Pull 135

ENSAM
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

USTL
UNIVERSITE DES SCIENCES
ET TECHNIQUES DU
LANGUEDOC

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES

AGRONOMIE : Option PEDOLOGIE

ESSAI D'APPRÉCIATION DE LA POROSITÉ LOMBRICIENNE D'UN SOL LIMONO-SABLEUX ALLUVIAL

Analyse méthodologique

par Maria Leonor LOPES ASSAD

Mémoire de DEA présenté le 5 Octobre 1984
devant le jury d'examen:

MM. E. SERVAT : ENSAM
M. BOUCHE : INRA
J.C. FAVROT : INRA
J.P. LUC : ENSAM

ENSAM
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

USTL
UNIVERSITE DES SCIENCES
ET TECHNIQUES DU
LANGUEDOC

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES

AGRONOMIE : Option PEDOLOGIE

ESSAI D'APPRÉCIATION DE LA POROSITÉ LOMBRICIENNE D'UN SOL LIMONO-SABLEUX ALLUVIAL

Analyse méthodologique

par Maria Leonor LOPES ASSAD

Mémoire de DEA présenté le 5 Octobre 1984
devant le jury d'examen:

MM. E. SERVAT : ENSAM
M. BOUCHE : INRA
J.C. FAVROT : INRA
J.P. LUC : ENSAM

ENSAM
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

USTL
UNIVERSITE DES SCIENCES
ET TECHNIQUES DU
LANGUEDOC

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES

AGRONOMIE : Option PEDOLOGIE

ESSAI D'APPRÉCIATION DE LA POROSITÉ LOMBRICIENNE D'UN SOL LIMONO-SABLEUX ALLUVIAL

Analyse méthodologique

par Maria Leonor LOPES ASSAD

Mémoire de DEA présenté le 5 Octobre 1984
devant le jury d'examen:

MM. E. SERVAT : ENSAM
M. BOUCHE : INRA
J.C. FAVROT : INRA
J.P. LUC : ENSAM

REMERCIEMENTS

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

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

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

Dans mon esprit, sont également associés à ces remerciments tous les membres du Laboratoire de Science du Sol de l'INRA-ENSAM, qui ont bien voulu me consacrer quelques moments, notamment MM. J. MOINEREAU, P. HERMANN, M. VOLTZ et S. CONVENTI , ainsi que Monsieur J.P. LUC , de la Chaire de Machinisme Agricole Genie Rural de l'ENSAM.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude auprès de M. BOURLET, de la Station de Science du Sol de l'INRA-Avignon, pour la précieuse aide lors des mesures de densité apparente avec la double-sonde gammamétrique LPC-INRA.

Je remercie également M. Claude CHEVALIER, du domaine expérimental de l'INRA à St. Laurent de la Pree qui fut d'un sécours précieux lors de ma mission en Charente Maritime.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude auprès de mes collègues du CEPE-CNRS, notamment Jean-Christophe HEIDET, Joelle FISCHER et François MESLEARD pour les discussions fructueuses lors de la réalisation de ce travail.

Je voudrais également exprimer ma sincère reconnaissance à M. DE CAZENOVE, propriétaire du Chateau de Teillan , qui a permis les essais relatifs au site d'Aimargues , en m'accueillant très gentiment sur sa propriété.

Enfin, j'exprime ici ma gratitude à Mlle. MARTINIEZ, du CROUS-Montpellier, et à M. CATRIX, de l'IFARC-GERDAT, pour tout l'appui qu'ils m'ont apporté.

PLAN DU MEMOIRE

- ESSAI D'APPRECIATION DE LA POROSITE LOMBRICIENNE D'UN SOL LIMONO SABLEUX ALLUVIAL
Analyse methodologique.

INTRODUCTION..... 1

I- ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE..... 3
1. REFERENCES CONCERNANT LE TRANSFERT DE L'EAU DANS LES SOLS SATURES..... 3
1.1. Rappel des principes..... 3
1.1.1. Les trois phases du sol..... 3
1.1.2. L'état énergétique de l'eau du sol 4
1.1.3. Les principes fondamantaux des mouvements de l'eau dans le sol..... 5
1.1.4. La Loi de Darcy..... 5
1.2. Considérations générales sur la mesure de k en mileu saturé..... 6

2. ROLE DES VERS DE TERRE DANS LE SOL..... 8
2.1. Aspects généraux..... 8
2.2. Quelques références sur le rôle des vers de terre dans le sol..... 10
2.2.1. Position des vers de terre dans l'ecosystème terrestre..... 10
2.2.2. Les vers de terre et la dynamique de la matière organique..... 10
2.2.3. Le travail physique des vers de terre dans les sols..... 11
a) l'action des turricules..... 12
b) le rôle des galeries..... 12
c) l'influence sur la porosité..... 12
d) l'influence sur la structuration du sol..... 13

3. POROSITE DU SOL ET DYNAMIQUE HYDRIQUE..... 13
3.1. Porosité du sol et circulation de l'eau..... 13
3.1.1. Taille des pores et circulation de l'eau..... 14
3.1.2. Forme des pores et circulation de l'eau..... 14
3.1.3. Nature des pores et circulation de l'eau..... 14
3.1.4. Connection entre les pores et écoulement de l'eau 15
3.1.5. Macroporosité fonctionnelle et macroporosité totale 16
3.1.6. Les approches pour l'étude de la porosité en vue de l'estimation de la conductivité hydraulique du sol. 16
3.2. Quelques résultats concernant le rôle des vers de terre vis à vis de l'écoulement 17

II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL 19
1. Objectifs généraux 19

2. Description du protocole experimental 19
2.1. Evaluation et caractérisation de la population de vers de terre 20
2.1.1. Description de la méthode physico-éthologique de prélèvement de vers de terre 20
2.1.2. Interprétation des résultats 21

2.2. Mesure de la conductivité hydraulique à saturation .. 21
2.2.1. Interprétation des résultats 23

2.3. Evaluation de la macroporosité biologique dûe aux vers de terre..... 23
2.3.1. Coloration de la paroi des galeries de vers de terre 23
2.3.2. Identification et quantification de la macroporosité biologique 24

2.4. Evaluation de la porosité du sol 25
2.4.1. Mesure de la densité apparente 25
2.4.2. Evaluation de la densité réelle 26
2.4.3. Evaluation de la macroporosité totale du sol 26
2.5. Traitement des données 27

3. CONSIDERATIONS FINALES 27

III - RESULTATS ET DISCUSSION 28
1. AIMARGUES
1.1. Description du milieu 28
1.1.1. choix du site 28
1.1.2. localisation géographique 28
1.1.3. climat 28
1.1.4. topographie 29
1.1.5. végétation 29
1.1.6. caractérisation pédologique et géologique 29

1.2. Nature des observations et des mesures 30
1.2.1. Aspects généraux 30
1.2.2. Evaluation de la population de vers de terre .. 30
1.2.3. mesure de la conductivité hydraulique 31
1.2.4. Caractérisation du réseau de galeries 31
1.2.5. Evaluation de la densité apparente 32
1.2.6. Evaluation de la densité réelle du sol 32
1.2.7. Evaluation de la micro et de la macroporosité du sol 32

1.3. Analyse et interprétation des résultats 33
1.3.1. Caractérisation de la population de vers de terre 33
1.3.2. Variabilité spatiale de k 33
1.3.3. Variabilité spatiale du réseau des galeries de vers de terre 34
1.3.4. Comparaison entre volume , longueur des galeries et valeur mésurée de k 35

1.3.5. Estimation du réseau de galeries 36
1.3.6. Comparaison volume de galeries et densité apparente du sol 37
1.3.7. Comparaison entre la macroporosité biologique dûe aux vers de terre et la macroporosité du sol 37
1.3.8 Considérations sur les valeurs de longueur mésurée et calculée 38

2. POLDER DE MOUEZE-BROUAGE
2.1. Introduction 39
2.2. Description du milieu..... 39
2.2.1. Caractéristiques des profils étudiés..... 39
2.2.2. Caractéeristiques des lombriciens introduits ... 40
2.3. Nature des mesures et des observations 40
2.3.1. Evaluation de la population de lombriciens 40
2.3.2. Mesure de ks..... 40
2.3.3. Coloration des parois des galeries et évaluation du réseau 40
2.4. Analyse et interprétation des résultats 40
2.4.1. Sur la population prélevée 41
2.4.2. Sur les valeurs de ks 41
2.4.3. Sur le réseau de galeries des lombriciens 41

CONCLUSION 43

BIBLIOGRAPHIE 45

ANNEXES
ANNEXE I - CLASSIFICATION SUGGEREE PAR MAC KEAGUE
ANNEXE II - MESURES DE DENSITE APPARENTE
ANNEXE III - DONNEES PEDOLOGIQUES DU POLDER DE MOUEZE-BROUAGE

INTRODUCTION

L'un des objectifs majeurs de l'aménagement rural, soit en milieu temperé, soit en milieu tropical, est la maîtrise de l'eau. Par suite, la dynamique de l'eau dans le sol est l'objet d'un intérêt constant, autant de la part des aménageurs que des scientifiques.

La connaissance de cette dynamique hydrique implique alors non seulement une étude approfondie des mécanismes physiques des mouvements de l'eau, mais aussi une étude des différents facteurs qui peuvent les influencer, de la porosité du sol en particulier. La macroporosité, qui commande au premier chef la circulation de l'eau libre dans la couverture pédologique, est une conséquence directe de plusieurs processus. Ceux-ci peuvent être de nature physique (gonflement, retrait, fissuration), résulter de l'activité biologique (galeries de la faune édaphique, racines, etc); où encore être provoqués par des actions anthropogéniques, comme les interventions culturales (sous-solage, labour, etc).

Or, nous constatons que si les études sur la porosité structurale sont nombreuses, peu de travaux prennent en compte la porosité biologique, et celle ci reste encore très peu connue.

Avec ce mémoire nous voulons précisement contribuer à une meilleure connaissance de la macroporosité du sol d'origine biologique. Parmi les diverses formes de cette porosité liée à la faune du sol (fourmis, termites, larves d'insectes, etc) nous étudierons essentiellement les galeries dûes aux lombriciens, plus connus comme vers de terre.

Ce choix a été guidé par la possibilité de disposer des connaissances déjà acquises sur leur comportement dans l'écosystème terrestre et aussi par l'importance de ces animaux tant du point de vue quantitatif que qualitatif.

Nous avons finalement comme objectifs:

- de caractériser de manière quantitative le réseau de galeries de vers de terre d'un sol considéré comme homogène;

- de relier la morphologie de ces biopores à d'autres paramètres du sol, à savoir:
  * les valeurs de la conductivité hydraulique et de la densité apparente, mesurées sur le terrain;
  * l'importance de la macro et de la microporosité du sol appreciée à partir de mesures realisées au laboratoire;

- d'étudier la variabilité spatiale de ces différents paramètres, afin de verifier la validité de la méthode utilisée.

En effet, notre travail fait suite au D.A.A. de Thierry

DURET (1983) qui a mis au point le protocole expérimental que nous avons adopté. Il s'inscrit aussi dans le cadre d'un objectif plus global d'appréciation sur des bases morphologiques (celles du pédologue de terrain) du comportement hydrique du sol, notamment de sa permeabilité. Ce dernier paramètre, difficile à mesurer, est pourtant primordial pour définir les modalités d'aménagement ou d'utilisation du sol.

Pour atteindre ces objectifs le parti a été pris d'associer différentes méthodes de travail: observations de terrain (pédologie, cartographie), mesures "in situ" (physique du sol), prélevements de sols et d'animaux (études de laboratoire et écologie). Ces méthodes relevent de deux grandes disciplines - la Science du Sol et la Zooécologie - dont les approches et les connaissances sont indissociables.

Le plan de ce travail reflète donc les étapes et les principes enoncés ci dessus. Dans un premier chapitre nous ferons une revue bibliographique, synthetisant des connaissances relatives à la physique du sol et à la biologie des lombriciens. Ensuite, le protocole expérimental sera presenté, en decrivant les différentes étapes du travail. L'interprétation et l'analyse des résultats constituerent un troisième chapitre. Enfim, avec la conclusion, nous ferons une synthèse critique du travail realisé, en degagéant les perspectives que nous pouvons envisager.

I- ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1- REFERENCES CONCERNANT LE TRANSFERT DE L'EAU DANS LES SOLS SATURES

Les études sur le transfert de l'eau dans le sol imposent, d'une façon générale, la distintion entre le cas du milieu saturé et celui du milieu non saturé. Les lois de transfert sont plus simples dans le premier cas; et dans le domaine de la recherche scientifique on peut considérer que les études en milieu saturé sont un préalable à celles qui concernent le milieu non saturé.

Toutefois, le mot saturation doit tout d'abord être precisé, pour ne pas créer de faux problèmes.

En effet, le flux en milieu saturé suppose un système biphasé eau-sol, où l'air inclus dans le milieu est remplacé par le liquide. Or, il est extrêmement difficile d'humecter un échantillon de terre sans emprisonner des quantités plus ou moins importantes d'air. Et dans la réalité du terrain, l'eau ne remplit pas toujours la porosité totale. Un sol, ou une partie de ce sol, passe rapidement de l'état non saturé à l'état saturé,et vice-versa; car en realité ils ne sont pas vraiment separés.

