

ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION ET DE L'ÉVAPORATION DU BAC À L'INTÉRIEUR D'UNE SERRE-TUNNEL PLASTIQUE AU NORD DE L'ALGÉRIE

Belkhiri F.E., Semiani M., Chabane A.

Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA), Centre de recherche de Mehdi Boualem, Division de Bioclimatologie et Hydraulique Agricole, BP 120 Baraki, Alger, Algérie.

Contact : fed_belkhiri@yahoo.fr

RÉSUMÉ

La rareté de la ressource hydrique dans les environnements méditerranéens nécessite une évaluation correcte des pertes d'eau par évapotranspiration qui est un outil très important pour l'estimation précise des besoins en eau des cultures. Dans ce cadre, une étude a été menée au centre de recherche de l'INRAA de Baraki (Alger) ayant pour objet l'estimation de l'évapotranspiration (ET) et de l'évaporation du bac (E_p) à l'intérieur d'une serre-tunnel à couverture plastique. Les variables météorologiques nécessaires pour l'étude ont été enregistrées sous serre à l'aide d'un dispositif de mesure composé d'une station météo automatique et de deux bacs d'évaporation : un bac Class A et un petit bac de diamètre 24,5cm et de hauteur 11 cm. Les coefficients des bacs K_p ont été estimés simplement à partir de l'équation « $ETo = K_p \times E_p$ » (Doorenbos et Pruitt, 1977). A l'aide de régressions linéaires simples, les performances de deux méthodes empiriques simples d'estimation de l'évapotranspiration ETo Priestley-Taylor (EToPT) et ETo Hargreaves (EToH) ont été évaluées et comparées au modèle de référence ETo FAO56 Penman-Monteith (EToPM). Les résultats ont montré que les cumuls des trois ETo enregistrés sous serre sont classés suivant l'ordre : EToPT > EToPM > EToH pour des niveaux respectifs atteignant les 628 > 514 > 498 mm durant toute la durée de l'essai. Des corrélations significatives sont observées par la relation entre EToPT et EToH en fonction de EToPM, mais la valeur de la pente a de la droite de régression a montré une surestimation de 23% de l'évapotranspiration ($\alpha = 1,2298$) de la part de EToPT alors qu'une meilleure estimation a été réalisée par EToH qui est donnée par la valeur de a proche de l'unité ($\alpha = 0,9851$). De plus, en comparant les indicateurs d'erreur, EToH a montré la prédiction la plus précise de l'évapotranspiration pour des valeurs d'indicateurs plus faibles que EToPT *i.e* RMSE = 0.39 mm/j vs 0.75 mm/j, MBE = -0.09 mm/j vs 0.64 mm/j, RE = -3% vs 22%, respectivement pour EToH et EToPT. Ainsi, l'analyse statistique a démontré la supériorité d'EToH et sa précision quant à l'estimation de l'évapotranspiration sous serre en comparaison avec EToPT.

L'évaporation du petit bac E_{p24} a montré une liaison plus étroite avec l'évapotranspiration calculée à l'aide du modèle ETo de Hargreaves que l'évaporation du bac Class E_{pA} pour des valeurs du coefficient r respectives de 0,8 contre 0,6, ainsi que pour des erreurs types moyennes SEE de 0,78 mm/j contre 1,10 mm/j, respectivement pour EToH et EToPT.

Finalement sur le plan pratique, l'étude a montré que, sans trop de risque d'erreur, l'évapotranspiration sous serre pourrait être simplement estimée à partir de la valeur du coefficient du petit bac K_{p24} égale à 0,93 prise comme facteur de conversion de l'évaporation du petit bac en niveau d'évapotranspiration par déduction à partir de la relation de Doorenbos et Pruitt (1977).

Mots Clés : Serre-tunnel plastique, ETo, bac d'évaporation Class A, petit bac d'évaporation Ø 24,5 cm, coefficient du bac K_p .

SUMMARY

Scarcity of water resources in the Mediterranean environments requires an accurate assessment of water loss through evapotranspiration, which is a very important tool for the crop water requirements calculation. A study was carried out at the research center of INRAA Baraki (Algiers) aiming the estimation of evapotranspiration (ET) and the pan evaporation (E_p) inside a plastic tunnel greenhouse. Meteorological variables were recorded under greenhouse by using an automatic weather station and two evaporation pans: a Class A pan and a small pan with 24.5cm in diameter and 11 cm in height. The coefficients of pans K_p were simply estimated from the equation " $E_{To} = K_p \times E_p$ " (Doorenbos and Pruitt, 1977). By using simple linear regressions, the performance of two simple empirical methods of estimating evapotranspiration, E_{To} Priestley-Taylor (E_{ToPT}) and E_{To} Hargreaves (E_{ToH}), were evaluated and compared to the reference model of FAO56 E_{To} Penman-Monteith (E_{ToPM}). For all duration of the experiment, results showed that cumulative E_{To} were ranked in the order of: $E_{ToPT} > E_{ToPM} > E_{ToH}$ with respective levels of 628 > 514 > 498 mm. Significant correlations were observed in the relationship between of both E_{ToPT} and E_{ToH} with E_{ToPM} , but the value of the slope of the regression line showed an overestimation of 23% of evapotranspiration ($b = 1.2298$) for E_{ToPT} while a better estimate was made by E_{ToH} which was given by the slope value close to unity ($b = 0.9851$). Moreover, by comparing the indicators of error, E_{ToH} showed the most accurate prediction of evapotranspiration with the lowest values of indicators than E_{ToPT} i.e RMSE = 0.39 mm day⁻¹ vs 0.75 mm day⁻¹, MBE = -0.09 mm d⁻¹ vs 0.64 mm d⁻¹, RE = -3% vs 22%, for E_{ToH} and E_{ToPT} respectively. Thus, the statistical analysis showed the superiority of E_{ToH} and its accuracy for estimating greenhouse evapotranspiration in comparison with E_{ToPT} .

Evaporation of small pan E_{p24} showed a closer relationship with evapotranspiration calculated using the Hargreaves E_{To} model than the Class A pan evaporation E_{pA} . Coefficients of correlation r were equal to 0.8 and 0.6 with standard errors for estimate (SEE) of 0.78 mm d⁻¹ and 1.10 mm d⁻¹ for E_{ToH} and E_{ToPT} respectively.

Finally, the study showed that the greenhouse evapotranspiration could be simply estimated by using a value of 0.93 of the small pan coefficient K_{p24} taken as a factor of conversion of the pan evaporation in level of evapotranspiration by deduction from the Doorenbos and Pruitt expression (1977).

Key Words : Plastic tunnel greenhouse, models of evapotranspiration, Class A pan evaporation pan, small evaporation pan Ø 24.5 cm, pan coefficient K_p .

INTRODUCTION

En Algérie, le secteur de la production des cultures maraichères sous abri serre est en pleine expansion à travers tout le pays et mêmes dans les régions du Sud à climat sec et aride qui sont devenues en quelques années pourvoyeuses en légumes frais des marchés du Nord grâce à leurs conditions climatiques favorables à la production de primeurs.

Depuis les années 70, le modèle de serre le plus largement répandu dans le pays est sans contexte le type méditerranéen constitué d'une serre-tunnel de 400 mètres carrés de superficie et à couverture plastique. Les caractéristiques avantageuses de ce modèle comme sa simplicité et sa structure à faibles coûts et sans aucun équipement de contrôle actif du microclimat, ont en fait un produit abordable pour la grande majorité des agriculteurs et adapté à une grande diversité de régions agro-écologiques du pays. L'introduction récente de l'irrigation « goutte à goutte » sous serre n'a pas encore permis de restreindre la pratique par les agriculteurs des techniques d'arrosage traditionnelles très consommatrices en eau qui sont, à la base, une source de gaspillage de la ressource hydrique et d'engrais chimiques par lessivage. En raison de la rareté de la ressource hydrique dans les environnements méditerranéens et surtout dans les zones du Sud à climat aride, la production de cultures sous serre nécessite une plus grande efficacité de l'eau pour la planification et l'utilisation efficace des ressources en eau.

Les études sur les besoins en eau des cultures horticoles sous serre méditerranéenne sont rares et l'irrigation est principalement planifiée en fonction de l'expérience des agriculteurs, en dépit de la rareté de l'eau (Fernández, 2000). La connaissance de l'évapotranspiration (ET) des cultures sous serre est un outil très important pour la gestion de l'irrigation et l'estimation précise des besoins en eau des cultures nécessaires pour la planification et l'utilisation efficace des ressources en eau (Stanghellini, 1987). La méthode, qui consiste à ajuster ET par un coefficient cultural empirique (K_c) pour produire une estimation de l'évapotranspiration des cultures (ET_c), peut également être appliquée aux cultures sous serre plastique, mais il existe peu de données évaluant les méthodologies pour l'estimation de l' ET_o dans les serres en plastique (Fernandez *et al.*, 2010).

