



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 irriguées 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

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)

Georges NIZINSKI¹ et Dalila SOUGUIR²

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, fax: (33) 1-48-02-79-49; courriel: georges.nizinski@ird.fr

² Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts - INGREF, Tunis, Tunisie, téléphone: (216) 248-334-19 ; courriel: dalila.souguir@iresa.agrinet.tn

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)

Titre du projet de recherche proposé: « *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)* » - proposition de projet de recherche pour un(e) – deux étudiant(e)s en Master II ou en thèse (partie de thèse).

1. Introduction – contexte scientifique

Pour estimer les doses d'irrigation, d'une plantation de grenadiers, située dans la plaine du Sisseb-Kairouan, Tunisie Centrale, nous utiliserons le modèle de transpiration de Nizinski *et al*, 2014 (issu du modèle de Penman-Monteith); ce modèle (système sol-plante-atmosphère) simulera la teneur en eau et le potentiel hydrique du sol, avec un pas de temps d'une journée.

L'évapotranspiration potentielle de Penman (Penman, 1948 ; FAO; Allen *et al*, 1998) est une des variables d'entrée du modèle.

Le modèle de Penman-Monteith (Monteith, 1965; Nizinski et Saugier, 1989) peut être appliqué pour les surfaces présentant une très petite pente (ici > 1 %), uniformes et suffisamment étendues (un rapport hauteur de peuplement/étendue horizontale de 1 : 100; ici < 1000 ha), les flux de chaleur sensible et de chaleur latente sont considérés comme verticaux et on applique le principe de « similarité » entre les coefficients de transfert de chaleur sensible (k_H) et de chaleur latente (k_E), ainsi: $k_H \approx k_E$. Les relations empiriques entre flux et gradients verticaux des chaleurs sensible et latente peuvent s'écrire (adaptée par Tanner, 1968):

Erreur ! **Signet** **non** **défini.** $E_a = \frac{E_p}{\left(1 + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma}\right) \cdot \left(\frac{r_{st}}{LAI \cdot r_a}\right)\right)}$

[mm.jour⁻¹] [1]

Avec: E_a - évapotranspiration réelle, en mm jour⁻¹; E_p - évapotranspiration potentielle (FAO; Allen *et al*, 1998), en mm jour⁻¹; Δ - dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, en kPa °C⁻¹; γ - constante psychrométrique, en kPa °C⁻¹; r_{st} - résistance stomatique d'une feuille, en s cm⁻¹; ($1/r_{st} = g_s$: conductivité stomatique); r_a - résistance aérodynamique, en s m⁻¹; LAI-indice foliaire du couvert, sans unité; r_a - résistance aérodynamique du couvert, en s cm⁻¹.



Photo 1 – Vue générale de la plantation de grenadier

La transpiration du couvert est la somme des transpirations de l'ensemble des feuilles (**indice foliaire – LAI**), chaque feuille ayant une **résistance stomatique** (r_s) donnée instantanée dépendante de ses caractéristiques physiologiques propres et du microclimat auquel elle est soumise. La résistance stomatique de LAI-feuilles, donc les mouvements stomatiques (dépendant de la turgescence des cellules de garde) sont sous le contrôle du rayonnement incident, de l'état hydrique de l'air, de l'état hydrique du sol et de l'état hydrique des feuilles. Nous proposons d'étudier dans ce projet les deux grandeurs, **LAI** et r_s et leur impact sur la consommation en eau de la plantation de grenadiers.

2. Hypothèses de travail – objectifs scientifiques

2.1. Suivre phénologique et indice foliaire chez le grenadier (LAI)

L'étude phénologique nous permet de construire un modèle de l'évolution de l'indice foliaire au cours de l'année avec un pas de temps d'une journée, utilisant l'approche de Nizinski et Saugier, 1988 (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 le grenadier.

Evolution de la surface des feuilles, on peut exprimer la surface foliaire mise en place par la surface totale des feuilles en unités de surface (m^2), ou bien par l'indice foliaire, à savoir la surface des feuilles (F) divisée par la surface du sol (S) recouvert par celles-ci, expression que nous utiliserons ici, à savoir :

$$LAI = F/S$$

$$[m^2 \cdot m^{-2}] \quad [2]$$

Avec: LAI – indice foliaire, sans unités; F - surface des feuilles, en m²; S-surface du sol, en m².

