

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Kasdi MERBAH Ouargla



Factuelité des Sciences Appliquées
Département de génie mécanique

Mémoire
Master Académique
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Mécanique
Spécialité: Energétique

Présenté par :
Hani Mohammed Abdelbasset
Deblaoui Mohammed

Thème

**Analyse de la variation temporelle de l'évapotranspiration
de référence dans la région de Ouargla .**

Soutenu publiquement
13/06/2018

Devant le jury :

Président	Mr SAGGAI SOFIANE	M.C.A	UKM Ouargla
Examineur	Mm SAIFI NADIA	M.A.A	UKM Ouargla
Encadreur	Mr ZERROUKI MOUSSA	M.C.A	UKM Ouargla

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

REMERCIEMENTS :

Avant tout, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage afin d'accomplir ce modeste travail.

Au terme de cette étude, nous exprimons notre profonde gratitude à notre promoteur Mr ZERROUKI MOUSSA, pour l'encadrement que nous a assuré, pour sa compréhension et sa patience avec nous tout au long de l'élaboration de ce mémoire, et pour ses conseils judicieux.

Nous remercions aussi à Monsieur SAGGAI SOFIANE pour avoir accepté de présider ce jury, nous le prions de trouver ici l'expression de notre respectueuse gratitude.

Nous voudrions également remercier madame SAIFI NADIA pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Sans oublier de remercier nos collègues, les étudiants de la deuxième année master génie mécanique, de la promotion 2017-2018 Nos remerciments vont aussi à toutes nos familles, tous nos amis, celles et ceux qui nous ont apporté leur aide, et tous ceux qui ont contribué par leur soutien de près ou de loin, pour la réalisation de ce travail.

Résume :

Connaître l'évapotranspiration (ET) est très important en matière de planification et de gestion des ressources en eau. À cet effet, plusieurs formules ont été développées pour son estimation. Parmi ces méthodes, celle de PENMAN-MONTEITH est recommandée par la FAO (*Food and Agriculture Organization*) comme modèle de référence du fait de sa performance sous différentes conditions climatiques. Cependant l'application de cette méthode peut être difficile dans certains pays, surtout ceux en voie de développement, où l'accès aux données climatiques est parfois limité. Pour ce faire, les données de variables climatiques journalières (T_{max} , T_{min} , n , HR et u_2) de 12 stations sur la période 2012-2017 ont été utilisées.

Dans cette contribution nous avons fait un calibrage spatial et temporel de l'évapotranspiration dans la région Ouargla, cette étude a pour objet de valoriser l'information thermométrique en se basant toujours sur la formule de PENMAN-MONTEITH de référence et fournir une cartographie fiable et à usage facile.

الملخص:

معرفة التبخر المرجعي مهم جدا في تخطيط وإدارة الموارد المائية. لهذا الغرض ، تم تطوير العديد من الصيغ لتقديرها. ومن بين هذه الطرق ، أوصت منظمة الأغذية والزراعة بمنظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (بنمان مونتيث) كنموذج مرجعي بسبب أدائها في ظل ظروف مناخية مختلفة. ومع ذلك ، قد يكون تطبيق هذه الطريقة أمراً صعباً في بعض البلدان ، لا سيما تلك الموجودة في العالم النامي ، حيث يكون الوصول إلى البيانات المناخية محدوداً في بعض الأحيان. وللقيام بذلك ، تم استخدام بيانات المتغيرات المناخية اليومية من 12 محطة في الناحية ورقلة ومناطق المحيطة لها خلال الفترة 2012-2017.

في هذه المساهمة حققنا معايرة المكانية والزمانية من التبخر في منطقة ورقلة ، وتهدف هذه الدراسة إلى تطوير المعلومات حراري دائما على أساس التبخر المرجعي بصيغة بنمان-مونتيث وتوفير الخرائط الموثوق بها و تسهيل قرائتها.

Abstract :

Knowledge of evapotranspiration (ET) is very important for water resources planning and management. Several methods have been developed to estimate ET. Among them the PENMAN-MONTEITH method is recommended by the Food and Agriculture Organization as a reference method. However, its use is difficult in some areas particularly in developing countries where climate data are not always available. One of the alternatives is then to use methods integrating fewer climatic variables. This study aims to evaluate alternative evapotranspiration methods and to calibrate and validate the two best ones. Daily climate data (T_{max} , T_{min} , n , RH and u_2) of 12 stations from 2012 to 2017 were used.

In this research, we were calibrating some formulas commonly used to estimating the evapotranspiration data in month scale and geographic zone on region Ouargla. Using Penman-Monteith reference formula, the calibration gives some maps characterized by an easy learning.

Sommaire:

Titre	Page
Remerciements	I
Résumé	II
Sommaire	III
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VI
Nomenclature	VII
Introduction générale	1
Chapitre I : étude bibliographique	
I.1. Introduction	2
I.2. Définitions	2
I.2.1.Évaporation	2
I.2.2.Transpiration	2
I.2.3.Évapotranspiration	3
I.2.4.Évapotranspiration de référence	4
I.2.5.Évapotranspiration potentielle et réel.....	4
I.2.6.Évapotranspiration maximale.....	5
I.3. Les mesure de l'évapotranspiration.....	5
I.3. 1. Les facteurs conditionnels de la mesure de l'évapotranspiration	5
I.3.1.1. Les facteurs climatiques (pouvoir évaporant du climat).....	5
I.3.1.2. Les facteurs géographiques (essentiellement la topographie).....	5
I.3.1.3. Les facteurs biologiques (le couvert végétal).....	6
I.3.1.4. Les facteurs pédologiques (les sols)	6
I.4.Étude physique de l'évapotranspiration.....	6
I.5. Les constituants paramétriques de l'évapotranspiration.....	6
I.5.1. Le vent.....	6
I.5.2. Le Rayonnement Solaire	8
I.5.3. Température de l'air.....	8
I.5.4. L'Humidité de l'air.....	9
I.5.5. La pression de l'air	9
I.6. présentation de la zone d'étude	10
I.6.1. La région d'étude.....	10
I.6.2. le climat.....	10
I.6.2.1. Températures de l'air	10
I.6.2.2. Humidité de l'air	11
I.6.2.3. le Vents.....	11
I.6.2.4. Insolation	12
Chapitre II : Matériel et méthodes	
II.1. Introduction	13
II.2. Données et méthodes	13
II.3. Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration de référence	14
II.4. Méthodes testées dans cette étude	14
II.5. Méthode combinée (PENMAN- MONTEITH)	15
II .5.1. Formule générale de PENMAN- MONTEITH	15
II.5.2. La résistance aérodynamique (r_a)	15
II.5.3. La Résistance de surface (r_s).....	16
II.5.4. Formule horaire de PENMAN – MONTEITH	17

II.5.4.1. Les hypothèses	17
II.5.5. La pression atmosphérique	17
II.5.6. Chaleur latente de vaporisation de l'eau (λ)	17
II.5.7. Constante psychrométrique (γ)	18
II.5.8. Loi des gaz parfait pour le calcul de la densité moyenne de l'air (ρ_a)	18
II.5.9. Température moyenne (T)	18
II.5.10. Tension de vapeur à saturation moyenne (e_s).....	18
II.5.11. pression de vapeur réelle (e_a)	19
II.5.12. Pente de la tension de vapeur d'eau saturante (Δ)	19
II.5.13. La vitesse moyenne du vent à hauteur 2 m (u_2)	19
II.5.14. Rayonnement net (R_n)	19
II.5.15. Rayonnement solaire net ou ondes courtes (R_{ns})	19
II.5.16. Rayonnement solaire ou ondes courtes (R_s)	20
II.5.17. Rayonnement à longue distance net sortant (R_{nl}).....	20
II.5.18. Rayonnement solaire du ciel clair (R_{so}).....	20
II.5.19. Rayonnement extraterrestre (R_a)	21
II.5.20. flux de chaleur du sol (G)	22
II.6. Méthode (ET_0) basée sur la Température	22
II.7. Le programme utilisé dans cette étude.....	23
II.7.1. le programme Matlab	23

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction.....	24
III.2. Les résultats obtenus	24
III.2.1. Les cartes climatiques de la région Ouargla	24
III.2.1.1. La carte de la température	24
III.2.1.2. La carte de l'humidité.....	25
III.2.1.3. La carte de la vitesse.....	25
III.2.1.4. La carte de la durée d'ensoleillement.....	26
III.2.2. Les résultats de l' ET_0 obtenus entre deux méthodes dans la région Ouargla.....	26
III.3. Calage et validation pour les deux méthodes testée	27
III.4. Analyse temporelle de la variation de l' ET_0 de la méthode (PENMAN-Monteith)	28
III.4.1. la carte de l' ET_0 annuelle.....	28
III.4.2. la carte de l' ET_0 d'hiver.....	29
III.4.3. la carte de l' ET_0 de printemps.....	29
III.4.4. la carte de l' ET_0 de L'été.....	30
III.4.5. la carte de l' ET_0 d'Automne.....	31
Conclusion général	32
Bibliographique	33
Annexe	35

Liste des figures :

N° de la figure	Titre	Page
I.01	Évaporation et évapotranspiration.....	3
I.02	Schéma théorique de la variabilité annuelle de l'ET ₀ , ETM et ETR.....	5
I.03	L'anémomètre.....	7
I.04	La girouette.....	7
I.05	Pyranomètre.....	8
I.06	Hygromètre.....	9
I.07	Carte de situation géographique de région Ouargla.....	10
II.01	Carte de situation géographique des 12 stations.....	13
II.02	Représentation simplifiée des résistances superficielles et aérodynamiques (en masse) pour l'écoulement de la vapeur d'eau.....	15
II.03	Caractéristiques de la culture de référence hypothétique.....	16
II.04	Divers composants de rayonnement.....	20
II.05	Variation annuelle du rayonnement extraterrestre (Ra) à l'équateur, 20 et 40 ° nord et sud.....	21
II.06	Organigramme de calcul.....	23
III.01	la carte annuelle de la température maximale dans la région Ouargla en 2012-2017.....	24
III.02	la carte annuelle de la température minimale dans la région Ouargla en 2012-2017.....	24
III.03	la carte annuelle de l'humidité dans la région Ouargla en 2012-2017.....	25
III.04	la carte annuelle de la vitesse dans la région Ouargla en 2012-2017.....	25
III.05	la carte annuelle de la durée d'ensoleillement dans la région Ouargla en 2012-2017.....	26
III.06	Variations temporelle de l'ET ₀ par la méthode de Penman- Monteith.....	26
III.07	Variations temporelle de l'ET ₀ par la méthode base sur la température..	27
III.08	la carte de l'ET ₀ annuelle.....	28
III.09	la carte de l'ET ₀ d'hiver.....	29
III.10	la carte de l'ET ₀ de printemps.....	29
III.11	la carte de l'ET ₀ de L'été.....	30
III.12	la carte de l'ET ₀ d'Automne.....	31

Liste des tableaux :

N° le tableau	Titre	Page
I.01	Température moyenne mensuelle (station d'Ouargla, 2012-2017)...	11
I.02	Humidité moyenne mensuelle (station d'Ouargla, 2012-2017).....	11
I.03	le vent moyen mensuel (station d'Ouargla, 2012-2017).....	11
I.04	insolation moyenne mensuelle (station d'Ouargla, 2012-2017).....	12
II.01	les paramètres climatiques des 12 stations (période 2012-2017).....	13
II.02	Caractéristiques des deux méthodes retenues.....	14
III.01	Calage et validation pour les deux méthodes testée dans la station Touggourt.....	30

Nomenclature :

Symbole	Désignation	Unité
<i>C_p</i>	Chaleur spécifique d'air.	(MJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)
<i>d</i>	Hauteur de déplacement.	(m)
<i>dr</i>	Distance relative de la Terre-Soleil.	(rad)
<i>e[°](T)</i>	Pression de vapeur de saturation à la température de l'air.	(kPa)
<i>ea</i>	Pression de vapeur réelle.	(kPa)
<i>es</i>	Tension de vapeur saturante.	(kPa)
<i>ET0</i>	Evapotranspiration de référence.	(mm j ⁻¹)
<i>ETP</i>	Evapotranspiration de potentiel.	(mm j ⁻¹)
<i>ETM</i>	Evapotranspiration maximal.	(mm j ⁻¹)
<i>ETR</i>	Evapotranspiration réel.	(mm j ⁻¹)
<i>G</i>	Flux de chaleur du sol.	(MJ m ⁻² j ⁻¹)
<i>Gsc</i>	Constante solaire = 0.0820 .	(MJ m ⁻² j ⁻¹)
<i>H</i>	la chaleur sensible.	(MJ m ⁻² j ⁻¹)
<i>h</i>	Hauteur de récolte constante 0,12.	(m)
<i>k</i>	0,41 : constante de von Karman's.	/
<i>ke</i>	Coefficient d'évaporation du sol.	/
<i>kcb</i>	Coefficient cultural de base.	/
<i>kc</i>	Coefficient cultural.	/
<i>ks</i>	Coefficient de stress.	/
<i>LAI</i>	Indice foliaire de la feuille.	/
<i>n</i>	Durée réelle du soleil en un jour.	(heur)
<i>N</i>	Durée d'ensoleillement maximale possible en un jour.	(heur)
<i>P</i>	Pression atmosphérique.	(kPa)
<i>R</i>	Constante de gaz spécifique = 0,287.	(kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)
<i>Ra</i>	Rayonnement extraterrestre.	(MJ m ⁻² j ⁻¹)
<i>RH</i>	Humidité relative moyenne horaire.	(%)
<i>Rn</i>	Rayonnement net.	(MJ m ⁻² j ⁻¹)
<i>Rnl</i>	Rayonnement à longue distance net sortant.	(MJ m ⁻² j ⁻¹)
<i>Rns</i>	Rayonnement solaire net ou ondes courtes.	(MJ m ⁻² j ⁻¹)
<i>Rs</i>	Rayonnement solaire ou ondes courtes.	(MJ m ⁻² j ⁻¹)
<i>Rso</i>	Rayonnement solaire du ciel clair.	(MJ m ⁻² j ⁻¹)
<i>ra</i>	la résistance aérodynamique.	(s m ⁻¹)
<i>rs</i>	La résistance du couvert végétal.	(s m ⁻¹)
<i>rl</i>	La résistance stomacale de la feuille bien illuminée.	(s m ⁻¹)
<i>T</i>	Température moyenne horaire de l'air.	(°C)
<i>Tmax</i>	Température maximale au cours de la journée.	(°C)
<i>Tmin</i>	Température minimale au cours de la journée	(°C)
<i>Tmois, i</i>	Température moyenne de l'air du mois i.	(°C)
<i>Tmois, i - 1</i>	Température moyenne de l'air du mois précédent.	(°C)
<i>Tmois, i + 1</i>	Température moyenne de l'air du mois prochain.	(°C)
<i>TKv</i>	La température virtuelle.	(k)
<i>u2</i>	la vitesse du vent mesurée à 2m.	(m s ⁻¹)
<i>u₁₀</i>	La vitesse moyenne du vent à hauteur 10m.	(m s ⁻¹)
<i>uz</i>	La vitesse du vent à l'altitude z.	(m s ⁻¹)
<i>Z</i>	Hauteur de la station.	(m)
<i>zh</i>	La hauteur la mesure de l'humidité.	(m)

zoh	Hauteur initiale de transfert de la chaleur et de la vapeur.	(m)
zm	La hauteur de la mesure du vent.	(m)
zom	Hauteur initiale de transfert du vent.	(m)