Beaucoup d'auteurs ont vu la nécessité de développer une méthode standard, globalement acceptable, pour l'estimation de ET_o pour le calcul des besoins en eau des cultures (Doorenbos and Pruitt, 1975 ; Doorenbos and Kassam, 1979 ; Dodds *et al.*, 2005). Des modèles ont été proposés par certains auteurs incluant FAO-Penman, Kinberly-Penman, FAO-Penman Corrigé, Penman-Monteith, Blanney-Criddle, Priestley-Taylor, FAO-Radiation, Hargreaves et FAO-Blanney-Criddle (Allen *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2003; Pereira et Pruitt, 2004; Dodds *et al.*, 2005). En général, les techniques d'estimation de ET sont basées sur une ou plusieurs variables atmosphériques et le but recherché étant de simplifier les modèles en diminuant l'intégration de

variables pas communément disponibles dans certaines régions du monde, comme par exemple la radiation solaire ou la vitesse du vent, tout en veillant à la validité du modèle. De plus, la performance de ces modèles est liée à des conditions climatiques diversifiées dont les études spécifiques nécessitent une calibration localisée en raison de leur représentativité globale limitée (Allen *et al.*, 1998). Les études ont toutes montré la supériorité de l'équation de Penman-Monteith (PM) pour estimer l'évapotranspiration de référence ETo sur une large gamme de climats (Jensen *et al.*, 1990). C'est pourquoi l'équation PM est fortement recommandé comme équation standard pour l'estimation de l'évapotranspiration par le programme des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et par l'American Society of Civil Engineers (ASCE) (Walter *et al.*, 2000).

L'évaporation du bac est une autre mesure climatique les plus couramment utilisée dans les écosystèmes naturels ou aménagés qui est étroitement liée à ETo quand le bac est proprement maintenu en bon état de fonctionnement pour plus de fiabilité des données obtenues (Jensen *et al.*, 1961 ; Doorenbos and Pruitt, 1975). Ainsi, pour les besoins en eau des plantes, l'évaporation du bac peut être utilisée par les agriculteurs dans le calendrier des irrigations. Les mesures à partir du bac Class A (121 cm de diamètre et 25,5 cm de hauteur) sont bien reliées à l'ETo quand des coefficients du bac appropriés sont utilisés (Allen *et al.*, 1998). Durant plusieurs décennies, le bac Class A a été utilisé avec succès pour le pilotage des irrigations de la tomate

(Locascio and Smajstrla, 1996), l'oignon (Imtiyaz *et al.*, 2000), la pomme de terre (Shalhevet *et al.*, 1983), ainsi que d'autres cultures. Mais en raison de son coût relativement élevé, la disponibilité d'un tel équipement est relativement faible dans les stations météorologiques des pays en développement (Thomas *et al.*, 2004). Pour réduire le coût du matériel, des petits bacs de différentes dimensions ont été testés pour la mesure de l'évaporation et les données ont été utilisées pour la conduite de l'irrigation (Torres, 1998; Thomas *et al.*, 2004). En Chine, le bac d'évaporation de 20 cm de diamètre, qui est un évaporomètre utilisé pour la surveillance des surfaces d'eau libres en Chine et au Japon (Yuan *et al.*, 2001, 2003, 2004) dont l'équivalent est le bac Class A du service météorologique U.S., est l'un des instruments standards utilisé dans pas moins de 1736 stations météorologiques chinoises (China Meteorological Administration, 2005). Il a été utilisé avec succès dans le calendrier d'irrigation des cultures sous serre comme la tomate (Yuan *et al.*, 2001), ou la fraise (Yuan *et al.*, 2004), et en plein champ pour la culture de pomme de terre (Yuan *et al.*, 2003) et du blé d'hiver dans la plaine de Chine du Nord (Liu et Kang, 2007). L'avantage du bac 20 cm est son volume réduit, facilement transportable, peu coûteux et dont la mesure est facile à réaliser.

A chaque type de bac et selon les conditions environnementales de son utilisation, il existe un coefficient du bac (Kp) qui est employé comme un facteur multiplicateur pour convertir l'évaporation du bac en évapotranspiration par simple déduction à par-

tir de la formule : $ET_o = K_p \times E_{pan}$ (Doorenbos et Pruitt, 1977 ; Gundekar *et al.*, 2008), mais généralement, ce coefficient est calculé à partir de variables climatiques comme la vitesse du vent, l'étendue du fetch en bordure de la culture et de l'humidité de l'air (Doorenbos and Pruitt, 1977 ; Snyder, 1992).

La présente étude a été réalisée dans le cadre du projet de coopération entre l'INRAA et l'Agence Internationale à l'Energie Atomique (AIEA) intitulé: « Enhancing the Productivity of High Value Crops and Income Generation with Small Scale Irrigation Technologies ». Le but recherché étant le développement de technologies simples dans le domaine de l'irrigation facilement extensibles à l'agriculteur.

Les objectifs poursuivis par l'étude se résument en : (1) Analyse de la corrélation entre deux modèles empiriques simples d'évapotranspiration sous serre (ETo Priestley-Taylor et Hargreaves) avec le modèle FAO56 Penman-Monteith ; (2)

Recherche du meilleur modèle empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration sous serre ; (3) Evaluation de la performance d'un bac d'évaporation réduit par rapport au bac Class A et aux modèles d'ETo ; (4) Sélection du meilleur coefficient du bac « K_p » pour la conversion du taux d'évaporation en évapotranspiration.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

1. Site d'étude

L'étude a été menée pendant 178 jours (du 10 Janvier au 6 Juillet 2011) au sein du centre de recherche de l'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (36° 41'N, 3°6'E et 18 m en altitude) situé au Sud d'Alger dans la plaine sublittorale de la Mitidja, à environ 7 kms de la mer. Les conditions climatiques du site sont caractérisées par des variations saisonnières prononcées avec des hivers doux et pluvieux et des étés chauds et secs. La moyenne annuelle de la température est de 18.4 °C

Tableau I : Evolution mensuelle des principales variables météorologiques du site d'étude.

Mois	T min (°C)	T max (°C)	Précipitations (mm)	Evaporation Piche (mm)	Vitesse du vent (m/s)
Janvier	6,5	16,9	86	85	1,2
Février	6,8	17,3	66	89	1,4
Mars	8,5	19,3	57	123	1,5
Avril	10,7	20,9	55	137	1,6
Mai	14,1	24,1	37	155	1,6
Juin	17,5	28,0	9	186	1,9
Juillet	20,2	30,7	3	212	1,7
Aout	21,1	31,6	9	208	1,7
Septembre	18,7	29,1	30	165	1,5
Octobre	15,2	25,5	53	137	1,3
Novembre	10,8	20,5	94	97	1,2
Décembre	7,9	17,7	99	88	1,2
Moyenne	13,2	23,5			1,5
Total			598	1681	

variant entre 11.7 °C durant le mois le plus froid (Janvier) et 26.4 °C en Aout, le mois le plus chaud de l'année. La moyenne annuelle des précipitations enregistrées sur site entre 1990 et 2010 est de 600 mm pour un niveau d'évapotranspiration de 1195 mm. Ci-après. Les moyennes mensuelles des principales variables météorologiques enregistrées au niveau du parc météo du site entre 1990 et 2010. (Tab 1)

2. Dispositif expérimental

Les mesures de l'évapotranspiration et de l'évaporation du bac ont été conduites à l'intérieur d'une serre-tunnel à couverture plastique Pebd de 240 m² de surface (30 m de long, 8 m de large et 3m de hauteur au faitage) et orientée d'Est en Ouest. Le système d'aération passif (par simple ouverture des portes et des bâches latérales) surtout durant les journées de forte chaleur, permet de lutter en même temps contre une surchauffe de l'ambiance de la serre et un microclimat saturé en humidité qui est propice pour la propagation des maladies fongiques.

