

INVESTIGATION NUMERIQUE PAR LATTICE BOLTZMANN DES TABLETTES CHAUFFANTES EN BOUTURAGE SEMI-LIGNEUX D'OLIVIERS

F. BERROUG¹, M. FARAJI^{2,*}, E.K. LAKHAL¹, M. EL OMARI¹

¹Laboratoire d'Automatique de l'Environnement et Procédés de Transferts, Faculté des Sciences Semlalia- Université Cadi Ayyad-Marrakech- Maroc

²Laboratoire de Physique des Matériaux, Microélectronique, Automatique et Thermique, Département de Physiques, Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II, Casablanca-Maroc.

*farajimustapha@yahoo.fr

Résumé : Dans ce travail, on a procédé à l'étude du comportement thermique nocturne du substrat d'enracinement des boutures semi-ligneux de l'olivier sous le climat de la période d'automne à Marrakech. Ce substrat est chauffé par des sources de chaleur enterrées. Un code de calcul basé sur la méthode de Lattice Boltzmann a été élaboré pour résoudre le modèle mathématique de transfert de chaleur. L'étude d'optimisation de la position des sources de chaleur a montré qu'un enterrissement des sources de chaleur de 6.5 cm et une température uniforme des sources de 40°C permettent de garantir les conditions optimales de développement des boutures d'olives.

Mots clés: Chauffage, Lattice Boltzmann, Boutures d'olive, Source chaleur.

Introduction

La culture de l'olivier a connu ces dernières années au Maroc un développement très important. En effet, le Maroc est classé 2^{ème} producteur mondial de l'olive de conserve et 6^{ème} producteur de l'huile d'olive [1]. Le bouturage semi-ligneux est une technique de multiplication et d'intensification de la production de plants. Cette technique consiste à prélever sur des arbres (pied mère) de jeune rameaux d'un an, qu'on débite en petites boutures 10 à 15 cm de longueur. Sous des conditions bien définies en termes de température et d'humidité, les bases des boutures traitées à l'aide d'un hormone spécifique (A.I.B, Acide IndolButirique) et plantées verticalement dans le substrat (sol) à une profondeur de 5 cm et une densité de 400 à 800 boutures par m², émettent des racines (rhizogénèse) en passant un séjour dans le solde 2 à 3 mois selon les variétés et les conditions de multiplication[2].

Pour avoir une rhizogénèse adéquate, l'utilisation d'une serre est recommandée. Une humidité de l'air intérieur de 95% doit être assurée par un système de nébulisation qui répartit l'eau sous forme de brouillard à l'aide d'un micro jet. La nébulisation permet de maintenir une pellicule d'eau sur les feuilles, ce qui limite l'évapotranspiration et en conséquence, évite la dessiccation des boutures. Une température du substrat d'enracinement de 22 à 25 C° doit aussi être satisfaite [2].

Pour subvenir à cette dernière condition, on propose dans ce travail de répartir sous le substrat des sources de chaleur. Une étude et optimisation de la position de ces sources est conduite dans cette communication.

Depuis quelques années, les codes de calcul sont largement utilisés pour étudier la production agricole sous climat contrôlé. Ces méthodes nécessitent un temps de calcul important surtout pour les cas simulant la serre agricole tridimensionnelle à l'échelle réel. La méthode de Lattice Boltzmann sur réseau permet de donner des résultats assez performants que les méthodes numériques classiques mais avec un temps de calcul nettement plus réduit [3].

Formulation mathématique

La Figure 1 illustre le substrat d'enracinement des boutures d'olive qui est constitué d'une tablette remplie de sol de longueur $L=4$ m et d'épaisseur $e_s=40$ cm. La face supérieure du substrat échange la chaleur par convection naturelle avec l'air froid, les autres faces sont isolées. Des sources de chaleur uniformément réparties à une profondeur e_p du sol permettent d'assurer le chauffage des boutures d'olive durant la phase nocturne. L'objectif est d'analyser l'effet de la position des sources de chaleur sur la répartition de la température dans le substrat afin de réaliser des conditions de développement favorable des boutures d'olive.

