

# Effet du travail du sol sur la localisation et l'accessibilité des éléments minéraux. Conséquences sur l'élaboration du rendement du maïs. (*Zea Mays L.*)

Jean ROGER-ESTRADE (\*)

## RÉSUMÉ

On a comparé quatre parcelles ayant toutes reçu la même fertilisation, mais dont l'histoire culturale a entraîné des localisations de phosphore, potassium et carbone différentes, et dans lesquelles on a créé deux types d'états structuraux de la couche labourée (fragmentaire et massif) avant d'y implanter du maïs. L'étude de l'effet du travail du sol sur la localisation des éléments considérés a été menée en repérant au sein de chaque bande de labour deux compartiments – A et B – correspondant, le premier au volume de terre appartenant à l'horizon superficiel antérieur, le second au reste de la couche travaillée. Les analyses de terre ont été effectuées dans chaque compartiment et associées par couple dans une même bande de labour. Puis on a dressé une carte des états structuraux (MANICHON, 1982) et une carte racinaire dans chaque profil analysé. Enfin, des mesures (matière sèche fabriquée, composantes du rendement, niveau de prélèvement de N, P et K) ont été menées au stade 11 feuilles, puis à la récolte du maïs. On montre que l'effet de mélange du labour est limité : s'il existe une hétérogénéité de répartition des éléments peu mobiles dans le sol, elle subsiste après cette opération. Cependant, quand l'état structural n'est pas dégradé, l'activité biologique tend à la faire disparaître au cours de la campagne.

Cette localisation des éléments minéraux, en particulier du phosphore, ne pose problème pour l'alimentation du maïs que lorsque l'accessibilité aux zones enrichies est fortement compromise par la présence d'obstacles structuraux, et ce d'autant plus qu'apparaissent des périodes de sécheresse au cours de la croissance de la plante.

Ces résultats montrent l'intérêt d'une meilleure compréhension des effets des techniques de travail du sol sur l'évolution de l'état du profil cultural, et de la prise en compte de la variabilité spatiale au sein de la couche labourée pour améliorer le diagnostic sur la fertilité chimique.

**MOTS-CLÉS** : état structural - travail du sol - fertilité chimique - alimentation minérale - maïs.

## EFFECT OF SOIL MANAGEMENT ON LOCATION AND ACCESSIBILITY OF MINERAL NUTRIENTS. CONSEQUENCES FOR YIELD ELABORATION OF CORN (*Zea Mays L.*).

*In this experiment, we studied the effects of interrupting an on-going (since 1958) soil management trial (shallow till versus moldboard ploughing) on the location of P, K and Carbon within the Ap-layer. The plots studied were moldboard ploughed and corn was sown to analyse its reaction to the new environmental conditions thus created (Table I).*

*Soil samples for analysis were removed from the ploughed layer taking into consideration their position before ploughing (i.e. belonging to the former upper part of the Ap-layer or not, Fig. 1). Structural state and root density were also described (MANICHON and TARDIEU, 1987) and crop measurements were made at the 11 leaf stage and at maturity (Table II).*

(\*) Chaire d'Agronomie, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 78850 Thiverval-Grignon.

*The results shown that P, K and Carbon enrichment of the upper layer due to shallow till leads to a heterogeneous repartition of P, K and C after ploughing (Tables III, IV and V). The mixing action of the moldboard plough is limited, but, when soil is not compacted, biological activity during the crop cycle leads to a diminution of the spatial variability of P, K and C within the Ap-layer.*

*This heterogeneous location is a problem for corn when soil compaction limits the accessibility of roots to the enriched zones. This effect is reinforced when there are water stresses during the growing season (Tables VII and VIII).*

*These results show the interest of a better understanding of the effects of management on soil state, and the necessity to take into account spatial variability within the ploughed layer to obtain a better diagnosis on the chemical component of the fertility.*

**KEY-WORDS** : soil structure - soil management - mineral nutrition - soil fertility - corn.

## INTRODUCTION

L'objectif de la fertilisation est de contribuer à la constitution ou au maintien d'un état chimique du sol qui ne soit pas limitant de l'objectif de rendement visé. Afin de raisonner cette opération, l'agronome dispose de méthodes d'analyse du pool alimentaire du sol (GACHON, 1977). Ces méthodes permettent de fixer des valeurs seuils en deçà desquelles la réponse des cultures à un apport de fertilisant est, en terme de fréquence, positive. Cependant, ces références ont trait à la quantité d'éléments présents dans le sol. Lorsqu'on les utilise, on suppose implicitement :

- que l'état physique du profil cultural ne limite pas la capacité d'absorption du système racinaire ;
- que les éléments minéraux sont répartis de façon homogène dans l'ensemble des horizons explorés par les racines.

Si ces conditions ne sont pas remplies, on peut constater l'apparition de troubles nutritionnels de sols considérés comme correctement pourvus.

Les résultats présentés consistent en la comparaison de quatre parcelles ayant toujours reçu la même fertilisation, mais dont l'histoire culturale est à l'origine d'une répartition différente des éléments minéraux, et dans lesquelles on a créé deux types d'état structural de la couche labourée (fragmentaire et massif) avant l'implantation du maïs. L'étude menée a pour objectif :

- d'étudier l'effet du travail du sol sur la localisation des éléments minéraux, en utilisant comme marqueurs les éléments peu mobiles dans le sol ; carbone, phosphore et potassium ;
- d'analyser le comportement de la végétation dans ces situations à travers l'étude de différents indicateurs de croissance et de développement.

