

# Étude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce

B. Nicoullaud, R. Darhout et Odile Duval

Collaboration technique de C. Le Lay, B. Renaux et B. Terrasse.

INRA - SESCOF, Centre de Recherches d'Orléans, F45160 Ardon

## RÉSUMÉ

La réduction des pertes en nitrates et une meilleure gestion de l'eau sont des impératifs auxquels l'agriculture moderne se doit de répondre compte tenu des contraintes environnementales et économiques. C'est dans ce contexte qu'une étude pilote conjointe entre différents partenaires (INRA, Chambre d'Agriculture...) a été mise en place en Petite Beauce du Loiret.

L'étude a porté sur la distribution spatiale de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs au stade floraison, dans des sols argilo-limoneux non calcaires reposant à profondeur variable sur des calcaires en place ou sur des matériaux limono-calcaires fins cryoturbés (MLCF). Une stratégie d'échantillonnage a été définie en fonction des systèmes de culture et de la connaissance des différents types de sols acquise lors de l'élaboration de la carte des sols du secteur. La méthode utilisée est la cartographie des racines sur des plans verticaux à l'aide d'une grille de 20 x 20 mm de maille élémentaire.

La profondeur d'apparition du calcaire de Beauce en place ou d'un encroûtement calcaire détermine la profondeur d'enracinement du blé et du maïs. Dans les sols limoneux profonds sans obstacles à l'enracinement, le blé peut descendre au delà de 1,7 m de profondeur. Pour le maïs, la profondeur d'enracinement dans les horizons limono-calcaires cryoturbés peut être estimée par une relation linéaire simple en fonction de la profondeur d'apparition de ces horizons.

Le blé colonise intensément les horizons de surface sans que l'on puisse mettre en évidence de différences notables entre itinéraires techniques, compte tenu des dates tardives d'observation et de la forte fissuration qui s'est développée. Cette colonisation est significativement supérieure à celle du maïs. Pour celui-ci, les colonisations les plus faibles sont celles des parcelles insuffisamment tassées. La colonisation des horizons profonds par le blé est nettement plus importante que celle réalisée par le maïs. Pour les deux cultures, nous avons mis en évidence des relations significatives entre la colonisation des horizons H5 (+H6) et celle des horizons B1.

A l'aide des critères que nous avons mis en évidence, il est possible dans cette petite région agricole de prévoir la profondeur d'enracinement des deux cultures à partir d'une reconnaissance à la tarière des horizons pertinents pour les sols étudiés. Toutefois ce travail mérite d'être complété et étendu à d'autres sols et à d'autres cultures du secteur.

## Mots clés

Système racinaire, sol argilo-limoneux, *Triticum aestivum* L, *Zea mays* L, Beauce.

## SUMMARY

### VERTICAL DISTRIBUTION OF WINTER WHEAT AND MAIZE ROOTS IN LOAMY CLAY SOILS OF "PETITE BEAUCE".

Environmental and economic constraints have made modern farming systems reduce nitrate losses and improve water management. In this context, a joint experimental study between different partners (INRA, Chambre d'Agriculture...) has been established in the area of Petite Beauce (Loiret).

The vertical distribution of wheat and maize roots was studied at flower stage in loamy soils (table 1), on hard limestone or on fine cryoturbated calcareous deposits (MLCF). A strategy of samplings was defined (figure 1) according to knowledge about farming systems (tables 2 and 3) and soil types. The root systems were studied by using in-situ root mapping on vertical plane (figure 2). For wheat, the biomass weights and the yield components of the no irrigated plots (table 4, figure 3) are reduced by drying conditions (table 5). Conversely, biomass weights of irrigated maize plots do not differ between plots (table 4). Root contact frequency curves (for wheat) plotted against depth are shown in figure 4. The ploughed horizon is intensively colonized by wheat. We did not observe important effect of work technics used (table 6) in reason of the later date of the root observations and of many cracks that are developed in spring. For wheat (figure 5) and maize (figures 6 and 7), the depth of an obstacle (hard limestone or calcareous overcrusting) defined the rooting depth. Without obstacle, the rooting depth of wheat may be more than 1.7 meter depth. For soils on MLCF, the rooting depth of maize can be connected to a simple linear relationship with the depth of the cryoturbated calcareous deposits (figure 6). The loamy clay horizons are very homogeneous (table 7) and we found a simple linear relationship between the colonisation of the H5 (+ H6) horizons and the colonisation of the B1 horizons for the two crops (figure 8). For the same soils the colonisation by maize is less important than wheat in the ploughed horizon and in depth (figure 9).

With the indicators used, it is possible to plan the rooting depth after making auger holes in the studied soils. Nevertheless, this work would deserve to be completed and extended to other soils and other crops of this area.

#### Key-words

Root system, loamy clay soil, *Triticum aestivum* L., *Zea mays* L., Beauce.

## RESUMEN

### ESTUDIO DEL ENRAIZAMIENTO DEL TRIGO DE INVIERNO Y DEL MAÍZ EN LOS SUELOS ARCILLO-LIMOSOS DE «LA PETITE BEAUCE»

La reducción de pérdidas en nitrógeno y una mejor gestión del agua son imperativos que la agricultura moderna se debe de contestar debido a las limitaciones ambientales y económicas. Es en este contexto que un estudio piloto con diferentes instituciones (INRA, Cámara de Agricultura...) fue instalado en Petite Beauce del Loiret.

La meta del estudio es la distribución espacial del enraizamiento del trigo de invierno y del maíz al estado de la floración, en los suelos arcillo-limosos no calcáreos reposando a profundidad variable sobre calizas o materiales limoso-calcáreos finos crioturbados (MLCF). Una estrategia de muestreo se definió en función de los sistemas de cultivos y del conocimiento de diferentes tipos de suelos adquiridos al momento de la elaboración del mapa de suelos del sector. El método usado consiste en la cartografía de raíces sobre planos verticales con ayuda de una reja de 20 x 20 cm. de maya elemental.

La profundidad de aparición de la caliza de Beauce o de un encostramiento calcáreo determina la profundidad de enraizamiento del trigo y del maíz. En los suelos limosos sin obstáculos al enraizamiento, el trigo puede bajar más allá de 1,7 m de profundidad. Para el maíz, la profundidad de enraizamiento en los horizontes limoso-calcáreos crioturbados puede ser estimada con una relación lineal simple en función de la profundidad de aparición de estos horizontes.

El trigo coloniza intensamente los horizontes de superficie sin que se puede poner en evidencia diferencias notables entre los itinerarios técnicos, teniendo en cuenta las fechas tardías de observación y de la fuerte fisuración que se desarrolló. Esta colonizaciónes significativamente superior a la del maíz. Para este, las colonizaciones las más ligeras son las de las parcelas insuficientemente compactadas. La colonización de los horizontes profundos por el trigo es netamente más importante que la realizada por el maíz. Para los dos cultivos, hemos puesto en evidencia relaciones significativas entre la colonización de los horizontes H5 (+ H6) y de los horizontes B1.

Gracias a los criterios que hemos caracterizado, es posible en una pequeña región agrícola de preveer la profundidad de enraizamiento de dos cultivos a partir de un reconocimiento a la barrena de los horizontes pertinentes para los suelos estudiados. Sin embargo este trabajo necesita de ser completado y extendido a otros suelos y otros cultivos del sector.

#### Palabras claves

Sistema radical, suelos arcillo-limosos, *Triticum aestivum* L., *Zea mays* L., Beauce.

La réduction des pertes en nitrates vers les nappes souterraines et une amélioration de la gestion de l'eau nécessitent une meilleure prise en compte de l'utilisation de l'azote et de l'eau des sols par les peuplements végétaux. L'ajustement de la fertilisation azotée est réalisé dans de nombreuses régions françaises en utilisant la méthode du bilan prévisionnel (Rémy, 1981). Pour sa mise en œuvre, cette méthode nécessite plus particulièrement des mesures de reliquats azotés à la sortie de l'hiver et la connaissance de la profondeur d'enracinement des cultures afin d'estimer la part de reliquat utilisable par les plantes (Machet, 1991). La connaissance de la profondeur d'enracinement est donc un critère important qui permet également de déterminer le volume d'eau directement accessible à la plante (Grégory, 1989). Le mode de disposition spatiale des racines peut enfin permettre de juger de la plus ou moins grande efficacité des systèmes racinaires à utiliser l'eau et les éléments minéraux (Tardieu et Manichon, 1987b). Dans une étude antérieure, Nicoulaud *et al.*, (1994) ont montré que la profondeur d'enracinement et le volume de sol prospecté par une culture de maïs peuvent différer fortement en fonction des caractères permanents du milieu.

Une étude pilote visant à mettre en œuvre les recommandations du CORPEN (1) a été mise en place en Petite Beauce du Loiret. La cartographie et la caractérisation des sols sur une aire échantillon de 3 000 ha (Duval et Isambert, 1992) font apparaître que dans bien des situations, la profondeur de l'enracinement semble limitée par des niveaux induisant un obstacle mécanique aux racines (calcaire de Beauce en place ou remanié, horizons indurés). Les différentes situations ayant servi de support à l'étude ont été choisies dans ou au pourtour immédiat du secteur ayant préalablement fait l'objet d'une cartographie pédologique.

L'objectif de l'étude est de caractériser à l'aide d'une méthode de cartographie racinaire (Tardieu et Manichon, 1986) la colonisation racinaire de deux cultures dont les cycles diffèrent fortement, le blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L) et le maïs (*Zea mays* L) et de l'analyser en fonction des caractéristiques permanentes du milieu afin de dégager des indicateurs pouvant servir à la prévision de l'enracinement de ces cultures.

## MATÉRIEL ET MÉTHODE

### Caractéristiques du secteur d'étude

Nous allons caractériser le secteur du point de vue des exploitations agricoles et des sols.