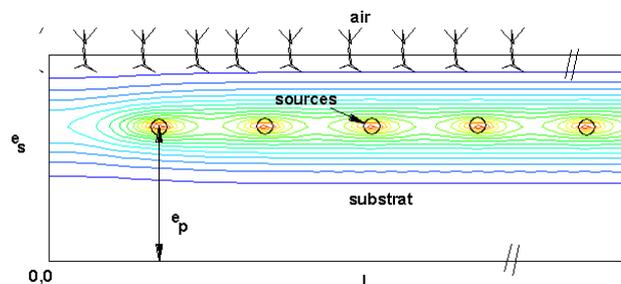


Figure 1 : Modèle physique

Les boutures sont enfoncées dans les 5 premiers cm du substrat ; la température des boutures doit être maintenue dans la marge 22°C - 25°C. La température moyenne de l'air ambiant est 15 °C, valeur typique d'une nuit froide de l'automne à Marrakech [4]. L'automne représente la période la plus favorable pour l'enracinement de la variété picholine marocaine [1]. Le coefficient d'échange de chaleur par convection h est égale à $h=7 \text{ W/m}^2\text{K}$; Le transfert de chaleur est bidimensionnel. Le sol est homogène, isotrope avec une conductivité thermique constante ($k = 4.05 \text{ W/mK}$) La teneur en eau est constante (60%). Ainsi l'équation de transfert de la chaleur dans le sol est :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

Cette équation est assujettie aux conditions aux limites et initiales suivantes :

$$T=0, T(x,y,t=0)=15^\circ\text{C} ;$$

$$t>0 ; y=e_s : h(T_a - T) = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2)$$

$$x=0, x=L ; -k \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$y=0 ; -k \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Les sources de chaleur sont ponctuelles et l'espacement est de 20 cm.

$$x_i = i \frac{L}{20}, i = 1 \text{ à } 19 : T(x_i, e_p) = 40^\circ\text{C} \quad (5)$$

Le système d'équations est résolu par la méthode de Lattice Boltzmann en utilisant un réseau D2Q4 à 4 vitesses sans particule résidante au centre. Le facteur de pondération est 1/4 pour chaque direction : 1,2,3 et 4.

L'équation de la cinétique de la fonction de distribution de la température f_k peut s'écrire :

$$\frac{\partial f_k(x, y, t)}{\partial t} + c_k \frac{\partial f_k(x, y, t)}{\partial x} + c_k \frac{\partial f_k(x, y, t)}{\partial y} = \Omega_k \quad (6)$$

$k = 1, 4$

La partie gauche de cette égalité représente l'advection de la fonction de distribution f_k à travers les branches du réseau avec la vitesse c_k ($c_k = \frac{\Delta x}{\Delta t}$), le terme à droite Ω_k représente le taux de variation de la fonction de distribution f_k durant la phase de collision. L'approximation BGK pour l'opérateur de collision est comme suit :

$$\Omega_k = -\frac{1}{\tau} (f_k(x, y, t) - f_k^{eq}(x, y, t)) \quad (7)$$

Le terme τ représente le temps de relaxation vers l'équilibre de la fonction de distribution f_k , il est lié au coefficient de diffusion α à l'échelle macroscopique. L'équation de Lattice Boltzmann avec l'approximation BGK, $\Delta x = \Delta y$ et $c_k = \Delta x / \Delta t$ est discrétisée sur le réseau D2Q4 à $n \times m$ lattices ($n=400, m=60$) et peut être simplifiée comme suit :

En phase de collision:

$$f_k(i, j) = f_k(i, j)(1 - \omega) + \omega f_k^{eq}(i, j) \quad (8)$$

En phase d' advection (streaming):

$$\begin{cases} f_1(n-i, j) = f_1(n-i-1, j) \\ f_2(i-1, j) = f_2(i, j) \\ f_3(i, m-j) = f_3(i, m-j-1) \\ f_4(i, j-1) = f_4(i, j) \end{cases} \quad (9)$$

$k=1 \dots 4, i = 1 \dots n$ et $j = 1 \dots m$ et $\omega = \frac{\Delta t}{\tau}$ est pris comme temps de relaxation.

