

Evapotranspiration d'un verger d'oranger en conditions semi-arides: mesure et modélisation

Saïd KHABBA¹, Salah ER-RAKI², Lionel JARLAN³, Noureddine AMENZOU⁴, Michel LE PAGE³

¹ LMME, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc;

² LP2M2E, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, Maroc;

³ CESBIO, Centre d'Etudes Spatiales de la BIOsphère, Toulouse, France;

⁴ CNESTEN, Unité Eau et Climat, Rabat, Maroc;

(khabba@uca.ma, s.erraki@uca.ma, lionel.jarlan@ird.fr, Michel.Le_page@ird.fr, j.ezzahar@gmail.com)

Résumé : Ce travail présente une étude expérimentale et par modélisation des besoins en eau (évapotranspiration) d'un verger d'oranger, irrigué par un système de goutte-à-goutte, en conditions semi-arides. L'étude expérimentale a été réalisée, de 2007 à 2010, sur un verger de mandarine situé à Agafay, 35 km au sud-ouest de Marrakech. Un système d'Eddy covariance a été installé pour contrôler en continu les flux verticaux de chaleur sensible (H_{ec}) et de chaleur latente (λET_{ec}). En parallèle, les différentes composantes du bilan radiatif à la surface et le flux thermique dans le sol sont également mesurés. La modélisation de l'évapotranspiration actuelle (λET_{act}) a été réalisée par le modèle résistif de Penman-Monteith. La comparaison entre λET_{ec} et λET_{act} a montré de bonnes relations pour les données horaires et journalières. Pour les quatre années d'étude, les coefficients de détermination (R^2) sont supérieurs à 0,78 et les régressions linéaires sont très proches de la première bissectrice.

Mots clés : Evapotranspiration, Eddy covariance, Penman-Monteith, Oranger, Goutte-à-goutte, Semi-aride.

1. Introduction

La croissance démographique mondiale a entraîné une explosion des demandes en eau dans le monde. La pénurie d'eau est susceptible d'être exacerbée dans un avenir proche sous les effets combinés de l'altération du cycle hydrologique, des changements climatiques et de l'augmentation de la demande en eau pour l'agriculture, l'urbain et l'industrie [1].

Dans les zones arides et semi-arides en général et sur la région sud-Méditerranéenne en particulier, la consommation d'eau a considérablement augmenté au cours des dernières décennies, alors que les ressources en eau disponibles se raréfient. D'ailleurs, la région sud de la Méditerranée est déjà déclarée comme un hot spot du changement climatique [1].

Au Maroc, l'irrigation est très consommatrice en eau; il est estimé qu'environ 83% des ressources disponibles est utilisée par l'agriculture avec une efficacité inférieure à 50% [2]. La région de Tensift Al-Haouz, typique des bassins de la méditerranée du sud, se caractérise par un climat semi-aride (l'évapotranspiration potentielle est d'environ 1600 mm/an contre une pluviométrie moyenne annuelle de 250 mm). Dans ces conditions, l'irrigation des cultures est inévitable pour la croissance et le développement.

Devant cette situation, une gestion rationnelle et rigoureuse de l'eau dans le domaine agricole s'avère nécessaire. Cette préoccupation constitue l'un des principaux axes développés dans le cadre du programme SudMed [3] et le Laboratoire Mixte International TREMA (<http://trema.ucam.ac.ma>), installés à Marrakech depuis 2002 et 2011, respectivement. L'approche scientifique adoptée consiste à étudier les besoins réels en eau des cultures en s'appuyant sur la synergie entre l'observation terrain, la modélisation des processus et l'observation satellite. Ainsi, depuis 2001, les études réalisées se sont focalisées sur les différentes cultures dominantes dans la plaine de Tensift ; blé, olivier, oranger et abricotier [4].

L'étude présentée dans cette communication fait partie des activités de ces deux programmes. Elle concerne la mesure et la modélisation des besoins en eau d'un verger d'orangers, irrigué par le goutte-à-goutte. Cette culture est une composante principale des agrumes au Maroc qui couvrent environ 44 500 ha (<http://www.legume-fruit-maroc.com/agrumes.php>).