Dans le cadre de ce mémoire, nous parlerons de saturation pour des raisons de simplicité , sachant qu'il s'agit plutôt d'un phénomène de quasi-saturation, où le sol doit, en principe, avoir une proportion importante de sa porosité occupée par l'eau. Le comportement du fluide doit correspondre alors aux lois fondamentales de l'hydraulique.

Nous allons tout d'abord faire un rappel des principes fondamentaux qui contrôlent le mouvement de l'eau dans le sol et ensuite nous ferons une discussion succinte sur la mesure de la conductivité hydraulique à saturation.

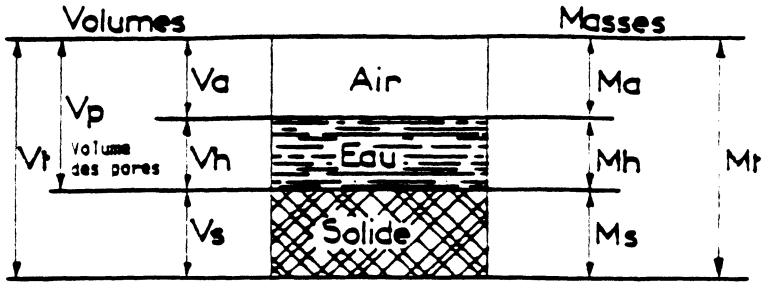
1.1- RAPPEL DES PRINCIPES
(HILLEL,1974; HENIN,1977; BOUMA 1977; LUC,1977; VACHAUD,1981.)

1.1.1- Les trois phases du sol

Le sol est considéré comme un milieu à trois phases: la phase solide, la phase liquide et la phase gazeuze. La phase solide est formée des constituants minéraux de taille variée ainsi que de macromolécules organiques qui s'organisent en agrégats, dont l'empilement conduit à la structuration du sol.

La phase liquide est localisée dans la porosité qui est considerée comme totalement ou pratiquement remplie quand le sol est saturé; mais généralement seul un film d'eau se trouve au contact des particules de la phase solide. La phase gazeuze est réprésentée par l'atmosphère du sol qui, à la capacité de rétention, occupe la macroporosité.

SOL _ Relations Volumes – Masses



MASSE VOLUMIQUE DU SOLIDE → **DENSITE DU SOLIDE**

(1) $$\rho_s = \frac{Ms}{Vs}$$

2,6 à 2,7 gr/cm3

(2) $$d_s = \frac{\rho_s}{\rho_{eau}}$$

2,6 à 2,7 (sans dimension)

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE A L'ETAT SEC → **DENSITE APPARENTE A L'ETAT SEC**

(3) $$\rho_a = \frac{Ms}{Vt}$$

(4) $$d_a = \frac{\rho_a}{\rho_{eau}}$$

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE TOTALE (ou humide) → **DENSITE APPARENTE TOTALE**

(5) $$\rho_t = \frac{Mt}{Vt} \simeq \frac{Ms+Mh}{Vs+Vh+Va} \text{ gr/cm3}$$

(6) $$d_t = \frac{\rho_t}{\rho_{eau}}$$

VOLUME MASSIQUE (sol sec)

(7) $$v_a = \frac{Vt}{Ms} = \frac{1}{\rho_a}$$

(ex. volume spécifique)

Volume unité de masse : cm3/gr
indice du degré de compaction

POROSITE : p

(8) $$p = \frac{Vp}{Vt} = \frac{Va+Vh}{Va+Vh+Vs}$$

(sans dimension) varie entre 0,3 et 0,6
s'exprime aussi en pourcentage (30 à 60 %) lié à texture p (texture grossière) < p (t.fine) ne donne aucun renseignement sur disposition des pores.

INDICE DES VIDES : e

(9) $$e = \frac{Va+Vh}{Vs} = \frac{Vp}{Vt-Vp}$$

0,3 < e < 2

utilisé en mécanique des sols.

avantage : Si Vp change, seul le numérateur de l'équation de définition change.

HUMIDITE MASSIQUE – h

(10) $$h = \frac{Mh}{Ms}$$

Rapport masse-eau sur masse de sol sec. Exprimé en %.
Sol sec : séché à l'étuve à 105° – poids constant.
$H = \frac{M1 - M2}{M2}$ Expression en hauteur d'eau : $\frac{Mh}{S}$

h varie de 25 à 60 % suivant densité apparente du sol sec (4).
dans les tourbes, h peut dépasser 100 %.

TENEUR EN EAU VOLUMIQUE – θ = Capacité en eau

(11) $$\theta = \frac{Vh}{Vt} = \frac{Vh}{Vs+Vp}$$

plutôt sur Vt que sur Vs
à saturation sols sableux : θ = 40 à 50 %
" " argileux θ = 60 %

DEGRE DE SATURATION θs

(12) $$\theta_s = \frac{Vh}{Vp} = \frac{Vh}{Va+Vh}$$

varie de 0 à 100 %

TENEUR RELATIVE EN AIR (indice d'aération)

(13) $$p_a = \frac{Va}{Vt} = \frac{Va}{Vs+Vh+Va}$$

(13b) $$p_a = p - \theta$$

FIGURE 1 : Principaux paramètres du sol – relations volumes masses. In: BOULAINE, 1978.

Cette caractérisation du sol nous permet la définition de plusieurs paramètres dont les plus importants sont présentés dans la figure 1.

Ces premiers paramètres expriment la proportion de liquide dans un échantillon de sol , mais ils restent insuffisants pour caractériser le système sol - eau. En effet, suivant qu'il s'agit d'un matériau sableux ou argileux, le système sol-eau aura un comportement différent pour une même humidité. Ceci a amené la caractérisation du sol dans son état énergétique, ce qui permet une interprétation plus rigoureuse de l'état de l'eau dans le sol.

1.1.2- L'état energétique de l'eau du sol

La particule d'eau dans le sol est soumise fondamentalement à deux formes d'énergie: cinétique et potentielle.

L'énergie cinétique dans le sol est dûe à la vitesse du fluide dans les pores. Mais, comme la taille des pores est restreinte et, que par conséquent les mouvements sont lents (1), l'énergie cinétique est considerée comme négligéable.

L'énergie potentielle d'un corps est, en physique classique, conditionnée par sa position dans un champ de forces. Dans le sol, l'énergie potentielle totale (ψ_t) est, actuellement, définie en termes de trois paramètres expérimentalement accessibles:

* potentiel gravitaire ou potentiel de position (z)
  défini par la position du liquide par rapport à un plan horizontal de réference (en général, la surface du sol)

* potentiel de pression ou potentiel matriciel (ψ_p ou h)
  défini par la pression de l'eau dûe aux effets de liaison autour des particules solides et aux effets de capillarité dans les pores

* potentiel osmotique (ψ_o)
  dû à la concentration saline et qui est considéré comme négligéable en dehors du cas des sols halomorphes ou des sols fortement fertilisés

La charge hydraulique (H) est la somme des potentiels de position et matriciel (exprimés par unité de poids) et se confond avec le potentiel total, lorsque les termes cinétique et osmotique sont nuls.

---

(1) LOI DE POISEUILLE - elle établit que le débit (Q) est proportionnel à la quatrième puissance du rayon (r) du capillaire et à la pression differentielle (P) entre les extremités de de celui-ci; et inversement proportionnel à la longueur (L) du capillaire et à la viscosité (N) du liquide.

$$H = \psi_t = h + z$$

où H - charge hydraulique
ψ_t - potentiel total par unité de poids
h - potentiel matriciel par unité de poids
z - potentiel de position par unité de poids

REMARQUES: * z est en général négatif car la surface du sol est considérée comme plan de référence et oz est positif vers le bas;
* h répresente l'énergie de rétention de l'eau par le sol: h<0 - sol non saturé
h=0 - sol saturé

1.1.3 - Les principes fondamentaux des mouvements de l'eau dans le sol

L'eau du sol, et les substances dissoutes, subissent des mouvements verticaux (ascendant et descendant) et latéraux sous l'action de la gravité, de la capillarité,en relation avec le climat et la demande des végétaux.

Ces mouvements sont faits à travers les pores et se produisent lorsque l'énergie potentielle varie d'un point à l'autre. Ainsi, les transferts d'eau ont lieu dans le sens des énergies décroissantes et la charge hydraulique est le paramètre le plus fréquemment utilisé pour quantifier l'état énergétique de l'eau du sol.

Mais, il faut remarquer que le mouvement d'eau à travers les pores est limité par de nombreuses constrictions ou "étranglements", et occasionellement par des "cul-de-sacs". Ceux ci provoquent le phenomène de tortuosité, sous l'influence des differentes formes, tailles et directions des pores.

Pour cette raison, la vitesse de l'eau varie considérablement d'un point à l'autre et même le long d'un même parcours.

Pour simplifier, on utilise la notion de vitesse d'écoulement ou vitesse de DARCY, qui est considérée, dans l'échelle macroscopique, comme un vecteur de vitesse qui répresente la moyenne globale des vitesses microscopiques dans le volume total du sol.

1.1.4 - La Loi de Darcy

D'une façon générale, quel que soit le degré de saturation d'un sol, le flux d'eau est proportionnel au gradient de charge hydraulique et à la section au travers de laquelle l'eau circule. C'est, fondamentalement, ce que nous dit la LOI DE DARCY, établie en 1856:

$$q = - k S \, dH/dx$$

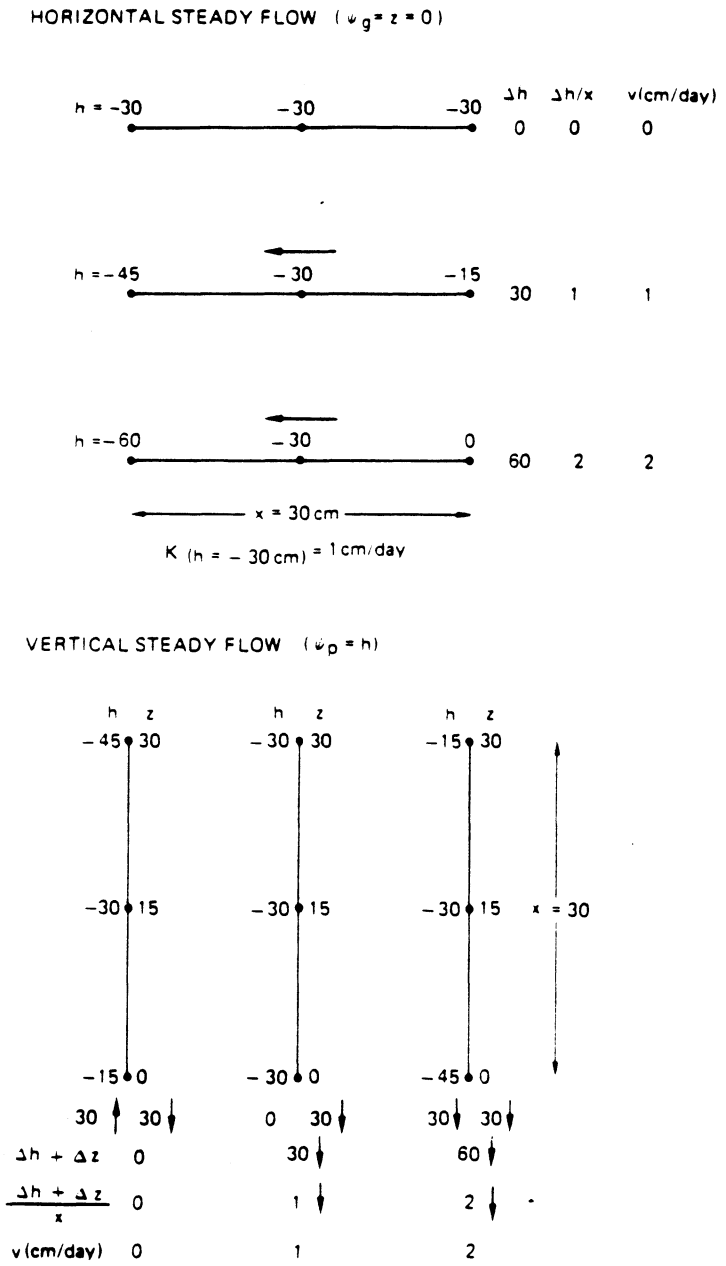


FIGURE 2 : Diagramme schématique illustrant l'importance de la conductivité hydraulique k comme une constante hydraulique. Le potentiel de pression au point central de chacune des six lignes est identique à h= -30 cm, mais le flux v est différent.
In: **BOUMA**, 1977.

où q - débit ou intensité de flux, c'est à dire, le volume d'eau écoulé par unité de temps
k - conductivité hydraulique, généralement exprimer en cm/s
S - section au travers de laquelle l'eau circule
dH- différence de charge hydraulique
dx- différence de distance sur laquelle dH est mesuré

* le signe négatif indique que le flux a lieu dans le sens des potentiels décroissants.

La conductivité hydraulique k constitue un des principaux paramètres de caractérisation des proprietés hydrodynamiques d'un sol et elle peut traduire son aptitude à laisser circuler un liquide.

