

Effet de l'activité biologique sur la structure de sols soumis à différentes pratiques culturales

Impact sur leurs propriétés de transfert

V. Hallaire₍₁₎, M. Lamandé₍₁₎ et D. Heddadj₍₂₎

(1) INRA-ENSA Science du Sol, 65 rue de Saint-Brieuc, F35042 Rennes Cedex, France

(2) Chambre d'Agriculture du Morbihan, Station Expérimentale de Kerguehenec, F56500 Bignan, France

RÉSUMÉ

Le rôle de l'activité biologique sur les propriétés structurales et hydriques des couches de surface des sols cultivés est analysé sur des sites expérimentaux du Massif armoricain soumis à différentes modalités (type de culture, itinéraire technique, mode de fertilisation). La structure est caractérisée par analyse d'image de la macroporosité sur échantillons de sols non remaniés, et des mesures d'infiltration sont réalisées en conditions proches de la saturation au moyen d'un infiltromètre multi-disques. Lorsque les conditions culturales favorisent l'activité de la macrofaune, on met en évidence un processus structural décompactant, conduisant à la formation d'agrégats fins séparés par une importante porosité d'assemblage, qui améliore l'infiltration en conditions quasi-saturées. Ce processus structural s'oppose à des processus compactants dus au tassement. Selon les pratiques culturales, les processus compactants et décompactants peuvent se succéder et se compenser. Leur combinaison met en évidence l'importance de la structuration liée à l'activité de la macrofaune, capable de régénérer des structures compactées. L'abondance et la diversité des communautés lombriciennes étant elles-mêmes influencées par les pratiques culturales, cette étude illustre les interactions entre facteurs anthropiques et biologiques.

Mots clés

Structure du sol, infiltration, pratiques culturales, activité biologique

SUMMARY

EFFECT OF BIOLOGICAL ACTIVITY ON THE STRUCTURE OF SOILS UNDER DIFFERENT AGRICULTURAL PRACTICES.

The effect of biological activity on structural and hydric properties of the upper layers in cultivated soils was analyzed on experimental sites in Massif Armorican (France) where various agricultural managements were applied (cropping systems, tillage practices, fertilization). Structure was characterized using image analysis of macropores on undisturbed soil samples, and infiltration was measured in near-saturated conditions using a triple ring infiltrometer. When the agricultural systems contributed to the development of biological activity, an uncompacting structural process was identified, creating small aggregates with an important packing porosity, and increasing water infiltration at low poten-

tials. On the other hand, compacting processes were characterized. According to agricultural practices, compacting and uncompacting processes succeeded or compensated one another. Their combination showed the main role of macrofauna activity: biological structuration appears to be able to regenerate compacted soils. Since abundance and diversity of earthworm communities are influenced by agricultural practices, this paper illustrates the interactions between anthropic and biological factors.

Key-words

Soil structure, infiltration, agricultural management, biological activity.

RESUMEN

EFEECTO DE LA ACTIVIDAD BIOLÓGICA SOBRE LA ESTRUCTURA DE SUELOS SOMETIDOS A DIFERENTES PRACTICAS DE CULTIVO: Impacto sobre sus propiedades de transferencia.

El papel de la actividad biológica sobre las propiedades estructurales y hídricas de las capas cultivadas se analizó en sitios experimentales del macizo armoricano sometidos a diferentes modalidades (tipos de cultivos, itinerario técnicos, modo de fertilización). Se caracteriza la estructura por análisis de imagen de la macroporosidad sobre muestras de suelos no retocadas, y se realiza medidas de infiltración en condiciones cercas de la saturación usando un infiltrómetro multi-discos. Cuando las condiciones de cultivo favorecen la actividad biológica de la macrofauna, se pone en evidencia un proceso estructural de decompactación, que conduce a la formación de agregados finos separados por una importante porosidad de ensambladura, que mejoran la infiltración en condiciones casi-saturadas. Este proceso estructural se opone a procesos de compactación. Según las prácticas de cultivo, los procesos que compactan y decompactan pueden sucederse o compensarse. Su combinación pone en evidencia la importancia de la estructuración ligada a la actividad de la macrofauna, capaz de regenerar estructuras compactadas. La abundancia y la diversidad de las comunidades de lombrices son influenciadas por las prácticas de cultivos; este estudio ilustra las interacciones entre factores antrópicos y biológicos.

Palabras clave

Estructura del suelo, infiltración, prácticas de cultivos, actividad biológica.

Les couches de surface des sols cultivés sont soumises à des modifications de structure qui peuvent soit être directement recherchées par l'agriculteur (émiettement par le travail du sol par exemple), soit résulter indirectement des techniques culturales (tassement par les passages de roues par exemple). L'importance de ces modifications sur le comportement du sol (Boiffin *et al.*, 1990 ; Stengel, 1990), et notamment sur ses propriétés hydriques, a entraîné le développement d'outils de caractérisation de l'organisation des éléments structuraux et de leur complémentaire, la porosité, au sein du profil cultural (Gautronneau et Manichon, 1987).

La macrofaune du sol constitue un autre acteur de l'état structural du sol ; les lombriciens, qui constituent la part la plus importante de la biomasse du sol, agissent sur l'agrégation et la structuration des sols par leur activité foreuse et broyeuse (Hallaire et Lamandé, 2002). Le développement des communautés lombriciennes étant lui-même influencé par les systèmes de culture, par le biais notamment des techniques culturales et du type de fertilisation (Abbott et Parker, 1981 ; Shipitalo et Protz, 1987), les facteurs anthropiques et biologiques sont en interaction.

L'objectif de cet article est de caractériser l'impact de la macrofaune sur la structure des sols, puis de montrer comment cette structuration d'origine biologique se combine avec d'autres processus structuraux. Cette analyse a été menée sur des sites expérimentaux du Massif armoricain ayant permis de comparer l'effet sur les couches de surface du mode de culture (monoculture céréalière, prairie permanente, prairie de rotation), des pratiques culturales (labour conventionnel, travail superficiel, semis direct) et du type de fertilisation (minérale ou organique). L'étude est basée d'une part sur une caractérisation morphologique de la structure par analyse d'image, d'autre part sur des mesures d'infiltration en conditions peu saturées. A travers ces différentes situations, nous chercherons d'abord à quantifier le processus structural lié à l'activité de la macrofaune ; puis cet effet sera comparé à d'autres processus structuraux, et nous montrerons comment ces effets se compensent ou se succèdent.

