

## LA MODÉLISATION : UNE AIDE À LA GESTION DE L'IRRIGATION DE PRÉCISION. CAS DE L'ORANGERAIE D'EL-SALAM, NORD SINAI, ÉGYPTE

NIZINSKI J. J. <sup>(1)</sup>, MONTOROI J.-P. <sup>(1)</sup>, ZAGHLOUL A. <sup>(2)</sup>, ALI R. <sup>(2)</sup>, SABER M. <sup>(2)</sup>

(1) Institut de Recherche pour le Développement, UMR 242, Institut d'Écologie et des Sciences de l'Environnement - IEES de Paris, Département SOLÉO, Equipe BioPhys, Centre d'Île de France, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy, France [georges.nizinski@ird.fr ; jean-pierre.montoroi@ird.fr]

(2) National Research Centre (NRC), Soils and Water Use Department, Cairo, 33 Al Behous, Dokki Ad Doqi, Giza, Egypt [alaazaghoul2002@yahoo.com ; bediertop@yahoo.com ; msaber1941@yahoo.com]

**Résumé** – Des études sur l'économie de l'eau dans le delta du Nil ont été menées en 2011-2012 à l'Institut de Recherche pour le Développement. L'orangerie El-Salam a été choisie comme station d'étude étalon. Ces études concernent le mode de gestion de l'irrigation de précision, avec comme perspective, la mise au point d'un modèle utilisable pour la gestion de l'irrigation d'autres cultures dans l'ensemble du delta du Nil. Ce modèle de l'évapotranspiration réelle fonctionne avec un pas de temps d'une journée et utilise l'approche de Penman-Monteith qui tient compte de la spécificité d'un couvert (résistance du couvert). Les variables d'entrée du modèle sont les données météorologique standard issues des stations météorologique du réseau national. Nous avons comparé les doses d'irrigation appliquées à l'orangerie ( $I=994,30 \text{ mm an}^{-1}$  ;  $2,72 \text{ mm jour}^{-1}$  ; le coefficient cultural  $ETR/Ep=0,78$ ) avec les besoins en eau issus du modèle ( $ETR_{calculée}$ ) : cette comparaison nous permet de proposer une gestion quotidienne de l'irrigation plus économe en eau. Les pertes en eau (drainage hors de la zone racinaire) sont de  $94\,570 \text{ m}^3 \text{ d'eau an}^{-1}$  pour l'ensemble de la plantation de 80 ha, soit  $1.182 \text{ m}^3 \text{ d'eau an}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ . Connaissant le coût élevé d'acheminement de l'eau vers les cultures, ces résultats peuvent être pris en compte dans l'aménagement hydraulique des sites de production.

**Mots-clés** : irrigation, rapport de Bowen, évapotranspiration réelle, orangerie, Delta du Nil.

**Abstract** – Use of the modelling in irrigation management of the El-Salam orange grove in the Northern Sinai, Egypt. Studies on the soil-water management in the Delta of the Nile (Egypt) were carried out into 2011-12 by the Institut de Recherche pour le Développement. The El-Salam orange orchard was selected like the standard station to studies the management of accurate irrigation, with a development of a model which would help the management of the irrigation on other crop covers in the Delta of the Nile. Model simulated the actual evapotranspiration with a one day step resolution, using the approach of Penman-Monteith (with the daily input data - standard data from the national network of weather stations) by taking account of specificity of crop cover (cover resistance). We compared the amounts of irrigation applied to the orange orchard ( $I=994.30 \text{ mm year}^{-1}$  ;  $2.72 \text{ mm day}^{-1}$  ; crop coefficient  $Ea/Ep=0.78$ ) with the requirements of water estimated by model ( $Ea_{simulated}$ ): this comparison enables us to propose daily amount irrigation. It is reasonable to retain the water losses of  $94,570 \text{ m}^3$  of water  $\text{year}^{-1}$  for the total area of the plantation (80 ha; drainage out of the roots zone), thus  $1,182 \text{ m}^3$  of water  $\text{year}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ . These losses of water are to be dealing with hydraulic adjustment of the sites of the crop production and the costs of routing of water.