2. Matériels et méthodes

2.1. Site et mesures expérimentales

Le site étudié est un verger de mandarine (variété Afourar) planté en juillet 2000, situé à Agafay (35 km au sud-ouest de Marrakech). Il s'étale sur une superficie de 38 ha, avec une densité de plantation $4 \times 6 \text{ m}^2$ et une

fraction du couvert d'environ 0.35. Le mode d'irrigation est le goutte-à-goutte et la texture du sol est sableux-limoneux (50% sable, 32% limon, et 18% argile).

Depuis avril 2006, le site est équipé par tous les capteurs nécessaires à la mesure des flux (hydrique et thermique) échangés entre le sol, végétation et atmosphère. Il s'agit de :

- système d'eddy covariance qui contrôle les flux de chaleur sensible (H_{ec}) et de chaleur latente (λET_{ec}) (Figure 1a),
- net radiomètre (CNR1) qui mesure le rayonnement net de la surface sol-végétation (R_n) (Figure 1a),
- plaquettes de flux (HPF01, Campbell Sci), enterrées à 5 cm, pour évaluer le flux de chaleur dans le sol (G) (Figure 1b),
- station météorologique complète qui mesure les différentes variables météorologiques.

Dans ce travail, les données de quatre ans (de 2007 à 2010) sont utilisées.



Figure 1: (a) Eddy Covariance et radiométrie, (b) mesure des flux dans le sol.

2.2. Modèle d'évapotranspiration

La modélisation de l'évapotranspiration réelle (λET_{mod}) du verger d'oranger étudié est faite à l'aide du modèle de Penman-Monteith. λET_{mod} est calculée, au pas de temps de 30 min, en utilisant :

$$\lambda ET_{mod} = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho c_p D}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (1)$$

Où toutes les variables sont mesurables par une station agro-météorologique standard. a et b dépendent de la relation choisie (équation 5 ou 6, selon la valeur de R_n).

L'utilisation de ce modèle nécessite la détermination de la résistance aérodynamique (r_a) et de la résistance du couvert (r_c). r_a est calculée, à un point de référence z situé dans la couche limite au-dessus du couvert, par :

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z - 0.67h_c}{0.13h_c}\right) \ln\left(\frac{z - 0.67h_c}{h_c - 0.67h_c}\right)}{0.16u_z} \quad (2)$$

La résistance du couvert r_c , pour les cultures irriguées, n'est pas une constante. Elle change selon l'énergie disponible et le déficit de la pression de la vapeur ($D = e_s - e_a$). Dans cette étude, nous proposons d'utiliser un modèle linéaire pour calculer r_c [5]:

$$\frac{r_c}{r_a} = a \frac{r^*}{r_a} + b \quad (3)$$

a et b sont des coefficients d'ajustement et r^* ($m s^{-1}$) est la résistance critique. Cette résistance représente r_c pour laquelle la valeur de λET est indépendante de r_a ($d\lambda ET/dr_a = 0$). Le développement du calcul donne :

$$r^* = \frac{\Delta + \gamma \frac{\rho c_p D}{R_n - G}}{\Delta \gamma} \quad (4)$$

Signalons que pour des raisons pratiques, on ne se place jamais au moment du lever ou du coucher du soleil, car lorsque le rayonnement net tend vers zéro, la résistance critique r^* n'a plus de sens physique. La résistance r^* est considérée comme résistance climatique, par ce qu'elle dépend seulement des paramètres météorologiques. Elle représente le seuil entre les deux situations pour lesquelles : i) λET augmente avec la vitesse du vent ($r_c < r^*$), et ii) λET diminue lorsque la vitesse du vent augmente ($r_c > r^*$).

Dans ce travail, la résistance r_c est calculée par ajustement du modèle de Penman-Monteith (équation 1). Cet ajustement est réalisé en utilisant les données complètes de l'année 2007 pour avoir des valeurs de r_c renseignant la variabilité météorologique intra-annuelle. Les valeurs de λET utilisées sont celles mesurées par Eddy covariance. Les autres termes de l'équation (1), à savoir R_n , G , D , r_a et Δ , sont déduits du microclimat du site étudié. Ensuite, les valeurs de r_c calculées sont utilisées pour déterminer les coefficients empiriques a et b de l'équation (3). Cette dernière est introduite dans le modèle de Penman-Monteith qui est validé, enfin, sur les données relatives aux trois ans 2008-2010.

