

Apport des modèles de transpiration dans l'amélioration du pilotage de l'irrigation de la tomate sous serre Monochapelle et Canarienne dans la Région du Souss-Massa

A. WIFAYA¹, F. MOKRINI¹, R. BOUHARROUD¹, F. ELAME¹, L. BOUIRDEN², A. MIMOUNI¹

(Reçu le 05/03/2019; Accepté le 01/08/2019)

Résumé

Cette étude présente une comparaison de la performance de quatre modèles d'estimation de l'évapotranspiration journalière (ET) sous serre. Les modèles étudiés sont De Villèle (ETDV), Penman-Monteith (ETPM), Stanghellini (ETST) et enfin le modèle Takakura (ETTK), basé sur l'équation du bilan de chaleur au niveau du couvert végétal. L'étude a été conduite durant deux campagnes de production de la tomate (2012 et 2013), sous deux types de serre (monochapelle et canarienne) localisées au Domaine Expérimental Melk Zhar à Balfae (INRA Agadir). Les modèles ETST et ETPM simulent correctement la transpiration de la tomate aussi bien pour les valeurs mesurées que pour le gain journalier de la tige de la tomate (CM/GJ) sous serre Monochapelle ($R^2=0,55$ et $0,62$). Dans le même sens, nous avons dégagé une relation satisfaisante entre l'Eff-TR (l'efficacité de transpiration de la plante) et le rapport CM/GJ en utilisant le modèle ETST, respectivement sous les serres monochapelle et canarienne ($R^2=0,67$; $0,58$). L'étude a identifié des seuils critiques ou bien des bases de référence de l'état hydrique de la tomate: confort hydrique ($0,40 < \text{CM/GJ} < 0,50$ et $70 < \text{Eff-TR} < 90\%$); surestimation de l'irrigation ($\text{CM/GJ} < 0,42$ et $\text{Eff-TR} < 70\%$ et stress hydrique ($\text{CM/GJ} > 0,46$ et $\text{Eff-TR} > 90\%$). Par ailleurs, la comparaison des moyennes suivant le niveau de rendement a permis de dégager 3 groupes de modèles ET; ETST (318 t/ha) > ETTK (272 t/ha) > ETDV~ETPM (236-249 t/ha).

Mots clés: Modèle d'évapotranspiration, Tomate sous serre, gain journalier de la tige, efficacité de transpiration, état hydrique de la plante, rendement.

Contribution of transpiration models to the improvement of tomato irrigation management under monospan and canarian greenhouse in Souss-Massa region

Abstract

This study compared the performance of four models to estimate the daily evapotranspiration (ET) in the greenhouse. The studied models were De Villele model (ETDV), Penman-Monteith model (ETPM), Stanghellini model (ETST) and finally Takakura (ETTK) transpiration model, based on heat balance equation of the crop canopy. The study was conducted during two tomato cropping seasons (2012 and 2013) under two greenhouses types (Monospan and Canarian), at INRA Melk Zhar Experiment Station (Agadir, Morocco). ETST and ETPM models correctly simulated tomato transpiration for both measured values and daily gain of the tomato stem (MC/DG) in the Monospan greenhouse ($R^2 = 0,55$ and $0,62$). Similarly, we have reached a satisfactory relationship between the Eff-TR (the efficiency of plant transpiration) and the ratio MC/DG using the ETST model under Monospan and Canarian greenhouses ($R^2 = 0,67$; $0,58$) respectively. The study identified critical thresholds or water status baselines of tomato: water comfort ($0,40 < \text{MC/DG} < 0,50$ and $70 < \text{Eff-TR} < 90\%$); overestimation of irrigation ($\text{MC/DG} < 0,42$ and $\text{Eff-TR} < 70\%$ and water stress ($\text{MC/DG} > 0,46$ and $\text{Eff-TR} > 90\%$). In addition, the comparison of means according to yield level identified three groups of ET models; ETST (318 T/ha) > ETTK (272 t/ha) > ~ ETDV~ETPM (236-249 t/ha).

Keywords: Evapotranspiration model, greenhouse tomato, daily gain of stem, transpiration efficiency, plant water status, yield.

INTRODUCTION

Les pertes de rendements et de qualité de la récolte liées à une irrigation mal maîtrisée ont depuis longtemps conduit les chercheurs à essayer de déterminer le plus exactement possible les besoins des cultures. Actuellement, plusieurs méthodes sont mises en œuvre pour piloter l'irrigation, allant de la plus traditionnelle comme celle qui est basée sur l'expérience du serriste, jusqu'aux méthodes climatiques utilisant des modèles de transpiration. En régions méditerranéennes, où le problème de la précision de l'estimation de l'irrigation se pose avec le plus d'acuité, la méthode la plus utilisée est celle du solarimètre qui considère que les besoins en eau de la plante varient comme une fonction linéaire du rayonnement global (De Villèle, 1974).

Comme la plupart des méthodes actuellement existantes, elle est précise sur un pas de temps relativement long (la journée ou la semaine) pendant lequel les conditions climatiques sont stables, telles qu'une succession de journées ensoleillées. Dans ces conditions et à ce pas de temps, il existe une corrélation linéaire assez étroite entre les deux principaux paramètres qui gouvernent la transpiration sous serre: le rayonnement global RG et le déficit de saturation de l'air D_a (Stanghellini, 1987; Yang *et al.*, 1990; Boulard *et al.*, 1991; Jolliet and Bailey, 1992; Papadakis *et al.*, 1993; Baille *et al.*, 1994).