Nous avons divisé le cycle annuel de l'évolution de la surface des feuilles en cinq stades:

- stade de dormance des bourgeons où LAI est constant et nul;
- stade « *d'activation* » physiologique des bourgeons qui se termine par le débourrement;
- stade de croissance de la surface des feuilles;
- stade de plein développement des feuilles où LAI=LAImax;
- stade de chute des feuilles où la surface des feuilles décroît.

a) **La dormance:** elle peut être corrélée aux jours courts, aux basses températures de l'air, à un stress hydrique aigu ou aux carences nutritives. Elle correspond à un équilibre interne entre promoteurs (gibbereline, cytokinine) et inhibiteurs (acide abscissique) de la croissance (Nizinski et Saugier, 1988).

b) **Le débourrement:** sous l'influence, d'abord du froid et ensuite de l'augmentation de la durée du jour et de la température de l'air, le taux d'acide abscissique diminue alors que le taux de gibberiline augmente, avec comme conséquence, l'accroissement de l'activité métabolique; il y a mobilisation des réserves nutritives, croissance racinaire ainsi que transfert de métabolites et d'hormones de croissance (gibbereline, cytokinine) des racines vers les bourgeons. Nous appellerons cette période, période « *d'activation* » métabolique. Les études hormonales expliquent la division et l'expansion des cellules des feuilles par l'action des cytokinines. Ainsi, les bourgeons évoluent de leur forme hivernale vers la libération distincte des feuilles; Aussenac (Nizinski et Saugier, 1988) propose l'échelle suivante pour observer cette évolution:

B0 – bourgeons non gonflés, conservant leurs dimensions hivernales;

B1 - bourgeons gonflés, écailles plus ou moins écartées;

B2 – la jeune pousse, dans le bourgeon, apparaît sans faire éclater les écailles;

B3 – le débourrement est effectif, écailles éclatées; les feuilles de la pousse sont partiellement libérées;

B4 – la jeune pousse est entièrement libérée et en phase de croissance.

La période « *d'activation* » métabolique correspond aux stades B1 et B2 d'Aussenac (Nizinski et Saugier, 1988) et se termine au stade B3; la durée exacte de cette période, le seuil thermique et le degré d'intervention du photopériodisme est propre à chaque géotype. Nous avons considéré, dans nos analyses, le stade B3 comme date de débourrement. Ces dates correspondent à la situation dans laquelle les bourgeons, *dans l'ensemble du peuplement*, se trouvent en phase B3 pour au moins 50 % des arbres, avec une précision de 1 à 3 jours. Parallèlement nous suivrons le comportement des bourgeons *sur cinq individus* de grenadier situés au milieu de la station d'études, d'après l'échelle d'Aussenac.

c) **La croissance des feuilles:** - il y a d'abord multiplication cellulaire dans les méristèmes, avec formation d'un nombre donné de cellules, correspondant à un nombre déterminé de feuilles. Ensuite, il y a élongation de ces feuilles jusqu'à ce qu'elles acquièrent leurs dimensions définitives puis dès que les feuilles sont mesurables, on peut estimer la phase de croissance des feuilles jusqu'à ce que la surface foliaire maximale soit atteinte (stade B4). En moyenne, pour un bourgeon

donné, entre le moment où les premières feuilles sont mesurables et le moment où la dernière feuille qui apparaît devient aussi mesurable, il s'écoule environ une semaine. Croissance en dimensions et croissance en poids sont, pour un organe donné, décalées dans le temps. Nous pouvons supposer qu'il en est de même pour l'ensemble des feuilles de notre espèce, dont toutes les feuilles apparaissent pendant une durée de sept jours. La croissance en poids ne nous intéresse pas directement pour l'objectif suivi, mais nous pouvons faire l'hypothèse que la croissance en dimensions et l'évolution fonctionnelle de l'appareil stomatique sont décalées, elles aussi, dans le temps. La croissance en dimensions, la mise en place de la surface foliaire agit essentiellement sur l'interception, la distribution des précipitations incidentes. L'évolution fonctionnelle de l'appareil stomatique règle la capacité transpiratoire des grenadiers. Les grandeurs mesurées 1^{er}) le suivi de l'accroissement de la surface des feuilles ; 2^{ème}) la date de la fin de la croissance de la surface des feuilles ; 3^{ème}) la surface maximale des feuilles de la plantation LAI_{max} . Les facteurs climatiques qui régissent le phénomène d'accroissement de la surface sont la température moyenne de l'air, l'humidité relative de l'air et la photopériode.

