

ETUDE IN SITU DE L'ENRACINEMENT EN TANT QUE CAPTEUR D'EAU

F. Tardieu

INRA, Laboratoire d'Agronomie, 78 850 Thiverval-Grignon

R é s u m é. Cet article synthétise les résultats de 4 années de travail sur la disposition spatiale des racines et sur l'effet de celle-ci sur l'absorption d'eau par le maïs. Les caractéristiques géométriques de l'enracinement ont été fortement affectées par l'état structural du sol, les racines ayant tendance à être d'autant plus groupées que cet état structural était défavorable. L'absorption d'eau a été affectée par la disposition spatiale des racines: des stress hydriques ont été observés dans les parcelles où cette disposition était fortement irrégulière; d'importants gradients de potentiel hydrique ont été mesurés entre des zones colonisées et non colonisées du sol situées à la même profondeur et contiguës.

1. INTRODUCTION

La géométrie du système racinaire étant très mal connue, plusieurs auteurs considèrent qu'il n'est pas possible de la prendre en compte dans la modélisation de l'extraction d'eau par les racines. Ils considèrent alors cette extraction d'une manière "macroscopique" et en une dimension [3, 9]. Un terme "puits racinaire" (S), qui ne dépend que de la profondeur (z) et du temps (t), est ajouté à l'équation de Darcy-Richards:

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

De nombreux modes de calcul ont été proposés pour le terme S [cf. la revue de Molz, 7]. Ils prennent très généralement en compte la densité racinaire moyenne de l'horizon considéré (mais y sont très peu sensibles pour la gamme de densités généralement rencontrée au champ), et ne tiennent pas compte de la disposition horizontale des racines dans cet horizon. Si cette approche simplifiée était acceptable, les seules caractéristiques du système racinaire pertinentes par rapport à l'alimentation hydrique seraient la profondeur d'enracinement et la densité ra-

cinaire par horizon, appréciée d'une manière grossière. De plus, les résultats des modèles de transfert en une dimension conduisent généralement à la conclusion que le transfert d'eau à l'intérieur du sol vers les racines rencontre de faibles résistances [8, 10]. Dans la gamme habituelle de teneurs en eau et de densités racinaires, on ne pourrait donc attendre que peu d'effets des caractéristiques de l'enracinement sur le terme "puits racinaire".

Cet article vise à faire la synthèse des travaux réalisés à Grignon (région Parisienne) sur l'effet de la disposition spatiale des racines sur l'absorption d'eau par le maïs. Une première partie présente l'effet de l'état structural du sol sur les caractéristiques géométriques de l'enracinement; les conséquences sur les transferts d'eau de la disposition spatiale des racines sont examinées dans la seconde partie.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Un dispositif pluriannuel a été mis en place à Grignon depuis 1982, sur un sol limoneux profond. Les traitements expérimentaux sont constitués par des états structuraux contrastés de la couche labourée [17]: le premier, noté „0", est fragmentaire, formé de terre fine et de petites mottes; le deuxième, "B" comporte des blocs tassés de plusieurs décimètres cubes séparés par des cavités; le troisième, "C", est continu et compact au moment du semis, mais se fragmente ensuite (apparition de fentes de retrait distantes de quelques décimètres). L'état structural des couches non travaillées (au-delà de 30 cm de profondeur) est le même dans tous les traitements et ne présente pas d'obstacle mécanique à la pénétration des racines. En 1984 et 1985, un traitement supplémentaire a été créé, noté "A" [14]. Il est constitué d'un état fragmentaire sur deux tiers du profil (inter-rang non tassé et rang de semis) et d'un état massif sur le tiers restant (inter-rang tassé). Ces traitements ont été placés sur un dispositif à 3 blocs, sans répétition intra-bloc. Le maïs (variété LG 1) a été semé début mai; le désherbage et la fertilisation ont été effectués suivant les normes régionales.

L'enracinement a été étudié sur des placettes de 40 x 80 cm, comprenant 3 plantes chacune. Une cartographie in situ [16] des impacts de racines a été effectuée sur un plan vertical et 5 plans horizontaux superposés, coupant le volume de sol situé sous la placette. Cette méthode permet d'étudier les dispositions verticale et horizontale des racines [14], et de calculer sur chacun des plans étudiés la fonction de répartition des distances entre chaque point du sol et la racine la plus proche [15]. Des cartes de l'état structural [6] ont été effectuées sur les mêmes plans, ce qui permet une mise en correspondance à une échelle centimétrique entre densité racinaire et état structural.

L'humidité volumique du sol a été mesurée périodiquement par gravimétrie dans les 15 premiers centimètres de profondeur et par mesures neutroniques entre 15 et 175 cm. En 1983, les tubes d'accès de la sonde ont été placés à 10 cm du rang de semis; en 1985, nous leur avons ajouté 2 batteries de tubes, au milieu de l'inter-rang tassé et de l'inter-rang non tassé. De 4 à 5 tubes ont été implantés dans chacune de ces situations. L'étalonnage de la sonde a été effectué au moyen de mesures prises au champ [13].

La conductance stomatique des feuilles a été mesurée au cours de journées claires avec un poromètre à diffusion, en suivant le mode opératoire proposé par Katerji et Oulid-Aissa [4]. Les mesures ont été effectuées toutes les heures dans la strate supérieure de chaque couvert, en y échantillonnant de 20 à 40 feuilles de même âge physiologique recevant des éclaircissements voisins (ce qui a nécessité de n'échantillonner, à chaque heure de la journée, que des feuilles ayant la même orientation par rapport au soleil. Elles ont concerné la face inférieure des feuilles où, chez la maïs, la conductance stomatique est plus sensible à une variation du potentiel hydrique [12].