(1) : Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates

### Les exploitations agricoles

Dans ce secteur de la Petite Beauce, les exploitations sont essentiellement céréalières avec pour cultures principales le blé tendre, le blé dur, l'orge, le maïs et les pois. Le blé tendre occupe de 28 à 36 % de la SAU et le maïs de 20 à 38 %. Les surfaces irrigables représentent de 65 à 90 % de la SAU. Une quarantaine d'exploitations agricoles ont été enquêtées, afin de disposer pour chaque culture d'au moins une trentaine de parcelles avant d'effectuer une sélection.

### Les sols

L'étude de l'enracinement a porté sur des sols argilo-limoneux moyennement profonds à profonds qui représentent 62 % de la superficie du secteur cartographié, le reste de la surface étant couvert par des sols superficiels, caillouteux et calcaires. Les sols se sont développés dans un matériau limoneux reposant sur différents niveaux calcaires. Ces derniers sont des formations limono-calcaires fines souvent associées à des phénomènes de cryoturbation, ou des calcaires en bancs plus ou moins altérés (Gigout, 1973).

Une description succincte des horizons caractéristiques des sols est donnée ci-après. Le *tableau 1* illustre la composition physico-chimique de trois profils représentatifs de la variabilité rencontrée.

#### La couverture argilo-limoneuse

Elle peut être divisée en deux niveaux majeurs : l'horizon de surface Ap et les horizons argilo-limoneux sous-jacents B.

L'horizon labouré, épais de 0,25 à 0,30 m est de texture argilo-limoneuse, à teneur en argile comprise entre 31 et 35 % et à teneur en matière organique variant de 2,0 à 2,5 %. La structure est variable et présente un mélange de mottes poreuses et de mottes compactes de petite taille. Le complexe adsorbant est saturé en calcium.

Les horizons sous-jacents, intermédiaires entre l'horizon labouré et le substratum calcaire, ont une épaisseur comprise entre 0,25 et 0,80 m. La texture est argilo-limoneuse (32 à 40 % d'argile) et le complexe adsorbant saturé en calcium. La structure est prismatique fine (à sous-structure polyédrique) et la porosité des agrégats est élevée. Ces horizons résultent principalement de l'altération du matériau parental. Dans les sols les plus profonds, ils peuvent avoir subi un léger lessivage. Ces horizons seront appelés B d'une façon indifférenciée.

#### Le matériau limono-calcaire fin (MLCF)

Situé sous l'argile limoneuse et caractérisé par les horizons C (*tableau 1*), son épaisseur varie de quelques centimètres à plus de 1 mètre. Il est constitué d'un mélange de limon, de calcaire fin et de petits graviers calcaires dont la proportion peut devenir importante. Ce matériau a été remanié par des phénomènes de solifluxion et de cryoturbation, ce qui explique une certaine hétérogénéité dans sa teneur en calcaire fin (15 à 65 %) et en graviers. Il se présente souvent sous forme de poches.

**Tableau 1** - Propriétés physico-chimiques de trois profils représentatifs des situations étudiées.**Table 1** - Physical and chemical properties for the three soil types of the studied situations.

SOL LIMONEUX PEU PROFOND SUR CALCAIRE DUR															
Horizon	prof. cm	E.G. %	Granulométrie %					M.O. %	pH eau	CaCO <sub>3</sub> tot. %	complexe adsorbant cmol+/kg				
			A	LF	LG	SF	SG				CEC	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
Ap	0-30		34,1	30,8	33,2	1,3	0,6	2,2	8,0		21,3	sat.	0,7	0,4	0,1
B1	30-50		32,4	31,6	34,7	1,0	0,3	1,0	8,1		15,7	sat.	0,5	0,3	0,3
B2	50-65		33,8	31,8	33,3	0,9	0,2	0,9	8,1		16,5	sat.	0,5	0,3	0,1
Cca	65-70		21,4	33,6	18,4	12,0	14,6	0,9	8,4	56,6	7,5	sat.	0,4	0,1	0,1
K	>70														
SOL LIMONEUX SUR MATÉRIAU LIMONO-CALCAIRE CRYOTURBÉ PEU PROFOND															
Horizon	prof. cm	E.G. %	Granulométrie %					M.O. %	pH eau	CaCO <sub>3</sub> tot. %	complexe adsorbant cmol+/kg				
			A	LF	LG	SF	SG				CEC	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
Ap	0-25		34,4	28,3	34,4	1,8	1,1	2,4	7,8		18,8	sat.	0,6	0,5	0,1
B	25-50		35,4	29,3	32,7	1,9	0,7	1,0	8,0		17,2	sat.	0,6	0,3	0,1
C1	50-70	1,0	19,2	33,3	26,8	12,1	8,6	0,7	8,3	32,7	11,8	sat.	0,5	0,2	0,1
C2	70-85	3,0	18,2	28,9	24,3	16,1	12,5		8,4	39,3	10,4	sat.	0,4	0,2	0,1
C3	85-100	3,0	15,6	29,4	21,9	18,8	14,3		8,4	42,9	10,1	sat.	0,4	0,1	0,1
SOL LIMONEUX PROFOND SUR MATÉRIAU LIMONO-CALCAIRE CRYOTURBÉ PROFOND															
Horizon	prof. cm	E.G. %	Granulométrie %					M.O. %	pH eau	CaCO <sub>3</sub> tot. %	complexe adsorbant cmol+/kg				
			A	LF	LG	SF	SG				CEC	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
Ap	0-25		31,1	30,2	35,3	2,1	1,3	2,4	7,4		19,1	sat.	0,8	0,4	0,1
B1	25-40		35,8	30,4	31,8	1,5	0,5	1,2	7,7		17,9	sat.	0,8	0,4	0,1
B2	40-55		37,6	29,2	30,8	1,7	0,7	1,0	7,9		18,1	sat.	0,8	0,4	0,1
B3	55-90		37,3	31,0	29,0	1,7	1,0	0,9	8,1		19,5	sat.	0,9	0,3	0,1
C1	90-110	1,0	34,2	34,1	22,6	4,5	4,6	0,9	8,4	16,9	16,6	sat.	1,2	0,3	0,1
C2	110-140	1,0	32,9	34,1	22,9	5,3	4,8		8,4	21,4	16,8	sat.	1,2	0,2	0,1
C3	140-150	1,0	31,9	31,4	25,3	5,0	6,4		8,3	10,5	25,0	sat.	1,7	0,3	0,2

Ap : horizon labouré

Cca : encroûtement calcaire

B : horizon argilo-limoneux intermédiaire

K : calcaire de Beauce

C : matériau limono-calcaire cryoturbé

La structure est à tendance polyédrique quand le matériau est peu profond et de texture limono-argileuse. Elle est à tendance massive quand le matériau est plus profond (> 0,80 m). La porosité est forte.

#### *Les niveaux carbonatés*

Ces niveaux peuvent créer un obstacle mécanique aux racines. Nous avons différencié les encroûtements calcaires (Cca) et le calcaire de Beauce (K).

Les encroûtements calcaires sont des niveaux blanchâtres, plus ou moins indurés et peu épais (3-10 cm), très riches en calcaire (de 65 à 85 % CaCO<sub>3</sub>). Ils apparaissent localement et de façon discontinue au sommet du matériau limono-calcaire ou au sommet du calcaire de Beauce remanié. Ils peuvent être massifs et compacts.

Le calcaire de Beauce est un calcaire blanchâtre massif, peu fissuré, dur, à teneur très élevée en carbonate de calcium (> 95 % CaCO<sub>3</sub>). Localement, il existe des faciès de couleur grisâtre, faiblement argileux et plus tendres.

Tous les sols étudiés présentent un drainage satisfaisant en raison de la forte porosité des horizons. Il faut également souligner la grande uniformité des teneurs en argile des horizons de surface (33 % en moyenne) quel que soit le sol considéré.

### **Critères de choix des sites d'étude**

Les parcelles sont choisies de façon à rendre compte de la variabilité des critères décrits ci-dessus, c'est-à-dire principalement ceux liés aux systèmes de cultures et ceux liés aux sols. L'enquête de quarante exploitations céréalières a permis de présélectionner une soixantaine de parcelles semées en blé ou maïs dans une rotation céréalière et en sol argilo-limoneux. La sélection définitive a été réalisée à partir d'une série de contrôles au champ afin que les conditions de sols et de cultures suivantes soient remplies.

#### **Critères liés aux systèmes de culture**

Nous avons cherché à disposer de parcelles identiques selon une combinaison : variété, précédent cultural, travail du sol. Cette sélection s'est avérée particulièrement difficile pour les cultures de blé en raison du grand nombre d'itinéraires techniques et de variétés utilisées localement. Nous avons fait l'hypothèse d'un comportement voisin des variétés de blé (Rossini, Thésée, Soisson) présentant des longueurs de cycle et des dates de semis assez proches.

#### **Sélection basée sur les critères de sols**

Les critères de sol ont été jugés a priori prédominants pour la sélection des sites. L'échantillonnage a été constitué en fonction de la nature des matériaux et de leur profondeur, de manière à obtenir une certaine gamme de variation des conditions de sol.

#### *Cas du blé*

L'objectif prioritaire a été de sélectionner les sites en fonction de la profondeur d'apparition du calcaire de Beauce. Le choix des stations d'étude a donc été réalisé de façon à disposer d'un ensemble de situations où la couverture argilo-limoneuse varie de 0,50 m à 1,10 m d'épaisseur et repose directement sur le calcaire de Beauce (6 stations). Nous avons également étudié quatre stations où la couverture argilo-limoneuse repose sur le MLCF en adoptant la même stratégie d'échantillonnage (*figure 1*).

#### *Cas du maïs*

L'objectif a été également de tester si le calcaire de Beauce est un obstacle absolu à l'enracinement du maïs (dans une situation type : calcaire à 0,80 m de profondeur), mais surtout d'examiner comment le matériau limono-calcaire fin est colonisé par les racines (dans 2 situations types : MLCF à 0,50 m et à 0,85 m de profondeur).

Pour chaque situation type sous culture de maïs, les observations ont été réalisées dans trois parcelles (*figure 1*).