3. Résultats et discussions

3.1. Fermeture du bilan d'énergie

Le bouclage du bilan d'énergie à la surface du couvert est un indicateur important de la fiabilité des mesures des flux thermiques à l'interface sol-végétation-atmosphère. En négligeant le terme de stockage d'énergie dans le couvert à l'échelle journalière [6] et en assumant le principe de conservation de l'énergie, la fermeture du bilan énergétique est définie par la qualité du bilan $R_n - G - H_{ec} - \lambda E_{ec} = 0$. Afin de vérifier cette fermeture pendant la période d'étude, nous avons comparé l'énergie disponible à la surface ($R_n - G$) et la somme des flux turbulents ($H_{ec} + \lambda E_{ec}$) à deux échelles, demi-horaire et journalière pour les quatre années d'étude 2007-2010.

La qualité de la corrélation entre ($R_n - G$) et ($H_{ec} + \lambda E_{ec}$) a été évaluée par la droite de régression et le coefficient de détermination R^2 . La figure 2 présente un exemple du bouclage de l'énergie pour les données journalières relatives à l'année 2007. Les résultats obtenus montrent que la fermeture du bilan d'énergie est bien vérifiée par comparaison avec les résultats d'autres études [6, 7]. Les résultats (non montrés) sont similaires, pour les trois années et les deux échelles temporelles considérées (demi-horaire et journalière), Les droites de régression sont très proches de la première bissectrice et les valeurs de R^2 sont généralement proches de 1.

La différence obtenue, entre ($R_n - G$) et ($H_{ec} + \lambda E_{ec}$), s'explique par la combinaison de plusieurs facteurs. A titre d'exemple, la sous-estimation des flux mesurés par le système d'Eddy Covariance pourrait être due à l'atténuation des signaux turbulents à des fréquences suffisamment basses ou élevées [7]. La différence entre les surfaces sources des instruments aussi a un impact très important sur la fermeture du bilan d'énergie. La surface source des capteurs qui mesurent l'énergie disponible (Rayonnement net et le flux conductif dans le sol) est très petite par rapport à celle du système d'Eddy Covariance qui peut changée rapidement selon la vitesse et la direction du vent et les conditions de surface. De plus, l'énergie stockée dans la biomasse n'a pas été considérée dans le bilan énergétique. Dans ce contexte, Scott et al. [8] ont évalué le stockage dans la biomasse à environ 5 à 10% de l'énergie disponible, ce qui pourrait expliquer une partie de la non-fermeture du bilan énergétique.

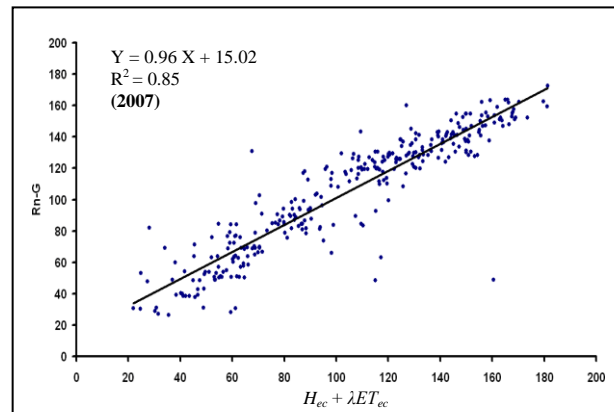


Figure 2 : Comparaison des flux journaliers de l'énergie disponible ($R_n - G$) et des flux turbulents ($H_{ec} + \lambda E_{ec}$), mesurés par Eddy Covariance (exemple l'an 2007).

3.2. Modélisation de l'évapotranspiration

On rappelle que la modélisation de l'évapotranspiration dans ce travail est basée sur le modèle de Penman-Monteith. Avant de présenter les résultats de la calibration et de la validation de ce modèle, la vérification expérimentale de la relation entre la résistance du couvert r_c et celle critique r^* s'avère préalable.

