

Travail du sol, structure et fonctionnement hydrique du sol en régime d'évaporation

G. Richard⁽¹⁾, J.F. Sillon⁽¹⁾, I. Cousin⁽²⁾ et A. Bruand⁽³⁾

(1) INRA, Unité d'Agronomie Laon-Reims-Mons, Rue F. Christ, 02007 Laon Cedex

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

(3) ISTO, Université d'Orléans, rue de St Amand, BP 6759, 45067 Orléans Cedex 2

RÉSUMÉ

Une des fonctions assignées au travail du sol est la modification de la structure en vue de contrôler le fonctionnement hydrique du sol. L'étude que nous avons conduite avait pour but d'analyser l'effet de la structure sur le dessèchement d'un sol cultivé au printemps. Trois traitements se différenciant par leur niveau de compacité (fort/faible) et/ou par la date de travail du sol (automne/printemps) ont été créés dans un sol de craie (Rendoll Typic) et dans un sol de limon (Luvisol Orthic). Un suivi de la teneur en eau et du potentiel de l'eau a été réalisé, respectivement, à partir de prélèvements gravimétriques et de mesures par des tensiomètres. Le flux d'évaporation a été calculé par la méthode du plan de flux nul. Les propriétés hydrodynamiques ont été estimées par la méthode évaporative de Wind. Dans le sol de craie, le traitement compacté avait un flux d'évaporation supérieur à celui des traitements travaillés d'environ 1 mm/jour. Les premiers centimètres du traitement compacté restaient humides tandis que ceux des traitements travaillés s'asséchaient rapidement. Au contraire, en profondeur, la teneur en eau du traitement compacté était inférieure à celle des traitements travaillés. Cet effet de la compacité du sol est à mettre en relation avec les variations de conductivité hydraulique du sol non saturé en fonction de la masse volumique du sol. La conductivité hydraulique était plus élevée dans le traitement compacté, probablement à cause d'une surface de contact entre fragments terreux plus grande, donc d'une meilleure continuité de la phase liquide du sol non saturé. L'augmentation de la conductivité hydraulique du traitement compacté a permis une meilleure ré-alimentation en eau de la surface du sol depuis les couches profondes, donc un flux d'évaporation plus élevé et un dessèchement de l'ensemble de la couche labourée. Cet effet n'a pas été observé dans le sol de limon pour lequel les variations de structure du sol n'ont pas eu de conséquences marquées sur le dessèchement du sol. La conductivité hydraulique était la même, à une teneur en eau donnée, quelle que soit la masse volumique. Ceci pourrait résulter de la formation de pores structuraux reliques par compactage. Il apparaît qu'un sol trop poreux en sortie d'hiver limite le dessèchement de la couche labourée au printemps. La présence des pores reliques dans un sol pourrait permettre de caractériser les conditions de compactage qu'il a subies.

Mots clés

Structure du sol, travail du sol, compactage, dessèchement, rétention en eau, conductivité hydraulique

SUMMARY**TILLAGE EFFECT ON HYDRAULIC PROPERTIES AND SOIL DRYING**

Evaporation is a major component of the water loss from the soil whose structure is modified by traffic and tillage. This study was undertaken to analyse, in field conditions, the effect of tillage and traffic on soil structure and evaporation, and to determine the role of the change in hydraulic properties on soil drying. Three structures of the ploughed layer were formed in a loess soil (Luvisol Orthique) and a calcareous soil (Rendzina): a fragmentary structure created by deep soil tillage in autumn or in spring (rotary tiller at 30 cm depth), a compacted ploughed layer created by compaction under wet conditions. The bulk density varied from 1.16 to 1.63 mg m^{-3} in the loess soil, from 1.00 to 1.45 mg m^{-3} in the calcareous soil. Evaporation was calculated from the change in soil water content and matric water potentials profiles measured during the spring season. Soil hydraulic properties were estimated using the Wind evaporative method. Soil structure greatly affected the drying of the calcareous soil: the evaporation of the compacted plot was about two times that of the tilled plot. The compacted plot dried out homogeneously, with a soil surface which remained wet. Evaporation mainly concerned the first 15 cm of the ploughed layer created by autumn or spring tillage. This effect of soil structure on evaporation was not observed in the loess soil. The unsaturated hydraulic conductivity was higher in the compacted plot than in the tilled plots in the calcareous soil. It was similar in the three plots of the loess soil, because of the formation of relict structural pores by compaction. Results showed that unsaturated hydraulic conductivity is of major concern in soil drying. The possible relict structural pores should be a criteria for soil compaction conditions.

Key-words

Soil structure, tillage, compaction, water retention, hydraulic conductivity

RESUMEN**TRABAJO DEL SUELO, ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO HÍDRICO DEL SUELO EN RÉGIMEN DE EVAPORACIÓN.**

Una de las funciones asignadas al trabajo del suelo es la modificación de la estructura para controlar el funcionamiento hídrico del suelo. El estudio que conducimos tenía como objetivo de analizar el efecto de la estructura sobre el desecamiento de un suelo cultivado durante la primavera. Se creó tres tratamientos que se diferencian por su nivel de compactación (fuerte/ligero) y/o por la fecha de trabajo del suelo (otoño/ primavera) en un suelo de creta (Rendoll typic) y en un suelo de limo (Luvisol orthic). Un seguimiento del contenido en agua y del potencial hídrico se realizó, respectivamente, a partir de muestras gravimétricas y de medidas por tensiómetros. El flujo de evaporación se calculó por el método del plan de flujo nulo. Las propiedades hidrodinámicas fueron estimadas por el método evaporativo de Wind. En el suelo de creta, el tratamiento compacto tenía un flujo de evaporación superior a los tratamientos trabajados aproximadamente de 1mm/día. Los primeros centímetros del tratamiento compactado quedaban húmedos mientras que los de los tratamientos trabajados se desecan rápidamente. Al contrario, en profundidad, el contenido en agua del tratamiento compactado era inferior al de los tratamientos trabajados. Este efecto de la compactación del suelo se pone en relación con las variaciones de conductividad hidráulicas del suelo no saturado en función su densidad aparente. La conductividad hidráulica era más elevada en el tratamiento compactado, probablemente en razón de una superficie de contacto entre los fragmentos terrosos más grande, con una mejor continuidad de la fase líquida del suelo no saturado. El aumento de la conductividad hidráulica del tratamiento compactado permitió una mejor re-alimentación en agua de la superficie del suelo desde las capas profundas, luego un flujo de evaporación más elevado y un desecamiento de toda la capa arada. Este efecto no fue observado en el suelo de limo donde las variaciones de estructura del suelo no han tenido las consecuencias marcadas sobre el desecamiento del suelo. La conductividad hidráulica era la misma, a un contenido en agua dado, cual que sea la densidad aparente. Esto podría resultar de la formación de poros estructurales reliquias por compactación. Aparece que un suelo demasiado poroso a la salida del invierno puede limitar el desecamiento de la capa arada en la primavera. La presencia de poros reliquias en un suelo podría permitir caracterizar las condiciones de compactación que este subió.