**Keywords**: irrigation, Bowen ratio, actual evapotranspiration, orange orchard, Delta of the Nile.

### Introduction

Les études sur l'économie de l'eau dans le delta du Nil ont été menées en 2011-2012 à l'UMR Bioemco (Institut de Recherche pour le Développement) dans le cadre d'un programme *Sustainable Management of Adverse Impacts on Farming and Soil Ecosystem Associated with Long Term Use of Low Quality Irrigation Water*, en collaboration avec les équipes de National Research Center, Soils and Water Use Department, du Caire (Braudeau et Zaghoul, 2010). L'orangerie El-Salam (nord du Sinai), irriguée par des eaux mélangées — eaux de drainage et eaux du Nil (le canal West-East El-Salam) — a été choisie comme station d'étude *étalon* pour les recherches sur le mode de gestion d'irrigation de précision, avec comme perspective la mise au point d'un modèle qui pourrait aussi être utilisé pour la gestion de l'irrigation d'autres cultures dans l'ensemble du delta du Nil. Pour estimer les doses d'irrigation pour l'orangerie (couvert épars), le coefficient cultural (rapport  $ETR/Ep$ ) (Allen *et al.*, 1998) a été utilisé. Il a été déterminé à partir : (a) de l'équation du bilan hydrique des zones racinaires des sols des plantations, méthode peu précise pour les calculs de l'évapotranspiration réelle des couverts éparsés situés en zones semi-arides ; et (b) de la valeur de l'évapotranspiration potentielle faisant référence au gazon bien alimenté en eau. L'application de ce coefficient aux plantations de citrus est discutée (Rana *et al.*, 2005). Nous

avons comparé les valeurs de ce coefficient cultural avec celles issues de la bibliographie sur d'autres plantations en zones semi-arides. Actuellement, on dispose de deux méthodes expérimentales pour déterminer avec précision l'évapotranspiration réelle, la méthode de rapport de Bowen et la méthode des corrélations. Nous avons estimé l'évapotranspiration réelle de l'orangerie avec un pas de temps de vingt minutes en utilisant la méthode du rapport de Bowen, méthode qui permet de quantifier l'évapotranspiration réelle des couverts végétaux et leurs résistances à partir des mesures des gradients de température et d'humidité de l'air, du rayonnement net et du flux de chaleur dans le sol. Ces mesures nous ont permis de construire un modèle de l'évapotranspiration réelle avec un pas de temps d'une journée, utilisant l'approche de Penman-Monteith (avec, comme variables d'entrée, les données météorologiques standard issues des stations météorologiques du réseau national), en tenant compte de la spécificité du couvert (ici la résistance du couvert, et en particulier la relation résistance stomatique/potentiel hydrique des feuilles). Nous avons validé le modèle à partir des mesures de la réserve en eau et des potentiels hydriques des sols de l'orangerie étudiée, puis proposé d'améliorer ce modèle. La comparaison des doses d'irrigation appliquées à l'orangerie avec les besoins en eau issus du modèle nous a permis de proposer une gestion quotidienne de l'irrigation plus économe en eau.

## 1. Matériels et méthodes

### 1.1. Caractéristiques géographiques des stations d'études et dispositif expérimental

La zone d'étude, le delta du Nil (Fig. 1) — partie nord-ouest du Sinaï — est située sur la façade méditerranéenne de l'Égypte (superficie de 24 000 km<sup>2</sup>). Cette région est soumise à un climat de type saharien au sud du pays — très chaud et très sec — ; il s'adoucit vers le nord, grâce à l'influence de la Méditerranée, avec des précipitations moyennes annuelles de  $P_i=95,4 \text{ mm an}^{-1}$ , une évapotranspiration potentielle (Penman, 1948) de  $1\,271 \text{ mm an}^{-1}$  ( $ETP=3,48 \text{ mm j}^{-1}$ ), un rayonnement global moyen annuel journalier de  $21,6 \text{ MJ j}^{-1}$ , une durée d'insolation moyenne journalière de 9,1 h, une température moyenne annuelle de l'air de  $20,3^\circ\text{C}$ , une humidité relative de l'air de 66,6 %, une vitesse moyenne du vent de  $8,2 \text{ km heure}^{-1}$  (station de référence Al-Arish — latitude  $31.08^\circ\text{N}$ , longitude  $33.83^\circ\text{E}$ , élévation 31 m —, à 190 km au nord-est de l'orangerie El-Salam Farm, la station d'étude ; [www.fao.org](http://www.fao.org)).