## I. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 1. Dispositif étudié

Les parcelles étudiées sont situées sur un sol brun lessivé développé sur limon loessique du Würm récent ("hapludalf" selon la Soil Taxonomy), reposant à une profondeur d'environ 2 m sur un calcaire dur du Lutétien. Les caractéristiques granulométriques de la couche travaillée sont présentées au tableau I. Ces parcelles appartiennent à un

dispositif d'étude de travail du sol mis en place sur le domaine expérimental de Grignon (Yvelines) en 1958 (RÉCAMIER, 1970 ; FOURBET, 1975). Dans cette expérimentation, les parcelles notées L étaient labourées chaque automne sur une profondeur d'environ 25 cm et celles notées S ne comportaient qu'un travail superficiel (profondeur 10 cm) de retournement.

Tableau I : Histoires culturales des situations étudiées et caractéristiques granulométriques moyennes de la terre de la couche travaillée.

*History of the plots studied. Physical analysis of the Ap-layer (mean values for the four plots studied).*

1958 - 1987	- ROTATIONS	Rotations de 3 ans comprenant 2 céréales à paille (1958-1966) puis monoculture d'orge de printemps (1967-1983) puis monoculture de blé d'hiver (1984-1987)
	- FUMURE DE FOND ANNUELLE	100 U/ha de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> et de K <sub>2</sub> O à l'automne sur chaume
	- RÉSIDUS DE RÉCOLTE	Pailles exportées
	- TRAVAUX DU SOL	Superficiel (10 cm) (S) - Labour (25 cm) (L)
1987 - 1988	<u>Culture du maïs grain</u>	
	- LABOUR	Les 18 et 19/01/88 - Charrue 14" (profondeur 25 cm environ)
	- COMPACTAGE	Les 5 et 10/04/88 en S <sub>T</sub> et L <sub>T</sub>
	- REPRISE	Herse rotative, le 29/04/88 (profondeur 10 cm environ)
	- SEMIS	Le 30/04/88 - LG 11 (87000 graines/ha)
- ENGRAIS AZOTÉ	Le 30/04/88 - 100 U/ha (ammonitrate 33,5%)	
	Caractéristiques granulométriques moyennes de la terre de la couche travaillée	A < 2 µm   L (2-50 µm)   S (50-200 µm)   M.O.   CaCO <sub>3</sub> total 18-20%   67-70%   8-10%   2-2,3%   < 1%

En 1988, les deux parcelles (L et S) ont été labourées, puis chacune divisée en deux parties afin d'y créer des conditions physiques différentes pour la croissance et le développement des racines du maïs, selon une procédure décrite par ailleurs (TARDIEU et MANICHON, 1987).

Dans l'une des deux parties, on a réalisé un compactage continu et homogène, éventuellement renouvelé, en conditions humides ; l'autre a été laissée en l'état.

Dans la partie compactée (les deux parcelles correspondantes seront notées dans la suite du texte L<sub>T</sub> et S<sub>T</sub> en fonction de leur histoire culturelle ancienne), l'état structural obtenu était du type continu (noté "C" dans la suite du texte, MANICHON, 1987). Dans la partie n'ayant pas subi cette intervention (parcelle L<sub>NT</sub> et S<sub>NT</sub>), l'état structural était de type fragmentaire (noté "O" dans la suite du texte, MANICHON, *ibid.*). Le tableau I complète la description de l'histoire culturelle du dispositif.

## 2. Conditions climatiques de la campagne 1987-1988

Le début de l'hiver ayant été peu pluvieux (le cumul des pluies du 1<sup>er</sup> novembre 1987 au 15 janvier 1988 est de 108 mm, soit 80% de la moyenne trentenaire sur la période 1951-1980), le labour a été réalisé dans de bonnes conditions d'humidité. Les opérations de reprise de labour et d'implantation du maïs ont été menées sur un sol bien ressuyé. La phase de démarrage s'est déroulée dans des conditions optimales d'humidité et de température ; le maïs, en particulier, n'a pas subi de période froide qui aurait pu entraîner des symptômes de carences induites.

## 3. Protocole

### a) Modalités d'échantillonnage des végétaux

Dans chaque parcelle (15 m x 8,3 m), on a délimité, courant juin, une zone de végétation d'aspect homogène, en excluant les bordures. Au sein de cette station, on a choisi, de façon aléatoire, l'emplacement d'une fosse dont la face d'observation était perpendiculaire à la direction du semis, et d'une largeur telle qu'elle permette d'observer deux rangs contigus de maïs (écartement entre rangs : 80 cm).

Sur ces deux rangs, les emplacements de 5 placettes ont été tirés au sort pour les contrôles de végétation au stade 11 feuilles, puis 5 autres pour les prélèvements à maturité. Chaque placette, d'une longueur de 1 m, comprenait 8 pieds de maïs.

Les observations de la végétation ont été menées au stade 11 feuilles, puis à la maturité du maïs. Le tableau II présente l'ensemble des mesures réalisées sur les échantillons ainsi prélevés lors de ces deux dates.

