



# **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**

François Tardieu, Hubert Manichon

## **► To cite this version:**

François Tardieu, Hubert Manichon. 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*, 1986, 6 (5), pp.415-425. <hal-00884892>

**HAL Id: hal-00884892**

**<https://hal.science/hal-00884892v1>**

Submitted on 11 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# 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.

François TARDIEU & Hubert MANICHON (\*)

*I.N.R.A., Laboratoire d'Agronomie, I.N.A.-P.G., F 78850 Thiverval-Grignon*

*(\*) Chaire d'Agronomie, I.N.A.-P.G., F 78850 Thiverval-Grignon*

### RÉSUMÉ

Une méthode de caractérisation des systèmes racinaires est proposée, qui permet de prendre en compte la variabilité horizontale de la densité racinaire. Elle consiste à cartographier les impacts de racines sur un plan vertical et 5 plans horizontaux superposés coupant le volume enraciné. Cette méthode permet, d'une part, d'analyser finement les sources de variation (décimétriques) de la densité racinaire (distance au rang de semis, état structural par exemple) et, d'autre part, de calculer directement, à partir des cartes horizontales, la fonction de répartition des distances entre chaque point du sol et la racine la plus proche (elle remplace ainsi le calcul indirect de la « distance moyenne entre racines voisines » à partir de la longueur de racines). L'intérêt de la méthode est testé sur des parcelles expérimentales d'états structuraux contrastés. Dans les parcelles tassées (avant ou après le labour), une forte hétérogénéité de la densité racinaire, de maille décimétrique, a été mise en évidence, tant dans la couche labourée que dans les couches sous-jacentes. Dans ces cas, une proportion appréciable de points du sol est située, par rapport à la racine la plus proche, à une distance jusqu'à 10 fois plus grande que la demi-distance moyenne entre racines voisines correspondant à l'horizon considéré. Cette dernière est cependant classiquement considérée comme la distance maximale entre un point et la racine la plus proche. Ceci suggère que la résistance au flux d'eau entre le sol et les racines ne peut être étudiée, dans ce type de cas, sans prise en compte de la répartition spatiale des racines.

**Mots clés additionnels :** *Transferts d'eau sol-plante, variabilité spatiale, distance entre racines, état structural du sol.*

### SUMMARY

*Characterization as a water sink of the maize root system in cultivated fields. II. — A method for studying vertical and horizontal distribution of roots.*

A method for characterizing root systems as water sinks has been designed to take into account the horizontal variability of root density. Root impacts are mapped on a vertical plane and on 5 superposed horizontal planes which cut the rooting volume. This method allows one : (a) to analyse accurately the sources of (decimetre scale) variation of root density (distance from row, soil structure, for example) ; (b) to calculate directly from horizontal maps the cumulative frequency distribution of distances between each point of soil and the nearest root replacing therefore the indirect calculation of the « average distance between neighbouring roots » from root length. The value of this method was tested on experimental plots with contrasting arable layer structure. In the plots where compaction occurred (before or after ploughing), root density showed high heterogeneity at the decimetre scale. This heterogeneity was highly significant in the ploughed layer, but also in lower layers. In this case, an appreciable proportion of points in the soil was at a distance up to 10-fold larger from the nearest root than the « half-distance between neighbouring roots » of the same layer, although the latter is classically considered as the maximum distance from a point to the nearest root. This suggests that, in such situations, study of water flow resistance between soil and plant cannot be undertaken without taking the spatial arrangement of roots into account.

**Additional key words :** *Soil-plant water transfers, spatial variability, distance between roots, soil structure.*

## I. INTRODUCTION

L'évaluation de la disposition spatiale des racines (verticale et horizontale) apparaît nécessaire pour l'étude au champ de la capacité des systèmes racinaires à utiliser les réserves en eau du sol (TARDIEU & MANICHON, 1986). Cet article a pour but de présenter une méthode d'étude de l'enracinement qui permette de prendre en compte cette caractéristique et qui soit adaptée aux conditions du champ cultivé (variabilité de croissance entre plantes voisines, hétérogénéité de l'état structural). Nous la justifierons en présentant ici une première étude des hétérogénéités horizontales de la densité racinaire sur des placettes observées en 1983 lors de la floraison du maïs. Les résultats concernant l'évolution dans le temps de la répartition spatiale des racines, la variabilité interannuelle des résultats et les mesures se rapportant à l'alimentation hydrique des peuplements de maïs étudiés feront l'objet d'une prochaine série d'articles.

## II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### A. Méthode d'observation de l'enracinement

#### 1. Échantillonnage

L'objectif étant de caractériser le système racinaire d'un peuplement végétal et non d'une seule plante de celui-ci, il est nécessaire d'effectuer un échantillonnage à l'intérieur de la parcelle étudiée. L'unité d'échantillonnage est un parallélépipède (fig. 1) de hauteur égale à la profondeur maximale d'enracinement et dont la base, limitée latéralement par le milieu des inter-rangs de la culture, est la surface de sol sur laquelle sont situés 2 pieds contigus ( $30 \times 80$  cm dans l'exemple présenté ici). Vu l'enchevêtrement des racines de pieds voisins, ce volume ne contient pas exclusivement les racines des 2 pieds situés sur sa base : il

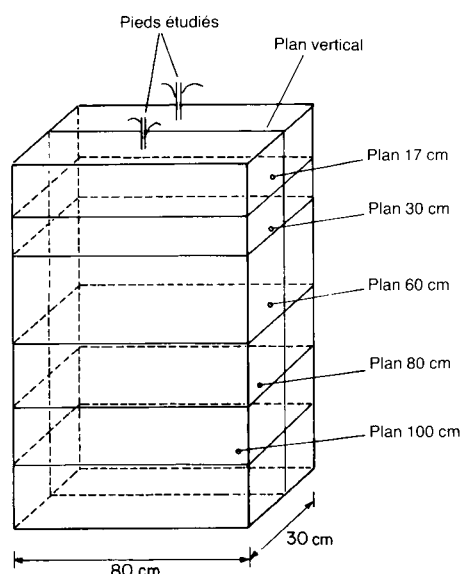


Figure 1

Plans étudiés sur une placette de  $80 \times 30$  cm.

Plans studied in an  $80 \times 30$  cm sample volume.

doit être considéré comme une aliquote du système racinaire du peuplement végétal.

