



**UNIVERSITE KASDI MERBAH
OUARGLA**

**Faculté des mathématiques et sciences de la
matière**

N° d'ordre :

N° de série :

DEPARTEMENT PHYSIQUE

Master académique

Spécialité: Physique

Option: Physique météorologique

Par : M^{lle} Saad Allah Salima

Thème

**Estimation de l'évapotranspiration potentielle par différents
méthodes. Application à un site à climat saharien
(Touggourt-w-Ouargla)**

Soutenu publiquement le : 07 Juin 2018

Devant le Jury :

Président : K. BEN BELGACEM

Examineur : A. FEKIH

Encadreur : M. T. NAKES

Co-Encadreur : M. BERREKBIA

M.A « A »

M.A « B »

M.A « A »

Chercheur

UKM-Ouargla

UKM-Ouargla

UKM-Ouargla

INRA, Touggourt

Table des matières

Remerciements.....	I
Liste des tableaux.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des symboles.....	V
Introduction General.....	1
Chapitre I : Généralités d'hydrologies.....	3
I.1 Introduction	4
I.2 Cycle de l'eau.....	5
I.3 Précipitation.....	6
I.4 Infiltration et percolation.....	7
I.5 Ecoulement	7
I.5.1 Ecoulement de surface.....	7
I.5.2 Ecoulement de souterrain.....	8
I.6 Evaporation et évapotranspiration.....	8
I.6.1 Mesure des facteurs contrôlant le mécanisme de l'évapotranspiration.....	9
I.6.1.1 Pressions de l'air.....	9
I.6.1.2 Température.....	10
I.6.1.3 Humidité relative de l'air	10
I.6.1.4 Rayonnement solaire	11
I.6.1.5 Durée d'insolation.....	11
I.6.1.6 Le vent.....	12
Chapitre II : Mesures de l'évaporation.....	14
II.1 Introduction.....	15
II.2 Mesure par bac évaporomètre.....	15
II.2.1 Mesure de bac évaporomètre à partir d'une surface libre.....	15
II.2.1.1 Balances d'évaporation.....	15
II.2.1.2 Bac d'évaporation « classe A »	15
II.2.1.3 Bac Colorado et bac ORSTOM.....	16
II.2.1.4 bac CGI 30.....	18
II.2.1.5 bac flottants	18

II.2.2	Mesure de l'évaporation à partir des surfaces poreuses.....	18
II.2.2.1	le Back Bellini.....	18
II.2.2.2	Le piche.....	19
II.3	Méthode d'estimation d'ETP.....	20
II.3.1	Formule de Thornthwaite (1944).....	20
II.3.2	Formule de Penman-Monteith-FAO (1998).....	20
II.3.3	Formule de TURC (1962).....	21
Chapitre III	: Cadre climatique de la région d'étude.....	23
III.1	Introduction.....	24
III.2	Présentation de la région Touggourt.....	24
III.2.1	Situation géographique.....	24
III.2.2	Cadre climatique.....	25
III.2.2.1	Précipitation.....	25
III.2.2.2	Température.....	26
III.2.2.3	Détermination des périodes sèches et de l'étage bioclimatique de la région de Touggourt.....	27
III.2.2.4	Evaporation.....	29
III.2.2.5	Humidité relative.....	30
III.2.2.6	La durée d'insolation.....	31
III.3	Effet des paramètres atmosphériques sur le taux d'évaporation.....	32
III.3.1	Taux d'évaporation et température de l'air.....	32
III.3.2	Taux d'évaporation et vitesse de vent.....	33
III.3.3	Taux d'évaporation et tension de vapeur d'eau.....	34
Chapitre IV	: Comparaison de taux d'évaporation mesuré avec les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration.....	36
IV.1	Introduction.....	37
IV.2	Evolution de l'évaporation mesurée et les estimations de d'ETP au cours de la période d'étude.....	37
IV.3	Analyse descriptive.....	38
IV.4	Erreur relative entre l'évaporation mesurée et les estimations de d'ETP.....	39
IV.5	Corrélation entre l'évaporation mesurée et les estimations d'ETP.....	40

Conclusion.....	44
Références.....	46

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nos avoir donné les forces, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail ce travail. Je dédie également mes meilleurs efforts à tous les membres du comité de discussion, Dieu a éclairé leur chemin et tous

Professeurs du Département des sciences physiques Mon père est grand sur mon coeur, Dieu prolonge sa vie. Je dédie aussi ce travail à ma chère mère, qui est patiente avec tout Je dédie également mon travail à mes soeurs Manal et Ayman, qui partagent avec moi le fardeau de la vie

nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenues et à tout ce qui participe de réaliser ce mémoire Tout d'abord, Et à tous ceux qui croient que les graines du succès changent en nous et en nous avant qu'ils ne soient dans d'autres choses.

Liste des tableaux

Tableau II.1: coefficient de correction $f(h)$ pour une latitude de 33.07°N	20
Tableau II.2: Valeur moyennes mensuelles d'Iga en calories par cm^2 et par jour pour un latitude de 33.20°N	22
Tableau II.3: Durée mensuelle théorique du jour « H » en heures par mois pour un latitude de 33.20°N	22
Tableau III.1: Précipitations mensuelles. Touggourt au cours de la période 2003 à 2015.....	25
Tableau III.2: Température moyenne mensuelles, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.....	26
Tableau III.3 : Evaporation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.....	29
Tableau III.4: humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.....	30
Tableau III.5: Insolation moyenne mensuelle en heures, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.....	31
Tableau IV.1 : Caractéristiques descriptives des variables statistiques et valeurs extrêmes de l'ETP des quatre modèles	39
Tableau IV.2: Corrélation entre l'évaporation mesurée et les méthodes d'estimation d'ETP.....	42

Liste des figures

Figure I.1: Diagramme des phases d'eau.....	4
Figure I.2: Cycle de l'eau.....	6
Figure I.3: Transpiration des végétaux.....	8
Figure I.4: Abri météorologique.....	10
Figure I.5: Pyranomètres.....	11
Figure I.6: Appareil de L'héliographe.....	12
Figure I.7 : Quelques types d'anémomètres.....	13
Figure II.1: bac « classe A ».....	16
Figure II.2: bac Colorado	17
Figure II .3: Jauge à crochet.....	18
Figure II.4: le Piche.....	19
Figure III.1: Situation géographique de la région de Touggourt.....	25
Figure III.2: Précipitations moyenne mensuelles enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.....	26
Figure III.3: Température moyenne mensuelle à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.....	27
Figure III.4: Diagramme ombrothermique de « GAUSSEN» pour la région de Touggourt.....	28
Figure III.5: Diagramme d'Emberger pour la région de Touggourt.....	29
Figure III.6: Evaporation moyenne mensuelle a la station de Touggourt au cours la période 2003- 2015.....	30
Figure III.7: Humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.....	31
Figure III.8: Durée d'insolation moyenne, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.....	32
Figure III.9: Evolution mensuelle de taux d'évaporation et de la température, à la région de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.....	33
Figure III.10: Evolution mensuelle de taux d'évaporation et de la vitesse de vent, à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.....	34
Figure III.11: Evolution mensuelle de taux d'évaporation et de la tension de vapeur saturante, à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.....	35

Figure IV.1: Evolutions moyennes mensuelle des ETP estimées et de l'évaporation de Piche, pour la région de Touggourt au cours de la période (2003 - 2015).....	38
Figure IV.2: Erreurs relatives mensuelles entre l'évaporation mesurée et les estimations de d'ETP pour la région de Touggourt au cours de la période 2003 – 2015.....	40
Figure IV.3: Corrélacion entre l'évaporation mesurée et ETP (Turc).....	41
Figure IV.4: Corrélacion entre l'évaporation mesurée et ETP (Penman-Monteith).....	41
Figure IV.5: Corrélacion entre l'évaporation mesurée et ETP (Thoronthwaite).....	42

Liste des symboles

- P:** Pressions de l'air (hPa) ou (mbar)
- T_a:** Température de l'air (K)
- ρ_a:** Masse volumique de l'air (kg/m³)
- R:** Constante des gaz parfaits J/(kg.K)
- H_r:** l'humidité relative (%)
- e_s:** pression de vapeur d'eau saturante (hPa)
- t:** température de l'air (°C)
- e_a:** pression de vapeur d'eau (hPa) ou (mbar)
- R_G:** Le rayonnement global (MJm⁻².j⁻¹)
- I:** Le rayonnement Solaire direct (MJm⁻².j⁻¹)
- R_d:** Le rayonnement Solaire diffuse (MJm⁻².j⁻¹)
- R_s:** Le rayonnement du sol (MJm⁻².j⁻¹)
- R_a:** Le rayonnement atmosphérique (MJm⁻².j⁻¹)
- v*:** Vitesse de frottement (m/s)
- k:** Constante de Von Karman
- z₀:** épaisseur de la rugosité de surface (mm)
- E:** Evaporation du bac (mm)
- (N_j-N_{j-1}):** Différence de niveau deux mesures successives (mm)
- Σ Rech:** Recharges effectuée (mm)
- ΣP:** pluviométrie (mm)
- u:** vitesse du vent (m/s)
- t_m:** Température sous abri de thermomètre mouillé (°C)
- I:** indice thermique annule
- a:** fonction complexe de l'indice I
- R_n:** Radiation nette (MJm⁻².j⁻¹)
- G:** Flux de chaleur du sol (MJm⁻².j⁻¹)
- γ:** Constante psychométrique (kPa°C⁻¹)
- Z=** laltitude en [m]
- Δ:** Pente de la pression de la vapeur saturée à la température moyenne l'air (kPa°C⁻¹)

RH_{max}: humidité relative maximale (%)

RH_{min}: humidité relative minimale (%)

Ig: Radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (cal/cm²/jour)

IgA: radiation globale théorique (cal/cm²/jour)

H: durée maximal d'insolation (théorique) en heure par mois.

h: durée d'insolation mesurée en heure par mois

P: Précipitation moyenne mensuelle (mm)

p: cumule pluviométrique annuel (mm)

M: moyenne des températures maximale (°C)

m: moyenne des températures minimale (°C)

Q₂: quotient pluviométrique (mm / °C)

R: coefficient de corrélation

ER: L'erreur relative (%)

R²: coefficient de détermination

Introduction générale

L'évaporation, ou le passage de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur, est l'un des facteurs les plus importants qui contribuent à la formation de cycle de l'eau dans la nature. L'évaporation est présente dans la nature de nombreuses façons: évaporation de l'humidité de sol, évaporation de l'eau des réservoirs d'eau (lac, barrage, cours d'eau, etc.) et évaporation des plantes.

Dans ce travail, nous étudierons les moyens d'estimer le taux de l'évaporation maximale de système sol et plante, communément connu sous le nom de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP), en raison de son importance dans les estimations des besoins en eau des plantes et les cultures irrigués. En cas d'absence des mesures réelles, la littérature propose plusieurs méthodes pour calculer le taux d'évaporation théorique, dont nous avons retenus ceux de Thornthwaite (1944), Turc (1962), et Penman-Monteith-FAO (1998). Les résultats obtenus à partir des ces méthodes sont ensuite comparés avec les mesures réelles réalisées par l'évaporimètre de Piche implanté dans l'institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA), installé dans la circonscription *administrative de Touggourt* (Willaya de Ouargla). La période d'étude s'étend de 2003 à 2015, soit 13 ans. Le choix de ce site est justifié par la disponibilité des mesures météorologiques nécessaires à l'estimation de l'ETP, tels que principalement la température, l'humidité relative, vitesse de vent, durée d'insolation.

La précision des méthodes d'estimation de l'ETP varie d'une région géographique à une autre en fonction des conditions climatiques prévalant dans chaque région. Ceci nous a conduits en premier temps d'identifier le cadre climatique de la région de Touggourt, avant d'entamer le volet de comparaison entre les mesures et les estimations et d'en choisir la plus proche d'entre eux vis-à-vis les mesures réelles.

Ensuite l'étude comparative entre les mesures et les estimations ont montrées que la méthode de Penman-Monteith-FAO, est la méthode la plus appropriée à admettre comme alternative aux mesures, non seulement pour la région de

Touggourt mais à travers toute la région de Oued-Righ, vue la ressemblance en terme des conditions climatiques.

Ce manuscrit est présenté, en plus d'une introduction générale et une conclusion générale, sous forme de quatre chapitres :

Le chapitre I est consacré aux généralités d'hydrologie, tel que le cycle de l'eau et ces composants tels que la précipitation, l'infiltration, l'écoulement, l'évaporation.

Le chapitre II est réservé aux instruments de mesure de taux d'évaporation, tels que par les bacs évaporomètres, ainsi aux méthodes d'estimation d'ETP tels que Thornthwaite (1944), Turc (1962), et Penman-Monteith-FAO (1998).

Le chapitre III, est une étude climatique de la région de Touggourt, où les régimes mensuels de température, de l'humidité relative, de précipitation et de la durée d'insolation sont identifiés. Cette étude était complétée par une analyse de l'effet des principaux paramètres climatiques (température $T(^{\circ}C)$, la vitesse de vent $V(m/s)$ et l'humidité relative $HR (\%)$, contrôlée par la tension de vapeur d'eau saturante $es(hPa)$) sur l'évapotranspiration.

Le chapitre VI, c'est l'étude statistique entre les mesures et les méthodes d'estimation, ou nous avons envisagés certains outils statistiques tels que l'erreur relative, le coefficient de détermination et l'écart-type pour choisir la méthode d'estimation la plus admise.

Enfin le manuscrit est finalisé par une liste des références utilisé dans cette étude.

CHAPITRE I

Généralités d'hydrologies

Chapitre I : Généralités d'hydrologies

I.1 Introduction:

L'hydrologie est une science qui a pour objet l'étude de l'eau et de sa circulation naturelle à la surface de la Terre.