Il est commun de voir l'expression vitesse de filtration comme synonyme de conductivité hydraulique. Mais, en vérité, k répresente une vitesse bien définie. C'est à dire, qu'il peut y avoir plusieurs vitesses dans un sol, dans un temps donné, avec des gradients de charge hydraulique variables. Mais il y a uniquement une valeur de k pour un potentiel de pression particulier (voir figure 2). Cet aspect peut être illustré en divisant la charge hydraulique en ses deux composants - le potentiel de pression (h) et le potentiel gravitationnel (z):

vitesse d'écoulement horizontal

$$v = -k\ dH/dx$$

vitesse d'écoulement vertical

$$v = -k\ d(z + h)/dz$$

$$v = -k\ (1 + dh/dz)$$

1.2 - CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA MESURE DE k EN MILIEU SATURE

La conductivité hydraulique k caractérise le sol du point de vue de l'écoulement de l'eau et suppose le sol saturé et en régime permanent (alimentation constante) (2).

L'écoulement en milieu saturé considère que le gradient moteur du mouvement de l'eau est la pesanteur (gradient gravitationnel), étant donné que le gradient de succion est nul.

La conductivité hydraulique traduit, donc, la résistance que le sol oppose à la circulation de l'eau.

Elle dépend de :

- la viscosité du liquide circulant,
- la porosité du sol,
- la distribution des pores (dans le cas des macropores,

---

(2) S'il s'agit d'un milieu non saturé, nous pouvons toujours appliquer la LOI DE DARCY, mais à condition de ne plus considérer la conductivité hydraulique comme constante. Elle sera fonction du potentiel de l'eau, car les forces de rétention des molécules d'eau augmentent en raison inverse à l'humidité.

s'ils sont plus ou moins verticaux, par exemple),
- la taille des pores

La mesure de k peut se faire en utilisant le gradient hydraulique égal à 1 (dh/dz = 1); et la conductivité hydraulique à saturation (ks) est obtenue lorsque le débit (dq/dt) devient approximativement constant.

Il existe plusieurs méthodes de détermination de la valeur de k, sur le terrain ou au laboratoire. Mais, quelles que soient les conditions de mesure, le comportement du sol vis-à-vis de l'eau nous impose quelques considérations sur les variations du coefficient k, pour un sol donné.

D'abord, il est rare, et même très rare, d'avoir un sol que nous pouvions considérer comme homogène, dans l'espace où il se distribue. Même pour un profil donné, l'homogénéité n'est pas atteinte, car les différents horizons présentent des structure, texture et porosité plus au moins différentes.

En effet, l'expérience montre que les discontinuités verticales de la valeur de k, et non les valeurs absolues, conditionnent la nature du flux à travers le profil. De telles discontinuités sont à l'origine du plancher des nappes (planchers imperméables). Un même profil peut présenter, donc, plusieurs écrans à l'infiltration, 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 milimètres d'épaisseur suffit à réduire de manière considérable la vitesse d'infiltration de l'eau au travers du profil; même si les horizons sous-jacents sont très perméables.

Mais, on observe aussi des variations de la valeur de k si on prolonge les mesures dans le temps, même dans un milieu considéré comme saturé; c'est-à- dire après avoir une première valeur de ks.

On peut considérer d'abord que les particules fines de la taille du limon peuvent obstruer certains pores. L'argile et l'humus, qui présentent des proprietés colloidales et sont plus ou moins gonflants, peuvent aussi modifier la valeur de k; car même si on utilise de l'eau pure, les sols renferment toujours une petite quantité des sels plus ou moins solubles, ou même très solubles, qui forment avec l'eau de percolation une solution d'électrolyte à une certaine concentration. Or, au fur et à mesure qu'on ajoute l'eau, cette solution varie, le gonflement des colloides se modifie et on a une variation de la valeur de k.

Un autre aspect à considérer est la présence de l'air piégé dans le sol au moment de l'humectation. Nous avons déjà remarqué que cet air peut empecher un remplissage de toute la porosité du sol par l'eau. Cette obstruction des pores par l'air peut venir aussi des dégagements gazeux provenant des fermentations.

Finalement, il faut considérer la temperature qui, en principe, doit rester constante au long de la mesure (ce que est impraticable sur le terrain), car la viscosité des liquides varie très rapidement avec la température et peut entraîner ainsi des variations de la valeur de k.

Après avoir signalé les principaux aspects du mouvement de l'eau dans le sol, voyons maintenant l'importance des vers de terre dans le sol.

2- ROLE DES VERS DE TERRE DANS LE SOL

La revue bibliographique que nous allons présenter a été entièrement basée sur des travaux publiés par M. **BOUCHE**, du Laboratoire de Zooécologie de l'INRA. Elle paraîtra peut-être très longue pour des pédologues et très succinte pour des zoologues. Cependant, notre but ici est de mettre en évidence l'importance des vers de terre dans notre écosystème, en dégagéant les bases de notre travail qui a pour objectif principal de relier la porosité biologique à l'écoulement de l'eau dans le sol.

2.1- ASPECTS GENERAUX

Les vers de terre se situent dans le Régne Animal parmi les **Métazoaires** et leur place à l'intérieur du phylum des **Annélides** est dans la classe des **Oligochètes**.

D'une façon générale, ils se caractérisent par un corps divisé en anneaux successifs - **les métamères** -, avec une anatomie à peu près semblable et dans laquelle les principaux organes se répètent régulièrement. La forme de leurs corps est cylindrique, de taille variable selon l'espèce ou sous-espèce.

Ce sont des animaux **saprophages**, se nourrissant de déchets organiques comme les feuilles mortes et les plantes en décomposition; plus rarement des déjections et cadavres d'animaux.

Il existe aujourd'hui une grande variété de familles, d'espèces et de sous-espèces de vers de terre, réflétant une évolution très ancienne. En effet, l'histoire des annélides remonte au Précambrien, à 700 millions d'années; et la métamérisation date d'au moins 570 millions d'années. Ces vers annelés ont subi de multiples diversifications et ont conquis progressivement tous les milieux, la mer, l'eau douce et enfin la terre.

Les vers de terre proprement dits existent actuellement en plusieurs espèces et sous-espèces. Pour les classer, **BOUCHE** (1972) propose une classification écologique basée sur différents

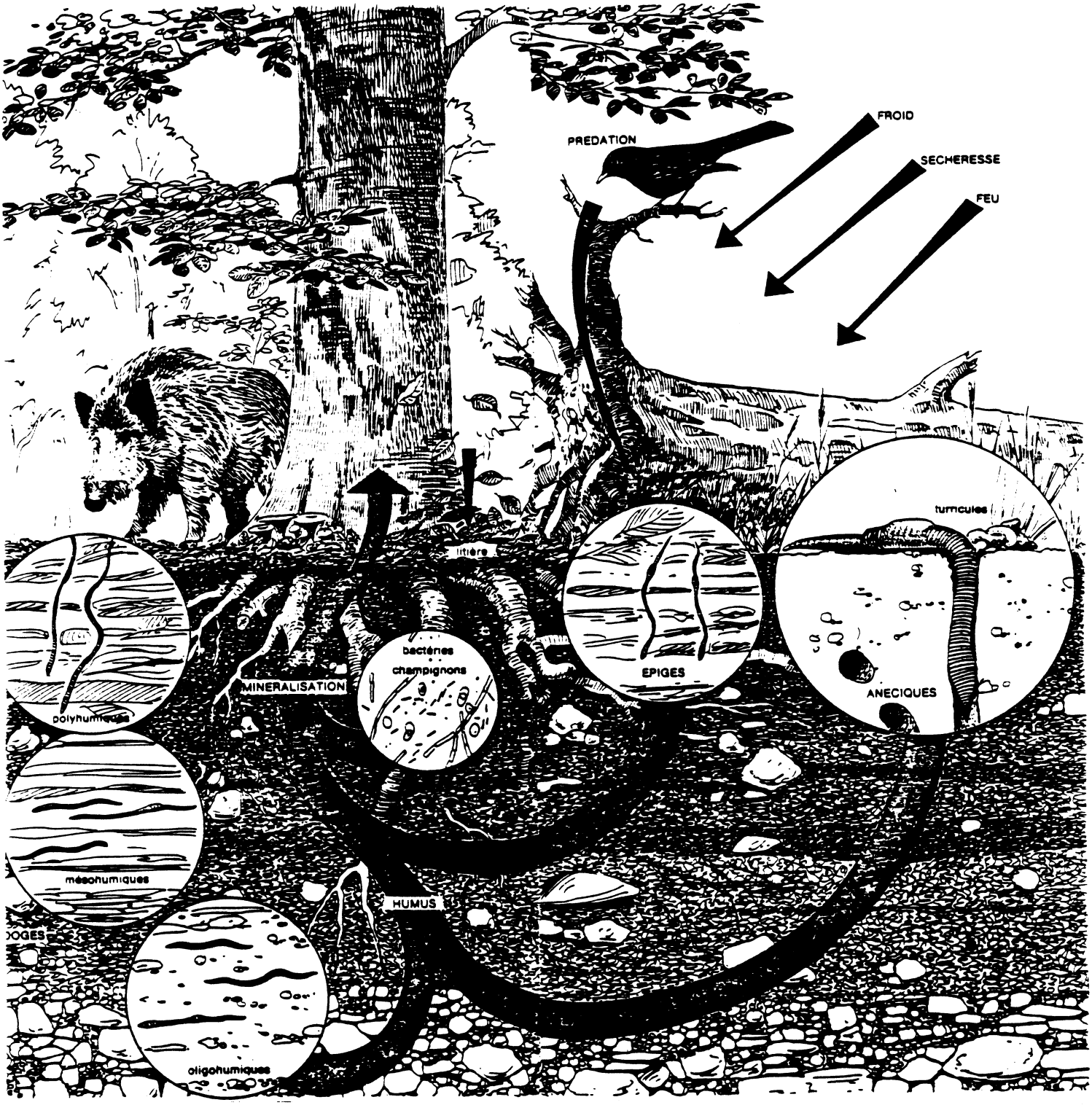


FIGURE 3 : Les vers de terre dans l'écosystème terrestre
In: **BOUCHE**, 1984.

facteurs:

- la distribution spatiale sur et dans le sol des différentes espèces et sous-espèces;
- la qualité des aliments disponibles;
- l'exposition aux agressions des antagonistes (prédateurs et parasites);
- les conditions de climat (sécheresses, gélées) et de pédoclimat (humidité, température);
- la nécessité de maintenir un flux de nourriture assurant la maintenance énergétique;
- la disponibilité en oxygène;
- le taux de réproduction (fortement lié aux impacts des agréssions des parasites, prédateurs, aléas climatique).

Ainsi, on distingue trois grandes classes de vers de terre (fig. 3):

- les **épigés** - occupent la surface du sol, dans les accumulations organiques (litières, troncs morts, fèces de bétail, etc); ils sont très exposés aux aléas climatiques et aux prédateurs, ayant comme compensation une démographie galopante dûe à un taux de réproduction très élevé. Ils se caractérisent aussi par leur homochromie (couleur caractéristique semblable à celle du milieu) et par des cocons résistants à la sécheresse. Ils répresentent environ 1% de la biomasse lombricienne.

- les **endogés** - vivent en permanence dans le sol et se nourrissent essentiellement à partir de la terre mélangée à de la matière organique. Comme ils sont relativement à l'abri des prédateurs et des contraintes climatiques, leur réproduction est souvent modeste. Constituant 20 à 50% de la biomasse lombricienne des sols fertiles en Europe, les endogés forment un groupe relativement hétérogène et on peut y distinguer 3 catégories:
  * les <u>oligohumiques</u> qui vivent en profondeur et se nourrissent de terre pauvre en matière organique;
  * les <u>mésohumiques</u> qui s'alimentent en sol moyennement riche, surtout dans les couches superficielles;
  * les <u>polyhumiques</u> qui sont des vers petits et filiformes, vivant soit près de la surface, soit le long des racines, et ingérant des particules organiques.

- les **anéciques** - sont de gros vers de terre qui creusent des galeries sub-verticales, où ils entraînent les débris organiques du sol dont ils se nourrissent, mélangés à de la terre prise en profondeur. Dans les sols fertiles de l'Europe tempérée ils répresentent environ 80% du poids des lombriciens et en France les adultes peuvent mesurer de 8 à 110 cm, les plus gros pouvant vivre plusieurs années. Les anéciques présentent normalement une coloration brune à brune-noirâtre, parfois irisée (mimetisme crépusculaire). En effet, ils sortent de leurs galeries généralement au crépuscule ou à la nuit, et leur pigmentation traduit une homochromie. Ces animaux se maintiennent, souvent, après un

déboisement ou même après un labour.

2.2 - QUELQUES REFERENCES SUR LE ROLE DES VERS DE TERRE DANS LE SOL

L'importance des vers de terre était déjà soulignée par **DARWIN** (1881); néanmoins, cette catégorie animale, souvent considérée comme primitive et inférieure, reste encore peu connue.

L'effet global sur l'écosystème terrestre des interactions entre lombriciens, sol, plantes, microorganismes et climat est rarement etudié et les méthodes utilisées sont souvent artificielles. Il s'ensuit que l'importance des vers de terre est négligée autant par les aménageurs et agriculteurs, que par les scientifiques.