**Figure 1 :** Localisation de la zone d'étude : cinq stations d'études ont été choisies, choix fait en fonction de la qualité des eaux d'irrigation : Abu-Rawash and Zenin (eaux usées ; nord-ouest du Caire) ; Kafr el-Sheikh (eaux de drainage ; au nord du delta du Nil) ; Tanash (eaux du Nil ; nord du Caire) ; El-Salam (eaux mélangées – eaux de drainage et eaux du Nil ; nord du Sinaï)

Les lieux de production de citrus du delta du Nil se trouvent surtout dans les gouvernorats de Qalyoubia, Beheira, Sharqiya, Ismailia et Menoufia, où les surfaces défrichées ont été transformées en zones de cultures pérennes. Les plantations de citrus s'étendent en 2012 sur 111 200 ha (30 % sont des orangeries). La production d'oranges en 2012 est de 2 430 000 tonnes an<sup>-1</sup> (environ 33 % exporté, ce qui place l'Égypte à la onzième position au monde). L'orangerie El-Salam Farm étudiée (80 ha) a été plantée en juin 2005 avec des plantules de  $\phi$  6 cm et de  $h=0,6 \text{ m}$ , en rangs de  $6,0 \text{ m} \times 4,0 \text{ m}$  avec la variété Valencia late (greffon) greffée sur une souche *Folca matricana* (souche). L'orangerie est irriguée par un système de goutte-

à-goutte avec des eaux mélangées — eaux de drainage et du Nil — alimenté par le West-East El-Salam canal.

Les mesures ont été faites à l'échelle du peuplement avec un pas de temps de vingt minutes (Photo 1). Les résultats présentés sont issus de mesures du 9 au 24 avril 2013. Les calculs de l'ETR ont été faits à partir des valeurs diurnes des gradients des températures de l'air et du sol, des pressions actuelles de vapeur d'eau à la température de l'air et du rayonnement net. Les mesures en continu ont été stockées sur une centrale d'acquisition CR1000 et ensuite transférées sur ordinateur portable.



**Photo 1 :** Dispositif expérimental de mesure de l'évapotranspiration réelle d'un couvert végétal (tour à flux ; méthode rapport de Bowen) à l'orangerie El-Salam. Le pas de temps est de vingt minutes pour la température moyenne de l'air, l'humidité relative de l'air (sonde HMP35AC), la vitesse du vent (anémomètre A100R), et ce, à deux niveaux, à 2 m et à 5 m au-dessus de la surface du sol de la plantation. Le rayonnement global (pyranomètre Li-200SZ) et le rayonnement net (bilanmètre REBS/Q-7) ont été mesurés à 6 m au-dessus de la surface du sol. La température moyenne du sol a été mesurée à 0,15 m, 0,25 m, 0,35 m et 0,45 m dans le sol (sondes 107). Les sondes HMP35AC et les anémomètres ont été installés sur un mât de type UT920/UT930 amovible et haubané (Campbell Scientific®, Logan, États-Unis)

On rendra compte de la surface des feuilles et de leur distribution par l'indice foliaire, surface totale des feuilles divisée par la surface du sol recouvert par celles-ci. L'indice foliaire est obtenu par mesures indirectes qui consistent à comptabiliser le nombre de feuilles récoltées à l'aide d'une aiguille, utilisée perpendiculairement au sol, chaque mesure étant répétée trois cents fois. La période de nos mesures correspond à la fin d'une saison sèche, puis à une nouvelle période de croissance pendant laquelle la biomasse foliaire augmente. Le potentiel hydrique du sol est mesuré avec un tensiomètre. La mesure consiste à placer une bougie poreuse saturée en eau dans le sol. Ces bougies sont reliées à un manomètre par un circuit hydraulique étanche. Le sol va engendrer une succion au niveau de la bougie qui se traduit par un transfert d'eau de celle-ci vers le sol avec chute de pression hydrostatique dans le circuit hydraulique mesurée par le manomètre. Pour les analyses des sols de la station, nous avons établi la relation entre rétention en eau volumique et potentiel matriciel du sol à partir : (a) des mesures expérimentales de rétention en eau volumique et du potentiel hydrique du sol à l'aide d'un rétractomètre TypoSol® (Braudeau et Mohtar, 2006) ; (b) des analyses des sols de la station et (c) de données bibliographiques.

