

Action combinée des pratiques culturales et des lombriciens sur le sol

Morphologie porale, conductivité hydraulique et communautés lombriciennes suivant trois systèmes de culture

M. Lamandé⁽¹⁾, G. Pérès⁽³⁾, V. Hallaire*⁽¹⁾, P. Curmi⁽¹⁾⁽²⁾ et D. Cluzeau⁽³⁾

(1) INRA, Unité Sol et Agronomie Rennes Quimper, 65, route de Saint-Brieuc, 35042 Rennes

(2) ENESAD, Département Agronomie et Environnement, Équipe Milieu Physique et Environnement, 26, bd Dr Petitjean, BP 87999, 21036 Dijon Cedex

(3) CNRS, UMR 6553 "Ecobio" - Laboratoire d'Ecologie du Sol et de Biologie des Populations, Station Biologique, 35380 Paimpont

* Auteur correspondant : hallaire@roazhon.inra.fr

RÉSUMÉ

L'activité des lombriciens et les pratiques culturales entraînent des modifications de la porosité à différents niveaux d'analyse, notamment celui de la mésoporosité (pores de diamètre équivalent compris entre 30 et 1 000 μm), où l'eau peut être faiblement retenue ou s'écouler lentement. L'évolution de la structure des sols en zone tempérée, est peu décrite à ce niveau d'analyse. L'objectif de cette étude est de comprendre, à travers la comparaison de trois systèmes de culture, les effets de communautés lombriciennes naturellement présentes et des pratiques culturales sur les relations entre la morphologie de la mésoporosité et le comportement hydrodynamique de l'horizon de surface d'un sol.

Le dispositif expérimental est composé d'une monoculture de maïs fertilisée au lisier, d'une rotation maïs/raygrass (1 an / 3 ans) en phase prairie également fertilisée au lisier et d'une prairie ancienne pâturée (association raygrass - trèfle blanc). L'horizon 0-10 cm du sol a fait l'objet d'une caractérisation morphologique de la mésoporosité par analyse d'images 2D de résolution spatiale 40 $\mu\text{m}.\text{pixel}^{-1}$ et de mesures de la porosité totale. Les courbes de conductivité hydraulique en fonction du potentiel matriciel ont été calculées à partir de mesures d'infiltration à quatre potentiels (-0,05; -0,2; -0,6; et -1,5 kPa) réalisées à la surface du sol à l'aide d'infiltromètres à disque. L'utilisation d'eau teintée au bleu de méthylène a permis d'identifier la porosité fonctionnelle. Les communautés lombriciennes, extraites au terrain, ont été caractérisées par le nombre d'individus, les espèces présentes et la structure écologique fonctionnelle (catégorie écologique couplée au stade de développement).

Les pratiques culturales influencent significativement les communautés lombriciennes en termes d'abondance des individus et de diversité fonctionnelle. Dans le maïs, le petit nombre de pores tubulaires est lié à la faible abondance de vers, en particulier des anéciques, et de racines. Dans la prairie pâturée, le tassement par piétinement de bovins affecte les pores d'assemblage d'agrégats. La forte conductivité hydraulique dans la prairie de rotation est due à une diversité lombricienne plus grande que dans le maïs et à l'absence de piétinement par rapport à la prairie pâturée. L'analyse morphologique de la mésoporosité a permis d'expliquer les différences de fonctionnement hydrodynamique mesurées entre les trois parcelles. Des relations entre communautés lombriciennes et propriétés physiques ont été ana-

lysées grâce à une méthodologie originale qui prend en compte la diversité des espèces, ainsi que des paramètres morphologiques et physiques correspondant à un niveau d'analyse peu exploré.

Mots clés

Structure du sol, conductivité hydraulique, analyse d'images, systèmes de culture, vers de terre.

SUMMARY

PORE MORPHOLOGY, INFILTRATION AND EARTHWORM COMMUNITY IN A LOAMY SOIL UNDER DIFFERENT AGRICULTURAL MANagements

Earthworm activity produces changes at different scales of soil porosity, including the meso-porosity (between 30 μm and 1 000 μm eq. dia.) where both water retention and near-saturated infiltration take place. At this scale the structural changes are poorly described in temperate agricultural systems, and it is not yet fully understood how these changes occur. The present study was conducted to determine the relationships between the morphology of the meso-pores, which is mainly affected by earthworm activity, and the hydrodynamic behaviour (near-saturated infiltration) of topsoil under different agricultural managements inducing a large range of earthworm populations.

Investigations were carried out at the soil surface in three fields under different management practices giving rise to three different earthworm populations: a continuous maize field where pig slurry was applied, a rye-grass/maize rotation (3 years/1 year, respectively) also with pig slurry, and an old pasture sown with white clover and rye-grass. Pore space was quantified using a morphological approach and 2D image analysis, yielding a spatial resolution of 40 $\mu\text{m}.\text{pixel}^{-1}$. Pores were classified according to their size (which is a function of their area) and their shape. Hydraulic conductivity $K(h)$ was measured using a disc infiltrometer at four water potentials: -0.05, -0.2, -0.6, and -1.5 kPa. Methylene blue was used in water to stain the functional porosity. The abundance and ecological categories groups of earthworms were also investigated.

Continuous soil tillage causes a decrease in both earthworm abundance and functional diversity (cf. maize compared with old pasture) when soil tillage every four years causes only a decrease in abundance (cf. rotation compared with old pasture). Fewer roots and anecic earthworms resulted in fewer effective tubular voids under maize. There were fewer packing voids in the old pasture due to cattle trampling. Greater hydraulic conductivity in the pasture phase of rotation may arise from a greater functional diversity than in the maize and absence of cattle trampling compared with the pasture. Image analysis was useful in distinguishing the functional difference between the three managements. This study provides a new methodology in which we consider the earthworm activity as well as community in order to assess the effects of agricultural management on soil structure and water movement.

Key-words

Soil structure, hydraulic conductivity, image analysis, cropping systems, earthworms

RESUMEN

MORFOLOGÍA DE LOS POROS, CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y COMUNIDADES DE LOMBRICES SEGÚN TRES SISTEMAS DE CULTIVO

La actividad de los lombrices y las prácticas de cultivos implican modificaciones de la porosidad a diferentes niveles de análisis, en particular la de la mesoporosidad (poros de diámetro equivalente entre 30 y 1000 μm), donde el agua puede ser ligeramente retenida o escurrirse lentamente. Se describe poco la evolución de la estructura de los suelos en zona templada, a este nivel de análisis. El objetivo de este estudio es entender, a través la comparación de tres sistemas de cultivo, los efectos de las comunidades de lombrices naturalmente presentes y de las prácticas de cultivo sobre las relaciones entre morfología de la mesoporosidad y el comportamiento hidrodinámico del horizonte de superficie del suelo.