Lorsque le rayonnement global et le déficit de saturation de l'air ne sont pas corrélés, la prise en compte du RG seul est insuffisant pour gérer l'irrigation lorsque la serre

¹ Institut National de la Recherche Agronomique, UR-Production intégrée des cultures, Agadir, Maroc

² Laboratoire de Thermodynamique et Énergétique, Faculté des Sciences, Agadir, Maroc

est équipée d'un système de régulation climatique tels que l'écran d'ombrage ou la brumisation (Fuchs, 1990; Boulard et Baille, 1993), ou lorsque les conditions climatiques extérieures sont changeantes et très contrastées comme c'est souvent le cas en région méditerranéenne: journées chaudes avec un déficit de saturation important lorsque le vent vient du continent (mistral, sirocco, etc..) suivies de journées avec un temps couvert et humides, dans le cas d'un vent marin. Les résultats de Boulard et Jemaa (1993) sur la tomate sous serre confirment l'importance du rôle du déficit de saturation de l'air sur la demande évaporative et la nécessité de tenir compte de ce paramètre dans l'estimation des besoins en eau des cultures sous serre.

Afin de mieux maîtriser l'irrigation dans ces conditions, nous comparons dans cette étude quatre méthodes de pilotage de l'irrigation (Tableau 1). La première méthode est celle du solarimètre utilisant uniquement comme entrée le rayonnement global extérieur et mettant en œuvre un coefficient cultural (Kc) et une caractéristique thermique de la paroi de la serre t (De Villèle, 1972). La deuxième est une approche de type Penman-Monteith (Penman, 1948 et Monteith, 1965) utilisant un modèle de transpiration qui tient compte des paramètres climatiques couramment mesurés sous serre (température, humidité et rayonnement) et des paramètres biologiques décrivant la culture (Conductances aérodynamique et stomatique). Stanghellini (1987) a révisé le modèle Penman-Monteith et a introduit un nouveau facteur biologique de la culture (Surface foliaire). Enfin, le dernier modèle de transpiration est basé sur l'équation du bilan de chaleur au niveau du couvert (PM) (Takakura *et al.*, 2005). Ce dernier modèle a donné une bonne simulation de la transpiration de la tomate sous serre (Takakura, 2008; Takakura *et al.*, 2009).

Dans cette étude, nous avons appliqué les quatre modèles pour la détermination des besoins en eau de la tomate sous serre Multichapelle et Canarienne. Tout d'abord, on a comparé la réponse de ces modèles par rapport au bilan hydrique mesuré. Ensuite, on a déterminé quelques indicateurs mesurables qui interviennent dans l'évaluation de l'état hydrique des plantes, la qualité et le calibrage des modèles. On a également analysé les différences entre les paramètres de croissance, de développement et de rendement par modèle et par serre pour les deux campagnes. Enfin, on a défini le modèle le plus adéquat pour l'irrigation de la tomate sous serre qui remplacera par la suite la méthode conventionnelle d'irrigation par RG dans la région de Souss-Massa.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'expérimentation a été conduite au Domaine expérimental Melk Zhar à Balfae sous trois monochapelles de 290 m² chacune. Le matériel végétal utilisé est une variété de tomate (Pristyla) conduite sous ces deux structures durant deux campagnes (2012 et 2013). Le plan expérimental adopté est un dispositif en blocs aléatoires complets (DBAC) avec 4 répétitions.

La serre monochapelle est équipée d'une station météorologique Pessl pour la mesure des paramètres climatiques au pas horaire (Température, humidité relative, rayonnement photosynthétique actif (PAR) et flux de chaleur du sol). Les données climatiques externes sont recueillies au moyen d'une station Pessl standard.

La serre canarienne est équipée d'une centrale de mesure et de stockage de données climatique (Campbell CR1000), reliée à un capteur température-humidité Yang, des thermocouples en cuivre et constantan pour la mesure de la température foliaire et un pyranomètre pour mesurer le rayonnement net. L'aération naturelle est le seul moyen de gestion de climat des deux structures. Pour les mesures dendrométriques au pas horaire, une batterie de capteurs LVDT (Linear variable differential transformer) a été reliée aux stations. Enfin, la mesure de la transpiration journalière a été effectuée via des lysimètres (Decagon Drain Gauge G3). D'autres observations et mesures ont concerné la croissance, le développement et la récolte de la tomate ainsi que la détermination de l'indice foliaire par régression. Dans le même sens, le contrôle et la programmation de l'irrigation et de la fertigation par ligne est assuré par un programmeur de fertigation (MC, France). Quant aux analyses statistiques, régression et analyse de variance, nous avons utilisé le logiciel statistique Minitab 13.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Comparaison des modèles ET appliqués

Les modèles d'estimation de l'ET simulent correctement les valeurs journalières de l'ET mesuré par le lysimètre. Ainsi, les coefficients de régression ont dépassé 0,91 et les constantes à l'origine étaient plus faibles pour les modèles ETST et ETPM et légèrement élevées pour les modèles ETDV et ETTK (Figure 1). Les mêmes résultats ont été obtenus par Boulard et Jemaa (1993) et Morille *et al.*, (2013).

