

LA MODÉLISATION : UNE AIDE À LA GESTION DE L'IRRIGATION DE PRÉCISION - CAS DE L'ORANGERAIE D'EL-SALAM, NORD SINAÏ (ÉGYPTE)

Jerzy Jan NIZINSKI¹, Jean-Pierre MONTOROI¹, Alaa ZAGHLOUL², Rafat ALI²
et Mohammed SABER²

¹ Institut de Recherche pour le Développement
UMR 242 'Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement - IEES de Paris'
Département SOLÉO, Equipe BioPhys - Centre d'Ile 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
Le Caire – Egypte
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 2011-2013 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. Les variables d'entrée du modèle sont la donnée météorologique standard issue des stations météorologiques 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 $E_a/E_p=0,78$) avec les besoins en eau issus du modèle ($E_{a_{calculée}}$) pour 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 $1,182 \text{ m}^3 \text{ d'eau an}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ (-12 %). 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 orchard in the Northern Sinai (Egypt)

Studies related to soil-water management in the Delta of the Nile (Egypt) were carried out in 2011-2013 by the Institut de Recherche pour le Développement. The El-Salam orange orchard was selected as reference station to study the management of precision irrigation, with the aim of developing a model which would help in managing the irrigation of other crop covers in the Delta of the Nile. The modelling of the real evapotranspiration was performed at a one-day step resolution, using the Penman-Monteith approach (with daily data input - standard data from the national network of weather stations) taking the crop cover specificity into account (cover resistance). The amounts of irrigation applied to the orange orchard ($I=994.30 \text{ mm year}^{-1}$; 2.72 mm.day^{-1} ; crop coefficient $E_a/E_p=0.78$) were compared to the requirements of water estimated by the model ($E_{a_{simulated}}$) in order to suggest a daily amount of irrigation. It is reasonable to retain the water losses of 94.570 m^3 of water year⁻¹ for the total area of the plantation (80 ha; drainage out of the roots zone), thus 1.182 m^3 of water year⁻¹ ha⁻¹ (12%). These losses of water are to be dealing with hydraulic adjustment of crop production sites and the costs of routing of water.

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

Introduction

Cette étude sur l'économie de l'eau dans le Delta du Nil a été menée de 2011 à 2013 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 du National Research Center, Soils and Water Use Department, du Caire (Braudeau et Zaghoul, 2010). L'orangerie El-Salam (nord du Sinaï) irriguée (par le canal El-Salam Ouest-Est) 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 (blé, betterave à sucre, fèves, trèfle, petit pois, riz, coton, pastèque, tournesol, maïs).

Les doses d'irrigation de l'orangerie ont été jusqu'à présent choisies en utilisant un coefficient cultural établi par le rapport évapotranspiration réelle/évapotranspiration potentielle, noté E_a/E_p (Allen *et al.*, 1998) qui a été estimé de façon « classique » à partir de a) l'équation du bilan hydrique des zones racinaires des sols des plantations, méthode peu précise pour les calculs de l'évapotranspiration réelle des couverts éparses situés en zones semi-arides (Rana et Katerji, 2000) et b) 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.*, 1994 ; Steduto *et al.*, 1996). 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 (Heilman *et al.*, 1996 ; Villalobos *et al.*, 2000). 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 (Bowen, 1926), 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. Nous avons validé le modèle à partir des mesures de la réserve en eau et des potentiels hydriques des sols de l'orangerie puis proposé d'améliorer ce modèle. Nous avons comparé les doses d'irrigation appliquées à l'orangerie avec l'évapotranspiration réelle issue du modèle : cette comparaison permet de proposer une gestion quotidienne de l'irrigation plus économe en eau.

1. Matériels et méthodes

1.1. Station d'études et dispositif expérimental

1.1.1. Climat local, sols et types de couvert

La zone d'étude, le Delta du Nil (*Batn el-Baqara*) – partie nord-ouest du Sinaï – est située sur la façade méditerranéenne de l'Egypte, avec une superficie de 24 000 km² (figure 1). 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 95,4 mm pour la période 2005-2012, une évapotranspiration potentielle (Penman, 1948 ; Allen *et al.*, 1998) de 1271 mm.an⁻¹ ($E_{p2005-12} = 3,48$ mm.jour⁻¹), un rayonnement global moyen annuel journalier de 21,6 MJ.jour⁻¹, une durée d'insolation moyenne journalière de 9,1 heures, une température moyenne de l'air de 20,3°C ($t_{max} = 27$ °C, $t_{min} = 14,3$ °C), une humidité relative de l'air de 66,6 %, une vitesse moyenne du vent de 8,2

km.heure⁻¹ (station de référence Al-Arish ; latitude 31,08°N, longitude 33,83°E, 31 m d'altitude, éloignée de 190 km de l'orangerie El-Salam Farm ; www.fao.org). 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) et El-Salam (eaux mélangées – eaux de drainage et eaux du Nil ; nord du Sinaï – photo 1a).

Figure 1 : Localisation de la station d'étude dans le Delta du Nil (Batn el-Baqara), El-Salam (eaux mélangées – eaux de drainage et eaux du Nil ; nord du Sinaï). *Location of the study plot in the Delta of the Nile (Batn el-Baqara); El-Salam (mixed water – water of drainage and water of the Nile; North of the Sinai).*



La zone d'étude se situe dans un bassin sédimentaire côtier datant du pliocène et pléistocène, formé par des sables et des boues de cours d'eau. La plaine alluviale du Nil résulte du dépôt de particules transportées par les cours d'eau lors de leur irruption dans le bassin de réception, avec processus de perte de charge. Lorsqu'il y a contact entre deux milieux de salinité différente, ces processus peuvent être accompagnés de phénomènes de floculation responsables de l'agrégation des particules colloïdales en suspension puis de leur dépôt sous forme d'argiles (Jenkins, 1990).



Photos 1 : Les qualités des eaux d'irrigation : a) eaux usées au nord-ouest du Caire - Abu-Rawas et Zenin ; b) eaux de drainage et eaux du Nil, provenant du canal West-East El-Salam - système d'irrigation goutte-à-goutte de la station d'étude - orangerie d'El-Salam, Nord Sinaï. *Irrigation water qualities (a) sewage in the North-West of Cairo - Abu-Rawas and Zenin; (b) drip irrigation system of the study plot - orange grove of El-Salam, the Northern Sinai; water of drainage and water of the Nile, coming from the channel West-East El-Salam.*

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 cultures pérennes. Les citrus ont été introduits en Egypte au XI-XIII^{ème} siècles (*Citrus sinensis* ; originaire de Chine), transmis par les Perses aux Arabes. A l'heure actuelle (2012), les plantations des citrus s'étendent sur 111 200 ha (dont 30 % sont des orangeries). La production d'oranges est de 2 430 000 tonnes par an (dont environ 33 %

exportés, ce qui plaçait l'Égypte à la 11^{ème} position mondiale en 2012). Il existe de nombreuses variétés d'oranges parmi lesquelles la variété étudiée ici, l'Orange Valencia ou orange Valencia late (*Citrus sinensis late*). C'est une variété d'orange douce hybridée par l'agronome américain William Wolfskill (1798-1866) dans le sud de la Californie au XIX^{ème} siècle. Valencia orange late (orange d'été) est récoltée de février à juillet pour le jus de fruit et comme fruit de table. L'Orangerie El-Salam Farm, d'une surface 80 ha, a été plantée en juin 2005 avec des plantules de 6 cm de diamètre et de 0,6 m de hauteur, en rangs de 6 x 4 m, avec la variété Valencia late (greffon) greffée sur une souche *Folca matricana*. L'Orangerie est irriguée par un système de goutte-à-goutte avec des eaux mélangées – eaux de drainage et eaux du Nil, provenant du canal West-East El-Salam.