L'hydrologie étudie l'eau sous ses trois états (liquide, solide, gazeux): l'eau liquide s'évapore, la neige se sublime ou retourne à l'état liquide, la vapeur d'eau se condense et les précipitations tombent en pluie ou en neige qui alimentent les cours d'eau et les glaciers; ceux-ci s'écoulent à la surface des continents et ramènent l'eau à l'océan mondial. Le cycle de l'eau est commandé par ses changements d'états incessants. Figure 1, est une représentation des changements d'états naturels de l'eau et définit les domaines dans lesquels l'eau se trouve à l'état liquide, solide ou gazeux ainsi que les limites de transition de phases qui réclament des échanges d'énergie, [1].

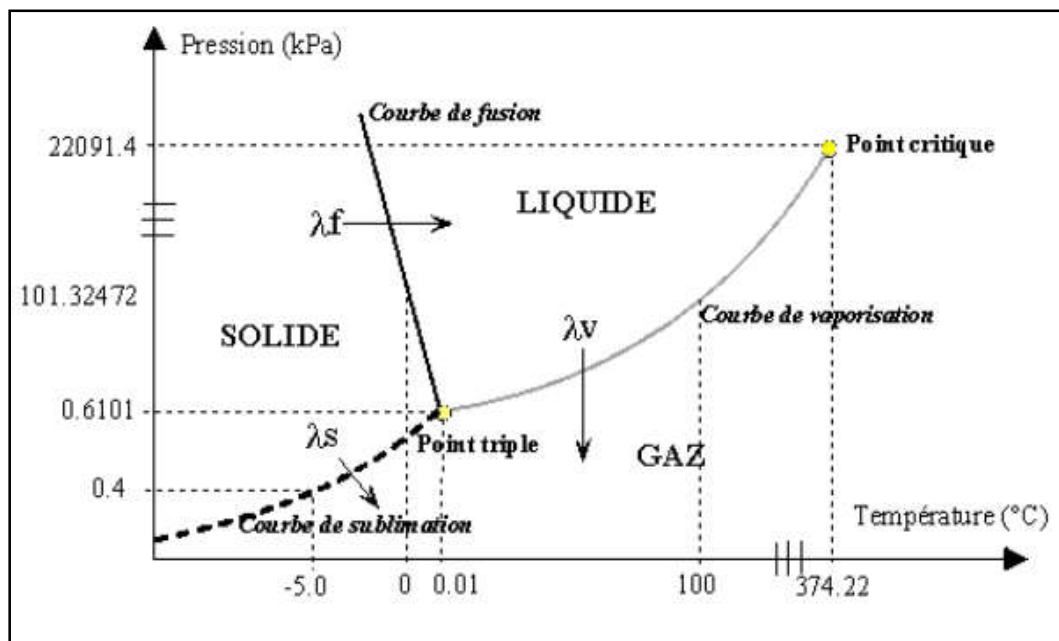


Figure I.1 : Diagramme des phases d'eau

- Le passage du domaine liquide au domaine gazeux nécessite un apport d'énergie nommée « chaleur latente de vaporisation » qui dépend de la température du liquide.
- Le passage entre les phases solide et liquide peut se faire si l'on apporte une quantité suffisante de chaleur au solide et liquide peut se faire si l'on apporte une quantité de chaleur suffisante de chaleur au solide nommée « chaleur latente de fusion ».
- La transition directe d'une structure solide à une structure gazeuse réclame une quantité de chaleur que l'on appelle « chaleur latente de sublimation ».

On peut encore noter que les changements de phases se font à température constante. Lorsque la glace fond, la température reste à 0 °C. Enfin, au-delà d'un point, nommé point critique, la distinction entre phase gazeuse et phase liquide n'est possible, ce qui explique l'interruption de la courbe de vaporisation.

I.2 Cycle de l'eau:

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau évaporée à partir du sol, des océans et des autres surfaces d'eau, entre dans l'atmosphère. L'élévation d'une masse d'air humide permet le refroidissement général nécessaire pour l'amener à saturation et provoquer la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes constituant les nuages, en présence de noyaux de condensation. Puis la vapeur d'eau, transportée et temporairement emmagasinée dans les nuages, est restituée par le biais des précipitations aux océans et aux continents. Une partie de la pluie qui tombe peut être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère, [2]. La pluie non interceptée atteint le sol. Suivant les conditions données, elle peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eau (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol. Il peut aussi y avoir emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, que peuvent utiliser les plantes. Il peut y avoir cheminement vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe souterraine. Un écoulement à partir de cette dernière peut rejoindre la surface au niveau des sources ou des cours d'eau. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle, [3].

Le cycle de l'eau, Figure I.2, est donc sujet à des processus complexes et variés parmi lesquels nous citerons les précipitations, l'évaporation, la transpiration (des

végétaux), l'interception, le ruissellement, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et les écoulements souterrains qui constituent les principaux chapitres de l'hydrologie. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément moteur, le soleil, organe vital du cycle hydrologique, [3].

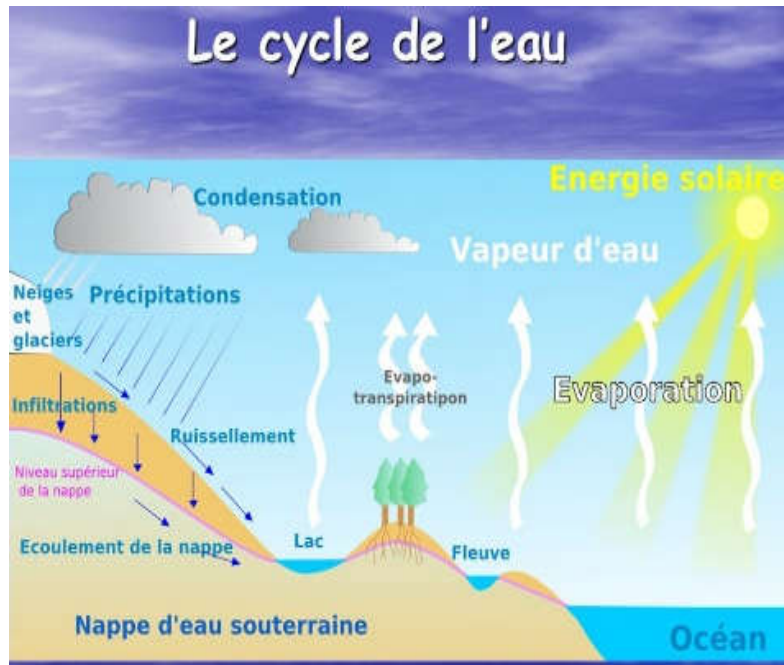


Figure I.2 : Cycle de l'eau.

Le cycle de l'eau peut être décomposé en quatre processus distincts : stockage, évaporation, précipitation et ruissellement. L'eau peut être stockée temporairement dans le sol, les océans, les lacs et les rivières, ainsi que dans les calottes glaciaires et les glaciers. Elle s'évapore depuis la surface terrestre, se condense en nuages, retombe sous forme de précipitations (pluie ou neige) sur les continents et les océans, puis s'écoule, ruisselle et à nouveau, est stockée ou s'évapore dans l'atmosphère, [2].

I.3 Précipitation :

Sont dénommées précipitations toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (brume, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche,

givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. La vapeur d'eau de l'atmosphère se transforme en liquide lorsqu'elle atteint le point de rosée par refroidissement ou augmentation de pression. Pour produire la condensation, il faut également la présence de certains noyaux microscopiques, autour desquels se forment des gouttes d'eau condensées. La source de ces noyaux peut être océanique (chlorides, en particulier NaCl produit par l'évaporation de la mer), continentale (poussière, fumée et autres particules entraînées par des courants d'air ascendants) ou cosmiques (poussières météoriques). Le déclenchement des précipitations est favorisé par la coalescence des gouttes d'eau. L'accroissement de poids leur confère une force de gravité suffisante pour vaincre les courants ascendants et la turbulence de l'air, et atteindre le sol. Enfin, le parcours des gouttes d'eau ou des flocons de neige doit être assez court pour éviter l'évaporation totale de la masse. Les précipitations sont exprimées en intensité (mm/h) ou en lame d'eau précipitée (mm) (rapport de la quantité d'eau précipitée uniformément répartie sur une surface) , [1].

I.4 Infiltration et percolation

L'infiltration désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de pression. La percolation représente plutôt l'infiltration profonde dans le sol, en direction de la nappe phréatique. Le taux d'infiltration est donné par la tranche ou le volume d'eau qui s'infiltrer par unité de temps (mm/h ou m³/s). La capacité d'infiltration (ou l'infiltrabilité) est la tranche d'eau maximale qui peut s'infiltrer par unité de temps dans le sol et dans des conditions données. L'infiltration est nécessaire pour renouveler le stock d'eau du sol, alimenter les eaux souterraines et reconstituer les réserves aquifères. De plus, en absorbant une partie des eaux de précipitation, l'infiltration peut réduire les débits de ruissellement, [1].

I.5 Ecoulement

L'écoulement ou encore appelée ruissellement des eaux se présente sous forme :

I.5.1 Ecoulement de surface : L'eau qui alimente ruisseaux et rivières est appelée ruissellement de surface. Le ruissellement n'est pas constant. Il décroît au cours des

périodes de sécheresse ou des saisons sèches, et augmente pendant la saison des pluies, les orages et les périodes de fonte des neiges et des glaces, [1].

I.5.2 Ecoulement souterrain : désigne le mouvement de l'eau dans le sol.

I.6 Evaporation et évapotranspiration

L'évaporation est le processus par lequel l'eau se transforme en vapeur d'eau et, sous cette forme gazeuse, entre dans l'atmosphère. Le passage direct de la glace à l'état gazeux s'appelle *sublimation*. Les végétaux perdent de l'eau par les pores des feuilles (évapotranspiration), voir Figure I.3, [4] [13].

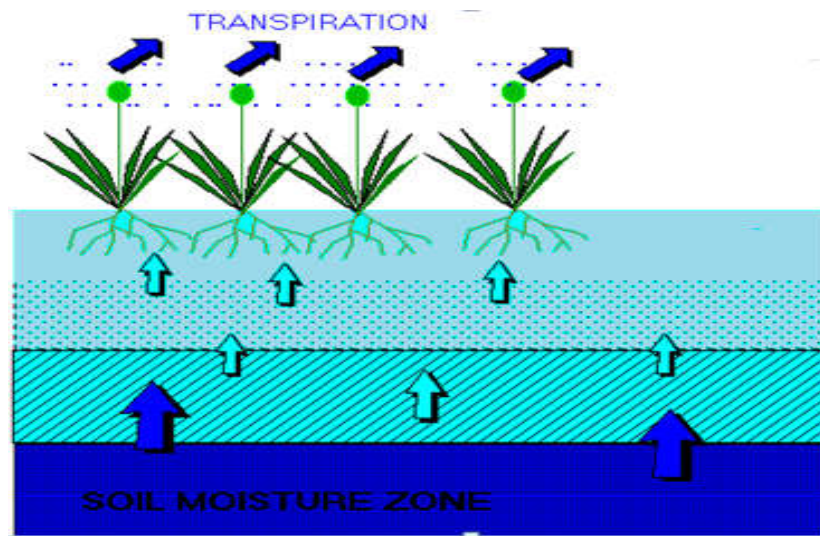


Figure I.3 : Transpiration des végétaux.

Quotidiennement, environ 1200 km^3 d'eau s'évaporent des océans, des surfaces des continents, des plantes, des glaciers et des calottes glaciaires; une quantité presque identique retombe sous forme de précipitations. Si l'évaporation ne compensait pas l'eau perdue par les précipitations, l'atmosphère deviendrait entièrement sèche en 10 jours^[1].

La vitesse d'évaporation croît avec la température, l'intensité du rayonnement solaire, la vitesse du vent, l'importance du couvert végétal et le degré d'humidité du sol. Elle décroît quand l'humidité de l'air croît. Dans la littérature on trouve trois types d'évapotranspiration, [1]:

- **L'évapotranspiration potentielle (ETP)** : En principe c'est la valeur maximale possible de l'évapotranspiration dans des conditions climatique donnée. Dans la pratique, l'évapotranspiration potentielle est considérée comme une référence et on la définit comme étant, l'évapotranspiration d'un couvert végétal homogène, dont l'alimentation en eau n'est pas limitant, et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique.
- **L'évapotranspiration maximale (ETM)** : Pour une culture donnée est définie à différents stades de développement végétatif, lorsque l'eau est en quantité suffisante et que les conditions agronomique sont optimales (sol fertile, bon état sanitaire).
- **L'évapotranspiration réelle (ETR)** : C'est l'évapotranspiration d'un couvert végétal dans des conditions réelles donnée : l'alimentation en eau de la plante peut être limitée par des contraintes d'ordre physique (suction du sol), chimique (concentration des solution) biologique (régulation stomatique).

I.6.1 Mesure des facteurs contrôlant le mécanisme de l'évapotranspiration

I.6.1.1 Pressions de l'air

Il existe divers instrument mesurant la pression atmosphérique, on distingue d'abord le baromètre à liquide ; le mercure est le plus souvent utilisé à cause de sa densité 13.6 fois supérieure à celle de l'eau. On a parfois recourt à un baromètre mécanique ou anéroïde, installé sous abri météorologique. Il peut rattacher à un système d'enregistrement (stylo); on obtient ainsi un barographe mesurant la pression en fonction du temps, [1].

