



IRD - UMR 242 « Institut d'Écologie et des Sciences de l'Environnement - *iEES de Paris* »

Projet de recherche 2015-2018

Caractérisation, fonctionnement et remédiation des sols argileux salés, sous conditions naturelles et irrigués avec les eaux salées dans la plaine du Sisseb-Kairouan (Tunisie Centrale)

*

Thème 3. Caractérisation et fonctionnement du système eau-sol-plante en conditions de stress hydrique, salin et nutritionnel

Optimisation de l'utilisation des ressources en eau d'une plantation de grenadiers (*Punica granatum* L) (sols argileux salés de la plaine du Sisseb-Kairouan, Tunisie Centrale)

JJ NIZINSKI¹, M. REZIGUE², H. AMAMI², S. KANZARI² et M. HACHICHA²

Décembre 2014

¹ Institut de Recherche pour le Développement – I.R.D., UMR 242 « Institut d'Écologie et des Sciences de l'Environnement - *iEES de Paris* », Département « SOLEO », Equipe « BIOPHYS », Centre d'Île de France, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy, France, téléphone: (33) 1-48-02-55-33; courriel: georges.nizinski@ird.fr

² Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts - INGRES, Tunis, Tunisie, téléphone: (216) 248-334-19; courriels: mourad.rezigue@iresa.agrinet.tn, hacib.amami@iresa.agrinet.tn, sabri.kanzari@iresa.agrinet.tn et hachicha.mohamed@iresa.agrinet.tn

Optimisation de l'utilisation des ressources en eau à partir de l'exemple d'une plantation des grenadiers (*Punica granatum* L) (sols argileux salés de la plaine du Sisseb-Kairouan, Tunisie Centrale)

Titre du projet de recherche proposé: « *Optimisation de l'utilisation des ressources en eau à partir de l'exemple d'une plantation des grenadiers (*Punica granatum* L) (sols argileux salés de la plaine du Sisseb-Kairouan, Tunisie Centrale)* » - proposition de projet de recherche pour un(e) étudiant(e) en Master II ou en thèse (partie de thèse)

1. Introduction – contexte scientifique

Les terres de la plaine kairouanaise, en cours de bonification (environ 30.000 ha), constituent probablement le dernier aménagement d'envergure à mettre en valeur en Tunisie. Une partie des terres bonifiées sera sous irrigation avec des eaux moyennement salées et une autre partie sous conditions naturelles (pluviométrie annuelle d'environ 300 mm). A long terme, la surexploitation de la nappe profonde va se traduire par une réduction de l'irrigation (diminution des volumes et des fréquences), d'où le besoin de favoriser la bonification des sols salés kairouanais sous conditions pluviales.

Les doses d'irrigation de l'orangerie ont été jusqu'à présent choisies en utilisant un coefficient cultural (rapport évapotranspiration réelle/évapotranspiration potentielle), E_a/E_p (Penman, 1948; FAO; Allen *et al*, 1998) qui a été estimé de façon « classique » ($E_a/E_p=0,4$) 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 éparses situés en zones semi-arides, et (b) à partir de la valeur de l'évapotranspiration potentielle faisant référence au gazon bien alimenté en eau. Nous avons comparé les valeurs de ce coefficient cultural avec celles issues de la bibliographie sur d'autres plantations en zones semi-arides.



Photo 1 – Vue générale de la plantation de grenadier

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 la plantation de grenadiers avec un pas de temps de vingt minutes en utilisant la méthode du rapport de Bowen (Nizinski *et al*, 2014a), 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/le potentiel hydrique des feuilles) (Monteith, 1965; Nizinski et Saugier, 1989; Nizinski *et al*, 2014b). Nous validerons le modèle à partir des mesures de la réserve en eau et des potentiels hydriques des sols de l'orangerie puis proposons d'améliorer ce modèle.

Nous avons comparé les doses d'irrigation appliquées à la plantation de grenadiers avec l'évapotranspiration réelle issue du modèle: cette comparaison nous permet de proposer une gestion quotidienne de l'irrigation plus économe en eau. L'application de ce coefficient aux plantations de grenadiers est discutée.

2. Matériels et méthodes - acquisition des données, type de mesure, fréquence, caractéristiques du matériel

Les mesures sont effectuées à l'échelle du peuplement sur la période 2015-2018. Les calculs de l'Ea sont 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 sur une durée d'environ 12 heures. Nous avons mesuré avec un pas de temps de vingt minutes la température moyenne de l'air, 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, à 2 m et à 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 m, 0,25 m, 0,35 m 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. 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 est inférieure à $\pm 0,01$ °C, soit pour les deux capteurs $dT = \pm 0,02$ °C. La précision des mesures de la pression partielle de vapeur d'eau est inférieure à $\pm 0,01$ kPa, soit pour les deux capteurs $d_e = \pm 0,02$ kPa. Ces mesures en

continu sont stockées sur une centrale d'acquisition de données de type Micrologger CR1000 (Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis) et ensuite transférées sur ordinateur portable.