### **Échantillon retenu**

#### *Parcelles en blé*

Sur les 33 parcelles sélectionnées initialement, 10 ont été retenues (*tableau 2, figure 1*). Six parcelles avaient comme précédent un maïs associé pour cinq d'entre elles à un semis simplifié à la volée, sans labour préalable, réalisé avec un outil combinant une houe rotative et un semoir (de type sémavator, dans la suite de l'exposé, nous utiliserons seulement ce terme). Quatre parcelles avaient comme précédent une céréale à paille associée à un semis en ligne après labour. Six parcelles étaient irriguées.

#### *Parcelles en maïs*

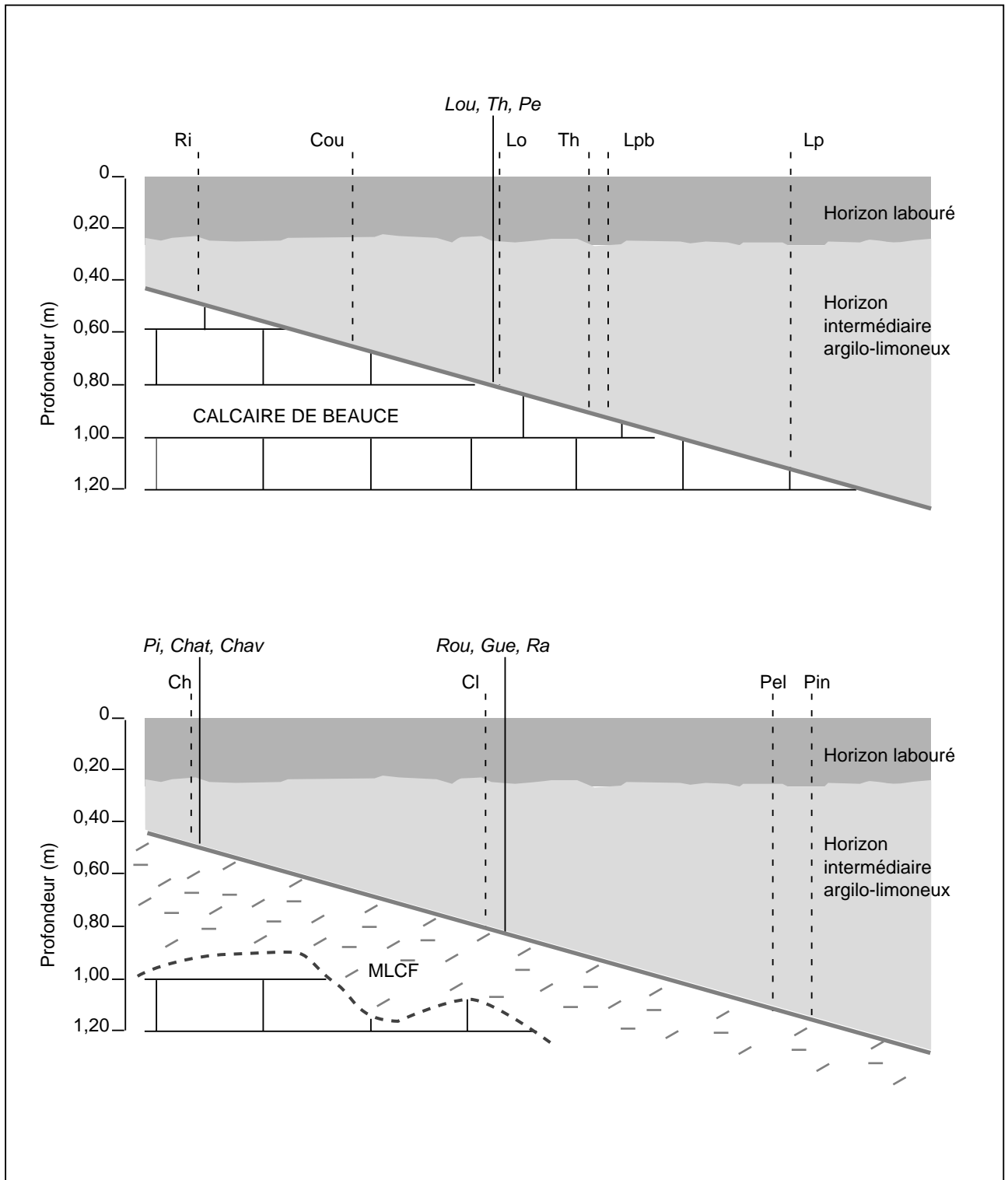
Nous avons retenu 9 parcelles (*tableau 3, figure 1*) sur un échantillon de départ de 31 parcelles. Toutes les parcelles ont été semées avec la variété Nobilis (1/2 précoce) avec la mise en œuvre de techniques culturales assez semblables, comportant un labour d'hiver à la charrue à socs et des reprises superficielles avec des outils à dents, avant le semis. Les écartements entre rangs étaient de 0,80 m pour des densités de semis variant de 100 000 à 110 000 pl/ha.

### **Mesures réalisées**

Les parcelles de blé ont été semées du 15 octobre au 15 novembre 1991 et les floraisons ont eu lieu dans la dernière décade de mai. Les parcelles de maïs ont été semées du 02 au 22 avril 1992 et les floraisons sont intervenues pendant la deuxième décade de juillet. Les systèmes racinaires ont été caractérisés deux semaines après la floraison quand la profondeur d'enracinement du blé (Baldy, 1973) et du maïs (Mengel et Barber, 1974 ; Tardieu et Manichon, 1987b) est à son maximum d'extension.

**Figure 1 - Stratégie d'échantillonnage en fonction des types de sols :**  
 Blé : tiretés verticaux      maïs : traits pleins verticaux  
 Ri : nom de la parcelle      Lou : nom de la parcelle

**Figure 1 - Sampling strategy related to soil types :**  
 Wheat : vertical dashed lines      maize : vertical full lines  
 Ri : name of the plot      Lou : name of the plot



**Tableau 2** - Itinéraires techniques mis en œuvre sur les parcelles étudiées en blé d'hiver (année 1991 - 1992).**Table 2** - Work technics used in studied winter wheat plots (year 1991-1992).

Parcelles	Ch	Cl	Cou	Lp	Lpb	Lo	Pel	Pin	Ri	Th
Variété	Th	S	S	S	S	S	S	R	S	S
Date de semis	23/10	18/10	30/10	27/10	23/10	22/10	22/10	24/10	15/10	5/11
Densité kg/ha	180	180	170	170	120	220	150	170	180	200
Précédent	M	M	M	M	BD	M	BT	BT	BT	M
Travail du sol	Sem	Sem	Sem	L + HR	L + HR	Sem	L + HR	L + HR	L + HR	Sem
Engrais N	200	272	250	170	220	200	200	180	180	200
Irrigation	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui

*R* : Rossini*HR* : Herse rotative*BD* : Blé dur*Th* : Thésée*L* : Labour*BT* : Blé tendre*S* : Soisson*Sem* : Semavator*M* : Maïs**Tableau 3** - Itinéraires techniques mis en œuvre sur les parcelles étudiées en maïs (année 1991-1992).**Table 3** - Work technics used in studied maize plots (year 1991-1992).

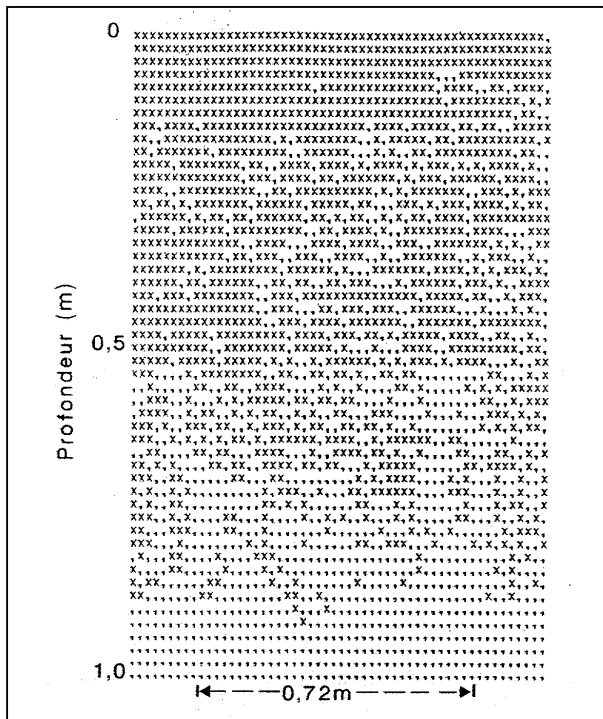
Parcelles	Lou	Pe	Th	Gué	Ra	Rou	Chav	Chat	Pi	
Date de labour	07/11	08/11	15/12	20/11	20/11	15/11	02/12	15/11	20/11	
Préparation	H + Ca	2 Vi	H + Cu + R + comb	2 Germ	H + Rh + comb	2H + R	HL + Ca + comb + R	HL + Ca + R	H + Rh	
Apports kg/ha	N	185	200	180	200	200	200	178	181	189
	P	120	270	150	100	125	80	75	120	160
	K	104	205	110	100	100	64	67	90	120
Autres		Zinc	Zinc	Zinc	Zinc	Zinc	-	-	-	
Date de semis	11/04	2/04	22/04	11/04	17/04	21/04	20/04	13/04	13/04	
Nombre de traitements phytosanitaires	4	3	3	4	3	2	5	5	3	
Apports* d'eau (mm)	120	140	100	140	80	100	100	105	105	

\* Apports d'eau effectués à la date du profil racinaire.

*H* : herse*Ca* : canadien*Cu* : cultivateur*R* : Rouleau*Comb* : Combiné*Ger* : Germinator*Rh* : Roto-herse*HI* : Herse lourde*Vi* : Vibroculteur

Figure 2 - Exemple de carte racinaire (blé d'hiver).

Figure 2 - Example of a root contact map (winter wheat).



