

Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en saturé

Cas des horizons d'un système pédologique armoricain

V. Hallaire⁽¹⁾, P. Curmi⁽¹⁾ et Widiatmaka⁽²⁾

(1) INRA, Unité de Science du Sol et de Bioclimatologie, 65 rue de Saint-Brieuc, F 35042 Rennes CEDEX

(2) Bogor Agriculture University, Dept of Soil Science, Pajajaran Str., Bogor 16144, Indonesia

RÉSUMÉ

La macroporosité a été analysée sur neuf horizons types du bassin versant du Coët Dan (Morbihan), en vue d'une détermination des pores efficaces aux transferts hydriques en conditions saturées. Les voies de circulation préférentielle ont été marquées, puis identifiées par analyse d'images. Une paramétrisation morphologique des pores fonctionnels est proposée à partir de quatre critères : la porosité surfacique, la taille des pores, leur forme, et leur connectivité. Ces paramètres porosimétriques ont été croisés à un paramètre hydrodynamique, la conductivité hydraulique à saturation des horizons. On met en évidence une relation entre la porosité fonctionnelle et la perméabilité, malgré une grande variabilité au sein de chaque horizon. L'analyse morphologique des pores permet de classer les horizons en quatre types, en fonction de la classe principale des macropores. Cette classification montre que la connectivité est fortement liée au K_{sat} . Une approche morphologique de la porosité, tenant compte de la forme des pores (pores tubulaires, pores fissuraux, pores d'assemblage), de leur taille et de leurs connexions apparaît ainsi nécessaire pour expliquer les transferts hydriques en saturé.

Mots clés

Macroporosité, circulations préférentielles, conductivité hydraulique à saturation, analyse d'images

SUMMARY

PORE MORPHOLOGY AND PREFERENTIAL SATURATED FLOW IN THE MAIN HORIZONS OF AN ARMORICAN CATCHMENT

Macropores were analyzed on the main nine horizons of the Coët Dan catchment (Morbihan, France), in order to detect effective porosity for saturated flows. Preferential paths were coloured, then identified by image analysis. Effective pores were quantified with four parameters : surfacic porosity, pore size, pore shape (combined with pore size as shown on table 1), and pore connectivity. These parameters were related to a hydrodynamic parameter, the saturated hydraulic conductivity K_{sat} (tables 2 and 3). There was no relationship between K_{sat} and total macroporosity (figure 1), but a good one with effective macroporosity (figure 2), in spite of a great variability within each horizon. There was no obvious effect of pore size and shape on K_{sat} (figures 3 and 4), but the combination of these two parameters allowed the horizons to be classified in four morphological types, according to the main class

of macropores (figures 5 and 6). Taking into account this classification showed that pore connectivity was strongly related to K_{sat} (figure 7). A morphological approach of pore space, based on their shape (channels, cracks, packing voids), their size and their connections appeared therefore useful to explain water transfers in saturated soils.

Key-words

Macroporosity, preferential paths, saturated hydraulic conductivity, image analysis

RESUMEN5

MORFOLOGÍA DE LA POROSIDAD Y CIRCULACIONES PREFERENCIALES EN SATURADO: EL CASO DE LOS HORIZONTES DE UN SISTEMA PEDOLÓGICO ARMORICANO.

Resumen: La macroporosidad fue analizada sobre nueve horizontes característicos de la cuenca del Coït Dan (Morbihan), en vía de una determinación de los poros eficaces para las transferencias hídricas en condiciones saturadas. Las vías de circulaciones preferenciales fueron marcadas y identificadas por análisis de imágenes. Se propone una parametrización morfológica de los poros funcionales a partir de cuatro criterios: la superficie, el tamaño, la forma, y la conexidad de los poros. Estos parámetros fueron cruzados con un parámetro hidrodinámico, la conductividad hidráulica a saturación de los horizontes. Se pone en evidencia una relación entre la porosidad funcional y la permeabilidad, a pesar de una grande variabilidad en el seno de cada horizonte. El análisis morfológico de los poros permite ordenar los horizontes en cuatro tipos, en función de la clase principal de los macroporos. Esta clasificación muestra que la conexidad está fuertemente ligada a K_{sat} . Un enfoque morfológico de la porosidad, teniendo en cuenta la forma de los poros (poros tubulares, poros de fisuras, poros de ensambladura), su tamaño y sus conexiones aparece así necesario para explicar las transferencias hídricas en saturado.

Palabras claves

Macroporosidad, circulaciones preferenciales, conductividad hidráulica a saturación, análisis de imágenes.

Les transferts hydriques dans les sols naturels sont fortement influencés par la structure de ces sols (Anderson et Bouma, 1977; Quisenberry et al., 1994), les macropores jouant en effet un rôle de court-circuit (Bouma, 1981; Beven et Germann, 1982). Si l'équation de Kozeny-Carman reliant la conductivité en saturé d'un sol à sa porosité a pu s'avérer satisfaisante dans certains cas (Ahuja et al., 1989), une définition de la macroporosité uniquement basée sur la taille des pores (Luxmoore, 1981) ne suffit généralement pas à expliquer la perméabilité d'un sol : les « voies de circulation préférentielle », responsables des écoulements rapides, correspondent à une faible fraction de la porosité dont la morphologie doit être prise en compte. Certains travaux ont ainsi pu établir le rôle des pores dans les sols fortement marqués par leur texture argileuse (Ritchie et al., 1972; Booltink et Bouma, 1991) ou sableuse (Kung, 1990), des galeries biologiques (Ehlers, 1975), ou de la porosité résultant des pratiques culturales (Andreini et Steenhuis, 1990). L'utilisation de marqueurs colorés reste la méthode la plus générale pour l'identification de ces voies (Diab et al., 1988; Ghodrati et Jury, 1990; Lin et al., 1996).