Tableau II : Mesures effectuées sur la végétation (8 pieds/placette)

*Crop measurements (one sample = 8 plants)*

STADE 11 FEUILLES	MATURITÉ (après battage)
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Matière sèche totale : prélèvement des placettes ; séchage à l'étuve 48 h à 80°C.</li> <li>● Teneur en éléments minéraux N, P, K : dosage à partir de broyats tirés des prélèvements précédents.</li> <li>● Notation de symptômes de déficience de l'alimentation minérale : une fiche par pied, comportant l'âge des feuilles affectées, la nature, la localisation et l'importance des symptômes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Matière sèche végétative (tiges + feuilles + spathes + rafles) : idem.</li> <li>● Matière sèche grains par placette : mesurée à 0% d'humidité.</li> <li>● Composantes du rendement (poids d'un grain mesuré, nombre de grains surfacique (calculé).</li> <li>● Teneur en éléments minéraux N, P, K : idem.</li> </ul>

### b) Modalités d'échantillonnage et d'observation du sol (Fig. 1)

(1) Avant le labour de 1988, on pouvait distinguer, au sein de la couche labourée, deux horizons notés H1 et H5 (MANICHON, 1987), d'origine différente selon l'histoire culturale des parcelles.

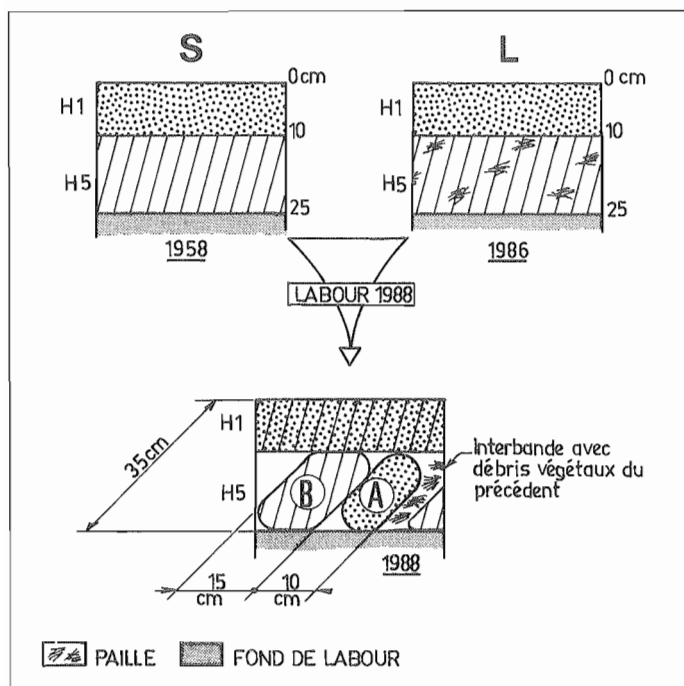
– Dans les parcelles L : l'horizon superficiel H1 (épaisseur 10 cm environ) avait été créé par les outils de reprise du labour de l'automne 1986. L'horizon sous-jacent (H5)

correspondait à la partie inférieure de la couche labourée, non fragmentée par les outils de façons superficielles. Dans ces parcelles, le régime de labour permanent assurait, d'une année à l'autre, un certain mélange de l'ensemble de la couche labourée.

– Dans les parcelles S, en revanche, l'horizon superficiel, lui aussi de 10 cm environ, était le seul travaillé tous les ans depuis 1958, l'horizon sous-jacent (H5) ayant été créé lors de labours antérieurs à cette date et jamais ameubli depuis.

Figure 1 : Schéma du principe de la stratification des profils étudiés

*Sampling of the Ap-layer for soil analysis*



H1 : Horizon créé par les outils de travail superficiel

H5 : Horizon labouré non repris

(A, B) : Couple de prélèvements des échantillons de terre. 5 couples sont prélevés par profil ; chaque prélèvement comprend environ 100 g de terre

(2) Après le labour et les travaux de reprise de 1988, toutes les parcelles étudiées présentaient un profil dont l'organisation était du type de celle des parcelles L décrites ci-dessus. Nous avons alors délimité dans l'horizon H5 de chaque profil deux compartiments pour chaque bande de labour (i.e. volume de terre découpé, puis retourné par un corps de charrue) (cf. Fig. 1).

– Le compartiment A : situé au voisinage des débris végétaux, et à gauche de ceux-ci (dans le sens opposé à celui du versement par la charrue), il correspond à l'ancien horizon H1. Dans les parcelles S, il se distingue aisément du reste de la bande de labour par sa teinte plus foncée, jusqu'à une dizaine de centimètres de l'alignement des débris végétaux enfouis. Dans les parcelles L, les contrastes de couleur n'existent pas au sein de la bande de labour et l'on a défini, par analogie avec le cas précédent, un compartiment A de mêmes dimensions.

– Le compartiment B : il correspond au reste de la bande de labour et est constitué de terre provenant de l'ancien horizon H5, retourné lors du labour.

Le but recherché à travers cette stratification du profil cultural est la mise en évidence d'une éventuelle différence de localisation du carbone, du phosphore et du potassium en relation avec le régime de travail du sol antérieur.

– On a dressé une carte des états structuraux (MANICHON, 1982) pour chacune des bandes de labour identifiées (5 par profil).

– Ensuite, sur la même face d'observation, on a dressé une carte racinaire, en utilisant une grille de maille carrée de 2 cm de côté, en notant dans chaque case la présence ou l'absence de racines (TARDIEU et MANICHON, 1987).

