

Etude de l'effet à moyen et long terme des systèmes de culture sur la structure d'un sol limoneux-argileux du Nord du Bassin Parisien

Les enseignements de l'essai de longue durée d'Estrées-Mons (80)

H. Boizard⁽¹⁾, G. Richard⁽²⁾, P. Defossez⁽²⁾, J. Roger Estrade⁽³⁾ et J. Boiffin⁽²⁾

(1) INRA, Unité d'Agronomie de Laon-Reims-Mons, Estrées-Mons, B.P. 136, 80203 Péronne cedex, France

(2) INRA, Unité d'Agronomie de Laon-Reims-Mons, 02007 Laon Cedex, France

(3) INA P-G, UMR d'Agronomie INRA-INAPG, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France.

RÉSUMÉ

L'étude de l'évolution à moyen et long terme de la structure des sols préoccupe les agriculteurs du Nord du Bassin Parisien. En effet la fréquence parfois élevée des cultures de printemps (betterave, maïs, pomme de terre) dans la succession implique souvent des conditions d'intervention au semis ou à la récolte en conditions humides avec du matériel lourd et puissant. Un essai au champ de longue durée a été mis en place en 1989 à Mons en Chaussée en Picardie pour étudier l'évolution de la structure du sol sous l'effet de systèmes de culture représentatifs de cette région et se caractérisant par des risques de compactage très contrastés. Les trois systèmes de culture comparés comportent un labour annuel. Ils se différencient par la nature de la succession (pois/blé d'hiver/colza/blé d'hiver ou betterave/blé d'hiver/maïs/blé d'hiver) et par les règles de décision concernant les dates d'intervention lors des semis et des récoltes. Le suivi de la structure de la couche labourée est basé sur une approche morphologique permettant de décrire la structure de l'horizon labouré tous les ans après implantation de chaque culture de la rotation. Cette description est complétée par une évaluation quantitative de la proportion, dans la couche labourée, d'éléments structuraux dont la porosité structurale est très faible à nulle (état interne Δ). Les résultats présentés dans cet article montrent que cet indicateur est sensible, variant fortement d'une année à l'autre et entre les trois systèmes de culture. Ils suggèrent également que les évolutions observées sont réversibles. Concernant la partie du sol située sous le fond du labour, des observations complémentaires, menées dans le cadre de cet essai, ont montré que le passage répété d'engins de récolte en conditions humides provoquait un tassement de la couche de sol sous-jacente à l'horizon labouré sur une dizaine de centimètres d'épaisseur.

Mots clés

Structure du sol, lit de semences, analyse morphologique, compactage du sol, travail du sol, système de culture

SUMMARY**EFFECT OF CROPPING SYSTEMS ON THE STRUCTURE OF A SILTY LOAMY SOIL :
results of a long term experiment in northern France**

A field experiment was initiated in 1989 in northern France to evaluate the cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer of a loamy soil. Three cropping systems involving different crop rotations and cultivations (early or late sowing, early or late harvesting) were compared. Soil structure was evaluated in the ploughed layer after each crop was sown, using a morphological analysis method. We determined the proportion of highly compacted zones, i.e. the zones with a massive structure and no visible macropores in the ploughed layer. These zones, called Δ zones, result from severe anthropogenic compaction. The creation of Δ zones depended largely on the soil moisture at the time of field operations and the characteristics of the machinery used. Maximum compaction occurred mostly during harvesting in wet conditions because of high axle loads. In contrast, little compaction was produced during seedbed preparation, where lower axle loads and wide tyres were used. Consequently changes in soil structure depended to a large extent on the cropping system. However, the proportion of Δ areas was not stable, but fluctuated greatly from one year to the next. Δ zones could quickly disappear turned into fine soil. We therefore detected no irreversible effects on the structure of the ploughed layer, even for the cropping system that produced the highest annual risk of soil compaction. The combined effects of tillage and climate led to fewer compacted zones in the surface layer. Because this layer was mixed with deeper layers during soil inversion at the next ploughing, this contributed to fewer Δ zones in the whole layer. The loss of Δ zones over the whole cultivated layer could not be explained by this effect alone and the reduction in soil compaction was probably also due to the combined effects of loosening by mouldboard ploughing and climatic and soil fauna activities in the ploughed layer below the seedbed. A complementary experiment was used to study the effect of cropping system on subsoil compaction in 1998. The results showed a significant effect of cropping systems on the part of the profile located under the plough pan.

Key-words

Soil structure, seedbed, morphological analysis, soil compaction, soil tillage, cropping system

RESUMEN**ESTUDIO DEL EFECTO A MEDIO Y LARGO PLAZO DE LOS SISTEMAS DE CULTIVO SOBRE LA ESTRUCTURA DE UN SUELO LIMONO-ARCILLOSO DEL NORTE DE LA CUENCA PARISINA: enseñanzas del ensayo de larga duración de Estrées-Mons (departamento 80)**