Tableau 1: Les modèles de simulation de l'évapotranspiration

Modèle d'évapotranspiration	Auteurs
$ETM = Kc \cdot ETPs$ avec $ETPs = t \cdot Rg$ et $t = (0,67 \cdot kp)/\lambda$	De Villèle, 1972
$E\lambda = [\delta \cdot Rn + ((2 \cdot LAI \cdot \rho_a \cdot Cp)/re)(VPD)] / [\gamma \cdot (1 + (\delta/\gamma) + (ri/re))]$	Stanghellini, 1987
$E\lambda = Rn - h(T - T_w)$	Takakura <i>et al.</i> , 2005
$E\lambda = [\delta \cdot Rn + ((\rho_a \cdot Cp)/re)(VPD)] / [\gamma \cdot (1 + (\delta/\gamma) + (ri/re))]$	Penman, 1948 et Monteith, 1965

L'analyse plus poussée de la régression entre l'ET mesurée et simulée par les quatre modèles, tenant en compte leurs variabilité interstade de culture, interannuelle et entre les deux serres mono-chapelle et canarienne (Tableau 2), a montré que les coefficients de détermination s'améliorent pour les modèles ETPM ($0,80 < R^2 < 0,93$) et ETST ($0,88 < R^2 < 0,97$) et se dégradent relativement pour les modèles ETDV ($0,97 < r^2 < 0,99$) et ETTK ($0,97 < R^2 < 0,99$) en passant d'un stade à un autre. En effet, les deux modèles ETST et ETPM ont montré une certaine stabilité de leurs réponses vis-à-vis de la variabilité intersaison et inter-annuelles des variables climatiques mesurées (Rana *et al.*, 2012). Ces résultats ont été démontrés par plusieurs auteurs. Katerji et Rana (2006), en testant deux modèles de simulation de l'ET, ont précisé une alternance de la réponse des deux modèles et que la prise en considération de la variabilité interannuelle des conditions climatiques par le modèle est un indicateur de sa robustesse et fiabilité.

Validation du modèle ET par des paramètres morphométriques

Les modèles ETST et ETPM simulent correctement la transpiration de la tomate sous serre mono-chapelle ($R^2 = 0,55$ et $0,62$) respectivement, contre des coefficients de détermination faibles ($R^2 = 0,41$ et $0,45$) pour ces deux modèles sous serre canarienne (Figure 2). Également, les résultats montrent clairement que le rapport CM/GJ est un bon indicateur de l'état hydrique de la tomate et de la demande climatique pour les deux modèles Penman-Monteith (ETPM) et Stanghellini (ETST). Dans le même

sens, Pagán *et al.*, (2012) ont noté une forte corrélation de la CM avec le déficit de saturation et la température de l'air, les deux paramètres climatiques clé des modèles ETPM et ETST. La faible réponse des modèles ETPM et ETST sous serre canarienne avec ce rapport CM/GJ, est due à l'hétérogénéité du climat.

La figure 3 illustre la relation satisfaisante entre l'Eff-TR et le rapport CM/GJ en utilisant respectivement le modèle ETST sous les serres mono-chapelle et canarienne ($R^2 = 0,67$; $0,58$). Cependant, cette relation était moins importante avec la simulation de l'ET par ETPM, ETDV et ETTK. Pour le modèle ETPM, nous avons remarqué une surestimation des valeurs de l'Eff-TR par rapport au CM/GJ mesuré ($R^2 = 0,45$; $0,4$), contrairement au modèle ETTK, nous avons souligné une sous-estimation ($R^2 = 0,45$; $0,39$) et une alternance et dispersion des valeurs estimées pour le modèle ETDV ($R^2 = 0,23$; $0,35$). Par ailleurs, la majorité des auteurs ont travaillé avec l'indicateur CM (croissance maximale de la tige) comme facteur de réponse aux variables climatiques (Température, déficit de saturation de l'air, rayonnement solaire et évapotranspiration de référence) et physiologiques (Potentiels hydriques de la tige et feuilles Ψ) (Gallardo *et al.*, 2006a, 2006b, Perez-Lopez *et al.*, 2008, De Swaef *et al.*, 2009; De Pauw *et al.*, 2008a, 2008b).

Enfin, c'est le premier travail qui a étudié ces deux indicateurs (Eff-TR et CM/GJ) qui peuvent décrire l'état hydrique de la plante et par la suite le pilotage d'irrigation. Également, on peut les utiliser pour le calibrage des modèles d'ET. Ainsi, nous avons défini une fourchette de

