

MODÉLISATION DANS UN PLAN DE L' ABSORPTION D'EAU PAR LES RACINES
DANS LE CAS D'UN SYSTÈME RACINAIRE QUELCONQUE

F. Lafolie, L. Bruckler

INRA, Station de Science du Sol, 84 140 Montfavet

R é s u m é. L'objet de ce travail est de décrire, de quantifier et de généraliser sur modèle, les conséquences de l'hétérogénéité du système racinaire sur la consommation en eau pendant une période donnée et pour une demande climatique déterminée. Géométriquement, le système étudié correspond à un plan horizontal (deux dimensions) où les racines sont représentées par leur point d'impact sur ce plan. Le modèle proposé comprend plusieurs sous-modèles.

1. INTRODUCTION

L'optimisation des ressources et de la consommation en eau des cultures constitue à juste titre un thème majeur de la recherche agronomique dans la mesure où l'eau est fréquemment un des principaux facteurs limitants de la production agricole. Dans la phase de croissance des végétaux, la consommation en eau est fortement dépendante de l'importance du système racinaire, de son état physiologique et phytosanitaire. Plus précisément, des observations expérimentales réalisées "in situ" [6-8] montrent, qu'au delà de la densité moyenne racinaire, la position des racines dans l'espace a un effet majeur sur la cinétique d'absorption hydrique. Cet effet de la répartition spatiale des racines sur la consommation en eau des cultures est lié à la répartition des distance moyennes entre racines dans le volume de sol qu'elles explorent. On conçoit donc assez facilement que la consommation en eau d'un couvert végétal par l'intermédiaire de son architecture racinaire résulte de l'interaction entre la position de chacune des racines fonctionnant comme capteur et l'ensemble des propriétés hydrodynamiques du sol exploré. L'analyse précise des interactions entre la consommation en eau des cultures et l'architecture racinaire se heurte à des difficultés expérimentales importantes par la lourdeur des expérimentations à gérer et la finesse des mesures à effectuer. Il est donc utile d'aborder cette analyse sur le plan théorique par construction d'un outil théorique explicitement conçu pour l'étude des inte-

ractions entre l'architecture racinaire, les caractéristiques hydrodynamiques du sol considéré et le climat. La plupart des modèles utilisés dans la littérature prennent en considération le cas d'une racine isolée en introduisant parfois des hypothèses peu réalistes [5]. Quelques travaux prennent explicitement en compte le cas où plusieurs racines coexistent [1, 3, 4], mais ces modèles ne sont pas conçus explicitement pour l'analyse des interactions entre le sol et l'architecture racinaire. Cette carence est en partie liée à la difficulté et à la lourdeur du problème numérique à traiter et à la difficulté d'introduire dans de tels modèles des caractéristiques réalistes décrivant les propriétés fondamentales du fonctionnement des racines.

Ce travail présente les hypothèses de base et la conception générale sur le plan physiologique, physique et mathématique d'un modèle d'étude en 2 dimensions de l'absorption d'eau d'un système racinaire quelconque. De plus, un ensemble de simulations sont présentées qui montrent l'intérêt qu'il peut y avoir à mettre au point et à valider un tel modèle.

2. THÉORIE

2.1. Bases physiques du modèle

Les bases physiques du modèle incluent les hypothèses de travail choisies et la formulation physique du problème posé. Dans tout ce travail nous supposerons que la loi de Darcy généralisée en milieu non saturé rend compte des écoulements dans un milieu poreux. Il s'agit donc d'appliquer la loi de Darcy généralisée dans un espace à 2 dimensions dans lequel les points d'impacts racinaires imposent une condition aux limites correspondant à la valeur du potentiel racinaire à un instant donné.

Les principales hypothèses retenues sont les suivantes:

1. Les caractéristiques hydrodynamiques du sol étudié sont identiques en tout point du domaine. En d'autres termes, le sol est supposé homogène.
2. La situation initiale est uniforme (en teneur en eau ou en potentiel).
3. Les conditions aux limites à la périphérie du domaine sont des conditions de flux nul. Cette hypothèse est liée au fait qu'il est toujours possible de définir 2 axes de symétrie orthogonaux dans le cas d'une culture en rangs.
4. A un instant donné, le potentiel racinaire est identique pour tous les points d'impacts racinaires. En d'autres termes, il n'y a pas, à un instant donné, d'adaptation locale du potentiel racinaire selon l'état local plus ou moins sec du sol.
5. Le potentiel racinaire peut varier dans un intervalle $(\psi_{rmin}; \psi_{rmax})$ tel que:

$$\Psi_{r\min} = -150 \text{ à } -200 \text{ m}$$

$$\Psi_{r\max} = 0.$$

Cette hypothèse est compatible avec les connaissances actuelles portant sur le fonctionnement du système racinaire, en particulier, l'existence d'une valeur seuil minimale du potentiel d'extraction racinaire.

6. Les résistances racinaires internes sont négligées. Autrement dit, on s'intéresse exclusivement aux transferts d'un point quelconque du sol à la périphérie des racines.