On se propose ici d'identifier par analyse d'images les voies de circulation préférentielle, préalablement marquées par du bleu de méthylène, sur les principaux horizons d'un système pédologique armoricain (bassin versant du Coët Dan), sur lesquels un paramètre hydrodynamique, la conductivité hydraulique à saturation, a été mesuré. Ces voies ont été quantifiées au moyen de paramètres décrivant la morphologie des macropores « fonctionnels » par des indices de taille, de forme et de connectivité. En reliant chacun de ces paramètres porosimétriques à la conductivité hydraulique, nous chercherons à établir une typologie des horizons regroupant leurs caractéristiques structurales et leur fonctionnement hydrique en condition saturée.

LES HORIZONS ÉTUDIÉS

L'analyse a été réalisée sur le bassin versant du Coët Dan, à Naizin (Morbihan); ce bassin versant a fait l'objet, dans le cadre du programme CORMORAN-INRA, d'une caractérisation géomorphologique, pédologique, hydrologique et géochimique visant à définir le rôle du milieu physique sur les conditions de transfert et les risques de pollution en milieu agricole (Curmi et al., 1997 a,b). Les sols sont développés dans une couverture limoneuse recouvrant des schistes antécambriens (schistes briovériens). L'analyse pédologique (Walter et al., 1993; Widiatmaka, 1994; Walter et Curmi, 1997) a montré que les sols sont organisés selon un système pédologique sous l'influence de trois processus pédogénétiques : le lessivage, l'hydromorphie et la dégradation. Les sols ainsi formés sont des Alocriols, des Luvisols, des Luvisols Rédoxisols et des Luvisols Rédoxisols dégradés du Référentiel Pédologique

(Baize et Girard, 1995). Ils se caractérisent par un nombre limité d'horizons : un horizon structural aluminique Sal, un horizon éluvial bien drainé E, un horizon éluvial rédoxique Eg, un horizon éluvial albique Ea, un horizon illuvial bien drainé BT, un horizon illuvial rédoxique BTg, et un horizon illuvial rédoxique et dégradé BTgd.

Notre analyse portera sur 9 horizons : les 7 horizons types cités précédemment, l'horizon de labour L, et l'horizon de transition Sal/E.

MÉTHODES

Mesure de la conductivité hydraulique à saturation

Chaque horizon a fait l'objet de mesures de la conductivité hydraulique à saturation, selon la méthode proposée par Bouma et Dekker (1981). Dans les fosses pédologiques, des échantillons de 20 cm de côté, d'épaisseur 20 cm (10 cm pour l'horizon Ea), encore attachés par leur base à l'horizon sous-jacent, sont dégagés de façon à présenter une surface horizontale et quatre faces latérales; celles-ci sont protégées par des parois cimentées. La mesure de l'infiltration sous charge constante est effectuée sur le cube détaché de son support afin d'estimer la perméabilité propre de l'horizon. Elle est assurée par un dispositif automatisé permettant d'acquérir le débit d'eau percolant dans l'échantillon sur des temps relativement longs; la mesure est arrêtée lorsque le débit est constant, ce qui peut atteindre 3 ou 4 jours; au minimum, la mesure a été poursuivie sur 24 heures.

Pour les neuf horizons analysés, des mesures ont été effectuées sur 28 cubes : de 1 mesure pour l'horizon Eg jusqu'à 5 mesures pour les horizons Sal et BT. Le nombre de mesures par horizon dépend de son extension dans le système pédologique.

Marquage des voies de circulation préférentielle

Les échantillons sont ensuite soumis à une deuxième percolation en saturé avec une eau additionnée de bleu de méthylène ($0,1 \text{ g.l}^{-1}$), pendant 72 heures, de façon à colorer les parois des pores assurant les transferts préférentiels. Les parois de ciment ont ensuite été retirées, et les échantillons, après échange eau-acétone, ont été imprégnés dans une résine polyester (Scott-Bader Crystic) contenant un pigment fluorescent (Ciba-Geigy Uvitex OB, à la concentration de 1 g.l^{-1}) selon le protocole décrit par Murphy et al. (1977). Après durcissement, les échantillons sont découpés en tranches d'environ 2 cm d'épaisseur permettant d'observer des sections horizontales.

Identification des voies de circulation préférentielle

Les voies de circulation préférentielle, constituées par les

pores dont les parois sont colorées par le bleu de méthylène sur les sections horizontales, sont détectées par analyse d'images sur station SUN avec le logiciel Noesis VISILOG. L'acquisition des images a été effectuée en « double analyse spectrale » : chaque fenêtre analysée est acquise d'une part en lumière visible, d'autre part en lumière ultraviolette. La méthode, décrite par Hallaire et Curmi (1994), permet d'obtenir des images représentant respectivement les zones colorées par le bleu et la porosité. Une image de 7 cm sur 5 cm, localisée au hasard, est acquise sur chaque section horizontale ; elle est numérisée en 768 x 576 pixels avec une résolution spectrale de 256 niveaux de gris. La résolution spatiale des images est ainsi de 90 µm par pixel, ce qui correspond à une surface élémentaire d'analyse de 0,008 mm² ; ce seuil limite bien sûr la prise en compte des macropores fissuraires, dont les étranglements risquent d'être considérés comme des déconnexions. Dans la suite de l'analyse, nous dénommerons macropore tout pore supérieur à ce seuil, et par macropore fonctionnel tout macropore coloré par le bleu de méthylène. Cette analyse a été réalisée sur 250 fenêtres, ce qui représente une moyenne de 9 fenêtres par cube.

Chaque image en niveaux de gris est ensuite binarisée selon la méthode décrite par Hallaire (1994) qui combine des opérations de morphologie mathématique (« ouvertures morphologiques ») et un seuillage sur les niveaux de gris. Des opérations logiques (intersection, différence symétrique) entre les deux images binaires provenant de la double acquisition permettent de distinguer sur une fenêtre donnée les macropores fonctionnels et les macropores non fonctionnels.

Paramétrisation des voies de circulation préférentielle

Quatre paramètres ont été mesurés pour quantifier les macropores : la porosité surfacique, la taille, la forme, et la connectivité bidimensionnelle des pores.

- la porosité surfacique correspond à l'aire totale occupée par les pores, rapportée à la surface de l'image.
- la taille de chaque pore est estimée par l'aire de sa

section sur l'image (en pixels, ramenée en mm²). Les pores ont été classés en trois classes de taille : les petits « p » (aire < 1 mm²), les moyens « m » (1 mm² < aire < 10 mm²), les gros « g » (aire > 10 mm²).