La pression atmosphérique diminue avec l'altitude. La température, la pression et la masse volumique de l'air sont liées par la loi des gaz parfaits établie par la relation suivante, [2] :

$$P = R \cdot T_a \cdot \rho_a \quad (I.1)$$

- T_a : Température de l'air en Kelvin (K)
- ρ_a : Masse volumique de l'air kg/m^3
- R : Constante des gaz parfaits en $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

I.6.1.2 Température

L'instrument de mesure de la température et le thermomètre, il mesure la dilatation d'un liquide ou d'un solide à fort coefficient de dilation, ce qui permet d'en déduire la température. Les thermomètres les plus courants sont à mercure, à alcool et à toluène. Citons encore le thermomètre à maxima, qui est capable de retenir la valeur maximale diurne en utilisant la capillarité. La mesure de la température de l'air exige quelques précautions en raison des effets perturbateurs, principalement ceux du rayonnement. Il est donc nécessaire de protéger le thermomètre en le mettant sous un abri météorologique, Figure I.4, [1].



Figure I.4 : Abri météorologique.

I.6.1.3 Humidité relative de l'air

On mesure le taux d'humidité dans l'air avec un instrument appelé hygromètre les plus simples sont les hygromètres organique. Ils sont basés sur la propriété des substances organiques de se contracter ou se dilater selon l'humidité. Le cheveu humain, dégraissé, s'allonge de 2.5% lorsque l'humidité relative passe de 0 à 100 %. La lecture peut être aisément faite sur un cardan qu'on étalonne en fonction de l'humidité relative. L'appareil relié à un système d'enregistrement constitue un horographe, [1]. Pour détermination simultanée de la température de l'air et de l'humidité (%), on utilise un psychomètre. L'humidité relative de l'air s'exprime la relation suivante, [5]:

$$H_r (\%) = 100 \times \frac{e_a}{e_s} \quad (I.2)$$

- e_s : pression de vapeur d'eau saturante (hPa), [19]

$$e_s = 6.112 \exp\left(\frac{17.62t}{t+243.212}\right) \quad (I.3)$$

- t : température de l'air en °C
- e_a : pression de vapeur d'eau actuelle (hPa) ou (mbar).

I.6.1.4 Rayonnement solaire

Les rayonnements solaire globales parvenant au sol se compose de rayonnement direct et de rayonnement diffus. Les instruments de mesure utilisés sont désignés sous le nom général d'actinomètres pour la mesure du rayonnement net, [6], ou des **pyranomètres** à thermopiles, à lames ou rarement à distillation pour la mesure du rayonnement globale, voir Figure I.5. A la surface de sol on trouve, [7] :

- Le rayonnement global R_G
- Le rayonnement Solaire direct I
- Le rayonnement Solaire diffuse R_d
- Le rayonnement du sol R_s
- Le rayonnement atmosphérique R_a



Figure I.5 : Pyranomètres

I.6.1.5 Durée d'insolation

La durée du rayonnement solaire est mesurée par l'héliographe. Le principe consiste à focaliser les rayons solaires (grâce à la sphère en verre centrale) sur le diagramme sans

que ce dernier ne s'enflamme. Ce dernier doit également être insensible à l'humidité. Une règle transparente permet ensuite d'apprécier la longueur de la trace de brûlure avec une résolution permettant de mesurer la durée d'insolation, [20].



Figure I.6: Appareil et L'héliographe .

I.6.1.6 Le vent

La mesure du vent est faite dans les station métrologique par des **anémomètre** énerigsteurs des vitesses instatanées, doublés d'une girouette donnant la direction de vent pour l'hydrologie est sauf cas particulier on peut se contenter d'anémomètres totalisateurs, voir Figure I.7. Dans le cas simple d'un espace bien dégagé et sons relief marqué, le profil vertical de vitesse du vent est décrit par la relation logarithmique suivante, [2]:

$$\mathbf{v(h)} = \frac{\mathbf{v^*}}{\mathbf{k}} \ln \left(\frac{\mathbf{h}}{\mathbf{z_0}} \right) \quad \text{(I.4)}$$

Avec :

v^* : Vitesse de frottement (indépendante de la hauteur h) ;

k : Constante de Von Karman ($k \approx 0.4$) ;

z_0 : épaisseur de la rugosité de surface.

Les anémomètres sont classés en quatre catégories [7]:

- Les anémomètres utilisant l'énergie cinétique de l'air.
- Les anémomètres utilisant la pression exercée par le vent.

- Les anémomètres thermiques.
- Les anémomètres soniques.



Figure I.7 : Quelques types d'anémomètres (compteur et enregistreur).

CHAPITRE II

Mesures de l'évaporation

Chapitre II : Mesures de l'évaporation

II.1 Introduction

Plusieurs études de recherches sur l'utilisation des formules d'estimation de l'ETP ont été proposés par des climatologues et agro-climatologues. Ces formules d'évaluation ont été faites au niveau des sols nus ou cultivés, au niveau des études hydrologiques, etc. Au niveau des stations météorologiques, les bacs d'évaporomètres ont été placés pour mesurer par la méthode directe les pertes d'eau par évaporation. Depuis 1950, plusieurs formule ont été développées pour estimes l'évapotranspiration de Thornthwate (1944), Turc (1962), Penman-Monteith-FAO (1998). Ce chapitre présente d'abord les principaux instruments utilisés pour mesurer l'évapotranspiration ensuite un exposé sur les approches couramment utilisés comme alternative en cas d'absence les instruments conventionnels. Ces approches peuvent être simples ou complexes, de nature empiriques ou plus théoriques, qu'elles sont basées sur le bilan d'énergie ou de la température de l'air.

II.2 Mesure par bac évaporomètre

II.2.1 Mesure de bac évaporomètre à partir d'une surface libre:

Différentes type d'appareils ont été conçus mais avec des qualités distinctes, les plus utilisés sont, [6] :

II.2.1.1 Balances d'évaporation

Les balances d'évaporation mesurent l'évaporation en continu par diminution du poids de l'eau placée dans un plateau sous abri. Elles ne sont pas très représentatives de l'évaporation naturelle en raison de leur faible surface libre. De plus, le faible volume de l'eau favorise le rôle thermique des parois, [1].

II.2.1.2 Bac d'évaporation « classe A »

Ce bac est constitué d'un cylindre métallique de 121.9 cm de diamètre et de 25.4 cm de hauteur, dans ce cylindre on maintient une épaisseur d'eau de 17.5 à 20cm. Le cylindre est supporté par caillebotis (un panneau constitué de baguettes assemblées en

quadrillage) à 15 cm du sol. Le caillebotis doit permettre une bonne aération sous le bac[6]. Ce bac universellement répandu ne satisfait que très partiellement aux hydrologues car de fait aux variations de température son inertie thermique étant faible, voir Figure II.1.

Le calcul de l'évaporation se fait par différence en tenant compte de la pluviométrie et des recharges effectuées pendant la période considérée, [8]:

$$E = (N_j - N_{j-1}) + \Sigma \text{Rech} + \Sigma P \quad (\text{II.1})$$

Avec :

E : Evaporation du bac en (mm)

$(N_j - N_{j-1})$: Différences de niveau deux mesures successives en (mm)

ΣRech : Recharges effectuées en (mm)

ΣP : pluviométrie en (mm)

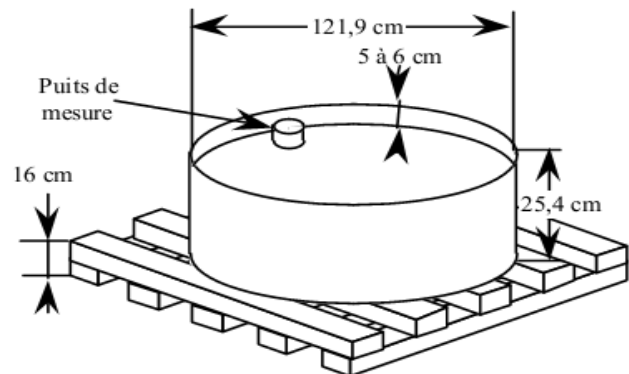


Figure II.1: bac « classe A »

II.2.1.3 Bac Colorado et bac ORSTOM

Le bac Colorado et bac ORSTOM qui en dérive, sont des bacs de section carrée de 92.5 cm de cote (1m pour le bac ORSTOM) d'une hauteur de 60 cm et il est enterré de 50 cm. L'eau est maintenue à 10 cm environ du rebord, soit sensiblement au niveau du rebord, soit sensiblement au niveau du sol, cet appareil étant enterré et avec une plus grande épaisseur d'eau, il possède une plus grande inertie thermique et se rapproche plus des conditions naturelles, [6]. Voir Figure II.2.

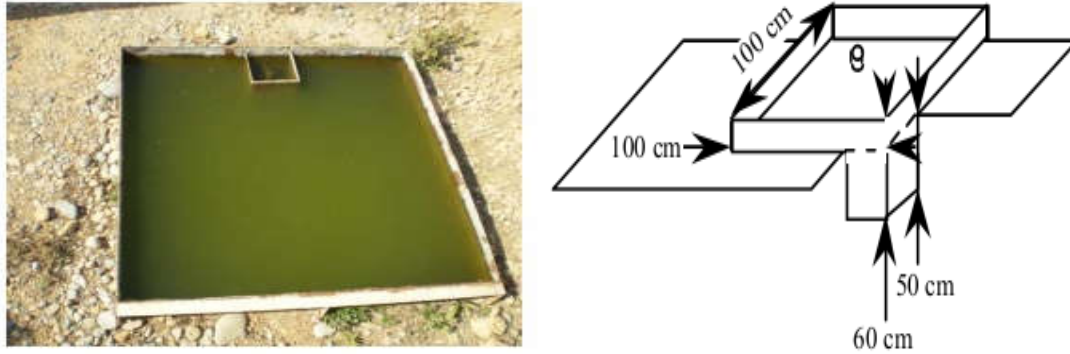


Figure II.2: bac Colorado

Si l'on dispose de mesure d'évaporation par bac Colorado (bac enterré), l'estimation de la fonction $f(u)$ peut se faire par la formule suivante, [8]:

$$f(u) = \frac{E_{bac}}{es - ea} \quad (\text{II.2})$$

Avec:

$f(u)$: fonction déduit de l'estimation de u

u : vitesse du vent a 2m du sol en m/s

E_{bac} : évaporation sur bac en mm ;

es : Tension de vapeur d'eau saturante de la surface en mm de mercure ;

ea : Tension de vapeur d'eau de l'air en mm mercure.

Tous les bacs d'évaporation doivent être relevés quotidiennement. Ils sont munis d'une pointe métallique tournée vers le haut et fixée au bac pour repérer le niveau évaporé (jauge à crochet). Ces bacs doivent toujours être installés dans un site représentatif du milieu hydrologique ambiant. Sous nos climats, on évitera de mettre les bacs au milieu d'une zone recouverte de sable ou de gravillons (augmentation de la température) mais plutôt au milieu d'une zone enherbée.

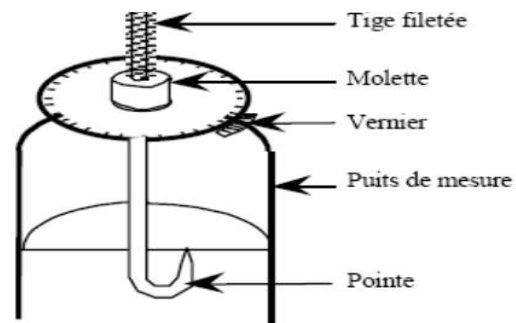


Figure II .3: Jauge à crochet

II.2.1.4 bac CGI 30

De conception analogue au bac Colorado, ce bac, d'origine soviétique, est celui recommandé par L'O.M.M (Organisation Mondiale de la Météorologie). C'est un cylindre de 61.8 cm de diamètre à fond conique et de 60 cm de profondeur (soit un volume de 3000 cm³), il est enterré de façon à ce que sa collerette dépasse 7.5 cm du sol, le niveau d'eau étant maintenu au niveau du sol,[6].

II.2.1.5 bac flottants

L'institut de géographie aux états unis d'Amérique a préconisé l'installation des bacs au sein même des nappes d'eau à étudier. Leur installation et leur exploitation présentent de grandes difficultés, mais ce sont eux qui fournissent les mesures les plus proches de celles de l'évaporation d'une grande surface d'eau, [8].

II.2.2 Mesure de l'évaporation à partir des surfaces poreuses

Ces appareils sont destinés à mesurer une grande caractéristique du pouvoir évaporant de l'air ambiant.

II.2.2.1 le Back Bellini

C'est un appareil qui correspond le mieux aux qualités que l'on exige d'un atmomètre (évaporomètre). L'évaporation se fait à partir d'une surface poreuse de porcelaine noire de 7.5 cm de diamètre, cette coupelle est alimentée en eau à partir d'un réservoir qui sert également à mesurer la quantité d'eau évaporée. La couleur noire de la surface évaporant permet de capter le maximum des radiations solaire. Cet appareil est installé sans protection à 2m du sol dans une zone représentative, [6].

II.2.2.2 Le Piche

L'atmomètre de piche, bien qu'il ne réponde qu'imparfaitement aux qualités exigibles d'un appareil de mesure il est utilisé très fréquemment par les agronomes, son emploi se justifie par la simplicité et le faible cout de l'appareil. La surface évaporant est constituée par un film de papier buvard blanc fixé à l'extrémité du tube en verre en forme de U. ce tube sert à la fois à l'alimentation et à la mesure de l'évaporation [6]. La feuille de buvarde et changée chaque jour après lecture de l'appareil. Le piche est disposé à l'intérieur de l'abri météorologique, voir Figure II.3. La mesure de la quantité évaporée (EP), dépend beaucoup des conditions climatiques, et elle peut être exprimée par la formule suivante, [8]:

$$EP = 0.59(t - tm)u \quad (II.3)$$

Avec :

EP : évaporation piche en mm ;

t : Température de l'aire en °C ;

tm : Température sous abri du thermomètre mouillé °C ;

u : Vitesse du vent à 2 m du sol en m/s.