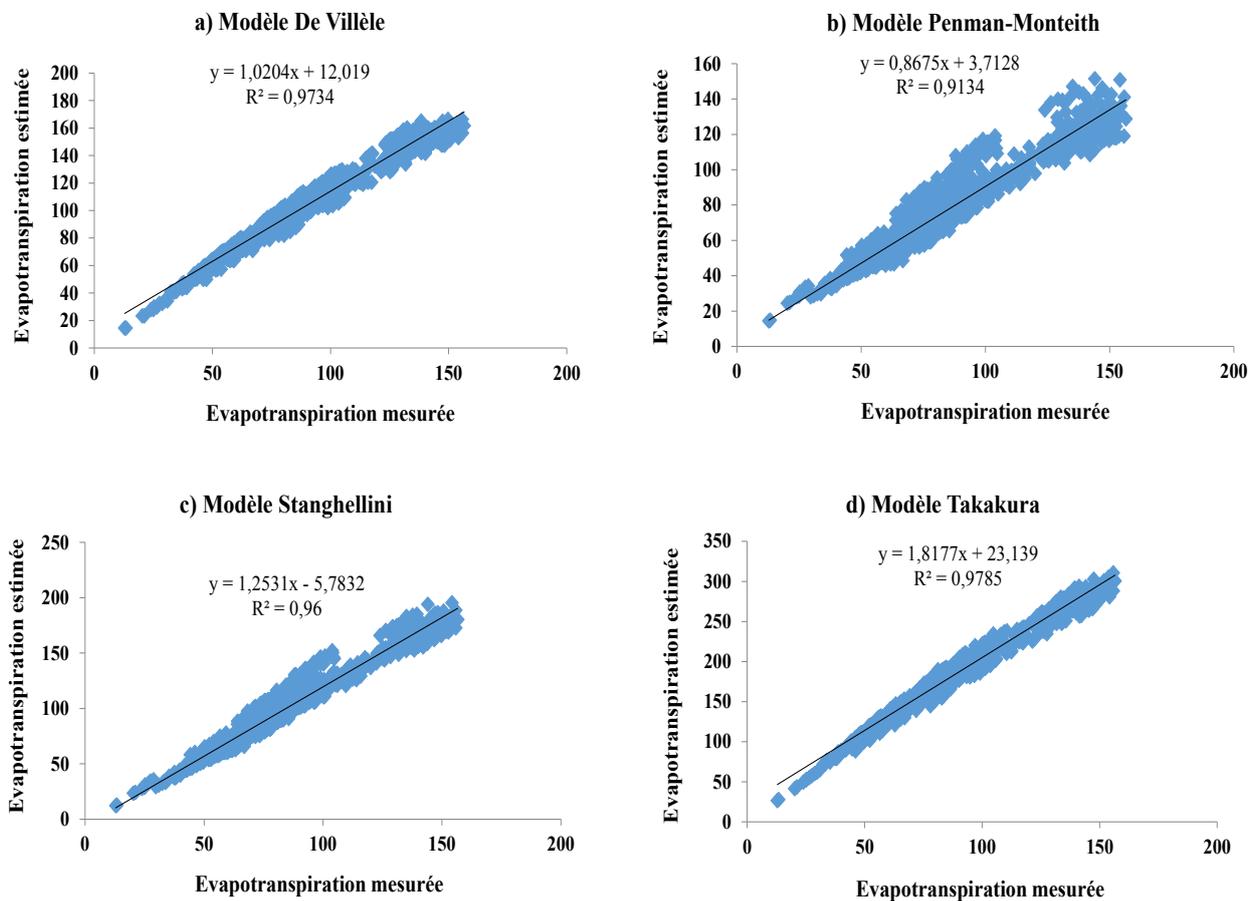


Figure 1: L'évapotranspiration de la tomate estimée par les modèles ; (a) De Villèle (DV), (b) Penman-Monteith (PM), (c) Stanghellini (ST) et (d) Takakura (TK) comparée à celle mesurée par lysimètre sous les deux serres mono-chapelle et canarienne durant deux campagnes de production 2012 et 2013 (992 valeurs journalières)

Tableau 2: Régressions entre l'évapotranspiration mesurée par lysimètre et estimée par les modèles De Villèle (ETDV), Penman-Monteith (ETPM), Stanghellini (ETST) et Takakura (ETTK) par type de serre, année et stade de la culture (Valeurs journalières)

Serre	Année	Stade	Modèle	Équation de régression	R ²
Monochapelle	2012	Octobre-Février	ETDV	$y = 1,2317x + 2,0208$	0,9867
			ETPM	$y = 0,9295x - 1,0286$	0,8457
			ETST	$y = 1,329x - 11,802$	0,9385
			ETTK	$y = 2,0859x + 6,4714$	0,9741
		Mars-Juin	ETDV	$y = 1,1432x + 5,4508$	0,9808
			ETPM	$y = 0,9133x + 1,198$	0,9017
			ETST	$y = 1,3124x - 10,43$	0,9709
			ETTK	$y = 1,919x + 12,782$	0,9703
	2013	Septembre-Février	ETDV	$y = 1,2326x - 1,1803$	0,9941
			ETPM	$y = 1,1207x - 9,8852$	0,8068
			ETST	$y = 1,5253x - 20,864$	0,8881
			ETTK	$y = 2,1352x + 1,6121$	0,9938
Mars-Mai	ETDV	$y = 1,0475x + 4,5642$	0,9890		
	ETPM	$y = 0,824x + 7,1682$	0,9303		
	ETST	$y = 1,2125x - 5,3672$	0,9780		
	ETTK	$y = 1,8295x + 10,035$	0,9847		
Canarienne	2012	Octobre-Février	ETDV	$y = 1,1529x + 2,92$	0,9787
			ETPM	$y = 0,9067x - 1,7674$	0,8411
			ETST	$y = 1,3254x - 12,738$	0,9392
			ETTK	$y = 2,0973x + 7,9339$	0,9674
		Mars-Juin	ETDV	$y = 1,0629x + 7,4028$	0,9794
			ETPM	$y = 0,8973x - 0,6004$	0,9127
			ETST	$y = 1,317x - 12,281$	0,9746
			ETTK	$y = 1,9196x + 16,756$	0,9718
	2013	Septembre-Février	ETDV	$y = 1,1726x - 0,0309$	0,9942
			ETPM	$y = 1,0993x - 10,987$	0,8103
			ETST	$y = 1,526x - 22,461$	0,894
			ETTK	$y = 2,1445x + 3,1285$	0,9923
Mars-Mai	ETDV	$y = 1,0036x + 5,6457$	0,9864		
	ETPM	$y = 0,8081x + 5,9982$	0,9294		
	ETST	$y = 1,2153x - 6,6093$	0,9786		
	ETTK	$y = 1,848x + 12,33$	0,9825		