Palabras clave

Trabajo del suelo, compactación, desecamiento, retención en agua, conductividad hidráulica.

L'une des fonctions du travail du sol est le contrôle de la circulation de l'eau dans le sol, en régime d'évaporation et en régime d'infiltration. L'agriculteur peut chercher à favoriser le dessèchement du sol pour intervenir, lors des périodes de semis, dans ses parcelles le plus tôt possible après une pluie. Il peut au contraire chercher à limiter le dessèchement du sol pour éviter, après le semis, des conditions sèches dans les premiers centimètres du lit de semences qui retarderaient la germination.

C'est par son effet sur la structure du sol et sur la localisation des résidus de culture que le travail du sol affecte le fonctionnement hydrique du sol. Les nombreuses études concernant des comparaisons sol travaillé/sol non travaillé ont mis en évidence le rôle d'un mulch de résidus à la surface du sol (Johnson *et al.*, 1984; Radke *et al.*, 1985). Le mulch réduit le flux d'évaporation et limite le dessèchement du sol: un sol non travaillé après la récolte de la culture précédente reste donc généralement plus humide qu'un sol travaillé. Pour ce qui est de l'effet de la structure du sol, il a été établi que la création, par le travail du sol, d'un horizon superficiel de structure fragmentaire favorise l'évaporation à court-terme. Le dessèchement très marqué de l'horizon travaillé permet ensuite de limiter l'évaporation ultérieure (dite à long-terme) et de préserver les ressources en eau du sol (Allmaras *et al.*, 1977; Gill *et al.*, 1977). L'effet de l'état de compacité ou du degré de fragmentation du sol est plus mal connu. L'étude que nous avons conduite visait donc à quantifier l'effet de la structure de la couche labourée d'un sol cultivé sur son fonctionnement hydrique en régime d'évaporation et à caractériser les variations de propriétés hydrodynamiques induites par les changements de structure du sol. L'analyse des effets de la structure du sol a ensuite été basée sur l'utilisation d'un modèle de transfert d'eau dans les sols.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sites et dispositifs expérimentaux

L'étude (Sillon, 1999) a été réalisée au printemps sur deux grands types de sol du Nord du bassin parisien (*tableau 1*): un sol de craie (Rendzine sur substrat crayeux avec 70 % de calcaire dans la couche labourée, Rendoll Typic d'après le référentiel FAO) du domaine expérimental INRA de Châlons en Champagne (Marne) en 1996, un sol de limon (Sol Brun Lessivé avec 20 % d'argile et 70 % de limon dans la couche labourée, Luvisol Orthic d'après le référentiel FAO) du domaine expérimental INRA d'Estrées-Mons (Somme) en 1995. Les expérimentations ont été conduites de façon similaire dans les deux types de sol. Chaque expérimentation a été mise en place sur une parcelle longue de 25 m et large de 30 m avec un précédent de blé dont les résidus de récolte ont été brûlés. La parcelle a été travaillée durant l'automne précédant l'expérimentation à l'aide d'une roto bêche (en conditions plutôt sèches le 10/10/1994 en sol de limon et le 17/10/1995 en sol de craie). L'objectif était d'obtenir une structure fine sur 30 cm de profondeur et homogène sur l'en-

semble de la parcelle (absence de bande de labour). La parcelle a été subdivisée au printemps en trois traitements de 10 m de large:

- **Traitement compacté (C)**: un passage de tracteur, roue dans roue afin de couvrir l'ensemble de la surface du sol, a été réalisé fin mars en conditions humides pour obtenir un état structural massif et compacté avec une porosité minimale (le 13/3/1995 en sol de limon et le 22/3/1996 en sol de craie).
- **Traitement travaillé au printemps (P)**: un nouveau passage de roto bêche a été réalisé fin avril en conditions plutôt sèches pour obtenir un état structural fragmentaire et poreux constitué de fragments terreux de petite taille (< 1 cm) avec une porosité maximale (le 21/04/1995 en sol de limon et le 01/04/1996 en sol de craie).
- **Traitement travaillé à l'automne (A)**: le sol n'a subi aucun travail du sol au printemps. Son état résulte de l'action du climat hivernal sur l'état fragmentaire obtenu en octobre (reprise en masse à l'humectation). L'objectif était d'obtenir un état structural constitué de fragments terreux soudés entre eux avec une porosité intermédiaire à celle des traitements C et P.

Etats et propriétés physiques des sols

Des profils culturaux de 6 mètres de large ont été réalisés sur chaque traitement afin de repérer les horizons, mesurer leur épaisseur et caractériser leur état structural. Le profil de masse volumique a été mesuré à l'aide d'une sonde gamma (six répétitions, une mesure tous les 5 cm). La distribution de la taille des fragments terreux des traitements A et P a été obtenue à partir du tamisage d'un volume de sol de 0,0014 m³ prélevé à l'aide d'un cylindre de 25 cm de diamètre (six répétitions). La rugosité de la surface a été estimée sur 4 m de large avec un aspérimètre à aiguille (espacement entre deux aiguilles de 1 cm). Des mesures du rayonnement réfléchi sur chaque traitement et du rayonnement incident sur chaque parcelle expérimentale (par des pyranomètres) ont permis de calculer en continu l'albédo.