1.1.2. Acquisition des données, type de mesure, fréquence, caractéristiques du matériel

Les résultats présentés sont issus de mesures effectuées à l'échelle du peuplement (756 arbres) sur une période de 16 jours, du 9 au 24 avril 2013. Les calculs de l'Ea ont été faits à partir des valeurs diurnes des gradients des températures de l'air et du sol (dT), des pressions actuelles de vapeur d'eau à la température de l'air T (d_e) et du rayonnement net (durée astronomique du jour) de 6h00 à 18h00, soit une durée d'environ 12 heures. Nous avons mesuré avec un pas de temps de vingt minutes la température moyenne et l'humidité relative de l'air (sonde HMP35AC, Vaisala®, Helsinki, Finlande), la vitesse du vent (anémomètre A100R, Vector Instruments®, Rhyl, Royaume Uni), et ce, à deux niveaux (2 m et 5 m) au-dessus de la surface du sol de la plantation. Le rayonnement global (pyranomètre Li-200SZ, Li-cor®, NE, Etats Unis) et le rayonnement net (bilanmètre REBS/Q-7, Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis) ont été mesurés à 6 m au-dessus de la surface du sol. La température moyenne du sol a été mesurée à 0,15, 0,25, 0,35 et 0,45 m dans le sol (sondes 107, Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis). Les sondes HMP35AC et les anémomètres ont été installés sur un mât de type « UT920/UT930 » (Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis) amovible et haubané (photo 2).

Photo 2 : Dispositif expérimental de mesure de l'évapotranspiration réelle d'un couvert végétal (tour à flux ; méthode rapport de Bowen) dans l'orangerie El-Salam. *Site of the studies plot (orange grove of 80 ha) - measurement of the actual evapotranspiration using the Bowen-ratio method. Measurements were made on the field scale with the 20 minute step time resolution the air temperature, relative air humidity (R.H. probe HMP35AC, Vaisala®, Helsinki, Finland), wind speed (anemometer A100R, Vector Instruments®, Rhyl, UK), and this, on two levels, at 5 m and 2 m above the orange grove's soil surface. The global radiation (pyranometer sensor Li-200SZ, Li-cor®, NE, USA) and net radiation (net radiometer REBS/Q-7, Campbell Scientific®, Logan, USA) were measured at 6 m above the orange grove's soil surface. The mean soil temperature was measured at 0.15, 0.25, 0.35 and 0.45 m depth (107 probes, Campbell Scientific®, Logan, USA). R.H. probes HMP35AC and anemometers were set up on a mast « UT920/UT930® » removable and fixed.*



Afin de minimiser l'influence des supports sur les mesures, les capteurs sont tenus par des bras métalliques longs de 1 à 2 m (selon la sensibilité du capteur concerné), ces derniers étant fixés et isolés des supports. Les mesures sont effectuées avec un pas de temps de vingt

minutes et cumulées sur la journée pour donner les valeurs du rayonnement net, des températures de l'air, de l'humidité relative de l'air et de la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air. La précision des mesures de température a été inférieure à $\pm 0,01^\circ\text{C}$, soit pour les deux capteurs $dT = \pm 0,02^\circ\text{C}$, la précision des mesures de la pression partielle de vapeur d'eau a été inférieure à $\pm 0,01$ kPa, soit pour les deux capteurs $de = \pm 0,02$ kPa (Revfeim et Jordan, 1976). Les mesures en continu ont été stockées sur une centrale d'acquisition de données de type Micrologger CR1000 (Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis) et ensuite transférées sur ordinateur portable.

Les mesures de la hauteur des arbres de l'orangerie ont été faites le 9 et 16 avril 2013 à l'aide d'une règle graduée (photo 3), sur la placette d'étude (1,89 ha), sur l'ensemble des 756 individus, plantés sur 24 rangs (6 x 4 m) avec 16 arbres pour chaque rang.

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. La période de nos mesures correspond à une nouvelle période de croissance pendant laquelle la biomasse foliaire augmente. L'indice foliaire est obtenu par mesures indirectes qui consiste à comptabiliser le nombre de feuilles (litière cumulée sur la période 2008-2012, la durée de vie des feuilles étant de 4 ans ; photo 4) récoltées à l'aide d'une aiguille, utilisée perpendiculairement au sol, chaque mesure étant répétée 300 fois.



Photo 3 : Mesures des hauteurs d'arbres de l'orangerie à l'aide d'une règle graduée les 9 et 16 avril 2013 ; mesures sur la placette d'étude (1,89 ha) sur l'ensemble de 756 individus, plantés en 24 rangs (6 x 4 m) avec 16 arbres dans chaque rang. *Levelling of trees of the orange grove using a graduated rule on April 9 and 16 2013; measurements were made for each tree of the study plot (1.89 ha) i.e. a total of 756 trees with 16 trees planted over 24 rows (6 x 4 m).*



Photo 4 : L'indice foliaire est obtenu par une mesure indirecte qui consiste à comptabiliser le nombre de feuilles (litière cumulée sur la période 2008-12, la durée de vie des feuilles étant de 4 ans) récoltées à l'aide d'une aiguille, utilisée perpendiculairement au sol, chaque mesure étant répétée 300 fois. Les mesures sont effectuées du 9 au 24 avril 2013 dans les rangs n°11, n°12, n°13 et n°14 sur la station d'étude. *The leaf area index is obtained by an indirect measurement who consists in entering the number of leaves collected using a needle, used perpendicular to the soil surface each measurement being repeated 300 times (litter cumulated over period 2008-2012; the lifespan of the leaves being 4 years). Measurements were performed over a 16-day period (9 to 24 April 2013) in rows 11, 12, 13 and 14 of the study plot. By taking account of the area of the inter-rows (area occupied by a single tree being of $25.00 \text{ m}^2 \cdot \text{tree}^{-1}$), the LAI is of $4.24 (\pm 1.399; N=300)$.*

Le tensiomètre mesure le potentiel hydrique du sol et 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. Les mesures ont été faites avec des

tensiomètres de type SMS 2500 - SDEC®, chaque jour à 11h00 lors de la période de 16 jours du 9 au 24 avril 2013, aux profondeurs de 0,15, 0,25, 0,35 et 0,45 m, dans le rang n°13, entre les arbres n°12 et 13, au-dessous du mât à flux (photo 5).

Photo 5 : Mesures du potentiel hydrique du sol (Ψ_{sol} , en bars) à 0,15 m, 0,25 m, 0,35 m et 0,45 m de profondeur avec un tensiomètre de type SMS 2500 - SDEC® lors d'une période de 16 jours, du 9 au 24 avril 2013, dans les rangs n°13, entre l'arbre n°12 et l'arbre n°13, au-dessous du mât à flux. *Soil-water potential measurements (Ψ_{soil} , bars) at 0.15 m, 0.25 m, 0.35 m and 0.45 m of depth with a SMS 2500 - SDEC® tensiometers performed over a 16-day period (from 9 to 24 April 2013) in the 13th row between tree 12 and tree 13 underneath the « UT920/UT930® » tower.*



Nous avons établi la relation entre rétention en eau volumique et potentiel matriciel du sol à partir *i*) des mesures expérimentales de rétention en eau volumique (en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) et du potentiel hydrique du sol (en bars) à l'aide d'un rétractomètre TypoSol® d'AGREC et SYGA Electronique (Braudeau et Mohtar, 2006), *ii*) des analyses des sols de la station (granulométrie standard, pH eau, pH, KCl ; Laboratoire d'Analyses du CIRAD de Montpellier, US49 « Analyse ») et *iii*) de données bibliographiques (Gad *et al.*, 1996).

1.2. Description du modèle

1.2.1. Réserve en eau du profil du sol

Le modèle calcule pour chaque jour (en variable de sortie) : 1) la réserve en eau du sol ($\text{RP}_{(j)}$) sur la base de l'équation du bilan hydrique, de façon que la variation de la réserve en eau du profil soit égale à la différence entre les entrées (précipitations au sol, $\text{Ps}_{(j)}$ et/ou irrigation, $\text{I}_{(j)}$) et les sorties (drainage de l'eau hors de la zone racinaire du sol ($\text{Dr}_{(j)}$) : 2) l'absorption de l'eau dans l'ensemble du profil par les racines du peuplement ($\text{ABS}_{(j)}$).