Les résultats présentés ici se situent entre les stades "10 feuilles visibles" et "floraison + 3 semaines". Cette période a été relativement pluvieuse en 1982 et 1983 (respectivement 142 et 100 mm), contrairement à 1984 (85 mm) et 1985 (68 mm) (les précipitations de 1983 et 1985 sont présentées aux figures 4 et 7). Ces 4 années les 2 semaines précédant la floraison ont été sèches, avec des ETP Piche (appelées ETP_p dans la suite du texte) élevées excédant souvent 5 mm.jour⁻¹.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Effet de l'état structural de la couche labourée sur la disposition spatiale des racines

La répartition verticale de la densité racinaire est présentée à la figure 1, pour 1983. Les courbes correspondant aux traitements 0 et B ont formes similaires, avec des valeurs de densité plus élevées en 0 qu'en B. En revanche, elles ont une forme différente dans le traitement C: on observe une forte densité de racines dans les 10 premiers centimètres de profondeur où le sol a été ameubli par le travail superficiel, et une diminution brutale de la densité racinaire à la limite entre cet horizon et la couche labourée; la colonisation des couches sous-jacentes, bien que légèrement plus intense que celle de la couche labourée, est inférieure à celle constatée en 0 et B. Les profondeurs maximales d'enracinement n'ont cependant pas été affectées par les traitements [18]. Les résultats obtenus les autres années étant similaires, il apparaît que l'état structural de la cou-

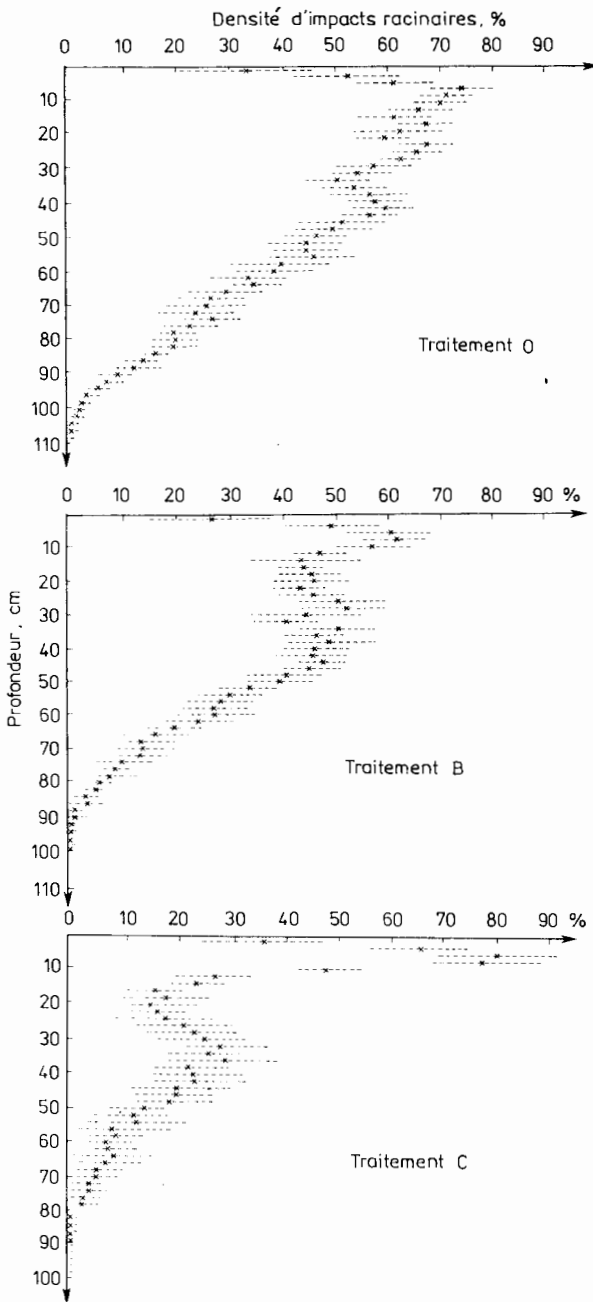


Fig. 1. Moyenne et intervalles de confiance (0,05) par classe de profondeur de la proportion de cases de 2 x 2 cm où un impact de racine au moins a été observé. Floraison, Grignon 1983

Fig. 1. Mean and interval of confidence (0.05) of the proportion of 2 x 2 cm squares where at least one root contact was observed. Silking, Grignon 1983

T a b l e a u 1. Effet de l'état structural sur la localisation des racines dans la couche labourée: proportion de cases (2 x 2 cm) où une racine au moins a été observée
F - fragmentaire

T a b l e 1. Effect of soil structure on root localization in the ploughed layer: proportion of 2 x 2 cm squares where at least one root impact was observed

	Types d'états structuraux						χ^2 calculé
	massif pas de porosité visible	massif porosité visible	massif fissuré	F terre fine	F mot-tes + cavités	fentes de retrait	
Placette de type C							
Effectifs (cases)	1,104	0	304	0	0	246	722 S**
Proportion	8		46			88	
Placette de type B							
Effectifs	426	0	301	0	799	0	632 S**
Proportion	7		66		81		
Placette de type O							
Effectifs	106	359	0	655	411	0	162 S**
Proportion	17	48		71	72		

che labourée joue un rôle sur la colonisation non seulement dans cet horizon, mais aussi dans les horizons sous-jacents.

Répartition horizontale dans la couche labourée: les cartes d'impacts racinaires ont été superposées aux cartes structurales effectuées sur les mêmes plans. Nous avons ainsi pu calculer, dans chacun des types d'états structuraux, la fréquence de cases où un impact de racine au moins a été observé. Les résultats (tab. 1) montrent que, dans les 3 traitements, les impacts de racines sont groupés dans les zones fragmentaires (en O et B) ou dans les fentes de retrait (en C). Le test χ^2 effectué sur les données montre que le groupement est significatif dans tous les traitements, bien que plus prononcé en B et C. Ces résultats confirment l'existence d'une forte variabilité horizontale de la densité racinaire, d'échelle décimétrique, dans la couche labourée. Celle-ci, d'origine structurale, est d'autant plus forte que les obstacles à la pénétration des racines sont plus fréquents.