MATERIELS ET METHODES

Sites expérimentaux

Cette étude a été réalisée sur deux sites expérimentaux du Massif armoricain, sur des Brunisols oligo-saturés humifères (Baize et Girard, 1995) :

■ **Au domaine expérimental de Kerbernez** (Quimper, Finistère), où le sol de texture sablo-limoneuse (*tableau 1*) est développé sur une arène granitique. Le site est composé de parcelles expérimentales (9 m x 16 m) conduites selon différents systèmes de culture ; quatre parcelles ont été retenues pour cette étude :

- une monoculture de maïs avec fertilisation minérale (ammonitrate) depuis 22 ans,
- une monoculture de maïs avec fertilisation organique depuis 22 ans (lisier, 70 m³.ha⁻¹.an⁻¹),
- une rotation maïs/ray-grass (1/3 ans), en phase de prairie depuis un an au moment des mesures, avec fertilisation organique (lisier, 70 m³.ha⁻¹.an⁻¹),
- une prairie permanente pâturée (ray-grass et trèfle blanc depuis 9 ans).

■ **Au domaine expérimental de Kerguehenec** (Bignan, Morbihan), où le sol de texture limono-sablo-argileuse est développé sur mica-schiste (*tableau 1*). Le site (Alletto, 2002) est composé de parcelles (12 m x 25 m) soumises, depuis 3 ans au moment des mesures, à trois techniques de travail du sol :

- un labour réalisé à l'aide d'une charrue classique travaillant sur environ 25 cm. Le lit de semence, « reprise de labour », est préparé avec une herse rotative travaillant sur 5 cm.
- un travail superficiel sans labour, réalisé à l'aide d'un Semavator (HOWARD) qui travaille toute la surface sur 5-7 cm de profondeur et sème les graines à la volée.
- un semis direct réalisé à l'aide d'un SD 3000 (KUHN) qui ne travaille que la ligne de semis sur 2-3 cm de large, pose la graine dans

Tableau 1 - Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés

Table 1 - Physico-chemical characteristics of the studied soils

Profondeur cm	Granulométrie %					pH eau	MO %
	A	Lf	Lg	Sf	Sg		
Kerbernez							
0-25	17,0	18,1	19,3	13,9	31,7	5,90	4,47
25-40	15,1	23,8	16,6	12,7	38,2	5,05	1,99
40-80	6,0	8,5	9,6	20,1	58,2	5,50	0,46
Kerguehenec							
0-25	16,6	23,3	19,1	26,0	15,0	6,0	4,30
25-45	16,0	25,0	17,9	26,5	14,4	5,4	2,52
45-90	13,7	19,9	15,7	28,0	21,6	5,0	1,20

Tableau 2 - Classification morphologique des macropores en fonction de leur taille et de leur forme**Table 2** - Morphological classification of macropores according to their size and shape

Classes de forme	Classes de taille (mm ²) S			
	1 [0.018 ; 0.031]	2 [0.031 ; 0.196]	3 [0.196 ; 1.77]	4 > 1.77
Tubules (l < 3)	T1	T2	T3	T4
Fissures (3 < l < 7)	F1	F2	F3	F4
Pores d'assemblage (l > 7)	P1	P2	P3	P4

un sillon tracé par un disque ouvreur et refermé par un double disque semeur.

Afin de caractériser au mieux l'évolution structurale de l'horizon superficiel, les mesures dans ces deux sites ont été effectuées à trois profondeurs (0 cm, 15 cm, 25 cm) et à trois dates (mars, août, novembre). Dans les deux parcelles en monoculture de maïs, les mesures ont été dédoublées de façon à distinguer les inter-rangs avec ou sans passage de roues d'engins. Pour chaque situation et chaque date, les mesures ont donné lieu à quatre répétitions.

Infiltrabilité

La conductivité hydraulique est estimée à partir de mesures de flux en régime permanent réalisées avec un infiltromètre à disque à succion contrôlée (TRIMS). Les essais d'infiltration en régime permanent sont réalisés sur une surface circulaire de 80 mm de diamètre à quatre potentiels proches de la saturation : -0,05 kPa ; -0,2 kPa ; -0,6 kPa ; -1,5 kPa, en commençant par le potentiel -1.5 kPa. Les surfaces de mesure ont été soigneusement préparées en évitant le lissage de la structure et l'obstruction de la porosité, et une fine couche de sable a permis d'assurer la continuité du contact entre la membrane du disque de l'infiltromètre et la surface de mesure. Les flux ont été mesurés à chaque potentiel pendant environ une heure pour atteindre le régime pseudo-permanent. La courbe de conductivité hydraulique $K(h)$ en fonction du potentiel matriciel est estimée avec la méthode monodisque multipotentiel développée par Reynolds et Elrick (1991) et Ankeny *et al.* (1991) basée sur la solution de Wooding pour l'infiltration axisymétrique en trois dimensions en régime permanent (Wooding, 1968).

Morphologie quantitative de la macroporosité par analyse d'image

La morphologie de l'espace poral est décrite sur des blocs de sol non remaniés, prélevés exactement sous les sites des essais d'infiltration. Après déshydratation par échange eau/acétone les blocs de sol ont été imprégnés par une résine d'inclusion polyester contenant un pigment fluorescent (Ringrose-Voase, 1996). Après induration de la résine les blocs ont été coupés en quatre tranches horizontales

à 1, 3, 5 et 7 cm de la surface du bloc. Après polissage de ces tranches, quatre images de 2,28 cm x 3,05 cm ont été acquises sur chaque face (soit 16 images par bloc, ou 64 images par modalité), avec une résolution de 40 µm par pixel, puis binarisées de façon à identifier les macro-pores, en utilisant la procédure de segmentation d'images proposée par Hallaire et Curmi (1994).