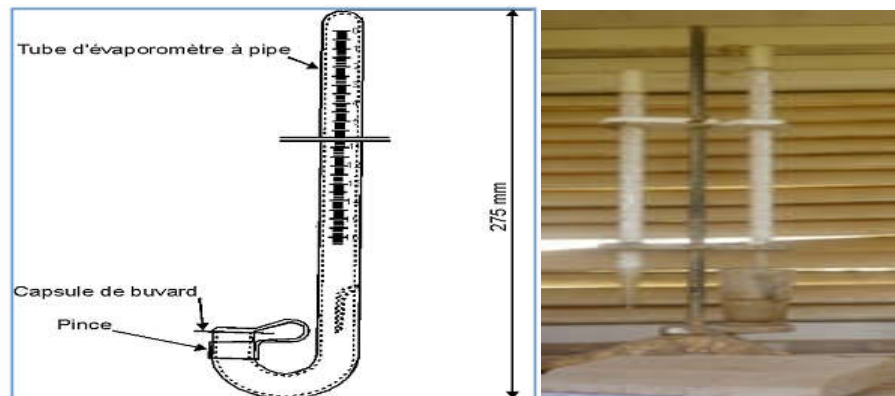


Figure II.4: le Piche

II.3 Méthode d'estimation de ETP

II.3.1 Formule de Thornthwaite (1944)

La formule de Thornthwaite à été la première équation publiée permettant d'estimer l'évapotranspiration, et elle à été développée à partir des mesures sur des cases lysométriques à l'est des USA, et elle est exprimée par la formule suivante :

$$ETP = 16 \cdot \left(\frac{10t}{I}\right)^a \cdot f(h) \quad (II.4)$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm), [9];

I : indice thermique annule, c'est la somme de douze indices mensuels, [10].

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

t : température moyenne mensuelle °C.

f(h) : terme correctif qui tiens compte de la latitude de lieu, [12].

a : fonction complexe de l'indice I , [11].

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5 \quad (II.5)$$

Tableau II.1: coefficient de correction f(h) pour une latitude de 33.20° N

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
f(h)	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.1.05	1.03	0.97	0.88	0.86

II.3.2 Formule de Penman-Monteith-FAO (1998)

Vu la complexité de la mise en œuvre des dispositifs de mesure de ETP, il est presque toujours préférable de recourir à des méthodes d'estimation, on dispose actuellement des formules et des méthodes suffisamment variées, et adaptées à différents climats. La formule Penman-Monteith (F.A.O) est l'une des formules les plus utilisées dans le monde. Elle est exprimée par :

$$ETP = \frac{0.408\Delta.(Rn-G) + \gamma \cdot \frac{900}{t+273} \cdot u_2 \cdot (e_a - e_b)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34u_2)} \quad (II.6)$$

ETP = évapotranspiration potentielle (mm/j) ; [13]

Rn: Radiation nette (MJm⁻²·j⁻¹)

G: Flux de chaleur du sol (MJ⁻²·j⁻¹)

$G = 0.1 R_n$ durant la journée ($rad > 0$)

γ : Constante psychométrique ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$)

$\gamma : 0.665 \times 10^3 \cdot P$

P : Pression (kPa), [14]

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26} \quad (II.7)$$

Z = l'altitude en [m]

Δ : Pente de la pression de la vapeur saturée à la température moyenne l'air ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$) [14]

$$\Delta = 4098 \left[\frac{0.6108 \exp\left(\frac{17.27t}{t+237.3}\right)}{(t+237.3)^2} \right] \quad (II.8)$$

t : Température moyenne de l'air $^\circ C$

u_2 : La vitesse de vent (ms^{-1})

e_a : pression de vapeur d'eau saturante (kPa), [14]

$$e_a = \frac{1}{2} [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] \quad (II.9)$$

e_b : Pression actuelle de vapeur d'eau (kPa), [14]

$$e_b = \frac{1}{2} \left[e_s(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e_s(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100} \right] \quad (II.10)$$

RH_{max} : humidité relative maximale (%), [14]

RH_{min} : humidité relative minimale (%), [14]

II.3.3 Formule de TURC (1962)

Cette méthode fait intervenir la température moyenne mensuelle, la radiation globale du mois considéré et l'insolation relative, dans ce cas l'ETP est exprimée en mm/mois selon les cas suivants :

Si $H_r > 50\%$ on a :

$$ETP = 0.4 \cdot \frac{t}{t+15} (I_g + 50) \quad (II.11)$$

Si $H_r < 50\%$ on a :

$$ETP = 0.4 \cdot \frac{t}{t+15} (I_g + 50) \cdot \left(1 + \frac{50 - H_r}{70} \right) \quad (II.12)$$

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/mois), [15].

H_r : Humidité relative moyenne (%)

t : Température moyenne de l'air °C

Ig : Radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (cal/cm²/jour), [16].

$$I_g = I_g A \left(0.18 + 0.62 \cdot \frac{h}{H} \right) \quad (\text{II.13})$$

IgA : radiation globale théorique en (cal/cm²/jour).

H : durée maximal d'insolation (théorique) en heure par mois.

h : durée d'insolation mesurée pendant le mois considéré en heure par mois.

Tableau II.2: Valeur moyennes mensuelles d'Iga en calories par cm² et par jour pour une latitude de 33.20 °N, [17].

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Iga	456.8	567.8	731.6	863.8	947.8	977.4	956.8	880.2	761	614.8	479.4	415.8

Tableau II.3: Durée mensuelle théorique du jour « H » en heures par mois pour une latitude de 33.20 °N, [17].

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
H	316.8	309.4	309.4	390.6	432.2	431	438	415.4	371.8	352.4	312.8	308

L'utilisateur de ces modèles nécessite la connaissance de certaines données climatiques telles que, la température moyenne mensuelle de l'air, l'humidité relative moyenne mensuelle, la vitesse du vent, les radiations solaires globales et les durées d'ensoleillement,

CHAPITRE III

Cadre climatique de la région d'étude

Chapitre III : Cadre climatique de la région d'étude

III.1 Introduction

Les conditions climatiques varient d'une région à une autre en fonction de leurs situations géographiques en latitude et en longitude et de leurs élévations par rapport au niveau de la mer. Ces composés spécifiques aux régions ont un impact significatif sur les conditions climatiques et météorologiques. Le climat donne une image générale et complète du temps dans cette région pendant de longues périodes, tandis que le temps (ou la météo) donne une image temporaire des conditions atmosphériques tels que la température, la pression, l'humidité relative, le couvert nuageux, les irradiations solaires, la vitesse et direction de vent, etc. Notre étude vise à caractériser l'influence de certains de ces paramètres atmosphériques sur le taux de d'évaporation mesurée par l'instrument de Piche du lieu Touggourt à climat saharien, au cours de la période entre 2003 à 2015, soit 13 ans.

III.2 Présentation de la région Touggourt

III.2.1 Situation géographique

La région de Touggourt est située au nord-est de l'Algérie, aux coordonnées géographiques 33.20° N, 6.08° E à une altitude de 85 m au-dessus du niveau de la mer. La région de Touggourt est un ensemble d'oasis situé à la bordure occidentale de la chaîne de dunes, celle de « Grand erg Oriental ». La région s'étend sur environ 140 km du nord au sud, le long de la vallée d'oued Righ dont les eaux suivent pour l'essentiel un cours souterrain. La région de Touggourt est limitée administrativement au nord par la commune de Djamaa, à l'Est par la commune de Taibat, au sud par la commune Hassi Messaoud. Alors qu'en examinant la topographie de cette région on constate que c'est une zone de dépression, bordée au nord par les massifs de Ziban, à l'est par les grands alignements dunaires d'Erg Oriental, au sud par les oasis d'Ouargla, et à l'ouest par El-Hadjira, [21].

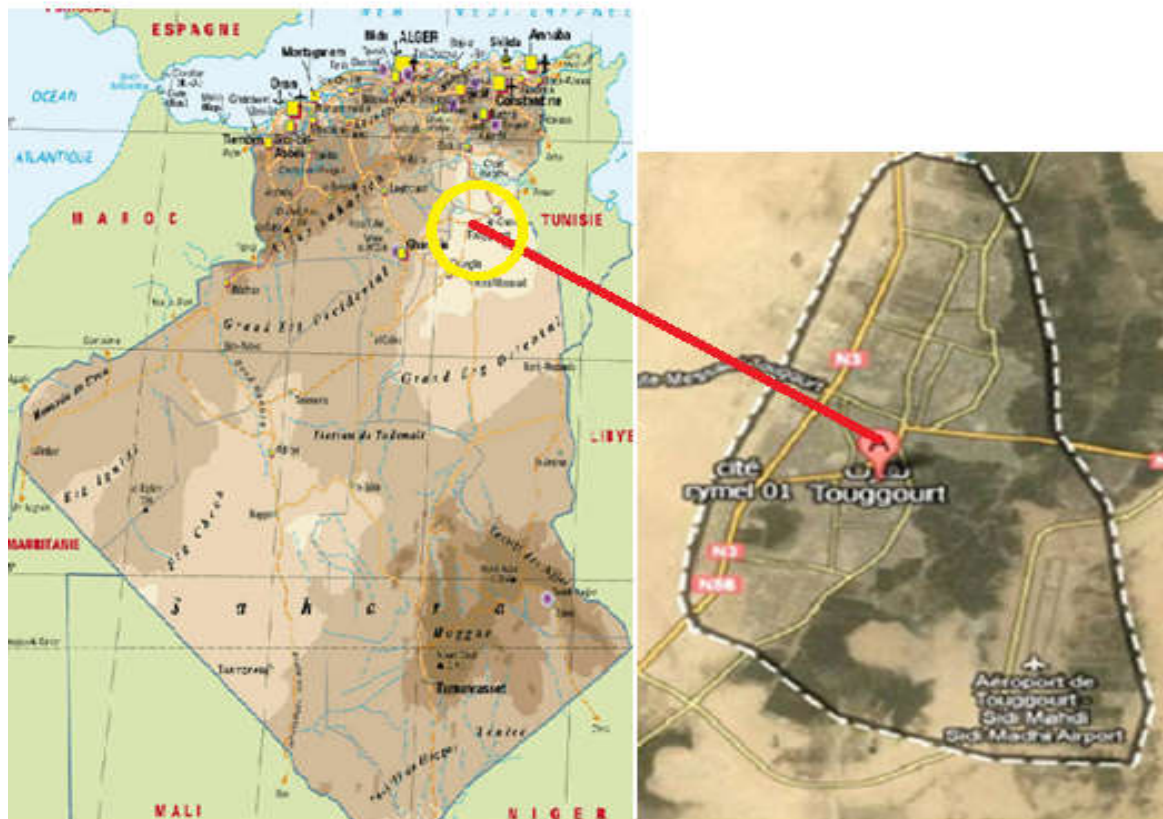


Figure III.1: Situation géographique de la région de Touggourt.

III.2.2 Cadre climatique

Dans le but d’identifier le caractère climatique de la région de Touggourt, nous allons exposer les régimes mensuelles des principaux paramètres climatiques, tels que : le régime de pluviosité, de la température, de l’évaporation, de l’humidité relative et de la durée d’insolation.

III.2.2.1 Précipitation: Les précipitations sont très rares et irrégulières, leurs répartition et marquée par une sécheresse quasi absolue aux mois d’été, autour de 1 mm pour le mois de juillet, et un maximum pour le mois de janvier avec 13.2 mm, voir Figure III.2. Le cumul annuel des précipitations est de l’ordre de 75 mm (Tableau III.1).

Tableau III.1: Précipitations mensuelles. Touggourt au cours de la période 2003 à 2015.

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
P(mm)	13.25	4.43	6.07	7.31	1.77	1.61	1.01	3.58	5.28	5.9	20.05	4.66

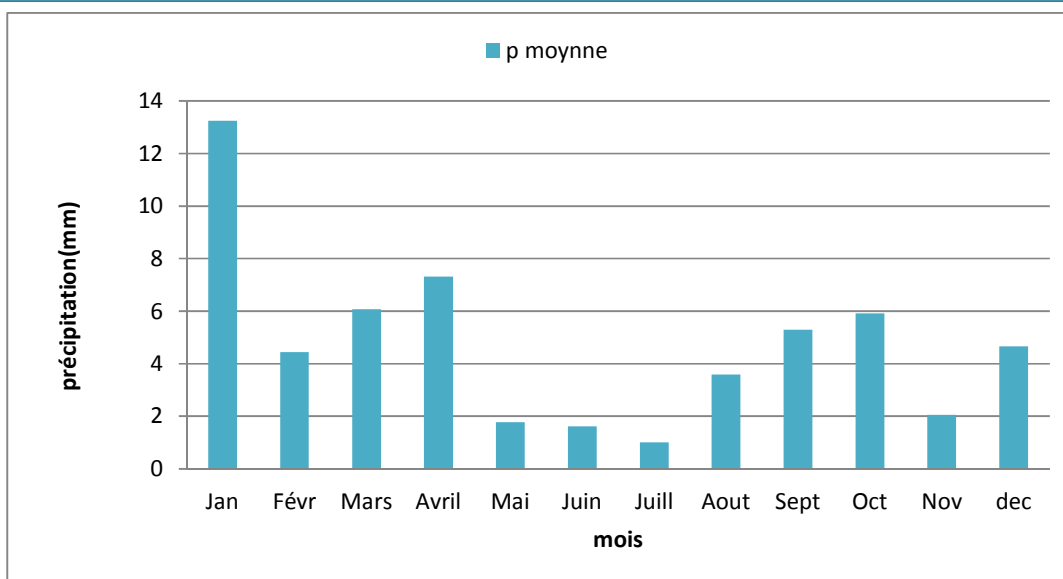


Figure III.2 : Précipitations moyenne mensuelles enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 - 2015

III.2.2.2 Température: Le Tableau III.2 indique que la température moyenne minimale est enregistrée en janvier avec 10.69 °C, et la température moyenne maximale est enregistrée en juillet avec 34.15 °C, voir également Figure III.3.