Des mesures quotidiennes du potentiel de l'eau ont été réalisées à l'aide de tensiomètres à mercure (bougie poreuse de 13 mm de diamètre) positionnés aux profondeurs suivantes (trois répétitions par profondeur): 2, 5, 10, 17, 25, 40 et 60 cm. La teneur en eau a été mesurée à partir de prélèvements gravimétriques réalisés tous les 2 à 3 jours durant les périodes de dessèchement (six répétitions). Les prélèvements ont été réalisés tous les 1 cm dans la couche 0-5 cm, tous les 5 cm dans la couche 5-35 cm et tous les 10 cm dans la couche 35-65 cm. L'évaporation a été calculée à partir des mesures de potentiel de l'eau et de teneur en eau à l'aide de la méthode du plan de flux nul (Vachaud *et al.*, 1978).

Les propriétés hydrodynamiques du sol ont été estimées à partir de mesures réalisées sur le terrain et au laboratoire. Les couples (teneur en eau, potentiel de l'eau) obtenus sur le terrain pour chaque profondeur de mesure ont permis d'établir la courbe de rétention en eau (pour des potentiels de l'eau >-100 kPa). Cette courbe de rétention de terrain a été comparée à celle obtenue au laboratoire à partir de la méthode de Wind (Wind, 1968). La méthode

de Wind est une méthode évaporative qui consiste à suivre (par pesée) l'évolution de la teneur en eau moyenne d'un échantillon de sol qui a été préalablement saturé en eau, et celle du profil de potentiel de l'eau en son sein (à l'aide de microtensiomètres). La courbe de rétention en eau est obtenue par une méthode mathématique inverse en supposant l'échantillon de sol homogène : il s'agit d'ajuster la courbe qui permet de recalculer au mieux la teneur en eau moyenne de l'échantillon à tout instant à partir du profil de potentiel de l'eau. Une fois la courbe de rétention en eau connue la conductivité hydraulique est calculée à chaque profondeur de mesure du potentiel de l'eau à partir de la loi de Darcy : la conductivité hydraulique est égale au rapport entre le flux d'eau à une profondeur donnée, calculée à partir de la variation de la teneur en eau entre deux instants de mesure successifs, et le gradient de potentiel de l'eau, calculé à partir de la variation de potentiel entre trois profondeurs successives. Cette méthode a été développée à l'INRA Science du Sol d'Avignon par Tamari *et al.* (1993). Différentes sources d'erreur (position des capteurs, étalonnage des capteurs, degré d'hétérogénéité de l'échantillon) ont été analysées par Morath *et al.* (1997). Nous avons utilisé des cylindres de 15 cm de diamètre et de 7 cm d'épaisseur (cinq cylindres par traitement, prélevés dans la couche 5-22 cm). Chaque cylindre est équipé de 6 tensiomètres (bougie poreuse de 2,2 mm de diamètre) positionnés à 0,5, 1, 2, 3, 4,5 et 6 cm avec une mesure toutes les 20 minutes. Suite aux travaux de Richard *et al.* (2001b), les cylindres à forte porosité (traitements A et P) ont été saturés en eau en appliquant un potentiel de l'eau nul à leur base pendant deux semaines. Les cylindres à faible porosité (traitement C) ont eux subi un ennoyage durant la seconde semaine. La durée d'une expérience est de l'ordre d'une semaine.

RÉSULTATS

Caractérisation de la structure des horizons travaillés et compactés

Dans le sol de craie, l'état structural fin obtenu par le travail du sol d'automne a très peu évolué durant l'hiver. Les états structuraux des traitements travaillés à l'automne et au printemps se sont révélés similaires, avec peu de fragments terreux d'un diamètre > 40 mm et une masse volumique relativement faible, de l'ordre

de 1 mg m⁻³ (tableau 2). L'albédo plus élevé du sol travaillé à l'automne résulte d'une plus grande quantité de petits cailloux calcaires visibles à la surface du sol, suite à la désagrégation des fragments terreux de surface induite par les pluies hivernales. Dans le sol de limon, l'état structural obtenu par le travail d'automne était plus grossier que dans le sol de craie (tableau 2). L'augmentation de porosité entre les traitements travaillés à l'automne et au printemps dans le sol est à mettre en relation avec le travail du sol de printemps qui a fragmenté les fragments terreux les plus grossiers (tableau 2). Finalement, dans les deux sols, seule une légère soudure des fragments terreux a été observée durant l'hiver, ce qui témoigne d'une reprise en masse hivernale peu intense.

Les traitements compactés obtenus dans les deux sols présentent une masse volumique beaucoup plus forte que celle des traitements travaillés. La surface des traitements compactés se caractérise par une rugosité plus faible et un albédo légèrement plus élevé que ceux des traitements travaillés (tableau 2).

Structure et dessèchement du sol

Sur le tableau 3 sont présentées les évaporations calculées par traitement pour deux périodes de dessèchement qui suivaient un épisode pluvieux et qui avaient des ETP contrastées : 1 à 2 mm par jour (période 1) ou 4 à 5 mm par jour (période 2). Dans le sol de craie, l'évaporation dans le traitement compacté est supérieure à celle du traitement travaillé à l'automne d'environ 1 mm par jour durant les deux périodes de dessèchement. L'évaporation est par contre similaire dans les traitements travaillés à l'automne ou au printemps. Dans le sol de limon, l'évaporation n'était pas significativement différente entre les trois traitements.