Une surface sans mauvaises herbes et avec un peuplement régulier a été sélectionnée dans chaque parcelle.

Dans le cas du blé, le peuplement végétal a été caractérisé par des mesures de biomasses aériennes à la floraison et celles des composantes du rendement à la récolte. Les prélèvements ont été réalisés sur 10 rangs contigus de 1 m de longueur pour les semis en ligne et sur 6 placettes de 0,5 x 0,5 m pour les semis au semavator. Dans le cas du maïs, les biomasses ont été mesurées à la date de description du profil racinaire sur 12 pieds encadrant les faces observées.

Les quatre parcelles de blé non irriguées ont fait l'objet de mesures hebdomadaires d'évolution de l'humidité du sol à l'aide de suivis neutroniques.

La technique de caractérisation des enracinements utilisée est celle décrite par Tardieu et Manichon (1986). Une fosse, profonde de 0,80 m à 2 m selon les cas, a été creusée perpendiculairement aux rangs et entre 2 pieds consécutifs (maïs) et des faces verticales ont été préparées. Les faces verticales étudiées ont été au nombre de trois pour le blé (de 0,72 m de largeur chacune) et de deux pour le maïs (de 0,80 m de largeur chacune). Les racines ont été rendues visibles en découpant au couteau chaque face sur quelques millimètres d'épaisseur. Une grille à mailles de 20 mm de côté a été placée sur la face, et la présence ou l'absence de contacts racinaires a été notée pour

Tableau 4 - Matières sèches mesurées au moment du profil racinaire (blé et maïs) et composantes du rendement (blé). Les valeurs suivies par une même lettre ne diffèrent pas au seuil de 5 % selon le test de Newman et Keuls.

X : moyenne      σ : écart type

Table 4 - Dry matter measured at root observation date (wheat and maize) and yield components (wheat). Values followed by a common letter do not differ at the 5 % level according to the Newman and Keuls test.

X : mean      σ : standard deviation

BLÉ				MAÏS			
Parcelles	Biomasse aérienne X (t/ha)    σ	NPSH/m <sup>2</sup>	NbE/m <sup>2</sup>	Parcelles	densité (pl/ha)	Biomasse aérienne X (t/ha)    σ	
Lp	7,9 ± 1,3 a	245	452	Lou	93 750	8,4 ± 2,3 * a	
Ri	9,0 ± 0,6 a	413	511	Th	108 300	8,5 ± 2,0 a	
Pin	9,5 ± 0,9 a	289	397	Chav	106 400	9,2 ± 1,8 a	
Lpb	9,8 ± 1,1 a	204	502	Rou	106 200	9,3 ± 2,0 a	
Ch	11,8 ± 0,6 b	369	495	Pi	106 100	9,6 ± 1,7 a	
Th	12,7 ± 1,4 b	338	741	Ra	99 500	9,8 ± 1,2 a	
Cl	13,1 ± 0,9 b	290	780	Gue	102 000	10,4 ± 2,0 a	
Cou	13,6 ± 2,4 b	291	725	Pe	97 700	10,4 ± 1,4 a	
Lo	15,6 ± 2,1 c	444	759	Chat	106 250	10,7 ± 1,0 a	
Pel	16,9 ± 2,2 c	458	862				

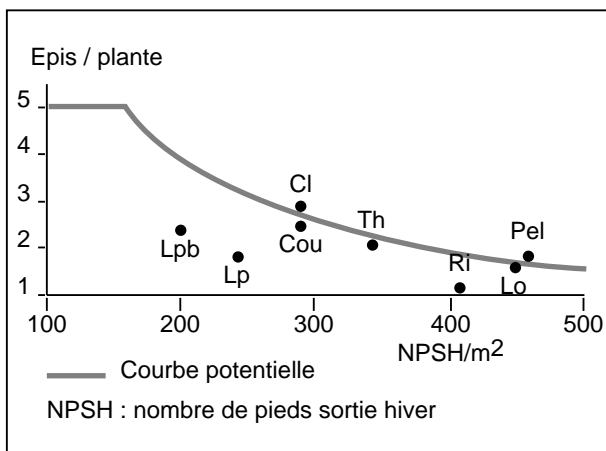
NPSH : Nombre de pieds sortie hiver  
NbE : Nombre d'épis

\* tiges couchées par une tempête juste après irrigation



**Figure 3** - Relation entre le nombre de pieds sortie hiver et le nombre d'épis/plante.

**Figure 3** - Relationship between the plant number at the end of winter and the ear number/plant ratio.



**Tableau 5** - Evolution de la réserve en eau des parcelles de blé non irriguées.

**Table 5** - Evolution of available water of the no irrigated plots of wheat.

Parcelles	Ri	Pin	Lpb	Lp
Date d'épuisement de la RU de l'horizon Ap	28/4	5/5	14/5	19/5
% de la RU consommée au 27/5/92	100 %	93 %	90 %	94 %

chaque maille carrée de 20 x 20 mm (un contact racinaire est l'intersection d'au moins une racine avec le plan observé). Un exemple de carte racinaire est donné en *figure 2*.

Les horizons ont été décrits selon la méthode STIPA (Système de transfert de l'information pédologique et agronomique, Bertrand *et al.*, 1979). Les principales limites d'horizons ont été relevées précisément. L'horizon de surface a été décrit et cartographié avec la méthode du profil cultural (Manichon, 1982 ; Manichon et Gautronneau, 1987).

Les enracinements sont évalués à partir de deux critères : la fréquence de contacts racinaires et la profondeur d'enracinement. La fréquence de contacts racinaires (F), calculée pour chaque horizon élémentaire de 20 mm est la proportion de maille avec au

moins un contact racinaire. La profondeur d'enracinement est définie comme la profondeur maximale à laquelle au moins un contact racinaire a été observé. Les deux critères de description des enracinements retenus vont par la suite être mis en correspondance avec les caractéristiques de sols.

Les conditions climatiques ont été analysées avec les données du poste de Bricy (Loiret) situé à moins de 10 km de l'ensemble des parcelles. L'hiver a été doux (la température minimale a atteint - 8,1°C), puis à partir du 10 avril les températures ont toujours été supérieures à 0°C. Les risques d'échaudage ont été faibles, les températures post floraison n'ayant dépassé 28°C que les 15, 16, 28 et 29 juin. L'évapotranspiration potentielle cumulée du 01/09/1991 au 31/07/1992 a été de 679 mm (644 mm pour la normale) alors que les pluies cumulées ont été de 380 mm pour la même période (594 mm pour la normale). Les pluies hivernales ont été particulièrement faibles (49,8 mm du 01/12/91 au 28/02/92) et le déficit hydrique des quatre mois suivants très important (P - ETP = - 233,8 mm). Pour le maïs, cette sécheresse s'est traduite par un déficit hydrique de 110 mm entre le 10 avril et le 20 mai, pendant la période de levée et de croissance juvénile.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

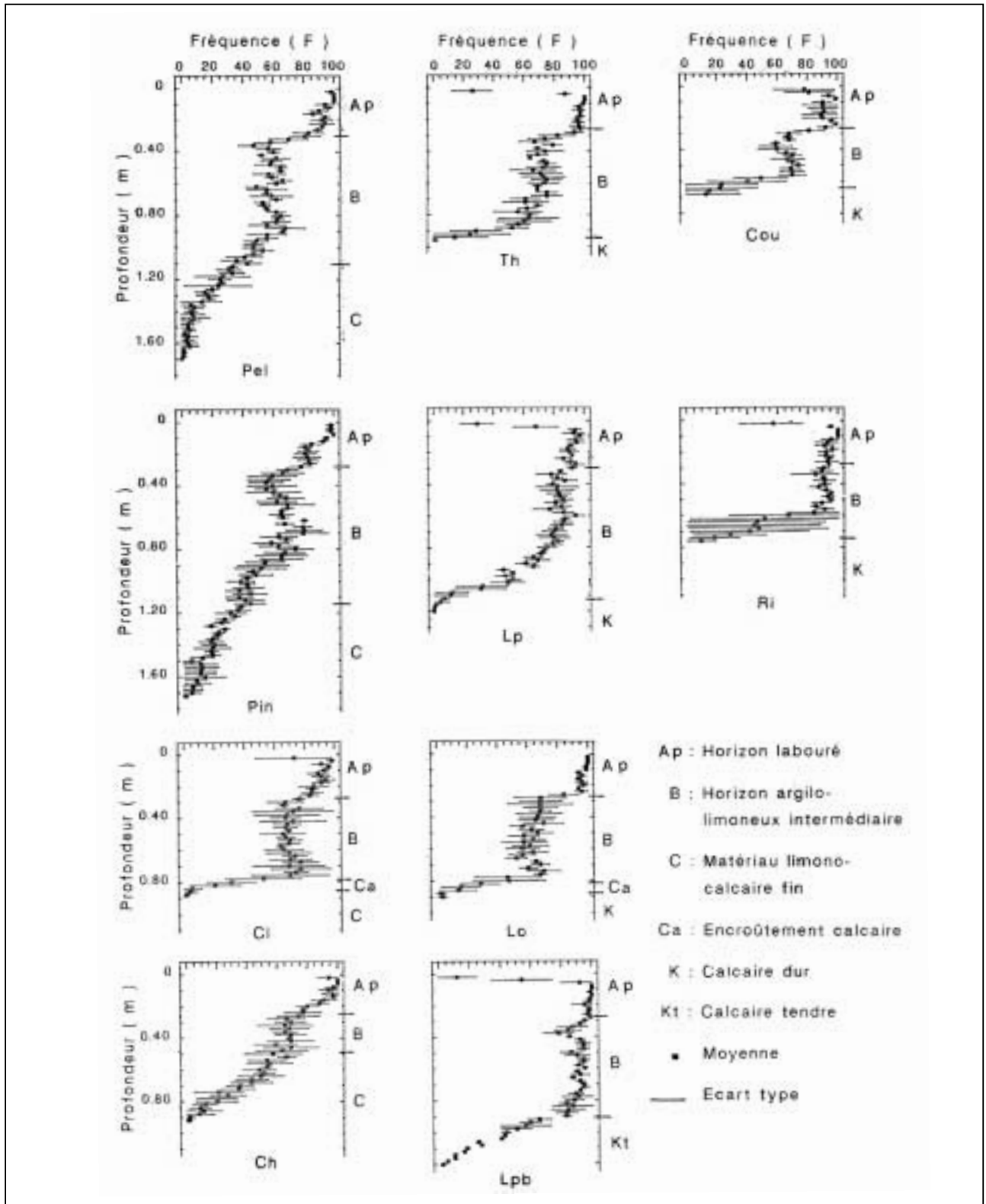
### Conditions climatiques de l'année et conséquences pour les peuplements végétaux

Le poids des matières sèches totales des parties aériennes mesurées au moment de la réalisation des profils racinaires diffère fortement entre les parcelles de blé (*tableau 4*). L'analyse des composantes du rendement et des suivis hydriques nous permet de faire un diagnostic selon les principes de la démarche proposée par Leterme *et al.* (1994). Pour la variété Soisson (*figure 3*), toutes les parcelles irriguées ont un nombre d'épis/plante (rapport entre le nombre de pieds sortie hiver et le nombre d'épis/m<sup>2</sup>) situé sur la courbe potentielle (Maraby *et al.*, 1994) ; ceci indique que ces parcelles n'ont pas subi de stress. Les points représentant les parcelles non irriguées sont par contre nettement au-dessous de la courbe potentielle.

