

TRANSFERTS D'EAU ET DE NITRATE DANS UN SOL ET ABSORPTION PAR  
LE SYSTÈME RACINAIRE DE PÊCHERS  
PRÉSENTATION DES HYPOTHÈSES DU MODÈLE ET DES RÉSULTATS  
RECUEILLIS POUR SA VALIDATION

A. M. de Cockborne, R. Habib, F. Lafolie

INRA, Station de Science du Sol, Station d'Agronomie, 84 140 Montfavet

Résumé. Les travaux présentés concernent la modélisation des transferts d'eau et d'azote dans un sol. Une attention particulière est portée à la formulation théorique du problème quand on prend en compte simultanément l'absorption de ces éléments par un système racinaire. Dans le cas étudié on s'est limité à une modélisation monodimensionnelle. L'expérimentation associée au modèle est décrite et les principales variables mesurées (potentiel hydrique, température du sol, flux de transpiration, teneur en azote organique et minéral du sol, absorption racinaire, distribution spatiale des racines) sont présentées et discutées dans la perspective de l'ajustement et de la validation du modèle.

## 1. INTRODUCTION

Les travaux menés actuellement sur la modélisation des transferts d'eau et de nitrate dans un sol, en prenant en compte explicitement la fonction d'absorption du système racinaire, sont motivés par le souci d'une meilleure maîtrise de la gestion des intrants et également de l'optimisation des systèmes racinaires eux-mêmes. Il existe une littérature abondante qui traite de la modélisation des transferts d'eau et de solutés dans un sol pour différentes modalités d'apport d'eau et d'éléments fertilisants [1, 3]. La formulation théorique des modèles montre que si l'on considère des transferts en conditions non saturées et en régime transitoire, on est amené à résoudre les équations couplées de transferts d'eau (équation de Richards) et de solutés (équation de diffusion-convection). La prise en compte de l'absorption racinaire ajoute encore à la difficulté par la nécessité de traiter conjointement des processus physiques, régis par des lois bien

diéfinies, et des processus biologique dont les lois de fonctionnement sont, pour partie, l'objet de la recherche.

Ces considérations nous ont amenés, dans un souci de simplification théorique et expérimentale, à nous limiter à une formulation monodimensionnelle du problème. C'est-à-dire que l'on fait l'hypothèse que l'ensemble des processus modélisés se déroule dans une seule direction de l'espace (la profondeur). Par ailleurs, nous avons voulu pouvoir négliger la fonction source ou puits pour l'azote constituée par la matière organique et son évolution dans un sol. La prise en compte de celle-ci aurait constitué une difficulté supplémentaire tant sur le plan théorique qu'expérimental, et nous avons tenté de nous en affranchir par le choix du sol et des traitements que nous avons appliqués.

L'objet de cette communication est de présenter à la fois les hypothèses du modèle et les données expérimentales qui ont été recueillies pour sa validation.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Le matériel expérimental était constitué de pêchers "Suncrest GF305" en deuxième année de croissance. Au moment de la plantation (Février 1986), les arbres ont été fortement rabattus tant au niveau aérien que racinaire et mis en place dans des conteneurs cylindriques de 71 l remplis pour 92 % de leur volume par du

T a b l e a u 1. Analyses de sol

T a b l e 1. Soil analysis

Granulométrie sans décalcification (5 fractions):	
- argile, %	7,9
- limon fin, %	3,4
- limon grossier, %	2,5
- sable fin, %	41,7
- sable grossier, %	44,5
Carbone organique (Méth. Anne), %	0,50
Matière organique, %	0,80
Azote, Kjeldahl, %	0,03
Rapport (C org. Kjeldahl)	15,66
pH (chlorure de potassium 0,1 N)	8,4
Calcaire total, %	13,00
Indice de pouvoir chlorosant:	
- calcaire actif, %	0,30
- fer facilement extractible, méq	12,60
- I.P.C.	16,00
Acide phosphorique (méth. Joret Hebert), %	0,00
Capacité d'échange (méth. de Metson), méq/100	1,100
Magnesium échangeable, méq/100	0,090
Potassium échangeable, méq/100	0,018

sol sableux (tab. 1). Les conteneurs placés sous un abri plastique, dans une tranchee, sont isolés thermiquement (laine de verre). Lors de l'expérimentation décrite, ils ont été surélevés de 30 cm, la solution de drainage étant récupérée dans un bac de percolation. L'irrigation était assurée par arrosage manuel. Le sol

avait été soigneusement aplani afin d'assurer une distribution homogène de la lame d'eau apportée lors des arrosages (de 3 à 5 l selon la demande climatique). Par ailleurs la surface du sol était protégée par un tissu de plastique à grosses mailles afin d'en limiter la dégradation structurale lors des arrosages. Un film plastique était mis en place entre 2 irrigations pour éviter les pertes d'eau par évaporation.

T a b l e a u 2. Plan, expérimental. Le signe + : mesure effectuée

T a b l e 2. Plan of the experiment. Signe + : measurement done

	N <sup>0</sup> arbre						
	4	5	8	11	15	18	20
Temp. du sol	-	+	-	+	-	-	+
Potential hydrique	-	+	-	+	-	-	+
Taux de transpiration des arbres	-	+	+	+	+	-	+
Date d'apport du fertilisant <sup>15</sup> N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2/06/87 à 11 heures						
Date d'échantillonnage (bilan azoté)							
15/06/87	+	-	+	-	+	+	-
22/06/87	-	+	-	+	-	-	+
Temps de séjour du fertilisant (jours)	13	20	13	20	13	13	20

En Février 1987 nous avons procédé à un lessivage du sol en place dans les conteneurs pour obtenir, avant la reprise de la végétation, une teneur en nitrate faible (de l'ordre de 1 mg·kg<sup>-1</sup>) et sensiblement égale pour tous les conteneurs. Puis les arbres ont reçu une solution fertilisante exempte de nitrate afin de maintenir l'azote du sol à un niveau très faible. Cependant, les arbres commençant à présenter des symptômes de carence trop marqués pour être négligés, nous avons dû réaliser mi-Mai un apport d'azote modéré (de l'ordre de 0,5 g de N par conteneur).