A partir du 10 janvier, la serre est cultivée en poivron (*Capsicum annuum* L.) et irriguée par un système de gaine « goutte à goutte ». L'étude sur la gestion de l'irrigation de la culture de poivron sous serre est traitée séparément dans un rapport à part. Pendant 178 jours (du 10 Janvier au 6 Juillet 2011), les variables météorologiques sont enregistrées sous serre au moyen d'une station météo automatique (modèle FA, Lambrecht, Germany) équipée d'une centrale d'acquisition (modèle Synmet,

Germany) et placée au centre de la serre (Fig. 1). Les enregistrements sont réalisés pour toutes les données sur un pas de temps de 10 min. Les capteurs, installés à 2 m de hauteur et connectés à la centrale d'acquisition, sont constitués par une sonde de précision Pt100 pour la température de l'air, un psychromètre à ventilation forcée (modèle 918) pour l'humidité de l'air constitué de 2 sondes de précision Pt100 dont l'une est humidifiée, un pyranomètre (modèle CM6B, Kipp & Zonen) pour le rayonnement global et un bilan-mètre (modèle NB Lite) pour le rayonnement net. La vitesse du vent n'est pas mesurée. Pour le traitement des données, les enregistrements sont fréquemment déchargés sur un micro-ordinateur portable à partir de la centrale d'acquisition.

Le dispositif de mesure est complété par deux bacs d'évaporation installés près de la station météo et constitué par un bac Class A et un petit bac en métal galvanisé, non peint, avec des dimensions de 24.5 cm de diamètre et 11 cm de hauteur (Fig. 1). Le petit bac d'évaporation est testé pour la première fois dans le but de comparer ses performances avec celles du bac Class A et sa relation avec différents modèles d'ETO. En raison de ces caractéristiques de simplicité d'utilisation et de faible encombrement dans la serre, il pourrait être un outil alternatif pour le pilotage des irrigations en remplacement du bac Class A. Pour la mesure des conditions atmosphériques externes, la station météo automatique du parc météo, semblable à la première, complète le dispositif expérimental.



Figure 1 : Photo du dispositif de mesure installé au centre de la serre composé deux bacs d'évaporation (Class A et petit bac) et d'une Station météo automatique.

3. Mesures expérimentales

3.1. Estimation de l'évapotranspiration de référence

L'évaluation de l'évapotranspiration de référence sous les conditions de la serre cultivée a permis le test de trois équations de ETo: la méthode Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972), la méthode Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985) et le modèle FAO56 Penman Monteith (Allen *et al.*, 1998). En raison de l'indisponibilité des données lysimétriques, les deux équations de Priestley-Taylor et de Hargreaves, choisies pour leur simplicité, ont été comparées au modèle de Penman-Monteith qui est généralement admis comme une approche universelle pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle et utilisé comme référence pour calibrer les deux autres équations proposées (Jensen *et al.*, 1990; Xu et Singh, 2000).

Les méthodes de calcul de l'ETo proposées sont :

(1) ETo Priestley-Taylor :

L'approche Priestley-Taylor pour l'estimation de ETo d'une surface humide extensive sous des conditions d'advection minimale en utilisant le rayonnement net et le flux de chaleur dans le sol (Priestley and Taylor, 1972) est décrite par :

$$E_{To} = 1,26 \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (1)$$

où 1,26 est un facteur de correction empiriquement déterminé, R_n et G sont respectivement le rayonnement net et le flux de chaleur dans le sol ($MJ m^{-2} jour^{-1}$) ; G est relativement petit et le plus souvent ignoré pour une période d'une journée ($G \approx 0$) (Allen *et al.*, 1998). λ est la chaleur latente de vaporisation ($MJ kg^{-1}$), Δ est la pente de la courbe de pression de vapeur-température à saturation ($kPa ^\circ C^{-1}$) et γ est la constante psychométrique ($kPa ^\circ C^{-1}$).

(2) ETo Hargreaves :

Hargreaves et Samani (1985) ont développé une méthode basée sur les paramètres température - rayonnement :

$$E_{To} = \frac{1}{\lambda} (0,0023) \sqrt{(T_{max} - T_{min})} (T_{moy} + 17,8) R_s \quad (2)$$

où T_{max} , T_{min} et T_{moy} sont respectivement les températures journalières maximale, minimale et moyenne en $^\circ C$; R_s est le rayonnement solaire global en $MJ m^{-2} jour^{-1}$; λ est la chaleur latente de vaporisation en $MJ kg^{-1}$.

(3) ETo FAO 56 Penman-Monteith :

Le modèle FAO 56 Penman-Monteith (FAO-PM Modèle) (Allen *et al.*, 1998) qui simule une culture de référence de 0,12 m de hauteur avec une résistance du couvert de 70 s m⁻¹ et un albédo de 0,23, estime l'évaporation à partir d'un vaste couvert végétal de gazon, de hauteur uniforme, en pleine croissance, couvrant complètement le sol et sans restriction d'alimentation en eau.

L'équation du modèle pour le calcul journalier de l'ETo (mm jour⁻¹) est :

$$ETo = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (3)$$

où Rn et G sont respectivement le rayonnement net et le flux de chaleur du sol en MJ m⁻² jour⁻¹, G est relativement petit et supposé négligeable pour la période de la journée (G ≈ 0) (Allen *et al.*, 1998). T est la température moyenne journalière de l'air mesurée à 2 m de hauteur en °C, (e_s-e_a) est le déficit de pression de vapeur saturante en kPa calculée à 2 m de hauteur où e_s et e_a sont respectivement les pressions de vapeur à saturation et actuelle, u₂ est la vitesse du vent en m s⁻¹ à 2 m de hauteur, non enregistrée mais supposée égale à 0,2 m s⁻¹, Δ et γ sont les mêmes que dans l'Eq. (1).

Le manuel de la FAO n° 56 qui détaille la méthode de calcul de l'équation ETo FAO56 Penman-Monteith a été utilisé pour les besoins de ce calcul (Allen *et al.*, 1998). Le tableur Excel Microsoft Office (v. 2003)

a servi pour le calcul des ETo sur un pas de temps journalier à partir des données enregistrées par la station météo automatique.

3.2. Mesures de l'évaporation du bac

La mesure de l'évaporation des deux bacs est réalisée quotidiennement à partir de 16:00 h et pendant 125 jours (du 20 Janvier au 31 Mai 2011). En suivant les directives exprimées par Doorenbos et Pruitt (1977), le niveau d'eau du bac Class A est constamment maintenu entre 5 et 7 cm du bord supérieur du bac. Quant à la mesure de la quantité d'eau évaporée à partir du petit bac, elle est simplement réalisée en utilisant une éprouvette graduée. Liu HJ et Kang Y (2007) ont recommandé que le placement du petit bac doit être toujours maintenu à 5 cm au dessus du couvert végétal. Après chaque mesure, le petit bac est nettoyé puis rempli avec 20 mm d'eau propre selon le standard de mesure de l'évaporation d'une surface d'eau libre (Ministry of Water Resources and Electric Power, People's Republic of China, 1988).

Le calcul de l'évaporation journalière du petit bac (en mm/j) est donné par la formule :

$$Ep_{24} = W_{i-1} - W_i \quad (4)$$

où Ep₂₄ est la quantité d'eau évaporée du petit bac (diamètre 24,5 cm), W_{i-1} et W_i sont respectivement la quantité d'eau apportée le jour précédent et celle restant dans le bac 24 h après évaporation.

Selon l'équation d'évaporation du bac FAO24 (Doorenbos et Pruitt, 1977), une autre méthode d'estimation de l'évapotranspiration à partir de l'évaporation du bac est aussi utilisée :

$$ET_o = K_p \times E_p \tag{5}$$

avec K_p , le coefficient du bac et E_p , l'évaporation du bac (mm jour⁻¹).

Le coefficient pour les deux bacs est déduit :

$$K_{p24} = \frac{ET_o}{E_{p24}} \tag{6}$$

$$K_{pA} = \frac{ET_o}{E_{pA}} \tag{7}$$

avec K_{p24} et K_{pA} , respectivement les coefficients du petit bac et du bac Class. ET_o est l'évapotranspiration de référence, E_{p24} et E_{pA} sont respectivement les évaporations du petit bac et du bac Class A pan, toutes en mm/j.

3.3. Calcul statistique

La relation entre les données d'évapo-

transpirations et d'évaporation des bacs ont été analysées au moyen de régressions linéaires simples ($y = ax$) forcées à l'origine (ordonnée $b = 0$) utiles pour l'évaluation de la qualité des ajustements entre les valeurs estimées et observées par l'analyse des valeurs de la pente a et du coefficient de corrélation r donné par la formule :

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - \mu_E)(O_i - \mu_O)}{\sigma_E \sigma_O} \tag{8}$$

où E sont les valeurs des ET_o estimées (Priestley-Taylor ou Hargreaves) et O est la valeur observée (FAO56 Penman-Monteith), μ_E et μ_O sont respectivement les moyennes des valeurs estimées et observées des ET_o , σ_E et σ_O sont les écart-types et n est le nombre d'observations. Tous les paramètres sont en mm/j.

