



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

Université de Blida -1-
Département de biotechnologie

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de master

Option : Eau et Environnement

**Etude comparatives des besoins en eau estimés par les modèles
semi empirique**

Présenté par :

M^S KHELIFATI FERDOUS

DEVANT LES MEMBRES DU JURY

Nom et prénom	Grade	Qualité
M ^{me} N. YAHIA	MCB U. BLIDA 1	Présidente
M ^r L. ZELLA	P _r U. BLIDA 1	Promoteur
M ^r S. HADJ MILOUD	MAA U. BLIDA 1	Examineur
M ^r AMIROUCHE	MAA U. BLIDA 1	Examineur

Juin- 2018

Dédicace

Je dédie ce travail :

À ceux qui m'ont comblé d'affection et d'amour, À ceux qui n'ont jamais cessé de se sacrifier pour mon avenir,

À ceux que je dois mon bonheur et mes joies,

À mes très chers parents.

À mes très chers MON FRÈRE.

DJAAFAR pour leurs aides, leurs encouragements et leur présence à côté de moi pendant

Toute la vie universitaire ;

À toute la famille KHELIFATI et DOUBA ;

À mes chers amis : HASSIBA, IMANE, AMINA, ROSSA,

À tous mes collègues de L'université Saad Dahleb Blida et

Spécialement à ma promotion de spécialité Eau et

Environnement (2016-2018) À ceux que j'ai oublié de citer.

KHELIFATI.FERDOUS

Remerciements

A l'issue de ce modeste travail, je tiens à remercier tout d'abord mon bon DIEU tout puissant, de m'avoir procuré patience et volonté pour aboutir et pour son aide miséricordieuse durant toutes mes années d'étude.

Je tiens à remercier mon promoteur Mr. ZELLA, L Professeur à l'Université de Blida. Chef d'option eau et environnement.

Et surtout Med. Samadhí. D, Directeur de Recherche INRA Alger, pour avoir dirigé et guidé ce travail ; pour son soutien au cours de ma formation.

Je remercie Med .Yahya, Maitre de conférences à l'université de Blida, d'avoir accepté d'examiner le document et faire partie du jury de soutenance.

Je remercie Mr. Hadj Miloud, S, doctorat à l'Université de Blida, d'avoir accepté d'examiner le document et faire partie du jury de soutenance.

Je remercie Mr. Amirouche, M doctorat à L'ENSA d'avoir accepté d'examiner le document et faire partie du jury de soutenance.

Je remercie vivement tous mes enseignants, Mme Ramini, Mme Haddadi, Mr Dégaychiya, Mr Mimouni, Mr Chemlale et toute personne qui a contribué à mes études.

Mes grands remerciements pour mes chers collègues de la promotion master 2016-2018 et de licence 2015.

Sommaire

Introduction générale.....	1
I. Evapotranspiration.....	4
1. Définition.....	8
2. Les mesures de l'évapotranspiration.....	11
2. 1. Les facteurs conditionnels de la mesure de l'évapotranspiration.....	15.
2. 2. Les outils de mesures de l'évapotranspiration.....	21
3. Estimation de l'évapotranspiration.....	24
3.1. Evapotranspiration de référence (ET ₀).....	25.
3. 2. Estimation de L'évapotranspiration potentielle (ETP).....	26
3. 3. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	30.
3. 4 .Estimation de l'évapotranspiration maximale (ETM).....	30.
3. 4. 1. Calcul l'évapotranspiration maximale.....	31
3. 4. 2. L'élément conditionnel de l'ETM.....	31
4. Concept de la déficience d'évaporation.....	32
5. Importance de l'évapotranspiration.....	33
5. 1. Evapotranspiration et cycle de l'eau.....	33
5. 2. Évapotranspiration et écosystèmes.....	33
6. Méthode évaluation d'évapotranspiration.....	34.
6. 1. Les formules évapotranspiration.....	35
6. 1. 1. Blaney-Criddle.....	36
6. 1. 2. Méthode des Hargreaves.....	37
6. 1. 3. Formule de FAO modifie Penman.....	37
6.1.4. Formule de Penman-Monteith.....	37
6. 1. 5. Formule de Makkink.....	38.

Conclusion.....	37
II. Matériel et méthode.....	38
1. Situation et limite de la région d'étude	38
2. Répartition générale des terres agricoles.....	39
3. Les données édaphiques.....	39
3.1. Le sol.....	40
4. Données climatiques.....	41.
4. 1. Caractéristiques climatiques du site	41
5. Méthode évaluation d'ET0 Calculateur.....	42
5.1. Le logiciel ET0 Calculateur.....	42
5. 2. Calcul d'ET0	42
III. Résultats et discussions.....	43
I. Contexte climatique.....	43.
II. Analyse de l'évapotranspiration potentielle moyenne	44
1. A l'échelle mensuelle (ETP)	44
1. A l'échelle annuelle (ETP)	45
2. Analyse les résultats	46
2. 3. Corrélation entre l'ETP PM et d'autres formules	47.
2.4. Analyse la régression linéaire	48
II. Evaluation évapotranspiration potentielle moyenne sur les quatre wilayas.....	50
Conclusion générale.....	50

Résumé

La gestion durable des ressources en eau nécessite une bonne maîtrise des termes du bilan hydrologique. L'évapotranspiration, facteur important de perte en eau de ce bilan, a été estimée sur les régions d'Alger, Constantine, Oran, Biskra, Située dans les hauts plateaux, par un ensemble de méthodes physiques sur une série des données climatiques (température, l'humidité relative, la durée insolation, la vitesse du vent et l'évaporation Pichet) recueillies au niveau de la station météorologique (ONM) de Dar EL Beida, (1994-2008).

Les résultats montrent, qu'à l'échelle mensuelle, les valeurs de l'évapotranspiration Potentielle (ETP) obtenues par le modèle de Penman-Monteith, s'approchent des valeurs de l'ETP de Blaney Criddle. Cependant, durant la saison sèche, cette méthode de calcul sous-estime considérablement l'évapotranspiration potentielle.

Par ailleurs, l'application des différentes approches pour l'estimation de l'ETP annuelle, met en évidence que la méthode de Penman-Monteith, conduit à une meilleure estimation de cette composante climatique.

Mots clés : Paramètre climatique, logiciel ET0 calculateur, évapotranspiration de référence (ET0), Nord Algérie

Summary

Sustainable management of water resources requires good control of the terms of the water budget. Evapotranspiration, an important water loss factor in this assessment, has been estimated the regions of Algiers, Constantine, Oran, Biskra, in the highlands, by a set of physical methods on a series of climatic data (temperature, relative humidity, duration). Sunstroke, wind speed and evaporation Pitcher) collected at the weather station (ONM) Dar El Beida (1994-2008).

The results show that, on a monthly scale, the Potential evapotranspiration (ETP) values obtained by the Penman-Monteith model approach the values of the Blaney Criddle ETP. However, during the dry season, this calculation method greatly underestimates potential evapotranspiration.

Moreover, the application of the different approaches for the estimation of the annual ETP highlights that the Penman-Monteith method, leads to a better estimate of this climatic component.

Key words: Climatic parameter, ET0 computer software, reference evapotranspiration (ET0), North Algeria.

ملخص

تتطلب الإدارة المستدامة للموارد المائية رقابة جيدة على شروط ميزانية المياه. تم تقدير تبخير البخر، وهو عامل مهم لفقدان المياه في هذا التقييم، في مناطق الجزائر العاصمة وقسنطينة ووهران وبسكرة، الواقعة في المرتفعات، من خلال مجموعة من الطرق الفيزيائية على سلسلة من البيانات المناخية (درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، مدة العزل، سرعة الرياح وأبخرة (ONM) التبخير التي تم جمعها في محطة الدار البيضاء (1994-2008) للأحوال الجوية.

Penman-Monteith التي حصل عليها نموذج (ETP) تظهر النتائج أنه على مقياس شهري، فإن قيم التبخر المحتملة ومع ذلك، خلال موسم الجفاف، فإن طريقة الحساب هذه تقلل إلى حد كبير من Blaney Criddle ETP تقترب من قيم التبخر المحتمل.

تؤدي إلى Penman-Monteith السنوي، يبرز أن طريقة ETP وعلاوة على ذلك، فإن تطبيق النهج المختلفة لتقدير

الكلمات المفتاحية:

المعلمة المناخية ، برمجيات الحاسوب، شمال الجزائر (ET0) ، التبخير المرجعي ET0

INTRODUCTION

L'évapotranspiration est un terme utilisé pour décrire la somme de l'évaporation et de la transpiration des plantes sur La surface terrestre de la Terre à l'atmosphère.

L'évapotranspiration c'est le deuxième plus Variable importante dans le cycle hydrologique après la pluie et a un rôle important en tant que facteur de contrôle de Volume du ruissellement ou débit de la rivière, besoin en eau d'irrigation et les teneurs en humidité du sol (Mohan et Arumugam, 1996).

Il est maintenant clair que le changement climatique provoquera une hausse constante de la température et changements dans le régime des précipitations. Une température plus élevée induira évapotranspiration plus élevée qui à son tour affectera le système hydrologique et les ressources en eau (Shahid, 2011).

Ainsi, quantifier les changements de l'évapotranspiration en raison du climat le changement est très important pour la gestion de ressources en eau à long terme. Surtout dans les terres cultivées, il est essentiel de mesurer les changements possibles dans l'évapotranspiration et probabilité de pertes d'eau dues au changement climatique.

Compte tenu de l'importance de l'évapotranspiration, les hydrologues ont développé de nombreuses méthodes pour son estimation.

Chaque méthode a sa propre perspective et concept, et a été développé pour une configuration climatique spécifique. Une partie de ces méthodes sont essentiellement la version modifiée d'Autres méthodes. Cependant, la principale préoccupation dans l'estimation L'évapotranspiration est la fiabilité et la précision des méthodes (Burnash, 1995).

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 (Tabari, 2010).

Quelques méthodes d'évaluation de ET_0 : Thornthwaite (1948) ont introduit la notion d'évapotranspiration potentielle (ETP) dans l'optique d'une classification des climats. Cette notion représente la demande climatique imposée par le climat sans restriction d'eau pour le sol et qui correspond au pouvoir évaporant de l'air (Mounier., 19652 ; Dagorne et al1996). Depuis les années 1950, les formules et les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration se multiplient et les chercheurs (climatologues, météorologues, agronomes, hydrologues et les ingénieurs hydrauliciens) ne cessent pas d'étudier ce paramètre climatique. Ainsi, de

nombreuses formules, d'estimation de l'évapotranspiration, adaptée à différents climats, ont été proposées par différents auteurs. Il s'agit des formules élaborées par Thornthwaite 1944 ; Penman 1948 ; Turc 1961 ; De Villèle 1965 ; Espinar 1975 ; Riou 1980 ; Allen 1998 ; Cash 2007 ; Zhou 2009.

Le calcul des besoins en eau est primordial en irrigation ; quel que soit la méthode d'irrigation la connaissance des besoins en eau est nécessaire d'où l'importance des méthodes de calcul. Quand on prévoit l'irrigation il est utile de calculer l'évapotranspiration potentielle, une donnée basée sur les paramètres climatiques elle prend en compte une série de données et visé à déterminer la valeur qui se répète fréquemment.

Ces besoins sont estimés par des méthodes théoriques dont les résultats divergents suivent.

Ce travail consiste à prendre un exemple de cinq méthodes à savoir Penman-Monteith, FAO-Penman, Hargreaves, Makkink et Blaney Criddle. Le calcul est effectué par un logiciel ET₀ calculateur sur ordinateur en prenant les données climatique d'Alger et de Biskra, Constantine, Oran.

Liste des figures

N°	Intitulé	Page
Figure 01:	le processus d'évapotranspiration	4
Figure 02:	Mesure de l'évapotranspiration réelle par lysimètre	7
Figure 03	Schéma d'un évapotranspiromètre.....	7
Figure 04 :	Eddy corrélation, à gauche schéma théorique à droite photo de l'appareil	8
Figure 05 :	(a) Bac d'évaporation (classe A) du Weather Bureau.....	9
Figure 06 :	Evaporomètre Piche	10
Figure 07 :	Représentation de l'évapotranspiration de référence « ET0 »... ..	11
Figure 08 :	Evapotranspirations réelle (ETR) et de référence (ET0).....	15
Figure 09 :	Cycle de développement d'une culture	16
Figure 10 :	Etage bioclimatique de l'Algérie	19
Figure 11 :	Différents écosystèmes dans le monde	20
Figure 12:	Localisation géographiques des régions d'études	36
Figure13 :	Interface de logiciel ET0.....	37
Figure 14 :	ETo mensuelle estimée par diverses méthodes (lignes) par rapport à la méthode FAO Penman-Monteith (barres)	38
Figure 15 :	Données relation entre ET0P-Met ET0 Pen	40
Figure 16 :	Données relation entre ET0P-Met ET0 Harg	40
Figure 17 :	Données relation entre ET0P-Met ET0 B-C.....	41

Liste des tableaux

N°	Intitulé	Page
Tableau 01:	Classification des méthodes de mesure-estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle.....	6
Tableau 02:	Densités apparentes (da) et réserves utiles (RU en % et en mm) dans quelques stations de la région	13
Tableau 03:	Valeurs de l'ETM calculées pour différentes classes d'occupation du sol, en pleine saison de développement végétal.....	14
Tableau 04:	Coefficients culturaux et durée (en jours) des différentes phases de développement de quelques cultures pratiquées au Nord de la Tunisie.....	14
Tableau 05:	Les coefficients culturaux simples et la hauteur maximale pour différentes cultures et pour différentes régions pour à climat humide	21
Tableau 06:	Modèles d'ETP recensés dans la littérature (Zella, 2015).....	28
Tableau 07:	Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration (adapté d'Oudin, 2004).....	30
Tableau 08:	Classification des quatre régions (altitude, latitude, longitude).....	31
Tableau 09:	Répartition générale des terres agricoles dans la wilaya de Constantine (Campagne agricole 2004/2005)	31
Tableaux 10:	La culture des tomates et agrumes dans la wilaya d'Alger.....	39
Tableau 11:	Répartition générale des terres agricoles.....	39

I. Evapotranspiration

1. Définition

L'évapotranspiration (ET) est l'ensemble de la combinaison de tous les processus par lesquels l'eau du sol est transférée dans l'atmosphère ; l'évaporation provenant de l'eau de la surface du sol et de l'eau interceptée par les plantes, plus celle transpirée par leurs organes aériens (ASCE, 1990).

