dans laquelle **I** est l'indice thermique annuel égal à la somme des **12** indices thermiques mensuels (**i**)

$$I = \sum_{i=1}^{i=12} i = \sum_{i=1}^{i=12} \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

t : Température moyenne mensuelle (°C).

La valeur de "a" est donnée par l'expression de L. SERRA de **1954** par simplification de la formule de Thornthwaite :

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

Le terme **C** varie en sens inverse de **I** et en définitive l'équation **ETP = C t^a** peut s'écrire :

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

II.2.3) Formule de BLANEY-CRIDDLE :

C'est l'une des plus anciennes formule car en **1931** Harry Blaney pensait que l'**ETP** dépendait de deux facteurs essentiels :

- ✓ La force évaporante **F**.
- ✓ L'humidité relative de l'air ou le déficit de saturation.

A ce moment là, les auteurs ont envisagé une régression linéaire entre l'**ETP** et la température ; ensuite ils ont remarqué que l'**ETP** ne dépend pas seulement du potentielle énergétique **F**, dépensé pour actionner le déficit de saturation **H** mais aussi de la structure de la surface qui libère les molécules d'eau. Ce dernier est appelé facteur de correction **K** qui dépend directement du type de la plante.¹¹

Ainsi la première formule s'écrit :

$$ETP = F.K (114 - H)$$

Enfin en **1945**, les mêmes auteurs Blaney Harry et Criddle Wayne ont remarqué que le facteur **H** joue un rôle moins important que prévu vis-à-vis du potentielle énergétique et à l'état de liaison de l'eau à la surface évaporante, alors pour simplifier le calcul, ils éliminèrent le **H** de leur formule qui devient ainsi : **ETP = K F**

Où :

K : Coefficient propre à la couverture végétale considérée.

La formule de l'**ETP** climatique s'écrit de la manière suivante:

$$ETP = aF + b$$

Avec :

F : en mm/mois. $F = P (0.46 t + 8.13)$

P : Durée d'éclairement en %

T : Température moyenne mensuelle en (°C)

a et **b**: Coefficients de correction en fonction de trois paramètres climatiques: l'humidité relative, la vitesse du vent et l'insolation effective (rapport des heures d'insolation et de la durée astronomique de jour), les valeurs de **a** et **b** sont données par le tableau suivant:

Tableau II.01: Valeurs des coefficients **a** et **b** de l'équation $aF + b$

Insolation effective	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative (%)					
		Faible <20%		Moyenne 20-50%		Elevée >50%	
		a	b	a	b	a	B
Elevée 0.70-0.90	Faible 0-2	1.59	-2.02	1.45	-2.18	1.16	-1.96
	Modérée 2-5	1.77	-1.84	1.59	-2.11	1.25	-1.88
	Elevée 5-8	2.00	-1.86	1.73	-2.04	1.36	-2.00
Modérée 0.45-0.70	Faible 0-2	1.45	-2.00	1.30	-2.07	1.05	-1.84
	Modérée 2-5	1.66	-1.98	1.45	-2.00	1.14	-1.84
	Elevée 5-8	2.05	-2.23	1.57	-1.98	1.21	-1.80
Faible 0-0.45	Faible 0-2	1.25	-1.79	1.13	-1.71	0.89	-1.70
	Modérée 2-5	1.45	-1.91	1.23	-1.75	0.96	-1.66
	Elevée 5-8	1.61	-1.88	1.36	-1.82	1.02	-1.59

II.2.4) Formule de Blaney-Criddle "Soils Conservation Service" (USDA, 1962) :

En 1962, le Département de l'Agriculture des Etats Unies (USDA) fait intervenir le facteur **Kt** dans l'équation précédente.¹²

$$ET0 = (0.48 \times T + 8.13) \times P \times Kt$$

Avec :

Eto : Evapotranspiration en mm/mois ou par décade ;

Kt : Facteur dépendant de température qui vaut : $Kt = (0,031 \times T + 0,24)$.

Remarque :

La relation proposée par Blaney et Criddle qui permet une estimation correcte de l'**ETP** pour des régions arides ou semi arides.

II.2.5) Formule dite ANRH :

Il arrive souvent que les données climatiques ne soient pas disponibles pour Permettre le calcul de l'**ETP**. Dans ce cas, on peut utiliser la formule **ETP** de l'**ANRH**, qui permet

d'évaluer l'évapotranspiration potentielle mensuelle à partir de la seule mesure de la température moyenne mensuelle correspondante de la position géographique .¹¹:

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

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/mois).

Km : Coefficient mensuel dont ses valeurs sont données à la **Figure II.07**

Kr : Coefficient régional qu'on peut lire sur la **Figure II.08**

T : température moyenne mensuelle pour le mois considéré (°C).

H : Durée théorique mensuelle d'insolation (heures/mois) et elle est exprimée en fonction de l'ordonnée (Y) de Lambert selon la formule suivante :

$$Hi = ai Y + bi$$

Avec :

Y : l'ordonnée de Lambert de la zone(Km).

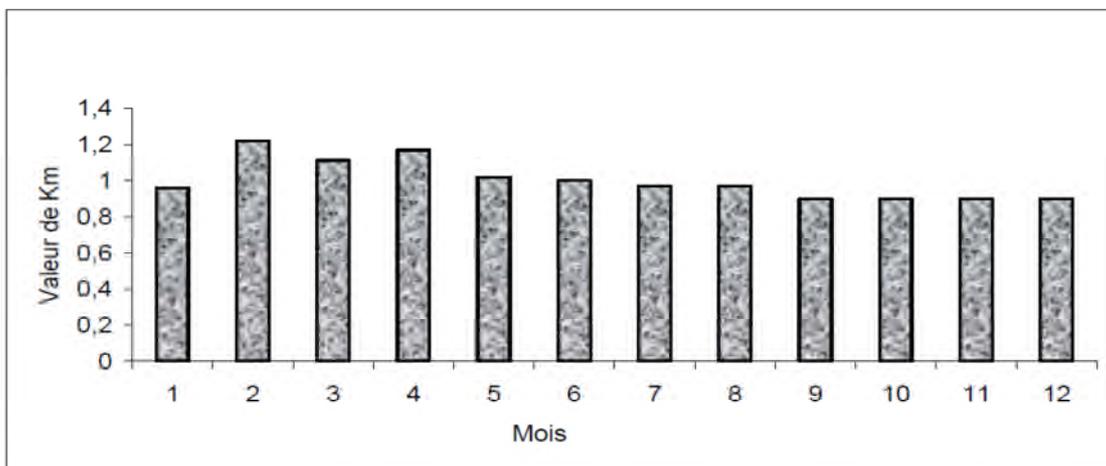


Figure II.07 : Evolution du coefficient correctif mensuel

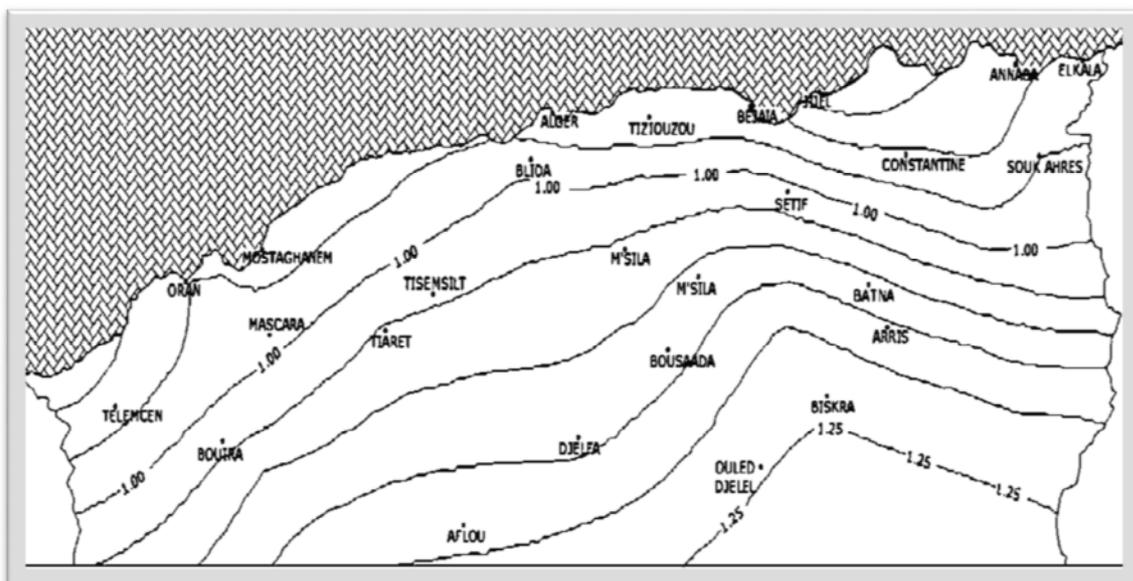


Figure II.08: Carte des coefficients correctifs régionaux

Évolution du coefficient correctif mensuel **ai**, **bi** sont donnés dans le **tableau II.2**

Tableau II.2 : Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation pour la formule de l'ANRH.

Mois	1	2	3	4	5	6
ai	-0.0218	-0.0110	-0.0012	0.0098	0.0201	0.0248
bi	315	307	371	389	429	429
Mois	7	8	9	10	11	12
ai	0.0230	0.0144	0.0031	-0.0081	-0.0185	-0.0246
bi	436	414	370	351	311	308

II.2.6. Formule de Penman modifiée par F.A.O:

La formule originale de Penman (physicien anglais) est établie en **1948** sur une nappe libre d'eau, elle résulte de la combinaison du bilan d'énergie avec le transfert aérodynamique sous la forme suivante :

$$ETP = \left[\frac{Iga}{59} (1 - a) \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right) - \frac{\sigma}{59} T^4 (0,56 - 0,08\sqrt{e}) \left(0,10 + 0,90 \frac{h}{H} \right) \right] \times \left[\frac{\frac{\Delta}{\gamma}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} + \frac{0,26}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} (E - e) (1 + 0,54u) \right]$$

La formule de Penman a été modifiée par de nombreux auteurs de façon à en simplifier l'écriture ou en adapter les paramètres à des régions particulières. Parmi ces formules modifiées on utilise fréquemment la formule dite de PENMAN-FAO recommandée pour les régions sèches et arides.¹¹ Cette formule a la forme suivante :

$$ETP = \left[\frac{Iga}{59} (1 - a) \left(0,25 + 0,45 \frac{h}{H} \right) - \frac{\sigma}{59} T^4 (0,56 - 0,08\sqrt{e}) \left(0,10 + 0,90 \frac{h}{H} \right) \right] \times \left[\frac{\frac{\Delta}{\gamma}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} + \frac{0,26}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} (E - e) (1 + 0,864 u) \right]$$

Cette formule semblable avec la formule Penman mais avec petite changement dans les paramètres :

- ❖ $(1 + 0,864 u)$ Au lieu de $(1 + 0,54 u)$.
- ❖ $(0,25 + 0,45 \frac{h}{H})$ Au lieu de $(0,18 + 0,62 \frac{h}{H})$.

Avec :

ETP : Évapotranspiration potentielle (**mm/j**).

Iga : Rayonnement solaire qui atteindrait le sol en l'absence d'atmosphère, c'est une donnée astronomique indépendante du climat (**cal/cm²/j**). (**Iga=I₀** chez turc)

h : Durée d'insolation réelle (**heures**).

H : Durée d'insolation maximale théorique (**heures**).

Détermination de l'albédo **a**:

La valeur de l'albédo généralement retenue pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle est de **20%**.

σ: Constante de Stephan-Boltzman= 1.18×10^{-7} cal/cm²/j.

T : Température en (°K).

e : est estimée à partir de l'humidité relative **H_r** en% et de la température **t** en (°C) par la relation suivante :

$$e = 0.061H_r \times 10^{(7.5 \frac{t}{238+t})}$$

Δ: Pente de la courbe de tension de vapeur saturante pour la température de l'air **T**.

$$\Delta = \frac{6.149}{T} \exp(19.511 \frac{t}{T}) (\frac{6463}{T} - 3.927) \quad (\text{Millibar}/^\circ\text{C})$$

Avec :

t : Température en (°C).

T : Température en (°K).

γ: Constante psychrométrique.

$$\gamma = 0.6605 - 0.826 \cdot 10^{-4}Z \quad (\text{Millibar}/^\circ\text{C})$$

Avec :

Z : Altitude de site (**m**).

E: Tension maximale de la vapeur d'eau dans l'air exprime par la relation suivante :

$$E = 6.107 \times 10^{(7.5 \frac{t}{238+t})} \quad (\text{Millibars}).$$

u : Vitesse moyenne journalière du vent mesurée à **2 mètres** au-dessus de la surface évaporante (**m/s**).