Les conséquences des variations d'évaporation sur l'évolution du profil de teneur en eau sont illustrées sur la figure 1. La teneur en eau est exprimée en indice d'eau (appelée aussi taux d'humidité) :

$$\vartheta = (\rho_s / \rho_w) \cdot w$$

w : teneur en eau massique (g d'eau par g de sol)

ϑ : indice d'eau (m³ d'eau par m³ de solide)

ρ_s : masse volumique de solide (Mg de sol par m³ de solide)

ρ_w : masse volumique de l'eau (Mg par m⁻³)

En sol de craie, l'indice d'eau des premiers centimètres du traitement compacté est supérieur à celui du traitement travaillé : le trai-

Tableau 1 - Caractéristiques des 30 premiers centimètres des deux types de sol étudiés

Table 1 - Physical characteristics of the first 30 centimetres of loess and calcareous soils

| | Argile < 2 μm (g kg ⁻¹) | Limon 2-50 μm (g kg ⁻¹) | Sable 50-2000 μm (g kg ⁻¹) | CaCO ₃ (g kg ⁻¹) | Carbone Organique (g kg ⁻¹) | Masse volumique du solide (Mg m ⁻³) |
|--------------|--|--|---|--|---|--|
| Sol de limon | 146 | 797 | 52 | 5 | 10 | 2.68 |
| Sol de craie | 109 | 179 | 16 | 696 | 20 | 2.67 |

Tableau 2 - Etat structural de l'horizon travaillé de chaque traitement**Table 2** - Structure of the tilled horizon of each treatment

| | | Epaisseur (cm) | Rugosité de surface (cm) | Albédo (sol sec) | Masse volumique (Mg m ⁻³) | Porosité Totale (2) (m ³ m ⁻³) | Proportion de fragments terreux | |
|--------------|-------|-------------------|--------------------------------|---------------------|---|---|------------------------------------|-----------------------------------|
| | | | | | | | < 2 mm (kg kg ⁻¹) | > 40 mm (kg kg ⁻¹) |
| Sol de craie | A (1) | 35.5 | 1.20 | 0.33 | 1.06 | 0.61 b | 0.32 b | 0.04 b |
| | P | 34.1 | 1.23 | 0.26 | 1.00 | 0.63 a | 0.36 b | 0.01 b |
| | C | 24.9 | 0.30 | 0.33 | 1.45 | 0.45 c | 0 a | 1 a |
| Sol de limon | A | 33.0 | 1.28 | 0.31 | 1.28 | 0.52 b | 0.18 b | 0.19 b |
| | P | 34.0 | 1.12 | 0.29 | 1.16 | 0.57 a | 0.27c | 0.08 c |
| | C | 25.9 | 0.37 | 0.35 | 1.63 | 0.39 c | 0a | 1 a |

(1) Traitement travaillé à l'automne (A) ou au printemps (P), traitement compacté (C)

(2) Les chiffres suivies par une même lettre pour un sol donné ne sont pas significativement différents ($P=0.05$, test de Tukey)

| | Période | ETP (mm jour ⁻¹) | Flux d'évaporation à la surface du sol (mm jour ⁻¹) | | |
|----------------------|------------|---------------------------------|--|-------|-------|
| | | | C | A | P |
| Sol de craie 1996 | 22/3 → 2/4 | 1.6 | 1.9 a | 0.8 b | - |
| | 4/6 → 13/6 | 5.1 | 2.9 a | 1.4 b | 1.3 b |
| Sol de limon 1995 | 4/4 → 14/4 | 1.8 | 1.2 a | 1.8 a | - |
| | 1/5 → 9/5 | 4.2 | 1.2 a | 1.4 a | 1.7 a |

Tableau 3 - Flux d'évaporation estimée durant deux périodes de dessèchement pour chaque traitement (l'erreur-standard varie de 0.2 à 0.5 mm jour⁻¹)

Table 3 - Evaporation from each treatment calculated during two dry periods (standard error varied from 0.2 to 0,5 mm d⁻¹)

Les valeurs suivies par une même lettre au sein d'une même ligne ne sont pas significativement différentes ($P=0.05$, test de Tukey)

tement travaillé à l'automne s'est desséché plus rapidement en surface que le traitement compacté. Au contraire, au-delà de 15 cm de profondeur, l'indice d'eau du traitement compacté est inférieur à celui du traitement travaillé à l'automne : le dessèchement du traitement compacté affecte l'ensemble de la couche labourée alors qu'il concerne préférentiellement la surface du sol dans le traitement travaillé à l'automne. Ce résultat est à mettre en relation avec celui concernant les différences de flux d'évaporation entre les deux traitements : le traitement qui évapore le plus est celui qui reste le plus humide en surface et qui se dessèche le plus en profondeur parce qu'il y a une meilleure alimentation en eau de la surface du sol à partir de couches profondes.

En sol de limon, l'indice d'eau évolue de façon similaire dans le traitement compacté et dans le traitement travaillé, avec un dessèchement plus marqué dans les premiers centimètres qu'au-delà de 15 centimètres. Ce résultat est à mettre en relation avec celui concernant la similarité des flux d'évaporation entre les deux traitements.

Enfin, dans les deux types de sol, aucune différence n'a été observée entre les traitements travaillés à l'automne et ceux travaillés au printemps.