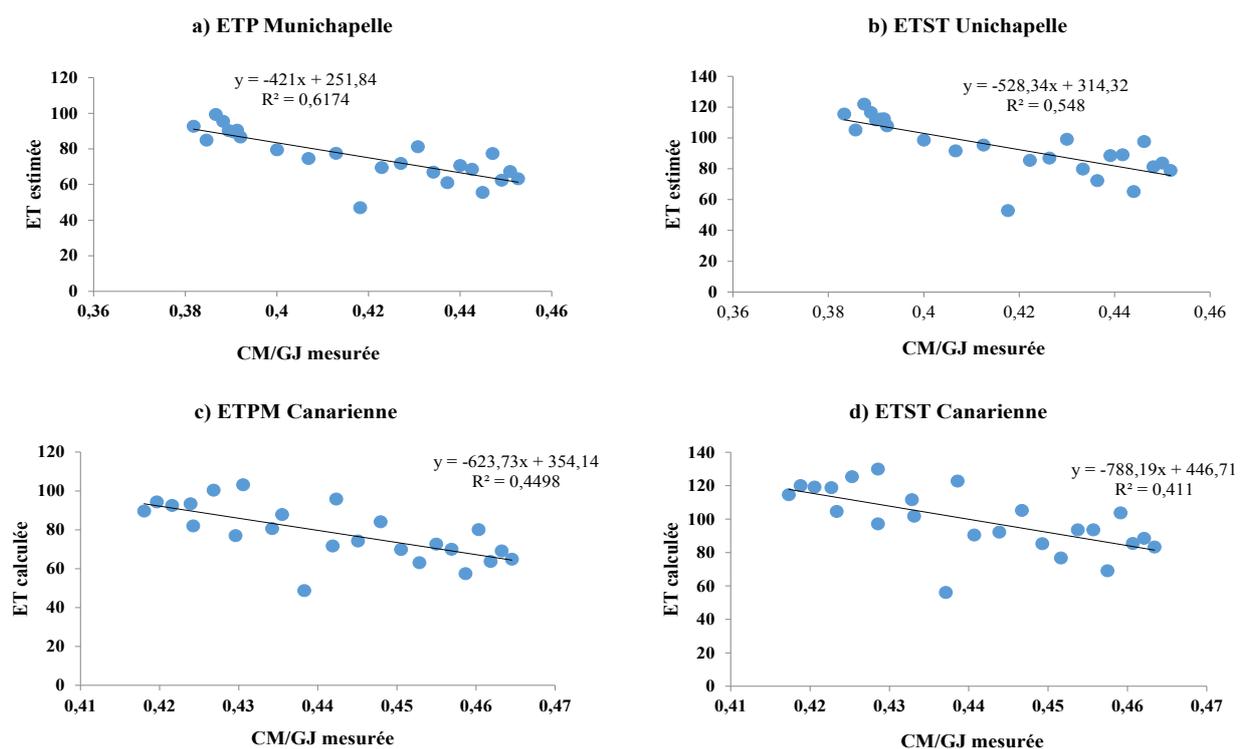


Figure 2: Relation entre l'ET calculée et le taux de contraction maximale par rapport au gain journalier de la tige de la tomate mesuré par les dendromètres (a, b, c et d représentent l'efficacité de la transpiration par modèle et par type de serre)

confort hydrique pour la tomate à des valeurs de CM/GJ ($0,40 < CM/GJ < 0,50$) et une efficacité de transpiration (Eff-TR) comprise entre 70 et 90% où la plante est en équilibre physiologique, cas de la tomate sous le modèle ETST (Figures 3 e,f). Les deux autres situations, concernant une surestimation de l'irrigation (Cas du modèle ETTK) on aura des valeurs de CM/GJ $< 0,42$ et de Eff-TR $< 70\%$ (Figures 3 g,h). La dernière situation quand la plante est exposée à un stress hydrique, CM/GJ $> 0,46$ et Eff-TR $> 90\%$ (Cas du modèle ETPM sur tomate (Figures 3 c,d). Ces indicateurs nécessitent un calibrage par stade de culture, par campagne et par type de serre afin d'avoir des réponses fortement corrélées de ces indicateurs (Fernández et Cuevas, 2010; Ortuno *et al.*, 2010).

