



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

Etude de l'absorption racinaire des grenadiers (*Punica granatum* L) dans des sols argileux salés de la plaine du Sisseb-Kairouan en Tunisie Centrale

JJ NIZINSKI¹, J.-P. MONTOROI¹ et M. HACHICHA²

Février 2015

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'Ile de France, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy, France, téléphone: (33) 1-48-02-55-33; courriels: georges.nizinski@ird.fr; jean-pierre.montoroi@ird.fr

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

Etude de l'absorption racinaire des grenadiers (*Punica granatum L*) dans des sols argileux salés de la plaine du Sisseb-Kairouan en Tunisie Centrale

Titre du projet de recherche proposé: « *Etude de l'absorption racinaire des grenadiers (Punica granatum L) dans des sols argileux salés de la plaine du Sisseb-Kairouan en 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

L'aménagement des terres de la plaine kairouanaise, en cours de bonification (environ 30.000 ha), constituent probablement le dernier aménagement d'envergure de 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). Le fait que la nappe profonde soit par ailleurs surexploitée 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.



Photo 1 – Vue générale de la plantation de grenadiers

Nous avons construit un modèle de l'évapotranspiration réelle (Nizinski et al. 2014), comme outil de la gestion d'irrigation, avec un pas de temps d'une journée, utilisant l'approche de Penman-Monteith (Penman, 1948; Monteith, 1965; FAO d'Allen et al. 1998; avec comme variables d'entrée les données météorologiques standard issues des stations météorologiques du réseau national) en tenant compte de la spécificité du couvert et en particulier la distribution dans le profil du sol de la masse racinaire. Ce modèle calcule pour chaque jour (variable 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 ($Abs_{(j)}$).

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

Le flux d'eau liquide, à caractère de flux conservatif, d'une journée (soit 24 heures), implique l'égalité entre la transpiration et absorption, donc :

$$Tr(j) \approx Abs(j) \quad [\text{mm.jours}^{-1}] \quad [1]$$

Avec: $Tr(j)$ – Transpiration du peuplement de grenadiers le jour j , en mm.jours^{-1} ; $Abs(j)$ - absorption d'eau par les racines des grenadiers dans l'ensemble du profil le jour j , en mm.jour^{-1} .

Le débit journalier étant identique à tous les niveaux de la plante, le volume de l'eau transpirée du peuplement, déterminée à l'aide de l'équation Penman-Monteith (Monteith, 1965; FAO; Allen et al. 1998), est égal à la quantité d'eau absorbée par les racines dans tout le profil racinaire. En supposant une relation linéaire entre absorption d'eau et longueur racinaire, seule la longueur du système racinaire et sa répartition dans le compartiment sol nous intéressera. Nous allons considérer la zone d'absorptions racinaire de deux manières – comme une mono-strate et comme une zone racinaire pluri-strates.

A) **Cas du profil mono-strate** - on suppose l'homogénéité du sol et de la densité racinaire sur tout le profil, soit:

$$\Psi_{\text{sol}} = \Psi_{\text{sol}(1)} = \Psi_{\text{sol}(2)} = \Psi_{\text{sol}(n)} \quad [\text{bars}] \quad [2]$$

Avec: Ψ_{sol} - potentiel hydrique moyen dans l'ensemble du profil, en bars; $\Psi_{\text{sol}(i)}$ - potentiel hydrique moyen dans la strate i , en bars ; de 1 à n strates du profil.

et

$$LR(i)/h(i) = \text{constant} \quad [\text{cm.cm}^{-1}] \quad [3]$$

Avec: $LR(i)$ – fraction de la longueur totale des racines présentes dans la strate i , en cm; $h(i)$ épaisseur de la strate i , en cm.

Ceci implique que la demande imposée au peuplement et transférée aux racines est répartie régulièrement sur toute la profondeur du sol. D'autre part, avec comme condition que toutes les racines soient également actives pendant toutes les phénophases, la variation de la réserve en eau du sol, et donc du potentiel hydrique, se fait de la même façon en tout point du profil. Le potentiel hydrique en un point donné du profil est alors égal au potentiel hydrique moyen du profil.