2.2. Description du modèle

2.2.1. Réserve eau du profil du sol

Le modèle calcule pour chaque jour (variables de sortie): (a) la réserve en eau du sol ($RP_{(j)}$) sur la base de l'équation du bilan hydrique de façon telle que la variation de la réserve en eau du profil soit égale à la différence entre les entrées (précipitations au sol, $Ps_{(j)}$ et/ou irrigation, $I_{(j)}$) et les sorties (drainage de l'eau hors de la zone racinaire du sol ($Dr_{(j)}$), et (b) l'absorption de l'eau dans l'ensemble du profil par les racines du peuplement ($ABS_{(j)}$).

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 ($R_{CC}(i)$) - et par sa rétention en eau minimale ($R_{PFP}(i)$). 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 ($Dr_{(i-1)(j)}$) additionné à celui déjà présent ($RP_{(i)(j-1)}$) diminué du volume d'eau absorbé par les racines ($ABS_{(i)(j)}$) et $E_{sol(j)}$ est supérieur à la capacité au champ ($R_{CC}(i)$). 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*), seule la litière serait soumise au phénomène d'évaporation ($E_{sol(j)}=0,0 \text{ mm.jour}^{-1}$), le sol sous-jacent n'étant concerné que par le phénomène d'absorption. L'excès d'eau de la strate i ($Dr_{(i)(j)}$) constitue l'entrée d'eau pour la strate sous-jacente ($i+1$). Ainsi, le bilan d'eau de toute strate i est égal à:

$$Dr_{(i-1)(j)} - E_{sol(j)} + (RP_{(i)(j-1)} / (j-1)) - ABS_{(i)(j)} \approx 0 \quad [\text{mm.jour}^{-1}] \quad [1]$$

En comparant l'équation [1] avec les valeurs limites ($\leq R_{PFP}(i)$; $\leq R_{CC}(i)$ et $> R_{CC}(i)$) nous avons déduit $DR_{(i)(j)}$ et $RP_{(i)(j)}$. 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 ($RP_{(i)(1)}=R_{CC}(i)$). Le modèle utilise les variables d'entrée suivantes:

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

Le modèle comporte quatre principaux paramètres: la relation résistance stomatique moyenne-potential 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 $R_{PFP}(i)$).

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, $I_{(j)}$, et par les précipitations au sol ($Ps_{(j)}$). Les valeurs de l'irrigation (mesures) et des précipitations au sol (modèle; Nizinski et Saugier, 1988a) introduites dans le modèle sont des variables d'entrée. Les doses d'irrigation

rechargeront la première strate du sol ($i=1$) s'additionneront 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 de nos sols n'est jamais minimale et qu'il n'y a donc jamais ruissellement.

2.2.2. 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) (*in* Nizinski et Saugier, 1989; Nizinski *et al*, 2014b), 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:

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

Avec: $\Psi_s(i)(j)$ —potentiel hydrique moyen dans la strate i , le jour j , en bars; $\Psi_{\text{feuille}(j)}$ —potentiel hydrique moyen des feuilles d'arbres le jour j , en bars; R —résistance totale sur l'ensemble du trajet sol-arbre correspondant à la somme des résistance 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, (c) 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 la littérature Saugier (1974) (*in* Nizinski et Saugier, 1989); $LR(i)(j)$ —fraction de la longueur totale des racines présentes dans la strate i , le jour j , soit: $LR(i)(j)=\text{longueur racinaire dans la strate } i \text{ le jour } j / LR_{(j)}$; $LR_{(j)}=\text{longueur des racines totale sur tout profil le jour } j$

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

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

Avec: $ABS_{(j)}$ —absorption de l'eau par les racines d'arbres dans l'ensemble du profil le jour j, en $mm.jour^{-1}$; n—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.

2.2.3. Potentiel hydrique du sol

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

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

Avec: $\Theta(i)_{(j-1)}$ —humidité volumique du sol de la strate i, le jour j, en $cm^3.cm^{-3}$; $RP(i)_{(j-1)}$ — réserve en eau du sol de la strate i, le jour (j-1), en $mm.jour^{-1}$; h(i)—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) (*in* Nizinski et Saugier, 1988a) à:

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

Avec: A(i) et B(i) – 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.