El dispositivo experimental se compone de un monocultivo de maíz fertilizado con estiércol líquido, de una rotación maíz / raygrass (1 año / 3 años) en fase pradera igualmente fertilizada al estiércol líquido y de una vieja pradera pastada (asociación ray grass – trébol blanco). Se caracterizó la morfología de la mesoporosidad del horizonte 0-10cm del suelo por análisis de imágenes 2D con una resolución espacial de 40 $\mu\text{m}.\text{pixel}^{-1}$ y de medidas de la porosidad total. Las curvas de conductividad hidráulica en función del potencial matricial fueron calculadas a partir de las medidas de infiltración con cuatro potenciales (-0.05, -0.2, -0.6, and -1.5 kPa) realizadas en la superfi-

cie del suelo con ayuda de un infiltrómetro con discos. El uso de agua tintada al azul de metileno permitió de identificar la porosidad funcional. Las comunidades de lombrices, extraídas del terreno fueron caracterizadas por el número de individuos, las especies presentes y la estructura ecológica funcional (categoría ecológica acoplada al estado de desarrollo).

Las prácticas de cultivo influyen significativamente las comunidades de lombrices en término de abundancia de los individuos y de diversidad funcional. En el maíz, el pequeño número de poros tubulares es ligado a la pequeña abundancia de gusanos, en particular de los anécticos y de las raíces. En la pradera pastada, el apisonamiento por pisoteo de los bovinos afecta los poros de conjuntos de agregados. La fuerte conductividad hidráulica medida en la pradera de rotación es debida a una diversidad de lombrices más grande que en el maíz y a la ausencia del pisoteo en relación a la pradera pastada. El análisis morfológico de la mesoporosidad permitió explicar las diferencias de funcionamiento hidrodinámico medidas entre las tres parcelas. Relaciones entre comunidades de lombrices y propiedades físicas fueron analizadas gracias a una metodología original que toma en cuenta la diversidad de las especies así que los parámetros morfológicos y físicos que corresponden a un nivel de análisis poco explorado.

Palabras claves

Estructura del suelo, conductividad hidráulica, análisis de imágenes, sistema de cultivo, lombrices.

Comprendre l'influence de la faune du sol sur les propriétés physiques du sol est essentiel pour développer des systèmes de culture durables. Au cours de la dernière décennie, des efforts importants de description et de quantification des effets directs et indirects des invertébrés du sol sur les processus majeurs ont été réalisés, en particulier la formation et la conservation de la structure du sol. Dans les régions tempérées, les vers de terre représentent la plus grande part de la biomasse édaphique (Lee, 1985). Les communautés lombriciennes sont directement influencées par les systèmes de culture (Binet *et al.*, 1997; Paoletti *et al.*, 1998; Chan, 2001; Pérès, 2003) et les activités lombriciennes (creusement de galeries, dépôt de déjections dans le sol) modifient les propriétés physiques du sol à tous les niveaux spatiaux d'analyse. De nombreux travaux traitent de la caractérisation des réseaux de galeries créés par les espèces lombriciennes (Capowiez *et al.*, 1998; Jégou *et al.*, 1999). Ces réseaux de macropores (>1 mm) sont parfois des voies préférentielles d'écoulement (Ehlers, 1975; Bouché et Fathel Al-Addan, 1997; Trojan et Linden, 1998; Pérès, 2003) à travers lesquelles l'eau circule rapidement sous l'action de la gravité (Germann *et al.*, 1984). Les vers de terre, suite à l'ingestion des composés organiques et minéraux, modifient les assemblages des particules élémentaires et la porosité résultante de ces assemblages, c'est-à-dire la microporosité (Shipitalo et Protz, 1989; Blanchart *et al.*, 1993; Chauvel *et al.*, 1999). Enfin, à un niveau spatial d'analyse intermédiaire, les pores résultant de l'agrégation des déjections déposées dans le sol représentent une grande partie de la mésoporosité (VandenBygaert *et al.*, 2000) (pores de diamètre équivalent supérieur à 30 µm et inférieur à 1 000 µm). Cette porosité d'assemblage se différencie des réseaux de galeries par sa morphologie et son fonctionnement hydrique : une grande quantité d'eau et de solutés circule, mais peut aussi être retenue dans ce compartiment de l'espace poral. Si les effets de l'activité lombricienne et des systèmes de culture sur les propriétés hydriques du sol ont surtout été identifiés vis-à-vis des voies préférentielles d'écoulement (Ehlers, 1975; Sveistrup *et al.*, 1997; Pérès, 2003), l'évolution de la

mésoporosité et des propriétés hydriques associées, en particulier en fonction des systèmes de culture, a été peu étudiée pour des sols en milieu tempéré.

La morphologie de la porosité conditionne les transferts d'eau et de solutés. Hallaire et Curmi, (1994), Kribaa *et al.* (2001) l'ont montré en identifiant la porosité fonctionnelle et en la reliant aux mouvements d'eau et de solutés. Les effets des systèmes de culture sur les propriétés physiques des sols ont souvent été quantifiés par des mesures de l'infiltration de l'eau à des potentiels proches de la saturation (Ankeny *et al.*, 1990; Meek *et al.*, 1992; Azevedo *et al.*, 1998; Heddadj et Gascuel-Oudou, 1999; Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000). La capacité d'infiltration de l'eau est mesurée successivement à travers des pores de diamètres équivalents fonctionnels différents, ce qui permet de relier ces compartiments de la porosité fonctionnelle à des types morphologiques de pores identifiés par analyse d'images.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les effets de différents systèmes de culture et des communautés lombriciennes naturellement présentes, sur les propriétés physiques de l'horizon de surface du sol (0-10 cm). Pour cela nous étudions parallèlement la morphologie des mésopores, la capacité d'infiltration à des potentiels proches de la saturation et les communautés lombriciennes dans trois parcelles. La morphologie de la mésoporosité est caractérisée par analyse d'images, la conductivité hydraulique est mesurée *in situ* à plusieurs potentiels proches de la saturation à l'aide d'infiltromètres à disque.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dispositif expérimental

