



Détermination de la formule appropriée pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans une région aride : Application à la station de Béchar (SO Algérien)

Lynda CHEBBAH^a et Abdesselem KABOUR^{b,*}

^a Département Sciences et Techniques, Université Abdelhafid Boussouf de Mila, BP 26 Mila - 43000, Algérie.

^b Laboratory of Modeling and Socio-Economic Analysis in Water Science – MASESE, Mohamed-Cherif Messaadia University - Souk Ahras, Algeria

Résumé

Une gestion durable des ressources en eau nécessite une bonne maîtrise de l'évaluation quantitative des termes du bilan hydrologique, tel que l'évapotranspiration, qui constitue un paramètre relativement difficile à estimer, surtout en présence de plusieurs expressions empiriques, le choix devient délicat. Dans la région aride de Béchar (Sud-ouest Algérien), qui souffre de la rareté des précipitations et d'une demande en eau sans cesse croissante sous l'effet de la pression de la démographie et de l'activité agricole, l'évapotranspiration constitue le facteur de perte hydrique le plus important. Elle est estimée, par un ensemble de méthodes (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman-FAO et ANRH), sur une série de 1978 à 2010 (32 ans), à partir de données climatiques (température, humidité relative, précipitation, durée d'insolation et la vitesse du vent). L'objectif de ce travail est de choisir, par comparaison entre ces méthodes, celle la plus appropriée pour le calcul de l'évapotranspiration. Les résultats indiquent que sur l'échelle mensuelle pour la station de Béchar, le modèle de TURC fournit la meilleure estimation quantitative de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Mots-clés : Modèle numérique ; Évapotranspiration potentielle (ETP) ; Climat aride ; Béchar

Determination of the appropriate formula for the estimation of potential evapotranspiration "PET" in an arid region: Application to the Bechar station (SW Algeria)

Abstract

The sustainable management of water resources requires a good command of the quantitative assessment of the terms of the hydrological balance, such as evapotranspiration, which is a relatively difficult parameter to estimate, especially in the presence of several empirical expressions, making the choice a delicate one. In the arid region of Béchar (south-west Algeria), which suffers from a lack of rainfall and an ever-increasing demand for water as a result of demographic pressure and agricultural activity, evapotranspiration is the main factor of water loss. The aim of this work is to select the most appropriate method for calculating evapotranspiration by comparing several methods. Evapotranspiration is estimated using different methods (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman-FAO and ANRH) over a series from 1978 to 2010 (32 years) based on climatic data (temperature, relative humidity, precipitation, sunshine duration and wind speed). The results indicate that on a monthly scale for the Béchar station, the TURC model provides the best quantitative estimate of potential evapotranspiration (ETP).

Keywords: Numerical modelling; Potential evapotranspiration (PET); Bechar; Arid climate.

1. Introduction

Plusieurs auteurs ont cherché à établir une formule convenable pour estimer l'ETP (l'évapotranspiration potentielle) avec le minimum d'erreurs possible et intégrant une grande partie du nombre des facteurs

climatiques qui régissent le phénomène [1-3]. On estime communément que l'évapotranspiration représente l'évaporation à partir de toute l'eau contenue dans le sol, la neige, la glace, et les autres surfaces à laquelle s'ajoute la transpiration des végétaux. Les



estimations relatives à l'évaporation des nappes d'eau libre du sol, ainsi que la transpiration des végétaux, revêtent une grande importance dans les études hydrologiques. A titre d'exemple, l'évaluation de l'évaporation peut jouer un rôle déterminant dans l'étude de la faisabilité et la gestion d'un site agricole. L'évaporation et l'évapotranspiration constituent enfin deux éléments importants de toute étude du bilan hydrique [4]. Des estimations de l'évapotranspiration moyenne des bassins sont indispensables pour établir des modèles hydrologiques conceptuels [5]. Les moyens techniques actuels ne permettent pas encore de mesurer directement l'évapotranspiration sur de grandes surfaces [6, 7]. On a cependant mis au point plusieurs méthodes d'évaluation indirecte qui fournissent des résultats acceptables, les évaluations peuvent être faites à partir du bilan hydrique, du bilan énergétique et des méthodes basées sur l'aérodynamique des fluides [1,2,8,9], d'autres formules ont été établies à la base de la simplicité et de leurs exigences minimales en matière de paramètres d'entrée, en particulier les éléments climatiques fondamentaux, tel que la température (t), l'humidité relative (HR), l'insolation et vitesse du vent [10,11]. Dans l'ensemble, les études soulignent l'importance de choisir la méthode la mieux adaptée aux conditions locales et à la disponibilité des données météorologiques [12].

L'évapotranspiration en Algérie peut être évaluée à l'aide de différentes méthodes et facteurs. Une approche consiste à estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP) à l'aide de la méthode de Thornthwaite [13]. Une autre méthode consiste à utiliser des modèles de réseaux neuronaux artificiels ¹, qui peuvent estimer l'évapotranspiration de référence quotidienne en fonction de facteurs climatiques tels que la température, l'humidité relative et la vitesse du vent [14]. En outre, l'algorithme S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index) peut être utilisé avec des images satellites pour évaluer l'évapotranspiration dans des zones spécifiques, en tenant compte de facteurs tels que la disponibilité de l'eau, la saisonnalité et l'indice de végétation [15]. Ces méthodes fournissent des informations précieuses sur le bilan hydrique et les processus hydrologiques dans les régions arides en l'Algérie.

¹ ANN : Modèles mathématiques dont l'architecture est inspirée de réseaux de neurones biologiques.

L'objectif de ce travail est de comparer plusieurs méthodes le calcul de l'évapotranspiration, pour choisir la plus appropriée à une station située dans un climat aride en l'occurrence la station climatique de Béchar.

2. Matériel et méthode

Dans ce travail, nous avons appliqués six modèles d'estimation de l'évapotranspiration (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman-FAO et ANRH², sur les données de la station de Bechar, située dans une région à climat aride, pour une série de 1978 à 2010 (32 ans). Nous avons calculées leurs moyennes à l'échelle des valeurs moyennes mensuelles interannuelles (VMMI), et à l'échelle annuelles en calculant les sommes des valeurs moyennes mensuelles interannuelles (SVMMI). Ensuite, nous les avons comparés, à cette moyenne, pour déterminer le model le plus proche de la moyenne considérée, sur les deux échelles, et le proposer comme formule appropriée pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle dans la région de Bechar. Nous avons utilisés deux méthodes de comparaison, la première consiste à calculer un écart relatif (ER) à la moyenne, pour les deux échelles des SVMMI et VMMI, et la deuxième est une corrélation linéaire, seulement pour le VMMI.