Enfin, dans chacun des compartiments A et B de H5, on a prélevé un échantillon de terre pour analyse, soit 5 couples (A, B) par profil. Dans l'horizon superficiel, on a également prélevé 5 échantillons, au droit de chaque bande de labour repérée. On a mesuré sur tous les prélèvements les teneurs en carbone (méthode Anne), phosphore (Dyer) et potassium échangeable (extraction à l'acétate d'ammonium).

## II. RÉSULTATS

### 1. Mise en évidence d'un effet du passé cultural sur la répartition spatiale du phosphore, du potassium et du carbone au sein de la couche labourée

Dans le tableau III sont présentés les résultats des analyses de  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  et C pour l'horizon superficiel (H1) et les deux compartiments de H5 dans les différentes situations étudiées.

Tableau III : Valeurs moyennes des teneurs en  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  et C total pour H1 et les deux compartiments de H5 dans les quatre situations étudiées.

*Mean values of  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  and C measured in the upper layer (H1) and compartments A and B of the other part of the Ap-layer (H5) (in one column, for a given element, values with the same letter are not different at the 0,01 level (Newman-Keuls test).*

		$S_{NT}$	$S_T$	$L_{NT}$	$L_T$
$P_2O_5$ (‰)	H1	0,72 b	0,66 b	0,80 a	0,77 a
	H5 B	0,79 b	0,58 b	0,84 a	0,79 a
	H5 A	1,07 a	1,13 a	0,78 a	0,84 a
$K_2O$ (‰)	H1	0,31 b	0,25 b	0,29 a	0,28 a
	H5 B	0,31 b	0,26 b	0,31 a	0,29 a
	H5	0,41 a	0,56 a	0,30 a	0,27 a
C (%)	H1	1,20 b	1,18 b	1,13 b	1,34 a
	H5 B	1,23 b	1,13 b	1,26 a	1,30 a
	H5 A	1,56 a	1,52 a	1,21 a	1,30 a

Pour un élément donné, les valeurs assorties d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas différentes au seuil  $\alpha = 1\%$  (test de Newman-Keuls).

Les résultats des tests sont donnés ici à titre indicatif, le mode de prélèvement ne garantissant pas l'indépendance des échantillons.

On constate, au sein des horizons H5 des différentes parcelles :

- une teneur élevée dans le compartiment A des parcelles S ;
- des teneurs de même ordre de grandeur entre compartiments A et B dans les situations L.

Par ailleurs, les teneurs relevées dans l'horizon superficiel H1 sont :

- comparables à celles des compartiments A et B dans les parcelles L (sauf pour ce qui concerne le carbone en  $L_{NT}$  où la valeur est plus faible) ;
- comparables à celle du compartiment B dans les situations S.

Les résultats obtenus sont conformes à ce que l'on attendait de l'effet de l'histoire culturale :

- dans les parcelles S, le compartiment A, issu d'un horizon enrichi par le régime de travail superficiel, présente des valeurs plus élevées des teneurs mesurées. A l'inverse, l'horizon H1, constitué de terre provenant du fond de la couche travaillée (effet de retournement du labour), présente des valeurs comparables à celles du compartiment B ;
- dans les parcelles L, la pratique du labour a amené un mélange de la terre arable qui se traduit par une moindre dispersion dans chacune des parties du profil étudiées.

Ce diagnostic peut cependant être amélioré si l'on remarque que la méthode de prélèvement retenue (échantillonnage systématique par couple) permet d'étudier l'hétérogénéité de répartition en analysant les écarts de teneurs entre compartiments A et B d'une même bande de labour. En effet, cette méthode de comparaison limite les causes d'erreur liées à la variabilité spatiale des prélèvements (DAGNÉLIE, 1973).

Les données présentées dans le tableau IV illustrent les résultats de cette analyse pour le phosphore : ils confirment l'analyse faite ci-dessus, les écarts constatés étant voisins de 0 dans les parcelles L, significativement plus élevés dans les parcelles S. On note, en outre, que dans ces dernières l'écart est plus important en  $S_T$  qu'en  $S_{NT}$ . On a vérifié que ces conclusions étaient identiques pour le potassium et le carbone. Les trois teneurs étudiées sont d'ailleurs significativement corrélées.

Tableau IV : Ecarts des teneurs en  $P_2O_5$  Dyer entre compartiments A et B ( $P(A-B)$ ) (5 couples par situation)

*For  $P_2O_5$  Dyer, differences between A and B compartments ( $P(A-B)$ ), 5 couples in each plot.*

	$S_T$	$S_{NT}$	$L_T$	$L_{NT}$
Moyennes (‰)	0,55 a	0,28 b	0,05 c	-0,06 c
Ecarts types	0,14	0,21	0,05	0,12

Les valeurs assorties de lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha = 1\%$  (test de Newman-Keuls ; même remarque qu'au tableau III en ce qui concerne l'utilisation de ce test).

Ainsi, il existe dans les parcelles S une variabilité spatiale structurée de la répartition dans le profil des éléments étudiés ; cette variabilité est caractérisée par l'alternan-

ce de zones subverticales, respectivement moyennement riches (compartiments B) et très riches (compartiments A) en phosphore, potassium et carbone. Cette hétérogénéité est cependant plus marquée en  $S_T$  qu'en  $S_{NT}$ .

A l'inverse, dans les parcelles L, cette hétérogénéité de répartition n'existe pas et les teneurs mesurées sont très proches sur l'ensemble du profil.