Calcul des surfaces foliaires – dans tout ce qui suit, nous avons établi la relation entre la surface foliaire réelle et la surface calculée à partir des longueurs et des largeurs, par régression linéaire sur un échantillon de 100 feuilles de taille différente, récoltées sur la station d'études au moment où $LAI_{(j)}=LAI_{max}$, donc au moment où ces feuilles ont leurs dimensions maximales. La longueur sera mesurée sur la nervure centrale, pétiole non compris, et la largeur à l'endroit le plus large de la feuille (précision ± 1 mm). Les surfaces seront mesurées à l'aide d'un planimètre automatique de fabrication « Delta T Devices », avec une précision de $\pm 0,1$ cm². **Indice foliaire maximal** (LAI_{max}) – il est obtenu par mesure indirecte, à partir de mesures lors de la chute des feuilles sur les feuilles tombées sur des grilles. Pour estimer la décroissance de la surface totale des feuilles nous devons installer au sol dix grilles fixes sur une surface totale de 25.000 cm², disposées régulièrement sur la placette d'études. Nous avons recueilli les feuilles fraîchement tombées sur les grilles, une fois par semaine ; nous les avons comptées puis avons mesurées leur surface à l'aide d'un planimètre automatique de fabrication « Delta T Devices » (précision de $\pm 0,1$ cm²) ; ces feuilles ont été séchées à 80 °C à l'étuve (jusqu'à stabilisation de leur poids) et pesées à 20 °C (précision de $\pm 0,0001$ g). La moyenne arithmétique des valeurs des relevés des 10 grilles représentera l'estimation de la décroissance partielle et totale de la surface des feuilles de la plantation.

- d) **La date de la fin de croissance des feuilles** – nous avons considéré comme date de fin d'accroissement de la surface des feuilles, la date pour laquelle les longueurs et les largeurs mesurées (à deux reprises) stabilisent sur l'ensemble des feuilles observées, à savoir 250 feuilles en 2015, 2016, 2017 et 2018.
- e) **La chute des feuilles** – lors de la chute des feuilles, il y a décroissance de la surface totale des feuilles jusqu'à annulation de cette surface. Cette décroissance a pour conséquence: 1^{er}) la diminution de la capacité de rétention en eau du couvert végétal, et donc la modification de l'interception; 2^{ème}) la diminution jusqu'à arrêt du flux transpiratoire. La diminution de la transpiration ne suit pas fidèlement la diminution de l'indice foliaire ($LAI_{(j)}$); ainsi l'évolution de l'indice foliaire n'est pas un critère satisfaisant pour l'estimation de l'évolution du flux transpiratoire lors de la chute des feuilles. On distingue deux étapes : 1^{er}) l'étape de sénescence des feuilles,

lors de laquelle il y a changement de couleur des feuilles (perte de chlorophylle) et constitution à la base du pétiole de la zone d'abscission ; 2^{ème}) l'étape d'abscission proprement dite, provoquée par la digestion des cellules constituant la zone d'abscission, puis détachement ou arrachement sous l'influence du vent. La sénescence des feuilles survient comme réponse au changement de photopériode et de régime thermique ; il y a rééquilibre hormonal en faveur des inhibiteurs de la croissance (auxine, gibberelline et cytokinine). La constitution de la zone d'abscission coïncide avec l'extinction de la transpiration, qui a lieu bien avant l'abscission et donc chute des feuilles. Nous discuterons, dans le chapitre 2.2., de l'évolution de la capacité transpiratoire d'une feuille au regard des variations de la conductance stomatique maximale.

Les résultats attendus : cette étude de l'indice foliaire chez le grenadier nous aidera à concevoir un modèle mécaniste inspiré de travaux de Nizinski *et al*, 2014. Nous validerons ce modèle à partir des mesures du suivi phénologique des grenadiers situés dans sur la plaine du Sisseb-Kairouan puis nous proposerons d'améliorer ce modèle

2.2. Étude des variations de la conductance stomatique maximale (résistance stomatique minimale) chez le grenadier

La résistance stomatique d'une feuille est généralement mesurée sur le terrain, puis calculée, calculée à l'aide de modèles empiriques comme celui de Jarvis (Stewart, 1988) qui utilisent des relations entre la résistance stomatique minimale de la feuille, son potentiel hydrique, le rayonnement global, le déficit de saturation de l'air et la réserve en eau du sol, on rend compte ainsi des variations de cette résistance avec les facteurs du milieu.