Les lettres Grèce

π	Constante d'Archimède =3.14.	/
Δ	Pente de la courbe de la tension de vapeur saturante.	(kPa °C ⁻¹)
ε	Rapport poids moléculaire de la vapeur d'eau / air sec = 0,622.	/
λ	Chaleur latente de changement d'état =2.45.	(kJ kg ⁻¹)
γ	Constante psychrométrique.	(kPa °C ⁻¹)
ρ_a	Densité moyenne de l'air.	(kg/m ³)
ω_s	Angle du coucher du soleil.	(rad)
φ	Latitude.	(rad)
δ	Déclinaison solaire.	(rad)

Introduction général :

L'évapotranspiration (ET) est l'une des composantes du cycle hydrologique les plus difficiles à quantifier du fait de sa complexité dans le système sol-terre- plante [1]. Son estimation est importante pour les programmes d'irrigation, la planification et la gestion des ressources en eau. L'évapotranspiration peut être estimée directement par des instruments de mesure, comme les lysimètres [2], les bacs d'évaporation ou les atmomètres. La mise en place et la gestion de ces instruments suppose un coût financier élevé et du personnel qualifié, raison pour laquelle ils sont souvent réservés aux centres de recherche [3]. Face à cette situation, de nombreuses méthodes ont été développées pour une estimation indirecte de l'évapotranspiration [4].

Plusieurs de ces méthodes ont été testées sous différentes conditions climatiques. Parmi ces méthodes, celle de Penman-Monteith (FAO-PM) a été recommandée par la FAO comme méthode standard [4]. À cet égard, O.C. DIOUF ont montré que la performance de la méthode FAO-PM réside dans le nombre important de variables météorologiques qu'elle intègre : température (T), radiation solaire (Ra), humidité relative (HR) et vitesse du vent ($u2$). Cette méthode offre l'avantage de pouvoir être utilisée sans ajustement ou intégration d'autres variables. Cependant son application peut être compromise par l'absence de quelques variables climatiques dans certaines régions, particulièrement dans les pays en voie de développement, où l'accès aux données climatiques est parfois limité, particulièrement à l'échelle journalière. Pour pallier ce problème, des formules intégrant moins de variables climatiques [5].

Ces différentes méthodes sont classées par catégorie en fonction des variables climatiques qu'elles intègrent : température, radiation, transfert de masse ou combinaison de variables. Les méthodes à base de température sont largement utilisées du fait que cette variable est la plus facile à obtenir.

Dans la région de Ouargla, plusieurs études portant sur l'évapotranspiration ont été menées, par exemple dans le ITAS Etude de l'évapotranspiration réelle liée à l'évapotranspiration potentielle [6]. Au Touggourt, Mihoub Adil (2016) a utilisé la méthode de Penman-Monteith pour calculer l'évapotranspiration effective, aux échelles horaire et journalière, sur la station Touggourt [7]. Toutefois ces auteurs ont appliqué un nombre limité de méthodes. Il est donc important d'en tester davantage, relevant des différentes catégories, afin de déterminer celles qui fournissent les meilleures estimations.

Le but de ce travail c'est la contribution à l'élaboration d'une carte qui estime l'évapotranspiration dans la région d'Ouargla on se basant sur les données météorologique de 12 stations dont trois situant dans la zone d'étude et 09 dans les régions voisins pour un intervalle du temps de cinq ans (2012 à 2017). La méthode de Penman-Monteith a été utilisée pour évaluer l'évapotranspiration de référence mensuelle, saisonnière et annuelle. Une analyse des résultats obtenus est présentée à la fin de ce mémoire.

Le mémoire comprend trois chapitres dont le premier est consacré à l'étude bibliographique, le second présente les différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration de référence notamment celle de Penman-Monteith. Le troisième chapitre présente les résultats obtenus sous forme des cartes, tableaux et courbes, une discussion et analyse de ces résultats conclure ce chapitre.

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1. Introduction :

L'évaporation et la transpiration constituent les premiers prélèvements du cycle hydrologique. Elles sont faibles et peuvent être négligées durant un épisode de ruissellement. Le plus gros de ces prélèvements se produit dans la période séparant deux épisodes de ruissellement. Elles constituent ainsi, le prélèvement le plus important au cours de cet intervalle de temps.

On appelle évapotranspiration l'ensemble des phénomènes d'évaporation et de transpiration. Dans les grandes étendues de terres en zones tempérées, l'évapotranspiration représente près des deux tiers de la précipitation annuelle, le tiers restant s'écoulant dans les rivières et les nappes souterraines vers les océans. Dans les régions arides, l'évapotranspiration peut être encore plus importante, renvoyant vers l'atmosphère, jusqu'à 90 % de la précipitation annuelle. L'évaporation relie l'hydrologie aux sciences de l'atmosphère et, à travers la transpiration, aux sciences agronomiques.

I.2. Définitions :**I.2.1.Évaporation :**

L'évaporation est le processus par lequel de l'eau passe de l'état liquide ou solide, à l'état gazeux par un transfert d'énergie thermique [8].

C'est une part importante du cycle hydrologique, au point que sur les continents, environ 70 à 75 % du total de la précipitation annuelle retourne à l'atmosphère par évaporation et transpiration. Sous les climats chauds, les pertes d'eau par évaporation à partir des rivières, des canaux et équipements de stockage d'eau à ciel ouvert, constituent un problème vital dans la mesure où elles prélèvent une part importante des approvisionnements en eau. Cela revêt une importance dans le sens que la plus grande partie de l'eau prélevée pour des usages profitables revient en fin de compte aux rivières et aux aquifères, et devient de nouveau disponible pour une réutilisation. Les pertes d'eau par évaporation sont, par contre, définitivement inutilisables. Même dans les régions humides, la perte par évaporation est significative mais elle est masquée par l'importance des précipitations au point qu'elle n'est habituellement pas reconnue, sauf pendant les périodes sans pluie.

Les réservoirs de stockage présentent de grandes surfaces à l'évaporation et sont une source majeure de perte d'eau, même si la profondeur des retenues contribue à diminuer l'évaporation naturelle qui, autrement, se produirait sur les grandes étendues des plaines d'inondation.

Les facteurs contrôlant l'évaporation sont connus depuis longtemps, mais leur évaluation est difficile à cause de l'interdépendance de leurs effets. En général, cependant, l'évaporation dépend de la température, du vent, de la pression atmosphérique, de l'humidité, de la qualité et de la profondeur de l'eau, du type et de la nature du sol et enfin de la forme de la surface exposée.

I.2.2. Transpiration :

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

La quantité d'eau stockée par une plante n'atteint pas l'un pour cent de celle qu'elle perd ainsi durant sa période de croissance. D'un point de vue hydrologique, les plantes se comportent, par conséquent, comme des pompes tirant l'eau du sol et la remontant vers l'atmosphère. Il est difficile de procéder à des estimations précises de la quantité d'eau transpirée en raison des nombreuses variables responsables du

processus. Les estimations disponibles doivent être utilisées avec prudence, en tenant compte des conditions dans lesquelles elles ont été obtenues. Il faut disposer de relations appropriées entre les facteurs climatiques et la transpiration si on veut faire un usage général de données obtenues dans une région climatique particulière [9].

La transpiration est contrôlée par des facteurs physiologiques et environnementaux. Les stomates ont tendance à s'ouvrir ou à se fermer en réponse aux conditions environnementales comme la lumière ou l'obscurité et le chaud ou le froid. Les facteurs environnementaux influant sur la transpiration sont essentiellement les mêmes que pour l'évaporation, quoique légèrement différents. D'un point de vue pratique, le gradient de pression de vapeur, la température, la radiation solaire, le vent, l'humidité disponible dans le sol sont les plus importants facteurs influençant la transpiration [10].

I.2.3.Évapotranspiration :

L'évapotranspiration (ET) est la vapeur d'eau produite à partir d'un bassin versant, résultant de la croissance des plantes qui y poussent. L'évapotranspiration et la consommation d'eau incluent toutes les deux la transpiration par les végétaux et l'évaporation à partir des surfaces d'eau libre, du sol, de la neige, de la glace et de la végétation. Il est important de souligner ici la différence entre évapotranspiration et consommation d'eau. La consommation d'eau ne diffère de l'évapotranspiration que parce qu'elle inclut l'eau utilisée pour la formation du tissu des plantes [11].

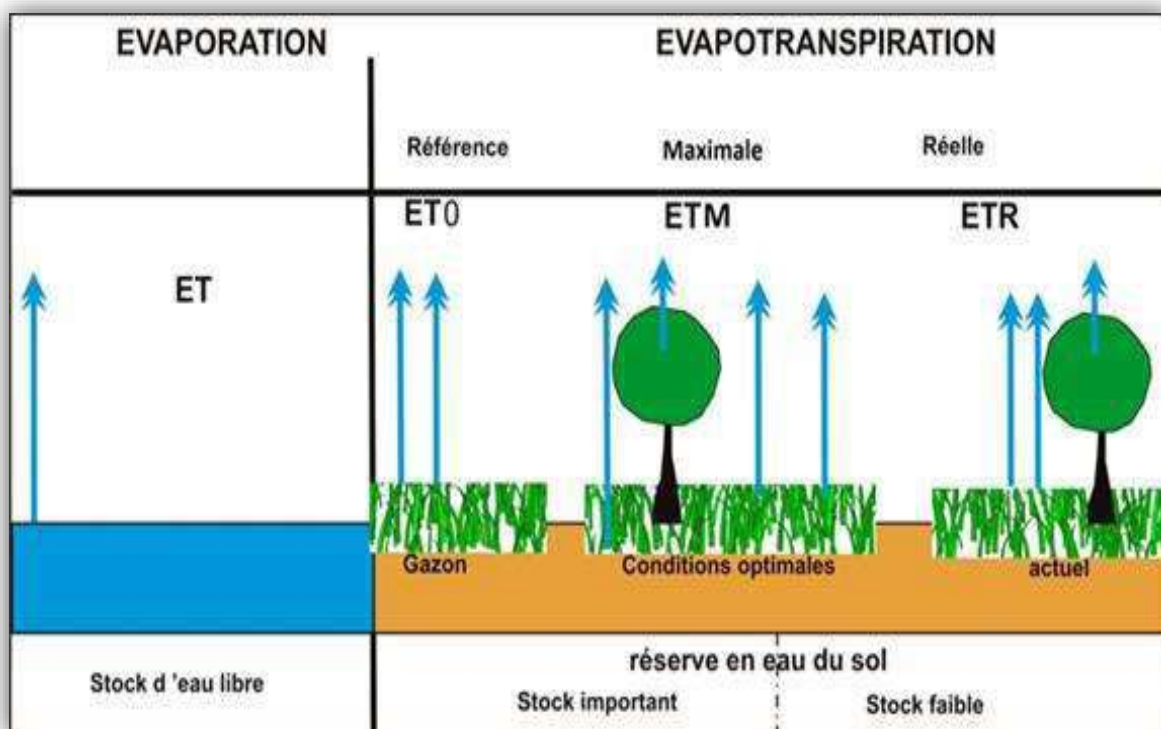


Figure I.01 : Évaporation et évapotranspiration [12].

Dans le calcul de l'évapotranspiration sont prises en compte à la fois la transpiration et l'évaporation du sol. L'évapotranspiration réelle peut être déduite de l'analyse de l'enregistrement simultané des pluies et des débits d'un bassin versant. Il y a une grande différence entre évapotranspiration et évaporation des surfaces libres. La transpiration est associée à la croissance des plantes et l'on ne peut donc parler d'évapotranspiration que durant cette croissance. Il en résulte des variations diurnes et saisonnières, qui se superposent à l'évaporation annuelle normale des surfaces d'eau libre.

I.2.4.Évapotranspiration de référence :

L'évapotranspiration de référence (ET_0) est un concept utilisé dans différentes méthodes d'estimation. C'est une valeur pour une végétation choisie, dans des conditions hydriques réelles, permettant ensuite de déduire l'évapotranspiration pour d'autres couverts végétaux. Cet usage pratique d'une culture de référence est lié à la faible variation de l'évapotranspiration potentielle selon les différents végétaux, dans de généralement pour les besoins de l'agriculture [13].

I.2.5.Évapotranspiration potentielle et réel:

La notion d'« évapotranspiration potentielle » (ETP) est couramment opposée à l'« évapotranspiration réelle ». L'évapotranspiration réelle désigne la quantité exacte d'eau évapotranspirée par une couverture végétale réelle. C'est une donnée impossible à mesurer à l'échelle d'une parcelle ou d'une région.

À l'opposé, l'évapotranspiration potentielle ou de référence est une valeur calculée par des formules mathématiques. L'Évapotranspiration potentielle est ainsi l'objet de définitions variées, selon les auteurs et les méthodes de calcul employées [14,15].