## 2. Observation de l'état structural et de l'enracinement du maïs

En  $S_T$  et  $L_T$ , dominant dans H5 des zones massives, d'état interne  $\Delta$  (c'est-à-dire dont l'espace poral structural est nul, MANICHON, 1987), séparées par des discontinuités structurales, les interbandes (Fig. 1) et des fentes de retrait.

Dans les parcelles  $S_{NT}$  et  $L_{NT}$ , au contraire, les zones qui dominent présentent une morphologie de type fragmentaire et la terre fine y est abondante.

Les fentes de retrait y sont moins nombreuses et plus réduites. On note cependant, localisées sous les traces de roues (une par profil, soit 15% de la surface décrite), des zones d'état structural de type "C".

De plus, les mottes d'état interne  $\Delta$  observées dans les compartiments B, hors traces de roues, ne présentent pas le même type de répartition par classe de taille (tableau V): en  $S_{NT}$ , cette répartition est plus homogène qu'en  $L_{NT}$ . Il semble donc exister un arrière-effet de l'histoire culturale ancienne sur l'état physique de la couche labourée dans les parcelles où le compactage post-labour ne l'a pas fait disparaître.

Tableau V : Distribution par classe de taille des mottes  $\Delta$  identifiées dans les compartiments B, hors traces de roues,  $L_{NT}$  et  $S_{NT}$

Size distribution of  $\Delta$  clods identified in the B compartments, outside track wheels, in  $L_{NT}$  and  $S_{NT}$

Classe de taille (1)	Fréquence par classe de calibre (2)	
	$S_{NT}$	$L_{NT}$
1 - 10 cm	33	53
10 - 20 cm	66	33
20 cm	-	14

(1) plus grande dimension des mottes – (2) sur 190 cm de profil analysé

L'analyse des cartes racinaires (tableau VI) montre que :

– la fréquence de cases occupées par au moins une racine est nettement plus faible dans les parcelles tassées que dans les zones hors traces de roues des parcelles non tassées ;

– la répartition spatiale des racines est de type groupé en  $L_T$  et  $S_T$ , l'essentiel du système racinaire étant localisé dans les fentes de retrait, zones dans lesquelles on observe, en outre, un mauvais contact des racines avec la terre.

Enfin, l'horizon superficiel (H1) est fortement colonisé dans les deux types de profils observés.



Tableau VI : Fréquence de cases avec au moins un impact de racine

*Frequency of squares having at least one root impact (see TARDIEU and MANICHON, 1987)*

POURCENTAGE DE CASES OCCUPÉES		COMPARTIMENT A		COMPARTIMENT B	
		hors roue	sous la roue	hors roue	sous la roue
présentant au moins un impact	S <sub>NT</sub>	52	31	58	27
	L <sub>NT</sub>	57	18	50	18
	L <sub>T</sub>	16	19	13	26
	S <sub>T</sub>	8	18	12	9
pour lesquelles la racine est dans une fente de retrait	S <sub>NT</sub>	8	9	9	0
	L <sub>NT</sub>	0	0	13	0
	L <sub>T</sub>	82	66	77	96
	S <sub>T</sub>	75	86	72	82

En résumé, quand l'état de la couche labourée a été dégradé, le volume exploré par le système racinaire est fortement réduit et sa progression en profondeur dans H5 est liée à celle des fentes de retrait, au sein desquelles les conditions de fonctionnement sont perturbées, les racines n'étant pas adhérentes à la terre.

Dans les situations non tassées, au contraire, une proportion plus faible d'obstacles structuraux (zones d'état interne  $\Delta$ ) entraîne une meilleure colonisation de H5, des distances entre racines moins importantes qu'en situation tassée et une meilleure adhérence de celles-ci à la terre.

### 3. Mesures de végétation

#### a) Biomasse aérienne et composantes du rendement (tableau VII)

Les rendements atteints sur les parcelles non tassées (environ 90 qx de grain à 0% d'humidité) sont élevés pour du maïs non irrigué dans cette région. Par contre, les niveaux de production atteints sur les parcelles tassées sont nettement plus faibles. Dans ce cas, d'ailleurs, on remarque que le nombre de grains par unité de surface et le poids d'un grain ont été affectés. D'autre part, dès le stade 11 feuilles, la production de matière sèche était plus faible dans ces parcelles : l'écart entre situations s'est donc manifesté dès le début du cycle du maïs. Le classement des situations, pour l'ensemble de ces variables, est :

$$S_{NT} = L_{NT} > L_T > S_T$$

#### b) Niveau de prélèvement des éléments minéraux

Les données présentées (tableau VIII) permettent de comparer les niveaux de prélèvement mesurés au stade 11 feuilles. Ils ont été calculés à partir de la teneur plante entière et de la production de matière sèche surfacique (quantité = teneur x MS/m<sup>2</sup>) avant que n'interviennent des pertes d'éléments par lessivage (SAYRE, 1955 ; HANWAY, 1962, cité par ARNON, 1975 pour le potassium). Les valeurs obtenues permet-

tent donc d'évaluer les quantités d'éléments prélevés jusqu'au stade 11 feuilles. Le classement des situations est :

$$S_{NT} > L_{NT} > L_T > S_T$$

Les coefficients de variation pour ces mesures sont de l'ordre de 4 à 20%, ce qui ne remet pas en cause le choix des stations d'observation.