2.2.4. 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): 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 (adaptée par Tanner, 1968):

$$E_a = E_p / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_{st} / LAI r_a)) \quad [mm.jour^{-1}] \quad [6]$$

Avec: E_a —évapotranspiration réelle, en $mm.jour^{-1}$; E_p —évapotranspiration potentielle, en $mm.jour^{-1}$ (FAO; Allen *et al*, 1998); r_{st} —résistance stomatique d'une feuille, en $s.cm^{-1}$; LAI—indice foliaire du couvert, sans unité; r_a —résistance aérodynamique du couvert, en $s.cm^{-1}$.

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

$$r_a = (1/(k^2 u_{2M}) [\ln((z-d)/z_0)]^2) \quad [s.cm^{-1}] \quad [7]$$

Avec: r_a -résistance aérodynamique, en $s.cm^{-1}$; k -constante de von Karman (0,39); u_{2M} -vitesse du vent mesurée à 2 mètres de la surface du sol, en $m.s^{-1}$; z -niveau considéré, en m; z_0 -longueur de rugosité, en m; d -hauteur du déplacement, en m.

Nous avons estimé r_a à partir des profils de la vitesse du vent au dessus du couvert végétal; pour ce couvert arborescent nous avons calculé r_a à partir de la hauteur du peuplement:

$$d=0,75 h \quad \text{et} \quad z_0=0,1 h \quad [m] \quad [8] \quad \text{et} \quad [9]$$

Avec: d -hauteur de déplacement, en m; z_0 -longueur de rugosité, en m; h -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 -1,30 et -2,50 MPa pour les espèces arborescentes (dans notre cas le potentiel hydrique foliaire critique est d'environ -1,50 MPa). L'équation empirique [10], mise au point sur ce peuplement de grenadiers permet de rendre compte de la variation de la résistance stomatique moyenne en fonction du potentiel hydrique foliaire, soit:

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

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:

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

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:

$$\text{si } \Psi_{\text{feuille}(j)} \leq \Psi_{\text{sol}(j)} \quad \text{alors} \quad \sum ABS_{(j)} \approx Tr_{(j)} \quad [mm.jour^{-1}] \quad [12]$$

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

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

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

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

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' $\sum ABS_{(j)} \approx Tr_{(j)}$, nous avons repris la résolution numérique proposée par Rose *et al*, 1976 (*in*

Nizinski et Saugier, 1989) 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 $\Psi_{feuille(j)} \leq \Psi_{feuille-lim}$
- * Si $r_{st}=r_{st-max}$ alors $\Psi_{feuille(j)} \geq \Psi_{feuille-max}$
- * Si $r_{st-min} < r_{st} < r_{st-max}$ alors $\Psi_{feuille-lim} < \Psi_{feuille(j)} < \Psi_{feuille-max}$ et $\Psi_{feuille-lim} \geq 0$ et $\Psi_{feuille-lim} \leq 0$

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

3. Conditions de réalisation - Durée de projet – Calendrier - Budget

a) *Direction du programme*: Georges Nizinski (Institut de Recherche pour le Développement – I.R.D., UMR 242 « Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement - *iEES de Paris* », Département « SOLEO », Equipe « BIOPHYS », Centre d'Ile de France, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy, France, téléphone: (33) 1-48-02-55-33; courriel: georges.nizinski@ird.fr) en collaboration avec Mourad Rezigue, Hacib Amami, Sabri Kanzari et Mmohamed Hachicha de l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts-INGREF, Tunis, Tunisie, téléphone: (216) 248-334-19; courriel: mourad.rezigue@iresa.agrinet.tn, hacib.amami@iresa.agrinet.tn, sabri.kanzari@iresa.agrinet.tn et hachicha.mohamed@iresa.agrinet.tn.

b) *Période d'étude*: de janvier à décembre 2015-2018

c) *Infrastructure*:

- Matériel végétal: étude *in situ* dans la plantation de grenadiers de Kerouan, Tunisie, dans des conditions hydriques non limitantes (valeurs moyennes de R proches de la capacité au champs - R_{CC});
- Equipement de mesures: tour à flux – rapport de Bowen, méthode des corrélations (transpiration, résistance/conductance du couvert et stomatique).
- Equipement de traitement des données et des images.

d) Manips à faire sur les feuilles d'oranger *in situ* (programme lié « *Suivi phénologique et étude des variations de la conductance stomatique maximale chez le grenadier (Punica granatum L) (sols argileux salés de la plaine du Sisseb-Kairouan, Tunisie Centrale)* »):

- Les mesures au poromètre sont non destructives; les résistances stomatiques peuvent être mesurées sur une même feuille à différents intervalles de temps;
- Les mesures au Microscope électronique à balayage sont destructives, il faudra faire des échantillons de feuilles d'âges différents et puiser dans ces échantillons à un rythme qui correspond à celui des mesures au poromètre;
- L'étude de la morphologie d'une feuille de grenadier à l'aide d'un Microscope électronique à balayage est telle que pour avoir des mesures représentatives d'une feuille il faut prendre en compte: les deux cotés de la feuille, « zoomer » la pointe, le milieu et la base de la feuille;