Lors de l'expérimentation proprement dite (Juin 1987), les arbres sont donc en place depuis 18 mois. Sur les 20 ensembles "arbre-sol" disponibles, 7 ont été utilisés dans l'essai de validation qui fait l'objet de cet article (tab. 2). Au temps t=0 de démarrage des mesures (le 2 Juin 1987 à 11 h), les 7 arbres utilisés dans la suite de l'essai ont reçu 5 l d'une solution de nitrate de potassium à 0,86 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>·cm<sup>-3</sup> marqué à 13,1 % d'azote 15. Cet essai a duré 20 jours pendant lesquels nous avons pu mesurer pour 3 de ces ensembles "arbre-sol" (N<sup>0</sup> 5, 11 et 20) l'évolution des profils hydriques et de température dans le sol, ainsi que leur transpiration réelle par mesure du flux de sève brute dans le tronc. En com-

plément, 2 autres arbres (N<sup>o</sup> 8 et 15) étaient équipés des capteurs pour la mesure de transpiration. Deux prélèvements ont été réalisés, l'un 13 jours après l'apport de la solution fertilisante pour les 4 ensembles "arbre-sol" non équipés pour les mesures dans le sol, et l'autre 7 jours plus tard pour les 3 ensembles "arbre-sol" qui étaient pourvus de cet équipement.

Suivi hydrique: dans chacun des 3 ensembles "arbre-sol" concerné (tab. 2), il a été placé 10 tensiomètres aux profondeurs respectives de -6, -10, -13, -16, -19, -22, -25, -31, -34 et -37 cm. Les tensiomètres, mis en place depuis la surface du sol, n'étaient pas disposés sur une même verticale. Les mesures étaient effectuées au minimum 2 fois par jour (matin et soir), et toutes les 5 minutes environ dans l'heure qui suivait une irrigation. Les irrigations étaient déclenchées lorsque le stock d'eau, estimé d'après les relevés tensiométriques, atteignait 75 % de la capacité du conteneur. La quantité apportée était calculée afin que le stock d'eau après irrigation fût de l'ordre de 90 % de la capacité du bac.

Suivi thermique: pour chacun des 3 ensembles "arbre-sol" concerné (tab. 2), la température dans le sol était mesurée, à pas de temps de 30 min, par 3 sondes de platine, implantées sur une même verticale aux profondeurs de -5, -10 et -30 cm. La température de l'air à 10 cm au-dessus de la surface du sol était également mesurée par une sonde thermique située au centre du tunnel plastique. L'ensemble des 4 sondes étaient reliées à une centrale d'acquisition de données.

Mesures de flux de sève: pour chacun des 5 ensembles "arbre-sol" concerné (tab. 2) les flux de sève brute dans le tronc étaient estimés à pas de temps de 30 min. Les capteurs de flux [7, 8] étaient reliés à une centrale d'acquisition de données.

P r é l è v e m e n t p o u r a n a l y s e. Le substrat, d'une hauteur totale de 38 cm, était arbitrairement divisé en 4 couches d'une épaisseur de 8 cm pour la première et de 10 cm pour les 3 autres. Par niveau, il était constitué un échantillon moyen résultant de 10 prélèvements à la tarière dont les emplacements étaient tirés au hasard sur la surface considérée. Le végétal était ensuite divisé en racines (extraite du sol par lavage de la terre au laboratoire), tronc, rameaux de 2 ans, rameaux de 1 an et feuilles. Chacun de ces organes était broyé in toto et les mesures étaient réalisées sur une partie aliquote du broyat.

Pour le sol, nous avons déterminé l'azote minéral, après extraction par une solution de KCl (N) et distillation en présence de magnésie et d'alliage Devarda [2], et l'azote organique (après élimination du nitrate et des racines) par minéralisation Kjeldahl et distillation en présence d'une base forte [2]. Pour le végétal nous avons dosé uniquement l'azote total après minéralisation Kjeldahl. Dans tous les cas (sol et végétal), l'excès isotopique <sup>15</sup>N a été mesuré en spectrométrie optique d'émission [9].

Distribution spatiale des racines. Une des hypothèses contraignante du modèle concerne le caractère monodimensionnel de la distribution spatiale des racines. Afin d'en vérifier le bien-fondé nous avons, à la fin de l'essai proprement dit, prélevé 6 ensembles "arbre-sol" parmi ceux qui restaient disponibles pour caractériser la disposition spatiale de leur système racinaire. Le sol a été divisé en 4 couches définies comme précédemment. Chacune de ces couches a ensuite elle-même été subdivisée en 16 secteurs (numéroté de I à

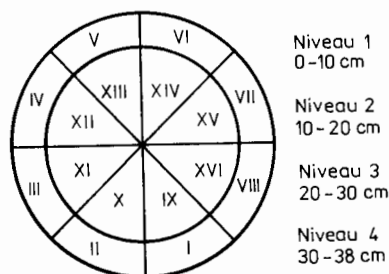


Fig. 1. Plan de prélèvement du système racinaire

Fig. 1. Plan of the root system examination

XVI) comme représenté sur la figure 1, de tel sorte que chacun corresponde au même volume de sol (environ 1 l). Les 4 couches de sol ont été prélevées de telle façon que les secteurs portant le même numéro soient situés sur une même verticale. Puis les racines ont été extraites du sol par lavage, séchées à 70°C, réparties par estimation visuelle en 3 classes de diamètre (fin:  $D < 0,5$  mm, moyen:  $D$  compris entre 0,5 et 1,5 mm, gross:  $D < 1,5$  mm), et pesées.