La température, variable dépendant, est liée à la fonction de distribution f_k par :

$T(x, y, t) = \sum_{k=1}^4 f_k$, la fonction de distribution peut être choisie comme suite:

$$f_k^{eq} = w_k T(x, y, t) \quad (10)$$

Les facteurs de pondération w_k doivent satisfaire les relations :

$$\sum_{k=1}^4 w_k = 1 \quad (11)$$

et

$$\sum_{k=1}^4 f_k^{eq} = \sum_{k=1}^4 w_k T(x, y, t) = T(x, y, t) \quad (12)$$

La relation entre α et w est déterminé par l'analyse multi échelle en utilisant la relation de Chapman Enskog [3] :

$$\alpha = \frac{\Delta x^2}{2\Delta t} \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{2} \right) \quad (13)$$

Pour le problème de diffusion, vitesses nulles, on considère des valeurs constantes de la fonction d'équilibre :

$$f_k^{eq} = A_k \quad (14)$$

La conservation de la masse et de la quantité de mouvement donnent :

$$\sum_{k=1}^4 f_k^{eq} = T \text{ et } \sum_{k=1}^4 c_k f_k^{eq} = 0 \quad (15)$$

Ce qui donne $c_1=1, c_2=-1, c_3=1, c_4=-1,$

$A_1=A_2$ et $f_k^{eq} = w_k T$.

Résultats et discussion

Sur la Figure 2, on donne les variations des profils de température à différents instants et pour différents positions des sources de chaleur à l'intérieur du substrat (13 cm, 26 cm et 33.5 cm). En imposant une température de 40°C aux sources de chaleur on constate que ces profils sont croissant de la base du substrat à la position des sources et décroissants entre la position des sources de chaleur et la face supérieure du substrat ($y = 40$ cm). Cette décroissance est due principalement à l'éloignement de ces couches du sol des sources de chaleur. Pour la position $e_p = 13$ cm, le profil est quasi symétrique Figure 2-a, les couches profondes du substrat sont non influencées par le courant convectif d'air froid en contact avec la face supérieure.

Au début du chauffage ($t < t_3$) les profils de température ont une allure très concave indiquant qu'à l'intérieur du substrat, la température est encore faible (des zones ont encore la température ambiante 15°C). Au fur et à mesure qu'on évolue dans le temps, la température du substrat dépasse la

température ambiante et la concavité des courbes diminue.

On rappelle que nos boutures sont enracinées dans les 5 centimètres supérieures du substrat ($y > 35$ cm) et c'est spécialement cette épaisseur qu'on envisage de chauffer. La Figure 2-a montre qu'à une profondeur des sources de 13 cm, en régime permanent, $t=3$ heures, la température moyenne du substrat au niveau des 5 derniers centimètres est 15°C indiquant qu'à cette position des sources, la température requise pour les boutures n'est pas encore atteinte.

Ainsi, les sources de chaleur sont incapables d'assurer le chauffage des boutures d'olive qui sont enracinées sur la partie supérieure du substrat car la majorité de l'énergie fournie par les sources est stockée sensiblement dans les couches profondes du sol en régime transitoire. Étant donné que la résistance du sol est assez élevée, cela ne permet pas une évacuation facile de la chaleur stockée vers les zones supérieures du substrat. A cet effet, il s'avère utile de chercher la position optimale des sources de chaleur qui permet de mieux chauffer les boutures d'olives.