Pour mieux encadrer ce travail et pour mieux comprendre le rôle de ces animaux, nous allons présenter quelques réferences sur leur influence sur l'écosystème terrestre. Il ne s'agit pas d'un étude approfondie; mais d'une revue de plusieurs des travaux publiés par **M. BOUCHE**. Dans un premier temps nous verrons la position des vers de terre dans l'ecosystème; ensuite nous passerons en revue leur rôle sur la dynamique de la matière organique et sur le comportement physique des sols.

2.2.1 - Position des vers de terre dans l'écosystème terrestre

Les lombriciens, plus connus comme vers de terre, occupent à peu près tous les sols, à l'exception des milieux très acides ou très artificialisés. Constituant une véritable réussite écologique, ils sont retrouvés sous forêt, en prairie, dans des jardins et dans les champs (tableau 1).

Ils répresentent une des plus importantes biomasses terrestres, comparable à celle des microorganismes. En milieu tropical cette biomasse semble être plus faible, mais en milieu temperé elle oscille entre 0,5 et 2 tonnes/ha , en poids vif.(**BOUCHE**,1972).

Animaux saprophages, ils rentrent dans la catégorie des consommateurs et assurent un bilan énergie biochimique assimilée / énergie biochimique produite < 1.

Par contre, ils n'agissent pas directement sur la dynamique des cultures ou d'autres êtres vivants de l'écosystème (hormis les microorganismes). C'est-à-dire, qu'ils ne tirent pas leur énergie d'une action antagoniste sur d'autres populations.

2.2.2 - Les vers de terre et la dynamioque de la matière organique

La décomposition de la matière organique du sol est fort liée aux actions des vers de terre, car presque tous les lombriciens y interviennent. Comme des animaux saprophages, ils

ingèrent un mélange de débris organiques et de terre et, d'après **BOUCHE**(1984), une tonne de lombriciens (soit une masse fréquente sur 1 hectare) ingère environ 250 tonnes de sol par an.

Le métabolisme des vers de terre modifie le milieu proprement dit et les produits de celui-ci. Ils peuvent agir, essentiellement, selon deux mécanismes:

- <u>enfouissement actif des débris végétaux de la litière dans le sol</u>
  ce mécanisme est observable pour les anéciques qui enfouissent au moins une partie de leurs aliments.
- <u>ingestion et digestion</u>
  le mélange débris organiques + terre ingeré par l'ensemble des vers de terre subit, dans leur tube digestif, deux actions:
  1- mécanique - fractionnement des débris organiques et brassage avec les éléments minéraux du sol;
  2- chimique et enzymatique - résultant des sécretions du tube digestif et qui conduit, d'une façon générale, à la lyse des éléments organiques.

Il faut remarquer que cette décomposition-digestion se fait à l'aide d'attaques microbiennes dans le sol et dans la cavité intestinale. Si la décomposition n'est pas totale, les lombriciens recyclent la matière organique morte en reingérant leurs fèces après une période d'incubation microbienne.

Le transit intestinal a aussi un autre effet: ce qui est avalé par le ver sera assimilé. Les assimilats seront incorporés dans les tissus et puis rejétés sous différentes formes:

- <u>molécules élaborées</u> constituants des dépôts périodiques de mucus abandonné au passage de vers;
- <u>molécules dégradées</u> (gaz carbonique, ammoniaque, urée,etc) ou <u>très dégradées</u> (azote, phosphore, carbone, etc.)

Ainsi, la minéralisation de la matière organique, classiquement attribuée aux microorganismes seulement, est actuellement l'objet d'études vérifiant le rôle des vers de terre dans le processus. **BOUCHE** (1982), à partir de mesures directes des flux de carbone et d'azote, attribue aux vers de terre au moins **20%** de la minéralisation totale.

2.2.3 - <u>Le travail physique des vers de terre dans les sols</u>

Si le rôle des vers de terre dans la minéralisation de la matière organique reste encore à préciser, leur rôle comme laboureurs du sol a été remarqué dès la fin du siècle dernier.

D'une façon générale, le travail physique des vers de terre dans le sol peut se distinguer par:

- l'action des turricules
- le rôle des galeries
- l'influence sur la porosité

- l'influence sur la structuration du sol.

a) <u>l'action des turricules</u>

Les turricules des vers de terre (dejéctions, excréments) sont de natures variées suivant les différentes espèces:

- les épigés, qui se nourrissent surtout de matières organiques, ont des réjets essentiellement carbonés;
- les endogés, se nourrissant de terre plus ou moins melangée à de la matière organique, laissent, dans la strate où elle a été consommée, des réjets surtout minéraux;
- les anéciques, qui se nourrissent à la surface et aussi dans le sol, font un brassage important de matières organiques et minérales.

b) <u>le rôle des galeries</u>

En général, les galeries de vers de terre ont, pour eux, deux fonctions: soit d'ingestion du sol, soit d'ouverture de voies de passage.

Les épigés ont une activité mécanique très réduite et creusent très peu leur milieu. Les endogés évacuent leur fèces dans leurs terriers. Par contre, les anéciques, creusant des galeries qui débouchent normalement à la surface, sont responsables d'une fraction importante de la macroporosité.

Ces galeries des anéciques forment, suivant les conditions de compacité du sol, un réseau anastamosé. Elles constituent un milieu aéré, bien drainé et abrité des à-coups climatiques, ce dont bénéficie le développement des racines et des microorganismes.

Une autre importance, encore peu connue et que nous essayerons d'approfondir dans ce travail, est l'influence du réseau de galeries sur les phénomènes d'écoulement de l'eau dans le sol. Même avec le peu de travaux qui ont été faits jusqu'à présent (et que nous discuterons plus avant), il n'est pas difficile de supposer que les reseaux de galeries jouent un rôle privilegié sur le comportement hydrique des sols. Il suffit de rappeler le diamètre de ces galeries, qui varie de 0.2 cm à 2.0 cm (voir LOI de POISEUILLE) et leur développement sur toute la hauteur du profil.

c) <u>l'influence sur la porosité</u>

Comme nous avons vu, les travaux mécaniques des anéciques dépendent des conditions du milieu. Ainsi, la quantité de rejets varie avec la nature du milieu.

D'après **BOUCHE** (1970), les vers de terre peuvent pénetrer dans le sol suivant trois mécanismes:

- ou bien ils utilisent des voies pré-existantes;
- ou ils agrandissent des galeries, par compaction latérale du sol qui a déjà une certaine porosité;
- ou encore, dans les sols compacts, les animaux creusent en absorbant de la terre.

S, test inversement lié à la stabilité structurale ; K, test directement lié à la stabilité structurale ; C p. 1000, carbone lié pour mille ; Ag_a, Ag_e, Ag_b, traduisent le p. 100 de sol agrégé respectivement après des prétraitements à l'alcool, à l'eau et au benzène.

Sologne Fosse n° 2	Ag_a %	Ag_e %	Ag_b %	S	K	C lié ‰
Sol 0-20 cm	10,9	5,0	10,6	1,12	5,12	25,6
"Sous-sol" 20-40 cm (moyenne	4,5	2,7	0,8	1,25	1,85	
"Sous-sol" 20-40 cm (déjections de vers	15,3	8,1	10,5	1,00	2,80	22,9
"Sous-sol" 20-40 cm (sans déjections	8,5	1,9	0	5,17	1,68	10,5

TABLEAU 2 : Importance du mélange des couches du sol par les vers de terre (d'après MONNIER, 1965). In: BOUCHE, 1972.

TABLEAU 3 : Classes de porosité du sol selon LUXMOORE, 1981.

Classe de porosité	Potentiel hydraulique de l'eau (mbar)	pF	diamètre équivalent (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.

Or, on peut admettre que l'augmentation de la porosité sera d'autant plus importante que le sol est plus tassé. Par contre, lorsque la porosité atteint un certain seuil, de nombreuses cavités sont obstruées par les vers de terre.

d) l'influence sur la structuration du sol

MONNIER (1965), en étudiant un sol de prairie permanente agé d'au moins 10 ans, a mesuré les caracteristiques structurales de turricules collectés à 20-40 cm de profondeur, et reconnaissables grâce à leur teneur en matière organique. Il a vérifié que ces turricules ont des caracteristiques proches du sol superficiel et très distinctes de celles du "sous-sol" à 20-40 cm, comme nous pouvons voir sur le tableau 2. Selon **BOUCHE** (1972), "des analyses effectués à partir de l'émission de rejets, tendent à montrer que la stabilité constatée aurait des causes variables dans le temps:

1°) une action directe des mucus et polysaccharides bactériens;
2°) un rôle prédominant des hyphes fongiques;
3°) une conséquence des processus d'humification;
4°) une résultante des brassages et compactions mécaniques du tube digestif des vers de terre."

3- POROSITE DU SOL ET DYNAMIQUE HYDRIQUE

Nous allons maintenant présenter les relations entre la porosité et les mouvements de l'eau, en insistant sur l'influence des vers de terre sur ces paramètres. Pour cela, nous nous sommes basés sur quelques travaux déjà publiés, principalement le mémoire de D.A.A. de Thierry **DURET** (1983). En effet, la revue bibliographique que nous pouvons y trouver répresente une bonne synthèse des travaux publiés jusqu'en 1983, à laquelle nous ajouterons des compléments.

3.1. POROSITE DU SOL ET CIRCULATION DE L'EAU

La porosité du sol est couramment définie comme le pourcentage du volume total de sol occupé par l'eau et par l'air. Cependant cette définition n'est pas suffisante. En effet, plus que l'importance du volume, la taille, la forme et la distribution des pores jouent un rôle déterminant sur la dynamique de l'eau.

Concernant la taille des pores, **LUXMOORE** (1981) propose trois classes de porosité, associées à trois comportements fondamentaux vis à vis des phénomènes physiques d'adsorption de l'eau du sol. Il introduit aussi la notion de diamètre équivalent de pore (voir tableau 3).

Cette notion part du principe que dans la nature les pores sont souvent tortueux et qu'ils ont rarement la configuration cylindrique idéale qui facilitérait les calculs des forces de capillarité (3). La notion de diamètre équivalent

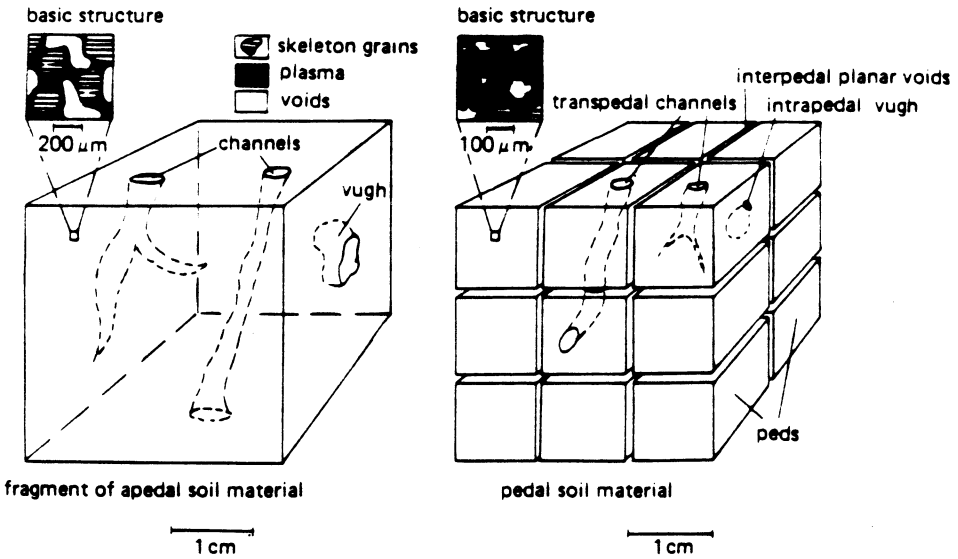
---

(3) Dans un pore cylindrique la force de capillarité qui retient un liquide est inversement proportionnelle à son diamètre.

TABLEAU 4 : Classes de porosité du sol selon **BREWER**, 1964.

CLASSE	SOUS-CLASSE	LIMITES	METHODES DE MESURE
Macropore	grossier	5 000 µm	à l'oeil nu
	moyen	2000-5000 µm	à l'oeil nu
	fin	1000-2000 µm	à l'oeil nu
	très fin	75 - 1000 µm	microscope et courbe de désorption
Mesopore		30 - 75 µm	microscope et courbe de désorption
Micropore		5 - 30 µm	microscope et courbe désorption
Ultramicropore		0,1 - 5 µm	microscope électronique

FIGURE 4 : Modèles simplfiés des pores des sols.
In: **BOUMA**, 1977.



consiste donc a affecter aux pores un diamètre fictif correspondant à un pore cylindrique que offrirait la même force de capillarité.

Cependant, comme le remarque **BOUMA** (1981), la mesure du diamètre equivalent est entachée d'erreurs, car suivant le point d'application de la pression sur un échantillon donné, le diamètre mesuré varie. En plus, les pores relativement petits peuvent conduire plus de liquide quand ils présentent une importante continuité à travers le profil; ce qui met en question l'attribution de fonctions spécifiques des pores. Ainsi, **BOUMA** (1981) suggère une classification plus ancienne qui a été proposée par **BREWER** (1964) et qui prend en considération des aspects morphologiques. (voir tableau 4)

Mais il faut remarquer que des observations morphologiques des pores sont beaucoup plus facile à faire quand ils deviennent plus large. (**JOHNSON** et al., 1960; **BREWER**, 1964).