Validation du modèle ET par des paramètres agronomiques

Durant la première campagne de production, la variabilité interannuelle était plus marquée pour le nombre de fruits ($3,79 \pm 0,59$) et le rendement ($285,9 \pm 239,1$). Cependant, les autres paramètres de croissance ont enregistré des valeurs plus élevées durant la campagne de production de 2013. Le type de structure de serre utilisé avait un effet très hautement significatif sur presque tous les paramètres étudiés. Le rendement ($327,5 \pm 202$), le nombre ($3,79 \pm 0,57$) et poids de fruits ($0,56 \pm 0,32$) étaient optimales sous serre monochapelle. Par contre, le reste des paramètres avait des valeurs fortes sous la serre canarienne. Concernant l'effet des modèles ET sur ces variables, le modèle ETST influence significativement le nombre ($3,65 \pm 0,67$), le poids de fruits ($0,56 \pm 0,63$) et le rendement ($318,0 \pm 349,5$) de la tomate (Tableau 3). Par ailleurs, la comparaison des moyennes suivant le niveau de rendement a permis de dégager 3 groupes de modèles ET; ETST > ETTK > ETDV ~ ETPM (Selon le test de Tukey).

Ces résultats confirment que le modèle Stanghellini est le plus adapté pour la gestion de l'irrigation de la tomate sous serre monochapelle et canarienne dans la région du Souss-Massa. Ces résultats corroborent ceux des travaux antérieurs sur la comparaison des modèles de l'ET sur tomate, poivron et érable

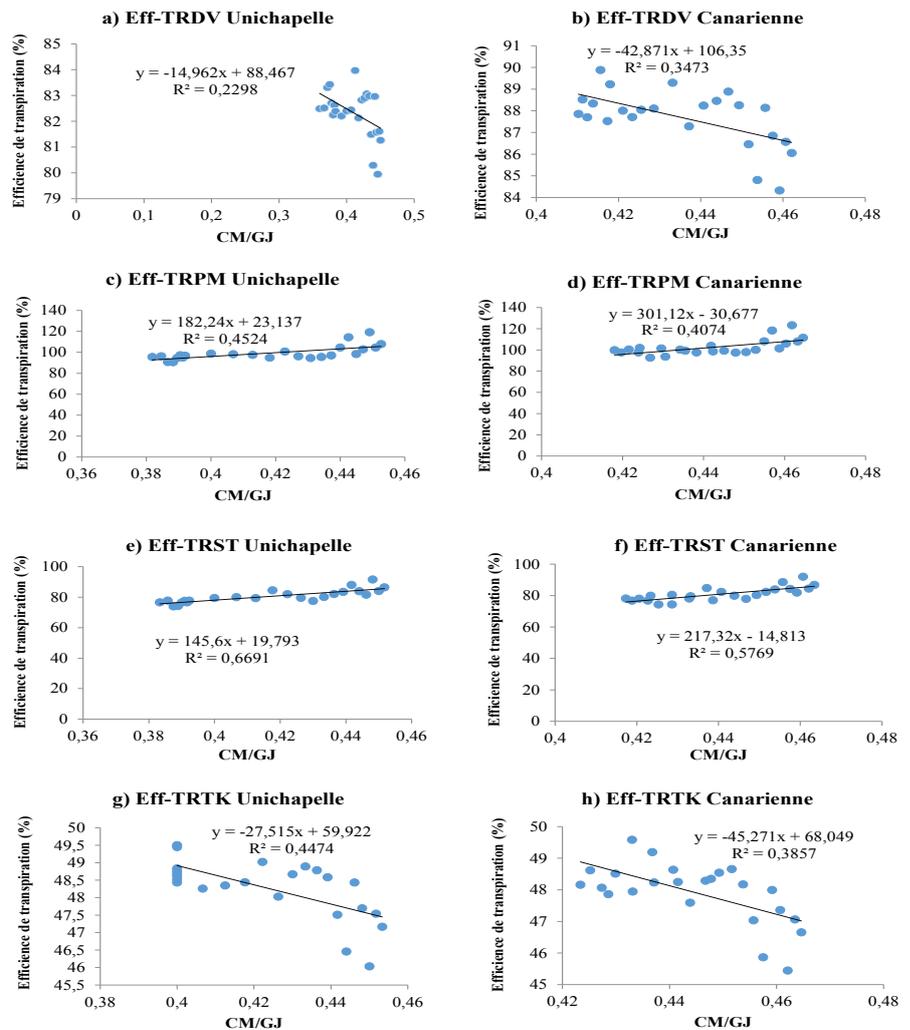


Figure 3: Régression entre l'efficacité de transpiration simulée par modèle et le taux de contraction maximale par rapport au gain journalier de la tige de la tomate mesuré par les dendromètres (a, b, c, d, e, f, g et h représentent l'efficacité de la transpiration par modèle et par type de serre)

Tableau 3: L'analyse de variance des différences entre les paramètres agronomiques mesurés par année, serre et par modèle d'ET