Les parcelles font partie d'une expérimentation à long terme située à Kerbernez dans le Finistère (latitude 47°57'N, longitude 4°8'W). Le climat est de type océanique tempéré, avec une

moyenne annuelle de précipitations de 1 200 mm et une température annuelle moyenne de 11,4 °C. Le sol est un Brunisol oligo-saturé humifère (Humic Cambisol selon la classification FAO) développé sur arène granitique, de texture sablo-limoneuse (tableau 1). Le dispositif expérimental comprend trois parcelles (9 m par 16 m) correspondant à trois systèmes de culture : (i) une monoculture de maïs fertilisée au lisier depuis 22 ans, (ii) une rotation maïs/raygrass (1 an / 3 ans) en phase prairie depuis un an, fertilisée au lisier depuis 22 ans, (iii) une prairie pâturée semée en raygrass et trèfle blanc il y a 9 ans. Les mesures et les prélèvements ont eu lieu en mars après six mois sans interventions culturales. La zone de mesures et de prélèvement dans chaque parcelle a été choisie suite à une cartographie de l'horizon labouré grâce à une méthode inspirée de Manichon et Estrade (1991) et de Curmi *et al.* (1996).

Communautés lombriciennes

Les vers de terre naturellement présents sont prélevés par la méthode au formol décrite par Bouché (1972) et adaptée au contexte d'étude (Cluzeau *et al.*, 1999) : sur une surface de 1 m², trois épandages d'une solution formolée sont réalisés, espacés de 15 minutes (10 l par épandage à différentes concentrations : 0,25 % ; 0,25 % ; 0,4 %), les vers de terre migrant à la surface sont collectés après chaque épandage. Trois répétitions sont effectuées pour chaque parcelle autour des zones de mesures physiques. Les communautés lombriciennes sont caractérisées par l'abondance des vers (nombre d'individus par m²), par les espèces présentes et par la catégorie écologique à laquelle appartiennent les individus : vers épigés, anéciques ou endogés (Lee, 1985 ; Bouché, 1972, 1977). Dans l'objectif de relier l'activité des vers aux propriétés du sol, les communautés lombriciennes sont également caractérisées par leur structure écologique fonctionnelle, qui est définie par les Unités Ecologiques Fonctionnelles (UEF) résultant du couplage des catégories écologiques et du stade de développement (juvénile ou adulte) (Pérès *et al.*, 1998 ; Pérès, 2003). Six unités écologiques fonctionnelles sont ainsi définies.

Conductivité hydraulique

Les capacités d'infiltration en régime permanent sont mesurées à quatre potentiels h : -0,05 ; -0,2 ; -0,6 et -1,5 kPa avec un infiltromètre à disque de 80 mm de diamètre, dont le fonctionnement est décrit par Ankeny *et al.* (1990, 1991) et Coquet *et al.* (2000). Le disque

de l'infiltromètre est positionné sur une surface non-perturbée couverte d'une fine couche de sable fin dans la parcelle de maïs. Dans la rotation et la prairie pâturée, le mat racinaire a été enlevé délicatement avant le dépôt de la couche de sable et la mise en place de l'infiltromètre (à 2 cm sous la surface du sol dans la rotation et 3 cm dans la prairie pâturée). Les flux sont mesurés à partir de $h = -1,5$ à $h = -0,05$ kPa et pendant au moins une heure pour atteindre le régime permanent. Nous avons utilisé de l'eau colorée au bleu de méthylène (0,4 g.l⁻¹) pour marquer la porosité fonctionnelle pour $h = -0,05$ kPa. La courbe de conductivité hydraulique en fonction du potentiel matriciel $K(h)$ 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).

Densité apparente et porosité totale

La porosité totale est estimée à partir de mesures de densité apparente sèche par la méthode du cylindre (250 cm³, quatre répétitions) et d'une densité de solide estimée à 2,65 g.cm⁻³.

Morphologie de la mésoporosité fonctionnelle

Les descriptions de l'espace poral sont réalisées sur des blocs de sol non-perturbés (7x7x8 cm) prélevés à l'aplomb des sites de mesure de l'infiltration à partir de la surface. Les échantillons sont imprégnés par une résine polyester contenant un pigment fluorescent (Ringrose-Voase, 1996). Après induration de la résine, les blocs sont coupés en quatre tranches horizontales (correspondant à quatre profondeurs : 1, 3, 5 et 7 cm), dont la face supérieure est polie. Sur chaque face, quatre fenêtres (2,2 cm x 3,1 cm : 57 % de la surface de la face) sont analysées en utilisant le logiciel OPTIMAS. La résolution spatiale permet d'analyser des pores de surface supérieure à 0,0158 mm² (diamètre équivalent de 0,142 mm), nous ne caractérisons donc qu'une partie de la mésoporosité (Zida, 1998). Une image en niveau de gris est acquise avec une caméra CCD sous lumière UV, sur laquelle la phase solide est en sombre et la porosité en clair. Un traitement multispectral des images a été nécessaire pour masquer certains grains minéraux (quartz et feldspaths) apparaissant en clair et pour supprimer la porosité non-marquée par le

Tableau 1 - Caractéristiques physico-chimiques de l'horizon de surface dans les trois parcelles

Table 1 - Soil characteristics of the top soil in the three studied fields

	<2 µm %	2-20 µm %	20-50 µm %	50-200 µm %	200-2000 µm %	Matière organique (%)	pHeau
Maïs	16,1	21,4	20,4	13,2	28,9	4,18	6,20
Rotation	17,7	19,6	23,6	13,1	26,6	4,43	5,65
Prairie pâturée	17,0	17,5	17,5	18,0	30,0	4,20	5,90

bleu de méthylène. L'image en niveau de gris est ensuite segmentée à partir d'une méthode de seuillage automatique (Otsu, 1978). L'image binaire finale est composée des pores marqués par le bleu de méthylène en noir et de la phase solide en blanc. Les pores de l'image binaire finale sont classés en fonction de leur taille et de leur forme. Leur taille correspond à leur surface en millimètre carré sur l'image binaire finale. Trois seuils définissent quatre classes de taille (taille 1 < 0,031 < taille 2 < 0,196 < taille 3 < 1,77 10^{-6} m² < taille 4). Ils correspondent aux diamètres équivalents des pores fonctionnels aux potentiels de mesure de la conductivité hydraulique (1,5 kPa; 0,6 kPa; 0,2 kPa). La forme est mesurée grâce à un index d'élongation l , rapport du périmètre p élevé au carré par la surface S ($l = p^2/S$). Deux seuils de forme sont choisis pour distinguer les pores arrondis d'origine biologique, des pores allongés ou fissures, des pores de forme complexe ou pores d'assemblages d'agrégats (arrondie < 38 < allongée < 89 < complexe) (Hallaire et Curmi, 1994).