El estudio de la evolución a medio y largo plazo de la estructura del suelo preocupa a los agricultores del Norte de la Cuenca Parisina. Efectivamente, la frecuencia, a veces elevada, de cultivos de primavera (remolacha, maíz, patata) en la rotación implica a menudo condiciones de intervención en el momento de la siembra o de la cosecha en condiciones húmedas con maquinaria pesada y potente. Un ensayo de campo de larga duración ha sido iniciado en 1989 en Mons-en-Chaussée en Picardie, para estudiar la evolución de la estructura del suelo bajo el efecto de sistemas de cultivo representativos de esta región y se caracterizando por riesgos de compactación muy contrastados. Los tres sistemas de cultivo comparados comportan una labraza anual. Se diferencian por el tipo de la sucesión (guisante / trigo de invierno / colza / trigo de invierno o remolacha / trigo de invierno / maíz / trigo de invierno) y por las reglas de decisión respecto a las fechas de intervención para las siembras y para las cosechas. El seguimiento de la estructura de la capa labrada del suelo esta basado en un enfoque morfológico permitiendo la descripción de la estructura del horizonte labrado todos los años después de la implantación de cada cultivo de la rotación. Esta descripción esta completada con una evaluación cuantitativa de la proporción en la capa labrada de los elementos estructurales cuya porosidad estructural es muy baja o nula (estado interno Δ). Los resultados presentados en este artículo muestran que este indicador es sensible, variando fuertemente de un año a otro y entre los tres sistemas de cultivo. Sugieren igualmente que las evoluciones no parecen irreversibles. Respecto a la parte del suelo situada bajo el horizonte labrado, observaciones complementarias llevadas acabo en el marco de este ensayo han mostrado que el paso repetido de cosechadoras en condiciones húmedas provocaba un apisonamiento de la capa de suelo subyacente al horizonte labrado sobre una decena de cm de espesor.

Palabras clave

Estructura del suelo, cama de siembra, análisis morfológico, compactación del suelo, manejo del suelo, sistema de cultivo.

Dans le Nord de la France, les successions de culture incluant des betteraves, du maïs ou des pommes de terre entraînent fréquemment des opérations d'implantation et de récolte effectuées en conditions très humides. Dans ces conditions, la dégradation de la structure du sol est une préoccupation majeure des agriculteurs et des acteurs de l'agriculture, qui s'inquiètent non seulement de l'effet immédiat (sur le fonctionnement des racines, la minéralisation, la biologie du sol) de ces opérations, mais également de leurs effets à long terme sur la structure (Leclère, 1988). La plupart des études portant sur l'évolution de l'état structural comparent des modalités différentes de travail du sol (voir la synthèse de Soane et Ball, 1998). On peut en distinguer deux grands groupes : les études qui privilégient les processus de fragmentation en comparant semi-direct et labour annuel, travail superficiel et labour profond, semi-direct et travail réduit... et celles qui privilégient les processus de compactage, en comparant des engins agricoles et leurs caractéristiques de charge ou de pneumatiques. Peu d'études prennent en compte l'ensemble des effets sur la structure qu'engendre l'activité agricole (tassements, fragmentation, retournement du sol...) et dont l'intensité dépend des décisions de l'agriculteur en matière de choix des cultures, d'équipements, de dates et de modalités d'intervention.

Ce constat a conduit l'INRA à mettre en place, en 1989, un dispositif expérimental de longue durée, à Mons en Chaussée dans la Somme. Le but de cet essai est l'analyse de l'évolution de la structure du sol dans des systèmes de culture se caractérisant par des risques de compactage annuel contrastés (Boizard *et al.*, 2002). L'objectif de l'expérimentation conduite entre 1989 et 2000 était (i) de quantifier le compactage exercé par trois systèmes représentatifs des zones de grande culture du Nord de la France (ii) de comparer l'évolution de l'état structural dans ces trois systèmes, en particulier de voir si des effets cumulatifs apparaissaient. Les observations menées sur l'essai portent sur la caractérisation de la structure dans la couche de sol labourée et sur le suivi du tassement dans la partie du sol située immédiatement sous le fond de labour. Celle-ci est susceptible d'être affectée par les opérations impliquant les tassements les plus intenses en conditions humides.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Description de l'essai et caractérisation des interventions culturales

Le dispositif a été implanté sur une parcelle de 15 ha de l'Unité Expérimentale de l'INRA à Estrées-Mons près de Péronne (80). Le sol est un sol de limon profond représentatif des limons du Bassin Parisien (Luvisol Orthique selon la classification FAO). Sa composition est de 19 % d'argile, 74 % de limon, 5 % de sable, 1,7 % de matière organique et 0,5 % de CaCO₃, avec un pH de 7,6. L'humidité pondérale au point de flétrissement est de 8 % et l'humidité à la capacité au champ de 24 %. La pluviosité annuelle moyenne a été de 660 mm durant la durée de l'expérimentation. Elle a varié entre 507 mm en 1991 et 786 mm en 1994 (*tableau 1*). Trois systèmes de culture ont été mis en place. Ils représentent des conditions très variables de compactage, tout en reproduisant les conditions de la région en ce qui concerne le choix des cultures, l'équipement ou le choix des dates d'intervention pour l'implantation et la récolte. Ils se différencient par la succession des cultures (pois/blé d'hiver/colza/blé d'hiver ou betterave/blé d'hiver/maïs/blé d'hiver) et par les règles d'intervention pour les semis et les récoltes. Les principes qui régissent la conduite de ces trois systèmes sont résumés au *tableau 2*. Les systèmes II et III qui comportent la même succession de culture, diffèrent par les règles de décision pour la conduite des cultures de printemps. Elles sont basées sur des seuils d'humidité de la couche labourée : dans le système II, on cherche à préserver la structure de l'ensemble de l'horizon labouré lors de l'implantation et de la récolte des cultures de printemps, alors que dans le système III, on se contente des conditions minimales acceptables pour réaliser un lit de semences. Dans ce dernier système, on cherche à maximiser la longueur du cycle des cultures de printemps (les plus rémunératrices dans cette région), reproduisant une stratégie courante chez les agriculteurs de cette région. Les références en terme de seuil d'humidité ont été acquises lors d'expérimentations préliminaires.