- la forme de chaque pore est estimée par l'indice d'allongement I_a (Coster et Chermant, 1985), mesuré à partir de l'aire et du périmètre de chaque pore sur l'image :

$$I_a = (\text{périmètre})^2 / 4 \pi \text{ aire}$$

Cet indice prend la valeur minimale 1 pour un pore parfaitement rond, il est d'autant plus grand que le pore est allongé. Il est particulièrement bien adapté à la distinction des différentes catégories de pores (Hallaire et Cointepas, 1993). En nous basant sur la classification proposée par Ringrose-Voase (1996), nous définissons ainsi trois catégories de pores : les pores tubulaires « T » ($I_a < 5$), les pores fissuraires « F » ($5 < I_a < 10$), et les pores d'assemblage « A » ($I_a > 10$).

Le couplage des paramètres de taille et de forme permet de définir 9 classes de « taille-forme » pour caractériser la morphologie des macropores (tableau 1). Seules 6 classes seront rencontrées dans notre étude : il n'y a pas d'occurrence des classes Ap, Tg et Fg.

- la connectivité bidimensionnelle des pores est estimée au moyen d'un indice original faisant appel à la notion « d'érosion ultime », proposée en morphologie mathématique par Serra (1982). Sur une image binaire représentant la porosité, le nombre de connexité N_c correspond au nombre de « particules connexes », c'est-à-dire au nombre de pores individualisés, et le nombre d'érodés ultimes N_u correspond au nombre de parties convexes dans la porosité. Ces deux grandeurs nous permettent de définir l'indice de connectivité bidimensionnelle I_c par :

$$I_c = 1 - N_c / N_u$$

I_c varie de 0 à 1 et est d'autant plus petit que les pores sont isolés ; il augmente lorsque les pores sont reliés entre eux, ou sont arrangés en « chapelets ».

Tableau 1 - Classification des macropores selon leur taille et leur forme.

Table 1 - Classification of the macropores according to their size and shape.

Forme des macropores selon l'indice d'allongement, I_a	Taille des macropores selon leur aire		
	"p" petits aire < 1 mm ²	"m" moyens 1 mm ² < aire < 10 mm ²	"g" gros aire > 10 mm ²
"T" tubulaires $I_a < 5$	Tp	Tm	-
"F" fissuraires $5 < I_a < 10$	Fp	Fm	-
"A" d'assemblage $I_a > 10$	-	Am	Ag

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le tableau 2 présente, pour les 28 cubes analysés, les résultats concernant la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) et les différents paramètres de porosité (macroporosité totale, macroporosité fonctionnelle, taille moyenne, indice d'allongement moyen, indice de connectivité). Le tableau 3 présente les moyennes de ces paramètres pour chacun des neuf horizons.

Le K_{sat} varie de trois ordres de grandeur entre les 28 cubes (de $4 \cdot 10^{-7}$ à $2 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$); Widiatmaka (1994) a pu distinguer deux groupes, en prenant un seuil de $3 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$: les horizons L, Sal, E/Sal et BT appartiennent au groupe des horizons à forte perméabilité (moyenne $3,01 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$), les horizons Ea et Eg au groupe des horizons à faible perméabilité (moyenne $2,15 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$), les autres horizons se partagent entre les deux groupes. L'analyse qui suit va permettre de relier ces valeurs de perméabilité aux caractéristiques macroporales de chacun des échantillons analysés.

Tableau 2 - Caractéristiques hydrodynamiques et morphologiques des échantillons.

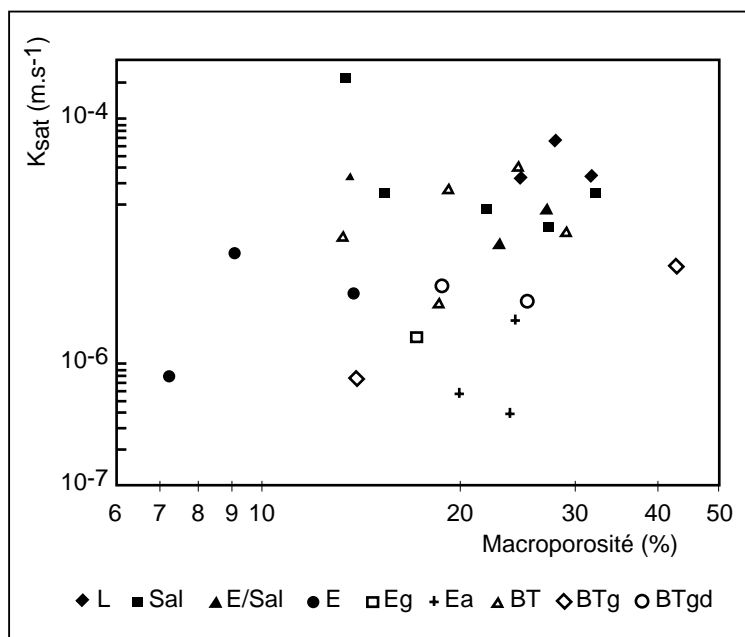
Table 2 - Hydrodynamic and morphological characteristics of the samples.