La résistance stomatique dépend en effet de la **résistance stomatique minimale**, valeur remarquable correspondant à une situation de non contrainte hydrique (sol et plante) (Nizinski, 2007). La résistance stomatique minimale évolue dans le temps, de l'apparition de la feuille jusqu'à sa mort, elle décroît jusqu'à une valeur minimale pour ensuite réaugmenter, ce que nous avons observé sur les autres espèces que nous avons étudiées. Chez les espèces caducifoliées (chêne, *Acacia*, hévée) toutes les feuilles du couvert évoluant *grosso modo* de façon synchrone, la résistance du couvert est une fonction de la résistance stomatique minimale et de l'indice foliaire.

Le grenadier est une espèce caduque, il faudra étudier le mode de renouvellement des feuilles à des époque(s) remarquable(s) et la dépendance de l'indice foliaire à la « *disponibilité en eau* ».

Nous avons étudié la relation [résistance stomatique minimale - indice foliaire] chez des différentes espèces caducifoliées (Nizinski, 2007): lors de la mise en place du couvert la résistance stomatique minimale d'une feuille décroît avec l'augmentation de l'indice foliaire et continue généralement de décroître jusqu'à sa valeur minimale alors que l'indice foliaire est maximal (Figure n°1). La période pendant laquelle le LAI est maximal (LAI_{max}) et la résistance stomatique minimale, r_{st-min} (Nizinski, Morand et Saugier, 1989) est plus ou moins longue en fonction de l'espèce; par exemple chez le chêne, elle est très courte (deux à trois semaines) (chez *Quercus petraea* - $LAI=100\%$; $r_{st}=3,6\pm 0,9\text{ s cm}^{-1}$; $LAI=8\%$; $r_{st}=8,7\pm 3,6\text{ s cm}^{-1}$).

Ensuite, la r_{st-min} réaugmente pendant toute la période du LAI_{max} (deux mois et demi pour le chêne) pour continuer d'augmenter lors de la sénescence (Nizinski, Morand et Saugier, 1989). Les photos n°2, n°3, n°4 & n°5 illustrent l'étude de la conductance stomatique minimale à partir de mesures au poromètre et de photographies au microscope électronique à balayage des épidermes des feuilles de *Quercus petraea*.

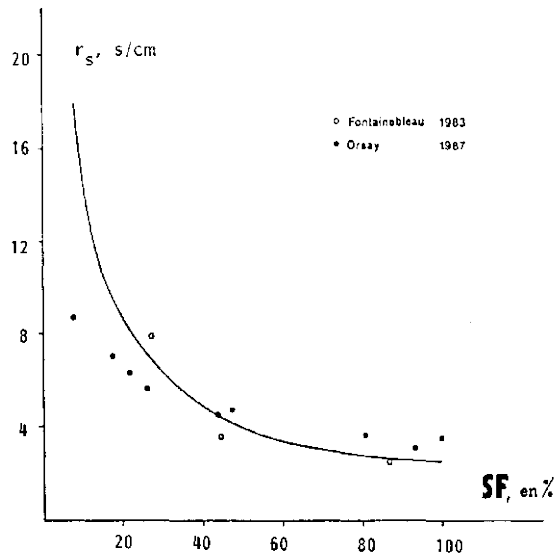


Figure 1 - Variation of stomatal resistance with leaf age, expressed as fraction of actual leaf area over maximal leaf area.