Pour chaque culture, le même matériel a été employé durant toute la durée de l'expérimentation (*tableau 3*). Ce matériel, couramment utilisé dans cette région de grande culture, couvre une large

Tableau 1 - Pluviométrie annuelle moyenne entre 1990 et 1998 (Station météorologique de Roupy (02))

Table 1 - Annual rainfall between 1990 and 1998.

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Mars, avril, mai	24	38	59	41	84	59	35	30	50
Juin, juillet, août	36	46	92	55	56	51	66	9	56
Sept., oct., nov.	61	43	59	75	61	39	52	51	83
TOTAL année	578	507	720	757	786	716	575	606	687

Tableau 2 - Principes de construction des systèmes de culture comparés sur le dispositif pluriannuel de Mons en Chaussée**Table 2** - The rules for decision making in each cropping system

Système	Succession	Objectifs	Règles de décision pour les semis	Règles de décision pour les récoltes
I	pois/blé d'hiver/ colza/blé d'hiver	Limiter les risques de dégradation de la structure sur l'ensemble de la succession	Le plus tôt possible, donc en conditions sèches dans cette région pour les cultures pratiquées dans la succession ¹	A maturité du grain, plutôt en conditions sèches dans cette région, pour les cultures pratiquées dans la succession.
II	betterave / blé d'hiver/ maïs/ blé d'hiver	Limiter les risques de dégradation de la structure lors des cultures de printemps	Semis dès que possible pour le blé, semis uniquement sur sol ressuyé pour les cultures de printemps : - BS : à partir du 15 mars, dès que l'humidité est < 20 % dans les 10 premiers cm, < 22 % dans la couche 10-25 cm. ; - maïs : idem mais à partir du 20 avril	Pas de condition pour le blé ; le plus tôt possible pour les cultures de printemps : - BS : à la date d'ouverture de la campagne d'arrachage ; - maïs : variété précoce avec récolte dès la maturité du grain.
III	betterave / blé d'hiver/ maïs/ blé d'hiver	Recherche du cycle de culture le plus long possible pour les cultures les plus rémunératrices de la succession : maïs et Betterave sucrière, éventuellement au détriment de la structure du sol	Semis dès que possible pour le blé ; semis dès que possible pour les cultures de printemps : - BS : à partir du 1 ^{er} mars, dès que l'humidité moyenne de la couche labourée est < 25 %. - Maïs : idem mais à partir du 1 ^{er} avril	Le plus tard possible pour les cultures de printemps : - BS : à la date de fermeture de la campagne d'arrachage ; - maïs : variété demi-précoce avec récolte dès la maturité du grain

1 - A l'exception des conditions du semis de pois, qui a lieu à partir du 20 février.

gamme de charge sur essieu (de 4,5 à 16,5 tonnes), de largeur de pneumatiques (de 30 à 70 cm) et de pression de gonflage (de 70 à 300 kPa) et donc de pression appliquée au sol. Après un déchaumage d'automne réalisé à l'aide d'un outil à disques et essentiellement destiné à faciliter l'incorporation des résidus de récolte, un labour est réalisé chaque année à l'aide d'une charrue 3 corps munie de rasettes. Sa profondeur, mesurée à chaque intervention, est restée comprise entre 28 et 30 cm. Les préparations de lits de semences sont réalisées en un seul passage avec un outil combiné pour la betterave, le maïs et le colza. Les préparations et les semis du blé et du pois sont faits en un seul passage, en employant un outil combiné herse rotative/semoir. La profondeur de travail lors des opérations d'implantation et de déchaumage est toujours restée comprise entre 4 et 10 cm. A chaque intervention, on a mesuré l'humidité pondérale du sol (profils hydriques par pas de 5 cm de 0 à 30 cm) et enregistré la position de chaque passage de roue par rapport au bord (fixe d'une année sur l'autre) de la parcelle expérimentale.

Le dispositif a été mis en place sur 24 parcelles expérimentales de 0,40 ha (80 m x 48 m), ce qui permet de réaliser les opérations culturales dans des conditions les plus proches possibles de celles des agriculteurs et de disposer, tous les ans, de toutes les cultures de la succession, avec deux répétitions.

Caractérisation de la structure du sol

Dans chaque parcelle expérimentale, la structure de l'horizon labouré a été décrite chaque année suivant la méthode de caractérisation mise au point par Manichon (1987). Cette description était réalisée immédiatement après l'implantation des cultures, à l'automne pour le blé et le colza, au printemps pour le maïs, les betteraves et le pois. Après avoir creusé, perpendiculairement au sens du travail du sol, une fosse d'une largeur de 3 m et d'une profondeur de 0,80 m, on repère, sur la face d'observation, les limites des différents horizons créés par les outils de travail du sol (fond du lit de semences, fond du labour de l'année et, éventuellement, de labour

Tableau 2 - Principes de construction des systèmes de culture comparés sur le dispositif pluriannuel de Mons en Chaussée**Table 2** - Main characteristics of the equipment used