2.2. Traitement des conditions aux limites

Les conditions aux limites du modèle proposé sont de 2 types:

- d'une part, conditions de flux à la périphérie du système. Ces conditions sont classiques et ne nécessitent pas de commentaires particuliers,
- d'autre part, des conditions de potentiel imposé à un moment quelconque en tout point correspondant à un impact racinaire.

Il s'agit donc d'une condition aux limites localisée sur un ensemble discret de points du domaine. Le problème spécifique lié à cette condition aux limites réside dans le fait que cette condition est a priori inconnue. En effet, le potentiel racinaire s'adapte progressivement au degré de dessèchement du sol que l'on cherche précisément à calculer compte tenu des conditions aux limites imposées. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de faire des hypothèses supplémentaires sur un schéma possible de régulation du potentiel racinaire en fonction de la demande climatique potentielle. Ce schéma et l'algorithme correspondant sont les suivants:

a) la demande climatique potentielle instantanée à satisfaire est supposée connue,

b) on recherche par une méthode itérative la valeur optimale du potentiel racinaire Ψ_r qui permet "au mieux" d'assurer cette demande climatique. Deux cas sont alors possibles:

- ou bien il existe une valeur $\Psi_r > \Psi_{r\min}$ telle que la demande climatique potentielle soit satisfaite: dans ce cas, la valeur trouvée Ψ_r répond au problème et il n'y a pas de stress hydrique,

- ou bien, même lorsque $\Psi_r = \Psi_{r\min}$, la demande climatique n'est pas satisfaite: dans ce cas, la meilleure valeur possible pour Ψ_r est $\Psi_{r\min}$ et il y a stress hydrique.

2.3. Racines actives et inactives

Une procédure particulière d'insertion et d'élimination des racines (racines actives ou inactives) a été introduite: En effet, on considère que l'eau se déplace du sol vers les racines, mais jamais des racines vers le sol (extraction d'eau des racines). Or, au cours de la journée, certaines zones du sol peuvent être fortement desséchées et ces zones sont potentiellement capables d'extraire de l'eau des racines lorsque le potentiel racinaire augmente rapidement, en général à la tombée du jour. Pour supprimer cette possibilité, on teste à chaque itération les racines pouvant céder de l'eau au sol, toute racine ainsi détectée étant virtuellement éliminée temporairement. Sa réintroduction dans le modèle d'absorption se fait dès que les conditions physiques le permettent, c'est-à-dire dès que les transferts d'eau se font du sol vers la racine, à la reprise de l'évaporation le jour généralement.

2.4. Création du maillage par éléments finis

La création du maillage utilisé pour la résolution du problème par ma méthode des éléments finis est une étape préliminaire importante du problème posé. En effet, la "qualité" du maillage conditionne la qualité de la solution trouvée ainsi que les performances de l'interpolation pour la génération d'isocontours. De plus, la répartition des racines pouvant être quelconque, cette procédure de maillage doit être automatique. La procédure de maillage mise au point est basée sur la construction préliminaire de polygones de Voronoi [2] qui définissent une partition polygonale du domaine d'étude. L'ensemble de la procédure de maillage devant aboutir à la triangulation du domaine comporte les étapes suivantes:

- 1) définition de la localisation des points d'impact racinaires (fig. 1).
- 2) construction des polygones de Voronoi autour des points d'impact racinaires (fig. 2),
- 3) définition et génération de "points de calcul" sur les frontières polygonales et à l'intérieur des polygones définis en (2) (fig. 3). En choisissant un nombre constant de points affectés à chaque polygone, cette procédure permet de générer un maillage d'autant plus dense que la densité racinaire est élevée,
- 4) construction des nouveaux polygones de Voronoi sur l'ensemble des points correspondant aux points d'impact racinaires et aux points de calcul générés (fig. 4),
- 5) triangulation du domaine polygonal défini en (4) à partir d'un algorithme de passage entre les polygones et les triangles (fig. 5).

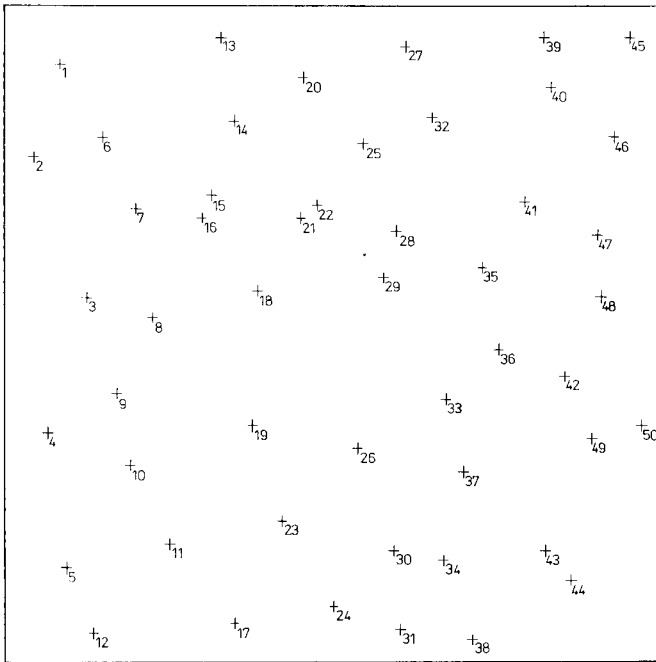


Fig. 1. Répartition de 50 points d'impact racinaire dans un plan (répartition régulière)