Pour les variétés Rossini et Thésée, le diagnostic est réalisé à partir du nombre d'épis/m<sup>2</sup>. Il faut au moins atteindre le nombre de 500 épis/m<sup>2</sup> pour réaliser 100 qx/ha. Cette condition est remplie chez Ch (irrigué) mais ne l'est pas chez Pin (non irrigué, *tableau 4*). Les suivis hydriques montrent que toutes les parcelles non irriguées ont souffert d'un déficit hydrique précoce et sévère pendant la période de montaison et de floraison (*tableau 5*).

Pour le maïs, les poids des biomasses aériennes entre parcelles ne sont pas statistiquement différents (*tableau 4*).

**Figure 4 -** Fréquence de contacts racinaires en fonction de la profondeur (parcelles de blé d'hiver).  
**Figure 4 -** Root contact frequency (F) plotted against depth (plots of winter wheat).



Compte tenu des apports d'eau réalisés, toutes les parcelles ont eu une alimentation en eau très largement suffisante pour compenser la demande climatique : la somme (Réserve en eau + Pluies + Irrigations) est toujours supérieure à l'évapotranspiration réelle de 55 mm à 135 mm selon les parcelles, de la date du semis à la date du profil racinaire.

Il faut donc se poser la question de la validité des comparaisons entre parcelles compte tenu des relations d'allométrie entre poids des racines et poids des parties aériennes souvent évoquées par de nombreux auteurs (on pourra se reporter aux articles de synthèses suivants : Jordan, 1987 ; Habib *et al.*, 1991). Rappelons que l'indicateur utilisé n'est pas un indicateur de biomasse racinaire mais un indice de l'intensité de colonisation en rapport avec l'accessibilité de l'eau. Prenons comme exemples les parcelles Pel et Pin situées sur des sols comparables, profonds, sans obstacle mécanique à l'enracinement. Les biomasses aériennes diffèrent fortement (*tableau 4*) alors que dans les deux cas, les fréquences de colonisation racinaire sont très importantes et équivalentes sur l'ensemble du profil et notamment dans les horizons de profondeur (*figure 4*). L'indicateur que nous utilisons n'est effectivement pas relié aux biomasses aériennes.

## Mise en évidence des obstacles vis-à-vis de la pénétration des racines

### Distribution verticale des racines de blé en fonction de la profondeur

#### État de l'enracinement dans la couche labourée

Nous avons regroupé les parcelles selon deux modalités principales d'états structuraux. Les dénominations utilisées

**Tableau 6** - Fréquence de contacts racinaires dans les horizons H5 (+H6) des parcelles avec labour et sans labour (Les valeurs suivies d'une même lettre ne diffèrent pas au seuil de 5 % selon le test de Newman et Keuls).

**Table 6** - Root contact frequency in the H5 (+H6) horizons of the ploughed or no ploughed plots (Values followed by a common letter do not differ at the 5 % level according to the Newman and Keuls test)

BLE (var : Soisson)	Nombre de stations	Nombre de profils	Fréquence %
Semis en ligne précédent blé	3	9	92,0 ± 2,3a
Sémavator précédent maïs	3	9	92,2 ± 6,3a

sont celles définies par Manichon et Gautronneau (1987). Six parcelles sont de type O (de 88 % à 100 % d'état O à état interne dominant  $\Gamma$ , les autres sont de type B dominant, (mélange de 30 à 47 % de O, 42 à 53 % de B avec forte fissuration et de 0 à 20 % de C ; états internes dominants  $\Phi$  et  $\Gamma$ ). La comparaison des fréquences de colonisation en fonction des états structuraux est difficile du fait d'une fissuration générale importante, de la colonisation élevée des horizons de surface et de sa faible amplitude de variation (de 86 % à 96 %). Pour les états B, la fréquence de colonisation (FH5-6) des horizons H5 (+H6 quand celui-ci existe) des variétés Rossini et Thésée (Pin 83,7 % ± 4,7 et Ch 84,0 % ± 1,7) est un peu inférieure à celle de Soisson (Lp 92,0 % ± 0, Cou 92,0 % ± 7,2). Celle des autres parcelles où l'état O est largement prédominant varie de 88,0 % ± 4,7 à 98,0 % ± 1,7.

Nous avons comparé pour la variété Soisson, la fréquence (FH5-6) des parcelles à état structural O, soit avec semis en ligne et précédent blé (Lp, Pel, Ri) soit avec semis au sémavator et précédent maïs (Cl, Lo, Th). Il n'y a aucune différence entre les parcelles (*tableau 6*). Cependant, les observations faites pendant la période post floraison peuvent masquer un retard de colonisation précoce pour les semis au sémavator ou à état structural défavorable (Manichon *et al.*, 1985, 1987).

#### État de l'enracinement dans les horizons argilo-limoneux intermédiaires

Nous avons représenté sur la *figure 4* la fréquence de contacts racinaires (F) en fonction de la profondeur pour chaque station étudiée (valeur moyenne et écart type).

Dans les sols limoneux profonds (parcelles Pel et Pin), la fréquence est stable (de 60 à 70 % de contacts racinaires) entre 0,28 m et 0,80 m de profondeur puis diminue régulièrement jusqu'à 1,70 m. Les deux stations ont des courbes extrêmement proches. Dans les deux cas, F est encore remarquablement élevée à 1,20 m (de 30 à 35 %).

Dans la parcelle sur MLCF moyennement profond (Cl), la colonisation régulière entre 0,28 et 0,75 m de profondeur (environ 70 %) augmente légèrement au contact de l'encroûtement calcaire puis diminue brutalement à ce niveau.

Dans la station sur matériau limono-calcaire fin peu profond (Ch), F est stable (proche de 70 %) entre 0,26 m et 0,42 m de profondeur puis diminue régulièrement jusqu'à 0,90 m.

Dans les sols moyennement profonds sur calcaire dur (entre 0,80 m et 1,10 m), F est également relativement stable de la base du labour jusqu'à 0,80 m de profondeur. Sur cette profondeur, F varie de 70 % à 80 %. L'enracinement s'arrête brutalement au contact du calcaire de Beauce (Th, Lp) ou de l'encroûtement calcaire (Lo). La parcelle Lpb diffère des précédentes par le faciès du calcaire de Beauce. Il s'agit d'un calcaire légèrement argileux (grisâtre) dont l'altération est colonisée par les racines sur une profondeur de 0,30 m environ.

Dans les deux parcelles sur calcaire peu profond, on note une nette différence de la valeur de F : 60 % dans la parcelle irriguée à mauvais état structural (Cou) et 90 % dans la parcelle non irriguée à état structural favorable (Ri).

#### Détermination de la profondeur d'enracinement et relation avec l'obstacle

Compte tenu de la variabilité de la profondeur des horizons calcaires, nous avons utilisé ici la profondeur atteinte pour chaque profil élémentaire, ce qui permet ainsi d'avoir accès à une plus grande gamme de variation de profondeur testée. Nous n'avons tenu compte que des six parcelles où un obstacle a été identifié.

Les obstacles peuvent être de 2 natures : le calcaire de Beauce ou un encroûtement calcaire (situé soit au sommet du calcaire ou soit au sommet des poches de cryoturbation).

La figure 5 montre que les points représentant la profondeur d'enracinement et la profondeur d'apparition de l'obstacle sont fortement corrélés et se situent près de la bissectrice.

$$y = 0,948 x + 7,23, r^2 = 0,94, n = 18$$

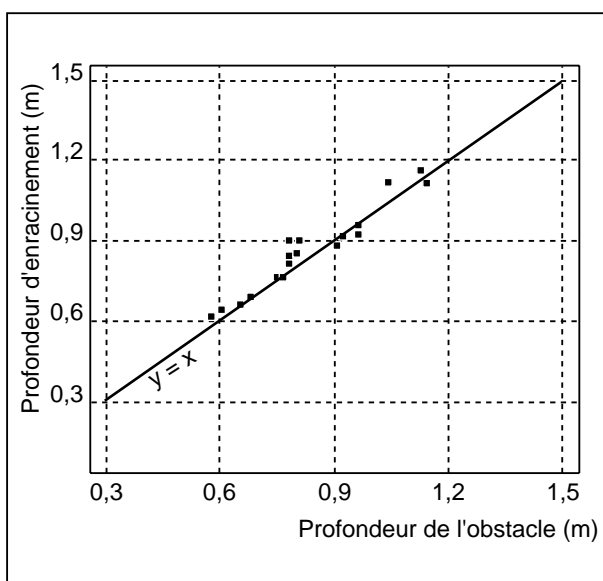
avec y = profondeur d'enracinement (cm) et

x = profondeur de l'obstacle (cm)

Les racines peuvent localement pénétrer les obstacles par des fissures ou par des poches de dissolution (points au dessus de la bissectrice).