3.2.1. Vérification expérimentale

Bien que l'idée de traduire les variations de r_c/r_a en fonction de r^*/r_a paraisse a priori réduisante, elle se heurte néanmoins à la complexité des interactions entre biologie et climat. A titre d'exemple, nous présentons sur la figure 3 l'évolution des rapports r_c/r_a et r^*/r_a au cours d'une journée. Sur cette figure on constate que :

- r_c/r_a est minimal au milieu de la journée et relativement élevé le matin et surtout l'après-midi.
- r^*/r_a varie dans le même sens: il est élevé le matin, prend des valeurs minimales en milieu de la journée et augmente fortement dans l'après-midi. Cependant, on peut remarquer que l'écart entre les deux rapports est relativement important entre 11h 30 min et 16h 30 min.

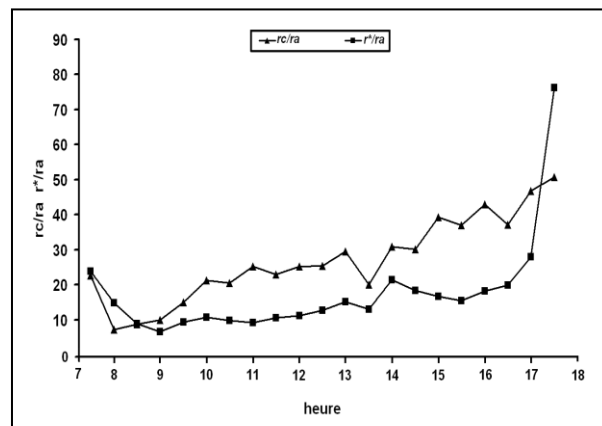


Figure 3 : Exemple d'évolution journalière de r_c/r_a et r^*/r_a pour l'oranger d'Agafay (31 Mars 2010).

Pour la même valeur de r^*/r_a , le rapport r_c/r_a observé à 13h est trois fois supérieur à celui observé à 8h 30 min. Il est donc important de distinguer, dans la calibration du modèle, les valeurs obtenues en conditions de faibles rayonnements ($R_n < 250 \text{ W m}^{-2}$) qui font intervenir une régulation de type photique [5] de celle obtenues en conditions de forts rayonnements ($R_n > 250 \text{ W m}^{-2}$).

3.2.2. Calibration du modèle de Penman-Monteith

La calibration du modèle de Penman-Monteith est faite par l'ajustement du rapport r_c/r_a pour que λET_{mod} , estimé par le modèle, coïncide avec celle mesurée par l'Eddy covariance λET_{ec} , durant l'année 2007. Les figures 4a et 4b présentent la variation du rapport r_c/r_a en fonction de r^*/r_a pour les valeurs demi-horaires obtenues dans les conditions de faibles et forts rayonnements, respectivement.

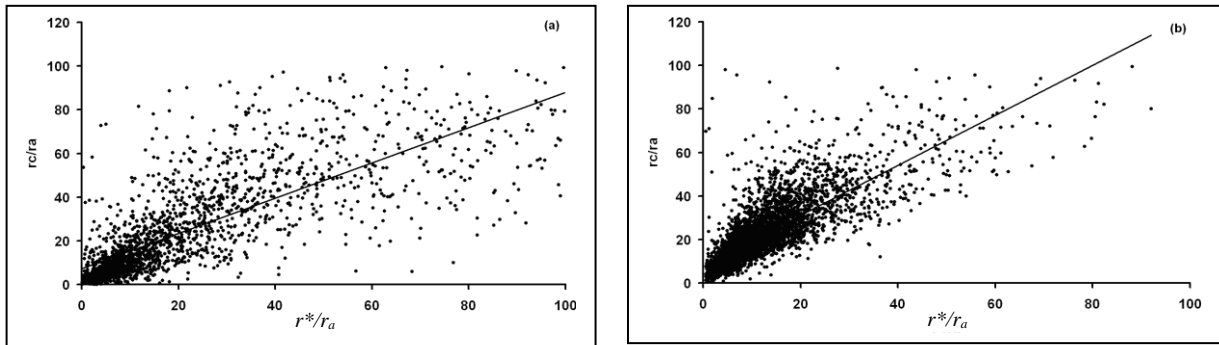


Figure 4 : Relation entre les rapports r_c/r_a et r^*/r_a . r_c/r_a est calculé par ajustement du modèle de Penman-Monteith sur les données de 2007. (a) faibles rayonnements $R_n < 250 \text{ W/m}^2$, (b) forts rayonnements $R_n > 250 \text{ W/m}^2$.