Afin de tenir compte de la variabilité des états de croissance des plantes à l'intérieur du peuplement végétal étudié, variabilité qui se répercute sur l'état de croissance des enracinements (cf. TARDIEU & MANICHON, 1986), nous avons choisi un échantillonnage stratifié (SNEDECOR & COCHRAN, 1957) sur ce critère. Le plan de sondage repose sur une évaluation de l'état de croissance des pieds du peuplement (hauteur et diamètre des pieds) et de la disposition spatiale de ceux-ci : les placettes retenues pour l'observation des systèmes racinaires ont été choisies de telle manière que les pieds étudiés et les pieds environnants soient disposés régulièrement (ni « doubles », ni « manques » à la levée) et aient des états de croissance similaires. Suivant les objectifs poursuivis, il est alors possible, soit d'étudier plusieurs types de placettes, selon l'état de croissance des pieds, soit de ne retenir que les placettes qui sont, sur ce critère, les plus représentatives du peuplement. Nous avons choisi, ici, cette dernière option, afin de ne pas multiplier les répétitions : le nombre d'observations nécessaire pour caractériser l'enracinement de ce groupe de placettes est déjà important par rapport au travail requis (cf. chap. IV) ; il ne nous aurait pas été possible d'explorer en plus la gamme de variation des états de croissance des pieds dans les parcelles étudiées.

#### 2. Technique utilisée

Une méthode cartographique *in situ*, inspirée de celles proposées par HÉNIN *et al.* (1969) et par BOHM (1976), a paru de nature à satisfaire au « cahier des charges » antérieurement défini (TARDIEU & MANICHON, 1986). Elle consiste à repérer la position des impacts de racines sur des plans verticaux et horizontaux, coupant le volume enraciné d'une placette (fig. 1). Le plan vertical est situé à mi-chemin entre les 2 pieds de la placette, les plans horizontaux sont situés respectivement à 17 cm (à l'intérieur de la couche labourée), 30 cm (en dessous du fond du labour et de l'éventuelle « semelle »), 60, 80 et 100 cm.

Après aplanissement de la face d'observation, les racines sont dégagées de la terre avec précaution sur 1 cm à l'aide d'un couteau et d'un soufflet. La disposition spatiale des impacts de racines est ensuite observée à l'aide d'une grille de maille carrée (2 cm de côté) placée contre le plan étudié.

Cette disposition aurait pu être caractérisée par la simple notation de présence ou absence d'impact de racine dans chacune des cases de la grille (ce type de notation est suffisant pour la plupart des traitements de données exposés au § B). Nous avons cependant tenté d'affiner les observations en attribuant une note de densité à l'intérieur de chaque case :

— Pour les *cartographies sur plans horizontaux* (perpendiculaires à la direction privilégiée des racines primaires), cette note est égale au nombre d'impacts de racines dans la case considérée. Les racines secondaires, sub-horizontales, ne sont pas comptabilisées si elles sont situées dans la même case que la racine primaire dont elles sont issues ; elles le sont en revanche si elles traversent les limites de cette case.

— Pour les *cartographies verticales* où le plan d'étude est parallèle à la plupart des racines primaires,

la note est fondée sur le nombre de racines observées et sur leur diamètre : 4 notes ont été définies (tabl. 1), les notes intermédiaires 1, 3 et 6 peuvent également être utilisées ; une note « 9 » a dû être attribuée dans un petit nombre de cas. Nous avons par ailleurs qualifié dans chaque case le contact terre-racines suivant 3 modalités : racines d'aspect normal ; racines situées dans des cavités structurales (racines de morphologie typique avec des poils racinaires très développés) ; racines situées dans des fentes de retrait (de section ellipsoïdale, avec toutes les ramifications situées dans le même plan).

Les notes de densité (cartographies verticales) ont été confrontées à un critère quantitatif : le *poids sec de racines par unité de volume*. Des prélèvements de cubes de terre de 2 cm d'arête ont été réalisés, après affectation d'une note de densité à la face visible de chacun d'eux. Les racines ont été ensuite séparées de la terre par lavage au chlorure de sodium, mises à sécher à 105 °C pendant 24 h et pesées. Les résultats (tabl. 2) montrent que, malgré une certaine dispersion, les notes sont ordonnées par rapport au poids sec de racines. Des différences significatives existent

entre notes, à l'exception de 6 et 8 (test t corrigé, niveau global de risque : 10 p. 100). La note 0, en particulier, se différencie bien des autres par l'absence de racines dans le volume prélevé (dans 16 cases sur 17). La relation obtenue entre poids sec de racines et notes permet, d'une part, d'affirmer que ces dernières ont un sens physique, d'autre part, d'effectuer des sommations de notes afin d'évaluer des masses racinaires. Il nous a été alors nécessaire de linéariser la relation présentée au tableau 2.

3. Correspondance avec l'état structural

Des cartes de l'état structural (MANICHON, 1982) ont été effectuées sur les mêmes plans verticaux et horizontaux. Rappelons qu'elles sont établies en distinguant sur ceux-ci des unités morphologiques dont l'état structural est défini par 2 niveaux d'organisation du matériau :

— L'assemblage des éléments structuraux, pour lequel les modalités suivantes ont été retenues : état massif et états fragmentaires à éléments de taille variée (terre fine, mottes centimétriques ou décimétriques, associées ou non à des cavités).

TABLEAU 1

Types de situations rencontrées dans une case et notes de densité attribuées (cartographie verticale).  
Types of situations found in a square, and corresponding root density indices (vertical mapping).

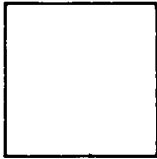
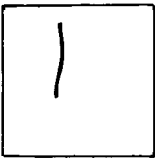



Description	Situation			
	Pas de racine	Une racine de diamètre < 0,5 mm	Une racine de Ø : 0,5 à 1 mm + radicelles ou plusieurs racines Ø < 0,5 mm	Deux racines Ø > 0,5 mm et radicelles
Note de densité	0	2	4	8
Situation rencontrée			 	

TABLEAU 2

Relation entre notes de densité (N) et poids sec de racines (P).  
Relation between root density indices (N) and root dry weight per unit volume (P).  
 $P = 0,0119 N^2 + 0,047 N + 0,029$  ( $r = 0,93$ ).

Notes de densité	0	1	2	3	4	6	8	9
Effectif	17	5	11	12	15	11	10	4
Poids moyen (mg/cm³)	0,42	1,10	2,96	4,49	5,97	12,53	13,30	23,59
Ecart-type	1,31	1,51	1,57	1,64	2,03	2,88	3,00	3,45

— L'état interne des éléments structuraux : continu, de densité proche de la densité texturale (selon la définition donnée par FIES & STENGEL, 1981), notés «  $\Delta$  », ou plus poreux, notés «  $\Gamma$  ».