Coefficient de diffusion moléculaire. Le coefficient de diffusion moléculaire a été mesuré pour différentes conditions physiques du sol (humidité, densité, température) selon la méthode de Graham-Bryce [4].

### 3. HYPOTHÈSES DU MODÈLE

#### 3.1. Transfert d'eau et de nitrate

La modélisation des transferts d'eau repose, classiquement, sur l'équation de Richards à laquelle est ajouté un terme  $S$  décrivant la fonction puits racinaire (équ. 1). Nous y reviendrons par la suite.

$$c(h) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right) - S(h, z, t). \quad (1)$$

La formulation retenue pour la modélisation des transferts de solutés (nitrate dans le cas considéré) est un modèle diphasique [5, 6] prenant en compte des échanges entre une phase liquide mobile et une phase immobile (équ. 2 et 3). A l'équation de dispersion-convection est ajouté un terme S décrivant l'absorption racinaire (équ. 2), que discuterons plus loin.

$$\frac{\partial(\theta_m C_m)}{\partial t} + \frac{\partial(\theta_{im} C_{im})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta_m \theta_m \frac{\partial C_m}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (q C_m) - S(C, z) \quad (2)$$

$$\theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha (C_m - C_{im}). \quad (3)$$

La formulation des équations de "dispersion-convection" montre que la qualité de la modélisation des transferts de solutés va dépendre des résultats de la simulation des transferts d'eau. En effet, des paramètres (teneur en eau et flux de Darcy) provenant de la résolution de l'équation (1) apparaissent explicitement dans les équations (2) et (2). C'est une des difficultés de ce type d'étude qu'il est important de souligner.

### 3.2. Absorption racinaire pour l'eau

Nous nous sommes orientés vers une représentation de la fonction d'absorption racinaire sous forme d'une fonction puits répartie et continue dans tout le domaine d'enracinement. On a donc défini une fonction puits S dépendant de la variable d'espace z, du temps t et du potentiel de l'eau dans le sol (h). Le logical de simulation est construit de telle sorte que l'on puisse étudier, et comparer, 2 hypothèses concernant la fonction d'absorption hydrique.

La première repose sur l'idée que tout segment de racine absorbe l'eau de la même façon quelle que soit sa position dans le sol. Connaisant la transpiration potentielle T et la longueur totale de racines L, on peut alors définir un taux d'extraction maximum par unité de longueur de racines  $S_m = T/L$ . L'absorption réelle d'une unité de racine est alors calculée par:  $S = S_m \cdot E(h)$  où E(h) est une fonction de pondération qui relie l'efficacité de la fonction puits racinaire au potentiel matriciel de l'eau h. Différentes formulations ont été proposées pour E(h) dont certaines sont dérivables.

La seconde hypothèse repose sur l'idée que le potentiel racinaire  $h_r$  est modifié à chaque pas de temps pour tenter de satisfaire les besoins de transpiration potentielle T(t). Le potentiel  $h_r$  est alors calculé de telle sorte que l'on minimise l'écart entre T(t) et l'extraction racinaire calculée. Dans ce cas on aboutit donc à des profils d'activité racinaire qui varient au cours du temps.

### 3.3. Absorption racinaire pour le nitrate

La encore, 2 hypothèses ont été envisagées pour rendre compte de l'absorption racinaire de nitrate. La première considère que le flux de nitrate pénétrant dans la racine est directement lié au flux d'absorption hydrique - (hypothèse "mass-flow" [11]). Cette modélisation n'est pas retenue par de nombreux auteurs dont Nye et Marriott [10] qui ont préféré modéliser la fonction puits nitrique par une fonction hyperbolique analogue à celle utilisée en cinétique enzymatique. Le flux de nitrate  $F$  par unité de racine s'exprime alors par:

$$F = F_{\max} \frac{C}{C + K_m}, \quad (4)$$

où:

$F_{\max}$  est le flux maximal pouvant être absorbé,  
 $K_m$  est une constante d'affinité ( $10^{-5}$  à  $10^{-6}$  M selon la littérature),  
 $C$  est la concentration de la solution du sol.

## 4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

### 4.1. Mesures des transpirations réelles

Les débits transpiratoires ont été mesurés sur les arbres 5, 11 et 20 (tab. 2). Les résultats obtenus pour les arbres 5 et 11 sont présentés à titre d'exemple sur la

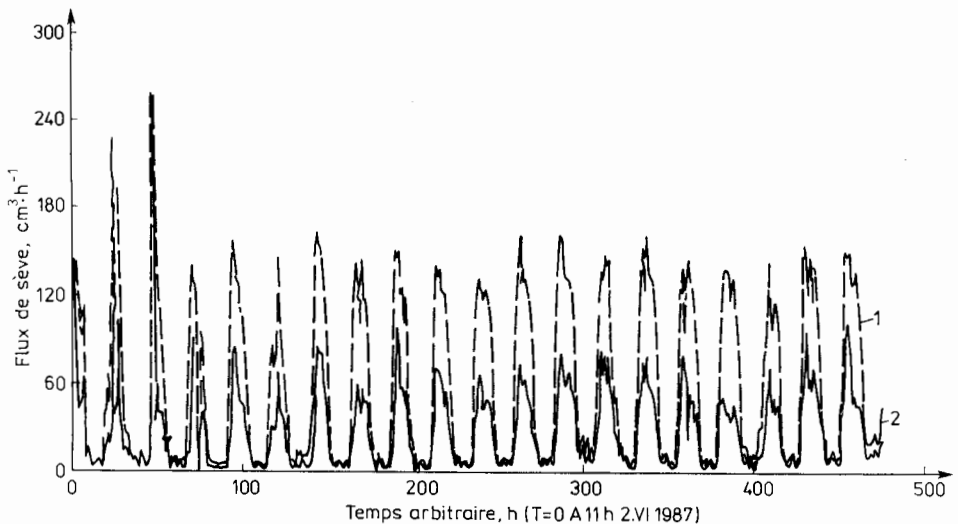


Fig. 2. Variabilité inter-arbres des flux de sève  
 1 - arbre 5 (est), 2 - arbre 11 (ouest)

