

Influence de la structure du sol à différentes échelles sur les transferts d'eau

Conséquences d'une réduction du travail du sol

I. Cousin⁽¹⁾, H.-J. Vogel⁽²⁾ et B. Nicoullaud⁽¹⁾

(1) INRA, Unité de Science du Sol, Avenue de la Pomme de Pin, BP 20619, 45166 Ardon, France

(2) Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 229, D-69120 Heidelberg, Allemagne

RÉSUMÉ

L'étude présentée ici a pour objectif de discuter de l'effet d'une réduction du travail du sol sur la structure et les propriétés hydrodynamiques de la couche cultivée d'un sol argilo-limoneux dans une région de grande culture. Une étude à double échelle a été entreprise : une expérience d'infiltration d'un colorant (Brilliant Blue FCF), suivie d'une prospection tridimensionnelle sur la base de coupes sériées à l'échelle de 1 m³, a permis de mettre en évidence des chemins préférentiels qui permettent un transfert rapide de l'eau et des solutés vers la profondeur. Nous avons également montré que l'ancien horizon de labour présentait, après 5 ans, une différenciation verticale marquée par une structure grumeleuse très poreuse, très connectée, et très filtrante sur les 10 premiers cm et une structure polyédrique, moins poreuse et moins connectée que la partie sus-jacente mais plus filtrante qu'un horizon de surface de même nature traité en labour conventionnel, sur les 20 cm suivants. Les propriétés hydrodynamiques mesurées au laboratoire et une analyse par tomographie aux rayons X a permis de confirmer ces résultats et de proposer des hypothèses d'évolution de la structure de l'ancien horizon labouré.

Mots clés

Structure du sol, propriétés hydrodynamiques, travail réduit, tomographie X, coupes sériées, reconstruction 3D

SUMMARY

INFLUENCE OF SOIL STRUCTURE ON WATER TRANSFERS AT DIFFERENT SCALES: Consequences of reduced tillage.

This study aimed at discussing the effect of reduced tillage on structure and hydrodynamic properties in the cultivated layer of a loamy-clay soil. A double-scale study was conducted: an infiltration experiment with Brilliant Blue FCF, followed by a field 3D reconstruction with serial sections at the cubic meter scale, enabled to evidence preferential pathways that conducts solute and water directly toward soil depth. It showed, as well, that after 5 years, the old tilled layer exhibits a porous, very connected structure on the first 10 cm, and a polyedric structure, less porous and less connected in the 10-30 cm. The latter is however more suitable for infiltration than the equivalent structure in a

conventionally tilled horizon. Hydrodynamical properties determined in laboratory and X-ray tomography experiments enabled to propose a sketch for structure evolution under reduced tillage in that context.

Key-words

Soil structure, hydrodynamic properties, reduced tillage, X-ray tomography, serial sections, 3D reconstruction

RESUMEN

INFLUENZA DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO A DIFERENTES ESCALAS SOBRE LAS TRANSFERENCIAS DE AGUA : consecuencias de una reducción del trabajo del suelo.

El estudio presentado tiene por objetivo de discutir del efecto de una reducción del trabajo del suelo sobre la estructura y las propiedades hidrodinámicas de la capa cultivada de un suelo arcillo-limoso en una región de cultivos de cereales . Se emprende un estudio a doble escala: una experiencia de infiltración de un colorante (Brilliant blue FCF), seguida de una prospección tridimensional sobre la base de cortes seriados a escala del 1m³, permitió de poner en evidencia caminos preferenciales que permiten una transferencia rápida del agua y de las soluciones hacia la profundidad. Mostramos igualmente que el viejo horizonte arada presentaba, después de 5 años, una diferenciación vertical marcada por una estructura grumosa muy porosa y muy conectada, y muy filtrante sobre los 10 primeros cm y una estructura poliédrica, menos porosa y menos conectada que la parte sub-yacente pero más filtrante que un horizonte de superficie de misma naturaleza tratada con arado convencional, sobre los 20 cm que siguen. Las propiedades hidrodinámicas medidas en laboratorio y un análisis por tomografía a los rayos X permitió de confirmar estos resultados y proponer hipótesis de evolución de la estructura del viejo horizonte arado.

Palabras clave

Estructura del suelo, propiedades hidrodinámicas, trabajo reducido, tomografía X, cortes seriados, reconstrucción 3D

La structure de la couche cultivée des sols dépend fortement du mode de travail du sol (passage d'engins, labours, etc...) et son état influence les propriétés de transfert d'eau, de gaz et de solutés dans le sol. La modification des pratiques agricoles, telles que la réduction du travail du sol observée de plus en plus fréquemment en Europe dans les régions d'agriculture intensive, conduit ainsi à une évolution de la structure de la couche cultivée, dont les conséquences à long terme sur les propriétés de transfert du sol sont encore mal connues. Que ce soit sur la structure du sol ou les propriétés hydrodynamiques, les études actuelles font état de résultats contrastés. Borresen (1999) compare l'effet de différents types de travaux culturaux (labour sur 10 cm à l'automne ; semis direct au printemps à l'aide d'un outil de reprise sur 7 cm ; semis direct au printemps à l'aide d'un outil de reprise sur 3-4 cm) sur des sols limoneux de Norvège. Il met en évidence qu'après 6 ans, les différences de densité apparente entre les sols n'ayant pas subi de labour et les autres ne sont pas significatives. Gomez *et al.* (1999) comparent l'effet, au bout de 15 ans, d'un labour classique sur 20 cm par outil à disques à une absence totale de labour (gestion des adventices par herbicides) sur des sols limono-argileux d'Espagne sous culture d'oliviers. Ils montrent que la densité apparente du sol est plus élevée dans la couche de surface (0-20 cm) dans les zones non labourées mais que la tendance s'inverse dans la couche inférieure. Cette observation est corroborée par Tebrügge et Düring (1999) pour des sols allemands de différentes textures cultivés en céréales, maïs, betterave ou colza sur des durées supérieures à 10 ans. Logsdon *et al.* (1999) observent, quant à eux, sur des sols américains de textures variées, que l'absence de travail du sol sur plus d'une dizaine d'années a pour conséquence une réduction de la densité apparente en surface (0-2 cm) mais une augmentation de la densité pour les couches inférieures (6-18). Néanmoins, ces différences constatées sur des mesures réalisées en entrée d'hiver tendent à s'amenuiser au cours de l'hiver et du printemps. Tebrügge et Düring (1999), qui constatent la même évolution du système au cours de la saison culturale, concluent que le travail du sol en automne crée une porosité inter-agrégat artificielle et instable, détruite au cours de l'hiver par l'action du climat. Guérif (1991) observe une forte réduction de la porosité structurale du sol en semis direct (Essai ITCF, Boigneville). L'espace poral structural résiduel serait principalement lié aux fissures et aux galeries de vers de terre.

