REMERCIEMENTS

Avant de débuter ce mémoire, je tiens à remercier ici toutes les personnes qui m'ont aidé dans sa réalisation.

En premier lieu Monsieur le Professeur E. SERVAT, directeur de la Chaire de Science du Sol de l'ENSAM, qui m'a accueilli dans son laboratoire et m'a donc permis de mener à bien ce travail.

Messieurs J.C. FAVROT (directeur adjoint de recherche INRA) et M.B. BOUCHE (maître de recherche et directeur du laboratoire de zooécologie du sol INRA) qui m'ont encadré dans ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Dans mon esprit, sont également associés à ces remerciements tous les membres du laboratoire de Science du Sol de l'INRA-ENSA Montpellier qui ont bien voulu me consacrer quelques moments, notamment MM. M. BORNAND, G. CALLOT, J. MOINEREAU, P. HERRMANN et P. LAGACHERIE, ainsi que Monsieur J.P. LUC du laboratoire de Machinisme Agricole de l'ENSAM.

Arturo GONZALES (stagiaire en thèse au CEMAGREF d'Antony) me fut d'un secours précieux lors de ma mission en Sologne.

Je remercie également Mr J.A. Mac KEAGUE et le Ministère de l'Agriculture du Canada qui m'ont fourni des documents très utiles pour la conduite de mon travail.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude auprès de toutes les personnes sans lesquelles la réalisation pratique de ce travail eut été impossible; MM. OULLIER et GOUZON du Machinisme Agricole de l'ENSAM, Mlle Régine ALIAGA du Laboratoire de zooécologie du sol, et Titus du Laboratoire de Science du Sol de Montpellier.

PLAN DU MÉMOIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
A. REFERENCES CONCERNANT LA PHYSIQUE DES MOUVEMENTS DE L'EAU EN SOL SATURE	3
I. Rappels physiques	3
I.1. Le sol, milieu poreux	3 4
I.3. La loi de Darcy	4
milieu saturé	6
II. Etude bibliographique	7
II.1. Localisation des zones préférentielles de circulation de l'eau	7 8
II.1.2. Mise en évidence des zones de circulation préférentielle	10
du sol	10 11
II.2. Paramètres de l'écoulement	12 12
II.2.2. Développement de la macroporosité sur le profil. Connection entre les pores	12
II.2.3. Ouverture de la macroporosité à l'eau libre	13
III. Conclusion	14
B. REFERENCES SUR LA FAMILLE DES LUMBRICIDAE	16
I. Généralités	16
II. Les galeries de lombriciens	18
II.1 Morphologie	18
de l'écoulement	20
C. CONCLUSION DE L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE. OBJECTIFS DU MEMOIRE	21

CH	MAPITRE II. MISE AU POINT DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL	22
Α.	OBJECTIFS ENTREPRIS	22
В.	DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL	23
I.	Evaluation et caractérisation de la population de	
	lombrics	23
	I.1. Présentation générale	23
	I.2. La méthode de prélèvement au formol	24
	I.3. La méthode de prélèvement à la bêche	24
	I.4. Interprétation des résultats	24
II	. Mesure de la conductivité hydraulique à saturation .	24
	II.1. Méthode du double anneau	24
	II.2. Méthode du puits et des piézomètres	26
II	I. Caractérisation de la porosité	27
	III.1. Coloration des vides	27
	III.2. Identification et quantification de la porosité	28
	racionarion de damientración de la berestes	
СН	APITRE III. RESULTATS	30
		30
A.	BEL AIR	30
I.	Description du site	30
	1.1. Localisation. Occupation	30
	I.2. Description pédologique du profil	30
II	. Nature des observations et des mesures	31
	II.1. Présentation générale	31
	II.2. Evaluation de la population lombricienne	31
	II.3. Mesure de Ks	31
	II.4. Description des galeries et pores des profils .	31
II	I. Analyse des résultats	32
	III.1. Variabilité verticale du nombre de galeries	
	fonctionnelles	32
	<pre>III.2. Comparaison nombre et taille des galeries -</pre>	
	population de lombrics	32
	III.3. Comparaison nombre de galeries - valeur mesurée	
	de Ks	33
IV	. Conclusion	33
_	T	2.4
в.	LA SOLOGNE	34
ı.	Description du site	34
	I.1. Localisation. Occupation. Climat. Topographie	34
	I.2. Description pédologique du site	34
	I.3. Choix du site et des points d'observations	35

II. Nature des observations et mesures	36
II.1. Présentation	36
	36
II.2. Evaluation de la population lombricienne	
II.3. Description des profils	37
II.3.1. Colorant appliqué dès la surface	37
II.3.2. Colorant appliqué à - 20 cm	37
Trouble dozonanie apprzeduce de de em troutere	0.
III. Analyse des résultats	38
III.1. Variabilité verticale et latérale du nombre	
	38
de galeries pour un même site	30
III.2. Comparaison de ces valeurs entre les sites l	
et 2	38
III.3. Comparaison des populations de vers de terre	
entre les deux sites et de leur action	
respective	38
III.4. Comparaison nombre de galeries - valeur de Ks	39
IV. Conclusion	39
C. LA BRESSE	40
C. LA DRESSE	40
I. Description du site	40
	4.0
I.1. Localisation. Occupation. Climat. Topographie .	40
I.2. Description pédologique des sites	40
II. Nature des mesures et des observations	41
,	
II.1. Présentation	41
II.2. Résultats	41
III. Analyse des résultats. Conclusion	41
III. Analyse des resultats. Conclusion	41
D. AUTRES SITUATIONS	42
I. Station climatologique ENSAM	42
• •	
II. Fréjorgues	42
II. riejorgues	42
III. Passy	42
IV. Parcelle drainée de Marsillargues	42
•	
CHAPITRE IV. SYNTHESE	44
A. MISE EN OEUVRE PRATIQUE DU PROTOCOLE	44
T. To withhale hitche formal	4.4
I. La méthode bêche-formol	44
II. Maitrise du colorant	44
III. Appréciation de la macroporosité fonctionnelle	45
111. "Abtrestante" as in macrobotostes tonestonnette	-2-3
D. TWOTDDWORD BRO CAVERTING BR - CHI-COST	
B. INCIDENCES DES GALERIES DE LOMBRICIENS SUR LES	
TRANSFERTS D'EAU EN MILIEU SATURE	45
C. PERSPECTIVES	45

I. Compar galeri	aison po es	_						• • • •	4 5
II. Estim	ation de	e la com	nducti	vité K	s		• • • • •	• • • •	46
CONCLUSIO	<u>N</u>	· • • • • • • ·	•••••	• • • • • •	• • • • • •	• • • • •	• • • • • •	• • • •	47
REFERENCE	S BIBLIC	GRAPHI	QUES .	• • • • • •	• • • • • •	· • • • • •	••••	••••	49
ANNEXES :	Annexe Annexe	II. Dor	nnées j		•	ombrici	.ens		
	Annexe pour es	_	_		_	_	_		

INTRODUCTION

La dynamique de l'eau dans le sol, matérialisée notamment par la conductivité hydraulique à saturation, conditionne à la fois les processus pédogénétiques et les modalités de mise en valeur des terres.

Sa connaissance est donc indispensable et deux voies principales permettent d'y parvenir : la mesure d'une part, basée sur les lois d'hydraulique, d'une mise en oeuvre parfois difficile, l'observation d'autre part, à condition que l'on sache relier morphologie du sol et comportement hydrique.

Il est connu de longue date que la macroporosité du sol commande au premier chef la circulation d'eau libre au sein des profils et que les macropores résultent de deux catégories principales de phénomènes : processus physiques (gonflement, retrait, fissuration) et activité biologique (galeries de vers, de racines), si l'on exclut les interventions culturales (labour, sous-soulage).

Alors que de nombreux travaux étudient la porosité structurale (ses formes, sa dynamique saisonnière), les études relatives à la porosité d'origine biologique sont encore peu nombreuses.

L'objectif de ce mémoire est précisément de contribuer à une meilleure connaissance de la nature des biopores et de leur incidence sur les écoulements.

En mettant l'accent sur les galeries de lombriciens notre travail repose donc sur les principes suivants ;

- associer mesures in situ (conductivité hydraulique à saturation)

et observations morphologiques (forme, nombre, localisation des pores) ;

- associer approche pédologique et zoologique en rapprochant morphologie des sols et écologie des lombriciens.

Si le but à long terme de telles études est de tenter d'apprécier le comportement hydrique des sols et d'estimer notamment la conductivité hydraulique à partir de l'examen visuel de la porosité, notre propre objectif est plus modeste. Il a surtout consisté, sur la base de références bibliographiques, à tester et adapter une méthode d'identification de la bioporosité et de dégager les points à développer en vue d'atteindre le but final défini ci-avant.

Le plan de ce mémoire reflète cet objectif : dans un premier temps nous ferons donc une synthèse des connaissances relatives à la physique des mouvements de l'eau et à la biologie des lombriciens. Puis nous définirons le protocole expérimental mis en oeuvre. Le résultat des expériences fera l'objet du chapitre suivant. Enfin, nous ferons une synthèse critique du travail réalisé afin d'en dégager les perspectives.

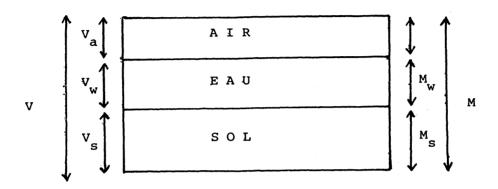


FIGURE 1 : Le sol : milieu à trois phases (HILLEL, 1974)

avec M_{W} : masse de l'eau et V_{a} : volume d'air

 M_s : masse du sol V_w : volume d'eau

V_s: volume de sol

CHAPITRE I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

A. REFERENCES CONCERNANT LA PHYSIQUE DE MOUVEMENTS DE L'EAU EN SOLS SATURES

En 1856 DARCY établissait la loi modélisant le processus de circulation de l'eau à travers un milieu poreux. Cette loi servit de base à la plupart des travaux concernant les déplacements de l'eau dans le sol. Très tôt, il apparut important de distinguer la circulation en milieu saturé de celle en milieu non saturé, car si le processus restait d'une manière globale correctement décrit dans les deux cas par la loi de DARCY et les équations en dérivant, à un niveau plus fin, les paramètres contrôlant le mouvement de l'eau agissaient de manière différente.

Nous nous restreindrons ici à l'étude de la circulation de l'eau en sol saturé (d'où il pourra toutefois être tiré des informations concernant les mouvements de l'eau en milieu non saturé), d'une part pour des raisons de temps qui sont limitatives dans le cadre d'un DAA et d'autre part à cause de la plus grande simplicité du phénomène.

Nous allons tout d'abord en rappeler les principes physiques fondamentaux afin de mieux cerner les paramètres à prendre en compte, puis nous effectuerons une revue bibliographique des travaux déjà publiés.

I. RAPPELS PHYSIQUES

I.1. Le sol, milieu poreux

Le sol est un milieu à trois phases : terre, air , eau (figure 1). Cette représentation conduit à la définition de paramètres dont nous allons citer les plus importants.

•

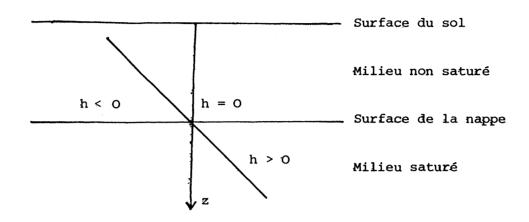


FIGURE 2 : Profil de la répartition hydrostatique des pressions

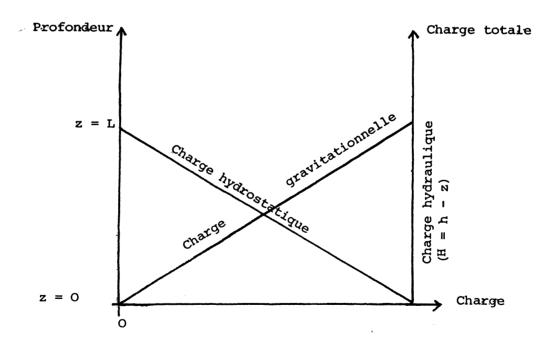


FIGURE 3 : Profil de la répartition des charges (hydrostatique et gravitationnelle) avec la profondeur

Paramètres dimensionnels

- masse volumique du sol humide : $\rho_h = \frac{M}{V}$ en kg/m³

- masse volumique du sol sec : $\rho_s = \frac{M_s}{V}$ en kg/m³

Paramètres adimensionnels

- porosité totale : $n = \frac{Va + Vw}{V}$ qui traduit le volume de vide offert aux deux phases liquide et gazeuse. Elle peut s'exprimer aussi à partir des masses volumiques, on a alors $n = \frac{\rho_d \rho_s}{\rho_d}$ où ρ_d est la masse volumique des grains (sensiblement égale à 2,65) ;
- degré de saturation : $S = \frac{V_w}{V_a + V_w} \times 100$;
- teneur en eau volumique : $\theta = \frac{V_{w}}{V}$
- densité apparente : $d_a = \frac{\rho_s}{\rho_w}$ avec $\rho_w \approx 1$.

I.2. Etats énergétiques de l'eau

Selon la théorie de continuité, l'eau dans le sol est caractérisée par son état énergétique propre. La physique classique reconnait deux formes d'énergie: l'énergie potentielle et l'énergie cinétique qui est ici négligée à cause de la lenteur des mouvements de l'eau (HILLEL, 1974). L'énergie potentielle de l'eau dépend à la fois de sa position par rapport au niveau de référence (surface du sol) et de son état interne (potentiel capillaire).

L'énergie potentielle totale par unité de poids est la charge hydraulique H :

$$H = h - z$$

- z : Energie potentielle de position par unité de poids (Oz étant dirigé positivement vers le bas)
 - h : Tension de l'eau, c'est l'énergie de rétention de l'eau par le sol.

I.3. La loi de DARCY

Les transferts d'eau dans le sol d'un point à un autre sont régis par les états énergétiques relatifs de l'eau en chacun de ces

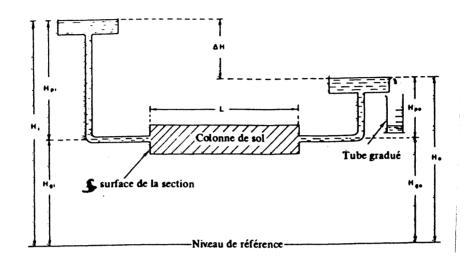


FIGURE 4 : Ecoulement dans une colonne horizontale saturée (HILLEL, 1974)

points. Comme nous venons de le voir la charge hydraulique H est la grandeur qui quantifie cet état énergétique. Dans le sol les mouvements de l'eau tendent à rééquilibrer la différence de charge. Sous certaines restrictions (1) les mouvements de l'eau dans le sol suivent la loi de DARCY:

$$Q = K S \frac{\Delta H}{L}$$

(1) Aux grandes vitesses d'écoulement, ce dernier n'est plus laminaire (Re > 1000), la relation entre le flux et le gradient hydraulique n'est plus linéaire. De même, dans des sols très argileux certains auteurs prétendent que de faibles gradients induisent des écoulements qui leur sont moins que proportionnels (HILLEL, 1974).

avec $\frac{\Delta H}{L}$: gradient hydraulique en L.L⁻¹
S : section au travers de laquelle l'eau circule en L²
K : conductivité hydraulique en L.T⁻¹
3 -1

Q : débit d'écoulement en L³.T⁻¹

(Figure 4).

Cette loi signifie que l'écoulement d'un liquide à travers un milieu poreux se fait dans la direction de la force motrice et à un régime qui lui est proportionnel, le coefficient de proportionnalité étant appelé la conductivité hydraulique.

La conductivité hydraulique est une constante physique essentielle pour la caractérisation des propriétés hydrodynamiques d'un sol. Elle traduit l'aptitude d'un sol à laisser circuler un liquide. Pour un sol donné sa valeur dépend de la teneur en eau. A saturation, elle atteint sa valeur maximale Ksat, puis elle diminue très vite avec l'abaissement de la teneur en eau. (Exemple :

$$\theta = 0, 55$$
 Ksat = 5.10 $^{-2}$ cm.s⁻¹
 $\theta = 0, 4$ Ksat = 10 $^{-6}$ cm.s⁻¹

(GERMAN and BEVEN, 1981).

On utilise plus fréquemment la loi de DARCY sous sa forme dite généralisée :

 $q = - K(\theta)$ grad H

où q est le flux (débit par unité de surface).

q a les dimensions d'une vitesse LT⁻¹, cette grandeur est aussi appelée vitesse apparente. Toutefois, il est important de noter que la vitesse réelle d'écoulement de l'eau est supérieure à q d'une part à cause de la tortuosité (rapport de la distance réelle parcourue au chemin apparent d'écoulement qui est rectiligne) et d'autre part car seule une fraction de la section est ouverte à l'écoulement.

I.4. Caractéristiques physiques des écoulements en milieu saturé

Le gradient de succion est nul, le gradient gravitationnel est le seul responsable du mouvement de l'eau.

La conductivité hydraulique est maximale, elle traduit la résistance qu'oppose le sol à la circulation d'un liquide. Sa valeur est donc fonction, d'une part de la viscosité du liquide circulant, et d'autre part, de la porosité et de la distribution de la taille des pores. L'importance de ce paramètre est soulignée par la loi de POISEUILLE: Pour un écoulement laminaire au travers d'un tube, le débit est proportionnel à la quatrième puissance du rayon du tube. Un pore de 1 mm de rayon conduira donc autant que 10 000 pores de 0,1 mm de rayon (d'où l'importance de galeries, même peu nombreuses, vis-à-vis de la perméabilité d'un sol).

Le flux d'eau au travers d'un sol saturé est donc égal à la conductivité hydraulique à saturation Ksat.

Si on considère un profil, il est très rare qu'il soit homogène sur toute sa hauteur. Par conséquent, il est probable que les conductivités hydrauliques de ses horizons soient différentes. L'expérience montre que ce sont souvent plus les discontinuités verticales des valeurs de K qui conditionnent la nature du flux à travers le profil que les valeurs absolues de K, ceci pour des conductivités hydrauliques

,

moyennes à faibles. De telles discontinuités sont à l'origine du plancher des nappes dits "planchers imperméables". Dans un même profil plusieurs écrans à l'infiltration peuvent exister qu'ils soient d'origine naturelle ou pas. Ainsi, une semelle de labour peut provoquer la formation d'une nappe fugace. De même une croute de battance de quelques mm d'épaisseur suffira à réduire de manière considérable la vitesse de circulation de l'eau au travers du profil, même si les horizons sousjacents sont très perméables.

L'état de surface du sol semble donc lui aussi jouer un rôle important sur la conductivité Ksat car il détermine l'accessibilité de l'eau libre aux horizons inférieurs.

Après avoir vu rapidement les bases de la dynamique de l'eau dans le sol, il s'agit maintenant d'affiner nos connaissances relatives à l'écoulement gravitaire. Nous allons donc orienter l'étude bibliographique vers, d'une part les moyens d'observation, de quantification et qualification, et d'autre part, sur les résultats acquis.