La morphologie des pores, après leur individualisation en « poroïds » (Moran *et al.*, 1988) sur l'image binaire, est caractérisée par leur taille et leur forme. La taille du poroïde est estimée par la surface de sa section sur le plan de l'image ; quatre classes de taille sont définies, correspondant aux diamètres équivalents des pores fonctionnels aux potentiels de mesure de la conductivité hydraulique. Sa forme est exprimée grâce à l'indice de forme I du pore, calculé en fonction de son périmètre p et de sa surface S : $I = p^2/4.\pi.S$; trois classes de forme sont définies pour distinguer les pores tubulaires T, les fissures F et les pores d'assemblage P. Le croisement des classes de taille et de forme permet de définir douze classes morphologiques (tableau 2).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

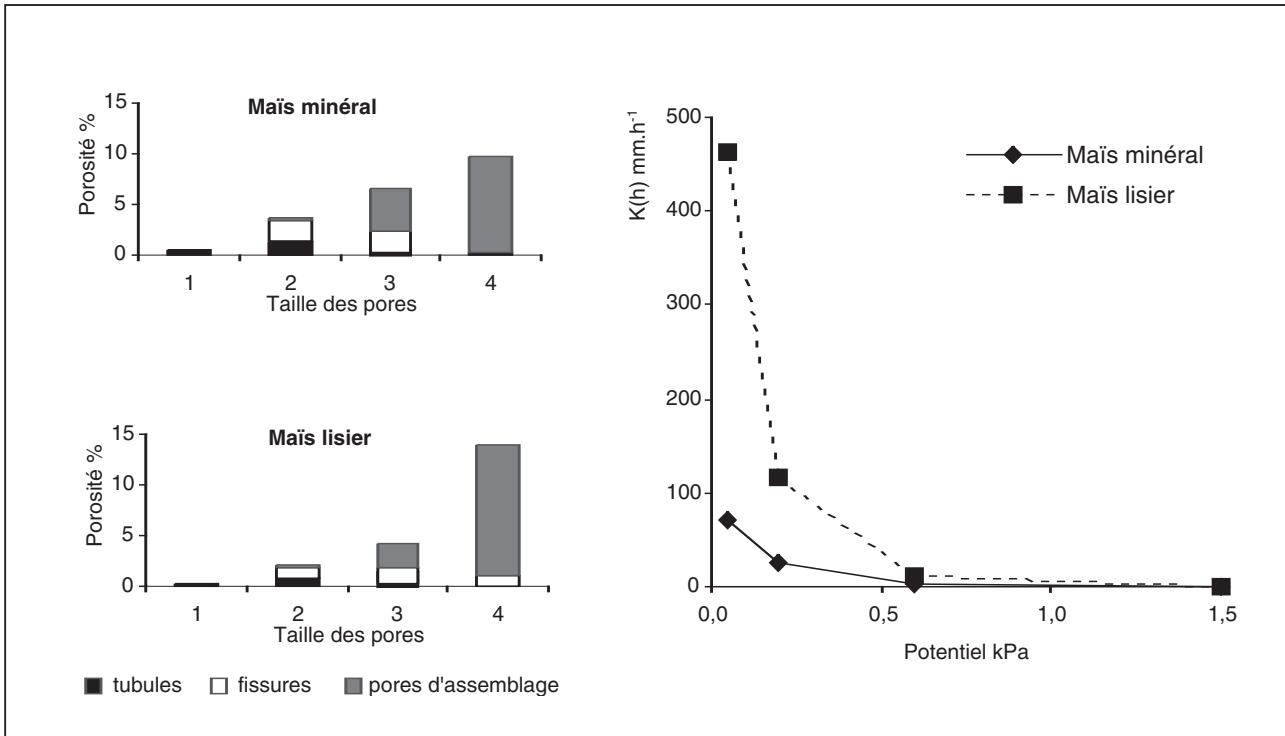
La diversité des situations analysées nous permet d'identifier l'impact de différents facteurs sur la structure et l'infiltrométrie dans l'horizon de surface. Nous caractériserons d'abord le rôle décompactant de la macrofaune, puis chercherons à voir comment cet effet se combine à des processus compactants. Dans chaque situation, l'analyse s'appuiera sur la comparaison des histogrammes de porosité (moyenne des 64 images correspondant à la modalité) et des courbes de conductivité hydraulique (moyenne des 4 répétitions).

Un processus structural décompactant lié à l'activité biologique

Si l'effet de la macrofaune sur la structure est reconnu depuis longtemps (Dexter, 1991 ; Oades, 1993), ses modalités sont encore mal définies, sinon par ses conséquences sur les propriétés du sol (Schrader *et al.*, 1995 ; Blanchart *et al.*, 1997). Les outils employés dans cette étude permettent de quantifier les modifications structurales liées à l'activité lombricienne. Ces modifications sont illustrées par la figure 1 qui compare les propriétés structurales et hydriques

Figure 1 - Porosité et conductivité hydraulique d'un inter-rang de maïs (profondeur 15 cm), hors passage de roue, en fertilisation minérale et organique.

Figure 1 - Porosity and hydraulic conductivity of untrafficked maize inter-row (15 cm depth) with mineral and organic fertilization.



mesurées à 15 cm de profondeur, dans des inter-rangs sans passage de roue de deux parcelles voisines conduites en monoculture de maïs, l'une avec fertilisation minérale, l'autre avec fertilisation organique. Pérès (2003) a montré sur ces parcelles l'influence du type de fertilisation sur la diversité des communautés lombriciennes: la fertilisation par lisier a permis aux endogées d'être la catégorie écologique prédominante. Nos données structurales montrent que la macroporosité (> 40 μm) est du même ordre dans les deux situations (20,7 %), mais présente des spectres de porosité différents, l'apport de lisier favorisant les plus gros pores d'assemblage (13 % au lieu de 9 %). La prolifération de vers géophages actifs, produisant des déjections dans leurs galeries (Hirth *et al.*, 1996), provoque donc une bioturbation favorisant la création d'une porosité d'assemblage lâche, comparable à la porosité inter-agrégats d'un assemblage de terre fine: la structuration d'origine biologique a ici le même effet qu'un émiettement mécanique. L'activité structurante des vers ne se limite donc pas à la création de galeries, elle provoque un remaniement pouvant affecter l'ensemble d'un horizon, comme l'illustre la *figure 2* où la bioturbation est repérable sur plusieurs centimètres d'épaisseur. La *figure 1* nous montre que les conséquences de la bioturbation sur les transferts est surtout importante aux plus faibles potentiels: à $-0,05$ kPa, la conductivité hydraulique est multipliée par 6,6; cette augmentation est favorisée par la création d'une poro-

sité d'assemblage très interconnectée.