A partir de ces résultats, on remarque bien l'existence d'une bonne relation entre la résistance du couvert (r_c) et celle critique (r^*) avec un effet remarquable de l'intensité du rayonnement. Pour les deux gammes de rayonnement fort et faible, les corrélations obtenues sont :

$$\frac{r_c}{r_a} = 0.81 \frac{r^*}{r_a} + 7.18 \quad (R^2=0.72) \quad \text{pour } R_n < 250 \text{ W/m}^2 \quad (5)$$

$$\frac{r_c}{r_a} = 1.15 \frac{r^*}{r_a} + 8.24 \quad (R^2=0.81) \quad \text{pour } R_n > 250 \text{ W/m}^2 \quad (6)$$

Rappelons que le matin, surtout en hiver et au printemps, il y a souvent de la rosée et que l'on se retrouve plus au moins dans le cas général (r_c petite et r_c/r_a petit). Soulignons enfin que les cas de mauvaises relations entre r_c/r_a et r^*/r_a sont précisément les moments de plus faible évapotranspiration qui n'ont pas d'effet significatif sur la moyenne journalière.

3.2.3. Validation du modèle

Nous avons calculé l'évapotranspiration demi-horaire λET_{mod} , pour les trois ans 2008-2010, avec le modèle de Penman-Monteith combiné aux relations r_c/r_a et r^*/r_a , obtenues pour 2007. A signaler que les trois ans 2008-2010 avaient des pluviométries contrastées. Ainsi, la validation du modèle sur ces données constitue un bon test du modèle et surtout les relations développées entre r_c/r_a et r^*/r_a (équations 5 et 6).

Les figures 5a et 5b présentent la comparaison entre l'évapotranspiration demi-horaire estimée par le modèle λET_{mod} et celle mesurée par le système Eddy covariance λET_{ec} relatives aux données de 2009 (comme exemple).

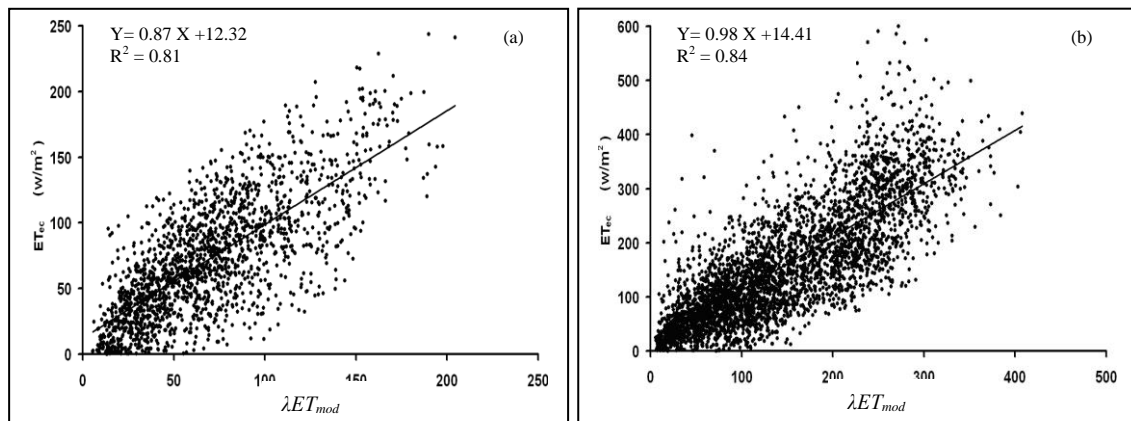


Figure 5 : Relation entre λET_{mod} calculée par le modèle de Penman-Monteith calibré et λET_{ec} mesurée par Eddy covariance pendant l'année 2009. (a) $R_n < 250 \text{ W/m}^2$, (b) $R_n > 250 \text{ W/m}^2$.