Tableau III.2: Température moyenne mensuelles, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 - 2015

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
T (°C)	10.69	13.46	17.92	21.73	26.66	31.30	34.15	33.71	29.3	23.50	16.35	13.65

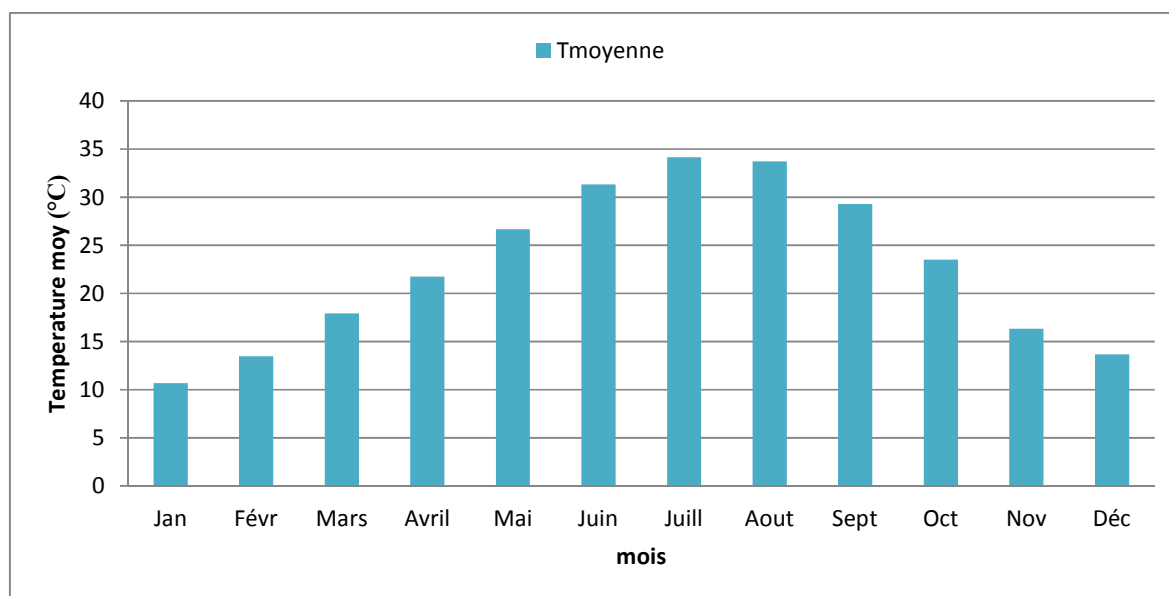


Figure III.3 : Température moyenne mensuelle à la station de Touggourt au cours la période 2003 - 2015

III.2.2.3 Détermination des périodes sèches et de l'étage bioclimatique de la région de Touggourt

Le diagramme d'ombrothermique de GAUSSEN permet déterminer les périodes sèches et humides d'une région quelconque à partir des séries de précipitation et de température (paramètres en valeurs moyennes mensuelles). Le principe de calcul est selon l'équation (III.1) suivante, [22] :

$$P = 2T$$

(III.1)

P: Précipitation moyenne mensuelle (mm)

T: température moyenne mensuelle (°C)

Si la courbe des précipitations est au dessus de la courbe de la température la période est humide si non elle est sèche. On constate, d'après Figure III.4 suivant, que la région de Touggourt est totalement sèche tout au long de l'année, aucune période humide n'était observée. Ceci confirme l'aspect saharien de la région.

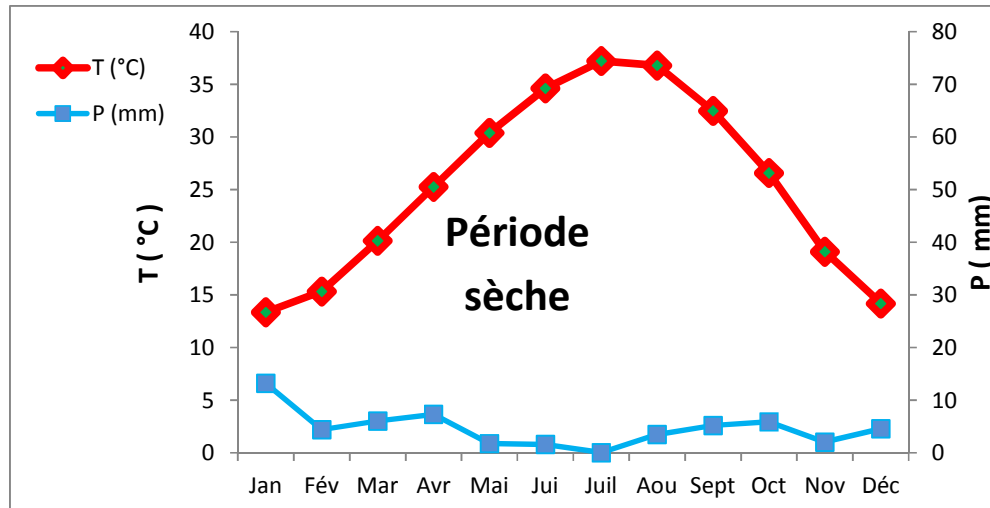


Figure III.4: Diagramme ombrothermique de « GAUSSEN » pour la région de Touggourt.

Concernant l'étage bioclimatique de la région de Touggourt, nous avons utilisés le diagramme d'Emberger. On reportant en abscisses les valeurs moyennes des températures minimale du mois le plus froid et en ordonnées les valeurs de quotient pluviométrique (Q_2) calculé par l'équation de Stewart suivante, [23] :

$$Q_2 = 3.43 \frac{p}{M-m}$$

(III.2)

Avec :

p : cumule pluviométrique annuel en mm.

M : moyenne des températures maximale du mois le plus chaud (°C)

m : moyenne des températures minimale du mois le plus froid (°C)

Q_2 : quotient pluviométrique en $\text{mm}/^\circ\text{C}$.

Pour le cas de la station de Touggourt au cours la période 2003 - 2015, on trouve pour $Q_2 = 6.709 \text{ mm} / ^\circ\text{C}$ et $t(m)=10.69 ^\circ\text{C}$ que la région se trouve dans l'étage bioclimatique « saharienne très chaud », voir Figure III.5.

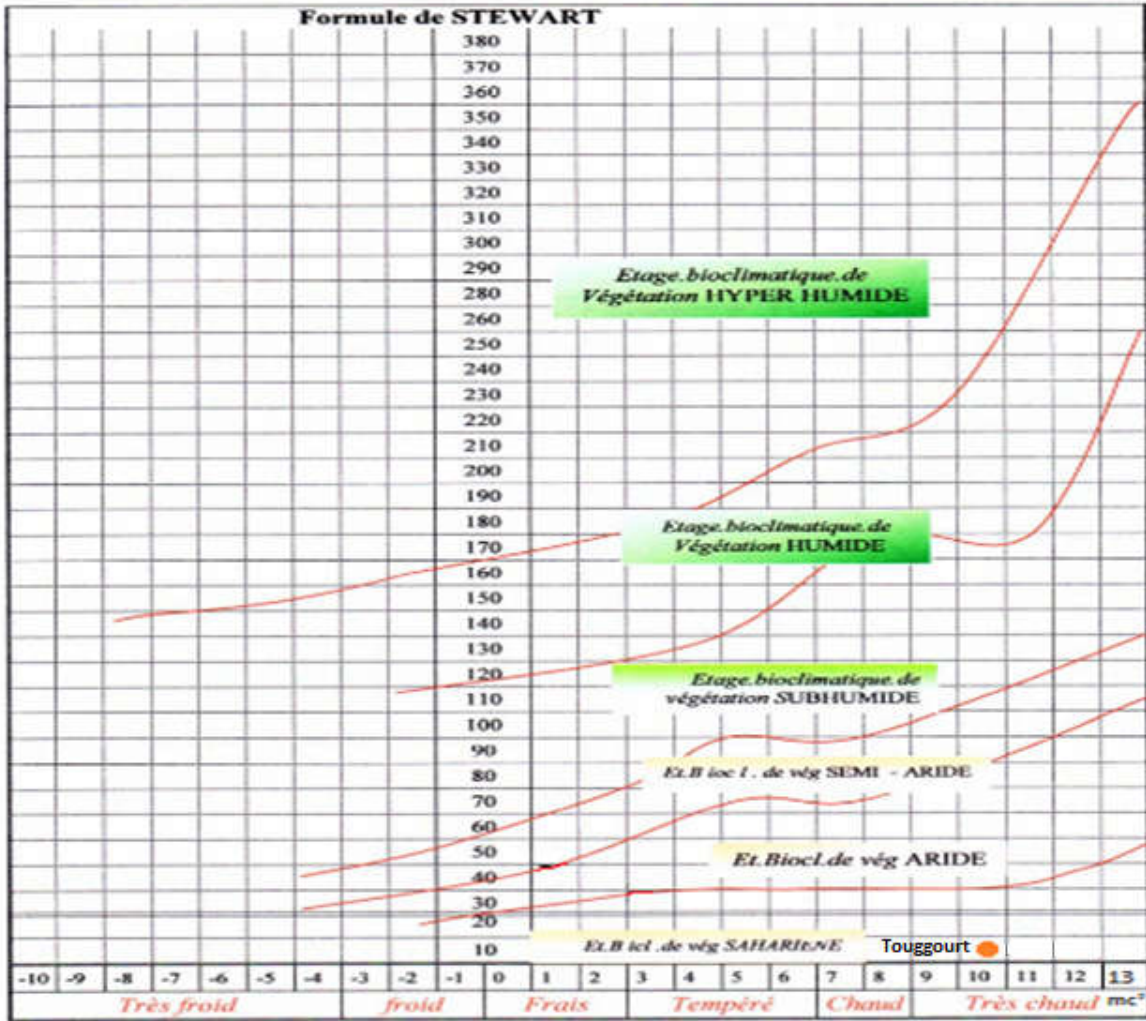


Figure III.5 Diagramme d'Emberger à la région de Touggourt.

III.2.2.4 Evaporation :

L'évaporation est très importantes aux mois chauds de l'été, on remarque que le maximum des moyennes mensuelles d'évaporation est atteint en mois de juillet avec 319.49 mm et le minimum au mois de janvier avec 80.44 mm, voir Tableau III.3 représenté par Figure III.6.

Tableau III.3 : Evaporation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 - 2015

mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
E(mm)	80.44	107.3	145.52	197.3	228.76	281.54	319.49	276.39	218.95	165.83	121.25	79.39

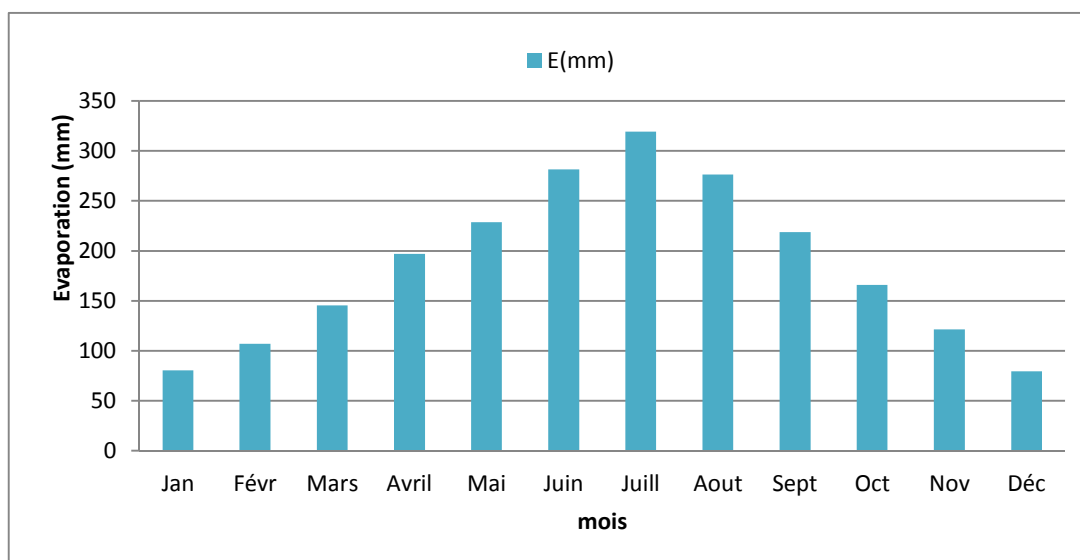


Figure III.6: Evaporation moyenne mensuelle pour la station de Touggourt au cours la période 2003- 2015

III.2.2.5 Humidité relative

L'effet de l'humidité relative HR (%) de l'air en particulier sur l'évaporation peut s'exprimer à l'aide de la loi de Dalton. Celui-ci avait mis en évidence, que si tout les autres facteurs restent invariables, le taux d'évaporation d'une surface libre est inversement proportionnel à l'humidité relative de l'air. Pour le cas de la région de Touggourt l'humidité relative H est maximale pour les mois d'hiver qu'aux mois d'été. La valeur maximale est enregistrée au mois de janvier de valeur égale à 64.4 % et la valeur minimale au mois de juillet (le mois le plus chaud) de valeur égale près de 30 %, voir Tableau III.4 représenté par Figure III.7.