Thornthwaite (1944) a défini l'évapotranspiration potentielle (ETP) comme étant la perte d'eau maximale par la végétation si, à aucun moment, le sol ne se trouve en déficit hydrique. Après, il constate la nécessité de préciser un certain nombre de conditions climatiques et végétales (Thornthwaite, 1954).

Selon Tsé (1999), l'ET est « l'ensemble de la combinaison de tous les processus par lesquels l'eau du sol est transférée dans l'atmosphère, l'évaporation provenant de l'eau à la surface du sol et de l'eau interceptée par les plantes plus celle transpirée par leurs organes aériens ».

Pour les hydrologues, l'évapotranspiration est l'ensemble des phénomènes qui transforment l'eau liquide, en vapeur d'eau, par un processus physique (Chuzeville, 1990). Le terme générique d'évapotranspiration, est utilisé pour prendre en compte la combinaison de ces deux processus, qui ont lieu généralement, simultanément dans la situation d'un sol couvert par de la végétation. En effet, la transpiration des végétaux (évaporation physiologique), permet à la vapeur d'eau de s'échapper des plantes vers l'atmosphère. Quand, à l'évaporation physique elle représente, les surfaces d'eau libre, des sols dépourvus de végétation et des surfaces couvertes par de la neige ou de la glace (figure 1).

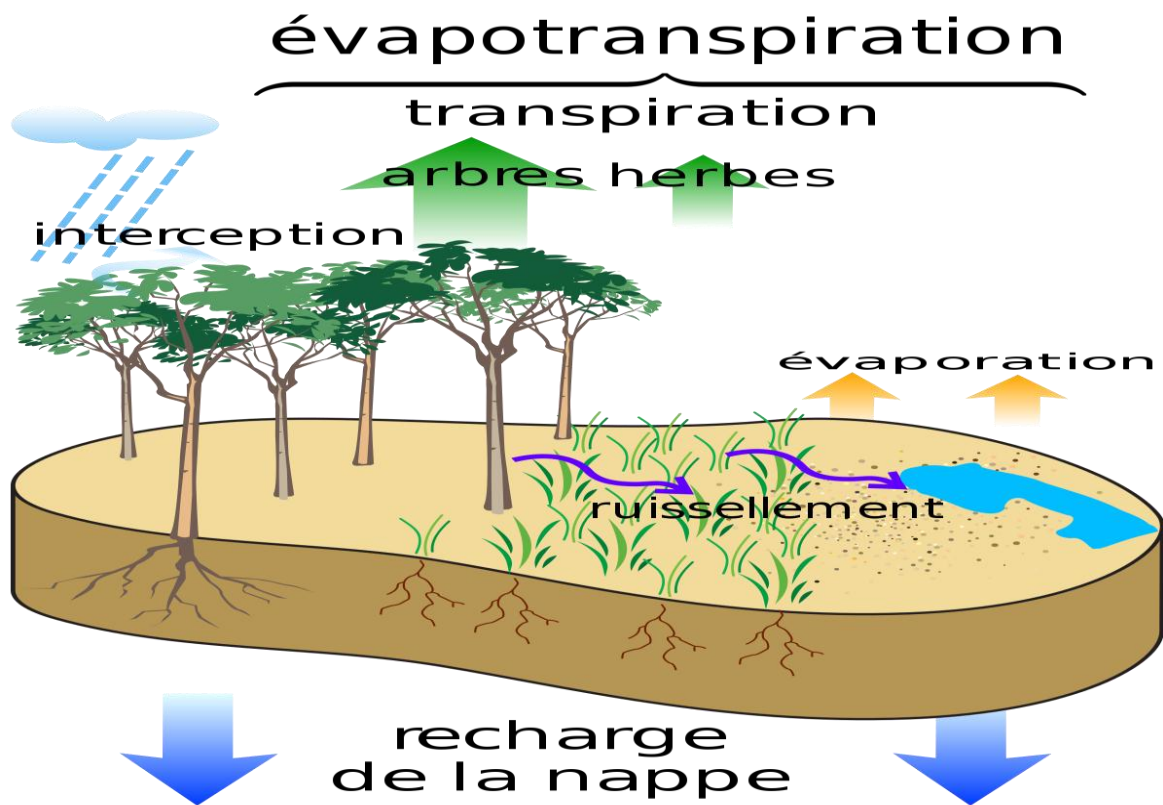


Figure. 1 le processus d'évapotranspiration

2. Les mesures de l'évapotranspiration

2. 1. Les facteurs conditionnels de la mesure de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration dépend fortement de l'intervention de trois facteurs, climatiques, géographique, biologiques et pédologiques (Allen et al, 1998 et 2011)

□ 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,
- pression atmosphérique.

□ Les facteurs géographiques (essentiellement la topographie)

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

□ Les facteurs biologiques (le couvert végétal)

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

□ Les facteurs pédologiques (les sols)

- la capacité de rétention en eau du sol,
- la réserve utile dans le sol,
- 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. En effet, d'après Courault et al. (2005), l'évapotranspiration est très liée au rayonnement solaire et au bilan d'énergie à la surface du sol.

3. Les outils de mesures de l'évapotranspiration

« La mesure de l'évapotranspiration est très complexe » (El Garouani, 1995).

Certes, les mesures directes de l'évapotranspiration (ETP et ETR) se font surtout en agronomie où on étudie chaque type particulier de cultures. Les résultats de ces mesures sont difficiles à utiliser en hydrologie car il y a une grande différence d'échelle entre la surface de la parcelle (quelques mètres carrés) et celle d'un bassin versant (des dizaines de kilomètres carrés). En outre, les plantations utilisées ne sont généralement pas représentatives de la végétation d'un bassin versant. En climatologie les mesures sont effectuées dans la plupart des cas à une échelle ponctuelle correspondant aux stations météorologiques. Par ailleurs, le tableau 1 élaboré par Rana et Katerji (2000), résume les méthodes de mesure et de l'estimation de l'évapotranspiration. En effet, la plupart des méthodes directes ou indirectes des mesures de l'évapotranspiration s'appuient sur la détermination de deux classes de facteurs :

- la teneur en eau du sol et les caractéristiques physiques des surfaces à partir desquelles se Produit l'évapotranspiration (hauteur, densité des plantes, rugosité du couvert végétal, albédo) ;
- les variables climatiques telles que le rayonnement solaire, la vitesse du vent, les caractéristiques thermodynamiques de l'atmosphère, au-dessus de la végétation.

	Approches	Méthodes
Mesure de l'évapotranspiration	Approche hydrologique	Bilan hydrique
		Lysimètre
	Approche micro- météorologique	Bilan d'énergie et rapport de Bowen
		Méthode aérodynamique
		Eddy covariance
	Approche physiologique- végétale	Méthode du flux de Sève
Systèmes de chambres		
Estimation de l'évapotranspiration	Approche analytique	Méthode de Penman-Monteith
	Approche empirique	Méthode de coefficient cultural (Kc)
		Méthode du bilan hydrique
	Approche de la télédétection	Bilan d'énergie
		Activité physiologique des plantes

Tableau 1. Classification des méthodes de mesure-estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle

(Source : Rana et Katerji, 2000)

Cependant, les mesures directes de l'évapotranspiration peuvent être faites par les méthodes courantes suivantes :

- **La case lysimétriques**

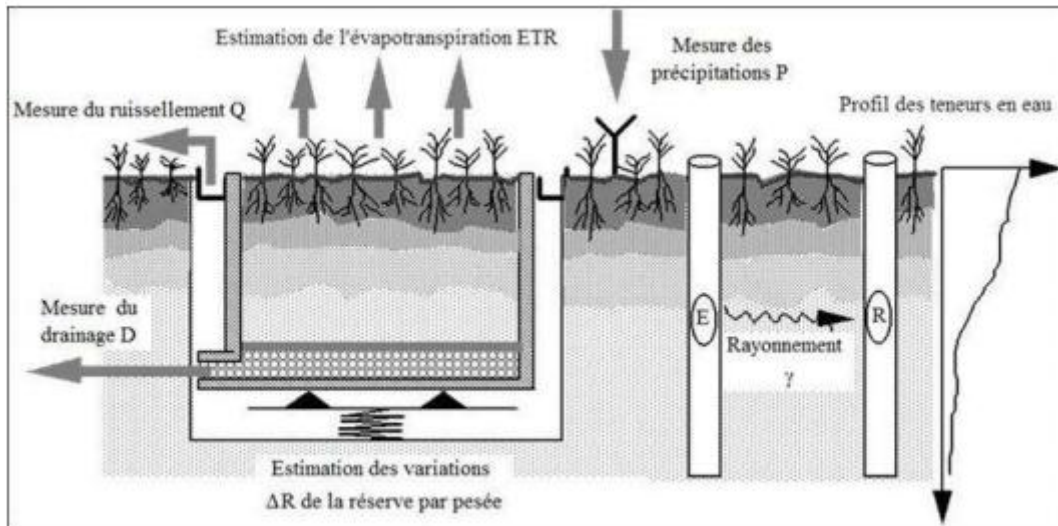


Figure 2. Mesure de l'évapotranspiration réelle par lysimètre

(Source : Rana et Katerji., 2000)

- **L'évapotranspiromètre**

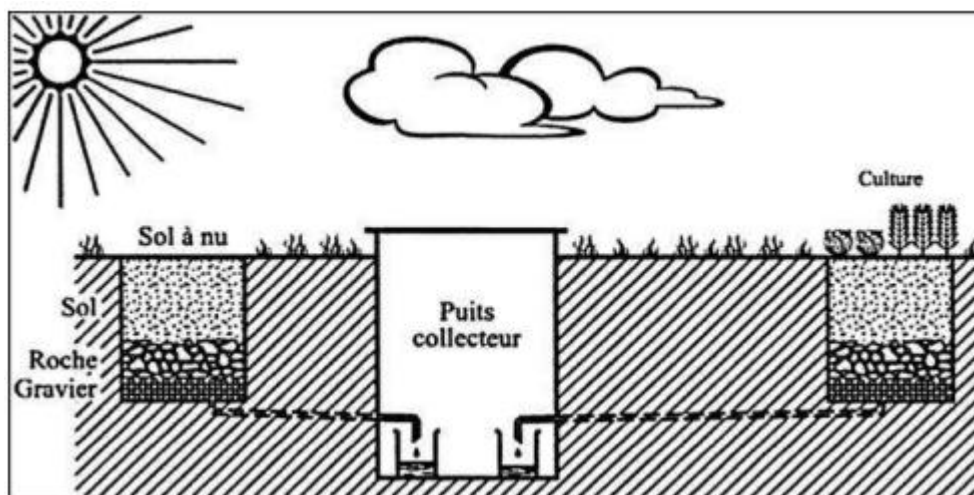


Figure 3. Schéma d'un évapotranspiromètre (source : Capus, 1984)

- **Eddy corrélation**

C'est une méthode statistique qui utilise les mesures à haute fréquence des températures et la vitesse du vent pour décrire la turbulence et depuis là, les flux de chaleur sensible. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet une mesure directe des flux verticaux de la chaleur latente et sensible.

En revanche aucune hypothèse n'est faite concernant les caractéristiques de la surface du sol, telles que la rugosité aérodynamique et aucune correction de stabilité atmosphérique n'est nécessaire. La méthode Eddy corrélation est avantageuse dans les zones à végétations hétérogènes et clairsemées, en particulier, dans les régions semi- arides, caractérisées par des conditions climatiques très variables (Traoré, 2007). Cette méthode a été expérimentée dans la plaine de Haouz au Maroc et elle donne de bons résultats (Simonneaux et al., 2009) et de même dans quelques parcelles du bassin versant de Kamech au Cap Bon en Tunisie (Chebbi et al., 2014),

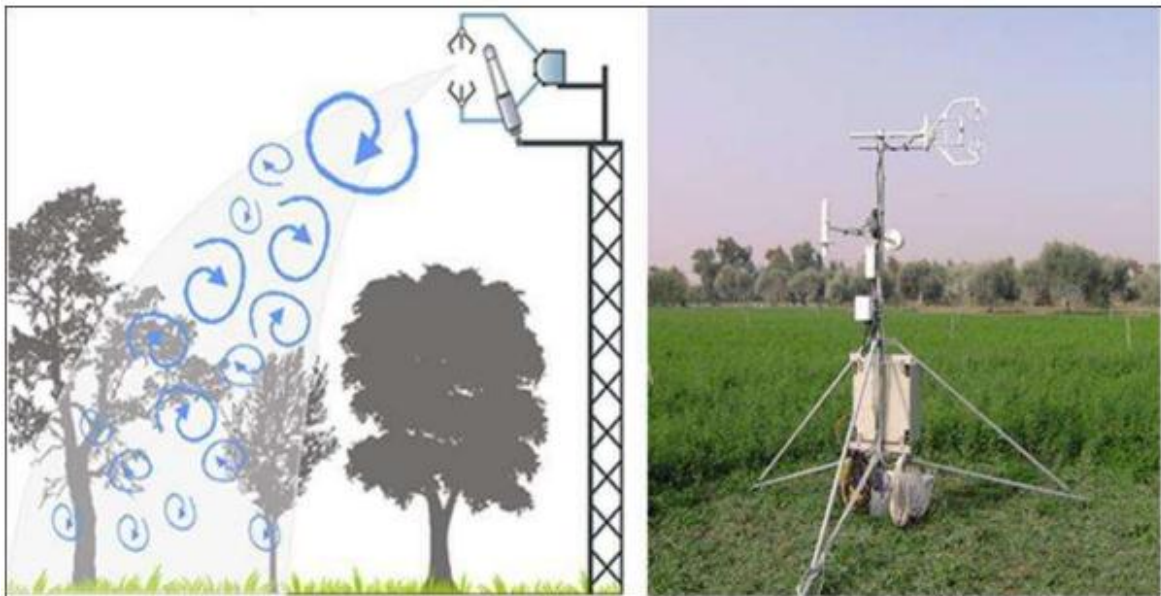


Figure 4. Eddy corrélation, à gauche schéma théorique à droite photo de l'appareil

(source : Projet SUDMED 2007)

- **Les bacs à évaporation**

On peut aussi mesurer l'évapotranspiration de référence par le bac évaporant. Ainsi, l' ET_0 est reliée à l'évaporation bac (EB) au-dessus des surfaces d'eau libres (lacs, barrages, réservoirs...) par un coefficient KP appelé coefficient du bac (Kamil, 2007) selon la formule suivante :

$$ET_0 = EB * KP \dots \dots \dots (1)$$

Avec

EB : évaporation moyenne journalière du bac pour la période considérée en mm/jour

KP : coefficient du bac varie de 0,5 à 1,1.