B) Cas du profil pluri-strates - nous avons choisi de prendre en compte les différentes strates du sol, et donc leurs particularités de structure, de texture et la répartition des racines, chaque strate étant considérée comme homogène. L'absorption totale sur tout le profil est calculée à partir du potentiel hydrique moyen du profil obtenu par pondération du potentiel de chaque strate par un coefficient égal au rapport de la longueur racinaire dans la strate considérée sur la longueur racinaire totale (Van Bavel et Ahmed, 1976), soit :

$$\text{Abs}(i) = ((\Psi_{\text{sol}(i)} - \Psi_{\text{feuilles}}) / R) * \text{LR}(i) \quad [\text{mm.jour}^{-1}] \quad [4]$$

Avec: Abs(i) – absorption d'eau par les racines des grenadiers dans la strate i, en mm.jour⁻¹; $\Psi_{\text{sol}(i)}$ - potentiel hydrique moyen dans la strate i, en bars; Ψ_{feuilles} – potentiel hydrique moyen des feuilles des grenadiers, en bars; R – résistance totale sur l'ensemble du trajet sol-plante, en bars jour⁻¹ mm⁻¹, correspondant à la somme des résistances suivantes (a) résistance à la pénétration radiale 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; LR(i) – fraction de longueur totale des racines présente dans la strate i, en cm; LR(i)=longueur racinaire dans la strate i/longueur racinaire totale sur tout le profil. L'absorption de l'eau dans l'ensemble du profil est ainsi:

$$\text{Abs} = \sum \text{Abs}_{(i)} \quad \text{de 1 à n strates du profil} \quad [\text{mm.jour}^{-1}] \quad [5]$$

Avec: Abs – absorption d'eau par les racines des grenadiers dans l'ensemble du profil, en mm.jour⁻¹; Abs_(i) – absorption d'eau par les racines des grenadiers dans la strate i, en mm.jour⁻¹; i – numéro de la strate; n – nombre des strates.

A potentiel hydrique égal, la quantité d'eau absorbée est d'autant plus grande que la densité des racines est importante. La répartition des racines dans chaque strate revêt par conséquent un rôle fondamental.

Bien que l'existence des profils hydriques aient été établies dans un large éventail de conditions édaphiques, elle n'est pas toujours liée à la densité du profil racinaire (Javaux et al. 2013); on dispose cependant de très peu des études sur les volumes d'eau effectivement mobilisés et redistribués (Moreira et al. 2003; Neumann et Cardon, 2012). Les outils de modélisation peuvent apporter une aide précieuse à la compréhension des processus en lien avec l'enracinement. Mais encore une fois ces efforts de recherche sont fortement concentrés sur l'enracinement superficiel. Les outils de modélisation utilisables proviennent de nombreux domaines dont nous pouvons citer ici quelques exemples: la croissance racinaire (Collet et al., 2006; Doussan et al. 2003; Pagès et al. 2012) l'ancrage dans le sol (Danjon et Reubens 2008; Dupuy et al. 2005b; Reubens et al. 2007), le développement des racines en lien avec les ressources en eau (Doussan et al. 1998; Draye et al. 2010; Javaux et al. 2008; Lobet et al. 2014; Pierret et al. 2007; Pierret et al. 2006) et minérales (Darrah et al. 2006; Dunbabin et al. 2003; Ho et al. 2004; McMurtrie et al. 2012a; McMurtrie et al. 2012b).

C) **Mesures de la longueur des racines absorbantes:** les racines sont généralement classées de manière assez approximative en fonction de leurs diamètres (fines, moyennes, grossières) ou de leur localisation dans le sol (superficielles, peu profondes et profondes). Ces classifications ne sont pas exactement fondées sur une justification fonctionnelle ou physiologique (Maeght, 2014).

Le classement général de racines en fonction de leur diamètre est empiriquement (et approximativement) lié à leurs différences fonctionnelles. Les plus grosses racines sont généralement considérées comme des vecteurs de transfert de l'eau à longue distance entre le système racinaire et les parties aériennes de la plante. Les racines fines sont plus spécifiquement dédiées à des fonctions locales, telles que l'absorption d'eau et de nutriments. Cependant, la classification des racines fines comme rapportée dans la littérature manque de cohérence en ce qui concerne les propriétés physiologiques et la variabilité des diamètres - sont généralement considérées comme «grossières» lorsque leur diamètre est >2 mm ou parfois > 5 mm, mais la justification d'un tel seuil reste floue et n'est pas consensuelle.