Tableau VII : Analyse de la variance des mesures effectuées sur la végétation  
*Variability analysis of the crop measurements*

		$S_{NT}$	$L_{NT}$	$L_T$	$S_T$
Rendement (g/m <sup>2</sup> )	$\bar{x}$	919,4 a	896,5 a	678,1 b	442,0 c
à 0% d'humidité	C.V. %	6	14	5	12
Poids d'un grain (g)	$\bar{x}$	0,3273 a	0,3210 a	0,2970 b	0,2547 c
	C.V. %	5,4	6,8	4,5	6,5
Nombre de grains surfaccique	$\bar{x}$	2809,0 a	2792,8 a	2283,2 b	1735,4 c
Matière sèche totale à la récolte (g/m <sup>2</sup> )	$\bar{x}$	1872,5 a	1710,8 a	1139,8 b	733,5 c
	C.V. %	6	13	7	11
Matière sèche totale au stade 11 feuilles	$\bar{x}$	483,7 a	440,7 a	181,6 b	52,7 c
	C.V. %	5	12	8	7

Pour une variable donnée, les valeurs assorties d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil  $\alpha = 1\%$  (test de Newman-Keuls).

Tableau VIII : Niveaux de prélèvement de N, P et K au stade 11 feuilles

Indice 100 = 9,31 g/m<sup>2</sup>, 1,48 g/m<sup>2</sup> et 17,78 g/m<sup>2</sup> respectivement pour N, P et K en  $L_{NT}$

*Levels of N, P and K uptakes at the 11 leaf-stage*

*Index 100 = 9.31 g/m<sup>2</sup>, 1.48 g/m<sup>2</sup> and 17.78 g/m<sup>2</sup> resp. for N, P and K in  $L_{NT}$*

		$S_{NT}$	$L_{NT}$	$L_T$	$S_T$
N		117 a	100 b	37 c	12 d
	C.V. %	4	11	14	17
P		120 a	100 b	30 c	9 d
	C.V. %	7	14	19	13
K		114 a	100 b	33 c	10 d
	C.V. %	5	7	14	19

Pour un élément donné, les valeurs assorties d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil  $\alpha = 1\%$  (test de Newman-Keuls).

### c) Observation des symptômes de déficience de la nutrition minérale

Les contrôles effectués tout au long du cycle du maïs ont révélé l'apparition de symptômes de déficience de la nutrition minérale (THEVENET et TAUREAU, 1985) très marqués dans les parcelles tassées. On n'a pas noté de tels symptômes dans les parcelles non tassées.

En  $S_T$ , on a noté des symptômes de déficience de la nutrition phosphorique (bandes rouge-violet occupant toute la largeur du limbe de l'ensemble des feuilles) ; en  $L_T$ , on a observé des signes de carence en azote (dessèchement de l'extrémité des feuilles les plus âgées affectant la zone centrale du limbe).

## III. DISCUSSION

### 1. Variabilité spatiale de la teneur en éléments fertilisants

Pour interpréter la variabilité spatiale de la répartition des éléments étudiés, nous avons fait l'hypothèse d'un enrichissement de l'horizon H1 en régime de travail superficiel et d'une homogénéisation liée au mélange de la terre dans les parcelles labourées de longue date.

Différents auteurs ont observé des situations analogues : BALLAND (1982) et MONNIER *et al.* (1976) à Boigneville (91), sur un sol voisin de celui de Grignon et dans le cadre d'un essai comparable, ne notent pas d'écart de teneur entre H1 et H5, en situation régulièrement labourée. Ils observent, en revanche, un enrichissement de H1 en régime de travail superficiel. BODET et FOURBET (1976) font des observations comparables pour P et K à Grignon, sur les mêmes parcelles que celles présentées ici. Enfin, CIHACEK *et al.* (1974) montrent qu'après trois années successives de labour, on obtient une répartition homogène du phosphore (apporté en surface la première année) au sein de la couche labourée.

Cependant, la comparaison de situations différenciées par l'état physique de la couche labourée (qui n'existait pas dans les essais que nous venons de citer) montre que l'arrière-effet du régime de travail superficiel n'a pas la même intensité suivant que l'état structural de la couche labourée est ou n'est pas dégradé. On observe, en effet, une hétérogénéité de répartition plus marquée en  $S_T$  qu'en  $S_{NT}$ .

Dans la mesure où l'état initial avant labour était le même dans les deux situations, ce résultat pourrait s'expliquer par un brassage de la terre en  $S_{NT}$ , du fait d'une activité biologique plus intense dans la couche labourée qui n'a pas été compactée. Ce brassage aurait alors pu entraîner, dans le cas du phosphore, deux types de conséquences qui ne s'excluent d'ailleurs pas :

- soit un plus grand mélange de terre entre les compartiments A et B de  $S_{NT}$ , diminuant ainsi l'écart en enrichissant le compartiment B en phosphore ;
- soit, par l'intermédiaire de l'enrichissement en carbone de ce compartiment, une redistribution du phosphore total vers des formes liées à la matière organique.

On note, par ailleurs, une élévation de la teneur en carbone dans les compartiments B de  $S_{NT}$  par rapport au même compartiment de  $S_T$ .