- Le comptage de la « population » des stomates au mm^2 d'une feuille; l'évaluation du degré du développement des stomates synchrone au développement et/ou la sénescence des feuilles;
- Le rythme des mesures:
 - *Hebdomadaires*: après le débourrement, feuille d'environ d'un mois – conductance stomatique (transpiration);
 - *Mensuelles*: conductance stomatique;
 - *Horaire, journalières, hebdomadaires et mensuelles*: données micro-météorologiques, teneur en eau du sol relative correspondante – teneur en eau/teneur en eau à la capacité au champs (R/R_{CC}).



Photo n°2 et n°3 – Etat de la surface des feuilles dans la plantation de grenadier sur la placette d'étude

4. Evaluation du coût de la manip

- * L'étudiant - gratification: **500** euros par mois (un étudiant pendant les six mois) – total de **3.000** euros;
- * Le transfert de la tour à flux – rapport de Bowen **2.500** euros ;
- * Deux capteurs micro-météorologiques: heat flux sensor - Campbell (**853,00** euros); net radiometer - Campbell (**1.231,00** euros) ;
- * Total d'environ **7.584** euros 1^{ère} année, ensuite 3.000 euros par année (soit total sur quatre années - **16.584** euros)

5. Les résultats attendus

L'étude des variations de la conductance stomatique maximale avec l'âge des feuilles de grenadier travail nous permettra d'affiner un modèle mécaniste « sol-plante » (Monteith, 1965; Nizinski et Saugier, 1989; Nizinski *et al*, 2014b).

Une plantation de grenadiers peut-être considérée comme un couvert ligneux dense, dans ce cas la méthode du rapport de Bowen permettra d'analyser « l'indice foliaire efficace » et

la résistance du couvert (surface des feuilles qui participent effectivement au flux transpiratoire).

L'approche de Penman-Monteith, méthode « simple », où l'indice foliaire (LAI) est une constante, est insuffisante: l'indice foliaire contribuant à la cinétique du flux transpiratoire est une fonction complexe dépendante de nombreux facteurs (position des feuilles, conditions de croissance, caractéristiques métaboliques...).

Le rapport de Bowen ne fait pas intervenir le LAI et cette méthode se rapproche au mieux du phénomène réel puisque l'on mesure la sortie réelle de vapeur d'eau.

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 minutes, temps de scrutation du rapport de Bowen) et la comparer avec la résistance stomatique moyenne issue du modèle Jarvis-Stewart et avec les résistances stomatiques d'un échantillon optimal de feuilles, résistances mesurées au poromètre de façon synchrone. Cette méthode du rapport de Bowen associée à des mesures de porométrie, permet d'analyser « l'indice foliaire efficace » (surface des feuilles qui participent effectivement au flux transpiratoire) qui peut être décomposée par strate et pour différents pas de temps.

6. Références

- 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 pages
- 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., 2007. *Etude et modélisation du bilan des échanges de masse et d'énergie dans les couverts végétaux*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Orléans, Orléans, 357 pages.
- 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
- Nizinski J.J. & Saugier B., 1988a. A model of leaf budding and development for a mature *Quercus* forest. *Journal of Applied Ecology*, **25**(2), 643-652
- Nizinski J.J. & Saugier B., 1988b. Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Acta Oecologica/Oecologia Plantarum*, **9/23**(3), 311-329
- Nizinski J.J., Morand D. & Saugier B., 1989. Variation of stomatal resistance with leaf age in *Quercus petraea*: Effect on the soil-water balance of an oak forest. *Annales des Sciences Forestières*, **46** suppl., 429s-432s.
- Nizinski J.J., Galat G. & Galat-Luong A., 2014a. Actual evapotranspiration and canopy resistance measurement of the savannah in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). *Russian Journal of Ecology – Ekologiya*, **45**(5), 359–366
- Nizinski J.J., Montoroi J.-P., Zaghoul A., Ali R. & Saber M., 2014b. La modélisation : une aide à la gestion de l'irrigation de précision - cas de l'orangerie d'El-Salam, Nord Sinaï, Egypte. *Climatologie* (sous presse)

- Paw U.K.T. & Meyers T.P., 1989. Investigations with a higher-order canopy turbulence model into mean source-sink levels and bulk canopy resistances. *Agricultural and Forest Meteorology*, **47**, 259-271
- Penman H.L., 1948. Natural evaporation from open water balance bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, **193**, 120-145.
- 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