Conclusion:

La détermination de l'**ETP** composé de deux méthodes courantes ce sont : les méthodes directes (le bac, lysimètre... etc.) et indirectes (Turc, Thornthwaite et Penman...etc) ; Ces formules dépendent des informations climatiques du milieu étudié tels-que l'expérience de Blaney-criddle permet une estimation pour une région aride ou semi-aride, l'application de formule de turc possible dans une région tempérée....

La disponibilité en donnée météorologique conditionnera aussi le choix d'une formule qui est possible d'application pour la région d'étude comme « le vent, température, humidité.. ».

A grayscale photograph of a hand holding a pen, writing on a notepad. The pen is positioned at the bottom right, with a line of text being written. The notepad is open, and the page is white. The background is a soft, out-of-focus light gray.

*Chapitre III : Présentation du
site d'étude*

Introduction :

L'étude climatique est un pas de l'évaluation de l'ETP, tels que la disponibilité des données climatiques agissent sur le choix des formules.

Dans notre travail nous choisirons la station de Beni -Haroun qui situe dans la wilaya de Mila à l'aval de confluer de Oued Rhumel et de Oued Endja ; Il couvre une surface environ à **6,595 Km²**.

III.1. Situation géographique du site d'étude :

Le site d'étude est la station climatique du barrage de Beni-Haroun qui est situé dans le Nord-Est de l'Algérie sur l'oued Kebir Rhume là une quarantaine de km de son embouchure dans la mer méditerranée. La retenue crée par le barrage se trouve au Sud de ce dernier ; elle est située à environ **40km** au Nord-Ouest de la ville de Constantine et à **350km** à l'Est d'Alger..¹³

- ✓ Le barrage est située à l'extrémité amont de la gorge calcaro-marneuse de Beni-Haroun et à environ **4 km** du confluent de Oued Rhumel et de oued Endja.¹³

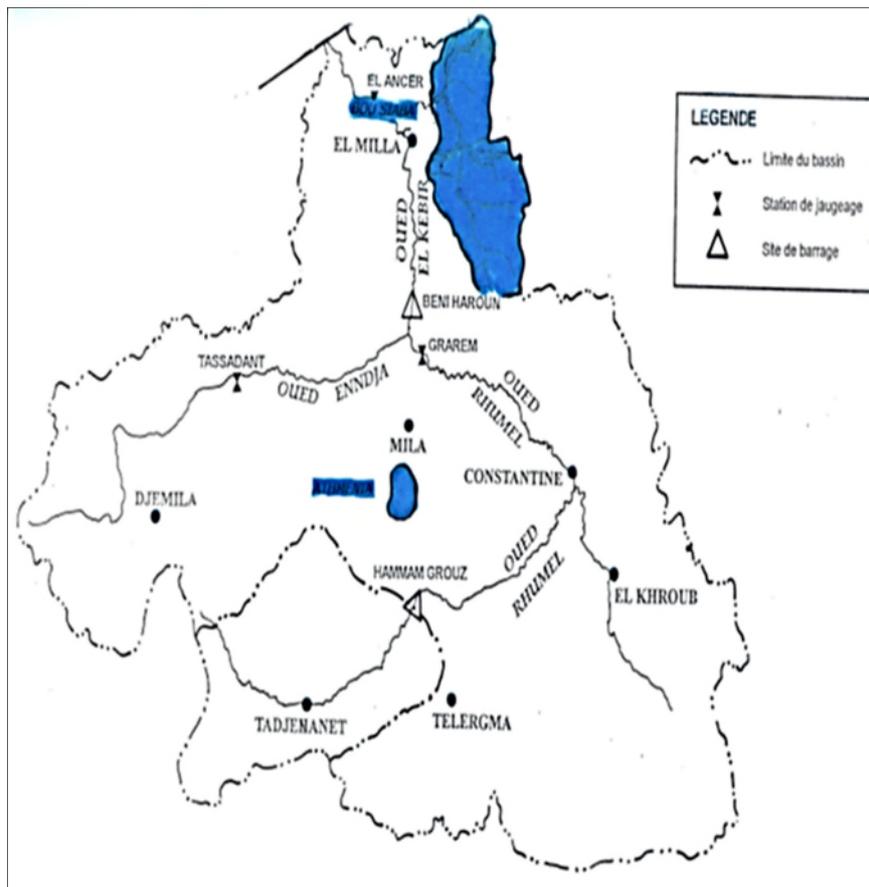


Figure III.1 : Situation géographique du site d'étude.

III.2 : Etude climatique de site d'étude :

Pour les calculs de l'ETP on utilise les données climatiques gérée par l'ANBT de Mila ces sont la température, la vitesse de vent, l'évaporation, et les précipitations.

➤ Station da Beni-Haroun dans la région de Mila :

Tableau.III.1 : caractéristiques des stations climatiques.

Stations	X (km)	Y (km)	Longitude(°)	Latitude(°)	Altitude(m)
Beni Haroun	820	369	6°6'19.17''	36°332'26.01''	310.00

ANBT(Beni Haroun)

III.2.1. Les précipitations :

Comme les données qui intervenant dans l'estimation de l'ETP on a les précipitations telles que tous les eaux météoriques qui tombent sur la terre en plusieurs types (liquide (pluie, bruine) , solide(neige, grêle...), la mesure des précipitations est l'une des mesures hydrologique les plus complexe à cause d'une forte variation spatiale selon le déplacement de la perturbation, le lieu de l'averse, la topographie, et les obstacles géographiques locaux gênent sa captation .

Pour l'enregistrement des pluviosités on trouve divers machines de mesure les plus classiques sont les pluviomètres est généralement relevé une fois par jour, et il reçoit les précipitations sur une longue période. La lecture se fait par mesure de la hauteur d'eau recueillie ou par pesée ; les pluviographes fournissent des diagrammes de hauteur de précipitations cumulées en fonction du temps, il est permet de déterminer avec les hauteurs de précipitation sa répartition dans le temps donc son intensité et aussi permet un enregistrement permanent.

La surface réceptrice des pluviomètres et pluviographes soit horizontale et située à **1.50m** au-dessus du sol ; cette hauteur permet de placer facilement l'appareil et évite les rejaillissements (selon les normes **ONM 1996**)

Au contraire de ces approches ponctuelles, il existe aussi des méthodes de mesures globales fondées sur les méthodes radar et la télédétection.

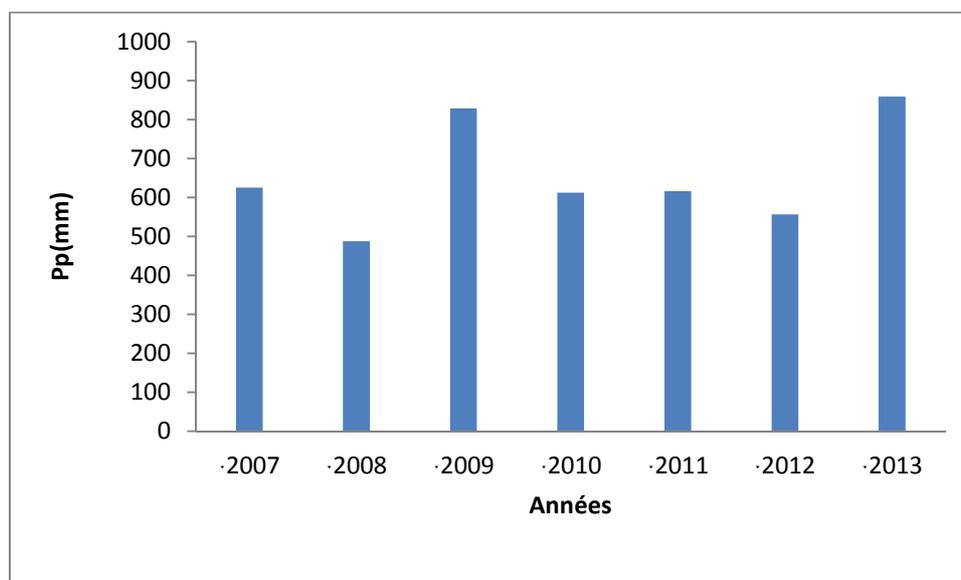
III.2.1.1.Précipitations annuelles :

La pluie annuelle recueillie à la station météorologique de Beni-Haroun (région de Mila) sur une période de **7ans** (de**2007**à**2013**) présente dans le tableau suivant :

Tableau (III.2) : Précipitation moyenne annuels de la station de Beni- Haroun (2007-2013)

Années	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Pp (mm)	625,44	487,44	828,72	612,36	616,32	555,96	858,96

ANBT(Beni Haroun)

**Figure .III.2 : Histogramme de la distribution annuelle des précipitations de la station de Beni Haroun (2007 ; 2013)****Interprétation :**

On observe que les précipitations moyennes annuelles dans la station de Beni-Haroun atteint ses grandes valeurs aux années **2009** et **2013** avec une valeur max égale à **858.96 mm**; la précipitation faible situe à l'année **2008** avec une valeur minimale égale à **487.44mm**.

III.2.1.2. Précipitation mensuelles :

Le tableau suivant donne une série de pluie mensuelle de la même station et la même période :

Tableau.III.3 : moyennes mensuelles des précipitations (en millimètres) de la station de Beni-Haroun (2007-2013).

Mois	Sép	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	total
P(mm)	50,04	54,94	97,94	78,09	66,23	103,9	83,6	60,54	37,43	13,23	2,46	6,61	655.01

ANBT(Beni Haroun)

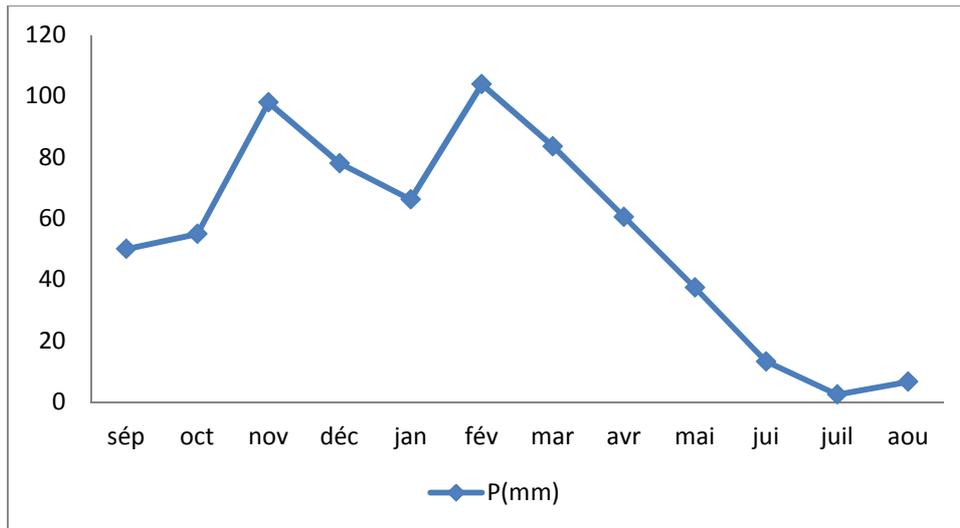


Figure.III.3 : Représentation graphique de la répartition mensuelle des précipitations de la station de Beni -Haroun (2007-2013)

Interprétation :

- Les précipitations élevées dans les mois de Novembre (**97.94mm**) et Février (**103.9mm**).
- Les précipitations les plus faibles se situent aux dans les mois de Juillet et Aout avec un minimum de **2.46mm**.

Donc les précipitations dans la station d'étude estivale entre une valeur minimale en Juillet (été) et une valeur maximale étaient en Février (fin de l'hiver).

III.2.2. La température :

La température est un paramètre très important dans la conversion de l'état de liquide à solide ou gaz, et la variation de la température agit directement sur le taux d'évaporation tels-que le taux d'évaporation augment pendant l'augmentation de la température et l'inverse ; ce paramètre influencé par latitude, l'altitude, le relief et le type de surface ou végétation...etc.

La mesure de la température est très facile par des instruments comme le thermomètre (les plus courants sont les thermomètres à mercure, à alcool et à toluène)

La température de l'aire suit un cycle quotidien appelé variation (ou cycle diurne) avec un minimum et maximum observable à la cour d'une journée ou année ou mois.

Tableau.III.4 : Température moyenne mensuelle en °C à la station de Beni-Haroun (2007-2013).