II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. Localisation des zones préférentielles de circulation de l'eau

La dynamique de l'eau dans le sol est évidemment conditionnée par la forme et la taille des macropores.

Dans les sols sains notamment, aux horizons perméables à porosité (interagrégats) répartie assez uniformément dans la masse et variant peu d'une saison à l'autre, le flux d'eau se déplace suivant un front relativement régulier.

Dans les sols hydromorphes en revanche, certains horizons présentent de grandes variations de la porosité au cours du temps, par suite des processus de gonflement-retrait, liés aux cycles de réhumectation dessication. Dans ces couches, la circulation de l'eau peut se faire alors suivant différentes voies préférentielles :

- dans les sols argileux, par exemple, en période estivale après une pluie (orage) un flux important s'engouffre dans les fissures et fentes de retrait pour atteindre rapidement la base du profil. Si la réhumectation se poursuit et affecte tout le sol il y a "fermeture" de la porosité structurale et le sol devient peu perméable. L'eau gravitaire ne subsiste que dans le premier horizon et peut subir des transferts latéraux. Toutefois, si des pores d'origine biologique existent dans les horizons sousculturaux, des écoulements verticaux peuvent alors intervenir, ces pores étant généralement peu modifiés par les phénomènes de gonflement;
- dans les sols lessivés dégradés, autre exemple, l'augmentation de la teneur en eau se traduit également par une "fermeture" de la porosité structurale des horizons Btg, ceux-ci deviennent très peu perméables dans la masse mais il existe néanmoins des voies de percolation en profondeur. Il s'agit des plans de dégradation ou glosses dont la porosité tient à la fois à la texture plus grossière et aussi à la fréquence de pores d'origine biologique (galeries de vers, traces de racines). Ces derniers ont donc un rôle privilégié dans la dynamique de l'eau.

Ces deux exemples montrent l'importance des circulations préférentielles dans les sols et donc tout l'intérêt de leur mise en évidence. A cet égard, diverses techniques existent utilisant des traceurs chimiques ou des colorants.

II.1.1. Techniques utilisées

Les essais consistant à utiliser le chlore 36 comme marqueur du passage de l'eau dans le profil grâce à une détection par autoradiographie se sont révélés décevants car cette technique montre un faible pouvoir de résolution du fait de la nécessité d'avoir un contact étroit entre le sol et la pellicule photo.

Les marqueurs les plus fréquemment employés, et avec succès, sont les colorants qui peuvent être fluorescents ou non. Les premiers

TABLEAU 1

Classe de porosité	Potentiel hydrau- lique de l'eau (mbar)	pF	Diamètre du pore équiva- lent µm	Phénomène dominant
Microporosité	< - 300	> 2,5	< 10	Evapotranspiration. Mouvement de l'eau sous l'action du gradient de succion.
Mésoporosité	- 300 < < - 3	2,5 > < 0,4	10 à 1000	Drainage. Hystérèse. Mouvement de l'eau sous l'action du gradient gravitationnel.
Macroporosité	> - 3	< 0,4	> 1000	Flux d'eau à travers le profil depuis une nappe en surface ou vers une nappe perchée.

Ces colorants sont employés de deux manières : soit en les mélangeant à une concentration connue (en général 0,1%) dans de l'eau que l'on fait ensuite circuler dans le profil étudié, soit en les déposant à la surface du sol avant une pluie.

L'intérêt de ces colorants est donc de marquer les voies de circulation de l'eau et en permettre ainsi l'observation. Les essais d'analyse quantitative des mouvements de l'eau à partir des colorants se sont révélés infructueux à cause du faible pourcentage de colorant mesuré par l'analyse chimique ou la photodensimétrie.

II.1.2. Mise en évidence des zones de circulation préférentielle II.1.2.1. Notion de micro-, méso-, et macroporosité du sol

En physique du sol on utilise couramment la notion de porosité qui est le pourcentage volumique occupé par l'eau et l'air du sol. Cependant, comme le laisse supposer la loi de POISEUILLE et cela sera précisé par la suite, en matière d'écoulement d'eau, il est beaucoup plus significatif de mesurer la porosité en termes de dimension et nombre de pores plutôt qu'en terme de pourcentage volumique. En effet suivant la taille des pores la dynamique de l'eau est différente. Le Tableau l présente la classification suggérée par LUXMOORE (1981).

L'intérêt de cette classification est d'une part de mettre en évidence trois comportements différents de l'eau du sol et d'autre part de faciliter les communications entre les scientifiques grâce à la notion de diamètre du pore équivalent que nous allons préciser ici : dans un pore cylindrique l'eau est retenue par une force dite de capillarité inversement proportionnelle au diamètre du pore. En fait, dans la nature, les pores, souvent tortueux, ont rarement cette configuration idéale et la notion de diamètre du pore équivalent consiste à affecter au pore réel un diamètre fictif correspondant à un pore cylindrique qui offrirait la même force de capillarité.

Cependant, comme le fait remarquer BOUMA (1981), la mesure du diamètre du pore équivalent est entachée d'erreurs. Il note aussi que le comportement de l'eau dans un pore n'est pas fonction uniquement de sa taille : c'est pour cela qu'il préfèrerait caractériser la porosité

TABLEAU 2

Classe	Sous-classe	Limites	Méthodes de mesure
Macropore	grossier moyen fin très fin	> 5000 µm 2000-5000 µm 1000-2000 µm 75-1000 µm	
Mésopore		3O - 75 μm	Microscope et courbe de désorption
Micropore		5 - 3O μm	Microscope et courbe de désorption
Ultramicropore		O,1 - 5 μm	Microscope électronique



FIGURE 5 : Photo d'une coupe horizontale d'un sol argileux dont les macropores ont été marquées par un colorant (bleu de méthylène).

On peut observer : - les trois différents groupes de macropores,

- certains macropores sont interconnectés.

(BOUMA et al., 1977)

d'une manière plus dynamique. Toutefois, dans le but de faciliter les communications, le choix d'une classification s'impose. Dans cette optique là, il préfère le système proposé par BREWER (1964) qui lui paraît être moins arbitraire (Tableau 2).

II.1.2.2. Zones decirculation

Les essais menés sur le terrain ou en laboratoire sur des cylindres de sol non perturbés, montrent que la répartition inégale du colorant, aussi bien sur des coupes horizontales que verticales, traduisant les voies de passage empruntées par l'eau, correspondent à la macroporosité (REYNOLDS, 1966; AUBERTIN, 1971; KISSEL et al., 1973; BOUMA et al., 1977; OMOTI et WILD, 1979; EHLERS, 1975). Ainsi, GUENNELON et de COCKBORNE (1975) montrent que sur un milieu poreux artificiel, des conduits de 0,32 mm de diamètre, rectilignes, représentant l % du volume total assurent 99 % de l'écoulement des fluides.

BOUMA (1977) classe la macroporosité en trois groupes suivant la forme (Figure 5) :

- vide circulaire (galerie) :

 $A/P_e^2 > 0.04$

- vide de forme intermédiaire :

 $0.015 < A/P_e^2 < 0.04$

- vide de forme allongée :

 $A/P_e^2 < 0.015$

avec A = aire

P = périmètre

La formation de ces macropores relève de deux sortes de phénomènes :

- biologiques : galeries de lombrics, trous de racines,
- physiques : forces de tension interne qui provoquent lors de la dessication la formation de fissures, ou de vides inter-agrégats.

Il n'est pas invraisemblable que ces différents types de

.

macropores se comportent différemment lors des mouvements de percolation de l'eau. Les vides inter-agrégats et les fissures peuvent éventuellement se refermer (gonflement du sol lors de la réhumectation) alors que les galeries de lombrics et les trous de racines peuvent rester ouverts (JONGERIUS, 1957; BREWER, 1964; MONNIER, 1965).

II.2. Paramètres de l'écoulement

Nous allons maintenant essayer de distinguer les différents paramètres qui influent sur la perméabilité d'un sol. L'expérience a en effet montré que réduire la conductivité hydraulique d'un sol à être seulement fonction de la densité était quelque peu simpliste et qu'en fait le problème de la dynamique de l'eau était beaucoup plus complexe.

RITCHIE (1972) observa que Ksat mesuré sur un cylindre de sol dont la structure avait été détruite, était 30 fois plus faible que celle mesurée pour le même sol non perturbé, alors que les densités étaient identiques (donc le volume poral était le même).

II.2.1. Nombre de macropores fonctionnels - Taille

BOUMA et al. (1977) ont observé sur quatre sols argileux que le nombre de macropores colorés par unité de surface pour chacun de ces sols montrait des tendances distinctes qui correspondaient aux différences de Ksat mesurées.

Les macropores de grosse taille (galeries de vers de terre) conduiront plus que ceux de petite taille. Cependant, le débit d'eau circulant dans un pore sera fonction du diamètre minima qu'a ce pore au cours de son développement sur le profil (BOUMA, 1977). Mais il faut noter que les macropores de grosse taille ne seront fonctionnels qu'après de fortes pluies ou lorsque le sol est saturé.

II.2.2. Développement de la macroporosité sur le profil. Connection entre les pores

Ce caractère de connection entre les macropores est fondamental car c'est lui qui conditionne la continuité de l'écoulement au travers du profil.



BOUMA fait remarquer que "des pores relativement petits peuvent conduire beaucoup d'eau s'ils sont continus à travers le profil" (1982). Il avait en effet mesuré une valeur de Ksat d'un sol argileux égale à 60 cm/jour (valeur relativement élevée). L'étude micromorphologique liée à la coloration, lui apprit que la majorité de l'écoulement était dûe à des pores de diamètre équivalent égal à 90 µm, alors que la plupart de la macroporosité était formée de macropores dont la taille était comprise entre 1 000 et 2 000 µm (BOUMA et al., 1979).

ANDERSON et BOUMA (1973) mesurèrent la conductivité hydraulique à saturation d'un sol argileux sur des cylindres de hauteurs différentes. Ils observèrent que la valeur de Ksat était une fonction décroissante de la hauteur de l'échantillon. Cela confirmait l'hypothèse selon laquelle les macropores tendent à devenir discontinus au travers de cylindres de plus en plus hauts parce que leur cheminement n'est pas rigoureusement vertical, et qu'il est donc coupé par les parois du cylindre, avec pour conséquence une très forte diminution de Ksat.

De même RITCHIE et al. (1972) notèrent lors d'essais sur un sol argileux que la valeur de Ksat mesurée sur des cylindres de 73 cm de diamètre était en moyenne 7 fois plus faible que celle mesurée sur une surface de 100 m². Cette réduction apparente du flux d'eau était probablement dûe aux parois du cylindre qui bloquent quelques uns des macropores.

II.2.3. Ouverture de la macroporosité à l'eau libre

Comme ont pu l'observer de nombreux scientifiques seuls peuvent être fonctionnels les macropores ouverts à l'eau libre (cela signifie le plus souvent que ces pores sont connectés avec la surface du sol).

ANDERSON et BOUMA (1973) notèrent lors d'essais sur un sol argileux où ils marquaient par un colorant les vides fonctionnels lors de l'écoulement, qu'une partie seulement des galeries étaient colorées. De même, en appliquant à la surface du sol une croûte de gypse afin de créer les conditions de succion matricielle auquelles est soumise l'eau en milieu non saturé, aucune galerie n'était colorée.

,

.

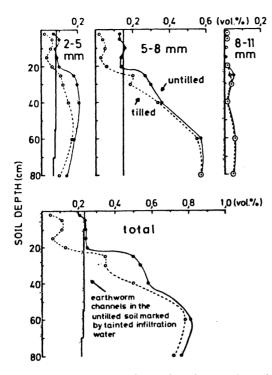
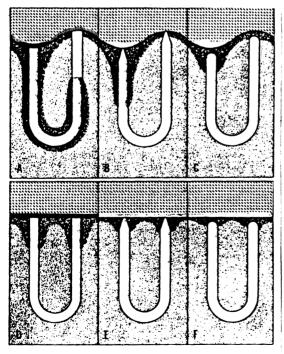


Fig. 3. Percentage volume of earthworm channels in tilled and untilled soil for three different channel diameters (upper part) and for total channel number (lower part). Large circles with dot represent coincident observations for tilled and untilled soil.

FIGURE 6:

Pourcentage volumique occupé par les galeries de vers de terre en sols labourés et sols non labourés.

A noter, dans le graphique inférieur la coincidence entre le pourcentage de galeries colorées et le pourcentage de galeries atteignant la surface.



rig. —Idealized channel system states representing six combinations of soil surface roughness and openness. States A, B, and C represent rough surfaces with open, constricted and closed water intake and air exhaust orifices; states D, E, and F represent smooth surfaces with open, constricted and closed orifices.

FIGURE 7:

Présentation des 6 états possibles de la surface du sol tels que l'ont conçu DIXON et PETERSON (1971) EHLERS (1975) en étudiant les galeries de lombrics et l'infiltration sur des sols labourés et non labourés observa pour ces derniers que le pourcentage de galeries colorées restait sensiblement constant sur tout le profil et égal au pourcentage de galeries ouvertes en surface. En sol labouré aucune galerie n'était colorée sous l'horizon Ap (Figure 6).

DIXON et PETERSON (1971) s'attachèrent plus précisément à ce problème. Leur "Channel system concept" prenait pour hypothèse que la perméabilité d'un sol ainsi que les voies empruntées par l'eau étaient largement fonction de l'ouverture de la macroporosité à la surface du sol ainsi que de la microtopographie. Ils donnèrent 6 états possibles de la surface du sol qui recouvrent la totalité des cas présents dans la nature (Figure 7).

Ces différents états furent créés sur une parcelle expérimentale où furent réalisés les essais. Les résultats obtenus confirment cette hypothèse (Figure 8).

III. CONCLUSION

La perméabilité d'un sol dépend donc de la manière dont est construite la porosité :

- taille des pores, tortuosité,
- connection entre les pores,
- continuité de la porosité sur le profil,
- ouverture de la porosité à l'eau libre.

Il était tentant d'essayer d'estimer la conductivité Ksat d'un sol à partir de la collecte et du traitement des paramètres pré-cités, pour ensuite confronter cette valeur calculée avec la valeur mesurée.

Deux approches différentes ont été réalisées, l'une morphométrique (observation de lames minces), l'autre morphologique (examen sur le profil de la porosité).

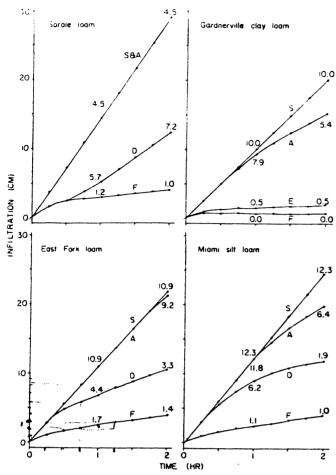


Fig. -Total infiltration under imposed channel system states A and F and naturally occurring state D or E. The curve labeled S represents the total water supplied by the infiltrometer spray nozzle. Numbers near curves at 1- and 2-hour times denote infiltration rates in cm hr⁻¹ for these times.

FIGURE 8:

Résultats obtenus par DIXON et PETERSON lors de la mise à l'épreuve du "Channel system concept". Les lettres A, B, C, D, E, F, identifiant chaque courbe, correspondent aux 6 états définis à la figure 6

1					
CLASSES		CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE A SATURATION.			
		cm/h	m/j		
H élevé	H _l très rapide	H ₁ > 50	H ₁ > 12		
	H ₂ rapide	16,7 < H ₂ < 50	4 < H ₂ < 12		
M moyen	M ₁ modérément rapide	$4,2 < M_1 < 16,7$	1 < M ₁ < 4		
	M ₂ modéré	$1,7 < M_2 < 4,2$	0,4 < M ₂ < 1		
	M ₃ modérément lent	$0,42 < M_3 < 1,7$	0,1 < M ₃ < 0,4		
L bas	L _l lent	0,17 < L ₁ < 0,42	0,04< L ₁ < 0,1		
	L ₂ très lent	0,017 < L ₂ < 0,17	0,004< L ₂ < 0,04		
	L ₃ extrêmement lent	L ₃ < 0,017	L ₃ < 0,004		

TABLEAU 3

- La technique morphométrique note le nombre et la taille des pores, en distinguant les pores colorés (fonctionnels) des autres. Ce relevé est effectué à partir de lames minces (25 cm x 25 cm) en utilisant la technique électro-optique (Quantimet 720) mise au point par JONGERIUS (1974). L'équation pour calculer Ksat est basée sur la relation physique entre la taille d'un vide et son aptitude à transmettre un liquide, en incluant un modèle d'interaction entre les pores. Cependant, il ne faut pas oublier que ces calculs sont basés sur des observations en 2 dimensions alors que l'écoulement s'effectue dans un milieu à 3 dimensions. C'est pour cela que cette technique ne s'applique avec une marge d'erreur pas trop importante que pour les sols sableux (DENNING et al., 1974; BOUMA and DENNING, 1974) et nécessite de grandes précautions pour les autres sols (BOUMA et ANDERSON, 1973). Comme le font remarquer ANDERSON et BOUMA (1977) elle a davantage un intérêt académique car les mesures in situ de Ksat sont plus rapides et moins onéreuses. Mais le concept d'interaction entre les pores (connection entre les pores ; étranglement contrôlant le flux au niveau de ces connections) permet une meilleur compréhension des phénomènes d'écoulement d'eau en milieu saturé.

- L'estimation de la conductivité Ksat à partir de critères morphologiques relevés sur le profil (O'NEAL, 1952; Mc KEAGUE et al., 1982). A partir de l'étude de 38 sites, sélectionnés en vue de disposer d'une gamme variée de sols, Mc KEAGUE et al. ont établi une classification permettant, après avoir observé divers paramètres de l'horizon considéré, d'attribuer à ce dernier une valeur de conductivité Ksat. Plus précisément, le schéma proposé ne donne pas une valeur numérique de Ksat, mais une classe de variation définie par deux valeurs extrêmes entre lesquelles est comprise la conductivité. Les classes de conductivité hydraulique à saturation retenues par Mc KEAGUE sont celles proposées par NOWLAND (1981) qui a mis au point une classification des "régimes de l'eau du sol" basée sur quatre paramètres: aridité, perméabilité, zone de saturation (nappe) et modifications induites par l'homme. En ce qui nous concerne, NOWLAND a défini 8 classes de conductivités hydrauliques à saturation (Tableau 3).

Ainsi, la classification établie par Mc KEAGUE permet d'associer à un horizon ou un profil une classe de conductivité donnée choisie en fonction de divers paramètres (texturaux et structuraux)

relevés sur le profil. A chaque classe définie par NOWLAND correspondent trois ou quatre morphologies de la structure et de la porosité du sol. Les distinctions sont basées sur la qualité de la porosité (taille, développement sur le profil, etc.), la quantité de pores, la structure (taille des agrégats, cohésion entre les agrégats), la compaction. La texture est également appréciée mais Mc KEAGUE note qu'il y a en général très peu de relation entre la texture et la conductivité hydraulique à saturation pour les textures plus fines que les textures limonosableuses (pour plus de précisions voir Annexe IV).