**Figure 5** - Comparaison entre la profondeur d'enracinement et la profondeur de l'obstacle (parcelles de blé d'hiver).

**Figure 5** - Comparison between the rooting depth and the depth of the obstacle (plots of winter wheat).



#### Distribution verticale des racines de maïs en fonction de la profondeur

La figure 6 représente pour chaque station, la fréquence F (moyenne de deux profils élémentaires) en fonction de la profondeur.

##### État de l'enracinement dans la couche labourée

L'état structural dominant de toutes les parcelles est de type O. Dans trois parcelles (Chav, Lou, Th) l'état O ( $\Gamma$ ) représente de 62,5 % à 65,5 % du volume, le reste étant constitué d'état C (à état interne  $\Gamma$  ou  $\Phi$ ). Dans les autres parcelles l'état O représente plus de 75 % du volume et l'état interne  $\Delta$  ne dépasse pas 20 % du volume total. Nous avons noté également la présence d'horizons H6 sur de nombreux profils (figure 6). La fréquence de colonisation des horizons labourés (H5) est assez élevée : elle varie de 62 % à 80 %. Les colonisations les plus faibles (Chat 62 % et Gué 65 %) sont le fait de profils trop poreux et insuffisamment tassés. Compte tenu de la période de sécheresse qui a suivi le semis, la croissance des racines a peut-être été pénalisée. Dans quatre stations on note une diminution importante de F au niveau des horizons H6. Ces horizons sont peu fissurés (Pi) ou à fissuration moyenne (Chav, Rou, Chat).

##### État de l'enracinement dans les horizons argilo-limoneux sous-jacents

Dans les sols sur calcaire de Beauce, les fréquences (F) de colonisation diminuent régulièrement de la base du labour jusqu'au calcaire où l'enracinement s'arrête brutalement.

Nous observons également une diminution régulière de F dans les sols sur MLCF peu profond. Dans la parcelle Chav, il y a arrêt brutal sur l'encroûtement calcaire alors que les profondeurs atteintes dans les deux autres parcelles sont de 0,86 m et 0,90 m.

Dans les parcelles sur MLCF profond, la décroissance lente dans les horizons argilo-limoneux s'accroît dans le matériau limono-calcaire. Les profondeurs atteintes varient de 1 à 1,16 m.

##### Profondeur d'enracinement

La comparaison de la profondeur d'enracinement et de la profondeur de l'obstacle montre que, comme pour le blé, les points se répartissent autour de la bissectrice (figure 7). L'obstacle est 6 fois du calcaire de Beauce, et 2 fois un encroûtement calcaire (situé à la base du MLCF au contact du calcaire)

$$\text{L'équation est : } y = 1,01 x + 0,56, r^2 = 0,80, n = 8$$

avec y = profondeur d'enracinement (cm) et

x = profondeur de l'obstacle (cm).

Dans le cas où un obstacle est bien identifié, il est possible de prédire assez aisément la profondeur d'enracinement du maïs.

Dans les sols sur MLCF, la profondeur d'enracinement est

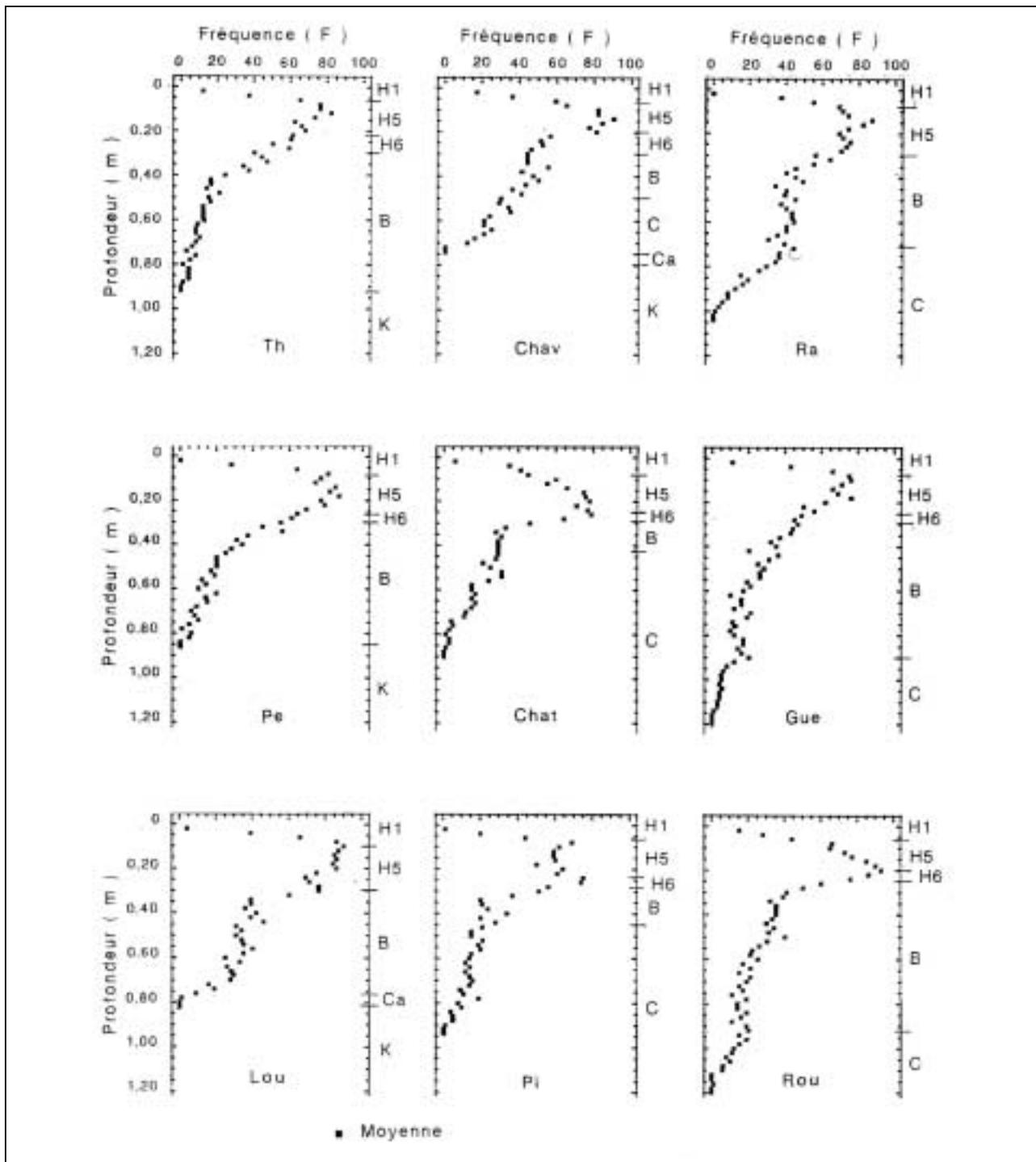
**Figure 6 -** Fréquence de contacts racinaires en fonction de la profondeur (parcelles de maïs).

H1 : lit de semence  
 H5 : horizon labouré  
 H6 : ancien H5

B : horizon argilo-limoneux  
 C : matériau limono calcaire fin  
 Ca : encroûtement calcaire  
 K : calcaire dur

**Figure 6 -**

Root contact frequency plotted against depth (plots of maize).



reliée à la profondeur d'apparition du matériau limono-calcaire par une relation linéaire (en pointillés) qui diffère fortement de la bissectrice.

L'équation est :  $y = 0,54 x_1 + 60,5$ ,  $r^2 = 0,90$ ,  $n = 10$

avec  $y$  : profondeur d'enracinement (cm) et

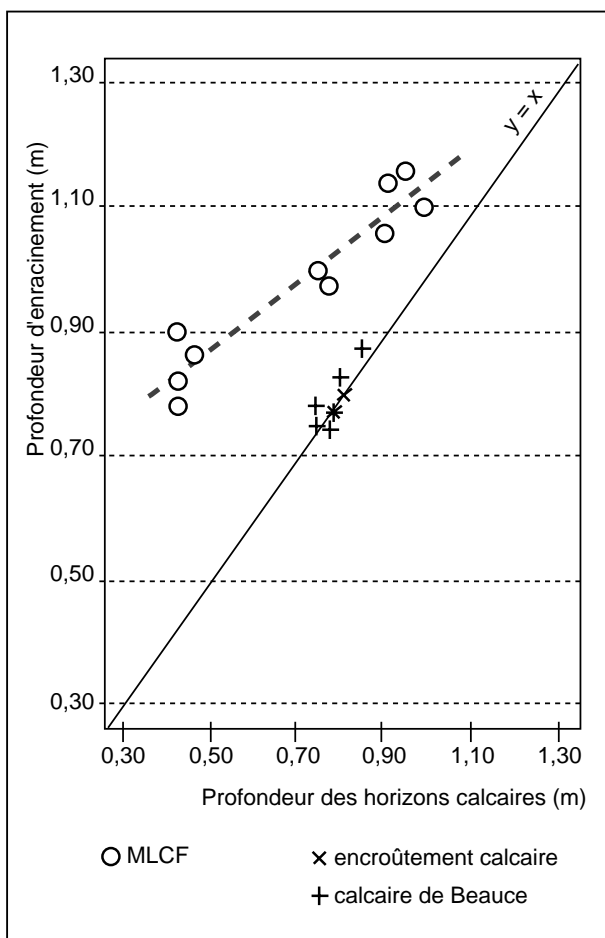
$x_1$  : profondeur d'apparition du matériau limono-calcaire (cm).

Cette relation signifie qu'en situation irriguée, moins le matériau limono-calcaire est profond et plus il peut être exploité par les racines ; un MLCF situé à 0,45 m de profondeur peut être pénétré de 0,40 m environ alors qu'un MLCF situé à 0,90 m ne peut l'être que de 0,15 m.