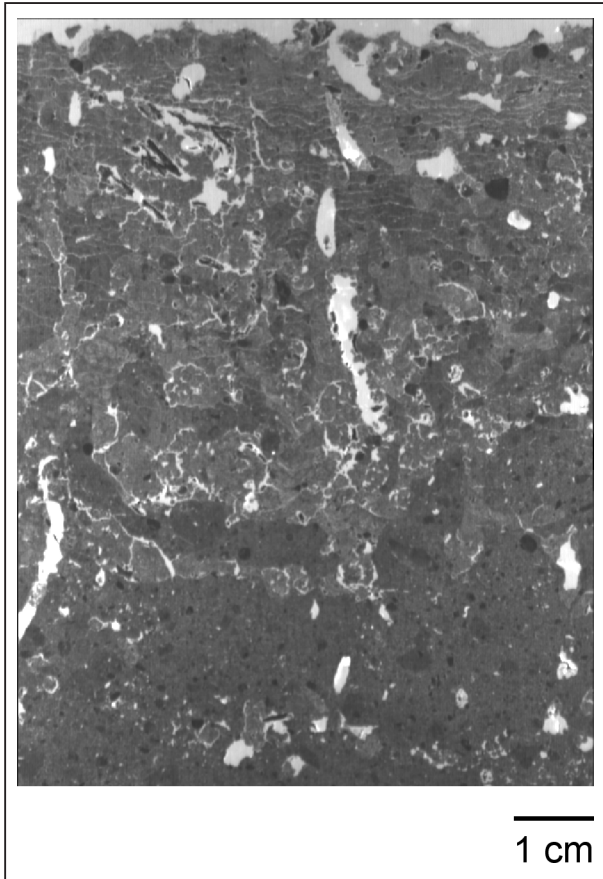
Processus structuraux compactants

Pour estimer l'importance relative de la structuration biologique précédemment décrite, les mêmes outils de quantification ont été utilisés pour caractériser les conséquences structurales et hydriques d'autres processus structuraux, conduisant à un compactage du sol.

L'effet des passages d'engins sur la structure des couches de surface fait l'objet d'une bibliographie abondante (Coulon et Bruand, 1989; Bruand et Cousin, 1994; Soane et Van Ouwerkerk, 1994; Horn *et al.*, 1995; Alakukku, 1999; Richard *et al.*, 1999; Défossez et Richard, 2002). Il est ici illustré sur la *figure 3*, qui compare deux inter-rangs sous monoculture de maïs en fertilisation minérale, l'un d'eux étant soumis au passage de roues. Le compactage se traduit par une réduction importante de la macroporosité, qui passe de 23,4 % à moins de 10 %; cette évolution concerne principalement les plus gros pores d'assemblage (classe P4, qui passe de 14 % à 1 %), et dans une moindre mesure les pores de taille 3 (fissures F3 et pores d'assemblage P3). Les plus petits pores (tailles 1 et 2) ne sont pas affectés. Le tassement consiste donc en un rapprochement d'agré-gats fins, initialement arrangés en un assemblage lâche; les espaces intra-agrégats ne sont pas concernés. Les conséquences sur les

Figure 2 - Exemple de bioturbation dans la couche superficielle d'un sol (prairie de rotation) observée sur une coupe verticale.

Figure 2 - Example of bioturbation in the toplayer of a soil (rye grass rotation) observed on a vertical section



transferts sont surtout sensibles aux potentiels les plus proches de la saturation (-0,05 kPa et -0,2 kPa) où la conductivité hydraulique est réduite d'un facteur 5. Ces potentiels correspondant aux transferts dans les pores de taille 3 et 4, ceci confirme que la connectivité de la macroporosité est essentiellement liée à l'abondance des pores d'assemblage et des fissures (Hallaire *et al.*, 1997).

Un autre processus compactant est illustré sur la *figure 4*, qui compare différentes techniques culturales : les histogrammes de porosité et les courbes de conductivité hydraulique sont ici présentés après trois années de labour, de travail superficiel et de semis direct. La proportion des plus gros macropores (classe 4) passe de 9,8 % sous labour conventionnel à 6,7 % en travail superficiel, et à 2,6 % en semis direct. Si le labour favorise le processus de fragmentation mécanique (Kooistra *et al.*, 1984 ; Hangen *et al.*, 2002), les techniques culturales simplifiées favorisent plutôt un tassement, déjà mentionné dans d'autres études (Richard *et al.*, 2001 ; Roger-Estrade *et al.*, 2000) ; on montre ici que ce tassement naturel, intervenant à long terme,

affecte les mêmes classes de pores qu'un compactage résultant d'une pression mécanique : les pores les plus grossiers, et en premier lieu les pores d'assemblage. Ces classes de pores sont responsables des transferts dans les domaines les plus proches de la saturation : la conductivité hydraulique au potentiel -0,05 kPa est 50 fois plus faible sous semis direct que sous labour ; on confirme ici l'influence du mode de travail du sol sur les propriétés fonctionnelles des couches de surface (Klute, 1982 ; Stengel *et al.*, 1984).

Ces processus compactants (tassement mécanique et tassement naturel) apparaissent donc jouer sur les mêmes fractions porales que le processus décompactant lié à l'activité biologique : les plus gros pores d'assemblage (classe P4) sont les principaux concernés par les modifications structurales analysées ; les variations dans cette classe sont du même ordre (8 à 10 %) ; l'effet sur les propriétés hydriques concernent essentiellement les transferts aux plus faibles potentiels (-0,05 kPa et -0,6 kPa).