Structure et propriétés hydrodynamiques du sol

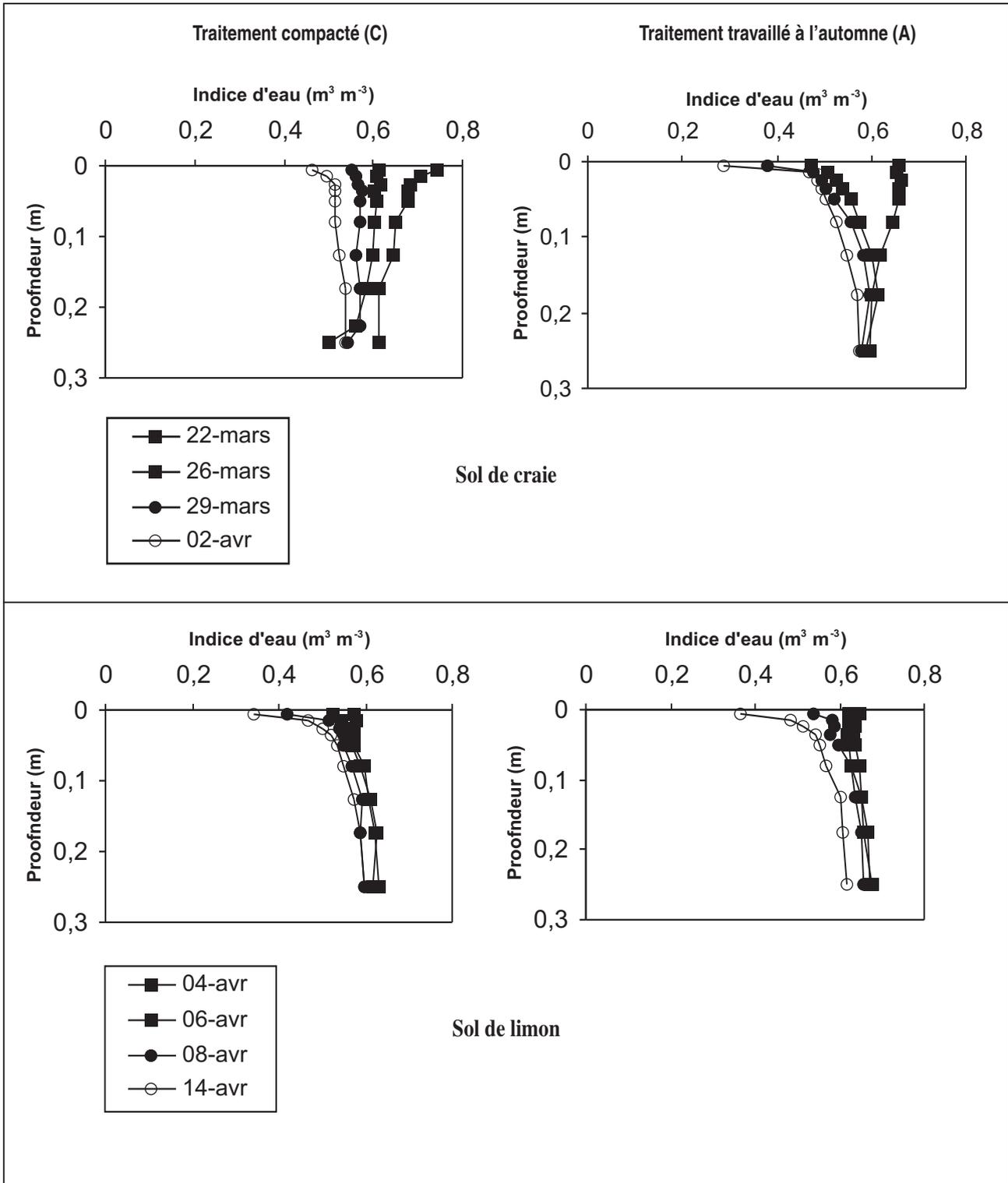
Sur la figure 2 sont présentées les courbes de rétention et de conductivité hydraulique obtenues par la méthode de Wind dans une gamme de potentiel de l'eau compris en -0,5 m et -8 m pour des structures compactes et massives (cylindres issus des traitements compactés) ou bien fragmentaires et poreuses (cylindres issus des traitements travaillés au printemps). Le sol le plus compact retient toujours moins d'eau pour des potentiels de l'eau > -2 m. Dans le sol de craie, l'indice d'eau est similaire dans les deux types de structure pour des potentiels de l'eau < -2 m. Par contre, dans le sol de limon, le sol compact retient plus d'eau que le sol poreux pour des potentiels de l'eau < -2 m. Pour ce qui est de la conductivité hydraulique, celle-ci est, dans le sol de craie, plus élevée dans le sol compact que dans le sol poreux à un indice d'eau donné (d'un facteur trois environ). Dans le sol de limon, la conductivité hydraulique est la même pour les deux types de structure.

DISCUSSION

Dans le sol de craie, les variations de structure ont profondément

Figure 1 - Evolution du profil d'indice d'eau au cours d'une période de dessèchement en sol de craie (haut, teneur en eau mesurée les 22/3, 26/3, 29/3 et 2/4) et en sol de limon (bas, teneur en eau mesurée les 4/4, 6/4, 8/4 et 14/4)

Figure 1 - Change in water ratio profile during one dry period on the calcareous soil (top, water content measured on 22/3, 26/3, 29/3 and 2/4) and on the loess soil (bottom, water content measured on 4/4, 6/4, 8/4 and 14/4)



affecté le fonctionnement hydrique du sol en terme (1) d'évaporation : elle est supérieure d'environ 1 mm par jour dans le sol le plus tassé, (2) de forme du profil hydrique : la surface du sol le plus tassé reste humide plus longtemps. Ce résultat est à mettre en relation avec la conductivité hydraulique plus élevée du traitement le plus tassé : une forte conductivité hydraulique du sol permet de transférer de l'eau plus facilement et depuis des couches plus profondes vers la surface du sol, qui peut ainsi rester humide plus longtemps. Si l'on considère un sol présentant initialement une structure fragmentaire, constitué de fragments terreux de petite taille, les variations de conductivité hydraulique sont à mettre en relation avec les variations de surface de contact entre les fragments terreux. En effet, le compactage entraîne une diminution de la porosité entre les fragments terreux et ainsi une augmentation des surfaces de contact entre les fragments terreux. En conséquence, tant que le taux de saturation en eau de la porosité structurale est nul, c'est-à-dire tant que l'eau est uniquement localisée au sein des fragments terreux, une augmentation de la compacité doit entraîner une augmentation de la conductivité hydraulique du fait d'une meilleure continuité des pores remplis d'eau. Cela suppose que la conductivité hydraulique au sein des fragments terreux n'ait pas été modifiée par le compactage, ce que laisse présager la similitude des courbes de rétention en eau des traitements tassés et non tassés pour des potentiels < -2 m, c'est-à-dire en l'absence d'eau dans l'espace poral entre les fragments terreux. Des résultats similaires sont été obtenus dans des sols tropicaux à structure microgranulaire (Curmi *et al.*, 1994). Il apparaît donc que dans le sol de craie, les variations de masse volumique induites par le compactage, se sont traduites par des variations de la conductivité hydraulique de la couche labourée, qui elle-même ont affecté le fonctionnement hydrique du sol.