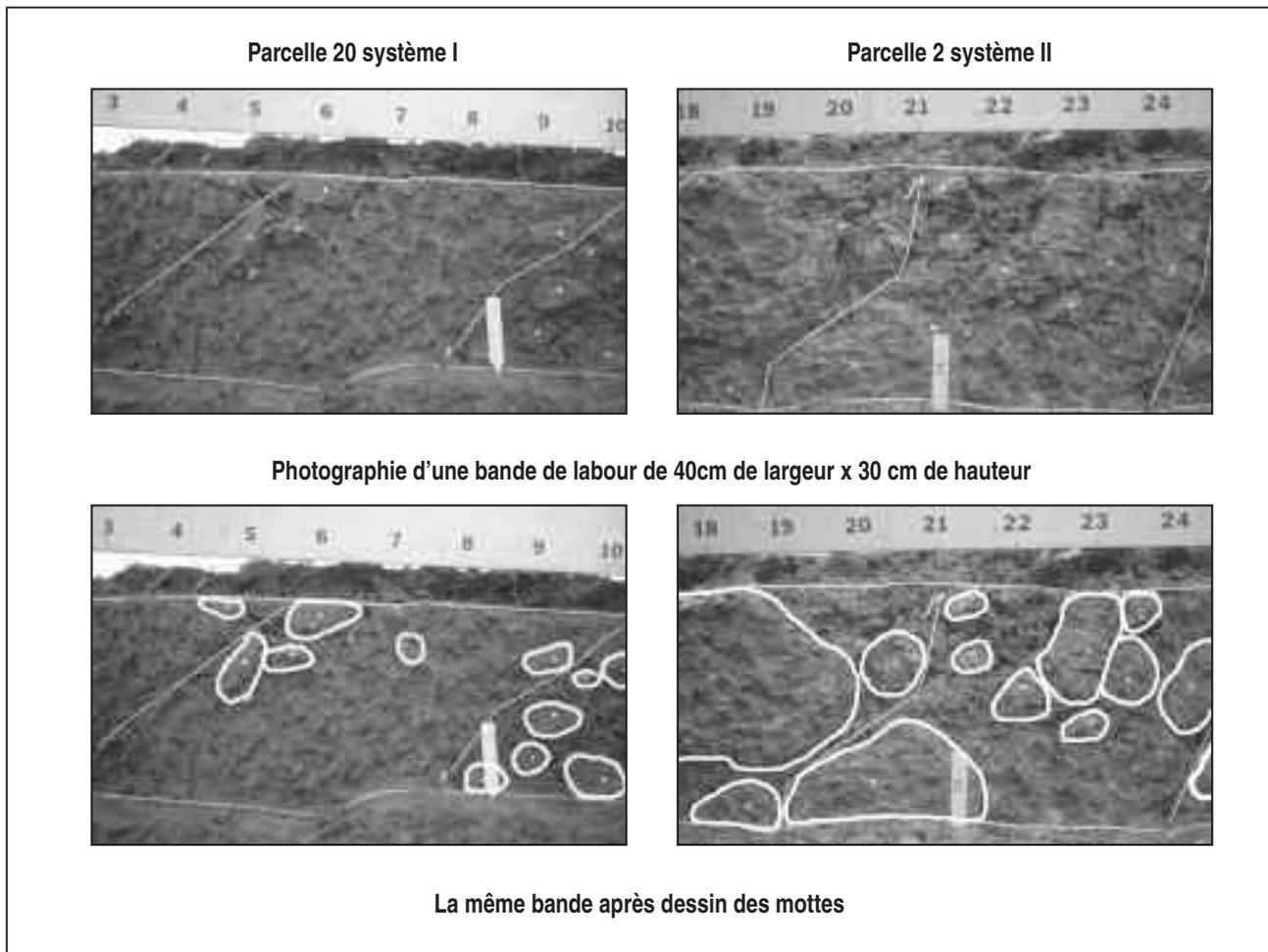
Opérations culturales	Cultures	Tracteur	Caractéristiques des outils	Poids total (tracteur et outil) /T	Largeur maximale pneus (cm)	Pression de gonflage (bar)
Broyage	Maïs	Case IH 1056	Broyeur	8.2	45	2
Déchaumage	Pois, blé, maïs et Colza	Case IH 956	Cover crop	7.5	65	0.7
Labour	Toutes cultures	Case IH 1056	Charrue 4 socs 16 pouces	6.5	45	2
Préparations superficielles	Betteraves et maïs	Case IH 956	outil de préparation combiné	6.5	65	0.7
Semis combiné avec la préparation	Blé, pois et colza	Case IH 956	Herse rotative semoir	8	65	0.7
Semis	Betteraves	MF 575	Semoir 12 rangs	5	30	2.2
Semis	Maïs	Fiat 780	Semoir 6 rangs	4.5	40	2.2
Récolte	Blé, pois, maïs et colza	—	MB8060, MBTX34, Axial FL 1460	15	70	2-2.5
Arrachage	Betteraves	Case IH1056,	Matrot 6 rangs	15	60	2-2.5
Transport^a	Betteraves	Case IH1055	Remorque 8 tonnes	16.5 ^b	45	3

a : La circulation de remorques dans les parcelles expérimentales ne s'est produite que lors des récoltes de betteraves.

b : Poids avec remorque pleine

plus profonds) et entre les bandes de terre retournées par la charrue. Les zones situées sous les passages des roues postérieures au labour sont également repérées : zones situées sous les passages de roue pour les opérations de préparation du lit de semences (L2) et zones sous les passages de roues du tracteur tirant le semoir (L1). Dans la partie du profil située entre le fond de labour et le lit de semences, les zones ou mottes Δ sont ensuite délimitées à l'aide d'un couteau de façon à les faire apparaître légèrement en relief sur le profil. Les zones Δ ont pour origine les tassements sévères occasionnés par les interventions en conditions humides. Ces zones sont ensuite divisées et déplacées par le labour, produisant des mottes Δ de calibres variés (figure 1). Les structures Δ sont repérables au

champ sur la base de caractéristiques morphologiques particulières : pas de porosité visible à l'œil, et faces de rupture planes. Nous n'avons pas tenu compte de la fissuration éventuelle de ces mottes sous l'effet du climat (création d'état interne Φ , au demeurant peu intense dans un sol régulièrement labouré et dont la teneur en argile est inférieure à 20 %). Les cartes de zones ou mottes Δ sont dessinées à partir des photos avec l'aide d'un stéréoscope, puis digitalisées et traitées par analyse d'image de façon à calculer différents critères comme la localisation de ces mottes, leur surface ou leur plus grand diamètre. La proportion surfacique de mottes Δ dans la partie de l'horizon labouré située sous le lit de semences a été choisie dès la mise en place de l'essai comme indicateur de l'effet du sys-