Le profil du sol comprend n strates i ; chaque strate est caractérisée par sa rétention en eau maximale – capacité au champ de la strate i ($\text{R}_{\text{CC}}(i)$) – et par sa rétention en eau minimale ($\text{R}_{\text{PFP}}(i)$). Les strates du profil du sol fonctionnent comme n réservoirs en parallèles qui se vident au-delà de leurs capacités maximales de rétention en eau. Cette vidange est atteinte lorsque le volume d'eau de drainage de la strate précédente ($\text{Dr}_{(i-1)(j)}$) additionné à celui déjà présent ($\text{RP}_{(i)(j-1)}$) diminué du volume d'eau absorbé par les racines ($\text{ABS}_{(i)(j)}$) et $\text{E}_{\text{sol}(j)}$ est supérieur à la capacité au champ ($\text{R}_{\text{CC}}(i)$). Dans le modèle, l'évaporation ne concerne que la litière. La litière a un rôle protecteur vis-à-vis de l'évaporation de l'eau du sol (*self-mulching* ; photo 4), et seule la litière serait soumise au phénomène d'évaporation ($\text{E}_{\text{sol}(j)} = 0 \text{ mm} \cdot \text{jour}^{-1}$), le sol sous-jacent n'étant concerné que par le phénomène d'absorption. L'excès d'eau de la strate i ($\text{Dr}_{(i)(j)}$) constitue l'entrée d'eau pour la strate sous-jacente ($i+1$). Ainsi, le bilan d'eau de toute strate i est égal à :

$$\text{Dr}_{(i-1)(j)} - \text{E}_{\text{sol}(j)} + (\text{RP}_{(i)(j-1)} / (j-1)) - \text{ABS}_{(i)(j)} \approx 0 \quad [\text{mm} \cdot \text{jour}^{-1}] \quad [1]$$

En comparant l'équation [1] avec les valeurs limites ($\leq \text{R}_{\text{PFP}}(i)$; $\leq \text{R}_{\text{CC}}(i)$ et $> \text{R}_{\text{CC}}(i)$), nous avons déduit $\text{DR}_{(i)(j)}$ et $\text{RP}_{(i)(j)}$. La simulation commence le 1^{er} janvier (jour $j=1$) avec comme condition initiale de simulation, une rétention en eau de chacune des strates du profil égale à la capacité au champ ($\text{RP}_{(i)(1)} = \text{R}_{\text{CC}}(i)$). Le modèle utilise les variables d'entrée suivantes :

- la demande évaporative de l'atmosphère ($E_{P(j)}$),
- les précipitations au sol ($P_{S(j)}$) et/ou l'irrigation ($I_{(j)}$),
- l'indice foliaire le jour j ($LAI_{(j)}$).

Le modèle comporte quatre principaux paramètres : la relation entre résistance stomatique moyenne et potentiel hydrique foliaire ($r_{st}/\Psi_{\text{feuille}}$), la distribution de la longueur racinaire dans le profil du sol ($LR(i)$), la capacité maximale et minimale de rétention en eau de chacune des strates du profil du sol ($R_{CC}(i)$ et $R_{PPF}(i)$).

Le choix de la journée comme pas de temps nous a conduit à simplifier les processus d'infiltration et de distribution des apports d'eau au sol : (a) nous admettons que les qualités hydrauliques de chaque strate sont identiques sur toute leur épaisseur ; (b) l'alimentation en eau du profil du sol est assurée par l'irrigation $I_{(j)}$ (photo 1b), et par les précipitations au sol ($P_{S(j)}$). Les valeurs de l'irrigation (mesures) et des précipitations au sol (modèle ; Nizinski et Saugier, 1988) introduites dans le modèle sont des variables d'entrée. Les doses d'irrigation rechargeront la première strate du sol ($i=1$) et s'ajouteront au volume d'eau déjà présent dans cette strate ; si la réserve en eau résultante est supérieure à la capacité au champ, l'excès d'eau est ajouté à la strate suivante ($i=2$), et le processus se répète jusqu'à la dernière strate. Nous supposons ici que l'infiltrabilité des sols n'est jamais minimale et qu'il n'y a donc jamais ruissellement.

1.2.2. Drainage et absorption racinaire

Si la rétention en eau de la dernière strate (n) excède sa capacité au champ, il y a écoulement de l'excédent hors de la zone racinaire de la plantation ; le drainage de l'ensemble du profil est alors égal au drainage de la dernière strate de ce profil, soit $DR(j)=DR(n)(j)$, en mm.jour^{-1} .

Le modèle s'inscrit dans l'optique de Van den Honert (1948) et Philip (1966), optique considérant l'ensemble sol-plante-atmosphère comme une entité physique dans laquelle les processus liés à la circulation de l'eau de chacun des compartiments sont interdépendants. Dans cette optique, l'absorption est égale à la transpiration (concept du flux conservatif des racines aux feuilles). Le flux d'eau liquide (q) est proportionnel au gradient des potentiels hydriques ($\Delta\Psi$) et inversement proportionnel à la résistance qu'il rencontre sur son parcours R (par analogie à la loi d'Ohm $q=(\Delta\Psi)/R$). Chaque strate i possède une capacité de rétention en eau et une répartition des racines qui lui sont propres ; chaque strate est considérée comme homogène, ce qui implique que l'absorption dans la strate i est répartie régulièrement sur toute la profondeur de cette strate i . L'absorption sur l'ensemble du profil est calculée à partir du potentiel hydrique moyen du profil ($\Psi_{\text{sol}(j)}$) obtenu par pondération du potentiel de chaque strate ($\Psi_{\text{sol}(i)(j)}$) par un coefficient ($LR_{(j)}$) égal au rapport de la longueur racinaire dans la strate considérée i , le jour j ($LR(i)(j)$), sur l'ensemble du profil le jour j ($LR_{(j)}$) (Nizinski et Saugier, 1989). L'absorption d'eau dans la strate i est égale à :

$$\mathbf{ABS}(i)(j) = ((\Psi_{\text{sol}(i)(j)} - \Psi_{\text{feuille}(j)})/R) LR(i)(j) \quad [\text{mm.jour}^{-1}] \quad [2]$$

Avec $\Psi_s(i)(j)$, le potentiel hydrique moyen dans la strate i , le jour j , en bars ; $\Psi_{\text{feuille}(j)}$, le potentiel hydrique moyen des feuilles d'arbres le jour j , en bars ; R , la résistance totale sur l'ensemble du trajet sol-arbre correspondant à la somme des résistances suivantes : (a) résistance à la pénétration de l'eau dans les racines, (b) résistance des manchons du sol entourant les racines, (c) résistance à la circulation de l'eau dans le xylème, (d) résistance à la circulation de l'eau dans les nervures des feuilles et les chambres sous-stomatiques, en $\text{bars.jour}^{-1}.\text{mm}^{-1}$; ($R=0,5 \text{ bars.jour}^{-1}.\text{mm}^{-1}$; valeurs issue de Saugier, 1974 ; $LR(i)(j)$, la fraction de la longueur totale des racines présentes dans la strate i , le jour j , soit $LRi(j)=\text{longueur racinaire dans la strate } i \text{ le jour } j / LR_{(j)}=\text{longueur des racines totale sur tout le profil le jour } j$.

L'absorption de l'eau dans l'ensemble du profil vaut :

$$\mathbf{ABS}_{(j)} = \sum \mathbf{ABS}(\mathbf{i})_{(j)} = ((\Psi_{\text{sol}}(\mathbf{i})_{(j)} - \Psi_{\text{feuille}}(\mathbf{j}))/\mathbf{R}) \quad [\text{mm.jour}^{-1}] \quad [3]$$

Avec $\mathbf{ABS}_{(j)}$, l'absorption de l'eau par les racines d'arbres dans l'ensemble du profil le jour j , en mm jour^{-1} ; n , le nombre de strates du profil du sol.

A potentiel hydrique du sol égal, la quantité d'eau absorbée est d'autant plus grande que la densité de racines est importante.

1.2.3. Potentiel hydrique du sol

Pour le calcul du potentiel hydrique du sol de chaque strate i le jour j ($\Psi_{\text{sol}(j)}$), nous utilisons la valeur de la rétention en eau de la strate i le jour $j-1$, $\mathbf{RP}(\mathbf{i})_{(j-1)}$ (mm), valeur que nous avons exprimé en humidité volumique :

$$\Theta(\mathbf{i})_{(j-1)} = (\mathbf{RP}(\mathbf{i})_{(j-1)}/\mathbf{h}(\mathbf{i})) \mathbf{1000} \quad [\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}] \quad [4]$$

Avec $\Theta(\mathbf{i})_{(j-1)}$, l'humidité volumique du sol de la strate i , le jour j , en cm^3/cm^3 ; $\mathbf{RP}(\mathbf{i})_{(j-1)}$, la réserve en eau du sol de la strate i , le jour $(j-1)$, en mm.jour^{-1} ; $\mathbf{h}(\mathbf{i})$, l'épaisseur de la strate i , en m.