Comme décrites par Willmott (1982), les statistiques suivantes sont choisies pour évaluer la qualité des ajustements et la précision des estimations. La racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, *Root Mean Square Error*; mm j⁻¹) qui est la mesure

Tableau II : Acronymes des ET_o et évaporations des bacs utilisées dans l'étude.

Désignations	Acronymes	Données journalières nécessaires
ET_o Priestley-Taylor	ET_oPT	Températures de l'air min et max, rayonnement net.
ET_o Hargreaves	ET_oH	Températures de l'air min et max, rayonnement global.
ET_o FAO56 Penman Monteith	ET_oPM	Températures de l'air min et max, vitesse du vent, humidités relatives min et max, rayonnement global.
Evaporation du petit bac (Ø 24,5 cm)	E_{p24}	Quantité d'eau évaporée.
Evaporation du bac Class A	E_{pA}	Quantité d'eau évaporée.
Coefficient du petit bac (Ø 24,5 cm)	K_{p24}	Evapotranspiration et évaporation du bac.
Coefficient du bac Class A	K_{pA}	Evapotranspiration et évaporation du bac.

d'écart de la prédiction par rapport à la valeur estimée, l'erreur moyenne biaisée (MBE, *Mean Bias Error*, mm j⁻¹) et l'erreur moyenne relative (RE, *Relative Error*, %) sont utilisées dans ce cas.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E - O)^2}{n}} \quad (9)$$

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n (E - O)}{n} \quad (10)$$

$$\text{RE} = \frac{\text{MBE}}{\bar{O}} \times 100 \quad (11)$$

où " \bar{O} " est la moyenne de EToPM.

Pour la comparaison des données d'évaporation des bacs (Ep24 et EpA) en relation avec les différentes méthode de ETo, l'erreur-type (*SEE, Standard Error of Estimate*, mm jour⁻¹) est calculée pour le modèle de régression $y = ax$ selon la formule :

$$\text{SEE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon)^2}{n - 2}} \quad (12)$$

où " ε " sont les résidus ($Y - \hat{Y}$) en mm jour⁻¹ issus de l'ajustement du modèle et n est le nombre d'observations.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. Climat sous serre

L'évolution des valeurs saisonnières de la température de l'air et radiation solaire à l'intérieur de la serre et à l'extérieur est portée

dans la Figure 2(a). La représentation des données sur un pas de temps de la décade (10 jours) est choisie afin d'atténuer les fluctuations journalières permettant une tendance plus nette des paramètres climatiques.

Durant l'essai, les deux paramètres ont suivi la même tendance avec en moyenne un écart supérieur de 7,2 °C de la température sous serre par rapport aux conditions externes, à l'inverse du rayonnement solaire qui en est en moyenne de 3,3 MJ m² j⁻¹ inférieur suite à l'impact de la couverture plastique. Cette différence augmente sensiblement en période estivale jusqu'à atteindre les 6,5 MJ m² j⁻¹ concernant le rayonnement global alors que l'écart thermique est resté quasiment constant (7,4 °C).

Les tendances saisonnières montrent que la température de la serre varie en moyenne entre 6,7 °C en hiver et 34,7 °C en été et entre 1,5 et 24,7 MJ m² j⁻¹ concernant la radiation solaire. L'accroissement de la température et du rayonnement depuis le démarrage de l'essai en janvier jusqu'en été témoigne des conditions de forte chaleur prévalant au niveau du site à partir du mois de Juin qui peuvent souvent occasionner une surchauffe de l'ambiance de la serre et une forte demande évaporative à l'intérieur les serres plastiques. C'est la principale contrainte que rencontrent les utilisateurs de ce type de serre, démunies de système de contrôle actif du microclimat, surtout à partir de la fin du printemps.

La Figure 2(b) montre un taux de 83% de transmissivité du film plastique de couverture de la serre correspondant à la valeur de la pente de la droite de régression.

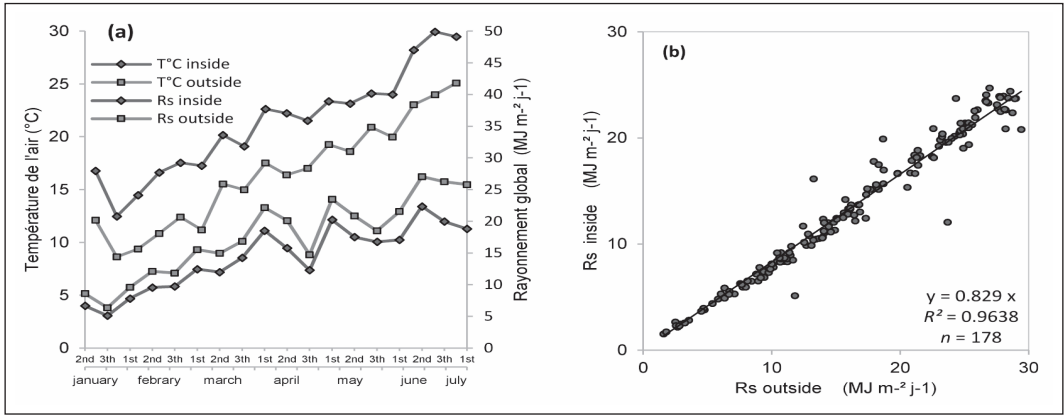


Figure 2 : Evolution des valeurs saisonnières (moyennes décadaires) de la température de l'air et du rayonnement global (a). Evolution du taux entre rayonnement global enregistré à l'intérieur et à l'extérieur de la serre durant l'essai (b).

La qualité du film plastique de couverture utilisé a permis d'enregistrer une différence de 7,2 °C durant tout l'essai relative au gain moyen en température par rapport aux conditions externes (Fig. 2 a). Les différences de températures nocturnes saisonnières entre la serre et l'extérieur sont faibles et sont en moyenne de 1,1, 0,9 et 1,5 °C pour les périodes de l'hiver, du printemps et de l'été. Ceci dénote la faible efficacité thermique du film plastique surtout durant les périodes nocturnes hivernales et printanières, en plus de la difficulté d'assurer une fermeture hermétique convenable des ouvertures des portes de la serre pour pallier les déperditions de chaleur durant la nuit.

2. Evapotranspiration de référence (ETo) et évaporation du bac (Ep) sous serre

2.1. Evapotranspiration de référence (ETo) sous serre

La Figure 3 montre l'évolution journalière sous serre des valeurs décadaires des trois modèles d'évapotranspiration de Priestley-Taylor, Penman-Monteith et Hargreaves (EToPT, EToH et EToPM) ainsi que l'évaporation mesurée à partir des deux bacs d'évaporation (Ep24 and EpA). Sur toute la période de l'essai, EToPT a montré des valeurs supérieures par rapport aux deux autres modèles avec un classement de niveaux cumulés suivant l'ordre : EToPT > EToPM > EToH pour des valeurs respectives de 628 > 514 > 498 mm (Fig. 4). Les moyennes journalières sont de 3,6, 2,9 et 2,8 mm et les écart-types de 1,9, 1,5 et 1,6 mm, respectivement pour EToPT, EToPM et EToH.

Du début du mois de janvier, la variation journalière de ETo de tous les modèles était approximativement de 1 mm par jour, puis une croissance régulière des EToPT, EToPM et EToH est enregistrée jusqu'à atteindre à la première décade d'avril des niveaux respectifs de 4,6, 4,2 et 3,9 mm.

Une décroissance de 1,2 mm par jour en moyenne est ensuite observée durant les deux décades suivantes (Tab. 2) dont le principal facteur sont les conditions climatiques et le mauvais temps comme le montre les chutes de température et de radiation solaire à la même période (Fig. 2). Le même phénomène s'est reproduit après la première décade de mai quand toutes les ETo ont diminué de presque 1 mm par jour au cours des trois décades successives (Fig.3). A la fin de l'essai, le classement est resté comme au démarrage avec des valeurs moyennes journalières de $5,4 > 4,1 > 4,9$ mm respectivement pour $EToPT > EToH > EToPM$. L'étude a montré que le type de serre utilisée est caractérisé pour une faible efficacité thermique contre les déperditions de chaleur principalement durant ces épisodes de refroidissement des conditions atmosphériques externes.

La Fig.4 montre l'évolution des ETo cumulées durant l'essai où une quasi superposi-

tion des ETo Hargreaves et Penman-Monteith est observée au cours de la période hiver-printemps, néanmoins une différence commence à apparaître avec la venue des fortes chaleurs au printemps. Ainsi, les deux ETo ont évolué de la même manière surtout depuis le début en janvier jusqu'au mois de mai où une différence moyenne de 0,3 mm par jour est enregistrée qui va en augmentant jusqu'à atteindre les 0,8 mm en juillet au bénéfice de EToPM.