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

Ces deux notions ETR et ETP sont utiles et nécessaires pour étudier les bilans de circulation de l'eau et notamment pour déterminer les besoins en eau des cultures ou calculer l'effet oasis [16] d'une zone où l'évapotranspiration est plus importante (qui peut être une zone urbaine). Les plantes de milieux arides peuvent fortement réduire leur évapotranspiration quand elles manquent d'eau. Les plantes des zones tropico-équatoriales pluvieuses ne le peuvent généralement pas. Elles sont présentées dans l'équation suivante :

$$ETR = k_s ETM = k_s k_c ET_0 \quad (I.01)$$

Ou

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

I.2.6.Évapotranspiration maximale:

L'évapotranspiration maximale d'une culture est la quantité maximale d'eau qu'elle est susceptible d'évaporer lorsqu'elle est placée dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique et pour un sol proche de la capacité au champ. Elle dépend de la couverture du sol par la culture et de son état physiologique. Elle fait alors intervenir les coefficients culturaux (k_c) qui retranscrivent les particularités de chaque type de plante à un stade développement donné. Prise en compte par l'évapotranspiration référence (ET_0). Elles sont présentées dans l'équation (I.02) :

$$ETM = k_c \cdot ET_0 = (K_{cb} + K_e) \cdot ET_0 \quad (I.02)$$

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

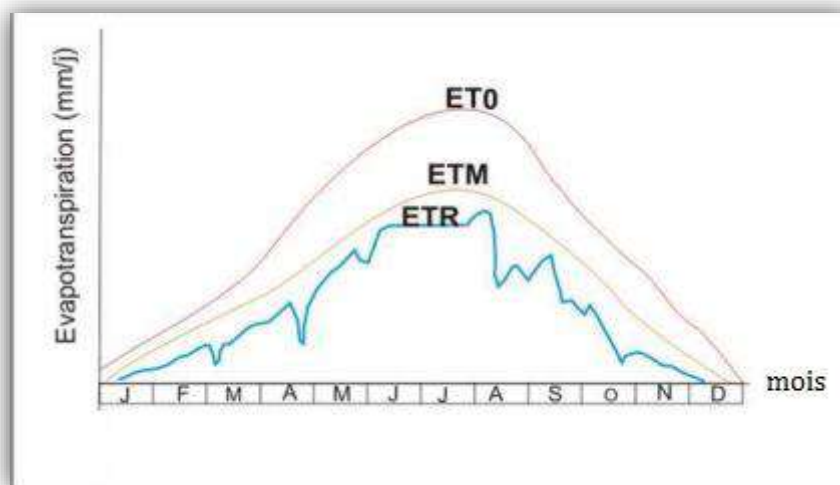


Figure I.02 : Schéma théorique de la variabilité annuelle de l'ET0, ETM et ETR [12].

I.3. Les mesure de l'évapotranspiration :

I.3. 1. Les facteurs conditionnels de la mesure de l'évapotranspiration :

L'évapotranspiration dépend fortement de l'intervention de quatre facteurs, climatiques, géographique, biologiques et pédologiques [17].

I.3.1. 1. Les facteurs climatiques (pouvoir évaporant du climat):

- La température de l'air.
- La température de la surface terrestre.
- La vitesse et turbulence du vent.
- La durée de l'insolation ou le rayonnement solaire.
- L'humidité relative de l'air.
- La pression atmosphérique.

I.3.1.2. Les facteurs géographiques (essentiellement la topographie):

- L'état de la surface évaporant.
- L'altitude.
- L'effet du site.
- La latitude,
- La proximité de la mer.
- L'orographie (exposition des versants au soleil, aux vents, pentes).

I.3.1.3. Les facteurs biologiques (le couvert végétal):

- Les espèces végétales (stade phénologique de la culture considérée).
- La hauteur du couvert végétal.
- La résistance stomatique.
- La profondeur des racines.
- Les besoins ou non d'eau.

I.3.1.4. Les facteurs pédologiques (les sols) :

- La capacité de rétention en eau du sol,
- La réserve utile dans le sol.
- L'humidité du sol.
- La texture du sol.

Certains facteurs sont facilement mesurables (température, vent, insolation) d'autres sont mal connus (profondeur des racines, hauteur du couvert végétal) et ces mesures sont souvent rares pour être utilisées en routine. De plus, ces facteurs n'ont pas le même pouvoir pour favoriser ou accélérer le processus de l'évaporation. L'évapotranspiration est très liée au rayonnement solaire et au bilan d'énergie à la surface du sol [17].

I.4. Etude physique de l'évapotranspiration :

L'évapotranspiration est la transformation de l'eau en vapeur, vers l'atmosphère est déterminée par deux phases essentielles, qui sont l'état physique c'est-à-dire liquide à un autre état qui est la vapeur. Cette évaporation se fait sur une surface évaporant à l'exemple de la mer, du système foliaire de la plante et surtout du sol.

En thermodynamique, nous savons en effet que la transformation d'un gramme d'eau à 0°C (glace fondante), en vapeur consomme 597 calories [18].

Généralement, cette dernière est fonction du facteur énergétique à savoir le rayonnement solaire, paramètre principal de l'évaporation. Cette énergie est issue de deux sources à savoir : le rayonnement net et l'advection.

- Le rayonnement net recueilli au niveau des surfaces évaporant est fonction de la qualité optique, de leur température et du rayonnement absorbé issu du soleil.
- L'advection dépend de l'humidité relative de l'air et surtout du vent. Par définition c'est l'énergie apportée par l'air ambiant. L'évaporation dépend des facteurs climatiques et surtout de la nature de la surface évaporant et de ses caractéristiques physiques [19].

I.5. Les constituants paramétriques de l'évapotranspiration :

Les paramètres intégrants pour le calcul de l'évapotranspiration sont essentiellement d'ordre énergétique et aérodynamique. L'évapotranspiration dépend de la demande climatique et finalement, elle est dépendante de ces deux paramètres (le rayonnement net et l'advection).

I.5.1. Le vent :

Le vent est partie essentielle et intégrante du calcul de l'évapotranspiration. Le rôle du vent dans l'atmosphère c'est qu'il remplace les masses d'air humides en tenant la surface évaporant par des masses d'air sèches.

Selon Jefereys stipule que la vitesse d'évapotranspiration augmente avec ce processus du renouvellement de l'air au-dessus de la surface évapotranspiration [20].

Seltzer en 1946 Souligne que l'augmentation de l'évapotranspiration s'explique par l'augmentation de la vitesse du vent, et de la grande sécheresse [21]. Vecteur vent peut - être caractérisé par deux nombres représentant son orientation direction du vent et son module « vitesse du vent.

Les anémomètres mesurent la vitesse du vent, ils sont classés en quatre catégories :

- 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.03 : L'anémomètre

La girouette indique la direction du vent à l'air transmetteur potentiométriques à rotation continue. La valeur du potentiomètre est ensuite interprétée de façon à connaître la vitesse de vent.



Figure I.04: La girouette

I.5.2. Le Rayonnement Solaire :

Ce paramètre est un facteur énergétique important dans la mesure où il a provoqué l'évapotranspiration. En fait, il représente la source d'énergie nécessaire pour mettre en œuvre cette dernière sur une surface évaporant. Le bilan énergétique au niveau de n'importe quelle surface évaporant est déterminé par :

- L'énergie du soleil.
- Emission vers l'atmosphère d'une partie de la chaleur reçue.

Le bilan entre l'énergie reçue et l'énergie perdue représente l'énergie utilisée pour la mise en forme de l'évaporation, et la fonction transpiratoire de la plante. L'énergie à la surface du sol se fait par le rayonnement solaire. La mesure du rayonnement nous fournit des renseignements sur la source de ce rayonnement [22]. A la surface du sol on trouve :

- Le rayonnement global.
- Le rayonnement solaire direct.
- Le rayonnement solaire diffuse.
- Le rayonnement atmosphérique.
- Le rayonnement du sol.

Les pyranomètres sont utilisés pour la mesure du rayonnement émis.



Figure I.05: pyranomètre.

I.5.3. Température de l'air :

La quantité d'eau évaporée est influencée par les variations de la température. Le pouvoir évaporant de l'air augmente avec l'élévation de la température qui a son tour fait varier le taux de saturation de l'air [23]. La mesure de la température repose sur une grande diversité de méthodes à l'exemple :

- La thermo sonde.
- Le thermocouple.
- Infrarouge.
- Les captures de type mécanique et acoustique.
- La mesure actinothermique.

I.5.4. L'Humidité de l'air :

L'humidité de l'air est un paramètre climatique très important par rapport aux autres paramètres – ceci s'explique par le fait, qu'il est impératif à avoir un équilibre de vapeur d'eau entre la surface évaporant, et celle de l'air qui l'entoure [24].

L'hygromètre l'appareil de mesure d'humidité du sol



Figure I.06: Hygromètre

I.5.5. La pression de l'air :

Pour le climatologue Peguy, le pouvoir évaporant se trouve en rapport inverse à la pression de l'air. Une élévation de la pression de l'air provoque une diminution de l'évaporation. Dalton, sa loi vérifiée par Peguy, est résumée comme suit et tient compte de la vitesse d'évaporation, et de la pression de l'air : "La vitesse d'évaporation est inversement proportionnelle à la pression de l'air au-dessus du liquide, et qui dépend par ailleurs de la tension de la vapeur qui se trouve déjà au-dessus du liquide. La vapeur d'eau maximale croît linéairement avec la température" [20].

Finalement, les facteurs cités sont indépendants l'un de l'autre et agissent tous sur le pouvoir évaporant. Ce qui donne au phénomène d'évaporation un caractère très complexe. Ce qui a pour conséquence une application des formules très difficile, dans les conditions géographiques et climatiques de l'expérimentation [25].

I.6. présentation de la zone d'étude:

I.6.1. La région d'étude:

La région d'Ouargla est située au Sud-est de l'Algérie, à une distance de 800 km d'Alger la capitale. La wilaya d'Ouargla couvre une superficie de 163 000 km². Elle se trouve dans le Nord-est de la partie septentrional du Sahara (5° 19' longitude Est, 31°57' latitude Nord), la région de Ouargla se trouve à une altitude de 141 m. La wilaya est située dans la partie sud-est du pays. Elle est limitée:

- Au Nord, par les wilayas de Djelfa, Biskra et El Oued
- Au Sud, par Illizi et Tamanrasset
- A l'Est, par la Tunisie
- A l'Ouest, par Ghardaïa [26].

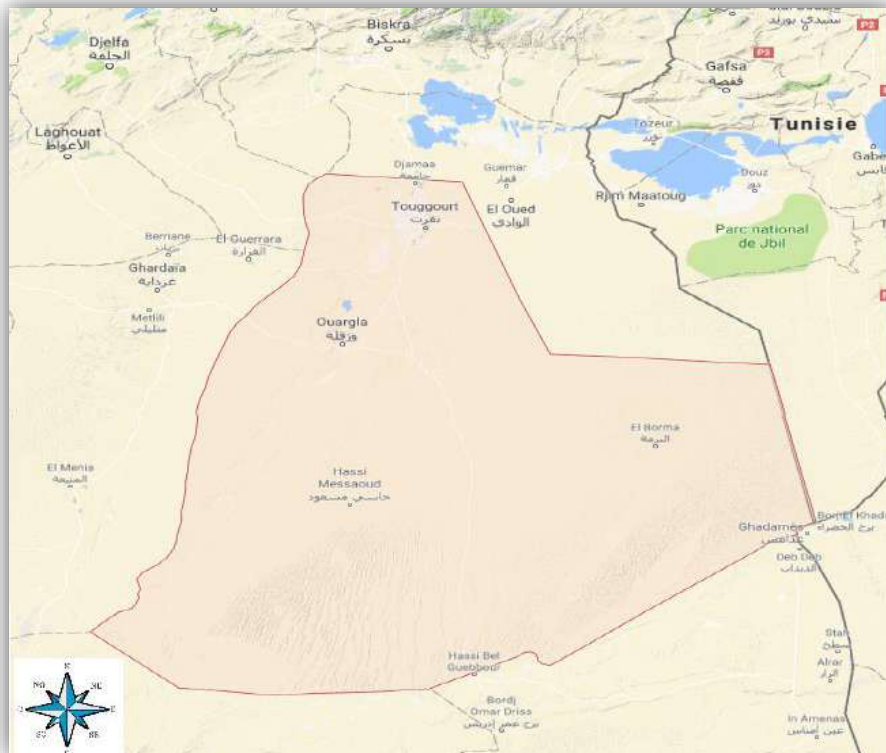


Figure I.07 : Carte de situation géographique de région Ouargla.

I.6.2. le climat :

La région d'Ouargla est située dans une zone saharienne, son climat sec désertique est caractérisé par une aridité qui s'exprime par une sécheresse permanente, l'irrégularité et la rareté des précipitations. Pour caractériser le climat de la région, les données climatiques en 5 ans (2012-2017) de la station météorologique d'Ouargla ont été utilisées dans la présente étude [27].

I.6.2.1. Températures de l'air :

La température présente un facteur limitant de toute première importance car elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la

reproduction, l'activité et la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'être vivant dans la biosphère [28].

Le tableau I.01 résume les températures mensuelles moyennes, maximales et minimales de la région d'Ouargla pour (2012-2017).

Tableau. I.01 : température moyenne mensuelle (station de Ouargla, 2012-2017)[29].

Mois	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	aout
<i>T_{max}</i>	38,2	32,9	24,5	19,1	19,1	21	25,6	31,3	36,2	40,6	43,4	42,5
<i>T_{min}</i>	23,8	17,6	11	6	5,1	7,2	10,6	15,7	20,8	24,9	27,7	27,5

T_{max} : Température maximale au cours de la journée (°C).

T_{min} : Température minimale au cours de la journée (°C).

Dans cette région l'hiver est trop froid 5.1°C aux mois janvier et comportant d'importants risques de gelées, et pendant l'été, le climat est trop chaud 43.4 °C aux mois juillet,

I.6.2.2.Humidité de l'air :

Le degré hygrométrique de l'air (ou humidité relative) c'est le rapport de la tension de vapeur effective à la tension de vapeur saturante dans les mêmes conditions de température et de pression.

Nous avons indiqué dans le tableau I.02 ci-dessous la moyenne mensuelle de l'humidité mesurée à Ouargla (période 2012 - 2017).

Tableau. I.02 : Humidité moyenne mensuelle (station de Ouargla, 2012-2017)[29].

Mois	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	aout
<i>RH %</i>	24	30	49	62	57	41	29	22	15	11,5	17	21,5

RH : Humidité relative moyenne horaire (%).

L'humidité relative est maximum au mois de décembre avec 62%, le minimum est au mois de juin avec 11.5%.

I.6.2.3.le Vent :

Le vent à une action indirecte sur les êtres vivants et il joue le rôle de facteur de mortalité vis à vis des oiseaux et des insectes [30]. Les vents dominants à Ouargla sont ceux de Nord- Est à Sud - Ouest avec une vitesse qui peut dépasser parfois les 17 km/h, surtout que le sirocco (vent chaud et sec) peut être observé à toute époque de l'année [31]. Les valeurs des vitesses des vents enregistrés dans cette région de sont représentés dans le tableau I.03

Tableau. I.03 : La vitesse moyenne mensuel du vent (station de Ouargla, 2012-2017)[29].