Les travaux relatifs à l'influence du travail du sol sur la porosité concernent généralement la porosité biologique. Plusieurs travaux ont montré, par des observations de la porosité ou de l'activité de la mésofaune (lombriciens en particulier mais aussi termites en zone semi-aride) *in situ* ou par une analyse morphologique de la porosité sur des images de sol, que l'absence de travail du sol augmente la porosité d'origine biologique (Trojan et Linden, 1998 ; Tebrügge et Düring, 1999). On considère généralement que l'absence de labour qui permet le maintien des résidus de culture en surface crée des conditions trophiques et d'habitat favorables pour les lombriciens (Douglas *et al.*, 1998 ; MacGarry *et al.*, 2000).

En dehors de la porosité d'origine biologique, les résultats concernant la macroporosité dans son ensemble varient d'un contexte pédo-climatique à l'autre. Certains auteurs constatent que la macroporosité tend à augmenter en conditions de non labour (Douglas *et al.*, 1998), que ce soit sous l'action d'agents biologiques ou climatiques. Dans ce cas, la conductivité hydraulique à saturation est plus élevée, non seulement parce que les macropores sont plus nombreux, mais également parce qu'ils présentent une plus grande continuité, le labour ayant pour conséquence de «casser» les réseaux poreux et de les rendre discontinus (Arshad *et al.*, 1999). De plus, leur orientation est généralement verticale (Tebrügge et Düring, 1999). Les risques d'entraînement en profondeur de produits phytosanitaires sont alors augmentés (Barriuso *et al.*, 1991). Même si la conductivité hydraulique en régime insaturé est peu différente sous les 2 itinéraires culturaux, l'infiltration instantanée est plus élevée dans les sols non labourés présentant de nombreuses galeries biologiques (Trojan et Linden, 1998). Dans d'autres cas, vraisemblablement lorsque les phénomènes climatiques sont prépondérants sur les phénomènes biologiques, la macroporosité est moins importante en conditions de non labour mais la microporosité est plus importante (MacGarry *et al.*, 2000). Il en résulte, à un potentiel donné, des propriétés de rétention en eau plus élevée pour les sols non labourés que pour les sols labourés (Arshad *et al.*, 1999). MacGarry *et al.* (2000) montrent par exemple que 28 % d'eau supplémentaire est accessible à la plante. Norwood (1994) montre qu'à 90 cm de profondeur, la teneur en eau est augmentée de 62 % grâce au maintien en surface des résidus de culture qui limitent à la fois l'évaporation et le ruissellement.

L'ensemble des travaux cités ci-dessus montre que le problème est complexe et non généralisable. De plus, de nombreuses études sont menées à une échelle donnée, soit sur le terrain, sur des territoires plus ou moins vastes, soit en laboratoire, sur des échantillons de taille finie où l'on n'échantillonne pas forcément idéalement toute la structure du milieu. Pour pallier ces problèmes, nous avons choisi de caractériser la structure et les propriétés hydrodynamiques d'un sol situé en Beauce, région de grande culture intensive à deux échelles. Afin de discuter de l'influence de la structure du réseau poreux d'un sol sur ses propriétés de transfert, nous avons couplé une expérimentation de terrain à l'échelle du profil de sol, permettant d'analyser l'évolution de la structure à une échelle intermédiaire, à une étude de laboratoire sur cylindres permettant une analyse plus fine de l'influence de la structure sur les propriétés hydrodynamiques du milieu étudié.

MATÉRIEL ET MÉTHODE : UNE APPROCHE A DEUX ÉCHELLES

Le sol étudié se situe sur la commune de Villamblain en Petite Beauce du Loiret (Ould Mohamed et Bruand, 1994). C'est un Calcisol d'une profondeur de 70 cm, structuré en 3 horizons :

- de 0 à 35 cm, l'ancien horizon labouré,
- de 35 à 60 cm, un horizon structural S, moins dense et moins organique que les horizons précédents,
- à partir de 60 cm environ, une zone cryoturbée calcaire dans laquelle des blocs de calcaire sont visibles par endroits.

Une culture de colza-jachère a été implantée en semis direct sur la zone étudiée. Aucun labour n'y a été effectué depuis 5 ans. Le travail réduit consiste simplement en une implantation des semis au semavator, qui reprend le sol sur une épaisseur de 8 à 10 cm, et à un broyage en période de récolte. Le semis a été réalisé en début d'automne après la récolte d'un lin-jachère. L'étude présentée ici a été réalisée en avril de l'année suivante, après ressuyage du sol suite aux pluies hivernales, lorsque le sol est à la capacité au champ.

Notre étude porte principalement sur l'ancien horizon labouré d'une épaisseur de 35 cm environ. Cet horizon présente deux couches de structures distinctes : en surface, sur une épaisseur de 10 cm, une structure grumeleuse très aérée ; plus en profondeur, de 10 à 30 cm, une structure polyédrique. Les caractéristiques granulométriques de cet horizon sont présentées dans le *tableau 1*.

Sur une surface de 1,6 x 1,6 m², nous avons réalisé une expérience d'infiltration avec un colorant bleu, le brillant blue FCF (Flury et Flüher, 1994), ne s'adsorbant pas sur le sol (Flury et Flüher, 1995). Après saturation du profil de sol, 19 mm de colorant puis 55 mm d'eau ont été appliqués sur cette surface de sol à l'aide d'un sprinkler à une intensité de 13 mm h⁻¹. Cette intensité de pluie a été choisie après quelques essais préliminaires sur une zone située à quelques mètres de l'expérimentation. Elle permet de n'avoir quasiment aucun flaquage en surface et d'assurer une infiltration sans mise en charge.