Des comparaisons entre les valeurs estimées et des valeurs mesurées furent effectuées sur 78 horizons. En moyenne (il y eut deux estimations par horizon) les prévisions étaient correctes pour 45 % des cas et correctes en valeur ou vis-à-vis de la classe (H, M ou L) dans 87 % des cas. En dépit des problèmes rencontrés lors de l'application des lignes directrices données par Mc KEAGUE, il est bien évident que des estimations utiles peuvent être réalisées à la suite d'observations soignées.

B. REFERENCES SUR LA FAMILLE DES LUMBRICIDAE

Outre l'observation directe des galeries, une autre approche possible de l'estimation de la porosité biologique d'un sol consiste à s'intéresser à la population elle-même des lombrics, responsable de la fabrication des pores.

La connaissance des différents types de lombrics, de leur écologie permettront en effet de déduire ensuite des indications utiles sur la porosité à partir de l'identification, sur un site donné, du nombre et de la systématique des vers présents.

I. GENERALITES

La famille des Lumbricidae, couramment appelés "lombrics" ou "vers de terre" appartient à l'embranchement des annélides, classe des oligochètes. Elle se subdivise en 5 genres (Lumbricus, Nicodrilus, Allolobophora, Dendrobaena, Octolasion). Dans les écosystèmes terrestres



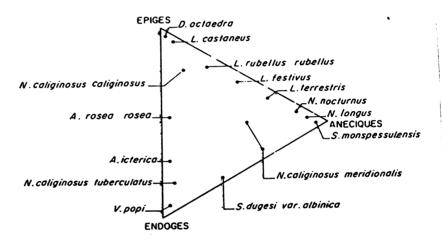


FIGURE 9 : Diagramme situant approximativement quelques espèces communes dans le système tripôle des catégories écologiques.

Il n'y a pas de coupures tranchées, il s'agit d'un classement relatif.

 ${\tt L}$: Lumbricus ; ${\tt N}$: Nicodrilus ; ${\tt A}$: Allolobophora

V : Vignysa

émergés les lombriciens occupent une place relativement importante. Ils constituent, dans nos milieux tempérés, la troisième biomasse (après les végétaux et les micro-organismes). Cette biomasse oscille entre l et 2 tonnes par hectare (poids vifs), mais elle peut largement augmenter ou diminuer sous l'action de divers facteurs. Certains auteurs ont pu observer une diminution de la population de lombriciens dans des parcelles où le sol était travaillé, alors que ces populations se maintenaient très bien là où le semis direct était utilisé (BORNES et ELLIS, 1979). Il semblerait même que les lombriciens supportent mieux les herbicides que le travail du sol (EDWARDS and LOFTY, 1969; SCHWERDTLE, 1969). Les insecticides et les produits fongiques à base de cuivre provoquent souvent leur disparition.

Leur activité est importante. En effet, on considère généralement que la totalité d'un sol passe par leur tube digestif en l'espace de quelques années (5 ans pour HOEKSEMA et al., 1957, mais 60 ans pour BARLEY, 1969). Une tonne de lombriciens ingère environ 250 tonnes de sol par an. Le comportement écologique détermine la nature de l'alimentation constituée d'une fraction minérale et d'une fraction organique (végétaux morts) en proportions variables.

Il existe trois catégories écologiques de vers de terre décrites par BOUCHE (1972) (Figure 9) :

- les épigés : de couleur rouge, de petite taille (1 à 5 cm de long), vivant à la surface du sol au sein de la litière,
- les endogés : apigmentés, de taille variable, localisés dans les horizons inférieurs, géophages essentiellement et alimentés par les infiltrations de matière organique en profondeur,
- les anéciques : coloration sombre, taille variant de 8 à 140 cm. Ils se nourrissent en surface et fouissent très profondément le sol. Ils représentent approximativement 80 % de la biomasse lombricienne, alors que les endogés ne comptent que pour 19 % et les épigés 1 %.

Cette classification fait abstraction des types écologiques intermédiaires. Nous étudierons plus particulièrement dans le paragraphe suivant, le réseau de galeries élaboré par chaque type.



La distribution quantitative des types écologiques varient avec les climats, le sol, l'histoire faunistique et le type de végétation. En un site donné de nos pays tempérés l'activité de la population est rythmé par les saisons : apport de nourriture, température et humidité suffisantes. Ainsi le printemps correspond à la période d'activité maximale.

Occupant une place importante dans nos écosystèmes, les vers de terre vont y jouer des rôles multiples aux conséquences généralement très favorables sur le niveau d'activité des sols :

- incorporation intime de la matière organique à la matière minérale ;
- labour permanent du sol ;
- édification d'un réseau anastomosé de chenaux (4 000 à 5 000 km de galeries par hectare pour une population moyenne de 1 à 2 tonnes);
- participation aux cycles des éléments ;
- participation aux phénomènes structuraux d'agrégation.

Malheureusement, l'effet global sur l'écosystème résultant de ces interactions entre lombriciens, sol, plantes, micro-organismes et climat est rarement mesuré car les méthodes d'études toujours très partielles, sont souvent artificielles. Il s'ensuit que nos connaissances sur l'incidence réelle des lombriciens sur chaque phénomène sont limitées et souvent imprécises.

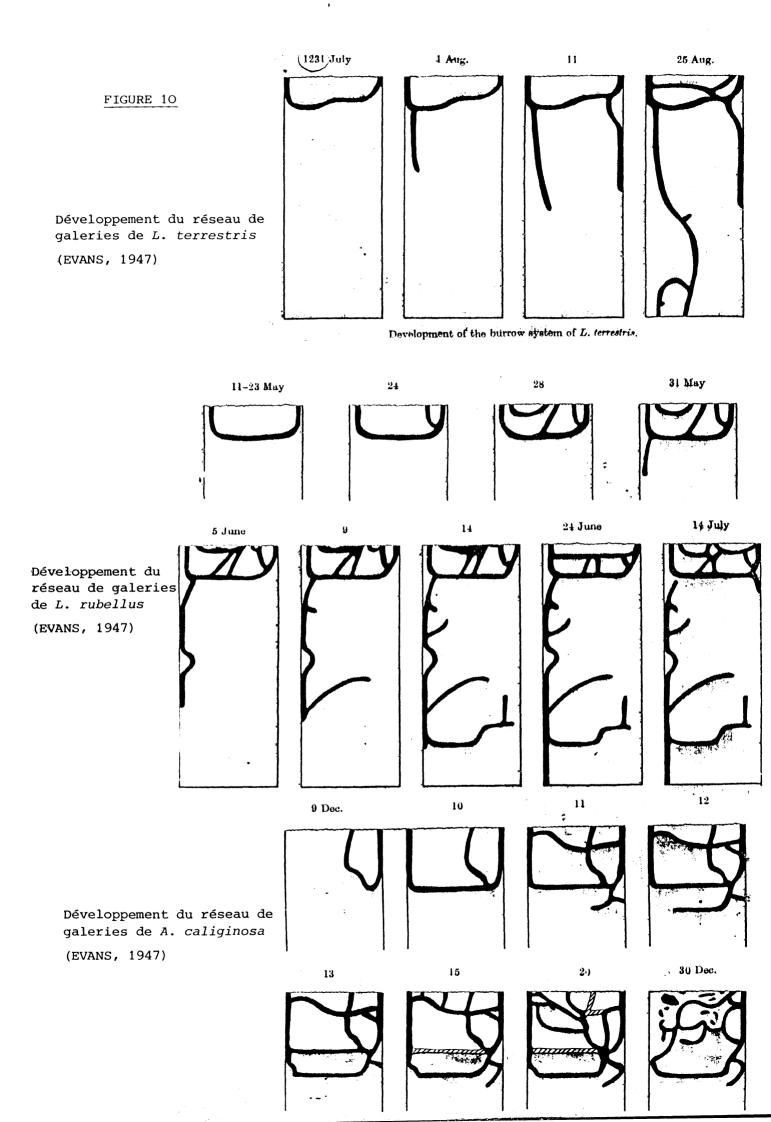
Notons toutefois que les introductions de lombriciens effectuées en Nouvelle Zélande depuis 25 ans se sont révélées fructueuses (augmentation des rendements des cultures fourragères de 75 %). De même VAN RHEE observa, suite à des introductions de lombriciens dans des polders fraîchement gagnés sur la mer, un développement du système racinaire des pommiers, plus important.

II. LES GALERIES DE LOMBRICIENS

II.1. Morphologie

En premier lieu, il est important de signaler que le réseau





élaboré dépend de la catégorie écologique auquelle appartient le ver de terre. Les épigés, vivant en surface, ne créent pas de véritables galeries, ils forment une structure très grumeleuse. Les endogés élaborent des galeries horizontales à subhorizontales. Enfin, les anéciques créent des galeries verticales à subverticales.

KRETZSCHMAR (1979) étudia la morphologie du réseau de galeries élaborées par des lombriciens sous une prairie naturelle : le réseau se présente comme un ensemble très fragmenté (40 % des galeries mesurent entre 20 et 40 mm de long et 2 à 3 % seulement mesurent plus de 200 mm). Cette fragmentation est essentiellement due aux fèces excrétés par les vers de terre dans les galeries. Le diamètre des galeries varie entre 3 et 5 mm (j'ai pu observer, lors de mon travail, des galeries dont le diamètre atteignait fréquemment 6 - 8 mm, parfois 12 mm). 72 % des galeries sont subverticales à verticales. Le réseau n'est pas distribué de manière homogène sur l'ensemble du profil : la densité est maximale entre 20 et 40 cm puis décroit lentement avec la profondeur.

D'après les travaux de EVANS (1947) il semblerait que la morphologie du réseau soit déterminée d'une part par la quantité de nourriture disponible en surface autour de l'orifice de la galerie, et d'autre part, par l'humidité du sol (le ver de terre descend dans le sol jusqu'à ce que l'humidité soit suffisante). Il est bien évident que le comportement est variable suivant les espèces, mais nous pouvons retenir le schéma suivant : le ver de terre creuse une galerie suffisamment profonde pour qu'il puisse assurer ses besoins en humidité ; à partir de l'orifice de cette galerie, il explore la surface du sol, sur un rayon fonction de sa taille, pour se nourrir ; lorsqu'il a épuisé les ressources il creuse à partir de la galerie centrale une autre galerie qui lui permettra d'atteindre d'autres zones plus riches en aliments (Figure 10).

Le réseau de galeries ainsi élaboré semble être susceptible de se conserver pendant plusieurs années (BARNES and ELLIS, 1979; EHLERS, 1975).

•

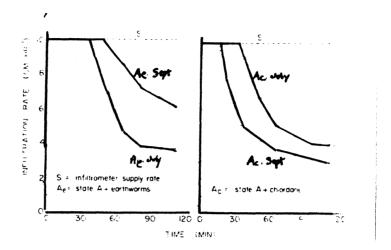


FIGURE 11 : Résultats obtenus par DIXON et PETERSON lors des essais mis en place pour tester le "Channel system concept" et l'action des vers de terre sur la vitesse d'infiltration

A_e : état A (défini précédemment) avec introduction de lombriciens

A_C : état A avec application de chlordane afin d'éradiquer la population lombricienne

Observer, pour chaque état, l'écart entre les deux courbes d'infiltration

	Low N	T	Hig	h N
_1	control	treated	control	treated
Hydraulic conductivity m day ⁻¹ Feb 77	17,79	0.67	20.07	1.39

FIGURE 12 : Résultats des mesures de conductivité Ks effectuées sur 4 parcelles ayant reçu des traitements différents

Les parcelles dites "treated" ont reçu des produits phytosanitaires qui ont éliminé les vers de terre

II.2. Quelques résultats concernant leur rôle vis-à-vis de l'écoulement

A priori, il n'est pas invraisemblable de supposer que le réseau de galeries ainsi créé joue un rôle privilégié vis-à-vis des écoulements hydriques en milieu saturé. En effet, les chenaux de lombriciens présentent des qualités particulièrement avantageuses :

- diamètre élevé (de 2 mm à 8-10 mm en général) (rappelons que, suivant la loi de POISEUILLE, le débit au travers d'un tube cylindrique est proportionnel à la quatrième puissance du rayon),
- développement sur toute la hauteur du profil.

Ainsi, plusieurs auteurs ont pu constater que la présence de lombriciens dans une parcelle améliorait nettement la conductivité hydraulique à saturation du sol.

DIXON et PETERSON (1971), lors des essais mis en place pour tester leur "Channel system concept", constatèrent l'action favorable des vers de terre, vis-à-vis de l'écoulement de l'eau en modifiant l'activité biologique de deux parcelles identiques (parcelle A : introduction de Lumbricus terrestris : parcelle A : destruction de la population de lombriciens par application de chlordane) (résultats Figure 11).

CLEMENTS (1978) a travaillé sur les conséquences causées par l'usage de pesticides en comparant divers paramètres (accumulation de matière organique, conductivité hydraulique à saturation, rendement, densité apparente, pH, etc.) mesurés sur deux parcelles (l'une étant le témoin, l'autre étant traitée avec des pesticides). L'usage des pesticides entraina la disparition radicale de la population de lombriciens. Les résultats relatifs à la conductivité hydraulique à saturation (Figure 12) indiquent une très nette diminution de Ks suite à l'éradication des lombriciens.

• •

C. CONCLUSION DE L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE, OBJECTIFS DU MEMOIRE

Dans l'état actuel des connaissances nous savons que les transferts d'eau libre dans le sol empruntent des chenaux préférentiels appelés macropores. Du nombre, de la taille et de la configuration de ceux-ci dépendra la vitesse d'écoulement de l'eau au travers du profil. Il est à noter que, si la macroporosité joue un rôle essentiel lors des écoulements en milieu saturé, son action est tout aussi importante en sol non saturé lorsque les apports d'eau (pluie ou irrigation) sont élevés.

D'un autre côté, l'étude du comportement des lombriciens a montré qu'ils étaient capables, les anéciques notamment, d'élaborer un réseau de galeries plus ou moins verticales dont le diamètre varie entre 1 et 12 mm, et qui peuvent s'étendre sur toute la hauteur du profil.

Jusqu'à présent très peu de travaux avaient tenté de relier les connaissances relatives à ces domaines. En effet, si les pédologues avaient pu constater l'importance des galeries de vers de terre sur la circulation de l'eau dans le sol, ils sont rarement allés plus loin dans leur investigation (quantification, incidence sur les écoulements). De même, les zoologues en étudiant les populations de lombriciens ont observé la présence de galeries, différentes en tracé suivant les espèces. Cela a conduit certains d'entre eux à effectuer des mesures de conductivité hydraulique à saturation et à noter les écarts qui existaient entre les parcelles avec et sans lombriciens. Cependant, ils ne sont pas rentrés davantage dans les détails des lois régissant les écoulements d'eau dans le sol.

Il nous a donc paru intéressant d'étudier le problème des mouvements de l'eau dans le sol en s'attachant plus particulièrement au rôle joué par les galeries de vers de terre, avec, pour éventuelle conséquence pratique, l'estimation de la conductivité hydraulique à saturation du sol d'après l'observation de divers paramètres sur le terrain (nombre, forme, diamètre des galeries, importance de la population de lombriciens, ...).

Pour cela, nous avons donc conjugué deux approches, la mesure de Ks in situ, et la mise en évidence (coloration) des biopores puis l'estimation de la porosité liée à l'activité des lombrics.



CHAPITRE II. MISE AU POINT DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

A. OBJECTIFS ENTREPRIS

Ce travail a été motivé par le désir de relier les mesures hydrodynamiques classiques donnant la conductivité hydraulique à saturation, à la description de la porosité fonctionnelle vis-à-vis des écoulements gravitaires (mise en évidence par un procédé fiable) en mettant l'accent sur la macroporosité créée par les lombriciens anéciques dont on essaiera d'évaluer la population tant au niveau quantitatif que qualitatif. Il s'agira donc, pour chaque site de travail, de mesurer la conductivité hydraulique à saturation, d'estimer le peuplement de lombriciens et de caractériser et décrire la macroporosité active. Ces résultats acquis devraient permettre plusieurs choses :

- une meilleure compréhension des phénomènes d'écoulement en milieu saturé, en particulier au niveau du rôle joué par les macropores, et de l'incidence, sur l'écoulement, des paramètres de nombre, taille, configuration spatiale, etc.,
- mieux comprendre l'importance du rôle joué par les galeries de lombriciens sur la dynamique de l'eau dans le sol,
- enfin, nous espérons contribuer à élaborer à terme une méthode assez légère permettant d'estimer la conductivité hydraulique à saturation d'un sol, ou d'un horizon, en se basant sur l'observation de divers paramètres à préciser.

B. DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Afin d'obtenir des éléments de réponse aux problèmes envisagés dans ce mémoire, nous avons élaboré le protocole expérimental suivant : sur un site donnée, il se déroule en 3 opérations successives :

- évaluation et caractérisation de la population de "lombrics",
- mesure de la conductivité hydraulique à saturation,
- caractérisation de la porosité biologique. Cette opération comportant elle-même deux phases :
 - . coloration des vides,
 - . identification et quantification de la porosité.

I. EVALUATION ET CARACTERISATION DE LA POPULATION DE "LOMBRICS"

I.1. Présentation générale

Diverses méthodes de terrain peuvent être utilisées. Nous avons choisi la technique de prélèvement au formol, qui est directement issue de celle employée par RAW (1959) et SATCHELL (1963), car elle présente un certain nombre d'avantages :

- elle est relativement légère (un cadre en bois de 1 m de côté, 2 arrosoirs, 80 l d'eau, 400 cm³ de formol) et rapide (le prélèvement dure 1 heure);
- elle est plus fiable que les méthodes de prélèvement par la chaleur ou l'électricité;
- elle est bien connue de Monsieur Bouché qui, avec l'expérience qu'il a acquise depuis 20 ans, interprète qualitativement les résultats obtenus et pourra le faire de façon quantitative sous un faible délai.

Cependant, il faut savoir que les quantités de lombriciens prélevés varient en fonction de l'espèce (plus ou moins grande sensibilité au formol), et de la date de prélèvement (l'activité des lombriciens est éminemment fonction de la température et de l'humidité). Néanmoins, l'utilisation de coefficients correcteurs, déterminés par les données bioclimatiques, permettent de corriger les résultats obtenus. Afin d'affiner l'estimation, Monsieur Bouché conseille un prélèvement à la bêche que nous



.

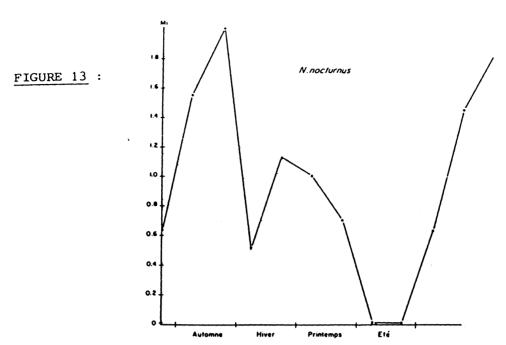


Figure . Cas d'un acénique: Nicodrilus nocturnus var. cistercianus Bouché. Avec un index de sensibilité moyen (Si = 0,49) cette espèce présente un ralentissement d'activité par le froid et un arrêt estival obligatoire par diapause. Courbe moyenne sur trois années de Mi (= index de mobilité).