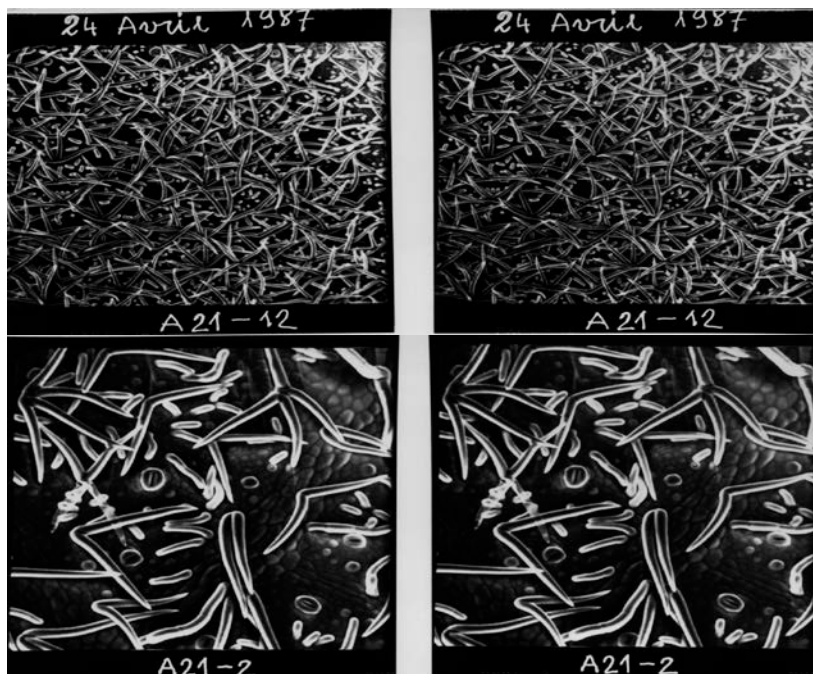


Photo n°2 et n°3 (deux agrandissements) – du 24 avril 1987, avec une surface foliaire 8 % du LAI_{max} , avec une résistance stomatique de $8,7 \pm 3,6 \text{ s cm}^{-1}$ (*Quercus petraea*) (Nizinski, Morand et Saugier, 1989)

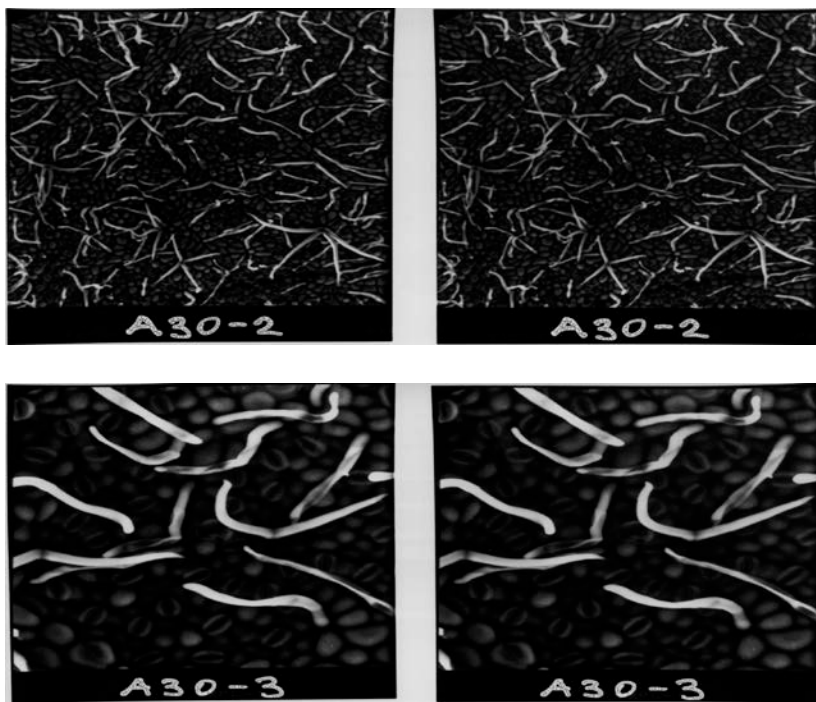


Photo n°4 et n°5 (deux agrandissements) – du 14 mai 1987, avec une surface foliaire 100 % du LAI_{max} , avec une résistance stomatique $3,6 \pm 0,9 \text{ s cm}^{-1}$ (*Quercus petraea*) (Nizinski, Morand et Saugier, 1989).