L'évolution du potentiel hydrique à différentes profondeurs a été mesurée par trois tensiomètres disposés à 40, 60 et 80 cm de profondeur. Après 19 heures, les tensiomètres indiquent que le potentiel de l'eau est stabilisé dans le profil à une valeur de pF = 1,7. Une fosse de 1 m de large sur 70 cm de profondeur a alors été creusée à l'amont de la zone irriguée afin que nous puissions photographier l'ensemble du profil (profil vertical de 1 m de large sur 0,70 m de profondeur). Ce profil vertical a ensuite été rafraîchi tous les 4 cm et une photographie de l'ensemble du profil a été prise à chaque fois, jusqu'à l'obtention de 24 photographies (*figure 1*). La résolution des images est de 15,2 mm x 14,4 mm. Après des corrections de brillance et de géométrie, ces photos numériques couleur sont analysées de façon à

déterminer les limites de chaque horizon et la structure du colorant bleu ayant irrigué le milieu.

En dehors de la zone concernée par l'apport de colorant, plusieurs cylindres de sol non perturbés ont été prélevés dans l'horizon de surface, dans la couche à structure grumeleuse et dans la couche à structure polyédrique. Des cylindres de 16 cm de diamètre sur 10 cm de hauteur ont été analysés par tomographie à rayons X (résolution = 0,4 mm dans un plan horizontal et 1 mm dans un plan vertical). Les images obtenues en tomographie ont été seuillées, de façon à séparer le réseau poreux de la phase solide. La structure du réseau poreux a ensuite été analysée quantitativement à l'aide de plusieurs paramètres morphologiques tels que la porosité et la distribution de longueurs de cordes (Cousin *et al.*, 1996), et de paramètres topologiques tels que le nombre de pores et le nombre de pores connectés (Vogel et Cousin, 2002).

Des cylindres de 15 cm de diamètre et de 7 cm hauteur ont été prélevés dans les mêmes couches, aux profondeurs 0-7 cm et 20-27 cm. Des expériences d'évaporation de Wind ont été conduites afin de déterminer leur courbe de rétention en eau et leur conductivité hydrodynamique en régime insaturé (Tamari *et al.*, 1993 ; Mohrath *et al.*, 1997). Deux échantillons ont été prélevés à chaque fois. Les résultats présentés correspondent à des résultats moyens sur ces 2 répétitions. Les résultats obtenus ont été ajustés par le formalisme de Van Genuchten pour la teneur en eau et de Mualem-Van Genuchten pour la conductivité hydrodynamique en régime insaturé (Van Genuchten, 1980). Les données n'ont été ajustées que pour des potentiels hydriques supérieurs ou égaux à -800 cm, ce qui correspond à la gamme des mesures réalisées au laboratoire.

Afin d'avoir un témoin de l'évolution de la structure après la mise en jachère, quatre cylindres de 15 cm de diamètre et de 7 cm hauteur ont été également prélevés dans l'horizon de surface de la même unité de sol, à quelques centaines de mètres de notre zone expérimentale, dans une partie de la parcelle où les travaux culturaux sont conduits de façon conventionnelle, avec un labour qui intervient chaque année. Des expériences d'évaporation de Wind ont été réalisées sur ces cylindres.

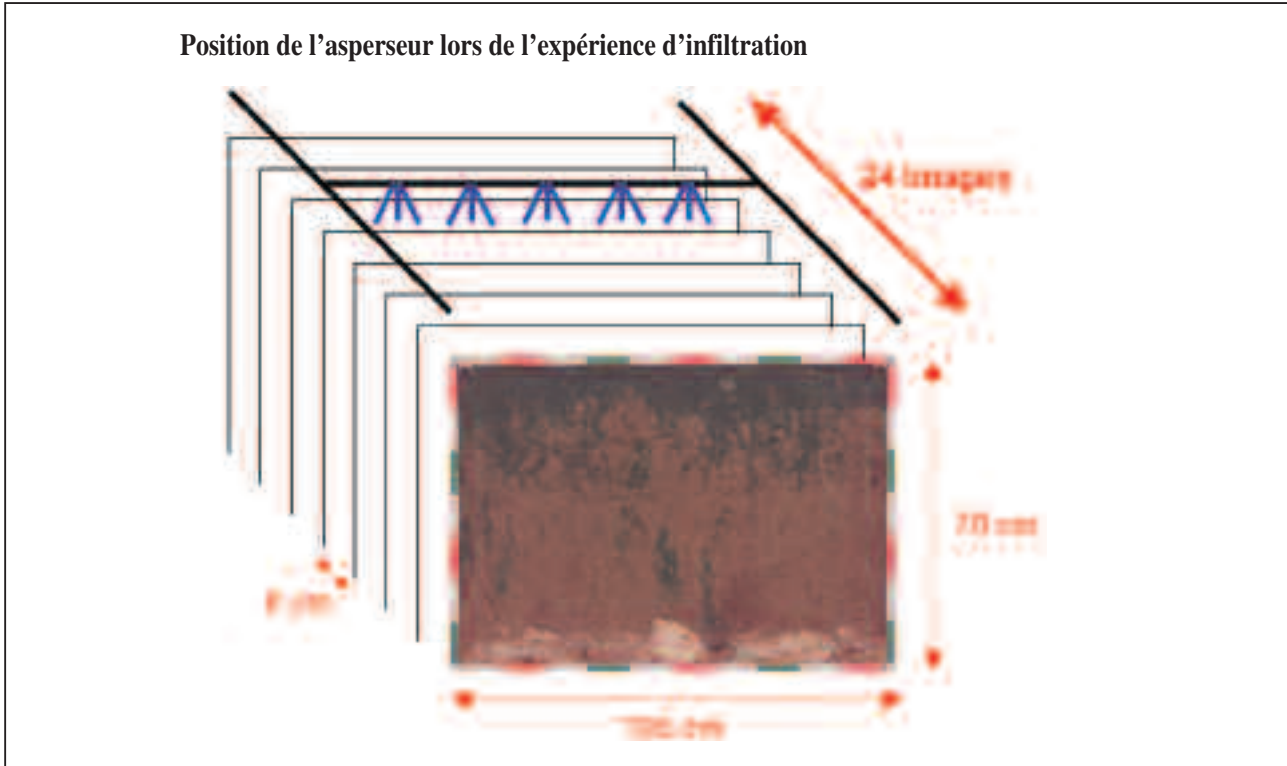
Tableau 1 - Caractéristiques physico-chimiques de l'horizon de sol étudié (horizon de surface, 0 à 35 cm)

Table 1 - Chemical and physical characteristics of the superficial horizon of the studied soil (0 - 35 cm)

Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Carbone organique	CEC
0-2 µm	2-20 µm	20-50 µm	50-200 µm	200-2000 µm		
g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	cmol kg ⁻¹
356	293	323	17	11	1,38	21,5

Figure 1 - Principe d'acquisition des images des profils verticaux après l'expérience d'infiltration. 24 images de 100 cm X 70 cm, séparées de 4 cm, ont été acquises sur le site. Un cadre de couleur rigide permet le repérage et l'alignement des images lors du post-traitement. Chaque bande blanche, verte ou rouge représente 10 cm. À l'intérieur du cadre, sur la partie utile de l'image, la taille de l'image est de 1520 X 1008 pixels.