Combinaison des processus structuraux

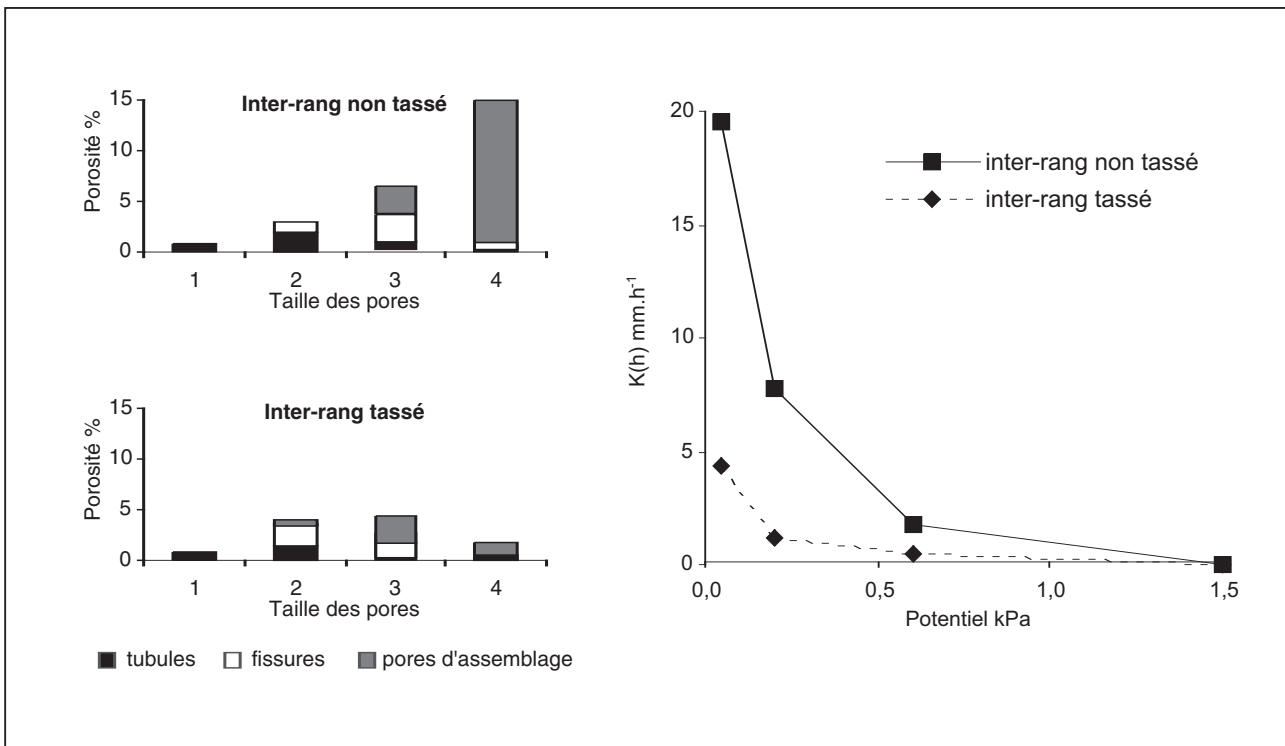
Les exemples précédents ont permis d'identifier des processus structuraux, compactants ou décompactants, dans des situations où ils pouvaient être décrits indépendamment les uns des autres. Sur l'ensemble des modalités, on constate cependant qu'ils interviennent rarement seuls : par combinaison ils peuvent se cumuler, se compenser, ou se succéder au cours d'un cycle cultural.

L'exemple de la *figure 5* illustre l'opposition entre une compaction mécanique et une décompaction d'origine biologique. Une prairie de rotation non pâturée est comparée à une prairie permanente pâturée et à un inter-rang de maïs sous passage de roue, en fertilisation minérale. Ici encore, on constate que les plus gros pores, et notamment les pores d'assemblage (classe P4) sont les plus sensibles aux modifications structurales. La prairie permanente pâturée correspond à une situation intermédiaire entre les deux autres modalités, tant du point de vue morphologique que physique : les macropores d'assemblage P4 y représentent une porosité de 6 % (contre 9,2 % sous rotation et 1,4 % sous maïs), la conductivité hydraulique à -0,05 kPa y est de 55 mm.h⁻¹ (contre 236 mm.h⁻¹ sous rotation et 4,3 mm.h⁻¹ sous maïs). Le sol est ici soumis à deux processus : d'une part une compaction mécanique due au pâturage, responsable d'une semelle de piétinement dont l'effet s'assimile à celui d'un passage d'engins (Greenwood *et al.*, 1997 ; Singleton *et al.*, 2000) ; d'autre part une décompaction biologique favorisée par l'abondance sous prairie d'espèces endogées, pratiquement absentes sous maïs en fertilisation minérale (Pérès, 2003). Ces deux processus interviennent ici simultanément, et se compensent partiellement.

L'exemple suivant présente un autre type de combinaison où les processus structuraux interviennent non pas simultanément, mais successivement. La *figure 6* montre l'évolution au cours d'un cycle cultural d'un inter-rang non compacté sous monoculture de maïs, en fertilisation organique, à 15 cm de profondeur. La situation de départ, correspondant à une structure très aérée (P4 = 11%), est issue d'une

Figure 3 - Porosité et conductivité hydraulique d'un inter-rang de maïs, en fertilisation minérale (profondeur 0 cm), hors passage de roue et sous passage de roue.

Figure 3 - Porosity and hydraulic conductivity of trafficked and untrafficked maize inter-rows with mineral fertilization (0 cm depth).



fragmentation mécanique due aux outils de préparation du sol, et présente une forte infiltrabilité aux faibles potentiels ($K(-0,05) = 284 \text{ mm.h}^{-1}$) ; d'août à novembre, l'affaissement de l'horizon labouré (tassement naturel) provoque un rapprochement des agrégats, et la réduction importante des pores d'assemblage ($P_4 = 4\%$) se traduit par une forte diminution de l'infiltrabilité ($K(-0,05) = 29 \text{ mm.h}^{-1}$) ; en fin d'hiver enfin, on retrouve une structure plus aérée encore qu'au départ ($P_4 = 13\%$), qui se traduit par une infiltrabilité 15 fois supérieure à celle d'automne ($K(-0,05) = 464 \text{ mm.h}^{-1}$). En l'absence de toute autre intervention, on peut attribuer cette recrudescence de la porosité d'assemblage à l'activité biologique, particulièrement importante en fin d'hiver lorsqu'une fertilisation organique favorise le développement des lombriciens.

La combinaison, simultanée ou successive, des processus structuraux montre que les facteurs anthropiques et biologiques sont en interaction : le choix d'un système de culture, des interventions culturales, du mode de fertilisation, déterminent l'abondance et la diversité des communautés lombriciennes, responsables à leur tour de modifications structurales.