3.1.1. Taille des pores et circulation de l'eau

Il est difficile d'attribuer à des diamètres particuliers de pores une fonction spécifique vis à vis des écoulements, (**BOUMA**, 1981) car plusieurs facteurs peuvent être déterminants et il peut exister des zones de circulation préferentielle.

GUENELON et **COCKBORNE** (1975), lors d'expériences menées au laboratoire sur un milieu poreux artificiel, ont montré que des conduits de 0.32 mm de diamètre, rectilignes, répresentant 1% du volume total, assuraient 99% de l'écoulement des fluides.

Par ailleurs, de nombreux travaux, menés au laboratoire ou sur le terrain, utilisant différentes techniques de mise en évidence des voies de passage de l'eau, ont montré que les macropores étaient les principaux responsables de I'ecoulement de l'eau du sol. (**REYNOLDS**, 1966; **AUBERTIN**, 1971; **KISSEL** et al., 1973; **EHLERS**, 1975; **BOUMA** et al., 1977; **OMOTI** et **WILD**, 1979; **McINTYRE** et **SLEMAN**, 1982).

3.1.2. Forme des pores et circulation de l'eau

BOUMA et al. (1977), en utilisant des techniques eletro-optiques, ont mis en évidence l'importance de la forme des pores sur la circulation de l'eau. En classant la macroporosité du sol en trois groupes suivant leur forme (figure 4) ils ont vérifié que le nombre et le pourcentage de pores colorés, pour chacun des trois types de macropores, correspondaient à des valeurs différentes de ks mesurées, répresentant les différences entre les quatre types de sols étudiés. (voir tableau 5)

3.1.3. Nature des pores et circulation de l'eau

Nous avons vu que la macroporosité du sol pouvait avoir deux origines différentes, soit biologique (action des vers de

Physical characteristics of four soil horizons used to study the function of different types of macropores to conduct water during saturated flow.

	Texture			Organic matter	$CaCO_3$	Bulk density (saturated)	LE_{Sat}	K_{Sat}
	Clay	Silt	Sand					
	%					g/cm³		cm/day
Sample I	47	49	4	0.5	1.1	1.16	0.138	20
Sample II	43	53	4	0.3	1.3	1.23	0.137	75
Sample III	36	46	18	0.1	–	1.35	0.092	5
Sample IV	64	34	2	0.7	–	1.13	0.138	0.8

Average total number of channels and vughs and length of planes for each of the four samples per horizontal cross-section of 70 cm² (area thin section) and the average number and length of colored macropores (also expressed as a percentage of the total number).

	Number of channels			Number of vughs			Length of planes (m		
	Total	Colored	%	Total	Colored	%	Total	Colored	%
Sample I	266	125	47	94	47	50	666	393	59
Sample II	797	167	21	210	65	31	404	186	46
Sample III	560	34	6	119	17	14	267	91	34
Sample IV	647	13	2	156	3	2	790	71	

TABLEAU 5 : Caracteristiques physiques des quatre horizons de sols étudiés et pourcentage de galeries, de vides allongés et des vides intermédiaires pour chaque un des horizons. (BOUMA et al., 1977)

terre, fourmis, termites, racines, etc.), soit physique (vides inter-agrégats, fissures provoquées par la dessication du sol).

AUBERTIN (1971), en travaillant avec des sols forestiers de l'Ohio (USA) a observé, sur des coupes horizontales que le pourcentage de macropores dus à l'activité animale correspondait à 3,7% de la surface de l'horizon B1 (12-22 cm), à 3% de celle de l'horizon B21t (22-40 cm) et à 2.3% de celle de l'horizon B22t (40-54 cm).

Les différents types de macropores peuvent avoir des comportements distincts vis à vis de la percolation de l'eau. Les vides inter-agrégats et les fissures peuvent éventuelement se refermer lors de la rehuméctation et du gonflement du sol, alors que la macroporosité biologique peut rester active (**JONGERIUS**, 1957; **BREWER**, 1964; **MONNIER**, 1965).

En effet, **FONTES** (1984) a pu constater que la grande permeabilité de certains sols de la bordure du fleuve Tocantins, où a été construit le barrage de Tucurui, au nord du BRESIL, était dûe à la présence d'un important réseau fossile de galeries anastamosées de termites qui atteignaient une profondeur de 20 m.

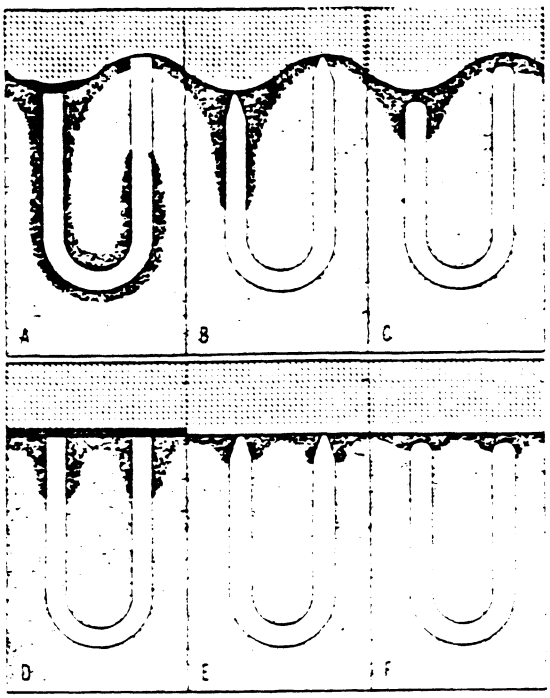
3.1.4. Connection entre les pores et écoulement de l'eau

Le critère de connection entre les pores est fondamental vis à vis de la dynamique de l'eau car c'est lui qui conditionne la continuité de l'écoulement au travers du profil.

Nous avons déjà pu remarquer que selon **BOUMA** (1981) "des pores relativement petits peuvent conduire beaucoup plus d'eau s'ils sont continus à travers le profil". Par exemple, **BOUMA** et al. (1979), en étudiant la macroporosité associée à des mesures de ks, ont obtenu des valeurs de conductivité hydraulique de 60 cm/jour pour des sols argileux, ce qui répresente une valeur relativement élevée. Pour ces sols, l'étude micromorphologique après coloration des lames identifiant les voies de passage de l'eau, a révélé que la majorité de l'écoulement était dûe à des pores de diamètre égal a 90 μm, alors que la plupart de la macroporosité était formée par des macropores de taille comprise entre 1000 et 2000 μm.

Un point important est la façon d'étudier la continuité des pores. **ANDERSON et BOUMA** (1973), en mesurant la conductivité hydraulique d'un sol argileux avec des cylindres de différentes hauteurs, ont observé que la valeur de ks décroissait avec l'augmentation de la hauteur du cylindre. **RITCHIE et al.** (1972), travaillant avec des sols argileux, ont vérifié que la valeur de ks mesurée sur des cylindres de 73 cm de diamètre (soit une surface de 0.4185 m^2), était sept fois plus faible que celle mesurée sur une surface de 100 m^2 .

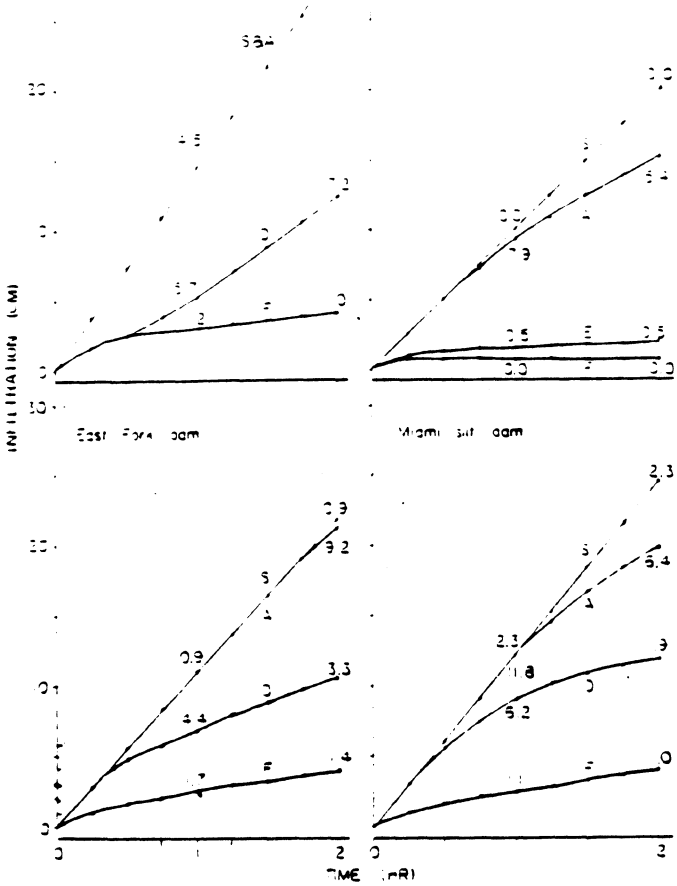
Ainsi, le travail de **ANDERSON et BOUMA** (1973), comme celui de **RITCHIE et al.** (1972), mettent en évidence le problème de la taille de l'échantillon d'étude. Les macropores, ayant en général un cheminement tortueux, ils peuvent être recoupés par



—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 5 :

Présentation des six états possibles de la surface du sol tels que l'ont conçu **DIXON et PETERSON**, 1971.



-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 6 :

Résultats obtenus par **DIXON et PETERSON**, 1971 lors de la mise à l'épreuve du "Channel system concept". Les lettres A, B, C, D, E et F, identifiant chaque courbe, correspondent aux six éta définis par la figure 5.

les parois du cylindre, provoquant alors une réduction de la conductivité hydraulique.

3.1.5. Macroporosité fonctionnelle et macroporosité totale

La connaissance de la macroporosité totale, définie par la taille, le nombre, la continuité, la forme et la nature des vides, n'est pas encore suffisante pour la comprehénsion complète de la dynamique de l'eau dans le sol. Celle ci dépend plus spécialement de la macroporosité fonctionnelle, c'est à dire de celle effectivement active vis à vis de l'écoulement de l'eau, representée par les macropores ouverts à l'eau libre.

ANDERSON et **BOUMA** (1973), travaillant avec un sol argileux marqué par un colorant, ont vérifié qu'une partie seulement des galeries était colorée. De même, en présence d'une crôute de gypse à la surface du sol, créant des conditions de succion matricielle auquelles est soumis l'eau en milieu non saturé, aucune galerie n'était colorée.

Ceci peut s'expliquer par la fermeture de galeries soit par les réjets d'animaux du sol ou par la présence des pierres qui empêcheraient la descente de l'eau, soit par la non connection de ces galeries avec la surface du sol.

La fermeture de galeries peut aussi être provoquée par le labour du sol. **EHLERS** (1975), étudia les galeries de vers de terre et l'infiltration de l'eau sur des sols labourés et non labourés. Il a constaté que le pourcentage de galeries colorées en sols non labourés était pratiquement constant sur tout le profil et égal au pourcentage des galeries ouvertes en surface. En revanche, en sol labouré, il n'y avait pas de galeries colorées sous l'horizon Ap.

Ainsi, l'ouverture de la macroporosité à la surface du sol constitue un important facteur pour l'écoulement. **DIXON** et **PETERSON** (1971) utilisent le "Channel system concept". Ils prennent, d'ailleurs, ce facteur comme élément determinant pour la permeabilité du sol et pour les voies empruntées par l'eau dans le sol. Lors des essais sur une parcelle, ils ont recrées les six états possibles de la surface du sol qui, selon eux, existent dans la nature. Les résultats obtenus montrent que la permeabilité du sol et les voies d'écoulement de l'eau sont fonction de l'ouverture de la macroporosité à la surface du sol et aussi de la microtopographie. (voir figures 5 et 6).

3.1.6. Les approches pour l'étude de la porosité en vue de l'estimation de la conductivité hydraulique du sol

Mais si la macroporosité fonctionnelle est souvent citée comme un important facteur de contrôle de l'infiltration de l'eau dans le sol, elle est plus rarement considerée quand il s'agit d'estimer ou de prédire les taux d'infiltration. Pour **BAKER** (1979) les raisons de cette situation sont diverses. Il y a d'abord la difficulté d'isoler l'influence de la porosité du sol

TABLEAU 6 : Classes de conductivité hydraulique à saturation selon **NOWLAND**, 1981.

CLASSES		CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE A SATURATION	
		cm/h	m/j
H élevé	H_1 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_1 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	$L_3 < 0,017$	$L_3 < 0,004$

sur l'infiltration de l'eau , de l'influence d'autres caractéristiques du sol auxquelles la porosité est plus ou moins liée; il y a ensuite la variabilité de la porosité dans le temps ainsi que les problèmes de méthodologie à adopter; et finalement la difficulté d'exprimer la porosité comme un simple terme résultant de l'intéraction de plusieurs facteurs.

De toute façon, il existe deux approches différentes pour l'étude de la porosité en vue de l'estimation de la conductivité hydraulique. Une approche utilise la technique morphométrique qui permet de distinguer les pores fonctionnels des autres, à partir de l'observation de lames minces. (**BOUMA et ANDERSON**, 1973; **DENNING et al.**, 1974; **BOUMA et DENNING**, 1974; **BOUMA et al.**, 1977; **ANDERSON et BOUMA**, 1977). Ensuite, l'équation pour calculer ks est basée sur la relation physique entre la taille d'un pore et son aptitude à transmettre un liquide, avec un modèle d'interaction entre les pores. Toutefois ces calculs sont basés sur des observations bidimensionnelles, alors que l'écoulement est un phénomène tridimensionnel.