Facteurs	Nombre de fruits	Poids fruits (kg)	Hauteur plante (cm)	Diamètre tige (mm)	Nombre de feuilles	Surface Foliaire (m ²)	Indice foliaire (m ² /m ²)	Rendement (t/ha)
Année	***	ns	***	***	***	***	***	**
2012	3,79 ^a (0,59)	0,48 (0,39)	126,45 ^b (8,63)	14,87 ^b (1,17)	18,98 ^b (2,73)	0,16 ^b (0,02)	3,17 ^b (0,61)	285,9 ^a (239,1)
2013	3,28 ^b (0,56)	0,49 (0,26)	218,92 ^a (11,26)	16,26 ^a (1,32)	25,13 ^a (2,84)	0,26 ^a (0,02)	3,56 ^a (0,62)	251,3 ^b (140,1)
Serre	***	***	*	***	***	***	***	***
Monochapelle	3,79 ^a (0,57)	0,56 ^a (0,32)	169,08 ^b (47,16)	14,81 ^b (0,94)	20,36 ^b (3,27)	0,20 ^b (0,05)	2,87 ^b (0,40)	327,5 ^a (202)
Canarienne	3,28 ^b (0,57)	0,41 ^b (0,33)	176,28 ^a (47,28)	16,32 ^a (1,43)	23,76 ^a (4,24)	0,22 ^a (0,05)	3,86 ^a (0,44)	209,6 ^b (172,1)
Modèle	**	***	ns	ns	ns	ns	ns	***
De Villèle	3,43 ^b (0,58)	0,44 ^b (0,12)	173,18 (46,41)	15,55 (1,36)	22,16 (4,16)	0,218 (0,052)	3,40 (0,62)	235,7 ^c (89,5)
Penman-Monteith	3,49 ^b (0,70)	0,45 ^b (0,13)	171,41 (46,21)	15,52 (1,4)	21,90 (4,05)	0,217 (0,057)	3,36 (0,65)	248,8 ^c (109,7)
Stanghellini	3,65 ^a (0,67)	0,56 ^a (0,63)	172,31 (47,85)	15,56 (1,45)	22,09 (4,18)	0,215 (0,053)	3,35 (0,64)	318,0 ^a (349,5)
Takakura	3,56 ^a (0,53)	0,49 ^b (0,12)	173,83 (49,08)	15,63 (1,5)	22,07 (4,21)	0,215 (0,056)	3,34 (0,68)	271,9 ^b (94,6)

Les niveaux non connectés avec la même lettre sont significativement différents ($\alpha = 0,05$) *Significative ($P < 0,05$); **hautement significative ($P < 0,01$) et *** très hautement significative ($P < 0,001$). Valeurs entre parenthèse: l'écartype.

rouge qui ont souligné que le modèle Stanghellini simule correctement l'évapotranspiration en comparaison avec les autres modèles testés (Lopez-Cruz *et al.*, 2008; Prenger *et al.*, 2002; Villarreal-Guerrero *et al.*, 2012b).

CONCLUSION

Sur la base des résultats de cette étude, le modèle Stanghellini est le plus fiable pour le calcul des besoins en eau des cultures abritées. Néanmoins, il présente quelques inconvénients liés principalement au calcul des résistances aérodynamiques et stomatiques, et la position des capteurs de mesure des variables climatiques. De ce fait, l'exploitation de ce modèle exige un travail de calibrage afin de stabiliser les réponses du modèle par culture et par type de serre et même par région. En effet, les indicateurs biologique et climatique que nous avons identifiés dans ce travail permettent d'élaborer les bases de référence du statut hydrique de la plante et le calibrage des modèles testés, soit par l'actualisation de leurs facteurs ou bien par l'identification de nouveaux facteurs moins laborieux et plus fiables.

En perspective de recherche, on recommande l'application du modèle ETST pour le pilotage d'irrigation directe ou bien automatique de la tomate sous serre. On devrait également étudier l'influence de la position des capteurs climatiques par rapport au couvert végétal et la recherche d'autres indicateurs biologiques plus fiables pour la simulation de la transpiration des plantes. Ces indicateurs peuvent être mesurés facilement par les seristes au moyen des téléphones portable. L'exemple de l'application sur GSM qui donne la température foliaire par imagerie et après traitement de l'image vous recevez une description de l'état hydrique de votre culture. De même, une autre application à développer concerne le flux de sève de la tige mis en relation avec le statut hydrique de la plante ou bien les indicateurs biologiques et climatiques identifiés dans ce travail afin de caractériser la vitesse de mouvement de la sève au niveau de la tige de la plante. Cette application peut être développée pour utilisation par GSM *in situ*, ce qui présente une nouvelle voie de développement de techniques de pilotage d'irrigation par l'utilisation des applications mobiles.