2.1. Présentation de la station et des données

Pour la réalisation de ce travail le choix est porté sur la station climatique de Bechar, située dans un climat aride, au Sud-Ouest de l'Algérie (Figure 1), elle présente les caractéristiques suivantes : X (Km) : 802.15, Y (Km) : 116, Longitude : 02°14'00"W, Latitude : 31°37'00"N, Altitude : 772 m. Cette station appartient à l'office national de météorologie (ONM). Les observations et les mesures enregistrées sont : la pluviométrie, les températures, l'humidité relative, la vitesse du vent et la durée d'insolation journalière [16]. La série utilisée s'étale de 1978 à 2010, c'est-à-dire 32 années. Les données de l'ONM ont été soigneusement examinées, elles ne présentent aucune lacune.

Les six formules ou modèles utilisés pour estimer l'évapotranspiration, à l'échelle mensuel et annuel, sont : Turc (1960), Thornthwaite (1948, 1955), Blaney-Criddle (1950), Penman (1948), Penman-FAO (Food

² Agence Nationale des ressources Hydriques

and Agriculture Organization) (1965), et celle de l'ANRH. Ces formules sont présentées, en définissant chaque paramètre utilisé, et les résultats sont consignés dans des tableaux et des graphes, pour faciliter leurs comparaisons et leurs interprétations. En fin, une corrélation avec des valeurs d'une ETP de référence est calculée à la base d'une formule de référence [1, 2, 8], notamment celle de Turc, et choisie par rapport à sa proximité de la valeur moyenne des six modèles appliquées, ce qui a permis de déterminer le modèle le plus adéquat pour la région étudiée.

2.2. Aperçu climatique.

Pour caractériser le climat d'une région donnée, le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls (1953) est considéré comme une méthode graphique, qui permet de définir les périodes sèche et humide de l'année, où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T), avec $P=2T$. La courbe des précipitations passe au-dessous (période sèche), ou au-dessus de celle des températures (période humide); la période s'étendant entre les abscisses des points d'intersection des deux courbes, correspond à la durée de la saison correspondante, son intensité et traduite par la surface du graphe comprise entre les deux courbes pendant cette période [2,8,16]. Pour la station de Béchar (1978-2010) (Figure 1), la période sèche s'étend sur toute l'année, à cause de sa situation dans une région à climat aride.

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles interannuelles varient de 7,07 mm (Décembre) à 9,73 mm (Juillet), et les températures moyennes mensuelles interannuelles oscillent entre 9,85 °C (Janvier) et 34,5 °C (Août) (Figure 2).



Figure 1. Situation géographique de la station climatique de Bechar
Longitude : 2°14'00\" ; Latitude : 31°37'00\".

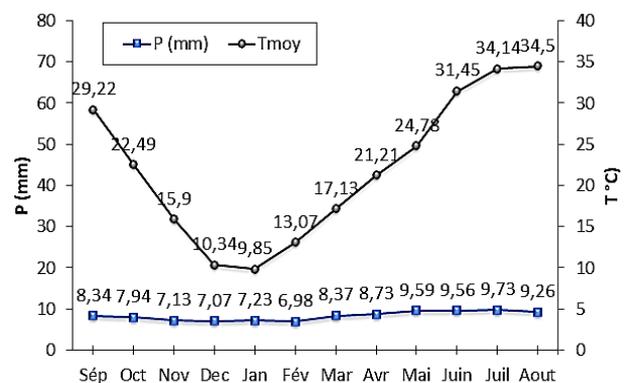


Figure 2. Diagramme ombrothermique de Gaussen – Bagnouls de la station la station de Béchar, (1978-2010).

2.3. Formule de Turc

L. Turc rechercha à partir de 1945 une expression algébrique représentant au mieux l'évapotranspiration mensuelle et même décadaire observée sur les cases lysimétriques³ de Versailles, Rothamsted, Groningen et d'autres stations situées en Ecosse, en Afrique du Nord et aux Indes. Il aboutit ainsi, vers 1960, à une formule complexe donnant l'évapotranspiration potentielle en fonction de l'insolation et de la température [2, 6-8, 17]. En 1962, L. Turc a proposé des formules plus simplifiées, séparées par une limite entre deux applications différentes, fonction de l'humidité relative mensuelle de valeur 50 %. Ainsi, on peut évaluer avec une approximation suffisante l'évapotranspiration

³ Appareil de mesure de la quantité d'eau provenant des précipitations qui pénètre dans le sol.

potentielle mensuelle d'un périmètre irrigué par la formule suivante :

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

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

Où :

Ig : Radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale (quelques calories/cm²/jour) ;

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

Le coefficient 0,40 est le résultat du produit de 0,013 par le nombre de jours du mois considéré. Ainsi, pour un mois de 31 jours : $0,013 \times 31 = 0.40$

La radiation solaire globale n'est mesurée qu'en un petit nombre de stations, on devra souvent l'évaluer à partir de la radiation maximale théorique Iga^4 , calculée d'après les données astronomiques et d'après le rapport h/H de la durée d'insolation effective (mesuré par un héliographe) à la durée du jour astronomique (s'obtient par des tables).

On emploie souvent la formule suivante dérivée de celle d'Ångström⁵ :

$$Ig = Iga \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H}\right) \quad (1)$$

Si l'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est inférieure à 50 %, on multiplie l'ETP calculée par le facteur correctif $\left(1 + \frac{50-Hr}{70}\right)$.