Les résultats obtenus, pour les trois ans 2008-2010 et pour les deux échelles demi-horaires et journalières, montrent de très bonnes relations entre λET_{mod} et λET_{ecs} pour les deux gammes de R_n . L'ajustement linéaire de cette relation conduit à des droites très proches de la première bissectrice. Les pentes et les constantes sont très proches de 1 et de 0, respectivement. Dans les différents cas, le coefficient de détermination R^2 est supérieur à 0.78. Ces résultats sont considérés très encourageants considérant l'inertie thermique importante de la surface (le sol en particulier) qui peut conduire à un certain déphasage entre la demande climatique et la réponse de la surface.

Conclusion

A l'issue de ce travail, on peut conclure que la résistance du couvert végétal (r_c) est liée de manière satisfaisante à la résistance critique (r^*). Les relations linéaires obtenues montrent que l'effet climatique l'emporte sur l'effet biologique dans le processus d'évapotranspiration. Après la calibration de r_c , le modèle de Penman-Monteith a montré une bonne aptitude à reproduire l'évapotranspiration mesurée, pour les deux gammes de rayonnements nets (faibles $R_n < 250 \text{ W/m}^2$ et forts $R_n > 250 \text{ W/m}^2$).

En perspective, la stabilité de la relation entre r_c et r^* mérite d'être testée d'avantage sur la culture d'orange ainsi que sur les autres cultures arborées de la région ayant différentes caractéristiques biophysiques.

Nomenclature

Symbole		Symboles grecs	
h_c	hauteur moyenne du couvert végétal, m	ρ	densité de l'air, $kg \ m^{-3}$
G	flux thermique de chaleur dans le sol, $W \ m^{-2}$	γ	constante psychrométrique, $kPa \ C^{-1}$
C_p	la chaleur spécifique de l'air, $J \ kg^{-1} \ C^{-1}$	Δ	la pente de la courbe de la pression de la vapeur saturante à la température de l'air, $kPa \ C^{-1}$
$e_s - e_a$	déficit de la pression de la vapeur d'air, kPa		
r_a	résistance aérodynamique, $s \ m^{-1}$		
r_c	résistance du couvert, $s \ m^{-1}$		
r^*	résistance critique, $s \ m^{-1}$	Exposant, Indices	
R_n	rayonnement net au-dessus du couvert, $W \ m^{-2}$	a	air
u	vitesse du vent, $m \ s^{-1}$	c	couvert
		n	net
		s	stomate

Références

- [1] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), <http://www.ipcc.ch/>, 2009.
- [2] Plan Bleu, Etat de L'environnement et du Développement en Méditerranée, *Rapport d'activités régionales PNUD/PAM*, page 208, 2009.
- [3] A. Chehbouni, R. Escadafal, G. Boulet et al., An integrated modelling and remote sensing approach for hydrological study in semi-arid regions: the SUDMED Program, *International Journal of Remote Sensing*, 29, 5161–5181, 2008.
- [4] S. Khabba, L. Jarlan, S. Er-Raki, M. Le Page, J. Ezzahar, G. Boulet, V. Simonneaux, M.H. Kharrou, L. Hanich, G. Chehbouni, The SudMed program and the Joint International Laboratory TREMA: A decade of water transfer study in the Soil-Plant-Atmosphere system over irrigated crops in semi-arid area, *Procedia Environmental Sciences*, in press
- [5] N. Katerji, M. Hallaire, Y. Menoux-Boyer, B. Durand, Modelling diurnal patterns of leaf water potential in field conditions, *Ecological Modelling*, 33: 185–203, 1986.
- [6] L. Testi, F.J. Villalobos, F. Orgaz, Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121: 1-18, 2004.
- [7] J. Ezzahar, S. Er-Raki, H. Marah, S. Khabba, N. Amenzou, G. Chehbouni, Coupling Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer model with Energy Balance model for estimating energy and water vapor fluxes over an olive orchard in semi-arid region, *Global Changes*, 1: 1-8, 2012.
- [8] R.W.C. Scott, J. Garatuza-Payan, E. Edwards, D.C. Goodrich, D.G. Williams, W.J. Shuttleworth, The understory and overstory partitioning of energy and water fluxes in an open canopy, semi-arid woodland, *Agricultural and Forest Meteorology*, 114: 127-139, 2003.