## B. Traitement des données

Ce traitement est constitué, principalement, de l'étude de la disposition spatiale des racines et de celle des distances entre chaque point du sol et la racine la plus proche. Cependant, ces données permettent aussi d'étudier (TARDIEU, 1984) certains des critères classiques utilisés pour la caractérisation de l'enracinement, tels que la profondeur d'enracinement ou la densité racinaire par horizon : cette dernière est appréciée dans chaque tranche de 2 cm de cartographie verticale, soit par le pourcentage de cases où une racine au moins a été observée, soit par la somme de notes de densités (linéarisées sur la masse racinaire, cf. § II A 2). Il est également possible de comparer entre plusieurs placettes la masse racinaire totale : un indicateur de celle-ci est obtenu en sommant les notes (linéarisées) de densité racinaire présentes sur une carte verticale.

### 1. Etude de la disposition des impacts de racines sur les plans étudiés

Cette étude vise, d'une part, à déterminer de quel type de disposition spatiale se rapprochent le plus les cartes considérées (cf. TARDIEU & MANICHON, 1986), d'autre part, à analyser les facteurs de variation de la densité racinaire (effets de la profondeur, de la distance au rang de semis ou de l'état structural, par exemple).

— L'étude des types de disposition des impacts de racines a été menée selon 2 méthodes, décrites dans le premier article de cette série. Elles permettent de tester l'hypothèse : « la carte considérée diffère significativement d'une disposition aléatoire, pour la maille d'hétérogénéité constatée ». Ce sont la méthode des « autocorrélations spatiales » (CLIFF & ORD, 1973) et la méthode des « quadrats » (ROGERS, 1974), adaptées respectivement à la recherche des hétérogénéités centimétriques et décimétriques.

— L'étude de l'hétérogénéité de la densité racinaire consiste à comparer la densité d'impacts dans des zones du plan préalablement délimitées en fonction du critère considéré (classes de distances au rang, catégories d'état structural). Pour cela, on utilise le maillage du plan effectué lors des observations et on considère l'événement : « il existe au moins une racine dans la case  $i$  de la zone considérée ». La fréquence de cet événement peut être comparée entre chacune des zones délimitées : un test  $\chi^2$  permet de vérifier si les différences de fréquences entre zones sont dues au hasard.

### 2. Etude des distances entre les points du plan et l'impact de racine le plus proche

Cette étude a été menée, sur chacun des plans étudiés, à partir de la cartographie des impacts de raci-

nes. Pour chaque case étudiée (maillage 2 cm), nous avons calculé la distance euclidienne 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 à 4, 7, 12 et 16 cm d'un impact.

Le calcul de ces distances permet en outre d'obtenir une carte de la proximité aux racines : des zones peuvent ainsi être délimitées dans le plan étudié, correspondant chacune à une classe de distance à l'impact le plus proche.

## C. Dispositif expérimental

Un essai a été réalisé en 1983 à Grignon (Yvelines), pour une culture de maïs, en sol profond de texture limono-argileuse. Trois types d'états structuraux de la couche labourée ont été créés dans ce dispositif : un état fragmentaire formé de terre fine et de petites mottes (noté « O »), un état fragmentaire formé de mottes tassées et de cavités structurales (noté « B »), et un état continu et compact (noté « C ») (la description physique de ces états figure ailleurs : TARDIEU, 1984). Après dessiccation du profil sous l'action des prélèvements d'eau par la culture, des fentes de retrait distantes de quelques décimètres sont apparues dans le dernier cas. Ces 3 types d'état structural ont été mis en place dans un dispositif en 3 blocs. Douze placettes de chaque type (4 par bloc) ont été étudiées. Parmi celles-ci, 3 ont été observées sur 5 plans horizontaux et un plan vertical, en O et en C. Les autres placettes ont été caractérisées par une cartographie sur plan vertical.

Le maïs (variété LG1) a été semé le 3 mai, à la densité de 87 000 plantes/ha, avec un semoir 2 rangs. Le désherbage et la fertilisation ont été pratiqués suivant les normes locales de culture.

## III. RÉSULTATS

### A. Exemples de cartes obtenues

Les figures 2a et 2b présentent des cartes racinaires obtenues sur un plan vertical, pour une placette de type C. Les notes de densité attribuées à chaque case de la grille sont représentées par des grisés d'intensité croissante ; le traitement de données fait apparaître soit la totalité des impacts de racines, soit seulement les racines ayant un type de contact avec la terre environnante. La figure 2c présente la carte des états structuraux du sol pour la même placette. Cette carte est constituée de zones massives et de discontinuités structurales : d'une part, des fentes de retrait (dont la largeur, sur la carte, est liée à l'angle qu'elles forment avec le plan étudié) et, d'autre part, des interbandes (zones situées entre les bandes de labour où sont localisés de manière préférentielle les débris végétaux enfouis). Les figures 3a et 3b présentent respectivement les cartes racinaires et structurales d'une placette de type O.

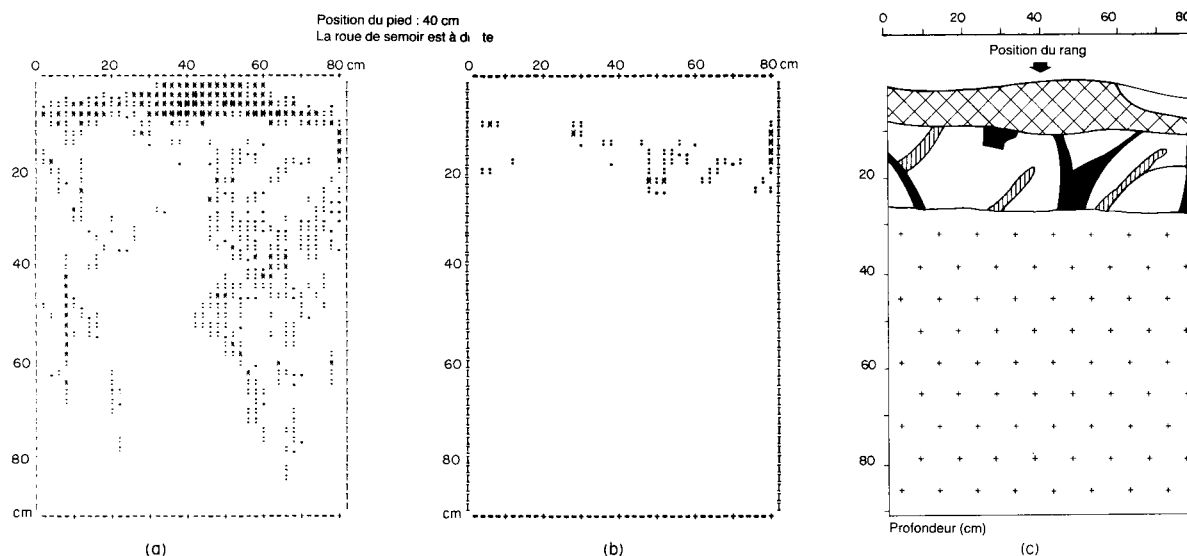


Figure 2

Cartographie sur plan vertical d'une placette de type « C ».