Mois	Sép	Oct	Nov	déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	MOY
Tm (°c)	21,4	16,5	10,35	7,58	7,11	6,18	8,61	11,7	14,94	20,29	24,89	25,23	14,57
TM (°c)	22,98	19,45	13,4	10,2	10,37	10,38	10,87	14,66	17,79	24,3	29,03	29,52	17,75
T (°c)	22,19	17,98	11,88	8,89	8,74	8,28	9,74	13,18	16,37	22,3	26,96	27,38	16,16

ANBT(Beni Haroun)

Tm : Moyenne mensuelle des températures minimales.

TM : Moyenne mensuelle des températures maximales.

T : température moyenne mensuelle. $T = (Tm + TM) / 2$

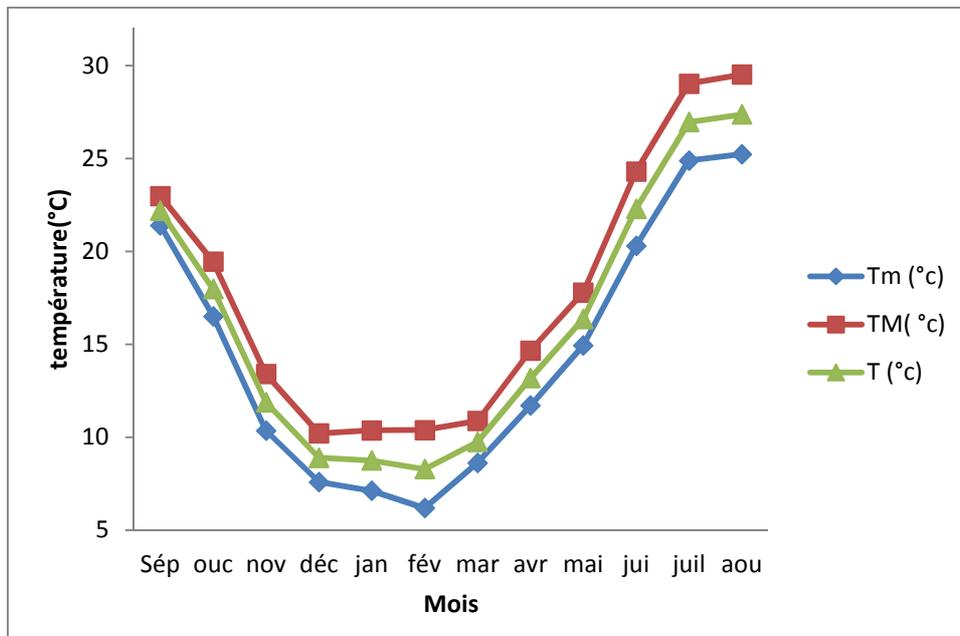


Figure III.4 : Représentation graphique des températures à la station de Beni -Haroun, période 2007-2013.

Interprétation :

Selon le diagramme on observe que la station de Beni-Haroun caractériser par deux saisons l'une froide s'étend de Novembre jusqu'à Avril avec une min de **8,28°C** en Février, et l'autre chaude s'étend de Mai jusqu'à Octobre avec un max de **27,38°C** en Aout.

La température moyenne de cette station est modérée elle est de l'ordre de **16,16°C**.

III.2.3. La vitesse de vent :

Le vent agit directement sur l'évaporation soit pour sa vitesse ou sa direction ou bien leur type (sec ou humide) où l'évaporation élevée dans le vent sec et diminue en cas du vent humide (**chapitre 01, I.7.2.C**). La mesure du vent s'effectue par deux types d'instruments ; certains évaluent la vitesse et l'autre la direction, pour évaluer la vitesse du vent on a les anémomètres sont installés à **10m** au-dessus du sol à un endroit dégagé de tous les obstacles (arbre, bâtiment...) ; pour déterminer la direction du vent on a une girouette ou une manche à air. La variation du vent est saisonnière montre une grande irrégularité d'un mois à l'autre.

Tableau.III.5 : la variation mensuelle de vitesse du vent pour la station Beni -Haroun (2007-2013).

Mois	Sép	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Moy
V (m/s)	6,10	4,31	2,87	3,20	3,75	4,94	4,59	3,25	4,21	7,75	8,37	7,38	5.06

ANBT (Beni Haroun)

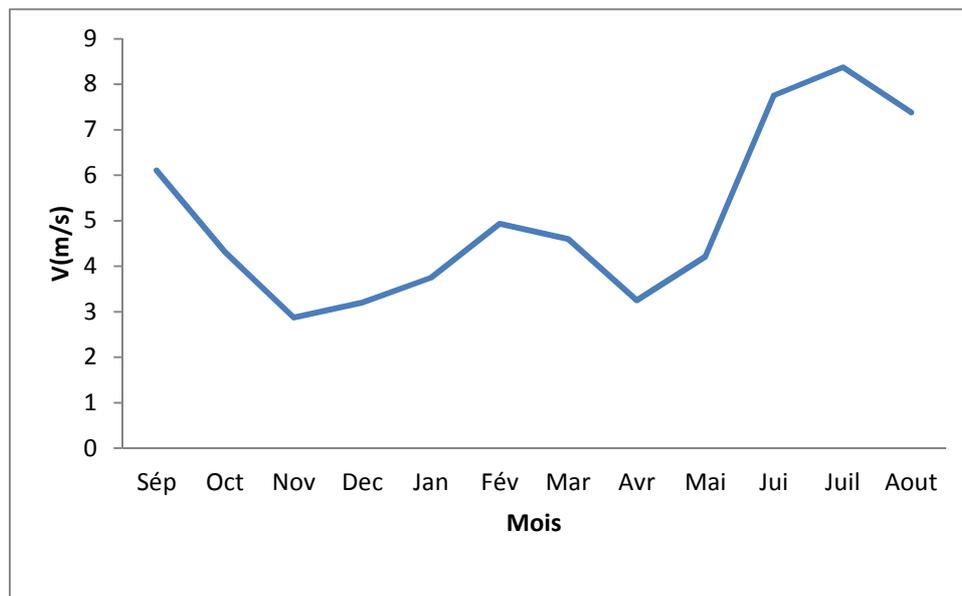


Figure III.5 : représentation graphique de la variation mensuelle de la vitesse de vent de la station de Beni -Haroun (2007 à 2013).

Interprétation :

La région de Beni-Haroun caractérisée par des vents saisonniers tels que les vents violents qui se produisent entre Juin et Septembre avec une vitesse max de l'ordre de **8.37m/s**, et des vents calmes (légèrement) pendant les mois allant de Octobre jusqu'à Mai avec une vitesse minimal de l'ordre de **2.87m/s**.

- ✓ La vitesse moyennes de vent durant cette période est de l'ordre de **5.06m/s**.

III.2.4.L'évaporation :

L'évaporation est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant. La variation mensuelle de l'évaporation de la station de Beni -Haroun est donnée par le tableau suivant :

Tableau.III.6 : la variation mensuelle de l'évaporation en (mm) de station de Beni Haroun (2007-2013)

Mois	SEP	AUC	NOV	DES	JAN	FUV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	SOMM
E(mm)	148	92,00	47,80	30,27	31,77	41,16	65,23	85,40	134,00	208,68	261,12	246,16	1391,6

ANBT (Beni Haroun)

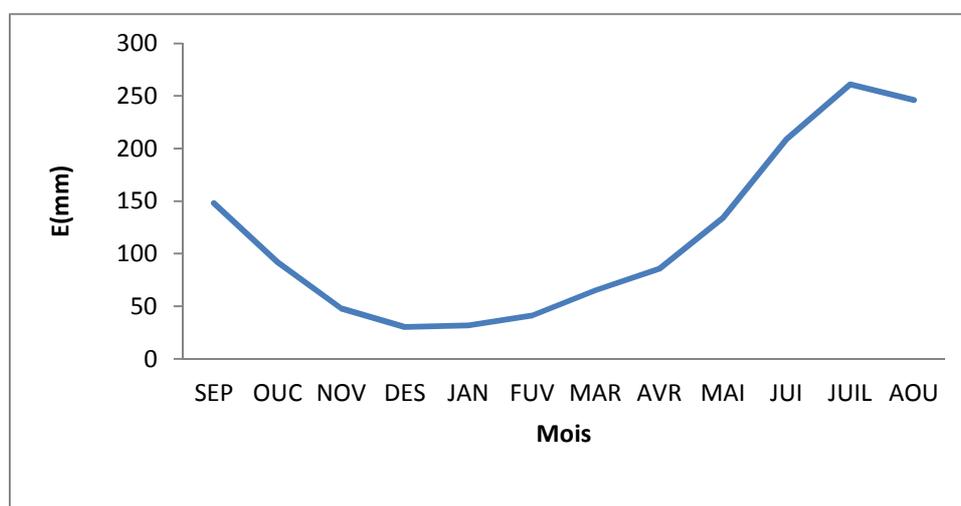


Figure III.6 : Représentation graphique de la variation mensuelle de l'évaporation dans la station de Beni -Haroun (2007à2013).

Interprétation:

Le taux d'évaporation le plus élevée se situé à la saison d'été avec un max de **261.12mm** au mois de Juillet, et diminue dans la saison de l'hiver avec un minimum de **30.27mm** au mois de Décembre.

Le taux d'évaporation est plus faible entre les mois de Novembre et Avril avec un minimum de **30.27mm** en Décembre, et il augmente entre Mai et Août avec un max de **261.12mm** au mois de Juillet.

III.2.5. Humidité relative :

Comme les facteurs précédemment cités, on a l'humidité relative qui est modifiée sensiblement le phénomène d'évaporation, l'estimation de ce facteur est simple par le psychromètre (cet appareil est le plus précis pour la mesure de l'humidité).

Elle exprime aussi par la relation suivante : $H_r = \frac{e_a}{e_w} \times 100$

e_a : Pression de vapeur d'eau effective ou actuelle.

$$E = C(e_w - e_a) \rightarrow e_a = e_w - \frac{E}{C}$$

Avec :

E : L'évaporation journalier en (mm) où $C=3.66$

Où E : L'évaporation mensuelle en (mm) où $C=110$

e_w : Pression de vapeur d'eau à saturation. $e_w = 0,6118 e^{17,27 \cdot T / (237,3 + T)}$

T : température minimum de l'air (°C)

À partir de ces formules on peut trouver la variation mensuelle de l'humidité relative pour la station de Beni-Haroun, les résultats récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau.III.7 : La variation mensuelle de l'humidité relative moyenne en (%) de la station de Beni Haroun (2007-2013).

Mois	SEP	OUC	NOV	DES	JAN	FUV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	MOY
Hr	47,23	55,46	65,44	73,61	71,40	60,49	46,98	43,56	28,31	20,34	24,59	30,34	47,31

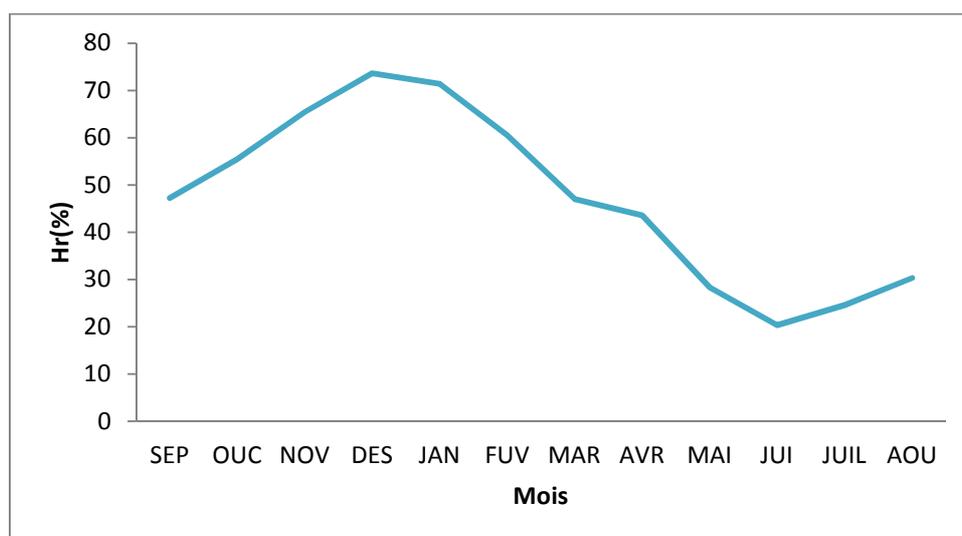


Figure III.7 : Représentation graphique de la variation de Hr% dans la station de Beni - Haroun (2007,2013).

Interprétation :

L'humidité relative dans notre station varie entre une valeur minimale en Juin (été) égale à **20.34%**, et une valeur maximale en Décembre (hiver) égale à **73.61%**.

✓ L'humidité moyenne durant cette période est de l'ordre de **47.31%**.