Fig. 2. Inter-tree variability of the sap flux  
 1 - tree 5 (east), 2 - tree 11 (west)

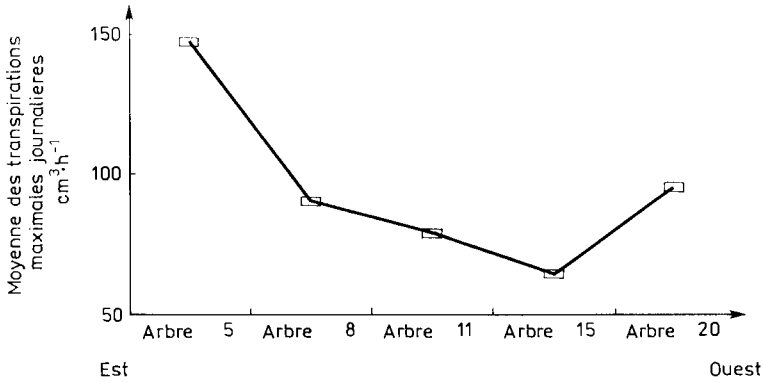


Fig. 3. Variabilité des flux de sève sous l'abri plastique. Le numéro d'un arbre est proportionnel à sa position sous la serre

Fig. 3. Variability of the sap flux under foil. The tree number is proportional to its position in the greenhouse

figure 2. On constate une diminution de la transpiration, pour  $t > 60$  heures, qui est à mettre en relation avec le blanchiment du tunnel plastique réalisé pour diminuer la température de l'air sous l'abri. Sinon, on observe une grande régularité des débits de sève tout au long de l'expérimentation. Dans un cas (arbre 5) les débits maxima sont de l'ordre de  $150 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , et dans l'autre cas présenté (arbre 11), ils sont de l'ordre de  $70 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Ce sont ces mesures de transpiration qui seront utilisées pour calculer l'extraction racinaire de l'eau. La différence observée entre les arbres est probablement due à un effet micro-climatique lié à leurs positions sous le tunnel plastique (fig. 3). Cette variabilité est d'ailleurs intéressante dans l'optique de validation du modèle, car on peut penser ajuster les paramètres du modèle sur l'un des ensembles "arbre-sol", puis valider celui-ci en utilisant les autres données expérimentales, qui correspondront donc à un fonctionnement différent.

#### 4.2. Mesures des températures

Sur la figure 4 est présentée, à titre d'exemple (arbre 5), l'évolution des températures, dans le sol à 3 profondeurs ainsi que dans l'air. Les profils de température obtenus sont tout à fait classique et n'appellent pas de remarque particulière. Les écarts observés peuvent être, pour une même profondeur, de l'ordre de  $10^\circ\text{C}$  (de  $20^\circ\text{C}$  à  $30^\circ\text{C}$ ) si l'on considère toute la durée de l'essai. Ces écarts sont suffisamment importants pour devoir être pris en compte dans le modèle, en particulier en ce qui concerne le coefficient de diffusion moléculaire du nitrate. Celui-ci peut en effet varier de  $2 \cdot 10^{-6} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  à  $4 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour des tempé-



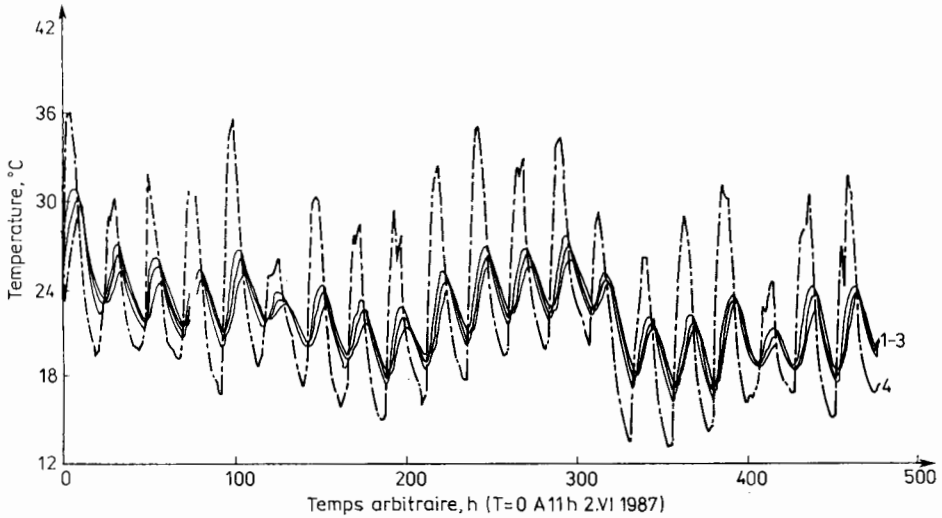


Fig. 4. Variation de la température du sol et de l'air durant l'expérience (arbre 5)