(a) Cartographie de la totalité des impacts de racines.

(b) Cartographie des impacts situés dans des fentes de retrait (la note correspondant à chaque case est figurée par un symbole d'autant plus foncé que la note est plus élevée).

(c) Cartographie des états structuraux.

Mapping on a vertical plane of a « C » sample volume.

(a) Mapping of all root impacts.

(b) Mapping of root impacts within cracks (root density index corresponding to each square shown by progressively darker symbols).

(c) Soil structure mapping.

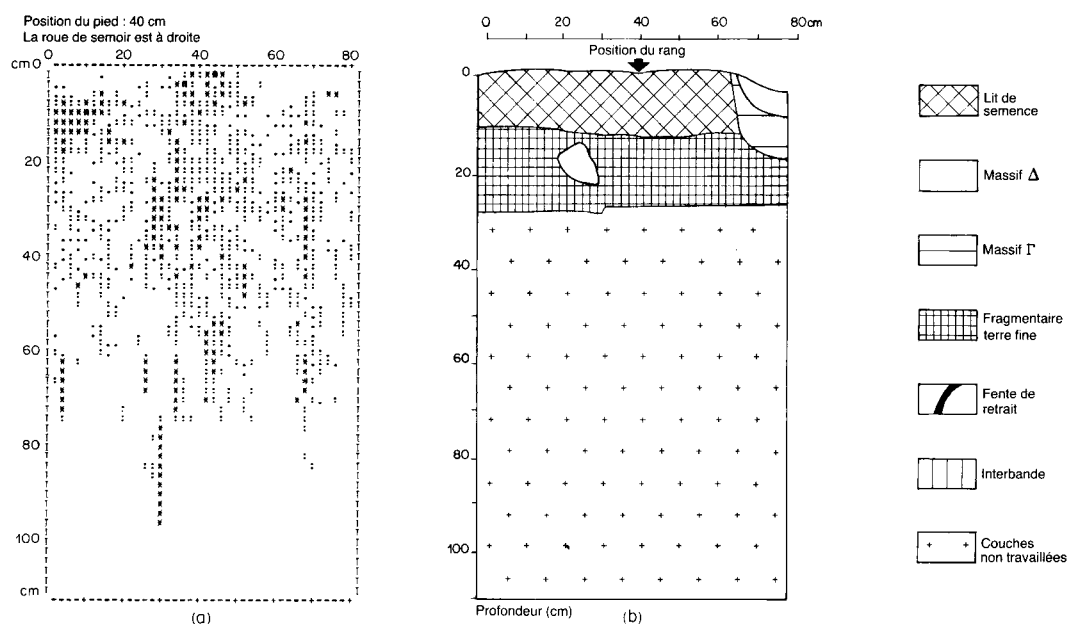


Figure 3

Cartographie sur plan vertical d'une placette de type « O ».

(a) Cartographie des impacts de racines.

(b) Cartographie des états structuraux.

Mapping of a « O » sample volume.

(a) Root mapping.

(b) Soil structure mapping.

Des cartes racinaires et structurales effectuées sur un plan horizontal à 17 cm de profondeur sont présentées aux figures 4a et 4b, 5a et 5b.

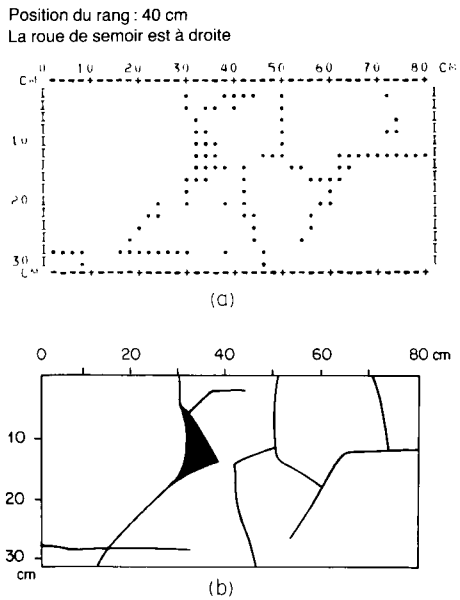


Figure 4  
Cartographie sur plan horizontal d'une placette de type « C » à 17 cm de profondeur.  
(a) Cartographie des impacts de racines.  
(b) Cartographie des états structuraux.  
Mapping on an horizontal plane of a « C » sample volume at 17 cm depth.  
(a) Root mapping.  
(b) Soil structure mapping.

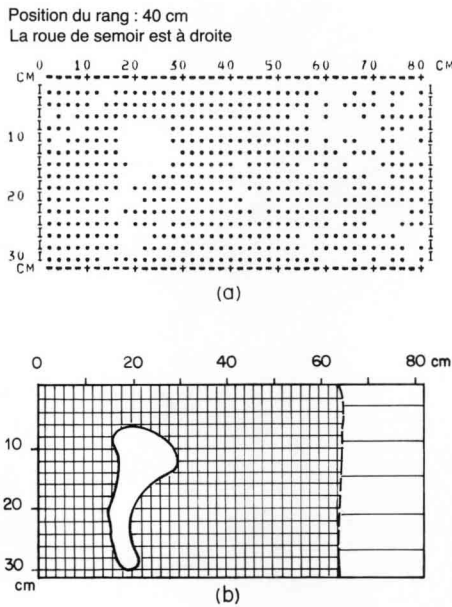


Figure 5  
Cartographie sur plan horizontal d'une placette de type « O » à 17 cm de profondeur.  
(a) Cartographie des impacts de racines.  
(b) Cartographie des états structuraux.  
Mapping on an horizontal plane of a « O » sample volume at 17 cm depth.  
(a) Root mapping.  
(b) Soil structure mapping.