Deux facteurs peuvent être évoqués pour expliquer ces

**Figure 7** - Relation entre la profondeur d'enracinement et la profondeur d'apparition des horizons calcaires (parcelles de maïs).

**Figure 7** - Relationship between the rooting depth and the depth of the calcareous horizons. (plots of maize).



courbes. La densité d'enracinement décroît naturellement avec la profondeur (Tardieu et Manichon, 1987b). Les MLCF peu profonds ont une teneur en calcaire qui varie de 31 à 34 % entre 0,50 m et 0,70 m de profondeur et une structure bien exprimée (polyédrique) alors que les MLCF profonds ont une teneur en calcaire plus élevée (de 42 % à 75 %) et une structure plus grossière, voire massive en profondeur.

Il semble que dès que le matériau cryoturbé contient plus de 40 % de calcaire total, ce matériau devient moins favorable à l'enracinement que les horizons argilo-limoneux. Il ne s'agit pas d'un obstacle stricto-sensu mais plutôt d'un frein à l'enracinement. Ceci mériterait d'être confirmé par d'autres observations.

En l'absence d'obstacles, le blé tendre d'hiver colonise intensément et profondément les sols. Dans notre étude, la profondeur maximale atteinte (au moins 1,70 m) est de l'ordre de grandeur de celle mesurée (1,60 m) par Barraclough *et al.*, (1990). Les fréquences de colonisation sont encore importantes à 1,20 m de profondeur (>30 %). La méthode utilisée permet de calculer (Tardieu 1988, Nicoullaud *et al.*, 1994) qu'à une telle densité, 90 % du volume de sol est à moins d'une distance de 4 cm d'une racine, distance pour laquelle l'eau et l'azote dissous peuvent être considérés comme facilement utilisables. Ces résultats montrent que pour les sols de limons profonds, fréquents en Beauce et dans d'autres contextes pédologiques, il y aurait intérêt à réaliser les mesures de reliquats d'azote jusqu'à 1,20 m alors qu'elles sont réalisées actuellement jusqu'à 0,90 m. Dans le cas d'hivers relativement humides entraînant l'azote en profondeur, cette pratique conduit à sous-estimer sensiblement la part du reliquat azoté encore utilisable par le blé.

Dans le cas des sols argilo-limoneux reposant directement sur le calcaire de Beauce, les deux cultures ont des profondeurs d'enracinement proches de la profondeur d'apparition du calcaire, quelle que soit la profondeur de ce dernier. Celui-ci est en effet peu altéré ou fissuré dans la gamme des profondeurs étudiées. Le calcaire de Beauce apparaît donc comme un obstacle absolu aux racines contrairement aux horizons de calcaires crayeux étudiés par Louis (1989). Il en est de même des encroûtements calcaires, conformément aux observations réalisées en Champagne crayeuse par Boiffin *et al.*, (1981). Dans le cas des sols développés sur matériau limono-calcaire, nous avons mis en évidence que la profondeur d'enracinement du maïs peut être prévue à partir de la connaissance de la profondeur d'apparition de ce matériau (MLCF). Ces trois critères : profondeur du calcaire de Beauce, profondeur de l'encroûtement calcaire et profondeur du matériau limono-calcaire fin peuvent être considérés comme des niveaux repères majeurs vis-à-vis du thème envisagé.

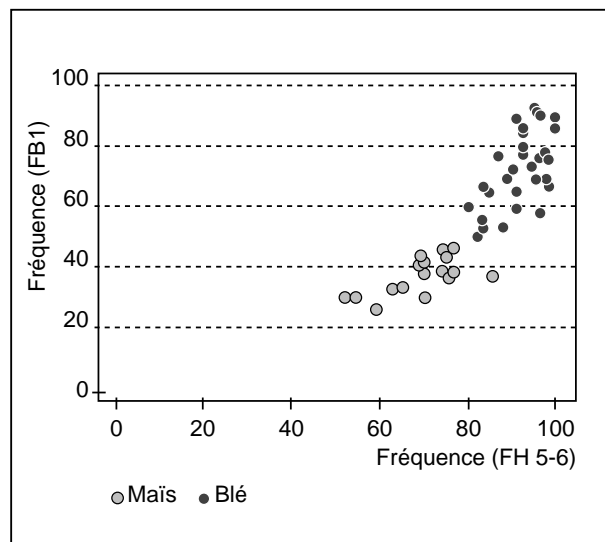
Nous ne pouvons pas expliquer les différences de colonisation des horizons argilo-limoneux par des différences

d'ordre pédologique tant ce milieu est remarquablement homogène (tableau 7). Les teneurs en argile y sont peu variables ainsi que les critères de structure et de porosité. Il est vraisemblable que la variabilité observée est due principalement aux différents itinéraires techniques appliqués sur les parcelles. Nous avons vu précédemment que de faibles colonisations des horizons de surface pouvaient être mises en relation avec des états structuraux peu favorables ; tassés (blé), trop poreux ou présence d'anciens labours mal structurés (maïs). La fréquence de colonisation (FH5-6) des horizons H5 (+H6) étant la résultante de l'action des différents itinéraires techniques, nous avons représenté en fonction de cette fréquence, la colonisation (FB1) moyenne de la base de l'horizon Ap jusqu'à 0,50 m de profondeur (horizon B1) pour l'ensemble des 48 profils élémentaires réalisés (figure 8). Malgré le nombre important de facteurs de variation (19 itinéraires techniques), nous obtenons des relations significatives pour chacune des deux cultures. Ces relations n'expliquent toutefois que de 36 % (blé) à 43 % (maïs) de la variabilité de la colonisation de B1. Pour mieux cerner cet aspect, il faudrait pour ces sols à forte évolution structurale (forte fissuration en raison de la teneur en argile), réaliser des profils culturaux plus tôt par rapport au cycle de la plante ou faire des essais spécifiques avec différents états structuraux comme traitements (Manichon et Tardieu, 1987a)

Le mode d'échantillonnage choisi nous permet de comparer les enracinements des deux cultures dans des sols identiques par la profondeur de limon et la nature du substrat. Des regroupements de parcelles basés sur ces deux caractéristiques peuvent ainsi être réalisés. Nous allons comparer les enracinements observés dans les sols constitués de 0,80 m environ de matériau argilo-limoneux reposant directement sur un obstacle : calcaire dur pour les parcelles de maïs (3 stations) et calcaire dur ou encroûtement calcaire pour le blé (parcelles Lo, Cl, Th). De même, des comparaisons sont envisageables dans

**Figure 8** - Relation entre la fréquence de contacts racinaires de H5 (+H6) et celle de l'horizon B1 pour les deux cultures.

**Figure 8** - Relationship between the root contact frequency of the H5 (+H6) horizon and the root contact frequency of the B1 horizon for the two crops.



les sols développés sur matériau limono-calcaire peu profond, bien que le nombre d'observations diffère ; 2 stations pour le maïs (Chat, Pi), 1 station pour le blé (Ch).

La comparaison des fréquences de colonisation des horizons de surface (figure 9a) montre que le blé (fréquence moyenne = 93,5 % ± 3,7 %) colonise plus intensément ces horizons que le maïs (fréquence moyenne = 71,2 % ± 9,5 %). Cette différence est due pour partie au peuplement en ligne de 0,80 m du maïs et à la faible colonisation de l'horizon superfi-

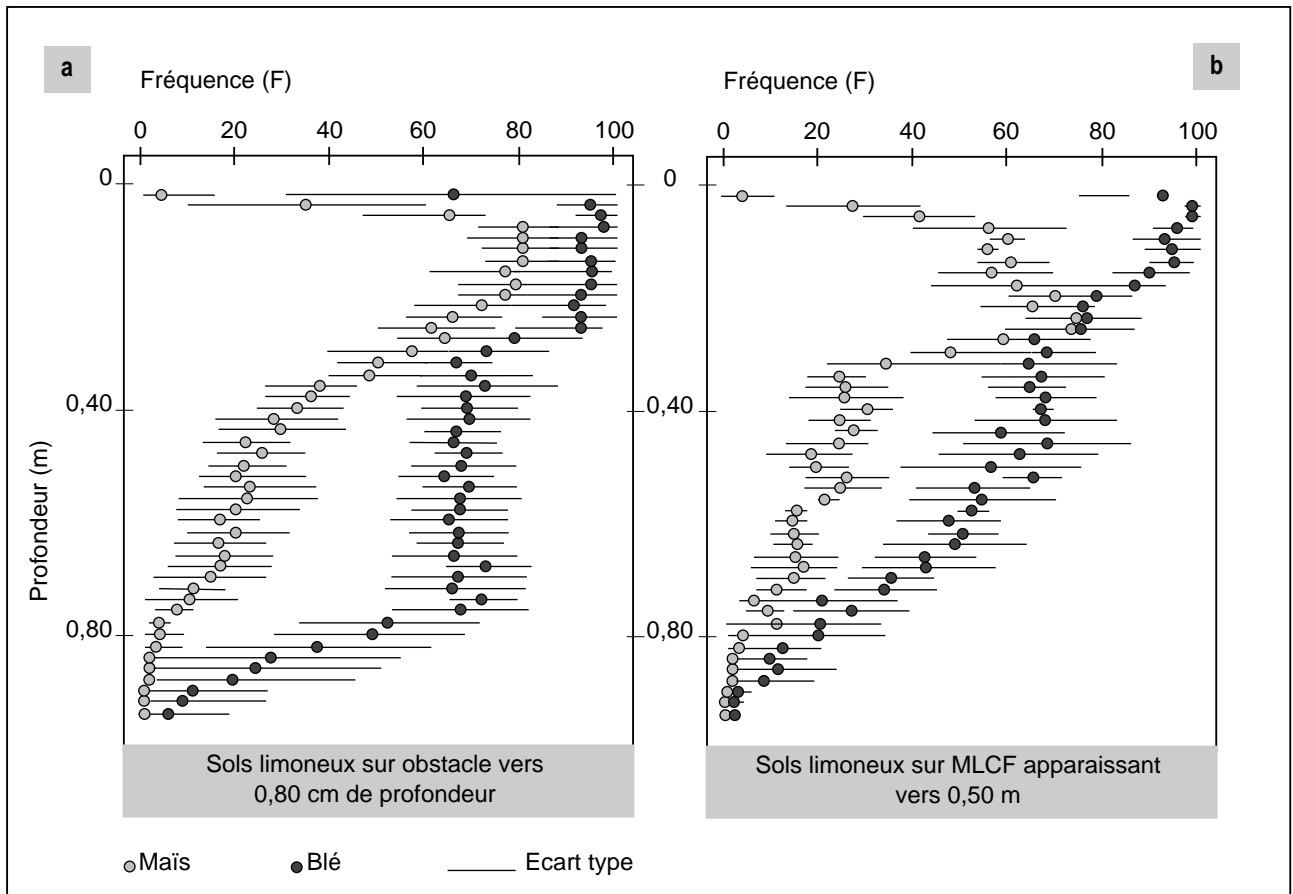
**Tableau 7** - Comparaison des horizons argilo-limoneux des parcelles de blé et de maïs.