1 - sol 5 cm, 2 - sol 10 cm, 3 - sol 30 cm, 4 - air 10 cm au-dessus du sol

Fig. 4. Variability of soil and air temperature during the experiment (tree 5)

1 - soil 5 cm, 2 - soil 10 cm, 3 - soil 30 cm, 4 - air 10 cm above the soil

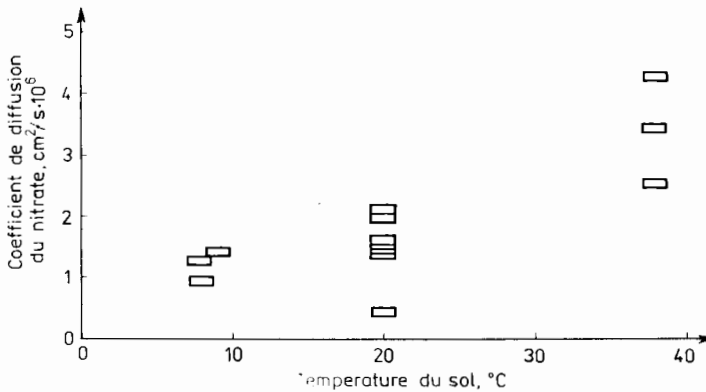


Fig. 5. Variation du coefficient de diffusion du nitrate du sol utilisé en fonction de la température. Les mesures ont été réalisées pour des humidités volumiques variant entre 11 et 16 %

Fig. 5. Changes of the nitrate diffusion coefficient in the soil used with temperature. The measurements were taken for volumetric moisture contents between 11 and 16%

ratures variant de 20 à 30° C (fig. 5), toutes choses étant égales par ailleurs.

#### 4.3. Distribution spatiale des racines

A titre d'exemple, nous présentons les résultats concernant 2 des arbres dont on a extrait le système racinaire pour en analyser la distribution spatiale. Les

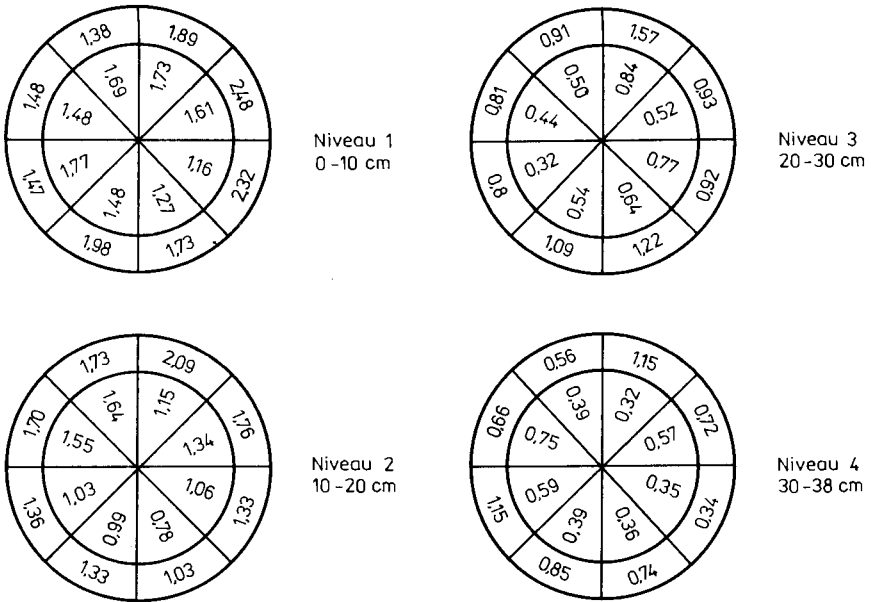


Fig. 6. Variabilité de la masse sèche de racines fines ( $\phi = 0,5$  mm). Distribution dans le sol

Fig. 6. Variability of dry matter of fine roots ( $\phi = 0.5$  mm). Distribution in the soil

résultats rapportés (fig. 6 et 7) ne concernent que les racines dites "fines" ( $D < 0,5$  mm) qui correspondent à la quasi totalité du système racinaire si on en calculait la longueur. Dans les 2 cas, on trouve une densité d'enracinement très importante, de l'ordre de 1 cm de racines par  $\text{cm}^3$  de sol (1 g de racines "fines" a une longueur d'environ 10 m), et pouvant atteindre  $2 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  pour les plus fortes densités. Par ailleurs, si on constate bien une certaine variabilité horizontale de l'enracinement, il n'y a pas de structure spatiale à proprement parler (c.à.d, zones à forte densité s'opposant à des zones à faible densité). De même les secteurs prélevés (numérotés de I à XVI pour chaque couche de sol) ne présentent pas de liaison verticale comme le montre l'examen des profils de numéro correspondant (fig. 6 et 7), même si, en moyenne, on retrouve bien un profil racinaire ty-

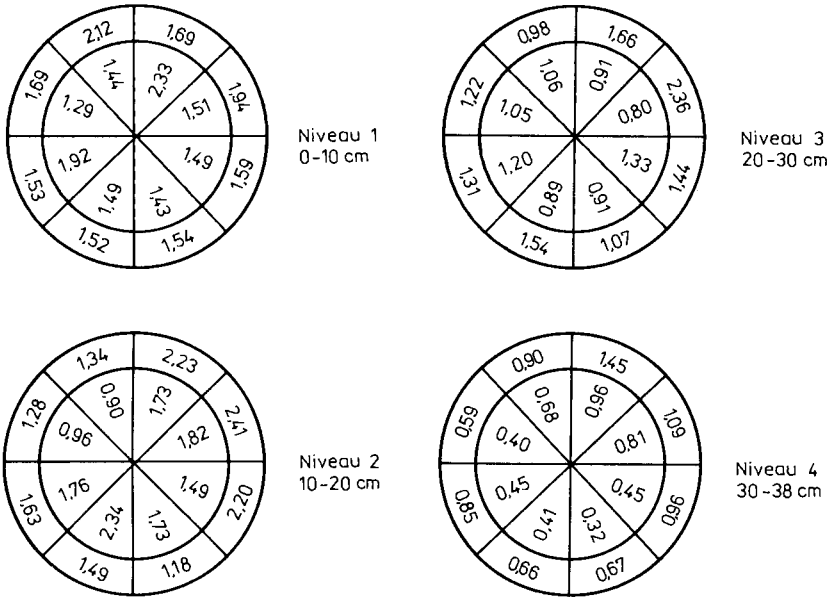


Fig. 7. Variabilité de la masse sèche de racines fines ( $\phi = 0,5$  mm). Distribution dans le sol

