

Quelques réflexions concernant les problèmes de fertilisation en cultures irriguées.

R. HABIB*

SOME CONSIDERATIONS ABOUT FERTILIZATION OF IRRIGATED PLANTS.

R. HABIB.

Fruits, Jun. 1988, vol. 43, n° 6, p. 381-390.

SUMMARY - Plant mineral nutrition can be regarded as a four step process (i) providing of mineral nutrients (e.g. fertilizing), (ii) supplying these by solute transfer and/or root growth in soil, (iii) root absorption and (iv) metabolic process. The second and third steps are studied with special regards to the ferti-irrigation system being used. Solute transfer is considered both in homogeneous and heterogeneous (i.e. craked) soil. Root growth is briefly considered as it is related to irrigation. Concomitance between root absorbing zone and spatial distribution of nutrients in soil is then discussed.

QUELQUES REFLEXIONS CONCERNANT LES PROBLEMES DE FERTILISATION EN CULTURES IRRIGUEES.

R. HABIB.

Fruits, Juin 1988, vol. 43, n° 6, p. 381-390.

RESUME - La nutrition minérale d'une culture peut être définie comme un processus en quatre étapes : fourniture minérale (ex. la fertilisation), approvisionnement (par le transfert des solutés et/ou la croissance des racines), absorption racinaire et assimilation métabolique. Les deux étapes intermédiaires sont étudiées, sous certains points particuliers, en fonction du mode de fertilisation-irrigation utilisé. Les travaux cités concernent aussi bien les transferts en milieu homogène qu'en milieu hétérogène fissuré. La croissance du système racinaire est rapidement abordée en relation avec le système d'irrigation utilisé. Le problème de la coïncidence dans le sol des zones d'accumulation des engrais et des zones de croissance et fonctionnement des racines est également envisagé.

INTRODUCTION

L'effet synergique de l'irrigation et de la fertilisation sur la production des cultures est maintenant bien démontré. L'objet de cet article n'est pas de faire une présentation exhaustive des problèmes liés à la fertilisation des cultures en zones irriguées, ni de présenter les différentes techniques d'irrigation-fertilisation utilisées en association. L'auteur voudrait plutôt insister sur certains points qui font encore l'objet de recherches actives dans des domaines souvent divers qui peuvent relever de différentes spécialités scientifiques (en particulier : Science du sol, Agronomie, Physiologie).

Afin de clarifier la présentation, il apparaît nécessaire de préciser la terminologie qui sera utilisée dans la suite du texte. On peut présenter la nutrition minérale d'une plante supérieure cultivée comme un processus en quatre étapes principales qui peuvent être en interactions plus ou moins complexes :

La fourniture minérale : sa principale traduction en acte technique est la fertilisation. Mais d'autres phénomènes peuvent y participer ; telle la minéralisation de la matière organique qui intervient dans la fourniture d'azote, pour ne citer qu'un seul exemple.

L'approvisionnement : cette étape est particulièrement importante et complexe, elle correspond à l'apport des éléments nutritifs aux racines, qui se réalise soit par le transport des éléments minéraux dans le sol, soit par la croissance du système racinaire.

L'absorption racinaire : c'est la pénétration des éléments minéraux dans la plante. C'est donc un point clef du processus de nutrition qui va sanctionner par ses conditions de réalisation l'efficacité des deux étapes précédentes.

L'assimilation métabolique : cette quatrième étape est définie par l'utilisation et le comportement des éléments minéraux absorbés par la plante. Sa présentation n'est pas du domaine de cet article.

L'objectif de cet article est de discuter les deux phases intermédiaires du processus de nutrition minérale, appro-

* - Institut National de la Recherche Agronomique - Domaine Saint Paul - Station d'agronomie - 84140 MONTFAVET (France).

visionnement et absorption racinaire, en relation avec les modes d'irrigation et de fertilisation. Il convient donc dans un premier temps de définir ce que nous entendons par modes d'irrigation et de fertilisation, puis de préciser les phénomènes qui interviennent sur les phases d'approvisionnement et d'absorption racinaire.

MODES D'IRRIGATION ET DE FERTILISATION

Concernant l'irrigation, nous considérons différents modes d'apport de l'eau selon que la couverture du sol est totale ou partielle. Entre les deux extrêmes que sont l'irrigation par aspersion (couverture totale) et l'irrigation goutte à goutte (couverture très partielle), il existe des intermédiaires tels, par exemple, l'irrigation à la raie ou le goutte à goutte en ligne (trickle in line). Nous faisons cette distinction car le volume d'eau apporté aux cultures étant du même ordre de grandeur (compensation de l'ETr), la variation de la surface de pénétration va caractériser les différents modes d'irrigation par la vitesse moyenne macroscopique de déplacement de l'eau dans le sol. Cette remarque est à moduler en fonction de la durée de l'irrigation, de son débit et des caractéristiques hydrodynamiques du sol, en particulier la conductivité en condition saturée. Cependant, on peut globalement accepter que, toutes choses égales par ailleurs, plus la surface d'apport est réduite et plus la vitesse moyenne macroscopique de l'eau lors de l'infiltration est importante. Par ailleurs, il est également possible de différencier les modes d'irrigation selon les directions de l'espace affectées par les transferts hydriques. On parle alors d'irrigation mono, bi ou tridimensionnelle. Cette classification recouvre d'ailleurs, au moins partiellement, la précédente.

Concernant la fertilisation on ne considérera que deux modes d'apport des fertilisants qui sont d'ailleurs souvent liés aux modes d'irrigation utilisés :

- Fertilisation par épandage d'engrais au sol en couverture totale ou partielle souvent employée dans le cas d'une irrigation en couverture totale du sol.

- Ferti-irrigation, c'est-à-dire apport des engrais dissous dans l'eau d'irrigation qui est généralement utilisée en relation avec des irrigations en couverture partielle du sol.

Il existe une littérature abondante qui traite de la modélisation des transferts de solutés dans un sol pour différentes modalités d'apport d'eau ou de solutés (BRESLER, 1980 ;

ADDISCOTT et WAGENET, 1985). L'équation de diffusion des sels pour une espèce minérale quelconque «i» se déplaçant dans une seule direction de l'espace peut s'écrire (BIGGAR et NIELSEN, 1980) :

$$(1) \frac{\delta C_i}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C_i}{\delta x^2} - \frac{\delta v C_i}{\delta x} - \frac{\delta S_i}{\delta t} + \phi_i$$

où x et t sont les coordonnées de l'espace et du temps, C_i et S_i la concentration du soluté «i» dans la solution du sol et dans la matrice solide (adsorption du phosphore par exemple : HABIB et GUENNELON, 1983), v est la vitesse moyenne macroscopique de déplacement de l'eau dans les pores du sol, ou vitesse de pore, et D le coefficient de diffusion apparent du soluté (supposé constant) ϕ_i est un terme rendant compte des phénomènes de source ou de puits pour le soluté «i» : transformation microbiologique, réactions chimiques, absorption racinaire.

v est habituellement calculé par :

$$(2) q = v \theta$$

où q est le flux de Darcy et θ l'humidité volumique. L'équation (2) suppose que toute l'eau du sol est mobile ; mais cette simplification n'est pas acceptée par certains auteurs (VAN GENUCHTEN et WIERENGA, 1976 ; SINE et AGNEESSENS, 1979).