## 1.2. Description du modèle

**Évapotranspiration réelle, résistance aérodynamique, résistance stomatique et potentiel hydrique des feuilles :** le flux de vapeur d'eau à travers les stomates est proportionnel au gradient de pression de vapeur d'eau et inversement proportionnel à la résistance rencontrée. Nous avons adopté la simplification proposée par Monteith (1965) : il considère la surface évaporante comme une strate unique dans laquelle la résistance stomatique moyenne du peuplement est considérée comme étant la somme des résistances stomatiques moyennes de LAI-feuilles. Pour estimer la transpiration du couvert, nous avons utilisé la formule de Penman-Monteith (Nizinski et Saugier, 1989) :

$$ETR = E_p / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_{st} / LAI r_a)) \quad [\text{mm jour}^{-1}] \quad [1]$$

avec ETR-évapotranspiration réelle, en mm jour<sup>-1</sup> ; E<sub>p</sub>-évapotranspiration potentielle, en mm jour<sup>-1</sup> ; r<sub>st</sub>-résistance stomatique d'une feuille, en s cm<sup>-1</sup> ; LAI-indice foliaire du couvert, sans unité ; r<sub>a</sub>-résistance aérodynamique du couvert, en s cm<sup>-1</sup>.

Lorsqu'une feuille se dessèche, son potentiel hydrique ( $\Psi_{\text{feuille}}$ ) atteint un seuil. C'est le potentiel hydrique foliaire critique ( $\Psi_{\text{feuille-lim}}$ ) pour lequel les stomates commencent à se fermer. Ce potentiel hydrique foliaire varie selon l'espèce et se situe entre -13 et -25 bars pour les espèces arborescentes (dans notre cas, environ -15 bars). L'équation empirique permet de rendre compte de la variation de la résistance stomatique moyenne en fonction du potentiel hydrique foliaire, soit :

$$r_{st} = ((r_{st-max} - r_{st-min}) / (\Psi_{\text{feuille-max}} - \Psi_{\text{feuille-lim}})) (\Psi_{\text{feuille}(j)} - \Psi_{\text{feuille-lim}}) + r_{st-min} \quad [\text{s cm}^{-1}] \quad [2]$$

En reprenant les équations [1]-[2] et après transformation, on estime le potentiel hydrique des feuilles ( $\Psi_{\text{feuille}(j)}$ ), soit :

$$\Psi_{\text{feuille}(j)} = R (E_p / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_{st} / LAI r_a))) + \Psi_{\text{sol}(j)} \quad [\text{mm jour}^{-1}] \quad [3]$$

équation implicite puisque la résistance stomatique dépend du potentiel hydrique des feuilles. Pour estimer le potentiel hydrique des feuilles le jour  $j$  tel qu' $ABS_i(j) \approx Tr(j)$ , nous avons repris la résolution numérique proposée par Rose (*in* Nizinski et Saugier, 1989).