Les résultats obtenus en sol de limon ont été très différents de ceux obtenus en sol de craie. Malgré une gamme de variation très importante de la masse volumique de la couche labourée entre les trois traitements étudiés (de 1,16 à 1,63 mg m^{-3}), les relations conductivité hydraulique/indice d'eau étaient similaires. Par conséquent, le dessèchement du sol n'a pas été affecté par les variations de masse volumique. Pour expliquer la différence de comportement entre les sols de craie et de limon, nous avons conduit une analyse fine de la porosité (Richard *et al.*, 2001a). L'analyse de lames minces a montré que la porosité texturale n'a pas été affectée par le compactage du sol ou par le travail du sol. Les résultats de porosimétrie à mercure sont présentés sur la *figure 3* en terme de différence d'indice des vides entre des fragments terreux issus du traitement tassé et du traitement travaillé au printemps par classe de diamètre de pore équivalent. Pour les plus petits diamètres (correspondant au diamètre des pores argileux), cette différence est très faible. Pour les plus grands diamètres, l'indice des vides du traitement compacté est plus faible que celui du traitement travaillé. Par contre, pour des diamètres équivalents de pore de l'ordre de 2 μm , l'indice des vides du traitement compacté est supérieur à celui du traitement travaillé. Du fait de l'absence de variations de la porosité texturale entre les traitements compac-

tés et travaillés, la différence d'indice des vides pour des pores d'un diamètre équivalent de 2 μm indique que, lors du compactage, des pores structuraux ont été « emprisonnés » au sein de l'espace poral textural. Ces pores, qualifiés de pores structuraux « reliques » par Bruand et Cousin (1994), avaient déjà été mis en évidence par ces auteurs sur des échantillons remaniés. L'absence de variation de la conductivité hydraulique en fonction de la masse volumique pourrait être due à la présence de ces pores reliques dans le traitement compacté. Les pores reliques jouent en fait un rôle de réservoir dans un réseau de pores de plus petit diamètre. Ils augmentent la quantité d'eau retenue dans le sol compacté à des potentiels de l'eau où normalement ils ne contiennent pas d'eau. En revanche, ils contribuent peu à la conductivité hydraulique. Ils expliqueraient donc que le sol compacté retient plus d'eau que le sol travaillé à des potentiels < -2 m, et qu'en revanche la conductivité hydraulique soit la même entre les traitements compactés et travaillés.