III.3. Les indices climatiques :**III.3.1 Indice de Martonne ou d'aridité :**

Pour avoir une idée sur le climat dominant la zone d'étude, quelques indices et diagramme ont été introduits.

En **1923**, un indice d'aridité noté « **I** » a été défini par le géographe de Martonne, en se basant sur les données pluviométriques et celles des températures durant la même période :

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

Avec :

P : la précipitation moyenne annuelle en **mm**.

T : la température moyenne annuelle en **°C**.

Pour :

- $20 < I < 30$: Climat tempéré
- $10 < I < 20$: Climat semi-aride
- $7.5 < I < 10$: Climat steppique
- $5 < I < 7.5$: Climat désertique
- $I < 5$: Climat hyperaride.

+ Pour la station de Beni Haroun:

$P = 655.01 \text{ mm}$, $T = 16.16 \text{ }^\circ\text{C}$

$$I = \frac{655.01}{16.16+10} = 25.04$$

L'indice d'aridité est entre **20** et **30** d'où cette intervalle est déterminé le climat des zone tempéré.

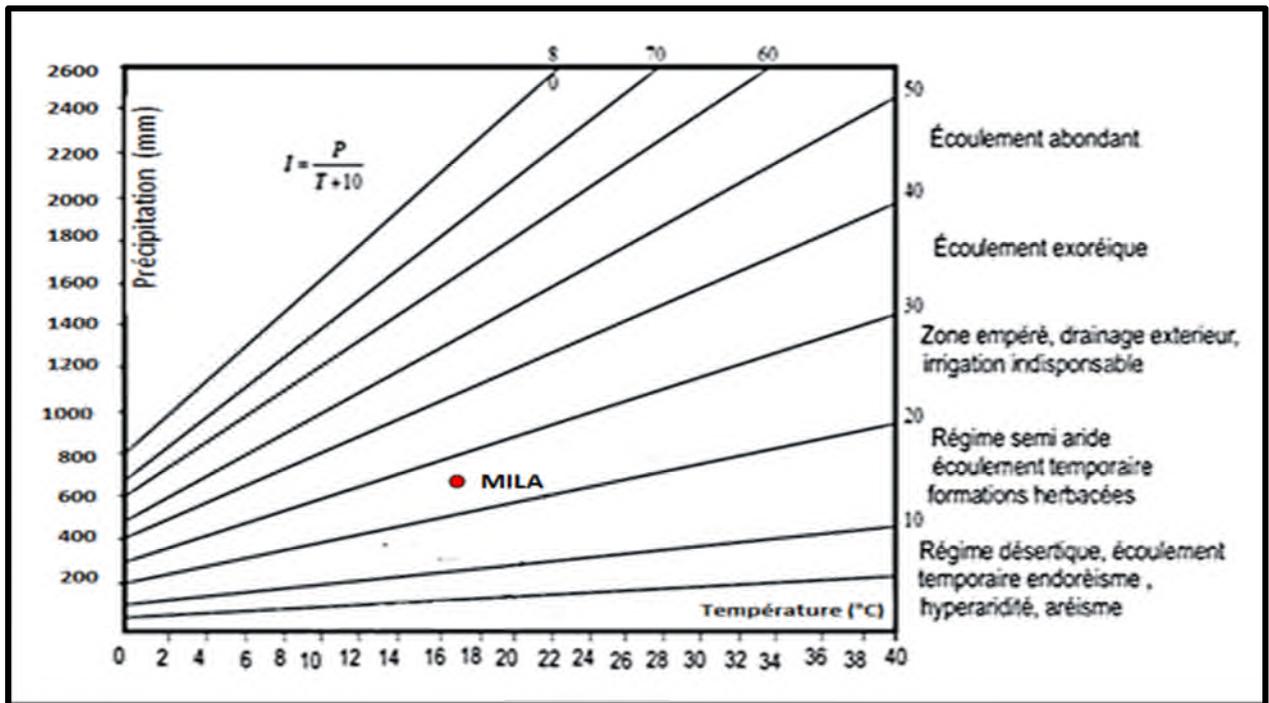


Figure III.8 : Abaque de De Martonne

III.3.2 Climagrammepluvio-thermique de L. Emberger :

La classification la plus souvent utilisée a été élaborée par L. Emberger en utilisant un diagramme bidimensionnel dans le quel la valeur d'un « quotient pluviométrique » d'une localité déterminée est en ordonnée et la moyenne du mois le plus froid de l'année en abscisse. Q_2 est calculé par la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{2000 \times P}{M^2 - m^2}$$

D'où :

Q_2 : le quotient pluviométrique de L. Emberger.

P : la précipitation moyenne interannuelle en mm.

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

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

✚ Pour la station de Beni Haroun :

$$P = 655.01 \text{ mm}$$

$$M = 29.52 + 273.15 = 302.67 K^\circ.$$

$$m = 6.18 + 273.15 = 279.33 K^\circ.$$

$$Q2 = \frac{2000 \times 655.01}{302.67^2 + 279.33^2} = 96.44$$

La température moyenne des minima de la saison froide est de **6.95 °C**. Après report des coordonnées (**6.95, 96.44**). Le point obtenu caractérise bien un climat subhumide à hiver tempéré.

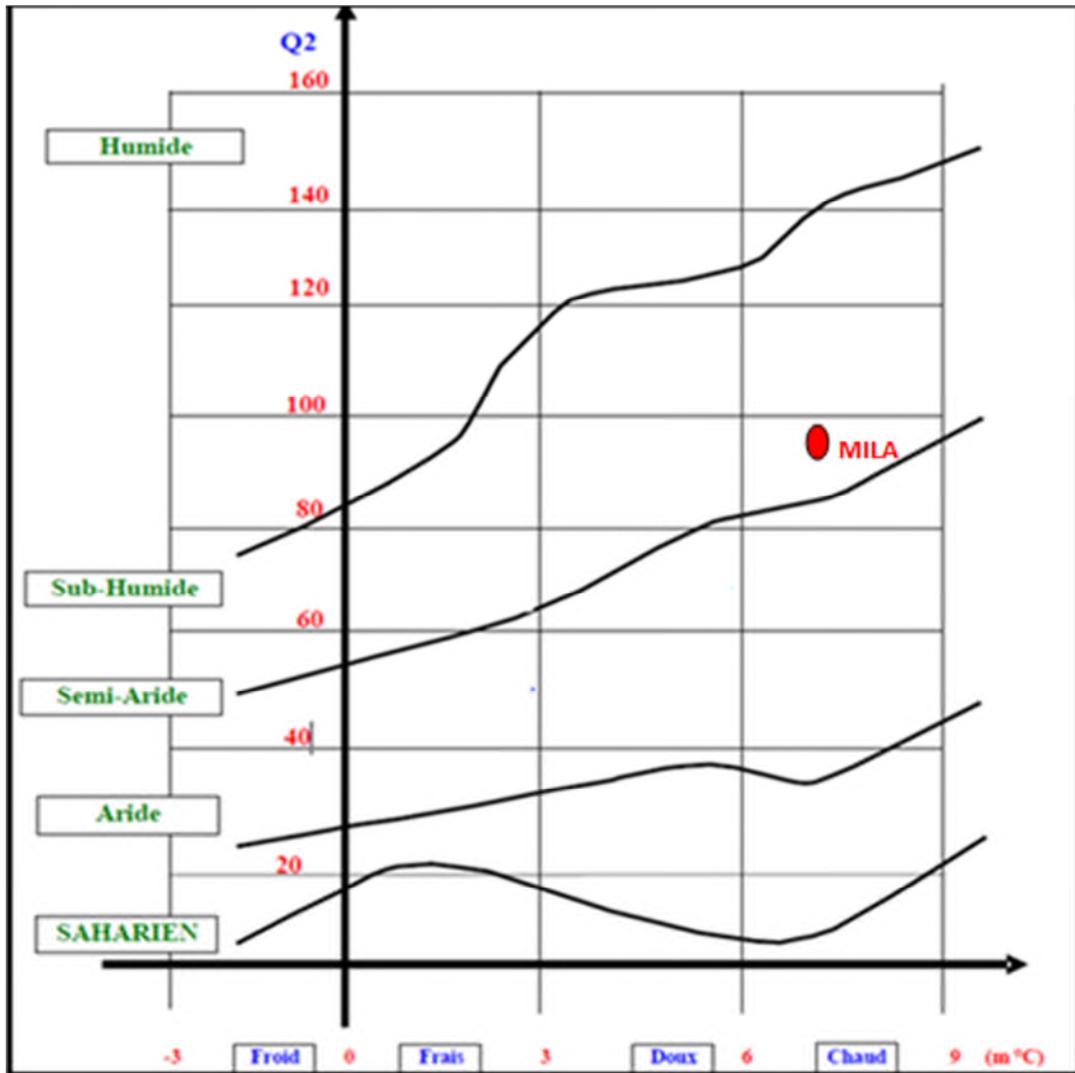


Figure III.9 : Climagramme de L. Emberger.

III.3.3. Indice de Paul Moral :

Les résultats précédents sont confirmés par l'indice pluviométrique de Moral (I_M), qui utilise aussi la hauteur annuelle des précipitations (en **mm**) et les températures moyennes annuelles en (**°C**). Cet indice permet de dire :

Si $I_M < 1$ on a climat sec et si $I_M > 1$ on a climat humide.

$$I_M = \frac{P}{T^2 - 10 \times T + 200}$$

Pour

$P = 655.01 \text{ mm}$

$T = 16.16 \text{ °C}$

Ce qui donne $I_M = 2.18 > 1$

On peut dire que le climat de **Beni -Haroun** est **humide**.

✚ **La station de Beni -Haroun est caractérisée par :**

- ❖ Des périodes humides occupent l'année complète d'après le diagramme **de Paul Moral**.
- ❖ Un climat subhumide défini bien par l'indice de Martonne, ainsi que par le climagramme de L. Emberger.

Conclusion :

Les variations climatiques liées directement à la situation géographique de la zone, à partir de l'analyse climatique de la région d'étude et sa position géographique on trouve que notre région située dans un climat tempéré, sub-humide.

La région est caractérisée par des précipitations moyenne annuelle de **655.01 mm/an** et des températures moyenne annuelle de **16.16°C**.

A grayscale photograph of a hand holding a pen, writing on a notepad. The pen is positioned at the bottom right of the frame, with a line of text being written. The notepad is open, and the page is visible. The background is a plain, light color.

*Chapitre IV: Estimation de
l'évapotranspiration*

Introduction :

Il ya plusieurs formules établie par les chercheurs pour le calcul de l'**ETP** à partir des variations climatique : température, humidité relative, insolation, et la vitesse du vent...etc.

Pour notre étude on utilise les formules de Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman modifie par **F.A.O**, et la formule dite **ANRH** (ces méthodes présentées dans le **2^{ème} chapitre**).

Les données climatiques sont celles de la station de Beni-Haroun sur une période de sept ans (**2007-2013**). Dans notre région les mesures de l'évaporation disponibles c'est celle du "Bac d'évaporation classe A", les mesures qui sont obtenue par ce bac sont présentées dans la partie I de **3^{ème} chapitre**.