RÉSULTATS

Communautés lombriciennes

Les abondances des vers dans les trois parcelles sont significativement différentes (Test t de Student, $p < 0,05$) (figure 1): la plus forte abondance est mesurée dans la prairie pâturée et la plus faible dans le maïs (respectivement 115 ind.m⁻² et 32 ind.m⁻²). Dans la prairie pâturée, la communauté est dominée: 1) par les vers endogés (48 %), particulièrement par *Aporrectodea caliginosa* (Savigny, 1826) (juvéniles et adultes) et *Allolobophora c. chlorotica* (Savigny, 1826) (adultes); 2) par les vers anéciques (42 %), dominés par *Lumbricus friendi* (Cognetti, 1904) (juvéniles et adultes). La communauté lombricienne dans le maïs est dominée par les espèces endogées (90 %), en particulier par *Aporrectodea caliginosa*, surtout observé au stade juvénile. La communauté lombricienne présente sur la prairie de rotation comporte principalement des espèces épigées (52 %), dominées par *Lumbricus castaneus* (Savigny, 1826) et *Lumbricus rubellus castenoides* (Bouché, 1972) (adultes), ainsi que des espèces anéciques (33 %) dominées par *Lumbricus friendi*.

Conductivité hydraulique

Les courbes $K(h)$ sont présentées sur la figure 2. Nous avons mesuré une forte conductivité hydraulique dans la rotation aux deux potentiels les plus proches de la saturation ($K_{(-0,05)}=1,8.10^{-4}$ m.s⁻¹ et $K_{(-0,2)}=1,16.10^{-5}$ m.s⁻¹): de nombreux pores de diamètre équivalent supérieur à 0,5 mm sont fonctionnels. Dans le maïs et la prairie pâturée, peu de pores participent à l'infiltration au voisinage de la saturation. Par contre la conductivité hydraulique au potentiel le plus négatif (-1,5 kPa) est plus forte dans le maïs et la prairie pâturée (respectivement $K_{(-1,5)}=2,3.10^{-7}$ m.s⁻¹ et $K_{(-1,5)}=7.10^{-8}$ m.s⁻¹) que dans la prairie de rotation ($K_{(-1,5)}=3.10^{-8}$ m.s⁻¹).

Porosité totale et porosité fonctionnelle

La porosité totale des 10 premiers centimètres, estimée à partir des mesures de densité apparente et d'une densité de solide de 2,65, n'est pas significativement différente entre le maïs (54,3 %) et la prairie de rotation (52,5 %) (figure 3). La porosité totale est significativement plus faible dans la prairie pâturée (46,0 %).

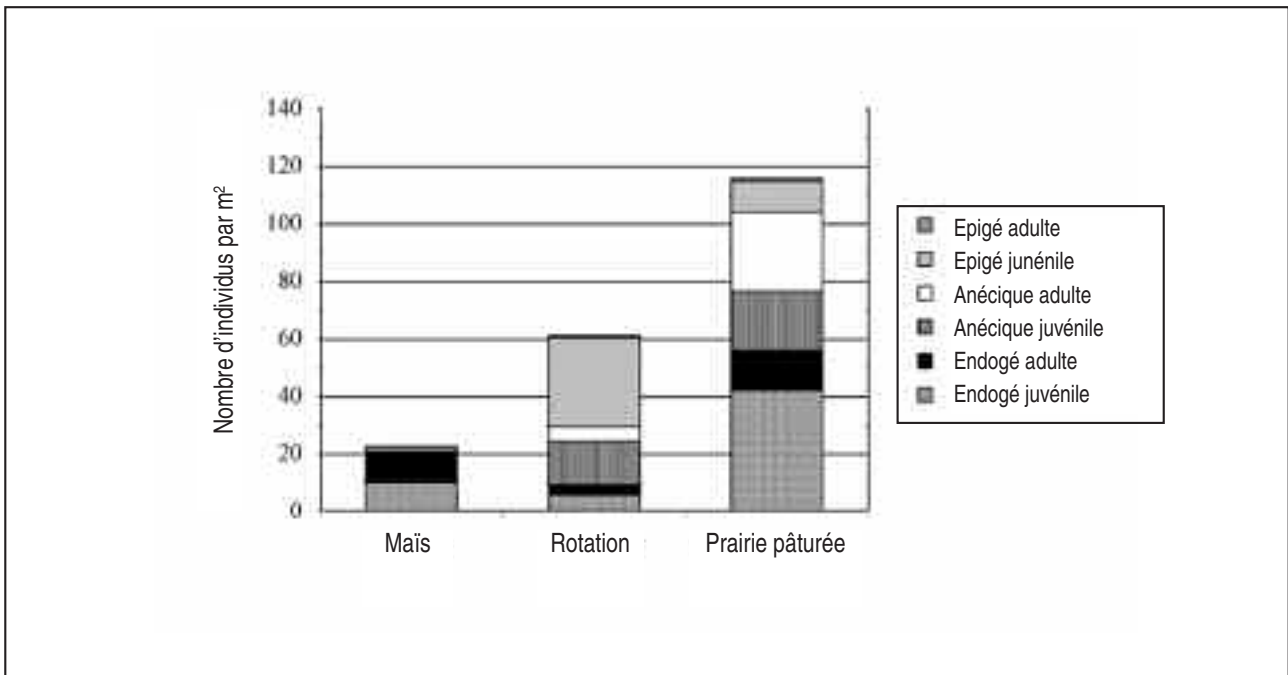
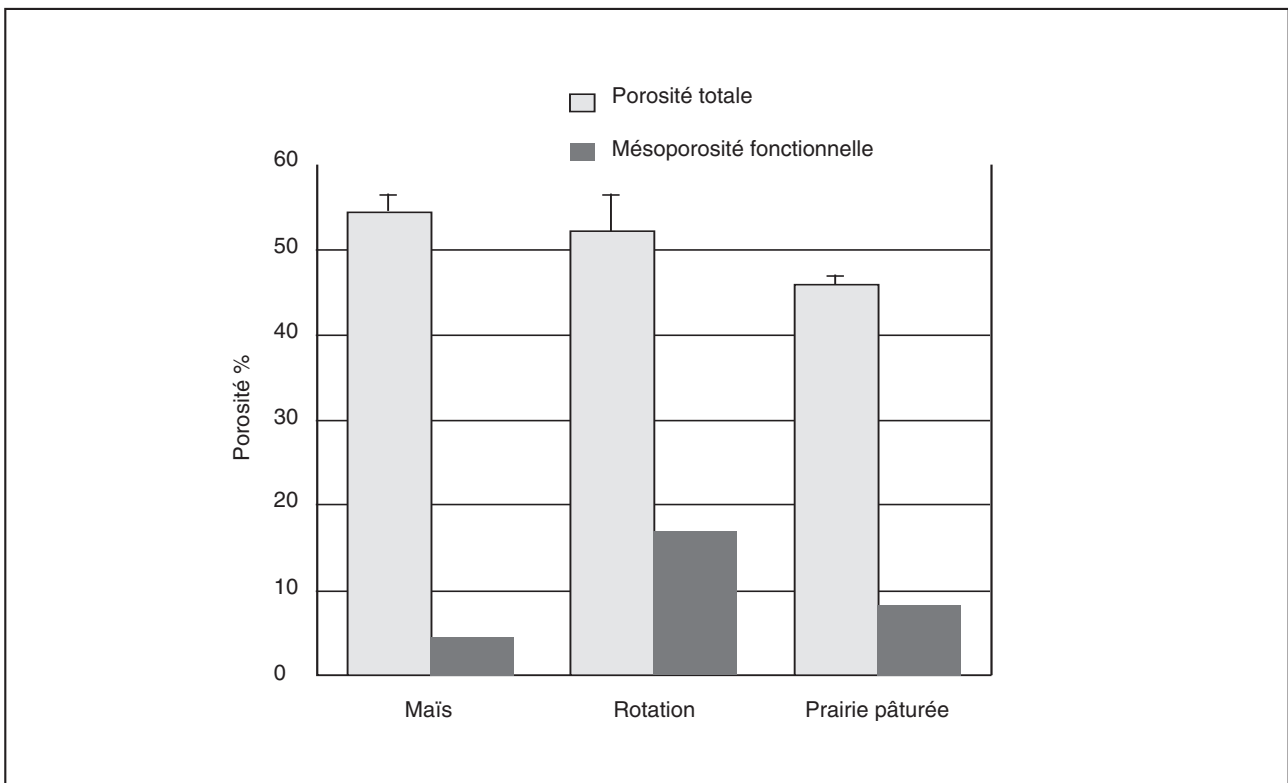
Morphologie de la mésoporosité fonctionnelle