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

2.4. Formule de Thornthwaite (1944) :

Cette formule est basée sur de nombreuses expériences effectuées sur des cases lysimétriques ne faisant intervenir que la température [2, 4, 6, 7, 17, 18] et par laquelle l'évapotranspiration potentielle est donnée par la relation suivante :

$$ETP = C \times t \times a \quad (2)$$

Avec :

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

C et « a », constantes pour un lieu donné, sont fonctions de l'indice thermique annuel I , égal à la somme des 12 indices thermiques mensuels (i) donnés par $i =$

$$\left[\frac{t}{5}\right]^{1.514}, \text{ le terme } C \text{ variant en sens inverse de } i \text{ et}$$

« a » étant donné par :

$$a = 6,75 \times 10^{-7} i^3 - 7,71 \times 10^{-5} i^2 + 1,70 \times 10^{-2} i + 0,492 \quad (3)$$

Par simplification de la formule de Thornthwaite, la valeur de « a » est donnée par l'expression de L. Serra⁶, $a = 0,016 \times I + 0,50$ de façon à ce que l'équation (1), peut s'écrire :

$$ETP = 16 \times \left(10 \frac{t}{I}\right)^a \quad (4)$$

2.5. Formule de Blaney-Criddle (1950) :

Établi par Blaney Harry et Criddle Wayne, ils pensaient que l'ETP dépendait de deux facteurs essentiels : la force évaporante F , fonction de la température et de la durée d'insolation, et de l'humidité relative de l'air ou le déficit de saturation. D'autre part, ont envisagés une régression linéaire entre l'ETP et la température ; puis ont remarqués, qu'elle ne dépendait pas seulement du potentielle énergétique F , dépensé pour actionner le déficit de saturation, mais aussi de la structure de la surface qui libère les molécules d'eau, appelé facteur de correction K , qui dépend directement du type de culture [2, 4, 6, 7, 17, 19].

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

$$ETP = aF + b \quad (5)$$

Avec :

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

⁴ Iga : Rayonnement solaire qui atteindrait le sol en l'absence d'atmosphère, c'est une donnée astronomique (ne dépend que de latitude du lieu considéré) indépendante du climat (cal/cm²/j).

⁵ Anders Knutsson Ångström est un physicien et météorologue suédois. On lui crédite l'invention du pyranomètre, le premier instrument à mesurer précisément la radiation solaire directe et indirecte

⁶ Serra L. Le contrôle hydrologique d'un bassin versant. In: Pluie, évaporation, filtration et écoulement. Compte rendu des troisièmes journées de l'hydraulique, Alger, 12-14 avril 1954. Tome 1, 1955. https://www.persee.fr/doc/jhydr_0000-0001_1955_act_3_1_3277

P : Durée d'éclairement en %.
 t : Température moyenne mensuelle en °C.
 a et b : Coefficients de correction (Tableau 1) en fonction de trois paramètres climatiques : l'humidité

relative, la vitesse du vent et l'insolation effective (rapport des heures d'insolation et de la durée astronomique de jour).

Tableau 1
 Valeurs des coefficients a et b de l'équation aF+b

Insolation effective	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative (%)					
		Faible Inf. à 20 %		Moyenne 20 % - 50 %		Élevée Sup. à 50 %	
		a	b	a	b	a	b
Élevée 0,70-0,90	Faible 0-2	1,59	-2,02	1,45	-2,18	1,16	-1,96
	Modérée 2-5	1,77	-1,84	1,59	-2,11	1,25	-1,88
	Élevée 5-8	2,00	-1,86	1,73	-2,04	1,36	-2,00
Modérée 0,45-0,70	Faible 0-2	1,45	-2,00	1,30	-2,07	1,05	-1,84
	Modérée 2-5	1,66	-1,98	1,45	-2,00	1,14	-1,84
	Élevée 5-8	2,05	-2,23	1,57	-1,98	1,21	-1,80
Faible 0-0,45	Faible 0-2	1,25	-1,79	1,13	-1,71	0,89	-1,70
	Modérée 2-5	1,45	-1,91	1,23	-1,75	0,96	-1,66
	Élevée 5-8	1,61	-1,88	1,36	-1,82	1,02	-1,59

2.6. Formule de Penman

La formule mise au point par le physicien anglais Howard Penman en 1948 découle directement du bilan d'énergie. Son intérêt est donc primordial quant à la compréhension du phénomène physique, de plus, elle donne les meilleures estimations de l'ETP, et ceci sous tous les climats, son seul inconvénient est de nécessiter un nombre assez important d'informations climatiques.

L'équation simplifiée du bilan d'énergie, appliquée à une surface évaporante de caractéristiques déterminées, et non limitée en eau, s'écrit de la manière suivante [4, 5, 7, 8, 20].

$$ETP = \frac{\Delta/\gamma}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} \times \left[\frac{I_{ga}}{59} (1 - a) \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right) - \frac{\sigma}{59} T^4 (0,56 - 0,08e(0,10 + 0,90hH)) + 0,261 + \Delta\gamma E - e(1 + 0,54u) \right] \quad (6)$$

Avec :

H : Durée astronomique du jour (heures) à partir des abaques.

u : Vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s).

E : Tension maximale de la vapeur d'eau dans l'air (millibars).

T : Température moyenne mensuelle (°K).

e : Tension moyenne est estimé à partir de l'humidité relative Hr en %, et de la température t en degré Celsius par la relation suivante : $e = 0,061 * Hr 10^{\left(7,5 \frac{t}{238+t}\right)}$
 t : Température moyenne mensuelle (°C).

C'est l'évaporation qui se produirait si la température de surface était égale à la température de l'air.

Le calcul de l'ETP par la formule de Penman exige l'estimation préalable du rayonnement net Iga souvent estimée à partir de l'équation modifiée d'Angstrom et du pouvoir évaporant de l'air (Equation 1) ainsi que celle des coefficients Δ et γ.

2.7. Formule de Penman – FAO

La formule de Penman a été modifiée par de nombreux auteurs de façon à en simplifier l'écriture ou en adapter les paramètres à des régions particulières. Parmi ces formules modifiées on utilise fréquemment la formule dite de Penman-FAO recommandée pour les régions sèches et arides. Cette formule a la forme suivante [2, 10, 21-24] :

$$ETP = \left[\frac{I_{ga}}{59} (1 - a) \left(0,25 + 0,45 \frac{h}{H} \right) - \frac{\sigma}{59} T^4 (0,56 - 0,08e(0,10 + 0,90hH)) \right] \Delta\gamma + \Delta\gamma + 0,261 + \Delta\gamma E - e(1 + 0,864u) \quad (7)$$

On y retrouve les mêmes variables de la formule de Penman seuls quelques paramètres changent, à savoir :

(1 + 0,864 u) au lieu de (1 + 0,54 u) et (0,25 + 0,45 $\frac{h}{H}$) au lieu de (0,18 + 0,62 $\frac{h}{H}$)

Δ : Pente de la courbe de tension de vapeur donnée par :

$$\Delta = \frac{4099 e_a}{(T-237,2)^2} = \frac{2504 \exp(17,27T)}{(T+237,3)^2} \quad (8)$$

Avec T la température de l'air (°C) et e_a (millibar. °C⁻¹) la tension de vapeur saturante à la température T.