IV.1 : Résultats de déférentes méthodes :**IV.1.1 Formule de TURC :**

Turc propose deux formule l'une pour **Hr < 50%** et l'autre pour **Hr > 50%**, donc nous avons calculé l'**ETP** par l'une des formule suivantes :

$$ETP = 0,40(Ig + 50) \frac{t}{t+15} \quad \text{Où } Hr > 50\%$$

$$ETP = 0,40(Ig + 50) \frac{t}{t+15} \times \left(1 + \frac{50-Hr}{70}\right) \quad \text{Où } Hr < 50\%$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (**mm**)

Ig : radiation solaire globale du considérée en **calorie/cm²/jour**

T : température moyenne mensuelle du mois considérée (**°C**)

Tableau. IV.1 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Turc à la station de Beni-Haroun (2007-2013)

Mois	Iga	H	H	h/H	t/(t+15)	Ig	Hr(%)	ETP	C	ETP _c
JAN	416,82	5,10	9,98	0,51	0,37	207,09	71,4	37,86	1,000	37,86
FEV	542,31	6,10	10,81	0,56	0,36	287,35	60,49	47,99	1,000	47,99
MAR	706,38	6,50	11,97	0,54	0,39	364,97	46,98	65,35	1,043	68,17
AVR	850,24	7,08	13,13	0,54	0,47	437,29	43,56	91,16	1,092	99,55
MAI	946,20	9,70	14,14	0,69	0,52	572,75	28,31	129,99	1,310	170,27
JUI	980,23	10,05	14,63	0,69	0,60	593,93	20,34	153,99	1,424	219,24
JUIL	956,90	11,68	14,38	0,81	0,64	654,13	24,59	180,96	1,363	246,66
AOU	870,10	10,65	13,53	0,79	0,65	581,25	30,34	163,13	1,281	208,95
SEP	738,61	8,05	12,42	0,65	0,60	429,76	47,23	114,50	1,040	119,03
OCT	580,75	6,72	11,26	0,60	0,55	319,42	55,46	80,56	1,000	80,56
NOV	440,61	5,90	10,25	0,58	0,44	236,55	65,44	50,66	1,000	50,66
DEC	376,55	5,10	9,70	0,53	0,37	190,53	73,61	35,80	1,000	35,80
Somme (mm)										1384,74

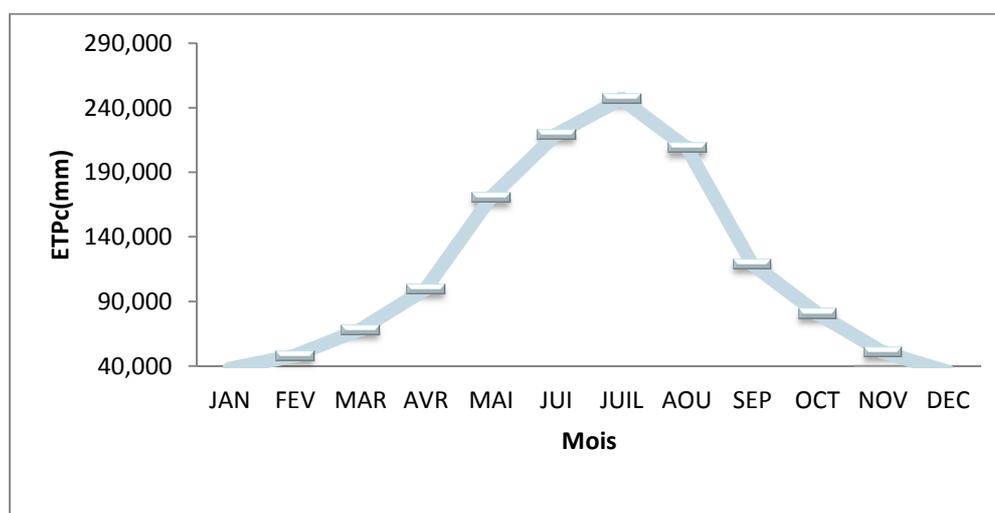


Figure. IV.1 : Présentation graphique de l'ETP (Turc) de station de Beni-Haroun, séries (2007-2013)

Interprétation :

La formule de Turc donne une variation saisonnière très marquée, où dans la saison de l'hiver l'ETP reste pratiquement constante avec une valeur faible (**35-50**) de Novembre jusqu'à Février, et élevée dans l'été au mois de Juillet avec une valeur environ à **180,96mm**.

IV.1.2. Formule de Thornthwaite :

Cette formule donne à la forme suivante : $ETP = 16 \left(10 \frac{t}{I}\right)^a$

Avec :

I : indice thermique annuel ($I = \sum_{i=1}^{i=12} \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$)

a : varie en fonction de l'indice thermique ($a = \frac{1,6}{100} I + 0,5$)

Le tableau ci-après présente les valeurs de l'**ETP** d'après l'application de formule de Thornthwaite :

Tableau. IV.2 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Beni-Haroun (2007-2013)

Mois	T (°c)	I	a	ETP(mm)
JAN	8,74	2,33	1,71	20,45
FEV	8,28	2,15	1,71	18,64
MAR	9,74	2,74	1,71	24,62
AVR	13,18	4,34	1,71	41,31
MAI	16,37	6,02	1,71	59,86
JUI	22,3	9,62	1,71	101,62
JUIL	26,96	12,82	1,71	140,61
AOU	27,38	13,12	1,71	144,39
SEP	22,19	9,55	1,71	100,76
OCT	17,98	6,94	1,71	70,29
NOV	11,88	3,71	1,71	34,58
DEC	8,89	2,39	1,71	21,05
Somme		I=75,73	Somme (mm)	ETP=778,19

I=75.73

ETP=778.19mm

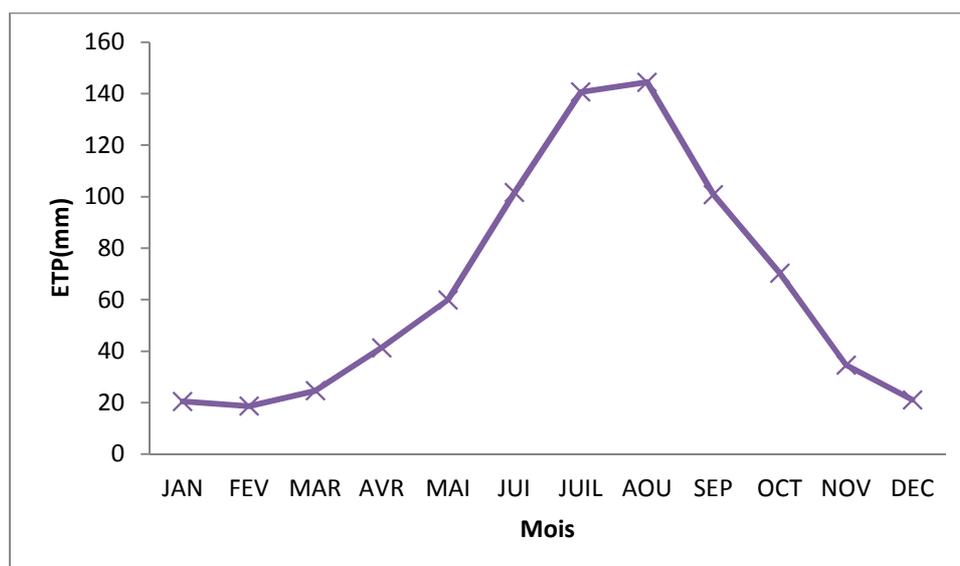


Figure IV.2 : Présentation graphique de l'ETP(Thorntwaite) de station de Beni-Haroun, séries (2007-2013)

Interprétation :

Dans cette station la formule de Thornthwaite donne une variation mensuelle interannuelle faible telle-que la valeur max marqué dans l'été dans les mois les chauds (Aout et Juillet) avec un max de 144 .39mm la valeur min marqué dans l'hiver en les mois de Décembre jusqu'à Février avec un minimum de 18.64mm

IV.1.3. Formule de BLANNEY-CRIDLE :

La formule qui permet d'estimer l'ETP mensuelle est la suivante (voir méthodes d'estimation indirectes à la chapitre II)

$$ETP = aF + b$$

Avec :

ETPcult: Evapotranspiration potentielle de culture (mm).

P : Durée d'éclairement en %

t : Température moyenne mensuelle (C°).

F: Force évaporante.

a et **b**: Coefficients de correction (**tableau n°01**)

H : Durée astronomique du jour (heures) s'obtient par des tables.

h: Durée moyenne d'insolation (heures).

V: Vitesse moyenne de vent (m/s).

Hr: Humidité relative (%)

Pour le calcul de l'ETP culture, nous avons adopté les valeurs des coefficients proposés par j.Doorenbos et W.O.Pruitt pour des cultures en plein champ, qui ont les valeurs suivantes:

Saison humide: **Kc=0.70**.

Saison sèche: **Kc=1.10**.

Car la détermination des valeurs de **Kc** exige un grand nombre de mesures expérimentales sur terrain.

Tableau. IV.3 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Blanney-Cridle à la station de Beni-Haroun (2007-2013)

mois	T °c	Hr	P	a	B	F	ETPclu=aF+b	Kc	ETP cul(mm)
JAN	8,74	71,40	5,51	0,96	-1,66	66,95	62,61	0,70	43,83
FEV	8,28	60,49	6,59	0,96	-1,66	78,68	73,87	0,70	51,71
MAR	9,74	46,98	7,02	1,23	-1,75	88,53	107,14	0,70	74,995
AVR	13,18	43,56	7,64	1,23	-1,75	108,43	131,62	0,70	92,14
MAI	16,37	28,31	10,47	1,23	-1,75	163,96	199,92	0,70	139,95
JUI	22,3	20,34	10,85	1,36	-1,82	199,51	269,51	1,10	296,47
JUIL	26,96	24,59	12,61	1,36	-1,82	258,90	350,29	1,10	385,32
AOU	27,38	30,34	11,5	1,36	-1,82	238,34	322,32	1,10	354,55
SEP	22,19	47,23	8,69	1,36	-1,82	159,35	214,90	0,70	150,43
OCT	17,98	55,46	7,25	0,96	-1,66	118,91	112,49	0,70	78,74
NOV	11,88	65,44	6,37	0,96	-1,66	86,60	81,48	0,70	57,03
DEC	8,89	73,61	5,51	0,96	-1,66	67,33	62,98	0,70	44,08
Somme (mm)							1989,12	Somme	1769,23

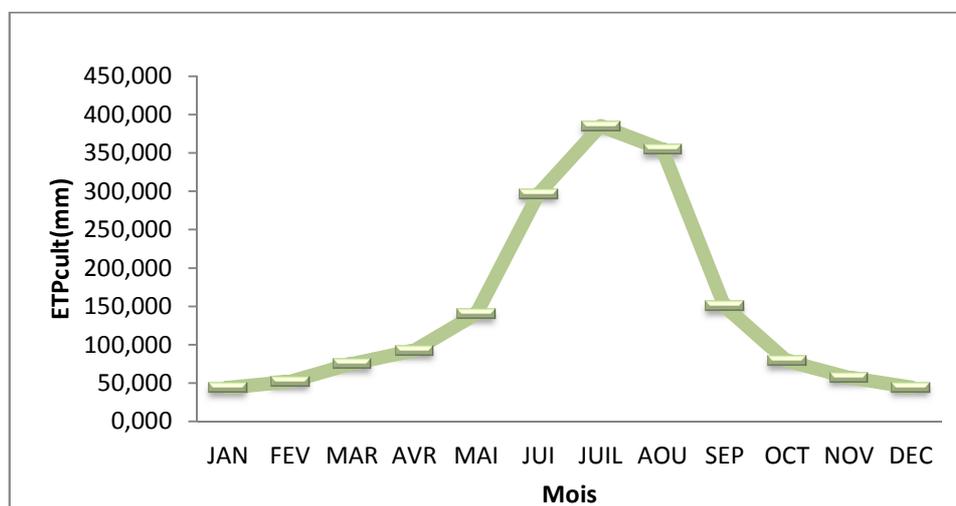


Figure IV.3 : Présentation graphique de l'ETP (Blanney-Cridle) de station de Beni-Haroun, séries (2007-2013)

Interprétation :

Cette méthode montre des résultats assez bien variés selon la saison, où on remarque un minimum de **43.83mm** au mois le plus froid dans cette station Janvier, le taux de l'ETP augmente dans l'été au mois le plus ensoleillé dans notre station (Juillet) avec un pic correspondant à **385.32mm**.

II.1.4. Formule de Blaney-Criddle "Soils Conservation Service" (USDA, 1962) :

La formule qui permet d'estimer l'ETP mensuelle est la suivante (voir méthodes d'estimation indirectes à la chapitre II)

$$ET0 = (0.48 \times T + 8.13) \times P \times Kt$$

Avec :

Eto : Evapotranspiration en **mm/mois** ou par décade ;

Kt : Facteur dépendant de température qui vaut : $Kt = ((0.031 \times T) + 0.24)$.