**B. Etude des types de disposition des racines**

Le tableau 3 présente les résultats du test d'auto-corrélation spatiale (maillage de 2 cm) pour les plans horizontaux situés à 17, 30, 60 et 80 cm des 6 placettes étudiées (la faible densité d'impacts sur le plan situé à 100 cm de profondeur n'a pas permis d'y effectuer ce test, les résultats présentés concernent les contacts « noir-noir » : cf. TARDIEU & MANICHON, 1986). Etudiées à une échelle centimétrique par cette méthode, toutes les cartes étudiées ont une disposition de type groupé.

TABLEAU 3

Types de disposition des racines sur les plans horizontaux. Résultats du test d'autocorrélations spatiales sur les placettes de type O et C (test effectué sur 1 800 cases, à chaque profondeur des deux types de placettes).  
Patterns of root arrangement on horizontal planes : result of the spatial autocorrelation test (test carried out on 1 800 squares at each depth for both treatments).

Profondeur du plan (cm)	Placette de type O		Placette de type C	
	t calculé	Conclusion disposition de type	t calculé	Conclusion disposition de type
17	23,5**	Groupée	24,3**	Groupée
30	9,3**	Groupée	25,0**	Groupée
60	11,0**	Groupée	23,3**	Groupée
80	10,1**	Groupée	17,4**	Groupée

Les résultats du test des quadrats (tabl. 4) montrent en revanche que, étudiées à une échelle décimétrique (maillage de 10 cm), les cartes correspondant aux états structuraux O et C ont des dispositions différentes : en C, toutes les dispositions sont groupées et les rapports variance/moyenne du nombre d'impacts par quadrat sont élevés, par contre en O, ces rapports sont proches de 1 et les valeurs t calculées sont à la limite ou en dessous du seuil de signification. Les tests effectués pour des maillages différents, de 6 à 14 cm, fournissent des résultats semblables à ceux présentés ici.

Une variabilité (horizontale) centimétrique de la densité racinaire existe donc dans toutes les cartes considérées, alors que la variabilité décimétrique n'est importante que dans les placettes de type C.

**C. Source de variations horizontales de la densité racinaire**

**1. Distance au rang de semis**

L'effet de cette distance a été étudié sur les cartographies verticales afin de disposer de 12 répétitions par traitement. Le zonage de ces plans a été effectué en 3 étapes :

- La séparation en 3 horizons : couche labourée, horizon 28-60 cm ; horizon 60-100 cm.
- La distinction entre l'inter-rang où se trouve la trace de roue du tracteur entraînant le semoir et

TABLEAU 4

Types de disposition des racines sur les plans horizontaux : résultats du test des quadrats (72 quadrats par profondeur et type de placettes).  
 Patterns of root arrangement on horizontal planes : results of the quadrat method test (72 quadrats at each depth for both treatments).

Profondeur (cm)	Etat structural des placettes	Nombre d'impacts par case		t calculé	Conclusion Type de disposition
		Moyenne	Variance Moyenne		
17	O	20,5	1,17	1,01 NS	Aléatoire
30	O	11,6	1,40	2,35*	Goupée
60	O	9,5	1,33	1,94 NS	Aléatoire
80	O	3,9	1,47	2,76**	Goupée
17	C	3,8	2,31	7,71**	Goupée
30	C	9,3	8,00	41,20**	Goupée
60	C	5,2	14,00	76,47**	Goupée
80	C	1,9	2,9	11,18**	Goupée

l'inter-rang non tassé (ces traces affectent toutes les placettes, soit à droite, soit à gauche du rang ; après une transformation par symétrie axiale de ces dernières, l'inter-rang droit est, par convention, celui où se trouve la trace de roue).

— Les parties de plans ainsi définies ont été découpées en bandes verticales de 2 cm de large. Chacune de celles-ci est caractérisée par la proportion de cases où une racine au moins a été observée. La figure 6 présente la moyenne et l'intervalle de confiance (0,95) de ces proportions pour chaque classe de distance au rang dans les inter-rangs tassés (droite) et non tassés

(gauche). Dans la couche labourée, on observe un effet net du tassement dû à la roue de semoir (entre 20 et 40 cm du rang) ; il n'y a pas, au contraire, de différence notable de densité d'impacts de racines entre le voisinage du rang et l'inter-rang non tassé. Dans les couches sous-jacentes, la densité est indépendante de la distance au rang, dans les 2 inter-rangs.

Les résultats présentés ici concernent les 12 placettes où l'état structural est de type « O » ; ils sont similaires à ceux obtenus sur les autres types de placettes. Ils sont également cohérents avec les mesures de MAERTENS (1964) et de MENGEL & BARBER (1974). La dis-