Effet de l'état structural de la couche labourée sur la localisation des racines dans les couches non travaillées: en 1984 et 1985, les cartes racinaires horizontales obtenues en A (fig. 2) ont été subdivisées en 3 parties égales, suivant la position par rapport au rang de semis: les zones situées respectivement sous l'inter-rang non tassé, sous le rang et sous l'inter-rang tassé. Les densités d'impacts de racines observées sous les rangs et sous les inter-rangs non tassés se sont pas significativement différentes (tab. 2): ce résultat avait été déjà

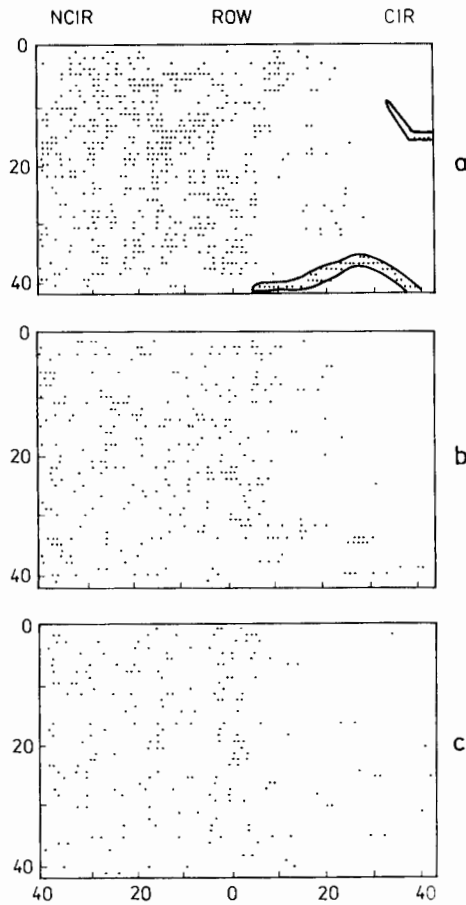


Fig. 2. Exemples de cartes d'impacts racinaires sur 3 plans superposés. a - 20 cm. b - 40 cm, c - 60 cm. Chaque impact racinaire est représenté par un point

Fig. 2. Examples of root contact maps on 3 superposed planes, a - 20 cm depth. b - 40 cm depth, c - 60 cm depth. Each root contact is figured by a point

mis en évidence lors d'observations antérieures [16]. En revanche, les densités observées sous les inter-range tassés sont nettement inférieures aux précédentes, dans la couche labourée et dans les couches sous-jacentes (où pourtant l'état structural est le même dans les 3 zones). Les obstacles à la pénétration des racines situés dans la couche labourée causent donc une réduction localisée de la densité racinaire dans les zones des couches sous-jacentes situées à leur verticale. Ceci n'est pas dû à l'état structural de ces couches, non affectées par les tassements, mais probablement à la dynamique d'implantation du système racinaire: les racines primaire qui colonisent les couches non travaillées prennent des

Tableau 2. Les densités d'impacts de racines (nombre·m⁻²·10⁻²), par la profondeur et position, dans la ligne, valeurs précédées par les mêmes lettres ne diffèrent pas (niveau de confiance 0,05 conformément au test de Bonferroni)

Table 2. Root contact densities (number·m⁻²·10⁻²), per depth and position, within a line, values followed by a common letter do not differ at the 5% level according to the Bonferroni's multiple comparison test

	Inter-rang non tassé	Rang	Inter-rang tassé
1984			
Nombre de cartes	4	7	7
Profondeur, cm			
20	23,13 a	20,40 a	4,14 b
40	13,40 a	12,15 a	5,05 b
40	9,75 a	9,26 a	2,98 b
80	5,26 a	4,01 ab	1,04 c
100	0,44 ab	0,50 a	0,10 a
1985			
Nombre de cartes	6	6	6
Profondeur, cm			
20	36,63 a	30,90 a	2,52 b
40	14,20 a	14,55 a	2,04 b
60	10,74 a	11,68 a	1,20 b
80	4,27 a	3,80 a	0,44 b
100	0,94 a	0,42 ab	0,08 b
1985			
Nombre de cartes	6	6	6
Profondeur, cm			
20	32,34 a	36,20 a	21,73 b
40	17,39 a	21,25 a	17,77 a
60	13,32 a	16,46 a	13,83 a
80	4,19 a	4,08 a	4,81 a
100	1,01 a	0,85 a	0,89 a

trajets principalement verticaux, dans la mesure où elles empruntent des galeries de vers de terre et des fissures qui ont cette direction. Il s'ensuit un "effet d'ombre" dans les couches situées à la verticale des obstacles. Cet effet d'ombre a été également observé dans le traitement C en 1983 [18], et lorsqu'un obstacle non structural, une grille de maille 100 µm, a été placée sur le fond de la couche labourée [14].