Fig. 7. Variability of dry matter of fine roots ( $\phi = 0.5$  mm). Distribution in the soil

rique (fig. 8). Cette analyse, confirmée par les données des autres systèmes racinaires analysés (non présentées), permet d'accepter pour cet essai particulier le caractère monodimensionnel de la distribution spatiale des racines, et donc de la fonction puits racinaire.

#### 4.4. Evolution de l'azote minéral du sol

L'évolution de l'azote minéral du sol au cours de l'expérimentation est présentée sur la figure 9 pour les 2 prélèvements qui ont été réalisés (13 et 20 jours après la fertilisation au  $^{15}\text{N-NO}_3^-$ ). Les données figurées concernent l'azote minéral total et l'excès  $^{15}\text{N}$  qui lui est associé. Treize jours après la fertilisation, le sol est enrichi en azote principalement entre -15 et -35 cm. Le profil isotopique permet d'affirmer que la majorité de cet azote provient de la fertilisation puisqu'on obtient des valeurs isotopiques d'excès mesurés proches de celle de la solution initiale (13,1 %). En surface, la quantité d'azote présente dans le sol est par contre très faible. Lors du second prélèvement, la majorité de l'azote présent dans le sol a été absorbé par le système racinaire, la quantité totale restant dans l'ensemble du volume de sol étant inférieure à 1 g.

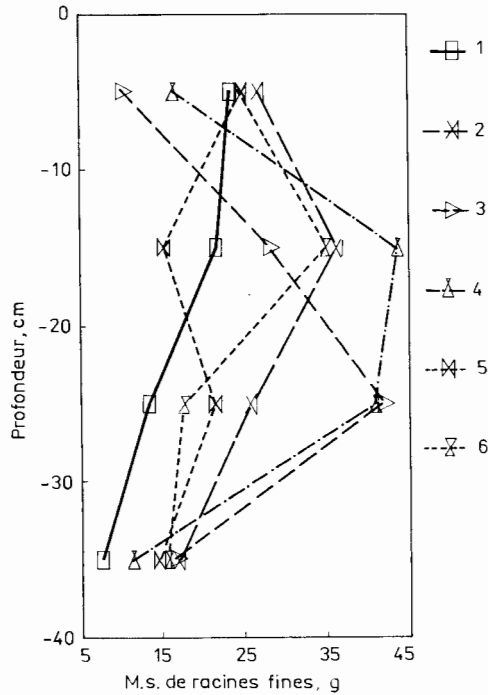


Fig. 8. Exemples de profil racinaire

1 - arbre 4, 2 - arbre 5, 3 - arbre 8, 4 - arbre 11, 5 - arbre 15, 6 - arbre 18

Fig. 8. Examples of the root profiles:

1 - tree 4, 2 - tree 5, 3 - tree 8, 4 - tree 11, 5 - tree 15, 6 - tree 18

Le bilan azoté global entre "azote absorbé" et "azote restant dans le sol" (minéral et organique) est présenté sur la figure 10. Lors du premier prélèvement, environ 60 % de l'azote apporté en fertilisation (soit 4,3 g par arbre) a été absorbé par la plante, 15 à 20 % restant sous forme minérale et une fraction faible étant passée sous forme organique. Lors du second prélèvement, l'azote absorbé correspond à 80 % de l'apport, et en moyenne 8 % ont été réorganisés sous forme organique. La fraction minérale devenant négligeable. Il faut noter que le bilan global permet de reconstituer environ 90 % de la quantité apportée, ce que l'on peut considérer comme satisfaisant pour ce type d'expérimentation.

## 5. DISCUSSION ET CONCLUSION

Le travail présenté avait un triple objectif:

- Définir, sous un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, un modèle de transfert d'eau et de solutés dans un sol qui prenne en compte l'absorption racinaire.