Tableau III.4 : humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.

mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
HR(%)	64.42	53.96	47.33	41.21	37.04	32.92	29.69	32.73	42.84	49.81	56.46	64.29

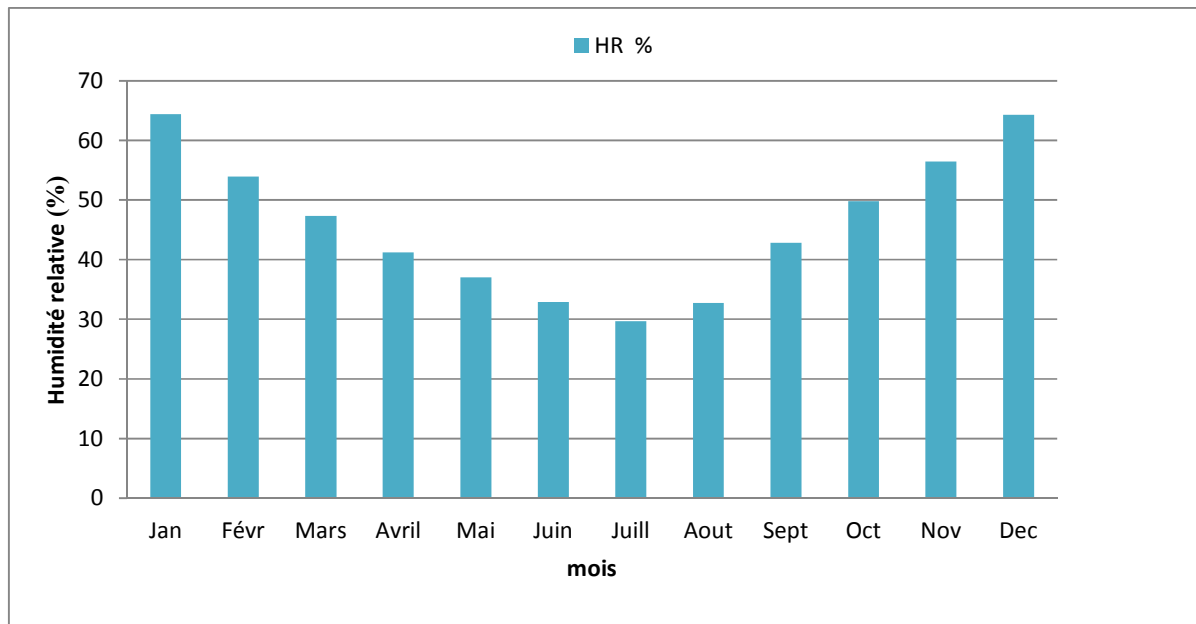


Figure III.7: Humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015

III.2.2.6 La durée d'insolation

L'insolation est la durée d'apparition du Soleil, elle est exprimée en heures. Elle varie en fonction de latitude et le taux de couverture nuageux. La région de Touggourt reçoit une quantité d'insolation relativement très forte. On note que le mois de juillet et le plus ensoleillé d'une durée mensuelle de 366.6 heures et que le mois de décembre et le mois le moins ensoleillé d'une durée de 214.3 heures. Voir Tableau III.5 et Figure III.8.

Tableau III.5 : Insolation moyenne mensuelle en heures, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015.

mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$\sigma(h)$	230.88	224.01	263.35	283.43	315.73	323.40	366.6	335.23	266.50	253.93	237.06	214.34

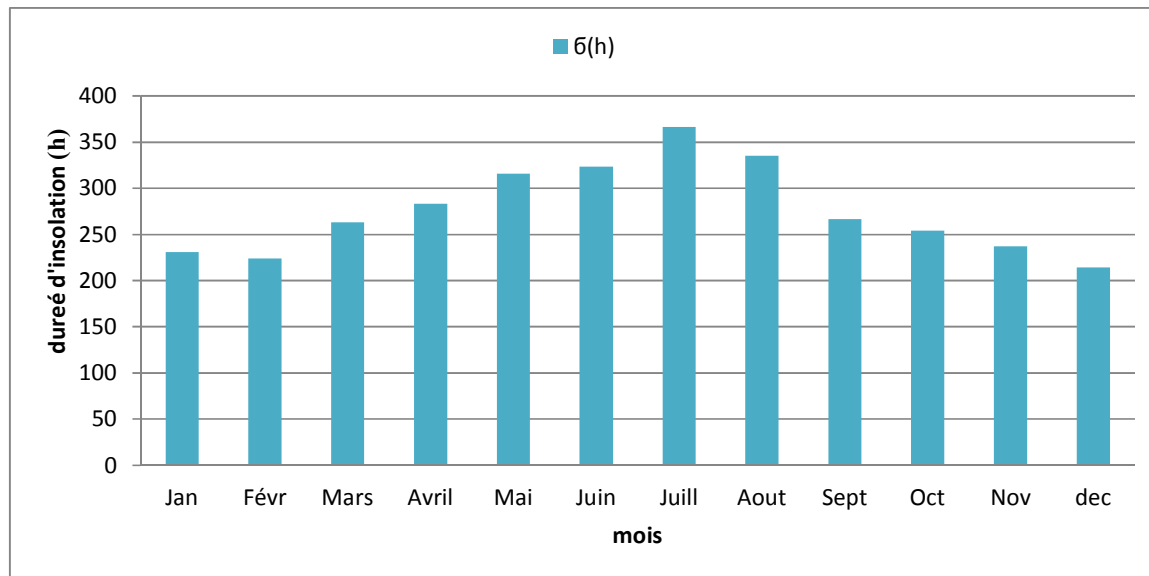


Figure III.8 : Durée d'insolation moyenne, enregistrées à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015

III.3 Effet des paramètres atmosphériques sur le taux d'évaporation

Pour compléter notre étude climatique sur la région de Touggourt, nous allons étudier l'effet sur le taux d'évaporation (EP) de certains paramètres atmosphériques, tels que la température $T(^{\circ}C)$ la vitesse de vent $V(m/s)$ et l'humidité relative HR contrôlée par la tension de vapeur d'eau saturante $es(hPa)$.

III.3.1 Taux d'évaporation et température de l'air

Les deux paramètres sont comparés en valeurs moyennes mensuelles au cours de la période 2003 à 2005, voir Figure III.9. On note que :

- L'évolution de la température mensuelle est quasi similaire que celle de l'évaporation de Piche.
- Les valeurs élevées de la température pendant les mois d'été (juin, juillet, août), conduisent aux valeurs maximales de l'évaporation.
- Les valeurs basses de la température pendant les mois de l'hiver (janvier, février et décembre) conduisent aux valeurs minimales de l'évaporation.

- Le coefficient de corrélation entre la température $T(^{\circ}C)$ et l'évaporation (EP) est égale à $R = 0.97$. Une très bonne corrélation entre les deux paramètres, ceci explique l'effet important de la température sur le taux d'évaporation de Piche.

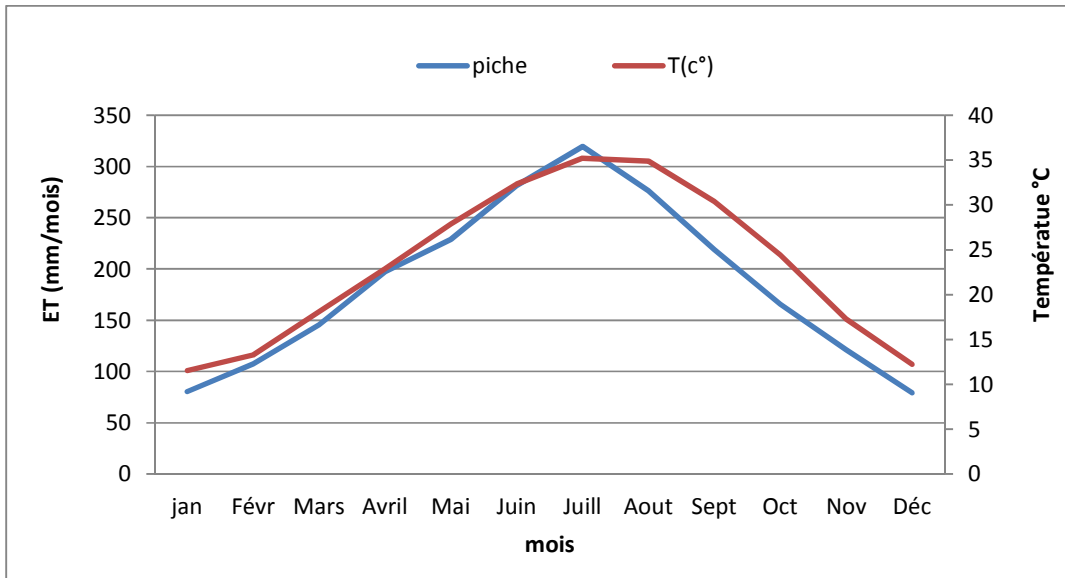


Figure III.9 : Evolution mensuelle de taux d'évaporation et de la température, à la région de Touggourt au cours la période 2003 – 2015

III.3.2 Taux d'évaporation et vitesse de vent

Généralement les vents en particulier chauds ont une influence important sur les taux d'évaporation des surfaces d'eau libre exposées à l'air atmosphérique. Cependant l'instrument de Piche mis à l'abri est protégé contre les turbulences de l'air. Les deux paramètres sont comparés en valeurs moyenne mensuelles au cours de la période 2003 à 2005, voir Figure III.10. On note que:

- la vitesse de vent et taux d'évaporation n'ont une tendance similaire, comme celle vue avec la température;
- De janvier au mai, la vitesse du vent enregistre ces valeurs maximal et atteint sa valeur maximale en mois d'avril avec 3.8m/s, mais l'évaporation (piche) atteint ses valeurs maximales aux mois de juin, juillet et aout, où la vitesse de vent tend à ce diminuée.

- Le coefficient de corrélation entre la vitesse de vent $V(m/s)$ et le taux d'évaporation (EP) en moyenne mensuelle est égale $R = 0.46$. Cette faible valeur est expliquée par le fait que l'instrument de Piche est protégé contre les courants d'air, il est à l'abri.

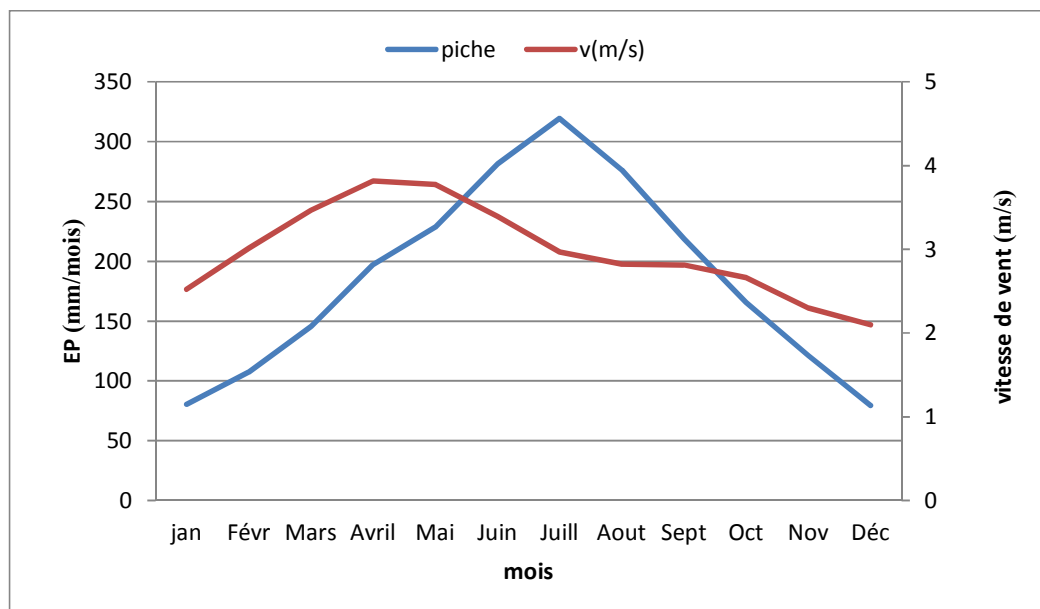


Figure III.10: Evolution mensuelle de taux d'évaporation et de la vitesse de vent, à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015

III.3.3 Taux d'évaporation et tension de vapeur d'eau

La tension de vapeur d'eau saturante es (hPa) est l'humidité relative de l'air $HR(\%)$ sont inversement proportionnelles (Equation I.2 §I.5.1.3), où HR est parmi les facteurs qui contrôlent le processus de l'évaporation. Des faibles valeurs de HR à l'été correspondent à des valeurs de $es(hPa)$ et des taux d'évaporation élevés. Voir Figures III.7 & III.11. On note pour Figure III.11 que :

- La tension es (hPa) présente une allure presque similaire que le taux d'évaporation EP (mm).
- En général, leurs valeurs maximales sont enregistrées aux mois d'été, août pour la tension es (hPa) et juillet pour le taux d'évaporation EP (mm)
- Cependant les valeurs minimales de es (hPa) et de taux d'évaporation EP (mm) sont enregistrées à tous les deux aux mois de l'hiver (décembre, janvier et février) ;

- Le coefficient de corrélation entre la tension de vapeur d'eau saturante es (hPa) et le taux d'évaporation (EP) en moyenne mensuelle est égale $R = 0.95$. Une bonne corrélation entre les deux facteurs, ce qui montre l'effet important de la tension es (hPa) sur le phénomène d'évaporation.