Fig. 1. Distribution of 50 points of root punching in the plane (regular distribution)

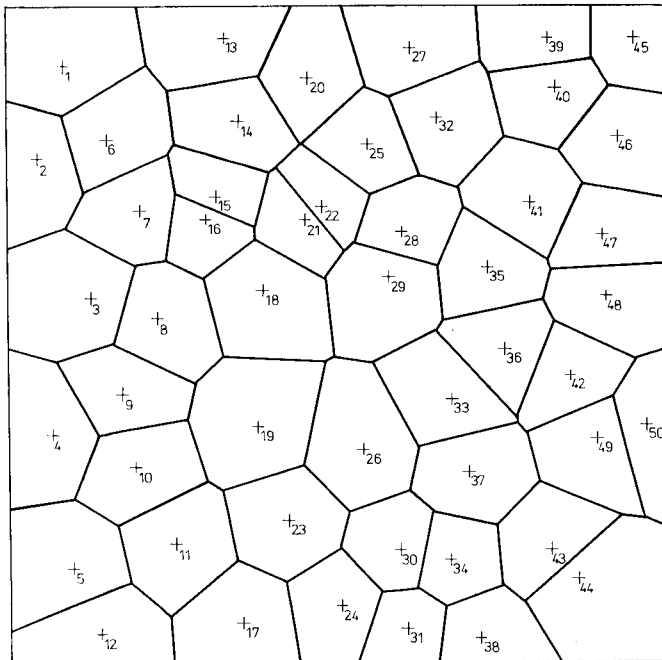


Fig. 2. Construction des polygones de "Voronoi" autour des points d'impact racinaire

L'ensemble de la procédure automatique ainsi définie aboutit à un maillage satisfaisant et respectant les règles de triangulation imposées par la méthode des éléments finis.

3. RÉSULTATS

Nous présenterons quelques résultats synthétiques obtenus sur quelques cas typiques d'enracinement. Nous étudierons 3 cas comparatifs d'enracinement:

cas (a): 50 racines réparties sur un domaine de 20 x 20 cm de façon régulière (fig. 1),

cas (b): 50 racines réparties sur un domaine de 20 x 20 cm de façon groupée (fig. 6),

cas (c): 20 racines réparties sur un domaine de 20 x 20 cm de façon groupée (fig. 7).

3.1. Cartes d'isocontours

Les figures 8 et 9 présentent les cartes d'isocontours en potentiel matriciel correspondant aux cas (a) et (b): les isocontours définis sont obtenus après 3 jours de simulation correspondant à une situation initiale uniforme "sèche" (-50 m) et à une forte demande climatique ($6 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$). On constate que les zones d'absorption racinaires sont dans ce cas très marquées et correspondent étroitement à la cartographie racinaire initiale. Les figures 10 et 11 correspondent aux mêmes situations d'enracinement mais 12 heures plus tard, c'est à dire pendant la nuit dans une période de redistribution nocturne. La réalimentation des zones à forts prélèvements diurnes apparaît nettement, et ceci d'autant plus que le dessèchement diurne a été régulièrement réparti, laissant ainsi des zones moyennement humides à conductivité hydraulique relativement élevée.

3.2. Evolution synthétique des prélèvements et des caractéristiques de l'absorption au cours du temps

Nous présenterons quelques caractéristiques globales du processus de prélèvement d'eau sur une période d'une semaine à partir d'une situation initiale "sèche" (-50 m) et pour l'enracinement correspondant au cas (a): Les figures 12, 13, 14 correspondent respectivement à l'évolution au cours du temps du potentiel raci-

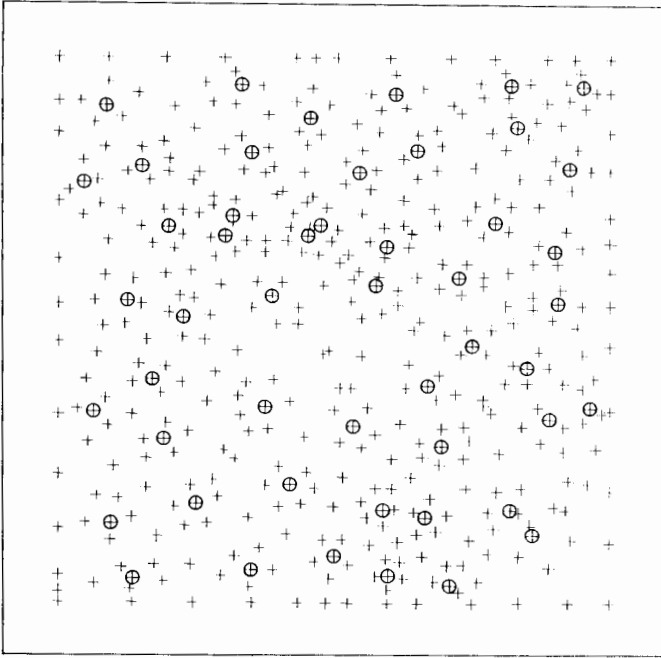


Fig. 3. Points d'impact racinaire et points de calcul (les points d'impact racinaire correspondent aux symboles circulaires)