Il est donc possible de conclure au caractère limité du mélange de terre des différents horizons de la couche travaillée par le labour. Utilisant les éléments P, K et C comme

"marqueurs" de ce mélange dans les situations S, nous avons constaté que lorsqu'il existe une hétérogénéité spatiale de leur répartition avant le labour, celui-ci ne permet pas une homogénéisation suffisante pour la faire disparaître. Il semble cependant que lorsque l'état structural n'est pas dégradé après le labour, on puisse observer une diminution de l'écart entre teneurs grâce à un brassage biologique plus important.

## 2. Comportement de la végétation

L'analyse des données concernant la croissance du maïs et son alimentation minérale (niveaux de prélèvement, symptômes de déficience) oppose nettement les situations dans lesquelles l'état physique a été dégradé à celles n'ayant pas subi de compactage après le labour de 1988.

Les conséquences d'un état physique dégradé sur la croissance du maïs ont souvent été décrites ; elles sont liées à :

- une moindre fourniture d'azote par le sol, en raison de la diminution de la minéralisation de la matière organique (MEYNARD, 1985 ; MANICHON, 1987) ;

- la limitation du volume exploré par les racines qui ne peuvent croître et se ramifier – quand l'état de la couche labourée est de type C – que dans les fentes de retrait et dont la progression en profondeur est liée à l'évolution de ces dernières (TARDIEU et MANICHON, 1987) ; on observe également, dans ce cas, de mauvaises conditions de fonctionnement du système racinaire ;

- une perturbation de l'alimentation hydrique du maïs ; à cet égard, l'étude de l'évolution de la différence P - ETP au cours de l'année 1988 fait apparaître des périodes de sécheresse ( $P < ETP$ ) au cours de la troisième décade de juin et à partir du 15 juillet, date du début de la "période critique" du maïs. Les observations faites par TARDIEU et MANICHON (1987) montrent que ces périodes de sécheresse, même si elles n'épuisent pas la réserve en eau du sol, induisent des stress hydriques sur le maïs quand son enracinement est déficient. Dans les parcelles  $S_{NT}$  et  $L_{NT}$ , au contraire, les problèmes d'alimentation hydrique n'apparaissent pas avant la deuxième décade d'août.

Si l'état structural est bien à l'origine des écarts observés entre situations tassées et non tassées, on constate cependant qu'il existe des différences entre  $S_{NT}$  et  $L_{NT}$  d'une part, et entre  $S_T$  et  $L_T$  d'autre part.

### *Ecart entre $S_{NT}$ et $L_{NT}$*

Les niveaux de prélèvement d'éléments minéraux sont plus importants en  $S_{NT}$  qu'en  $L_{NT}$ , sans que cela se traduise par un écart significatif des mesures de végétation (biomasse, composantes), même si l'on remarque que le classement est toujours en faveur de  $S_{NT}$ . Dans ces situations, l'absence d'obstacles structuraux a permis aux racines de coloniser l'ensemble du profil, tant en  $S_{NT}$  qu'en  $L_{NT}$ . Cependant, en  $S_{NT}$ , une partie du système racinaire a eu accès aux zones correspondant aux compartiments A.

L'hétérogénéité de répartition observée en  $S_{NT}$  se traduit donc par une fertilisation localisée dans ces zones de faible volume mais fortement enrichies (rappelons que les compartiments B ont des richesses comparables). On sait par ailleurs que la capacité d'absorption des racines n'est pas, en soi, limitante (MAERTENS, 1970).

*Ecart entre  $S_T$  et  $L_T$* 

Entre ces situations, les différences de prélèvement se traduisent par des écarts significatifs sur la production de matière sèche et les composantes du rendement. En  $S_T$ , l'accès aux zones enrichies n'a été possible que lorsque les fentes de retrait ont recoupé les compartiments A (un cas sur les six fentes de retrait observées dans le profil cultural examiné).

Par ailleurs, on constate dans cette parcelle une moindre richesse du compartiment B. Ceci pourrait provenir d'un appauvrissement progressif de l'horizon non repris en régime de travail superficiel ; en régime de labour, par contre, cette partie de l'horizon était réalimentée tous les ans en éléments fertilisants.

Enfin, à ces causes de limitation de l'alimentation minérale liées aux quantités d'éléments accessibles, il faut ajouter les perturbations dues aux conditions de fonctionnement des racines, rendues difficiles par les conditions climatiques de l'année d'étude, caractérisées par des périodes de sécheresse dès la troisième décennie de juin.

Ainsi, en  $S_T$  et  $L_T$ , l'effet de la localisation des éléments fertilisants n'a pas été efficace du fait de la diminution de la capacité d'interception du système racinaire liée à la présence d'obstacles structuraux et renforcée par les conditions hydriques de la campagne. On peut penser que, dans des conditions climatiques plus favorables, on n'aurait pas observé une discrimination aussi nette de ces situations.

## CONCLUSIONS

Il existe une certaine cohérence des résultats présentés dans cet article :

- les trois marqueurs utilisés pour caractériser l'effet de mélange de la charrue amènent à des conclusions comparables ;
- les réactions du maïs à l'état du sol créé correspondent aux observations de différents auteurs ayant étudié le fonctionnement du système racinaire de cette plante.

Il est donc possible d'en tirer un certain nombre de conclusions.

L'effet de mélange par la charrue est limité : lorsque, avant le labour, existe une variabilité de la répartition des éléments peu mobiles dans le sol, elle se conserve après cette opération. Mais cette variabilité tend à disparaître sous l'effet du brassage de terre résultant de l'activité biologique du sol, lorsque l'état physique de la couche labourée est favorable à cette activité.