Mais maintenant leur intérêt est plutôt historique que pratique : par exemple, c'est sur ces mesures « bac » que s'est appuyé Turc pour mettre au point sa formule d'évaporation (Cosandey et al, 2012).

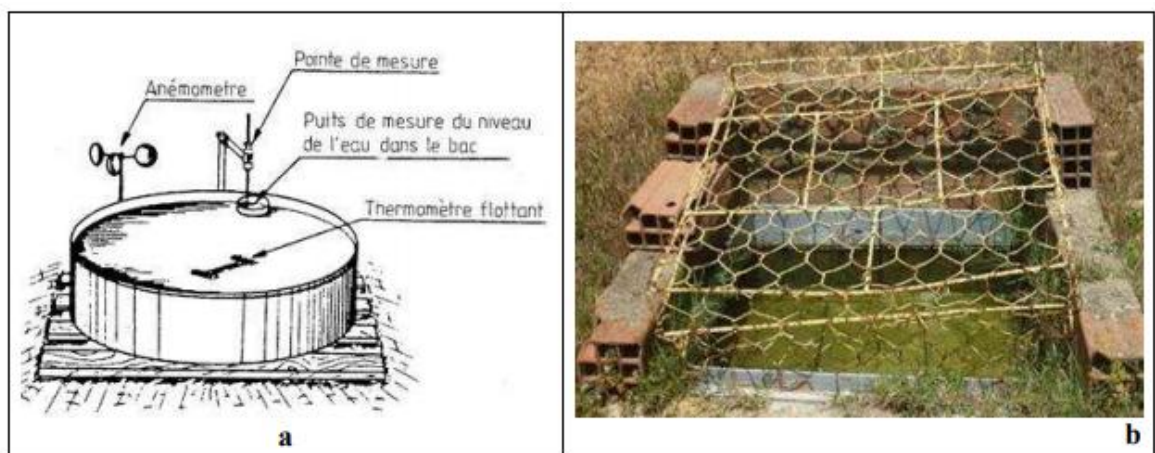


Figure 5. (a) Bac d'évaporation (classe A) du Weather Bureau

Source : (Photo : Mjejra, 2011)

Bac d'évaporation (classe A) c'est un bac circulaire d'un diamètre de 120.7cm et d'une profondeur de 25cm, posé sur un support de hauteur de 15cm et à remplir jusqu'à 5 cm en dessous de l'anneau (d'après Capus, 1984) et (b) **Bac d'évaporation** au barrage de Bou Hertma au Nord-Est de Jendouba

- **L'évaporomètre Piche**

— L'évaporation Piche mesurée hors abri est supérieure à celle mesurée sous abri et l'on observe une corrélation très forte ($g > 0,95$) entre les valeurs mensuelles de ces évaporations : un seul évaporomètre de ce type suffit donc pour définir en un point le pouvoir évaporant réel de l'atmosphère.

$$ETP = \alpha * EPICHE [1 + \lambda (\theta)] \dots \dots \dots (2)$$

Avec :

ETP en mm,

EPICHE évaporation Piche en mm/jour, $\theta = (T_{\min} + T_{\max}) / 2$,

α et λ coefficients d'ajustement à déterminer suivant les conditions d'observation.

L'utilisation de la mesure de l'évaporation Piche, n'est pas vérifiable dans la mesure où elle n'a pas trouvé une bonne réponse dans les essais en Tunisie (Ben Dakhli., 2004). En effet, l'amélioration des résultats a été recherchée par l'équation mathématique qui intègre l'effet des facteurs adventif et radiatif, la formule devient donc :

$$\text{ETP-Espinar} = ((T_{\min} + T_{\max} + 36)/3218) * (DJ * (DJ - 5) * (\text{EPICHE})) \dots \dots \dots (3).$$

Avec :

DJ = durée du jour (1/10 heure) ;

EPICHE = évaporation en mm d'eau ;

T min = température minimale quotidienne (en °C) ;

T max= température maximale quotidienne (en °C) ;

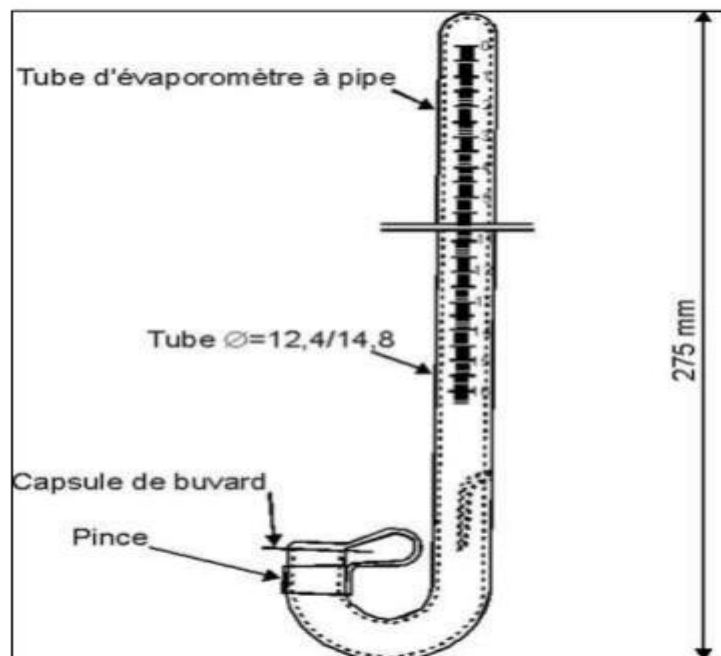


Figure 6. Evaporomètre Piche

(Source : Capuis., 1984)

4. Estimation de l'évapotranspiration

4. 1. Evapotranspiration de référence ET_0

ET_0 représente le taux d'évapotranspiration à partir d'une surface de référence. Un grand champ d'herbe uniforme est considéré dans le monde entier comme la surface de référence. La culture de référence couvre complètement le sol, est maintenue courte, bien arrosée et pousse activement dans des conditions agronomiques optimales

- L'évapotranspiration de référence est l'évapotranspiration d'une surface de référence, bien alimentée en eau.
- Le couvert de référence, est exempt de maladie, cultivé dans des champs de large superficie, dans des conditions de sol optimales, Possédant un rendement maximal dans les conditions climatiques existantes
- Elle permet d'éviter de définir une évapotranspiration pour chaque culture, chaque état phénologique, chaque état de stress
- Elle rassemble en fait tous les contrôles climatiques de l'évapotranspiration ; c'est un paramètre climatique

ET_0 correspond donc à une évaporation potentielle dans des conditions hydriques réelles. Certains climats, moins tempérés que la Grande-Bretagne, ne permettent pas de maintenir cette fétuque de référence, en particulier en Californie pour le réseau CIMIS.

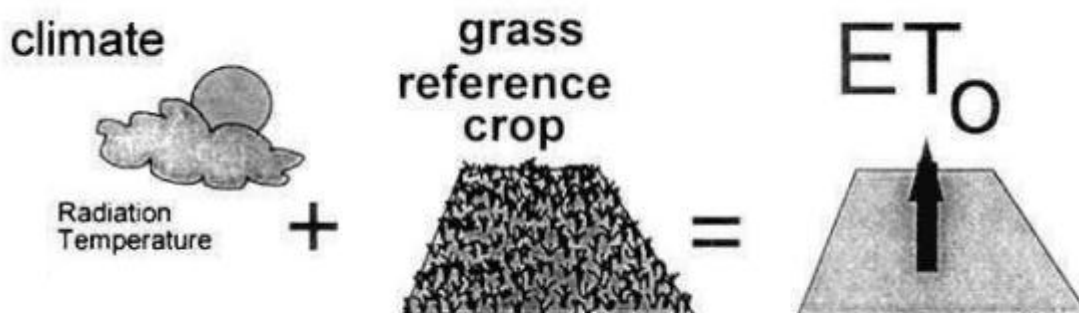


Figure 7. Représentation de l'évapotranspiration de référence « ET_0 »

4. 2. Estimation de L'évapotranspiration potentielle (ETP)

La notion d'évapotranspiration potentielle (ETP) a été introduite par Thornthwaite en 1948 et correspond à la perte en eau par évaporation directe du sol et par transpiration d'un couvert végétal dense et bien alimenté en eau, en fonction de la demande atmosphérique. Cela correspond en fait à l'évapotranspiration maximale de référence pour un couvert végétal donné (Guyot, 1997).

En effet, l'évapotranspiration est un phénomène climatique continu dans l'espace et dans le temps. Ce paramètre est utilisé au niveau des recherches ; sur l'utilisation de l'eau pour les besoins en irrigation. L'importance des quantités d'eau est fonction de l'E.T.P où le déficit en eau des plantes, en est fonction (Dubost, 1992).

Selon Brochet et Gerbier (1975), c'est l'évapotranspiration d'un couvert végétal couvrant bien le sol et abondamment pourvu en eau ; c'est-à-dire que les végétaux peuvent puiser sans restriction dans la réserve hydrique du sol pour répondre au mieux aux besoins atmosphériques- L'ETP est donc la limite maximale vers laquelle tend l'évapotranspiration

4. 3. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle (ETR) est liée à l'évapotranspiration maximale par un coefficient K_s qui est appelé coefficient de stress par l'équation suivante :

$$ETR = K_s * ETM = K_s * K_c * ET_0 \dots \dots \dots (4)$$

L'équation de la démarche simple du modèle FAO-56 décrit l'effet du stress hydrique sur la transpiration. Dans l'équation de l'évapotranspiration calculée à partir d'un coefficient cultural simple, il suffit de multiplier le coefficient cultural simple (K_c) par le coefficient de stress hydrique (K_s).

Les mesures de la réserve utile (Ben dakhli, 2003) dans le sol sont rares. Nous avons utilisé, dans un premier lieu, les valeurs existantes dans la littérature, notamment, réalisés par Henia, et Mougou, 1995 ; Ben Hassine, et al 2002 (tableau, 2). À partir de ces documents nous avons pu représenter une carte de la réserve utile pour le bassin versant de la Mejerda (Ben dakhli, 1995). Dans un deuxième lieu, nous avons déterminé l'humidité du sol par la méthode de contraste local de l'indice de différence entre la végétation et l'eau (CLDVW) pour en déduire le coefficient de stress hydrique.

$$ETR = (K_s * K_c) * ET_0 \dots \dots \dots (5)$$

Profondeurs en cm	Vertisol (Béja)			Sol peu évolué (Béja)			Sol isohumique (Le Kef)			Sol peu évolué (Le Kef)		
	da	RU (%)	RU (mm)	da	RU (%)	RU (mm)	da	RU (%)	RU (mm)	da	RU (%)	RU (mm)
0-20	1,131	28,05	63,4	1,250	25,86	64,7	1,263	20,87	66,6	1,298	22,99	59,7
20-40	1,225	22,63	55,4	1,442	20,89	60,2	1,310	20,20	52,9	1,345	19,47	52,4
40-60	1,225	31,47	77,1	1,442	23,70	68,4	1,390	21,77	60,5	1,345	18,94	50,9
60-80	1,373	25,41	69,8	1,447	23,05	66,7	1,313	19,74	51,8	1,508	15,16	45,7
80-100	1,373	26,63	73,1	1,451	25,29	73,4	1,468	22,88	67,2	1,508	12,51	37,7
100-120	1,343	33,39	89,7	1,451	22,55	65,4	1,468	24,51	72	1,634	12,17	39,8
Total 0-60 cm			159,9			193,3			180			163
Total 0-120 cm			428,5			398,8			371			286,2

Tableau2. Densités apparentes (da) et réserves utiles (RU en % et en mm) dans quelques stations de la région.

Source : Ben Hassine, H et al, 2003

4. 4. Estimation de l'évapotranspiration maximale (ETM)

Elle est définie à différents stades de développement d'une culture donnée sous des conditions agronomiques optimales (Allen, al, 1998).