Figure 1 - Analyse morphologique de la structure du sol**Figure 1** - Morphological analysis of the soil structure

tème de culture sur l'état structural des couches de sol travaillées (Manichon et Roger-Estrade, 1990). Cet indicateur, mesuré lors de la mise en place de l'essai était proche entre situations, égal à 0.18 avec un écart type de 0.04.

RÉSULTATS

Évolution de la structure de l'horizon labouré entre 1990 et 2000

Un exemple d'évolution de l'indicateur mentionné ci-dessus est présenté à la *figure 2*, où l'on a porté les variations de la teneur en Δ pendant 10 ans, mesurées dans 3 parcelles appartenant aux 3 systèmes de culture de l'essai. Avec une rotation pois/blé/colza/blé, la proportion de zones Δ reste globalement inférieure à 25 % et varie

peu. Par contre dans le système III on observe de fortes teneurs et de fortes variations entre années. Les valeurs atteintes en système II sont intermédiaires. Dans le système III une récolte de betteraves réalisée en 1990 dans des conditions d'humidité de sol très élevée (25 %) a entraîné une forte augmentation de la teneur en zones Δ qui atteint 65 % dans la couche labourée du blé suivant. Les années suivantes, on observe le maintien d'un niveau élevé de la teneur en Δ qui oscille entre 40 et 60 %. Cependant deux années, pendant lesquelles l'implantation, la croissance et la récolte du blé en 1995 et du maïs en 1996 se sont faites plutôt en conditions sèches et sans création de zones tassées (*tableau 1 et figure 4*), ont entraîné une diminution rapide de la teneur en Δ qui se trouve ramenée à un niveau proche de celui du départ. En 1999 une récolte de betteraves réalisée à une humidité à la capacité au champ de 24 % entraîne une remontée rapide de l'indicateur. Dans le système II on constate que les mesures prises pour limiter les tassements sont assez efficaces, excepté en 1992 et 1993, années pluvieuses où des récoltes

Figure 2 - Evolution du pourcentage de mottes Δ dans 3 parcelles appartenant chacune à un des systèmes de culture
Figure 2 - Change in the percentage of Δ areas overtime in three plots (one for each system)

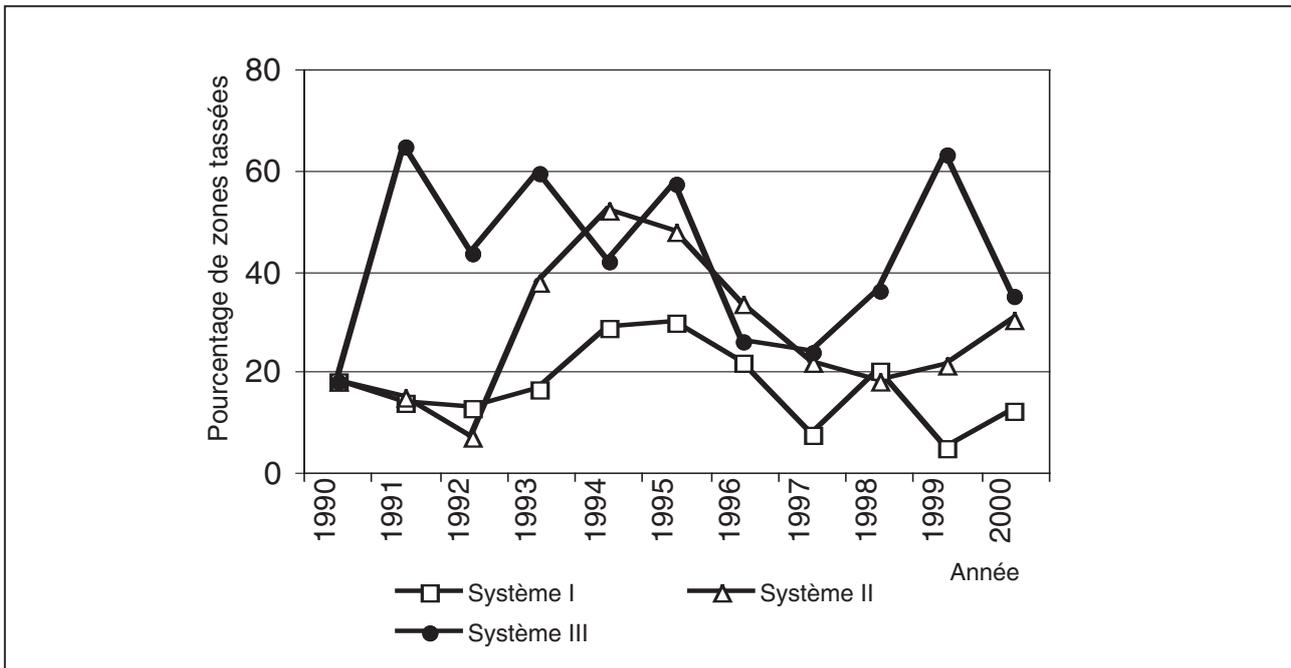
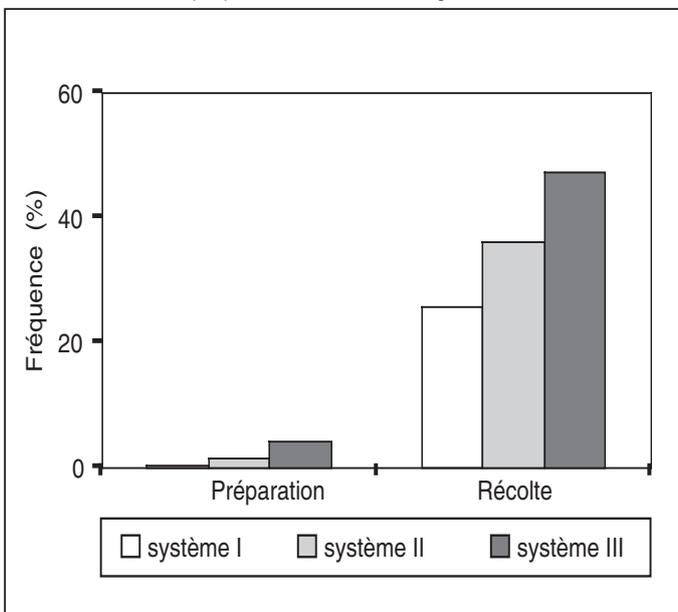