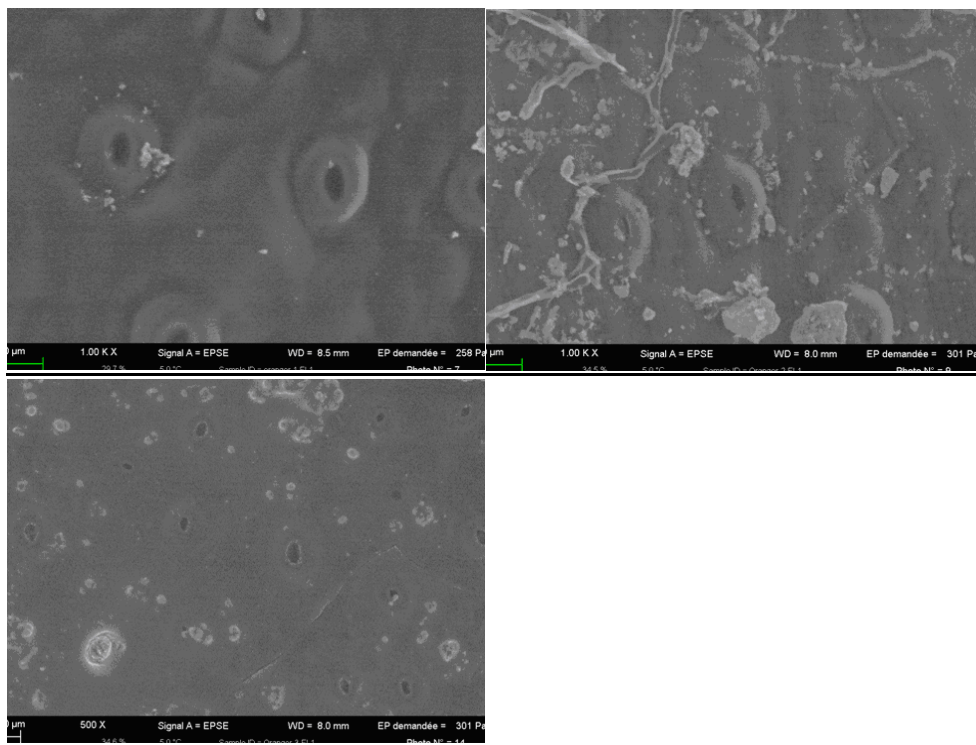


Photo n°6abc – Etat de la surface épidermes des feuilles de *Citrus sinensis late* (orangerie El-Salam, nord du Sinäï): photographies au Microscope électronique à balayage des épidermes des feuilles de Valencia late (*Citrus sinensis late*) – feuilles (a) d'un an; (b) deux ans; (c) trois ans; 100 % du $LAI_{max}=4,24$, avec une résistance stomatique moyenne $r_{stomatique-min}=176,01 \text{ s m}^{-1}$ ($\pm 91,397$; $N=615$) sur la période du 9 au 24 avril 2013 (Nizinski et al, 2014).

Pour le grenadier, espèce caducifoliée, nous nous proposons quantifier l'évolution de la conductance stomatique minimale en conditions naturelles au cours de la croissance des feuilles et de la sénescence, à partir de:

(a) à partir du rapport de Bowen (Paw et Meyers, 1989 ; Nizinski *et al*, 2014) :

$$r_c/r_a = [(((\Delta/\gamma) \beta) - 1) + (1 + \beta)] [\rho_a c_p ((e_{s(T)} - e_{a(T)})/\gamma (R_n - G_s))] \quad [s \text{ m}^{-1}] \quad [3]$$

Avec: r_c - résistance du couvert, en $s \text{ m}^{-1}$; r_a - résistance aérodynamique, en $s \text{ m}^{-1}$:

$$r_a = (1/(k^2 u_2)) (\ln(z - d)/z_0)^2 \text{ (Monteith, 1965)} \quad [s \text{ m}^{-1}] \quad [4]$$

Avec : k - constante de von Karman (0,39); u_2 - vitesse du vent mesurée à 2 mètres de la surface du sol, en m s^{-1} ; z - niveau considéré, en m; z_0 - hauteur de rugosité de la surface, en m; d - hauteur du déplacement du plan où la vitesse du vent s'annule, en m; $d = 0,63 h$ et $z_0 = 0,1 h$ (Thom, 1972); avec: d - hauteur de déplacement, en m; z_0 - longueur de rugosité, en m; h - hauteur du peuplement, en m; γ - constante psychrométrique, en $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; Δ - dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, en $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; β - rapport de Bowen rend compte de la répartition de l'énergie disponible au niveau d'une surface, c'est le rapport entre chaleur sensible (H) et chaleur latente d'évaporation (λE); $e_{s(T)} - e_{a(T)}$ - déficit de saturation de l'air, en kPa; $e_{s(T)}$ - pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface T, en kPa; R_n - rayonnement net ou effectif, en W m^{-2} ; G_s - flux de chaleur dans le sol, en W m^{-2} .