Tableau.IV.4 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Blaney-Criddle (USDA) à la station de Beni-Haroun (2007-2013)

mois	T °c	Kt	P	ETP(mm)
JAN	8,74	0,51	5,51	34,70
FEV	8,28	0,50	6,59	39,62
MAR	9,74	0,54	7,02	48,72
AVR	13,18	0,65	7,64	71,63
MAI	16,37	0,75	10,47	125,12
JUI	22,3	0,93	10,85	190,31
JUIL	26,96	1,08	12,61	285,83
AOU	27,38	1,09	11,5	266,35
SEP	22,19	0,93	8,69	151,44
OCT	17,98	0,80	7,25	96,89
NOV	11,88	0,61	6,37	53,60
DEC	8,89	0,52	5,51	35,22
Somme (mm)				1399,43

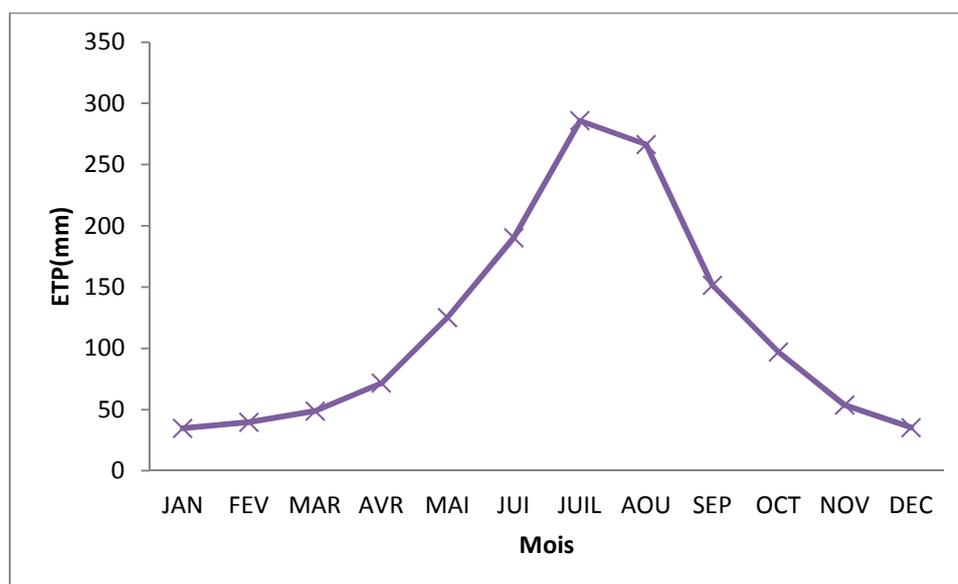


Figure IV.4 : Présentation graphique de l'ETP (B-C USDA) de station de Beni-Haroun, séries (2007-2013)

Interprétation :

L'application de cette formule présente des résultats varie selon la saison, où l'ETP élevé toujours dans l'été au mois le plus chaud dans la station de Beni-Haroun (Juillet) de l'ordre de **285.83mm**, et diminue en l'hiver (Janvier) avec une valeur de l'ordre de **34.70mm**.

IV.1.5 Formule de PENMAN FAO :

La formule qui permet d'estimer l'ETP mensuelle est la suivante (voir méthodes d'estimation indirectes à la chapitre II)

$$ETP = \left[\frac{I_{ga}}{59} (1 - a) \left(0.25 + 0.45 \frac{h}{H} \right) - \frac{\sigma}{59} T^4 (0.56 - 0.08\sqrt{e}) \left(0.10 + 0.90 \frac{h}{H} \right) \right] \times \frac{\frac{\Delta}{\gamma} + \frac{0.26}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} (E - e)(1 + 0.864 u)}$$

L'application de cette formule aux différentes stations a permis d'obtenir les résultats qui ont été consignés dans le **tableau(IV.5)** et reportée dans la **figure(IV.5)**

Tableau. IV.5 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Panman FAO à la station de Beni-Haroun (2007-2013)

Mois	T °c	T °Kelven	Hr	Iga	h	H	e	D	u	E	ETPj	ETP mois
JAN	8,74	281,89	71,4	416,82	5,1	9,98	8,03	0,76	1,81	11,26	1,17	36,25
FEV	8,28	281,43	60,49	542,31	6,1	10,81	8,07	0,74	2,38	10,91	1,67	46,79
MAR	9,74	282,89	46,98	706,38	6,5	11,97	5,65	0,81	2,21	12,04	3,23	99,71
AVR	13,18	286,33	43,56	850,24	7,08	13,13	6,58	0,98	1,57	15,11	3,80	113,99
MAI	16,37	289,52	28,31	946,2	9,7	14,14	5,25	1,18	2,03	18,56	5,52	171,03
JUI	22,3	295,45	20,34	980,23	10,05	14,63	5,45	1,63	3,74	26,81	8,96	268,85
JUIL	26,96	300,11	24,59	956,9	11,68	14,38	8,69	2,08	4,03	35,40	10,01	310,31
AOU	27,38	300,53	30,34	870,1	10,65	13,53	10,99	2,13	3,55	36,28	8,61	267,05
SEP	22,19	295,34	47,23	738,61	8,05	12,42	7,66	1,62	2,94	26,64	5,46	163,91
OCT	17,98	291,13	55,46	580,75	6,72	11,26	11,38	1,29	2,08	20,54	3,14	97,48
NOV	11,88	285,03	65,44	440,61	5,9	10,25	9,07	0,91	1,38	13,88	1,38	41,39
DEC	8,89	282,04	73,61	376,55	5,1	9,7	8,36	0,77	1,54	11,37	0,88	27,25
Somme (mm)												1656,6

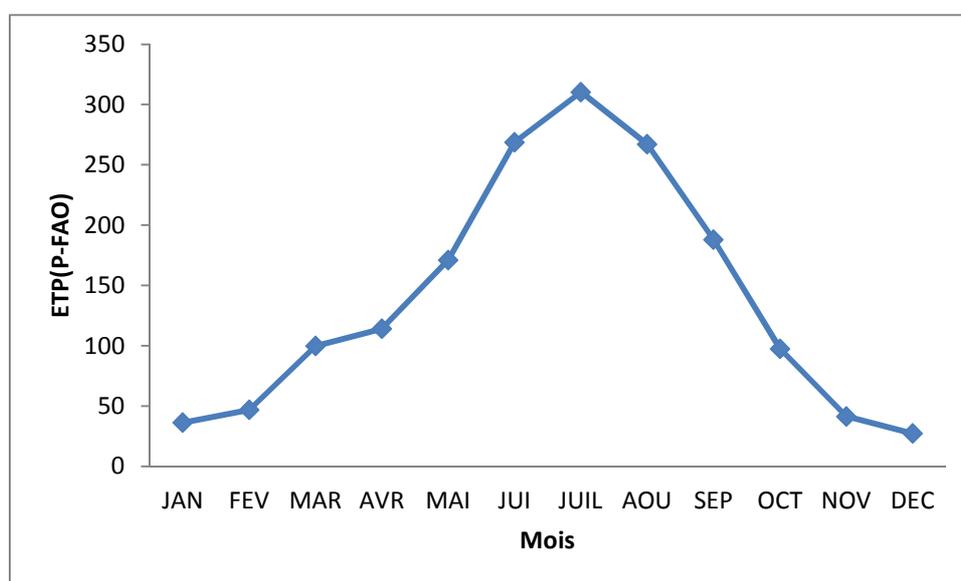


Figure IV.5 : Présentation graphique de l'ETP (Penman) de station de Beni-Haroun, séries (2007-2013)

Interprétation :

Cette formule est plus complexe comporte plusieurs variable climatique. Comme les autres méthodes cette méthode donne une variation saisonnière plus marquée. Dans l'été le taux de l'**ETP** plus augmente avec un max en Juillet (**310.31mm**), et plus faible dans l'hiver surtout aux des mois des Janvier, décembre et Novembre avec un minimum de **27.25mm** où la température est plus faible.

IV.1.6. Formule d'ANRH :

La formule qui permet d'estimer l'**ETP** mensuelle est la suivante (voir méthodes d'estimation indirectes à la chapitre II)

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

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm).

t : Température moyenne mensuelle (C°).

H : Durée théorique mensuelle d'insolation (**heures/mois**) et elle exprime en fonction de **Y**

Km : Coefficient mensuel dont ses valeurs sont données à la **figure (II.7)**.

Kr : Coefficient régional

L'application de cette formule aux différentes stations a permis d'obtenir les résultats qui ont été consignés dans le tableau(IV.6) et reportés dans la figure(IV.6)

Tableau.IV.6 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon ANRH à la station de Beni-Haroun (2007-2013)

Mois	T °C	Km	Kr	ai	bi	H	ETP(mm)
JAN	8,74	0,96	0,91	-0,0218	315	306,96	37,38
FEV	8,28	1,22	0,91	-0,11	307	266,41	30,15
MAR	9,74	1,11	0,91	-0,0012	371	370,56	72,07
AVR	13,18	1,17	0,91	0,0098	389	392,62	109,19
MAI	16,37	1,02	0,91	0,0201	429	436,42	139,10
JUI	22,30	1,00	0,91	0,0248	429	438,15	180,69
JUIL	26,96	0,97	0,91	0,023	436	444,49	213,58
AOU	27,38	0,97	0,91	0,0144	414	419,3136	195,46
SEP	22,19	0,98	0,91	0,0031	370	371,1439	129,25
OCT	17,98	0,9	0,91	-0,0081	351	348,0111	86,03
NOV	11,88	0,9	0,91	-0,0185	311	304,1735	43,87
DEC	8,89	0,9	0,91	-0,0246	308	298,9226	33,13
Somme (mm)							ETPt=1269,9

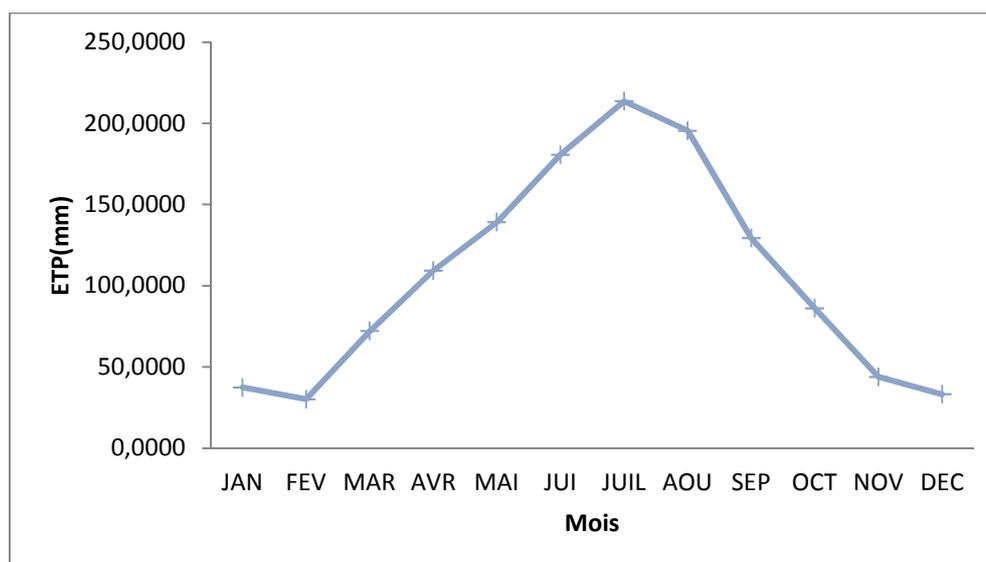


Figure IV.6 : Présentation graphique de l'ETP(ANRH) de station de Beni-Haroun, séries (2007-2013)

Interprétation :

L'application de cette formule dans notre station montre un résultat bien varié entre une valeur minimum au mois de Février (**30.15mm**) et une valeur maximale au mois de Juillet (**213.58mm**).

IV.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des valeurs mesurées de l'évaporation par bac d'évaporation classe A :

La mesure de l'évaporation potentielle s'effectue en divisant la mesure directe lue sur le bac de l'évaporation (E_{bac}) par un coefficient local dépendant des différents facteurs du climat et du bac. Le coefficient K est fonction du bac, l'humidité relative, et d'autres paramètres fonction du lieu.¹⁴

$$ETP_{bac} = \frac{E_{bac}}{K_{bac}}$$

- **ETP_{bac}** : évapotranspiration potentiel de bac (**mm**) ;
- **K_{bac}** le coefficient du bac. (**Bac=0.78**) ;
- **E_{bac}** la mesure d'évaporation dans le bac (en **mm**).