Le potentiel hydrique du sol de la strate i le jour j , est alors égal, d'après Gardner (1960) à :

$$\Psi_{\text{sol}}(\mathbf{i})_{(j)} = \mathbf{A}(\mathbf{i}) (\Theta(\mathbf{i})_{(j-1)})^{\mathbf{B}(\mathbf{i})} \quad [\text{bars}] \quad [5]$$

Avec $\mathbf{A}(\mathbf{i})$ et $\mathbf{B}(\mathbf{i})$, les coefficients dépendant des caractéristiques hydrauliques du sol de la strate i ; ces coefficients ont été établis à partir des mesures faites sur des échantillons des sols de la station d'étude.

1.2.4. Evapotranspiration 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) qui 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 (adaptée par Tanner, 1968) :

$$\mathbf{ETR} = \mathbf{E}_p / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (\mathbf{r}_{st} / \mathbf{LAI} \mathbf{r}_a)) \quad [\text{mm.jour}^{-1}] \quad [6]$$

Avec \mathbf{ETR} , l'évapotranspiration réelle, en mm.jour^{-1} ; \mathbf{E}_p , l'évapotranspiration potentielle, en mm jour^{-1} (FAO ; Allen *et al.*, 1998); \mathbf{r}_{st} , la résistance stomatique d'une feuille, en s.cm^{-1} ; \mathbf{LAI} , l'indice foliaire du couvert, sans unité; \mathbf{r}_a , la résistance aérodynamique du couvert, en s.cm^{-1} .

La résistance aérodynamique gère l'efficacité de déplacement de la vapeur d'eau de la surface évaporante, cette résistance dépend de la vitesse moyenne du vent et de la rugosité du couvert; en l'absence de stratification thermique, elle s'exprime par :

$$\mathbf{r}_a = (1 / (k^2 \mathbf{u}_{2M})) [\ln((\mathbf{z} - \mathbf{d}) / \mathbf{z}_0)]^2 \quad [\text{s.cm}^{-1}] \quad [7]$$

Avec \mathbf{r}_a , la résistance aérodynamique, en s.cm^{-1} ; k , la constante de von Karman (0,39); \mathbf{u}_{2M} , la vitesse du vent mesurée à 2 mètres de la surface du sol, en m.s^{-1} ; \mathbf{z} , le niveau considéré, en m; \mathbf{z}_0 , la longueur de rugosité, en m; \mathbf{d} , la hauteur du déplacement, en m.

Nous avons estimé \mathbf{r}_a à partir des profils de la vitesse du vent au-dessus du couvert végétal. Pour ce couvert arborescent, nous avons calculé \mathbf{r}_a à partir de la hauteur du peuplement :

$$\mathbf{d} = \mathbf{0,75} \mathbf{h} \quad \text{et} \quad \mathbf{z}_0 = \mathbf{0,1} \mathbf{h} \quad [\text{m}] \quad [8] \quad \text{et} \quad [9]$$

Avec \mathbf{d} , la hauteur de déplacement, en m; \mathbf{z}_0 , la longueur de rugosité, en m; \mathbf{h} , la hauteur du peuplement, en m (Thom, 1972).

Lorsqu'une feuille se dessèche, son potentiel hydrique (Ψ'_{feuille}) atteint un seuil, 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, le potentiel hydrique foliaire critique est d'environ -15 bars). L'équation empirique [10], mise au point sur ce peuplement d'Orange late, permet de rendre compte de la variation de la résistance stomatique moyenne en fonction du potentiel hydrique foliaire, soit :

$$r_{st} = ((r_{st-max} - r_{st-min}) / (\Psi'_{\text{feuille-max}} - \Psi'_{\text{feuille-lim}})) (\Psi'_{\text{feuille(j)}} - \Psi'_{\text{feuille-lim}}) + r_{st-min} \text{ [s.cm}^{-1}\text{]} \quad [10]$$

D'après l'équation [2], si le potentiel hydrique des feuilles est supérieur ou égal au potentiel hydrique du sol, alors l'absorption racinaire n'a pas lieu :

$$\text{si } \Psi'_{\text{feuille(j)}} \geq \Psi_{\text{sol(j)}} \text{ alors } \sum \text{ABS}_{(j)} \approx 0 \text{ [mm.jour}^{-1}\text{]} \quad [11]$$

Dans le cas contraire, il y a absorption. Compte tenu de la continuité du flux d'eau dans le système sol-plante-atmosphère, la somme des extractions d'eau par les racines dans n-strates du profil du sol est égale à la transpiration, soit :

$$\text{si } \Psi'_{\text{feuille(j)}} \leq \Psi_{\text{sol(j)}} \text{ alors } \sum \text{ABS}_{(j)} \approx \text{Tr}_{(j)} \text{ [mm.jour}^{-1}\text{]} \quad [12]$$

En reprenant les équations [2] et [6], l'équation [12] devient :

$$\Psi_{\text{sol(j)}} - \Psi'_{\text{feuille(j)}} / R = E_p / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_{st} / LAI r_a)) \text{ [mm.jour}^{-1}\text{]} \quad [13]$$

Ce qui, après transformation, permet d'estimer le potentiel hydrique des feuilles ($\Psi'_{\text{feuille(j)}}$), soit :

$$\Psi'_{\text{feuille(j)}} = R (E_p / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_{st} / LAI r_a))) + \Psi_{\text{sol(j)}} \text{ [mm.jour}^{-1}\text{]} \quad [14]$$

Equation implicite, puisque la résistance stomatique (r_{st}) dépend du potentiel hydrique des feuilles ($\Psi'_{\text{feuille(j)}}$) (équation [10]). Pour estimer le potentiel hydrique des feuilles le jour j tel qu' $\text{ABS}_{(j)} \approx \text{Tr}_{(j)}$, nous avons repris la résolution numérique proposée par Rose *et al.* (1976) pour un sol non stratifié (dans cette étude, nous avons utilisé le potentiel moyen du profil). Les étapes du calcul sont les suivantes :

si $r_{st} = r_{st-min}$ alors $\Psi'_{\text{feuille(j)}} \leq \Psi'_{\text{feuille-lim}}$;
 si $r_{st} = r_{st-max}$ alors $\Psi'_{\text{feuille(j)}} \geq \Psi'_{\text{feuille-max}}$;
 si $r_{st-min} < r_{st} < r_{st-max}$ alors $\Psi'_{\text{feuille-lim}} < \Psi'_{\text{feuille(j)}} < \Psi'_{\text{feuille-max}}$ et $\Psi'_{\text{feuille-lim}} \geq 0$ et $\Psi'_{\text{feuille-lim}} \leq 0$.

Ainsi, la solution ($\text{ABS}_{(j)} \approx \text{Tr}_{(j)}$) se trouve entre $\Psi'_{\text{feuille-lim}}$ et $\Psi'_{\text{feuille-max}}$ avec une précision d'approche α . Puis nous recommençons à calculer la différence entre $\text{Tr}_{(j)}$ et $\text{ABS}_{(j)}$ pour un potentiel $(\Psi'_{\text{feuille-lim}} + \Psi'_{\text{feuille-max}}) / 2$, et nous répétons le procédé jusqu'à obtention du potentiel qui égalise $\text{Tr}_{(j)}$ et $\text{ABS}_{(j)}$ à un seuil de précision fixé à l'avance, α .

2. Résultats et discussion

2.1. Paramètres morpho-physiologiques

Pour comparer nos mesures à celles d'autres travaux, nous avons paramétré la station d'étude (tableau 1), les paramètres intervenant dans notre modèle étant 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, $\Psi'_{\text{feuille-lim}}$, potentiel hydrique maximal, $\Psi'_{\text{feuille-max}}$), la hauteur moyenne du peuplement, paramètres comparables à ceux obtenus par Castel *et al.* (1987), Chartzoulakis *et al.* (1999), Green et Moreshet (1979) ou Hoffman *et al.* (1982). L'orangerie étudiée n'est pas encore parvenue à son niveau de production optimale (de 0,09 tonnes.ha⁻¹ en 2007 jusqu'à 25

tonnes.ha⁻¹ en 2013) qui devrait avoisiner 45,9 tonnes.ha⁻¹ (prévisions) vers 2017 (au Maroc, selon Bouazzama et Bahri - 2009, la production moyenne est de 30 tonnes.ha⁻¹).