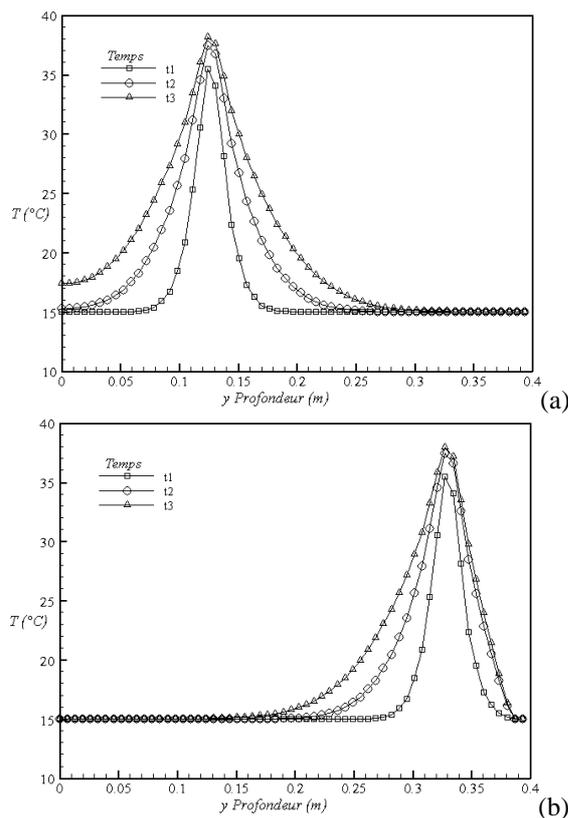


Figure 2: Profil vertical de la température pour différentes positions des sources : (a) $e_p = 13$ cm, (b) $e_p = 33.5$ cm. $t_1 = 10$ min, $t_2 = 1$ heure, $t_3 = 3$ heures

A une profondeur de 33.5 cm, la température moyenne du substrat dans les 5 derniers centimètres est de 25°C qui représente la température optimale pour l'enracinement des boutures.

Pour confirmer ces résultats, on a procédé à une analyse des isothermes en régime permanent

($t_3 = 3$ heures $\leq t$) (Figure 3) pour différentes positions des sources de chaleur. Les résultats de cette Figure montrent que la température du sol n'est jamais homogène et que la stratification des isothermes est plus nette quand on s'éloigne des sources de chaleur. De même, plus de 90 % de la surface du substrat située dans les 5 derniers centimètres a atteint la température de 25°C pour la position des sources $e_p = 33.5$ cm.

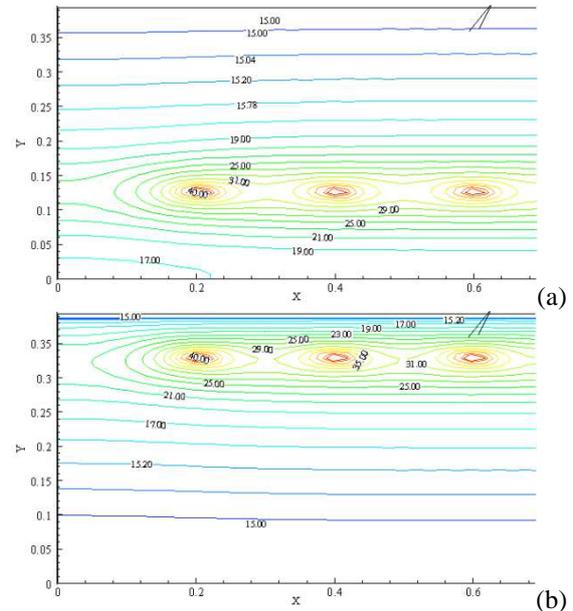


Figure 3: Structure des isothermes en fonction de la position des sources, (a) $e_p = 13$ cm, (b) $e_p = 33.5$ cm. en régime permanent

Conclusion

La répartition de la diffusion verticale de la chaleur dans le substrat dépend de la position des sources de chaleur. Une profondeur d'enterrement de 6.5 cm à partir de la face supérieure du substrat est à choisir en période d'automne à Marrakech est à choisir car, elle permet de garantir une température moyenne du substrat dans les 5 derniers centimètres de 25°C qui représente la température optimale du développement racinaire des boutures. Mais, cette température n'est pas uniforme.

Bibliographies

- [1] El Mouhtadi I., Agouzzal M. et Guy F., 2014. L'olivier au Maroc . OCL. 21(2) , D203.
- [2] Abousalim A. et Mansouri L., 1991. « Utilisation des tablettes chauffantes en bouturage semi-ligneux de cultivars d'Olivier en automne ». Actes Inst. Agron. Vet. Vol. 11(3) , 17-22.
- [3] A. A. Mohamad, Lattice Boltzmann Method-Fundamentals and Engineering Applications, Springer, New York, (2011), DOI 10.1007/978-0-85729-455-5
- [4] Ouardi C., 1997. Contribution à l'étude du comportement thermique d'un habitat dans le climat de Marrakech. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia- Marrakech.