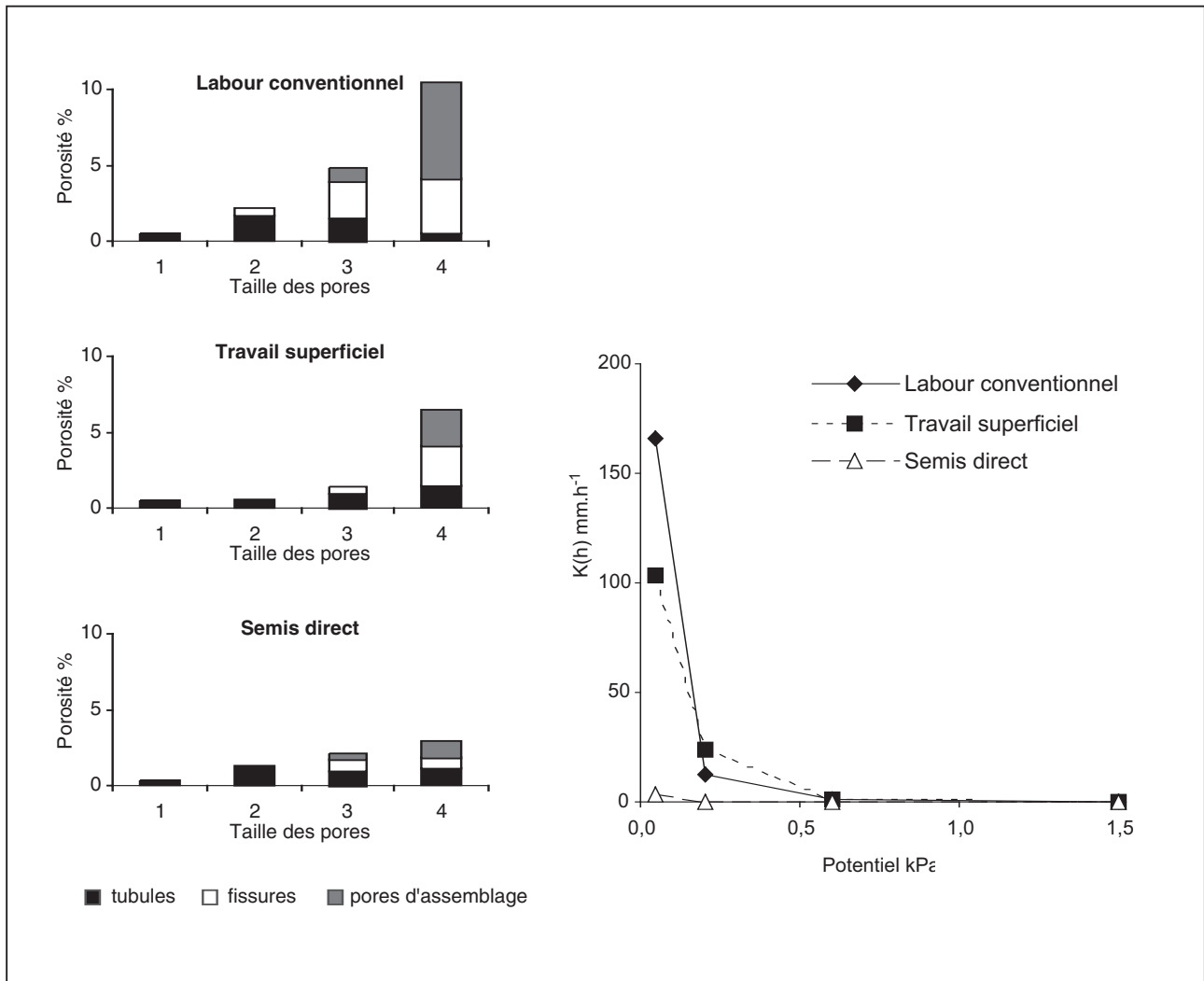
CONCLUSION

Pour évaluer l'impact de l'activité biologique sur les caractéristiques structurales des couches de surface et sur leurs propriétés de transfert, cette étude s'est appuyée sur des situations expérimentales permettant de comparer différentes pratiques culturales. En comparant deux à deux ces modalités, une analyse morphologique de la macroporosité et des mesures d'infiltration en conditions proches de la saturation ont permis une caractérisation quantitative de différents processus structuraux, liés à un effet décompactant de la macrofaune et à l'effet compactant du tassement (mécanique et/ou naturel). Ces processus élémentaires peuvent se combiner, se compenser ou se succéder : on montre ainsi l'importance de l'action régénératrice de certaines catégories écologiques lombriciennes sur la structure, capables d'induire une structuration biologique permettant de rétablir une forte macroporosité dans des couches compactées.

Cette étude illustre également les interactions entre les facteurs anthropiques et biologiques : le choix des cultures et des successions, les itinéraires techniques, les types de fertilisation influencent l'abondance et la diversité des communautés lombriciennes qui agiront à leur tour sur les caractéristiques du sol. La mise en évidence de ces interactions confirme la nécessité de considérer le système de culture dans son ensemble afin d'intégrer les différents acteurs, physiques et biologiques, de la structure des couches de surface.

Figure 4 - Porosité et conductivité hydraulique d'un inter-rang de maïs, en fertilisation minérale (profondeur 0 cm), soumis à différentes techniques culturales.

Figure 4 - Porosity and hydraulic conductivity of maize inter-rows with mineral fertilization (0 cm depth) under conventional tillage, reduced tillage and no-tillage.