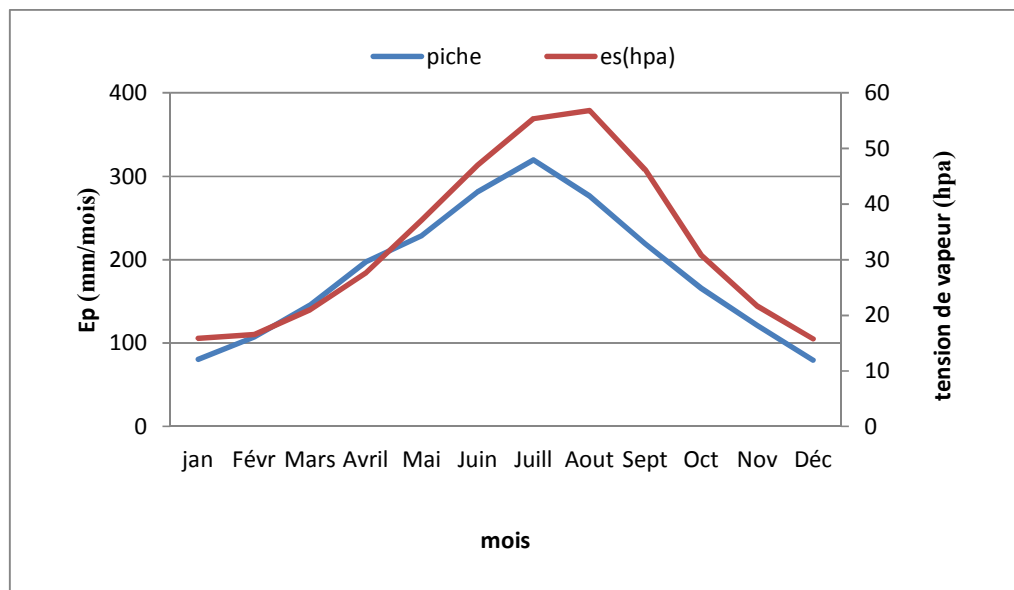


Figure III.11 : Evolution mensuelle de taux d'évaporation et de la tension de vapeur saturante, à la station de Touggourt au cours la période 2003 – 2015

On remarque que la température et la tension de vapeur saturante sont les facteurs climatiques qui ont une influence le plus important sur le taux d'évaporation mesurée par l'instrument de Piche. Cependant la vitesse de vent son influence est modérée vue que l'évaporimètre de Piche est protégé contre les turbulences de l'air.

CHAPITRE IV

*Comparaison de l'évaporation mesurée
avec les méthodes*

d'estimation de l'évapotranspiration

Chapitre IV : Comparaison de taux d'évaporation mesuré avec les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration

IV.1 Introduction

Les mesures de l'évaporation à partir de l'évaporomètre de Piche installé à l'Institut National des recherches Agricole (INRA, Sidi Mahdi, Touggourt) ont été confrontées avec les valeurs de l'Evapo-Transpiration Potentielle (ETP) estimées par certaines méthodes tels que: Thornthwaite (1944), Turc (1962), et Penman-Monteith (1998); en se basant sur les mesures météorologiques collectées de la station comme la température, l'humidité relative, la vitesse du vent, et la durée d'insolation.

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

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

Les valeurs moyennes mensuelles au cours de la période (2003 – 2005) de l'évaporation mesurée *EP (Piche)* et ceux estimés ETP (Thornthwaite), ETP (Turc) et ETP (Penman-Monteith) sont présentées par Figure IV.1. On note que :

- Les quatre séries de l'évaporation (Piche, Thornthwaite, Penman-Monteith et Turc) ont toutes des tendances similaires : les faibles valeurs concernent les mois d'hiver et les fortes valeurs marquent les mois d'été, avec un maximum pour l'ensemble des séries concerné le mois de juillet.
- Cependant le rapprochement des valeurs estimées avec les mesures sont différentes.
- Le bon rapprochement concerne la méthode de Penman-Monteith et le moins bon concerne la méthode de Thornthwaite, la méthode de Turc occupe une position intermédiaire.

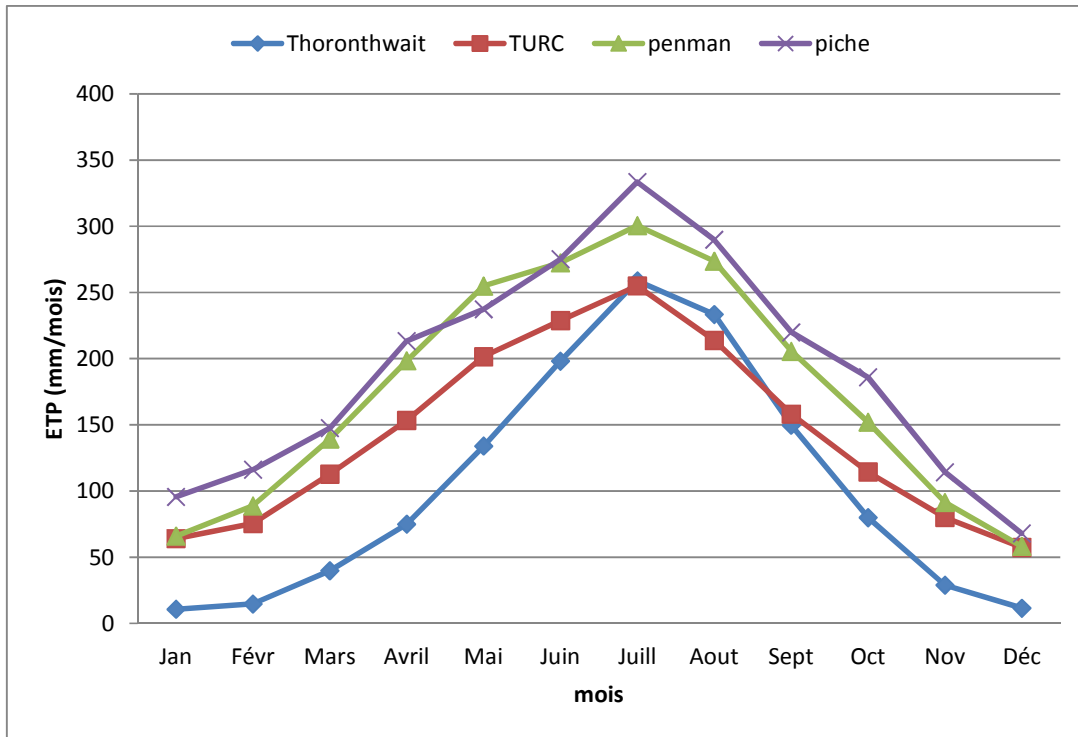


Figure IV.1 : Evolutions moyennes mensuelle des ETP estimées et de l'évaporation de Piche, pour la région de Touggourt au cours de la période (2003 - 2015).

IV.3 Analyse descriptive

Tableau IV.1 représente les statistiques descriptives qui sont les moyennes, les écart-types et les intervalles de confiance pour chaque groupe (ETP Thoronhwait, ETP Turc, ETP Penman-Monteith et ETP Piche), produites par le logiciel SPSS « Statistical Package for Social Sciences software IBM SPSS, version 20. ».

Le calcul de l'ETP a concerné quatre modèles. Il s'agit de l'ETP obtenue par les formules de *Thoronhwait*, de *Turc* et de Penman-Monteith ainsi que l'ETP mesurée par le *Piche* in situ (Tableau IV.1). Les valeurs de l'ETP *Thoronhwait* varient entre 10.76 mm/mois et 258.83 mm/mois, avec une moyenne de 102.98 ± 89.92 mm/mois. L'ETP *Turc* révèle des valeurs comprises entre 57.57 à 255.07 mm/mois, avec une valeur moyenne de 142.95 ± 69.12 mm/mois. Ainsi l'ETP Penman-Monteith les valeurs varient 58.3 à 300.6 mm/mois, avec une valeur moyenne de 175.19 ± 87.7 mm/mois. Il est à noter que les données de l'ETP estimés par l'équation de *Thoronhwait* sont les moins importantes (102.982 ± 89.92) mm/mois, alors que celles obtenues par le Piche sont les plus fortes

(191.47±84.36) mm/mois. Cet essai montre que le modèle de Penman-Monteith avec (175.19±87.7) mm/mois donne les résultats les plus proches aux observations réelles (Piche).

Tableau IV.1: Caractéristiques descriptives des variables statistiques et valeurs extrêmes de l'ETP des quatre modèles

Paramètres Modèles	N	Moy.	Ecart-type	Erreur standard	Intervalle de confiance à 95% pour la moyenne		Min.	Max.
					Borne inférieure	Borne supérieure		
<i>ETP Thornthwait</i>	12	102.98	89.91	25.95	45.84	160.11	10.76	258.83
<i>ETP Turc</i>	12	142.94	69.11	19.95	99.03	186.86	57.57	255.07
<i>ETP PenmanMonteith</i>	12	175.19	87.68	25.31	119.47	230.90	58.30	300.60
<i>ETP Piche</i>	12	191.46	84.36	24.35	137.86	245.06	68.16	333.58
Total	48	153.14	87.42	12.61	127.76	178.53	10.76	333.58

IV.4 Erreur relative entre l'évaporation mesurée et les estimations de d'ETP

L'erreur relative ER entre l'évaporation mesurée (Piche) et les estimations de d'ETP, peut être calculé par l'équation (IV.1) suivante :

$$ER = \frac{(ETP(Piche) - ETP_i)}{ETP(Piche)} * 100\% \quad (IV.1)$$

ETP_i : ETP estimée respectivement par la méthode de Thornthwaite ($i=1$), Turc ($i=2$) et Penman-Monteith ($i=3$).

ETP : l'évaporation de Piche.

ER : Erreur relative (%).

Nous avons appliqué par la méthode pour l'erreur relative.

Figure IV.2 suivant donne les valeurs mensuelles de l'erreur relative ER entre l'évaporation de Piche est respectivement les estimations de Thornthwaite, Turc et Penman-Monteith. On note que :

- Pour Thornthwaite ER est entre [19 à 89] %.
- Pour Turc ER est entre [15 à 38] %.
- Pour Penman- Monteith ER est entre [-7 à 30] %.

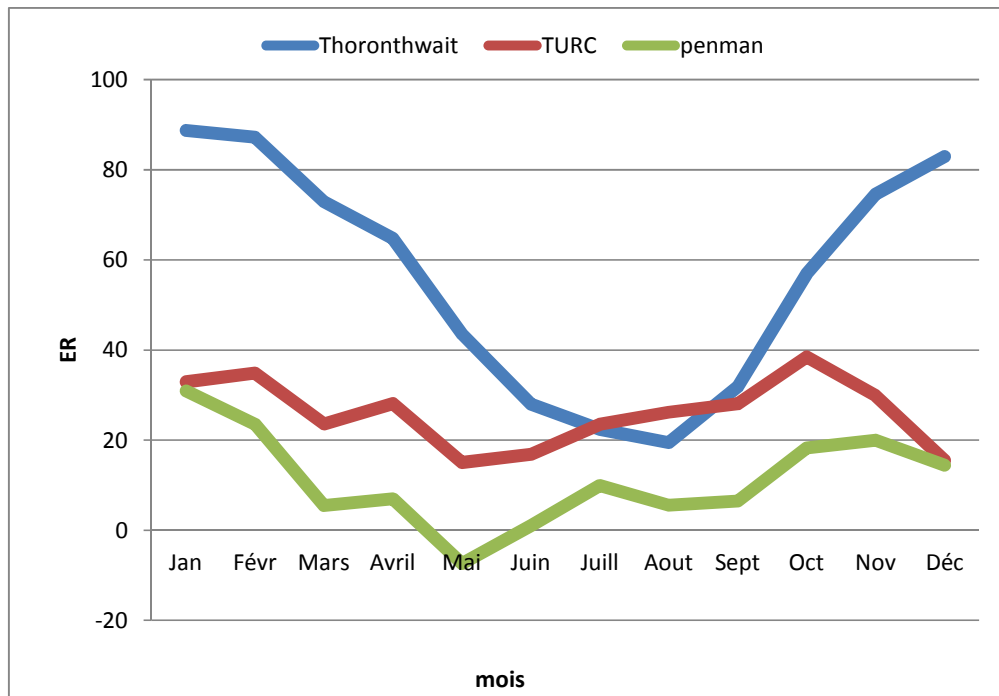


Figure IV.2: Erreurs relatives mensuelles entre l'évaporation mesurée et les estimations de d'ETP pour la région de Touggourt au cours de la période 2003 – 2015

On confirme encore une fois que la méthode de Penman- Monteith présente pour chaque mois le minimum d'erreur relative, c'est la méthode la plus appropriée comme alternative en cas d'absence des mesures réelles.

IV.5 Corrélation entre l'évaporation mesurée et les estimations d'ETP

Les corrélations entre l'évaporation mesurée et les estimations d'ETP, respectivement Thornthwaite, Turc et Penman-Monteith sont présentés respectivement par les figures IV.3, IV.4 et IV.5 suivants. Les corrélations sont mentionnées par le coefficient de détermination R^2 .

Vous avons remarqué la méthode.