2.8. 2.8. Formule dite ANRH

Il arrive souvent que les données climatiques ne soient pas disponibles pour permettre le calcul de l'ETP. Dans ce

Tableau 2

Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation pour la formule de l'ANRH [7, 24] ,

Mois	1	2	3	4	5	6
ai	-0,0218	-0,0110	-0,0012	0,0098	0,0201	0,0248
bi	315	307	371	389	429	429
Km	0,96	1,22	1,11	1,17	1,02	1,00
Mois	7	8	9	10	11	12
ai	0,0230	0,0144	0,0031	-0,0081	-0,0185	-0,0246
bi	436	414	370	351	311	308
Km	0,97	0,97	0,98	0,90	0,90	0,86

3. Résultats et discussion

Les résultats de l'application des formules de l'estimation de l'ETP sus citées, à savoir : Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman-FAO et la formule de l'ANRH, en utilisant les données climatiques de la station de Bechar sur une période de trente-deux (32) ans (1978 - 2010), sont consignées dans les tableaux correspondants 3 à 8, et les figures 2, 3 et 4.

3.1. Formule de Thornthwaite :

Les résultats de calcul de l'ETP mensuelle par la formule de Thornthwaite sont représentés dans le tableau 3 ; Elle présente de faibles variations mensuelles interannuelles allant de Novembre à Mars. Plus la température augmente, plus les précipitations se raréfient dans la région, dès que le Sirocco souffle, et

cas, on peut utiliser la formule ETP de l'ANRH, qui permet d'évaluer l'évapotranspiration potentielle mensuelle à partir de la seule mesure de la température moyenne mensuelle correspondante, pour une position géographique quelconque, par la formule suivante [5, 7, 24]:

$$ETP_{ANRH} = Kr \times Km (H - 187) (0,032 t + 0,077) \quad (9)$$

Avec :

Km : Coefficient mensuel (Tableau 2).

Kr : Coefficient régional Kr = 1,25.

H : Durée théorique mensuelle d'insolation (heures/mois) exprimée selon la formule suivante : $H_i = a_i Y + b_i$ avec Y l'ordonnée de Lambert de la zone (Km) ; a_i et b_i des coefficients estimés selon les mois selon le tableau suivant (Tableau 2).

plus la fluctuation mensuelle interannuelle dévient importante et atteint 164,83 mm en Juin, mois caractérisé par des vents forts et secs et une insolation importante. Le cumul annuel est de 1050,02 mm (Tableau 3 et figure 2) et le pic mensuel est obtenu en Août correspond à 206,17 mm.

Tableau 3
Valeurs de l'ETP mensuelle selon Thornthwaite
à la station de Béchar, (1978-2010).

Mois	I	a	ETPmm
Jan	2,79	2,41	9,95
Fév.	4,28	2,41	19,73
Mar	6,45	2,41	37,94
Avr.	8,91	2,41	63,59
Mai	11,28	2,41	92,63
Juin	16,18	2,41	164,83
Juil.	18,32	2,41	201,01
Août	18,62	2,41	206,17
Sep	14,48	2,41	137,98
Oct.	9,74	2,41	73,27
Nov.	5,76	2,41	31,68
Déc.	3,00	2,41	11,19
Somme	119,85		1050,02

3.2. Formule de Turc

Le modèle de Turc donne l'ETP à l'échelle annuelle une valeur de 2012,60 mm, et on observe des valeurs plus élevées pendant la période d'été avec un maximum de 288,02 mm/mois en Juillet, où les températures sont élevées, les vents modérés, l'humidité relative est faible, pour la période de Novembre jusqu'à Février l'ETP est la plus faible avec un minimum de 58,611 mm/mois en Décembre (Tableau 4 et figure 3).

Tableau 4
Valeurs de l'ETP mensuelle selon TURC à la station de Bechar
(1978-2010)

Mois	Ig	ETPmm	C	ETPc mm
Jan	331,25	60,45	1,02	61,71
Fév.	378,15	73,76	1,14	84,40
Mar	510,40	119,51	1,27	152,02
Avr.	580,37	144,00	1,33	191,52
Mai	634,77	170,62	1,37	233,92
Juin	666,90	189,30	1,43	270,51
Juil.	649,26	194,32	1,48	288,02
Août	588,41	177,98	1,46	259,60
Sep	500,39	141,84	1,33	189,03
Oct.	442,66	118,21	1,18	139,32
Nov.	352,64	80,80	1,04	83,92
Déc.	309,09	58,61	1	58,61
Somme		1529,43		2012,61

3.3. Formule de Blaney-Criddle

La méthode de Blaney-Criddle, montre des variations mensuelles interannuelles moyennes. Elles sont surtout minimales de Décembre à Février et atteignent leur maximum en Juin, mois le plus ensoleillé et le plus venté dans la région. L'effet saisonnier est très marqué (Tableau 5 et figure 3).