Arrosage au formol

avons effectué chaque fois que cela était possible.

I.2. La méthode de prélèvement au formol

Elle consiste, par mètre carré, en quatre arrosages successifs de 20 litres de solution aqueuse chacun. Les deux premiers arrosoirs ont reçu 50 cm³ de formol pur, les deux derniers 100 cm³. Les applications sont espacées de 10 minutes. La récolte débute après le premier arrosage et prend fin 10 minutes après le dernier. Seuls sont comptabilisés les vers de terre récoltés à l'intérieur du cadre.

I.3. La méthode de prélèvement à la bêche

On prélève, sur l'aire qui a subi le prélèvement au formol, un carré de 0,1 m² de surface sur 20 cm de profondeur que l'on met à tremper dans un bac avec de l'eau, l litre de formol pur et 100 g d'hexametaphosphate de sodium. 48 heures plus tard, le prélevat est lavé, tamisé (tamis de l mm), les lombriciens présents sont récupérés. Afin de pouvoir réaliser la mesure de Ks sur le site de prélèvement, ce volume de terre a été extrait légèrement à côté du cadre, d'où la nécessité de déborder de la surface de prélèvement lors des arrosages au formol.

I.4. Interprétation des résultats

Nous avons vu, au chapitre I, que l'activité des lombriciens était conditionnée par une humidité suffisante et une température pas trop basse (+ 5° C). Pour les anéciques, cela correspond le plus souvent aux périodes printanières et automnales (Figure 13). C'est pour cela que l'on considère en général que la méthode formol + bêche prélève 90 % de la population, quand celle-ci est en activité. Les travaux menés par Monsieur Bouché permettront dans un avenir assez proche de déterminer, pour chaque espèce, la période convenable de prélèvement ainsi que le coefficient de correction à appliquer, déterminé par la température, l'humidité du sol et la photopériode au moment du prélèvement. Cependant, nous pouvons déjà dire que, sur la majorité du territoire français, cette période convenable dure au moins 8 mois.

II. MESURE DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE A SATURATION

II.1. Méthode du double anneau

Nous avons surtout utilisé la méthode dite du "double anneau", de MUNTZ (1905, 1907, 1912). Elle consiste à mesurer la quantité d'eau



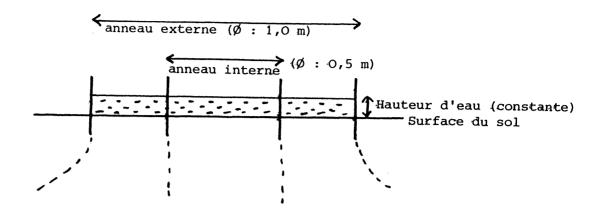
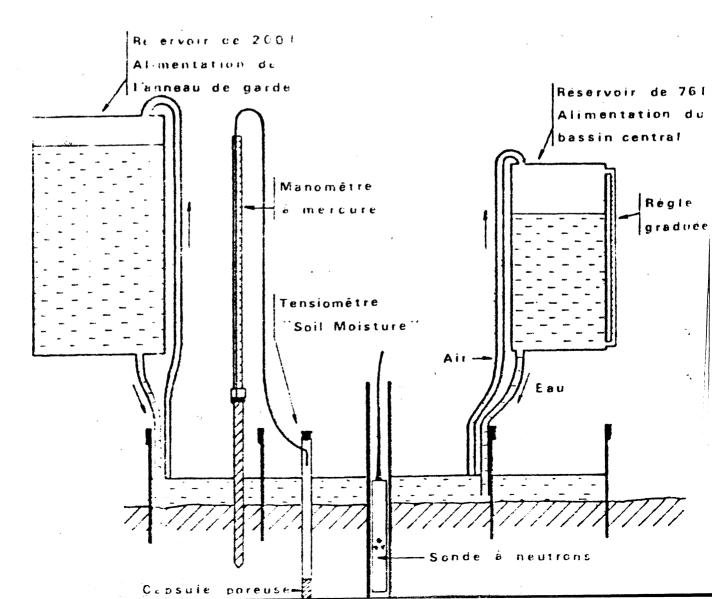


FIGURE 14 : Principe de la mesure de Ks par la méthode du double anneau (coupe verticale)

FIGURE 15 : Dispositif général

(Nous n'avons pas utilisé de tensiomètres ni de sondes à neutrons)



infiltrée sous charge constante à travers une surface parfaitement connue. Le "double anneau" permet d'obtenir des filets liquides verticaux (Figure 14).

Les deux anneaux (hauteur commune : 25 cm; diamètre anneau externe : 1,0 m; diamètre anneau interne : 0,5 m) sont disposés sur la surface qui a reçu le traitement au formol. Après un temps variable (entre 1 heure et 2 heures lors de nos expériences), fonction du type de sol et de sa teneur en eau initiale, on constate une stabilisation du débit. Dans cette condition, le grandient hydraulique est égal à 1 (le gradient de succion est nul car le sol est saturé).

Avec un anneau central de 1 dm², on a :

$$Ks mm/h = \frac{Q cm^3/h}{1 000}$$

Les deux anneaux sont alimentés par des vases de Mariotte, choix justifié par le fait que le vase permet de réaliser simultanément la régulation du niveau et le contrôle du débit.

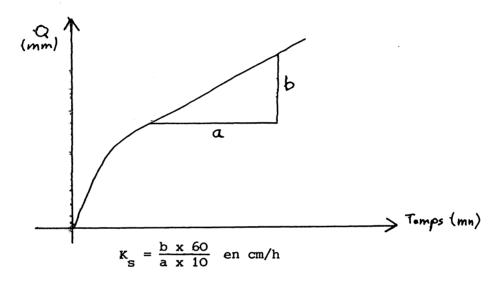
Le vase alimentant l'anneau central a une capacité de 76 l, il est parfaitement étanche. Il est relié à l'anneau par deux tuyaux, l'un branché au bas du vase, assurant l'alimentation en eau, l'autre branché à la partie supérieure assurant l'entrée d'air. Un tube en verre muni d'un réglet permet de connaître à tout moment le niveau d'eau dans le vase : l'itre écoulé correspond à 0,8 cm de graduation :

surface anneau central : 0,192 m² donc

0,1 cm de graduation = 0,64 mm d'eau dans l'anneau.

La hauteur d'eau dans les anneaux (5 cm dans nos expériences) est déterminée par la hauteur des tubes d'entrée d'air (Figure 15).

En relevant les valeurs de graduation aux temps de déclenchement on peut établir la courbe de la quantité d'eau infiltrée cumulée



en fonction du temps, d'où l'on déduit aisément la valeur de la conductivité hydraulique à saturation Ks (Figure 16). Lors de nos mesures, nous avons recouvert l'anneau central d'une feuille de plastique, afin que l'évapotranspiration ne cause pas d'interférences sur les mesures.

II.2. Méthode du puits et des piézomètres

Pendant notre mission en Sologne, nous n'avons pu, pour des raisons matérielles, emporter l'outillage nécessaire pour réaliser la mesure de Ks par la méthode du double anneau. Nous avons donc utilisé les résultats des mesures faites par A. Gonzalez (CEMAGREF, Antony) selon la méthode du puits et des piézomètres. Celle-ci consiste en un pompage d'essai in situ dans un puits, provoquant un rabattement de la surface libre de la nappe. L'exploitation des mesures de débit de pompage, d'une part, de dénivellations de la nappe dans le puits et les piézomètres situés à des distances variées du puits, d'autre part, permettent d'estimer la conductivité hydraulique horizontale équivalente et la porosité de drainage.

La première phase (dite de "tarissement non influencé") permet d'estimer la porosité de drainage. Au cours de cette phase, l'abaissement progressif de la nappe est effectué et l'on relève :

- les niveaux piézomètriques à intervalles de temps constants,
- le volume d'eau extrait du sol, en cumulant les volumes pompés durant chaque intervalle de temps.

La deuxième phase (dite de "régime quasi permanent") conduit au calcul de la conductivité hydraulique horizontale équivalente. L'objectif est d'obtenir la stabilisation du régime d'écoulement, par ajustement du débit de pompage; on cherche à obtenir une situation quasi-stable, tant en débit de pompage qu'en niveaux piézométriques.

Les résultats de ces mesures sont ensuite introduits dans des formules mathématiques qui donnent la porosité de drainage (p) et la conductivité hydraulique horizontale équivalente (K_h) qui doit obligatoirement être assortie de la profondeur du plancher imperméable pour laquelle elle a été calculée.



Coupe verticale

Observer les galeries colorées, le lombric en diapause (Bresse)

En ce qui concerne le problème envisagé dans ce mémoire, il est bien évident que nous ne pouvons effectuer de comparaisons entre les résultats de la Sologne et ceux des autres sites qu'en prenant de grandes précautions. En effet, d'une part les méthodes de mesures de la conductivité sont différentes, d'autre part, il n'y a pas identité formelle entre les paramètres mesurés par les deux méthodes.

III. CARACTERISATION DE LA POROSITE

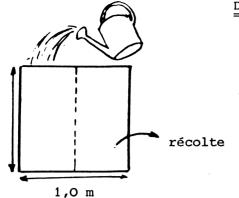
III.1. Coloration des vides

L'étude bibliographique a révélé qu'un bon moyen d'identifier la porosité "active" était de colorer celle-ci en diluant un colorant spécifique avec de l'eau s'infiltrant dans le sol. Nous avons donc utilisé cette technique. Le premier problème qui nous a été posé fut de trouver un colorant efficace. Nous avons opté pour un colorant visible directement (les colorants fluorescents nécessitent l'emploi de lumière "noire"). Les premiers essais, menés avec un mélange de Tartrazine et de Bleu patenté (= Vert menthe E) furent totalement décevants. Puis nous avons utilisé le "Bleu Chicago" dont les qualités nous sont apparues douteuses après une nouvelle série d'expériences. Finalement le Bleu de méthylène (voir en annexe pour les références plus précises) s'avéra être le colorant remplissant le mieux les fonctions requises. Il est d'ailleurs utilisé par d'autres auteurs (Mc KEAGUE, 1982; BOUMA et al., 1977).

Le colorant (sous forme de poudre) est mis dans l'eau occupant l'anneau central (celui sur lequel la mesure de K est effectuée) lorsque la vitesse d'écoulement paraît stabilisée (en moyenne l heure après le début de l'opération) afin de ne marquer que les voies de l'écoulement gravitaire. La dose utilisée est approximative (au moins l g par litre).

Puis on laisse infiltrer l'eau colorée pendant un laps de temps suffisant (au moins 3 heures). Ce dernier point est très important. Certains résultats décevants constatés lors de mes premières mesures doivent s'expliquer par le fait que je n'ai pas laissé infiltrer suffisamment longtemps l'eau colorée au Bleu de méthylène.

DESCRIPTION SCHEMATIQUE DU PROTOCOLE



Prélèvement au formol

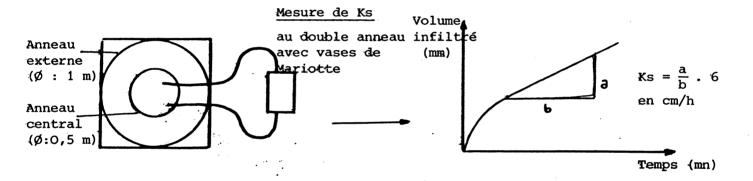
80 1 d'eau 300 cc de formol our

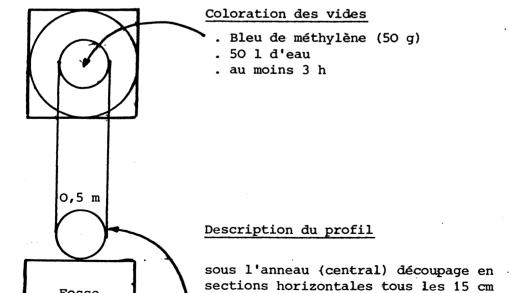
Prélèvement à la bêche

Volume prélevé : 0,3 x 0,3 x 0,2

Héxamétaphosphate de sodium 1 l formol eau

lavage-tamisage récolte





Fosse d'observation

III.2. Identification et quantification de la porosité

C'est la partie la plus délicate de la méthode. Après avoir creusé une fosse (1,2 m x 0,8 m x 1,0 m) face à l'anneau central, le profil est décrit "classiquement", puis on découpe, en sections horizontales, le disque de 50 cm de diamètre au travers duquel l'eau colorée au Bleu de méthylène a circulé. Pour chaque niveau découpé, on reporte à l'échelle 1/5ème la position, la taille et la forme des voies de circulation. On suit ainsi la progression du colorant sur une hauteur de 60 cm environ en découpant des tranches tous les 15-20 cm en moyenne. Le mode de description du profil en sections horizontales s'est révélé être le meilleur après une série d'échecs subis en découpant celui-ci en tranches verticales, au cours des premiers essais menés à Bel Air. En effet, les macropores, et plus particulièrement les galeries de vers de terre, ont rarement un cheminement vertical, rectiligne, d'où quelques difficultés à les suivre.

Nous avons donc appliqué ce protocole sur plusieurs sites afin d'en apprécier la valeur et les limites (les résultats obtenus font l'objet du chapitre suivant) (voir page ci-contre le schéma résumé du protocole).

Dans un premier temps, nous sommes allés à Bel Air (Station bioclimatologique, Montpellier) puis, afin d'avoir des situations pédologiques contrastées, nous sommes allés en Sologne, en Bresse et en Haute Savoie (Vallée de Chamonix).

C'est à Bel Air que le protocole a été testé pour la première fois. En effet, après les échecs subis près de la station climatologique ENSAM et au domaine de Fréjorgues (INRA), Monsieur Luc m'a conseillé d'utiliser les cases lysimétriques de la station bioclimatologique de Bel Air car il avait pu constater, lors de son travail de thèse, la présence de lombriciens dont les galeries expliquaient les écoulements rapides observés.

La méthode proposée ayant fait ses preuves à Bel Air, nous avons cherché à l'appliquer sur quelques sols de France bien typés et ayant une certaine importance tant du point de vue pédologique que

.

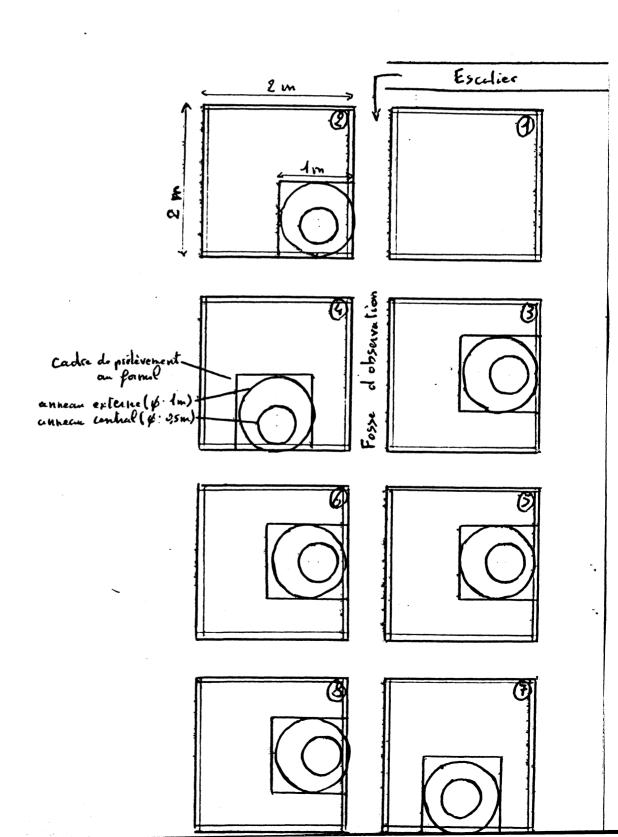
du point de vue des surfaces occupées. La Sologne a d'abord été retenue car, d'une part, ses sols présentent des caractères bien définis (sables sur argiles), d'autre part notre travail pouvait s'intégrer dans la ligne de celui mené par le CEMAGREF d'Antony sur l'étude de la variabilité spatiale des mesures hydrodynamiques. La Bresse a été choisie ensuite pour caractériser notamment des sols limoneux du type lessivé à pseudogley très répandus en France; de plus, nos observations pouvaient s'appuyer sur l'étude du secteur de référence de la Bresse jurassienne. Passy (Haute Savoie) nous offrait enfin la possibilité de travailler sur un sol reconstitué (fines de gravière, compost et terre végétale) dans lequel des lombrics avaient été introduits.

00000000000000

•

FIGURE 17 : Station Bioclimatologique de Bel Air. Disposition des 8 cases lysimétriques. Position des prélèvements formolbêche du double anneau

Statum biochmalologique Batement central



CHAPITRE III. RÉSULTATS

A. BEL AIR

I. DESCRIPTION DU SITE

I.1. Localisation. Occupation

La Station Bioclimatologique de Bel Air (Montpellier, Hérault) dispose de 8 cases lysimétriques de 8 m³ chacune (2 m x 2 m x 2 m). Mises en place avant 1957, elles ont servi à de nombreux travaux (thèse de J.P. LUC, 1978, entre autres). Depuis quelques années elles ont été laissées à l'abandon, et la végétation naturelle (ronces, graminées diverses) a repris le dessus. Le plan de situation est présenté en Figure 17. Les robinets de vidange des cuves (situés dans la fosse de vidange) étaient ouverts lors de ma première venue au site. Nous pouvons donc supposer que des phénomènes d'oxydo-réduction, qu'aurait provoqué une stagnation de l'eau en bas de la cuve, ne sont pas venus perturber celle-ci.

I.2. Description pédologique du profil

C'est un sol brun calcaire prélevé dans les alluvions récentes du Lez (Domaine de Lavalette de l'ENSAM) et reconstitué lors du remplissage en couches successives.

Les analyses granulométriques (voir annexe II) donnent une texture argilo-limono-sableuse sur l'ensemble du profil avec une légère augmentation de la teneur en argile vers 1 m de profondeur (renseignements issus de la thèse de LUC, 1978).