RÉFÉRENCES

- Baille M., Baille A. Delmon D. (1994). Microclimats and transpiration of greenhouse rose crops. *Agri. Forest Meteorology* 71, 83-97.
- Boulard T., Baille A. (1993). A simple greenhouse climate control model incorporating effects of aeration and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology* 65: 145-157.
- Boulard T., Jemaa R. (1993). Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control. *Acta Hort.* 335, 381-388.
- Boutard T., Baille A., Mermier M., Vilette F., (1991). Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomate de serre. *Agronomie*, 11: 259-274.
- Colla G., Roupheal Y., Cardarelli M., Rinaldi, S., Rea, E. (2009). Water use efficiency and transpiration of greenhouse geranium crop. *Acta Hort.* 807: 271-276.
- De Pauw D.J.W., Steppe K., De Baets B. (2008)a. Unraveling the output uncertainty of a tree water flow and storage model using several global sensitivity analysis methods. *Biosystems Engineering* 101: 87-99.
- De Pauw D.J.W., Steppe K., De Baets B. (2008)b. Identifiability analysis and improvement of a tree water flow and storage model. *Mathematical Biosciences* 211: 314-332.
- De Swaef T., Steppe K., Lemeur R. (2009). Determining reference values for stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in young apple trees based on plant responses to water deficit. *Agricultural Water Management* 96: 541-550.
- De Villèle O. (1972). Water requirement of glasshouse crops. Symposium ISHS on Water Supply under glass and plastics.
- Fernández J.E., Cuevas, M.V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 135-151.
- Fuchs M. (1990). Effect of transpiration on greenhouse cooling. Proceedings of the international seminar on British-Israel workshop on greenhouse technology. Agricultural Research Organisation, Bet Dagan Israel, 155- 181.
- Gallardo M., Thompson R.B., Valdez L.C., Fernandez, M.D. (2006)a. Response of stem diameter variations to water stress in greenhouse-grown vegetable crops. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 81: 483-495.
- Gallardo M., Thompson R.B., Valdez L.C., Fernandez, M.D. (2006)b. Use of stem diameter variations to detect plant water stress in tomato. *Irrigation Science* 24:241-255.
- Guix-Hébrard N., Voltz M., Trambouze W., Garnier F., Gaudillère J.P., Lagacherie P. (2007). Influence of water table depths on the variation of grapevine water status at the landscape scale. *European Journal of Agronomy* 27: 187-196.
- Hornbuckle J.W., Christen E.W., Ayars J.E., Faulkner R.D. (2005). Controlled water table management as a strategy for reducing salt loads from subsurface drainage under perennial agriculture in semi-arid Australia. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 145-159.
- Jolliet O., Baily B.J. (1992). The effects of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. *Agric. and Forest Meteor.* 58: 43-62.
- Intrigliolo D.S., Castel J.R. (2007b). Crop load affects maximum daily trunk shrinkage of plum trees. *Tree Physiology* 27: 89-96.
- Katerji N., Rana G. (2006). Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean climate conditions. *Agric. and Forest Meteor.* 138: 142-155.
- Lopez-Cruz I.L., Olivera-Lopez M., Herrera-Ruiz G. (2008). Simulation of greenhouse tomato crop transpiration by two theoretical models. In: Proceedings of the International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions, pp. 145-150.
- McFadyen L., Grieve A.M. (2012). Effects of irrigation management and water table depth on growth and yield of field-grown Sultana grapevines in south eastern Australia. *Agricultural Water Management* 111: 20-26.

- Monteith J.L. (1965). Evaporation and environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*, 19th Symp, Society for Experimental Biology, London, U.K, pp. 205–234.
- Morille B., Migeon C., Bournet B.E. (2013). Is the Penman–Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. *Sci. Hort.* 152: 80-91.
- Ortuno M.F., Conejero W., Moreno F., Moriana A., Intrigliolo D.S., Biel C., Mellisho C.D., Pérez-Pastor A., Domingo R., Ruiz-Sánchez M.C., Casadesus J., Bonany J., Torrecillas A. (2010). Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management* 97: 1–11.
- Pagán E., Pérez-Pastor A., Domingo R., Conesa M.R., Caro M. (2012). Suitability of trunk diameter reference lines for irrigation scheduling with saline water in late mandarin trees with different crop load. *Agricultural Water Management* 111: 11-19.
- Papadakis G., Frangoudakis A., Kiribis S. (1994). Experimental investigation and modelling of heat and mass transfer between-a-tomato crop and the greenhouse environment. *J. Agric. Engng. Res.*, 57: 217-227.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. In: *Proceedings of the Royal Society London*.
- Perez-Lopez D., Moriana A., Rapoport H., Olmedilla M., Ribas F. (2008). New approach for using trunk growth rate and endocarp development in the irrigation scheduling of young olive orchards. *Scientia Horticulturae* 115:244–251.
- Prenger J.J., Fynn R.P., Hansen R.C. (2002). A comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment. *Trans. ASAE* 45: 1779–1788.
- Stanghellini C. (1987). *Transpiration of Greenhouse Crops. An Aid to Climate Management*. Agricultural University, Wageningen.
- Takakura T., Takayama K., Nishina H., Tamura K., Muta S. (2005). Evapotranspiration estimate by heat balance equation. ASAE Paper No. 054151, St. Joseph, Mich. ASAE, 9 pp.
- Takakura T. (2008). Plant solarimeter for energy balance. *Acta Hort.* 801: 615–620.
- Takakura T., Kubota C., Sase S., Hayashi M., Ishii M., Takayama K., Nishina H., Kurata K., Giacomelli G.A. (2009). Measurement of evapotranspiration rate in a single-span greenhouse using the energy balance equation. *Biosyst. Eng.* 102: 298–304.
- Rana G., Katerji N., Lazzara P., Ferrara R.M. (2012). Operational determination of daily actual evapotranspiration of irrigated tomato crops under Mediterranean conditions by one-step and two-step models: Multiannual and local evaluations. *Agricultural Water Management* 115: 285-296.
- Villarreal-Guerrero F., Kacira M., Fitz-Rodríguez E., Kubota C., Giacomelli G.A., Linker R., Arbel A. (2012)a. Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and variable high-pressure fogging. *Sci. Hort.* 134: 210–221.
- Villarreal-Guerrero, F., Kacira, M., Fitz-Rodríguez, E., Linker, R., Kubota, C., Giacomelli, G.A., Arbel, A. (2012) b. Simulated performance of a greenhouse cooling control strategy with natural ventilation and fog cooling. *Biosyst. Eng.* 111: 217–228.
- Yang X., Short T., Fox W. (1990). Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of greenhouse cucumber crop. *Agric. Forest Meteor.*, 5: 197-209.