Mois	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	aout
<i>u₁₀(km/h)</i>	14	11,5	9,6	9,5	10,8	14,2	14,2	17,8	17,7	16,8	14,7	14,5

u_{10} : La vitesse du vent à l'altitude (10m) ($km\ h^{-1}$).

Les vents sont relativement fréquents dans la région d'Ouargla. En hiver, ce sont les vents d'Ouest qui dominent, tandis qu'au printemps, ce sont ceux du Nord-est, alors qu'en été, ce sont ceux du Sud-ouest, la vitesse peut dépasser le (17 Km/h).

I.6.2.4.Insolation :

La région d'Ouargla est caractérisée par une forte insolation. L'insolation correspond à la durée d'éclairement du sol par le soleil.

Tableau. I.04 : la durée d'insolation moyenne mensuelle (station de Ouargla, 2012-2017)[29].

Mois	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	aout
n (heur)	8,7	8,39	7,44	6,65	7,73	8,62	8,95	9,67	9,6	10,79	11,06	10,1

n : Durée réelle du soleil en un jour (heur).

La durée moyenne d'insolation dans la région d'Ouargla est de 8.975 h/jour, avec un maximum de 14.7 heures en juillet et un minimum de 9.5 heures en décembre.

Chapitre II

Matériel et méthodes

II.1.Introduction :

La présente partie porte sur l'étude de l'évapotranspiration de référence à la région d'Ouargla et l'analyse de son variation temporelle. Ce chapitre II est consacré à la présentation des stations d'études, et les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration de référence utilisées.

II.2.Donnees et méthodes :

Pour ce travail, nous avons utilisé les données mensuelles recueillies sur la période 2012-2017 à 12 stations climatologiques d'Ouargla et les zones proches de la frontière de Ouargla, C'est Pour une étude approfondie de la région. La figure (II.01) et le tableau (II.01) présente la Carte de situation et les coordonnées géographiques des 12 stations et les moyennes sur la période d'étude des différentes variables climatiques considérées [27]:

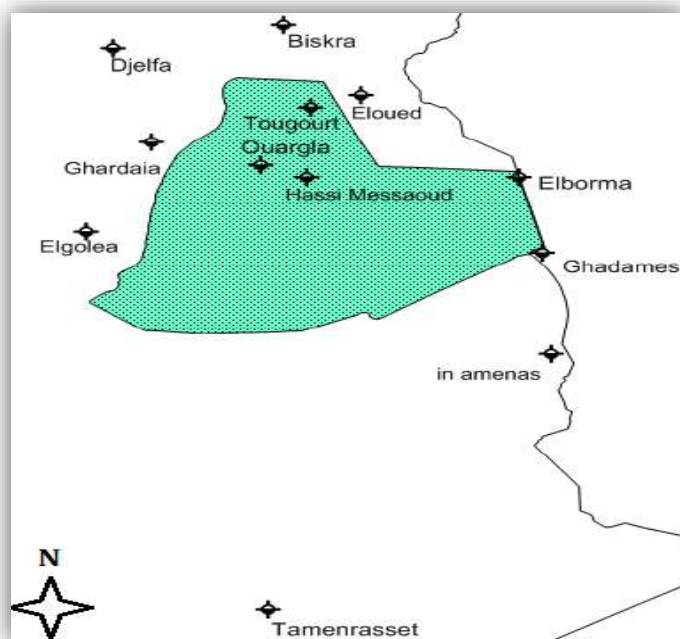


Figure II.01: La Carte de situation géographique des 12 stations.

Tableau II.01 : les paramètres climatiques des 12 stations (période 2012-2017)

Site	Latitude	longitude	Altitude(m)	Tmax °C	Tmin °C	RH (%)	u ₁₀ (m/s)	n (heur)
Biskra	34,8	5,73	87	29,15	17,19	39,25	3,75	9,32
Djelfa	34,33	3,25	1144	21,24	9,47	47,5	4,52	8,46
El Oued	33,5	6,11	63	29,60	16,025	44,82	2,54	9,30
Touggourt	33,11	6,13	85	29,83	15,68	32,16	3,11	9,40
Ghardaïa	32,4	3,81	450	28,87	16,86	34,33	3,89	9,36
Ouargla	31,93	5,4	141	31,20	16,49	31,58	3,82	8,97
Hassi_Messaoud	31,66	6,15	142	31,08	16,47	38	3,81	8,97
El-Goléa	30,56	2,86	397	30,25	15,02	31	3,61	9,77
In Amenas	28,05	9,63	562	31	15,58	32,25	4,67	9,42
Tamanrasset	22,8	5,51	1364	29,80	15,61	18,66	4,01	9,31
El_Borma_Tunisie	31,68	9,16	258	29,10	16,15	33,91	4,89	9,25
Ghadames_Libye	30,13	9,5	346	30,87	16,26	29,58	4,41	9,25

T_{max} : Température maximale moyenne au cours de la journée (°C) ;

T_{min} : Température minimale moyenne au cours de la journée (°C) ;

RH : Humidité relative moyenne horaire (%) ;

u_{10} : La vitesse moyenne du vent à hauteur 10m (m/s) ;

n : Durée réelle du soleil en un jour (heur).

II.3.Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration de référence :

En raison de la difficulté de mesurer l'évapotranspiration de référence (ET_0), d'importantes formules ont été développées, dans des conditions climatiques diverses, permettant d'estimer l'évapotranspiration de référence à partir de paramètres climatiques, mais elles se différencient par leur fondement théorique, et leurs données d'entrées exigées, le choix de la formule se fait alors en fonction de l'adéquation entre données nécessaires au calcul de l'évapotranspiration de référence et données disponibles. Ces formules sont classées en quatre types [32] :

a) Méthodes basées sur la température :

- Blaney.
- Criddle.
- Thornthwaite.
- Trajkovic.

b) Méthodes basées sur le rayonnement :

- Hargreaves,
- Makkink.

c) Méthodes basées sur l'évapotranspiration des bacs :

- Bac classe A
- Bac Colorado.

d) Méthode combinée :

- Penman,
- Penman-Monteith,
- Penman-Monteith modifiée.

II.4.Méthodes testées dans cette étude :

Il existe plus d'une vingtaine des méthodes qui ont été utilisées pour estimer l'évapotranspiration de référence, deux ont été sélectionnées pour figurer dans cette étude. Il s'agit :

1. méthodes à base de température.
2. méthodes dites combinatoires c'est-à-dire qui associe l'approche aérodynamique et celle du bilan d'énergie. Elles sont présentées dans le tableau II.02 :

Tableau II.02 : Caractéristiques des deux méthodes retenues.

Catégorie	Méthode	Formulation
Combinatoires	PENMAN- MONTEITH	$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u^2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u^2)}$
Température	S. Trajkovic(2007)	$ET_0 = 0.0023 Ra(T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.424}$

II.5.Méthode combinée (PENMAN- MONTEITH) :

II .5.1.Formule générale de PENMAN- MONTEITH :

La formule de Penman – Monteith est une combinaison du bilan énergétique et de la méthode de transfert de masse. Parmi les différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_0). Cette formule se présente comme suit [33] :

$$\lambda ET = \frac{\Delta(Rn-G) + \rho_a cp \frac{(es- ea)}{ra}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{rs}{ra})} \quad (II.01)$$

Ou

Rn : Rayonnement net [$MJ m^{-2} j^{-1}$];

G : Flux de chaleur du sol [$MJ m^{-2} j^{-1}$];

ρ_a : Densité moyenne de l'air ($kg m^{-3}$);

cp : Chaleur spécifique d'air [$MJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$];

λ : Chaleur latente de changement d'état ($2.45 MJ kg^{-1}$);

ea : Pression de vapeur réelle (kPa);

es : Tension de vapeur saturante à la température T (kPa);

Δ : La pente de la courbe de tension de vapeur saturante ($kPa ^\circ C^{-1}$);

ra : La résistance aérodynamique ($s m^{-1}$);

rs : Résistance de surface ($s m^{-1}$);

γ : La constante psychrométrique ($kPa ^\circ C^{-1}$).

II.5.2. La résistance aérodynamique (r_a) :

La résistance aérodynamique a pour formule :

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_z} \quad (II.02)$$

z_m : La hauteur de la mesure du vent (m);

z_h : La hauteur la mesure de l'humidité (m);

d : Hauteur initiale de déplacement (m);

z_{om} : Hauteur initiale de transfert du vent (m);

z_{oh} : Hauteur initiale de transfert de la chaleur et de la vapeur (m);

$k = 0,41$: constante de von Karman's;

u_z : La vitesse du vent à l'altitude z ($m s^{-1}$).

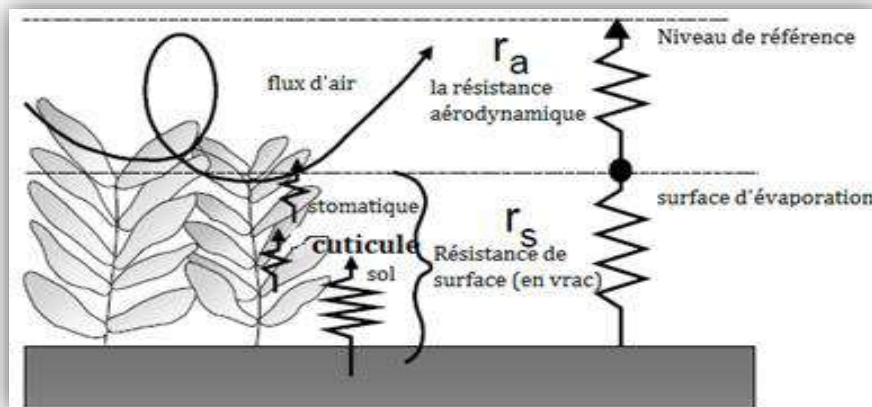


Figure II.02 : Représentation simplifiée des résistances superficielles et aérodynamiques (en masse) pour l'écoulement de la vapeur d'eau [34].

Il est nécessaire de rencontrer les approximations suivantes en fonction de la hauteur de la végétation (h (m)):

$$\begin{aligned} d &= 2/3 h \\ z_{om} &= 0.123 h \\ z_{oh} &= 0.1 z_{om} \end{aligned}$$

Ainsi, par exemple, pour une hauteur de végétation constante (h) de 0.12m (hauteur) suggérée pour le gazon et une hauteur standard de mesure du vent et de l'humidité de 2 m, la résistance aérodynamique pour une surface de gazon de référence devient [33]:

$$r_a = \frac{208}{u_2} \tag{II.03}$$

Ou

u_2 : La vitesse du vent mesurée à 2m ($m s^{-1}$).

II.5.3. La Résistance de surface (r_s):

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}} \tag{II.04}$$

Ou

r_l : Résistance stomacale de la feuille bien illuminée ($s m^{-1}$);

LAI_{active} : Indice foliaire (m^2 (surface de feuille) m^{-2} (surface du sol)).

À titre d'équation générale:

$$LAI_{active} = 0.5LAI \tag{II.05}$$

Aussi pour une surface de pâturage:

$$LAI = 24h \tag{II.06}$$

Où

h : représente la hauteur de végétation (m).

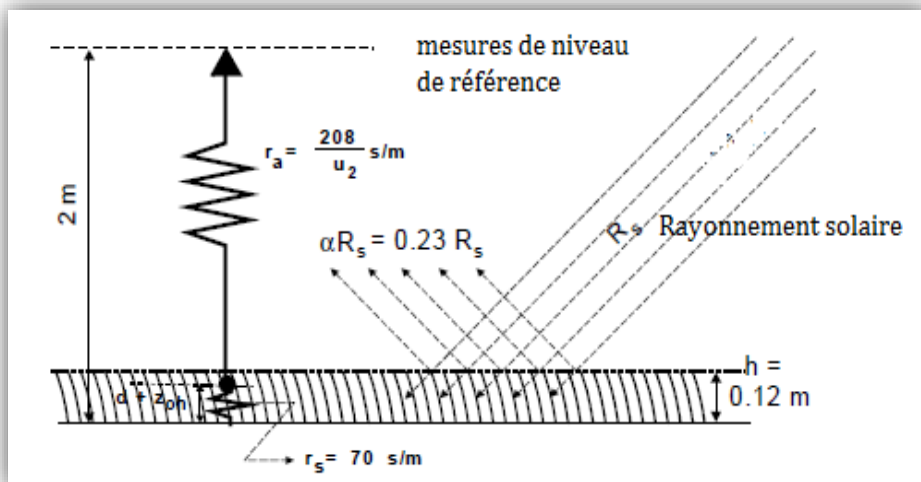


Figure II.03 : Caractéristiques de la culture de référence hypothétique [34].

Ainsi, pour une culture de gazon avec une résistance stomate de 100 s m^{-1} , pour de bonnes conditions hydriques et une hauteur de végétation de 0.12m , la résistance de surface devient:

$$r_s = \frac{100}{0.5(24)(0.12)} = 70 \text{ (s m}^{-1}\text{)} \quad (\text{II.07})$$

II.5.4. Formule horaire de Penman - Monteith :

II .5.4.1. Les hypothèses:

- La végétation est un gazon bien irrigué et couvrant à une hauteur de $0,12\text{m}$, de résistance extérieure de 70 s.m^{-1} et un albédo de $0,23$.
- Le flux de la chaleur dans le sol G n'est pas négligeable pour des calculs horaires de l' ET_0 .
- Les données météorologiques exigées sont : la température horaire moyenne de l'air, l'humidité relative horaire moyenne, vitesse horaire moyenne mesurée à 2m , le rayonnement net horaire [33].

Pour une échelle de temps horaire, et un gazon bien irrigué, l'équation de Penman -Monteith FAO donne une Evapotranspiration de référence (ET_0) :

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34 u_2)} \quad (\text{II.08})$$

Où

ET_0 : Évapotranspiration de référence (mm j^{-1}) ;

Rn : Rayonnement net [$\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$] ;

G : Flux de chaleur du sol [$\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$] ;

T : Température moyenne horaire de l'air ($^{\circ}\text{C}$) ;

Δ : Pente de la courbe de la tension de vapeur saturante ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) ;

γ : Constante psychrométrique ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) ;

II.5.5. La pression atmosphérique :

La pression atmosphérique pour un site donné est calculée selon l'équation suivante:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 Z}{293} \right)^{5.26} \quad (\text{II.09})$$

Où

P : Pression atmosphérique (kPa);

Z : Altitude du site (m).