Donc la connaissance du déplacement des solutés dans un sol irrigué est directement liée à la précision que l'on peut avoir sur la valeur et la distribution de v dans l'espace, et donc à la résolution de l'équation de transfert hydrique. D'ailleurs le coefficient de diffusion apparent D comprend les phénomènes de dispersion hydrodynamique et est donc lié à v et θ , soit en fait $D(v, \theta)$.

Les différents termes à la droite de l'équation (1) vont avoir une importance plus ou moins grande selon l'espèce minérale considérée et les modes de fertilisation et irrigation utilisés. Une illustration qualitative en est donnée dans le tableau 1, dans le cas de sels de nitrate et de phosphate.

APPROVISIONNEMENT DES CULTURES EN ELEMENTS FERTILISANTS ET ABSORPTION RACINAIRE

Comme nous le soulignons dans l'introduction, l'approvisionnement des cultures en éléments fertilisants est le

TABLEAU 1 - Illustration qualitative de l'importance des termes de l'équation de diffusion (1) pour 2 sels et 2 modes de fertilisation-irrigation.

Variables	Fertilisation Irrigation			
	Epandage d'engrais + aspersion		Ferti-irrigation localisée	
	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻
D « apparent »	moyen	faible	fort	moyen
v	faible	faible	fort	fort
S	nul	fort	nul	fort
ϕ _i *	variable	variable	variable	variable

* - Dans le cas de NO₃⁻ le terme ϕ_i devient prépondérant pendant les phases de réorganisation de la matière organique. Dans le cas de PO₄⁻, il est très dépendant du caractère calcaire du sol.

résultat de deux processus complémentaires : le déplacement proprement dit des solutés dans le sol et la croissance du système racinaire. Ces deux phénomènes ne sont pas indépendants car la croissance du système racinaire est directement affectée par la présence des solutés dans le milieu (DREW, 1975), comme d'ailleurs par le mode d'irrigation utilisé (MONNIER *et al.*, 1982). Cependant, pour d'évidentes raisons de simplification, ces deux points seront traités séparément.

Influence du mode de fertilisation-irrigation sur le déplacement des engrais dans le sol.

En sol irrigué, l'alternance des périodes d'humectation et de dessiccation va induire une modification au cours du temps du système de porosité. En l'absence de travail du sol, la porosité structurale N_s (STENGEL, 1979), ou porosité inter-agrégats, ne provient que de la fissuration du sol par gonflement et retrait, et de l'activité biologique. Ainsi, dans les conditions climatiques moyennes du Bassin Parisien (zone non irriguée), en sol de limon bien drainé, on a pu relier la porosité structurale à l'humidité pondérale du sol w et à sa teneur en argile A (MONNIER *et al.*, 1981) :

$$N_s = 0,44 A - 0,32 w + 4,8 \quad n = 34 \quad r = 0,94$$

On voit que l'importance de la porosité inter-agrégats du sol va dépendre de sa classe texturale et de son humidité. Cependant, bien que ce type de conditions corresponde à de nombreux sols cultivés, l'étude des transferts de solutés en milieu fissuré est assez récente, mais fait l'objet d'un développement important depuis quelques années.

• Transfert en milieu homogène.

Les études de déplacement de solutés ont donc généralement été réalisées en milieu homogène et isotrope. Nous ne citerons pas ici les travaux fondamentaux qui sont basés sur la résolution de l'équation de diffusion [équ. (1)] pour différentes conditions initiales et aux limites. Nous

préférons insister sur certains résultats expérimentaux qui illustrent bien l'importance du mode de fertilisation et d'irrigation sur la répartition des engrais dans le sol.

Un cas particulièrement démonstratif concerne la migration du phosphore. En effet les sels de phosphate interagissent fortement avec la matrice du sol, et ce d'autant plus que le sol est calcaire. Ainsi, en l'absence d'irrigation la migration des orthophosphates épandus à la surface du sol par simple diffusion moléculaire, pour un limon argileux calcaire, est de l'ordre de $10^{-1} \text{ cm} \cdot \text{j}^{-1}$; le coefficient de diffusion apparent pouvant varier de 0,3 à $3,6 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (HABIB et GUENNELON, 1983) selon les conditions de milieu (humidité et densité apparente du sol en particulier).

Cependant, quand on pratique une irrigation, on peut montrer que, dans un sol homogène mais bien structuré au niveau des agrégats, les orthophosphates peuvent migrer à des distances de leur point d'apport de l'ordre de la dizaine de $\text{cm} \cdot \text{j}^{-1}$ selon la taille des agrégats et le débit du fluide vecteur [c'est-à-dire en fait, la vitesse dans les pores, v , de l'équation (2)]. Les résultats sont présentés sur les figures 1a et 1b. Cet essai a été réalisé en appliquant une irrigation de type goutte à goutte en ligne (trickle in line) à une cuve bidimensionnelle (dimension : $50 \times 35 \times 5 \text{ cm}$), les sels de phosphate étant dilués dans l'eau d'irrigation. Le sol utilisé était un limon argileux calcaire (38 p. 100 d'argile, 41 p. 100 de limon, 34 p. 100 de calcaire total). La taille des agrégats permet de réaliser dans le premier cas (figure 1a : agrégats de 0,8 à 2 mm) des flux convectifs inter-agrégats plus rapides que dans le second cas (figure 1b : agrégats inférieurs à 0,4 mm). La pénétration du phosphate en profondeur est alors plus importante et dépasse 15 cm pour 50 heures d'infiltration (débit 5 ml/h). Dans le second cas (figure 1b) le front de phosphate atteint environ 10 cm pour 200 heures d'infiltration (débit 5 ml/h) : les transferts convectifs sont ralentis et le phosphate est plus localisé autour du point d'apport.