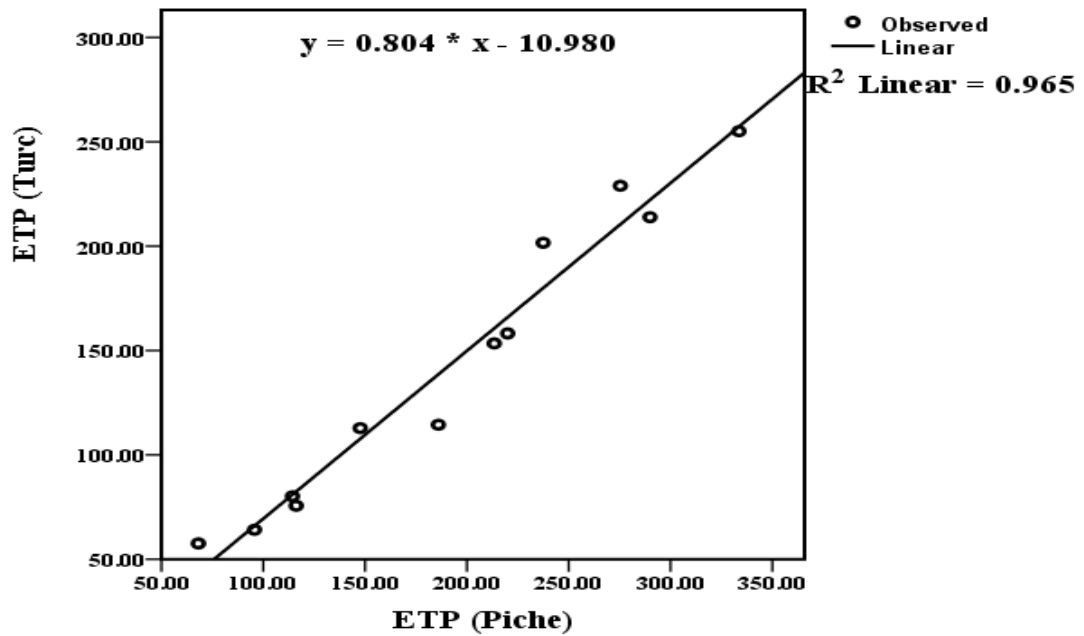


Figure IV.3 : Corrélation entre l'évaporation mesurée et ETP (Turc)

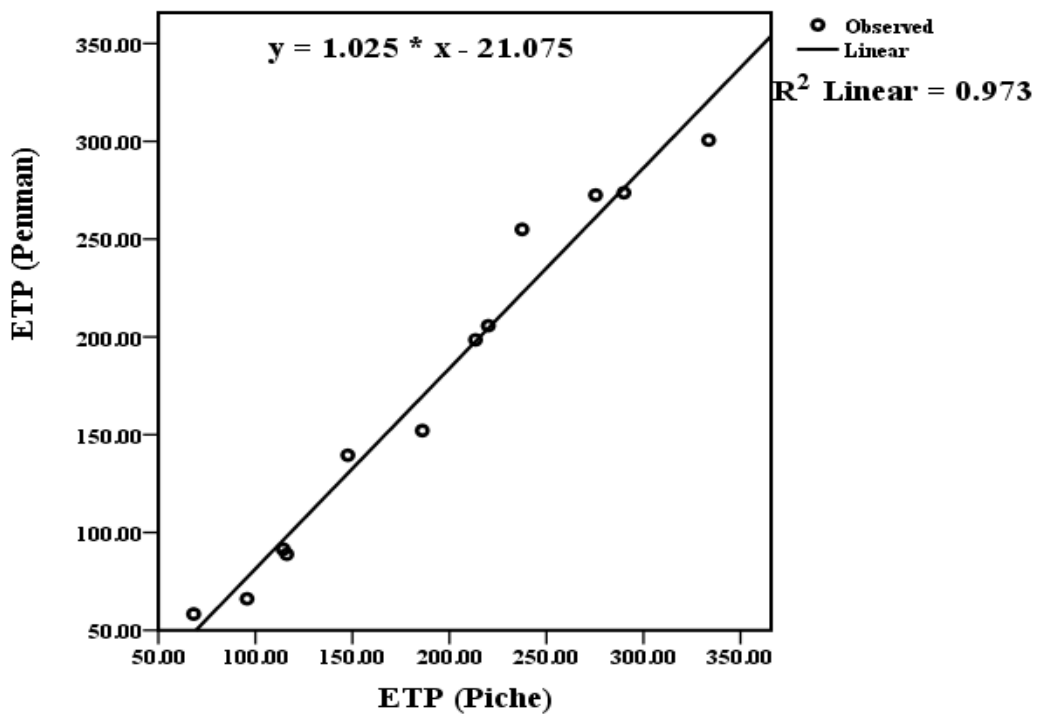


Figure IV.4 : Corrélation entre l'évaporation mesurée et ETP (Penman-Monteith)

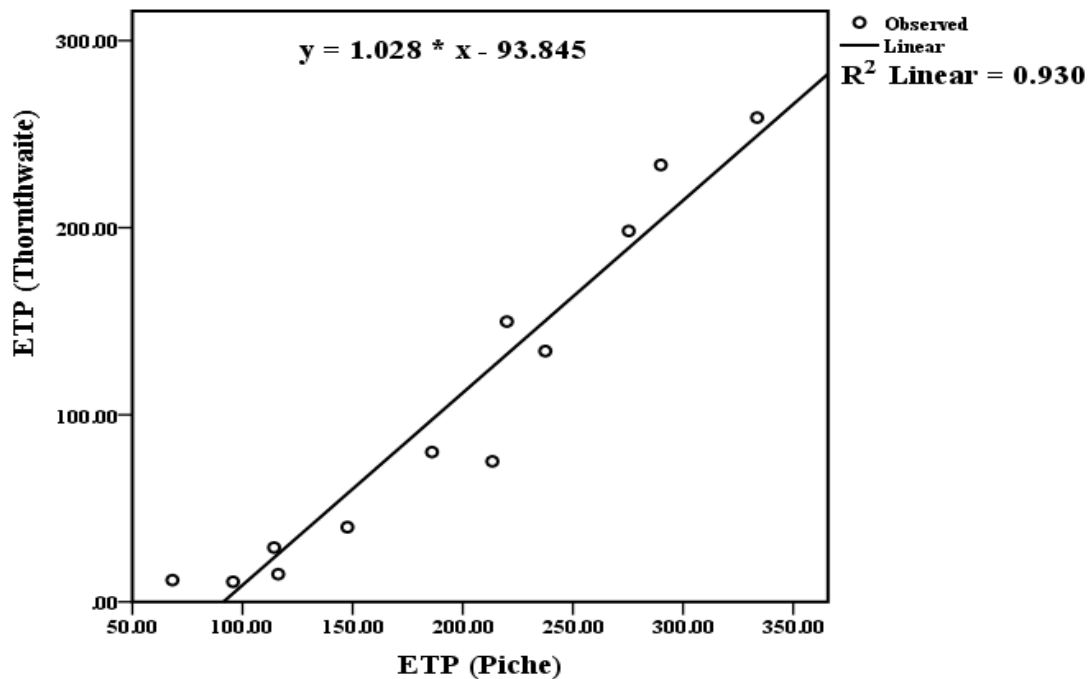


Figure IV.5 : Corrélation entre l'évaporation mesurée et ETP (Thornthwaite)

Les relations entre l'évaporation mesurée et les méthodes d'estimation d'ETP sont linéaire, chacune peut être représentée par une équation linéaire de la forme $y=ax+b$. Tableau IV.2 résume pour chaque méthode les paramètres a et b ainsi le coefficient de détermination correspondant.

Tableau IV.2: Corrélation entre l'évaporation mesurée et les méthodes d'estimation d'ETP

Méthode	Equation	R^2
Turc	$ETP (Tu) = 0.804 ETP (Piche) - 10.98$	0.96
Penman-Monteith	$ETP (Pen) = 1.025 ETP (Piche) - 21.07$	0.97
Thornthwaite	$ETP (Th) = 1.028 ETP (Piche) - 93.85$	0.93

D'après Figure IV.2 et Tableau IV.1, on peut conclure que la méthode de Penman-Monteith est la méthode la plus recommandée dans les estimations des taux

d'évaporation, indispensables aux estimations des besoins en eau pour la croissance des végétations et des cultures agricoles.

Conclusion générale

L'évapotranspiration est une étape importante du cycle de l'eau : c'est le processus de transfert de l'humidité de la terre vers l'atmosphère par l'évaporation de l'eau et la transpiration des plantes. Ce travail avait comme objectif de choisir d'une façon raisonnable entre trois méthodes d'estimation de taux d'évaporation, à rappeler Thornthwaite (1944), Turc (1962), et Penman-Monteith-FAO (1998) et d'en recommander la plus appropriée à être comme alternative en cas d'absence des mesures réelles. Ceci s'avère nécessaire dans les estimations des besoins en eau des plantes et les cultures irriguées. L'étude était au sein de l'institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA), installé dans la circonscription *administrative de Touggourt* (Willaya de Ouargla), et la période d'étude était entre 2003 à 2015, soit 13 ans.

Les résultats ont montrés que la méthode que:

- Les quatre séries de l'évaporation (Piche, Thornthwaite, Penman-Monteith et Turc) ont tous des tendances similaires : les faibles valeurs concernent les mois d'hiver et les fortes valeurs marquent les mois d'été, avec un maximum pour l'ensemble des séries concerne le mois de juillet.
- Cependant le rapprochement des valeurs estimées avec les mesures sont différentes. Le bon rapprochement concerne la méthode de Penman-Monteith et le moins bon concerne la méthode de Thornthwaite, la méthode de Turc occupe une position intermédiaire.
- La méthode de Penman - Monteith présente pour chaque mois le minimum d'erreur relative.
- Les relations entre l'évaporation mesurée et les méthodes d'estimation d'ETP sont linéaire, dont la méthode Penman – Monteith présente le meilleur coefficient de détermination $R^2 = 0.97$, ensuite celle de Turc $R^2 = 0.96$ et enfin Thornthwaite $R^2 = 0.93$.
- La méthode de Penman-Monteith, est recommandée comme la méthode la plus appropriée à être une alternative aux mesures, non seulement pour la région

de Touggourt mais à travers toute la région de Oued-Righ, vue la ressemblance en terme des conditions climatiques.

Nous recommandant pour la suite de cette étude de l'appliquer sur d'autres lieux à climat différent, pour confirmer les résultats obtenus.

Références

- [1]-M.BONNET, M. DELAROZIERE, O.BOUILLIN ,CI .JUSSRAND, ROUX. P , 1970. Calcul automatique des bilan d'eau mensuels et annuels par les méthodes de thornthwaite et de turc , BRGM , PARIS ,p21.
- [2]-Travaux pratiques du cours d'hydrogéologie, Cycle hydrologique et bilans en eau d'un bassin, Université de liège.p7.
- [3]-Aude Niveau -MCF IC2MP Hydrata ,en Eau. L1 SVG - UE « Crises et Ressources de la Terre » .p19
- [4]- Pierluigi, C. Pascale , S. Anneliez ,H. Christoff ,A .2011. L'évapotranspiration de référence et son application en agro météorologie. p176.
- [5]- RQUIER, J. Formule d'évapotranspiration, En Annexes tables utilisables P , Madagascar .p18
- [6]- 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.
- [7]- LABORDE, J.P .Sophia, A . 2000. éléments d'hydrologie de surface, U.M.R. 5651 "Espace" du C.N.R.S, p204.
- [8]- Charles ,O .Maurice , P ,1983 . les réseaux d'irrigation téhorie, Thechnique et économie des arrosages, boulevard saint germain ,paris , p141
- [9]- Valérie Borrelli, E., 2011. L'évapotranspiration . université Montpellier, p23
- [10]-OUTELDJAOUI, F. BESSENASSE,M . GUENDOOUZ.2011, Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa) , Université Saad Dahl ab , BLIDA ,P116
- [11]- ERIC ,G . CHRISTIAN M , JCQUES M .2008 .Hydrogeology objects methods .application ,DUNOD,PARIS , P 354.
- [12]-ANDRE ,M . CHRISTOPHE, H. 2004 .Hydrologie une science de la nature , presses polytechniques et universel la mature sitaires romandes , p 310.
- [13]- évaluation des quntites necessare aux irrigations,1979. Ministère de l'agriculture C.T.G.R.E.F ,Afrique ,p300.
- [14]- Abdelwaheb,S. Maitre. C, 2002. l'hydrologie de surfce , La Bruyère Bouzaréah Distribution. P157

- [15]-ANCHTIL ,F . ROUSELLE , J.LOUZON , N.2012. Hydrologie presse Internationale polytechnique ,CANNADA, P 391
- [16]-ANCHTIL ,F . ROUSELLE , J.LOUZON ,N .2007.Hydrologie presse Internationale polytechnique, CANNADA , P 317
- [17]- CHEHATF. ABDELFETTAH, M.2015, INSCICUC NATIONAL DE LA Recherche Agronomique d'Alger INRA , el-harrache . ALGER. P158
- [18]-Farid. T ,2007. Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso , Université de Liège p 133
- [19]-Aldoma y .M.2017,l'évaporation dans le bilan hydrologique des étangs du Centre-Ouest de la France (Brenne et Limousin) ,<https://tel.archives.fr/tel-01661489>, université d'océans ,p332.
- [20]-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 , university kasdi merbah , ouargl .P 97
- [21]-ANRH ,2009.situation géographique, d'Ouargla Touggourt, agence nationale de ressource hydrique,ourgla.
- [23]- w.w.w.com/doc/150591343/Digramme.ombrothermique (mai 2018)

Résumé

L'évapotranspiration (ETP) est un composant important du cycle de l'eau. L'estimation de ce paramètre est nécessaire dans la connaissance des besoins en eau des plantes et des cultures. Nous avons appliqués certaines méthodes d'estimation de l'ETP, tels que Thornthwaite , Turc, Penman-Monteith , pour une région à climat saharien (Touggourt-w-Ouargla). Les résultats ont montrées que la méthode de Penman-Monteith est recommandée comme la méthode la plus appropriée à être une alternative aux mesures

mots clés : Climatologie ; Climat saharien ; Evaporomètre de Piche ; Estimation de ETP.

Abstract

Evapotranspiration (ETP) is an important component of the water cycle. The estimation of this parameter is necessary in the knowledge of the water needs of plants and crops. We have applied some methods of estimating ETP, such as Thornthwaite, Turk, Penman-Monteith, for a region with a Saharan climate (Touggourt-w-Ouargla). The results showed that the Penman-Monteith method is recommended as the most appropriate method to be an alternative to measurements.

keywords: Climatology; Saharan climate; Piche Evaporometer; Estimate of ETP

ملخص

تبخر نتح النبات (ETP) هو مكون مهم في دورة المياه الطبيعية حيث يمكننا تقدير قيمة (ETP) لهدف لمعرفة الاحتياجات المائية للنباتات والمحاصيل ولهذا قمنا بتطبيق بعض الطرق لتقدير (ETP) مثل طريقة Penman-Monteith , Thornthwaite , TURC, في منطقة ذات مناخ صحراوي (Touggourt-w-Ouargla) ولقد أظهرت النتائج البحث المدروسة أن طريقة الأنسب من بين هذه الطرائق لحساب تبخر النتح هي Penman-Monteith و يمكن إستخدامها كبديل في القياس.

الكلمات المفتاحية

(ETP) تقدير Piche, مقياس التبخر, علم المناخ, المناخ الصحراوي