II.5.6. Chaleur latente de vaporisation de l'eau (λ) :

La chaleur latente de vaporisation de l'eau présente très peu de variation. Par conséquent, la valeur utilisée est fixée à (2.45 MJ kg^{-1}).

II.5.7. Constante psychrométrique (γ) :

$$\gamma = \frac{cp P}{\lambda \varepsilon} = 0,665.10 - 3 P \quad (\text{II.10})$$

Où

λ : Chaleur latente de vaporisation, (=2.45 MJ kg⁻¹) ;

cp : Chaleur spécifique à pression constante, (= 1.013x10⁻³ MJ kg⁻¹ °C⁻¹) ;

ε : Ratio de la masse moléculaire de la vapeur d'eau / air sec = 0.622.

À l'inverse :

$$cp = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{P} \quad (\text{II.11})$$

II.5.8. Loi des gaz parfait pour le calcul de la densité moyenne de l'air (ρ_a) :

$$\rho_a = \frac{P}{T_{kv} R} \quad (\text{II.12})$$

Où

ρ_a : Densité moyenne de l'air pour une pression constante (kg m⁻³) ;

R : Constante spécifique des gaz (0.287 kJ kg⁻¹ K⁻¹) ;

T_{kv} : Température virtuelle en fonction de la température selon l'équation suivante.

$$T_{kv} = 1.01(T + 273.16) \quad (\text{II.13})$$

Où

T : Température moyenne de l'air (°C) ;

T_{kv} : Température virtuelle en fonction de la température (K).

II.5.9. Température moyenne (T) :

La température moyenne de l'air est calculée selon l'équation suivante:

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (\text{II.14})$$

Où

T_{max} : Température maximale journalière (°C) ;

T_{min} : Température minimale journalière (°C).

II.5.10. Tension de vapeur à saturation moyenne (e_s) :

Dans un premier temps, il est important de mentionner que la tension de vapeur à saturation est fonction de la température selon l'équation suivante:

$$e^\circ(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T}{T+237.3} \right] \quad (\text{II.15})$$

Où

$e^\circ(T)$: Tension de vapeur à saturation à la température T (kPa).

Ainsi, la tension de vapeur moyenne à saturation peut être calculée selon l'équation suivante:

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \quad (\text{II.16})$$

II.5.11. pression de vapeur réelle (e_a) :

$$e_a = e^\circ(T) \frac{RH}{100} \quad (\text{II.17})$$

Où

 RH : Humidité relative moyenne horaire (%).**II.5.12. Pente de la tension de vapeur d'eau saturante (Δ) :**

La pente de la tension de vapeur d'eau saturante en fonction de la température est calculée selon l'équation suivante :

$$\Delta = \frac{4098[0.6108 \exp(\frac{17.27 T}{T+237.3})]}{(T+237.3)^2} \quad (\text{II.18})$$

II.5.13. La vitesse moyenne du vent à 2 m de la hauteur (u_2) :

La vitesse moyenne quotidienne du vent en mètres par seconde (m s^{-1}) mesurée à 2 m au-dessus du sol est requise. Il est important de vérifier la hauteur à laquelle la vitesse du vent est mesurée, car les vitesses de vent mesurées à différentes hauteurs au-dessus de la surface du sol diffèrent. La vitesse du vent mesurée à des hauteurs différentes de 2 m peut être ajustée selon l'équation suivante :

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (\text{II.19})$$

Où

 u_z : La vitesse du vent à l'altitude z (m s^{-1}).**II.5.14. Rayonnement net (Rn) :**

Le rayonnement net est défini comme la quantité d'énergie radiative disponible à la surface de la terre est pouvant être transformée en d'autres formes d'énergie par les divers mécanismes physiques ou biologiques de la surface.

On exprime généralement le bilan des échanges radiatifs à la surface du sol par le rayonnement net Rn Il se compose de deux sources radioactives Rnl et Rns selon l'équation suivante :

$$Rn = Rns - Rnl \quad (\text{II.20})$$

Où

 Rns : Rayonnement solaire net ou ondes courtes [$\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$] ; Rnl : Rayonnement net de grandes longueurs d'onde net [$\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$].**II.5.15. Rayonnement solaire net ou ondes courtes (Rns) :**

Le rayonnement net de courtes longueurs d'onde représente la composante radiative dominante émise par le soleil et absorbée par la surface de la terre. Il s'exprime selon l'équation suivante :

$$Rns = (1 - 0.23)Rs \quad (\text{II.21})$$

Où

 Rs : Rayonnement de courtes longueurs d'onde incident [$\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$].

II.5.16. Rayonnement solaire ou ondes courtes (R_s) :

Le rayonnement de courtes longueurs d'onde incident (solaire) peut être calculé par la formule d'Angstrom :

$$R_s = \left[0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right] R_a \quad (\text{II.22})$$

Où

n : Durée réelle d'ensoleillement (heure) ;

N : Durée maximale d'ensoleillement (heure) ;

R_a : Rayonnement de courtes longueurs d'onde extra-atmosphérique [$\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$].

II.5.17. Rayonnement à longue distance net sortant (R_{nl}) :

De façon similaire au calcul du rayonnement de courtes longueurs d'onde proposent un calcul journalier du rayonnement de grandes longueurs d'onde net :

$$R_{nl} = 6 \left(\frac{(T_{max,k})^4 + (T_{min,k})^4}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (\text{II.23})$$

Où

σ : Constante de Stephan-Boltzmann ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4}$) ;

$T_{max,k}$: Température maximum journalière en degré Kelvin ($\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.16$) ;

$T_{min,k}$: Température minimum journalière en degré Kelvin ($\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.16$) ;

R_s/R_{so} : Rayonnement de courtes longueurs d'onde relatif (limitation à ≤ 1.0) ;

R_{so} : Rayonnement de courtes longueurs d'onde incident pour un ciel dégagé [$\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$].

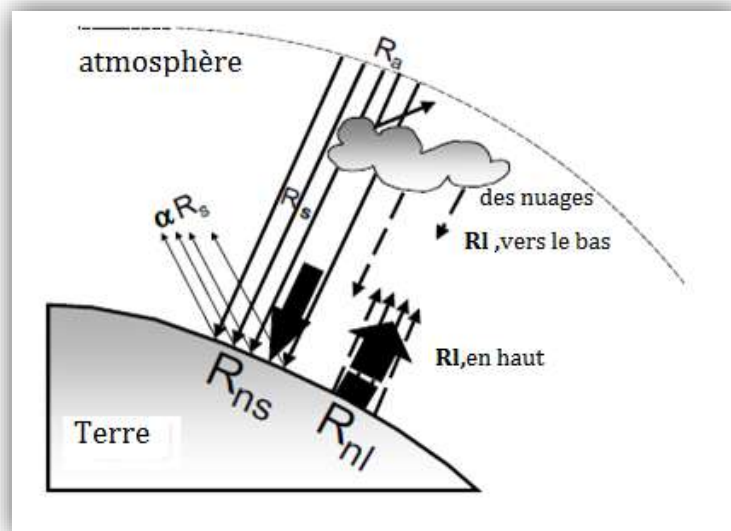


Figure II.04 : Divers composants de rayonnement [34].

II.5.18. Rayonnement solaire du ciel clair (R_{so}):

La radiation potentielle (R_{so}) est la quantité maximale de rayonnement solaire qui peut atteindre la surface d'évaporation (le sol par exemple) par ciel clair à un instant donné.

Elle dépend du rayonnement extrasolaire d'une part et de la masse atmosphérique d'autre part. Le rayonnement solaire atmosphérique (R_a) est une fonction astronomique du lieu et de la date. La masse atmosphérique détermine la fraction du rayonnement extrasolaire absorbée par l'atmosphère, elle est fonction

notamment de l'altitude, des aérosols, de la vapeur d'eau. Il existe plusieurs fonctions pour estimer la masse atmosphérique en fonction des conditions locales.

$$R_{so} = \left[0.75 + \frac{2Z}{100\,000}\right] Ra \quad (\text{II.24})$$

II.5.19. Rayonnement extraterrestre (Ra) :

Le rayonnement de courtes longueurs d'onde (solaire) extra-atmosphérique représente la puissance des radiations solaires, pour une surface donnée, atteignant l'atmosphère terrestre pour un jour donné, un endroit donné (considérant sa pente et son orientation). Le calcul du rayonnement extra atmosphérique se base sur un modèle trigonométrique qui considère la géométrie et l'emplacement du site visé. Les équations conduisant au calcul du rayonnement extra-atmosphérique. Elles sont présentées dans l'équation (II.25) :

$$Ra = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} dr [\omega s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega s)] \quad (\text{II.25})$$

Où

Ra : Rayonnement de courtes longueurs d'onde extra-atmosphérique [$\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$].

G_{sc} : Constante solaire = $0.0820 \text{ [MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}]$;

dr : Inverse de la distance relative soleil-terre (rad) équation (II.26) ;

ωs : Angle solaire à l'heure du coucher du soleil (rad) équation (II.28) ;

φ : Latitude (rad) équation ;

δ : Déclinaison solaire (rad) équation (II.27).

Les composantes de l'équation (I.25) sont calculées selon les équations suivantes.

$$dr = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (\text{II.26})$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (\text{II.27})$$

Où

π : Constante d'Archimède = 3.14 ;

J : Jour julien compris entre 1 et 365 ou 366.

$$\omega s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (\text{II.28})$$

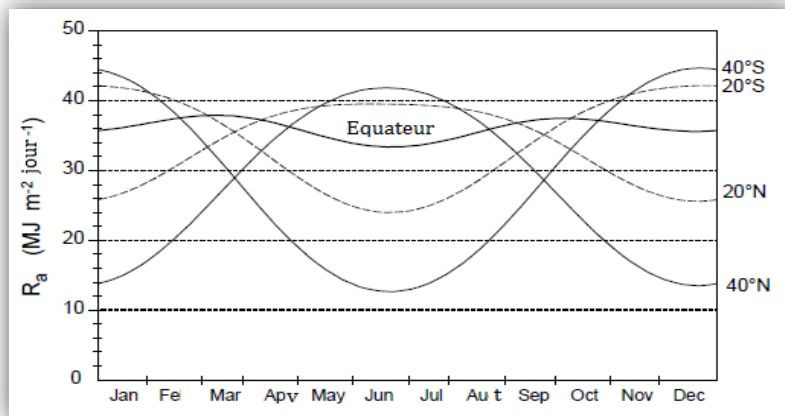


Figure II.05: Variation annuelle du rayonnement extraterrestre (Ra) à l'équateur, 20 et 40 ° nord et sud [34].

II.5.20. Flux de chaleur du sol (G) :

Des modèles complexes sont disponibles pour décrire le flux de chaleur du sol. Parce que le flux de chaleur du sol est petit par rapport à Rn , en particulier lorsque la surface est couverte par la végétation et le temps de calcul les étapes sont de 24 heures ou plus, une procédure de calcul simple est présentée ici depuis longtemps étapes, basé sur l'idée que la température du sol suit la température de l'air:

Le flux de chaleur mensuel dans le sol (G) n'est pas nul. On peut l'approcher par :

$$G = 0.07(T_{i+1} - T_{i-1}) \quad (\text{II.29})$$

Ou bien lorsqu'on ne dispose pas de (T_{i+1}), on utilise l'expression :

$$G = 0.14(T_i - T_{i-1}) \quad (\text{II.30})$$

Où

T_i : température moyenne mensuelle de l'air du mois i (°C) ;

T_{i-1} : température moyenne mensuelle de l'air du mois précédent (°C) ;

T_{i+1} : température moyenne mensuelle de l'air du mois prochain (°C).

II.6.Méthode (ET_0) basée sur la Température :

Lorsqu'il n'y a pas de données de lysimètre mesurées sur l'évapotranspiration de référence, la méthode FAO-56 (*Food and Agricultural Organization*) est recommandée comme procédure standard pour l'estimation précise de l'évapotranspiration de référence.

La méthode de Penman-Monteith est considérée comme la meilleure méthode pour estimer les ET_0 journaliers et mensuels dans tous les climats. Cela a été confirmé par de nombreuses recherches au cours de la dernière décennie.

La FAO-56 PM est une approche basée sur la physique qui nécessite des mesures de la température de l'air, de l'humidité relative, du rayonnement solaire et de la vitesse du vent. Le nombre de stations où il existe des données fiables pour ces paramètres est limité [35].

Ce manque de données a provoqué Hargreaves pour développer une approche plus simple où seules les températures de l'air sont requises. L'équation originale de Hargreaves peut être écrite comme l'équation (II.31):

$$ET_0 = 0.0023 Ra (T + 17.8)(T_{max} - T_{min}) \quad (\text{II.31})$$

Ou

T : Température moyenne horaire de l'air (°C).

T_{max} : Température maximale au cours de la journée (°C).

T_{min} : Température minimale au cours de la journée (°C).

Ra : Rayonnement extraterrestre [$MJ m^{-2} \cdot^{-1}$].