Par ailleurs, la migration des engrais dans le sol, pour un même mode de fertilisation-irrigation, va dépendre de la nature chimique des sels concernés et de leurs réactions

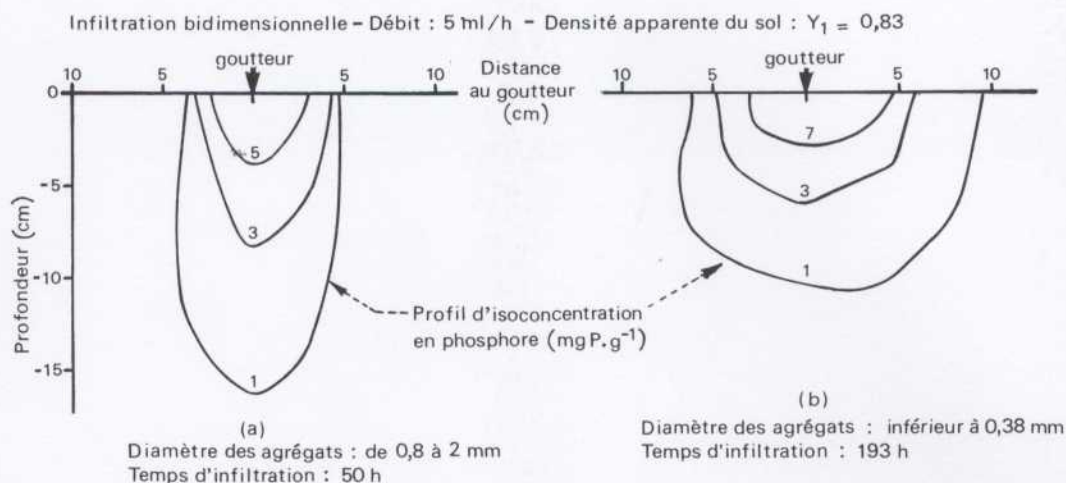


Figure 1 * EFFET DE LA VARIATION DE LA VITESSE MOYENNE DE L'EAU DANS LES PORES (\bar{V}), SUR LA DISPERSION DE P DANS UN MILIEU POREUX : (a) \bar{V} forte, (b) \bar{V} faible.

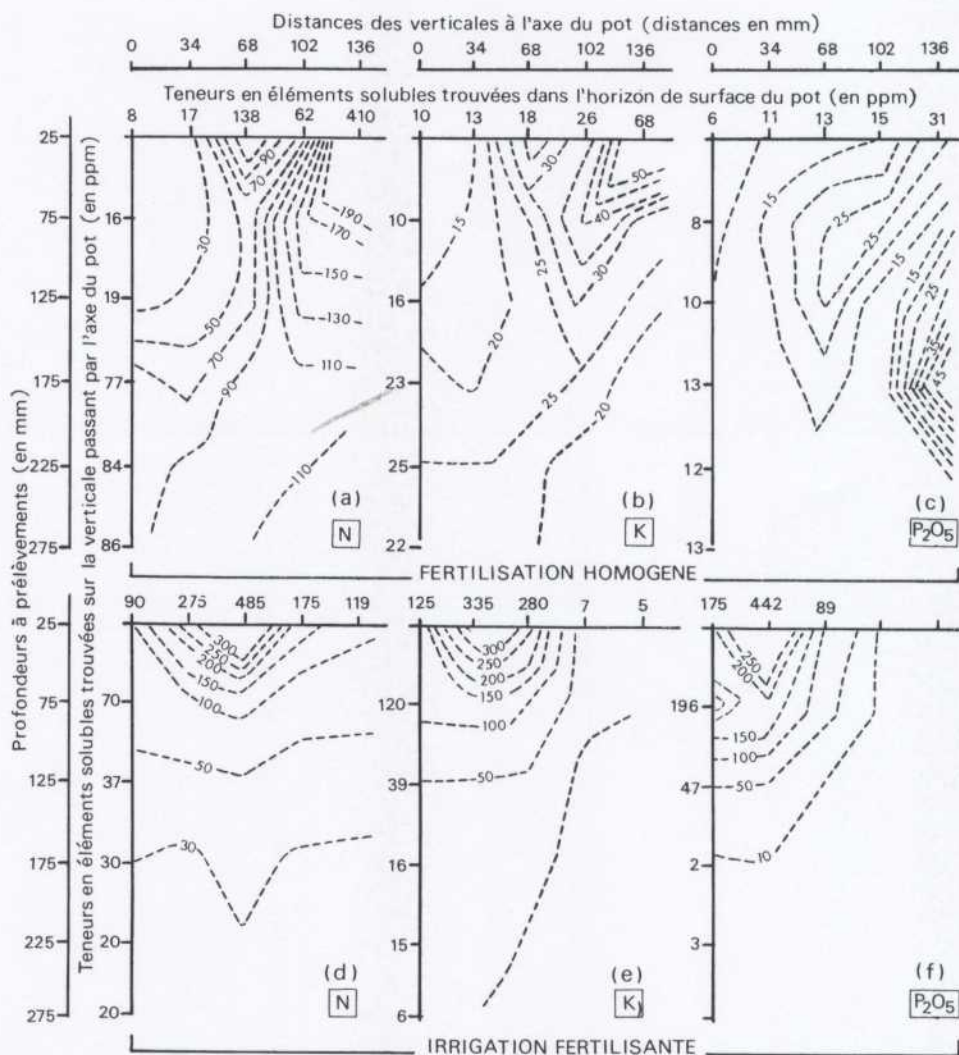


Figure 2 * INFLUENCE DU MODE DE FERTILISATION SUR LA DISTRIBUTION DES SELS SOLUBLES DANS UN SOL HUMECTE INITIALEMENT DE FAÇON HOMOGENE. (CABIBEL, comm. pers., 1977).

physico-chimiques avec le milieu. Ces différences de comportement pour N, P, K sont illustrées sur les schémas de la figure 2 (B. CABIBEL, Station de Science du sol, INRA-Avignon, communication personnelle, 1977). Ces schémas traduisent les résultats d'une expérience de migration des engrais apportés selon deux modalités :

- soit mélangés au volume total de sol avant installation de l'irrigation goutte à goutte (schémas a, b, c) : 120, 110 et 150 ppm respectivement pour N, K, et P_2O_5 .

- soit dissous dans l'eau d'irrigation (schémas d, e, f) à des doses qui correspondraient à un apport global pour tout le volume de sol de 60, 50 et 60 ppm respectivement pour N, K et P_2O_5 .

Le sol étudié était un sable fin : 8 p. 100 d'argile, 1,6 p. 100 de matières organiques, 11,1 p. 100 de calcaire total. Il avait été placé dans des récipients cylindriques de 35 cm de diamètre et 35 cm de profondeur.

Fertilisation homogène (fig. 2 a-b-c) :

Le goutte à goutte appauvrit en azote la zone située sous le goutteur (figure 2a) avec une migration de N vers la périphérie de la zone mouillée (416 ppm à 14 cm sous le goutteur). Il y a peu de lessivage. Pour K, extrait à l'eau, on peut également admettre cet effet de migration en surface (en partie dû à l'évaporation). Mais on ne retrouve pas la totalité des sels initialement mélangés au sol, ce qui peut s'expliquer par une certaine fixation sur la capacité d'échange cationique. Pour P_2O_5 soluble à l'eau, la migration n'apparaît pas clairement car il n'y a nulle part de zones d'enrichissement. Il semble au contraire que le phosphate précipite dans la zone humide, d'où la diminution de la solubilité de cet élément dans la quasi-totalité du volume du sol. Cependant, ces interprétations sont à moduler en fonction d'un effet de bordure possible lié aux parois des pots.