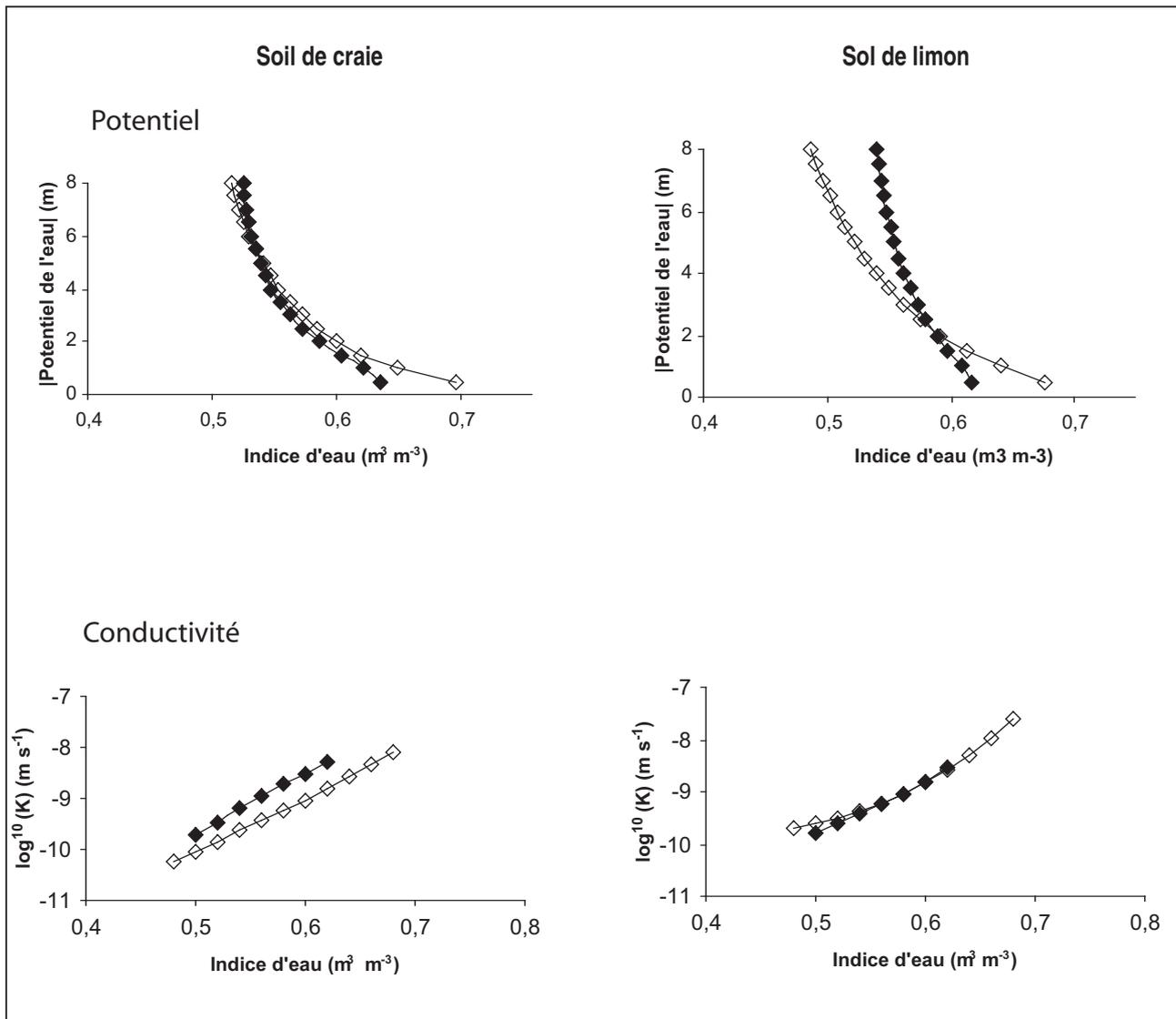
CONCLUSION

L'étude du fonctionnement hydrique du sol en fonction de sa structure, qui a été conduite sur un sol de craie et de limon, permet de mettre en relation les modalités de dessèchement d'un sol au printemps avec les variations de conductivité hydraulique (en dehors du domaine de saturation en eau de la porosité). La conductivité hydraulique de la couche labourée conditionne la ré-alimentation en eau de la surface du sol : si elle est trop faible (par rapport à une certaine demande climatique), la surface du sol s'assèche et limite le dessèchement ultérieur des couches plus profondes. Si elle est suffisante, la surface du sol reste humide et le dessèchement concerne l'ensemble de la couche labourée.

Comment à partir de ces résultats raisonner l'état structural à atteindre en sortie d'hiver pour favoriser le dessèchement du sol et réaliser les semis le plus tôt possible au printemps? D'un côté, chercher à diminuer la teneur en eau de l'ensemble de la couche labourée permet d'augmenter la résistance mécanique du sol et ainsi de réduire la sensibilité du sol au tassement lors des préparations superficielles et des semis. Il faut éviter d'avoir qu'un sol trop poreux en sortie d'hiver. Cela conduit à supprimer le labour ou bien à réaliser le labour juste avant les interventions de printemps, sauf si la présence d'un mulch de résidus de la culture précédente (pailles de blé par exemple), qui est un frein à l'évaporation, contrebalance l'effet de la structure du sol. D'un autre côté, favoriser le dessèchement extrême des premiers centimètres du sol peut aussi permettre de réduire la sensibilité du sol au tassement. Ceci étant, cet effet dit « couche sèche » mis en évidence par Guérif (1984) en sol argileux n'a pas été retrouvé en sol limoneux (Padot, 1996). Le domaine de validité de cet effet « couche sèche » reste à établir. Il s'avère donc nécessaire de mieux prévoir à la fois l'effet du mulch sur le dessèchement sol et celui de la forme du profil de teneur en eau sur la résistance mécanique du sol (cf. article de Défossez *et al.*, 2004 dans ce

Figure 2 - Relations Potentiel de l'eau/Indice d'eau et Conductivité hydraulique/Indice d'eau obtenues par la méthode de « Wind » en sols de craie (gauche) et de limon (droite) pour une structure massive et compacte (symbole plein), ou pour une structure fragmentaire et poreuse (symbole ouvert)

Figure 2 - Water potential/water ratio and hydraulic conductivity/water ratio relationships obtained with the Wind in the calcareous and loess soils on compacted (dark symbol) or tilled (open symbol) plots.



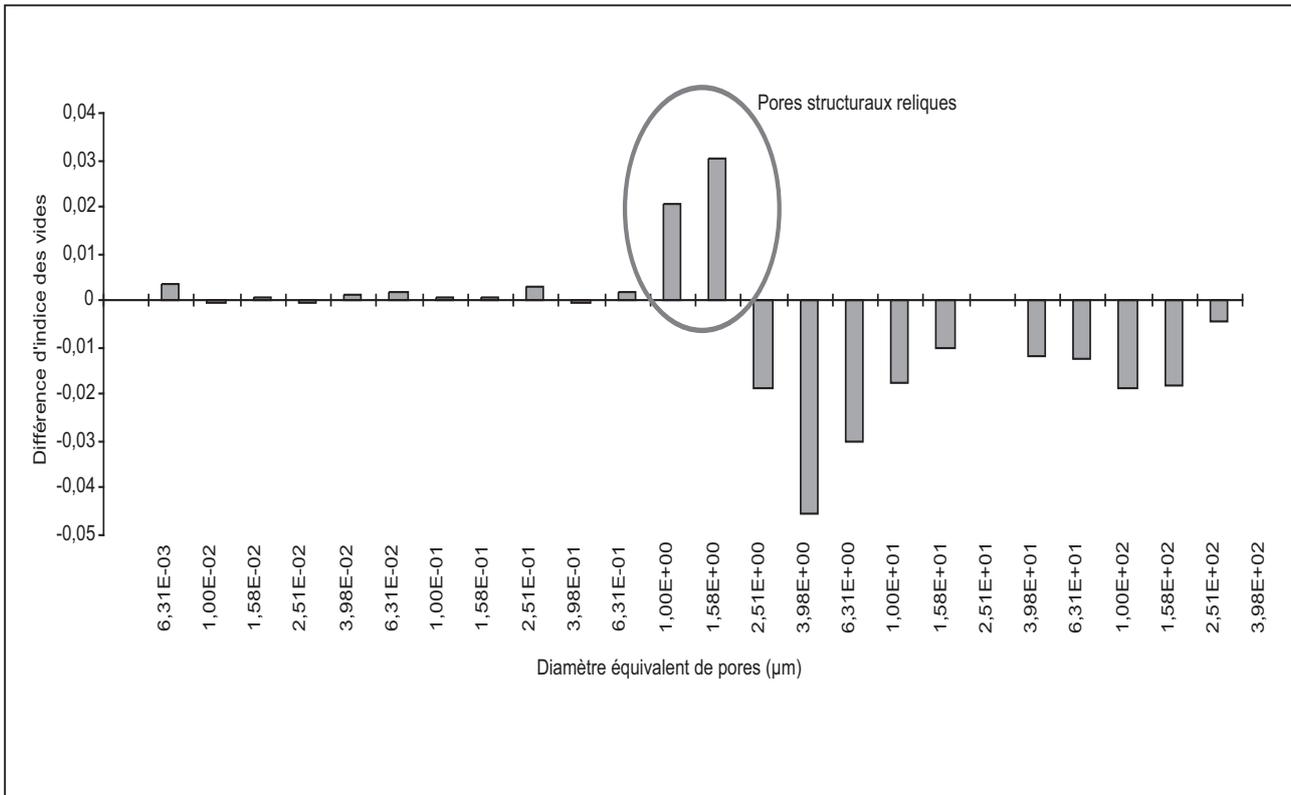
numéro) pour être en mesure de raisonner le travail du sol par rapport aux conditions d'intervention de printemps.