Date de plantation (plantule de l'oranger Valencia late Ø 6 cm ; h = 0,6 m)	Juin 2005
Ecartement (en m)	6 x 4
Hauteur moyenne des arbres (en m)	2,47
Surface de la placette (en ha)	1,89
Nombre d'arbres (en arbres ha ⁻¹)	756
Nombre d'arbres par hectare	400
Surface du sol par arbre (en m ²)	25
Circonférence à 0,3 m du sol (en cm)	52,75
Diamètre du tronc à 0,3 m du sol (en cm)	16,60
Surface terrière (en m ² ha ⁻¹)	9,23
LAI (en m ² m ⁻²)	4,24

Tableau 1 : Caractéristiques morphologiques du peuplement de la station d'étude (orangerie de 80 ha). *Morphological characteristics of the study plot (a 80-ha orange grove).*

La surface réelle occupée par un arbre est de 17 m².arbre⁻¹, avec un LAI de 6,24. En prenant en compte la surface des inter-rangs (2 mètres de largeur), la surface occupée par un arbre est de 25 m².arbre⁻¹ avec un LAI de 4,24 ($\pm 1,39$; N=300). La résistance du couvert (r_c) 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. Pour estimer la résistance du couvert, on suppose que toutes les feuilles sont semblables (mêmes caractéristiques physiologiques, même microclimat).

Nous calculerons r_c à partir des mesures du flux de chaleur latente au dessus du couvert par la méthode micro-météorologique du rapport de Bowen. Les mesures sont effectuées en continu du 9 au 24 avril 2013 : la résistance du couvert moyenne journalière est de 580,88 s.m⁻¹ ($\pm 215,56$; N=615), avec une résistance aérodynamique moyenne $r_a=137$ s.m⁻¹ (hauteur moyenne du peuplement de 2,47 m). Cette résistance du couvert moyenne journalière est comparable au 500 s.m⁻¹ d'un peuplement de citrus étudié par Rana *et al.* (2005), obtenue à l'aide de la méthode des corrélations.

Connaissant d'une part la résistance du couvert obtenue par le rapport de Bowen et d'autre part, l'indice foliaire (LAI=4,24), on peut calculer la résistance stomatique moyenne d'une feuille (pour un pas de temps de 20 minutes, temps de scrutation du rapport de Bowen). Les mesures ont été faites dans des conditions de disponibilité en eau optimales (plantation irriguées ; réserve en eau du sol proche de la capacité au champ). Ainsi, les résistances stomatiques mesurées sont les résistances stomatiques minimales $r_{\text{stomatique-min}}=176,01$ s.m⁻¹ ($\pm 91,397$; N=615) sur la période du 9 au 24 avril 2013, valeurs très proches obtenues sur des peuplements comparables par Cohen et Cohen (1983), Cohen *et al.* (1983), Cohen et Fuchs (1987) ou Cohen *et al.* (1987). Nous avons repris les valeurs du potentiel hydrique limite de la bibliographie (Green et Moreshet, 1979 ; Cohen et Cohen, 1983 ; Cohen *et al.*, 1983 ; Castel *et al.*, 1987 ; Cohen et Fuchs, 1987 ; Cohen *et al.*, 1987 ; Chartzoulakis *et al.*, 1999), soit un potentiel hydrique limite $\Psi_{\text{feuille-lim}}=-15$ bars et un potentiel hydrique maximal $\Psi_{\text{feuille-max}}=-25$ bars, valeur obtenue sur la même variété, Valencia Orange late.

Le sol de la station d'étude est un sol sableux, avec une granulométrie fonction de la profondeur résumé ainsi :

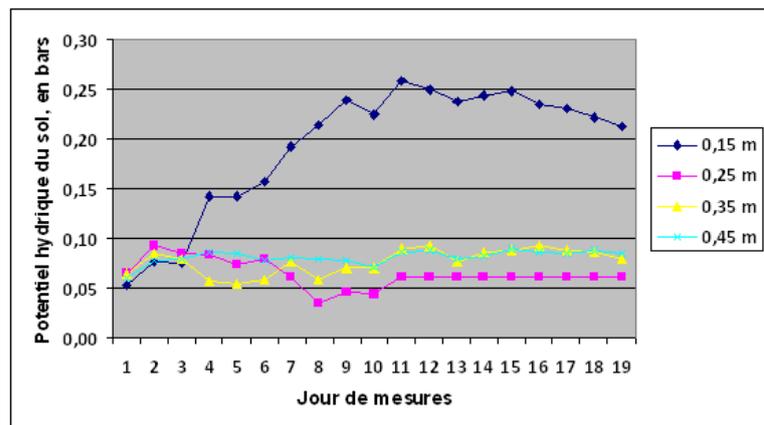
- **Entre 0 et 35 cm** : sable fin (31,4 %), sables grossier (66,1 %), limon grossier (0,5 %), argile (2 %), pH_{eau} (calcimétrie) de 9,12, pH_{KCl} de 9,05, conductivité électrique (solution de sol) de $186,40 \mu S.cm^{-1}$;
- **Entre 35 et 70 cm** : sable fin (23,8 %), sables grossier (74,6 %), limon grossier (0 %), argile (1,6 %) ¹; pH_{eau} (calcimétrie) de 8,8, pH_{KCl} de 8,97, conductivité électrique (solution de sol) de $358,40 \mu S.cm^{-1}$.

Le sol est homogène et sableux, sur 1,20 m. La composante principale du potentiel hydrique du sol est le potentiel matriciel. L'eau retenue par les forces matricielles représente le volume compris entre le contenu à la capacité au champ (le potentiel matriciel à la capacité au champ) et le contenu au point de flétrissement permanent (potentiel matriciel au point de flétrissement permanent). Le potentiel matriciel du sol est lié au contenu en eau du sol par une relation appelée courbe caractéristique de l'humidité du sol. Nous avons appliqué au sol étudié la formule empirique de Gardner (1960), soit :

- pour l'humidité volumique à la capacité au champ, $R_{CC}(i)=0,238 cm^3/cm^3$ ($R_{CC}(i)=18,3 mm$ sur 0,1 m), avec un potentiel hydrique à la capacité au champ de $\Psi_{CC}(i)=-0,1 bars$;
- pour l'humidité volumique au point de flétrissement permanent, $R_{PP}(i)=0,071 cm^3/cm^3$ ($R_{PP}(i)=5 mm$ sur 0,1 m) correspondant à un potentiel hydrique au point de flétrissement permanent, $\Phi_{PP}(i)=-16 bars$;
- les coefficients dépendant des caractéristiques hydrauliques du sol de la strate i ont été établis à partir de mesures faites sur des échantillons des sols de la station d'étude, soit $A(i)=2,396 10^{-4}$ et $B(i)=-4,2134$;
- la réserve utile calculée sur 0,1 m est de $R_{RU}(i)=13,2 mm$; elle est extrapolée à toute la hauteur du profil.

Le potentiel hydrique de mesures est respectivement, pour les profondeurs de 0,15, 0,25, 0,35 et 0,45 m de -0,192, -0,061, -0,076 et -0,081 bars (figure 2), avec une rétention en eau du sol de 89,9 à 92 % de R_{CC} (sans stress hydrique, E_a/E_p de 0,8) pour l'ensemble du profil.