Irrigation fertilisante (fig. 2 d-e-f) :

Dans ce cas on note pour tous les éléments des enrichissements nets en forme d'anneau dans la couche superficielle

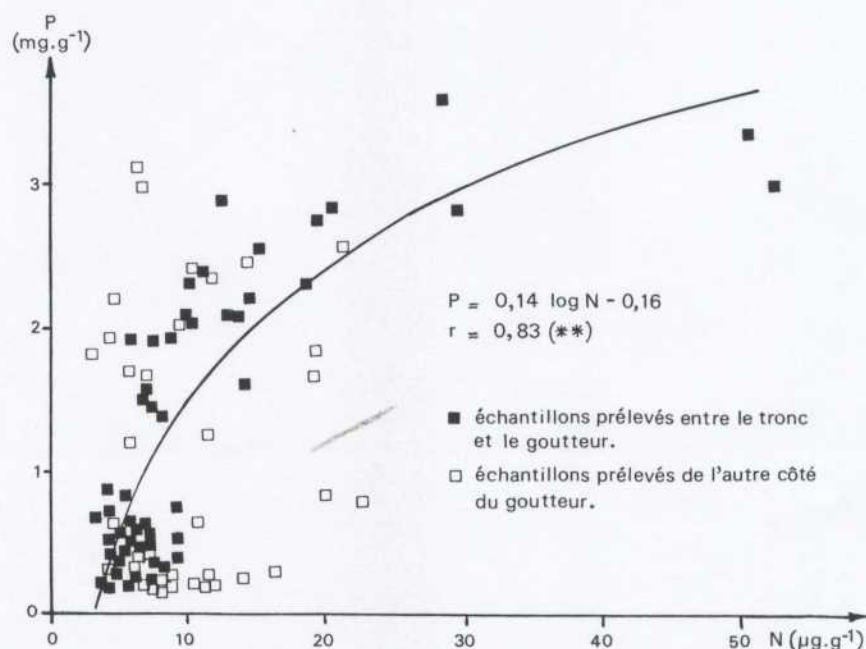


Figure 3 * RELATION ENTRE LES TENEURS EN P ET N DU SOL DANS LE PLAN TRONC-GOUTTEUR (GUENNELON et CABIBEL, 1981).

et des lessivages négligeables au-delà de 15-20 cm de profondeur. Les courbes d'iso-contour montrent des interactions avec la matrice solide différentes pour les trois sels : la plus faible pour N, la plus forte pour P_2O_5 .

Ce type de comportement est modifié en présence d'un système racinaire actif, en particulier du fait de l'accélération du fluide vecteur sous l'influence de l'absorption racinaire. A cet égard, la distribution de N, P, K apportés dans l'eau d'irrigation a été étudiée dans le cadre d'une ferti-irrigation localisée d'un verger de pommiers (GUENNELON et CABIBEL, 1981). Cette étude en conditions de terrain montre que le déplacement de P et K est corrélé à celui du nitrate (sol à faible interaction avec la matrice solide) dans les zones de sol fortement colonisées par les racines, c'est-à-dire celles situées entre le tronc et le goutteur (CABIBEL, 1978) pour ce type de conditions expérimentales. Par contre du côté opposé à l'arbre, sur la ligne arbre-goutteur, faiblement colonisé par les racines on n'observe plus de corrélation entre nitrate et phosphate ou potassium. Pour les phosphates par exemple on peut penser que les réactions d'adsorption et précipitation deviennent prépondérantes sur les déplacements convectifs. Les résultats concernant la relation NO_3^- - PO_4^{3-} sont présentés sur la figure 3.

● Transfert en milieu fissuré.

Dans le paragraphe précédent nous avons voulu montrer que le mode d'irrigation associé à la fertilisation, ainsi que le mode de fertilisation, influent fortement sur le transfert des engrais dans le sol. Ceci est en fait lié à la compétition entre les réactions d'immobilisation des ions dans le sol et les déplacements rapides par flux convectifs.

En milieu hétérogène, les fissures jouent en outre le rôle de chemins préférentiels : l'existence d'une porosité de grande dimension (porosité structurale : STENGEL, 1979) induit des circulations préférentielles de l'eau et des engrais qui se traduit par une perturbation du schéma diffusif habituel, en particulier pour les ions à fortes interactions avec la matrice solide, PO_4^{3-} et à un moindre titre K^+ (d'après GUENNELON *et al.*, 1979).

Mais les travaux concernant le transfert de solutés en milieu fissuré sont assez récents et relèvent pour l'instant encore plus de l'expérimentation (KANCHANASUT *et al.*, 1978 ; de COCKBORNE, 1980 ; GERMANN et BEVEN, 1981a ; de COCKBORNE, 1986) que de la modélisation (GRISAK *et al.*, 1980 ; GERMANN et BEVEN, 1981b ; VAN GENUCHTEN *et al.* 1984 ; GERMANN et BEVEN, 1985).

Les travaux récents de de COCKBORNE (1986) ont montré que, y compris en irrigation monodimensionnelle (infiltration d'une lame d'eau sur un massif de sol), l'existence de fissures va permettre le déplacement en profondeur de PO_4^{3-} pour un écoulement hydrique en conditions non saturées. L'infiltration a été réalisée en quatre temps chacun séparé par 1 heure de ressuyage du massif : 5 l d'eau en 1 mn, 10 l de ^{32}P - PO_4^{3-} (0,5 g P/l), en 3 mn, 10 l d'eau en 20 mn, 10 l de ^{15}N - NO_3^- (1,2 g NO_3^- /l) en 60 mn. Les résultats sont présentés sur la figure 4.

Dans le massif de sol, la localisation préférentielle des deux solutés entre les cotes -25 et -40 cm a pu être liée à la présence de fissures repérées par marquage des solutions au bleu de méthylène. Par ailleurs, la répartition de NO_3^- et PO_4^{3-} dans le sol était également fortement liée à la répartition des porosités structurales considérées comme un indicateur quantitatif de fissuration.