Une autre approche consiste à estimer la conductivité hydraulique 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, sélectionnées en vue de disposer d'une gamme variée de sols,**Mc KEAGUE et al.** ont établi une classification permettant 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, qui sont celles définies par **NOWLAND** (1981) (voir tableau 6) (4), correspondent trois ou quatre morphologies de la structure et de la porosité du sol. La classification proposée par **Mc KEAGUE et al.** est presentée en Annexe 1.

3.2. QUELQUES RESULTATS CONCERNANT LE ROLE DES VERS DE TERRE VIS A VIS DE L'ECOULEMENT

Comme nous l'avons déjà signalé, le réseau de galeries élaboré dépend de la catégorie écologique auquelle appartient le ver de terre. Ainsi, 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. Un autre aspect important est qu' un réseau de galeries de vers de terre semble être susceptible de se conserver pendant plusieurs années. (**BARNES et ELLIS**, 1979; **EHLERS**, 1975).

Comme les galeries de vers de terre ont un diamètre

---

(4) **NOWLAND** a mis au point une classification des "régimes de l'eau du sol" basée sur quatre paramètres: aridité, permeabilité, 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 qui sont celles indiquées par le tableau 6.

élevé (de 2 mm à 10 mm, en général) et se développent sur toute la hauteur du profil, il est logique de supposer qu' elles jouent un rôle important vis à vis des écoulements hydriques.Ainsi, plusieurs auteurs ont pu constater que la présence de vers de terre dans une parcelle améliorait nettement la conductivité hydraulique à saturation.

Mais il faut signaler que, étant donné le diametre relativement grand de ces galeries, elles ne seront fonctionnelles qu'après de fortes pluies, ou quand les sols sont irrigués, ou mieux lorsque le sol est saturé. LEE (sous presse) remarque que les galeries de lombriciens doivent être regardées "comme un système additionnel de drainage".

Le taux d'infiltration de l'eau, quand elle est fournie en larges quantités, est aussi nettement affecté par la présence de vers de terre. **SLATER et HOPP** (1947), **HOPP et SLATER** (1948), **GUILD** (1952, 1955), **STOCKDILL** (1966) et **CARTER et al.** (1982) montrent que le taux d'infiltration de l'eau du sol peut augmenter de deux à dix fois dans des sols avec des vers de terre par rapport à ceux où les lombriciens sont absents.

BOUCHE (1971), sur un sol de prairie, en France, présentant 800 galeries de lombriciens / m^2 , a versé 100 l d'eau dans une unique galerie,sans observer de débordement; il a montré que les galeries forment un réseau anastamosé et l'eau peut pénétrer à travers tout le réseau.

CLEMENTS (1978), a travaillé sur les conséquences de l'usage de pesticides sur une population de lombriciens. Il a vérifié que la valeur de la conductivité hydraulique à saturation sur une parcelle traitée avec des pesticides diminuait par suite à l'eradication des lombriciens (17.79 m/jour à 0.67 m/jour).

STOCKDILL (1966) a mesuré un acroissement de 86 % du taux d'infiltration de l'eau dans une prairie de Nouvelle-Zélande, après une introduction d'"Allolobophora caliginosa". **HOOGERKAMPS et al.** (1983) ont mésuré dans un polder de Hollande une capacité d'infiltration multipliée par 120 à 140 dûe à l'introduction de Allolobophora caliginosa.

Ces réferences bibliographiques étant rappelées, voyons maintenant les méthodes utilisées et les résultats obtenus lors de notre propre travail.

II- LE PROTOCOLE EXPERIMENTAL UTILISE

1. OBJECTIFS GENERAUX

Suite aux premières expérimentations menées par DURET (1983), nous nous proposons, dans ce mémoire, de tester et affiner la méthode d'étude des galeries de vers de terre, afin de préciser le rôle joué par ces galeries sur la porosité du sol et, par conséquence, sur l'écoulement de l'eau.

L'objectif principal de ce travail est donc de caractériser les galeries de vers de terre du point de vue qualitatif et quantitatif, en essayant de rélier cette macroporosité biologique au comportement hydrodynamique du sol, spécialement, à la conductivité hydraulique.

Ces résultats devraient nous permettre, dans un premier temps:

- une meilleure compréhension des phénomènes d'écoulement d'eau, principalement en ce qui concerne le rôle joué par la macroporosité biologique;

- une meilleure évaluation du rôle joué par les galeries de lombriciens, principalement ceux du type anécique, sur la dynamique de l'eau dans le sol;

- de mettre en évidence l'intérêt des études plus approfondies sur la population lombricienne du sol comme point fondamental pour la simplication des diagnostics de la conductivité hydraulique à saturation d'un sol ou d'un profil.

Finalement, en étudiant la distribution spatiale des galeries de vers de terre, leur taille, leur nombre par profil permettant une estimation du volume de ces galeries, nous voulons contribuer à une meilleure connaissance du rôle des vers de terre comme agents de modification du milieu édaphique.

2. DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Afin d'aboutir à des éléments qui nous permettront de discuter et de justifier les propositions ci dessus nous avons suivi le protocole suivant:

2.1. évaluation et caractérisation de la population de vers de terre
2.2. mesure de la conductivité hydraulique à saturation
2.3. caractérisation de la macroporosité biologique dûe aux vers de terre
2.3.1. coloration des parois des galeries de vers de terre
2.3.2. identification, quantification et description spatiale des galeries de vers de terre
2.4. évaluation de la porosité du sol
2.4.1. évaluation de la densité apparente par la methode gammamétrique
2.4.2. évaluation de la densité réelle
2.4.3. évaluation de la macroporosité totale du sol

2.1. EVALUATION ET CARACTERISATION DE LA POPULATION DE VERS DE TERRE

Il existe différentes méthodes de terrain pour effectuer le prélèvement de vers de terre. D'une façon générale, nous avons deux types de procédures:

- des prélèvements basés sur l'application d'un stimulus qui permet de déclencher l'ascension des vers de terre dans le sol et leur récolte en surface (chaleur, électricité, formol);

- des prélèvements d'un échantillon de sol et puis l'extraction des animaux présents dans cet échantillon.

BOUCHE (1969) a mis au point une méthode intermédiaire qui consiste à récolter les vers de terre en surface à partir d'un stimulus chimique (solution de formol) et ensuite à faire un prélèvement d'un échantillon de sol, à l'emplacement préalablement formolé, jusqu'à une profondeur de 20 cm.

Nous avons choisi cette dernière méthode, avec une adaptation à nos conditions de travail, car elle présente des avantages importants :

- elle est relativement légère et rapide;
- les résultats, d'après les études déjà effectuées et indiquées par **BOUCHE** (1972), sont plus fiables que ceux des méthodes par la chaleur ou l'électricité;
- elle nous permet de béneficier de l'avantage de la méthode au formol qui fait remonter la faune profonde du sol, et de celui de la méthode du prélèvement de l'échantillon qui donne la totalité des cocons et autres animaux endogés vivant dans la couche superficielle.

2.1.1. Description de la méthode physico-éthologique de prélèvement des vers de terre

1er étape: prélèvement au formol

Elle consiste à arroser le sol avec une solution diluée de formol. On travaille sur une surface de 1 m2, delimitée par un cadre en bois de 1 m de côté. Sur cette surface nous faisons quatre arrosages successifs de 20 litres de solution de formol. Pour les deux premiers arrosages la solution est à 2.5% de formol; pour les deux autres à 5%. Chaque arrosage est espacé de 10 minutes. La récolte débute après le premier arrosage et finit 10 minutes après le dernier. Pour faciliter la récolte et permettre une identification plus précise, on divise la surface de prélevement au milieu. Sont comptabilisés seulement les vers de terre prélevés à l'intérieur du cadre.

2eme étape: prélèvement d'un échantillon de sol avec extraction des vers de terre et des cocons

Cette étape consiste à prélever un échantillon de sol de 0.002 m3 (10cm x 10cm x 20 cm), en utilisant une bêche. On le met à tremper dans un bac avec de l'eau - en quantité suffisante pour imbiber tout le matériau -, 1 litre de formol pur et 100 g

Comparaison des méthodes d'extraction utilisées de novembre 1966 à novembre 1967, au terrain de Citeaux.
Valeurs absolues et efficacités relatives moyennes des différentes techniques, par rapport à la méthode physico-éthologique.
Nicodrilus *confond deux espèces anéciques voisines* N. longus *et* N. nocturnus *var.* cistercianus. *p. f. poids frais.*

		Méthodes					
		Physique (fosse et lavage)		Physico-éthologique		Éthologique (formol)	
Profondeur prospectée en cm		(1) 0-20 (2) 20-40 (3) 40-80 (4) 0-60		0-20 + ?		?	
Hiver	Densité individus/m²	(1) 318,3 (2) 58,9 (3) 22,4 (4) 399,6	95,6 % 17,7 % 6,8 % 120,0 %	328,8	100 %	55,4	16,9
	Biomasse g m² en p. f.	(1) 107,7 (2) 29,9 (3) 16,5 (4) 153,3	64,3 % 17,4 % 9,7 % 91,6 %	167,4	100 %	34,7	20,7 %
Densité relative (moyenne annuelle)	Peuplement total	non établi		100 %		25,7 %	
	Nicodrilus adultes	non établi		100 %		15,8 %	
	— larves	non établi		100 %		22,9 %	
	Lumbricus castaneus	non établi		100 %		75,4 %	

TABLEAU 7 : Comparaison des méthodes de prélèvement de vers de terre . In : BOUCHE, 1972.

d'hexametaphosphate de sodium. On laisse pendant 48 h, en faisant attention de bien remuer, de façon à détruire completement la structure du matériau. Ensuite, le prélevat est lavé, tamisé au tamis de 1 mm et les lombriciens présents sont récuperés.

Comme la mesure de ks doit être faite après, sur le site de prélèvement au formol, le prélèvement à la bêche a été fait à l'extérieur du cadre. Ainsi, pour les arrosages avec le formol, il faut deborder de la surface de prélèvement.

2.1.2. Interprétation des résultats

BOUCHE (1972), en comparant les différentes méthodes de prélèvement de vers de terre (tableau 7), avait démontré que l'association "formol + bêche" (méthode physico-éthologique) convenait bien pour l'étude des biomasses. Cependant, durant l' été certains animaux sont immobiles à une profondeur supérieure à 20 cm.

Il a montré aussi que l'efficacité de l'application du formol dépendait de plusieurs facteurs, à savoir:

a) du mode de vie des animaux
   - les épigés sont plus sensibles au formol que les anéciques et les endogés;
b) de l'époque de prélèvement
   - car l'activité des vers de terre est liée à la température et à l'humidité du sol, et aussi à longueur du jour (**BOUCHE**,1984);
c) à la taille des animaux
   - les animaux de grande taille (anéciques) remontent bien des couches profondes inférieures à 60 cm, mais n'apparaissent sur le sol que dans une faible proportion;
d) le prélèvement à la bêche à 20 cm de profondeur est problématique dans les sols squelettiques. Il est limité aussi pour les autres sols, car les vers de terre, principalement le anéciques et les endogés, creusent fréquemment à plusieurs mètres sous le niveau du sol.

Cependant, les travaux menés par **BOUCHE** au laboratoire de zooécologie de l'INRA, permettront, dans un futur proche, de déterminer la période la plus convenable de prélèvement, pour chaque espèce; ainsi que le coefficient de correction à appliquer en fonction de la température, de l'humidité du sol, et de la photopériode au moment du prélèvement.

Pour chaque profil, nous avons donc déterminé l'humidité à 105°C et la température à 10 cm de profondeur.

2.2. MESURE DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE

Il existe plusieurs méthodes de détermination de la conductivité hydraulique à saturation et comme nous avons vu au chapitre I, il y a plusieurs remarques à faire sur les résultats obtenus.