Figure 2 : Valeurs journalières du potentiel hydrique du sol pour les 16 jours de mesure du 9 au 24 avril 2013 pour les profondeurs 0,15 m, 0,25 m, 0,35 m et 0,45 m. *Daily values of the soil water potential for a 16-day period of measurement between the 9th and the 24th of April 2013 at 0.15 m, 0.25 m, 0.35 m and 0.45 m depths.*



2.2. Irrigation, coefficient cultural - évapotranspiration potentielle

L'irrigation de la plantation a été de $994,3 mm.an^{-1}$, soit une moyenne de $2,72 mm.jour^{-1}$. Les doses sont traditionnellement calculées en utilisant un coefficient cultural moyen annuel d' $ETR/E_p=0,78$ (minimal de 0,58 en janvier et maximal de 1,27 en juillet). Les sols sont

¹ Laboratoire d'Analyses du CIRAD de Montpellier, CIRAD-PERSYST, US49 « Analyses », Avenue Agropolis TA B-49/0134398, Montpellier (www.cirad.fr).

irrigués toute l'année, avec un minimum durant les mois de janvier-février-mars-novembre-décembre et un maximum durant les mois de mai-juin-juillet-août (tableau 2a). Les doses annuelles d'irrigation appliquées à l'orangerie sont très proches de celles issues des travaux de Castel et Buj (1990), Martin *et al.* (2001), Garcia Petillo et Castel (2004) ou Garcia Petillo et Castel (2007).

Tableau 2 : Valeurs mensuelles moyennes de l'évapotranspiration réelle calculées sur la période du 1^{er} janvier 2005 au 31 décembre 2010, et valeurs mensuelles moyennes de l'irrigation de l'orangerie de la station d'étude (valeurs constantes sur la période du 1^{er} juin 2005 au 26 avril 2013) : a) comparaison de l'ETR_{calculée} avec l'irrigation (ETR vs I_{moy}) ; b) comparaison de l'ETR_{calculée} avec l'irrigation à laquelle on ajoute les précipitations incidentes (Pi) (ETR vs I_{moy}+Pi) ; c) comparaison de l'ETR_{calculée} avec l'irrigation à laquelle on ajoute les précipitations au sol Ps (soit Pi-In) (ETR vs I_{moy}+Ps).

Simulated average monthly values of the actual evapotranspiration and the average monthly values of the irrigation of the orange grove of the studies plot over the period of January 1 2005 to December 31 2010 (constant values over the period of June 1 2005 to April 26 2013): a) comparison between $E_{a,simulated}$ and irrigation (E_a vs I_{mean}); b) comparison between $E_{a,simulated}$ and irrigation with gross precipitations (Pi) (E_a vs $I_{mean}+Pi$); c) comparison between $E_{a,simulated}$ and irrigation with throughfall, Ps (P_s =gross precipitations-net interception) (E_a vs $I_{mean}+P_s$).

a)	ETR	I _{moy}	Pi	I _{moy} +Pi	I _{moy} +Ps
	m ³ mois ⁻¹				
Janvier	54527	39680	17376	57056	54971
Février	54273	40320	11683	52003	50601
Mars	60905	54560	5045	59605	59000
Avril	64356	62400	3080	65480	65110
Mai	67892	71920	13987	85907	84228
Juin	76663	84000	0	84000	84000
Juillet	84526	133920	0	133920	133920
Août	83412	104160	0	104160	104160
Septembre	80429	72000	0	72000	72000
Octobre	72889	49600	13480	63080	61462
Novembre	60747	43200	1761	44961	44750
Décembre	53518	39680	9924	49604	48413
Jan.-dec.	814136,6	795440,0	76336,0	871776,0	862615,7

b)	I _{moy} -ETR	(I _{moy} +Pi)-ETR	(I _{moy} +Ps)-ETR	I _{moy} -ETR	(I _{moy} +Pi)-ETR	(I _{moy} +Ps)-ETR
	m ³ mois ⁻¹	m ³ mois ⁻¹	m ³ mois ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ mois ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ mois ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ mois ⁻¹
Janvier	-14847,0	2529,0	443,8	-186	32	6
Février	-13952,7	-2270,1	-3672,0	-174	-28	-46
Mars	-6345,0	-1299,7	-1905,1	-79	-16	-24
Avril	-1956,0	1124,0	754,4	-24	14	9
Mai	4028,0	18014,7	16336,3	50	225	204
Juin	7337,1	7337,1	7337,1	92	92	92
Juillet	49394,0	49394,0	49394,0	617	617	617
Août	20748,4	20748,4	20748,4	259	259	259
Septembre	-8429,3	-8429,3	-8429,3	-105	-105	-105
Octobre	-23289,0	-9809,0	-11426,6	-291	-123	-143
Novembre	-17547,0	-15785,6	-15997,0	-219	-197	-200
Décembre	-13838,1	-3914,1	-5105,0	-173	-49	-64
Jan.-dec.	-18696,6	57639,4	48479,1	-233,7	720,5	606,0
Excès	81507	99147	95014	1019	1239	1188
Déficit	-100204	-41508	-38106	-1253	-519	-476
Bilan	-18696,6	57639,4	56908,4	-233,7	720,5	711,4

c)	(I _{moy} +Ps)-ETR	I _{moy} -ETR	(I _{moy} +Pi)-ETR	(I _{moy} +Ps)-ETR
	m ³ 80 ha ⁻¹ mois ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ mois ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ mois ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ mois ⁻¹
Juin	754,4	-24	14	9
Juillet	16336,3	50	225	204
Août	7337,1	92	92	92
Septembre	49394,0	617	617	617
Octobre	20748,4	259	259	259
Juin-octobre	94570	994	1208	1182

Lors de nos mesures en avril, l'absorption racinaire a préférentiellement eu lieu dans la première strate du sol, de 0 à 0,15 m (figure 2) ; les strates sous-jacentes 0,15-0,25 ou 0,25-0,35 ou 0,35-0,45 m se sont maintenues à la capacité au champ. Le mois d'avril est un mois durant lequel l'irrigation appliquée est proche de l'ETR_{calculée} issue de notre modèle (± 9 m³ d'eau.ha⁻¹.mois⁻¹, soit 0,3 m³ d'eau.ha⁻¹.jour⁻¹, cette différence représentant 1,25 % ; figure 3 et tableau 2b). 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 (tableau 2c), ce qui n'est pas le cas des autres mois. 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 10⁻⁶ m.s⁻¹), soit l'équivalent de 517 mm.jour⁻¹. Sachant que les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à Pi=95,4 mm.an⁻¹ et que la dose maximale d'irrigation est de 10 mm.jour⁻¹, nous pouvons supposer que l'infiltrabilité des sols n'a effectivement jamais été minimale.

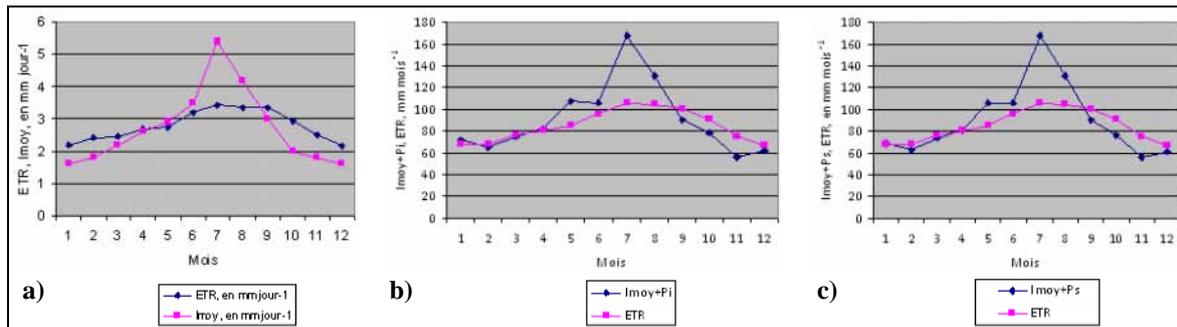


Figure 3 : Valeurs mensuelles moyennes de l'évapotranspiration réelle calculées sur la période du 1^{er} janvier 2005 au 31 décembre 2010 et valeurs mensuelles moyennes de l'irrigation de la station d'étude (valeurs constantes sur la période du 1^{er} juin 2005 au 26 avril 2013) : a) comparaison de l' $ETR_{calculée}$ avec l'irrigation (ETR vs I_{moy}) ; b) comparaison de l' $ETR_{calculée}$ avec l'irrigation à laquelle on ajoute les précipitations incidentes (Pi) (ETR vs $I_{moy}+Pi$) ; c) comparaison de l' $ETR_{calculée}$ avec l'irrigation à laquelle on ajoute les précipitations au sol Ps (soit $Pi-In$) (ETR vs $I_{moy}+Ps$). *Simulated average monthly values of the actual evapotranspiration and the average monthly values of the irrigation of the orange grove of the studies plot over the period of January 1 2005 to December 31 2010 (constant values over the period of June 1 2005 to April 26 2013): a) comparison between $Ea_{simulated}$ and irrigation (Ea vs I_{mean}); b) comparison between $Ea_{simulated}$ and irrigation with gross precipitations (Pi) (Ea vs $I_{mean}+Pi$); c) comparison between $Ea_{simulated}$ and irrigation with throughfall, Ps (Ps=gross precipitations-net interception) (Ea vs $I_{mean}+Ps$).*

L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle et moyenne journalière calculée sur la période 2005-2010 est de $1271,5 \text{ mm.an}^{-1}$ ($3,48 \text{ mm.jour}^{-1}$), avec une E_p minimale moyenne en janvier de $2,74 \text{ mm.jour}^{-1}$ et en décembre de $2,70 \text{ mm.jour}^{-1}$, et une E_p maximale moyenne en juillet ($4,26 \text{ mm.jour}^{-1}$) et août ($4,20 \text{ mm.jour}^{-1}$).