2.1. Description du modèle - absorption racinaire

Le modèle calcule pour chaque jour (variable 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 ($R_{PP}(i)$). 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 ($Abs_{(i)(j)}$) 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*; photo 4), 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:

$$Dr_{(i-1)(j)} - E_{sol(j)} + (RP_{(i)(j-1)} - R_{PP}(i)) - Abs_{(i)(j)} \approx 0 \quad [\text{mm.jour}^{-1}] \quad [6]$$

En comparant l'équation [1] avec les valeurs limites ($\leq R_{PP}(i)$; $\leq R_{CC}(i)$ 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 ($r_{st}/\Psi_{feuille}$), 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, $I_{(j)}$, et par les précipitations au sol ($Ps_{(j)}$). 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 ($i=1$) 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.

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 ($\Psi_{sol(j)}$) obtenu par pondération du potentiel de chaque strate ($\Psi_{sol(i)(j)}$) 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:

$$Abs(i)(j) = ((\Psi_{sol(i)(j)} - \Psi_{feuille(j)})/R) LR(i)(j) \quad [mm.jour^{-1}] \quad [7]$$

Avec: $\Psi_{s(i)(j)}$ —potential hydrique moyen dans la strate i , le jour j , en bars; $\Psi_{feuille(j)}$ —potential 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 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, (c) résistance à la circulation de l'eau dans les nervures des feuilles et les chambres sous-stomatiques, en $bars.jour^{-1}.mm^{-1}$; ($R=0,5 bars.jour^{-1}.mm^{-1}$; valeurs issue de la littérature Saugier (1974); $LR(i)(j)$ —fraction de la

longueur totale des racines présentes dans la strate i , le jour j , soit: $LR(i)_{(j)}$ =longueur racinaire dans la strate i le jour j / $LR_{(j)}$ =longueur des racines totale sur tout profil le jour j

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

$$Abs_{(j)} = \sum Abs(i)_{(j)} = ((\Psi_{sol}(i)_{(j)} - \Psi_{feuille(j)})/R) \quad [mm.jour^{-1}] \quad [8]$$

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.

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

a) *Direction du programme*: Georges Nizinski en collaboration avec Jean-Pierre Montoroi de l'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, téléphone: (33) 1-48-02-55-33; courriel: georges.nizinski@ird.fr; jean-pierre.montoroi@ird.fr); et Mohamed Hachicha de l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts-INGREF (Tunis, Tunisie, téléphone: (216) 248-334-19 ; courriel: 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 des grenadiers de Kerouan, Tunisie, dans des conditions hydriques non limitantes (valeurs moyennes de $R_{(j)}$ proches de la capacité au champs - R_{CC});
- Equipement de mesures: tarière de prélèvements des racines, tamis ;
- Equipement de traitement des données et des images: planimètre optique Delta-T Devices© (ou équivalent).

d) Manips à faire sur la plantation de grenadiers *in situ*; le programme proposé est lié aux deux programmes suivants : (1^{er}) « *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)* » et (2^{ème}) « *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)* »):

- Mesure de la longueur des racines absorbantes : les racines vont être récoltées sur la station d'étude, après creusement d'une fosse atteignant la limite de la zone racinaire des grenadiers (1,50 m de profondeur environ). Cette fosse se situera entre deux rangs d'arbres distants d'environ 4,0 m. L'échantillonnage va consister à prélever sur les faces de la fosse, chaque 10 cm, sous forme de cubes de 1.000 cm^3 découpés à l'aide d'une truelle. Les prélèvements auront lieu deux fois dans chaque strate sur deux faces de la fosse (60 échantillons). Les racines seront séparées de la terre par lavage au dessus d'un

tamis (de maille de 1 mm) puis divisées en deux classes: (a) « *racines fines* » d'un diamètre inférieur ou égal à 1 mm; ces racines vont être considérées comme racines absorbantes; (b) « *grosses racines* » d'un diamètre supérieur à 1 mm, ces racines sont considérées comme non absorbantes. Nous allons mesurer, pour chaque strate, la longueur totale des racines « fines », au moyen de la méthode décrite par Newman (1966), consistant à comptabiliser le nombre d'intersections d'un ensemble de racines posé au hasard sur une surface couverte par une série de ligne parallèles, l'écartement entre ces lignes étant connu (planimètre optique de type Delta-T Devices©).

- Par ailleurs, les racines seront récoltées dans les rangs des arbres à l'aide d'une tarière atteignant le limite de la zone racinaire des grenadiers (1,50 m de profondeur environ). Ces prélèvements auront lieu.
- Rythme des mesures:
 - *Semestrielles*: prélèvement des échantillons dans la fosse qui se situera entre deux rangs des arbres après le débourrement et lors de la période de la sénescence;
 - *Mensuelles*: prélèvement à la tarière des échantillons dans les rangs;
 - *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}), évapotranspiration réelle de la plantation.