Fig. 3. Real and calculated punching points of roots (root punching points correspond to the symbols inside the circles)

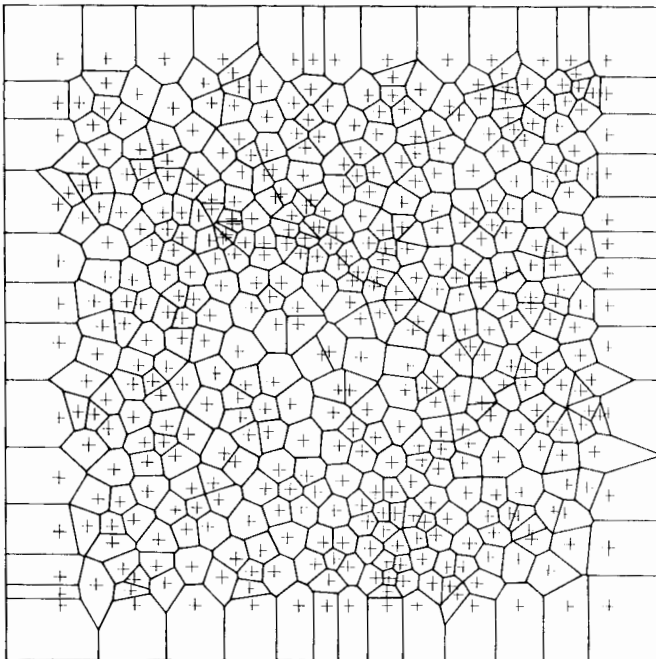


Fig. 4. Construction des polygones de "Voronoi" autour des points d'impact racinaire et des points de calcul

Fig. 4. Construction of Voronoi's polygones around root punching points and calculated points

naire, du nombre de racines actives et du bilan hydrique. Les périodes de stress hydrique apparaissent nettement ainsi que l'évolution moyenne du potentiel racinaire au cours du temps. Parallèlement, le nombre moyen de racines actives au cours du temps augmente compte tenu du dessèchement progressif du sol. Les alternances jour/nuit du rythme d'absorption apparaissent clairement aussi bien en ce qui concerne le potentiel racinaire que le nombre de racines actives. Enfin, le bilan hydrique fait apparaître un déficit très important dès le deuxième jour, consécutif à la forte demande climatique dès le premier jour et au dessèchement du sol à proximité immédiate des racines.

3.3. Analyse de l'interaction: sol - climat - enracinement sur le bilan hydrique

Le code de calcul présenté plus haut est conçu comme un outil d'analyse des interactions: sol - climat - enracinement vis-à-vis de l'existence et de l'intensité des stress hydriques. Dans cette optique, le tableau 1 présente la synthèse de simulations combinant 3 types d'enracinement, 2 situations climatiques, et 3 types de sol différenciés par leur conductivité hydraulique. Le calcul est effectué en estimant la conductivité hydraulique relative en milieu non saturé selon la procédure proposée par Van Genuchten [9], la conductivité hydraulique réelle étant alors obtenue en multipliant la conductivité relative par la conductivité hydraulique à saturation. Les résultats du tableau 1 correspondent à une situation initiale sèche et limitante (-50 m). On constate que:

- la situation initiale, humide ou sèche, conditionne fortement l'apparition d'un stress hydrique: ainsi, lorsque le sol est humide, il n'y a pratiquement aucun stress quelles que soient les caractéristiques relatives à la demande climatique, aux propriétés hydrodynamiques du sol, ou à la disposition spatiale des racines.

- dans le cas d'un sol fortement conducteur, la structure de l'enracinement n'induit pas de différence vis-à-vis des prélèvements hydriques sur la période étudiée, quelle que soit la demande climatique.

- la structure de l'enracinement différencie les prélèvements lorsque le milieu devient de moins conducteur.

- la demande climatique détermine fortement la valeur relative du stress hydrique, celle-ci étant d'autant plus forte que la demande climatique est élevée.

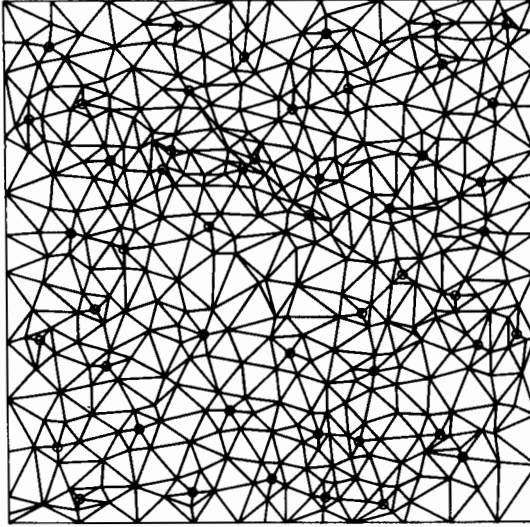


Fig. 5. Triangulation finale du domaine par éléments finis (les points d'impact racinaire correspondent aux symboles circulaires)