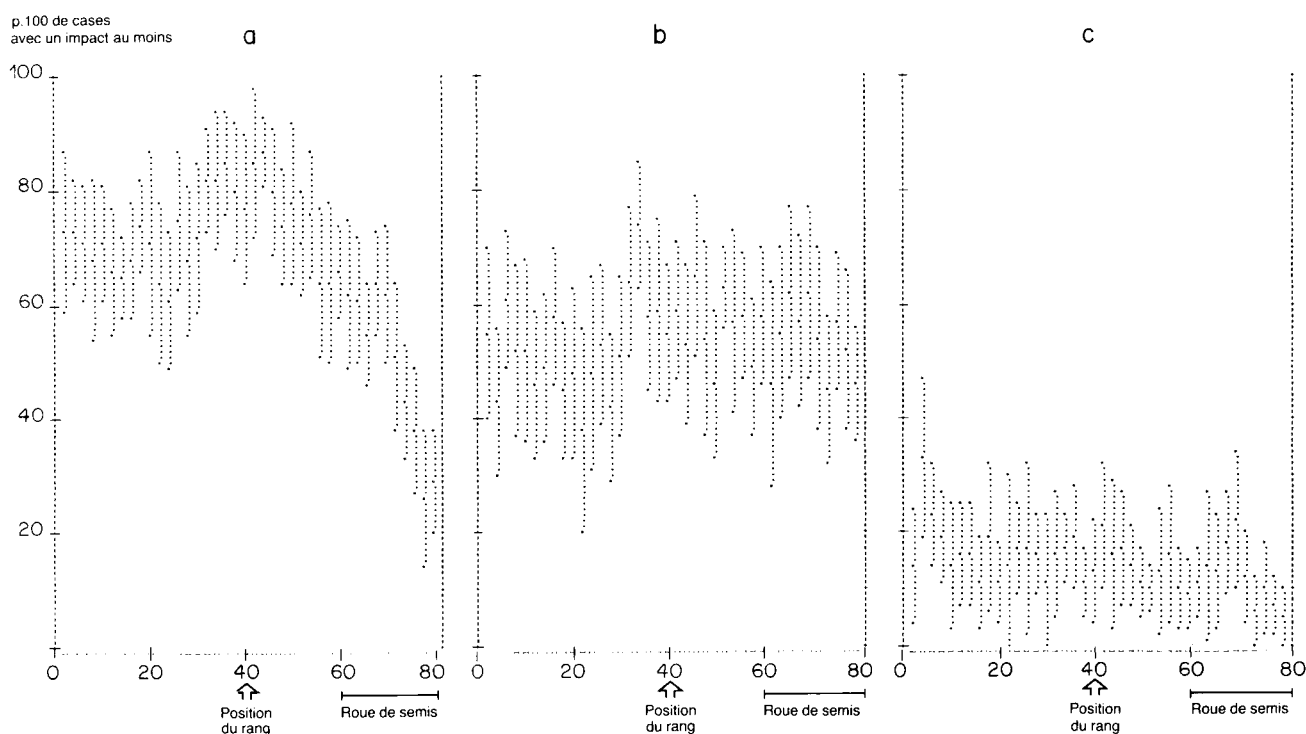


Figure 6

Effet de la distance au rang de semis sur la densité racinaire : fréquence de cases avec un impact de racine au moins, par classes de distance au rang. Par convention, la trace de roue de semoir est à droite.

(a) Couche labourée ; (b) Horizon 28-60 cm ; (c) Horizon 60-100 cm.

Effect of distance from the row on root density : frequency of squares with at least one root impact per category of distance from the row.

Wheel compaction is placed conventionally on the right.

(a) Ploughed layer ; (b) 28-60 cm layer ; (c) 60-100 cm layer.



tance au rang de semis n'est donc pas en elle-même, dans notre échantillon et avec la méthode utilisée, une cause appréciable de variabilité horizontale de la densité racinaire ; la différence entre rang et inter-rang n'apparaît, dans la couche labourée, que dans les inter-rangs tassés.

## 2. Effet de l'état structural sur la localisation des racines de la couche labourée

Cette étude a été effectuée sur les cartes verticales en superposant les cartes structurales et racinaires :

chacune des zones de la carte structurale est caractérisée par la proportion de cases où une racine au moins a été observée. Les résultats (tabl. 5) montrent que, dans les 3 types de placettes, les impacts de racines sont regroupés dans les zones à structure fragmentaire (en O et B) ou dans les fentes de retrait et les interbandes (en C). Le regroupement, significatif dans les 3 cas, est cependant plus prononcé en B et C qu'en O.

Ces résultats confirment l'existence d'une forte variabilité horizontale de la densité racinaire, d'échelle décimétrique, dans la couche labourée. Cette variabilité

TABLEAU 5

*Effet de l'état structural sur la localisation des racines dans la couche labourée : proportion de cases (2 × 2 cm) où une racine au moins a été observée. F : fragmentaire.*

*Effect of soil structure on root localization in the ploughed layer : proportion of 2 × 2 cm squares where at least one root impact was observed. F : fragmentary.*

	Types d'états structuraux						$\chi^2$ calculé
	Massif $\Delta$	Massif $\Gamma$	Massif $\Delta$ fissuré	F terre fine	F mottes + cavités	Fentes de retrait	
Placette de type C							
Effectif (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	665	411	0	162 S**
Proportion	17	48		71	72		

lité, d'origine structurale, est d'autant plus forte que les obstacles à l'enracinement sont plus fréquents dans la couche labourée.

## 3. Effet de l'état structural de la couche labourée sur la localisation des racines dans les couches non travaillées

L'observation de certaines cartes racinaires verticales (fig. 2a) suggère l'idée que des obstacles de grandes dimensions, situés dans la couche labourée, peuvent provoquer des hétérogénéités de colonisation dans les couches sous-jacentes (celles-ci n'étant pas, dans cet essai, affectées par les tassements, TARDIEU, 1984). Pour la vérifier, nous avons mis en correspondance les cartographies racinaires effectuées sur un plan horizontal à 17 cm de profondeur avec celles concernant les plans horizontaux sous-jacents. Cette étude a été effectuée sur les placettes de type C, où la couche labourée est formée de blocs prismatiques non colonisés, de dimension décimétrique, séparés par des fentes de retrait subverticales où sont localisées les racines. Pour cela, nous avons d'abord réalisé une partition du plan 17 cm, suivant l'éloignement des cases qui le constituent à l'impact de racine le plus proche (cf. § II B 2). Quatre types de zones sont ainsi définis : celles situées, respectivement, à moins de 4 cm, entre 4 et 7 cm, entre 7 et 12 cm et à plus de 12 cm d'un

impact de racine. Ce dernier type de zone est situé dans la partie centrale des obstacles de grandes dimensions, alors que le premier est constitué des zones périphériques des obstacles et des zones colonisées. Ce zonage a ensuite été projeté sur les cartes correspondant aux plans sous-jacents des mêmes placettes. Dans chacun de ceux-ci, des zones ont ainsi été définies par leur position par rapport aux obstacles de la couche labourée ; chaque type de zone a été caractérisé par la proportion de cases où une racine au moins a été observée.

Les résultats de cette analyse (tabl. 6) montrent que, sur les plans situés à 30, 60 et 80 cm de profondeur, il existe de fortes différences de densité d'impacts de racines entre les zones définies précédemment : ces densités sont plus faibles dans les zones situées sous les parties centrales des obstacles de la couche labourée que dans celles situées sous les zones colonisées. Le phénomène, très net à 30 et 60 cm de profondeur, s'atténue à 80 cm et n'est pas significatif à 100 cm, profondeur à laquelle la densité de racines devient faible en tout endroit.

Les obstacles de grandes dimensions situés dans la couche labourée peuvent donc créer des « zones d'ombre » de la densité racinaire dans le sous-sol ; celles-ci sont probablement à l'origine de la forte hétérogénéité décimétrique de la colonisation constatée dans le sous-sol des placettes de type C.