Enfin, les différences de propriétés hydrodynamiques en sol de limon entre un horizon tassé et non tassé ont été mises en relation avec la présence de pores reliques. La même analyse doit maintenant être conduite en sol de craie. Si l'on parvient à mieux définir les conditions d'apparition des pores reliques, alors leur présence pourrait nous permettre de mieux caractériser, *a posteriori*, les conditions

de compactage d'un sol à un moment donné (importance du cisaillement par exemple) ou bien la sensibilité d'un sol au compactage.

Figure 3 - Différence, par classe de diamètre équivalent de pores, entre le volumes de pores de fragments terreux, de structure massive, prélevés dans le traitement compacté et le volume de pores de fragments terreux, de structure fragmentaire, prélevés dans le traitement travaillé au printemps (mesures en sol de limon). Résultats obtenus par porosimétrie au mercure.

Figure 3 - Differences in void ratio of clods from compacted and from tilled plots in the loess soil as a function of pore diameter. Results obtained with mercury porosimetry.



REMERCIEMENTS

Cette étude a été conduite dans le cadre de la thèse de J.F. Sillon qui a été financée par le Conseil Régional de Picardie et par la Chambre d'Agriculture de la Marne. Elle a bénéficié de l'appui technique de D. Boitez, C. Dominiarczyk et F. Mahu.

BIBLIOGRAPHIE

- Allmaras R. R., Hallauer E. A., Nelson W. W., Evans S.D., 1977 - Surface energy balance and soil thermal property modifications by tillage-induced soil structure. Technical Bulletin, 306.
- Bruand A., Cousin I., 1994 - Variation of textural porosity of a loamy-clay soil during compaction. Eur. J. Soil Sci., 46, pp. 377-385.
- Curmi P., Kertzman F.F., Queiroz Neto, J.P., 1994 - Degradation of structure and hydraulic properties in an Oxisol under cultivation (Brazil). In A.J. Ringrose-Voase et G.S. Humphreys (Editeurs) Soil micromorphology: studies in management and genesis, Developments in Soil Science, Elsevier, 22, pp. 569-579.
- Guérif J., 1984 - The influence of water-content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. J. Agric. Engng. Res., pp. 367-374.
- Gill K. S., Jalota, S. K., Prihar, S. S., Chauphary, T. N., 1977 - Water conservation by soil mulch in relation to soil type, time of tillage, tillage and evaporativity. J. Indian Soc. Soil Sci., 25, pp. 360-366.
- Johnson M.D., Lowery, B., Daniel, T.C., 1984 - Soil moisture regimes of three conservation tillage systems. Transactions of the ASAE., pp. 1385-1395.
- Morath D., Bruckler L., Bertuzzi P., Gaudu J.C., Bourlet M., 1997 - Error analysis of an evaporation method for determining hydrodynamic properties in insaturated soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 61, pp. 725-735.
- Padot M., 1996 - Effet de la teneur en eau de l'horizon de surface sur le compactage de l'horizon travaillé sous-jacent. Mémoire de fin d'Etude IUT Amiens, INRA Agronomie Laon-Reims-Mons, 28 pages + annexes.
- Radke J.K., Dexter, A.R., & Devine, O.J. 1985 - Tillage effects on soil temperature, soil water, and wheat growth in South Australia. Soil Sci. Soc. Am. J., 49, pp. 1542-1547.
- Richard G., Cousin, I., Sillon J.F., Bruand A., Guérif J., 2001a - Effect of compaction on soil porosity: consequences on hydraulic properties. Eur. J. Soil Sci., 52, pp. 49-58.

- Richard G., Sillon J.F., Marloie O., 2001b - Comparison of Inverse and Direct Evaporation Methods for Estimating Soil Hydraulic Properties under Different Tillage Practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, pp. 215-224.
- Sillon J.F., 1999 - Modélisation des conditions hydriques d'intervention dans un champ cultivé. Application à la prévision des jours disponibles. Thèse de Doctorat de l'INAPG, 146 pages +annexes.
- Sillon J.F., Richard G., Cousin I., 2003 - Quantifying and Modelling the effect of soil structure induced by tillage and traffic on soil drying. *Geoderma*, Special Issue of the Symposium « Effects of management practices on soil properties and processes, 116, pp. 29-46
- Tamari S., Bruckler L., Halbertsma J., Chadoeuf J., 1993 - A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, pp. 642-651.
- Vachaud G., Dancette C., Sonko S., Thony J. L., 1978 - Méthode de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé. *Annales agronomiques*. 29, pp. 1-36.
- Wind G.P., 1968 - Capillary conductivity data estimated by a simple method. In P.E. Rijkema and H. Wassink (editeurs) *Water in the unsaturated zone*. Vol. 1. Proc. Wageningen Symp. June 1966. Int. Assoc. Scientific Hydrol., Gentbrugge, Belgium. pp. 181-191