Figure. IV.7 : Bac d'évaporation Colorado classe A (ANBT-Beni-Haroun)

Tableau. IV.7 : Valeurs de l'ETP mensuelle selon Bac d'évaporation à la station de Beni -Haroun (2007-2013)

MOIS	E (mm)	Kbac	E bac (mm)
JAN	31,77	0,78	40,73
FIV	41,16	0,78	52,77
MAR	65,23	0,78	83,63
AVR	85,4	0,78	109,49
MAI	134	0,78	171,79
JUI	208,68	0,78	267,54
JUIL	261,12	0,78	334,77
AOU	246,16	0,78	315,59
SEP	148	0,78	189,74
OCT	92	0,78	117,95
NOV	47,8	0,78	61,28
DEC	30,27	0,78	38,81

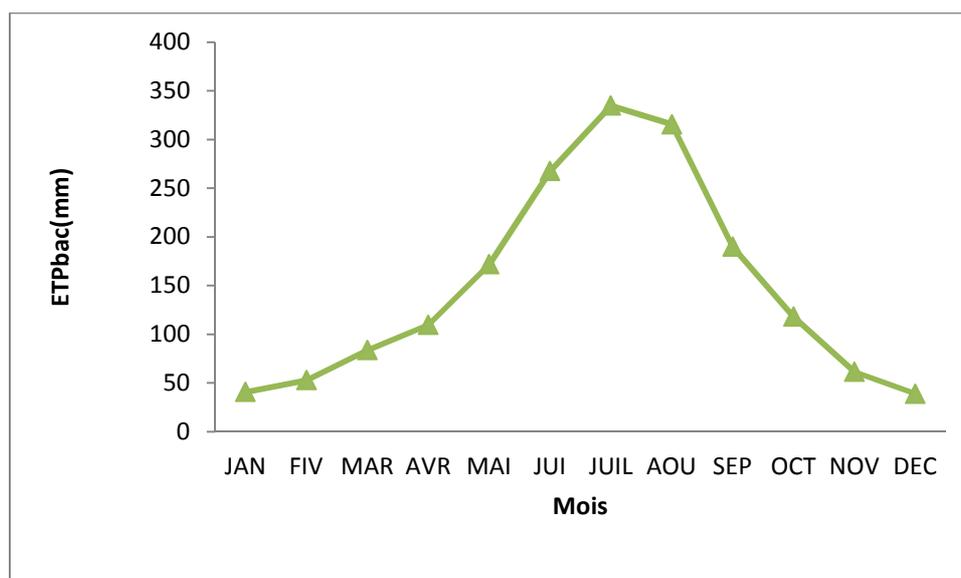


Figure IV.8 : Présentation graphique de l'ETP (Bac d'évaporation) de station de Beni- Haroun, séries (2007-2013)

Interprétation :

Comme toutes les méthodes empiriques, l'ETP peut estimer pratiquement par le bac d'évaporation colorado classe A (utiliser dans notre station) cette bac donne une variation saisonnière plus remarquée où le taux de l'ETP élevé toujours avec l'augmentation de la température dans l'été aux mois les plus chauds dans cette station avec un pic correspond à **334.77mm**, et diminue en l'hiver avec un minimum de **38.81mm** en Décembre.

IV.3. Analyse et comparaison des résultats de l'ETP de différentes méthodes par l'ETP du Bac d'évaporation :

Les résultats obtenus par l'application des différentes approches d'estimation de l'ETP, à l'échelle mensuelle ont été comparés à l'ETP (Bac Colorado),

Les résultats de l'évapotranspiration potentielle mensuelle calculés selon les formules de: Turc, Thornthwaite, Blanney-Cridle(USDA), Blanney-Cridle, Penman FAO et ANRH et par le mesure du Bac d'évaporation sont récapitulées dans la figure (IV.9) et le tableau (IV.8).

Tableau IV.8 : valeurs des variations annuelles de l'ETP selon les différents formules à la station de Beni-Haroun (2007-2013)

Méthod	ANRH	B-C(USDA)	B-C culture	B-Cr climat	Tw	Tu	P-FAO	Bac
ETP(mm)	1269,90	1399,43	1769,23	1989,12	778,19	1384,74	1656,60	1784,09

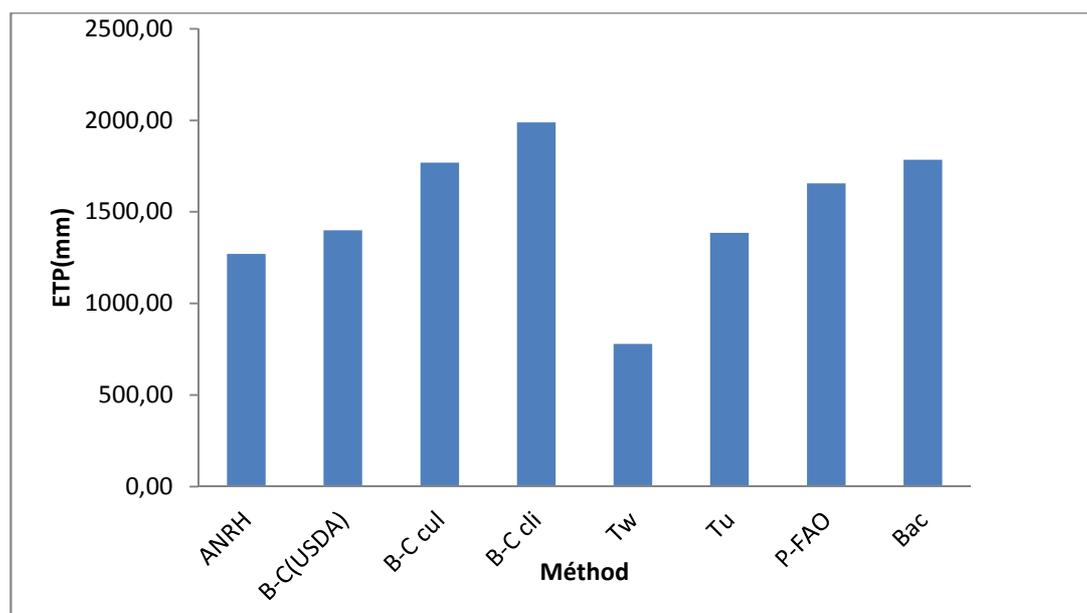


Figure IV.9 : Evapotranspiration annuelle (mm/an) obtenues par les différentes méthodes dans la région de Beni-Haroun

Avec:

Tu: formule de Turc.

Tw: formule de Thornthwaite.

B-C cul: formule de Blanney-Cidle culture.

B-Ccli : formule de Blanney-Cidleclimat

P. FAO : formule de Penman modifié par **FAO**.

B-C(USDA) : formule de Blaney-Cridle "Soils Conservation Service" (**USDA, 1962**)

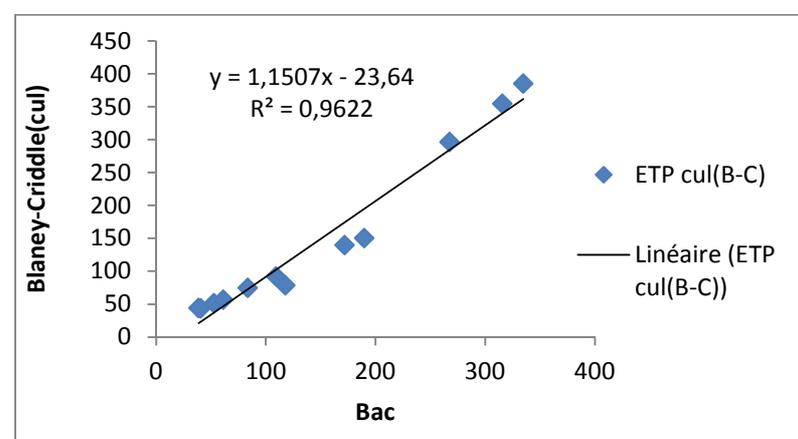
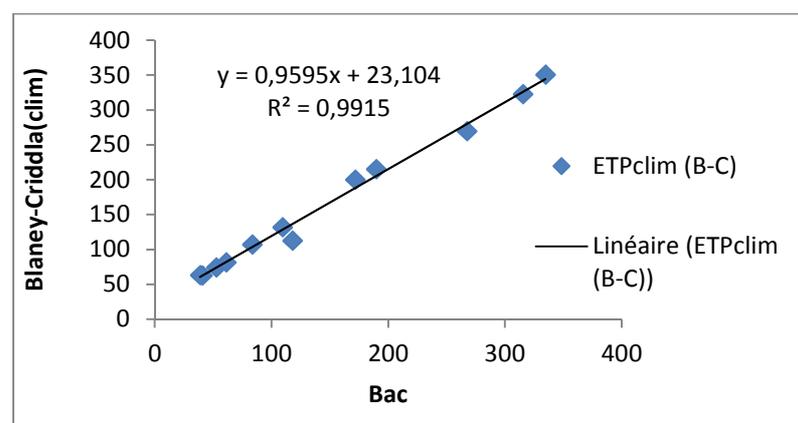
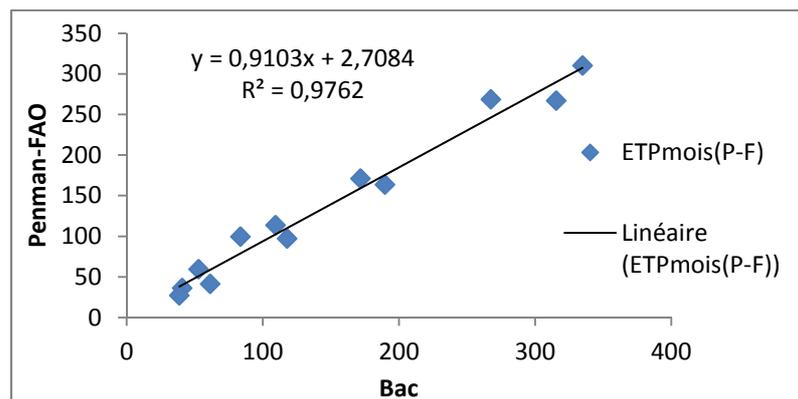
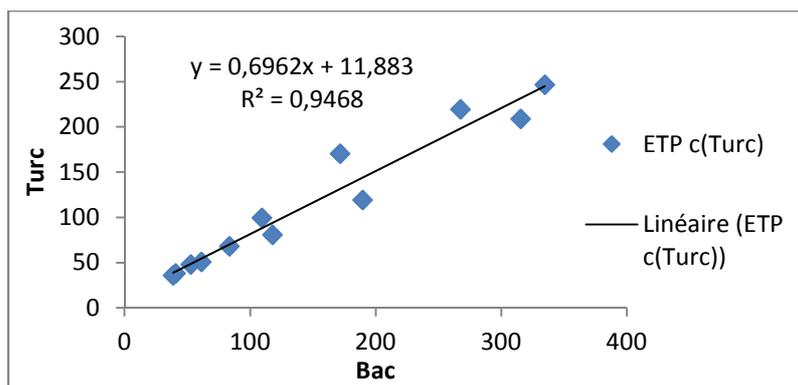
ANRH: formule dite **ANRH**.

Interprétation :

D'après la figure **IV.8** on remarque que la valeur de l'**ETP** qui déterminée d'après la formule de Blanney-Cridle climat et culturale est la plus près de la réelle qui obtenue par la mesure sur le Bac Colorado. L'autre formule donne des valeurs autours de cette valeur, tels-que la formule de Blanny-Cridle climatique donne une valeur plus grande et la formule de Thornthwaite donne une valeur plus petite que la valeur référence.

IV.3.1. Corrélation entre l'ETP (mesurée) et estimée :

A partir des relations entre l'**ETP** (Bac Colorado) et celle estimée à partir des différentes formules, il apparaît une bonne corrélation entre celle-ci et celle obtenue par l'application des différents modèles de calcul (coefficient de corrélation > **0.9**). Figure **IV.10**.



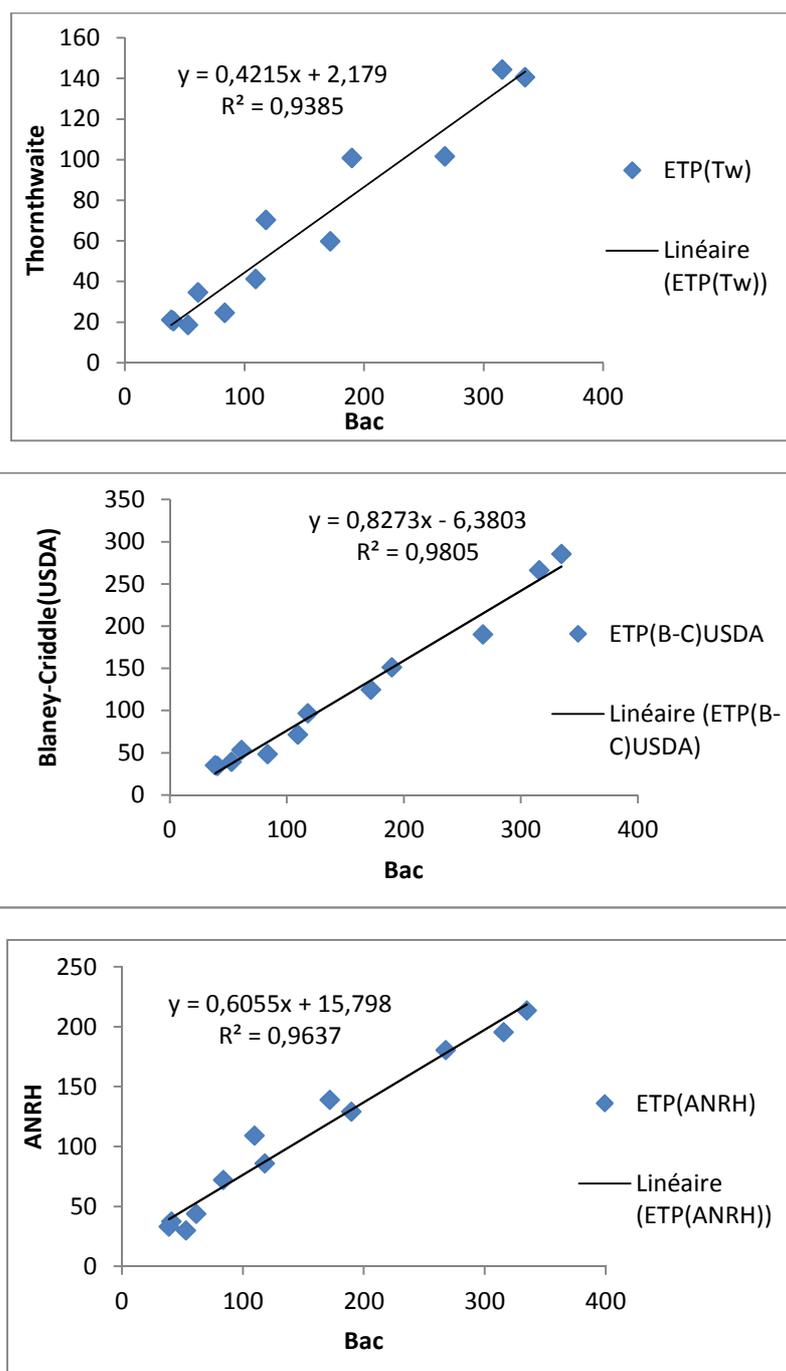


Figure IV.10. Courbes des corrélations des résultats obtenus par différentes méthodes par rapport au Bac d'évaporation Colorado.