TABLEAU 6

*Effet de la répartition des racines dans la couche labourée sur la colonisation du sous-sol : proportion des cases où une racine au moins a été observée, suivant la position par rapport aux obstacles situés dans la couche labourée.*

*Effect of root distribution in the ploughed layer on sub-soil colonization : proportion of squares where at least one root was observed in the ploughed layer.*

	Zonage de la couche labourée : distance à la racine la plus proche				$\chi^2$ calculé
	< 4 cm (zones colonisées)	4-7 cm (zones non colonisées proches de racines)	7-12 cm (zones non colonisées éloignées de racines)	> 12 cm (zones non colonisées fortement éloignées)	
Nombre de cases	485	231	91	33	
Projection de ce zonage sur les plans situés à :					
30 cm	52	32	21	18	52 S**
60 cm	25	17	3	6	34 S**
80 cm	9	6	0	3	11 S**
100 cm	1	2	1	0	1 (NS)

#### D. Distance entre points du sol et racine la plus proche

Afin d'évaluer l'ordre de grandeur des erreurs commises lorsqu'on suppose que la disposition des racines est régulière, nous avons effectué de 2 manières différentes le calcul de la fonction de répartition des distances entre les points du sol et les racines.

- Le 1<sup>er</sup> calcul a été effectué à partir des cartographies des impacts de racines sur les plans considérés avec la méthode exposée au § II B 2.

- Un 2<sup>e</sup> calcul a été fait sur des cartes fictives qui aurait chacune le même nombre d'impacts de racines que les précédentes mais où ceux-ci seraient régulièrement disposés. Il a été effectué en calculant la distance moyenne entre impacts voisins (à partir de leur densité surfacique, cf. TARDIEU & MANICHON, 1986), puis en évaluant la surface du plan situé à des distances croissantes des impacts (cf. TARDIEU, 1984).

Les résultats concernant les placettes de type C sont présentés aux figures 7a et 7b, pour les 5 plans horizontaux étudiés dans chaque placette. Avec le 2<sup>e</sup> mode de calcul (hypothèse de disposition régulière), il apparaîtrait que la totalité des points situés sur les plans à 17, 30 et 60 cm de profondeur est située à une distance inférieure à 4 cm d'une racine. En revanche, le calcul effectué à partir des cartographies observées fournit un résultat très différent, surtout pour le plan situé à 17 cm où les racines sont groupées dans les fentes de retrait.

Cette différence de résultats entre modes de calcul existe également dans les placettes de type O. Elle y est cependant nettement moins prononcée en raison de l'absence, dans ces placettes, de zones non colonisées de grandes dimensions.

L'hypothèse de régularité, communément admise dans les études d'enracinement et dans les modèles de transfert d'eau, aurait donc eu pour conséquence, dans l'exemple traité, de sous-estimer fortement les distances entre points du sol et la racine la plus proche dans les placettes d'état structural défavorable.

#### IV. DISCUSSION

La méthode cartographique proposée permet de mettre en évidence les hétérogénéités décimétriques de la densité racinaire présentes dans les placettes étudiées. A la différence des autres méthodes d'observation (cf. TARDIEU & MANICHON, 1986), elle permet également d'analyser l'origine de ces hétérogénéités grâce, en particulier, à la superposition des cartes structurales et racinaires et à la mise en correspondance des cartes racinaires horizontales effectuées dans la couche labourée et dans les horizons sous-jacents.

Il apparaît, à partir de l'exemple présenté, que, dans les placettes où existent des obstacles structuraux de grandes dimensions à la pénétration des racines (placettes de type B et C), il existe, à une même profondeur, des zones colonisées où la distance entre racines est millimétrique et des zones non colonisées où la distance à la racine la plus proche est de l'ordre du décimètre. Le calcul de la fonction de répartition des distances entre chaque point des plans horizontaux étudiés et la racine la plus proche permet de prendre ce fait en considération, ce qui n'est pas possible avec les méthodes classiquement utilisées : celles-ci sont fondées sur le calcul d'une « distance moyenne entre racines voisines » qui repose sur l'hypothèse de régularité de la disposition des racines (cf. TARDIEU & MANICHON, 1986). Ce point différencie en particulier la méthode présentée ici de celle de BOHM (1976 ; BOHM *et al.*, 1977 ; EHLERS *et al.*, 1981) : bien que les techniques d'observation soient proches (observations *in situ* sur profil, dans les deux cas), le traitement des données est différent : évaluation de la longueur de racines puis calcul de la distance moyenne entre racines voisines chez BOHM, calcul direct sur carte ici.

Par rapport à d'autres méthodes, le temps passé sur le terrain est supérieur avec la méthode présentée ici : 7 h environ par placette, si les 5 plans horizontaux et le plan vertical sont observés. En revanche, l'exploita-

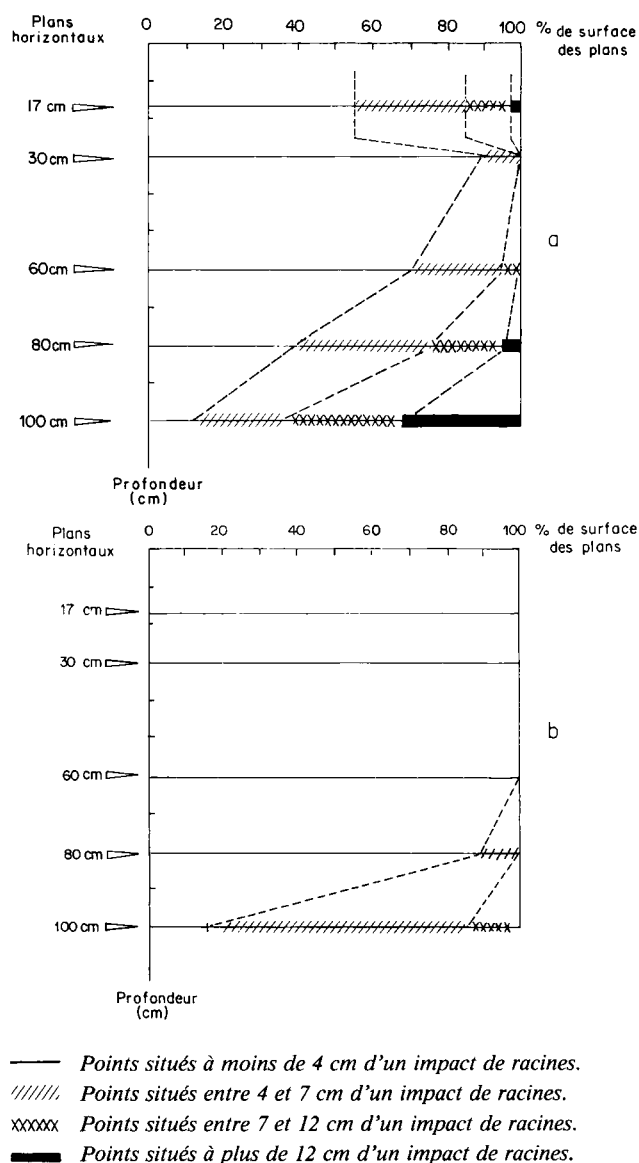


Figure 7

Fonction de répartition des distances entre chaque point du sol et la racine la plus proche, pour les 5 plans étudiés sur les placettes de type « C ».