TABLEAU 4

	PRELEVEMENT AU FOR	PRELEVEMENT A LA BECHE			
	Espèce	Biomasse (g/m2)		omasse g/m2)	
CASE 2	4 L. castaneus (adulte) Ep	0,54	3 A. chlorotica (adulte)En 4 A. chlorotica (juvénil)En	0,7	
CASE 3	19 L. castaneus (adulte) Ep 2 L. castaneus (juvénile) Ep 27 A. chlorotica(adulte) En 18 A. chlorotica(juvénile) En	0,54 3,28 0,11 4,90 1,99	6 A. chlorotica l anécique 4 endogés interminables	1,02 1,37 1,37 1,51	
CASE 4	10 <i>L. castaneus</i> (adulte) Ep 1 <i>L. castaneus</i> (juvénile) Ep 1 <i>A. chlorotica</i> (juvénile) En	10,3 1,42 0,03 0,11	10 A. chlorotica (adulte) En 9 A. chlorotica (juvénil) En 1 N. (juvénil) A 1 L. castaneus (adulte) Ep 1 endogé indéterminable	4,25 2,24 1,41 0,49 0,15 0,18	
CASE 5	31 <i>L. castaneus</i> (adulte) Ep 1 <i>L. castaneus</i> (juvénile) Ep	1,56 3,34 0,06	1 <i>L. castaneus</i> (adulte) Ep 5 <i>A. chlorotica</i> (adulte) En 4 <i>A. chlorotica</i> (juvénile) En 2 anéciques indéterminables 4 endogés indéterminables	0,17 0,93 0,43 0,33 0,45	
CASE 6	19 <i>L. castaneus</i> (adulte) Ep 3 <i>A. chlorotica</i> (juvénile) 1 endogé	3,45 3,06 0,38 0,02	8 N. caliginosus meridionalis dionalis A 3 A. chlorotica (adulte) En 4 A. chlorotica(juvénile) En 1 N. caliginosus caliginosus En	2,68 0,43 0,46 0,70	
CASE 7	4 L. castaneus (adulte) Ep	3,46 0,54	7 A. chlorotica (adulte) En 23 A. chlorotica (juvénile)En 1 endogé indéterminable	4,24 1,31 3,14 0,15	
CASE 8	4 L. castaneus (adulte) Ep 1 M. dubius (adulte) En	0,54 0,52 0,06	2 L. castaneus (adulte) Ep 6 A. chlorotica (adulte) En 3 A.chlorotica (juvénile) En 9 endogés (species) 1 M. dubius En	4,60 0,31 1,34 0,31 0,86 0,09 2,91	

Catégories écologiques : A = anécique

Ep = épigé

En = endogé

Voir l'annexe III pour plus de précisions sur les espèces

II. NATURE DES OBSERVATIONS ET DES MESURES

II.1. Présentation générale

Sur les 8 cases lysimétriques disponibles, seulement 4 ont donné des résultats exploitables à la suite de la mise au point du protocole. Disposant des moyens nécessaires, le protocole a pu être appliqué dans son intégralité.

II.2. Evaluation de la population lombricienne

Les captures de vers de terre (par les méthodes au formol et à la bêche), étalées du 16/05/83 au 2/06/83 ont donné les résultats exposés au Tableau 4.

Nous pouvons simplement noter que la méthode au formol n'a prélevé aucun anécique, et que la méthode bêche a obtenu des résultats faibles. Nous commenterons ceci plus précisément dans le paragraphe III. Néanmoins, nous pouvons dire que cela ne remet pas en cause ni la méthode, ni le protocole dans son intégralité.

II.3. Mesure de Ks

Les mesures, réalisées au double anneau, avec les vases de Mariotte ont donné les résultats exposés au Tableau 5.

II.4. Description des galeries et pores des profils

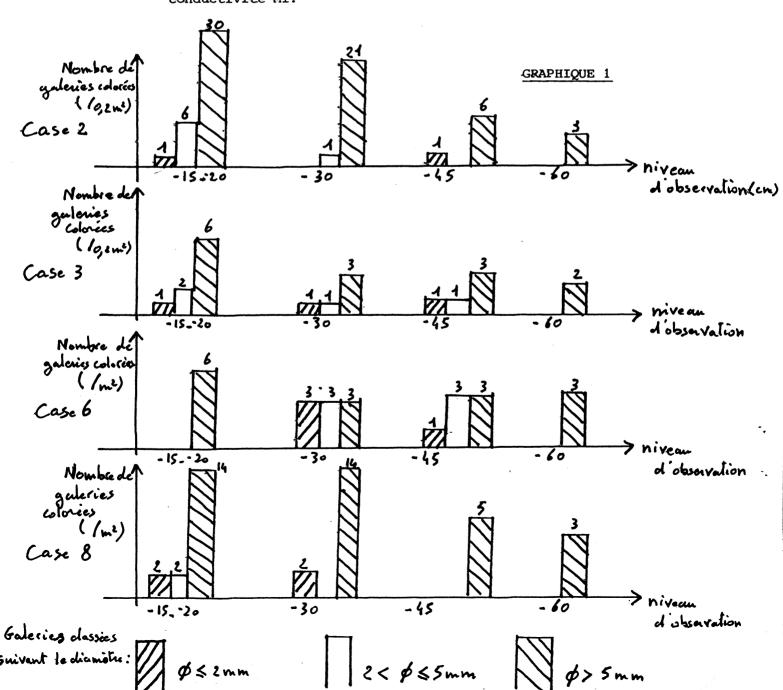
Les résultats des comptages sont présentés par le graphique 1. Les remarques suivantes peuvent être tirées de la description :

- les 10 premiers cm n'offrent pas la possibilité d'effectuer une identification précise des voies de circulation du fait d'une structure particulièrement grumeleuse (agrégats coprogènes, action des racines);
- les racines jouent un rôle indéniable pour la circulation d'eau libre dans le sol. Néanmoins cette action semble se limiter aux horizons supérieurs ;
- d'après la coloration, la macroporòsité d'origine physique ne s'est révélée fonctionnelle lors de nos essais qu'à partir de 40 cm de profondeur. En effet dès 30 cm l'horizon B développe

TABLEAU 5

	Ks (en cm/h)	Classe suivant NOWLAND		
CASE 1	4	м2		
CASE 2	9,3	M1		
CASE 3	7,1	M1		
CASE 4	6,7	M1		
CASE 5	2,5	M2		
CASE 6	7	M1		
CASE 7	1,9	м3		
CASE 8	12	м1		

Les cases 2, 3, 6 et 8 les seules ayant donné des résultats exploitables pour la suite appartiennent toutes à la même classe de conductivité M1.



une structure prismatique typique. Ainsi avons nous pu observer sur les cases 2 et 6 que certaines des fissures interprismes étaient colorées. Il est à noter que, chaque fois que cela était le cas, une ou plusieurs galeries se trouvaient à proximité ou sur le trajet de la fissure. Aucun autre macropore d'origine physique (vide inter-agrégats plus particulièrement) ne semble avoir eu une incidence sur les transferts d'eau.

III. ANALYSE DES RESULTATS

III.1. Variabilité verticale du nombre de galeries fonctionnelles

La tendance générale est la diminution du nombre de galeries colorées avec la profondeur. Nous remarquons aussi que les galeries de gros diamètre (5 < d < 10 mm) sont les voies de circulation qui semblent les plus continues sur l'ensemble du profil. Lors des essais nous avons pu constater aussi que, au premier niveau d'observation (- 15 cm, - 20 cm), la quasi totalité des galeries présentes étaient colorées. Par la suite, la proportion de galeries non fonctionnelles augmente avec la profondeur. Le phénomène biologique qui peut expliquer ceci est le suivant : juste avant d'entrer en diapause, les anéciques colmatent avec leurs déjections les galeries au-dessus de la logette où ils séjournent pendant cette phase de vie très ralentie. Les "effondrements" de galeries sont aussi probables. J'ajouterai que l'identification et la quantification ne portant que sur le volume cylindrique à l'aplomb de l'anneau central, certaines galeries peuvent sortir du volume prospecté. Nous avons pu nous-même le constater à plusieurs reprises en élargissant l'observation.

III.2. Comparaison nombre et taille des galeries - population de lombrics

Nous remarquons essentiellement qu'il ne semble pas y avoir de corrélations entre le nombre de galeries colorées et le nombre de lombriciens anéciques prélevés par la méthode bêche + formol. Ainsi les prélèvements effectués dans les cases 2 et 8 sont exempts de vers de terre de la catégorie anécique, alors que les descriptions de profil ont révélé des preuves de leur travail. La part d'explication du fait que des lombriciens soient morts entre-temps, est certainement faible. Nous avons vu au chapitre I.B. que la période d'activité

•

TABLEAU 6 : Synthèse des résultats "case par case"

	Nombre d'anéciques Conductivité Ks au m2 prélevés à mesurée (suivant la bêche+formol la classif. NOWLAND		Ks estimée suivant le schéma prévu par Mc KEAGUE Niveau d'observations			
			-1520	- 30	- 45	- 60
CASE 2	o	м1	н1	н2	м1	M2
CASE 3	10	M1	H 2	м1	м1	M2
CASE 6	80	м1	M1	м1	м1	M2
CASE 8	0	M1	 €12	н2	М1 .	M2

des vers de terre correspondait aux moments de l'année suffisamment humides, soit le début du printemps et l'automne sous nos climats. Or, il est bien connu que la réponse à la méthode bêche - formol dépend de l'activité de la population. Il est donc certain qu'en période de stress hydrique comme c'était le cas ici lors de mes prélèvements (fin du printemps), il y aura très peu de corrélations entre ces deux paramètres.

III.3. Comparaison nombre de galeries - valeur mesurée de Ks

Nous pouvons nous rapporter au tableau 6 qui fait une synthèse des résultats. En comparant les valeurs de conductivité K, mesurées, et celles estimées en appliquant le schéma mis au point par Mc KEAGUE à nos données de taille et nombre de galeries, nous constatons que le niveau d'observation pour lequel il semble y avoir le plus de corrélations entre ces deux valeurs, est - 45 cm. De l'exploitation des observations des deux niveaux supérieurs, on aboutit à des surestimations, par contre le niveau - 60 cm conduit à une erreur par défaut.

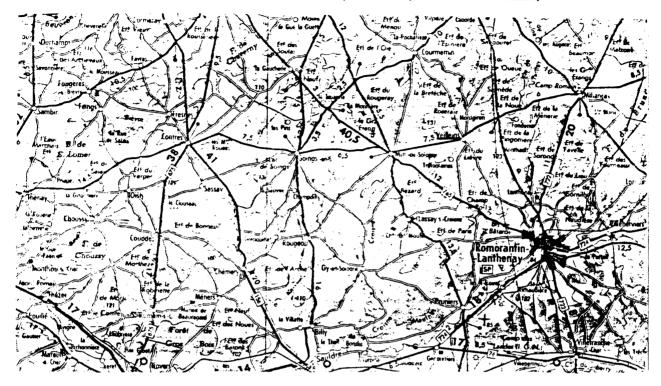
IV. CONCLUSION

Nos essais ayant débuté à Bel Air, le manque d'expérience explique le fait que seulement 50 % des cases sur lesquelles nous avons travaillé ont donné des résultats exploitables. Cela ne remet pas formellement en cause le protocole expérimental qui, par ailleurs, a donné plus ou moins satisfaction. Si l'observation morphologique semble donner des estimations de Ks correctes (tout au moins pour le niveau - 45 cm), en revanche, les données relatives aux populations de vers de terre sont difficilement corrélables aux autres, les dates de prélèvements étant vraisemblablement en cause.

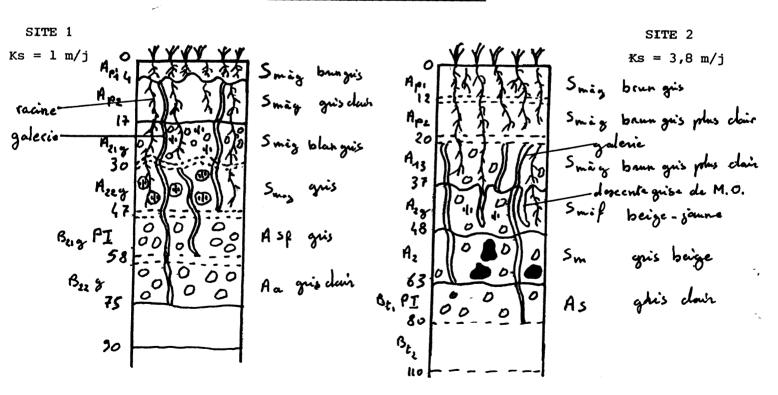
En ce qui concerne l'incidence des galeries de lombriciens sur l'écoulement d'eau libre, nous avons pu voir qu'elles paraissent jouer à Bel Air un rôle primordial.

 SOLOGNE : Plan de situation

(échelle : 1/250 000, Carte Michelin)



Profil des 2 points d'essai



legende: 111 concretion ferro manganique
O tache rouille
PI plancher impormishe

B. LA SOLOGNE

I. DESCRIPTION DU SITE

I.1. Localisation. Occupation. Climat. Topographie.

La parcelle sur laquelle nous avons travaillé se situe dans la commune de Veilleins (Loir et Cher) (voir plan de situation ci-contre sur la carte Michelin au 1/250 000).

C'est une prairie naturelle de 4 ha environ paturée par du bétail. Cette prairie subit un engorgement temporaire généralisé pendant plusieurs mois de l'année (au moins 3 ou 4), dû à la remontée d'une nappe perchée. Au cours de nos expériences (du 15/06/83 au 17/06/83) la nappe perchée avait disparu depuis un mois (une autre nappe apparaissant à 2 m).

Le climat est continental doux. Les conditions climatiques précédant nos observations sont courantes pour la saison (ensoleillé à nuageux et doux).

La parcelle est plane, et s'inscrit parfaitement dans la topographie régionale. On peut noter de-ci, de-là des microcuvettes ne dépassant pas l'mètre par rapport à l'altitude moyenne qui est de 130 mètres.

I.2. Description pédologique du site

La cartographie du site a été réalisée début 1983 par Monsieur Baillon (DDA du Loir et Cher). Il a considéré la parcelle comme homogène. Le sol est un planosol typique de Sologne comprenant des horizons sableux au sommet (A1 humifère et A2g très clair) reposant sur un horizon Btg argilo-sableux (plancher de la nappe perchée). Nos observations ont porté sur deux points distants l'un de l'autre de 100 mètres (nous verrons au paragraphe II.1.3. la raison de ce choix) dont la description détaillée des profils figure en annexe II.

Une représentation schématique de chacun des sites est présenté ci-contre. Dans le présent paragraphe nous nous limiterons à indiquer les similitudes et différences entre les deux sites.

`

Alors que pour le site 1 la texture est nettement sableuse jusqu'à 47 cm puis devient très argileuse dès 58 cm, pour le site 2 le changement textural s'observe à 63 cm. L'activité biologique (galeries de vers de terre, racines) est importante pour les 2 sites dans les 4 premiers horizons, mais il semble que la décroissance de cette activité avec la profondeur soit plus nette pour le site 1. Pour les deux sites on observe une couleur de fond gris beige clair, les différences observées résident dans la répartition des taches rouille et des concrétions ferro-manganiques que 1'on retrouve plus nombreuses et débutant plus près de la surface dans le site 1. Le site 1 est moins humifère en Ap avec trace d'une culture ancienne alors que l'autre parait de mise en culture plus récente (ou laissé plus longtemps en prairie). Enfin, la profondeur du plancher imperméable est vraisemblablement différente (horizon 47-58 pour le site 1, horizon 63-80 pour le site 2).

I.3. Choix du site et des points d'observation

Notre choix s'est porté sur cette parcelle pour tenter de relier les différences de conductivité hydraulique horizontale équivalente constatée dans les deux points choisis comme sites d'observation (de 1 m/j à 4 m/j). En effet, A. GONZALES, stagiaire au CEMAGREF d'Antony suit cette parcelle depuis deux ans et étudie la variabilité spatiale des paramètres hydrodynamiques \overline{K}_h et μ dans ce milieu, a priori homogène au plan pédologique. Il a mesuré la conductivité hydraulique à saturation suivant les deux méthodes :

- trou de tarières (140 mesures KT)
- puits et piézomètres (14 mesures Kp).

Il a pu ainsi établir la droite de régression entre ces deux mesures, et, en ce qui nous concerne, observer des différences nettes de conductivité hydraulique au sein de la parcelle. Il s'agissait donc pour nous de tester notre protocole en vérifiant si les résultats des essais réalisés auraient permis d'une part d'estimer Ks, d'autre part de prévoir une nette différence de conductivité hydraulique entre deux points de mesure. Nos essais ont été réalisés en deux points distants

·

TABLEAU 7

	PRELEVEMENT 1 (15/06	PRELEVEMENT 2 (16/06)		
	Espèce	Biomasse (g)	Espèce	Biomasse (g)
SITE 1	1 L. rubellus (adulte) Ep 1 L. terrestris (adulte) A 2 L. castaneus (adulte) Ep 1 A. chlorotica (forme verte)En	1,89 0,62 0,52 0,08	1 <i>L. festivus</i> (adulte) A 1 <i>L. terrestris</i> (juvénile)A	1,14
		3,11		1,82
SITE 2	6 L. centralis (adulte) A 8 L. centralis (juvénile) A 6 L. castaneus (adulte) Ep 1 A. chlorotica (forme verte)En	9,92 2,75 1,06 0,08	3 L. centralis (adulte) A 16 L. centralis (juvénile)A 1 L. castaneus (adulte) Ep 1 N. caliginosus	3,87 6,23 0,09
	N. caliginosus meridionalis (juvénile) A	0,27	meridionalis (adulte) A	0,89
	es de Villago	14,08	-	11,08

Voir en Annexe III, les renseignements complémentaires sur les espèces.

Les lettres A, Ep, En signifient la catégorie écologique auquelle appartient l'espèces citée :

A = anécique

Ep = épigé

En = endogé

La "chasse" aux lombrics Site Sologne



de 100 mètres, ayant des conductivités très différentes :

- site 1 : $K_{T} = 0.64 \text{ m/j}$ $K_{p} = 1.45 \text{ m/j}$

- site 2 : $K_{T} = 3,71 \text{ m/j}$ $K_{p} = 3,87 \text{ m/j}$

avec $K_{\underline{T}}$: conductivité hydraulique à saturation par la méthode "trou de tarière"

avec K : conductivité hydraulique horizontale équivalente (à saturation) par la méthode du puits et des piézomètres

II. NATURE DES OBSERVATIONS ET MESURES

II.1. Présentation

Les conductivités hydrauliques à saturation étant connues, nous avons directement effectué les prélèvements de lombriciens suivant la méthode au formol uniquement (la méthode bêche n'a pu être réalisée pour des raisons de temps), puis (au même point) nous avons coloré et décrit les profils. La coloration a été réalisée à l'aide d'un cylindre de 50 cm de diamètre enfoncé légèrement dans le sol, rempli ensuite d'une solution colorée au Bleu de méthylène (phases l et 3 du protocole). Dans un premier temps, le 15/06/83 (2 points d'essai par site), le colorant a été appliqué depuis la surface. Ensuite, le 17/06/83 (4 points d'essai, deux à chaque site), le cylindre a été placé à la profondeur - 20 cm (après avoir décapé les deux premiers horizons) et ce, afin d'une part d'éviter l'adsorption du colorant par le mât racinaire et, d'autre part car la nappe était à la profondeur - 20 cm lors des mesures de conductivité.

Nous avons ainsi décrit en sections horizontales trois profils pour chaque site.

II.2. Evaluation de la population lombricienne

Les captures de vers de terre (15/06 et 16/06) ont donné les résultats exprimés dans le tableau 7.