Les valeurs extrêmes des ETo sous serre sont de 1,0 et 6,3 mm pour EToPT, 0,7 et 5,2 mm pour EToH et 0,8 et 5,6 mm pour EToPM (Tab. 2). Pour comparaison, les minimas-maximas de l'évapotranspiration des conditions externes calculée à partir de la méthode de Hargreaves sont de 0,9 et 9,0 mm, pour une moyenne journalière de 3,6 mm et un écart-type de 1,6 mm. Durant la même période de l'essai sous serre, le cumul de l'évapotranspiration à l'extérieur est de 645 mm.

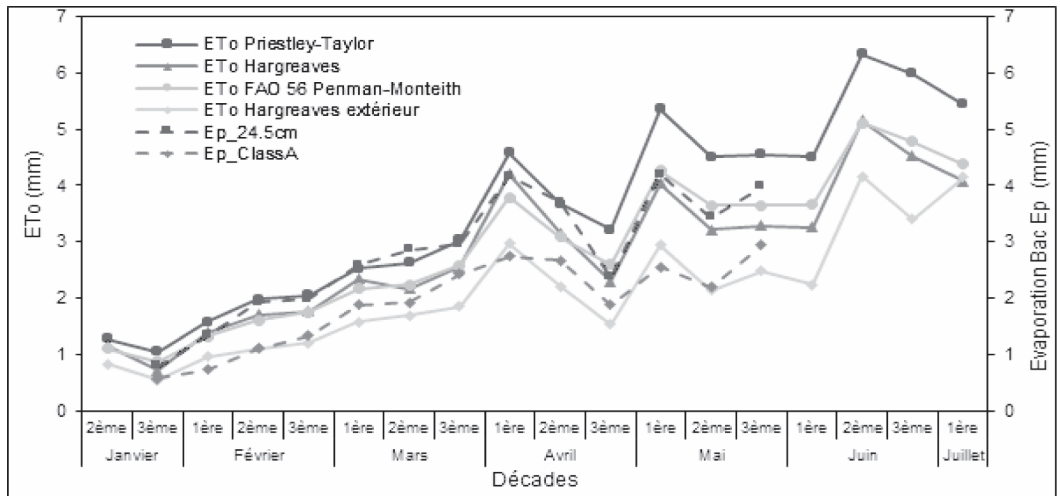


Figure 3 : Evolution saisonnière (moyennes décadaires) des modèles de ETo (Priestley-Taylor, Hargreaves et FAO56 Penman-Monteith) et des évaporations des deux bacs (petit bac Ep24 et bac Class A EpA).

Tableau III : Evolution mensuelle des moyennes décadaires des ETo et des Ep (en mm/jour).

Mois	Décade	EToPT	EToH	EToPM	Ep24	EpA
Janvier	2 ^{ème}	1,3	1,2	1,2		
	3 ^{ème}	1,0	0,7	0,8	0,8	0,6
	moyenne	1,2	0,9	1,0	0,8	0,6
Février	1 ^{ère}	1,6	1,4	1,4	1,3	0,7
	2 ^{ème}	2,0	1,7	1,6	1,9	1,1
	3 ^{ème}	2,0	1,8	1,8	2,0	1,3
	moyenne	1,9	1,6	1,6	1,7	1,1
Mars	1 ^{ère}	2,5	2,3	2,2	2,6	1,9
	2 ^{ème}	2,6	2,2	2,2	2,9	1,9
	3 ^{ème}	3,0	2,6	2,7	3,0	2,4
	moyenne	2,7	2,3	2,3	2,8	2,1
Avril	1 ^{ère}	4,6	4,2	3,9	4,2	2,7
	2 ^{ème}	3,7	3,2	3,7	3,7	2,7
	3 ^{ème}	3,2	2,3	2,6	2,4	1,9
	moyenne	3,8	3,2	3,4	3,4	2,4
Mai	1 ^{ère}	5,4	4,0	4,5	4,2	2,5
	2 ^{ème}	4,5	3,2	3,7	3,4	2,2
	3 ^{ème}	4,5	3,3	4,0	4,0	2,9
	moyenne	4,8	3,5	4,1	3,9	2,6
Juin	1 ^{ère}	4,5	3,2	3,9		
	2 ^{ème}	6,3	5,2	5,6		
	3 ^{ème}	6,0	4,5	5,1		
	moyenne	5,6	4,3	4,9		
Juillet	1 ^{ère}	5,4	4,1	4,9		
Moyenne générale		3,3	2,6	2,9	2,5	1,8

Certains auteurs ont observé que l'évapotranspiration sous serre était d'environ 60 à 80% inférieure par rapport à l'extérieur en raison de l'influence des principaux facteurs de la demande évaporative de l'atmosphère, tels que les faibles valeurs de la vitesse du vent, de l'humidité relative de l'air plus élevée et de la baisse de l'incidence du rayonnement solaire direct dans les serres (Montero *et al.*, 1985 ; Rosenberg *et al.*, 1989 ; Farias *et al.*, 1994). Notre étude a montré que ce ratio est égal à 30% (498 mm contre 645 mm) quand le modèle de Hargreaves basé sur la radiation extraterrestre à la place du rayonnement global est appliqué :

$$EToH = (0,0023) 0,408 \sqrt{(T_{max}-T_{min}) (T_{moy}+17,8) Ra} \tag{13}$$

où 0,0023 est la constante empirique originale proposée par Hargreaves et Samani (1985), 0,408 est l'inverse du flux de chaleur latente de vaporisation à 20 °C pour convertir les unités de Ra de MJ m² j⁻¹ en mm j⁻¹ ou équivalent évaporation (Allen *et al.*, 1998), Ra est le rayonnement extraterrestre, T_{max}, T_{min} et T_{moy} sont les mêmes que dans l'Eq. (2).

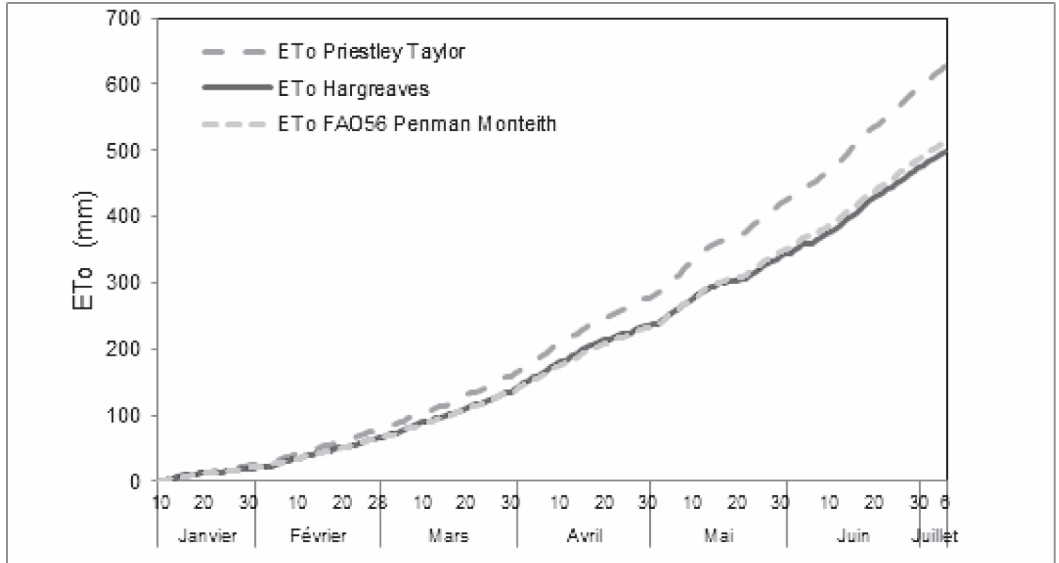


Figure 4 : Evolution des valeurs journalières des ETo Priestley-Taylor, Hargreaves et FAO56PM sous serre cumulées sur la durée de l'essai.

2.2. Évaporation du bac sous serre

Les évaporations des bacs E_p présentent des similitudes avec les tendances d'évolution saisonnière des ETo (Fernandez *et al.*, 2010). Comparativement, E_{p24} a montré des valeurs toujours supérieures à E_{pA} au cours de l'essai (Fig. 3) avec une moyenne décadaire des évaporations de 2,5 et 1,7 mm par jour respectivement pour E_{p24} et E_{pA} (Tab. 2).