Echantillon (lc)	K_{sat} m.s ⁻¹	Macroporosité porosité surfacique %	Macroporosité fonctionnelle			
			porosité surfacique %	taille moyenne mm ²	indice d'allongement (<i>la</i>)	indice connectivité
L1	6,57e-5	27,84	9,02	0,368	3,97	0,058
L3	3,29e-5	24,71	9,54	0,280	4,51	0,069
L4	3,39e-5	31,51	9,99	0,354	5,68	0,016
Sal8	1,84e-5	21,97	4,40	0,286	9,07	0,027
Sal9	1,30e-5	27,27	4,74	0,368	2,06	0,070
Sal12	2,17e-4	13,35	7,87	0,327	6,69	0,142
Sal13	2,43e-5	32,15	8,81	0,324	4,05	0,108
Sal14	2,54e-5	15,34	8,39	0,435	6,50	0,238
E/Sal3	3,40e-5	13,52	6,34	0,293	21,60	0,142
E/Sal4	9,00e-6	22,84	2,64	0,223	4,71	0,000
E/Sal5	1,75e-5	27,02	5,84	0,587	2,33	0,060
E/Sal11	3,29e-5	13,65	7,06	0,343	7,29	0,131
E2	7,84e-7	7,22	2,57	0,353	2,79	0,000
E6	7,95e-6	9,07	5,31	0,310	2,44	0,053
E7	3,74e-6	13,73	5,32	0,244	2,10	0,033
Eg1	1,60e-6	17,18	2,73	0,292	2,61	0,083
Ea1	3,85e-7	23,79	2,63	0,307	4,50	0,059
Ea2	2,23e-6	24,22	4,17	0,342	12,48	0,088
Ea3	5,59e-7	19,94	3,57	0,323	8,24	0,064
BT2	2,93e-6	18,51	3,92	0,441	3,83	0,127
BT4	1,13e-5	29,08	3,24	0,287	2,41	0,162
BT5	1,06e-5	13,27	2,86	0,206	1,24	0,310
BT6	3,92e-5	24,50	10,55	0,392	7,99	0,331
BT7	2,58e-5	19,14	4,49	0,371	5,40	0,255
BTg1	6,27e-6	42,53	6,42	0,348	22,00	0,293
BTg3	7,47e-7	13,93	2,83	0,670	2,51	0,186
BTgd2	4,27e-6	18,74	4,60	0,382	6,03	0,215

Tableau 3 - Caractéristiques hydrodynamiques et morphologiques moyennes des horizons.

Table 3 - Mean hydrodynamic and morphological characteristics of the horizons.

Echantillon	K_{sat} m.s ⁻¹	Macroporosité porosité surfacique %	Macroporosité fonctionnelle			
			porosité surfacique %	taille moyenne mm ²	indice d'allongement (<i>la</i>)	indice connectivité (<i>lc</i>)
L	4,42e-5	28,023	9,518	0,334	4,719	0,048
Sal	5,96e-5	22,016	6,843	0,348	5,674	0,117
E/Sal	2,34e-5	19,257	5,471	0,362	8,982	0,083
E	4,16e-6	10,007	4,400	0,302	2,445	0,029
Eg	1,60e-6	17,176	2,728	0,292	2,612	0,083
Ea	1,06e-6	22,652	3,458	0,324	8,408	0,070
BT	1,80e-5	20,899	5,013	0,339	4,175	0,237
BTg	3,51e-6	28,231	4,625	0,509	12,254	0,240
BTgd	3,74e-6	22,045	5,286	0,365	7,402	0,187

Figure 1 - Relation entre le K_{sat} et la macroporosité.Figure 1 - Relationships between K_{sat} and macroporosity.

Macroporosité

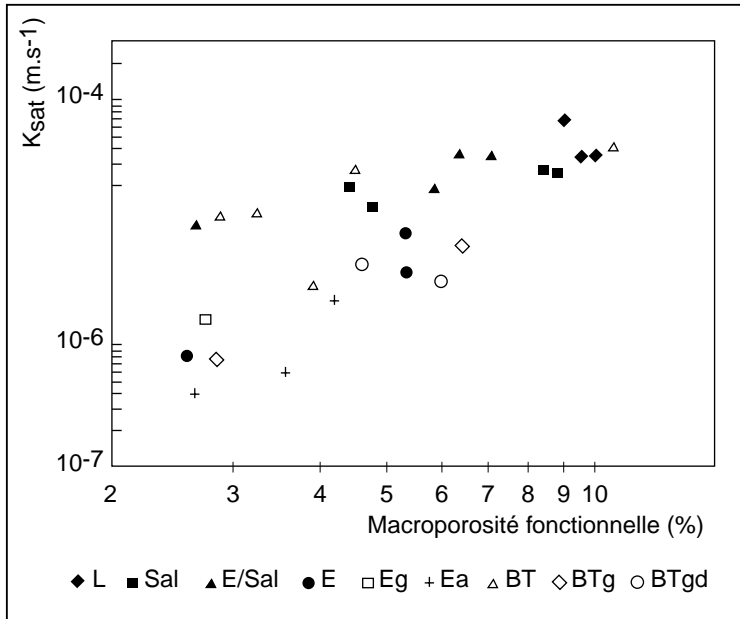
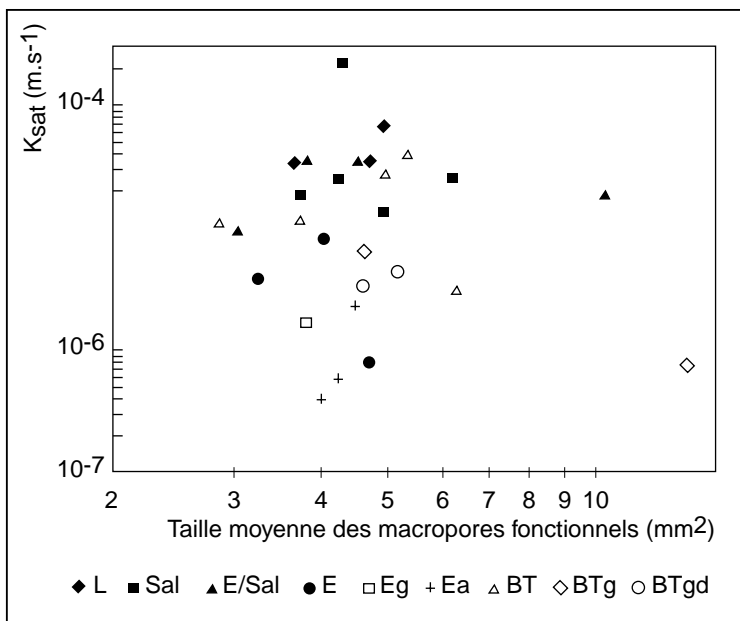
La figure 1 représente la conductivité hydraulique des 28 cubes analysés en fonction de leur macroporosité, c'est-à-dire du pourcentage surfacique de tous les pores (fonctionnels ou non) reconnus sur les images. La macroporosité varie de 7 % à 43 %, avec une très grande variabilité au sein d'un même horizon, notamment pour l'horizon Sal où les valeurs varient de 13 % à 32 % et pour l'horizon BT où elles varient de 13 % à 29 %. Par ailleurs, les valeurs

de macroporosité ne montrent pas de relation évidente avec la conductivité hydraulique à saturation : pour une même valeur de macroporosité, toute la gamme de K_{sat} est représentée. Le coefficient de corrélation entre $\text{Log}(K_{sat})$ et $\text{Log}(\text{macroporosité})$ est de 0,17. Ce résultat confirme donc que la perméabilité des sols ne dépend pas uniquement de l'importance de la porosité, ni même de l'importance de la macroporosité.