2.3. Simulation de l'évapotranspiration réelle de l'orangerie et irrigation de précision

La simulation de l'évapotranspiration réelle de l'orangerie a été effectuée pour la période du 1^{er} janvier 2005 au 31 décembre 2010 en utilisant la paramétrisation du modèle issue de nos mesures. L'évapotranspiration réelle moyenne annuelle calculée sur les six années étudiées est de $1017,2 \text{ mm.an}^{-1}$ ($2,79 \text{ mm.jour}^{-1}$), soit très proche de la dose d'irrigation annuelle appliquée à l'orangerie : $I_{moy}=994,3 \text{ mm.an}^{-1}$ ($2,72 \text{ mm.jour}^{-1}$), soit 102,3 % de I_{moy} . Ces valeurs sont comparables à celles issues des travaux de Castel et Buj (1990), Martin *et al.* (2001), Garcia Petillo et Castel (2004) ou Garcia Petillo et Castel (2007), valeurs obtenues sur les mêmes types de peuplement. Nous analysons la distribution de l'irrigation mensuelle au cours d'une année moyenne issue des six années de calcul. Comme nous ignorons le détail des calculs qui ont conduit aux doses d'irrigation, nous analysons l' $ETR_{calculée}$ de trois façons :

- 1. Comparaison de l' $ETR_{calculée}$ avec l'irrigation (ETR vs I_{moy})** (tableau 2b et figure 3a) : sur une année, l' $ETR_{calculée}$ est supérieure aux doses irrigation appliquées de $18697 \text{ m}^3.\text{mois}^{-1}$, soit $233 \text{ m}^3.\text{mois}^{-1}.\text{ha}^{-1}$. Les valeurs de l'irrigation pour les mois de janvier à mars sont de 25 à 30 % inférieures à celles de l' ETR calculée ; celles d'avril et mai sont très proches ; celles des mois de juin, juillet et août sont très fortement supérieures (10 à 60 %) et celles de septembre à décembre inférieures de 11 à 25 %. Ces calculs ne tiennent pas compte des apports d'eau dus aux précipitations incidentes (Pi).
- 2. Comparaison de l' $ETR_{calculée}$ avec l'irrigation à laquelle on ajoute les précipitations incidentes (Pi) (ETR vs $I_{moy}+Pi$)** (tableau 2b et figure 3b) : nous avons ajouté aux doses mensuelles d'irrigation les apports dus aux précipitations incidentes mensuelles (avec $Pi_{annuelle}$ de $95,4 \text{ mm.an}^{-1}$). Sur une année, l' $ETR_{calculée}$ est inférieure aux doses d'irrigation appliquées de $57639 \text{ m}^3.\text{mois}^{-1}$, soit $720 \text{ m}^3.\text{mois}^{-1}.\text{ha}^{-1}$. Les valeurs de l'irrigation pour les mois de janvier à avril sont très proches (2-5 %) de celles de l' ETR calculée ; celles des mois de juin, juillet et août nettement supérieures (10 à 60 %) et celles de septembre à

décembre inférieures de 11 à 15 %. Cette approche n'est pas assez précise car elle ne tient pas compte du phénomène d'interception nette de la plantation. Il s'agit de déduire la fraction des précipitations incidentes qui s'évapore sans atteindre le sol et qui ne doit pas être prise en compte dans le calcul de l'évapotranspiration réelle.

- 3. Comparaison de l'ETR_{calculée} avec l'irrigation à laquelle on ajoute les précipitations au sol Ps (soit Pi-In) (ETR vs I_{moy}+Ps) (tableau 2b et figure 3c) :** nous avons estimé les précipitations au sol (Ps) à partir du modèle de l'interception de Nizinski et Saugier (1988). Il résulte que, compte tenu du régime des pluies (brèves averses mais intenses) et du type de végétation (plantation en rangs), les précipitations au sol s'élèvent en moyenne à 88 % des précipitations incidentes (Pi). Nous avons ajouté aux doses mensuelles de l'irrigation les apports dus aux précipitations au sol (avec Ps_{annuelle} de 83,9 mm.an⁻¹). Sur une année, l'ETR_{calculée} est inférieure aux doses d'irrigation appliquées de 56908 m³.mois⁻¹, soit 711 m³.mois⁻¹.ha⁻¹. Les valeurs de l'irrigation pour les mois de décembre à avril sont très proches (2-5 %) de celles de l'ETR_{calculée} ; celles des mois de juin, juillet et août nettement supérieures (10 à 60 %) et celles des mois de septembre à novembre inférieures de 11 à 15 %.

Quelle que soit l'approche, la comparaison de l'ETR_{calculée} avec l'irrigation (ETR vs I_{moy}+Pi) ou avec l'irrigation à laquelle on ajoute les précipitations au sol Ps (ETR vs I_{moy}+Ps) rend compte de doses d'irrigation adéquates pour les mois de décembre à mai, mais fortement surestimées pour les mois de juin à octobre (tableau 2c), ce qui se traduit par un drainage hors de la zone racinaire de l'orangerie. L'ETR_{calculée} avec l'irrigation (ETR vs I_{moy}+Ps) est de 94570 m³ d'eau.an⁻¹ pour l'ensemble de la plantation de 80 ha, soit 1182 m³ d'eau.ha⁻¹.mois⁻¹. Ceci constitué 11,9 % de volume total d'eau utilisé dans l'irrigation (792266 m³ d'eau.an⁻¹ pour l'ensemble de la plantation de 80 ha).

L'irrigation en excès des mois de mai-juin-juillet-août (mois de maturation et de récolte des fruits) est motivée par le projet d'augmentation du tonnage de la récolte de fruits, projet qui repose sur la supposition qu'un engorgement temporaire induirait une absorption supplémentaire. Ceci nous semble discutable car, compte tenu du type de sol (sol sableux, réserve utile réduite) et de son état hydrique (réserve en eau proche de la capacité au champ), les doses d'eau en excès sont drainées quasi instantanément hors la zone racinaire. Il serait souhaitable de faire une étude comparative de l'évolution du poids des fruits des arbres irrigués en faisant varier le coefficient cultural Ea/Ep, de valeur inégale/inférieure à 0,80 à des valeurs supérieures à 1. Par ailleurs, une analyse économique s'impose, car l'irrigation (système de goutte-à-goutte) a un coût élevé, dû au coût de l'eau.

D'après Bouazzama et Bahri (2009), qui utilisent un espère Maroc late, en irrigation gravitationnelle, sans précision du type de sols et du mode de calcul du coefficient cultural, le rendement final avec un coefficient cultural Ea/Ep=0,8 serait de 74 kg.arbre⁻¹, alors que pour un coefficient cultural Ea/Ep=1,1, le rendement serait de 117 kg.arbres⁻¹, soit une augmentation de 43 kg.arbres⁻¹. Ces résultats peuvent être pris en considération dans le bilan économique : les gains hypothétiques issus de rendement en fruits plus élevés dus à une irrigation en excès du même ordre que celle mentionnée par Bouazzama et Bahri (2009) compensent-ils le coût global de l'irrigation (coût élevé de l'eau acheminée) ? Il est ainsi raisonnable de retenir des pertes en eau de 94570 m³ d'eau.an⁻¹ pour l'ensemble de la plantation de 80 ha, soit 1182 m³ d'eau ha⁻¹.mois⁻¹ (tableau 2c).