Tant dans la couche labourée que dans les couches sous-jacentes, la disposition des impacts de racines sur un plan horizontal est donc loin d'être régulière, comme le supposent les modèles classiques du transfert d'eau entre le sol et les racines. Le degré de groupement [11] de ces impacts dépend de l'état structural de la couche labourée, ce qui a une conséquence importante sur le calcul des distances entre racines. Lorsque ces dernières sont fortement groupées, à cause de la présence d'obstacles structuraux, la "distance moyenne entre racines voisines"

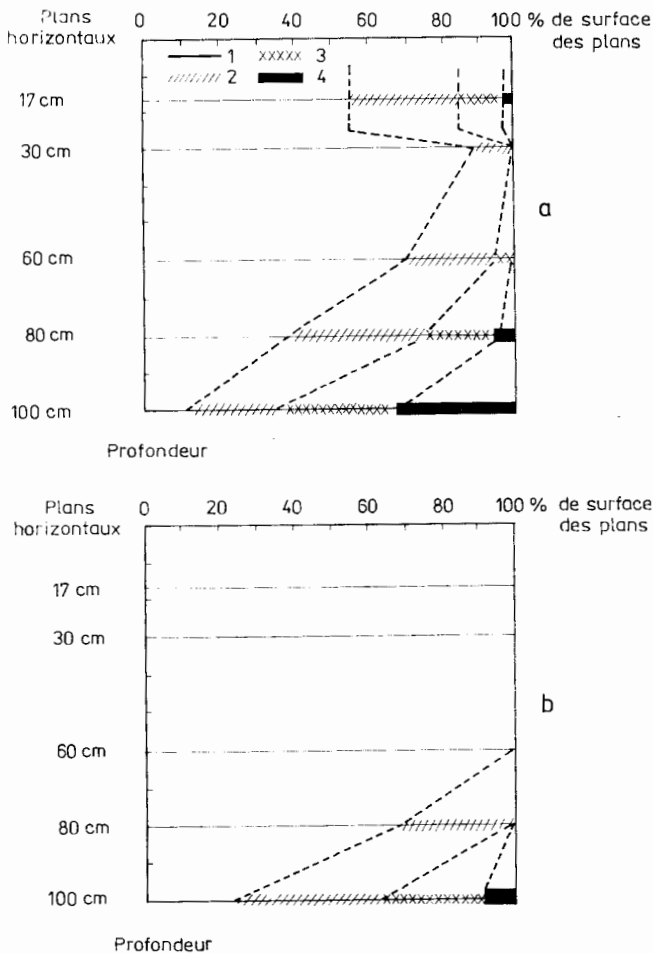


Fig. 3. Fonction de répartition des distances entre chaque point du sol et la racine la plus proche, pour les 5 plans étudiés. Floraison, Grignon 1983

a - traitement C, b - traitement 0

(le plan 17 est supposé représentatif de l'ensemble de la couche labourée)

1 - points situés à moins de 4 cm d'un impact de racines, 2 - points situés entre 4 et 7 cm d'un impact, 3 - points situés entre 7 et 12 cm d'un impact, 4 - points situés à plus de 12 cm d'un impact

Fig. 3. Cumulative frequency distribution of distances between each point of the soil and the nearest root, for the 5 horizontal planes. Silking, Grignon 1983

a - treatment C, b - treatment 0

(the 17-cm deep plane is considered as representative of the whole ploughed layer)

1 - points situated less than 4 cm from the root impact, 2 - points situated between 4 and 7 cm from the root impact, 3 - points situated between 7 and 12 cm from the root impact, 4 - points situated more than 12 cm from the root impact

calculée à partir de la longueur de racines par unité de volume [2, 5] cesse d'être égale à la distance moyenne vraie entre racines voisines, qui est d'autant plus

faible que le groupement est prononcé. Cependant une proportion importante de points du plan se trouve à une distance du plus proche impact de racine très supérieure à la "demi-distance moyenne" calculée [14, 17]. C'est donc la fonction de répartition des distances entre chaque point du sol et l'impact de racine le plus proche qu'il convient de calculer à chaque profondeur étudiée.

Fonction de répartition des distances entre chaque point du sol et la racine la plus proche: cette étude a été menée, sur chacun des plans étudiés, à partir de la cartographie des impacts de racines. Pour chaque case de la carte (maillage 2 cm en 1983, 1 cm en 1984 et 1985), nous avons calculé la distance entre le centre de gravité de la case considérée et celui de la case la plus proche où se trouve un impact de racine. La fonction de répartition de ces distances est ensuite construite en calculant la proportion de cases situées à des distances inférieures respectivement de 4, 7, 12 et 16 cm d'un impact.

Les résultats concernant les traitements O et C en 1983 sont présentés aux figures 3 a et 3 b. Alors que dans le traitement O la totalité des points du sol se trouve à une distance inférieure à 4 cm de la racine la plus proche jusqu'à 80 cm de profondeur, en C une proportion importante de points se trouve éloignée des racines. Le plan situé à 17 cm de profondeur est celui où l'on observe la plus forte différence entre traitements, parce que les impacts de racines y sont groupés dans des fentes de retrait.

En revanche, si la "distance moyenne entre racines voisines" avait été calculée à chaque profondeur à partir des densités surfaciques de racines, il apparaîtrait [16] que dans les 2 traitements la totalité des points du sol serait située à une distance inférieure à 4 cm de la racine la plus proche. La différence entre traitements n'est donc mise en évidence que si l'on prend en compte la disposition spatiale des racines. Un phénomène semblable apparaît dans le traitement A: les "demi-distances moyennes" calculées à partir des densités surfaciques d'impacts présentées au tableau 2 sont de 1,53 et 1,90 cm à respectivement 35 et 60 cm de profondeur, alors qu'une proportion importante des points sous l'inter-rang tassé est située à une distance supérieure à 8 cm de la racine la plus proche [15].

Un classement de la capacité des différents systèmes racinaires à capter l'eau du sol peut être établi à partir de la proportion du profil situé à une distance inférieure à 4 cm d'une racine. En 1983, le classement distingue fortement C de O, B ayant une position intermédiaire proche de O [16]. En 1985, la différence entre O et C est également significative, le traitement A étant intermédiaire.