Macroporosité fonctionnelle

La figure 2 représente le K_{sat} en fonction du pourcentage surfacique des macropores fonctionnels. La macroporosité fonctionnelle varie de 2,6 % à 10,6 %, et constitue en moyenne 30 % de la macroporosité totale (de 11 % à 59 %, selon les cubes). Le nuage de points est par ailleurs beaucoup moins dispersé que sur la figure 1 : le coefficient de corrélation entre $\text{Log}(K_{sat})$ et $\text{Log}(\text{macroporosité fonctionnelle})$ est de 0,75.

Toutefois cette relation ne permet pas de tirer une loi générale entre ces deux grandeurs. On observe ainsi de très grands écarts, sur les abscisses comme sur les ordonnées : ainsi, pour les faibles valeurs de porosité fonctionnelle (moins de 3 %), les valeurs de K_{sat} varient d'un facteur 100 (de 10⁻⁷ à 10⁻⁵ m.s⁻¹); à l'inverse, les fortes valeurs de K_{sat} (supérieures à 10⁻⁵ m.s⁻¹) correspondent à des porosités fonctionnelles variant de 4,5 % à 10,6 %.

Figure 2 - Relation entre le K_{sat} et la macroporosité fonctionnelle.Figure 2 - Relationships between K_{sat} and effective macroposity.Figure 3 - Relation entre le K_{sat} et la taille moyenne des pores fonctionnels.Figure 3 - Relationships between K_{sat} and effective pore mean size.

Aussi, s'il existe une relation entre K_{sat} et macroporosité fonctionnelle, cette relation est faible, et la grande variabilité des résultats nous impose d'analyser plus finement chacune de ces valeurs. Cet objectif nécessite une analyse morphologique des pores fonctionnels.

Taille et forme des macropores fonctionnels

La figure 3 représente les variations de K_{sat} en fonction de la taille moyenne des macropores fonctionnels; les valeurs en abscisse résultent d'une moyenne de moyennes (moyenne, sur les différentes images d'un cube, des moyennes de taille des pores sur chaque image). La figure 4 représente les variations de K_{sat} en fonction de l'indice d'allongement moyen de ces pores; il s'agit ici d'un indice de forme pondéré, le poids de l'indice d'allongement de chaque pore sur la étant proportionnel à sa taille.

Ces figures ne laissent apparaître aucune relation entre les paramètres retenus et le K_{sat} : les nuages de points sont très dispersés. Cette absence de relation peut être due au fait que l'analyse bidimensionnelle est mal adaptée à la prise en compte des pores les plus anisotropes, comme les tubules ou les fissures; elle peut aussi être imputée au mauvais choix des paramètres retenus: la taille et la forme des pores, au sein de chaque image, montrent une telle variabilité que la moyenne seule ne peut pas décrire l'ensemble des spectres de porosité.

Toutefois le couplage des paramètres de taille et de forme et la définition de 6 classes de morphologie des pores permettent de prendre en compte ces spectres. La description de l'ensemble de nos échantillons selon cette classification morphologique a permis de définir quatre types de spectres auxquels tous les horizons peuvent être rattachés. Chaque type est caractérisé par la prédominance d'une classe donnée de macropores fonctionnels. La figure 5 propose un exemple d'histogramme pour chacun de ces types, chaque histogramme présentant les proportions des différentes classes de macropores fonctionnels. Les quatre images de la figure 6 illustrent ces quatre types morphologiques. L'analyse qui suit propose de décrire ces types morphologiques et tente d'établir les relations avec la conductivité hydraulique à saturation.

Figure 4 - Relation entre le K_{sat} et l'indice d'allongement moyen des pores fonctionnels.

Figure 4 - Relationships between K_{sat} and effective pore mean elongation index.

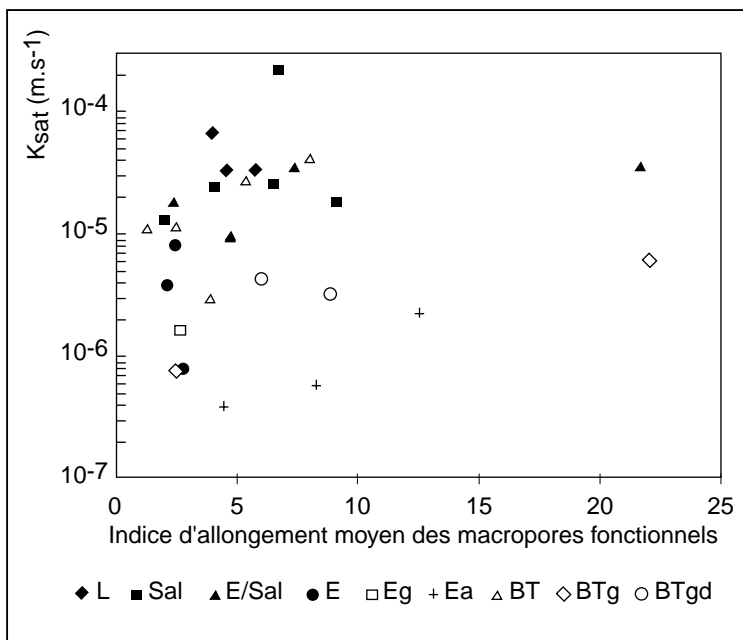
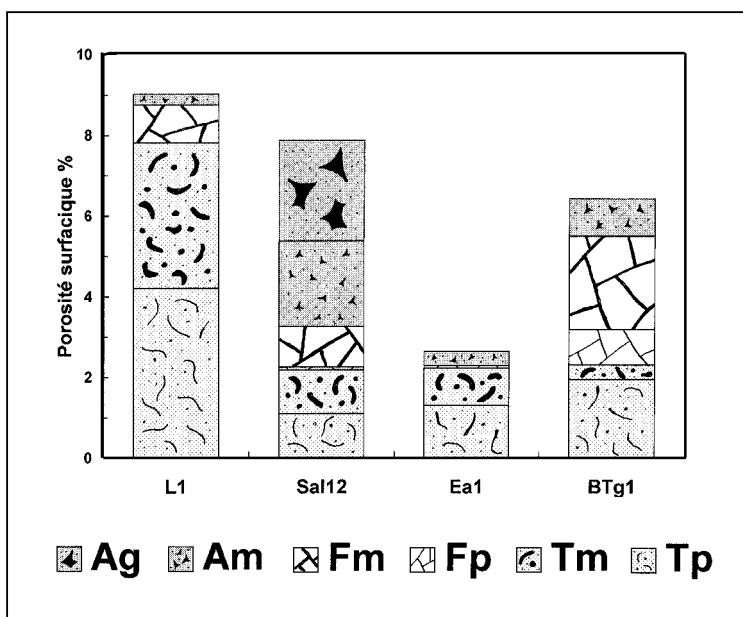