Tableau 5
Valeurs de l'ETP mensuelle selon Blaney-Criddle à la station de Bechar (1978-2010)

Mois	P	F	A	b	ETP clim mm	Kc	ETP cult mm
Jan	7,23	91,54	1,59	-2,11	143,44	1,10	157,78
Fév.	6,98	98,71	1,59	-2,11	154,84	1,10	170,33
Mar	8,373	134,05	1,59	-2,11	211,03	1,10	232,13
Avr.	8,73	156,15	1,73	-2,04	268,10	1,10	294,91
Mai	9,59	187,28	1,73	-2,04	321,96	1,10	354,15
Juin	9,56	216,03	2	-1,86	430,20	1,10	473,21
Juil.	9,73	231,91	1,77	-1,84	408,64	1,10	449,50
Août	9,26	222,24	1,77	-1,84	391,53	1,10	430,68
Sep	8,34	179,90	1,59	-2,11	283,94	1,10	312,33
Oct.	7,94	146,70	1,59	-2,11	231,14	1,10	254,25
Nov.	7,13	110,12	1,59	-2,11	172,97	1,10	190,27
Déc.	7,07	91,11	1,25	-1,88	112,00	1,10	123,20
Somme					3129,77		3442,75

3.3. Formule de Penman

Le modèle, comme il a été noté auparavant, prend en considération le plus grand nombre de variables climatiques qui gouvernent l'évapotranspiration. Les résultats de son application sont consignés dans le tableau 6. L'évapotranspiration augmente en été avec un pic en Juin qui correspond à 188,46 mm (Tableau 6 et figure 3).

Tableau 6
Valeurs de l'ETP mensuelle selon Penman à la station de Bechar (1978-2010)

Mois	T °c	T °Kelvin	Hr %	Iga	h	H	E	Δ	u	E	ETP mm/jour	ETP mm/mois
Jan	9,85	283	48,54	488,27	8,2	10,2	5,88	0,81	1,33	12,13	0,81	25,24
Fév.	13,07	286,22	39,9	606,34	7,8	10,9	5,98	0,98	1,55	15,00	1,36	38,19
Mar	17,13	290,28	30,96	751,53	9,5	11,8	6,02	1,23	1,96	19,47	3,20	99,35
Avr.	21,21	294,36	26,9	873,56	10	12,8	6,74	1,54	2,36	25,09	4,44	133,44
Mai	24,78	297,93	24,03	949,18	10,8	13,6	7,47	1,85	2,49	31,12	5,45	169,09
Juin	31,45	304,6	19,97	973,78	11,4	14	9,14	2,61	2,27	45,83	6,28	188,46
Juil.	34,14	307,29	16,25	955,41	11,2	11,2	8,65	2,99	2,06	53,29	5,98	185,39
Août	34,5	307,65	17,9	886,45	10,3	10,3	9,72	3,04	1,99	54,37	5,23	162,24
Sep	29,22	302,37	26,71	777,32	9,2	9,2	10,76	2,34	1,85	40,35	3,77	113,24
Oct.	22,49	295,64	37,5	641,29	9,3	9,3	10,16	1,64	1,53	27,12	2,67	82,97
Nov.	15,9	289,05	47,3	509,09	8,6	8,6	8,50	1,14	1,40	18,01	1,29	38,94
Déc.	10,34	283,49	53,8	449	8,2	8,2	6,73	0,83	1,26	12,53	0,59	18,34
Somme											1254,93	

3.4. Formule de Penman FAO

Le modèle, comme il a été noté auparavant, prend en considération le plus grand nombre de variables climatiques qui gouvernent l'évapotranspiration, elle augmente en été avec un pic en Juin qui correspond à 205,51 mm (Tableau 7 et figure 3).

Tableau.7
Valeurs de l'ETP mensuelle selon PENMAN FAO à la station de Bechar (1978-2010)

Mois	T °C	T °Kelvin	Hr %	Iga	h	H	E	Δ	u	E	ETP mm/jour	ETP mm
Jan	9,85	283	48,54	488,27	8,2	10,2	5,88	0,81	1,33	12,13	0,85	26,57
Fév.	13,07	286,22	39,9	606,34	7,8	10,9	5,98	0,97	1,54	15,00	1,54	43,32
Mar	17,13	290,28	30,96	751,53	9,5	11,8	6,02	1,22	1,95	19,47	3,47	107,61
Avr.	21,21	294,36	26,9	873,56	10	12,8	6,74	1,53	2,35	25,09	4,93	147,92
Mai	24,78	297,93	24,03	949,18	10,8	13,6	7,47	1,85	2,49	31,12	6,03	187,21
Juin	31,45	304,6	19,97	973,78	11,4	14	9,14	2,61	2,27	45,83	6,85	205,51
Juil.	34,14	307,29	16,25	955,41	11,2	11,2	8,65	2,99	2,06	53,29	6,54	202,94
Août	34,5	307,65	17,9	886,45	10,3	10,3	9,72	3,04	1,99	54,37	5,83	180,87
Sep	29,22	302,37	26,71	777,32	9,2	9,2	10,76	2,33	1,84	40,35	4,23	126,92
Oct.	22,49	295,64	37,5	641,29	9,3	9,3	10,16	1,64	1,53	27,12	2,81	87,24
Nov.	15,9	289,05	47,3	509,09	8,6	8,6	8,50	1,14	1,40	18,00	1,36	40,87
Déc.	10,34	283,49	53,8	449	8,2	8,2	6,73	0,83	1,25	12,53	0,60	18,64
Somme											1375,67	

3.5. Formule d'ANRH

Elle présente des variations mensuelles interannuelles plus ou moins importantes pour les douze mois de l'année avec un maximum de 356,86 mm en Juillet et un minimum de 54,21 mm en Décembre. Le

cumul annuel est de 2318,97 mm (Tableau 8 et figure 3).

Tableau.8
Valeurs de l'ETP mensuelle selon ANRH à la station de Bechar (1978-2010)

Mois	Ai	Bi	H	Km	ETPmm
Jan	-0,0218	315	312,47	0,96	59,05
Fév.	-0,11	307	294,24	1,22	80,99
Mar	-0,0012	371	370,86	1,11	159,48
Avr.	0,0098	389	390,13	1,17	224,51
Mai	0,0201	429	431,33	1,02	271,01
Juin	0,0248	429	431,87	1	331,62
Juil.	0,023	436	438,66	0,97	356,86
Août	0,0144	414	415,67	0,97	327,44
Sep	0,0031	370	370,36	0,98	227,31
Oct.	-0,0081	351	350,06	0,9	146,14
Nov.	-0,0185	311	308,85	0,9	80,30
Déc.	-0,0246	308	305,14	0,9	54,21
			Somme		2318,97

3.6. Analyse et comparaison des résultats à l'ETP moyenne

Après avoir calculé les évapotranspirations par les différentes méthodes (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman FAO et ANRH), à la station de Béchar (séries 1978-2010), nous avons calculées les écarts relatifs (ER), par rapport aux valeurs moyennes, et réaliser les différentes corrélations, et consigner les résultats dans des tableaux et sur des graphes, pour dégager les éventuelles convergences et/ou divergences sur les modèles testés, on remarque que :

- Les valeurs de l'ETP des VMMI varient entre 11,20 mm (Thornthwaite) et 473,21 mm (Blaney-Criddle), pour tous les modèles, alors que pour les SVMMI, elles varient entre 1050,02 mm (Thornthwaite) et 3442,75 mm (Blaney-Criddle).
- La figure 3 montre la variation mensuelle de l'ETP des VMMI, qui présente la même allure, avec de faibles valeurs en Octobre, Novembre, Décembre, Janvier, Février et Mars, et des valeurs élevées en Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre. On note aussi que la courbe la plus élevée est celle du model de Penman et la plus basse est celle du model de Blaney-Criddle.
- Sur la Figure 4, qui présente l'évapotranspiration des SVMMI (mm/an) obtenues par les différentes méthodes, ou les méthodes de Penman, Penman-FAO et Thornthwaite présente des valeurs nettement inférieures à la moyenne, alors que celle de celle de Blaney-Criddle

et L'ANRH sont supérieur à la moyenne (1909,16mm). Celle obtenu par le model de Turc est la plus proche de la moyenne avec 2012,61mm.

- Les différentes corrélations de la figure 5, réalisées entre les douze valeurs (ETP) moyennes mensuelles interannuelles (VMMI) de chaque modèle avec la (Moy mes) moyenne mensuelle de tous les modèles, permettent de constater que toutes les valeurs du coefficient de détermination dépassent 0,96, sauf pour la méthode de Thornthwaite (0,8804). La formule de l'ANRH montre une excellente corrélation, avec $R^2 = 0.9964$.

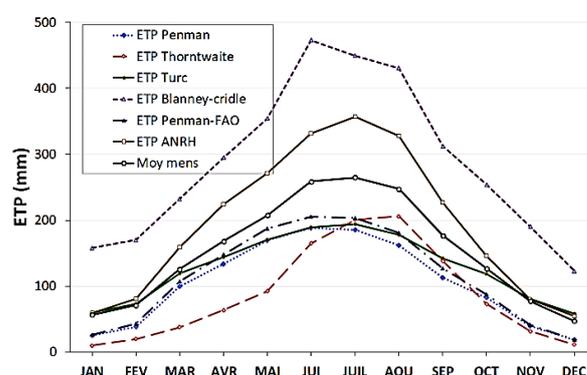


Figure 3. Variation de l'ETP mensuelle interannuelle (VMMI) estimée par les différentes méthodes a la station de Béchar (séries 1978-2010)

La méthode de l'écart relatif (ER en %) consiste à calculer le pourcentage d'écart entre l'ETP_i estimée par les différents modèles et leur moyenne ETP_{moy}, par la formule suivante [2] :

$$ER(\text{Ecart relatif}) = \frac{(ETP_{\text{moy}} - ETP_i)}{ETP_{\text{moy}}} \times 100 \% \quad (11)$$

Les résultats obtenus par l'application des différentes approches d'estimation de l'ETP, à l'échelle mensuelle (VMMI) ont été comparés à l'ETP (Moyenne), en se basant sur les valeurs de l'écart relatif « ER » (Figure 6 et Tableau 9). Il est à noter que plus les valeurs de « ER » sont faibles, plus la méthode d'estimation de l'ETP donne une estimation satisfaisante [2].

La figure 6 (Tableau 9) représente les ER des différentes méthodes d'estimation de l'ETP des SVMMI, ou les valeurs de la formule de Blaney-Criddle sont les plus loin avec -88,33 % et celle de Turc sont

les plus proche de la moyenne avec -5,42 %. Pour les VMMI, à l'échelle mensuelle, la formule de Turc donne des ER faibles pour les six mois de Février (-3,81 %), Mars (5,15 %), Septembre (19,69 %), Octobre (6,93 %), Novembre (-4,74 %) et Décembre (-23,73 %). Alors que la formule de Penman-FAO présente des ER les plus faibles pour les quatre mois d'Avril (11,98 %), Mai (9,76 %), Juin (20,60 %) et Juillet (23,42 %). Ceux qui reste sont le mois de janvier avec -4,50 % du model de l'ANRH et le mois de Août avec ER=16,72 % du model de Thornthwaite.

Enfin, on peut dire que bien que la méthode de l'ANRH présente un coefficient de détermination excellent (0,9964), à l'échelle mensuelle, ses valeurs d'ER restent relativement élevées par rapport aux autres, ce qui ne lui permet pas d'être sélectionnée pour la détermination de l'ETP dans cette région. Par contre la formule de Turc avec six mois sur douze de valeurs d'ER faibles, reste la plus favorisé à cette fonction, à l'échelle mensuelle (VMMI). A l'échelle annuelle (SVMMI) le modèle de Turc paraît être le plus représentatif avec un ER de -5,42 %.

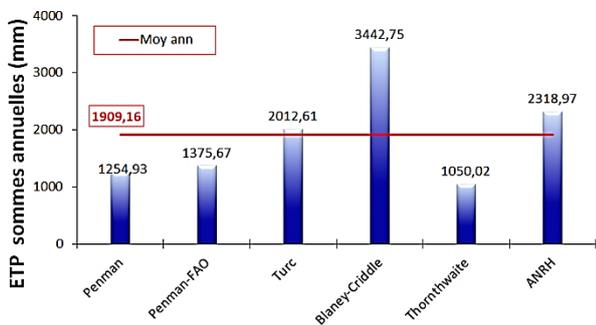


Figure 4. Évapotranspiration annuelle (SVMMI) (mm/an) obtenues par les différentes méthodes a la station de Béchar (séries 1978-2010).

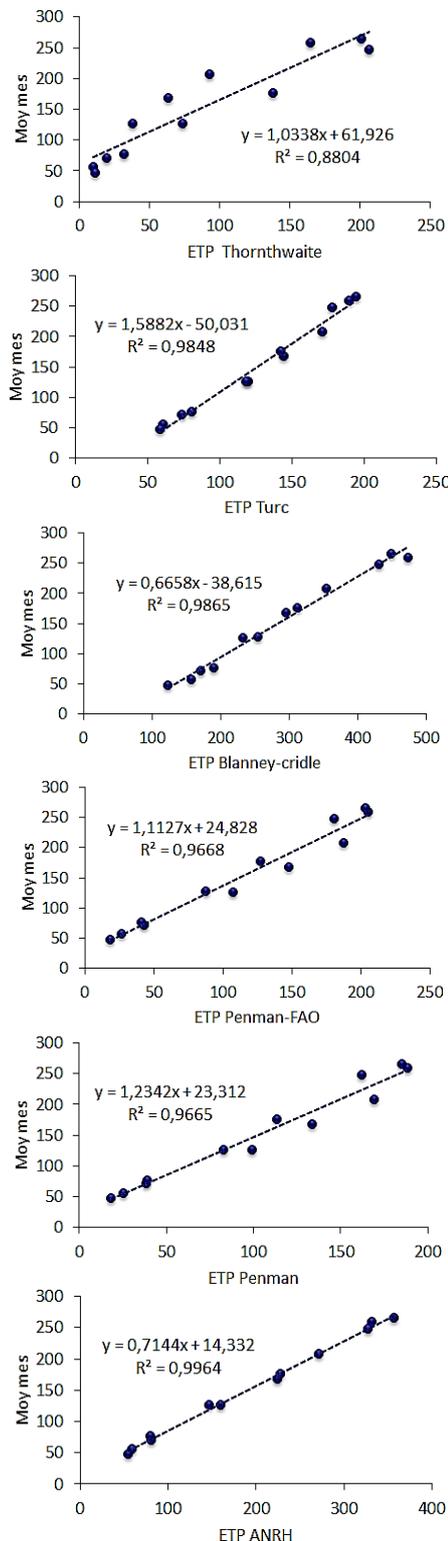


Figure 5. Graphes des corrélations de l'ETP mensuelle des différentes méthodes par rapport à celle de référence (la moyenne). Station de Bechar (1978-2010).

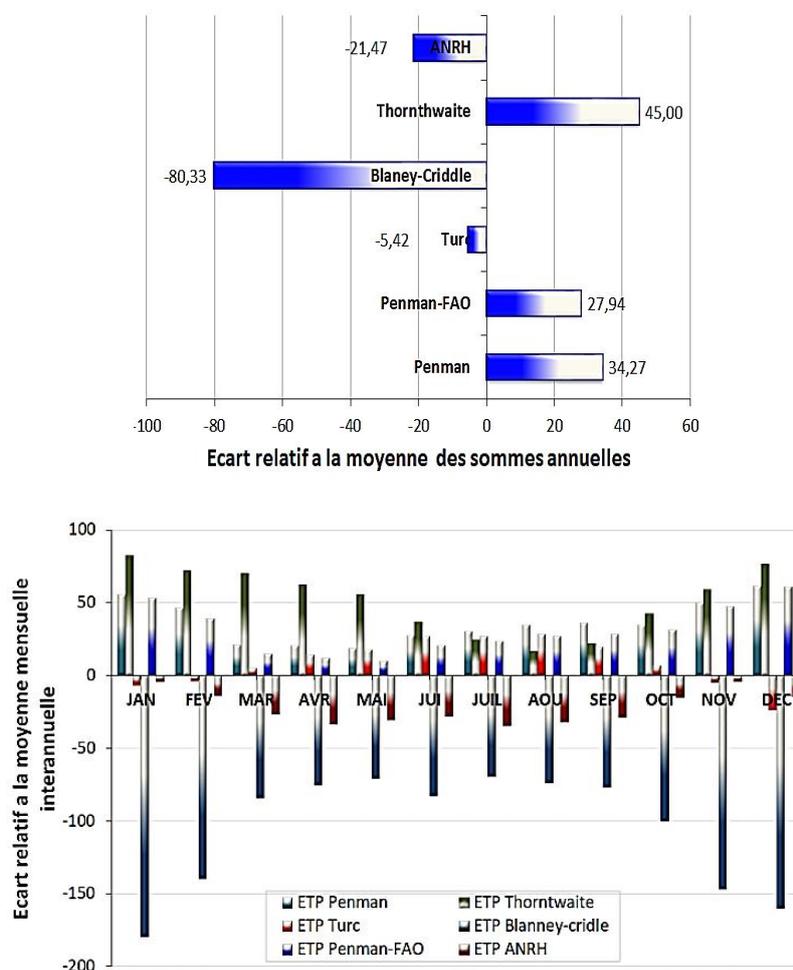


Figure 6. Écart relatif (ER en %) des différentes méthodes d'estimation de l'ETP (VMMI), et des SVMMI, par rapport à celle de référence (Moyenne), station de Béchar (1978-2010).

Tableau 9

Coefficient de détermination (R^2) et l'écart relatif à la moyenne (ER) (Échelle annuelle) (SVMMI) des différentes méthodes, station de Béchar (1978-2010).

Formule	ETP (SVMMI) (mm)	R^2 (VMMI)	ER / (SVMMI) %
ETP Thornthwaite	1050,02	0,8804	45,00
ETP Turc	2012,61	0,9848	-5,42
ETP Blaney-Criddle	3442,75	0,9865	-80,33
ETP Penman-FAO	1375,67	0,9668	27,94
ETP Penman	1254,93	0,9665	34,27
ETP ANRH	2318,97	0,9964	-21,47

4. Conclusion

L'application de plusieurs formules de calcul de l'ETP (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Penman-FAO et ANRH), sur les données climatiques de la station de Bechar, qui subit un climat aride, pour la série de 1978 à 2010 (32 ans), et on les comparant, par un calcul de l'écart relatif à leurs moyenne, prise comme référence, donne une vision plus mathématique, du rapprochement des formules à celle de référence. Cette démarche permet d'observer que la formule la plus appropriée à l'estimation de l'ETP dans la région de Bechar est celle de Turc, pour l'échelle annuelle (SVMMI), avec un écart relatif (ER) de -5,42. Pour l'échelle mensuelle, le choix se porte sur celle de Turc,

avec six mois sur l'année (Septembre, Octobre, Novembre, Décembre, février et Mars), qui présentent des écarts relatifs faibles (entre 2 et 7 %).

Sachant que les résultats obtenus sur une seule station ont un impact géographique limité, et dans le souci d'élargir l'application à un espace plus vaste, notre perspective de ce travail est d'appliquer cette approche sur d'autres stations situées dans le même type de climats.

The authors declare no conflict of interest.

Références

- [1] Ndiaye P. M., Bodian A., Diop L. and Djaman K. (2017) Évaluation de vingt méthodes d'estimation de l'évapotranspiration journalière de référence au Burkina Faso. *Physio-Géo*, 11: 129-146. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.5369>
- [2] Bouteldjaoui F., Bessenasse M. and Guendouz A. (2012) Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa). *Nature & Technology Journal*, 4 (2): 109-116. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/41680> [consulté le 12/02/2023]
- [3] Damagnez J., Riou C., and De Villele O. (1963) Problème d'évapotranspiration potentielle en Tunisie. *Annales agronomiques (Paris. 1931)*, 14 (4) : 543-558.
- [4] Paré S., "Contribution à la détermination d'un terme du bilan hydrologique dans la région d'Errachidia-Tafilalel: Evaluation de l'évapotranspiration de référence et de l'évaporation à travers la zone non saturée de la plaine de Tafilalel". PhD thesis [French], Faculté des Sciences, Université Mohammed V - Agdal, Rabat, Maroc, 2009. <http://www.secheresse.info/spip.php?article8105> [consulté le 10/02/2023]
- [5] Ladlani I., "Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle" ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba", magister thesis [French], Université de Batna 2, 2007. <http://eprints.univ-batna2.dz/806/>
- [6] Lecarpentier C. (1975) L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques (suite). *Annales de géographie*, 464 pp. 385-414. https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1975_num_84_464_18972 [consulté le 18/02/2023]
- [7] Boudjerada I., "Estimation et cartographie de l'évapotranspiration potentielle," *Master en Hydraulique Master en Hydraulique* (ENSH) Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, Algérie, 2015.
- [8] Belkhir F. E. (2021) Evaluation de la performance de dix-huit modèles d'estimation de l'évapotranspiration de référence dans les conditions subhumides de la Mitidja. *Recherche Agronomique*, 19 (1): 5-32. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/148748> [consulté le 12/03/2023]
- [9] Tetbirt Z. and Chemani A., "Les méthodes de l'estimation de l'évapotranspiration dans la région du Haut et Moyen Cheliff" Master Master [French], Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, Algérie, 2017. <http://www.secheresse.info/spip.php?article79827> [consulté le 05/12/2022]
- [10] Saad Allah S., "Estimation de l'évapotranspiration potentielle par différents méthodes. Application à un site à climat saharien (Touggourt-w-Ouargla)". Master Thesis [French], Université Kasdi Merbah- Ouargla, Algérie, 2017. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/18201> [consulté le 12/02/2023]
- [11] Samutrak P. and Kangvaravoot C. (2017) Application to Calculate Potential Evapotranspiration. *International Journal of Applied Computer Technology and Information Systems*, 7 (1): 35-40. <http://203.158.98.12/actisjournal/index.php/IJACTIS/article/view/202/114> [consulté le 19/10/2023]
- [12] Carvalho L. G. d., Rios G. F. A., Miranda W. L. and Neto P. C. (2011) Reference Evapotranspiration: Current Analysis Of Different Estimating Methods. *Pesquisa Agropecuária Tropical [Agricultural Research in the Tropics]*, 41 (3): 456-465. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i3.12760>
- [13] Benaradj A., Boucherit H., Bouderbala A. and Hasnaoui O. "Biophysical Effects of Evapotranspiration on Steppe Areas: A Case Study in Naâma Region (Algeria)". In *Climate Change in Asia and Africa*, P. T. John, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2021, p. Ch. 1. DOI: 10.5772/intechopen.97614
- [14] Laaboudi A., Mouhouche B. and Slama A. (2015) Modeling of daily reference evapotranspiration using climatic factors for arid regions of Algeria. *Sky Journal of Agricultural Research*, 4 (6): 114-122.
- [15] Ababou A., Chouieb M., Saidi D., Bouthiba A. and Mederbal K. (2016). Remote Sensing of Evapotranspiration in a Southern Mediterranean Forest. Application to Bissa Forest, Algeria. *The International Journal of Biotechnology*, 5 (3): 35-44. DOI: 10.18488/journal.57/2016.5.3/57.3.35.44
- [16] Kabour A., Hani A., Mekkaoui A. and Chebbah L. (2011) Evaluation et gestion des ressources hydriques dans une zone aride. Cas de la ville de Béchar. *LARHYSS Journa*, 8 (2): 07-19 <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/54856> [consulté le 06/02/2023]
- [17] Ben Mansour S. and Korichi R., "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" Master thesis [French], Université Kasdi Merbeh, Ouargla, Algérie, 2013.

-
- <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/2132> [consulté le 30/01/2023]
- [18] Réméniéras G., *L'hydrologie de l'ingénieur*. Paris [French] : Eyrolles, 1980, 450p
- [19] Blaney H. F., "Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data" (1952).
<https://ia800300.us.archive.org/4/items/determiningwater96blan/determiningwater96blan.pdf> [consulté le 27/01/2023]
- [20] Riou C., "La détermination pratique de l'évaporation. Application a l'Afrique Centrale," (1975).
<https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:07889> [consulté le 04/03/2023]
- [21] Doorenbos J. and Pruitt W., "Crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24," Rome., Italy, (1977).
<https://www.fao.org/3/S2022E/s2022e02.htm#TopOfPage> [consulté le 23/02/2023]
- [22] FAO, "*Rapport sur le projet relatif aux zones agro-écologiques: Méthodologie et résultats pour l'Afrique. Ressources en sols du Monde*". Roma: Food and Agriculture Organization, Rome., 1979. 9252005897,
- [23] Jensen M. E., Burman R. D. and Allen R. G., *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. New York: ASCE, American Society of Civil Engineers 1990.
<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784414057.fm> [consulté le 12/02/2023]
- [24] ANRH (2002), "*Notice explicative de la carte des évapotranspirations potentielles du Nord de l'Algérie*" [French]. Edit. Agence Nationale des Ressources Hydriques Algerie, 42p.