Il est donc clair que le site 2 (Ks = 3.8 m/j) est plus peuplé que le site 1 (Ks = 1 m/j). La majeure partie des vers de terre qui ont

•

TABLEAU 8 : Site 1. Plancher imperméable à horizon 47 cm Ks mesuré : H2 suivant NOWLAND.

	Nombre de galeries colorées sur une section de 0,2 m ²				
NIVEAU D'OBSERVATION	PROFIL 1		PROFIL 2		
		Estimation de Ks d'après Mc KEAGUE		Estimation de Ks d'après Mc KEAGUE	
- 30 cm	39	H1 :	62	H1	
- 50 cm	17	н2	33	н1	
- 60 cm	8	M1	6	M2	
- 75 cm	3	м3	0		

TABLEAU 9 : Site 2. Plancher imperméable horizon 63-80 cm Ks mesuré : H2 suivant NOWLAND

	Nomb	ore de galeries coloré section de 0,2 m		4
NIVEAU D'OBSERVATION	PF	OFIL 1	PRO	FIL 2
		Estimation de Ks d'après Mc KEAGUE		Estimation de Ks d'après Mc KEAGUE
- 30 cm	42	н1	69	н1
- 50 cm	20	Н2	21	H2-
- 60 cm	8	M1	13	H2
- 70 cm	1	м3	3	м3
- 85 cm	0			
	s colo sente	ration bleue		

répondu à la méthode sont du genre *Lumbricus*, qui ne présente pas de diapause.

II.3. Description des profils

II.3.1. Colorant appliqué dès la surface

Pour les deux sites nous n'avons pas fait de quantifications précises du nombre de galeries colorées. Les nombres cités se rapportent à une section de $0.2\,\mathrm{m}^2$.

- SITE 1 : à 15 cm, le nombre de galeries colorées était de l'ordre de 3, à 40 cm il n'en restait plus qu'une, à 50 cm, il n'y avait plus aucune trace de colorant.
- SITE 2 : à 15 cm le nombre de galeries colorées était supérieur à 10, à 40 cm ce nombre se réduisait à 3, à 63 cm, nous avons pu noter l'arrêt spectaculaire de la descente du colorant sur le plancher imperméable où il s'est étalé sur 100 cm² environ.

Pour les deux sites, le diamètre des galeries variait entre 4 mm et 8 mm.

II.3.2. Colorant appliqué à - 20 cm

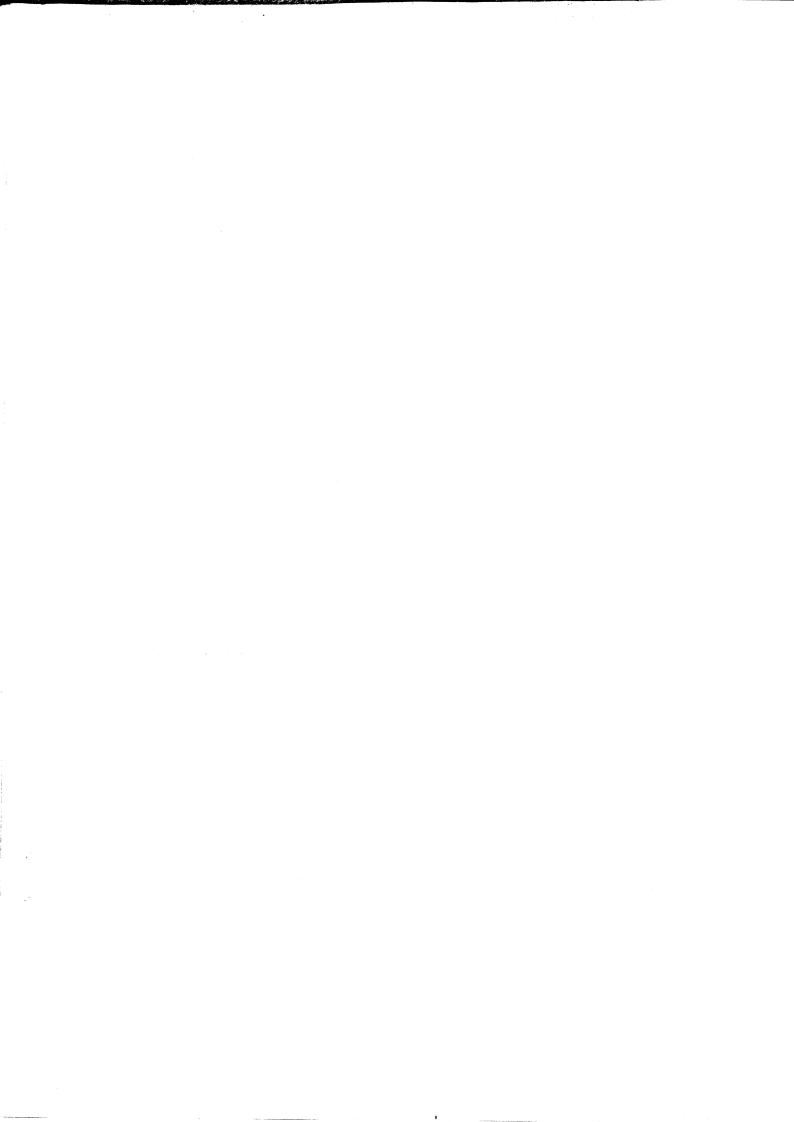
- SITE 1 : voir tableau 8 et graphique 2

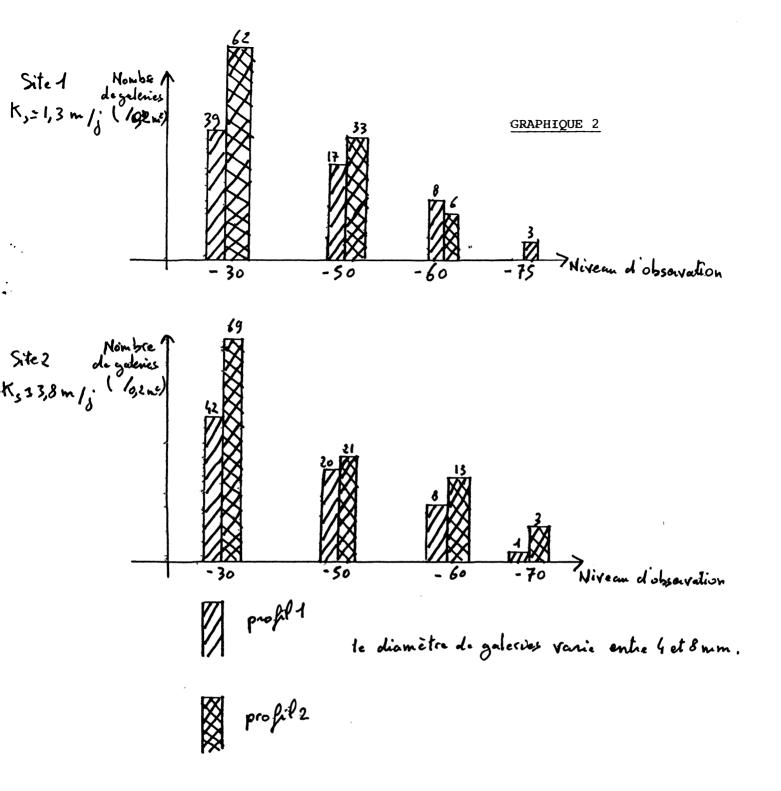
 Le diamètre de ces galeries variait entre 4 mm et 8 mm.
- SITE 2 : voir tableau 9 et graphique 2

 Là encore le diamètre des galeries variait entre 4 mm et 8 mm.

Pour le profil 1, le colorant était visible à - 85 cm sans qu'une galerie continue visible en soit la cause.

De plus nous avons pu aussi constater la présence, dans les horizons sableux, de taches bleues ne correspondant pas d'une manière évidente à des galeries ou à des zones plus poreuses (aucune fissure visible). Enfin, il est important de noter que dans ces mêmes horizons sableux (de O à - 48 cm) il ne semble pas y avoir eu comme on aurait pu s'y attendre par suite de la texture grossière, un écoulement en masse





(caractérisé par une couleur bleue répartie d'une manière homogène au sein du profil).

III. ANALYSE DES RESULTATS

III.1. Variabilité verticale et latérale du nombre de galeries dans un même site

Nous observons les mêmes tendances pour les sites 1 et 2 :

- diminution importante du nombre de galeries colorées avec la profondeur,
- les variations du nombre de galeries colorées entre les deux profils de chaque site, pourtant très proches (< 1 m) sont relativement élevées près de la surface, mais négligeables dès
 50 cm.

III.2. Comparaison de ces valeurs entre les sites 1 et 2

Quelle que soit la profondeur d'observation, nous n'observons pas de différences significatives entre les deux sites. Il est clair que, au seul vu du nombre de galeries colorées, nous n'aurions pas pu prévoir de gros écarts de conductivité hydraulique entre les deux sites.

III.3. Comparaison des populations de vers de terre entre les deux sites et de leur action respective

Le site 2 (plus perméable) est significativement plus peuplé que le site 1. Cette constatation ne peut nous permettre de justifier les écarts de conductivité hydraulique entre les deux sites car l'observation morphologique du profil n'a révélé aucune différence nette. Néanmoins, elle pourrait servir d'indicateur de zones plus perméables dans la mesure où cette observation se confirme par la suite.

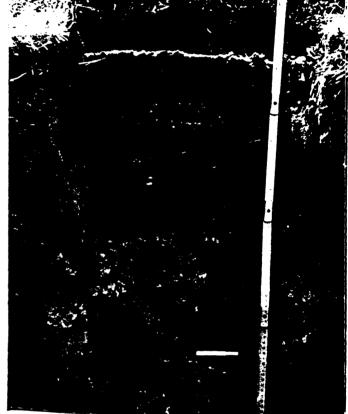
Nous pouvons aussi remarquer que, malgré les différences très nettes de peuplement, il ne semble pas y avoir eu un travail d'élaboration de galeries plus important pour le site 2.



. •



Site l (Ks = l m/j) colorant appliqué dès la surface



Site 2 (Ks = 4 m/j) colorant appliqué dès la surface Observer le plancher imperméable coloré en bleu



Site 2 (Ks = 4 m/j) colorant appliqué dès la surface Description en sections herizontales à différentes profondeurs

III.4. Comparaison nombre de galeries - valeur de Ks

Si l'on s'en tient à la classification suggérée par Mc KEAGUE (voir paragraphe A.II.2.3.) les éléments fournis par l'observation, texture sableuse et nombre de galeries, nous auraient amenés à situer la conductivité hydraulique des deux sites dans la classe M2 (l m/j < Ks < 4 m/j). Néanmoins, il est important d'insister sur ce point, nous n'aurions pas établi de distinction entre les deux sites (mais pour la conception du réseau de drainage, cette distinction ne sera pas faite, la parcelle étant considérée comme pédologiquement homogène).

IV. CONCLUSION

Le premier point intéressant à relever est l'importance à accorder à la continuité des galeries sur l'ensemble du profil, dont leurs connections avec la surface. En décapant les 20 premiers cm, qui sont labourés (donc les galeries sont détruites), on observe globalement sur l'ensemble du profil un plus grand nombre de galeries colorées que lorsqu'on s'est abstenu de cette opération préliminaire. Ainsi, en colorant à partir de - 20 cm, nous avons augmenté le nombre de galerie colorées, nous avons accru ainsi la probabilité d'avoir des galeries continues sur l'ensemble du profil, c'est ce que l'on constate puisque la coloration pénètre le plancher "imperméable".

En ce qui concerne l'interprétation des observations après coloration, l'examen de la porosité, tel qu'il est envisagé par la méthode, conduit à estimer une conductivité hydraulique globale élevée (de l'ordre de l m/j à 4 m/j d'après Mc KEAGUE) mais ne permet pas d'expliquer les différences constatées dans la mesure de Ks entre les deux sites. Il conviendrait pour cela d'avoir une répétition des profils colorés et des comptages, suffisante pour obtenir une valeur considérée comme représentative du site. D'autres facteurs : histoire culturale, profondeur du plancher imperméable, horizons argileux plus ou moins indurés et pénétrés par la matière organique peuvent aussi, et de manière prépondérante, expliquer cette différence entre les valeurs de Ks. Notons néanmoins qu'au plan du drainage la parcelle est considérée comme homogène et que l'interprétation globale (Ks de l'ordre de l à 4 m/j) recouvre la gamme des résultats des mesures effectuées in situ par la méthode puits-piézomètres.





C. LA BRESSE

411.

I. DESCRIPTION DU SITE

I.1. Localisation. Occupation. Climat. Topographie

Nous avons travaillé sur deux parcelles situées sur la commune de "Les deux Fays" (Hameau de Champmaux, département du Jura). Cette zone se rattache au secteur de référence de la Bresse jurassienne (voir la carte Michelin au 1/250 000) étudié par Ph. LAGACHERIE (opération ONIC, Ministère de l'agriculture).

Les deux points d'essai sont situés sur des prairies naturelles, non ou très rarement labourées, en général pâturées par du bétail.

L'engorgement dure approximativement 3 mois (de fin novembre à début mars) pour la parcelle du site 1 et au moins 4 mois (début décembre à fin mars) pour celle du site 2.

Le climat régional est continental. Avant notre venue et pendant notre travail le temps était orageux avec des averses fréquentes .

Le site 1, à l'altitude 220m , est localisé au sommet d'une butte. En revanche le site 2, à l'altitude 210 m, a été choisi parmi les sols de bas de pente.

I.2. Description pédologique des sites

Le site l'appartient à la série 2 (sols des hauts de butte).

C'est un sol limoneux, gris brun, à taches rouille, devenant plus argileux et bariolé ocre beige vers 40 cm, sur limon argileux à argile limoneux, bariolé vers 65 cm. C'est le sol lessivé à pseudogley typique, caractéristique des limons des plateaux de Bresse.

Le site 2 appartient à un sol colluvial à pseudogley (sol des bas de pente) (série 12). C'est un sol limoneux, brun grisâtre taché de rouille, puis beige jaunâtre taché de rouille et brun à partir de 30 cm sur limon argileux bariolé ocre et gris apparaissant vers 70 cm.

,

TABLEAU 10

LOMBRICS PRELEVES / M ²			CONDUCTIVITE NOMBRE DE GALERIES				/ 1	
Espèce	Nombre	Biomasse (en g)	Ks MESUREE			observation		
				-15 cm	-30 cm	-45 cm	-60	
L. terrestris (ad) (adulte)	17	60,8	2,7 cm/h	29	20	19	11	
L. terrestris (juvénile)	25	38,2	M2					
	TOTAL	99,0						



Coupe verticale : 2 galeries colorées aboutissent à une logette de L. terrestris



Coupe horizontale : galerie horizontale sur l'horizon induré à - 75 cm

II. NATURE DES MESURES ET DES OBSERVATIONS

II.1. Présentation

Nous avons mis en oeuvre chacune des 3 phases du protocole, en se limitant toutefois à effectuer les prélèvements de lombriciens par la méthode au formol uniquement. Malheureusement un essai a donné des résultats incomplets car l'anneau central (de l'appareillage pour la mesure de Ks) se trouvait à l'aplomb de la croisée de 3 galeries de taupes situées à 20 cm sous la surface du sol.

II.2. Résultats

Ils sont rassemblés dans le tableau 10 et concernent le sol des hauts de butte.

La plupart des galeries (au moins 80 %) ont un diamètre supérieur ou égal à 8 mm. Dès 45 cm certaines galeries n'ont plus un cheminement vertical mais oblique, cette tendance se confirme à 60 cm où 50 % au moins des galeries deviennent horizontales. Ainsi le plancher imperméable situé à la profondeur - 65 cm et l'horizon Bt (très induré) bloquent la descente des vers de terre. Sur toute la hauteur du profil prospecté lesgaleries de vers de terre étaient les seules voies de circulation de l'eau gravitaire.

III. ANALYSE DES RESULTATS. CONCLUSION

Les résultats obtenus n'amènent pas une grande discussion. Notons toutefois qu'il semble y avoir une certaine cohérence entre la quantification de lombriciens et le nombre de galeries, mais cela mérite confirmation. Par contre, l'estimation de Ks basée sur les données morphologiques (nombre et taille des galeries) aurait conduit à des valeurs dépassant largement la valeur mesurée. Ajoutons enfin que nous avons observé au-dessus du plancher imperméable une tendance pour les galeries à devenir horizontales, qui se confirme sur le plancher. Cela pourrait avoir une incidence particulièrement favorable sur la rapidité des écoulements latéraux.

La Bresse nous est apparue comme étant un champ d'étude très intéressant méritant la mise en oeuvre d'un plus grand nombre de mesures afin d'aboutir à des conclusions plus précises.

D. AUTRES SITUATIONS

I. STATION CLIMATOLOGIQUE ENSAM

Les premiers essais furent réalisés sur le remblais situé autour de la station climatologique de l'ENSAM. Malgré une forte activité lombricienne évidente (nombreux turricules en surface), les conductivités hydrauliques mesurées sont très faibles (moins de 1 mm par heure). Nous avons donc préféré poursuivre nos essais en des lieux plus propices, car de telles conductivites traduisaient probablement l'absence de galeries fonctionnelles.

II. FREJORGUES

Suite à l'échec rencontré à la station ENSAM, nous sommes allés à Fréjorgues poursuivre nos expériences. Pour les mêmes raisons que précédemment, nous avons dû rejeter cette station.

III. PASSY

Après la mise au point du protocole (résultats positifs à Bel Air, en Sologne et en Bresse), nous sommes allés début juillet 1983 à Passy (Haute Savoie) dans la vallée de Chamonix. La parcelle sur laquelle nous avons travaillé est une ancienne gravière que le CEMAGREF utilise pour faire des essais de reconstitution de sol à partir de divers matériaux (compost d'ordures ménagères, terre végétale et "fines de gravière"). En décembre 1982, J.C. Heidet (stagiaire de Monsieur Bouché) a introduit en des points bien définis, des lombriciens de la catégorie écologique anécique. Les résultats furent décevants et inexploitables. La principale raison est que le compost (dont une plus juste dénomination serait "verre pilé" car il contient en dépôt 70 % de stériles) constitue une zone d'écoulement préférentiel, court-circuitant les éventuelles galeries. Les écarts observés entre les mesures correspondaient ainsi à des "taches" de compost plus ou moins grandes, sous l'anneau de mesure.

IV. PARCELLE DRAINEE DE MARSILLARGUES (sols argileux et salés)

A Marsillargues, l'objectif était essentiellement d'utiliser le Bleu de méthylène comme marqueur du passage de l'eau afin de vérifier la continuité des fentes de retrait entre la surface et les drains. En effet, des problèmes de colmatage argileux se sont posés. Certains



résultats expérimentaux sont déjà venus corroborés cette hypothèse (analyse minéralogique, etc.). Le colorant a confirmé les hypothèses pré-citées car nous avons pu observer, après avoir versé 150 litres d'eau colorée au Bleu de méthylène dans une fissure se développant à la verticale d'un drain, que la coloration bleue atteignait le drain directement par l'intermédiaire de fissures et de vides inter prismes connectés entre eux.