Figure 5 - Histogrammes de macroporosité pour les 4 types morphologiques d'horizons.

Figure 5 - Macropore histograms of the 4 morphological types of horizons.



- le type T1 correspond aux horizons de labour (L). Il présente une porosité fonctionnelle importante (9 à 10 %), constituée très majoritairement de pores tubulaires, de tailles moyennes et petites (classes Tm et Tp). Dans cet horizon, la conductivité hydraulique est élevée (toujours supérieure à $10^{-5} \text{ m. s}^{-1}$).

- le type T2 correspond à l'horizon structural aluminique Sal, à l'horizon éluvial E, et à l'horizon de transition E/Sal. Il présente toutes les classes de pores, mais la porosité d'assemblage y est généralement majoritaire (classes Am et Ag). A l'intérieur de ce type, on peut rencontrer d'importantes variations non pas qualitatives (la proportion des différentes classes de pores restant généralement semblable), mais quantitatives : l'ensemble de la porosité fonctionnelle varie de 3 % à 9 %. Ce type présente également de fortes variations de K_{sat} (de $3 \cdot 10^{-6}$ à $2 \cdot 10^{-4} \text{ m. s}^{-1}$), les plus faibles valeurs correspondant à l'horizon E et les plus fortes à l'horizon Sal. La corrélation entre K_{sat} et porosité fonctionnelle est assez forte ($r^2 = 0,70$ pour 12 individus).

- le type T3 correspond aux horizons éluviaux hydromorphe (Eg) et albique (Ea). La porosité fonctionnelle y est toujours faible (en moyenne 3 à 4 %), et constituée majoritairement de pores tubulaires fins (classe Tp). Ce type correspond également aux horizons les moins perméables : les valeurs de K_{sat} y varient de $4 \cdot 10^{-7} \text{ m. s}^{-1}$ à $3 \cdot 10^{-6} \text{ m. s}^{-1}$.

- le type T4 correspond à l'ensemble des horizons illuviaux (BT, BTg, BTgd); il est caractérisé par le développement d'une importante porosité fissurale (classes Fp et Fm). Mais la porosité fonctionnelle peut s'étendre sur une très large gamme (de moins de 3 % à plus de 10 %), alors que les variations en K_{sat} y sont relativement moins importantes que pour les types T2 et T3 : même pour une faible valeur de porosité fonctionnelle, la conductivité hydraulique est plus élevée dans ces horizons que dans ceux des autres types. La présence d'une porosité fissurale semble ainsi être un facteur favorable aux transferts hydriques.

Ces résultats montrent la nécessité de prendre en compte les caractéristiques morphologiques des pores (taille et forme) pour tenter de relier le K_{sat} à la porosimétrie, ces relations variant d'un type morphologique à l'autre.

Figure 6 - Images correspondant aux 4 types morphologiques.
 Figure 6 - Images corresponding to the 4 morphological types.