(a) Distances mesurées sur les cartes.

(b) Calculs effectués en supposant que la disposition des racines est régulière.

(Le plan 17 cm est supposé représentatif de toute la couche labourée.)

Cumulative frequency distribution of distances between each point of soil and the nearest root, for the 5 planes studied of « C » sample volumes.

(a) Distances measured on maps.

(b) Calculation carried out on regular pattern hypothesis.

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

tion des données est extrêmement rapide (quelques dizaines de minutes par placette sur un ordinateur BULL MINI 6). L'ensemble des résultats peut ainsi être obtenu quelques heures après la fin des observations. On évite notamment le travail long, fastidieux et souvent générateur d'erreurs (cf. BOHM, 1979) de

lavage et de tri des racines, qui est nécessaire après le prélèvement de carottes verticales de sol ou de monolithes. En revanche, si seul le plan vertical est observé, le temps passé sur le terrain est réduit à 3 h par placette et est ainsi égal à celui passé par BOHM (1976). Avec cette méthode, les coefficients de variation observés sont (TARDIEU, 1984) de l'ordre de 10 à 20 p. 100 dans les situations que nous avons étudiées, pour les différentes variables prises en compte (profondeur d'enracinement, surface des plans situés à moins de 4 cm d'une racine, densité moyenne). Il est alors nécessaire d'effectuer, dans une parcelle expérimentale, entre 4 et 16 répétitions, suivant les cas, pour obtenir une précision de 10 p. 100 sur les observations (DAGNELIE, 1977). Ces effectifs permettent, dans une comparaison entre traitements, de mettre en évidence des différences de l'ordre de 20 p. 100 avec un risque de 2<sup>e</sup> espèce de 10 p. 100. Si le temps disponible n'est pas suffisant pour effectuer ce nombre de répétitions, il peut être préférable d'effectuer des observations simplifiées sur plans verticaux (TARDIEU, 1984), avec le nombre de répétitions requises, et de n'étudier que dans un sous-échantillon la disposition spatiale des racines par la méthode présentée ici.

## V. CONCLUSION

Dans les placettes que nous avons explorées, l'état structural de la couche labourée est la principale source de l'hétérogénéité horizontale de la densité racinaire. Son effet est direct dans la couche labourée (variations décimétriques de la résistance mécanique à la pénétration), mais il existe également dans les couches sous-jacentes à travers « l'effet d'ombre » des obstacles de grandes dimensions situés dans la couche labourée. Ces résultats, mis en évidence par une méthode cartographique, auraient difficilement pu être acquis par d'autres méthodes.

Lorsque les hétérogénéités décimétriques de la densité racinaire sont importantes, les distances entre chaque point du sol et la racine la plus proche sont apparues comme fortement dépendantes de la disposition spatiale des racines. La méthode présentée ici devrait, dans ces cas, permettre d'améliorer la compréhension de l'utilisation des réserves en eau du sol par les systèmes racinaires et de prendre en compte leurs caractéristiques pour évaluer ces réserves. Elle devrait notamment être utile lorsque l'état structural de la couche labourée est dégradé (situation fréquemment rencontrée au champ, cf. MANICHON, 1982) ou lorsque, cas également fréquent, la structure des couches sous-jacentes est elle-même discontinue, ce qui entraîne la localisation préférentielle des racines dans certaines zones du profil (fissures ou glosses, par exemple).

Reçu le 18 février 1985.

Accepté le 20 décembre 1985.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bohm W.**, 1976. *In situ* estimation of root length at natural soil profiles. *J. Agric. Sci. Camb.*, **69**, 415-418.
- Bohm W.**, 1979. *Methods of studying root systems*. Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 188 p.
- Bohm W., Maduakor H., Taylor H. M.**, 1977. Comparison of five methods for characterizing soybean rooting density and development. *Agron. J.*, **69**, 415-419.
- Cliff A. D., Ord J. K.**, 1973. *Spatial autocorrelation*. Pion Ltd., London, 178 p.
- Dagnelie P.**, 1977. *Théorie et méthodes statistiques*. Vol. 1, 2. Presses Agronomiques de Gembloux, 378 et 457 p.
- Ehlers W., Grimme K., Baeumer K., Stulpnagel R., Kopke U., Bohm W.**, 1981. Flow resistance in soil and plant during field growth of oats. *Geoderma*, **25**, 1-12.
- Henin S., Gras R., Monnier G.**, 1969. *Le profil cultural*. Masson, Paris, 332 p.
- Fies J. C., Stengel P.**, 1981. Densité texturale de sols naturels. II. — Eléments d'interprétation. *Agronomie*, **1** (8), 659-666.
- Maertens C.**, 1964. Influence des propriétés physiques des sols sur le développement racinaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. *Sci. Sol.*, **2**, 31-41.
- Manichon H.**, 1982. *Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique*. Thèse Doct. Ing., INA-PG, Paris, 214 p.
- Mengel D. B., Barber S. A.**, 1974. Development and distribution of the corn root system under field conditions. *Agron. J.*, **66**, 341-344.
- Rogers A.**, 1974. *Statistical analysis of spatial dispersion. The quadrat method*. Pion Ltd, London, 164 p.
- Snedecor G. W., Cochran W. G.**, 1957. *Statistical methods*. Iowa State University Press, USA, 649 p.
- Tardieu F.**, 1984. *Etude au champ de l'enracinement du maïs. Influence de l'état structural sur la répartition des racines. Conséquences pour l'alimentation hydrique*. Thèse Doct. Ing., INA-PG, Paris, 232 p.
- Tardieu F., Manichon H.**, 1986. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. I. — Discussion des critères d'étude. *Agronomie*, **6** (4).