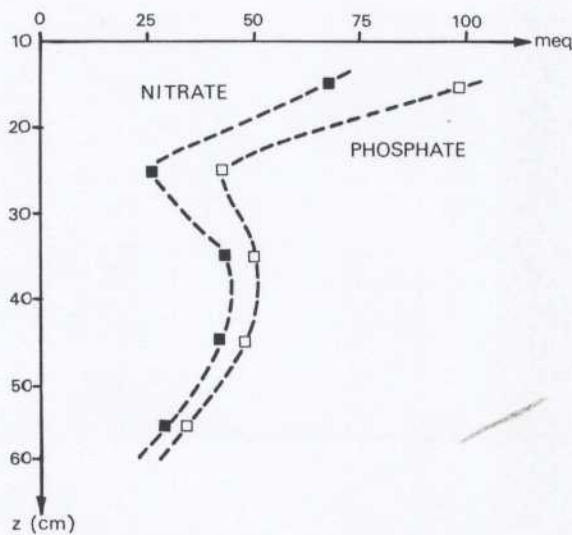


Figure 4 * INFILTRATION MONODIMENSIONNELLE DE NO_3^- ET PO_4^{3-} EN SOL FISSURE (de COCKBORNE, 1986).

Dans le même article (de COCKBORNE, 1986) on trouve une étude de l'infiltration de nitrate et phosphate en conditions d'apport d'eau tridimensionnelle (ferti-irrigation localisée sur sol nu fissuré) qui montre que la profondeur d'enrichissement du sol en PO_4^{3-} (marqué au ^{32}P) peut atteindre 100 cm et est du même ordre de grandeur que celle de NO_3^- (figure 5). Par contre, les transferts latéraux

diffusifs intéressent dans le cas du nitrate un volume de sol nettement plus important qui traduit bien la différence de nature chimique des deux anions.

Ces travaux récents demandent à être étendus et complétés car leur importance pratique apparaît comme considérable dès que l'aptitude à la fissuration naturelle des sols (MONNIER *et al.*, 1981) induit l'existence de chemins préférentiels pour l'eau et les engrais. Cependant la modélisation déterministe en est difficile qui exige une localisation spatiale précise de l'ensemble du système de fissures. Dans ce cadre, le passage à des modèles probabilistes serait un progrès déterminant (PERSAUD *et al.*, 1985).

Influence du mode d'irrigation-fertilisation sur la croissance des systèmes racinaires et leur capacité d'absorption minérale.

Il est bien connu que la croissance racinaire d'une plante est sous la dépendance de facteurs génétiques (TROUGHTON et WHITTINGTON, 1969) et de facteurs d'environnement, en particulier les conditions physiques de sol (EAVIS et PAYNE, 1969). De notre point de vue, on peut considérer les racines comme des lignes d'interception des flux d'éléments minéraux dans le sol. Pour les solutés dont le déplacement est faible, c'est en fait la croissance du système racinaire qui permet l'approvisionnement de la plante en éléments nutritifs (BOSC et MAERTENS, 1981 ; BOSC, 1981). Le problème en conditions irriguées est donc d'obtenir une bonne coïncidence entre les zones de croissance racinaire et les zones d'enrichissement en solutés ;

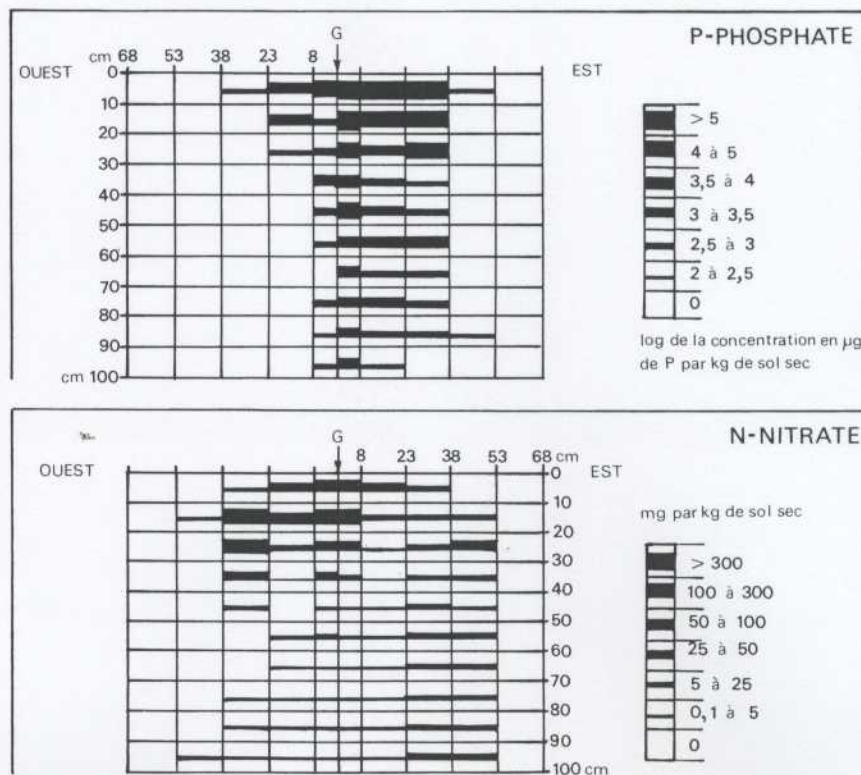


Figure 5 * INFILTRATION BIDIMENSIONNELLE DE NO_3^- ET PO_4^{3-} EN SOL FISSURE (de COCKBORNE, 1986).

ainsi d'ailleurs que l'existence dans ces zones d'interception de conditions favorables au fonctionnement racinaire.

• Croissance racinaire.

Le mode d'irrigation a, en effet, un rôle déterminant sur la croissance des systèmes racinaires aussi bien sur cultures annuelles (CABIBEL et MONNIER, 1977 ; CALIANDRO *et al.* 1980) que sur cultures fruitières pérennes

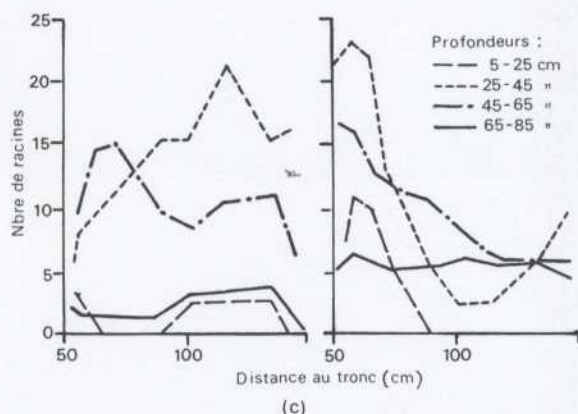
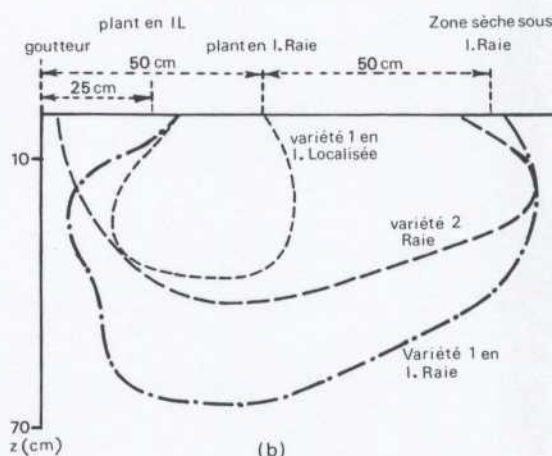
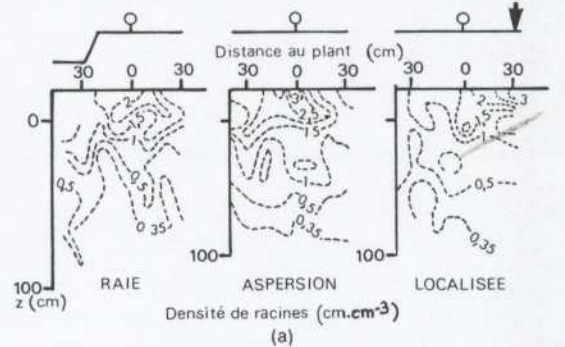