## 2. Résultats et discussion

Pour comparer nos mesures à celles d'autres travaux, nous avons paramétré la station d'étude, ces paramètres intervenant dans notre modèle d'estimation de l'évapotranspiration réelle des plantations d'orangers, à savoir : le nombre d'arbres par hectare, la circonférence des arbres, la surface terrière des placettes d'études, l'indice foliaire, la résistance du couvert, la résistance stomatique d'une feuille, le potentiel hydrique (potentiel hydrique limite, potentiel hydrique maximal), la hauteur moyenne du peuplement ; ces paramètres sont comparables aux paramètres obtenus par Hoffman *et al.* (1982). Nous pouvons considérer cette orangerie comme un peuplement mature (huit ans), arrivant à son niveau de production optimal pour la variété Orange late, soit de 0,09 tonnes ha<sup>-1</sup> en 2007 à 25,00 tonnes ha<sup>-1</sup> en 2013. La hauteur moyenne est de  $h=2,496 (\pm 0,402 ; N=756)$  m. L'indice foliaire s'élève à  $4,24 (\pm 1,399 ; N=300)$ . La résistance du couvert dépend des résistances stomatiques des feuilles de ce couvert et de l'indice foliaire ; la transpiration du couvert est la somme des transpirations de l'ensemble des feuilles, chaque feuille ayant une résistance stomatique donnée instantanée dépendante de ses caractéristiques physiologiques propres et du microclimat auquel elle est soumise. La résistance du couvert moyenne journalière est de  $r_c=580,88 \text{ s m}^{-1} (\pm 215,56 ; N=615)$ , avec la résistance aérodynamique moyenne  $r_a=137 \text{ s m}^{-1}$  (hauteur moyenne du peuplement de 2,5 m) étant comparable au  $500 \text{ s m}^{-1}$  d'un peuplement de citrus étudié par Rana et Katerji (2005) obtenue à l'aide de la méthode des corrélations. Connaissant la résistance du couvert obtenue par le rapport de Bowen et connaissant l'indice foliaire, on peut calculer la résistance stomatique moyenne d'une feuille (pour un pas de temps de 20 mn, temps de scrutation du rapport de Bowen). Les mesures ayant été faites dans des conditions de disponibilité en eau optimales (plantations irriguées), les résistances stomatiques mesurées sont les résistances stomatiques minimales  $r_{st}=176,01 \text{ s m}^{-1} (\pm 91,397 ; N=615)$  valeurs proches de celles obtenues sur des peuplements comparables par Cohen *et al.* (1987). Les potentiels hydriques foliaires sont issus de la bibliographie relative à Valencia Orange late (Cohen *et al.*, 1987), soit pour le potentiel hydrique limite  $\Psi_{\text{feuille-lim}}=-15$  bars et pour le potentiel hydrique maximal  $\Psi_{\text{feuille-max}}=-25$  bars.

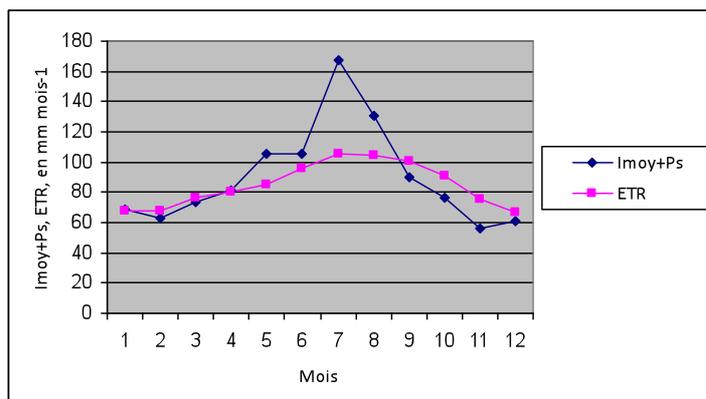
### 2.1. Irrigation, coefficient cultural - évapotranspiration potentielle

L'irrigation totale de la plantation a été de  $994,3 \text{ mm an}^{-1} (2,72 \text{ mm j}^{-1})$  sur les mois de mai-juin-juillet-août (89,9 ; 105,0 ; 167,4 et 130,2 mm mois<sup>-1</sup> respectivement). Ces irrigations ont été calculées en utilisant un coefficient cultural  $ETR/E_p$  qui augmente de 0,58 en janvier

jusqu'à 1,27 en juillet (coefficient moyen de 0,78). Ce choix a eu pour résultat un stress hydrique minimal car la réserve en eau du sol est toujours demeurée à 50 % de la réserve utile. Nous avons estimé que l'irrigation des mois de mai, juin, juillet et août provoque un drainage hors de la zone racinaire de l'orangerie. S'il y a eu excès d'apport d'eau par irrigation, avec donc drainage hors du profil, il n'y a jamais eu ruissellement qui aurait été provoqué par une infiltrabilité minimale : en effet, nous avons estimé le coefficient de conductivité hydraulique des horizons saturés ( $k_s$  de  $6,1 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ ), soit l'équivalent de  $500 \text{ mm j}^{-1}$ . Sachant que les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à  $P_i=95,4 \text{ mm an}^{-1}$  et que la dose maximale d'irrigation est de  $10 \text{ mm j}^{-1}$ , nous pouvons supposer que l'infiltrabilité de nos sols n'a effectivement jamais été minimale. L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle et moyenne journalière calculée sur la période 2005-2010 est de  $1\,271,5 \text{ mm an}^{-1}$  ( $3,48 \text{ mm j}^{-1}$ ) ; avec une ETP minimale moyenne en janvier de  $2,74 \text{ mm j}^{-1}$  – décembre de  $2,70 \text{ mm j}^{-1}$ , et une ETP maximale moyenne en juillet ( $4,26 \text{ mm j}^{-1}$ ) – août ( $4,20 \text{ mm j}^{-1}$ ).