II.7. Le programme utilisé dans cette étude:

II.7.1: le programme Matlab:

Pour Calculer plusieurs des équations que nous utilisons pour le résultat final (ET_0), Nous avons choisi un programme Matlab Pour éviter la période de calcul et des erreurs de calcul manuelles. Cet organigramme présente comme suit :

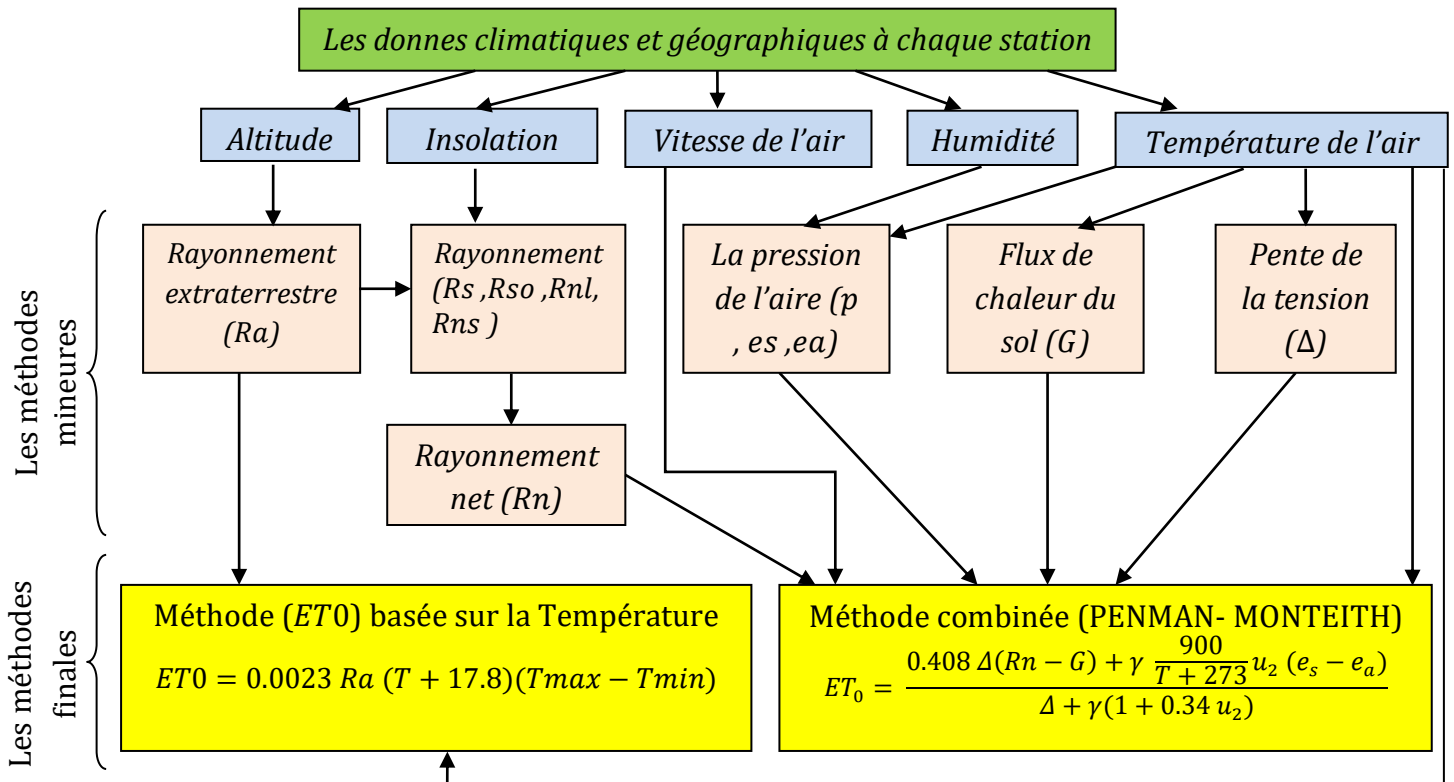


Figure II.06 : Organigramme de calcul.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1. Introduction :

Afin de faciliter l'interprétation des résultats obtenus, l'importance de les visualiser reste une étape très adéquate pour éclairer au mieux ce que nous avons proposé au cours des chapitres précédents.

Les tableaux, les graphes et les cartes sont les trois outils universels pour l'explication courante de tous résultats, de sorte que ; en chaque étape de calibrage pour n'importe quelle formule empirique les deux méthodes trouvés représentent la recette de cette étape d'étude, donc la nécessité de mettre en tableau ou les visualiser dans une carte pour permettre leur explication flagrante reste la seule méthode pédagogique et incontournable de présentation des résultats ainsi trouvés.

Chaque paramètre calibré va être cartographié sur une carte qui représente sa répartition temporelle et spatiale dans la région Ouargla.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont fondés sur la base des données climatiques des douze stations météorologiques durent une période de cinq ans allons de 2012 jusqu'à 2017.

III.2. Les résultats obtenus :

Nous afficherons les résultats sous forme de cartes, de tableaux et de courbes :

III.2.1. Les cartes climatiques de la région Ouargla :

III.2.1.1. La carte de la température :

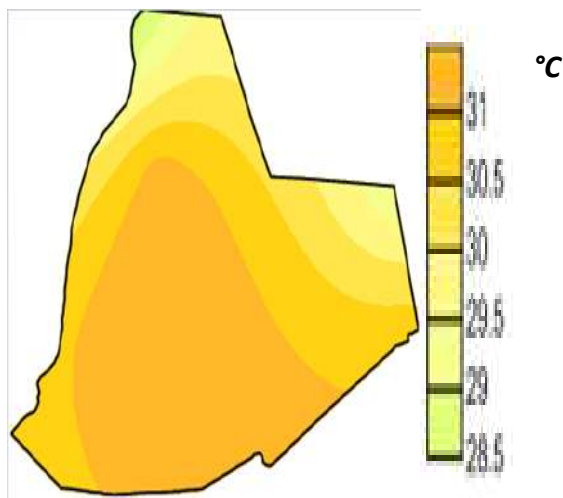


Figure III.01 : la carte annuelle de la température maximale dans la région Ouargla

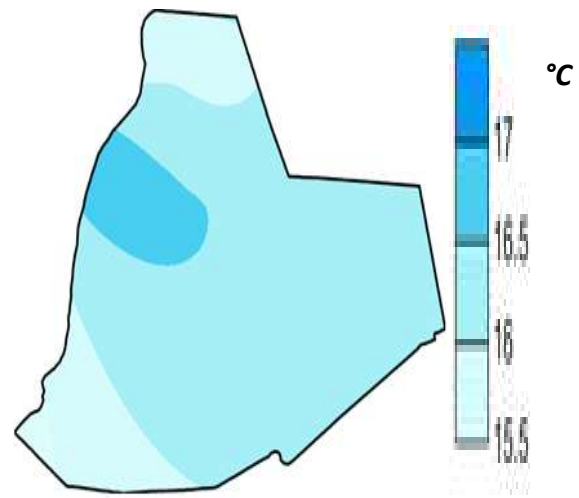


Figure III.02 : la carte annuelle de la température minimale dans la région Ouargla

Les figures (III.01 et III.02) montrent les cartes annuelles de la température dans la région Ouargla, où nous avons remarqué la valeur T_{max} augmente du Sud vers le Nord la valeur la plus élevée 31 °C était dans le Sud, et la T_{min} démunie de L'Ouest vers l'Est, la valeur la plus basse 15.5 °C était dans le nord de la région, et dans les stations de Ouargla et Touggourt et Hassi-Massaoud la température max varie entre 30 et 31 °C, la température min varie entre 16 et 17° C.

III.2.1.2. La carte de l'humidité :

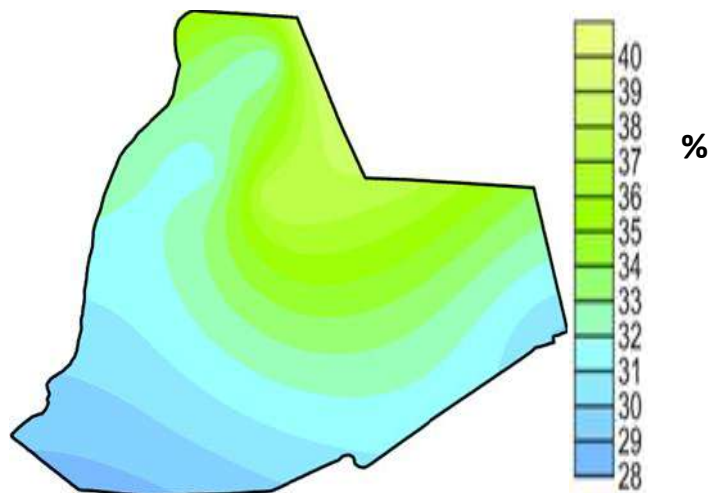


Figure III.03 : la carte moyenne annuelle de l'humidité dans la région Ouargla

La carte de La figure (III.03) présente la valeur annuelle de l'humidité relative dans la région Ouargla, où nous avons constaté que l'humidité relative diminue du Nord-Est vers le Sud-Ouest de la région, la valeur plus élevée 40 % était dans le nord, et la valeur plus basse 28 % était dans le Sud-Ouest de la région, et dans les stations de Ouargla et Touggourt et Hassi Massaoud l'humidité varie entre 32 et 38 %.

III.2.1.3. La carte de la vitesse de vent :

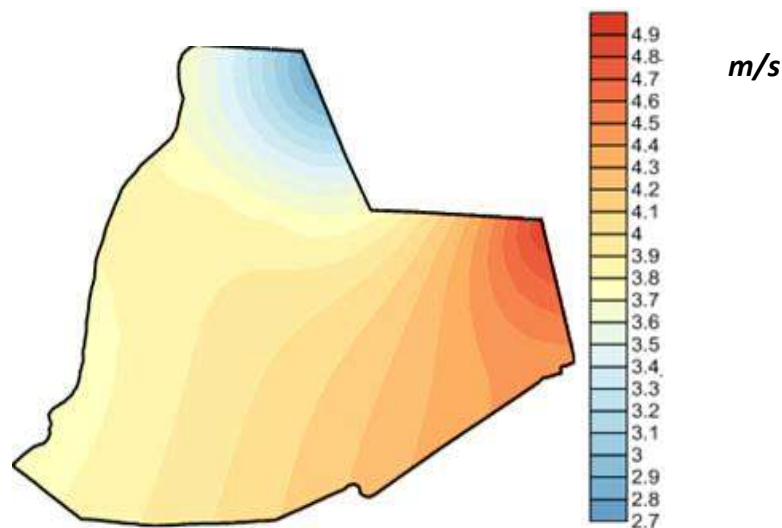


Figure III.04 : la carte moyenne annuelle de la vitesse dans la région Ouargla

La figure III.04 montre la variation spatiale de la vitesse annuelle de l'air dans la région Ouargla, elle est diminuée de l'Ouest vers l'Est et du Nord vers le Sud. Nous avons remarqué aussi que la valeur plus élevée 4.9 m/s était dans l'Est et la valeur plus basse 2.7 m/s était dans le nord-est de la région, et dans les stations de Ouargla et Touggourt et Hassi-Massaoud la vitesse varie entre 3.3 et 3.9 m/s.

III.2.1.4. La carte de la durée d'ensoleillement :

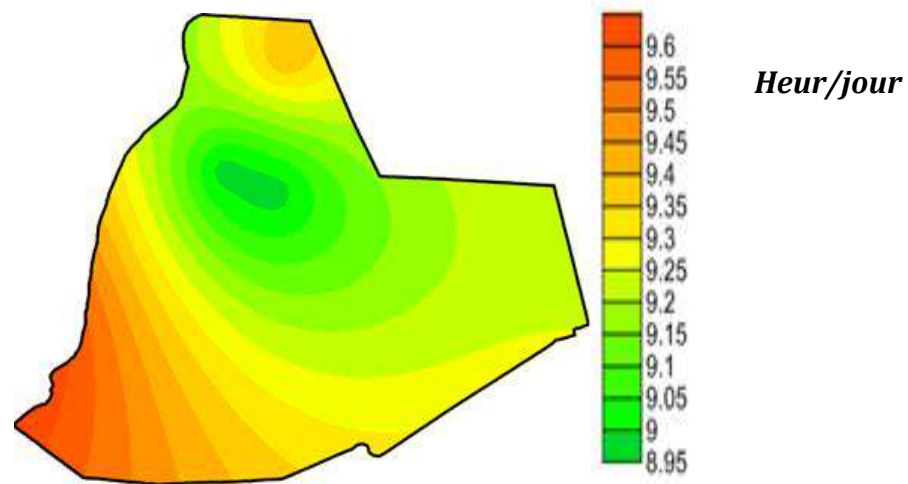


Figure III.05 : La carte moyenne annuelle de la durée d'ensoleillement dans la région Ouargla

Figure III.05 montre que la durée d'ensoleillement est principalement contrôlée par la latitude et le voisinage de nord, mais est également influencée par l'orographie.

Par conséquent, la plupart de la région Ouargla dans le sud et le centre-ouest sont représentées par des zones ayant une durée d'ensoleillement moyenne 9.3-9.6 heure, diminuant progressivement vers le nord en raison de l'effet supplémentaire de l'orographie.

III.2.2. Les résultats de l'ET₀ obtenus entre deux méthodes dans la région Ouargla :

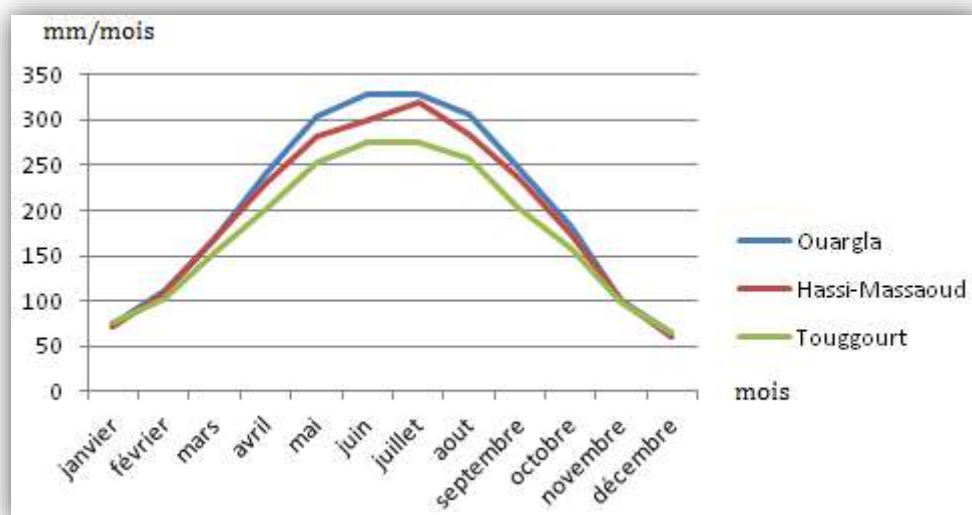


Figure III.06: Variations temporelle de l'ET₀ par la méthode de Penman- Monteith

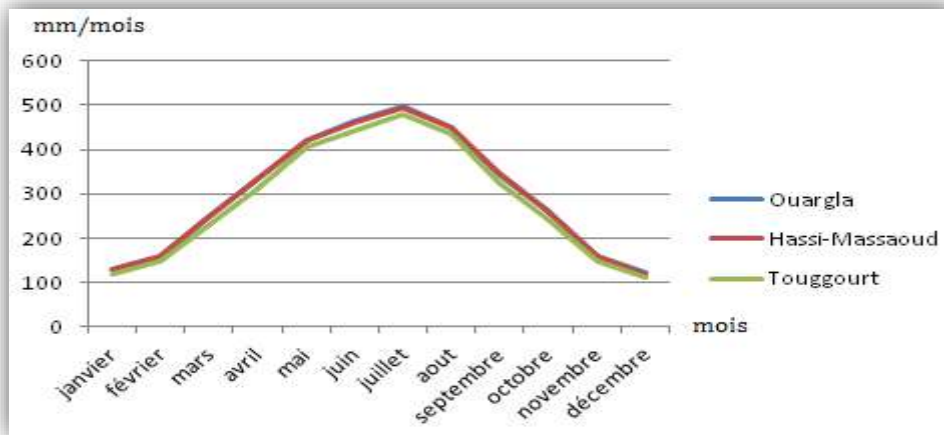


Figure III.07: Variations temporelle de l' ET_0 par la méthode base sur la température de l'aire.