Dans le cadre de ce mémoire, et en respectant les objectifs ici établis, nous avons choisi la méthode de Muntz, ou

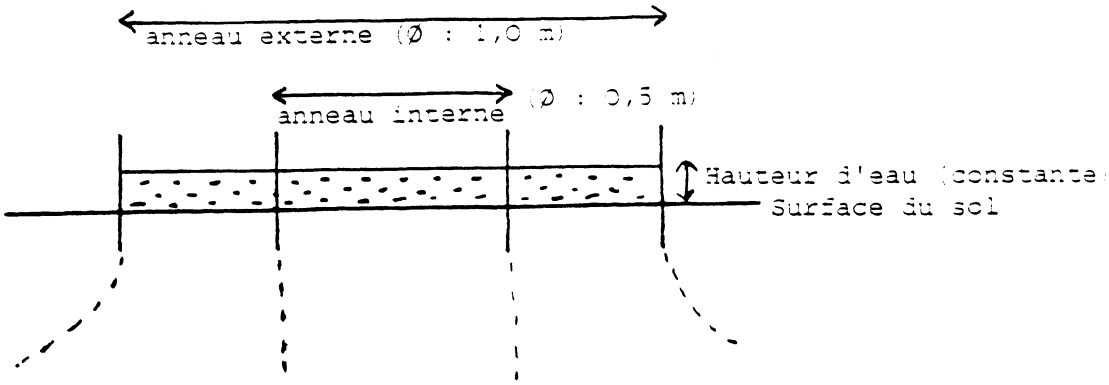
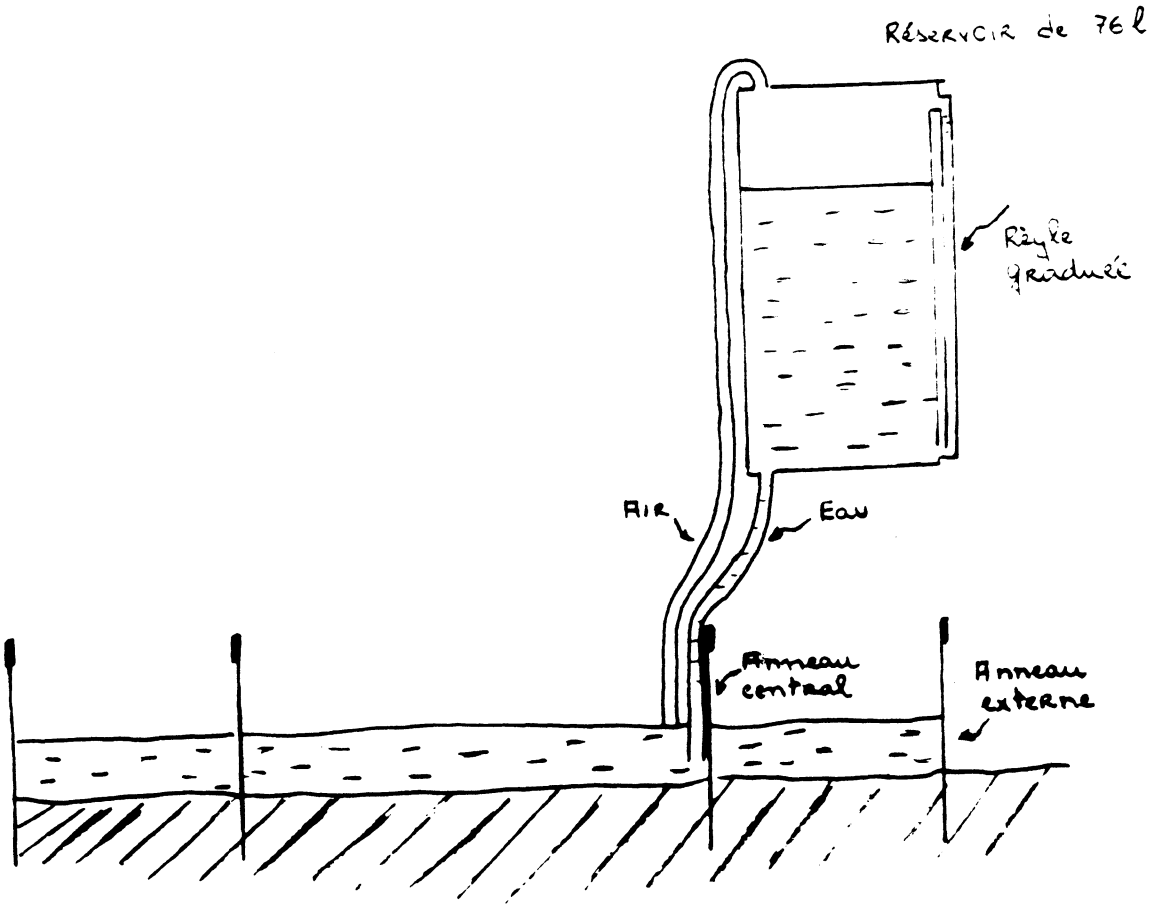


FIGURE 7 : Principe de la mesure de ks par la méthode du double-anneau (coupe verticale).

FIGURE 8 : Dispositif général utilisé pour la mesure de ks.



méthode du "double anneau". (MUNTZ, 1902, 1905, 1912), cité par LUC (1977).

Ce choix a été orienté par les critères suivants:

a) le "double anneau" est une technique assez simple. Elle consiste à mesurer la quantité d'eau infiltrée sous charge constante, à travers une surface parfaitement connue, en obtenant des filets liquides verticaux (fig. 7);

b) la méthode du double anneau est largement connue et utilisée sur le terrain, même si on sait que les résultats obtenus peuvent être très approximatifs;

c) nous disposions, grâce à la collaboration de M. LUC, de la Chaire de Machinisme Agricole de l'ENSAM, d'un matériel de caractéristiques assez satisfaisantes;

d) et, dernièrement, les anneaux présentent une taille suffisamment grande (ϕ = 0.50 m pour l'anneau interne et ϕ = 1 m pour l'anneau externe), pour travailler sur un échantillon de sol de taille significative.

Les anneaux ont été disposés sur la surface qui avait subi le prélèvement au formol, comme il est montré sur la figure 8.

En tenant toujours compte des difficultés de mesure de la conductivité hydraulique à saturation (chapitre I), la méthode du double anneau exige encore d'autres précautions:

- on doit enfoncer les anneaux au moins à 10 cm de profondeur de façon à éviter les fuites latérales;

- la surface du sol doit être la plus aplanie possible,ce qui n'a pas été toujours possible;

- la surface du sol doit être libérée le plus possible de la végétation, sans que cette opération provoque une destruction de la stucture de l'horizon superficiel;

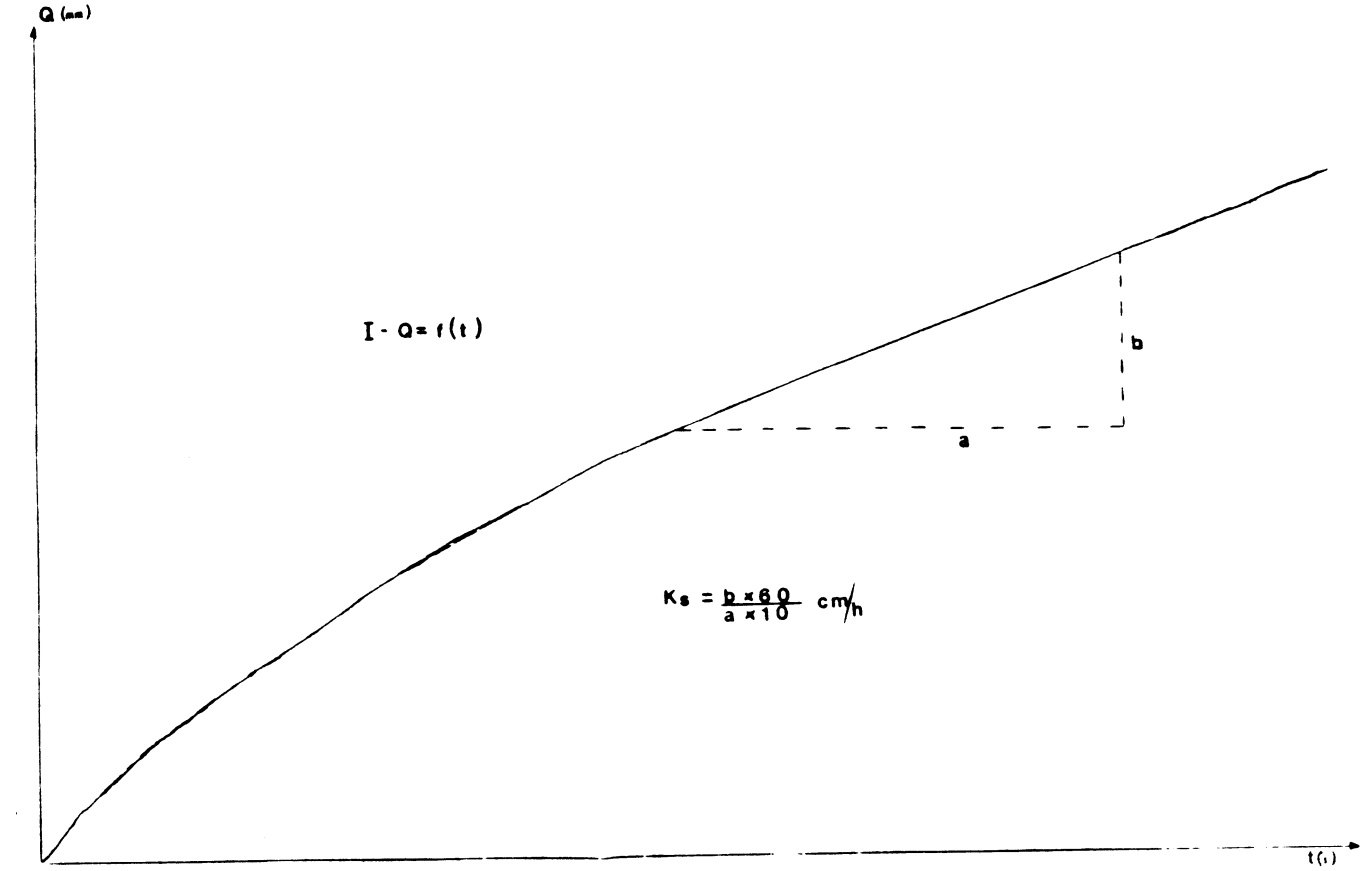
- l'anneau externe doit avoir un niveau d'eau semblable à celui de l'anneau interne;

- la hauteur de la lame d'eau doit être controlée et mantenue fixe. Pendant nos essais nous avons utilisé 5 cm de hauteur de la lame dans les deux anneaux;

- le vase de Mariotte qui alimente l'anneau interne doit être parfaitement étanche;

- les tuyaux d'entrée et de sortie de l'eau doivent rester libres pour éviter de possibles obstructions par des feuilles;

- les anneaux doivent être recouverts afin que l'évaporation



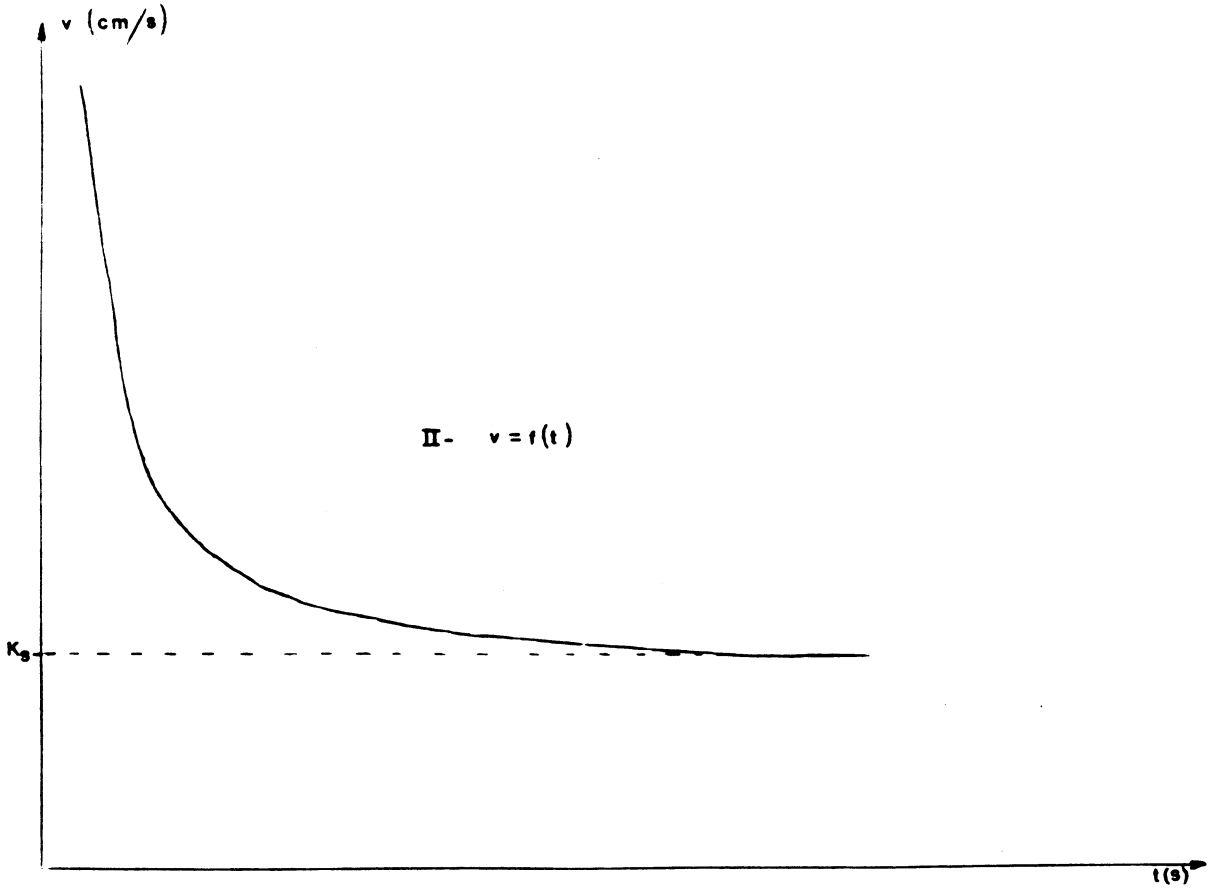


FIGURE 9 : Courbes caractéristiques de détermination de la valeur de ks.