ETM est reliée à ETP par l'intermédiaire d'un coefficient cultural qui tient compte de la différence physique et physiologique entre la surface de référence et la culture donnée (Er-raki., 2007). La formule de calcul de l'ETM est la suivante :

$$ETM = K_c * ETP \dots \dots \dots (6)$$

4. 4. 1. Calcul l'évapotranspiration maximale

Le calcul de l'évapotranspiration maximale passe par quatre étapes (Dorian, 2003)

- 1- identifier les stades de croissance de la culture, déterminer leurs durées et sélectionner les K_c correspondant ;
- 2- ajuster les K_c sélectionnés selon la fréquence des évènements pluvieux ou autres conditions climatiques pour chaque stade ;
- 3- construire la courbe des coefficients culturaux (permettant de déterminer les valeurs de K_c pour chaque stade de croissance) ;
- 4- calculer ETM à partir de l'équation précédente

Classes	valeurs d'ETM (mm.jr ⁻¹)
herbe courte	4,06
herbe longue	4,56
cultures maraîchères	4,64
cultures à petits grains	4,89
prairies et pâturages	5,07
cultures fourragères	5,74
friches	5,98
grandes cultures	6,11
forêts de feuillus	12,87
forêts de conifères	13,23

Tableau 3. Valeurs de l'ETM calculées pour différentes classes d'occupation du sol, en plein saison de développement végétal (NB : les valeurs élevées des couverts forestiers sont surestimées)

(Source : Taillon Annie, 1991)

4. 4. 2. L'élément conditionnel de l'ETM : le coefficient cultural

a. Concept du coefficient cultural

Le coefficient cultural (K_c) est le rapport entre l'évapotranspiration maximale et l'évapotranspiration potentielle. Sa valeur est largement affectée par la nature de la culture, sa hauteur, la durée de son cycle, et son taux de croissance.

Selon la méthode utilisée pour le calcul de l'ETM ou selon l'amplitude des différences entre la culture et celle de référence, le K_c obtenu expérimentalement peut légèrement dépasser la valeur de 1 (Dorian H., 2003 ; Simonneaux, al, 2007) :

Exemple la Tunisie, On a à titre d'exemple le tableau 4 tiré de Habaieb, 2003 et tableau 5 tiré de Allen et al, 1998.

cultures	Démarrage	Kcini	Kcmi	Kcar	Lini	Ldév	Lmi	Lar	Durée totale
Tomate	Février	0,60	1,15	0,80	30	40	65	30	165
Pomme de terre	Janvier	0,50	1,15	0,75	30	30	30	30	120
Blé dur	Novembre	0,70	1,15	0,30	30	140	40	30	240
Fève	Mars	0,50	1,15	1,10	20	30	35	15	100
Olivier	Mars	0,65	0,70	0,70	30	90	60	90	270

Tableau 4. Coefficients culturaux et durée (en jours) des différentes phases de développement de quelques cultures pratiquées au Nord de la Tunisie.

Source : Hbaeib H., 2003

Légende : Kcini, Kcmi, Kcar : coefficient cultural en phase initiale, de mi-saison et d'arrière-saison, respectivement ; Lmi, Ldév, Lmi, Lar : durée (en jours) du développement en phase initiale, de développement, de mi-saison et d'arrière-saison, respectivement.

Culture	Kcini	kcmid	Kcend	Hauteur maximale de la culture (en m)
Oignon sec	0,7	1,05	0,75	0,4
Salade	0,7	1	0,95	0,3
Tomate	0,6	1	0,95	0,3
Pomme de terre	0,5	1,15	0,75	0,6
Haricot vert	0,5	1,05	0,9	0,4
Orange	0,7	0,65	0,7	4
Olivier	0,65	0,70	0,70	4-6

Tableau 5. Les coefficients culturaux simples et la hauteur maximale pour différentes cultures et pour différentes régions pour à climat humide.

L'évapotranspiration d'un sol couvert par de la végétation est difficile à estimer. On détermine, dans la plupart des cas, les besoins en eau des cultures, équivalent à l'ETM par la correction de l'évapotranspiration potentielle d'une culture de référence (ET₀), par un coefficient appelé "coefficient cultural" (k_c) en utilisant la formule suivante (voir figure)

$$ETR (\text{culture}) = k_c * ET_0 \dots\dots\dots (7)$$

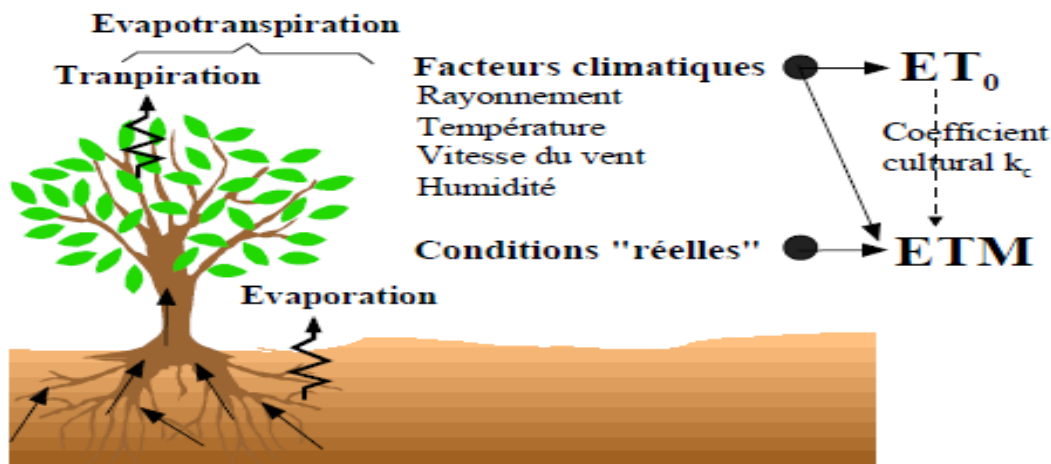


Figure 8. Evapotranspirations réelle (ETR) et de référence (ET₀).

Cycle des cultures montre quatre phases de croissance :

- la phase initiale qui s'étend du semis à environ 10% de couverture du sol ;
- la phase de développement du couvert végétal se terminant au moment où la couverture du sol est complète ;
- la mi-saison qui se termine par le début de la chute ou la sénescence du couvert foliaire ;
- la phase de l'arrière-saison ou de maturation.

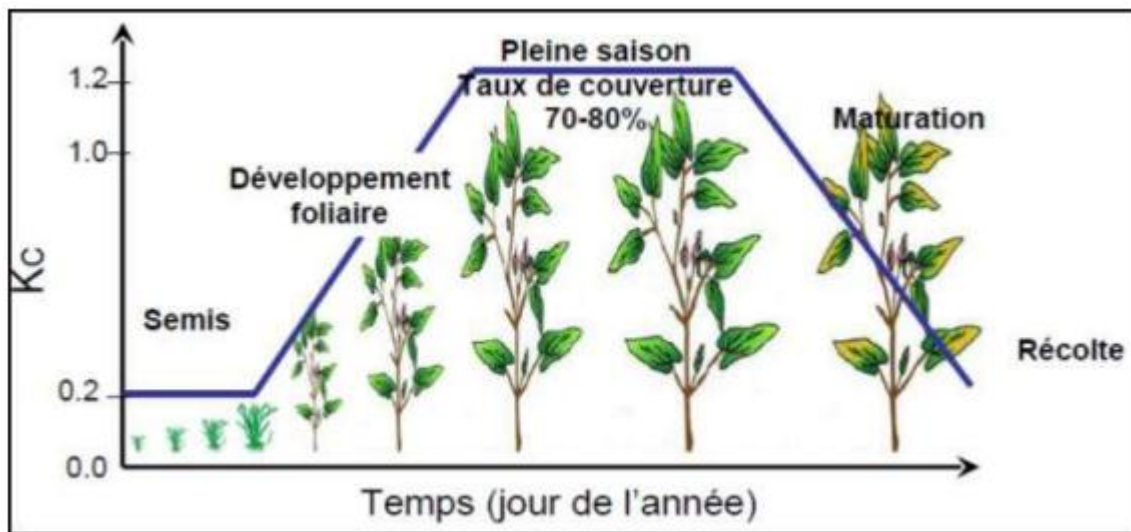


Figure 9. Cycle de développement d'une culture (In, Er-Raki., S, 2007)

b. Procédure de la détermination du coefficient cultural

C'est le rapport entre l'évapotranspiration maximale (ETM) et celle de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

- **Approche à coefficient cultural simple**

L'effet de la transpiration de la plante et de l'évaporation du sol est confiné dans un seul coefficient.

La procédure de calcul de l'évapotranspiration maximale consiste à :

- Identifier les phases de croissance de la culture et les durées correspondantes, et sélectionner les coefficients culturaux correspondants ;
- Ajuster les coefficients culturaux pour les conditions climatiques durant les mêmes phases de croissance (Allen et al. 1998) ;
- Construire la courbe du coefficient cultural, K_c ;
- Calculer ETM comme un produit de : $ETP * K_c$;

- **Approche à coefficient cultural double**

Elle consiste à diviser le coefficient cultural K_c en deux coefficients : Un pour la transpiration K_{cb} appelé coefficient cultural de base, et l'autre pour l'évaporation du sol K_e appelé coefficient d'évaporation dans ce cas l'équation de l'ETM devient :

$$ETM = (K_{cb} + K_e) ET_0 \dots \dots \dots (8)$$

Deux termes sont nécessaires à déterminer pour estimer l'évapotranspiration maximale : K_{cb} et K_e (Allen, al, 1998 ; Er-reki., 2007 ; Amri, 2013)

les valeurs du coefficient cultural de la phase initiale (K_{cini}), de la mi-saison (K_{cmid}), et de la récolte (K_{cend}) d'une part, et les durées des périodes de croissance, d'autre part, nous pouvons obtenir pour une culture considérée la valeur du K_c à n'importe quel moment du cycle. À noter que l'évolution du coefficient cultural de base ou coefficient de la transpiration (K_{cb}) est similaire à l'évolution du coefficient cultural simple (Er-Raki S., 2007, Amri, 2013).

5. Concept de la déficience d'évaporation

La déficience d'évaporation (ou déficit) signifie, globalement, un manque d'eau. De ce fait, il représente un déficit d'eau pour l'hydrologue (différence entre ETP et ETR), l'agronome utilise l'expression la déficience agricole (différence entre ETM et ETR).

La définition donnée par la FAO-56, le besoin en eau d'une culture est « la quantité d'eau nécessaire pour couvrir les pertes en eau par évapotranspiration d'une culture saine, cultivée en grande parcelle, sans contraintes du sol (fertilité et humidité), et réalisant son potentiel de production sous les conditions considérées » (Allen et al, 1998).

Cette définition correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture (ETM) qui dépend de la demande climatique ou de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et du coefficient cultural (K_c). Ainsi, déterminer les besoins en eau des cultures revient dans la pratique à déterminer les quantités d'eau perdues.

Selon Girardin (1999) « il y a un stress chez le maïs quand l'état hydrique perturbe le métabolisme. Cela sous-entend qu'il y a des répercussions directes plus ou moins rapides sur la croissance des organes et leur développement ». Par ailleurs, Lamy C en 2013 considère que « le déficit d'évaporation traduit le manque d'eau éventuel pour la plante du

fait des conditions climatiques. Il correspond au stress hydrique de la végétation. La réserve hydrique représente la teneur en eau dans les réserves utiles des sols à un moment donné ». À cet effet, le déficit d'évaporation est en relation étroite avec le stock d'eau dans le sol et les comportements de la végétation.

Déficiencia d'évaporation = Besoin (ETM) - Consommation (ETR)..... (9)

Cette formule se base sur l'évapotranspiration maximale et non pas l'évapotranspiration potentielle, c'est dû à la prise en compte de l'occupation du sol et la présence d'une grande corrélation entre l'ETM et l'ETR (Dubreuil V., 1995 ; Lamy., 2013).

On a trois relations entre l'ETR et l'ETM :

L'eau dans la RFU (réserve facilement utilisable), la réserve reste supérieure à la RDU (réserve difficilement utilisable), et la température de l'air ne dépasse pas 30°C et ne descend pas au-dessous de 9°C, la végétation sera en théorie en évapotranspiration maximale (Kaicun et al, 2006). La plante pourra donc répondre à la demande climatique

$$\text{ETR} = \text{ETM}$$

Si la RFU s'est vidée ou si les conditions climatiques (températures trop fortes ou trop fraîches) ne sont pas favorables à la végétation. Cette évapotranspiration réelle sera inférieure à une évapotranspiration maximale, la plante va fermer partiellement ses stomates,

$$\text{ETM} > \text{ETR}$$

Le coefficient cultural est trop pessimiste pour calculer l'ETM ou si l'ETP mesurée est fautive et trop pessimiste,

$$\text{ETM} < \text{ETR}$$

6. Importance de l'évapotranspiration

6. 1. Evapotranspiration et cycle de l'eau

Sur une majorité de bassins, les pertes d'eau par évapotranspiration représentent la partie la plus importante du bilan d'eau. Dans les espaces continentaux, plus de 60% de l'apport pluviométrique serait ainsi dissipé par évapotranspiration (Dunod, 2013).

L'évapotranspiration ne représente qu'une faible partie du cycle global de l'eau (cette eau évaporée représente 0,04 % de l'eau de l'hydrosphère) mais, c'est elle qui assure le transfert d'eau du sol et de la végétation vers l'atmosphère. Si l'atmosphère est un réservoir d'eau minuscule au regard des océans, sa grande mobilité et ses échanges permanents avec les réservoirs océanique et terrestre, lui confèrent un rôle fondamental dans le cycle de l'eau (Michel campy et Dunod, 2013).

La transpiration des végétaux intervient, on parle d'évapotranspiration. Le cycle décrit ci-dessus est essentiellement géochimique. En réalité, les êtres vivants, et plus particulièrement les végétaux ont une influence sur le cycle. Les racines des végétaux pompent l'eau du sol, et en relâchant une partie dans l'atmosphère. De même, une partie de l'eau est retenue dans les plantes. Lors de déforestation, le cycle de l'eau est fortement modifié localement et il peut en résulter des inondations.

Le cycle de l'eau correspond à l'ensemble des flux hydriques échangés dans le système sol-plante-atmosphère. L'entrée d'eau dans ce système correspond aux précipitations, les sorties à l'évapotranspiration réelle, définie ci-dessous, au drainage et éventuellement au ruissellement (Garnier, 2007).