La Figure 5 représente la corrélation entre les valeurs journalières de l'évaporation des deux bacs E_{pA} et E_{p24} . Le coefficient de corrélation ($r = 0,8569$) indique une évaluation précise de E_{p24} en dépit d'une pente supérieure à l'unité ($a = 1,3869$) montrant que l'évaporation du petit bac est en moyenne de presque 39% supérieure à celle du bac Class A. Les différences mensuelles entre E_{p24} et E_{pA} sont en nette pro-

gression au cours des saisons, variant de 0,22 à 0,71 puis à 0,95 et finalement atteignant les 1,32 mm/j au cours de la période entre janvier et mai. Ce résultat est confirmé par l'étude de Medeiros *et al.*, (1997) qui montre que l'évaporation du petit bac est en moyenne de 15% supérieure à celle du bac Class A lorsque les deux bacs sont installés à l'intérieur de la serre. Dans notre cas, cette différence est plus importante estimée à environ 39% comme l'indique la valeur de la pente de la droite de régression. Une première explication relative à l'évaporation réduite du bac Class A pourrait être donnée par l'influence de l'ombrage porté sur le plan d'eau du bac qui est provoqué par le développement en hauteur des plants de poivron au cours des saisons. De plus, les faibles dimensions du petit bac et la petite quantité d'eau emmagasinée sont aussi des paramètres qui pourraient

influer sur son comportement vis-à-vis de la chaleur sensible de l'ambiance de la serre en le rendant relativement beaucoup plus sensible à la demande évaporative que le bac Class A qui, comparativement, a une forte inertie. Liu et Costa (1998) ont trouvé que l'utilisation des bacs d'évaporation pour la prédiction de l'évapotranspiration de référence sur un pas de temps journalier n'est pas approprié en raison de l'insensibilité du bac au changement rapide du climat durant la journée mais acceptable pour des périodes de 5, 7 et 10 jours.

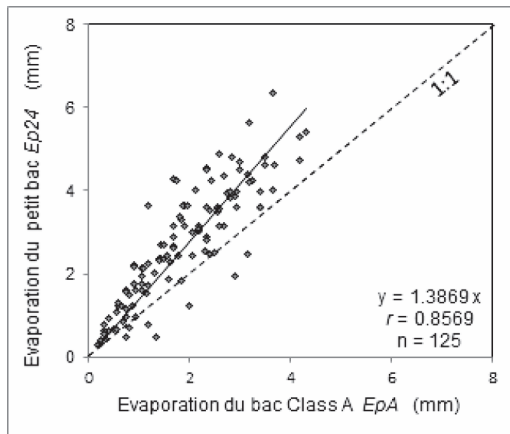


Figure 5 : Corrélation entre les valeurs journalières de l'évaporation du bac Class A Ep_A et de l'évaporation du petit bac Ep_{24} .

3. Évaluation des modèles de ETo sous serre

Les Figures 6 (a) et 6 (b) montrent des corrélations significatives données par EToPM en fonction des deux autres modèles (EToPT et EToH) mise en évidence par la distribution étroite des points autour de la ligne 1 :1 et la valeur élevée des coefficients de corrélation r égaux à 0,9. Par contre, la prise en compte seule de la valeur

de la pente a montre une surestimation de 23% ($a = 1,2298$) de l'évapotranspiration sous serre par EToPT, alors qu'une meilleure estimation est donnée par EToH en affichant une valeur de a proche de l'unité ($a = 0,9851$).

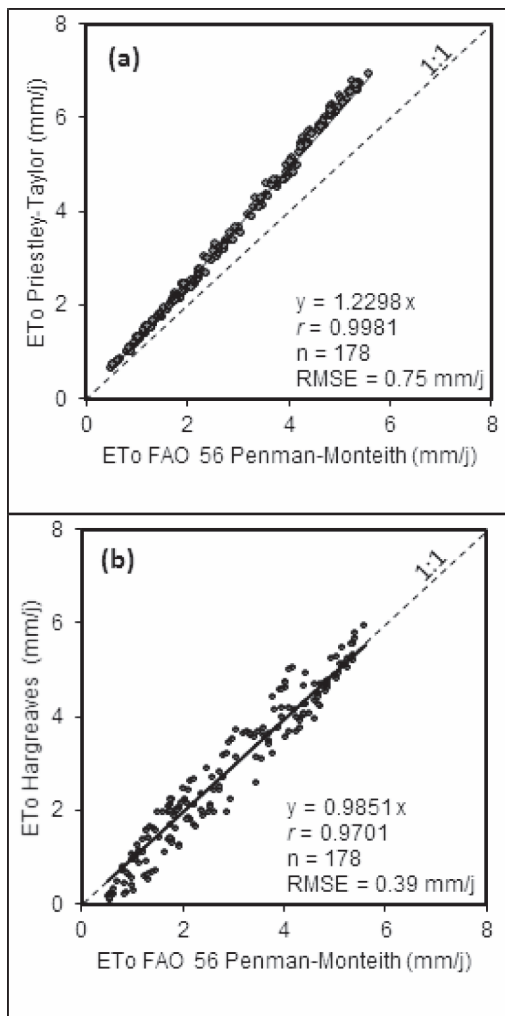


Figure 6 : Corrélation entre ETo FAO56 Penman-Monteith et ETo Priestley-Taylor (a) et ETo Hargreaves (b) des valeurs journalières enregistrées sous serre durant la période expérimentale.

Par ailleurs, l'analyse statistique montre de meilleurs indicateurs d'écarts pour EToH en comparaison avec EToPT (Tab. 3). L'écart de la prédiction par rapport à la valeur observée montre une plus faible erreur de prévision donnée par la RMSE de EToH que celle de EToPT (0,39 contre 0,75 mm/jour). Les autres indicateurs d'erreur que sont la MBE et la RE présentent aussi une meilleure prévision de l'évapotranspiration sous serre en faveur de la méthode Hargreaves par rapport à Priestley-Taylor qui a tendance à surestimer l'évapotranspiration à raison de 0,64 mm/j (MBE) et 22% (RE) par rapport au standard de référence (EToPM).

Un dernier test de comparaison des ETo a été réalisé grâce au tracé des boîtes à moustaches (Fig.7). Ainsi, la distribution des données journalières des ETo selon le 1^{er} et le 3^{ème} quartile (Q_1 et Q_3) montre que les valeurs de EToPM et de EToH sont plus homogènes et mieux distribuées que celles

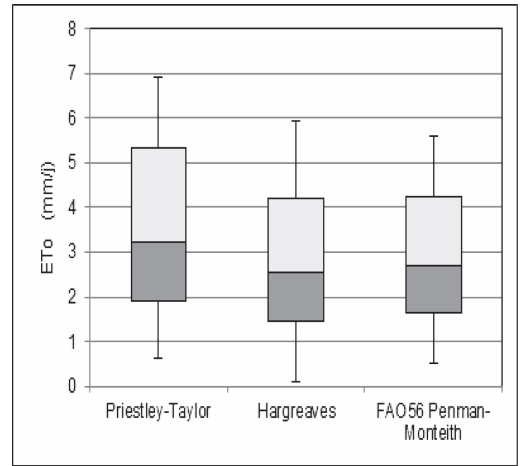


Figure 7 : Boîtes à moustaches des valeurs journalières des ETo. Les limites inférieures et supérieures indiquent les valeurs minimales et maximales et l'étendue des données. Les côtés inférieurs et supérieurs des boîtes sont les 1^{er} et 3^{ème} quartiles. Les lignes centrales sont les valeurs médianes.

de EToPT. Une plus grande dispersion des valeurs mesurée par l'écart interquartile (Q_3-Q_1) est donnée par EToPT, soit des valeurs de 3,4, 2,7 et 2,6 mm respectivement pour EToPT, EToH et EToPM.

Tableau IV : Indicateurs d'écarts entre valeurs journalières estimées (E) et observées (O) des ETo de FAO56 PM, Priestley-Taylor and Hargreaves (mm j^{-1}).

ETo	<i>n</i>	E	O	O/E	<i>b</i>	<i>r</i>	RMSE	MBE	RE
FAO56 PM	178		2.9						
Priestley-Taylor	178	3.5		0.8	1.2298	0.9981	0.75	0.64	22.2
Hargreaves	178	2.8		1.0	0.9851	0.9701	0.39	-0.09	-3.1

n est le nombre total d'observations; *Pente* de l'équation de régression linéaire ; *r* est le coefficient de corrélation ; *RMSE* est la racine de l'erreur quadratique moyenne (mm/j) ; *MBE* est l'erreur moyenne biaisée (mm/j) ; *RE* est l'erreur moyenne relative (%).