•••••

CHAP	IT	RF	IV.	SYNTH	SF
CIIAI			1 V I	O 1 11 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	

A. MISE EN OEUVRE PRATIQUE DU PROTOCOLE

Nous n'évoquerons dans ce paragraphe que les phases du protocole dont la mise au point a posé des problèmes.

I. LA METHODE BECHE-FORMOL

Elle doit être mise en oeuvre pendant la période d'activité des lombriciens anéciques. En pratique cela signifie qu'il faut prélever quand la température et l'humidité sont suffisantes (T > 5°, pF < 3,5) en évitant les périodes de jours longs (mai, juin, juillet) car les vers de terre anéciques sont alors en diapause. Notons que les lombriciens du genre Lumbricus ne connaissent pas de diapause. Si la sècheresse est trop intense, ils disparaissent.

II. MAITRISE DU COLORANT

Le Bleu de méthylène remplit les fonctions requises. Toutefois certaines précautions doivent être prises :

- entamer la phase de coloration quand la vitesse d'infiltration se stabilise,
- fractionner les apports de colorant en poudre au cours du temps de façon à avoir dans l'anneau central pendant toute la durée de la phase de coloration une concentration en Bleu de méthylène de l'ordre de 0,1 %,
- la quantité minimale de colorant à diluer dans l'eau de percolation est de 50 g (1) pour pouvoir réaliser une coloration efficace des macropores.

⁽¹⁾ En 1983 : 100 g de colorant coutait 132 F.



Dans ces conditions, la technique de coloration peut être considérée comme fiable et fructueuse.

III. APPRECIATION DE LA MACROPOROSITE FONCTIONNELLE

C'est la partie la plus délicate. Elle nécessite beaucoup de précautions lors du découpage du profil, de façon à ne pas détruire ou obstruer les éventuelles zones colorées. De plus, l'identification de la cause de la présence du colorant au sein du profil n'est pas toujours évidente (cas des sols sableux de Sologne où la présence d'une tache bleue n'indiquait pas nécessairement une galerie fonctionnelle). De même dans les dix premiers centimètres il est difficile de distinguer nettement les voies préférentielles de l'écoulement (mât racinaire, structure grumeleuse de l'horizon de surface).

Si le travail est mené avec suffisamment de délicatesse, il est donc possible d'identifier et quantifier in situ la bioporosité. En ce qui concerne la macroporosité d'origine physique, la méthode proposée a permis (à Marsillargues en particulier) de la mettre en évidence de la même manière. Reste à savoir comment la quantifier.

B. INCIDENCES DES GALERIES DE LOMBRICIENS SUR LES TRANSFERTS D'EAU EN MILIEU SATURE

Tous nos résultats montrent l'importance du rôle joué par ces galeries sur la circulation d'eau en sol saturé.

En effet, nos descriptions de profil révèlent que la majorité des voies d'écoulement sont des galeries de vers. Si leur rôle qualitatif paraît assez clair (insensible au cycle humectation-dessication, gros diamètre, développement sur toute la hauteur du profil), leur rôle quantitatif paraît plus difficile à préciser car d'autres facteurs (profondeur du plancher imperméable en particulier) interviennent sur la valeur mesurée de la conductivité Ks.

C. PERSPECTIVES

I. COMPARAISON POPULATION DE LOMBRICS - NOMBRE DE GALERIES

Un des objectifs entrepris était de savoir s'il était possible d'associer à une population de lombrics connue, un nombre approximatif



de galeries. Les essais menés avec la méthode bêche-formol comme moyen de quantification ne nous ont pas permis d'établir des corrélations nettes entre ces deux données. Cependant, rappelons qu'à Bel Air la date de prélèvement était peu propice. Sur ce point, dans un proche avenir, les travaux de Monsieur Bouché permettront d'avoir des précisions. Néanmoins, nous pouvons remarquer que, en Sologne, les estimations de population ont donné la zone à conductivité hydraulique Ks la plus élevée, comme étant significativement plus peuplée. Un plus grand nombre de répétitions réalisées sur un même site devrait permettre de tirer des informations intéressantes.

II. ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITE KS

L'estimation de la conductivité hydraulique Ks à partir de l'examen visuel de la porosité semble être une technique prometteuse. En effet, les essais menés à Bel Air et en Sologne laissent entrevoir des possibilités. Ajoutons à cela que, en Bresse, le net écart observé entre la valeur mesurée et la valeur estimée peut s'expliquer de la façon suivante : la conductivité hydraulique ayant été mesurée par la méthode du double anneau, il est fort probable que la présence du plancher imperméable à - 65 cm affecte la mesure du Ks des horizons supérieurs, justifiant ainsi les surestimations auxquelles nous aboutissons.

Cela nous amène à penser que, dans le cas des sols présentant un plancher imperméable, une méthode plus fiable de mesure de la conductivité Ks serait la méthode "du puits et des piézomètres" si le plancher imperméable n'est pas trop proche de la surface (au plus 50 cm).

Du même coup, nous pouvons espérer avoir davantage de coincidences entre les valeurs mesurées et estimées. La mise en oeuvre du protocole serait alors légèrement différente puisque la mesure de Ks et la coloration des vides seraient décalées dans le temps, s'exposant ainsi au risque d'avoir des galeries qui se créent entre temps.

Un autre élément qui ressort de nos résultats est que le niveau d'observation qui apporte les estimations les plus précises se situe en moyenne à 30-40 cm de la surface.

CONCLUSION

Nous avons entrepris dans ce mémoire de contribuer à une meilleure connaissance des écoulements gravitaires. Nous nous sommes plus particulièrement attachés à étudier les macropores d'origine lombricienne, ainsi que leur incidence sur les transferts d'eau libre.

Dans un premier temps, il nous fallait mettre au point un protocole expérimental dont la mise en oeuvre assurerait la connaissance de trois paramètres, jugés a priori interdépendants : population de lombrics ; conductivité hydraulique Ks ; nombre, taille, configuration spatiale des macropores actifs lors de la mesure de Ks.

Les échecs rencontrés lors des premiers essais, nous ont permis d'adapter et préciser la méthode qui semble fructueuse, si certaines précautions sont prises.

Les résultats obtenus par coloration indiquent l'importance du rôle joué par les galeries de vers sur la circulation d'eau en sol saturé. Sur les sites où nous avons travaillé, elles constituaient la presque totalité des voies d'écoulement de l'eau gravitaire.

En ce qui concerne l'objectif à long terme de ce travail, c'està-dire l'estimation de la conductivité hydraulique Ks à partir de l'examen visuel de la porosité, rien ne peut être affirmer vu le faible nombre de répétitions. Néanmoins, nous avons pu dégager une certaine cohérence à travers nos résultats. Il est donc probable, qu'en multipliant les essais sur un même site, nous puissions arriver à des conclusions pertinentes. Il serait souhaitable qu'une telle démarche aboutisse car les mesures de Ks par les techniques habituelle nécessitent souvent beaucoup de temps et ne



sont pas toujours possibles. De plus, la technique de mesure englobe un volume de sol trop faible pour que la valeur mesurée soit extrapolable avec certitude à toute la parcelle (hétérogénéité spatiale de la macroporosité).

0000000000000000



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHUJA, L.R., S.A. EL SWAIFY et A. RAHMAN, 1976 Measuring hydrologic properties of soil with a double ring infiltrometer and multiple depth tensiometers. Soil sci. soc. Am. J., 40, 494-499.
- ANDERSON, J.L. et J. BOUMA, 1973 Relationsships between Ks and morphometric data of an argillic horizon. Soil sci. soc. Am. Proc., 37, 408-413.
- ANDERSON, J.L. et J. BOUMA, 1977 Water movement through pedal soils:

 I. Saturated flow. II. Unsaturated flow. Soil sci. soc. Am. J., 41,
 413-423.
- Anonyme, 1981 Compte rendu de la troisième réunion annuelle. Comité d'experts sur la prospection pédologique. Ottawa, 2-6 mars 1981, 64-74.
- Anonyme, 1983 Le pompage d'essai appliqué au dimensionnement des ouvrages de drainage agricole. Etudes du CEMAGREF "Technologies de l'agriculture". n° 497-498, 1-15.
- BAKER, S.W., 1979 Pore size distribution: a factor to be considered in infiltration studies? Journal of Hydrology, 41, 3/4, 279-290.
- BARNES, B.T. et F.B. ELLIS, 1979 Effects of different methods of cultivation and direct drilling, and disposal of straw residues, on population of earthworms. Journal of Soil Science, 30, 669-679.
- BEVEN, K., 1981 Micro-, meso-, macroporosity and channeling flow phenomena in soils. Soil sci. soc. Am. J., 45, 1245.
- BOUCHE, M.B., 1972 Lombriciens de France. Ecologie et systématique. Ed. INRA, Ann. zool. écol. anim., n° spécial, 72-2, 1-671.
- BOUMA, J., A. JONGERIUS, O. BOERMA, A. JAGER and D. SCHOONDERBEEK, 1977 The function of different types of macropores during saturated flow
 through four swelling soil horizons. Soil sci. soc. Am. J., 41, 945-950.
- BOUMA, J., 1981 Comment on micro, meso and macroporosity of soils. Soil sci. soc. Am. J., 45, 1244-1245.



- BOUMA, J. and J.H.M. WOSTEN, 1979 Flow patterns during extended saturated flow in two, indisturbed swelling clay soils with different macrostructures. Soil sci. soc. Am. J., 43, 16-22.
- CLEMENTS, R.O., 1978 The benefits and some long term consequences of controlling invertebrates in a perennial ryegrassward. The Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society, 6, 11, 335-341.
- DIXON, R.M. and A.E. PETERSON, 1971 Water movement in large soils pores: a channel system concept of infiltration. Soil sci. soc. Am. Proc., 35, 968-973.
- EDWARDS, W.M., R.R. VAN DER PLOEG and W. EHLERS, 1979 A numerical study of the effect of non capillary-sized pores upon infiltration Soil sci. soc. Am. J., 43, 851-856.
- EHLERS, W., 1975 Observations on earthworms channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. Soil sci. J., 119, 3, 242-249.
- EVANS, A.C., 1947 A method of studying the burrowing activities of earth-worms. Annals and Magazine of Natural History, Ser. 11, XIV, 643.
- GERMAN, P.F. and K.S. BEVEN, 1981 Water flow in soil macropores. I. Experimental approach, 1-13, II. A combined flow model, 15-29, III. A statistical approach, 30-39. J. Soil sci., 32.
- HILLEL, D., 1974 L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Ed. Vander, Paris, 1-288.
- KISSEL, D.E., J.T. RITCHIE et E. BURNETT, 1973 Chloride movement in undisturbed swelling clay soil. Soil sci. soc. Am. Proc., 37, 21-24.
- KRETZCHMAR, A., 1978 Quantification écologique des galeries de lombriciens Techniques et premières estimations. Pedobiologia, <u>18</u>, 31-38.
- LUC, J.P., 1978 Caractérisation hydrique des sols. Thèse docteur-ingénieur USTL Montpellier, 1-169.
- LUXMOORE, R.J., 1981 Micro, meso- and macroporosity of soil. Soil sci. soc. Am. J., 45, 671-672.



- MAC KEAGUE, J.A., C. WANG and G.C. TOPP, 1982 Estimating saturated hydraulic conductivity from soil morphology. Soil sci. soc. Am. J., 46, 1239-1244.
- MAC KEAGUE, J.A. and C. WANG, 1982 Soil structure: concepts, description and interpretation. LRRI Contribution, 82-15, 1-42.
- OMOTI, U. and A. WILD, 1979 Use of fluorescent dyes to mark the pathways of solute movement through soil under leaching conditions.

 1. Laboratory experiments. Soil sci., 128, 1, 28-34.
- OMOTI, U. and A. WILD, 1979 Use of flurorescent dyes to mark the pathways of solute movement through soil under leaching conditions.

 2. Field experiments. Soil sci., 128, 2, 98-104.
- QUISENBERRY, V.L. and R.E. PHILLIPS, 1976 Percolation of surface applied water in the field. Soil sci. soc. Am. J., 40, 484-490.
- REYNOLDS, E.R.C., 1966 The percolation of rain water through soil demonstrated by fluorescent dyes. J. Soil Sci., 17, 127-132.
- RITCHIE, J.T., KISSEL, D.E. and E. BURNETT, 1972 Water movement in undisturbed swelling clay soils. Soil sci. soc. Am. Proc., 36, 874-879.
- SKAF, M., 1974 Etude des caractéristiques hydrodynamiques des cases lysimétriques de Bel Air. DEA USTL Montpellier, 1-26.
- SMETTEN, K.R.J. and S.T. TRUDGILL, 1983 An evaluation of some different fluorescent and non fluorescent dyes in the identification of water transmission routes in soils. Journal of Soil Sci., 34, 45-56.
- VAN DE WESTERINGH, W., 1972 Deterioration of soil structure in worm free orchard soils. Pedobiologia, 12, 6-15.



ANNEXES

ANNEXE I : MATÉRIEL

ANNEXE II

: DONNÉES PÉDOLOGIQUES

ANNEXE III : DÉTERMINATION DES LOMBRICENS

ANNEXE IV

: LIGNES DIRECTRICES PROPOSÉES PAR MC KEAGUE

POUR ESTIMER LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

A SATURATION KS



ANNEXE I

MATÉRIEL

1. METHODE AU FORMOL

Pour un prélèvement, prévoir :

- . deux arrosoirs de 10 l chacun,
- . 350 cm³ de formol pur,
- . 80 1 d'eau
- . l cadre en bois (1 x 1 m) (un fil tendu entre 4 piquets fait aussi l'affaire),
- . une pince à épiler,
- . une paire de gants en caoutchouc (le formol brule la peau !),
- . deux pots en plastique (300 cm³ chacun),
- . un thermomètre,
- . un sac en plastique pour prélever une fraction de sol et en déterminer l'humidité massique.

2. METHODE BECHE

Pour un prélèvement, prévoir :

- . une bêche,
- . un bac en plastique $(0.60 \times 0.40 \times 0.30 \text{ m})$
- . 1 1 de formol pur,
- . 100 g d'Hexamétaphosphate de sodium,
- . 30 l d'eau (pour recouvrir le volume de terre prélevé),
- . un tamis de maille 1 mm.

3. MESURE DE Ks

- . 2 anneaux de Müntz (anneau externe : 1,0 m ; anneau interne : 0,5 m pour nos essais),
- . 1 vase de Mariotte (anneau interne),
- . 400 l d'eau (mesure).



4. COLORANT

Bleu de méthylène, disponible à LABOVER (Zone industrielle, 34000 MONTPELLIER) sous les références : E.M.B 60-470, Bleu de méthylène pour analyses (Réactifs RAL) (en mai 1983, 100 g de ce colorant valaient 132 F) ; pour un essai, prévoir 50 g de colorant.

5. DESCRIPTION DU PROFIL

- . pelle, bêche, pioche (ouverture de la fosse),
- . un couteau rigide (découpage des tranches horizontales).

•

ANNEXE II

DONNÉES PÉDOLOGIQUES

I. BEL AIR

Résultats de l'analyse granulométriques du sol des cases						
Horizons			1:		Sable m%	
			L.F	L.G	S.F	5.4
I	0 - 25	30,00	29,90	13,80	13, 35	21,96
I	25-40	34,50	19, 30	14,10	13, 84	21,76
	40-60	35, 50	24,00	4,80	13,10	22, 62
IK	60 - 80	40, 50	29,50	11,13	8,09	10,78
工	80 - 400	54,00	16,50	2,40	10,34	19,28
A	100-140	53,50	20,00	10,50	6,91	9,09
<u>जा</u>	120-140	47,00	18,50	10, 80	12,60	10,73
Viii	140-160	40,50	16,00	9,96	18,38	15,16

•

II. LA SOLOGNE

Le sol est un planosol typique.

Site 1 Ks = 1 m/j

- O - 4 cm : Ap mat racinaire

couleur brune grise, texture très sableuse (sables moyens à grossiers), matière organique apparente (racines) mais bien incorporée, structure particulaire, friable, peu compact, poreux dans la masse, grande activité biologique, pas de galeries visibles, horizon frais, transition avec l'horizon inférieur nette, mais irrégulière.

$-4 - 17 \text{ cm} : Ap_2$

couleur grise claire avec quelques petites taches rouille (racines gainées), texture identique à celle de Ap₁, structure particulaire sur structure prismatique peu nette, friable, mais un peu plus compact que le précédent, nombreuses racines verticales, poreux dans la masse, quelques galeries, frais (moins que le précédent), transition nette avec l'horizon inférieur (quelques mm), régulière.

$-17 - 30 \text{ cm} : A_{21}g$

couleur de fond : blanc gris avec de nombreuses taches rouille, diffuses et quelques concrétions ocre rouille (ferromanganiques) (peu nombreuses), même texture que A_{p2} , quelques racines (moins que dans A_{p2} , structure particulaire sur prismatique peu nette, très friable, plus compact que A_{p2} , quelques galeries, frais (comme A_{p2}), transition peu nette (sur 3 ou 4 cm) avec l'horizon inférieur, plus ou moins régulière.

-30-47 cm : A_{22} g

couleur de fond un peu plus grise que le précédent (A_2) avec taches rouille localisées autour de concrétions ocres assez nombreuses qui semblent être groupées en zones de 10 cm de diamètre, texture identique à A_2 , avec en plus les concrétions dont le diamètre moyen est l cm, structure particulaire, cohésion faible, friable, horizon plus compact que A_2 (presque induré), autant de racines que dans A_2 , plus grand nombre de galeries que dans A_2 , frais à très frais, la transition avec l'horizon inférieur est assez nette (sur 2 ou 3 cm) ondulée.

 $-47 - 58 \text{ cm} : B_{21}g$

couleur de fond gris beige clair (identique à celle de l'horizon supérieur) avec de nombreuses taches rouille (pas de concrétions ocres), la texture est argilo sableuse (sans éléments grossiers), peu de structure, horizon assez compact, assez induré avec des zones de moindre compaction (zone gris clair), très peu de racines, quelques galeries, la transition avec l'horizon inférieur est de nature texturale, graduelle.

 $-58 - 75 \text{ cm} : B_{22}\text{g}$

mêmes caractéristiques de couleur que l'horizon précédent, texture très argileuse avec quelques sables fins, structure massive, aucune racine, quelques galeries (rares), frais (moins que l'horizon précédent).

Site 2 Ks = 3.8 m/j

- O - 12 cm : A mat racinaire

couleur brune grise, rares taches rouille, texture sableuse (sable moyen à grossier), matière organique apparente, bien incorporée, structure particulaire, friable, peu compact, nombreuses racines verticales, poreux dans la masse, grande activité biologique mais on n'observe pas de galeries, frais, la transition avec l'horizon inférieur se fait sur 2 cm, régulière.