Dans la mesure où la capacité d'absorption des racines n'est pas, en soi, limitante, une localisation des éléments minéraux dans certaines parties du profil cultural ne pose problème que lorsque l'accessibilité à ces zones par les racines est compromise par la présence d'obstacles structuraux, et ce d'autant plus que se produisent des périodes de sécheresse au cours du cycle de la culture.

Les conséquences que l'on peut tirer de ces quelques points concernent, d'une part les itinéraires techniques, d'autre part l'appréciation de la composante chimique de la fertilité d'un sol.

Si les substances localisées en surface avant le labour avaient été toxiques et peu mobiles dans le sol, on peut penser que les réactions de la végétation auraient été contraires à celles observés en  $S_{NT}$ . Ce cas peut se présenter, par exemple, lors de retournement de cultures mal implantées où l'on cherche à éliminer, par dilution, les résidus d'herbicides. Une meilleure connaissance du comportement du sol sous l'action du labour pourrait alors permettre de mieux prévoir les résultats de cette opération, donc de mieux raisonner le choix des itinéraires techniques.

Par ailleurs, la signification en matière de diagnostic et de pronostic des critères de fertilité chimique fondés sur des prélèvements de terre prenant en compte l'ensemble de la couche labourée peut être remise en cause lorsqu'il existe une variabilité spatiale des éléments considérés. Pour ce qui concerne le phosphore, par exemple, en tenant compte des valeurs moyennes correspondant à chacun des compartiments A et B, une analyse de la couche labourée aurait donné les valeurs suivantes ( $P_2O_5$  Dyer en ‰ de la terre fine) : 0,89 - 0,80 - 0,81 et 0,81 respectivement pour  $S_{NT}$ ,  $S_T$ ,  $L_T$  et  $L_{NT}$ . L'interprétation étant pour toutes les situations, "très élevée" aurait été mise en défaut en  $S_T$  et  $L_T$ .

Reçu pour publication : Octobre 1989

Accepté pour publication : Février 1991

## BIBLIOGRAPHIE

- ARNON J., 1975. – *Mineral nutrition of maize*. International Potash Institute. Ed. Bern (Suisse).
- BODET J.-M., FOURBET J.F., 1976. – Incidence de la simplification du travail du sol sur le devenir du Phosphore et du Potassium. In : *Simplification du travail du sol en production céréalière*. Colloque ITCF, Paris, 7-8/12/1976.
- BALLAND D., 1982. – Phosphore, Potassium, Magnésium et la simplification du travail du sol. *Persp. Agric.*, **56**, 32-47.
- CIHACEK L.J., MULVANEY D.L., OLSON A., WELCH L.F., WIESE R.A., 1974. – Phosphate placement for corn in chisel and moldboard plowing systems. *Agr. J.*, **66** (5), 660-665.
- DAGNELIE P., 1973. – *Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques*. Les Presses Agronomiques de Gembloux, 2<sup>e</sup> éd.
- FOURBET J.F., 1975. – Effets à long terme des techniques simplifiées du travail du sol. In : *La simplification des techniques de travail du sol*. SEI, Etude n° 59, INRA-INA/PG, 145-205.
- GACHON L., 1977. – Le phosphore dans le sol. In : *Le phosphore et son emploi dans l'agriculture*. Cycle sup. d'Agronomie, ADEPRINA, Paris, 82-119.
- HANWAY J.J., BARBER S.A., BRAY R.H., CALDWELL A.G., FRIED M., KURTZ L.T., LAWTON K., PESEK J.T., PRETTY K., REWED M., SMITH F.W., 1962. – North central regional potassium studies. III. Field studies with corn. *Iowa Agric. Exp. Stn. Res. Bull.*, 503.

- MAERTENS C., 1970. – *Influence des conditions de milieu sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par le système racinaire de quelques graminées cultivées*. Thèse Univ. P. Sabatier, Toulouse, France.
- MANICHON H., 1982. – *Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique*. Thèse Docteur-Ingénieur, INA-PG, Paris.
- MANICHON H., 1987. – Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. In : *Soil Compaction and Regeneration*, G. Monnier & M.J. Goss Ed., Baalkema Rotterdam/Boston, 39-52.
- MEYNARD J.M., 1985. – *Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver*. Thèse Docteur-Ingénieur, INA-PG, Paris.
- MONNIER G., STENGEL P., BODET J.-M., 1976. – Conséquences de la répartition des matières organiques sur le comportement du sol. In : *Simplification du travail du sol en production céréalière*. ITCF, Paris, 7-8/12/1976, 151-166.
- SAYRE J.D., 1955. – Mineral nutrition of corn. In : *Corn and corn improvement*. Sprague Ed., Academic Press, New York, 293-314.
- RECAMIER A., 1970. – Les herbicides et la possibilité de suppression du labour. In : *Herbicides et techniques de culture*. Colloque FNGPC-COLUMA, Versailles, 11-12/02/1969, 63-69.
- TARDIEU F., MANICHON H., 1987. – Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II. Croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agro-nomie*, 7 (3), 201-211.
- THEVENET G., TAUREAU J.C., 1985. – Diagnostic des carences sur blé et sur maïs. *Persp. Agric.*, numéro spécial 89.