Figure 10. Etage bioclimatique de l'Algérie (source : in CNCC-Algérie, 2010)

6. 2. Évapotranspiration et écosystèmes

L'évapotranspiration potentielle et réelle, varient considérablement selon les écosystèmes (figure 6) et selon les saisons

En effet, toutes les plantes ont besoin d'eau. Certaines évapotranspirent beaucoup, d'autres peu. En génie biologique, on exploite cette propriété pour assécher des terrains humides et

marécageux en plantant des peupliers ou des saules en climat tempéré. Certaines plantes semi-aquatiques, dites palustres ou hydrophytes, évapotranspirent beaucoup durant leur période de croissance (Allen, Prueger et Hill, 1992).

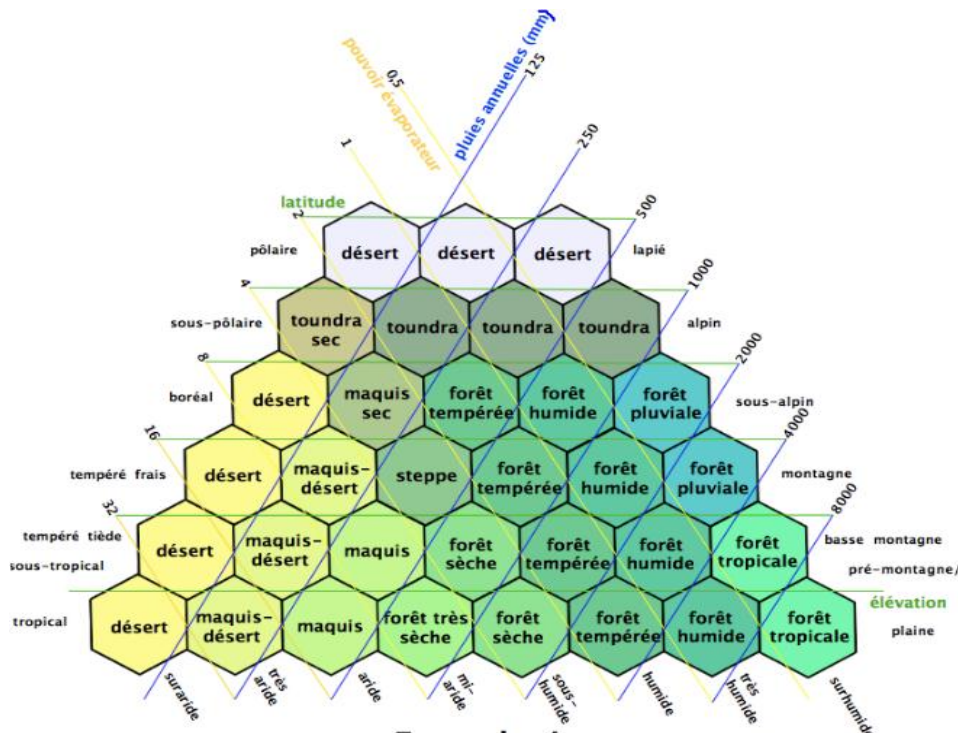


Figure 11. Différents écosystèmes dans le monde

7. Méthodes d'évaluations de l'évapotranspiration

7. 1. Les formules évapotranspiration

Cette section présente les principales équations qui sont utilisées présentement ou qui présente un intérêt historique pour estimer l'évaporation ou l'évapotranspiration

Elles peuvent être simples ou complexes, de nature empiriques ou plus théoriques.

Elles sont regroupées selon qu'elles sont basées sur le bilan de masse, le bilan d'énergie ou la température de l'air.

Ces méthodes peuvent être divisées en grands groupes, c'est-à-dire, les méthodes basées sur le rayonnement (Méthode Priestley-Taylor, Méthode Makkink, Méthode Turc) et basée sur la température méthodes (Méthode Hargreaves-Samani, Thornthwaite Méthode, méthode Blaney-Criddle).

Les techniques ET ont été sélectionnés en tenant compte de la disponibilité des données météorologiques les données requises par ces modèles. Les performances techniques ont été mesurées en les comparant avec la référence Penman-Monteith ET.

Les formules mises au point pour calculer l'évapotranspiration potentielle sont nombreuses. Mais, seules quinze à vingt d'entre-elles ont acquis une indiscutable Le calcul se fait habituellement en prenant le mois comme unité de temps bien que les formules les plus précises (Penman, Bouchet, Turc) puissent également, se libeller sous forme décadaire .évapotranspiration potentielle est toujours exprimée en hauteur eau et très généralement en mm, ce qui facilite la comparaison avec une part les précipitations et autre part la réserve en eau du sol.

Classification	Méthode	Données nécessaires	Pas de temps
combinatoires	Penman (1948)	e_d, T, u, D	Journalier
	Penman-Monteith (1965)	e_d, T, u, D	Journalier
	Priesley-taylor (1972)	T, D	Journalier
	Kimberly-penman (1982)	e_d, T, u, D	Journalier
	Thom-Olivier (1977)	e_d, T, u, D	Journalier
Aérodynamique	Dalton 1802	e_d, u	Journalier
Temperature	Thornthwaite (1948)	T, D	Mensuel
	Blancy- Criddle (1959)	T, D	5 jours
	Hamon (1961)	T	Journalier
	Romanenko (1961)	e_d, T	journalier
	Linacre (1977)	e_d, T	journalier
Makkink Rayonnement	Turc (1961)	e_d, T, u, D	journalier
	Jensen-Haise (1963)	T	5 jours
	Mc Guinness-Bordne(1972)	T	Mensuel
	Hargreaves (1975)	T	10 jours
	Hargreaves (1975)	e_d, T, D	journalier
	Doorenbos-Pruit (1977)	e_d, T, D	journalier
	Abtew (1996) (1957)	T	journalier

Tableau 6 : Modèles d'ETP recensés dans la littérature (Zella, 2015)

- **Blaney-Criddle**

Une des plus connues et des plus anciennes, est celle de Blaney et Criddle '(1945)

C'est une méthode basée sur la température de l'air, les variations mensuelles de l'évapotranspiration et radiation solaire (surtout pour l'évaporation de l'eau libre).

L'évapotranspiration de la méthode Blaney & Criddle (1950) a été développée pour une région semi-aride des États du Nouveau-Mexique et du Texas situés dans l'ouest des États-Unis.

Doorenbos & Pruitt (1984) ont proposé l'application d'un facteur de correction, en utilisant la variable d'humidité, la vitesse du vent et l'insolation, pour l'application de la méthode à diverses conditions climatiques.

Pour faciliter le calcul et éviter les interpolations et les monogrammes, (Frevet et al, 1983). Est l'une plus utilisées car elle exploite des données climatiques facilement accessibles dans les périmètres, cette formule elle suivant :

$$ETP = K (8.13 + 0.46 t) P \dots\dots\dots(10)$$

Avec

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle de référence en mm

t : température moyen pendant le moi considéré

P : pourcentage d'éclairement pendant le moi considéré qui ne dépende que l'altitude du lieu étudié

K : coefficient d'ajustement

La formule envisage une régression linéaire entre ETP et t et ne fait appel à aucun autre facteur climatique puisque p se réfère l'éclairement non à l'insolation et est donc de nature purement astronomique

- **Méthode des Hargreaves**

La méthode de Hargreaves montre des résultats ETo raisonnables avec une validité globale.

L'équation de Hargreaves est donnée par (Hargreaves, 1994) :

L'équation de Hargreaves fournit des estimations de l'évapotranspiration de référence (ETo) lorsque seules les données de température de l'air sont disponibles, bien qu'elle nécessite un étalonnage local préalable pour une performance acceptable. L'équation de Hargreaves (Hargreaves, 1985) est recommandée par Shuttleworth (1991).

Estimations basées sur l'évaporation potentielle, bien qu'elle ait été conçue pour estimer l'évaporation potentielle des systèmes agricoles. Il donne une estimation de l'évaporation potentielle (mm d-1) qui peut être moyennée pour obtenir des valeurs mensuelles :

$$E = 0.0023 S_o (T + 17.8) \sqrt{\delta_T} \dots\dots\dots(11)$$

$$ET_o = 0.0023 (T_m + 17.8) \left(\sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \right) R_a \dots\dots\dots(12)$$

Où

- ET_o : évapotranspiration de référence [mm jour-1],
- K : Coefficient
- T_{mean} : température moyenne quotidienne de l'air [° C],
- T_{max} : signifie la température maximale quotidienne de l'air [° C],
- T_{min} : signifie la température minimale journalière de l'air [° C],
- R_a : rayonnement extraterrestre [MJ m-2 jour-1].

γ_T différence entre la Tmax température maximale mensuelle moyenne et Tmin la température minimale mensuelle moyenne [° C] (c.-à-d. La différence entre la température maximale et minimale pour le mois donné, moyennée sur plusieurs années et donc l'équivalent en eau extraterrestre rayonnement [mm d-1] pour l'emplacement).

Tout comme Garnier est parti de Thornthwaite Hargreaves a transformé en formule hygrothermique la formule thermique de Blaney-Cridde, revenant ainsi à des conceptions que Blaney lui-même avait développées auparavant (Blaney et Morin 1942), puis abandonnées.

- **Formule de FAO modifie Penman**

$$ET_o = c \frac{\Delta 0.408 R_n + \gamma f(u) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma} \dots\dots\dots(13)$$

- ET_o : évapotranspiration de référence [mm jour-1].
- c : Facteur d'ajustement FAO-24 pour la vitesse du vent diurne, le rayonnement solaire. l'humidité relative maximale et le rapport entre la vitesse du vent diurne et nocturne.

- R_n : rayonnement net à la surface de la culture [MJ m⁻² jour⁻¹].
- $f(u)$ fonction du vent (mm kPa⁻¹ jour⁻¹).
- e_s la pression de vapeur de saturation [kPa].
- e_a pression de vapeur réelle [kPa].
- $e_s - e_a$ déficit de pression de vapeur de saturation [kPa].
- Δ courbe de pression de vapeur de la pente [kPa ° C⁻¹].
- γ Constant psychrométrique [kPa ° C⁻¹].

- **Formule de Penman-Monteith**

Cette méthode considère que l'ET₀ est dérivé de termes énergétiques et aérodynamiques, ceux-ci étant contrôlés par la résistance au transport de vapeur de la surface vers l'atmosphère (Fernandes et al, 2011).

Allen et al (1994) ont défini l'ET₀ comme «l'évapotranspiration d'un couvert végétal "hypothétique" de référence ayant une hauteur de 12 cm, une résistance du couvert de 70 s/m et un albédo de 23%. Un couvert de gazon se développe activement sur une grande étendue régulièrement tendu, bien alimenté en eau et in demande maladies ».

Dans cette méthode, la plupart des paramètres de l'équation sont mesurés directement ou peuvent être facilement calculés à partir des données météorologiques.

L'équation peut être utilisée pour le calcul direct de toute évapotranspiration des cultures (ET_c).

Penman propose, sur la base d'un bilan d'énergie et de transfert de vapeur, une première formulation théorique, qui fut précisée en 1965 par Monteith et s'est imposée dans le monde comme la référence pour estimer l'ETP (voir article Évapotranspiration).

La méthode FAO Penman-Monteith pour estimer ET₀ est :

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_{ste}}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \dots\dots\dots(14)$$

Avec :

$$\Delta = \frac{4098 e_{sat}(T)}{(T + 237,3)^2}$$

$$\gamma = 0,665 * 10^{-3} P$$

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26}$$

$$e_{sat}(T) = 0,6108 e^{\frac{17,27 T}{T+237,3}} \dots\dots\dots(15)$$

ET0 : évapotranspiration de référence, en mm/j ou mm/h,

Rn : rayonnement global en MJ/m²/j ou MJ/m²/h,

G : flux de chaleur dans le sol par conduction en MJ/m²/j ou MJ/m²/h,

Δ et γ : constantes en kPa/°C,

C_{ste} : 900 pour un pas de temps journalier et 37 pour un pas de temps horaire,

T = température en °C (! Dans la méthode FAO, l'approximation T surface = T atmosphère est effectuée),

P = pression atmosphérique en kPa,

z (présent dans la formule de P) = altitude par rapport à la mer (m), pour la station Aston : 1781mètres.

e_s(T) = e_{sat}(T), la pression de vapeur saturante en kPa,

e_a(T) = humidité relative * e_s / 100 pression de vapeur actuelle en kPa,

u₂ = vitesse du vent à 2 mètres du sol en m/s.

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

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)} \dots\dots\dots(16)$$

Sur la base des résultats de plusieurs études notamment celle de Jensen et Al (1990), la consultation d'expert menée par la FAO sur les méthodologies d'estimation des besoins en eau des cultures (Smith et Al, 1992) a conduit à recommander Penman - Monteith comme méthode privilégiée de référence et donc pour servir de base à la détermination des coefficients culturaux.

L'équation de Penman- Monteith n'exige pas de décalage local.

Cette recommandation résulte de la nécessité de standardiser le concept d'ETo et son utilisation (Smith et al, 1998).

Les paramètres nécessaires à la détermination de l'ETo mensuelle en mm/ jour sont les suivants :

Avec

- a- La température moyenne mensuelle en °C.
- b- L'humidité relative en pourcentage.
- c- La vitesse du vent en Km / jour.
- d- La radiation en KJ/ m²/ jour.

Pendant longtemps, l'usage de la formule de Penman-Monteith fut restreint à ceux qui disposaient de moyens de calculs puissants et aux rares stations météo où les nombreuses données qu'elle exige étaient mesurées, d'où la création d'autres formules - aussi diverses que nombreuses - moins sûres mais d'emploi plus facile. L'avènement de la micro-informatique et des stations météo automatiques en permet maintenant une utilisation beaucoup plus large, rendant les autres sans intérêt.

L'évapotranspiration de référence ETo sur une large gamme de climats (Jensen et al, 1990). C'est pourquoi l'équation PM est fortement recommandée comme équation standard pour l'estimation de l'évapotranspiration par le programme des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et par l'American Society of Civil Engineers (ASCE) (Walter et al, 2000).