Fig. 5. Final triangulation of the domain by finite element method (root punching points correspond to the symbols inside the circles)

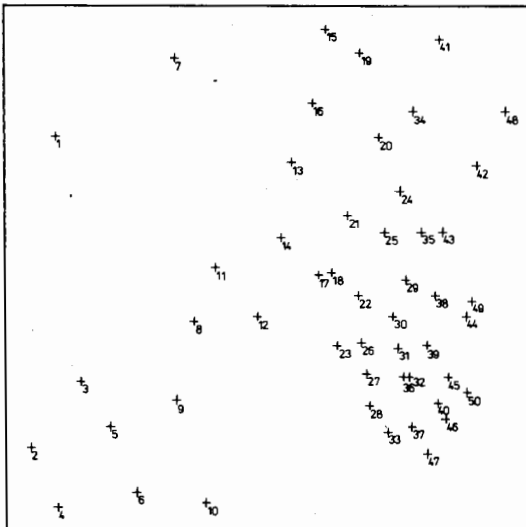


Fig. 6. Répartition de 50 points d'impact racinaire dans un plan (répartition groupée)

Fig. 6. Distribution of 50 points of root punching in the plane (group distribution)

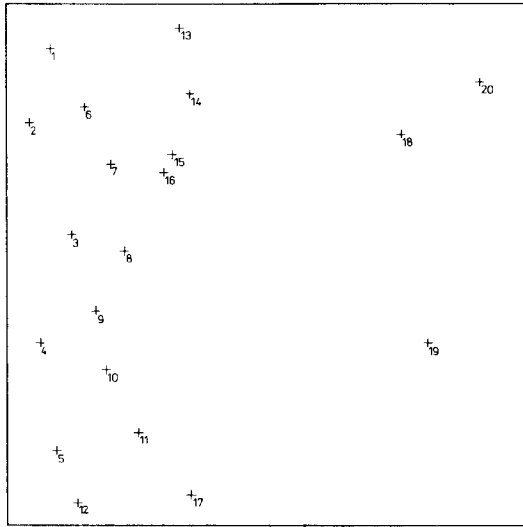


Fig. 7. Répartition de 20 points d'impact racinaire dans un plan (répartition groupée)

Fig. 7. Distribution of 20 points of root punching in the plane (group distribution)

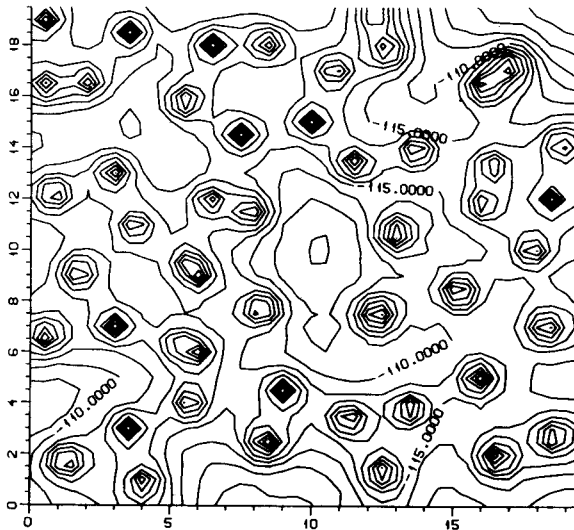


Fig. 8. Isocontours des potentiels matriciels après 3 jours de simulation à midi (50 racines, répartition régulière, potentiel matriciel initial -50 m, sol peu conducteur)

Fig. 8. Matric potential isolines after 3 days of the simulation in noon (50 roots, regular distribution, initial matric potential $= -50$ m, soil of low conductivity)

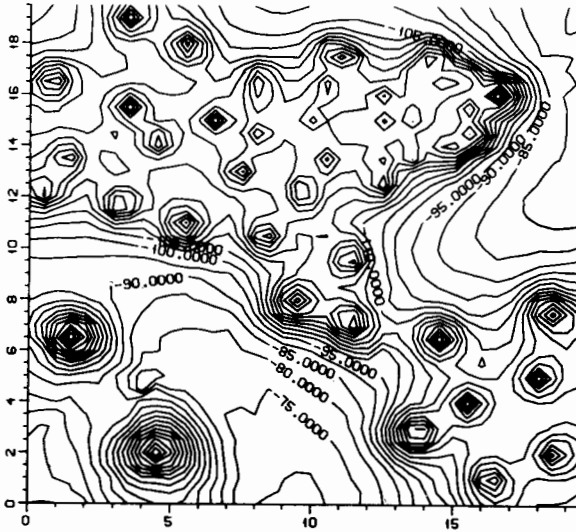


Fig. 9. Isocontours des potentiels matriciels après 3 jours de simulation à midi (50 racines, répartition groupée, potentiel matriciel initial = -50 m, sol peu conducteur)

Fig. 9. Matric potential isolines after 3 days of the simulation in noon (50 roots, group distribution, initial matric potential = -50 m, soil of low conductivity)