La surface des pores fonctionnels augmente fortement de la taille 1 à la taille 4 pour les trois parcelles (> 0,018 mm² et < 1,77 mm²) (figure 4). La porosité fonctionnelle au potentiel le plus proche de la saturation est trois fois plus forte dans la rotation que dans la prairie pâturée et le maïs. Davantage de pores tubulaires (forme arrondie) et fissurés (forme allongée) sont identifiés dans les deux prairies par rapport au maïs. La porosité est essentiellement de forme complexe (pores d'assemblage) et de taille 4 (>0,018 mm² et < 1,77 mm²) dans cette parcelle.

DISCUSSION

Les pratiques culturales influencent le développement des communautés lombriciennes

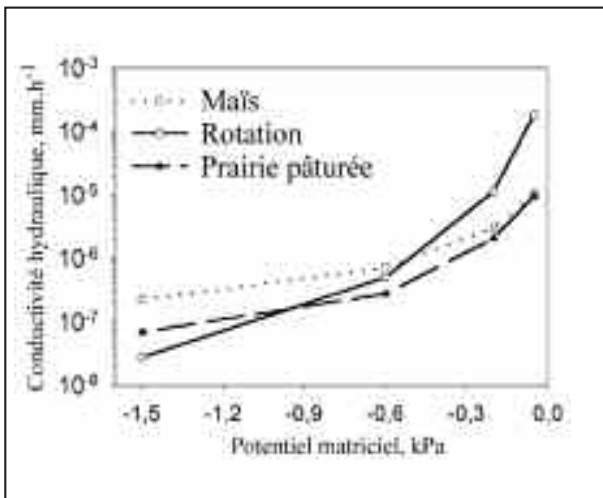
Les résultats montrent des effets significatifs des pratiques culturales sur le développement des communautés lombriciennes dans les parcelles. L'augmentation de la fréquence des interventions anthropiques entraîne une diminution de l'abondance et de la diversité fonctionnelle des vers. Le pâturage peut être à l'origine de la faible abondance des vers épigés dans la prairie pâturée (10 %) par rapport à la rotation (52 %) (Cluzeau *et al.*, 1992). En monoculture de maïs, les interventions culturales (travail du sol, utilisation de pesticides, faible restitution de matière organique) affectent toute la communauté lombricienne mais plus particulièrement les espèces anéciques (6 %) et épigées (4 %): les grands individus (anéciques adultes et juvéniles, endogés adultes) sont affectés par le travail du sol (labour), les épigés sont eux très sensibles à l'absence de couverture végétale et aux traitements phytosanitaires. La communauté lombricienne présente sur la prairie de rotation montre que l'installation d'une prairie après un maïs favorise le développement des espèces épigées et anéciques. La structure spécifique dans cette parcelle peut être expliquée par: 1) le fort taux de reproduction des espèces épigées; 2) le maintien de certaines espèces sous forme de cocons pendant la phase maïs de la rotation; 3) le développement des espèces anéciques grâce à un milieu plus propice (couverture végétale, absence de travail du sol); 4) la colonisation de la parcelle par des individus exogènes. L'essai de longue durée comprend plusieurs rotations céréales/prairie à proximité immédiate

Figure 1 - Densité des unités écologiques fonctionnelles des communautés lombriciennes dans les trois parcelles**Figure 1** - Density of the earthworm ecological and functional units in the three fields**Figure 2** - Courbes de conductivité hydraulique K en fonction du potentiel matriciel h pour les trois parcelles**Figure 2** - Hydraulic conductivity curves for four water potentials near saturation in the three fields

des parcelles utilisées dans cette étude. Les parcelles ont le même système de culture depuis 1978, les communautés lombriciennes de chaque parcelle ont atteint un équilibre de développement. Les écarts entre les trois comptages de vers de chaque parcelle le confirment. La circulation de vers entre les parcelles, sans doute de faible ampleur, est néanmoins possible.

Figure 3 - Porosité totale estimée à partir des mesures de densité apparente et d'une densité de solide de 2,65 et mésoporosité fonctionnelle à $h = -0,05$ kPa mesurée par analyse d'images

Figure 3 - Total porosity estimated from bulk density measurements and effective porosity at water potential $h = -0.05$ kPa.