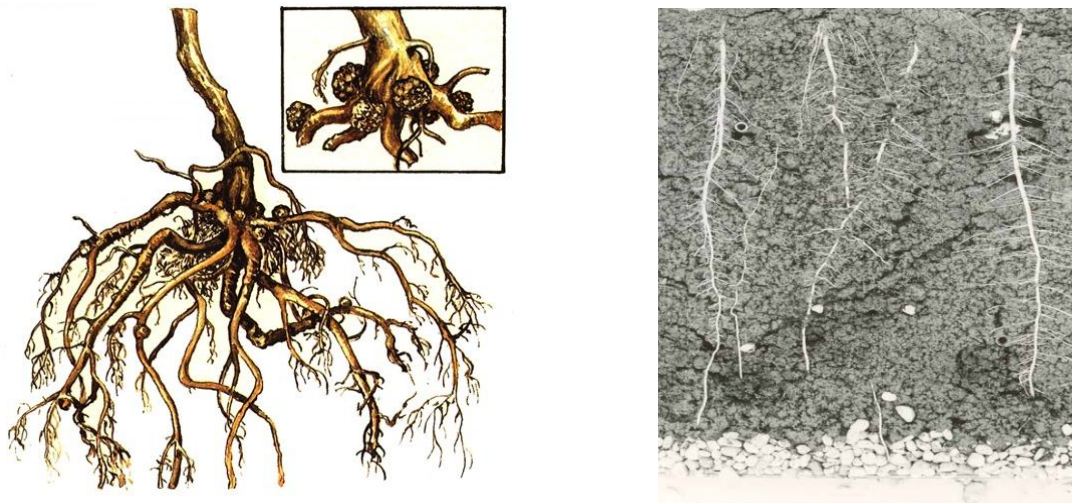


Figure n°1 – Schéma d'un système racinaire du grenadier

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 planimètre optique Delta-T Devices© 2.500 euros ;
- * Total d'environ **5.500** euros 1^{ère} année, ensuite 3.000 euros par année (soit total sur quatre années - **14.500** euros)

5. Les résultats attendus

Cette étude du système racinaire de grenadiers conduits en rangs et synchrones avec l'étude phénologique des grenadiers et les mesures de l'évapotranspiration réelle (rapport de Bowen, méthode des corrélations) nous aidera à affiner un modèle mécaniste « sol-plante-atmosphère » (Nizinski & Saugier, 1989; Nizinski et al. 2014). Nous allons estimer l'absorption racinaire avec un pas de temps d'une journée en considérant la zone racinaire de la plantation: a) comme un système mono-strate et b) comme système pluri-strate. Les valeurs de l'absorption racinaire issues du modèle vont être comparées avec les valeurs issues des mesures effectuées in situ. Ainsi, nous allons valider le modèle à partir des mesures de la réserve en eau et des potentiels hydriques des sols de la plantation de grenadiers puis proposer d'améliorer ce modèle, en focalisant notre attention sur les périodes de stress hydrique aigu ($R_{(j)}$ proche de R_{PPF}).

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
- Collet, C., Lof, M. & Pages, L., 2006. Root System Development of Oak Seedlings Analysed using an Architectural Model. Effects of Competition with Grass. *Plant and Soil*, **279**(12), 367–383
- Danjon, F. & Reubens, B., 2008. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. *Topology*, pp. 1–34
- Darrah, P.R., Jones, D.L., Kirk, G.J.D. & Roose, T., 2006. Modelling the rhizosphere: a review of methods for “upscaling” to the wholeplant scale. *European Journal of Soil Science*, **57**, 13–25
- Doussan, C., Pages, L. & Pierret, A., 2003a. Soil exploration and resource acquisition by plant roots: an architectural and modelling point of view. *Agronomie*, **23**(5-6), 419–431.
- Doussan, C., Pages, L. & Pierret, A., 2003b. Soil exploration and resource acquisition by plant roots: an architectural and modelling point of view. *Agronomie*, **23**(5-6), 419–431
- Doussan, C., Vercambre, G. & Pages, L., 1998. Modelling of the hydraulic architecture of root systems: An integrated approach to water absorption—Distribution of axial and radial conductances in maize. *Annals of Botany*, **81**, 225–232
- Draye, X., Kim, Y., Lobet, G. & Javaux, M., 2010. Model assisted integration of physiological and environmental constraints affecting the dynamic and spatial patterns of root water uptake from soils. *Journal of Experimental Botany*, **61**(8), 2145–55
- Dunbabin, V., Diggle, A. & Rengel, Z., 2003. Is there optimal root architecture for nitrate capture in leaching environments? *Soil Science*. Retrieved from <http://www.archive.org/details/plantrelationsfi00coul>
- Dupuy, L., Fourcaud, T., Stokes, A. & Danjon, F., 2005. A density based approach for the modelling of root architecture: application to Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) root systems. *Journal of Theoretical Biology*, **236**(3), 323–34
- Ho, M.D., Mccannon, B.C. & Lynch, J.P., 2004. Optimization modelling of plant root architecture for water and phosphorus acquisition. *Journal of Theoretical Biology*, **226**, 331–340