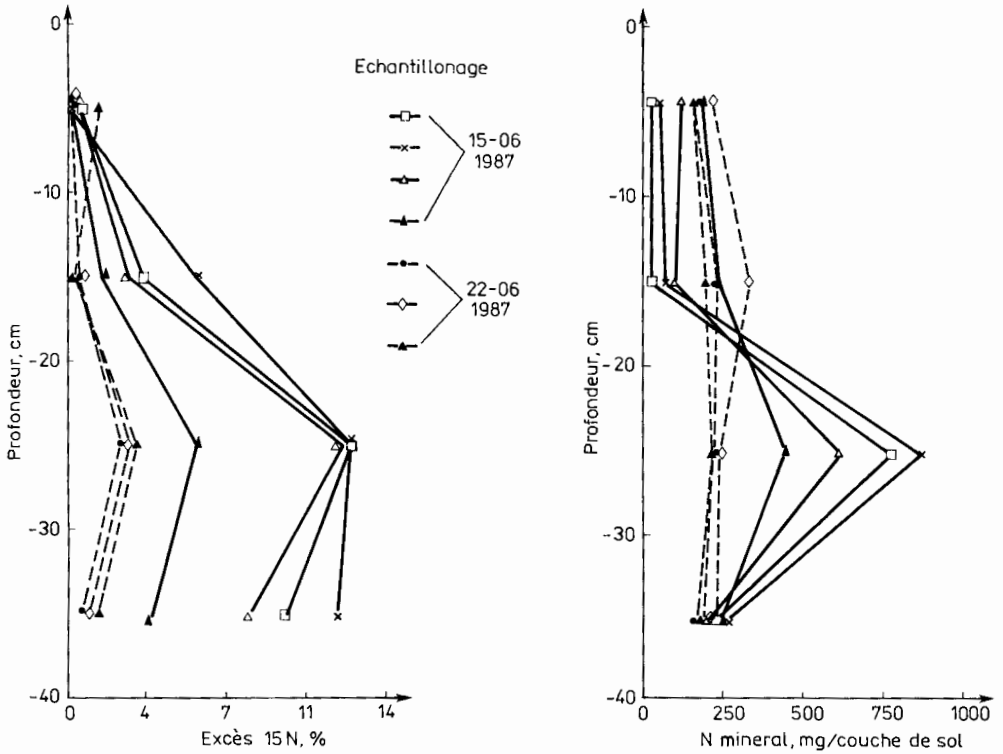


Fig. 9. Evolution de l'azote total minéral du sol  
 Fig. 9. Distribution of total mineral nitrogen in soil

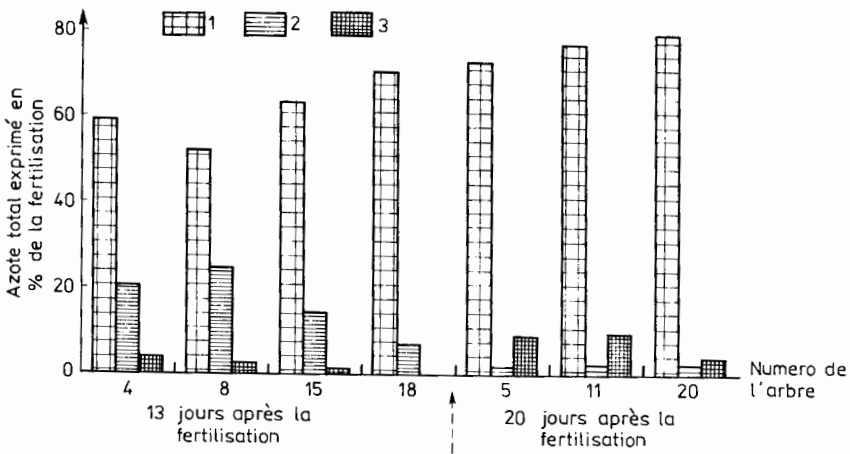


Fig. 10. Bilan azote global  
 1 - N absorbé par l'arbre, 2 - N minéral du sol, 3 - N organique du sol

Fig. 10. Total nitrogen balance  
 1 - N taken up by the tree, 2 - mineral N in the soil, 3 - organic N in the soil

- Vérifier expérimentalement certaines de ces hypothèses.
- Réaliser dans un même essai l'ensemble des mesures qui devraient permettre l'ajustement des paramètres du modèle et sa validation.

Concernant les hypothèses simplificatrices du modèle (caractère monodimensionnel des processus modélisés et non prise en compte de la fonction "source-puits" constituée par la matière organique) nous avons montré qu'elles étaient acceptables dans le cadre expérimental auquel nous nous restreignons. Pour ce qui est de la matière organique cependant, et malgré les précautions prises dans le choix du sol et des conditions expérimentales, il n'en reste pas moins que 8 % de l'azote se retrouve sous cette forme en fin d'essai, et donc ne peut être prise en compte par le modèle tel qu'il est défini. Cela indique les limites de cette expérimentation, mais également que ce modèle ne saurait être utilisé avec un objectif de prévision dans des conditions réelles d'application, à moins d'y inclure un sous-modèle qui décrirait la réorganisation et la minéralisation de la matière organique.

Par ailleurs, les données que nous avons présentées montrent que l'autre objectif que nous nous fixions est atteint. En effet, on dispose de l'ensemble des mesures qui devraient permettre d'ajuster les paramètres du modèle, et éventuellement de le valider en utilisant la variabilité des réponses des différents ensembles "arbre-sol" qui ont subi un cycle complet de mesures. Il est encore trop tôt pour en présenter les résultats, mais les premiers essais d'ajustement sont encourageants, bien qu'un certain nombre de problèmes semblent se poser.

Ce travail doit fournir un outil d'analyse des effets d'une irrigation (et/ou d'une fertilisation) sur la nutrition azotée de plantes cultivées. Dans le cas des arbres fruitiers, cette approche par modélisation est plus particulièrement nécessaire car la démarche classique en matière de fertilisation (corrélation dose-rendement, méthode du bilan) se révèle comme inopérante du fait de problèmes techniques jusqu'à présent non résolus en verger. Les progrès dans le raisonnement de la fertilisation reposent alors sur l'acquisition de connaissances plus analytiques qui sont à la base même de la démarche de modélisation. Ces connaissances, organisées en modèle, permettent de simuler le déroulement des processus naturels et donc de prévoir des évolutions possibles, ou probables, qui fournissent les clés d'une fertilisation raisonnée.

Les auteurs remercient le Conseil Régional de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur pour le soutien financier apporté à ce programme dans le cadre de la convention INRA-Region PACA.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Addiscott T. M., Wagenet R. J.: Concepts of solute leaching in soils: a review of modelling approaches. *Journal of Soil Science*, 36, 411, 1985.
2. Bremner J. M.: Inorganic forms of nitrogen. [In:] *Methods of soil analysis*. Am. Soc. of Agronomy Inc. Publisher Madison Wisconsin. 1179, 1965.