Figure 1 - Principle of vertical image acquisition after the infiltration experiment. 24 images (100 cm X 70 cm in size), 4 cm apart, have been taken. A colored frame enables to identify and align the photos during image processing. Each white, green or red band represents 10 cm. Inside the frame, the size of the image is 1520 X 1008 pixels.



RÉSULTATS

Analyse des coupes verticales réalisées après l'expérience d'infiltration de colorant sur le terrain

Dans la partie inférieure du profil et jusqu'au toit de la formation calcaire, des traces de colorant sont visibles et indiquent que l'infiltration en profondeur est possible par de larges canaux biologiques, souvent très verticaux et assez peu connectés entre eux (*figure 1*). Les taches de couleur qui apparaissent en profondeur dans le profil sont rarement connectées à des taches de couleur situées plus en surface, ce qui indique que les chenaux permettant les transferts ne sont pas strictement verticaux.

L'analyse de la répartition des couleurs dans le milieu permet de séparer les zones colorées par le Brilliant Blue FCF des zones non colorées. En revanche, nous n'arrivons pas à distinguer correctement,

parmi les zones non colorées, les limites entre les différents horizons, hormis le matériau cryoturbé et les blocs calcaire en fond de profil. Dans l'horizon de surface, deux zones peuvent être identifiées (*figures 1 et 2*): dans les 10 premiers centimètres, la couleur intense du colorant indique une très grande connexion du réseau de pores; dans les 20 centimètres sous-jacents, la connexion est moins importante. L'analyse des 24 photos successives et la reconstruction en 3 dimensions du passage du colorant montrent que cette partition est identique sur toutes les coupes (*figure 2*). La limite entre les 2 zones est toujours sub-horizontale, et située entre 10 et 15 cm de la surface. À l'échelle où nous avons effectué les coupes, les zones colorées dans la partie supérieure présentent une connexion de 100 %. Dans la partie inférieure, la connexion entre les îlots colorés est beaucoup plus faible, ce qui indique soit que le colorant est transporté de la partie supérieure de l'horizon à la partie inférieure par des chemins préférentiels peu nombreux, soit, et c'est plus probable, qu'il est transporté par des pores de diamètre inférieurs à la résolution de notre expérience.

Caractéristiques des cylindres de sol prélevés dans l'horizon de surface

Caractéristiques géométriques

La figure 3 présente la structure du réseau poreux de deux échantillons prélevés dans les couches inférieure et supérieure de l'horizon de surface. On constate visuellement, et les mesures quantitatives le confirment, que le réseau poreux est nettement plus développé et plus connecté dans les 10 premiers centimètres du sol que dans la zone 15-25 cm. Les mesures quantitatives le confirment : la porosité mesurée en tomographie est de 4,3 % dans la couche supérieure de l'horizon, dont 52 % de porosité connectée en moyenne, alors qu'elle n'est que de 1,7 %, dont 16 % de porosité connectée, dans la couche inférieure. On constate néanmoins, les expériences ayant été réalisées sur 2 cylindres à chaque fois, que la taille du plus grand pore connecté est très variable et représen-

te, pour chaque répétition, 44 et 61 % de l'ensemble du réseau poreux dans la couche supérieure et, 8 et 23 % de l'ensemble du réseau poreux dans la couche inférieure de l'horizon (tableau 2). De même, dans la couche inférieure de l'horizon, le nombre de pores semble très variable mais il faut relativiser cette information dans la mesure où certains pores sont de très petite taille. Enfin, on constate qu'aucun des échantillons analysés ne comporte de pore percolant, i.e. de pore qui traverserait de part en part les 16 cm du cylindre de prélèvement (tableau 2). Nous savons néanmoins (grâce à des expériences d'infiltration au laboratoire non présentées ici) que l'infiltration est non nulle dans cet échantillon. Il en résulte que cet échantillon présente une porosité connectée à une échelle inférieure à la résolution de l'image.

L'analyse de la distribution de taille de corde (figure 4) montre que la structure du réseau de pores de taille supérieure à environ 40 mm (fin de la courbe) n'est pas différente dans les deux couches puisque l'on observe une décroissance exponentielle de pente similaire

Figure 2 - Reconstruction tridimensionnelle des zones ayant été colorées par le Brilliant Blue FCF lors de l'expérience d'infiltration. Cette reconstruction est basée sur les 24 images des coupes sériées (voir figure 1). On ne visualise ici que les zones touchées par le colorant dans l'ancien horizon labouré. Le plan en couleur, au milieu de la figure, donne la position d'une coupe et les limites de la couche supérieure (en bleu) et de la couche inférieure (en rouge).

Figure 2 - 3D reconstruction of the soil volumes colored by Brilliant Blue FCF during the infiltration experiment. This 3D reconstruction is based on the 24 images of serial sections (see figure 1). Only the first 30 cm, corresponding to the old ploughed layer are represented here. The colored plan in the middle gives the position of one serial section and the limit of the upper part (in blue) and the lower part (in red).