Figure 6 * INFLUENCE DU MODE D'IRRIGATION SUR LE SYSTEME RACINAIRE : (a) TOMATE (d'après CALIANDRO *et al.*, 1980); (b) AUBERGINE (d'après MONNIER et CABIBEL, 1977); (c) POMMIERS (d'après CABIBEL, 1978).

(CABIBEL, 1978 ; SCALA *et al.*, 1980). Nous donnons, à titre d'illustration, quelques figures extraites des articles que nous venons de citer (figure 6 a, b, c).

Les conditions de déplacement des solutés dans un sol, que nous avons décrit précédemment, et en particulier en milieu fissuré, nous permettent d'assurer, au moins pour les cultures annuelles irriguées, que nous aurons une forte probabilité d'obtenir une bonne coïncidence entre les zones de croissance racinaire et les zones du sol enrichies en engrais : les transferts convectifs rapides qui assurent cet enrichissement en profondeur sont liés à des porosités interagregats qui permettent une bonne croissance des racines (bonne structure du sol, aération et humidité suffisantes).

• Fonctionnement racinaire.

On considère généralement que l'absorption des ions par les racines est liée à leurs concentrations dans la solution du sol par une relation de type linéaire ou hyperbolique (KAUTSKY *et al.*, 1968 ; NYE et MARRIOT, 1969). On conçoit donc que les modes de fertilisation et irrigation utilisés, qui vont modifier cette concentration, vont avoir une influence sur l'absorption racinaire des engrais, soit directement en différenciant leur localisation dans le sol, soit indirectement en modifiant les capacités de transfert diffusif des solutés par l'intermédiaire de l'humidité du sol. Ces deux aspects ont fait l'objet de nombreuses publications tant expérimentales que théoriques (NYE, 1966 ; DREW *et al.*, 1969 ; NANAGARA *et al.*, 1976 ; NYE, 1979).

Cependant, il n'existe, à notre connaissance, que peu d'études qui ont porté directement sur les conditions d'absorption racinaire en relation avec la localisation des engrais pouvant découler d'une irrigation. MAERTENS (1978) a étudié l'effet de la localisation de N, P, K, Ca en milieu riche ou pauvre en ces éléments sur l'absorption racinaire du maïs : en milieu non limitant en éléments nutritifs, la localisation n'a pas d'influence sur la croissance globale des racines ou des parties aériennes. Par contre, la croissance des racines isolées en zone enrichie réagit favorablement à cette localisation. Par ailleurs, la localisation a un effet positif très net sur l'absorption minérale des éléments nutritifs.

L'auteur a étudié les problèmes d'absorption racinaire du phosphore par des pommiers irrigués en localisation (GUENNELON et HABIB, 1979 ; GUENNELON *et al.*, 1979 ; HABIB, 1981 ; HABIB, 1983). Ce travail met en évidence l'influence directe du mode d'irrigation sur le fonctionnement des racines en fonction de la localisation présumée du phosphore dans le bulbe d'irrigation (figure 7).

- Lorsque le taux de saturation en eau du sol θ_s , est proche de 100 p. 100, on n'observe aucune absorption de P. Ces conditions sont, en irrigation localisée, le plus probablement réalisées à proximité de l'axe du goutteur.

- Lorsque le taux de saturation en eau est compris entre 70 et 85 p. 100, les conditions sont favorables à l'absorption de PO_4^{3-} , sauf si, simultanément, la densité sèche du sol, ρ_d , est supérieure à 1,60. Dans le limon argileux

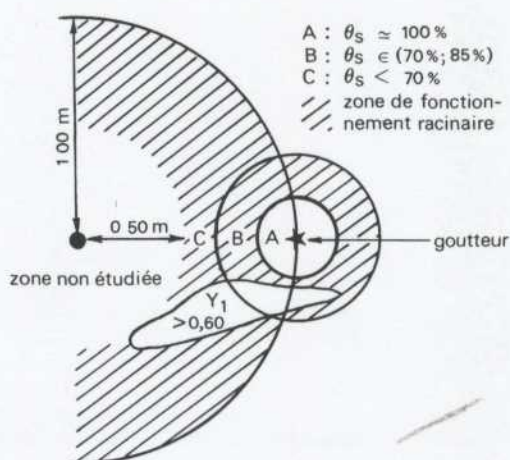


Figure 7 * REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES ZONES D'ABSORPTION OPTIMUM DU PHOSPHORE EN IRRIGATION LOCALISEE (d'après HABIB, 1981).

considéré, ce seuil correspond à la disparition de toute porosité de fissure. Cette condition met en lumière les aspects dynamiques de l'aération du sol et de l'eau : la porosité structurale de fissure est, en effet, à la fois un espace de diffusion rapide pour l'air, et un espace de circulation rapide de l'eau riche en oxygène apportée en surface par le goutteur.

- Pour les taux de saturation inférieurs à 70 p. 100, une triple interaction se manifeste : comme précédemment il est nécessaire, pour qu'il y ait absorption, qu'existe un minimum de porosité de fissures ; mais également que la densité racinaire soit suffisamment élevée. Cette dernière condition se réalise en année à printemps sec entre le tronc et le goutteur (conformément aux résultats de CABIBEL, 1978), telle que présentée sur la figure 7 ; et en année à printemps humide à des distances plus importantes du tronc.

Les deux types de travaux présentés illustrent le fait que la localisation des engrais préférentiellement dans certaines zones du sol, du fait en particulier des mécanismes impli-

qués dans le transfert des solutés, n'est pas défavorable au fonctionnement des cultures ; mais que, selon le mode de fertilisation-irrigation utilisé, le problème de la coïncidence entre zone d'enrichissement du sol et zone de fonctionnement racinaire est à poser pour pouvoir juger de l'efficacité d'une fertilisation.