Les valeurs ET_0 mensuelles pour trois stations (Ouargla, Touggourt, Hassi Massaoud) ont été estimées par les méthodes Penman-Monteith et méthode base sur la température, Les figure (III.06) et (III.07) montre les valeurs mensuelles d' ET_0 par la méthode penman-monteith température respectivement les courbes sont superposées de même ordre pour les deux méthodes (Ouargla/ Hassi Massaoud/ Touggourt) on peut expliquer ce résultat par l'effet de l'altitude (141/142/85m) c'est-à-dire la diminution de la pression atmosphérique. Pour les résultats mensuels, la plus faible valeur d' ET_0 était en décembre, alors que la valeur la plus élevée a été enregistrée en mois de juillet. D'autre part on constate que l'ordre de valeurs obtenues par les deux méthodes est très divergent.

III.3. Calage et validation pour les deux méthodes testée :

Dans cette section de l'étude, nous essayons choisirai la meilleure méthode entre les deux formules (Penman-Monteith et méthode base sur la température) qui donne des résultats précis pour cette la région. Cette partie de calcul nous renseignera c'est que le calibrage des résultats par rapport à les résultats d'une étude précédente réalisé par Baadi Nabilla en 2015 a station Touggourt [36], et calculerons le taux d'erreur entre ces résultats, Elles sont présentées dans le tableau III.01 :

Tableaux III.01 : Calage et validation pour les deux méthodes testée dans la station Touggourt.

	Méthode combine (penman-monteith)		Méthode base sur la température	
	ET0 (mm/mois)	Taux d'erreur(%)	ET0 (mm/mois)	Taux d'erreur(%)
janvier	75,2393	4.6153	120,3827	67.3842
février	102,1518	17.4159	147,509	69.5506
mars	153,0028	10.6631	229,0724	65.6823
avril	201,2892	4.4211	311,2527	47.7933
mai	252,3816	10.7309	404,8111	43.1845
juin	274,5308	14.7949	443,8807	37.7656
juillet	275,0853	25.7429	479,8251	29.5249
août	257,4998	17.6765	434,1298	38.7927
septembre	201,9749	14.8863	326,642	37.6494
octobre	157,0951	7.5258	244,9905	44.2139
novembre	98,6631	9.2615	149,8918	65.9931
décembre	64,9393	0.7196	112,4524	71.9193

Le résultat de cette étude a indiqué que les moyennes mensuelles de la méthode base sur la température étaient non significativement corrélées avec celles les résultats d'enregistrement disponibles dans la station Touggourt en 2015); par conséquent, il est impossible de prédire les valeurs ET_0 mensuelles et annuelles précisément dans d'autres zones, parce que le taux d'erreur dans cette méthode varie a 29 et 71%, C'est un très grand pourcentage par rapport aux résultats de la méthode Penmen_Monteith.

Après calage, l' ET_0 de la méthode de PENMAN-Montieth devient proches de la valeur raisonnable. Il en est de même des pourcentages d'erreur, qui se situent entre 0.71 et 25 % seulement.

III.4. Analyse temporelle de la variation de l' ET_0 de la méthode (PENMAN-Monteith) :

III.4.1. la carte de l' ET_0 annuelle:

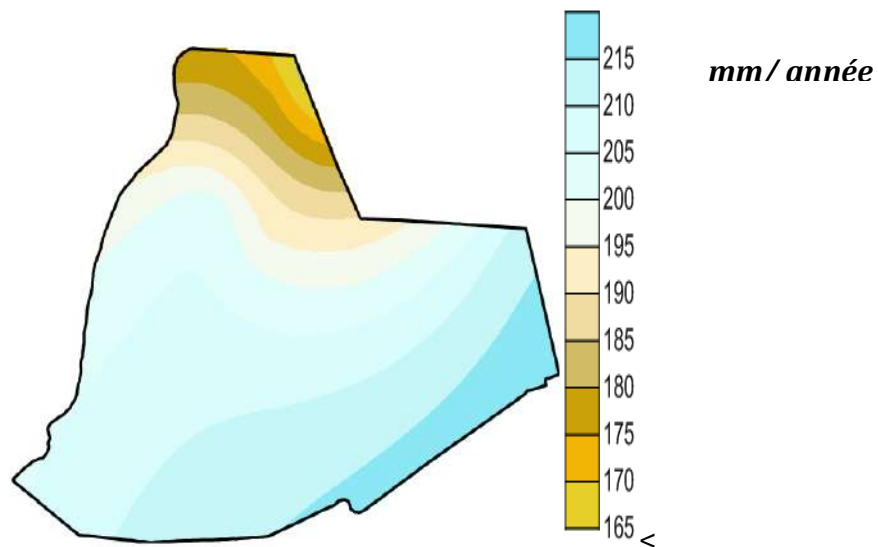


Figure III.08 : la carte de l' ET_0 annuelle.

La figure III.08 montre la carte annuelle de l'évapotranspiration de référence dans la région Ouargla, La figure suggère une augmentation graduelle de l' ET_0 du Nord au Sud-Est , OÙ nous avons remarqué la valeur élevée de l' ET_0 215 mm/mois était dans le Sud-Est Parce que le vent et la température était élevée 4.41 m/s et 30.87 C° , et la valeur basse de l' l' ET_0 165 mm/mois était dans le nord-est de la région Parce que l'humidité plus élevée >46% par ans , et dans les stations de Ouargla et Touggourt et Hassi Massaoud l' l' ET_0 annuelle varie entre 175 et 195 mm/mois.

III.4.2. La carte de l' ET_0 d'hiver:

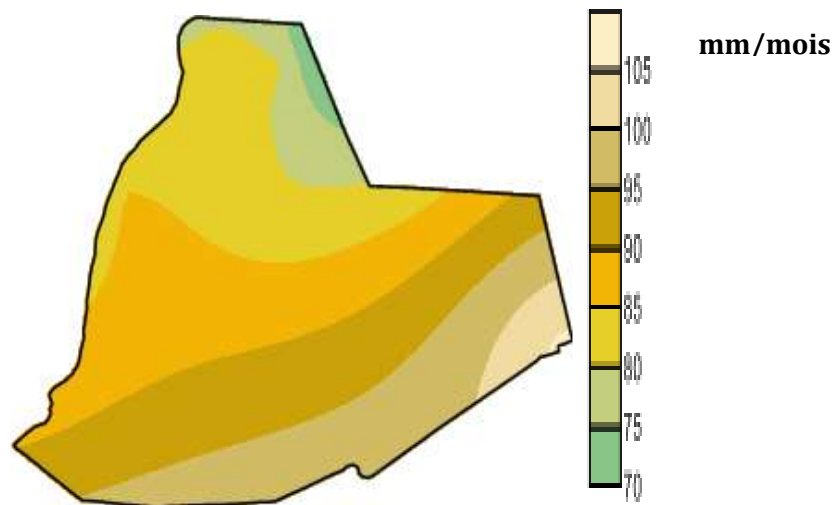


Figure III.09 : La carte de l' ET_0 d'hiver.

La carte de figure III.09 présente la variation de l'évapotranspiration de référence pour la saison de l'été hiverné dans la région Ouargla, La figure illustre une augmentation graduelle de l' ET_0 du Nord au Sud-Est, où nous avons observé la valeur élevée de l' ET_0 105mm/mois était dans le sud-est influencé par la vitesse du vent et la durée d'ensoleillement était élevée 15.8 km/h et 8 heure, et la valeur basse de l' ET_0 65 mm/mois était dans le Nord-Est de la région Parce que l'humidité plus élevée >60% et la température est très basse, et dans les stations de Ouargla et Touggourt et Hassi Massaoud l' ET_0 varie entre 70 et 75 mm/mois.

III.4.3. La carte de l' ET_0 de printemps:

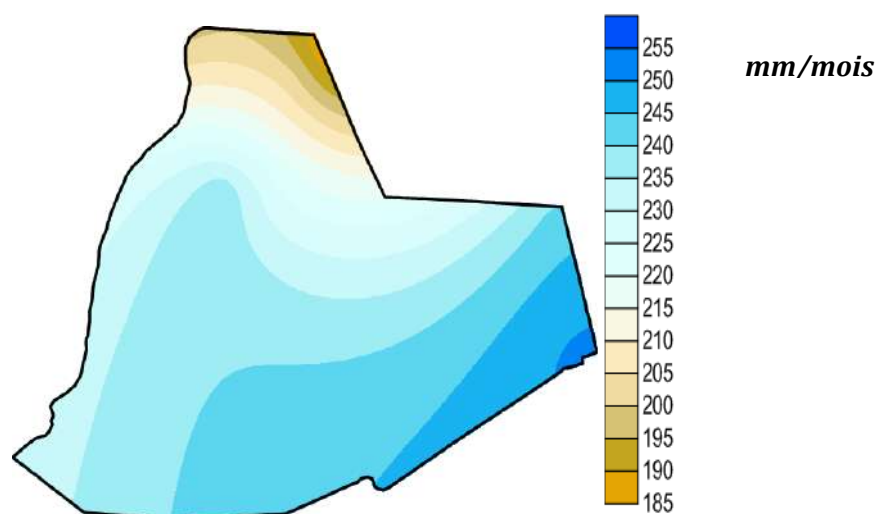


Figure III.10 : La carte de l' ET_0 de printemps.

La figure III.10 montre la carte de printemps de l'évapotranspiration de référence dans la région Ouargla, La figure suggère une augmentation progressive de l' ET_0 du Nord au Sud-Est, Nous constatons aussi une légère augmentation de la valeur de l' ET_0 par rapport à la valeur de l'hiver, car il y a une augmentation de la valeur de la vitesse du vent dans cette saison. Où nous avons enregistré la valeur élevée de l' ET_0 225 mm/mois était dans le Sud-Est, Parce que le vent et la durée d'ensoleillement était élevée 18 km/h et 10 heure, et la valeur basse de l' ET_0 185 mm/mois était dans le Nord-Est de la région, et dans les stations de Ouargla et Touggourt et Hassi Massaoud l' ET_0 varie entre 210 et 240 mm/mois.

III.4.4. La carte de l' ET_0 de L'été :

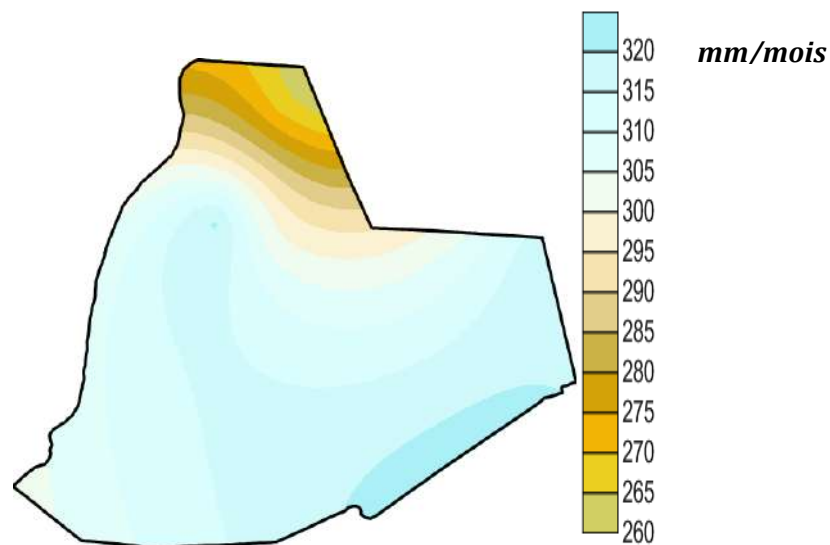


Figure III.11 : La carte de l' ET_0 de L'été.

Le schéma de la figure III.11 représente la carte de variation de l'évapotranspiration de référence à l'été dans la région Ouargla, La figure suggère une augmentation graduelle de l' ET_0 du Nord au Sud-Est, Nous remarquons une augmentation de la valeur de l' ET_0 par rapport à la valeur de l'hiver et printemps, Parce que c'est une saison très chaude et sèche. Où nous avons remarqué la valeur plus élevée de l' ET_0 320 mm/mois était dans le sud-est, et la valeur basse de l' ET_0 260 mm/mois était dans le nord-est de la région, et dans les stations de Ouargla et Touggourt et Hassi Massaoud l' ET_0 varie entre 280 et 315 mm/mois.

III.4.5. la carte de l' ET_0 d'Automne:

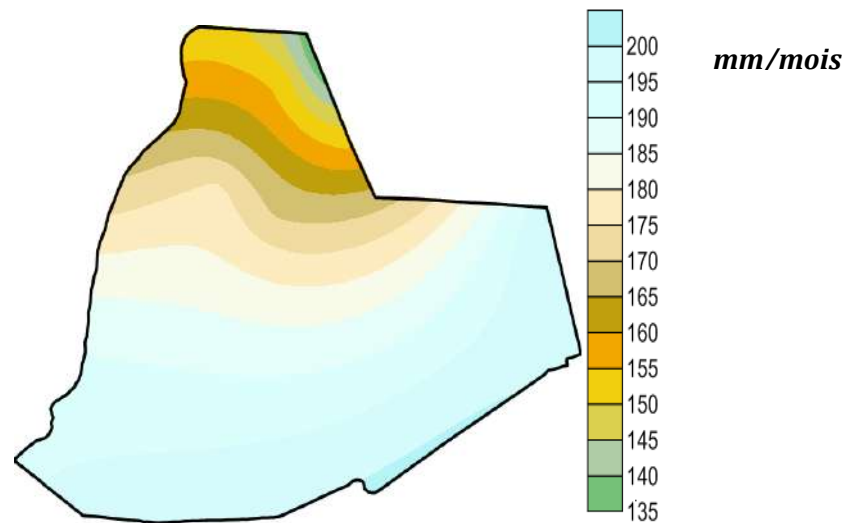


Figure III.12 : la carte de l' ET_0 d'Automne.