(b) à partir du modèle de Jarvis-Stewart (Stewart, 1988) proposant des relations empiriques entre la résistance stomatique d'une feuille (r_s) et/ou la résistance stomatique minimale d'une feuille (mesurée à l'aide d'un poromètre) ($r_{s\text{min}}$), l'indice foliaire (LAI), le rayonnement global (R_g), le potentiel hydrique des feuilles (Ψ_{feuille} ; chambre à pression), le déficit de saturation de l'air ($e_{s(T)} - e_{a(T)}$) et la réserve en eau du sol (R; sonde à neutrons, sonde TDR):

$$r_c = r_{s\text{min}}/\text{LAI} (f(R_g)) (g(\Psi_{\text{feuille}})) (h(e_{s(T)} - e_{a(T)})) (i(R_{\text{CC}} - R)) \quad [s \text{ m}^{-1}] \quad [5]$$

Avec: $r_{s\text{min}}$ - résistance stomatique minimale d'une feuille (valeurs mesurées), en $s \text{ m}^{-1}$; R - réserve en eau du profil du sol, en mm; R_{CC} - réserve du sol à la capacité au champ, en mm.

Cette étude propose d'affiner le lien entre la régulation du flux transpiratoire (résistance stomatique minimale ou conductivité stomatique maximale) et l'évolution de la morphologie de l'épiderme des feuilles chez le grenadier en conditions naturelles, au cours des différents stades de développement des stomates, du débourrement d'une feuille jusqu'à sa sénescence, et au cours des différentes phases (si elles existent) de la population de feuilles.

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, fax: (33) 1-48-02-79-49; courriel: georges.nizinski@ird.fr) en collaboration avec Dalila Souguir de l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts - INGREF, Tunis, Tunisie, courriel: dalila.souguir@iresa.agrinet.tn.

b) *Période d'étude*: de février à novembre (2015-2018).

c) *Infrastructure*:

- Matériel végétal: étude *in situ* dans la plantation des grenadiers de Kerouan, Tunisie, dans des conditions hydriques non limitantes (valeurs moyennes de R proches de la capacité au champs - R_{CC}); dix individus; échantillons de feuilles d'âge différents: du débourrement jusqu'à la sénescence.
- Microscope électronique à balayage du Centre d'Ile de France, Bondy.
- Equipement de mesures: poromètre (transpiration, résistance/conductance stomatique), planimètre (surface foliaire).
- Equipement de traitement des données et des images.

d) Manips à faire sur les feuilles d'oranger au laboratoire et *in situ*:

- 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'âge 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 oranger 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 puis « zoomer » sur la pointe, le milieu et la base de la feuille;
- Le comptage de la « population » de stomates par 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'âge d'environ un mois – conductance stomatique (transpiration);
 - *Mensuelles*: conductance stomatique, photos au Microscope électronique à balayage ;
 - *Journalières, hebdomadaires et mensuelles*: données météorologiques (réseau national), teneur en eau du sol relative correspondante – teneur en eau/teneur en eau à la capacité au champs (R/R_{CC}).



Photo n°7 et n°8 – 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 poromètre - location: 500 euros;
- * Le microscope électronique à balayage : une fois par mois à 90 euros/séance (pendant six mois) - total de 500 euros;
- * Total d'environ **4.000** euros par année (soit un total sur quatre années: 16.000 euros)

5. Les résultats attendus

Cette étude des variations de la conductance stomatique maximale avec l'âge des feuilles de grenadier nous aidera à affiner un modèle mécaniste « sol-plante » (Nizinski *et al*, 2014).

Une plantation de grenadier 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) (projet n°2 - « *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)* »).

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 nécessite pas l'estimation de LAI, c'est une méthode qui s'approche 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 phénologiques, 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
- Heilman, J.L. & Brittin, C.L., 1989. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, **44**, 261-296
- 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., 1988. A model of leaf budding and development for a mature *Quercus* forest. *Journal of Applied Ecology*, vol. 25, n°2, 643-652
- 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*, vol. **46** suppl., 429s-432s.
- Nizinski J.J., Galat G. & Galat-Luong A., 2014. Actual evapotranspiration and canopy resistance measurement of the savannah in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). *Russian Journal of Ecology – Ekologiya* , vol. 45, n° 5, 359–366
- Nizinski J.J., Montoroi J.-P., Zaghoul A., Ali R. & Saber M., 2014. 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