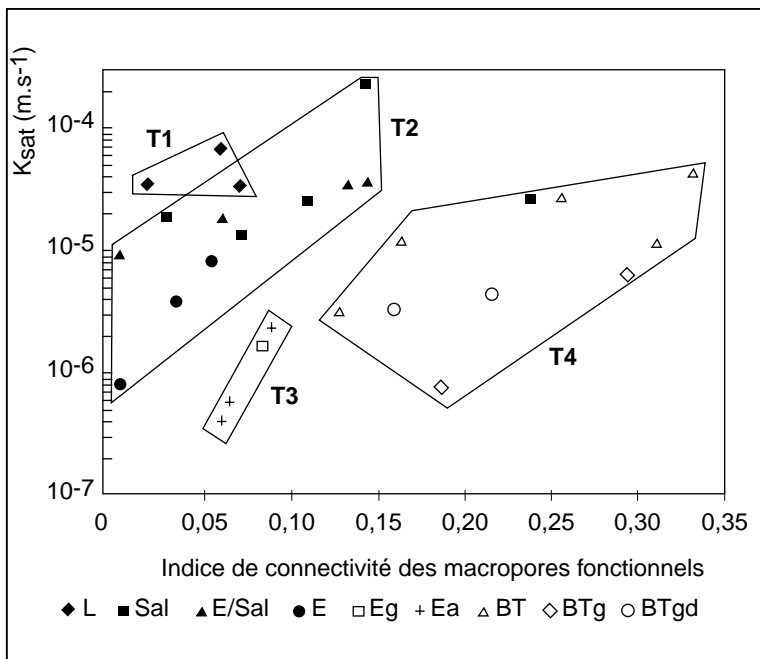
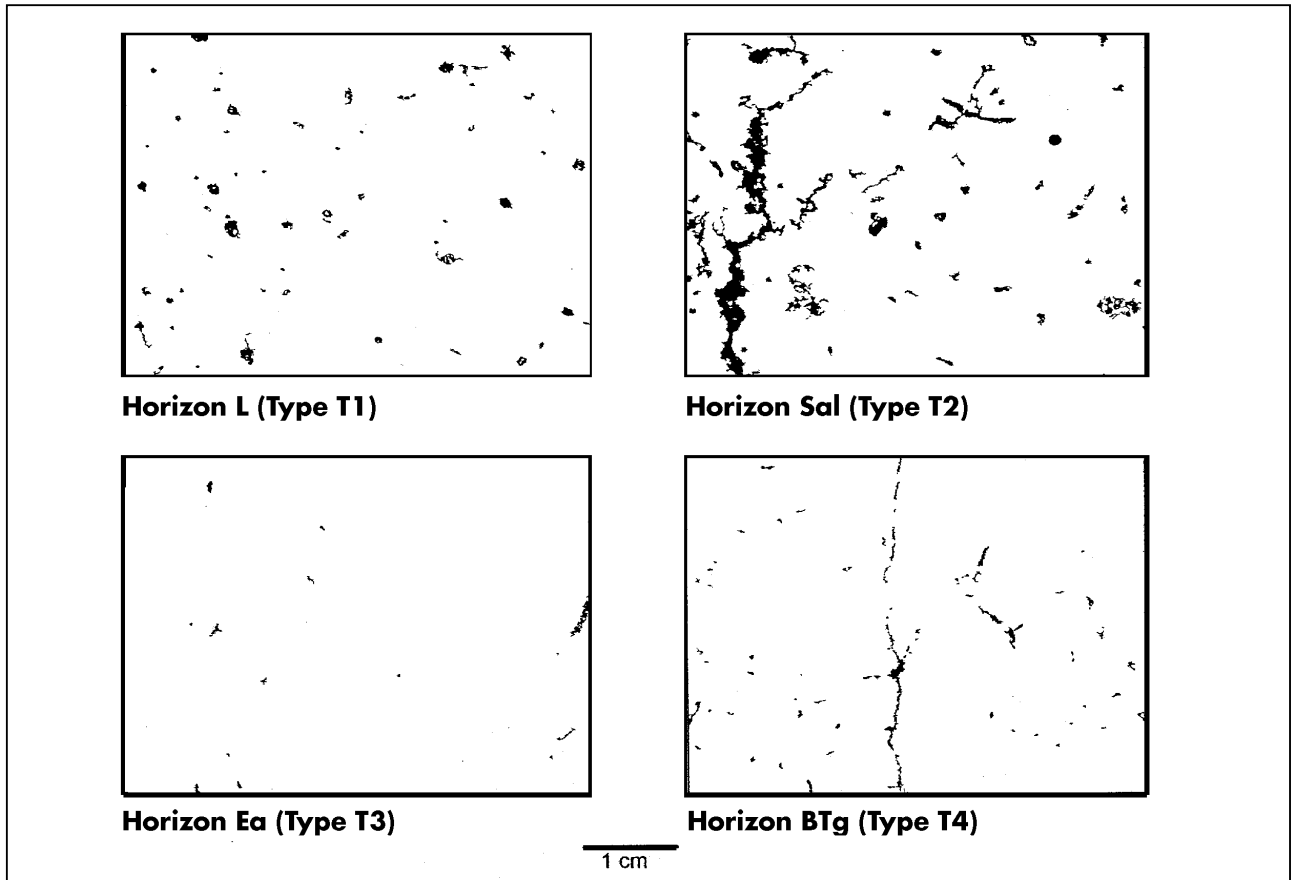


Figure 7 - Relation entre le K_{sat} et l'indice de connectivité des pores fonctionnels.
 Figure 7 - Relationships between K_{sat} and effective pore connectivity index.

Connectivité de la macroporosité fonctionnelle

La figure 7 représente les variations de K_{sat} en fonction de l'indice de connectivité bidimensionnelle de la macroporosité fonctionnelle. L'ensemble du nuage de points ne montre pas de relation évidente entre ces deux grandeurs. Mais le regroupement des points selon les quatre types morphologiques précédemment définis nous permet d'analyser différemment le rôle des connexions entre pores :

- pour les types T1 et T3, les variations de K_{sat} sont importantes pour des indices de connectivité peu variables. Ces types étant caractérisés par une porosité essentiellement tubulaire, ce résultat met en évidence le fait que ces pores interviennent individuellement sur les transferts en saturé, sans relation les uns avec les autres.

- à l'inverse, pour le type T2, on trouve une forte corrélation entre indice de connectivité et le K_{sat} ($r^2 = 0,88$). Ce type étant constitué en grande partie de pores d'assemblage, on montre ainsi que ces pores sont d'autant plus efficaces qu'ils sont connectés.

- pour le type T4, la relation entre connectivité et K_{sat} est là aussi très élevée, mais moins cependant que dans le cas précédent. Ce type étant majoritairement constitué de pores fissurés, on aurait pu s'attendre au contraire à ce que la relation soit ici la plus forte. On peut émettre l'hypothèse que le mode de calcul de l'indice de connectivité est moins bien adapté aux fissures qu'aux autres formes de pores : la méthode utilisée risque en effet de considérer la fissure comme un seul objet et non pas comme plusieurs objets connectés entre eux.

Dans tous les cas, on constate ainsi qu'il y a une très forte cohérence entre la connectivité des pores fonctionnels et la conductivité hydraulique à saturation si l'on prend en compte la typologie morphologique des pores.

CONCLUSION

La recherche des relations entre un paramètre de transfert en saturé et des paramètres de porosité nous a amenés à marquer les voies de circulation préférentielle sur les différents volumes pédologiques du bassin versant du Coët Dan, et à en établir une caractérisation morphologique.