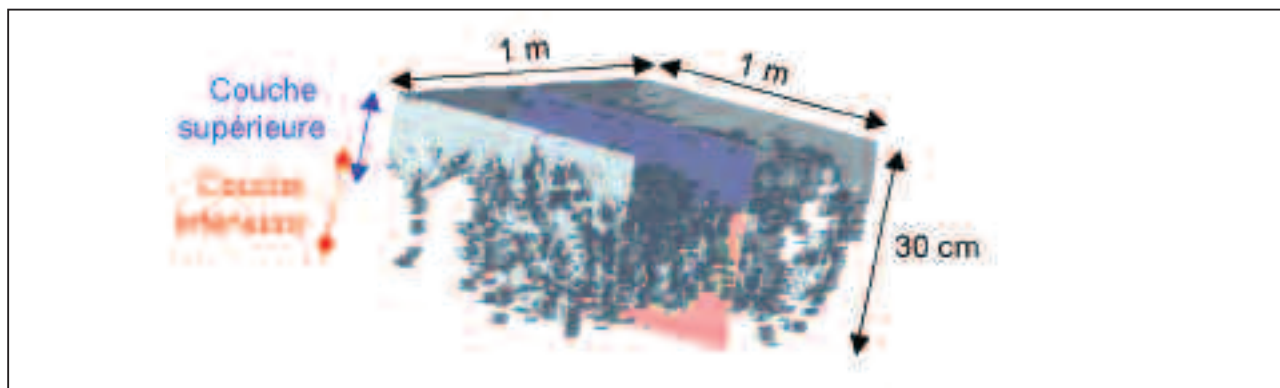


Tableau 2 - Caractéristiques du réseau poreux déterminé à partir d'images en tomographie X. Valeurs pour les 2 cylindres prélevés dans chaque couche.

Table 2 - Porous network characteristics calculated from the X-ray tomography images (data for the 2 cylinders sampled in each slice).

Zone de prélèvement	Porosité (%)	Nombre de pores	Nombre de pores percolants	Pourcentage de la porosité occupée par le plus grand pore
0 - 10 cm	4,37	1018	0	61 %
2 - 12 cm	4,22	1389	0	44 %
15 - 25 cm	1,97	327	0	8 %
15 - 25 cm	1,38	1009	0	23 %

Figure 3 - Structure du réseau de pores dans la couche 0-10 cm (à gauche) et dans la couche 15-25 cm (à droite). Le diamètre du cylindre est égal à 16 cm. Pour des facilités de visualisation, seule une tranche de 5 cm est représentée ici.

Figure 3 - Structure of the porous network in the 0-10 cm part (left) and in the 15-25 cm part (right). The diameter of the cylinder is equal to 16 cm. For easier visualisation, only a 5 cm slide is represented here.

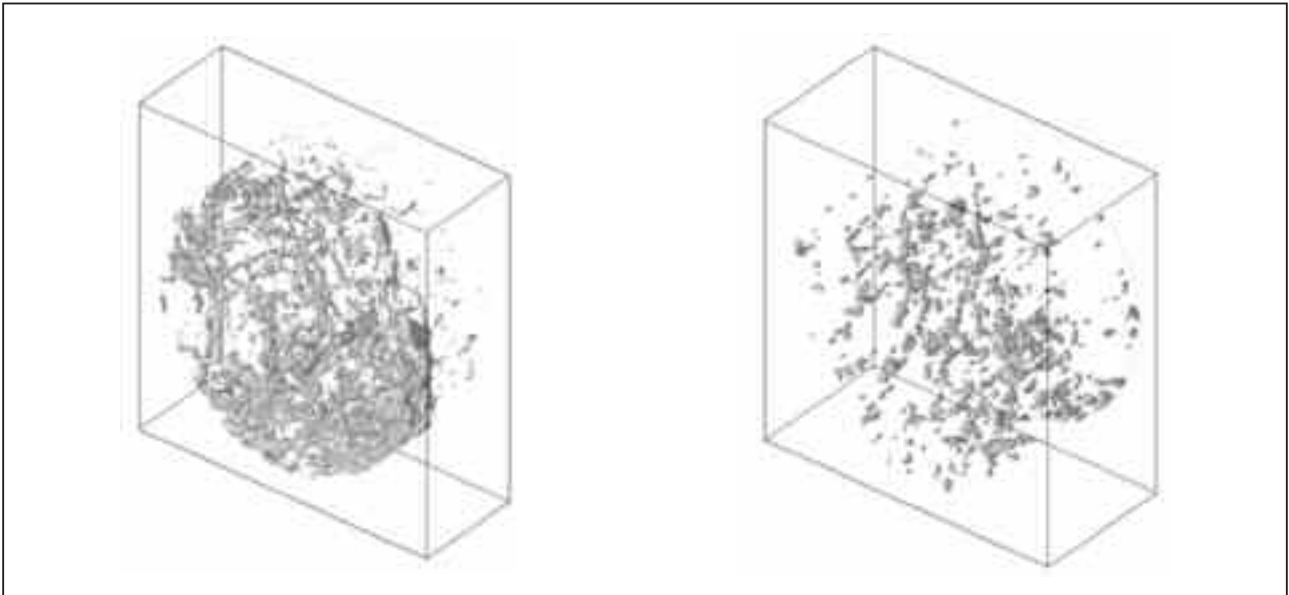
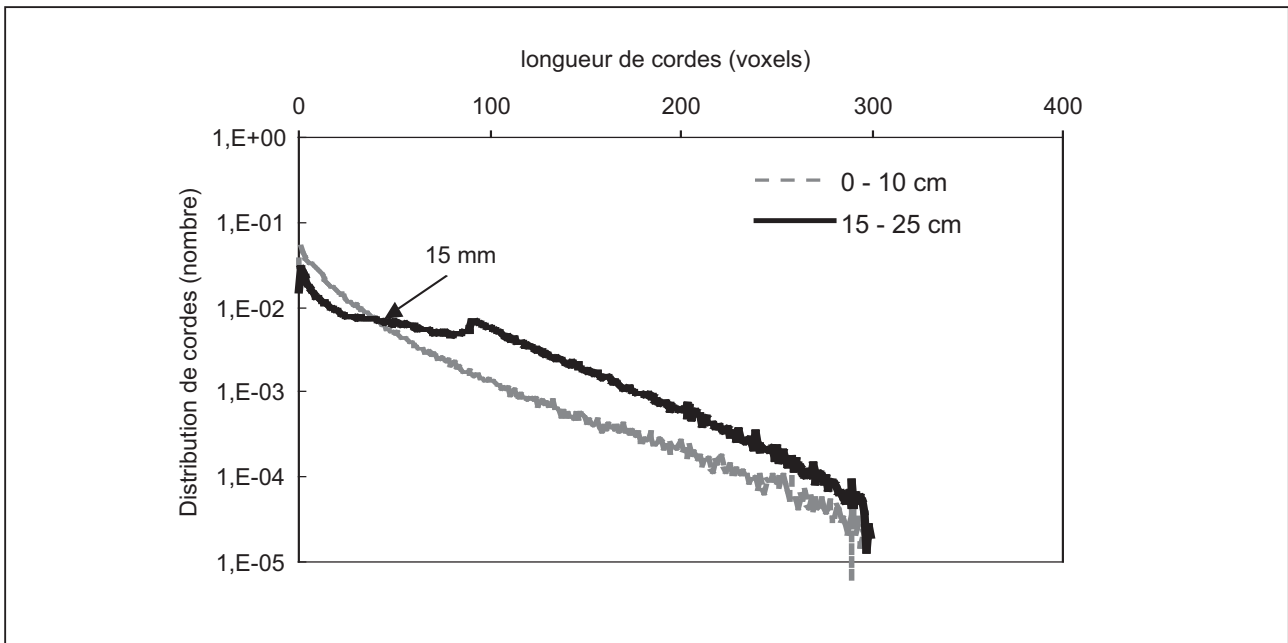