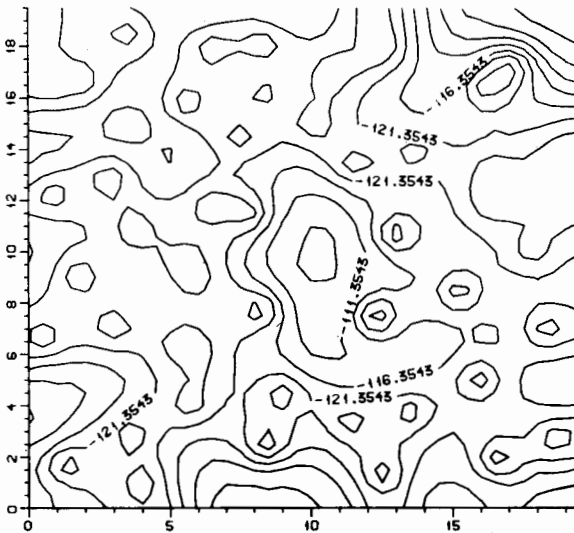


Fig. 10. Isocontours des potentiels matriciels après 4 jours de simulation le matin (50 racines, répartition régulière, potentiel matriciel initial = -50 m, sol peu conducteur)

Fig. 10. Matric potential isolines after 4 days of the simulation in the morning (50 roots, regular distribution, initial matric potential = -50 m, soil of low conductivity)

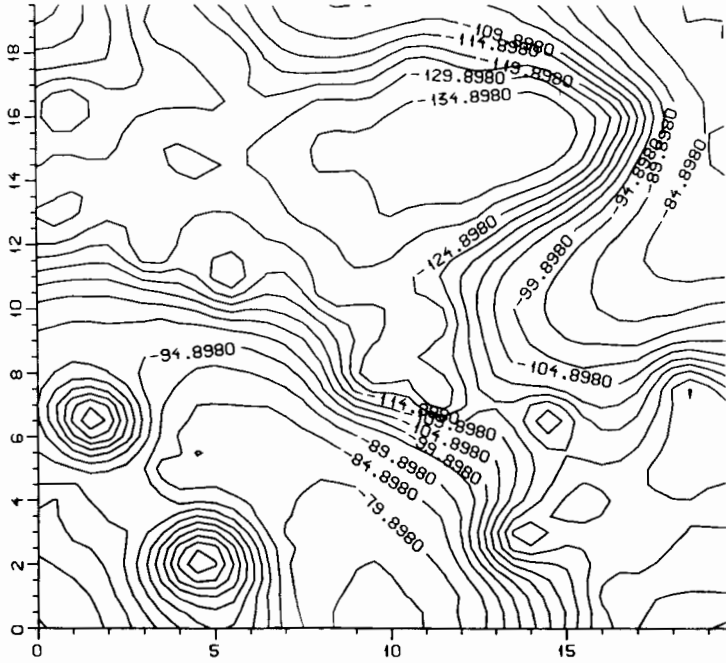


Fig. 11. Isocontours des potentiels matriciels après 4 jours de simulation le matin (50 racines, répartition groupée, potentiel matriciel initial = -50 m, sol peu conducteur)

Fig. 11. Matric potential isolines after 4 days of the simulation in the morning (50 roots, group distribution, initial matric potential = -50 m, soil of low conductivity)

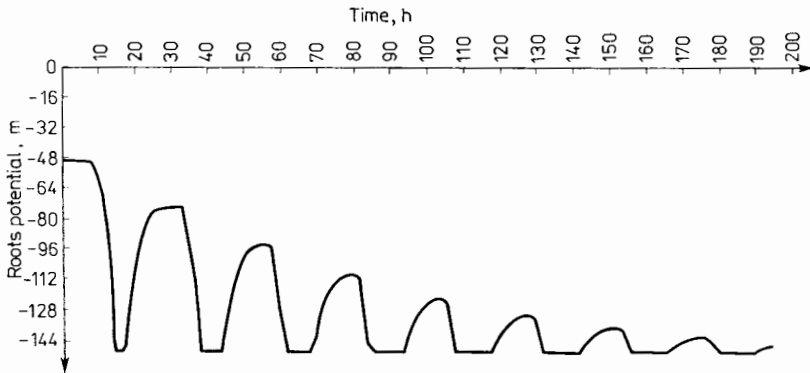


Fig. 12. Evolution du potentiel racinaire calculé pendant 7 jours (50 racines, répartition régulière, potentiel racinaire initial = -50 m, sol peu conducteur)

Fig. 12. Changes of the calculated root potential during 7 days (50 roots, regular distribution, initial, root potential = -50 m, soil of low conductivity)