Mais en raison de son coût relativement élevé, la disponibilité d'un tel équipement est relativement faible dans les stations météorologiques des pays en développement (Thomas et al, 2004).

À cet égard, Diouf et al. 2016 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 (u_2).

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 (Allen et al, 1998), particulièrement à l'échelle journalière (Bodian et al, 2016).

Ces différentes méthodes sont classées par catégorie en fonction des variables climatiques qu'elles intègrent (Heydari et al, 2014) : température, radiation, transfert de masse ou combinaison de variables

La qualité des résultats obtenus par ces différentes méthodes varie en fonction des conditions climatiques.

Les études ont toutes montré la supériorité de l'équation de Penman-Monteith (PM) pour estimer l'évapotranspiration de référence E_{To} sur une large gamme de climats (Jensen et al, 1990).

C'est pourquoi l'équation PM est fortement recommandée comme équation standard pour l'estimation de l'évapotranspiration par le programme des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et par l'American Society of Civil Engineers (ASCE) (Walter et al, 2000).

- **Formule de Makkink**

Populairement connue en Europe occidentale, cette méthode est basée sur le Penman et utilise des données de rayonnement solaire au niveau de la surface. Il a été développé aux Pays-Bas par Makkink (1957), qui a proposé l'équation suivante :

$$ET_o = c \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (0.408 R_s) \dots\dots\dots(17)$$

Où

ET_o : évapotranspiration de référence [mm jour-1],

c : Facteur d'ajustement FAO-24 pour l'humidité relative moyenne et la vitesse du vent diurne,

Δ : courbe de pression de vapeur de la pente [kPa ° C-1],

γ : constante psychrométrique [kPa ° C-1],

R_s : rayonnement solaire ou ondes courtes [MJ m-2 jour-1]

<i>Classification</i>	<i>Méthode</i>	<i>Données nécessaires</i>	<i>Pas de temps</i>
Aérodynamique	Dalton (Oudin, 2004)	e _d , u	Journalier
Combinatoire	Penman (1948)	e _d , T, U, D	Journalier
	Penman-Monteith (Monteith, 1965)	e _d , T, U, D	Journalier
	Priestley-Taylor (1972)	T, D	Journalier
	Kimberly-Penman (Wright, 1982)	e _d , T, U, D	Journalier
	Thom-Oliver (1977)	e _d , T, U, D	Journalier
Température	Thornthwaite (1948)	T, D	Mensuel
	Blaney-Criddle (1950)	T, D	Mensuel
	Hamon (1961)	T	Journalier
	Romanenko (Xu et Singh, 2001)	e _d , T	Mensuel
	Linacre (1977)	e _d , T	Journalier
	Baier et Robertson (1965)	T, D	Journalier
Rayonnement	Turc (1955)	e _d , T, D	Journalier
	Jensen-Haise (1963)	T	5 jours
	Mc Guinness-Bordne (1972)	T	Mensuel
	Hargreaves (Hargreaves et Samani, 1982)	T	Mensuel
	Doorenbos-Pruitt (1977)	e _d , T, U, D	Journalier
	Abtew, (1996)	e _d , T, D	Journalier
	Makkink (1957)	T	Journalier

T = Température; U = Vitesse du vent; D = Durée d'ensoleillement / Rayonnement; e_d= Pression de vapeur effective de l'air.

Tableau7. Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration (adapte d'oudine.2004)

Conclusion

La synthèse bibliographique a porté sur l'évapotranspiration, qui est la base pour toute estimation des besoins en eau et des besoins d'irrigations des cultures selon les régions choisies. D'où la nécessité de l'étude ce paramètre.

Dans ce chapitre, nous allons traiter les caractéristiques de la région de la wilaya d'Alger, Constantine, Oran et Biskra particulièrement, sa situation géographique et les facteurs édaphiques, climatiques et agronomique.

1. Situation et limite de la région d'étude

L'aire d'étude couvre les wilayas de Constantine, située dans la région Est ; Oran dans la région Ouest ; Alger dans la région Centre et enfin la wilaya de Biskra dans la région du Sud-Est. Ces régions sont situées entre les l'altitude 34° et 37° nord et les longitudes 0° et 7° Est.

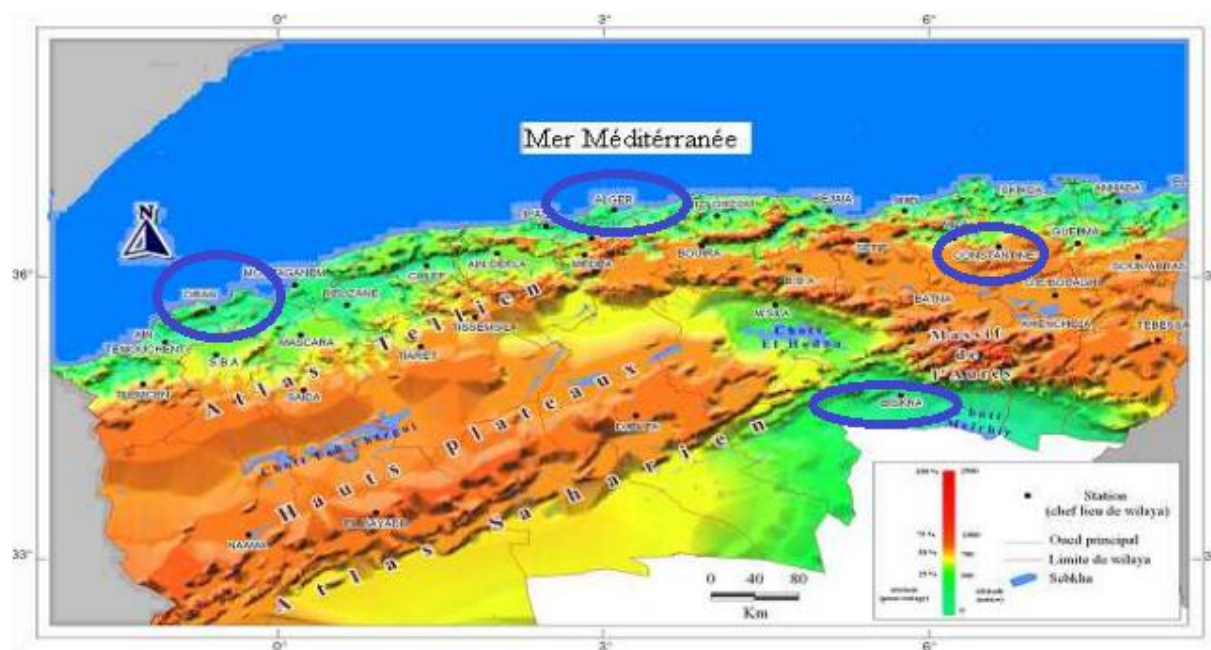


Figure 12. Localisation géographique des régions d'études

région	altitude	latitude	longitude
Alger	25 mètres	36,41°N	03,13°E
Biskra	115 m	34°51'01" N	5°43'40" E
Oran	110 mètres	35° 42' 00 N	0° 38' 30 W
Constantine	694 m	36° 21' 54 N	6° 36' 52 E

Tableau 8. Classification des quatre régions (altitude, latitude, longitude)

2. Répartition générale des terres agricoles

	1995/1996	1996/1997	1997/1998	1998 /1999
Superficie Agricole Utile (S.A.U)	8 081	8 201	8 215	8 227
1.1-Terres labourables	7 521	7 650	7 660	7 673
• Culture herbacées	4 554	4 234	4 458	4 031
• Terres au repos	2 967	3 415	3 202	3 640
1.2-Cultures permanentes				
• Pairies Naturelles	559	551	555	554
• Vignobles	40	42	42	35
• Plantations fruitière	62	57	56	57
	456	451	456	461
2. Pacages et parcours	31 525	31 531	31 652	31 503
3. Terres improductives des exploitations agricoles	935	929	864	865
Total terres utilisées par l'agriculture.(1+2+3)	40 541	40 663	40 732	40 596
Autres terres				
Terres alfatières	2 865	2 830	2 920	2 916
Terres forestières	3 855	3 835	3 900	4 196
Terres improductives*	190 913	190	190 621	190 465
Total superficie territoriale	238 174	238 174	238 174	238 174

S

Tableau 9. Répartition générale des terres agricoles dans la wilaya de Constantine (Campagne agricole 2004/2005)

Source : O.N.S. Algérie en quelques chiffres N° 29, N°30.ed : 2000-2001

3. Données climatiques

3. 1. Caractéristiques climatiques du site

Le climat est un facteur principal qui agit directement sur le contrôle et la distribution des cultures. Plusieurs facteurs définissent le climat comme la précipitation, la température, l'humidité relative, le vent et l'insolation. C'est dans ce cadre, que nous avons recensés ces paramètres auprès de l'Office Nationale de la Météorologie (ONM) ; sur une période de 15 ans (1994-2008). Les données qui nous ont été fournies, représentent les wilayas d'Alger,

Biskra, Constantine et Oran. Ces données permettent le calcul de l'évapotranspiration selon les critères climatiques exigés par chaque formule, identifiées dans le logiciel.

Les données climatiques utilisées

- La température maximale (Tmax) en degré Celsius °C.
- La température minimale (Tmin) en degré Celsius °C.
- L'humidité relative de l'air en pourcentage (%).
- La vitesse du vent en mètres par seconde (m/s).
- L'insolation en heures (h).

4. Méthode évaluation d'ET0 Calculateur.

4.1. Le logiciel ET0 Calculateur

Le logiciel « ET0 », est un logiciel développé par la Division Terre et Eau de la FAO (2003). Sa fonction principale est de calculer l'évapotranspiration de référence (ET0) selon des normes prédéfinies.

Le logiciel évalue l'ET0 à partir de données météorologiques au moyen de l'équation de Penman-Monteith de la FAO. Cette méthode a été choisie comme référence car elle se rapproche étroitement, de l'ET0 de l'herbe à l'endroit évalué. Elle est basée sur des paramètres physiques et inclut explicitement, les paramètres physiologiques et aérodynamiques

Le programme gère des données climatiques quotidiennes, décennales et mensuelles, selon le pas de temps défini. Les données de précipitations, de températures, de vent ; d'insolation et d'humidité sont fournies à l'échelle mensuelle afin qu'elles puissent être traités automatiquement. Lorsque des données pour certaines variables météorologiques manquent, des méthodes choisies et contenues dans le logiciel, sont utilisées pour l'estimation de nouvelles données climatiques à partir des données introduites.

En sélectionnant les limites inférieures et supérieures appropriées pour les données météorologiques, le programme applique un figure contrôle de qualité lors de la spécification ou de l'importation de données.

Les données climatiques spécifiées et dérivées, y compris ET0, peuvent être exportées dans des fichiers texte compatibles avec AquaCrop ou tracées de diverses manières spécifiées par l'utilisateur.

La calculatrice ETo est conçue comme un outil pratique pour aider les agro météorologistes, les agronomes et les ingénieurs d'irrigation à effectuer des calculs standards pour ETo, qui seront ensuite utilisés dans les études sur l'utilisation des eaux de culture (figure 13...).

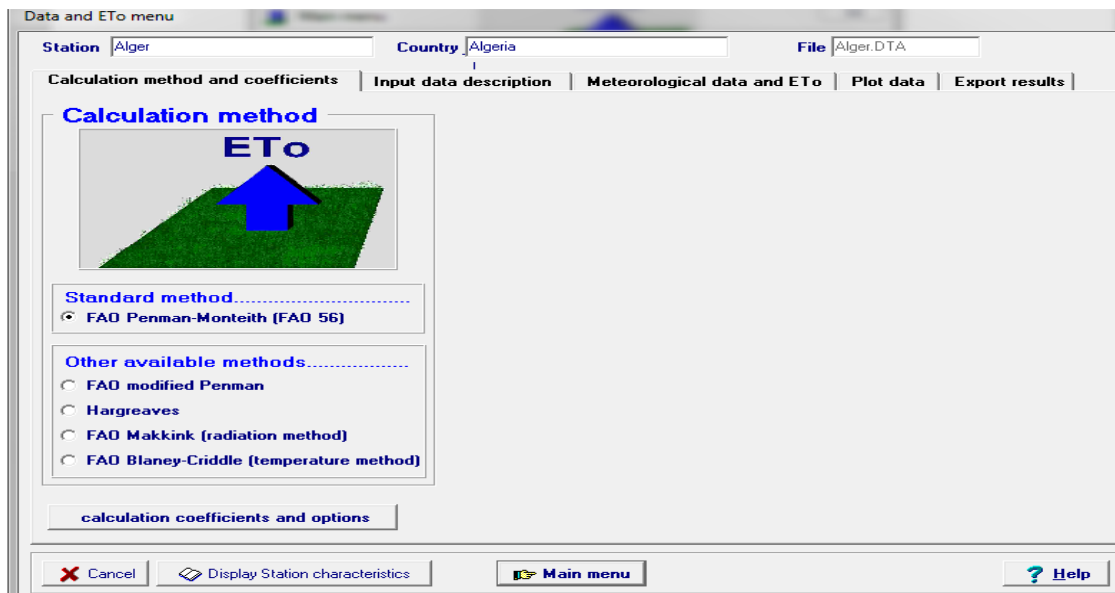


Figure 13 : Interface de logiciel ETo

4. 2. Calcul d'ETo

Le calcul de l'évapotranspiration, est basé sur différentes méthodes introduites dans le logiciel, à savoir la méthode de Penman et Monteith, Blaney-Criddle, Hargreaves, Makkink ; Penman et Monteith Modifier (figure). Les résultats obtenues ; vont servir à comparer l'évapotranspiration estimée par chaque formules au sein de la même région et entre les régions d'études.