Figure 4 - Distribution de taille de cordes calculées sur les images tridimensionnelles obtenues en tomographie. Le voxel n'est pas isotrope : sa taille est de 0,4 mm en X, 0,4 mm en Y et 1 mm en Z.

Figure 4 - Chord size distribution function calculated on the 3D images from X-ray tomography experiments. The voxel is not isotropic: its size is equal to 0.4 mm in direction X, 0.4 mm in direction Y and 1 mm in direction Z.



dans les 2 échantillons analysés. En revanche, l'échantillon prélevé dans les 10 premiers centimètres présente des pores très fins plus nombreux tandis que l'échantillon prélevé dans la couche inférieure de l'horizon présente des pores plus nombreux à partir d'une taille d'environ 15 mm. Les pores très fins et très connectés observés dans la couche supérieure de l'horizon sont le signe d'une activité biologique intense, consécutive à l'arrêt du labour sur la jachère et à la mise en place du semis direct. Même si nous ne disposons pas de l'état initial de la structure de l'ancien horizon labouré à cet endroit précis, nous pouvons faire l'hypothèse que la structure avant arrêt du labour est proche de celle de la base de l'ancien horizon cultivé. Nous constatons alors, sur les 4 cylindres étudiés et à l'endroit de notre étude, qu'après 5 ans de semis direct, la porosité a été multipliée par 2,5, que la connectivité du réseau de pores a triplé, et que cette reconnexion a concerné plutôt des pores de taille inférieure à 15 mm.

Propriétés hydrodynamiques

Les propriétés hydrodynamiques ont été mesurées sur des cylindres de 7 cm de hauteur prélevés dans les 2 couches de l'horizon de surface (figure 5). La teneur en eau à saturation est plus élevée dans la couche de surface, ce qui indique une porosité totale plus importante. En revanche, à partir d'un potentiel de -30 cm, correspondant à une taille de pore équivalente de 50 μm , l'échantillon prélevé dans la couche inférieure de l'horizon retient plus d'eau. Quelle que soit la couche de prélèvement, la quantité d'eau retenue dans le sol est très supérieure à celle retenue dans l'échantillon témoin, prélevé dans une zone sans réduction de travail du sol. Les courbes de conductivité hydrodynamique montrent que la conductivité hydraulique à saturation est beaucoup plus élevée, d'environ 3 ordres de grandeur, dans l'échantillon prélevé dans la couche supérieure de l'horizon que dans la couche inférieure. Cette conductivité diminue ensuite très rapidement, et à partir de -200 cm d'eau, les courbes de conductivité hydrodynamique suivent une même pente et leurs valeurs sont très faibles (de l'ordre de $5 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) et très proches. Etant donné l'incertitude sur les données expérimentales, on peut les considérer comme égales. Quelle que soit la gamme de potentiel considérée, la conductivité hydrodynamique en régime insaturé est très supérieure à celle mesurée sur l'échantillon témoin.

DISCUSSION

Lors de l'abandon du labour, 5 ans avant notre expérience d'infiltration, on peut faire l'hypothèse que l'horizon de surface du sol, d'une épaisseur de 30 à 35 cm, présentait une structure hétérogène mais isotrope, sans différenciation structurale verticale apparente. Cette hypothèse est corroborée par la description de fosses sur le terrain, creusées non loin de notre lieu d'expérimentation, dans une zone où le labour n'a pas été abandonné par l'agriculteur. Après 5 ans de jachère sur laquelle le seul travail du sol réalisé consis-