Malgré l'importante variabilité intra-horizon, tant sur le K_{sat} que sur les paramètres poraux, la classification des pores selon leur taille et leur forme permet d'établir une typologie des horizons cohérente avec le fonctionnement hydrodynamique :

- lorsque la porosité fonctionnelle est essentiellement tubulaire, la perméabilité est liée à la taille des pores et à leur abondance; elle dépend peu des connexions entre ces pores ;
- lorsque la porosité fonctionnelle est essentiellement fissu-

rale, la perméabilité est toujours élevée, indépendamment de l'abondance des pores; les connexions entre pores jouent un rôle important sur les transferts ;

- lorsque la porosité fonctionnelle est constituée de pores d'assemblage, ceux-ci pouvant être associés à des fissures et à des tubules, la perméabilité est très étroitement corrélée à l'abondance de cette porosité et aux connexions entre pores.

Cette analyse montre ainsi qu'il est possible d'établir des relations entre la porosité des horizons et leur perméabilité en saturé, à condition toutefois de considérer la porosité non pas dans sa globalité, mais à travers ses caractéristiques morphologiques. La description des structures et des systèmes de porosité, y compris lors des observations de terrain, apparaît ainsi comme un préalable utile pour une caractérisation rapide des propriétés hydrauliques des sols, à condition toutefois de prendre en compte l'ensemble des critères morphologiques et non pas seulement la taille des pores.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahuja L.R., Cassel D.K., Bruce R.R., Barnes B.B., 1989 - Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. *Soil Science* 148, 404-411
- Anderson J.L., Bouma J., 1977 - Water movement through pedal soils : 1. Saturated flow. *Soil Sci Soc Amer Journal* 41, 413-418
- Andreini M.S., Steenhuis T.S., 1990 - Preferential paths of flow under conventional and conservation tillage. *Geoderma* 46, 85-102
- Baize D., Girard M.C., 1995 - *Référentiel Pédologique 1995*. INRA, Paris (F), 332 p
- Beven K., Germann P., 1982 - Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research* 18, 1311-1325
- Booltink H.W.G., Bouma J., 1991 - Physical and morphological characterization of bypass flow in a well-structured clay soil. *Soil Sci Soc Amer Journal* 55, 1249-1254
- Bouma J., 1981 - Soil morphology and preferential flow along macropores. *Agric Water Management* 3, 235-250
- Bouma J., Dekker L.W., 1981 - A method for measuring the vertical and horizontal K_{sat} of clay soils with macropores. *Soil Sci Soc Amer Journal* 45, 662-663
- Coster M., Chermant J.L., 1985 - *Précis d'analyse d'images*. Editions du CNRS, Paris (F), 521 p
- Curmi P., Durand P., Gascuel-Oudou, C., Mérot, P. Walter, C. Taha, A., 1997a - Hydromorphic soils, hydrology and water quality : spatial distribution and functional modelling at different scales. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Kluwer Pub. (sous presse)
- Curmi P., Bidois, J., Bourrié, G., Cheverry, C., Durand, P., Gascuel-Oudou, C., Germon, J.C., Hallaire, V., Hénault, C., Jaffrezic, A., Mérot, P., Trolard, F., Walter, C., Zida, M., 1997b - Rôle du sol sur la circulation et la qualité des eaux au sein de paysages présentant un domaine hydromorphe. Incidences sur la teneur en nitrate des eaux superficielles d'un bassin versant armoricain. *Etude et Gestion des Sols*, (sous presse)
- Diab M., Mérot P., Curmi P., 1988 - Water movement in a glossoqualf as measured by two tracers. *Geoderma* 43, 143-161
- Ehlers W., 1975 - Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Science* 119, 242-249

- Ghodrati M., Jury W.A., 1990 - A field study using dyes to characterize preferential flow of water. *Soil Sci Soc Amer Journal* 54, 1558-1563
- Hallaire V., 1994 - Description of microcrack orientation in a clayey soil using image analysis. In : *Proceedings of 9th International Working Meeting on Soil Micromorphology* (AJ Ringrose-Voase, GS Humphreys, eds). Elsevier, Amsterdam (NL), 549-557
- Hallaire V., Cointepas J.P., 1993 - Caractérisation de la macroporosité d'un sol de verger par analyse d'image. *Agronomie*, 13, 155-164
- Hallaire V., Curmi P., 1994 - Image analysis of pore space morphology in soil sections, in relation to water movement. In : *Proceedings of 9th International Working Meeting on Soil Micromorphology* (AJ Ringrose-Voase, GS Humphreys, eds). Elsevier, Amsterdam (NL), 559-567
- Kung K.J.S., 1990 - Preferential flow in a sandy vadose zone : 1. Field observation. *Geoderma* 46, 51-58
- Lin H.S., McInnes K.J., Wilding L.P., Hallmark C.T., 1996 - Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions into a well-structured subsoil. *Trans of the Amer Soc of Agric Engr* 39, 131-135
- Luxmoore R.J., 1981 - Micro-, meso-, and macroporosity of soil. *Soil Sci Soc Amer Journal* 45, 671-672
- Murphy C.P., Bullock P., Turner R.H., 1977 - The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. *Journal of Soil Science* 28, 498-508
- Quisenberry V.L., Phillips R.E., Zeleznik J.M., 1994 - Spatial distribution of water and chloride macropore flow in a well-structured soil. *Soil Sci Soc Amer Journal* 58, 1294-1300
- Ringrose-Voase A.J., 1996 - Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant and Soil* 183, 27-47
- Ritchie J.T., Kissel D.E., Burnett E., 1972 - Water movement in undisturbed swelling clay soil. *Soil Sci Soc Amer Proc* 36, 874-879
- Serra J., 1982 - Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, London (GB), 610 p
- Walter C., Curmi P., 1997 - Les sols du bassin versant du Coët Dan : organisation, variabilité spatiale et cartographie. In : *Caractérisation et fonctionnement d'un bassin versant en climat tempéré océanique et en région d'élevage intensif*. (C. Cheverry, éd) INRA, Coll Science Update, (soumis)
- Walter C., Gourru M., Nicolas J.M., 1993 - Carte pédologique du bassin versant de Naizin, Morbihan. ENSA Rennes
- Widiatmaka, 1994 - Analyse structurale et fonctionnement hydrique d'un systè-

me pédologique limoneux acide sur granite et sur schiste de Massif

Armoricaïn, France. Thèse, ENSA Rennes, 260 p