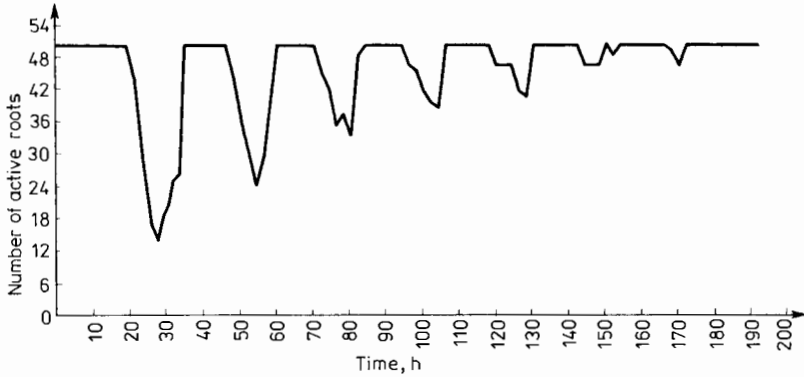


Fig. 13. Evolution du nombre de racine active calculé pendant 7 jours (50 racines, répartition régulière, potentiel racinaire initial = -50 m, sol peu conducteur)

Fig. 13. Changes of the number of calculated activ roots during 7 days (50 roots, regular distribution, initial root potential = -50 m, soil of low conductivity)

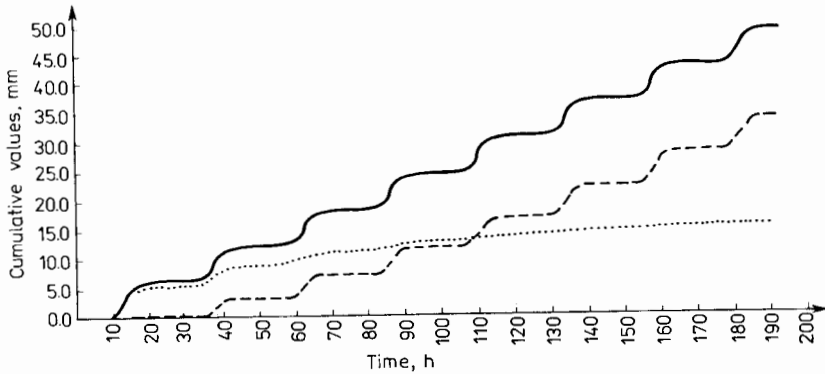


Fig. 14. Evolution de l'évaporation potentielle (ligne continue), de l'évaporation réelle (ligne pointillée) et du déficit hydrique (ligne tiretée) calculés au cours du temps (50 racines, répartition régulière, potentiel racinaire initial = -50 m, sol peu conducteur)

Fig. 14. Changes of the potential evaporation (continuous line), real evaporation (dotted line) and water deficit (dashed line) calculated as a function of time (50 roots, regular distribution, initial root potential = -50 m, soil of low conductivity)

T a b l e a u 1. Analyse des interactions: propriétés hydrodynamiques des sols x structure de l'enracinement x climat sur le rapport ETR/ETP

T a b l e 1. Analysis of the interactions: hydrodynamic properties of soils x structure of rooting x climate according to ETR/ETP ratio

Potentiel matriciel initial = -5 m						
	ETP = 3 mm·J ⁻¹			ETP = 6 mm·J ⁻¹		
Ks, m/sec	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
50 racines régulières	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
50 racines groupées	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,985
20 racines groupés	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,945
Potentiel matriciel initial = -50 m						
	ETP = 3 mm·J ⁻¹			ETP = 6 mm·J ⁻¹		
Ks, m/sec	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
50 racines régulières	0,672	0,672	0,594	0,343	0,343	0,315
50 racines groupées	0,672	0,668	0,539	0,343	0,342	0,284
20 racines groupées	0,672	0,642	0,433	0,342	0,335	0,227

4. CONCLUSION

Les résultats préliminaires présentés permettent de dégager plusieurs conclusions ou hypothèses de travail:

1. Le schéma de régulation du potentiel racinaire en fonction de la demande climatique permet de rendre compte d'un ensemble d'observations agronomiques classiques relatives au processus d'apparition du stress hydrique.

2. Le processus d'apparition du stress hydrique semble bien être la résultante d'un ensemble d'interactions entre les propriétés hydrodynamiques du sol, la structure de l'enracinement et la demande climatique: il semble donc difficile de parler a priori d'enracinement favorable ou défavorable.

3. Les phénomènes de redistribution semblent jouer un rôle important dans les possibilités de réalimentation hydrique de la zone rhizosphérique.

4. Un travail important de validation des principales hypothèses émises reste à faire avant de disposer d'un outil prédictif opérationnel.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baldwin J. P., Tinker P. B., Nye P. H.: Uptake of solutes by multiple root systems from soil. II. The theoretical effects of rooting density and pattern on uptake of nutrients from soil. *Plant and Soil*, 36, 693, 1972.
- Green P. J., Sibson R.: Computing Dirichlet tessellations in the plane. *The computer journal*, 21, 168, 1977.

3. Molz F. J.: Models of water transport in the soil plant system: a review. *Wat. Resour.*, 17, 1245, 1981.
4. Neuman S. P., Feddes R. A., Bresler E.: Finite element analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, 224, 1975. II. Field Applications. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, 231.
5. Passioura J. B., Cowan I. R.: On solving the nonlinear diffusion equation for the radial flow of water to roots. *Agr. Meteorol.*, 5, 129, 1968.
6. Tardieu F.: Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs, III. Disponibilité des réserves en eau du sol. *Agronomie*, 7, 279, 1987.
7. Tardieu F., Manichon H.: Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. I. Discussion des critères d'étude. *Agronomie*, 6, 345, 1986. II. Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. *Agronomie*, 6, 415.
8. Tardieu F., Manichon H.: Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. I. Modélisation d'états structuraux types de la couche labourée. *Agronomie*, 7, 123, 1987. II. Croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agronomie*, 7, 201.
9. Van Genuchten M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892, 1980.