CONCLUSIONS

La présentation qui vient d'être faite de certains problèmes posés par la pratique de la fertilisation en cultures irriguées n'a pas la prétention d'être exhaustive. L'auteur a tenté de montrer, sur certains points particuliers, que la fertilisation, acte technique de fourniture des engrais, pouvait être raisonnée quant à son efficacité vis-à-vis de la culture, selon les critères objectifs d'approvisionnement en éléments nutritifs et d'absorption racinaire de ces nutriments. La réalisation de ces deux étapes de la nutrition minérale est sous la dépendance de processus physiques et physiologiques dont la prise en compte simultanée est difficile car relevant de disciplines scientifiques différentes. Il est certain qu'un effort d'intégration des connaissances doit être entrepris. Cependant le dialogue entre physiciens du sol, utilisant souvent les techniques et méthodes de la modélisation déterministe, et les agronomes ou physiologistes, qui manient des concepts différents, est parfois difficile. Par exemple, le jugement de l'efficacité d'un mode particulier d'irrigation-fertilisation sur le simple examen des rendements en fin de culture peut apparaître comme insuffisant ; même si cette observation, qui intègre l'ensemble des « événements » du cycle cultural est indispensable. Par ailleurs, il est vrai que les modélisateurs travaillent encore souvent en conditions idéalisées dont la probabilité d'occurrence en milieu naturel est faible. Ainsi, les conditions d'homogénéité et d'isotropie du sol sont rarement réalisées *in situ*. Mais le développement des travaux sur sol fissuré est à cet égard encourageant, qui devrait permettre de faire le lien entre travaux de laboratoires et essais au champ. En particulier il deviendrait possible de raisonner la fertilisation des cultures en terme de calendrier d'apport et d'efficacité des engrais ; ce qui suppose d'appréhender à la fois les problèmes d'alimentation hydrique et minérale, et leurs relations avec la structure et le fonctionnement des systèmes racinaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADDISCOTT (T.M.) et WAGENET (R.J.). 1985.
 Concepts of solute leaching in soils : a review of modeling approaches.
Journal of Soil Science, 36, 411-424.
- BIGGAR (J.W.) et NIELSEN (D.R.). 1980.
 Mechanisms of chemical movement in soils.
 In *Agrochemical in soils*, A. BANIN and U. KAFKAFI ed., Pergamon Press (Paris), 213-227.
- BOSC (M.). 1981.
 Participation des divers états du phosphore et du potassium du sol à l'alimentation des plantes.
 Implications sur le diagnostic de la fertilité des sols.
 In : « Critère de fertilité des sols et d'évolution de cette fertilité en fonction des systèmes de cultures », Séminaire CEE-Agrimed, Bari (Italie), 28-29 septembre 1981.
- BOSC (M.) et MAERTENS (C.). 1981.
 Rôle de l'accroissement du système racinaire dans l'absorption de divers états du potassium du sol.
Agrochimica, 25 (1), 1-8.
- BRESLER (E.). 1980.
 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, 27-48.
- CABIBEL (B.) et MONNIER (G.). 1977.
 Circulation de l'eau et des sels. Enracinement.
 In : « Modalités d'apport d'eau aux cultures ». C.R. de l'ATP, 1976/CSC d'Avignon, 6-17.
- CABIBEL (B.). 1978.
 Influence du mode d'irrigation sur la structure et le fonctionnement du système racinaire de jeunes pommiers.
C.R. Acad. Agric. Fr., 616-624.
- CALIANDRO (A.), MARCHIONE (V.), RUBINO (P.), TARANTINO (E.). 1980.
 Tomato root distribution under three irrigation methods.
 In : « Séminaires sur l'irrigation localisée (III) », CEE Agrimed, Sorrento (Italie), 15-17 avril 1980, 185-189.