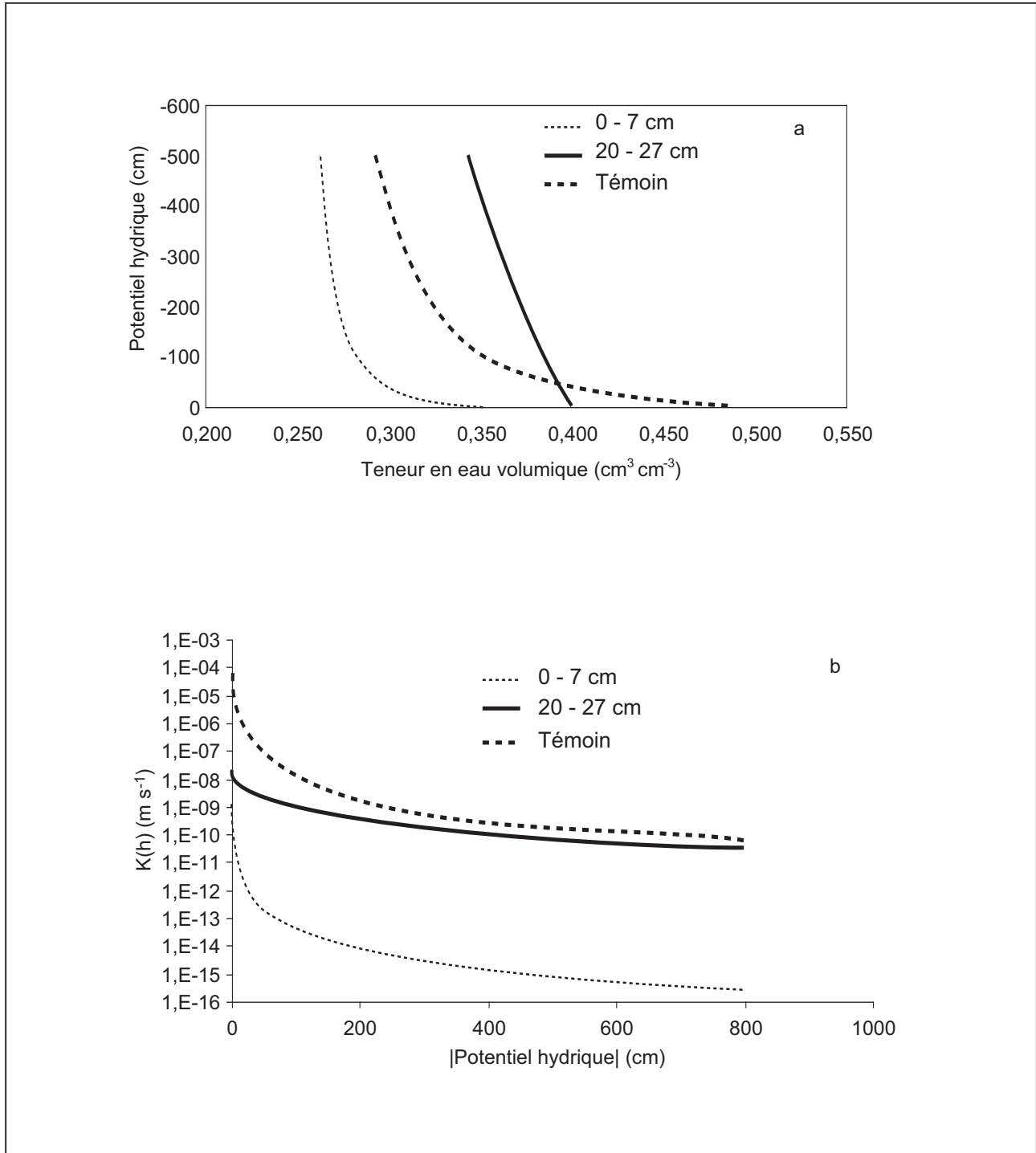
te en un semis annuel au sémavator (travail superficiel sur quelques 8 à 10 cm), la structure de l'horizon de surface présente une nette différenciation verticale : la structure grumeleuse observée sur une fosse sur les 10 premiers centimètres correspond à une zone où l'infiltration se fait de façon homogène, ce que nous montrent les coupes sériées réalisées après une expérience d'infiltration. On observe d'ailleurs que les propriétés hydrodynamiques dans cette zone, mesurées sur des cylindres de quelques décimètres-cubes, permettent une infiltration plus importante dans cette couche que dans la couche sous-jacente. La structure polyédrique, observée dans la seconde couche de l'horizon, entre 10 et 30 cm, correspond à une zone où l'infiltration se fait de façon moins homogène, ce que nous montre la reconstruction de l'expérience d'infiltration : il existe des chemins préférentiels pour le colorant, que nous avons identifiés sur le terrain comme des galeries de vers de terre. Bien que l'expérience d'infiltration, sur un volume d'environ 1 m^3 , et les mesures de conductivité hydrodynamique au laboratoire, sur un volume de quelques dm^3 ne mettent pas en jeu les mêmes échelles, les résultats concernant l'évolution de la structure et les propriétés hydrodynamiques sont convergents et indiquent une évolution différenciée du sol lors du passage en travail réduit, plus favorable à l'infiltration que la structure issue du labour conventionnel. Ces résultats sont conformes à ceux que l'on rencontre généralement dans la littérature (Trojan et Linden, 1998, par exemple).

Sur la base de nos résultats expérimentaux, pouvons-nous proposer un schéma d'évolution de la structure de l'horizon cultivé ? Sur un volume d'environ 1 m^3 , la présence de zones colorées localisées, en profondeur dans le profil, suggère la présence de galeries biologiques connectées qui traverseraient quasiment toute l'épaisseur du sol. Ces galeries, que l'on observe sur le terrain de façon erratique (environ 1 à 2 conduits sur chaque coupe verticale de sol), n'ont pas été échantillonnées lors du prélèvement de cylindres, que ce soit pour la mesure des propriétés hydrodynamiques ou pour l'imagerie par tomographie X. Elles sont donc très efficaces du point de vue du transport, mais peu nombreuses. Il ne nous est pas possible de savoir si elles étaient antérieures ou postérieures au passage en travail réduit.

Dans la partie inférieure de l'ancien horizon labouré, la structure est polyédrique alors qu'elle est assez compacte sur l'échantillon témoin. Les images de tomographie X nous montrent une structure constituée de pores de diamètre assez homogène, plutôt cylindriques, de diamètre de l'ordre de la dizaine de millimètres, très déconnectés. Sur le terrain, mais ils ne sont pas échantillonnés lors de notre prélèvement dans les cylindres, des galeries biologiques du même ordre de grandeur sont visibles mais également peu nombreuses. Il semble donc que l'activité biologique soit présente, mais qu'au bout de 5 ans, elle n'ait pas repris avec une intensité telle qu'elle permettrait de reconnecter complètement la partie inférieure de l'ancien horizon labouré. Ceci nuance les résultats courants de la littérature (Tebbrüge et During, 1999; Douglas *et al.*, 1998; MacGarry *et al.*, 2000), qui prévoient généralement que l'arrêt du labour permet une réinstallation rapide de l'activité lombricienne dans tout l'ancien

Figure 5 - Courbe de rétention en eau (-a-) et courbe de conductivité hydrodynamique en régime insaturé (-b-) déterminées à partir d'expérimentations d'évaporation de Wind. Les données ont été ajustées par les formalismes de Van Genuchten et Mualem-Van Genuchten. Le témoin correspond au cylindre de sol prélevé hors de la zone expérimentale, là où les travaux culturaux sont conduits de façon traditionnelle, avec un labour annuel.

Figure 5 - Water retention curve (-a-) and unsaturated hydraulic conductivity calculated from Wind evaporation experiments. Experimental data have been fitted by Van Genuchten and Mualem-Van Genuchten equations. The "témoin" curve corresponds to a soil core sampled outside the experimental plot, in an area with conventional ploughing.



horizon labouré. Celle-ci est active, mais en 5 ans, n'a probablement pas encore atteint son maximum.