3.2. Disponibilité des réserves en eau du sol

3.2.1. Variation du stock d'eau du sol

Dans les 15 premiers centimètres de profondeur, où tous les points sont situés à proximité d'une racine quel que soit le traitement, l'humidité a varié très

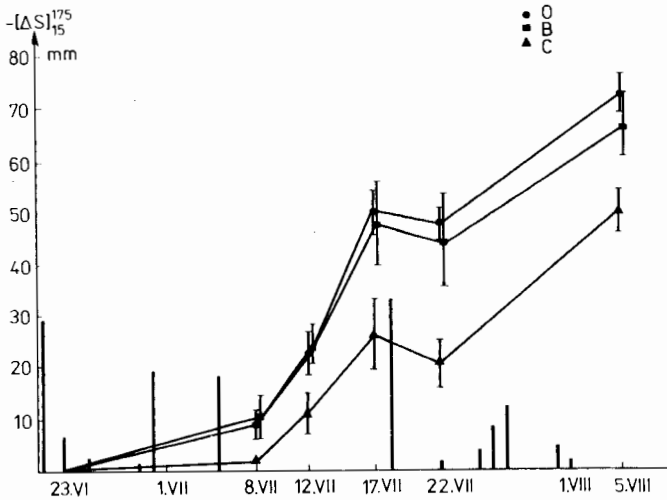


Fig. 4. Evolution au cours du temps du stock d'eau du sol dans la couche 15 à 175 cm ($[\Delta S]_{15}^{175}$) et précipitations (traits verticaux): 1983, calculs effectués à partir du 23.VI

Fig. 4. Variation of water reserves in the 15-175 cm layer of soil ($[\Delta S]_{15}^{175}$) and rainfall (vertical lines): 1983, calculations carried out from 23.VI

rapidement au cours du temps, mais les différences entre traitements sont faibles. Dans la couche 15-175 cm (fig. 4), une différence significative est apparue entre les traitements O et C, à toutes les dates des périodes étudiées. A la fin des périodes sans pluies de 1983 et 1985, la variation de stock d'eau est de l'ordre de la moitié en C par rapport à O. En 1983, les traitements O et B ne se différencient pas sur ce critère, et en 1985 le traitement A occupe une position intermédiaire entre O et C. Les remontées d'eau ayant été faibles à travers la cote 175 cm [13], l'ETR a été proche de ETP_p en O et B, et nettement plus faible en C, A ayant une position intermédiaire.

3.2.2. Étude de la conductance stomatique

Les mesures concernant les 12 et 21 juillet sont présentées aux figures 5b et 6b. Ces journées étaient claires (absence de nuages) et d' ETP_p élevées (respecti-

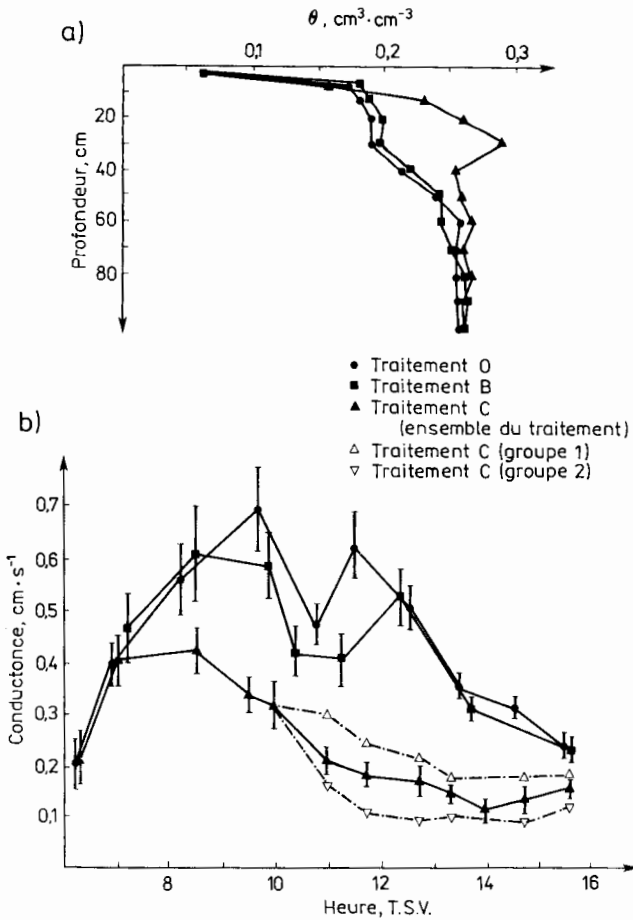


Fig. 5. Humidité volumique du sol (a) et conductance stomatique (b) mesurées le 12. VII 83

Fig. 5. Measurements of soil water volume (a) and stomatal conductance (b) on 12. VII 83

vement 8,4 et 6,2 mm). La première se situe pendant une période sans pluie, la seconde à l'issue de celle-ci, après une pluie de 33 mm qui a ramené les horizons de surface à la capacité au champ (fig. 5a et 6a). Le 12.VII les conductances stomatiques correspondant aux traitements 0 et B sont passées par un maximum entre 12 et 14 heures (avec un point singulier à 12 heures). Les courbes représentatives du traitement C se sont séparées significativement des précédentes à partir de 10 heures. Le 12, les courbes correspondant aux 3 traitements sont proches les unes des autres (différences non significatives). Des résultats semblables aux précédents ont été obtenus lors de 5 autres journées [13]: une situation proche de celle du 21. VII est observée le 8. VII 83 (sol à une humidité proche de la

capacité au champ). Au contraire, lorsque les premières couches de sol ont été partiellement desséchées (8 et 12.VIII 82; 20. VI, 7, 10 et 12.VII 83), une différence significative apparaît entre les traitements (la baisse de conductance observée à midi en 0 le 12.VII, ne l'a pas été les autres jours).