- de COCKBORNE (A.M.). 1980.
Transfert des nitrates en milieu poreux saturé en présence d'une porosité structurale.
Thèse Université de Grenoble, 93 p.
- de COCKBORNE (A.M.). 1986.
Transferts des ions nitrate et phosphate en milieu poreux fissuré.
Présentée à la Réunion du GFHN, nov. 1985, Cadarache, France.
A paraître dans le *Bulletin du GFHN*.
- DREW (M.C.), NYE (P.H.) et VAIDYANATHAN (L.V.). 1969.
The supply of nutrient ions by diffusion to plant roots in soil.
I.- Absorption of potassium by cylindrical roots of onion and leek.
Plant and Soil, 30 (2), 252-270.
- DREW (M.C.). 1975.
Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot in Barley.
New Phytol., 75, 479-490.
- EAVIS (B.W.) et PAYNE (D.). 1968.
Soil physical conditions and root growth.
In *root growth*, WHITTINGTON ed., BUTTERWORTHS (London), 315-336.
- GERMANN (P.) et BEVEN (K.). 1981 a.
Water flow in soil macropores.
I.- An experimental approach.
Journal of Soil Science, 32, 1-13.
- GERMANN (P.) et BEVEN (K.). 1981 b.
Water flow in soil macropores.
II.- A combined flow model.
Journal of Soil Science, 32, 15-29.
- GERMANN (P.) et BEVEN (K.). 1985.
Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores.
Water Resources Res., 21 (7), 990-996.
- GRISAK (C.E.), PICKENS (J.F.) et CHERRY (J.A.). 1980.
Solute transport through fractured media.
II.- Column study of fractured till.
Water Resources Res., 16 (4), 731-739.
- GUENNELON (R.) et HABIB (R.). 1979.
Conditions d'absorption du phosphore en irrigation localisée.
C.R. Acad. Agric. Fr., 1453-1459.
- GUENNELON (R.), HABIB (R.) et de COCKBORNE (A.M.). 1979.
Aspects particuliers concernant la disponibilité de N, P et K en irrigation localisée fertilisante sur arbres fruitiers.
In : *Séminaires sur l'irrigation localisée (I)*, CEE Agrimed, Bologne (Italie), 6-9 nov. 1979, 21-33.
- GUENNELON (R.) et CABIBEL (B.). 1981.
Influence de l'activité du système racinaire de pommiers sur la répartition des solutés en irrigation localisée.
Agronomie, 1 (4), 323-330.
- HABIB (R.). 1981.
Etude pour des végétaux pérennes (pommiers) soumis à une irrigation localisée, des conditions d'absorption racinaire du phosphore.
Thèse 3e cycle USTL-ENSAM.
- HABIB (R.). 1983.
Phosphorus absorption (^{32}P) by apple trees under drip irrigation as influenced by the physical properties of the soil.
Plant and Soil, 71, 381-385.
- HABIB (R.) et GUENNELON (R.). 1983.
Evaluation du coefficient de diffusion du phosphore en sol de limon argileux calcaire.
Agronomie, 3 (2), 113-121.
- KANCHANASUT (P.), SCOTTER (D.R.) et TILLMAN (R.W.). 1980.
Preferential solute movement through larger soil voids.
II.- Experiments with saturated soil.
Aust. J. Soil Res., 16, 269-276.
- KAUTSKY (J.), BARLEY (K.P.) et FIDDAMAN (D.K.). 1968.
Ion uptake from soils by plant roots, subject to the Epstein-Hagen relation.
Aust. J. Soil Res., 6, 159-167.
- MAERTENS (C.). 1978.
Possibilités d'absorption des éléments minéraux par les racines. Conséquence sur la localisation.
Science du Sol, 3, 185-195.
- MONNIER (G.), STENGEL (P.) et GUERIF (J.). 1981.
Recherche de critères de la fertilité physique du sol et de son évolution en fonction du système de culture.
in : *«Critère de fertilité des sols et d'évolution de cette fertilité en fonction des systèmes de cultures»*. Séminaire CEE Agrimed, Bari (Italie), 28-29 septembre 1981.
- MONNIER (G.), CABIBEL (B.), GUENNELON (R.) et HABIB (R.). 1982.
Problèmes posés par l'alimentation hydrique et minérale des arbres fruitiers sous irrigation localisée.
Fruits, 37 (3), 189-193.
- NANAGARA (T.), PHILLIPS (R.E.) et LEGGETT (J.E.). 1976.
Diffusion and mass flow of nitrate nitrogen into corn roots growth under field conditions.
Agron. J., 68 (1), 67-72.
- NYE (P.H.). 1966.
The effect of the nutrient intensity and buffering power of a soil, and the absorbing power, size and root hairs of a root, and nutrient absorption by diffusion.
Plant and Soil, 25 (1), 81-105.
- NYE (P.H.). 1979.
Soil properties controlling the supply of nutrients to the root surface.
In : *«The soil root interface»*, J.L. HARLEY and R. SCOTT RUSSEL ed., Academic Press (London), 39-49.
- NYE (P.H.) et MARRIOTT (F.H.C.). 1969.
A theoretical study of the distribution of substances around roots resulting from simultaneous diffusion and mass flow.
Plant and Soil, 30 (3), 459-472.
- PERSAUD (N.), GIRALDEZ (J.V.) et CHANG (A.C.). 1985.
Monte-Carlo simulation of noninteracting solute transport in a spatially heterogeneous soil.
S.S.S.A.J., 49, 562-568.
- SCALA (L.), BERTOZZO (R.) et LAVARA (L.). 1980.
First results on a comparative trial on irrigation methods in an orange grove (cv. Tarocco) with special reference to root growth.
In : *«Séminaires sur l'irrigation localisée (III)»*, CEE Agrimed, Sorrento (Italie), 15-17 avril 1980, 115-125.
- SINE (L.) et AGNEESSENS (J.P.). 1979.
Problèmes liés à la modélisation de la migration d'éléments dans le sol.
In : *«Séminaires sur l'irrigation localisée (I)»*, CEE Agrimed, Bologne (Italie), 6-9 nov. 1979, 59-66.
- STENGEL (P.). 1979.
Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ*.
Ann. Agron., 30 (1), 27-51.
- TOURNON (G.). 1975.
Installations de sub-irrigation capillaire.
Etudes expérimentales. Possibilités d'application.
IX Congrès de la Commission internationale des Irrigations et du Drainage, Moscou, 32 (1), 479-490.
- TROUGHTON (A.) et WHITTINGTON (W.J.). 1968.
The significance of genetic variation in root systems.
In : *«Root growth»*, WHITTINGTON ed., BUTTERWORTHS (London), 296-313.
- VAN GENUCHTEN (M. TH.) et WIERENGA (P.J.). 1976.
Mass transfer studies in sorbing porous media
I.- Analytical solution.
S.S.S.A.J., 40 (4), 473-480.
- VAN GENUCHTEN (M. TH.), TANG (D.H.) et GUENNELON (R.). 1984.
Some exact solutions for solute transport through soils containing large cylindrical macropores.
Water Resource Res., 20 (3), 335-346.

**GEDANKEN ZU DÜNGUNGSFRAGEN BEI
BEWÄSSERUNGSKULTUREN.**

R. HABIB.

Fruits, Jun. 1988, vol. 43, n° 6, p. 381-390.

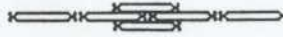
KURZFASSUNG - Die Versorgung einer Kultur mit Mineralstoffen kann als vierstufiger Prozess gesehen werden : Düngerdargebot (z.B. die mineralische Düngung), Nährstoffangebot (Transfer des gelösten Materials und/oder Wurzelwachstum), Nährstoffaufnahme durch die Wurzeln und Verstoffwechslung. Die beiden Zwischenstufen werden unter Berücksichtigung einiger Punkte und unter Bezugnahme auf die eingesetzte Methode der Bewässerungsdüngung untersucht. Die genannten Arbeiten betreffen den Transfer im homogenen und im rissigen, heterogenen Substrat. Das Wurzelwachstum wird im Zusammenhang mit dem verwendeten Bewässerungssystem kurz gestreift. Das Problem des Zusammentreffens im Boden von düngerreichen Zonen und Bereichen des Wachses und der Funktionstüchtigkeit der Wurzeln wird ebenfalls analysiert.

**ALGUNAS REFLEXIONES EN LO QUE CONCIERNE LOS
PROBLEMAS DE FERTILIZACION EN CULTIVO IRRIGADOS.**

R. HABIB.

Fruits, Jun. 1988, vol. 43, n° 6, p. 381-390.

RESUMEN - La nutrición mineral de un cultivo puede definirse como un proceso en cuatro etapas : suministro mineral (ej. la fertilización), aprovisionamiento (por el traslado de solución y/o el crecimiento de las raíces), absorción de las raíces y asimilación metabólica. Se estudian las dos etapas intermedias, bajo ciertos puntos particulares, en función del modo de fertilización-irrigación utilizado. Los trabajos citados conciernen tanto los traslados en medio homogéneo como en medio heterogéneo fisurado. El crecimiento del sistema de las raíces se aborda rápidamente en relación con el sistema de irrigación utilizado. El problema de la coincidencia en el suelo de las zonas de acumulación de los abonos y de las zonas de crecimiento y funcionamiento de las raíces es también abordado.





*Votre eau est précieuse
nous la respectons*



**LA MAITRISE
DU GOUTTE A GOUTTE
ET DE L'ASPERSION
DEPUIS 20 ANS**



KULKER SA

Siège et export :
45600 Sully-sur-Loire
☎ 38.36.53.04 - Tél. 760 598 F

DOM-TOM : 34160 Castries
☎ 67.70.42.70 - Tél. 490 274 F FRANCE

ANGEL Orléans - ☎ 38 84 24 58