- 12 - 20 cm : A_{p2}

horizon un peu plus clair que A_{pl} , nombreuses petites taches rouille (racines gainées), texture identique à celle de A_{pl} , structure particulaire nette sur prismatique peu nette, friable, peu compact (un peu plus que A_{pl}), nombreuses racines verticales, poreux dans la masse, peu ou pas de galeries, frais, la transition est peu nette (o à 5 cm), régulière.

 $-20 - 37 \text{ cm} : A_{13}$

même couleur que Ap₁, avec quelques taches jaunâtres, les plus grosses racines sont gainées (rouille), même texture que Ap₁, structure particulaire, horizon très friable (plus que les 2 autres), et peu compact (moins que les 2 précédents), nombreuses racines (moins que



Ap₂) verticales, quelques unes sont horizontales, assez nombreuses galeries, horizon très poreux, dû à l'activité biologique, frais à très frais, la transition avec l'horizon inférieur est nette (2 à 3 mm), très irrégulière.

- 37 - 48 cm : A₂g

couleur de fond beige jaune clair avec des taches rouille (0,5 à 2 cm de diamètre) et des descentes brunes grises verticales de l'horizon supérieur, texture sableuse (sable moyen à fin) avec des concrétions indurées à très dures (0,5 à 2 cm), structure particulaire peu nette, cohésion irrégulière : descentes brunes friables peu compactes, matrice jaunâtre friable mais compacte, racines assez nombreuses, liées aux vides ou aux descentes grises de A₁, quelques galeries, horizons très frais, limite de consistance avec l'horizon inférieur, ondulée.

$-48 - 63 \text{ cm} : A_2$

le fond est de couleur gris beige clair avec de grandes taches brunâtres irrégulières, des taches ocres rouille irrégulières et quelques descentes grises, texture sableuse (sable moyen), sans concrétions, structure massive à tendance prismatique peu nette, horizon comapct induré avec des infiltrations très meubles autour desquelles on observe des gaines de réduction blanchâtres, peu de racines (dans les descentes meubles), quelques galeries, la transition est nette, assez régulière.

$-63 - 80 \text{ cm} : B_{t1}$

bariolage gris clair, ocre, en taches dans la masse, recouvrement sableux gris clair sur les faces des prismes, texture argilo-sableuse, structure nette, prismatique (prismes de 5 à 6 cm), peu friable, compact dans la masse, très peu de racines, porosité fissurale faible, rares galeries, très frais, la transition est peu nette.

$-80 - 110 \text{ cm} : B_{t2}$

identique à B_{t1} , à la différence d'une structure prismatique peu nette.

- 110 - 130 cm :

texture très grossière avec une certaine proportion d'argiles, couleur identique à celle de B_{t2} et B_{t1} , structure à tendance lamellaire.

III. LA BRESSE

C'est un sol lessivé à pseudogley.

 $A_{D}: O - 25 cm$

couleur brun gris, limono-sableux, matière organique bien incorporée, structure grumeleuse, meuble, grande activité biologique, nombreuses galeries, frais, transition irrégulière.

A₂: - 25 - 40 cm

couleur brun clair, quelques taches rouilles, limono-sableux, matière organique bien incorporée, structure polyédrique subanguleuse, meuble, grande activité biologique, nombreuses galeries, frais, transition irrégulière.

A/B : -40 - 65 cm

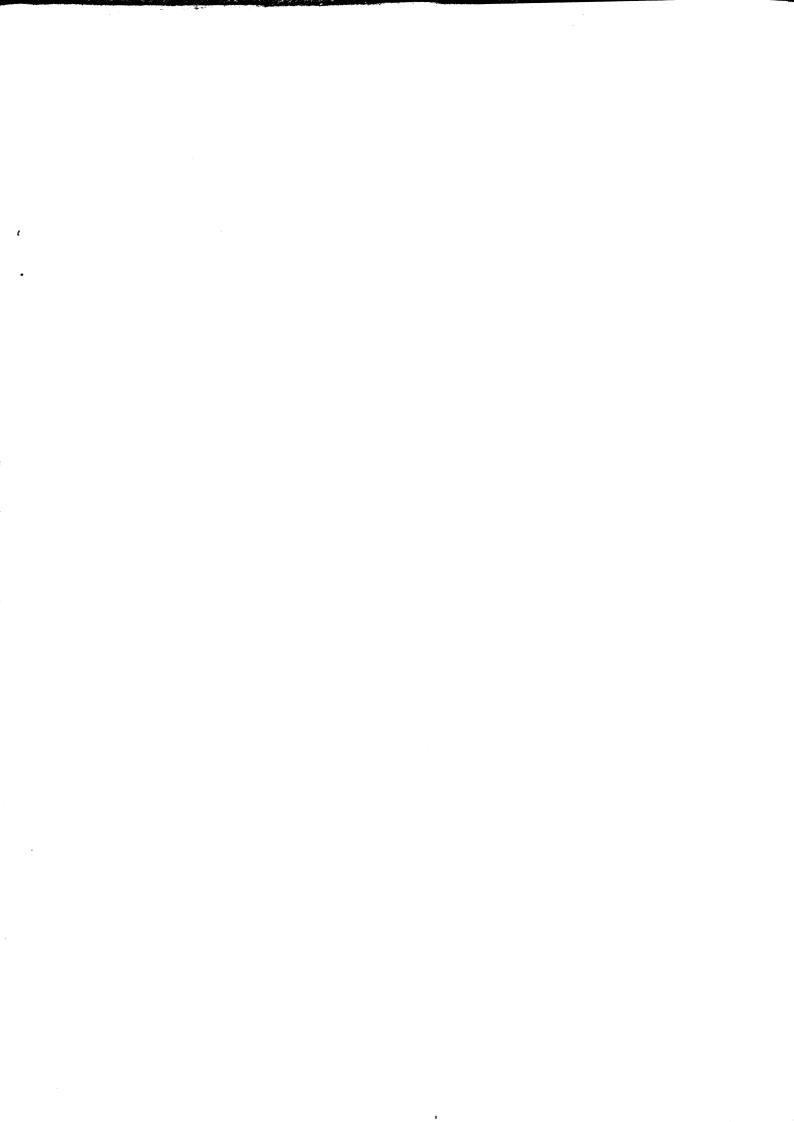
couleur ocre beige bariolé, limono-sableux, matière organique moins abondante, mais bien incorporée, structure prismatique avec sous structure polyédrique subanguleuse, un peu plus compact que le A_2 , activité biologique plus faible qu'en A_2 , transition régulière.

2 Btg: - 65 - 80 cm

couleur gris ocre bariolé avec des revêtements noirs (Fe, Mn) sur les agrégats, limono-sableux, matière organique beaucoup moins abondante, structure lamellaire assez compacte, très peu de racines, quelques galeries plus ou moins obliques.

2C - 80 - 100 cm

horizon très sec, complètement induré, ocre gris bariolé.



ANNEXE III

DÉTERMINATION DES LOMBRICIENS

GENRE	ESPECE C.	ATEGORIE ECOLOGIQUE			
Lumbricus	terrestris (L.em. Sims 1973)	épi-anécique			
Lumbricus	centralis Bouché 1972	épi-anécique			
Lumbricus	festivus (Sav. 1826)	épi-anécique			
Lumbricus	castaneus (Sav. 1826)	épigé			
Lumbricus	rubellus rubellus Hoffm. 1843	épigé			
Nicodrilus	caliginosus meridionalis Bouché 197	2 anécique			
<i>Nicodrilus</i>	caliginosus caliginosus (Sav. 1826)	endogé			
Allolobophora chlorotica chlorotica (Sav. 1826) forme verte : épi-endogé forme albinique : endogé					
Microscolex	dubius (Flechter 1887)	épi-endogé			



ANNEXE IV

LIGNES DIRECTRICES PROPOSÉES PAR MC KEAGUE POUR ESTIMER LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE A SATURATION KS

H1 Ksat > 12 m.j $^{-1}$ (50 cm h $^{-1}$)

- texture grossière (sable grossier), friable, pas de strate de matériaux plus fins,
- 2) grosses fissures (> mm) étendues à travers l'horizons ; la fissuration forme des polygones de taille inférieure à 20 cm,
- 3) plus de 0,5 % de l'horizon est occupé par des biopores (approximativmeent 400 pores (4 mm Ø) par m2) de diamètres supérieurs à 2 mm. Au moins la moitié de ces pores traverse l'horizon,
- 4) structure nette séparée par des vides visibles à l'oeil nu. Le matériau se fragmente très facilement,
- 5) combinaisons de biopores, fissures, vides interagrégats qui ensemble sont équivalents à 2), 3), 4).

H2 de 4 à 12 m.j $^{-1}$ (16,7 à 50 cm.h $^{-1}$)

- texture de sable fin avec très peu d'éléments fins ou de limons moyens, friable, non compressés,
- 2) fissures visibles à l'oeil nu mais inférieur à 2 mm de largeur à travers le profil, les primes délimités par les fissures sont de taille inférieure à 20 cm,
- 3) biopores de diamètre supérieur à 2 mm occupent 0,2 à 0,5 % de l'horizon, et au moins la moitié d'entre eux traversent l'horizon, un grand nombre de petits biopores (0,5 à 2 mm) peuvent être équivalents à quelques gros biopores (Ø supérieur à 7 mm),
- 4) structure en blocs grossiers ou fins avec des vides séparant les agrégats partiellement,
- 5) combinaison de bioperes, fissures et vides interagrégats qui ensemble équivalent à 2), 3), ou 4).



M1 de $1 \text{ à 4 m.j}^{-1} (4.2 \text{ à 16.7 cm.h}^{-1})$

- 1) texture de limon et sable fin à sable fin limoneux, sans structure, pas de couche de matériaux plus fins, non tassé,
- 2) approximativement 0,1 à 0,2 % de biopores de diamètre supérieur à 2 mm. Quelques uns traversent l'horizon, très peu de gros biopores (> 7 mm), peu de structure, texture plus fine que sable limoneux,
- 3) structure en blocs de taille variable, les pores interagrégats sont très étroits, peu de biopores à travers le profil, texture plus fine que limono-sableux si non compressé,
- 4) combinaisons qui équivalent à 1), 2) ou 3).

M2 de 0,4 à 1 m.j $^{-1}$ (1,7 à 4,2 cm.h $^{-1}$)

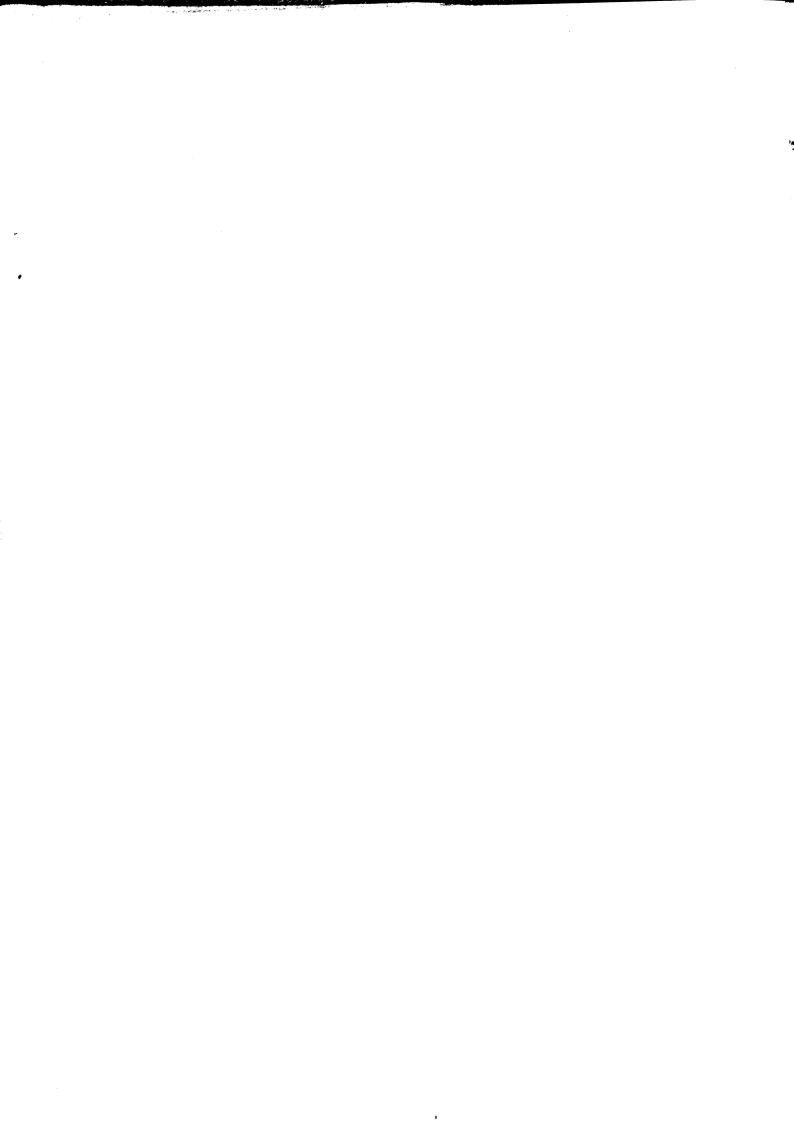
- sable fin à limon sableux avec des fines bandes de matériaux plus fins, sans structure, très peu de biopores à travers l'horizon,
- 2) faiblement structuré, matériaux limoneux ou argileux modérément aggloméré, moins de 0,1 % du volume est occupé par des biopores, quelques uns traversent l'horizon,
- 3) agrégats moyens à grossiers, limoneux ou argileux avec des vides interagrégats très fins, visibles in situ et moins de 0,02 % de la surface occupée par des biopores (approximativement 15 biopores (4 mm) par m²),
- 4) combinaison qui équivalent à 2) ou 3).

M3 de 0,1 à 0,4 m.j $^{-1}$ (0,42 à 1,7 cm.h $^{-1}$)

- sans structure, sables et limons stratifiés, friable mais relativement dense, avec moins de 0,02 % de la surface occupée par des biopores traversant l'horizon,
- 2) matériaux limoneux sans structure, friable mais relativement dense, non tassé, moins de 0,02 % de biopores,
- 3) matériaux argileux avec une structure en blocs de taille moyenne, les agrégats sont liés entre eux, moins de 0,02 % de biopores traversant l'horizon.

L1 de 0,04 à 0,1 m.j $^{-1}$ (0,17 à 0,42 cm.h $^{-1}$)

- 1) matériaux sableux avec des strates limoneuses ou argileuses continues d'au moins l cm d'épaisseur, peu de biopores,
- structure grossière en bloc, non compacté, de matériaux limoneux ou argileux, les agrégats sont étroitement liés.



- L2 de $0.004 \text{ à } 0.04 \text{ m.j}^{-1} (0.017 \text{ à } 0.17 \text{ cm.h}^{-1})$
 - 1) matériaux sableux à limoneux cimentés ou fortement compressés, densité apparente élevée ($d_a = 2$), la plupart des vides sont comblés par des matériaux fins), aucun biopore,
 - 2) structure massive, matériaux limoneux à argileux tassés, avec une densité apparente moyenne, aucun biopore.

L3 $< 0.004 \text{ m.j}^{-1} (< 0.017 \text{ cm.h}^{-1})$

- matériaux sableux à limoneux indurés avec suffisamment d'éléments fins pour colmater les vides intergranulaires,
- 2) matériaux argileux compressés, avec aucun vide visible,
- 3) horizon continu fortement cimenté.

N'étant pas sûr de mes traductions j'ai rajouté le texte

original:

H1 > 50 cm/h

1. Texture coarser than fine sand, friable, no strata of finer material.

2. Large cracks (≥ mm) extend through the horizon; cracking pattern forms polygons <20 cm across.

3. More than 0.5% of the horizon occupied by biopores ≥ 2 mm in diameter (approximately 400, 4-mm biopores \cdot m⁻²), at least one-half of the biopores extend through the horizon.

4. Strong, fine blocky (or granular) structure with readily visible voids separating most peds; the material

separates readily into peds.

5. Combinations of biopores, cracks, and pedality that together are equivalent to 2, 3, or 4. For example, 0.2% bipores ≥ 2 mm and moderate fine to medium blocky structure would probably give a K_{sat} value in the H1 class.

H2 16.7-50 cm/h

- 1. Texture of fine sand with very little finer material or of loamy medium or coarser sand, friable, not compressed.
 - 2. Cracks narrower than 2 mm but visible to the

naked eye through the horizon; polygons outlined by the cracks are <20 cm across.

3. Bipores ≥2 mm in diameter occupy 0.2 to 0.5% of the volume of the horizon and at least one-half of them are continuous through the horizon (large numbers of small biopores 0.5 to 2 mm, or a few larger bipores ≥7 mm may be equivalent).

4. Moderate to strong, fine to medium blocky structure with readily visible planar voids only partly sep-

arating peds.

5. Combinations of cracks, biopores, and interped voids that together are equivalent to 2, 3, or 4.

M1 4.2-16.7 cm/h

1. Texture of loamy fine sand to fine sandy loam, structureless, no strata of fine material, not compressed.

2. Approximately 0.1 to 0.2% bipores ≥ 2 mm, some of which extend through the horizon: rare large

(≥7 mm) bipores; structureless or weak structure; texture finer than fine sandy loam if not compressed.

3. Moderate fine or medium blocky, or moderate to strong, medium to coarse blocky structure with narrow interped voids; few biopores extend through the horizon; texture finer than fine sandy loam if not compressed.

4. Combinations of features that together are equiv-

alent to 1, 2, or 3.

M2 1.7-4.2 cm/h

1. Fine sand to loamy sand with thin bands of finer material, structureless or platy, very few biopores through the horizon.

2. Structureless or weakly structured, moderately packed loamy or clayey material with <0.1% bio-

pores, some of which traverse the horizon.

3. Moderate, medium to coarse blocky, loamy or

clayey material with thin interped voids visible in situ and <0.02% biopores (equivalent to approximately 15 biopores per m² of 4-mm diameter).

4. Combinations of biopores and interped voids that

are equivalent to 2 or 3.

M3 0.42-1.7 cm/h

1. Structureless, stratified sandy and silty material, friable but moderately dense, with <0.02% biopores that traverse the horizon.

2. Structureless loamy material, friable but moderately dense, not compressed, with <0.02% biopores.

3. Clayey material with weak to moderate blocky structure, peds tightly accommodated and adherent, with <0.02% biopores that traverse the horizon.

جن.

L1 0.17-0.42 cm/h

1. Sandy material with continuous silty or clayey

strata 1 cm thick or more and rare biopores.

2. Massive to weak coarse blocky noncompacted loamy or clayey material with tightly accommodated peds (if any) and rare biopores.

L2 0.017-0.17 cm/h

1. Cemented or strongly compressed sandy to loamy material of high bulk density (approximately 2 g · cm⁻³) with most of the interparticle voids filled by fine material, and no biopores.

2. Massive, compressed loamy or clayey material with no biopores and moderate to high bulk density.

· L3 0.017 cm/h

- 1. Indurated sandy to loamy material with enough fine material to fill intergranular spaces (some duric horizons).
- 2. Massive, compressed clayey material with no visible conducting voids.
 - 3. A continuous, strongly cemented placic horizon.

, ·