Figure 3 - Fréquences des situations où les passages de roues ont créé une zone Δ dont la taille relative était supérieure à 25 % lors des opérations de préparation du lit de semences et de récolte entre 1990 et 1998.

Figure 3 - Frequency over the 8 years of experimentation of the creation of Δ zones under wheel tracks occupying > 25 % of the soil volume at seedbed preparation and harvesting.



en conditions humides ont conduit à un niveau élevé de l'indicateur.

Ces évolutions de la teneur en Δ sont le résultat d'un bilan entre d'une part les actions de compactage qui créent des zones Δ et d'autre part les actions de fissuration et de fragmentation induites par les outils de travail du sol, l'action climatique et l'activité biologique qui font, plus ou moins rapidement, disparaître les zones Δ en le transformant en terre fine (Roger Estrade *et al.*, 2000).

Création de zones Δ lors des opérations culturales

Les règles de décision, qui sont basées sur la physiologie des plantes et l'humidité du sol à l'intervention, ont conduit à une gamme très large de dates de semis et de récolte. Les tassements significatifs (taille relative de la zone Δ créée sous les roues supérieure à 25 %) sont très limités lors des opérations d'implantation et de semis, quel que soit le système (*figure 3*). L'utilisation de matériels conçus pour limiter la pression appliquée au sol (charges inférieures à 4 t par essieu, pneumatiques de grande largeur), a limité le tassement, même pour des semis précoces de betteraves début mars comme dans le système III. Les tassements ont essentiellement eu lieu lors des récoltes du fait de l'intensité des contraintes appliquées au sol. On observe également que les récoltes de blé, pois et colza dans

Figure 4 - Fréquence de création de zones tassées en fonction des cultures, systèmes et années.**Figure 4** - Frequency of the creation of Δ zones under wheel tracks depending on crop, system and year.

culture	système	90	91	92	93	94	95	96	97	98
blé	I, II et III	0	0	2	2	0	0	0	2	0
colza	I	0	2	1	1	-	1	0	1	2
pois	I	0	0	2	0	0	0	0	0	1
betteraves	II	0	0	2	1	2	2	0	0	1
maïs	II	0	1	2	2	2	2	0	0	2
betteraves	III	2	2	2	2	2	0	2	2	2
maïs	III	0	1	2	2	2	1	0	2	2

0	= pas de compactage
1	= moins de 25 % de zones tassées sous les roues
2	= plus de 25 % de zones tassées sous les roues

le système I, pourtant réalisées en été, ont induit des tassements significatifs dans 25 % des situations observées.

La *figure 4* montre que la création de zones tassées lors des récoltes varie fortement en fonction des années culturales. On observe que les récoltes d'été : pois, colza et blé, ont conduit à des tassements sévères, qui dépendent de l'année mais aussi de la proximité des interventions culturales après un épisode pluvieux (non montré). Les récoltes tardives de betteraves du 15 novembre ont quant à elles systématiquement conduit à des tassements sévères, excepté en 1995, alors que les récoltes précoces de betteraves (1-5 octobre) en système II ont conduit à des compactages sévères seulement 1 année sur 2, de même que les récoltes de maïs en système II. Pour mesurer l'intensité des tassements sur une parcelle, il faut également prendre en compte l'importance des surfaces roulées dans la parcelle : elles représentent 30 % de la surface à la récolte de blé hors passage de remorques et atteignent plus de 65 % de la surface lors des récoltes de betteraves.

Évaluation des tassements profonds

Une évaluation du tassement des horizons situés sous le fond de labour a été réalisée sur le dispositif en 1998. Pour cela on a comparé des zones témoins indemnes d'intervention en conditions humides entre 1990 et 1998 et des zones ayant subi plusieurs passages en conditions humides pendant cette période (récoltes de betteraves par exemple). Deux propriétés du sol ont été significativement modifiées dans la partie du sol située entre 30 et 40 cm de profondeur : la résistance à la pénétration et la vitesse d'infiltration (*figure 5*).