- Javaux, M., Schroder, T., Vanderborght, J. & Vereecken, H., 2008. Use of a Three Dimensional Detailed Modeling Approach for Predicting Root Water Uptake. *Vadose Zone Journal*, **7(3)**, 1079
- Javaux, M., Couvreur, V., Vanderborght, J. & Vereecken, H., 2013. Root Water Uptake: From Three Dimensional Biophysical Processes to Macroscopic Modeling Approaches. *Vadose Zone Journal*, **12(4)**
- Lobet, G., Couvreur, V., Meunier, F., Javaux, M. & Draye, X., 2014. Plant Water Uptake in Drying Soils. *Plant Physiology*
- Maeght J.-L., 2014. L'influence de la variabilité climatique sur l'enracinement superficiel et profond d'arbres adultes en plantation: Les cas de l'hévéa (*Hevea brasiliensis*) et du teck (*tectona grandis*) sous contraintes hydriques en Asie du sud-est. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 202 pages
- McMurtrie, R.E., Iversen, C.M., Dewar, R.C., Medlyn, B.E., Nasholm, T., Pepper, D. & Norby, R.J., 2012a. Plant root distributions and nitrogen uptake predicted by a hypothesis of optimal root foraging. *Ecology and Evolution*, **2(6)**, 1235–50
- McMurtrie, R.E., Iversen, C.M., Dewar, R.C., Medlyn, B.E., Nasholm, T., Pepper, D. A., & Norby, R.J., 2012b. Plant root distributions and nitrogen uptake predicted by a hypothesis of optimal root foraging. *Ecology and Evolution*, **2(6)**, 1235–50
- 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
- Moreira, M. Z., Scholz, F. G., Goldstein, G. & Franco, A.C., 2003. *Hydraulic lift in a neotropical savanna* pp. 573–581. Retrieved from <http://www.archive.org/details/plantrelationsfi00cou>
- Neumann, R.B. & Cardon, Z.G., 2012. The magnitude of hydraulic redistribution by plant roots: a review and synthesis of empirical and modelling studies. *The New Phytologist*, **194(2)**, 337–352
- Newman, E.I., 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *Journal of Applied Ecology*, **3**, 139-145
- 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., 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)
- Pages, L., Bruchou, C. & Garre, S., 2012. Links between Root Length Density Profiles and Models of the Root System Architecture. *Vadose Zone Journal*, **11**, 4
- 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
- Philip, J.R., 1966. Plant water relations: some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology*, **28**, 71-88
- Pierret, A., Doussan, C. & Pages, L., 2006. Spatio-temporal Variations in Axial Conductance of Primary and First order Lateral Roots of a Maize Crop as Predicted by a Model of the Hydraulic Architecture of Root Systems. *Plant and Soil*, **282**, 117–126

- Pierret, A., Doussan, C., Capowiez, Y., Bastardie, F. & Pages, L., 2007. Root Functional Architecture: A Framework for Modeling the Interplay between Roots and Soil. *Vadose Zone Journal*, **6**, 26
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G. & Muys, B., 2007. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees Structure and Function*, **21**, 385–402
- 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
- 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 Bavel, C.H.M. & Ahmed, J., 1976. Dynamic simulation of water depletion in the root zone. *Ecological Modelling*, **2**, 189-212
- Van den Honert, T.H., 1948. Water Transport in plants as a catenary process. *Discussions of the Faraday Society*, **3**, 146-153