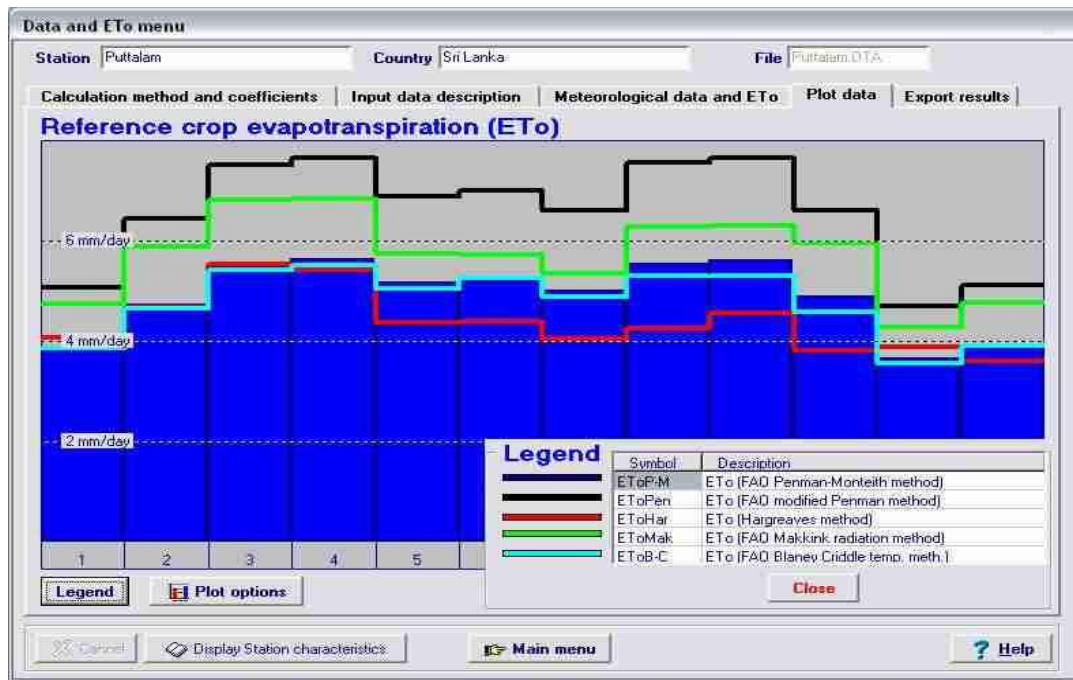


Figure 14. ETo mensuelle estimée par diverses méthodes (lignes) par rapport à la méthode FAO Penman-Monteith (barres).

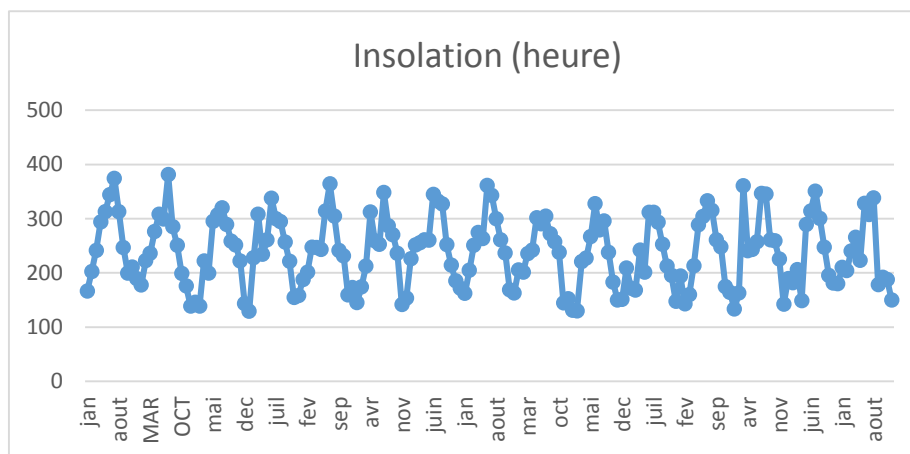
Rappelons l'objectif assigné à cette étude, à savoir la comparaison de cinq formules empiriques de calcul d'évapotranspiration potentielle (ETP) utilisées par le monde avec une formule de référence, en l'occurrence la formule de Penman-Monteith. Celle-ci est une version améliorée de la formule originale de Penman (1948), intégrant d'autres paramètres tels que le paramètre de rugosité. Elle permet ainsi de mieux caractériser le processus physique de l'évapotranspiration potentielle et d'améliorer les résultats de calcul.

C'est, entre autres, l'une des raisons ayant amené la FAO à adopter et utiliser cette formule dans de nombreuses applications en agriculture irriguée : évaluation des besoins en eau, indice de performance des cultures, caractérisation des systèmes d'irrigation, prévision des récoltes etc.

Pour simplifier l'analyse de l'évapotranspiration sur différentes échelles (journalier, mensuelle, annuelle) et pour que nous puissions comparer les différentes formules utilisées par le logiciel, nous avons pris comme **étude de cas la wilaya d'Alger**

I. Contexte climatique

La ville d'Alger bénéficie d'un climat tempéré chaud. La pluie dans Alger tombe surtout en hiver, avec relativement peu de pluie en été.



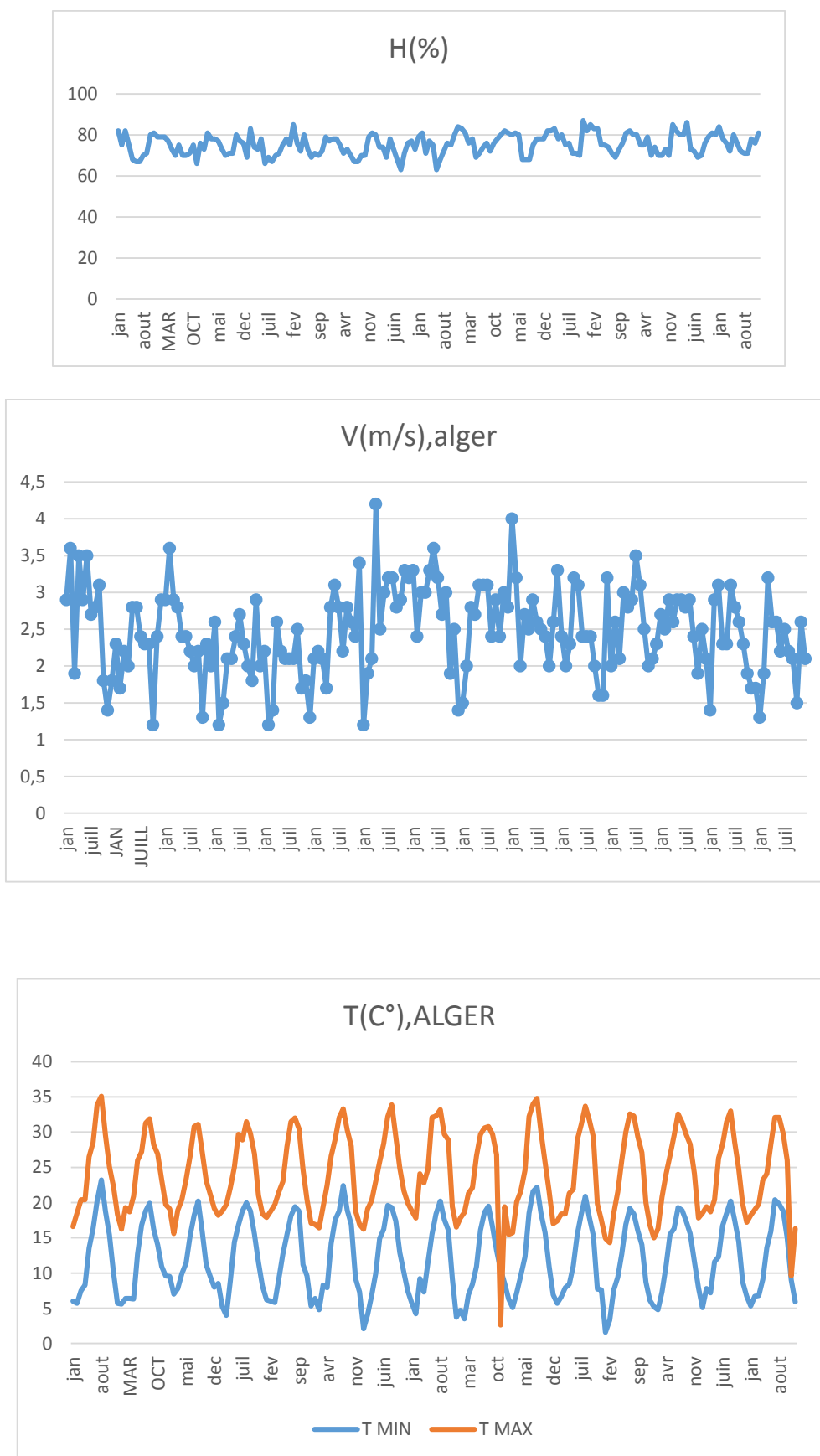


Figure 12. Evolution des variables climatiques durant la période (1994-2008)

Les quatre figures représentent la variation des paramètres climatiques au cours tous la série de mois du période d'études (1994/2008), cette variation elle continue changement avec les saisons.

II. Analyse de l'évapotranspiration potentielle moyenne

1. A l'échelle mensuelle (ETP)

L'évolution de l'évapotranspiration potentielle conduit à une pluralité de définition suivant du but recherche (Seguin, 1975).

Dans le cadre de notre étude, l'évapotranspiration est considérée comme l'expression de la demande climatique en eau par rapport aux besoins de la culture.

En effet seule la station d'Alger est pourvue de l'ensemble des paramètres climatique.

Les contraintes posées (manque de mesures directes, absence de la plupart des paramètres climatologiques sur, pratiquement l'ensemble du bassin versant) ; l'évaluation d'ETP en mm a été basée sur la station de Alger.

Pour mieux apprécier et avoir la variabilité de l'évapotranspiration dans le temps, une analyse des résultats à l'échelle mensuelle est réalisée.

La figure 12 montre des valeurs mensuelles moyennes qui s'échelonnent inégalement au cours de l'année. Un croisement des valeurs de l'évapotranspiration s'observe à partir du mois de janvier, pour atteindre une valeur maximale au mois de juillet.

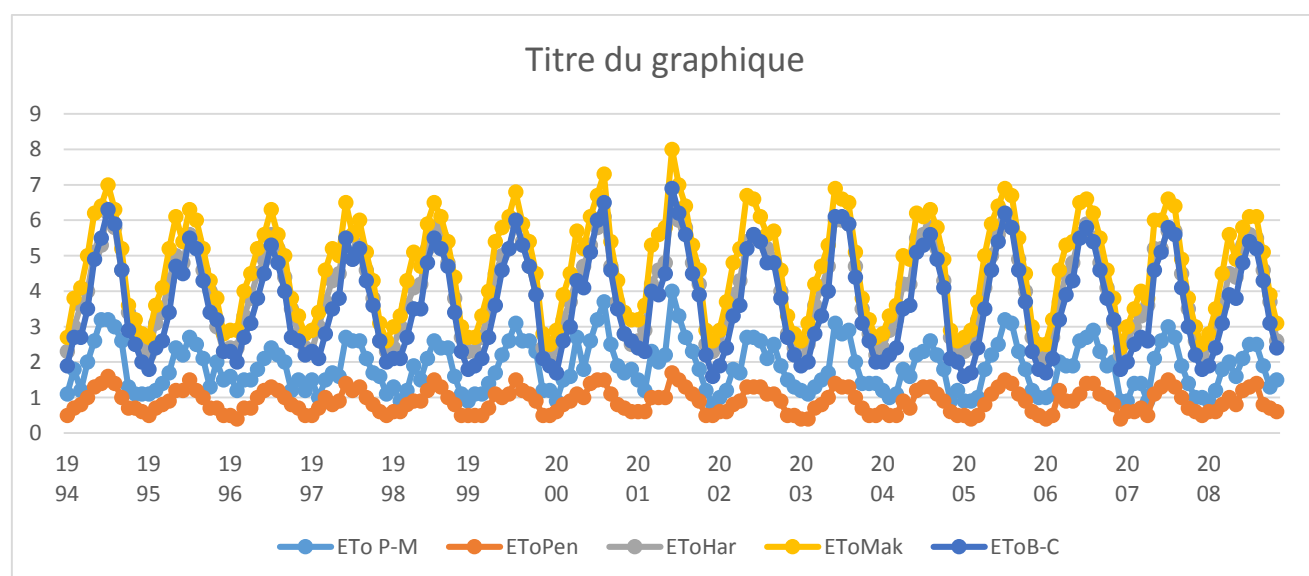


Figure 13. Evolution de l'évapotranspiration potentielle annuelle Alger période : 1994/2008

Les valeurs les plus élevées de l'évapotranspiration potentielle sont obtenues en été, il celle plus base sont obtenue on hiver, la variation des valeurs obtenues est due aux températures moyenne mensuelles très élevées.

2. A l'échelle annuelle

Estimation des valeurs de l'évapotranspiration est nécessaire à faire globe a faire de l'échelle mensuelle et annuelle des cultures qu'ou veut irriguer.

La comparaison de l'ETP moyenne annuelle (P-M et Blaney Criddle), semble donner des valeurs qui se rapprochent. Ce rapprochement s'explique par le fait que les méthodes utilisées font intervenir le bilan d'énergie (Seguin, 1975, Daoud, 1991). Le rapprochement se confirme également par les courbes des valeurs de l'évapotranspiration (figure 14.)