Discussion.

Les quatre méthodes d'estimation de l'évapotranspiration se fondant sur la température, seule le modèle de Thornthwaite aboutit à une sous-estimation du paramètre à l'échelle annuelle avec un cumul de **778.19 mm**. Blaney-Criddle culture et Bac Colorado donnent des résultats semblables respectivement de **1769.23** et

1784.09 mm/an. Blaney-Cridle clim surestime considérablement l'**ETP** toute l'année. Blaney-Cridle **USDA**, Turc et **ANRH** la sous estiment.

L'analyse comparative des résultats obtenus par l'application des différents modèles a permis de mettre en évidence :

A l'échelle annuelle, la formule de Blaney-Cridle climatique conduit à une estimation satisfaisante de la composante climatique ; tandis que les valeurs de l'**ETP** (Thornthwaite) sont nettement inférieures aux valeurs de l'**ETP** (Bac) ; L'**ETP** annuel de cette méthode sous-estime considérablement l'**ETP**, pouvant atteindre (**43.61%**). Par ailleurs l'estimation de l'**ETP** par la méthode de Blaney-Cridle cultur conduit à une meilleure approximation de cette composante, avec 99.16%.

Par ailleurs, à l'échelle mensuelle, l'estimation de l'**ETP** par la méthode de Blaney-Cridle climatique Conduit à une meilleure approximation de cette composante, avec un coefficient de corrélation **R2 = 0.9915** .D'autre part, les valeurs de l'**ETP** (Thornthwaite) sont nettement inférieures aux valeurs de l'**ETP** (Bac Colorado) avec un **R2=0.9385**.

Conclusion :

D'après l'application des six formules on observe que les valeurs de l'**ETP** est varié selon la température saisonnière, où elles élevées dans la saison d'été aux les mois les plus chauds (Juillet), et diminue dans la saison de l'hiver.

La comparaison entre les résultats des formules empiriques et les mesures du Bac d'évaporation classe A, admet que la formule la plus convenable est la formule de Blaney-Cridle (climat) pour **ETP** mensuelle et Blaney-Cridle (cultur) pour **ETP** annuelle.

Conclusion générale :

L'évapotranspiration est un processus complexe composé d'une évaporation physique et d'une évaporation physiologique (transpiration). Vu la difficulté de séparer ces deux processus dans la nature du fait qu'ils se produisent simultanément, ils sont généralement regroupés sous le même terme d'évapotranspiration.

Il est possible d'estimer l'évapotranspiration par le biais de formulations plus ou moins complexes qui nécessitent la connaissance d'un certain nombre de paramètres climatiques qu'on a cité plus haut. La plupart des méthodes empiriques basées sur la température, la précipitation, l'insolation et l'évaporation, généralement les résultats qui sont obtenues à partir des applications numériques des formules empiriques varie selon la température saisonnière, où ils prennent le maximum dans l'été, et le minimum dans l'hiver.

Les données disponibles de l'évaporation s'étalent sur **07 ans (2007-2013)** pour la détermination des valeurs de l'évapotranspiration potentielle. La comparaison de ces résultats avec des mesures référentielles disponibles par des méthodes pratiques (dans notre étude c'est la mesure à partir du Bac d'évaporation Colorado classe A), c'est nécessaire pour la déduction de la formule qui est convenable avec les caractéristiques climatiques du site d'étude.

Ce travail nous a permis de constater que :

- L'évapotranspiration potentielle obtenues par les formules de Turc, Blaney-Cridle (**USDA**) et **ANRH** aboutissent à la même fourchette de valeurs. Les valeurs obtenues à l'aide des formules de B-Cr culture et les mesure directe a partie du Bac Colorado présentent des résultats identiques. La valeur maximale est de B-Cr climat et la formule de Thornthwaite, donne la valeur minimale.
- Concernant le mois de pointe, nous constatons que la plus grande valeur de l'évapotranspiration potentielle se situe au mois de Juillet, où les huit méthodes présentent la même tendance d'évolution de ce paramètre.
- A l'échèle annuelle, la formule de Blaney-Criddle culture conduit à une estimation satisfaisante de la composante climatique avec **99.16%**.
- Par ailleurs, à l'échelle mensuelle, l'estimation de l'**ETP** par la méthode de Blaney-Cridle climatique Conduit à une meilleure approximation de cette composante, avec un coefficient de corrélation **R² = 0.9915**.

Donc on peut conclure : pour la station de Beni Haroun on utilise la formule de Blaney-Cridle (climat) pour la détermination de l'**ETP** mensuelle et Blaney-Cridle (culture) pour **ETP** annuelle.

Références

N° Bibliographie

- 2 **J. Bordet** (2007), l'eau dans son environnement rural, Edition JOHANET ; 317P
- 3 **L. Schriver-Mazzuoli** (2012), La gestion durable de l'eau, Edition DUNOD ; 249P
- 4 Global Arabic encyclopédie
- 5 **A.Francois, j.Rousselle, N.Lauzon** (2012), hydrologie cheminements de l'eau, 2^{ème} édition Presses Internationales Polytechnique ; 381P
- 6 **A. Sari** (2009, 2^{ème} éditions), initiation à l'hydrologie de surface, Editions-distribution Houma ; 223P.
- 8 **I.Mokadem** (2013), Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans les régions de Béchar»
- 9 **S. Bennis** (2007, 2^{ème} éditions), Hydraulique et Hydrologie, Edition Danger photocopillage Tue le livre ; 451P
- 10 **G .Réménieras** (1986) l'hydrologie de l'ingénieur ; 2^{ème} éditions EYROLLES ; 456P
- 11 **I. Ladlani** : Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba»
- 12 **S.Paré** (2006, thèse de doctorat), 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 l zone non saturé de la plain de Tafilalet
- 13 Rapport anonyme. ANBT Beni Haroun
- 14 **Ben Mansour. S-K.R**(2013), Etude de l'évapotranspiration réelle liée à l'évapotranspiration potentielle et à la production agricole phoenicicole à l'échelle de l'écosystème de l'ITAS. Mise au point d'un modèle basé sur la consommation de l'eau et la production agricole

N° Web graphie

- 1 <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/general/tmchapitres.html>

<http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Evaporation&oldid=604201332>

Categories:

<http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89vapotranspiration>

ANNEXE



Annexe

Tableau 1 : Valeurs mensuelles de la radiation globale en calories/cm² et par jour.

Lat. Nord	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
0°	858	888	890	862	816	790	804	833	875	880	860	842
10°	759	821	873	894	885	873	879	880	872	830	767	735
20°	642	732	834	902	930	934	930	902	843	755	656	610
30°	508	624	764	880	950	972	955	891	788	658	528	469
40°	364	495	673	833	944	985	958	858	710	536	390	323
50°	222	360	562	764	920	983	938	800	607	404	246	180
60°	87.5	215	432	676	880	970	908	728	487	262	111	55.5
70°	5	82	289	577	860	992	905	651	341	119	17	0
80°	0	2.9	146	508	889	1042	945	610	213	17.5	0	0
Lat. sud	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
0°	858	888	890	862	816	790	804	833	875	880	860	842
10°	893	888	872	820	754	724	748	804	871	896	900	891
20°	986	937	845	726	616	571	597	691	808	904	970	992
30°	1.009	923	783	629	495	439	473	586	734	880	987	1.031
40°	1.010	887	697	507	364	303	338	960	639	836	977	1.045
50°	990	820	590	376	226	167	205	330	527	753	949	1.040
60°	961	738	466	235	96	49.5	98.5	189	397	657	905	1.025

Penman nomme cette valeur **R_a**.

Turc la nomme **I_{gA}**.

Pour les latitudes intermédiaires, on interpole.

Annexe

Tableau 2 : Valeurs mensuelles moyennes durée astronomique du jour en heures par jour

lat. Nord	JAN	FER	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
0°	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10
10°	11.62	11.80	12.08	12.35	12.59	12.70	12.64	12.44	12.18	11.90	11.69	11.51
20°	11.09	11.49	12.04	12.60	13.11	13.33	13.24	12.80	12.26	11.70	11.19	10.90
30°	10.45	11.09	12.00	12.90	13.71	14.07	13.85	13.21	12.36	11.45	10.67	10.23
40°	9.71	10.64	11.96	13.26	14.39	14.96	14.68	13.72	12.46	11.15	10.00	9.39
50°	8.58	10.07	11.90	13.77	15.46	16.33	15.86	14.49	12.63	10.77	9.08	8.15
60°	6.78	9.11	11.81	14.61	17.18	18.73	17.97	15.58	12.89	10.14	7.58	6.30
Lat. sud	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
0°	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10
10°	12.64	12.39	12.16	12.90	12.68	12.51	12.60	12.80	12.06	12.30	12.57	12.70
20°	13.24	12.73	12.22	11.63	11.18	10.91	11.06	11.47	11.09	12.53	13.07	13.80
30°	13.84	13.13	12.26	11.33	10.62	10.25	10.40	11.07	11.91	12.83	13.64	14.06
40°	14.64	13.62	12.34	11.03	9.95	9.38	9.64	10.56	11.83	13.14	14.32	14.94
50°	15.82	14.31	12.46	10.62	9.00	8.15	8.50	9.92	11.74	13.57	15.34	16.28
60°	17.87	15.38	12.64	9.91	7.44	6.01	6.63	8.88	11.55	14.33	17.01	18.70

Brunt appelle cette valeur **N**. Turc l'appelle **H**.
 Pour les latitudes intermédiaires, on interpole.

Tableau 3 : Coefficient de correction F (m, φ) de la formule de Thornthwaite.

Lat .N	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
25	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
26	0.92	0.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
27	0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	0.99	0.90	0.90
28	0.91	0.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	0.98	0.90	0.90
29	0.91	0.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	0.98	0.90	0.89
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
31	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
32	0.89	0.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	0.98	0.88	0.87
33	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86
34	0.88	0.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	0.97	0.87	0.86
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
36	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84
37	0.86	0.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	0.97	0.85	0.83
38	0.85	0.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	0.96	0.84	0.83
39	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
41	0.83	0.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	0.96	0.82	0.80
42	0.82	0.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	0.95	0.82	0.79
43	0.81	0.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	0.95	0.81	0.77
44	0.81	0.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	0.95	0.80	0.76
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
46	0.79	0.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	0.94	0.79	0.74
47	0.77	0.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	0.93	0.78	0.73
48	0.76	0.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	0.93	0.77	0.72
49	0.75	0.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	0.93	0.76	0.71
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70
Lat.S.												
5	1.06	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	1.00	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	0.93	0.86	0.78	0.84	0.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	0.92	0.85	0.76	0.82	0.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	0.92	0.83	0.74	0.81	0.91	0.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	0.91	0.82	0.72	0.79	0.90	0.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	0.90	0.80	0.70	0.76	0.89	0.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	0.89	0.77	0.67	0.74	0.88	0.99	1.19	1.29	1.41

Dans Brochet P. et Gerbier N, L'évapotranspiration, aspect agro météorologique, évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle.