

Evaluation de la performance de dix-huit modèles d'estimation de l'évapotranspiration de référence dans les conditions subhumides de la Mitidja

F.E. Belkhiri

INRAA - Division de Recherche Bioclimatologie et Hydraulique Agricole, station expérimentale de Mehdi-Boualem, Alger, Algérie.

Auteur de correspondance : fed_belkhiri@yahoo.fr

Reçu : 28 décembre 2019

Révisé : 20 août 2020

Accepté : 08 décembre 2020

Résumé : L'estimation précise de l'évapotranspiration de référence (ET_o) est importante dans les études de gestion des ressources en eau en particulier dans les régions méditerranéennes, touchées par les aléas du réchauffement climatique. Le choix du meilleur modèle ET_o simple et fiable susceptible d'être utilisé dans les conditions subhumides de la Mitidja en remplacement du modèle standard FAO 56 Penman-Monteith (ET_o PMF-56) est le but recherché par la présente étude. Une série de variables météorologiques enregistrées au Centre INRAA de Baraki (Alger), entre 2014 et 2019, a servi à l'estimation de l'évapotranspiration journalière. Dix-huit modèles alternatifs de ET_o ont été évalués et comparés au modèle standard ET_o PMF-56, appartenant à 3 méthodes basées sur: a) le transfert de masse, b) la radiation solaire et c) la température de l'air. La régression linéaire simple ainsi que des indicateurs statistiques de calcul d'erreur (RMSE, MBE, MAE, RE et indice de Willmott d) ont été utilisés pour l'évaluation de la performance de ces 18 modèles d'estimation de ET_o. Les résultats ont montré que les 4 modèles "transfert de masse" réalisent les plus faibles performances avec une sous-estimation de l'évapotranspiration dans les conditions de la Mitidja. Les 8 modèles «radiation» sont nettement meilleurs que les précédents mais légèrement moins performants que les 6 modèles «température». Finalement, en affichant les plus faibles erreurs d'estimation de l'évapotranspiration parmi les 18 modèles évalués, le modèle «température» Trakjovic (2007) a été choisi pour son utilisation en Mitidja en remplacement du standard ET_o PMF-56.

Mots clés : évapotranspiration de référence, modèle standard FAO 56 Penman-Monteith, méthodes alternatives d'évapotranspiration, critères d'évaluation.

Summary : Accurate estimation of reference evapotranspiration (ET_o) is important in studies of management of water resources particularly in the Mediterranean regions affected by the hazards of global warming. The aim of this study is the search for the simple and reliable ET_o model that can be used in the subhumid conditions of Mitidja region instead of Penman-Monteith FAO 56 standard model (PMF-56 ET_o). A meteorological dataset recorded at the INRAA Centre of Baraki (Algiers) between 2014 and 2019 were used for estimating daily evapotranspiration. Eighteen alternative models of ET_o were evaluated and compared to the PMF-56 ET_o model, classified into three methods based on: a) mass transfer, b) solar radiation and c) air temperature. Simple linear regression as well as statistical criteria (RMSE, MBE, MAE, RE, Willmott d index) were used to evaluate the performance of the eighteen models for estimating ET_o. Results showed that the four «mass transfer» models perform the weakest performance by underestimating evapotranspiration in Mitidja conditions. The eight «radiation» models are clearly more best than the previous ones but slightly less efficient than the six «temperature» models. Finally, by showing the lowest errors for estimating evapotranspiration among the 18 evaluated models, the Trakjovic (2007) temperature-based model was chosen for its use in Mitidja region instead of the standard PMF-56 model.

Key words : reference evapotranspiration, FAO 56 Penman-Monteith standard model, alternative evapotranspiration methods, evaluation criteria.

INTRODUCTION

Le réchauffement climatique à l'échelle mondiale et son impact sur la gestion des ressources en eau dans les régions méditerranéennes impose la nécessité de l'estimation précise de l'évapotranspiration (ET) qui est une composante majeure du bilan hydrique intégrée dans les études hydrologiques, agronomiques et environnementales. Le processus de ET est la perte simultanée d'eau vers l'atmosphère sous forme de vapeur à partir de l'évaporation du sol et la transpiration des plantes. Le concept d'évapotranspiration de référence (ET_o) a été développé pour la compréhension de la demande évaporative de l'atmosphère indépendamment des caractéristiques

de la végétation et des facteurs du sol (Lopez-Urrea *et al.*, 2006). Dans ce cas, les seuls facteurs affectant ET_o sont les variables météorologiques. Par conséquent, elle devient une variable climatique qui peut être calculée à partir de données météorologiques (Sentelhas *et al.*, 2010).

Lors de la consultation d'experts et de chercheurs organisée par la FAO en 1990 pour l'examen des méthodologies de détermination des besoins en eau des cultures, l'utilisation de la méthode Penman-Monteith comme la méthode standard pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence a été adoptée puis bien développée dans le bulletin N° 56 de la FAO (ET_o PMF-56) (Allen *et al.* 1994a, 1994b,

1998). Elle est définie comme étant: «l'évapotranspiration potentielle d'une hypothétique culture de référence avec une hauteur supposée de 0,12 m, ayant une résistance superficielle de 70 s/m et un albédo de 0,23, ressemblant beaucoup à l'évaporation d'une surface engazonnée ou cultivée en luzerne avec une hauteur uniforme, en pleine croissance et adéquatement arrosée» (Allen *et al.*, 1998). Pour les résultats plus précis qu'il procure, de nombreux chercheurs ont approuvé, depuis, l'emploi du modèle ETo PMF-56 pour estimer l'évapotranspiration sous différents climats du monde (Garcia *et al.*, 2004; Tegos *et al.* 2009; Oudin *et al.* 2010, Sabziparvar *et al.*, 2010, Tabari et Talae, 2011). Ce modèle serait capable de fournir des valeurs cohérentes dans de nombreuses régions et climats en remplacement des mesures lysimétriques trop coûteuses et complexes à mettre en œuvre (Allen *et al.*, 2005, 2006). Néanmoins, comme estimateur standard, il présente l'inconvénient avec ses besoins en variables météorologiques pas toujours disponibles sur de nombreux sites. Cela est particulièrement vrai dans les pays en développement où les ensembles de données disponibles et fiables sur le rayonnement solaire, l'humidité de l'air et la vitesse du vent sont limités (Gocic et Trajkovic, 2010; Tabari et Talae, 2011). Afin de pallier cet inconvénient,

un grand nombre de méthodes plus ou moins empiriques ont été développées déjà au cours de ces 50 dernières années qui sont surtout élaborées à partir de modèles mathématiques. Actuellement, il existe une diversité de ces modèles d'estimation allant de la mesure directe à partir d'une culture de référence comme une surface engazonnée sur lysimètres ou une culture de luzerne (Doorenbos et Pruitt, 1977; Watson et Burnett, 1995) ou à partir de données météorologiques utilisant: a) l'évaporation du bac (Doorenbos et Pruitt, 1977 ; Allen *et al.*, 1998 ; Valipour, 2015), b) la température de l'air (Thorntwaite, 1948; Doorenbos et Pruitt, 1977), c) le rayonnement solaire (Doorenbos et Pruitt, 1977; Hargreaves et Samani, 1985), d) le transfert de masse (Allen *et al.*, 1998). L'évaluation de la performance de ces différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration est une tâche nécessaire car, pour être utilisées, ces équations alternatives nécessitent une validation locale et si nécessaire, une calibration. La validation peut être effectuée par rapport aux mesures lysimétriques ou par comparaison au modèle standard ETo PMF56 (Tabari *et al.*, 2011).

Comme les plus importants paramètres d'estimation de l'évapotranspiration sont la température et le rayonnement solaire (Samani, 2000), pouvant expliquer au moins 80% de la valeur de ETo (Jensen,

1985), de nombreuses études dans différentes conditions climatiques ont proposé que l'étalonnage régional de modèles basés sur ces deux paramètres peut améliorer leurs performances (Allen, 1995; Bogawski et Bednorz, 2014; Pandey *et al.*, 2016; Samani, 2004; Trajkovic, 2005; Xu et Singh, 2002). Beaucoup de ces études ont été réalisées dans des conditions humides donnant lieu à des modèles largement utilisés à travers le monde: États-Unis (Irmak *et al.*, 2003b), Bulgarie (Popova *et al.*, 2006), Italie (Berti *et al.*, 2016), Pologne (Bogawski et Bednorz, 2014), Inde (Pandey *et al.*, 2016), Chine (Xu *et al.*, 2012), Iran (Tabari *et al.*, 2011), Serbie (Trajkovic et Kolakovic, 2009; Trajkovic, 2005, 2007).

D'autres modèles d'estimation ont été évalués dans des conditions climatiques moins favorables comme au Sahel : Sénégal et Mali (Djaman *et al.*, 2015, 2016), Burkina Faso (Djaman *et al.*, 2016; Ndiaye *et al.*, 2017), mais aussi dans les régions semi-aride d'Espagne (Lopez-Urrea *et al.*, 2006), en Grèce (Xystrakis et Matzarakis, 2011; Bourletsikas *et al.*, 2017), en Iran (Sabziparvar et Tabari, 2010)... Les études du même genre menées en Algérie sont relativement rares à consulter dans la littérature. Généralement, les équations de Thornthwaite (1948) et de Turc (1961) sont les plus utilisées dans les travaux

universitaires et de mémoires de fin d'étude en raison de leur simplicité et de la contrainte de disponibilité des séries de données climatiques. La tendance actuelle dans ce domaine au niveau des laboratoires universitaires est plutôt axée vers la recherche de modèles basés sur le bilan énergétique qui sont utilisés en télédétection pour la spatialisation de l'évapotranspiration.

Dans la présente étude, dix-huit modèles d'estimation de l'évapotranspiration de référence, couramment utilisés et appartenant à différentes méthodes, sont évalués et comparés au modèle standard ETo PMF-56 sur des échelles journalière, mensuelle et saisonnière. L'objectif étant la recherche du meilleur modèle alternatif simple et performant dans les conditions de la Mitidja en remplacement du standard ETo PMF-56. Ses domaines d'application sont divers comme la planification et la gestion de l'irrigation, le bilan hydrique régional, le zonage agro-écologique et les études sur le changement climatique.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Site d'étude

L'expérimentation a été menée au Centre de Recherche INRAA de Mehdi Boualem, Baraki, Alger (latitude : 36,6835° Nord, longitude : 3,1080° Est, altitude : 18 m asl). Avec son extension

sur une superficie de 18 hectares, le Centre est situé dans la plaine de la Mitidja-Centre, dans une région classée « subhumide sèche » avec un ratio P/ET_o de 0,60 en référence à l'Indice d'Aridité du PNUE (UNEP, 1997).

La région bénéficie d'un climat de type méditerranéen avec des hivers doux et pluvieux et des étés chauds et secs. Le diagramme ombro-thermique de Bagnouls-Gausson situe la saison sèche entre mai et septembre, période durant laquelle les cultures nécessitent un apport d'eau par l'irrigation.

La normale des précipitations mesurées in situ sur une période de 25 ans (entre 1990 et 2014) est de 628 mm par an dont 76 % sont enregistrés entre novembre et avril. Pour une température moyenne annuelle de 18,4°C, les extrêmes oscillent autour de 6,6°C pour le mois le plus froid de janvier et 31,8°C pendant les fortes chaleurs du mois d'août. Avec un cumul annuel de 1042 mm, l'évapotranspiration suit une évolution croissante depuis janvier (1 mm/j) jusqu'à atteindre son maximum en août (5 mm/j). Le déficit hydrique «P-ET» est en moyenne de 414 mm par an avec des niveaux élevés en été (entre juin et septembre).

La plaine de la Mitidja bénéficie d'importantes potentialités hydriques et édaphiques qui lui confèrent des aptitudes de production dans les filières à forte valeur ajoutée notamment

l'arboriculture fruitière et le maraîchage en toutes saisons.

2.2. Données climatiques

Les variables météorologiques ont été enregistrées in situ au moyen d'une station météo automatique iMETOS®, du modèle IMT280 <http://metos.at/fr/imetos33/>. Les températures minimale et maximale de l'air (T_{\min} et T_{\max}), l'humidité relative de l'air (HR), la vitesse du vent à 2 m de hauteur (u_2) et le rayonnement solaire global (R_s) sont les paramètres enregistrés au quotidien entre 2014 et 2019. Au total, 2007 journées forment la série de données qui a fait l'objet de l'étude.

Suivant les recommandations détaillées dans le bulletin N° 56 de la FAO (Allen *et al.*, 1998), la qualité de l'ensemble des données a été préalablement contrôlée et vérifiée. Le contrôle du rayonnement global R_s (paramètre mesuré) a été réalisé par comparaison entre les données de ce paramètre et celles du rayonnement de ciel clair R_{so} (paramètre calculé) afin de confirmer sa fiabilité selon des valeurs toujours inférieures ou à la limite égales aux valeurs de R_{so} (Allen *et al.*, 1998) (Fig. 1).

Le Tableau I présente les caractéristiques climatiques de la région pendant les 6 années considérées à travers les moyennes mensuelles des variables météorologiques.

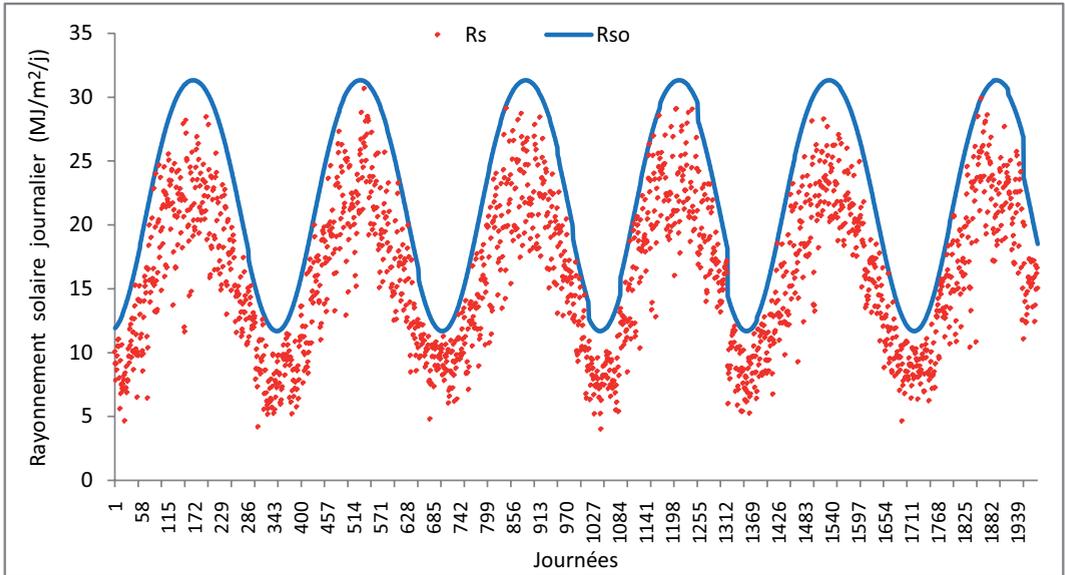


Figure 1 : Comparaison entre le rayonnement solaire global R_s et le rayonnement de ciel clair R_{so} . Variables climatiques journalières enregistrées entre 2014 et 2019 au Centre INRAA Mehdi Boualem, Baraki (Alger).

Tableau I : Moyennes mensuelles des variables climatiques journalières enregistrées entre 2014 et 2019 au niveau du Centre INRAA Mehdi Boualem, Baraki (Alger).

Mois	T_{min} (°C)	T_{mean} (°C)	T_{max} (°C)	ΔT (°C)	HR (%)	u (m/s)	R_s (MJ/m ² /j)	Précipitation (P) (mm/mois)	ETo PMF-56 (mm/mois)	P – ETo (mm/mois)
Janvier	6,6	12,0	17,4	10,9	81,0	0,6	8,5	105	26	79
Février	6,9	12,3	17,7	10,9	78,3	1,0	11,2	66	39	27
Mars	8,0	13,9	19,8	11,8	77,8	1,0	15,1	60	64	-4
Avril	10,7	16,6	22,6	11,9	76,4	1,0	18,9	40	88	-48
Mai	12,7	19,0	25,3	12,5	74,3	0,9	21,9	26	113	-87
Juin	17,1	23,1	29,0	11,9	72,9	1,0	23,4	19	129	-110
Juillet	20,4	26,6	32,7	12,3	70,2	1,0	22,7	5	141	-136
Août	21,0	26,8	32,6	11,6	71,8	1,1	20,2	23	126	-103
Septembre	18,9	24,7	30,5	11,6	73,1	0,8	16,6	21	91	-70
Octobre	14,9	21,0	27,1	12,2	76,8	0,7	13,4	47	63	-16
Novembre	10,6	16,2	21,8	11,2	77,0	0,6	9,2	78	34	44
Décembre	7,5	13,1	18,7	11,1	82,4	0,5	7,9	100	23	77

T_{min} , T_{mean} , T_{max} : températures minimale, moyenne et maximale de l'air (°C); ΔT : amplitude thermique $T_{max} - T_{min}$ (°C); HR : humidité relative de l'air (%); u : vitesse du vent (m/s); R_s : rayonnement global (MJ/m²/j).

Pour les mois le plus froid et le plus chaud de l'année, janvier et août, les températures extrêmes (T_{\min} et T_{\max}), oscillent entre 6,6 et 21 °C et 17,4 et 32,7 °C. L'amplitude thermique ($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$) subit une baisse entre novembre et avril, correspondant à la saison des pluies. L'humidité de l'air (HR) dépasse les 70 % toute l'année et atteint son maximum en hiver pour des taux supérieurs à 80%. L'amplitude de la radiation solaire (R_s) évolue entre 8 et 23 MJ/m²/j en décembre et juin, coïncidant avec les mois des solstices d'hiver et d'été. La vitesse du vent (u) est relativement stable au cours de l'année, variant entre 0,5 et 0,8 m/s en automne et en hiver et entre 0,9 et 1,1 m/s au printemps et en été. Le déficit hydrique « $P - E_{To}$ » fluctue entre un bilan négatif en été, avec un maximum de 136 mm atteint en juillet, et positif en hiver, avec 77 et 79 mm en décembre et janvier.

2.3. Méthodologie

En y incluant la méthode de référence PMF-56, dix-neuf équations d'évapotranspiration dérivées de la littérature et développées pour diverses conditions climatiques à travers le monde ont été évalués et comparées. Toutes les formules sont citées et décrites dans cette section.

Les valeurs journalières de l'évapotranspiration de référence

PMF-56 ont été calculées au moyen du logiciel FAO AquaCrop (ver. 6.1) <http://www.fao.org/aquacrop/software/aquacropstandardwindowsprogramme/fr>. Le tableur Microsoft Excel 2007 a servi au calcul des 18 autres équations alternatives ainsi qu'au calcul statistique des erreurs d'estimation.

L'équation de l'estimateur standard de l'évapotranspiration de référence, calculé selon l'équation FAO-56 Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), se présente comme suit:

$$E_{ToPMF56} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T_{mean} + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

où E_{To} PMF-56 est l'évapotranspiration de référence FAO 56 Penman-Monteith (mm/jour), R_n est le rayonnement net (MJ/m²/j), G est le flux de chaleur dans le sol (MJ/m²/j), T_{mean} est la température moyenne de l'air (°C), u_2 est la vitesse du vent à 2 m de hauteur (m/s), e_s est la pression de vapeur saturante de l'air (kPa), e_a est la pression de vapeur actuelle (kPa), $(e_s - e_a)$ est le déficit de pression de vapeur saturante de l'air (kPa), Δ est la pente de la courbe de pression de vapeur (kPa/°C), γ est la constante psychrométrique (kPa/°C).

Selon Allen *et al.* (1998), le bilan G du sol est négligeable et proche de 0 sur la journée.

La mesure quotidienne des variables météorologiques a permis le calcul des paramètres R_n , T_{mean} , e_s , e_a , $(e_s - e_a)$, Δ , γ selon les procédures détaillées dans le bulletin FAO N° 56 (Allen *et al.*, 1998). Le calcul du rayonnement extra-terrestre R_a (MJ/m²/j) est réalisé en fonction de la latitude du site, de l'angle solaire et le jour de l'année (Allen *et al.*, 1998). Le rayonnement de ciel clair R_{so} (MJ/m²/j), qui est une composante de R_n , représente 75 % de R_a (Allen *et al.*, 1998).

Les 18 équations alternatives d'estimation de l'évapotranspiration, ayant fait l'objet de l'étude, appartiennent à trois types de méthodes basées sur : a) le transfert de masse, b) la radiation solaire et c) sur la température de l'air. Les paramètres composant ces équations ainsi que leurs unités respectives sont identiques à ceux utilisées dans l'équation Eq. (1).

2.4. Méthodes d'évapotranspiration de référence

a) Méthodes basées sur le transfert de masse

Les méthodes aérodynamiques (transfert de masse) se réfèrent à la loi de Dalton qui décrit le transfert turbulent de la vapeur d'eau évaporée d'une surface d'évaporation vers l'atmosphère (Tabari *et al.*, 2011). Ces méthodes utilisent des formes simples et peuvent

être appliquées quand seules la vitesse du vent (u) et le déficit de saturation de l'air ($e_s - e_a$) sont disponibles.

Quatre de ces méthodes sont présentées ici.

La version de base de l'équation de Dalton (1802) :

$$ET_{Dalton} = (0.3648 + 0.07223u)(e_s - e_a) \quad (2)$$

La méthode simplifiée de Penman (1948) :

$$ET_{Penman\ 1948} = 0.35 (1 + 0.24u)(e_s - e_a) \quad (3)$$

Le modèle de Schendel (1967) :

$$ET_{Schendel} = 16 \frac{T_{mean}}{RH} \quad (4)$$

Le modèle de Mahringer (1970) qui a été développé et appliqué aux conditions d'Europe centrale :

$$ET_{Mahringer} = 0.15072 \sqrt{3.6u} (e_s - e_a) \quad (5)$$

b) Méthodes basées sur la radiation

Les équations empiriques utilisant le rayonnement solaire pour estimer l'évaporation potentielle sont généralement basées sur le bilan énergétique (Jensen *et al.*, 1990). Huit modèles les plus couramment utilisés ont été retenus.

Le modèle Makkink, qui a été conçu en 1957 aux Pays-Bas après

modification du modèle Penman (1948), est actuellement utilisé avec succès aux USA et en Europe de l'ouest (Allen *et al.*, 2003) :

$$ETo_{Makkink} = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R_s}{2.45} - 0.12 \quad (6)$$

En comparaison avec les modèles basés exclusivement sur la température, la méthode Turc (1961), aussi développée au Pays-Bas, permet d'évaluer l'effet combiné du rayonnement et de l'humidité de l'air sur l'évapotranspiration :

$$ETo_{Turc} = \alpha((23.9001R_s) + 50) \left(\frac{T_{mean}}{T_{mean+15}} \right) \quad \text{pour HR} > 50\%$$

$$ETo_{Turc} = \alpha((23.9001R_s) + 50) \left(\frac{T_{mean}}{T_{mean+15}} \right) \left(1 + \frac{50 - RH}{70} \right) \quad \text{pour HR} < 50\% \quad (7)$$

avec $\alpha = 0,01333$

L'équation Priestley et Taylor (1972), la plus largement utilisée dans sa catégorie, a été développée comme simplification de la méthode Penman-Monteith selon la formule :

$$ETo_{Priestley-Taylor} = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R_n - G}{\gamma} \quad (8)$$

La méthode Caprio (1974) est exprimée ainsi :

$$ETo_{Caprio} = (0.01092708 T_{mean} + 0.0060706) R_s \quad (9)$$

L'équation originale de Hargreaves (1975) est basée sur la température moyenne journalière (T_{mean}) et la radiation solaire (R_s):

$$ETo_{Harg} = 0.0135 * 0.408 R_s * (T_{mean} + 17.8) \quad (10)$$

où le coefficient 0,408 sert à la conversion de R_s de MJ/m²/j en mm/j (Allen *et al.*, 1998).

La méthode d'Irmak *et al.* (2003b) a été développée en utilisant des régressions linéaires multiples :

$$ETo_{Irmak} = -0.611 + 0.149 R_s + 0.079 T_{mean} \quad (11)$$

Tabari *et al.* (2011) ont développé 2 équations modifiées d'Irmak en utilisant des régressions linéaires multiples où ETo PMF-56 représentait la variable dépendante et T_{max} et T_{min} ou T_{mean} et R_s étaient les variables indépendantes :

$$ETo_{Tab1} = -0.642 + 0.174 R_s + 0.0353 T_{mean} \quad (12)$$

$$ETo_{Tab2} = -0.478 + 0.156 R_s - 0.0112 T_{max} + 0.0733 T_{min} \quad (13)$$

c) Méthodes basées sur la température

Les méthodes ETo basées sur la température sont parmi les plus anciennes méthodes d'estimation de l'ET (Xu et Singh, 2002). Selon Jensen *et al.* (1990), la relation entre ET et la température de l'air remonte aux années 1920.

La plus célèbre d'entre toutes est la méthode Hargreaves et Samani (HS) (1985) qui a été recommandée par Allen *et al.* (1998) dans les situations où seule la température de l'air est disponible. Sa conception a conduit ses 2 auteurs à améliorer l'équation

originale de Hargreaves (1975), consistant à soustraire l'emploi du paramètre R_s dans les conditions de données météorologiques limitées et sa substitution par le paramètre le plus largement disponible de la température de l'air.

L'équation originale de Hargreaves (Eq. 10) basée sur la radiation se présentait ainsi:

$$ETo_{Harg} = 0.0135 * 0.408 R_s * (T_{mean} + 17.8)$$

La substitution de R_s par la température dans l'équation passe, d'abord, par sa formulation selon l'expression :

$$R_s = kR_s * TD^{0.5} * R_a \quad (14)$$

où kR_s est le coefficient de Hargreaves et Samani (1985), TD est la différence $T_{max} - T_{min}$ et R_a est le rayonnement extra-terrestre.

D'après Hargreaves et Samani (1985), le facteur TD peut être utilisé comme indicateur de nébulosité et de transmittance atmosphérique pour l'estimation du rayonnement solaire dans un endroit donné.

Le remplacement de R_s dans Eq. 10 aboutit à l'équation intermédiaire suivante:

$$ETo_{HS} = 0.0135 * kR_s * 0.408 R_a * (T_{mean} + 17.8) * TD^{0.5} \quad (15)$$

Enfin, par combinaison des équations (10), (14) et (15), la nouvelle équation

Hargreaves et Samani (1985) prend la forme suivante:

$$ETo_{HS} = 0.0023 * 0.408 R_a * (T_{mean} + 17.8) * TD^{0.5} \quad (16)$$

où le coefficient empirique 0,0023 représente le produit entre la valeur 0,0135, issue de la conversion du système américain au système international, et la valeur 0,17 du facteur kR_s .

Initialement fixé à 0,17 pour les régions arides et semi-arides, des valeurs kR_s de 0,16 et 0,19 pour les régions intérieures et côtières ont été recommandés par la suite par Hargreaves (1994).

Les équations alternatives qui suivent s'inspirent toutes de l'équation ETo_{HS} (Eq. 16) mais contrairement aux recommandations de Hargreaves et Samani (1985) et Allen *et al.* (1998), de nombreux auteurs ont suggéré d'utiliser des kR_s locaux après calibration des termes composants l'équation : coefficient 0,0023, exposant 0,5 et valeur 17,8 (Jabloun et Sahli, 2008; Ren *et al.*, 2016; Todorovic *et al.*, 2013).

Trajkovic (2007) a ajusté l'équation de Hargreaves-Samani pour la région occidentale des Balkans à climat humide comme suit:

$$ETo_{HS-Trajk} = 0.0023 * 0.408 R_a * (T_{mean} + 17.8) * TD^{0.424} \quad (17)$$

Ravazzani *et al.* (2012) ont modifié ETo_{HS} en introduisant en plus l'élévation du lieu Z (m) dans l'équation:

$$ETo_{Rav} = (0.817 + 0.00022 Z) * 0.0023 R_a * (T_{mean} + 17.8) * TD^{0.5} \quad (18)$$

Bogawski et Bednorz (2014) ont ajusté l'équation HS pour le climat humide de la Pologne:

$$ET_{HS-Boga} = 0.001 * 0.408 R_a * (T_{mean} + 17) * TD^{0.724} \quad (19)$$

Berti *et al.*, (2016) ont ajusté ET_{oHS} pour une région du nord d'Italie à climat subhumide:

$$ET_{oBerti} = 0.00193 R_a * (T_{mean} + 17.8) * TD^{0.517} \quad (20)$$

Dorji *et al.* (2016) ont développé la nouvelle équation HS pour le relief montagneux du Bhoutan par la formule:

$$ET_{oHS-Dorji} = 0.002 * 0.408 R_a * (T_{mean} + 33.9) * TD^{0.296} \quad (21)$$

2.5. Critères d'évaluation

a) Indicateurs statistiques de performance

La précision et la performance des modèles ETo à l'échelle de la journée ont été évaluées via l'ajustement entre les couples de valeurs prédites des modèles à estimer (variables dépendantes) et celles de l'estimateur standard PMF56 (variables indépendantes). A cet effet, le coefficient de détermination R^2 de la droite de régression linéaire simple a été utilisé, ainsi que les indicateurs statistiques d'évaluation de la performance suivants: RMSE, MBE, MAE, indice d de Willmott et RE respectivement Root Mean Square Error, Mean Bias Error, Mean Absolute

Error, Relative Error. Ces procédures statistiques ont été largement discutées dans la littérature (Jacovides et Kontoyiannis, 1995; Willmott, 1982 ; Willmott, 1984; Willmott *et al.*, 1985) et se sont révélées importantes pour l'évaluation des performances des équations empiriques de ETo.

Le coefficient de détermination R^2 est donné par la formule:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (22)$$

où P_i et O_i (mm/j) sont respectivement les valeurs prédites du modèle ETo alternatif à estimer et les valeurs observées de l'estimateur standard ETo PMF-56, \bar{P} et \bar{O} (mm/j) sont les moyennes des valeurs prédites et observées.

L'erreur moyenne quadratique RMSE, qui est l'un des indicateurs statistiques les plus largement utilisés, caractérise la variance des erreurs engendrées par la prédiction par la différence moyenne entre les prédictions P_i et les observations O_i (Jacovides et Kontoyiannis, 1995). Les valeurs les plus faibles de RMSE indiquent une bonne performance du modèle de prédiction. Son expression est comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (23)$$

où n est le nombre d'observation (journées).

L'erreur moyenne des biais MBE calcule la moyenne des différences entre les valeurs prédites P_i et les valeurs observées O_i (Retta *et al.*, 1996; Jamieson *et al.*, 1998). Une valeur MBE positive donne la quantité moyenne de surestimation dans les valeurs calculées et au contraire une MBE négative indique une sous-estimation. Elle s'exprime selon la formule :

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (24)$$

L'erreur moyenne absolue MAE calcule l'écart moyen en valeur absolue entre les valeurs prédites P_i et les valeurs observées O_i :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (25)$$

L'Indice d (*Index of Agreement d*) a été proposé par Willmott en 1982 pour mesurer le degré auquel les données observées sont approchées par les données prédites. Il surpasse l'insensibilité du coefficient de corrélation r et le coefficient d'efficacité du modèle de Nash-Sutcliffe EF aux surestimations ou sous-estimations systématiques par le modèle (Willmott, 1984; Legates et McCabe, 1999). Les valeurs de l'indice d les plus proches de

l'unité indiquent une bonne performance du modèle. L'équation de Willmott *et al.* (1985) présente le calcul de l'indice d comme suit:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (26)$$

L'erreur relative RE exprime la part d'erreur exprimée par la RMSE par rapport à la moyenne des valeurs \bar{O} de l'estimateur ETo PMF-56, selon la formule:

$$RE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (27)$$

Les indicateurs RMSE, MBE et MAE sont exprimées en mm/j alors que le R^2 , l'indice d et la RE sont adimensionnels. On considère que les données estimées sont en parfait ajustement avec les données de référence lorsque RMSE et RE sont tous deux égaux à 0.

b) Différences d'évapotranspiration mensuelles et saisonnières

La 2^{ème} méthode d'évaluation des modèles ETo alternatifs vise la comparaison des valeurs RMSE mensuelles et saisonnières calculées à partir des données journalières de l'erreur. Le but recherché étant l'évaluation de la performance des modèles pour des périodes plus longues en respectant un seuil d'erreur fixé par la RMSE.

Les périodes saisonnières et mensuelles considérées sont: hiver (Décembre, Janvier et Février ou DJF), printemps (Mars, Avril et Mai ou MAM), été (Juin, Juillet et Août ou JJA) et automne (Septembre, Octobre et Novembre ou SON).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

a) Indicateurs statistiques de performance

Le Tableau II et les Figures 2 et 2 (*suite*) présentent les résultats de la

Tableau II : Résultats de l'évaluation de la performance des dix-huit modèles d'évapotranspiration comparée au modèle standard FAO 56 Penman-Monteith. Variables climatiques journalières enregistrées entre 2014 et 2019 au Centre INRAA Mehdi Boualem, Baraki (Alger).

Modèle d'évapotranspiration	R ²	RMSE	MBE		MAE		<i>d</i>	RE		Moyenne des RANGS	
	-	mm/j	R A N G	R mm/ j G	R A N G	R mm/ j G	-	-	R A N G		
Dalton	0,524	1,27	15	-0,60	13	0,99	15	0,82	0,448	15	14,5
Penman 1948	0,526	1,28	16	-0,62	14	1,00	16	0,82	0,450	16	15,5
Schendel	0,602	1,68	17	1,28	17	1,34	17	0,75	0,593	17	17,0
Mahringer	0,534	1,80	18	-1,47	18	1,52	18	0,67	0,634	18	18,0
Makkink	0,928	0,52	6	-0,25	8	0,41	6	0,96	0,184	6	6,5
Turc	0,940	0,54	7	0,39	10	0,45	8	0,97	0,189	7	8,0
Priestley-Taylor	0,953	0,47	4	0,23	7	0,37	4	0,98	0,166	4	4,8
Caprio	0,935	1,11	14	0,79	16	0,88	14	0,91	0,391	14	14,5
Hargreaves original	0,942	0,65	12	0,51	12	0,58	12	0,96	0,230	12	12,0
Irmak	0,938	0,59	10	0,41	11	0,49	11	0,96	0,206	10	10,5
Tabari 1	0,906	0,50	5	-0,04	1	0,41	5	0,97	0,176	5	4,0
Tabari 2	0,952	0,46	2	-0,15	5	0,36	3	0,97	0,162	2	3,0
Hargreaves-Samani	0,915	0,90	13	0,75	15	0,80	13	0,92	0,317	13	13,5
Trajkovic	0,925	0,45	1	0,14	3	0,34	1	0,98	0,158	1	1,5
Ravazzani	0,915	0,46	3	0,11	2	0,35	2	0,97	0,163	3	2,5
Bogawski	0,865	0,59	11	-0,17	6	0,46	10	0,96	0,207	11	9,5
Berti	0,912	0,54	8	0,30	9	0,43	7	0,97	0,192	8	8,0
Dorji	0,930	0,57	9	-0,15	4	0,45	9	0,95	0,199	9	7,8

R² : coefficient de détermination de la droite de régression; RMSE : Root Mean Square Error ou erreur moyenne quadratique (mm/j); MBE : Mean Bias Error ou erreur moyenne des biais (mm/j); MAE : Mean Absolute Error ou erreur moyenne absolue (mm/j); d : indice de Willmott (-); RE : Relative Error ou erreur relative (-).

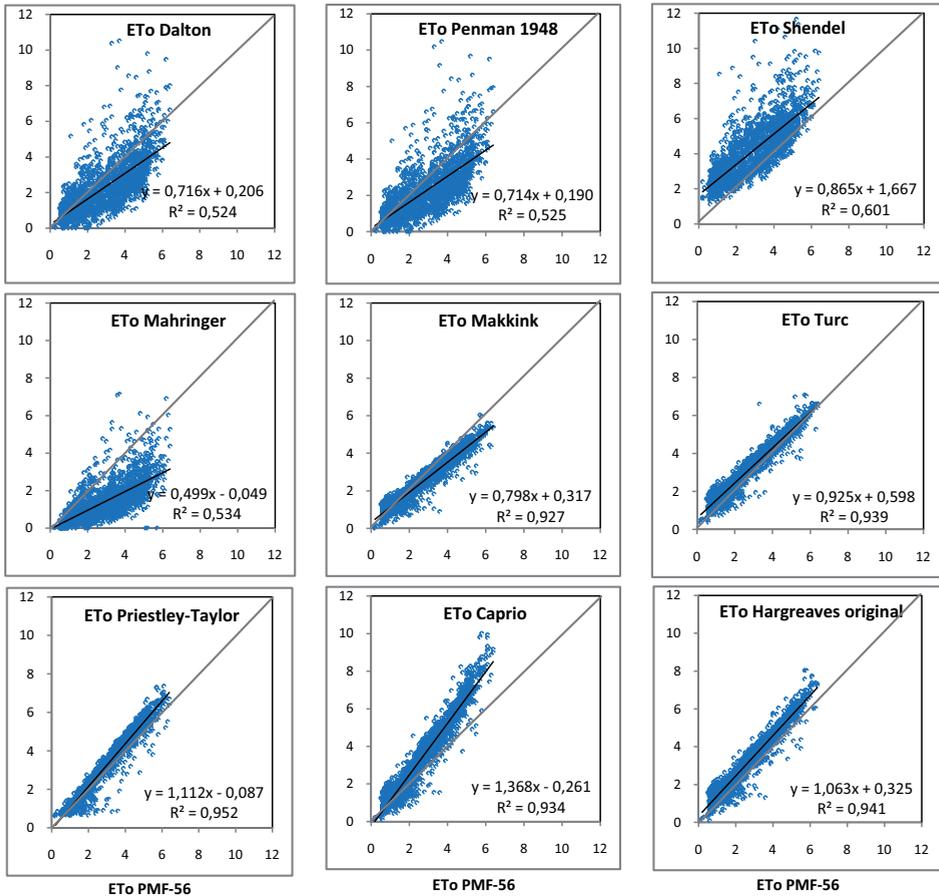


Figure 2 : Corrélations entre les modèles d'estimation de l'évapotranspiration de référence et le modèle standard FAO 56 Penman-Monteith (en mm/j). Variables climatiques journalières enregistrées pendant 2007 journées entre 2014 et 2019 au Centre INRAA Mehdi Boualem, Baraki (Alger).

comparaison entre les 18 modèles ETo et le standard FAO 56 Penman-Monteith au niveau du Centre INRAA de Mehdi Boualem (Baraki). Selon l'indicateur d'erreur considéré, les colonnes RANG du Tableau II représentent le classement de 1 à 18, de la plus faible valeur à la plus élevée, des valeurs des RMSE, MBE, MAE et RE résultant de

l'évaluation. La colonne « Moyenne des RANGS » est la moyenne de tous ces classements servant à distinguer les modèles entre eux (du meilleur modèle au plus mauvais).

On remarque que l'estimation de l'évapotranspiration par les 4 modèles «transfert de masse» (TM), de Dalton à Mahringer, est non fiable en raison

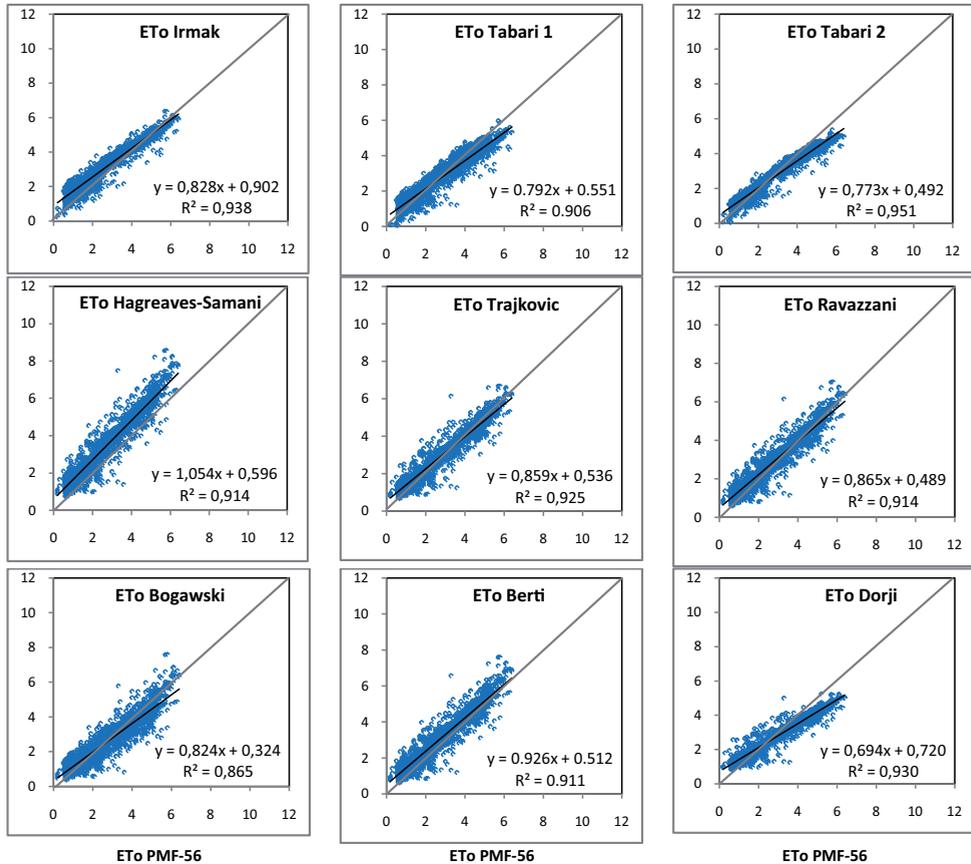


Figure 2 (suite) : Corrélations entre les modèles d'estimation de l'évapotranspiration de référence et le modèle standard FAO 56 Penman-Monteith (en mm/j). Variables climatiques journalières enregistrées pendant 2007 journées entre 2014 et 2019 au Centre INRAA Mehdi Boualem, Baraki (Alger).

de la faiblesse des ajustements entre les couples de variables corrélées illustrée par une forte distribution des valeurs autour de la droite de régression (Tab. II et Fig. 2). Les coefficients de détermination R² sont tous inférieurs à 0,61 et les indicateurs statistiques d'estimation de l'erreur confirment la faible performance de ces modèles :

RMSE > 1,27 mm/j, MAE > 0,9 mm/j, indices de Willmott d < 0,83 et RE > 0,44.

Les valeurs négatives de la MBE, variant entre -1,47 et -0,60 mm/j, indiquent une nette sous-estimation de l'évapotranspiration relative aux modèles Dalton, Penman1948 et Mahringer, contrairement à Schendel qui

la surestime à hauteur de 1,28 mm/j. Tous les classements d'indicateurs d'erreur rangent ces 4 modèles TM dans la catégorie des plus mauvais parmi les 18.

Avec des R^2 et des indices d supérieurs à 0,9, les 8 modèles «radiation» (RAD), de Makkink à Tabari 2, sont nettement meilleurs que les précédents (Tab. II, Fig. 2 et 2 (*suite*)).

La plus faible performance dans cette catégorie est réalisée par le modèle Caprio qui affiche les valeurs RMSE, MAE et RE les plus élevées (1,11 mm/j, 0,88 mm/j et 0,39), comparativement à la moyenne des mêmes erreurs d'estimation des 7 autres modèles (0,53 mm/j, 0,44 mm/j et 0,19).

La MBE indique une légère sous-estimation de l'évapotranspiration par Makkink (-0,25 mm/j), une surestimation modérée par Hargreaves original (0,51 mm/j) et une forte surestimation par Caprio (0,79 mm/j). Les 3 modèles, Tabari 2, Priestley-Taylor et Tabari 1 présentent les plus faibles erreurs RMSE et RE, en moyenne 0,48 mm/j et 0,17. Ils sont considérés comme les modèles les plus performants dans cette catégorie, suivant l'ordre : Tabari 2 > Priestley-Taylor > Tabari 1.

La 3^{ème} catégorie concerne les 6 modèles «température» (TEMP), de Hargreaves-Samani (HS) à Dorji, qui sont les plus recherchés parce que basés uniquement sur la température de l'air (Tab. II et Fig. 2 (*suite*)).

Al'instar des modèles RAD, on observe que la quasi-totalité des modèles TEMP affichent des R^2 et indices d supérieurs à 0,9.

Dans cette catégorie, le modèle HS réalise la plus faible performance d'estimation précise de l'évapotranspiration révélée via des niveaux d'erreur RMSE et RE de 0,90 mm/j et 0,317.

Les 5 autres modèles présentent des résultats quasi-identiques à ceux des modèles RAD (hormis Caprio) avec des valeurs moyennes RMSE, MAE, indice d et RE de l'ordre de 0,52 mm/j, 0,41 mm/j, 0,97 et 0,18. Néanmoins, les valeurs moyennes des MBE donnent un léger avantage aux modèles TEMP sur les modèles RAD (0,17 contre 0,28 mm/j). Parmi les 6 modèles TEMP, Trajkovic s'affiche en tête, suivi dans l'ordre par Ravazzani, Dorji, Berti et Bogawski.

L'analyse statistique a permis de réaliser une nette distinction entre les 18 différents modèles évalués. Le classement final regroupant les 10 meilleurs modèles se présente comme suit: Trajkovic > Ravazzani > Tabari 2 > Tabari 1 > Priestley-Taylor > Makkink > Dorji > Turc ex-aequo avec Berti > Bogawski (Tab. II, colonne «Moyenne»).

Noté 1,5 dans ce classement, le modèle Trajkovic s'est distingué par sa performance la plus élevée, suivi par Ravazanni et Tabari 2, avec 2,5 et 3.

En montrant une supériorité sur tous les autres, les 2 premiers modèles TEMP, Trajkovic et Ravazanni, seront les plus appropriés pour une estimation la plus précise de l'évapotranspiration en devançant les 4 meilleurs modèles RAD: Tabari 2, Tabari 1, Priestley-Taylor et Makkink.

Cinq modèles TEMP se retrouvent dans le top 10 du classement, à l'exception de Hargreaves-Samani qui se positionne loin derrière en 13^{ème} place juste après les 2 modèles RAD Irmak et Hargreaves original, respectivement en 11^{ème} et 12^{ème} place.

L'analyse a montré qu'une évaluation basée uniquement sur le coefficient de détermination R^2 ne suffisait pas à départager les modèles et qu'un approfondissement à l'aide d'indicateurs statistiques a été nécessaire. Selon Legates et McCabe (1999), une évaluation complète de la performance d'un modèle doit inclure au moins une mesure d'erreur relative et une mesure d'erreur absolue, ainsi que des statistiques récapitulatives et des outils graphiques.

Après une analyse comparative de 31 modèles d'estimation de l'évapotranspiration en région humide du nord de l'Iran sur la période 1965-2005, Tabari *et al.* (2011) ont observé que l'équation Trajkovic est la 2^{ème} la plus performante parmi les méthodes TM ($R^2 = 0,95$ et $RMSE = 0,34$ mm/j).

La série de données utilisées dans l'étude a révélé une sensibilité des modèles aérodynamiques TM par rapport aux faibles taux d'humidité de l'air (déficit de saturation de l'air élevé). Ceci s'est vérifié lors de journées venteuses en association ou non avec de fortes chaleurs. Les modèles réagissent à ce type de climat en provoquant l'augmentation anormale et trop forte de l'évapotranspiration qui peut dépasser, en moyenne, de 2,5 à 5 mm/j le standard PMF-56 durant les 37 journées comptabilisées à hygrométrie basse soit inférieure à 50 %. En plus d'une surestimation forte de ETo par temps sec, les modèles TM ont tendance à la sous-estimer par temps normal, à l'exception du modèle Schendel qui surestime ETo en tout temps. Ceci conduit à interpréter que cette variabilité intempestive du comportement des modèles TM les rend les plus inappropriés à une utilisation dans les conditions de la Mitidja.

L'équation Irmak a inspiré Tabari (Tabari *et al.*, 2011) pour l'adapter à ses propres conditions, sachant qu'elle a tendance à surestimer ETo dans des conditions humides (Irmak *et al.*, 2003b). Ici, le modèle Irmak s'est classé en 11^{ème} position et sa surestimation de l'ETo PMF-56 est à hauteur de 0,59 mm/j. Ceci concorde avec les résultats de Tabari lorsqu'il a évalué la surestimation de l'équation d'Irmak à 0,54 mm/j dans une région à climat humide du nord

de l'Iran. Selon Tabari *et al.* (2011), l'intégration des températures minimale et maximale dans l'équation $ET_{O_{Tab2}}$ (Eq. 13), au lieu de la température moyenne de l'air de l'équation $ET_{O_{Irmak}}$ (Eq. 11), a entraîné une meilleure estimation de l'évapotranspiration de référence. Cette amélioration apportée à l'équation Irmak par Tabari est nettement perceptible dans notre cas puisque $ET_{O_{Tab2}}$ s'est distingué en étant le 3^{ème} meilleur modèle en devançant très largement $ET_{O_{Irmak}}$ classé en 11^{ème} position.

L'équation Hargreaves-Samani (HS) (Eq. 16) a réalisé une surestimation de l'évapotranspiration en Mitidja estimée à 0,75 mm/j par la MBE. Par comparaison, l'équation Turc (MBE = 0,39 mm/j) lui est préférée en conditions humides comme plusieurs auteurs l'ont constaté (Yoder *et al.*, 2005; Trajkovic et Kolakovic, 2009a; Tabari, 2010). Comme modèle empirique, HS a été développé dans des environnements arides et ne convient pas à des conditions très différentes, alors que l'équation Turc est très recommandée en zones humides (Jensen *et al.*, 1990; Trajkovic et Kolakovic, 2009). Fontenot (2004) suppose que l'utilisation du rayonnement extra-terrestre R_a dans l'équation HS peut engendrer des surestimations de l'évapotranspiration dans les régions côtières. A cet effet, le paramètre calculé R_a , contrairement au rayonnement mesuré R_s , ne tient pas

compte de l'atténuation de la radiation solaire due à la couverture nuageuse et à l'humidité atmosphérique qui sont importantes dans ces régions.

Malgré ses inconvénients à estimer avec précision l'évapotranspiration, l'équation HS reste une source d'inspiration à de nombreux chercheurs qui ont, toujours, tenté de calibrer les différents paramètres qui la composent pour les besoins de planification et de gestion de l'irrigation (Todorovic *et al.*, 2013).

b) Différences d'évapotranspirations saisonnières et mensuelles

La précision à apporter au calcul de l'évapotranspiration est importante dans la recherche d'une utilisation efficace de l'eau notamment pendant les mois de l'été où les besoins en eau des cultures sont à leurs plus hauts niveaux.

Il a été démontré que tout biais dans le calcul peut être réduit lorsqu'il est intégré sur de longues périodes et, par conséquent, les erreurs devraient être plus faibles (Hupet et Vanclooster, 2001). De plus, l'analyse mensuelle permettrait une diversification de formules à utiliser au cours de l'année selon leurs performances respectives.

Dans cette partie, la RMSE mensuelle est produite à partir de la moyenne des RMSE journalières intégrée sur le mois, puis cumulée sur 3 mois pour composer la RMSE saisonnière.

Cadro *et al.* (2017) ont fixé un seuil de la RMSE > 0,5 mm/j dans les conditions climatiques de la Bosnie-Herzégovine pour statuer sur toutes les méthodes alternatives qui pourraient être rejetées et désignées comme non appropriées et non fiables. Une base de 0,5 mm/j de la RMSE est équivalente à une erreur d'estimation de ETo de 15 mm par mois et de 45 mm par saison (0,5 mm/j x 30

jours x 3 mois). C'est le critère retenu pour départager les 14 modèles RAD et TEMP sur la base de la saison et du mois dont les résultats sont présentés dans le Tableau III.

A l'échelle de la saison, on remarque que seuls Trajkovic et Ravazani respectent la conditionnalité de la RMSE ≤ 45 mm en toutes saisons, avec une légère performance pour le 1^{er} modèle.

Tableau III : Valeurs des RMSE mensuelles (mm/mois) et saisonnières (mm/3 mois) des 14 modèles "radiation" et "température" d'estimation de l'évapotranspiration de référence en comparaison au standard FAO56 Penman-Monteith. Variables climatiques journalières enregistrées entre 2014 et 2019 au Centre INRAA Mehdi Boualem, Baraki (Alger).

Modèle d'évapotranspiration	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Saisons			
													D J F	M A M	J J A	S O N
Makkink	12,9	12,7	11,9	10,8	11,5	12,9	18,3	25,6	24,3	15,5	8,8	15,5	38	35	68	40
Turc	23,1	20,0	14,3	15,5	14,9	13,7	10,7	12,7	11,5	14,7	20,9	21,4	57	44	35	57
Priestley-Taylor	7,7	9,9	10,9	11,6	16,1	19,6	19,9	18,5	14,6	10,1	10,4	14,5	29	47	53	35
Caprio	16,0	13,7	11,6	14,5	19,8	31,8	45,2	59,4	53,8	40,6	32,5	20,2	41	66	158	93
Hargreaves original	20,1	18,4	15,0	17,4	18,7	20,7	21,0	22,8	21,3	20,3	22,1	20,7	54	57	65	63
Irmak	26,7	23,0	17,3	18,0	14,5	10,1	7,2	8,3	9,9	16,5	25,4	25,9	67	43	25	68
Tabari 1	16,7	16,0	14,3	14,1	11,5	8,2	14,1	22,6	20,7	11,3	10,3	17,1	47	34	57	39
Tabari 2	12,0	11,2	9,4	8,5	9,0	12,2	18,4	24,7	20,0	9,7	8,7	13,3	33	30	63	32
Hargreaves-Samani	24,2	22,2	18,5	25,2	27,7	33,1	27,9	34,5	30,5	28,7	27,8	24,3	65	86	93	81
Trajkovic	16,6	15,0	11,6	12,9	13,4	14,0	10,8	13,5	14,0	12,8	12,4	16,6	43	40	38	42
Ravazzani	16,6	15,0	12,0	13,4	13,5	14,2	11,6	14,5	15,4	13,1	12,5	16,9	44	41	42	43
Bogawski	14,9	14,0	13,5	15,3	16,8	18,5	21,8	23,4	24,9	16,9	11,9	16,8	42	51	70	46
Berti	18,9	17,1	13,6	16,3	16,4	18,0	12,3	16,9	16,6	16,3	16,9	19,0	50	51	46	52
Dorji	14,9	14,1	10,7	12,0	14,5	18,0	22,6	26,3	24,2	15,5	8,7	14,6	40	45	73	39

Saisons/ hiver : Décembre, Janvier, Février ou DJF; printemps : Mars, Avril, Mai ou MAM; été : Juin, Juillet, Août ou JJA; automne : Septembre, Octobre, Novembre ou SON.

Les RMSE saisonnières respectives sont estimées à 43 et 44 mm, 40 et 41 mm, 38 et 42 mm, 42 et 43 mm pour les 4 saisons successives: hiver (DJF), printemps (MAM), été (JJA) et automne (SON) (Tab. III). Un intérêt est aussi porté sur Turc et Irmak qui répondent à ce critère au printemps et en été, 2 saisons avec des niveaux élevés de ETo. Tabari 2, Makkink et Dorji respectent aussi cette condition en toutes saisons sauf pour l'été.

Les 3 modèles inappropriées et non fiables en toutes saisons sont: Hargreaves original, Hargreaves-Samani et Berti. Enfin, l'application de l'évapotranspiration Irmak uniquement en été (JJA) pourrait procurer la plus faible RMSE estimée à 25 mm, soit 34 et 39 % en moins que celles produites par Trajkovic et Ravazzani.

A l'échelle mensuelle et au seuil de la $RMSE \leq 15$ mm par mois, on observe que seul le modèle Trajkovic répond à ce critère 10 mois de l'année (ratio 10/12), à l'exception de novembre et décembre où la RMSE dépasse de 1,6 mm ce seuil (Tab. III). De même pour Ravazanni, qui avec un ratio de 9/12, la RMSE dépasse en août de 0,4 mm le seuil limite des 15 mm/mois.

Tabari 2 est inapproprié durant les 3 mois de l'été (JJA) où l'écart de la RMSE s'élève à son niveau maximal avec +9,7 mm en juillet. Meilleur que le précédent, Priestley-Taylor, avec

un ratio de 8/12, affiche en été des écarts compris entre +3,5 et +4,9 mm/mois. Turc et Makkink complètent la liste (ratios 7/12) mais à l'avantage du 1er modèle dont la RMSE indique un modèle inapplicable uniquement en automne (ON) et en hiver (DJ).

Une autre méthode, reposant sur la plus faible RMSE mensuelle, permettrait aussi d'analyser le comportement des 14 modèles RAD et TEMP au cours de l'année.

Sur cette base, 3 modèles RAD se distinguent : Irmak répond à ce critère pendant les 3 mois de l'été (JJA) ($7 \text{ mm} \leq RMSE \leq 10 \text{ mm}$), Tabari 2 pour les mois d'automne (SON) ($9 \text{ mm} \leq RMSE \leq 13 \text{ mm}$) et de printemps ($8 \text{ mm} \leq RMSE \leq 9 \text{ mm}$), et Priestley-Taylor pour les mois d'hiver (DJ) ($8 \text{ mm} \leq RMSE \leq 10 \text{ mm}$). Comparativement, les 2 modèles TEMP, Trajkovic et Ravazanni, présentent des valeurs légèrement plus élevées particulièrement au printemps et en été avec respectivement $13 \text{ mm} \leq RMSE \leq 14 \text{ mm}$ et $11 \text{ mm} \leq RMSE \leq 15 \text{ mm}$.

L'avantage que procure ces 2 derniers modèles réside dans leur simplicité et leur fiabilité tous les mois de l'année et cela malgré de légers écarts de la RMSE observés en JJA, estimés en moyenne entre +4 et +5 mm/mois par rapport au modèle Irmak.

Cette dernière section complète l'analyse statistique consacrée à l'évaluation de la performance des

18 différents modèles ETo qui a mis en évidence la supériorité du modèle Trajkovic, suivi de près par celui de Ravazanni.

CONCLUSION

L'étude a permis l'évaluation et la comparaison de 18 différents modèles alternatifs de calcul de l'évapotranspiration de référence (ETo) classés en 3 types de méthodes: transfert de masse (TM), radiation solaire (RAD) et température de l'air (TEMP). Le but recherché étant le choix d'un modèle ETo simple et adapté aux conditions subhumides de la Mitidja qui est susceptible de remplacer l'estimateur standard ETo PMF-56, plus exigeant en paramètres climatiques souvent en disponibilité limitée dans nos régions.

Les indicateurs statistiques d'estimation de l'erreur utilisés ont montré que les 4 modèles TM sont les moins adaptés aux conditions climatiques de la Mitidja, parce qu'ils ont tendance à sous-estimer l'évapotranspiration par temps normal et à la surestimer fortement dès que l'humidité de l'air chute en dessous de 50%.

Les 8 modèles RAD sont beaucoup plus meilleurs que les précédents, et le modèle Tabari 2 se classe en tête dans cette catégorie, suivi par Priestley-Taylor et Tabari 1. En dépit des bonnes performances réalisées, l'inconvénient de ce type de modèle est que leur emploi

est tributaire de la mesure quotidienne de la radiation solaire, paramètre qui est peu disponible dans les conditions de données météorologiques limitées.

En réalisant les meilleures performances pour l'estimation précise de l'évapotranspiration, le modèle TEMP Trajkovic a été choisi parmi les 18 modèles évalués qui est susceptible de remplacer le standard ETo PMF-56. Son emploi pourrait désormais être recommandé pour la planification et la gestion de l'irrigation ainsi que dans le cadre des études sur le changement climatique en Mitidja. Aussi, le 2^{ème} meilleur modèle TEMP de Ravazzani serait intéressant à considérer sans omettre l'intégration dans sa formulation le paramètre élévation du lieu.

L'étude a montré que les modèles RAD, classés entre la 3^{ème} à la 6^{ème} place, en combinant la radiation solaire et la température, n'ont pas réalisé une meilleure performance que les 2 premiers modèles basés uniquement sur ce dernier paramètre.

Enfin, suivant les recommandations émis par les auteurs cités dans l'étude, comme Jabloun et Sahli (2008), Todorovic *et al.* (2013), Ren *et al.* (2016), il serait intéressant de procéder à la calibration du modèle Hargreaves-Samani (1985) pour l'adapter aux conditions locales, en agissant sur l'ajustement des coefficients qui composent l'équation.

Références

Allen R.G., Smith M., Perrier A., and Pereira L. S., 1994a. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 43 (2), 35-92.

Allen R.G., Smith M., Pereira L. S. and Perrier A., 1994b. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*. 43 (2). 1-34.

Allen R.G., 1995. Evaluation of various evapotranspiration equations for Texas and New Mexico. Proc., Irrigation Association International Conf., San Antonio, Tex. Jagtap, SS (1991).

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No, 56, FAO, Rome.

Allen R.G., 2003. REF-ET user's guide. University of Idaho Kimberly Research Stations, Kimberly.

Allen R.G., Clemmens A.J., Burt C.M., Solomon K. and O'Halloran T., 2005. Prediction accuracy for project wide evapotranspiration using crop coefficients and reference

evapotranspiration, *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 131(1): 24-36.

Allen R.G., Pruitt W.O., Wright J.L., Howell T.A., Ventura F., Snyder R., Itenfisu D., Steduto P., Berengena J., Beselga J., Smith M., Pereira L.S., Raes D., Perrier A., Alves I., Walter I. and Elliott R., 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman–Monteith method. *Agric. Water Manage.* 81:1-22.

Berti A., Tardivo G., Chiaudani A., Rech, F. and Borin, M., 2016. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. *Agricultural Water Management*, 2014, vol. 140, issue C, 20-25.

Bogawski P. and Bednorz E., 2014. Comparison and Validation of Selected Evapotranspiration Models for Conditions in Poland (Central Europe). *Water Resources Management*, 28, 5021-5038.

Bourletsikas A., Argyrokastritis I. and Proutos N., 2017. Comparative Evaluation of 24 Reference Evapotranspiration Equations Applied on an Evergreen-Broadleaved Forest. *Hydrology Research*, Online.

Cadro S., Uzunovic M., Zurovec J. and Zurovec O., 2017. Validation

and calibration of various reference evapotranspiration alternative methods under the climate conditions of Bosnia and Herzegovina. *International Soil and Water Conservation Research* 5 (4.), 309–324.

Caprio J.M., 1974. The solar thermal unit concept in problems related to plant development and potential evapotranspiration In: H. Lieth (Ed., Phenology and seasonality modeling, *Ecological Studies* (pp. 353-364), New York: Springer Verlag.

Dalton J., 1802. Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam of vapour from waters and other liquids in different temperatures, both in a torricellian vacuum and in air on evaporation and on the expansion of gases by heat. *Mem. Manch. Lit. Philos. Soc.* 5: 535-602.

Djaman K., Balde A.B, Sow A., Muller B., Irmak S., Ndiaye M.K., Manneh B., Moukoumbi Y.D., Futakuchi K. and Saito K., 2015. Evaluation of Sixteen Reference Evapotranspiration Methods under Sahelian Conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 139-159.

Djaman K., Tabari H., Balde A.B., Diop L., Futakuchi K. and Irmak S., 2016. Analyses, Calibration and

Validation of Evapotranspiration Models to Predict Grass reference Evapotranspiration in the Senegal River Delta. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 8, 82-94.

Djaman K., Irmak S., Kabenge I. and Futakuchi K., 2016. Evaluation of the FAO-56 Penman-Monteith Model with Limited Data and the Valiantzas Models for Estimating Reference Evapotranspiration in the Sahelian Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.142, ArticleID:04016044.

Doorenbos J. and Pruitt W.O., 1977. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24, FAO, Rome, Italy.

Dorji U., Olsen J.E., Seidenkrantz M., 2016. Water balance in the complex Mountains terrain of Bhutan and linkages to land use. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 7. 55-68.

Fontenot R.L., 2004. An evaluation of reference evapotranspiration models in Louisiana. M.Sc. Thesis, B.S., Louisiana State University and A&M College.

Garcia M., Raes D., Allen R.G. and Herbas C., 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology*. 125, 67-82.

- Gocic M. and Trajkovic S., 2010.** Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. *Comput Electron Agric* 71:158-162.
- Hargreaves G.H., 1975.** Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*, 18(5), 980-984.
- Hargreaves G.H. and Samani Z.A., 1985.** Reference crop evapotranspiration from temperature. *Transaction of ASAE*, 1 (2), 96-99.
- Hargreaves G.H., 1994.** Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe. Department Paper, Dept. of Biol. And Irrig. Eng. Utah State University, Logan, Utah.
- Hupet F. and Vanclooster M., 2001.** Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *J. Hydrol.*, 243 (3-4), 192-204.
- Irmak S., Irmak A., Allen R.G. and Jones J.W., 2003b.** Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*, 129 (5), 336-347.
- Jabloun M. and Sahli A., 2008.** Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to Tunisia. *Agricultural Water Management*. pp. 707-715.
- Jacovides C.P. and Kontoyiannis H., 1995.** Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*. vol. 27, issue 3-4, 365-371.
- Jamieson P.D., Porter J.R., Goudriaan J., Ritchie J.T., van Keulen H. and Stol W., 1998.** A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. *Field Crops Res.* 55: 23-44.
- Jensen M.E., 1985.** Futures directions of evapotranspiration. In: *Advances in evapotranspiration*, National Conference, American Society of Agricultural Engineers, Chicago, USA, 16-17/12/185, ASAE, St Joseph, pp. 100-104.
- Jensen M.E., Burman R.D. and Allen R.G., 1990.** Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE

manual and reports on engineering practice no. 70, ASCE, New York, NY.

Legates D. and McCabe G.J., 1999. Evaluating the Use Of “Goodness-of-Fit” Measures in Hydrologic and Landers Hydroclimatic Model Validation, Water Resources Research.

Lopez-Urrea R., Martin de Santa Olalla F., Fabeiro C. and Moratalla A., 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agric Water Management* 85:15–26.

Mahringer W., 1970. Verdunstungsstudien am Neusiedler See. [Evaporation Studies at Lake Neusiedl.] *Arch Met Geoph Biokl Ser, B*, 18, 1-20.

Makkink G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. of Water Eng.*, 11(3), 277-288.

Ndiaye P.M., Bodian A., Diop L. and Djaman K., 2017. Evaluation de vingt méthodes d'estimation de l'évapotranspiration journalière de référence au Burkina Faso. [Evaluation of Twenty Daily Reference Evapotranspiration Methods in Burkina Faso.] *Physio-Geo*, 11-1, 129-146.

Oudin L., Moulin L., Bendjoudi H., and Ribstein P., 2010. Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulations. *Hydrological Sciences Journal*. 55 (2), 209-222.

Pandey P.K., Dabral P.P. and Pandey V., 2016. Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeast region of India. *International Soil and Water Conservation Research*.

Penman H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceedings, Royal Society, London* 193, pp. 120-146.

Popova Z., Kercheva M. and Pereira, L.S. 2006. Validation of the FAO methodology for computing ETo with missing climatic data application to South Bulgaria. *Irrig. Drain*. 55:201–215.

Priestley, C.H.B. and Taylor R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81-92.

Ravazzani G., Corbari C., Morella S., Gianoli P. and Mancini M., 2012. Modified Hargreaves-Samani equation for the assessment of reference evapotranspi-

ration in Alpine River Basins. *J. Irrig. Drain. Eng.* ASCE 138 (7), 592–599.

Ren X., Qu Z., Martins D.S., Parades P. and Pereira L.S., 2016. Daily reference evapotranspiration for hyper-arid to moist sub-humid climates in inner Mongolia. China: I, Assessing temperature methods and spatial variability,” *Water Resource Management*, 30: 3769-3791.

Retta A., Vanderlip R.L., Higgins R.A. and Moshier L.J., 1996. Application of SORKAM to simulate shattercane growth using forage sorghum. *Agron. J.* 88: 596-601.

Sabziparvar A.A. and Tabari H., 2010. Regional Estimation of Reference Evapotranspiration in Arid and Semi-Arid Regions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 136, 724-731.

Sabziparvar A.A. et al., 2010. Evaluation of class A pan coefficient models for estimation of reference crop evapotranspiration in cold-semi arid and warm arid climates. *Water Resources Management*. 24 (5), 909–920.

Samani Z., 2000. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126 (4).

Samani Z., 2004. Discussion of ‘History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation’ by George H. Hargreaves and Richard G. Allen,” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. Vol. 130, No, 5, pp. 447-448.

Schendel U., 1967. Vegetationswasser-verbrauch und -wasserbedarf. Habilitation, Kiel, 137 pp..

Sentelhas P.C., Gillespie T.J. and Santos, E.A., 2010. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada, *Agric Water Manage* 97:635–644.

Tabari H., 2010. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resources Management*. 24, 2311–2337.

Tabari H., Grismer M.E. and Trajkovic S., 2011. Comparative analysis of 31 references evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31, 107–117.

Tabari H. and Hosseinzadeh Talaei P., 2011. Local calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold

climates of Iran based on the Penman-Monteith model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16 (10), 837-845.

Tegos A., Mamassis N. and Koutsoyiannis D., 2009. Estimation of potential evapotranspiration with minimal data dependence. EGU General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts. Vol. 11, Vienna, 1937, European Geosciences Union.

Thornthwaite C.W., 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Revue*, 38.

Todorovic M., Karic B. and Pereira L.S., 2013. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Hydrology* 481 (2013) 166-176.

Trajkovic S., 2005. Temperature-based Approaches for Estimating Reference Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131 (4).

Trajkovic S., 2007. Hargreaves versus Penman-Monteith under Humid Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133, 38-42.

Trajkovic S. and Kolakovic S., 2009. Evaluation of Reference Evapotranspi-

ration Equations under Humid Conditions. *Water Resource Management*. 23, 3057-3067.

Trajkovic S. and Kolakovic S., 2009a. Wind-adjusted Turc for estimating reference evapotranspiration to humid European locations. *Hydrol. Res.* 40 (1), 45-52.

Turc L., 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, 12, 1, 13-50.

UNEP, 1997. World Atlas of Desertification, second ed. United Nations Environment Programme, Arnold, London, 182 p.

Valipour M., 2015. Importance of Solar Radiation, Temperature, Relative Humidity, and Wind Speed for Calculation of Reference, *Archives of Agronomy and Soil Science*. 6, 239-255.

Watson I. and Burnett A.D., 1995. Hydrology: An Environmental Approach. CRC Press, Boca Raton, FL.

Willmott C.J., 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 63, 1309-1313.

Willmott C.J., 1984. On the Evaluation of Model Performance in Physical Geo-

graphy. In: *Spatial Statistics and Models*, Springer, Berlin, 443-460.

Willmott C.J., Ackleson S.G., Davis R.E., Feddema J.J., Klink K.M., Legates D.R., O'Donnell J. and Rowes C.M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of geophysical research*. vol. 90, NO, C5, pages 8995-9005.

Xu C.Y. and Singh V.P., 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resour. Manag.* 16:197-219.

Xu J., Yang S.H. and Luo Y.F., 2012. Predicting daily reference evapotranspiration in a humid region of china by the locally calibrated Hargreaves-Samani equation using weather forecast data. *Journal of Agricultural Science and Technology*.

Xystrakis F. and Matzarakis A., 2011. Evaluation of 13 Empirical Reference Potential Evapotranspiration Equations on the Island of Crete in Southern Greece. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 137, 211-222.

Yoder R.E., Odhiambo L.O. and Wright W.C., 2005. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Appl. Eng. Agric.* 21 (2), 197-202.