La *figure 5a* montre que la résistance à la pénétration est plus élevée entre 30 et 40 cm de profondeur dans des situations où des tassements sévères ont eu lieu : passages répétés de récoltes de

betteraves en conditions humides ou passages de pulvérisateur toujours réalisés au même endroit dans chaque parcelle comparée à la résistance des zones indemnes de tassements sévères entre 1990 et 1998. Au-delà de 40 cm la résistance mécanique du sol est la même quelle que soit la situation. De même on observe que la vitesse d'infiltration est sensiblement réduite entre 30 et 40 cm de profondeur dans ces mêmes situations (*figure 5b*).

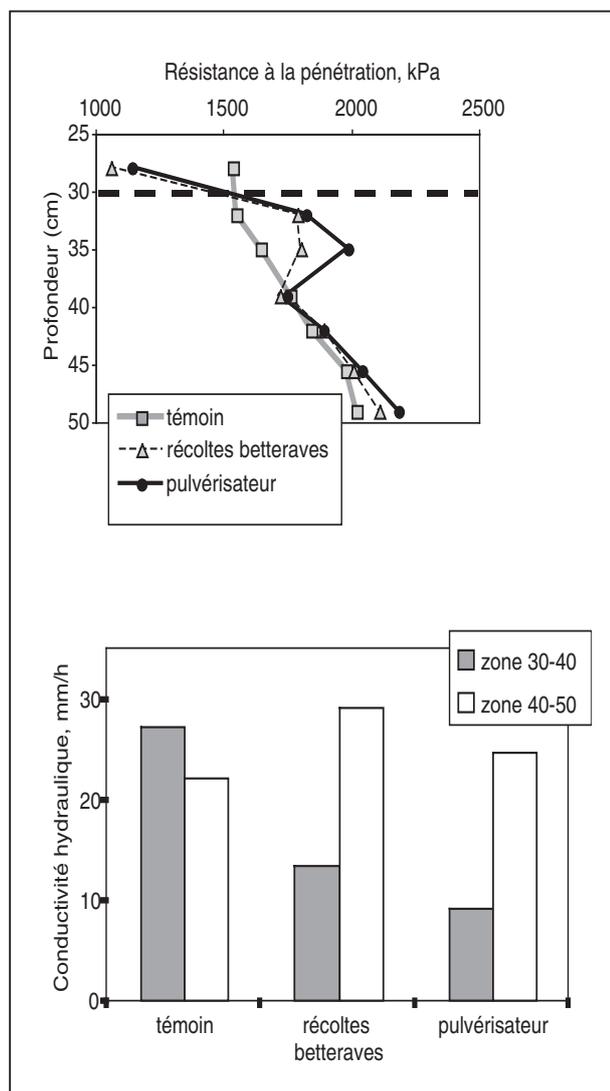
Ces mesures montrent que les tassements les plus sévères affectent la partie du profil située sous le fond de labour, ralentissant l'infiltration de l'eau en profondeur et créant un obstacle mécanique à l'enracinement.

Disparition des zones tassées : fragmentation par les outils et action des agents climatiques et biologiques

On observe sur les systèmes de culture étudiés que les baisses observées de teneur en zones Δ peuvent être rapides (*figure 2*). Elles sont en premier lieu liées à l'affinement du lit de semences par le travail du sol et l'effet du climat (Boizard *et al.*, 2002). Lors du labour suivant et en absence de nouveaux épisodes de tassement, l'horizon superficiel affiné par le travail du sol est dilué dans l'ensemble de la couche travaillée, aboutissant ainsi à une baisse de la teneur en Δ . Mais ce simple effet de dilution ne suffit pas à expliquer l'ensemble des baisses observées. En effet, en choisissant des parcelles n'ayant subi aucun tassement sévère (sans création de Δ) pendant une année, nous avons étudié l'évolution de la teneur en Δ durant cette période. Les baisses observées ont été comparées aux baisses calculées en ne faisant intervenir que l'effet de dilution mentionné ci-dessus (*figure 6*). On constate que la diminution observée entre deux années successives se révèle beaucoup plus forte que la

Figure 5 - Effet de tassements répétés entre 1990 et 1998 sur deux propriétés du sous-sol : (a) la résistance à la pénétration, (b) la conductivité hydraulique

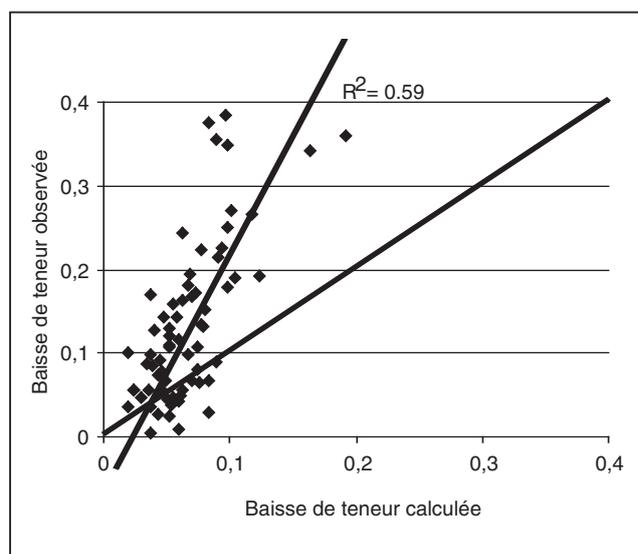
Figure 5 - Effect of compaction between 1990 and 1998 on subsoil properties : (a) penetration resistance, (b) hydraulic conductivity



diminution calculée. Cela signifie qu'un ou plusieurs autres facteurs interviennent pour expliquer la disparition des mottes Δ . Plusieurs hypothèses, qui ne s'excluent pas mutuellement, peuvent être avancées sans que l'analyse de nos résultats n'ait permis de conclure sur l'importance relative de ces différents facteurs : (i) la fragmentation par la charrue, celle-ci fragmentant suffisamment le sol pour faire disparaître une proportion significative de zones Δ en les transformant en terre fine ; (ii) l'action du climat (alternance humectation-desiccation, gel-dégel) affectant l'horizon situé sous le lit de semences