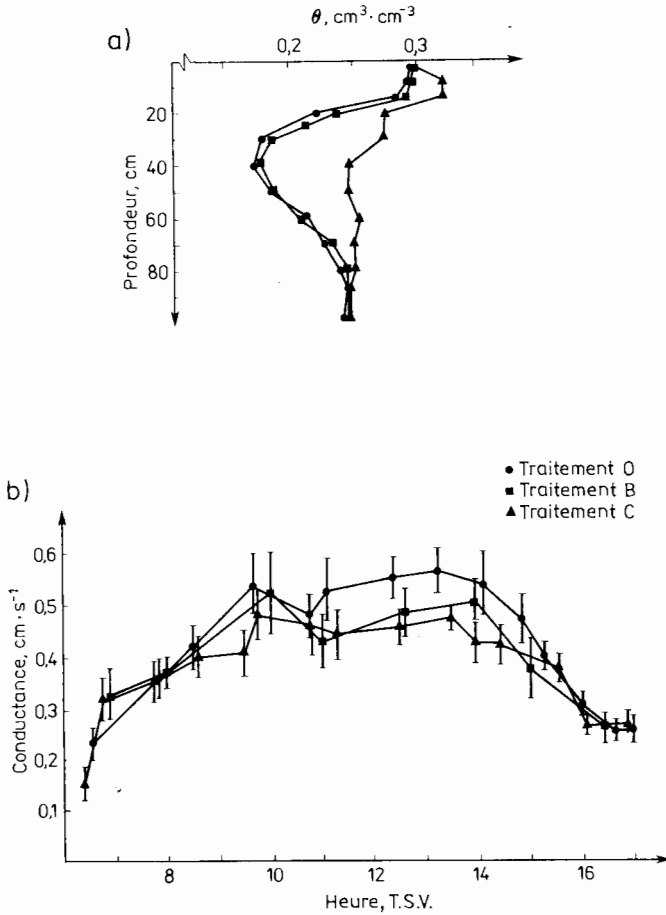


Fig. 6. Humidité volumique du sol (a) et conductance stomatique (b) mesurées le 21.VII 83

Fig. 6. Measurements of soil water volume (a) and stomatal conductance (b) on the 21.VII 83

Une courbe symétrique avec un maximum à midi solaire est donc observée dans les 3 traitements lorsque les premiers centimètres de sol sont humides. Les systèmes racinaires, indépendamment de leurs caractéristiques géométriques, ont alors fourni un flux d'eau suffisant par rapport à la demande climatique. Ce flux provient essentiellement de l'horizon 0-15 cm, où tous les points du sol sont à proximité d'une racine, quel que soit le traitement. Ce type de courbe est également

observé dans le traitement 0, quelle que soit la date. Après que l'horizon affiné par le travail superficiel a été desséché, le flux d'eau nécessaire au maintien de l'ouverture stomatique provient de l'horizon labouré et des horizons non travaillés, où les enracinements diffèrent entre traitements. On observe alors un décrochement de la conductance stomatique en C par rapport à 0 et, lors des différentes journées, les classements entre conductances stomatiques suivent ceux établis à partir de la fonction de répartition des distances entre chaque point du sol et la racine la plus proche. Il est à noter que le stress survient en C, bien que les conditions climatiques soient les mêmes sur tout le champ expérimental, et que le sol soit plus humide dans ce traitement, puisque le stock d'eau y a été moins capté par le système racinaire (fig. 5a).

Pour un pas de temps allant de la minute à la journée, les différences entre caractéristiques géométriques des systèmes racinaires ont donc eu des conséquences importantes sur l'alimentation hydrique des peuplements de maïs étudiés. Cette conclusion peut être étendue à des périodes de l'ordre de la décade par l'étude du rapport entre la variation de stock d'eau du sol et ETP_p . Pendant les semaines précédant la floraison, le traitement C a donc subi un déficit hydrique, ce qui n'a pas été le cas en 0. L'état structural de la couche labourée, à travers la disposition spatiale des racines, peut donc avoir une influence considérable sur la disponibilité des réserves en eau du sol.

4. ORDRE DE GRANDEUR DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL HYDRIQUE À L'INTÉRIEUR DU SOL

Dans le traitement A, on a suivi en 1985 [14] l'humidité volumique dans les compartiments "rang", "inter-rang tassé" et "inter-rang non tassé". La variation de stock d'eau du sol de chacun de ceux-ci est présentée à la figure 7. Il apparaît une différence significative entre le rang et l'inter-rang non tassé d'une part, et l'inter-rang tassé d'autre part.

La différence de densité racinaire entre ces 3 compartiments adjacents du profil a donc eu pour conséquence des dessèchements contrastés: les humidités volumiques mesurées par prélèvements gravimétriques le 1.08 étaient, à 40 cm de profondeur, de 0,190 (écart-type: 0,003), 0,191 (écart-type: 0,004) et 0,264 (écart-type: 0,022) $cm^3 \cdot cm^{-3}$ sous le rang, l'inter-rang non tassé et l'inter-rang tassé respectivement. Cet écart de teneur en eau correspond à une différence.