En conclusion, les résultats concordants des différents tests précédents démontrent la supériorité de la méthode Hargreaves par rapport à celle de Priestley-Taylor pour l'estimation de l'évapotranspiration sous serre en comparaison avec le modèle de référence FAO56 PM.

4. Évaluation des évaporations des bacs Ep₂₄ et Ep_A

L'ajustement des données des bacs d'évaporation en fonction des différents modèles d'ET_o établi au moyen des droites de régressions linéaires simples montre de meilleures corrélations pour Ep₂₄ (les trois graphes supérieurs) que pour Ep_A (les trois graphes inférieurs) tenant compte de la moyenne de leurs coefficients de corrélation r respectifs (0,8 contre 0,6) (Fig.8).

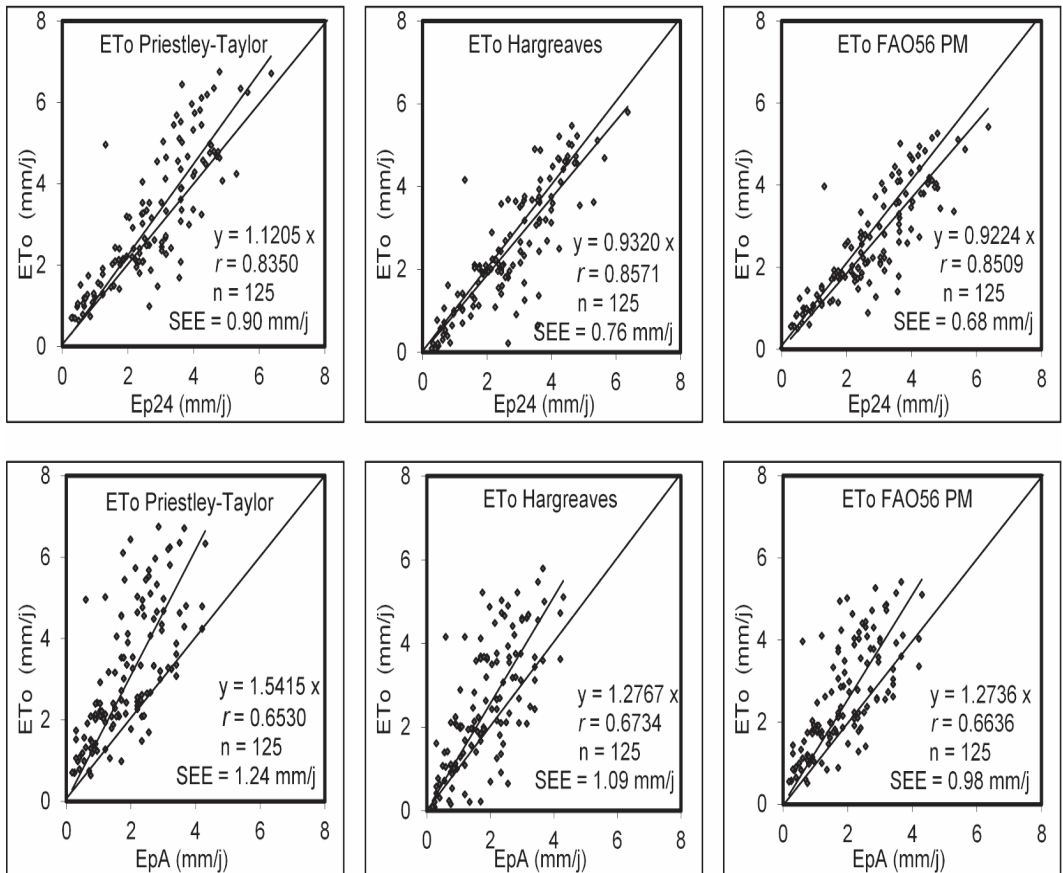


Figure 8 : Corrélations entre les modèles de ET_o avec l'évaporation du petit bac Ep₂₄ (en haut) et l'évaporation du bac Class A Ep_A (en bas).

L'analyse de l'estimation par l'erreur-type *SEE* (Standard Error of Estimate) confirme ce résultat en révélant une meilleure précision d'estimation de l'évapotranspiration par la mesure de l'évaporation sous serre par le biais du petit bac, dans le sens où les erreurs-types de Ep_{24} sont significativement inférieures à celles obtenues en fonction de Ep_A avec des valeurs égales à 0,90, 0,76 et 0,68 mm/j pour Ep_{24} et 1,24, 1,09 et 0,98 mm/j pour Ep_A , respectivement pour EToPT, EToH et EToPM.

5. Evaluation des coefficients des bacs Kp_{24} et Kp_A

Le coefficient du bac Kp est un facteur de conversion de l'évaporation du bac en évapotranspiration (Doorenbos and Pruitt, 1977), qui est égal au rapport entre ETo et Ep donné par les Eq. (6) and (7). Il correspond en définitive à la valeur de la pente de la droite de régression forcée à l'origine mettant en relation l'évapotranspiration et l'évaporation du bac.

Le tableau 5 détaille l'analyse statistique concernant les différents coefficients Kp obtenus au moyen de corrélations entre les trois équations de modèles d'ETo et les deux évaporations des bacs.

On remarque que les valeurs du coefficient du bac Class A sont nettement supérieures à l'unité ainsi qu'aux valeurs du coefficient du petit bac (Kp_A versus Kp_{24}). De plus, les intervalles de confiance à 95% réalisés pour un test unilatéral pour mesurer la dispersion des points autour de la pente de régression (Kp) indiquent des valeurs plus faibles de Kp_{24} et de meilleurs résultats que pour Kp_A . La confirmation de ce résultat est donnée par les valeurs nettement supérieures des coefficients r ainsi que des erreurs-types beaucoup plus faibles de Kp_{24} et au bénéfice de EToH.

Le tableau 6 met en évidence la variation au cours des saisons du coefficient du bac qui pourrait être aussi pris comme un autre critère d'évaluation des Kp . Les résultats montrent que les Kp_A mensuels sont tous supérieures à Kp_{24} et dépassent parfois même la valeur 2,00 (surtout celles qui sont calculées en fonction de EToPT) alors que les Kp_{24} calculés à partir de EToH et EToPM sont beaucoup plus proches de 1,00. A ce sujet, dans une étude réalisée par sur la tomate cultivée sous serre plastique, Farias *et al.*, (1994) préconisent que le coefficient Kp doit être très proche de 1.

Tableau V : Paramètres de régressions.

Equation of regression	$Kp \pm CI (95\%)$	r	SEE
$EToPT = Kp_{24} \times Ep_{24}$	$1,1205 \pm 0,0525$	0,8350	0,90
$EToH = Kp_{24} \times Ep_{24}$	$0,9320 \pm 0,0444$	0,8571	0,76
$EToPM = Kp_{24} \times Ep_{24}$	$0,9224 \pm 0,0400$	0,8509	0,68
$EToPT = Kp_A \times Ep_A$	$1,5415 \pm 0,1032$	0,6530	1,24
$EToH = Kp_A \times Ep_A$	$1,2767 \pm 0,0907$	0,6734	1,09
$EToPM = Kp_A \times Ep_A$	$1,2736 \pm 0,0812$	0,6636	0,98

Kp est la pente de l'équation de régression; $IC (95\%)$ est l'intervalle de confiance à 95%; r est le coefficient de corrélation; SEE (Standard Error of Estimate) est l'erreur-type.

Les moyennes sur 5 mois des Kp varient entre 1,47 et 1,94 pour KpA et entre 0,93 et 1,27 pour Kp24 en fonction du modèle d'ETo, tout en faisant remarqué que les coefficients calculés avec le modèle EToPT sont les plus élevés dans les deux cas (Kp24 et KpA). En terme de stabilité dans les variations saisonnières de Kp, nul doute qu'une légère variation mensuelle des valeurs de Kp24 calculées en fonction de EToH est observée pour le petit bac (entre 0,92 à 0,99) quand tous les autres coefficients sont plus irréguliers dans leurs évolutions respectives. Ainsi, le critère d'uniformité des Kp donne la supériorité à Kp24 calculé en fonction de EToH pour sa valeur la plus stable.

En conclusion, les résultats ont montré que la valeur de 0,93 attribué à Kp24 pourrait être considérée comme le meilleur facteur multiplicateur de conversion de l'évaporation du petit bac en évapotranspiration sous serre plastique par simple déduction à partir de l'Ep.(6).