Figure 6 - Diminution observée des zones tassées entre deux années culturales successives comparée à la diminution des zones tassées faisant l'hypothèse que toutes les zones ou mottes tassées ont été détruites dans l'horizon superficiel et diluée dans l'ensemble de l'horizon travaillé

Figure 6 - Relationships between the observed decrease of Δ areas during one year and the calculated decrease assuming that all Δ zones are destroyed during the year in the superficial layer influenced by secondary or stubble tillage.



et suffisamment intense pour transformer en terre fine une proportion significative de zones ou mottes Δ ; (iii) l'activité biologique (vers de terre), qui, perforant les zones tassées les fragilise suffisamment pour entraîner leur disparition rapide par fragmentation.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Ce dispositif a permis dans une situation pédo-climatique donnée et dans le cadre de systèmes de culture très contrastés sur le plan du risque de tassement de pouvoir analyser et quantifier l'effet des différents facteurs sur l'évolution de l'état structural. Les résultats montrent clairement que le tassement a un rôle déterminant dans l'évolution de l'état structural. Ce sont en particulier les opérations de récolte qui contribuent le plus à la création de zones tassées, même lors des récoltes d'été. Par contre lors des implantations de culture la limitation des contraintes au sol en limitant les charges et en employant des pneus larges permet de limiter fortement le compactage y compris lorsque les interventions ont lieu à des teneurs en eau de la couche labourée voisines de la capacité au champ.

Dans le même temps et en l'absence de nouveaux tassements l'effet combiné du travail du sol, de l'activité biologique et du climat entraîne une baisse sensible sur deux à trois années de la taille et

de la proportion des zones Δ . Cette baisse est liée à une disparition des zones tassées dans l'horizon de surface sous l'effet du climat et des opérations de préparation du sol, mais aussi à la diminution en diamètre et en volume des zones tassées en profondeur sous l'effet de ces différents facteurs.

D'un point de vue agronomique, nous n'avons pas constaté d'effet cumulatif dans l'évolution de l'état structural de la couche de sol travaillée. Néanmoins cela ne signifie pas que ceci ne puisse être envisagé dans certains cas, par exemple pour des sols à faible taux d'argile ou pour des situations où le travail du sol est fortement réduit avec suppression du travail profond. Une expérimentation est en cours actuellement sur ce dernier point : une modalité supplémentaire avec travail réduit du sol a été introduite sur le dispositif de Mons depuis 1999 pour répondre à cette question et mieux définir la contribution des agents naturels à la disparition des zones tassées.

Enfin nous avons constaté que des compactages en profondeur étaient observés au niveau de cet essai dans l'horizon 30-40 cm. Les compactages profonds sont peu réversibles en particulier parce que les mécanismes de régénération liés au climat y sont particulièrement faibles. Les horizons profonds ne sont qu'exceptionnellement affectés par le gel et les variations d'humidité favorables à la fissuration y sont moins intenses qu'en surface. De plus l'intensité des processus de fissuration dépend fortement du taux d'argile et donc du type de sol. Une évaluation des compactages profonds et de ses conséquences dans des contextes pédo-climatiques différents nous paraît souhaitable au vu de ces résultats.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient P. Régnier et B. Chauchard pour leur assistance technique et l'Unité Expérimentale INRA d'Estrées-Mons pour sa contribution au maintien du dispositif pluriannuel depuis 1990.

BIBLIOGRAPHIE

- Boizard H., Richard G., Brancourt-Hulmel M. et Guerif J., 1999 - Effect of cropping systems on change in bulk density, penetration resistance and hydraulic conductivity in subsoil. dans : R. Horn, R., van den Akker, J., J., H. (Editeurs), *Subsoil Compaction, distribution, processes and consequences*, Advances in Geocology 32, Kiel, Allemagne, pp. 233-241.
- Boizard H., Richard G., Roger Estrade J., Dürr C., and Boiffin J., 2002 - Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. *Soil and Tillage Research* 64, pp. 149-164.
- Leclère Bernard, 1988 - Réaction d'un agriculteur au problème du tassement. *Compte rendu de l'Académie d'Agriculture de France* 74, n°1, pp. 3-8.
- Manichon, H., 1987 - Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. *In*: Monnier, G., Goss, M.J. (Eds), *Soil Compaction and Regeneration*, Balkema, Rotterdam, the Netherlands, pp. 39-52.
- Manichon H., Roger-Estrade J., 1990 - Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. *In*: L. Combe et D. Picard (Eds), "Les systèmes de culture". INRA, Paris, pp. 27-55.
- Richard, G., Boizard, H., Roger Estrade, J., Boiffin, J., Guéris, J., 1999 - Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil Tillage Res.* 51, pp.151-160
- Roger Estrade, J., Richard, G., Boizard, H., Boiffin, J., Caneill, J., Manichon, H., 2000 - Modelling structural changes in tilled topsoil as a function of cropping system. *European J. Soil Sci.* 51, pp.455-474.
- Soane, B.D., Ball, B.C., 1998 - Review of management and conduct of long-term tillage studies with special reference to a 25-year experiment on barley in Scotland. *Soil Tillage Res.* 45, pp. 17-38.