Des différences de potentiel de l'ordre de la moitié de la "gamme d'eau utilisable" (0-16 kPa) ont donc été observées sur de faibles distances à l'intérieur du profil. Ces gradients sont du même ordre de grandeur que ceux observés [1] en

conditions contrôlées. Ceci infirme la théorie [8] suivant laquelle les trajets de l'eau à l'intérieur du sol ne rencontrent que des résistances faibles. Lorsque de

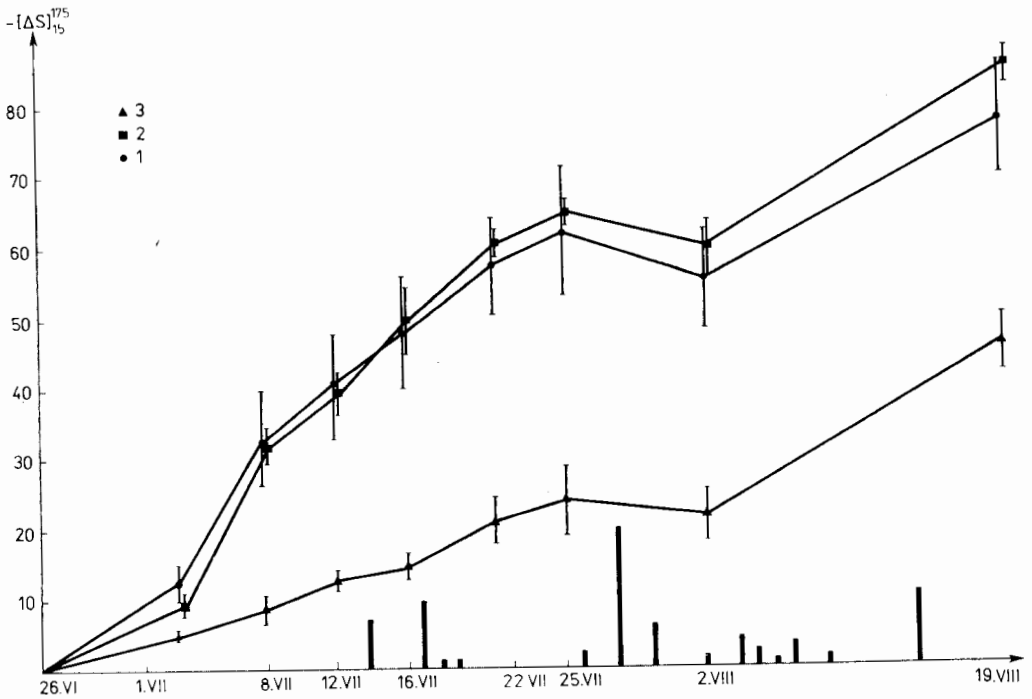


Fig. 7. Evolution au cours du temps du stock d'eau du sol dans la couche de 15 à 175 cm, sous le rang (1), à l'inter-rang non tassé (2) et à l'inter-rang tassé (3)

Fig. 7. Variations of water reserves in the 15-175 cm layer of soil under the row (1), the non-compacted inter-row (2) and the compacted inter-row (3)

fortes irrégularités existent dans un système racinaire et que la distance que l'eau doit parcourir jusqu'à la racine la plus proche peut être supérieure à 4 cm, même quand la densité racinaire est forte. Il s'ensuit une mauvaise utilisation de l'eau du sol dans ces zones éloignées des racines. Ce phénomène est reproduit d'une manière numérique par le modèle présenté dans le même volume par Bruckler et Lafolie.

5. CONCLUSION

Des différences de disposition spatiale des racines, induites par l'état structural de la couche labourée, ont eu pour conséquence de forts écarts entre traitements du flux d'eau entre le sol et les plantes. Ceci s'est traduit, dans les

traitements expérimentaux où les racines étaient le plus groupées, d'une part une plus grande fréquence de stress hydrique, d'autre part une moindre utilisation des réserves en eau du sol (si bien que les stress hydriques sont apparus sur les parcelles où le sol était le plus humide). Ces résultats ne pouvaient être prédits par les modèles classiques de transfert d'eau entre le sol et les racines, qui laissent, au contraire, attendre une résistance faible à l'intérieur du sol. Nos premières mesures de gradients de potentiel dans le sol nous incitent à penser que ces modèles ne représentent pas la réalité, et que l'existence dans le profil de zones décimétriques non colonisées se traduit par une plus faible disponibilité des réserves en eau du sol.

L'intérêt de l'étude des transferts d'eau vers les racines, qui pouvait être discuté à la suite des travaux de Newman [8], nous paraît au contraire relancé par ces premiers résultats. Nous avons proposé ici un outil pour cette étude, la fonction de répartition des distances entre chaque point du sol et la racine la plus proche. Ce critère, qui peut être obtenu par une cartographie des impacts de racines, a d'autant plus d'intérêt par rapport aux critères classiques que la disposition spatiale des racines est plus groupée à cause de l'état structural de la couche labourée ou des couches sous-jacentes. La "sortie" pratique de ce type d'étude pourrait être, d'une part la définition d'une gamme de profils culturaux acceptables par rapport aux besoins en eau de la plante (en fonction des caractéristiques permanentes du sol et du climat), et d'autre part la modélisation de la disponibilité pour les plantes des réserves en eau du sol, afin de prévoir les risques de stress hydrique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Dunham R. J., Nye P. H.: The influence of water content on the uptake of ions by roots. I. Soil water content gradient near a plane of onion roots. *J. Appl. Ecol.*, 10, 585, 1973.
2. Gardner W. R.: Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil. Sci.*, 89, 63, 1960.
3. Gardner W. R.: Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agron. J.*, 56, 35, 1964.
4. Katerji N., Oulid-Aissa A. K.: Etude et amélioration de la fiabilité d'un poromètre à diffusion utilisé en milieu naturel. *Agronomie*, 3, 931, 1983.
5. Maertens C., Blanchet R., Puech J.: Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption d'eau et des éléments minéraux par les cultures. II. Régimes hydriques, systèmes racinaires et modalités d'alimentation en eau. *Ann. Agron.*, 25, 575, 1974.
6. Manichon H.: L'action des outils sur le sol: appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. *Sc. Sol.*, 203, 1982.
7. Molz F. J.: Models of water transport in the soil-plant system: a review. *Water Resources Res.*, 5, 1245, 1981.
8. Newman E. L.: Resistance to water flow in soil and plant. I. Soil resistance in relation to amounts of root: theoretical estimates. *J. Appl. Ecol.*, 6. 1.