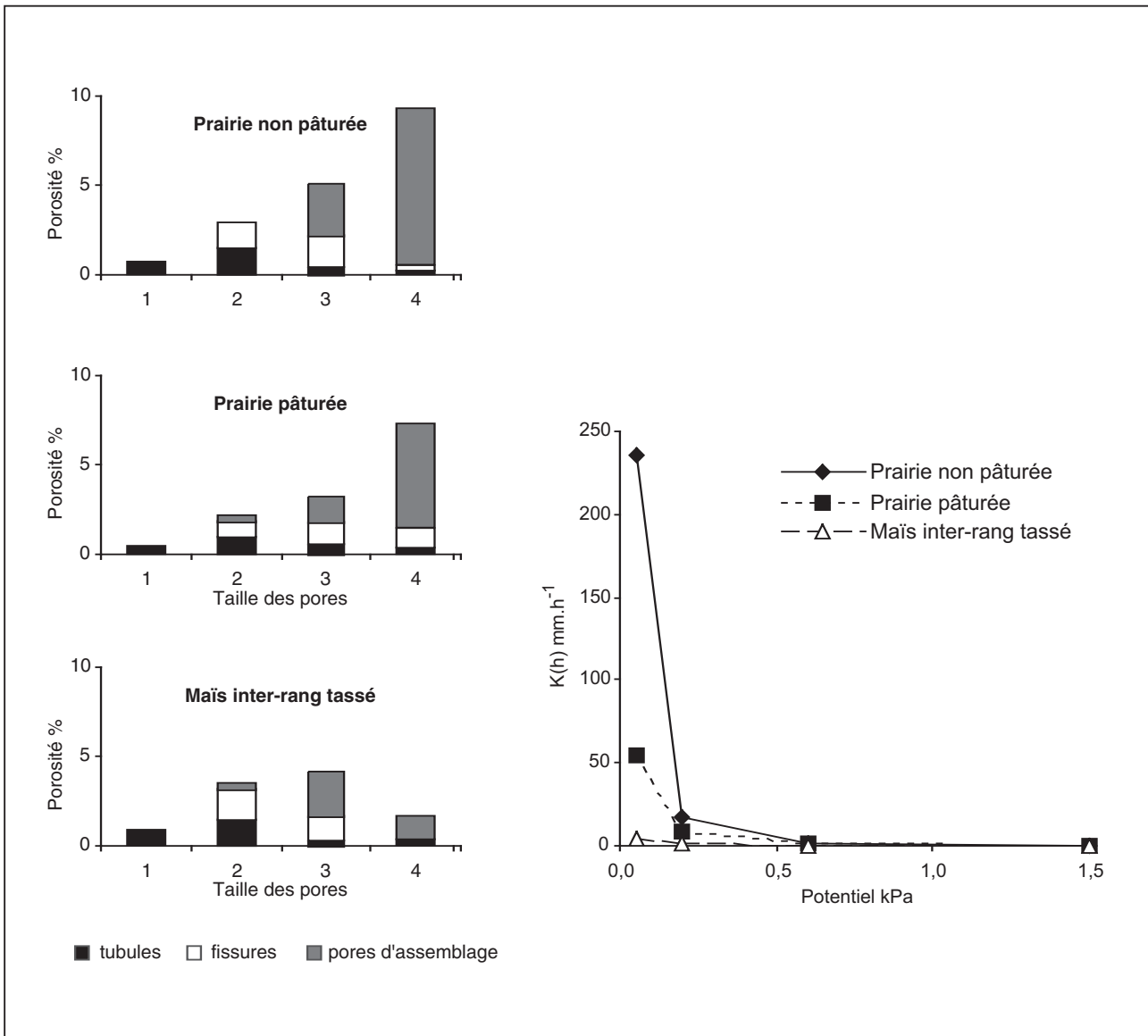
Le choix des paramètres morphologiques et hydriques retenus dans cette étude a enfin permis de mieux définir les composantes structurales affectées par ces modifications. En classant les macropores selon des critères morphologiques, on a ainsi pu montrer que les processus structuraux concernaient essentiellement les pores d'assemblage les plus grossiers, dont les variations sont étroitement liées aux variations d'infiltration aux plus faibles potentiels.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbott I., Parker C.A., 1981- Interactions between earthworms and their soil environment. *Soil Biology and Biochemistry*, 13, pp. 191-197.
- Alakukku L., 1999 - Subsoil compaction due to wheel traffic . *Agricultural and Food Science in Finland* 8, pp. 333-351
- Alletto L., 2002 - Travailler le sol sans retournement des horizons de surface. Bilan sur la fertilité physique, chimique et biologique d'un sol limoneux de Bretagne après trois années de travail simplifié. Mémoire d'ingénieur, ESA Purpan.
- Ankeny M.D., Ahmed M., Kaspar T.C., Horton R., 1991 - Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 54, pp. 467-470.
- Baize D., Girard M.C., 1995 - *Référentiel Pédologique Français*. INRA Editions, Paris.

Figure 5 - Porosité et conductivité hydraulique d'une prairie de rotation non pâturée, d'une prairie permanente pâturée et d'un inter-rang de maïs en fertilisation minérale sous passage de roue (profondeur 0 cm).

Figure 5 - Porosity and hydraulic conductivity of a rye grass rotation, an old pasture and a trafficked maize inter-row with mineral fertilization (0 cm depth).



Blanchart E., Lavelle P., Braudeau E., Le Bissonnais Y., Valentin C., 1997 - Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d'Ivoire. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, pp. 431-439.

Boiffin J., Guérif J., Stengel P., 1990 - Les processus d'évolution de l'état structural du sol. In «La structure du sol et son évolution» (J. Boiffin et A. Marin-Lafleche éditeurs). Les colloques INRA n°53, Versailles, pp. 37-70.

Bruand A., Cousin I., 1994 - Variation of textural porosity of a loamy-clay soil during compaction. *European Journal of Soil Science*, 46, pp. 377-385.

Coulon E., Bruand A., 1989 - Effects of compaction on the pore space geometry in sandy soils. *Soil and Tillage Research*, 15, pp. 137-152.

Défosse P., Richard G., 2002 - Compaction of tilled topsoil due to traffic: a review of models tested in field conditions. *Soil and Tillage Research*, 67, pp. 41-64.

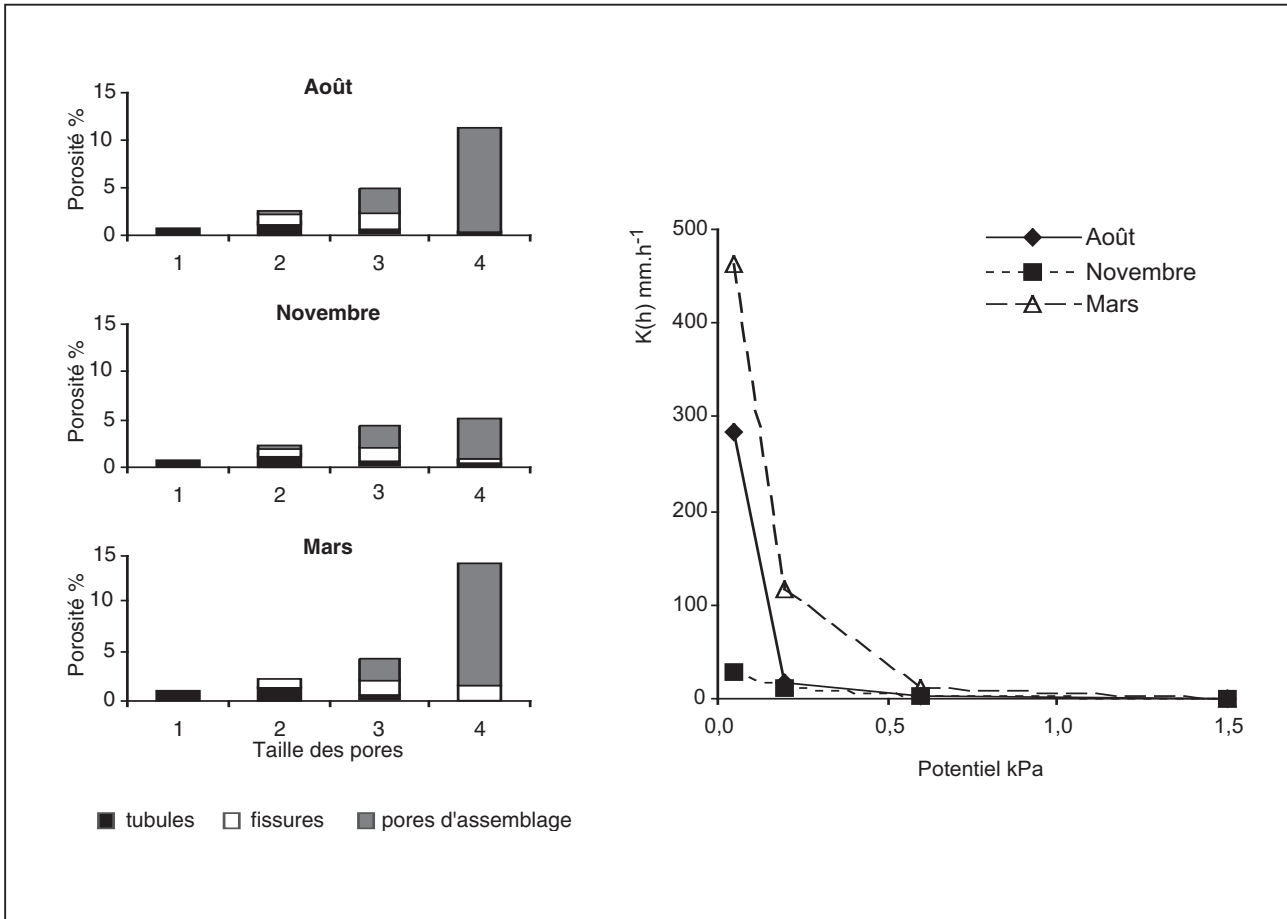
Dexter A.R., 1991 - Amelioration of soil by natural processes. *Soil and Tillage Research*, 20, pp. 87-100.