## 2.2. Simulation de l'évapotranspiration réelle de l'orangerie et de l'irrigation de précision

La simulation de l'évapotranspiration réelle de l'orangerie a été effectuée du 1<sup>er</sup> janvier 2005 au 31 décembre 2010, en utilisant la paramétrisation du modèle issu de nos mesures. L'évapotranspiration réelle moyenne annuelle calculée sur les six années étudiées est de  $1\,017,2 \text{ mm an}^{-1}$  ( $2,79 \text{ mm j}^{-1}$ ), soit très proche de la dose d'irrigation annuelle appliquée à l'orangerie :  $I_{\text{moy}} = 994,3 \text{ mm an}^{-1}$  ( $2,72 \text{ mm j}^{-1}$ ), soit 102,3 % de  $I_{\text{moy}}$ . Nous analyserons la distribution de l'irrigation mensuelle au cours de l'année — ici sur six années de calculs — : (1<sup>er</sup>) comparaison  $ETR_{\text{calculée}}$  avec l'irrigation ( $ETR$  vs  $I_{\text{moy}}$ ) ; (2<sup>e</sup>) comparaison  $ETR_{\text{calculée}}$  avec l'irrigation à laquelle on ajoute les précipitations incidentes ( $P_i$ ) ( $ETR$  vs  $I_{\text{moy}}+P_i$ ) ; et (3<sup>e</sup>) comparaison  $ETR_{\text{calculée}}$  avec l'irrigation à laquelle on ajoute les précipitations au sol  $P_s$  (soit  $P_i - I_n$ ) ( $ETR$  vs  $I_{\text{moy}}+P_s$ ) (Fig. 2) : nous avons estimé les précipitations au sol ( $P_s$ ) à partir du modèle de l'interception de Nizinski et Saugier (1989) ; il résulte que, compte tenu du régime des pluies (averses brèves mais intenses) et du type de végétation (plantation en rang) — les précipitations au sol en moyenne s'élèvent à 88 % de  $P_i$ . Nous avons ajouté aux doses mensuelles de l'irrigation les apports dus aux précipitations au sol ( $P_s$  étant de  $83,9 \text{ mm an}^{-1}$ ). Les valeurs de l'irrigation ainsi calculées pour les mois de janvier-avril et décembre seront très proches (2-5 %) de celles de l'ETR calculée ; celles des mois de juin, juillet et août très fortement supérieures (10 à 60 %) et celles des mois de septembre-novembre inférieures de 11 à 15 %.



**Figure 2 :** Doses de l'irrigation appliquées ( $I_{\text{moy}}+P_s$ ) et de l'évapotranspiration réelle calculée (ETR) du peuplement de la station d'étude ; valeurs moyennes mensuelles des années 2005-10, en  $\text{mm mois}^{-1}$

Quelle que soit l'approche, la comparaison  $ETR_{\text{calculée}}$  avec l'irrigation ( $ETR$  vs  $I_{\text{moy}}+P_i$ ) ou  $ETR_{\text{calculée}}$  avec l'irrigation à laquelle on ajoute les précipitations au sol  $P_s$  (soit  $P_i - I_n$ ) ( $ETR$  vs  $I_{\text{moy}}+P_s$ ) rend compte des doses d'irrigation adéquates pour les mois de décembre à mai (Fig. 2). Quant à l'irrigation de juin à août, les doses appliquées sont fortement surestimées : ceci se traduit par un drainage hors de la zone racinaire de l'orangerie : (a) l' $ETR_{\text{calculée}}$  avec