F. Lafolie, L. Bruckler

MODELLING IN PLANE OF WATER ABSORPTION BY ROOTS WHEN NON-UNIFORM ROOT SYSTEM

S u m m a r y

This paper presents a theoretical approach to analyse the effects of the soil hydrodynamic properties, climatic conditions and spatial position of roots on plant water stress. Theoretical calculations in order to predict soil/roots water flows are made in the two-dimensional case, assuming that the Darcy law yields to predict water movements in the unsaturated zone. The main hypotheses are the following: 1) the soil is regarded as homogeneous, 2) the initial soil water potential is assumed as uniform, 3) the root water potential is the same for all roots at a given time, 4) the variations of the root water potential versus time are comprised between given upper (0 m) and lower boundaries (0-(-)15 m). The main input file of the proposed modelling are: 1) the basic hydrodynamic soil properties, 2) the position of the roots on the plane, and 3) the potential evaporation.

The root water potential is estimated at each time step using an iterative procedure which calculates the best root water potential estimate in order to minimize the plant water stress. Furthermore, an original procedure is given to compute automatically the finite elements grid layout according to the given position of the roots.

Results for various soils, climatic conditions and root position are presented. First, maps of the soil water potential after several days of simulation are given that show it exists a strong relationship between the root position and water uptakes. Furthermore, the effects of water movements from the soil to the root zone during the night when no evaporation occurs appear clearly. Second, the variations of the root water potential and the activity of roots during night and day are presented during 7 days of water movements simulation and the results agree with the common knowledge about the relationships between soil moisture and

root uptakes. Finally, simulations are presented in order to combine the effects of the initial water content, soil hydrodynamic properties, spatial root position and climate on the plant water stress. It is showed that 1) when the soil is very and continuously wet, no stress appears, 2) when the soil is drier, the effects of limiting soil properties, spatial root positions and potential evaporation appear clearly on the plant water stress.

F. Lafolie, L. Bruckler

MODELOWANIE NA PŁASZCZYŹNIE POCHŁANIAŃ WODY
PRZEZ NIEJEDNORODNY SYSTEM KORZENIOWY

S t r e s z c z e n i e

Praca przedstawia teoretyczne podejście do programu analizy wpływu właściwości hydrodynamicznych gleby, warunków klimatycznych i przestrzennego rozmieszczenia korzeni na wodny stres roślin. Wyliczenia teoretyczne mające na celu określenie strumieni wody na granicy gleba - korzenie zostały wykonane dla przypadku dwuwymiarowego, przy założeniu, że równanie Darcy'ego pozwala przewidzieć ruch wody w strefie nienasyconej. Główne założenia były następujące: 1) gleba jest jednorodna, 2) początkowy potencjał wody glebowej jednakowy, 3) potencjał wody w korzeniu jest jednakowy dla wszystkich korzeni w określonej chwili, 4) zmiany korzeniowego potencjału wody w czasie zawarte są w granicach 0-(-)15 m. Główne dane wejściowe do proponowanego modelu są następujące: 1) podstawowe właściwości hydrodynamiczne, 2) położenie korzeni na płaszczyźnie, 3) parowanie potencjalne. Korzeniowy potencjał wodny jest oceniany dla każdego kroku czasowego, z wykorzystaniem metody iteracyjnej, która pozwala najlepiej oszacować potencjał wodny korzeni w celu zminimalizowania stresu wodnego roślin. Następnie przedstawiono oryginalną procedurę automatycznego wyliczania planu siatki do metody elementów skończonych, zgodnie z aktualną pozycją korzeni.

Przedstawiono wyniki dla różnych gleb, warunków klimatycznych i pozycji korzenia. Po pierwsze, mapy potencjału wody glebowej po kilku dniach symulacji wskazują, że istnieje istotna zależność między pozycją korzeni i poborem wody. Ponadto efekty ruchu wody z gleby do strefy korzeniowej podczas nocy, gdy nie ma ewaporacji, są wyraźnie zauważalne. Po drugie, przedstawiono zmiany potencjału wodnego i aktywności korzeni podczas nocy i dnia w okresie 7 dni symulacji przenoszenia wody. Wyniki są zgodne z ogólnymi prawami rządzącymi tymi procesami, tzn. zależnością między wilgotnością gleby i poborem wody. Następnie wykonano symulację w celu połączenia ze sobą efektów początkowej wilgotności właściwości hydrodynamicznych klimatu i przestrzennego rozmieszczenia korzeni na wodny stres roślin. Wynika z niej, że 1) gdy gleba jest bardzo wilgotna, stresi nie występują, 2) gdy gleba jest suchsza, daje się zauważyć wpływ granicznych właściwości gleby, przestrzennego rozkładu korzeni oraz potencjalnej ewaporacji na stres wodny roślin.