- 1969, II. A review of experimental evidence on the rhizosphere resistance. *J. Appl. Ecol.*, 6, 261.
9. Nimah M. N., Hanks R. J.: Model of estimating soil water, plant and atmospheric interrelations. I. Description and sensitivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37, 522, 1973.
 10. Reicosky D. C., Ritchie J. T.: Relative importance of soil resistance and plant resistance in root water absorption. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 293, 1976.
 11. Rogers A.: Statistical analysis of spatial distribution. The quadrat method. Pion Ltd., London, 1974.
 12. Sanchez-Diaz M., Kramer P. J.: Behavior of corn and sorghum under water stress and during recovery. *Plant physiol.*, 48, 613, 1971.
 13. Tardieu F.: Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs, III Disponibilité des réserves en eau du sol. *Agronomie*, 7, 279, 1987.
 14. Tardieu F.: Analysis of spatial variability of maize root density. I. Effect of discontinuous wheel compactions on spatial arrangement of roots. *Plant Soil*, 107, 259, 1988.
 15. Tardieu F.: Analysis of spatial variability of maize root density. II. Distances between roots. *Plant Soil*, 107, 267, 1988.
 16. Tardieu F., Manichon F.: Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II. Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. *Agronomie*, 6, 415, 1986-a.
 17. Tardieu F., Manichon H.: Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. I. Etats structuraux de la couche labourée comme traitements expérimentaux. *Agronomie*, 7, 123, 1987-a.
 18. Tardieu F., Manichon H.: Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II. Croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agronomie*, 7, 201, 1987-b.

F. Tardieu

IN SITU STUDY OF THE ROOT SYSTEM AS A WATER SINK

S u m m a r y

A field study has been carried out for 4 years, in order to study the effect of the structure of the ploughed layer on the root system and on the water uptake of maize. 4 types of structure were reproduced in the ploughed layer of an experimental loamy field: 0 (fragmentary, fine earth), B (dm-sized compacted blocks and voids), C (uniformly compact) and A (discontinuous compactions in a fragmentary structure). Root systems have been characterized each year by root mapping on horizontal and vertical planes; soil moisture and leaf stomatal conductance have been monitored during 6 weeks around silking. Maize root system had reproducible reactions, which concern both the ploughed and non-tilled layers (although the soil structure was not affected in the latter). While root depth did not vary between treatments (Fig. 1), the spatial arrangement of roots (vertical and horizontal) was the more irregular when obstacles to penetration were the more frequent. In the ploughed layer, the roots were clustered in the zones where resistance to penetration was lower (tab. 1).

In the subsequent layers, a "shadow effect" of the obstacles located in the ploughed layer was observed (Fig. 2). As a consequence, the distance that water had to travel to reach the nearest root was appreciable in C and A (Fig. 3): some points were at a distance more than 10 times larger than half the "mean distance between neighbouring roots" measured at the same depth. Water extraction by roots was smaller for irregular (A, B and C), than for regular (0) root systems (Fig.

4). This caused water stresses in C, which were not observed in O (Figs. 5 and 6). In A, the water depletion was 2 times faster in the colonized parts of the profile than in the non-colonized parts, located under the wheel tracks (Fig. 7). Considerable gradients of water potential were therefore observed on horizontal distance of 30 cm. These results show that the spatial arrangement of roots, which is affected by soil structure, must be taken into account for the prediction of water uptake under field conditions.

F. Tardieu

BADANIA SYSTEMU KORZENIOWEGO IN SITU - SYSTEM KORZENIOWY JAKO UJEMNE
ŹRÓDŁO WODY

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

Przeprowadzono czteroletnie badania polowe w celu określenia wpływu struktury warstwy ornej gleby na rozwój systemu korzeniowego kukurydzy i pobieranie wody. Utworzono cztery typy struktury na polu z glebą gliniastą: O (gleba luźna, struktura gruzełkowata), B (bryły i wolne przestrzenie), C (jednolicie ubita) i A (całkowicie ubicie struktury gruzełkowatej). Każdego roku określano rozmieszczenie przestrzenne korzeni w dwóch płaszczyznach (pionowej i poziomej) gleby. Przez sześć tygodni rejestrowano wilgotność gleby i przewodność aparatów szparkowych. Reakcja systemu korzeniowego kukurydzy była podobna w warstwie uprawnej jak i nieuprawnej (choć w ostatnim przypadku struktura gleby nie uległa zmianie). Głębokość korzeni nie zmieniała się w zależności od struktury (rys. 1), natomiast przestrzenny układ korzeni (poziomy i pionowy) stawał się nieregularny pod wpływem barier mechanicznych. W warstwie uprawnej korzenie były skoncentrowane w strefach wykazujących mniejszy opór penetracji (tab. 1).

W warstwie wyżej położonej obserwowano „efekt cienia” wywołany przeszkodą znajdującą się w warstwie ornej (rys. 2). W konsekwencji droga ruchu wody do najbliższego korzenia była znaczna w obiektach C i A (rys. 3). Niektóre punkty w glebie znajdowały się w odległości ponad 10 razy większej niż połowa „średniej odległości między sąsiednimi korzeniami” na tej samej głębokości. Pobór wody przez nieregularny system korzeniowy w obiektach A, B i C był mniejszy niż przez system korzeniowy w obiekcie O (rys. 4). Spowodowało to stres wodny w obiekcie C, którego nie obserwowano w obiekcie O (rys. 5 i 6). W obiekcie A pobieranie wody było 2 razy szybsze w ukorzenionych częściach profilu niż w części nieukorzenionej, usytuowanej w śladzie po przejeździe traktora. Obserwowano znaczny gradient potencjału wody glebowej w odległości 30 cm. Wyniki wskazują na to, że przestrzenny rozkład korzeni spowodowany strukturą gleby, należy brać pod uwagę przy przewidywanym pobieraniu wody w warunkach polowych.