**Table 7** - Comparison of the loamy clay horizons of the plots of wheat and maize.

		Nombre de Parcelles	Teneur en argile %		Structure	Porosité
			moyenne	extrêmes		
Horizon de surface	Blé	10	33,7 ± 1,7	31,0 - 37,0	/	forte
	Maïs	9	33,8 ± 2,0	31,0 - 35,8	/	forte
Horizon 0,30 - 0,50 m	Blé	10	35,4 ± 2,2	32,0 - 40,0	Polyédrique bien développée	forte
	Maïs	9	35,5 ± 2,5	32,4 - 40,5	Polyédrique bien développée	forte

**Figure 9** - Fréquence de contacts racinaires (blé/maïs) en fonction de la profondeur pour les mêmes types de sols.

**Figure 9** - Root contact frequency (wheat/maize) plotted against depth in the same soil types.



ciel (0-8cm) par ce dernier. De même, l'observation tardive des enracinements de blé peut masquer un défaut de colonisation en cours de cycle. Dans les horizons limoneux sous-jacents, nous constatons que la colonisation de l'ensemble du profil est beaucoup plus importante chez le blé. Elle est de l'ordre de 70 % de contacts racinaires entre 0,30 m et 0,80 m de profondeur, alors que pour le maïs on ne dépasse pas 40 %. Dans les horizons de surface des sols sur MLCF peu profond (*figure 9b*) la différence entre les deux cultures est plus importante que dans le cas précédent. C'est le résultat de conditions d'implantation défavorables pour le maïs (sol insuffisamment tassé et H6 mal structuré). Les différences se réduisent dans le matériau cryoturbé moins bien structuré en profondeur. A volume exploitable égal, le blé a une faculté beaucoup plus forte de colonisation que le maïs. Cela peut permettre une mobilisation plus rapide et plus intense des ressources du sol en eau, en azote voire en éléments minéraux en cas de demande clima-

tique ou biologique importante.

## CONCLUSION

Une connaissance préalable de la nature, des propriétés et de la répartition des sols d'une petite région est un outil puissant nécessaire à la mise en place d'un réseau d'enquête ayant pour objectif de connaître rapidement les caractéristiques des enracinements des cultures en fonction du milieu. La méthode utilisée dans notre étude s'est avérée performante et efficace pour réaliser ces diagnostics. Les résultats obtenus montrent que la profondeur d'enracinement peut être prévue à partir de critères pédologiques (horizons diagnostiques). Dans ce milieu très homogène, les fréquences de colonisation par les deux espèces sont importantes (potentiellement) et la variabilité observée suggère qu'elles dépendent essentiellement de l'action des différentes techniques culturales mises en œuvre.



En fonction des connaissances acquises, il reste à compléter l'échantillonnage déjà réalisé en étendant l'étude à d'autres cultures et à d'autres sols. Un réseau d'essai peut être envisagé pour étudier dans quelle mesure le reliquat azoté est mobilisable en profondeur en fonction de la densité et de la disposition spatiale des racines.

L'intégration des résultats en vue d'améliorer la gestion de la fertilisation parcelle nécessite encore une étape supplémentaire. En effet les parcelles sont de grandes tailles (10 à 50 ha), et sont constituées souvent de plusieurs types de sols. Si dans certains cas (sols sur calcaire dur ou sur matériau limono-calcaire), la simple connaissance du type de sol et de son extension peut s'avérer suffisante, il n'en est pas de même pour les sols présentant des encroûtements calcaires dont le diagnostic, la genèse et la localisation ne sont pas encore complètement connus.

Enfin, au cours de cette enquête, il est apparu qu'une meilleure gestion globale de la pollution nitrique passe par une meilleure maîtrise de l'irrigation sous peine de libérer en fin de culture, des parcelles dont la réserve en eau est presque entièrement reconstituée.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Mrs H. Manichon et J. Chrétien pour les remarques et suggestions constructives qu'ils ont apportées lors de l'élaboration de cet article.

## BIBLIOGRAPHIE

- Baldy Ch., 1973 - Progrès récents concernant l'étude du système racinaire du blé (*Triticum SP.*). *Ann Agron.* 24 (2) 241-276.
- Barracough P B., Kuhlmann H. and Weir A H., 1990 - The effects of drought and nitrogen on root growth and water uptake by winter wheat. *Proceedings of the ESA first congress, Paris 5th-7th december 1990.*
- Bertrand R., Falipou P., Legros J-P., 1979 - STIPA, Système de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique. Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sols en banque de données. INRA-IRAT, 119 p.
- Boiffin J., Caneill J., Meynard J.M., Sébillotte M., 1981 - Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse. III - Influence des variations pédologiques ; conséquences pour la conduite de la culture. *Agronomie*, 2 (5), 417-428.
- Duval O. et Isambert M., 1992 - Rapport sur l'étude pédologique du secteur de Villablain (Beauce). Doc. INRA 38 p.
- Gigout M., 1973 - L'altération périglaciaire du calcaire de Beauce. *Bull. de liaison labo ponts et chaussées. spécial U*, juin 1973. 54-59.
- Gregory P. J., 1989 - The role of root characteristics in moderating the effects of drought. In : *Drought resistance in cereals*, Baker (ed), 141-150.
- Habib R., Pagès L., Jordan M. O., Simmonneau T., Sébillotte M., 1991 - Approche à l'échelle du système racinaire de l'absorption minérale. Conséquences en matière de modélisation. *Agronomie*, 11 (8), 623-643.
- Jordan M. O., 1987 - Mise en place du système racinaire du maïs. I - Importance de quelques paramètres relatifs à la plante. *Agronomie*, 7 (6), 365-371.
- Leterme P., Manichon H., Estrade J.R., 1994 - Analyse intégrée des rendements du blé tendre et de leurs causes de variation dans un réseau de parcelles d'agriculteurs du Thymerais. *Agronomie*, 14, 341-361.
- Louis P., 1989 - Étude de l'enracinement du blé à la floraison en fonction des caractéristiques permanentes du sol : cas des sols crayeux de l'Aisne. *Mémoire Relance Agronomique* 64 p.
- Machet J. M., 1991 - Pourquoi et quand mesurer l'état minéral du sol en azote ? L'azote et le soufre dans le sol. *GEMAS*, 151-161.
- Manichon H., 1982 - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse doc. ing. INA-PG, 214p.
- Manichon H., Leterme P. et Buisson O., 1985 - Caractérisation des profils culturaux et des enracinements. Rapport intermédiaire, INA-PG, 27 p.
- Manichon H. et Gautronneau Y., 1987 - Guide méthodique du profil cultural. CEREF. GEARA, 71 p.
- Manichon H., Leterme P. et Buisson O., 1987 - État du profil cultural et enracinement du blé : campagne 1985-86 et essai de synthèse de deux années d'études. Rapport intermédiaire INA-PG, 22 p.
- Maraby J., Morin J.F., Ailliot B., Yvrard G., Le Gall A., Chevallier C., Goussault C., Robert D., Nicoullaud B., 1994 - Potentialités et références agronomiques. Résultats. Chambre d'Agriculture Région Centre, Orléans (FRA), 7 fiches.
- Mengel D.B. and Barber S.A., 1974 - Development and distribution of the corn root system under field conditions. *Agron. J.* 66, 341-344
- Nicoullaud B., King D. and Tardieu F., 1994 - Vertical distribution of maize roots in relation to permanent soil characteristics. *Plant and Soil*, 159 (2) 245-254.
- Rémy J C., 1981 - État actuel et perspectives de la mise en œuvre des techniques de la prévision azotée. *C R Acad. Agric. Fr* (67) 859-874.
- Tardieu F., Manichon H., 1986 - 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*, 7 (5), 415-425.
- Tardieu F., Manichon H., 1987 a - État structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. I - Modélisation d'états structuraux types de la couche labourée. *Agronomie*, 7 (2), 123-131.
- Tardieu F., Manichon H., 1987 b - État structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II - Croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agronomie*, 7 (3), 201-211.
- Tardieu F., 1988 - Analysis of the spatial variability of maize root density. II Distances between roots. *Plant and Soil*, 107, 267-272.

## Liste des abréviations

- H1 : Horizon de la couche labourée, affiné lors du travail superficiel  
H5 : Horizon non affiné de la couche labourée  
H6 : Ancien horizon labouré  
O : H5 de structure fragmentaire formée de terre fine et de mottes centimétriques  
B : H5 de structure fragmentaire formée de mottes décimétriques, séparées de fissures  
C : H5 de structure continue et compacte  
Γ : état interne des mottes : porosité structurale importante  
Δ : état interne des mottes : porosité structurale nulle  
Φ : état interne des mottes : porosité structurale réduite, mais fissuration des

mottes.