La figure III.12 illustré la carte de la variation spatiale de l'évapotranspiration de référence d'Automne dans la région Ouargla, La figure suggère une augmentation progressive de l' ET_0 du Nord au Sud-Est, Nous remarque une Diminuer de la valeur de l' ET_0 par rapport à la valeur de l'été, Parce qu'il y a une diminution de la valeur de la température et la vitesse de l'air. OÙ nous avons enregistré la valeur plus élevée de l' ET_0 200 mm/mois était dans le sud-est, et la valeur basse de l' ET_0 135 mm/mois était dans le nord-est de la région, et dans les stations d'Ouargla et Touggourt et Hassi-Massaoud l' ET_0 varie entre 150 et 175 mm/mois.

Conclusion général :

Ce travail avait pour objectif de contribuer à élaborer une d'estimation de l'évapotranspiration de référence (ET_0) à la région d'Ouargla. Deux méthodes ont été mise au point pour évaluer ce paramètre la méthode de Penman-Monteith recommandée par la FAO et la méthode Trajkovic à baes de la température.

Pour atteindre cet objectif, les ET_0 calculées par les méthodes testées ont été comparées à celles fournie par une étude précédente réalisé par Baadi Nabilla en 2015 à station Touggourt, de sorte d'en évaluer les performances.

Les résultats obtenus montrent que les meilleures estimations de l' ET_0 sont obtenues avec la méthode de Penman-Monteith, qui se révèle la meilleure à toutes les stations, ce qui n'a rien d'étonnant compte-tenu du degré de filiation entre les deux méthodes.

L'analyse des résultats fournis par ce travail montre que la variation spatiale de l'évapotranspiration de référence (ET_0) est progressive de Sud vers le Nord, la valeur annuelle passe de moins de 165 à 215 mm/mois. La variation temporelle de ce paramètre est importante des valeurs supérieurs 350 mm/mois ont été enregistrées au mois du Juillet, alors ces valeurs déminer à moins de 70 mm/mois dans certains endroits de la zone d'étude au mois de décembre.

Il convient toutefois de noter que, compte tenu de l'étendue de la zone d'étude et de ses contrastes climatiques, le nombre des stations utilisées dans cette étude s'avère insuffisant pour tirer des conclusions définitives. Un plus grand nombre de stations pourrait permettre de définir pour chaque zone climatique une méthode spécifique d'estimation de l'évapotranspiration de référence qui pourrait être utilisée quand les données nécessaires pour appliquer la méthode de Penman-Monteith, et donc aussi celle de PENMAN, ne sont pas toutes disponibles.

Bibliographique:

- [1] XU C.Y. et SINGH V.P. (2000) - Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, vol. 14, n° 2, p. 339-349.
- [2] MUSY A. et HIGY C. (2004) - *Hydrologie. Une science de la nature*. Édit. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne (Suisse), 314 p.
- [3] TABARI H. et TALAEE P.H. (2011) - Local calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for Estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 16, n° 10, p.837-845.
- [4] ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D. et SMITH M. (1998) - *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop requirements*. FAO irrigation and drainage paper, vol. 56, Rome, 15 p.
- [5] ALEXANDRIS S., STRICEVIC R. et PATKOVIC S. (2008) - Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*, vol. 21, n°22, p. 17-28.
- [6] BEN MANSOUR Siham, KORICHI Rahila (2013), Etude de l'évapotranspiration réelle liée à l'évapotranspiration potentielle et à la production agricole phœnicicole à l'échelle de l'écosystème de l'ITAS. Mise au point d'un modèle basé sur la consommation de l'eau et la production agricole.
- [7] Mihoub A., Helimi S., Mokhtari S. et Halitim A. (2016) / *Revue Agriculture*. Numéro spécial 1 189-197.
- [8] Dictionary.com. "the definition of evaporate". Retrieved 2018-01-23.
- [9] Sinha, Rajiv Kumar (2004-01-01) .*Modern Plant Physiology* . CRC Press. ISBN 978-0-8493-1714-9.
- [10] Taiz (2015), *Lincoln Plant Physiology and Development*. Sunderland, MA: Sinauer Associates, Inc. p. 101. ISBN 978-1-60535-255-8.
- [11] Singh, V.P., 1994 : *Elementary Hydrology*. Prentice Hall of India, New Delhi.
- [12] Mustapha MJEJRA (2015) .*Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de l'Oued Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique*. Thèse pp 13-14
- [13] Lu, Jianbiao, et al (2005). "A Comparison of Six Potential Evapotranspiration Methods for Regional Use in the Southeastern United States." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 41.3 : pp 621-633.
- [14] W. R. Hamon (1960), *Estimating potential evapotranspiration* [archive]. [PDF] (Thèse de doctorat présentée au Massachusetts Institute of Technology) .
- [15] Ludovic Oudin (2004), *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global* [archive], ENGREF, p. 22-24
- [16] R.J. Bouchet, *Évapotranspiration réelle et potentielle et signification climatique (Cf. Effet oasis)* [archive] - station centrale de bioclimatologie, Versailles Institut national de la Recherche agronomique (France).
- [17] ALLEN R.G., PEREIRA, L.S., HOWELL. T et JENSEN M.(2011): *Evapotranspiration information reporting: Factors governing measurement accuracy*. *Agricultural Water Management* **98** (6) .pp. 899-920.
- [18] TOURAD O.S.(1960), *Contribution à la conception d'un évaporomètre a surface poreuse*. Thés Ing Agr. INA. El -HARRACH.
- [19] BOUCHET R.J., ROBELIN M.(1960), *Météorologie et agronomie bulletin technique d'information* : p 238 .

- [20] PEGUY CH. P.(1970), *Précis de climatologie*. 2eme édition ,ed. Masson et cie. Paris: pp 265-275.
- [21] Seltzer, P (1946). *Le climat de l'Algérie*. Carbonel, Alger, p219 .
- [22] BARNITER I.(1978), *Elément pour l'étude du climat et la bioclimatologie*. Document reneotupé INA. paris: p101.
- [23] SAINIH S., ASPINALL D.(1998), *Sterility in weat induced by water deficit or high temperature: possible mediation by abscisic acid*. Australia:pp 529-537.
- [24] LAROUCI N.(1991), *Contribution à la conception d'un évaporomètre a surface poreuse*. Thèse Ing.Agr., INA,Al harrach.
- [25] BNEDER.(1992), *Hydrogéologie, Mission .n°2*. TIPAZA:p25.
- [26] Situation Géographique , J. Delheure, Vivre et mourir à Ouargla p. 24.
- [27] Tutiempo Network, S.L. (<https://fr.tutiempo.net/climat/afrique.html>)
- [28] RAMADE F., 2003-*élément d'écologie fondamentale*. Ed. Dunod, Paris, p99-689.
- [29] O.N.M ,ffice National de Météorologie, données climatiques de la période 2012-2017 station de Ouargla.
- [30] DAJOZ R., 1982-*Précis d'écologie*. Ed. Bordas. Paris. 503p.
- [31] ROUVILLOIS-BRIGOLM.,1975-*le pays de Ouargla, Sahara algérien-Ed-département de géographie de l'université de paris-soobonne*.P389
- [32] Jensen, M. E.(2000), and R. G. Allen. *Evolution of practical ET estimating methods*. In *Proc. of the 4th National Irrigation Symposium*, 52–65. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- [33] ALLEN R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., et SMITH, M (1998) : *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements*. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, Rome, Italy ,300p.
- [34] Richard G. ALLEN , Luis S. PEREIRA , Dirk RAES, Martin SMITH (2006) : *Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 ppp .19-24-44-43.
- [35] Trajkovic, S.(2007), *Hargreaves versus Penman–Monteith under humid conditions*. J. Irrig. Drain. Eng. 133 (1), p 38–42.
- [36] Baadi Nabila,(2016), *Etude de l'influence des eaux d'irrigation dans la recharge du lac de Témacine*, p33.

Annexe

Annexe 1 :

❖ Formule du programme utilisé :

```
%% Import data from spreadsheet
% Script for importing data from the following spreadsheet:%
% Workbook: D:\memoir master 2\les stations 2012-2017\.xlsx
% Worksheet: Feuill%
% To extend the code for use with different selected data or a different
% spreadsheet, generate a function instead of a script.
% Auto-generated by MATLAB on 2018/03/01 11:31:21
%% Import the data
[~, ~, raw] = xlsread('D:\memoir master 2\les cités 2012
2017\.xlsx','Feuill','A2:N13');

%% Create output variable
data = reshape([raw{:}],size(raw));

%% Allocate imported array to column variable names
Mois = data(:,1);
L = data(:,2); %latitude (degré)
Tmax = data(:,3); %température maximale au cours de la journée.
Tmin = data(:,4); %température minimale au cours de la journée
Hr = data(:,5); %humidité relative moyenne horaire
uz = data(:,6); %vitesse de vent en (km/h)
n = data(:,7); %durée réelle du soleil en un jour
j = data(:,8);
Tmoismaxi_1 = data(:,9);
Tmoismaxi1 = data(:,10);
Tmoismini_1 = data(:,11);
Tmoismini1 = data(:,12);
nj = data(:,13);

%% Clear temporary variables
clearvars data raw;

% _____ température moyen de l'aire (c°) _____ %
T=(Tmax+Tmin)/2;

% _____ vitesse u2(m/s)et pression atmosphère(kpa) _____ %
z=10;
u2=uz.*(4.87/(log(67.8*z-5.42)))*1000/3600;
p=(101.3)*((293-(0.0065*z))/293)^5.26;

% _____ Constante psychrométrique (kPa.°C-1) _____ %
gamma=(0.665*10^(-3))*p;

% _____ chaleur spécifique d'air [MJ kg-1 °C-1]. _____ %
lambda = 2.45; %chaleur latente de changement d'état (kJ.kg-1)
epsi =0.622; %rapport poids moléculaire de la vapeur d'eau / air sec
cp = (gamma*epsi*lambda)/p;

% _____ (rs) la résistance du couvert végétal(s.m?l) _____ %
h=0.12; %hauteur de récolte constante (m)
d=(2/3)*h; %hauteur de déplacement(m).
zom=0.123*h; % hauteur initiale de transfert du vent (m)
Lai=0.5*24*h; %indice foliaire de la feuille.
r1=100; %la résistance stomacale de la feuille bien illuminée
(s.m?l)
rs=r1/Lai;

% _____ (ra)la résistance aérodynamique (s.m-1) _____ %
zoh=0.1*zom; %hauteur initiale de transfert de la chaleur et de la
vapeur (m)
zh=2; %la hauteur la mesure de l'humidité (m)
zm=2; %la hauteur de la mesure du vent (m)
k=0.41; %constante de von Karman's.
ra=((log((zm-d)/zom)).*(log((zh-d)/zoh)))./(u2.*(k^2));
```

Annexe

```
% es eT ea (kpa) %
eT=0.6108.*exp((17.27.*T)/(T+237.3)); %pression de vapeur de saturation à la
ea=(eT.*Hr)/100; %température de l'air.
es=(0.6108.*exp((17.27.*Tmax)/(Tmax+237.3))+(0.6108.*exp((17.27.*Tmin)/(Tmin+237.
3))))/2; %tension de vapeur à la température.
%tension de vapeur saturante.

% (Ra) rayonnement extraterrestre [MJ m-2 jour-1] %
pi=3.14;
Q=L.*pi./180; %latitude (rads).
dr=1+(0.033.*cos(2.*pi.*j./365)); %distance relative de la Terre-Soleil.
sigma=(0.409.*sin((2.*pi.*j./365)-1.39)); %déclinaison solaire (rad).
ws=acos(-1.*tan(Q).*tan(sigma)); %angle du coucher du soleil (rad).
Ra=(24*60/pi).*0.082.*dr.*((ws.*((sin(Q)).*(sin(sigma))))+(cos(Q)).*(cos(sigma)).*
(sin(ws))));

% (Rn) rayonnement net [MJ m-2 jour-1] %
N=(24*ws)/pi; %durée d'ensoleillement maximale possible en un
Rs=(0.25+0.5.*(n./N)).*Ra; %rayonnement solaire ou ondes courtes.
Rns=(1-0.23).*Rs; %rayonnement solaire net ou ondes courtes [MJ m-2
Rso=(0.75+(2*(10^(-5))*z)).*Ra; %rayonnement solaire du ciel clair[MJ m-2 jour-1].
Tmaxk=Tmax+273.13;
Tmink=Tmin+273.13;
Rnl=4.903.*(10^(-9)).*((Tmaxk.^4)+(Tmink.^4))./2).* (0.34-
(0.14.*sqrt(ea)).*((1.35.*(Rs./Rso))-0.35); %rayonnement à longue distance net
Rn=Rns-Rnl; %sortant.[MJ m-2 jour-1].

% rhoA %
R=0.287; %constante de gaz spécifique [kJ kg-1 K-1].
Tkelv = 1.01.*(T+273); %la température virtuelle(k).
rhoA = p./(Tkelv.*R); %densité moyenne de l'air(kg/m3).

% G flux de chaleur du sol[MJ m-2 jour-1] %
G=0.07.*(((Tmoismaxil)+(Tmoismini1))./2)-(((Tmoismaxi_1)+(Tmoismini_1))./2);

% pente de la courbe de la tension de vapeur saturante (kPa.°C-1) %
delta=(4098.*(0.6108.*exp(17.27.*T/(T+237.3))))/(T+237.3).^2;

% ET0 (mm/mois) %
ET0=nj.*(0.408.*delta.*(Rn-G)+gamma.*u2.*900./(T+273)).*(es-
ea)/(delta+gamma.*(1+0.34.*u2)); %méthode combine%

ET02=nj.*(0.0023).*Ra.*(T+17.8).* (Tmax-Tmin).^ (0.424); %méthode base sur la
% température%

% fin %
```

Annexe 2 :

❖ Le programme SURFER (10):

Surfer 10 est un logiciel écrit pour Windows XP et 7. Surfer displays de données pour créer les cartes de base, cartes de contours, cartes postales et cartes postales classées, cartes-images, cartes en relief ombragées, cartes vectorielles, cartes de bassins hydrographiques, cartes filaires 3D et cartes de surface 3D. Il peut créer des profils, calculer longueur et les zones, et calculer les volumes.