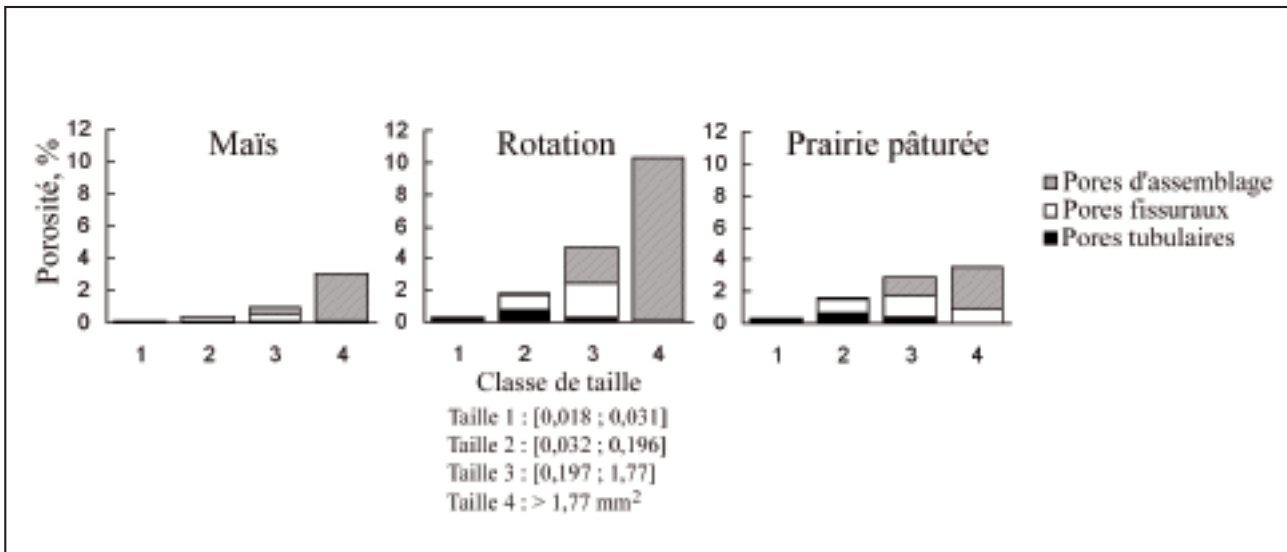


Fonctionnement hydrodynamique dans l'horizon de surface

Pour $h \geq -0,2$ kPa, les écoulements sont avant tout contrôlés par les forces gravitaires. Le potentiel matriciel h du changement d'influence forces gravitaires/capillaires est compris entre $-0,35$ et $-0,3$ kPa dans les trois parcelles. Jarvis et Messing (1995) estiment que cette valeur se situe entre $-0,6$ et $-0,25$ kPa et dépend de la texture du sol, avec $h = -0,25$ kPa pour un sol de texture équilibrée. Ces auteurs considèrent ce potentiel matriciel comme une limite fonctionnelle entre la macroporosité et la mésoporosité (Luxmoore, 1981). Les écoulements gravitaires sont majoritaires dans l'horizon de surface du sol dans la prairie de rotation. Ces résultats montrent que le fonctionnement hydrodynamique dans la prairie de rotation se distingue de celui observé dans le maïs et la prairie pâturée. Le labour, bien que conduisant à une diminution de densité apparente, n'entraîne pas d'augmentation de la conductivité hydraulique. Les travaux de Kooistra *et al.* (1984) peuvent expliquer ce résultat dans le maïs. Ces auteurs suggèrent que, contrairement à certaines espèces de vers de terre, le labour produit une macroporosité avec peu de connexions entre les pores. Les valeurs de conductivité hydraulique montrent que les mésopores résultant du « settling » (réorganisation de la structure après le labour sous l'action de la gravité) et de l'activité biologique dans la rotation présentent davantage de connexions que ceux résultant du settling dans le maïs après 11 mois sans travail du sol. Chan (2001) considère que les mouvements d'eau dans le sol sont principalement contrôlés par les voies préférentielles d'écoulement liées à l'activité des vers anéciques. Si, comme le montrent nos résultats, les connexions entre les macropores sont très dépendantes de la présence de mésopores, alors

Figure 4 - Classement morphologique des pores en fonction de leur taille et de leur forme pour les trois parcelles. Moyennes de 16 images (4 images x 4 profondeurs).

Figure 4 - Pore classification according to size and shape for the three fields. Means of the 16 images (4 images per level x 4 levels).



notre étude met en évidence : 1) le rôle majeur joué par les espèces endogées dans le fonctionnement hydrique ; 2) la complémentarité des deux catégories écologiques. La forte conductivité hydraulique dans la rotation ($K_{(-0,05)}$ est multipliée par 17 par rapport au maïs) est due en partie à l'activité biologique en l'absence d'autres facteurs (pas de gel ni de forte dessiccation dans cette région, pas de travail du sol annuel). La plus faible conductivité hydraulique dans la prairie pâturée ($K_{(-0,05)}$ est divisée par 19 par rapport à la rotation) fait suite au tassement du sol provoqué par le piétinement des bovins (pas de pâturage dans la prairie de rotation) ou à la présence d'espèces lombriciennes compactantes (les communautés sont différentes dans les deux prairies).

Apports de la quantification morphologique de la structure vis-à-vis du fonctionnement hydrodynamique