Gautronneau Y., Manichon H., 1987 - Guide méthodique du profil cultural. CEREF ISARA, Lyon. 70 p.

Greenwood K.J., MacLeod D.A., Hutchinson K.J., 1997 - Long term stocking rate effects on soil physical properties. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 37, pp. 413-419.

Figure 6 - Evolution de la porosité et de la conductivité hydraulique d'un inter-rang de maïs, en fertilisation organique hors passage de roue (profondeur 15 cm) entre août et mars.

Figure 6 - Porosity and hydraulic conductivity changes of an untrafficked maize inter-row with organic fertilization (15 cm depth) between August and March.



Hallaire V., Curmi P., 1994 - Image analysis of pore space morphology characterization in soil sections, in relation to water movement. In: « Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis. Proceedings of the IX International Working Meeting on Soil Micromorphology » (A.J. Ringrose-Voase and G.S. Humphreys editors). Developments in Soil Science, 22. Elsevier, Amsterdam, pp. 559-567.

Hallaire V., Curmi P., Widiatmaka, 1997 - Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en saturé. Cas des horizons d'un système pédologique armoricain. *Etude et Gestion des Sols*, 4, pp. 115-126.

Hallaire V., Lamandé M., 2002 - Structure et perméabilité des sols en contexte agricole armoricain: quels indicateurs de la qualité physique des sols ? In: « Caractérisation, déterminisme et surveillance de la qualité des sols en milieu limoneux acide » (C. Walter, R. Chaussod, D. Cluzeau, P. Curmi, V. Hallaire, éditeurs). Rapport final du programme GESSOL n° 99126, INRA Rennes, pp. 29-57.

Hangen E., Boczko U., Bens O., Brunotte J., Hüttl R.F., 2002 - Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. *Soil and Tillage Research* 63, pp. 181-186

Hirth J.R., McKenzie B.M., Tisdall J.M., 1996 - Volume density of earthworm burrows in compacted cores of soil as estimated by direct and indirect methods. *Biology and Fertility of Soils*, 21, pp. 171-176.

Horn R., Domzal H., Slowinska-Jurkiewicz A., Van Ouwerkerk C., 1995 - Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research* 35, pp. 23-36

Klute A., 1982 - Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. In « Predicting tillage effects on soil physical properties and processes », *Asa Special Publication*, n°44, ASA/CSSA, Madison, pp. 29-43.

Kooistra M. J., Bouma J., Boersma O. H., Jager A., 1984 - Physical and morphological characterization of undisturbed and disturbed ploughpans in a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research* 4, pp. 405-417

Moran C.J., Koppi A.J., Murphy B.W., McBratney A.B., 1988 - Comparison of the macropore structure of a sandy loam surface soil horizon subjected to two tillage treatments. *Soil Use and Management*, 4, 96-102. Oades J.M., 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56, pp. 377-400.

Pères G., 2003 - Identification et quantification *in situ* des interactions entre la diversité lombricienne et la macro-bioporosité dans le contexte polyculture bre-

- ton. Influence sur le fonctionnement hydrique du sol. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1.
- Reynolds W.D., Eirick D.E., 1991- Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 55, pp. 633-639.
- Richard G., Boizard H., Roger-Estrade J., Boiffin J., Guéris J., 1999 - Study of soil compaction due to traffic in field conditions : pore space and morphological analysis. *Soil and Tillage Research*, 51, pp. 151-160.
- Richard G., Cousin I., Sillon J.F., Bruand A., Guéris J., 2001- Effect of compaction on soil porosity: consequences on hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52, pp. 49-58.
- Ringrose-Voase A.J., 1996 - Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant and Soil*, 183, 27-47.
- Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., Boiffin J., Caneill J., Manichon H., 2000- Modelling structural changes in tilled topsoil over time as a function of cropping systems. *European Journal of Soil Science*, 51, pp. 455-474.
- Schrader S., Joschko M., Kula H., Larink O., 1995 - Advances in soil science, soil structure, its development and function. Earthworm effects on soil structure with emphasis on soil stability and soil water movement. Lewis Publishers, New York, pp. 109-133.
- Shipitalo M.J., Protz R., 1987- Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. *Canadian Journal of Soil Science*, 67, pp. 445-456.
- Singleton P.L., Boyes M., Addison B., 2000 - Effects of treading by dairy cattle on topsoil physical conditions for six contrasting soil types in Waitiko and Northland, New Zealand, with implications for monitoring. *New Zealand Journal of Agriculture Research*, 43, pp. 559-567.
- Soane B. D., Van Ouwerkerk C. eds, 1994- Soil Compaction in Crop Production. *Developments in Agricultural Engineering Vol 11*, Elsevier Science B.V.
- Stengel P., Douglas J.T., Guéris J., Goss M.J., Monnier G., Cannell R.Q., 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. *Soil and Tillage Research*, 4, pp. 35-53.
- Stengel P., 1990- Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. In: « La structure des sols et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur » (J. Boiffin, A. Marin-Lafèche, éditeurs). *Les colloques de l'INRA*, 53, Versailles, pp. 15-36.
- Wooding R.A., 1968- Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research*, 4, pp. 1259-1273.