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 météorologique du réseau national) en tenant compte de la spécificité du couvert (ici, la résistance du couvert, et en particulier la relation entre résistance stomatique et potentiel hydrique des feuilles). 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 $94570 \text{ m}^3 \text{ d'eau.an}^{-1}$ pour l'ensemble de la plantation de 80 ha, soit $1182 \text{ m}^3 \text{ d'eau an}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$.

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. Cependant, 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 d'étude du 9 au 24 avril 2013, peut être amélioré. En effet, l'approche de Monteith (1965) – modèle Jarvis–Stewart (Stewart, 1988) – ne tient pas compte de l'évolution des stomates (*résistance stomatique minimale*) au cours de leur durée de vie, évolution contrôlant la régulation du flux transpiratoire (résistance stomatique minimale ou la conductivité stomatique maximale) : *i*) l'évolution de la morphologie de l'épiderme des feuilles chez l'oranger du débourrement jusqu'à sa sénescence, et au cours des différentes phases (si elles existent) ; on pourra ainsi étudier des feuilles ici persistantes et donc, *ii*) l'évolution de la résistance stomatique minimale dépendant de l'âge de la feuille.

Remerciements : Cette étude a été financée par l'Agence Inter-établissements de Recherche pour le Développement (AIRD) et le Science and Technology Development Fund (STDF). Les auteurs remercient Hosseney Fathy, Directeur d'exploitation et Mohammed Yahia Fouta, propriétaire de l'orangerie El-Salam Farm, pour leur aide sur le terrain.

Références bibliographiques

- ALLEN R. G., PEREIRA L. S., RAES D. et SMITH M., 1998 : Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. Paper n°56, Rome, Italy, 300 pages.
- BOUAZZAMA B. et BAHRI A., 2009 : *Détermination des coefficients culturaux de la variété d'oranger « Maroc late » au périmètre irrigué Tadla*. Symposium international « Agriculture durable en région méditerranéenne (AGDUMED) », 14-16 mai 2009, Rabat, Maroc, 390-392.
- BOWEN I. S., 1926 : The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 27, 779-787.
- BRAUDEAU E. et ZAGHLOUL 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 pages.
- BRAUDEAU E. et MOHTAR R. H., 2006 : Modeling the swelling curve for packed soil aggregates using the pedostructure concept. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 494-502.
- CASTEL J. R., BAUTISTA I., RAMOS C. et CRUZ G., 1987 : Evapotranspiration and irrigation efficiency of mature orange orchards in Valencia (Spain). *Irrigation and Drainage System*, 3, 205-217.
- CASTEL J.R. et BUJ A., 1990 : Response of « Salustiana oranges » to high frequency deficit irrigation. *Irrigation Science*, 11, 121-127.

- CHARTZOULAKIS K., MICHELAKIS N. et STEFANOUDAKI E., 1999 : Water use, growth, yield and fruit quality of « Bonanza » oranges under different soil water regimes. *Advances in Horticultural Science*, 13, 6-11.
- COHEN S. et FUCHS, M., 1987 : The distribution of leaf area, radiation, photosynthesis and transpiration in a « Shamouti » orange hedgerow orchard, I. Leaf area and radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 40, 123-144.
- COHEN S., FUCHS M., MORESHET S. et 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, 145-162.
- COHEN S. et COHEN Y., 1983 : Field studies of leaf conductance response to environmental variables in Citrus. *Journal of Applied Ecology*, 20(2), 561-570.
- COHEN Y., FUCHS M. et COHEN S., 1983: Resistance to water uptake in a mature Citrus tree. *Journal of Experimental Botany*, 34(141), 451-460.
- GAD A., YOUNES H. et ABDEL-HADY M., 1996 : Evaluation of Soil Degradation in Northern Sinai (Egypt). In: ESCADAFAL R., Mulders M.A., Thiombiano L. (éditeurs.), Using Remote Sensing and GdI S Techniques. *Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographiques - Monitoring soils in the environment with remote sensing and GIS*, Paris, ORSTOM, 445-456.
- GARCÍA PETILLO M. et CASTEL J. R., 2007 : Water balance and crop coefficient estimation of a citrus orchard in Uruguay, *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5(2), 232-243.
- GARCIA PETILLO M. et CASTEL J. R., 2004 : The response of Valencia orange trees to irrigation in Uruguay. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2, 429-443.
- GARDNER W. R., 1960 : Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Science*, 89, 63-73.
- GREEN G. C. et MORESHET S., 1979 : An analysis of seasonal water use characteristics of Valencia orange trees in the Sundays River Valley. *Crop Production*, 8, 179-183.
- HEILMAN J. L., MCINNES K. J., GESCH R. W., LACANO R. J. et SAVAGE M. J., 1996 : Effects of trellising on the energy balance of a vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81, 79-83.
- HOFFMAN G. J., OSTER J. D. et ALVES W. J., 1982 : Evapotranspiration of mature orange trees under drip irrigation in an arid climate. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 25, 992-996.
- JENKINS D. A., 1990 : North and Central Sinai. In: Rushdi Said (éditeur), The geology of Egypt, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, 361-380.
- MARIN F. R., ANGELOCCI L. R., PEREIRA A. R., VILLA NOVA N. A. et SENTELHAS P. C., 2001 : Sap flow and evapotranspiration in an irrigated citrus orchard. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9, 219-226.
- MONTEITH J. L., 1965 : Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms. *Symposia of the Society of Experimental Biology*, New York, Academic Press, 19, 205-234.
- NIZINSKI J. J. et SAUGIER B., 1988 : Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Acta Oecologica/Oecologia Plantarum*, 9/2(3), 311-329.

- NIZINSKI J. J. et 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.
- PHILIP J. R., 1987 : A physical bound on the Bowen ratio. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, 1043-1045.
- RANA G., KATERJI N., MATRORILLI M. et EL MOUJABBER M., 1994 : Evapotranspiration and canopy resistance of grass in a Mediterranean region. *Theoretical and Applied Climatology*, 50(1-2), 61-71.
- RANA G. et KATERJI N., 2000 : Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal Agriculture*, 13(2-3), 125-153.
- RANA G., KATERJI N. et DE LORENZI F., 2005 : Measurement and modelling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128, 199-209.
- REVFEIM K. J. A. et JORDAN R. B., 1976 : Precision of evaporation measurements using the Bowen ratio. *Boundary-Layer Meteorology*, 10, 97-111.
- ROSE C. W., BYRNE G. F. et HANSEN G. K., 1976 : Water transport from soil through plant to atmosphere: a lumped parameters model. *Agricultural Meteorology*, 16, 171-184.
- SAUGIER B., 1974 : *Transport de CO₂ et de vapeur d'eau au-dessus et à l'interface végétation-atmosphère. Interaction du microclimat avec le comportement physiologique de plantes prairiales*. Thèse d'Etat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 155 pages.
- STEDUTO P., CALIANDRO A., RUBINO P., BEN MECHLIA N., MASMOUDI M., MARTINEZ-COB A., JOSE FACI M., RANA G., MASTRORILLI M., EL MOURID M., KARROU M., KANBER R., KIRDA C., EL-QUOSY D., EL-ASKARI K., AIT ALI M., ZAREB D. et SNYDER R. L., 1996 : Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates in the Mediterranean region. In: Camp C.R., Sadler E.J., Yoder R.E. (éditeurs), *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, Proceedings of the International Conference, San Antonio, TX, 3-6 November, 357-364.
- STEWART J. B., 1988 : Modelling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43, 19-35.
- THOM A. S., 1972 : Momentum, mass and heat exchange of vegetation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 98, 124-134.
- VAN DEN HONERT T. H., 1948 : Water Transport in plants as a catenary process. *Discussions of the Faraday Society*, 3, 146-153.
- VILLALOBOS F. J., ORGAZ F., TESTI L. et FERERES E., 2000 : Measurement and modelling of evapotranspiration of olive (*Olea europea* L.) orchards. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130, 155-163.