Nous avons comparé la mésoporosité fonctionnelle à $h = -0,05$ kPa, mesurée sur les images (surface de porosité marquée) et la porosité totale. Il n'y a pas de relation entre ces deux porosités pour les trois parcelles. Il n'y a pas non plus de relations entre $K(h = -0,05$ kPa) et la porosité totale pour la rotation et le maïs, mais l'analyse morphologique de la porosité permet d'identifier les différences de $K(h)$ entre ces deux parcelles. L'augmentation du nombre des pores fonctionnels au voisinage de la saturation est surtout liée à celle des pores d'assemblage d'agrégats (forme complexe). L'absence de travail du sol et le tassement naturel du sol (settling) après le dernier labour auraient pu conduire à une porosité plus faible dans la rotation que dans le maïs. Ils sont en fait compensés par une activité biologique (faune, racines) plus importante dans la rotation. Cette activité a pour conséquence une plus forte agrégation identifiée par une plus grande porosité d'assemblage. Les pores d'assemblage sont plus rares dans la prairie pâturée par rapport à la rotation. Ils sont en partie transformés en pores fissuraux (forme allongée) par le rapprochement des agrégats suite au piétinement de bovins (figure 4). Le nombre des pores tubulaires est presque négligeable dans la parcelle de maïs où la densité de la faune et des racines est la plus faible. La distribution en taille des pores fonctionnels (figure 4) coïncide avec la forme des courbes $K(h)$ (figure 2) pour les trois parcelles. Les pores d'assemblage semblent jouer un rôle majeur dans les flux d'eau dans des conditions proches de la saturation (classes de taille 3 et 4, écoulements majoritairement gravitaires). Ces pores correspondent aux vides présents dans l'agrégation des déjections de vers. Ils pourraient également correspondre aux vides d'assemblages des déjections d'enchytraeïdes (Dawod et FitzPatrick, 1993) qui, d'après Topoliantz et al. (2000), peuvent largement participer à la structuration du sol et à la stabilisation de sa structure dans les sols cultivés de faibles densités lombriciennes. Ce dernier facteur explicatif ne peut cependant pas être retenu dans le cadre de notre étude, compte tenu de la forte valeur de pH (6,2) mesurée dans le maïs qui n'est pas favorable au développement de ces organismes (Górny, 1984). Aux potentiels plus faibles, les flux sont davantage contrôlés par les

pores tubulaires et les pores fissuraux (écoulements majoritairement capillaires). La circulation de l'eau se fait dans des pores de taille différente dans le maïs et dans la prairie pâturée : la porosité fonctionnelle est plus faible alors que la conductivité hydraulique est équivalente. Dans le maïs, la plus grande partie des flux d'eau a lieu à travers des pores de diamètre équivalent inférieur à 200 μm . Du fait de la résolution choisie (40 $\mu\text{m}\cdot\text{pixel}^{-1}$), tous ces pores ne sont pas mesurables par analyse d'images, mais ils sont pris en compte dans la mesure d'infiltration à $h = -1,5$ kPa.

CONCLUSION

Les systèmes de culture et les communautés lombriciennes participent à l'évolution de l'état structural du sol et de ses propriétés physiques. Être capable de proposer des systèmes de culture durables respectueux de l'environnement nécessite de mieux comprendre les processus à l'origine de l'évolution de l'état physique du sol. Dans cette étude, nous avons comparé des paramètres de morphologie porale, la capacité d'infiltration et des paramètres fonctionnels des communautés lombriciennes naturellement présentes dans trois systèmes culture. Nous avons montré qu'au-delà de l'abondance lombricienne, il est indispensable de considérer la structure fonctionnelle des communautés lombriciennes lorsqu'on cherche à identifier l'effet d'une communauté sur les propriétés physiques du sol. La conductivité hydraulique à des potentiels proches de la saturation est adaptée à l'évaluation des effets des systèmes de culture sur le fonctionnement hydrique du sol. Elle renseigne à la fois sur la capacité d'infiltration et sur le nombre et la taille des pores fonctionnels. Les pores d'assemblage d'agrégats physiques et/ou biologiques ont un rôle important dans les flux d'eau, surtout quand les voies d'écoulement rapide (galeries de vers anéciques, fissures verticales) sont déconnectées par le travail du sol (labour) ou morphologiquement modifiées par le tassement lié au piétinement des bovins. Compte tenu de la structure fonctionnelle des communautés lombriciennes sur les différentes parcelles, notre étude a surtout mis en évidence le rôle majeur pouvant être joué aussi par les espèces géophages dans les écoulements rapides. Elle a aussi permis d'illustrer la fragilité des structures biogéniques liées aux espèces anéciques dans le fonctionnement hydrique.

Cette étude fournit une nouvelle méthodologie pouvant être utilisée pour l'étude de l'évolution des propriétés physiques des sols cultivés. En plus de la confrontation des mesures morphologiques et des mesures de flux d'eau à des potentiels matriciels proches de la saturation, l'originalité de ce travail réside dans la prise en compte de deux facteurs de modification des propriétés physiques du sol qui agissent en interaction : l'activité anthropique et l'activité biologique.

L'échantillonnage était ciblé suite à une caractérisation macroscopique de l'horizon labouré sur le terrain. Les résultats sont donc représentatifs de ce niveau d'analyse. Dans le but de pouvoir apprécier le fonctionnement du sol au niveau d'unités spatiales plus

grandes, par exemple un bassin versant, il convient maintenant de compléter ces résultats par une approche au niveau du profil dans son ensemble et au niveau de la parcelle.