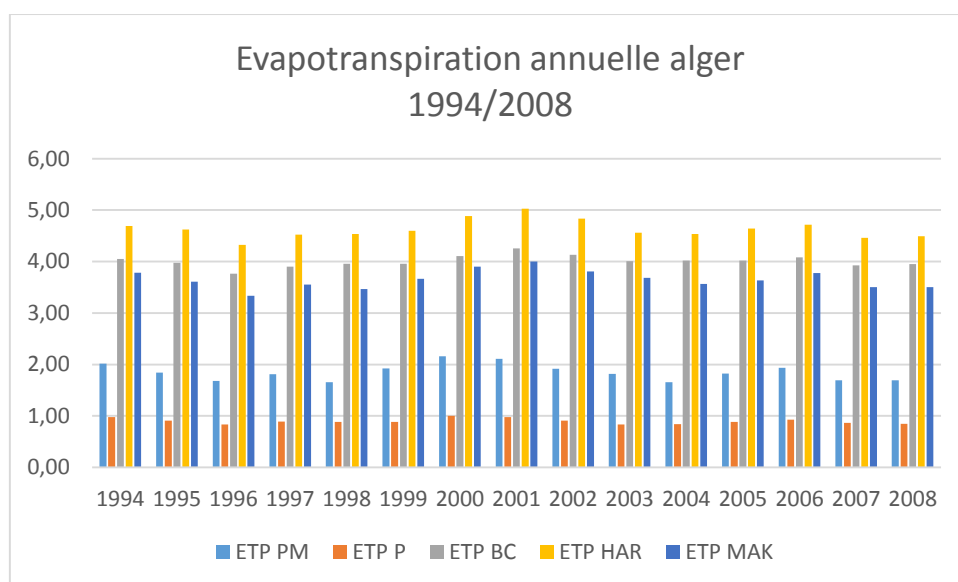


Figure 14. Evolution de l'évapotranspiration potentielle annuelle (Alger) au cours de période 1994/2008

3. Corrélation entre l'ETP PM et d'autres formules

Analyse la régression linéaire

A partir des relations entre l'ETP (PM) et celle estimée à partir des différentes formules, il apparaît une bonne corrélation entre celle-ci et celle obtenue par l'application des différents modèles de calcul (coefficient de corrélation > 0.9) (tableau 10). Il est à noter que la meilleure

corrélation est obtenu entre l'ETP (P-M) et (Blaney Criddle), avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 0.91$).

ETP (mm)	moyenne	écart type	coefficient variation
Blaney Criddle	1360	74,4	6
Penman Monteith	1306,8	56,7	4,5
Makkink	1118	101,5	9,1
Hargreaves	752	24,52	3,27

Tableau 10. Coefficient variation entre les formules ETP

Tableau11. Corrélation entre l'ETP mesurée et celle de différentes formules

relation	équation	R^2
ETP(Hargreaves)	$ETP_{P-M} = 1,6462ETP_{har} + 0,9637$	$R^2 = 0,8113$
ETP(Penman)	$ETP_{P-M} = 0,4519ETP_p + 0,0617$	$R^2 = 0,8701$
ETP (Blaney-Criddle)	$ET_{P-M} = 1,9463ETP_{b-c} + 0,0532$	$R^2 = 0,9174$
ETP(Makkink)	$ETP_{P-M} = 1,8855ETP_{mak} + 1,1433$	$R^2 = 0,8493$

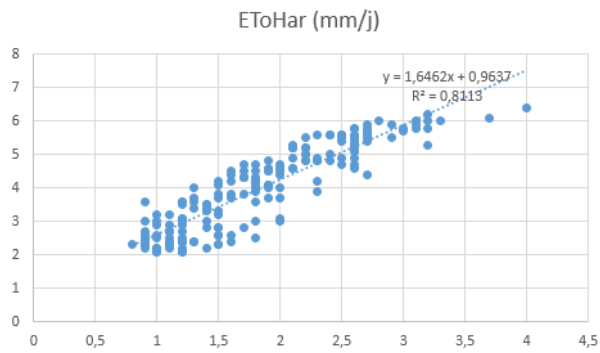


Figure 15. Relation entre ET₀ P-M et ET₀Har (ALGER)

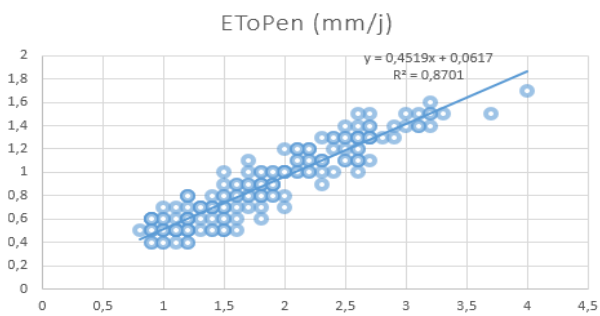


Figure16. Relation entre ET₀ P-M et ETO Pen(ALGER)

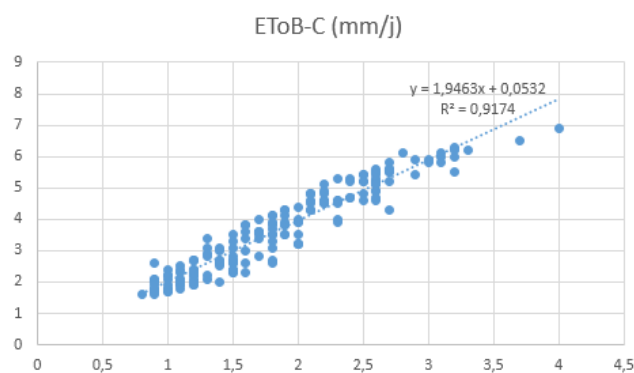


Figure 17. Relation entre ET₀ P-M et ETO B-C(ALGER)

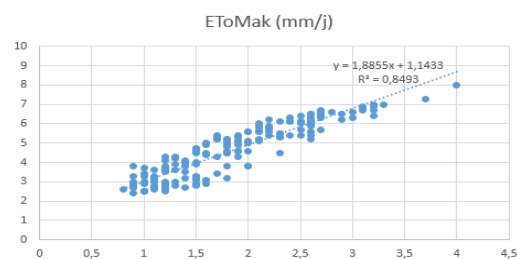


Figure18. Relation entre ET₀ P-M et ETO Mak(ALGER)

Les résultats obtenues peuvent être généralisés pour l'ensemble des stations, puisque l'évapotranspiration potentielle(ETP) varie peu dans l'espace (Daoud, 1991)

II. Evaluation évapotranspiration potentielle moyenne sur les quatre wilayas

1. à l'échelle mensuelle

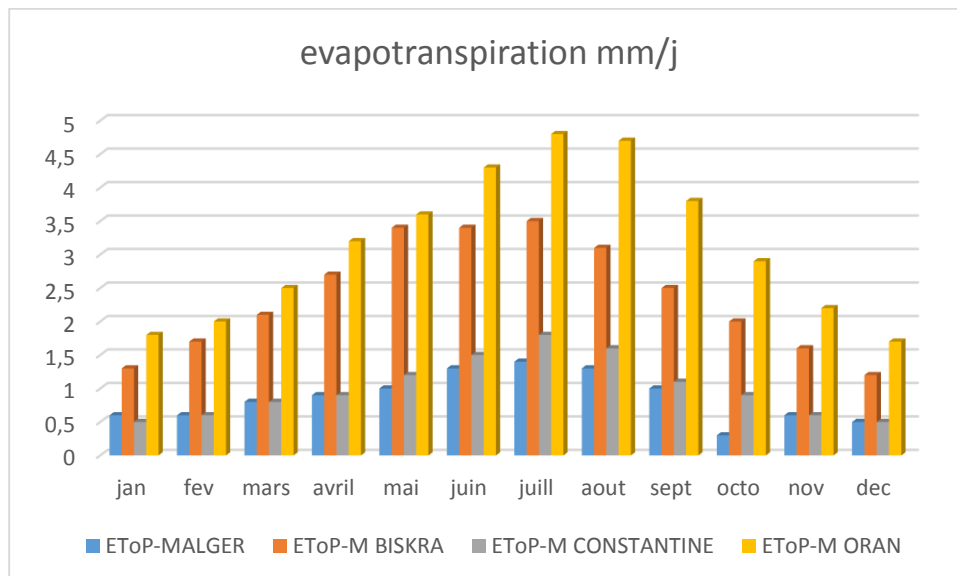


Figure 19. Evolution de l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle Alger : période (1994/2008)

La répartition mensuelle de l'évapotranspiration, montre que celle-ci est élevée en été par rapport au reste de l'année. Autrement dit, ces valeurs restent faibles en hiver avec des variations en court « Blaney Criddle » des valeurs mensuelles moyennes qui s'échelonnent inégalement au cours de l'année .un croisement des valeurs de l'évapotranspiration s'observe à partir du mois de janvier, pour atteindre une valeur maximale au mois juillet.

2. A l'échelle annuelle

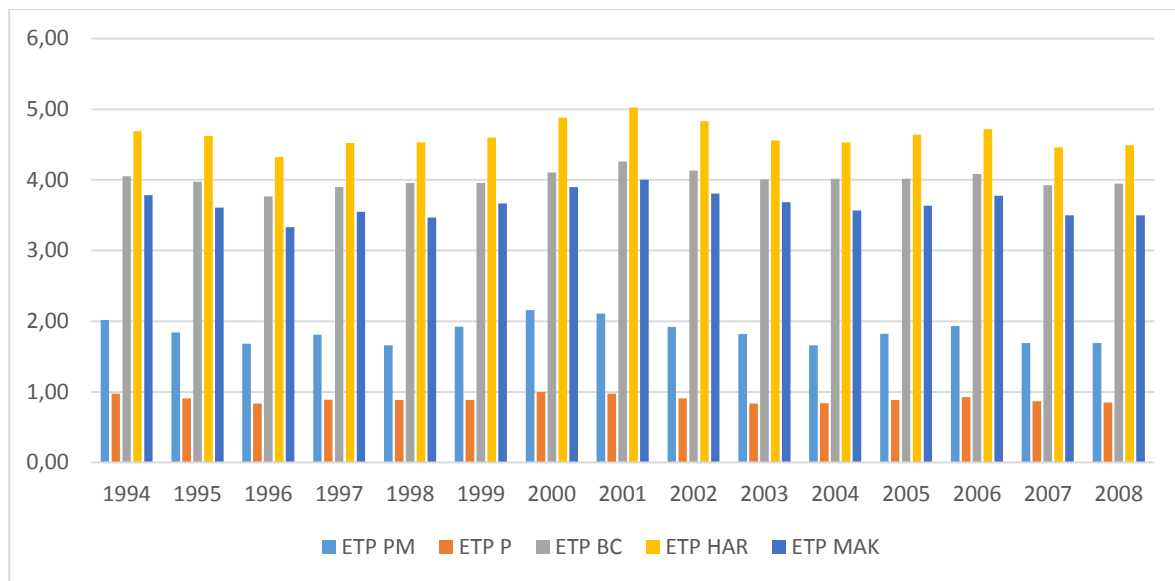


Figure 20. Evolution de l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle Alger : période (1994/2008)

La répartition mensuelle de l'évapotranspiration, montre que celle-ci est élevée en été par rapport au reste de l'année. Autrement dit, ces valeurs restent faibles en hiver avec des variations en court « Blaney Criddle »

Tableau récapitulatif

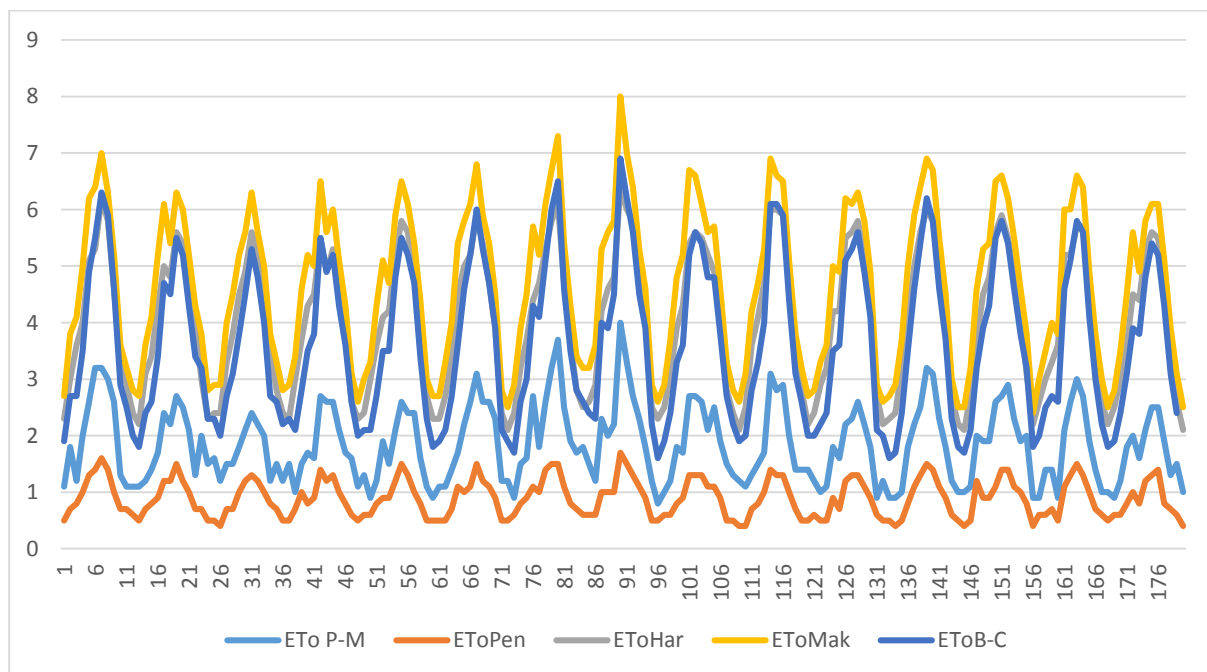


Figure21. Evolution de l'évapotranspiration potentielle mensuelle Alger : période (1994/2008)

Des valeurs mensuelles moyennes qui s'échelonnent inégalement au cours de l'année .un croissement des valeurs de l'évapotranspiration s'observe à partir du mois de janvier, pour atteindre une valeur maximale au mois juillet.

Partie I

Synthèse Bibliographique

Partie II

Matériel et méthode

Partie III

Résultats et discussions