Enfin, dans la partie superficielle de l'ancien horizon labouré, le réseau poreux est très connecté, mais par des pores très fins, de taille généralement inférieure à 10 mm. On constate également que les pores de taille supérieure à 10 mm sont moins nombreux. La modification de la structure provient donc i) d'une reconnexion du système par des pores très fins, probablement créés par l'activité biologique (mésafaune ou racines des plantes installées sur la jachère) et ii) d'une diminution du nombre de pores de plus grande taille, rebouchés ou déformés par cette activité. Le passage du sémavator participe également à cette réorganisation du milieu.

CONCLUSION

Cette étude à double échelle nous a permis de mettre en évidence l'influence de l'arrêt du labour sur la structure de la couche cultivée d'un sol argilo-limoneux de Beauce, région d'agriculture intensive. L'étude au champ a mis en évidence la présence de pores de grande taille, dont la distribution semble erratique, mais qui s'avèrent essentiels dans le transfert rapide de l'eau et des solutés vers la profondeur. Dans l'ancien horizon labouré, après 5 ans d'arrêt du labour, la structure présente une différenciation verticale nette, avec une partie supérieure très poreuse, très connectée, très favorable à l'infiltration et une partie sous-jacente moins poreuse mais néanmoins plus conductrice qu'un horizon équivalent traité en labour conventionnel. Cette différenciation est à mettre sur le compte d'une activité biologique accrue dans l'horizon de surface, pas suffisante néanmoins pour reconnecter l'ensemble de l'ancien horizon labouré. Enfin, que ce soit dans la partie inférieure de l'ancien horizon labouré ou dans les horizons sous-jacents, la présence de galeries d'origine biologique peu nombreuses permet d'expliquer l'infiltration préférentielle de l'eau et des solutés dans certaines zones du sol. Il est à noter que ces galeries ne sont pas échantillonnées lors d'un prélèvement classique sur horizon. Cela pose le problème de la représentativité des mesures des propriétés hydrodynamiques au laboratoire sur des échantillons de petite taille et sur l'utilisation de ces données à des fins de modélisation des transferts dans les sols. Notre étude montre qu'une analyse, même qualitative, de la structure du milieu à deux échelles, permet de caractériser correctement ce milieu. De telles informations sur la structure devraient pouvoir être intégrées dans des modèles de fonctionnement qui seraient ainsi à même de simuler le fonctionnement du sol de façon plus réaliste.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet Procope PAI 99062-PAI 01252TD. Il a bénéficié du soutien de Egide (Ministère des Affaires Étrangères) et du DAAD. Les auteurs remercient chaleureusement Mr Coutadeur, qui nous a donné accès à ses parcelles agricoles, P. Berché, B. Labaye, S. Lehmann, C. Le Lay, L. Raison, A. Ternedde et G. Yart pour leur participation à l'expérimentation de terrain, et Philippe Quétin pour la réalisation des mesures au laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE

- Arshad M.A., Franzluebbers A.J., Azooz R.H., 1999 - Components of soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil and Tillage Research*, 53, pp. 41-47.
- Barriso E. Calvet R., Cure B. 1991 - Incidence de la simplification du travail du sol sur le comportement des produits phytosanitaires : conséquences sur les risques de pollution. *In* Simplification du travail du sol, pp. 85-104, Les colloques de l'INRA n° 65, INRA Editions, Versailles.
- Borresen T., 1999 - The effect of straw management and reduced tillage on soil properties and crop yield of spring-sown cereals on 2 loam soils in Norway. *Soil and Tillage Research*, 51, pp. 91-102.
- Cousin I., Levitz P., Bruand A., 1996 - Three-dimensional analysis of a loamy-clay soil using pore and solid chord distributions. *European Journal of Soil Science*, 46 (4), pp. 439-452.
- Douglas J.T., Koppi A.J., Crawford C.E., 1998 - Structural improvement in a grassland soil after changes to wheel-traffic systems to avoid soil compaction. *Soil Use and Management*, 14, pp. 14-18.
- Flury M., Flüher H., 1994 - Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies - A toxicological overview. *Journal of Environmental Quality*, 23, pp. 1108-1112.
- Flury M., Flüher H., 1995 - Tracer characteristics of Brilliant Blue FCF. *Soil Science Society of America Journal*, 59, pp. 22-27.
- Gomez J.A., Giraldez J.V., Pastor M., Fereres E., 1999 - Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil and Tillage Research*, pp. 52, pp. 167-195.
- Guéris J., 1991 - Influence de la simplification du travail du sol sur l'état structural des horizons de surface : conséquences sur leurs propriétés physiques et mécaniques. *In* Simplification du travail du sol, 13-33, Les colloques de l'INRA n° 65, INRA Editions, Versailles.
- Logsdon S.D., Kaspar T.C., Cambardella C.A., 1999 - Depth incremental soil properties under no-till or chisel management. *Soil Science Society of America Journal*, 63, pp. 197-200.
- MacGarry D.M., Bridge B.J., Radford B.J., 2000 - Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. *Soil and Tillage Research*, 53, pp. 105-115.
- Mohrath D., Bruckler L., Bertuzzi P., Gaudu J.C., Bourlet M., 1997 - Error analysis of an evaporation method for determining hydrodynamic properties in unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal*, 61, pp. 725-735.
- Norwood C., 1994 - Profile water distributions and grain yield as affected by cropping system and tillage. *Agronomical Journal*, 86, pp. 558-563.
- Ould Mohamed S., Bruand A., 1994 - Morphology, location in voids and origin of secondary calcite in soils from Beauce (France). *In*: Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis (Eds A.J. Ringrose-Voase and G. Humphreys), pp 27-36, Elsevier, Amsterdam.

- Tamari S., Bruckler L., Halbertsma J., Chadoeuf J., 1993 - A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Science Society of America Journal*, 57, pp. 642-651.
- Tebrügge F., Düring R.A., 1999 - Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research*, 53, pp. 15-28.
- Trojan M.D., Linden D.R., 1998 - Macroporosity and hydraulic properties of Earthworm-affected soils as influenced by tillage and residue management. *Soil Science Society of America Journal*, 62, pp. 1687-1692.
- Van Genuchten M.T., 1980 - A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, pp. 892-898.
- Vogel H.J., Cousin I., 2002 - Quantification of pore structure and gas diffusion as a function of scale. *European Journal of Soil Science*, 54, pp. 465-473.