CONCLUSION

Cette étude a permis de démontrer la fiabilité de certaines méthodes simples pour l'estimation de l'évapotranspiration et la mesure de l'évaporation sous serre qui ont un intérêt certain dans le cadre de la connaissance des besoins en eaux des cultures. Les principaux résultats qui s'y dégagent peuvent être résumés dans les points suivants :

1- Parmi les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration, l'emploi de la méthode de Hargreaves est suggérée pour les bons résultats qu'elle procure quand elle est mise en corrélation avec le modèle standard de Penman-Monteith. L'intérêt porté à l'équation de Hargreaves réside dans sa simplicité et sa précision malgré le nombre restreint de variables climatiques nécessaires pour son calcul. Jensen *et al.*, (1997) recommandent l'équation de Hargreaves comme étant la plus simple et la plus précise des méthodes empiriques quand

Tableau VI : Variation mensuelle des valeurs du coefficient du petit bac (Kp24) et du bac Class A (KpA).

Pan coefficients	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Moyenne
Kp24= Ep24/ EToPT	1,44	1,22	1,02	1,32	1,35	1,27
Kp24= Ep24 /EToH	0,92	0,93	0,84	0,97	0,99	0,93
Kp24= Ep24/EToPM	1,20	1,01	0,87	1,09	1,08	1,05
KpA= Ep24/EToPT	2,03	2,17	1,42	1,96	2,14	1,94
KpA= Ep24/EToH	1,34	1,68	1,19	1,54	1,59	1,47
KpA= Ep24/EToPM	1,70	1,78	1,21	1,61	1,72	1,60

la totalité des variables nécessaires pour la méthode Penman-Monteith ne sont pas disponibles ou dans des situations où les mesures contiennent certaines erreurs spécialement l'humidité de l'air.

2- Le petit bac d'évaporation de diamètre 24,5cm a montré de meilleures performances pour l'estimation de l'évapotranspiration sous serre en comparaison avec le bac Class A. En plus de ses avantages de faible coût, d'utilisation facile et de faible encombrement à l'intérieur de la serre, le petit bac est considéré comme un outil alternatif pour la conduite des irrigations en remplacement du bac Class A. La valeur du coefficient du bac Kp_{24} , estimée égale à 0,93, pourrait être prise comme facteur pour la conversion en évapotranspiration de l'évaporation mesurée à partir du petit bac. Toutefois, des précautions doivent être prises quant à l'extrapolation des résultats au niveau de sites qui diffèrent par leur conditions environnementales. Cette recommandation est largement exprimée par les auteurs dans la littérature qui conseillent toujours de procéder à la calibration des formules empiriques afin d'obtenir des résultats plus fiables.

3- Enfin, il serait utile que la confirmation des résultats de l'étude puisse se faire par la reconduite d'essais similaires. Toutefois, pour les performances réalisées dans le cadre de cette étude, on peut d'ores et déjà recommander l'utilisation du modèle de Hargreaves et le petit bac d'évaporation pour l'irrigation sous serre.

Références bibliographiques

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56. FAO, Roma.
- China Meteorological Administration (2005) General Meteorological stations in China. http://www.cma.gov.cn/netcen-ter_news/jcwl/tzxx/t20041105_42148.phtm.
- Dodds PM, Meyer WS, Barton A (2005) A Review of Methods to Estimate Irrigated reference Crop Evapotranspiration. Technical Report 04/05. Australia : Cooperative Research Centre for Irrigation Futures, CSIRO, Land and Water.
- Doorenbos J, Pruitt WO (1975) Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper N° 24, FAO-ONU, Rome, Italy. 168 pp.
- Doorenbos J and Kassam AH (1979) Yield reponse to Water, FAO Irrigation and Drainage Paper N° 33. Food and Agriculture Organisation, Rome, Italy, 193 pp.
- Doorenbos J, Pruitt (1977) Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N°. 24 (rev.). FAO, Rome.
- Farias JRB, Bergamaschi H, Martins SR (1994) Evapotranspiração interior de estufas.

- Fernandez MD, Bonachela S, Orgaz F, Thompson R, Lopez JC, Granados MR, Gallardo M, Fereres E (2010) Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrig Sci* 28:497-509.
- Gundekar HG, Khodke UM, Sarkar S (2008) Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. *Irr. Sc.* 26:169-175.
- Hargreaves GH, Samani ZA (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl Eng Agric* 1(2):96-99.
- Imtiyaz M; Mgadla N P ; Manase S K ; Chendo K; Mothobi E O (2000). Yield and economic return of vegetable crops under variable irrigation. *Irrigation Science*, 19(2), 87-93.
- Jensen MC, Middleton JE, Pruitt WO (1961) Scheduling irrigation from pan evaporation. Circular 386, Washington Agricultural Experiment Station.
- Jensen ME, Burman RD, Allen RG (1990) Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manual N° 70. ASCE, New York.
- Jensen DT, Hargreaves GH, Temesgen B, Allen R G (1997) Computation of ETo under non ideal conditions, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 123, 394-400, 1997.
- Liu HJ, Kang Y (2007) Sprinkler irrigation scheduling of winter wheat in the North China Plain using a 20 cm standard pan. *Irrig Sci* 25(2):149-159 doi:10.1007/s00271-006-0042-z.
- Liu Y, Costa S (1998) Reference evapotranspiration. In: Pereira LS, Musy A, Liang RJ, Hann M (eds) Water and soil management for sustainable agriculture in the North China Plain. ISA, Lisbon, pp 49-57.
- Locascio SJ, Smajstrla AG (1996). Waterapplication scheduling by pan evaporation for drip-irrigated tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121(1), 63-68.
- Medeiros JF, de Pereira FA de C, Folegatti MV, Pereira AR, Villa Nova NA (1997) Comparação entre a evaporação em tanque Classe A padrao e em mini tanque, instalados em estufa e estação meteorologica. In: Congresso brasileiro de agrometeorologia, 10., Piracicaba, 1997. Anais. Piracicaba: ESALQ, 1997. p. 228-230.
- Ministry of Water Resources and Electric Power, People's Republic of China (1988) Standard of water surface evaporation measurement, Standard N°. SD 265-88, Beijing, China.
- Montero, J.I., Castilla N, Gutierrez de Rav E, Bretones F (1985) Climate under plastic in the Almeria. *Acta Horticulturae*, N° 170, p. 227-234.

- Pereira, AR and Pruitt WO (2004) Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 66, 251-257.
- Priestley CHB, Taylor RJ (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon Weather Rev* 100(2):81-92 doi:10.1175/1520-0493(1972)100<0081: OTAOSH>2.3.CO;2.
- Rosenberg NJ, McKenney MS, Martin P (1989) Evapotranspiration in a greenhouse-warmed world: a review and a simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.47, p. 303-320.
- Shalhevet J, Shimshi D, Meir T (1983) Potato irrigation requirements in a hot climate using sprinkler and drip methods. *Agron. J.* 75, 13-16.
- Snyder RL (1992) Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. *J Irrig Drain Eng* 118(6):977-980.
- Stanghellini C (1987) Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. Ph.D. Dissertation. Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- Thomas DL, Harrison KA, Hook JE (2004) Sprinkler irrigation scheduling with the UGA easy pan: performance characteristics. *Appl Eng Agric* 20(4):439-445.
- Torres JS (1998) A simple visual aid for sugarcane irrigation scheduling. *Agric Water Manage* 38:77-83 doi:10.1016/S0378-3774(98)00043-2.
- Walter IA, Allen RG, Elliott R, Jensen ME, Itenfisu D, Mecham B, Howell TA, Snyder R, Brown P, Eching S, Spofford T, Hattendorf M, Cuenca RH, Wright and Martin D (2000) ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation, P.209-215, Proc., 4th NA. Irrig. Symp., ASAE, Phoenix, AZ.
- Wang, K., Cheng, G., Jiang, H., & Zhang, L. 2003. Atmospheric hydrologic cycle over the Qilian Heihe Valley (in chinese with English Abstract). *Advances in Water Science*, 14, 91-96.
- Willmott CJ (1982) Some comments on the evaluation of model performance. *Bull Ame Meteorol Soc* 63(11):1309-1313.
- Xu C Y and Singh VP (2000) Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Process* 14p. 339-349.
- Yuan B, Kang Y, Nishiyama S (2001) Drip irrigation scheduling for tomatoes in unheated greenhouses. *Irrig Sci* 20:149-154 doi:10.1007/s002710100039.
- Yuan B Z, Nishiyama S; Kang Y (2003). Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip-irrigated potato. *Agricultural Water Management*, 63(3), 153-167.
- Yuan.Z, Sun J, Nishiyama S (2004) Effect of Drip Irrigation on Strawberry Growth and Yield inside a Plastic Greenhouse. *Biosystems Engineering* 87 (2), 237-245 *SW Soil and Water*.