3. Bresler E.: Models for predicting distribution of chemicals in soil during irrigation. [In:] Les phénomènes de transport de l'eau et des solutés et l'irrigation. Coll. Les Colloques de l'INRA, 1980, 27.
4. de Cockborne A. M., Guennelon R.: La diffusion de l'ion  $\text{NO}_3^-$  influencée par la structure et l'humidité du sol. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 312, 75, 1986.
5. Gaudet J. P.: Ecoulement transitoire d'eau et de sel dans la zone non saturée. Application à l'étude de la contamination des nappes à surface libre. Thèse Doct. Université de Grenoble, 1974.
6. Gaudet J. P.: Transferts d'eau et de soluté dans les sols non saturés. Mesures et simulation. Thèse, Doct., Université de Grenoble. 1978.
7. Granier A.: Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. Ann. Sci. For., 42, 193, 1985.
8. Granier A.: Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. Ann. Sci. For., 44, 1, 1987.
9. Guiraud C.: Contribution du marquage isotopique à l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans le système sol-plante. Thèse Doct., Université P. et M. Curie, Paris VI, 1984.
10. Nye P. H., Marriott F. H. C.: A theoretical study of the distribution of substances around roots resulting from simultaneous diffusion and mass flow. Plant and Soil, 30, 459, 1969.
11. Phillips R. E., Nanagara T., Zartman R. E., Leggett J. E.: Diffusion and mass flow of nitrate-nitrogen to plant roots. Agron. J., 68, 63, 1976.

A. M. de Cockborne, R. Habib, F. Lafolie

TRANSFER OF WATER AND NITRATE IN SOIL AND ABSORPTION BY ROOT SYSTEM OF PEACHES. PRESENTATION OF HYPOTHESES OF THE MODEL AND RESULTS GATHERED FOR ITS EVALUATION

#### S u m m a r y

Modelling of water and nitrate-nitrogen transfer in a soil is studied with a special attention to theory when root absorption is concerned. Equations are stated in the one-dimensional case and an experiment is achieved in order to calibrate and validate the model. The experiment is described and the first results are presented.

Young peach trees were grown under a plastic cover in containers filled with sandy soil. Tree transpiration rates were measured using flux-gauges. Sap transpiration rates were found to be different from one tree to another one (Fig. 1). Differences can be attributed to micro-climatic effects under the plastic cover (Fig. 2). Soil temperatures were measured at 3 depths (-5, -10, -30 cm) and air temperature 10 cm above the soil surface (Fig. 3). This will be used to estimate the nitrate diffusion coefficient under unsteady soil temperatures (Fig. 4). The spatial distribution of the root systems were analysed in order to check the one-dimensional assumption (Figs. 5-7). Some root profiles are presented in Figure 8. Nitrate distribution within the soil and nitrate-nitrogen absorption by roots were studied through  $^{15}\text{N}$  fertilizer labelling. At the beginning of the experiment soil nitrogen was very low, then it increased after fertilising, and afterwards it decreased due to root absorption (Fig. 9). This leads to nitrogen balance about 80 to 90% of the fertiliser amount (Fig. 10) what can be considered as satisfying in nitrogen soil-plant experiment. Nevertheless about 8% of total nitrogen was found as organic-nitrogen at the end of the experiment which is not taken into account by the model.

A. M. de Cockborne, R. Habib, F. Lafolie

PRZENOSZENIE WODY I AZOTU W GLEBIE I ICH ABSORPCJA PRZEZ SYSTEM  
KORZENIOWY BRZOSKWIŃ  
PREZENTACJA ZAŁOŻEŃ MODELU I WYNIKÓW ZEBRANYCH DO JEGO OCENY

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

Przedstawiono model przenoszenia wody i związków azotowych ze szczególnym zwróceniem uwagi na ich pobieranie przez korzenie. Rozpatrywano model jednowymiarowy oraz wykonano doświadczenie w celu sprawdzenia jego poprawności. Opisano doświadczenie i przedstawiono pierwsze rezultaty.

Młode drzewka brzoskwiń rosły w pojemnikach wypełnionych glebą piaszczystą i były osłonięte folią plastikową. Transpiracja drzewek mierzona przy użyciu sond była różna dla różnych drzewek (rys. 1). Różnice mogą być związane z efektami mikroklimatycznymi pod folią (rys. 2). Temperatura gleby była mierzona na trzech głębokościach (-5, -10, -30 cm), a temperatura powietrza na wysokości 10 cm nad powierzchnią gleby (rys. 3). Dane te będą potrzebne do oceny współczynnika dyfuzji azotu przy nieustalonym polu temperaturowym (rys. 4). Przestrzenne rozmieszczenie systemu korzeniowego analizowano w celu skontrolowania słuszności założenia jednowymiarowości procesu (rys. 5-7). Kilka profilów korzeniowych przedstawiono na rysunku 8. Rozkład azotanów w glebie i pochłanianie azotu azotanowego przez korzenie badano za pomocą izotopu  $^{15}\text{N}$ . Na początku doświadczenia poziom azotu w glebie był bardzo niski, po nawożeniu wzrósł, a następnie malał wskutek pochłaniania przez korzenie (rys. 9). Pozwala to oznaczyć bilans azotu, którego wartość wynosiła od 80% do 90% ilości dostarczonej z nawozem, co można uznać za wynik zadowalający w tego typu doświadczeniach. Tym niemniej około 8% całego azotu należy uważać za azot organiczny; czego nie wzięto pod uwagę przy tworzeniu modelu.