l'irrigation ( $ETR_{vs I_{moy}+Pi}$ ) est de  $57\,639\text{ m}^3\text{ d'eau an}^{-1}$  pour l'ensemble de la plantation de 80 ha, soit  $720\text{ m}^3\text{ d'eau an}^{-1}\text{ ha}^{-1}$ . Ceci constitue 12,5 % de volume total d'eau utilisé dans l'irrigation ( $792\,266\text{ m}^3\text{ d'eau an}^{-1}$  pour l'ensemble de la plantation de 80 ha) ; (b)  $ETR_{calculée}$  avec l'irrigation ( $ETR_{vs I_{moy}+Ps}$ ) de  $94\,570\text{ m}^3\text{ d'eau an}^{-1}$  pour l'ensemble de la plantation de 80 ha, soit  $1\,182\text{ m}^3\text{ d'eau an}^{-1}\text{ ha}^{-1}$ . Ceci constitue 11,9 % du volume total d'eau utilisé dans l'irrigation ( $792\,266\text{ m}^3\text{ d'eau an}^{-1}$  pour l'ensemble de la plantation de 80 ha). Il est ainsi raisonnable de retenir des pertes en eau de  $94\,570\text{ m}^3\text{ d'eau an}^{-1}$  pour l'ensemble de la plantation de 80 ha, soit  $1\,182\text{ m}^3\text{ d'eau an}^{-1}\text{ ha}^{-1}$ . Ces chiffres sont à prendre en considération du point de vue de l'aménagement hydraulique des sites de production, connaissant le coût élevé de l'acheminement de l'eau.

## Conclusion

Nous avons construit un modèle de l'évapotranspiration réelle avec un pas de temps d'une journée, utilisant l'approche de Penman-Monteith (avec comme variables d'entrée les données météorologiques standard issues des stations météorologiques du réseau national), en tenant compte de la spécificité du couvert (ici la résistance du couvert, et en particulier la relation résistance stomatique/potentiel hydrique des feuilles). Ce modèle est un outil fiable pour la gestion de l'irrigation de précision, quelles que soient les cultures (blé, betterave à sucre, fèves, trèfle, petit pois, riz, coton, pastèque, tournesol, maïs) dans l'ensemble du delta du Nil. Un des paramètres du modèle — *résistance du couvert et résistance stomatique d'une feuille* — issu de la méthode de rapport de Bowen lors de la période et du 9 au 25 avril 2013, peut être amélioré car l'approche de Monteith (modèle Jarvis-Stewart) ne tient pas compte de l'évolution des stomates (*résistance stomatique minimale*) au cours de leur durée de vie. Nous avons comparé les doses d'irrigation appliquées à l'orangerie avec les besoins en eau issus du modèle : cette comparaison nous permet de proposer une gestion quotidienne de l'irrigation plus économe en eau. Il est raisonnable de retenir des pertes d'eau de  $94\,570\text{ m}^3\text{ d'eau an}^{-1}$  pour l'ensemble de la plantation de 80 ha, soit  $1\,182\text{ m}^3\text{ d'eau an}^{-1}\text{ ha}^{-1}$ .

## Références bibliographiques

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998: *Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements*. Paper N°56, Rome, Italy, 300 p.
- Braudeau E., Zaghoul A., 2010: *Sustainable Management of Adverse Impacts on Farming and Soil Ecosystem Associated with Long Term Use of Low Quality Irrigation Water*. Joint Innovative Projects Fund, STDF-AIRD, Joint Research Project, Scientific Document, 48 p.
- Braudeau E., Mohtar R.H., 2006: Modeling the swelling curve for packed soil aggregates using the pedostructure concept. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **70**, 494-502.
- Cohen S., Fuchs M., Moreshet S., Cohen Y., 1987: The distribution of leaf area, radiation, photosynthesis and transpiration in a Shamouti orange hedgerow orchard, II. Photosynthesis, transpiration, and the effect of row shape and direction. *Agricultural and Forest Meteorology*, **40(2)**, 145-162.
- Hoffman G.J., Oster J.D., Alves W.J., 1982: Evapotranspiration of mature orange trees under drip irrigation in an arid climate. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, **25**, 992-996.
- Monteith J.L., 1965: Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms. *Symosia of the Soc. Exp. Biol.*, New York, Academic Press, **19**, 205-234.
- Nizinski J.J., Saugier B., 1989: A model of transpiration and soil-water balance for a mature oak forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **47**, 1-17.
- Penman H.L., 1948: Natural evaporation from open water balance bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society*, London, Series A, **193**, 120-145.
- Rana G., Katerji N., de Lorenzi F., 2005: Measurement and modelling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, **128(3)**, 199-209.