BIBLIOGRAPHIE

- Angulo-Jaramillo R., Vandervaere J.-P., Roulier S., Thony J.-L., Gaudet J.-P., Vauclin M., 2000 - Fields measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: a review and recent developments. *Soil and Tillage Research* 55: pp. 1-29.
- Ankeny M. D., Kaspar T. C., Horton R., 1990 - Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurements. *Soil Science Society of America Journal* 54: pp. 837-840.
- 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* 55: pp. 467-470.
- Azevedo A. S., Kanwar R. S., Horton R., 1998 - Effect of cultivation on hydraulic properties of an iowa soil using tension infiltrometers. *Soil Science* 163: pp. 22-29.
- Binet F., Hallaire V., Curmi P., 1997 - Agricultural practices and the spatial distribution of earthworms in maize fields. Relationships between earthworm abundance, maize plants and soil compaction. *Soil Biology and Biochemistry* 29: pp. 577-583.
- Blanchart E., Bruand A., Lavelle P., 1993 - The physical structure of casts of *Miliosonia anomala* (Oligochaeta: Megascolecidae) in shrub savanna soils (Côte d'Ivoire). *Geoderma* 56: pp. 119-132.
- Bouché M. B., 1972 - Lombriciens de France. *Écologie et systématique*. INRA, Paris.
- Bouché M. B., 1977 - Stratégies Lombriciennes. *In: Lohm, U., Persson, T., (Eds.), Soil organism as components of ecosystems. Proc. 6th Int. Coll. Soil Zool. Ecol. Bull., Stockholm*, pp. 122-132.
- Bouché M. B., Fathel Al-Addan, 1997 - Earthworms, water infiltration and soil stability: some new assessments. *Soil Biology and Biochemistry* 29: pp. 441-452.
- Capowiez Y., Pierret A., Daniel O., Monestiez P., Kretzschmar A., 1998 - 3D skeleton reconstructions of natural earthworm burrow systems using CAT scan images of soil cores. *Biology and Fertility of Soils* 27: pp. 51-59.
- Chan K. Y., 2001 - An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity: implications for functioning in soils. *Soil and Tillage Research* 57: pp. 179-191.
- Chauvel A., Grimaldi M., Barros E., Blanchart E., Desjardins T., Sarrazin M., Lavelle P., 1999 - An amazonian earthworm compacts more than a bulldozer. *Nature* 398: pp. 32-33.
- Cluzeau D., Cannavacciuolo M., Pérès G., 1999 - Indicateurs microbiologiques des sols: les lombriciens - Méthode d'échantillonnage dans les agrosystèmes en zone tempérée. *In 12^e Colloque Viticole et Œnologique Ed. ITV Paris*, pp. 25-35
- Cluzeau D., Binet F., Vertes F., Simon J. C., Rivière J.-M., Tréhen P., 1992 - Effects of intensive cattle trampling on soil-plant-earthworms system in two grassland types. *Soil Biology and Biochemistry* 24: pp. 1661-1665.
- Cognetti L., 1904 - Lombricidi dei Pirenei. *Boll. nus. zool. Anat. Comp. Torino* 19: 476, pp. 1-14.
- Coquet Y., Boucher A., Labat C., Vachier P., Roger-Estrade J., 2000 - Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques. *Étude et Gestion des Sols* 7: pp. 7-24.
- Curmi P., Mérot P., Roger-Estrade J., Caneill J., 1996 - Use of environmental isotopes for field study of water infiltration in the ploughed soil layer. *Geoderma* 72: pp. 203-217.
- Dawod V., FitzPatrick E. A., 1993 - Some population sizes and effects of the Enchytraeide (Oligochaeta) on soil structure in a selection of Scottish soils. *In: Brussard, L., Kooistra, M. J., (Eds), Soil structure/soil biota interrelationships*, pp. 173-178.
- Ehlers W., 1975 - Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Science* 119: pp. 242-249.
- Germann P. F., Edwards W. M., Owens L. B., Norton L. D., 1984 - Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropores. *Soil Science Society of America Journal* 48: pp. 237-244.
- Górny M., 1984 - Studies on the relationship between enchytraeides and earthworms. *In: J.Szegi, J., (Eds), Soil Biology and Conservation of the Biosphere 2. Akademiai Kiado, Budapest*.
- Hallaire V., Curmi P., 1994 - Image analysis of pore space morphology in soil sections, in relation to water movement. *In: Ringrose-Voase, A. J., Humphreys, G. S., (Eds), Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis. Developments in Soil Science 22, Elsevier, Amsterdam*, pp. 559-567.
- Heddadj D., Gascuel-Odoux C., 1999 - Topographic and seasonal variations of unsaturated hydraulic conductivity as measured by tension disc infiltrometers at the field scale. *European Journal of Soil Science* 50: pp. 275-283.
- Jarvis N. J., Messing I., 1995 - Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal* 59: pp. 27-34.
- Jégou D., Hallaire V., Cluzeau D., Tréhen P., 1999 - Characterisation of the burrow system of the earthworms using X-ray computed tomography and image analysis. *Biology and Fertility of Soils* 29: pp. 314-318.
- 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.
- Kribaa M., Hallaire V., Curmi P., Lahmar R., 2001 - Effect of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate. *Soil and Tillage Research* 60: pp. 43-53.
- Lee K.E., 1985 - Earthworm. Their ecology and relationships with soil and land use. *Academic Press Australia, Sydney*, 411 p.
- Luxmoore R. J., 1981 - Micro-, meso-, macroporosity in soil. *Soil Science Society of America Journal* 45: pp. 671-673.
- Manichon H., Roger-Estrade J., 1990 - Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de cultures. *In: Picard, D., and Combe, L., (Eds.), Un Point sur Les Systèmes de Culture. INRA, Paris*, pp. 27-55.
- Meek B. D., Rechel E. R., Carter L. M., DeTar W. R., Urie A. L., 1992 - Infiltration rate of a sandy loam soil: effects of traffic, tillage, and plant roots. *Soil Science Society of America Journal* 56: pp. 908-913.
- Otsu N., 1978 - A threshold selection method from gray-level histogram. *IEEE Trans. Systems Man Cybernet, SMC-8*: pp. 62-66.
- Paoletti M.G., Sommaggio D., Favretto M.R., Petruzzelli G., Pezzarossa B., Barbaferri M., 1998 - Earthworms as useful indicators of agroecosystem sustainability in orchards and vineyards with different inputs. *Applied Soil Ecology* 10: pp. 137-150.
- Pérès G., 2003 - Identification et quantification *in situ* des interactions entre la diversité lombricienne et la macro-bioporosité dans le contexte polyculture breton. Influence sur le fonctionnement hydrique du sol. *Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1*.
- Pérès G., Cluzeau D., Curmi P., Hallaire V., 1998 - Earthworms activity and soil structure changes due to organic enrichments in vineyard systems. *Biology and Fertility of Soils* 27: pp. 417-424.
- Reynolds W. D., Elrick D. E., 1991 - Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 55: pp. 633-639.
- Ringrose-Voase A. J., 1996 - Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant and Soil* 183: pp. 27-47.
- Savigny J. C., 1826 - Analyse des trav. acad. roy. sci. pendant l'année 1821, Partie

- physique. *In*: Cuvier, Mem. acad. roy. sci. inst. Fr. 5: pp. 176-184.
- Shiptalo M. J., Protz R., 1989 - Chemistry and micromorphology of aggregation in earthworm casts. *Geoderma* 45: pp. 357-374.
- Sveistrup T. E., Haraldsen T. K., Engelstad F., 1997 - Earthworm channels in cultivated clayed and loamy Norwegian soils. *Soil and Tillage Research* 43: pp. 251-262.
- Topoliantz S., Ponge J.F., Viaux, P., 2000 - Earthworm and enchytraeid activity under different arable farming systems, as exemplified by biogenic structures. *Plant and Soil* 225: pp. 39-51
- 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 American Journal* 62: pp. 1687-1692.
- VandenBygaart A. J., Fox C. A., Fallow D. J., Protz R., 2000 - Estimating earthworm-influenced soil-structure by morphometric image analysis. *Soil Science Society of America Journal* 64: pp. 982-988.
- Wooding R. A., 1968 - Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research* 4: pp. 1259-1273.
- Zida M., 1998 - Structure et fonctionnement hydrique d'un système pédologique armoricain (France). Rôle de l'espace poral et de l'agencement des horizons. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 192 p.