I - quantité d'eau infiltrée cumulée Q en fonction du temps;

II - vitesse d'infiltartion instantanée en fonction du temps.

ne cause pas d'interférences sur les mesures.

Ainsi, nous avons effectué les mesures de la quantité de l'eau infiltrée en fonction du temps et en utilisant un programme preparé pour une HP-41CV, nous avons calculé les vitesses d'infiltration instantannées. Dès que les valeurs devenaient approximativement constantes nous avons considéré la première valeur comme étant la valeur de ks.

Une autre façon de déterminer la valeur de ks a consisté à établir la courbe de la quantité d'eau infiltrée cumulée en fonction du temps. De cette courbe nous avons déduit la valeur de la conductivité hydraulique à saturation en prennant la valeur correspondante au début du tracé de la courbe lorsque celle ci s'assimile à une droite (cf. figure 9).

Il faut remarquer que ces deux modes de détermination de la conductivité hydraulique mettent en évidence la variabilité de la valeur de ks en fonction du temps et, peut-être aussi le long du profil. En effet, nous considérons que la saturation a été atteinte dès que ces valeurs calculés devenaient approximativement constantes et que la courbe, obtenue graphiquement devenait approximativement une droite. Or, il nous est arrivé d'obtenir des valeurs approximativement constantes pendant un intervale de temps de 50 minutes, 1 heure, puis de constater ensuite un changement de valeur. Ceci sera mieux évoqué lors de la discussion des résultats.

2.2.2. Interprétation des Résultats

L'interprétation des résultats doit prendre en compte que, en utilisant les anneaux de Muntz, nous sommes sûr de la saturation seulement sur les 10-20 premiers centimètres de sol.En effet, lors de nos études de profil nous avons pu observer que le front d'humectation formait un bulbe plus humide jusqu' à 40-50 cm de profondeur. L'écoulement de l'eau sur tout le profil étant controlé par la vitesse d'infiltration dans l'horizon superficiel.

2.3. EVALUATION DE LA MACROPOROSITE BIOLOGIQUE DUE AUX VERS DE TERRE

2.3.1. Coloration de la paroi des galeries de vers de terre

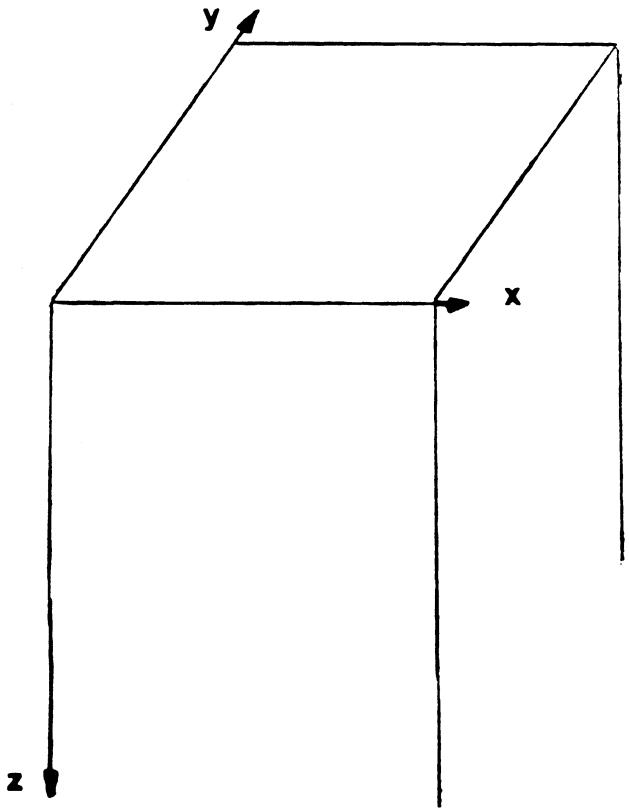
Une des techniques utilisées pour étudier les voies d'écoulement de l'eau dans le sol consiste à colorer la porosité active, ou mieux, fonctionnelle.

Nous avons utilisé comme colorant le bleu de méthylène, en nous basant sur des expériences ménées par **BOUMA** et al. (1977), **McKEAGUE** (1982) et **DURET** (1983).

Cette technique consiste à diluer le bleu de méthylène, sous forme de poudre, à raison de 1 g par litre d'eau. La solution colorante, 50 litres au total, est mise dans l'anneau

FIGURE 10 : Racines de moutarde dans une galerie de lombricien.(cliché Diercxens, E.P.F. Lausanne, in BOUCHE 1984).

FIGURE 11 : Schèma des axes x, y et z utilisés pour le répérage des galeries de lombriciens.



central (où la mesure de ks a été effectuée) et laisser infiltrer pendant au moins 3 heures. (DURET, 1983). Pour éviter des problèmes de mauvaise coloration des voies d'écoulement gravitaire, nous avons toujours travaillé de façon à laisser la solution colorante s'infiltrer pendant la nuit.

2.3.2. Identification et quantification de la macroporosité biologique

Tout d'abord nous devons faire un remarque. La coloration des parois des galeries nous permet de les identifier assez facilement. Néanmoins une question reste encore à éclaicir celle de différencier une galerie de ver de terre d'une galerie creusée par un autre animal (par exemple des termites ou des larves d'insectes). Une autre question encore est de bien distinguer une galerie de ver de terre d'une galerie dûe à une racine, principalement parce que les racines semblent avoir une forte tendance à se développer dans des anciennes galeries. (voir figure 10)

En effet, lors de nos travaux de terrain nous nous sommes rendus compte que ces questions étaientt assez importantes et nous nous sommes basés sur deux points pour réaliser les identifications. D'abord,comme la population de vers de terre sur la prairie du Chateau de Teillan était fort importante et dominée par de gros individus, nous avons considéré que toutes les galeries de grosse taille étaient dûes à des vers de terre. Ensuite, les petites galeries ont été aussi attribuées aux vers de terre, sauf lorque des racines les occupiaient. Ceci, en considérant absente d'autres composants de la meso-faune du sol.

Pour caractériser ces galeries, nous avons creusé, pour chaque profil étudié, une fosse (1.0m x 0.80m x 1.20m) face à l'anneau central. Le profil pédologique a été décrit classiquement et ensuite il a été étudié par tranches coupées au couteau. Pour avoir une observation plus fine, entre la surface et 20-25 cm de profondeur nous avons travaillé en coupant des cubes de +/- 5cm de côté. Au-delà de cette profondeur, comme le nombre des galeries diminuait et la visualisation des galeries était plus facile, les cubes avaient environ 10 cm de côté.

Le découpage par cubes a été choisi car il permettait de répérer un plus grand nombre de galeries (pratiquement la totalité), avec les différentes communications entre elles.

Pour faciliter l'étude, nous avons marqué l'entrée supérieur de chaque galerie avec un catéter numéroté. A chaque niveau découpé, nous avons référé les galeries trouvées par rapport à un plan (axes des x et de y), et noté leur longueur (valeur z) et leur diamètre . (voir figure 11)

Avec ces paramètres nous avons calculé ensuite :

- le volume et la longueur totale de chaque galerie;
- le volume et la longueur totale des galeries par profil;
- le diamètre moyen des galeries pour chaque profil;
- le volume des galeries par couche de 5 cm jusqu'à 50 cm de

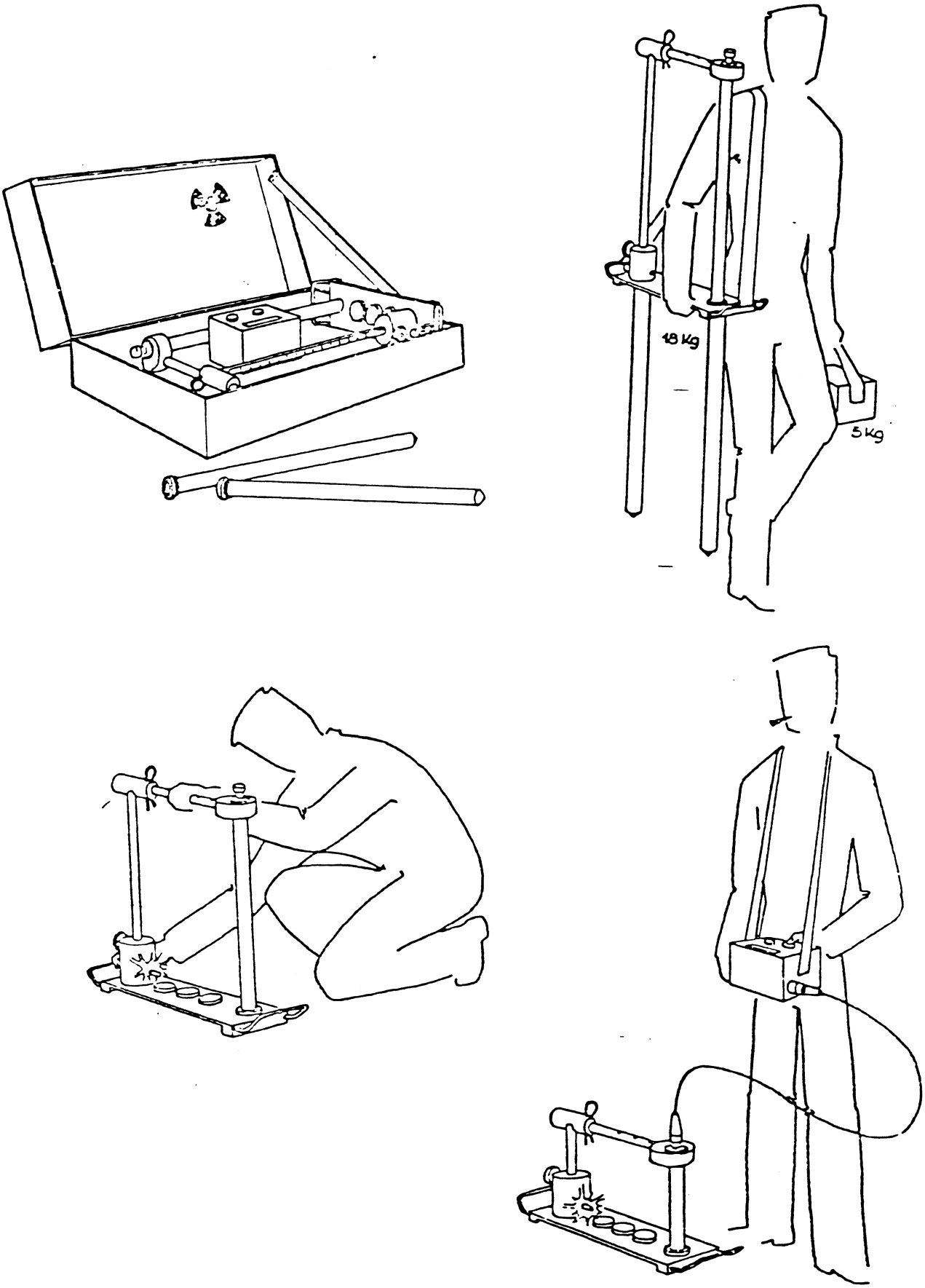


FIGURE 12 : Schèma de la double-sonde gammamétrique LPC-INRA.

profondeur, pour chaque profil.

Nous avons observé lors du traitement des données relévées sur le terrain que la valeur z -longueur de galerie- était souvent supérieure à une valeur estimée, si on considérait la galerie rectiligne. Pour celà nous avons deux explications possibles:

- les galeries de vers de terre suivent, en général, des cheminements tortueux;
- le repérage de la longueur d'une galerie peut comporter des erreurs, lorsque le tracé est plus ou moins tortueux. Quand les galeries sont verticales ou subverticales et peu tortueuses, la longueur totale mesurée sera plus grande que la longueur calculée. Quand les galeries sont plus tortueuses et/ou horizontales, la longueur totale mesurée sera inférieure à la longueur calculée.

De toute façon, nous avons utilisé les valeurs mesurées sur le terrain, même en sachant qu' elles pouvaient comporter des erreurs. A la fin, nous avons calculé la longueur à partir de la position spatiale de la galerie, ce qui néglige la tortuosité. Ces aspects seront mieux évoqués lors de la discussion des résultats.

2.4. EVALUATION DE LA POROSITE DU SOL

Dans le but de mieux apprécier la part des galeries de vers de terre dans la porosité du sol, nous avons essayé de quantifier l'espace poral.

Nous avons donc déterminé la porosité totale du sol (P) à partir de la mesure de la densité apparente (da) et de la densité réelle (dr). De ces valeurs la porosité totale est déduite ,en pourcentage, à partir de l'expression suivante:

$$P = 1 - \frac{da}{dr} \times 100$$

2.4.1. Mesure de la densité apparente

La densité apparente a été évaluée en utilisant une double-sonde gammamétrique LPC-INRA, aimablement prêtée par la Station de Science du Sol de l'INRA - Avignon. M. BOURLET, technicien de cette Station, nous a aidé à faire les mesures. Elles ont été faites par couche de 5 cm, à partir de la surface jusqu'à 50 cm de profondeur, avec une distance source-détecteur de 30 cm. Dans ces conditions, l'équation d'étalonnage est:

$$\gamma = - 0.6173 \ln C + 5.757$$

où : γ = masse volumique apparente à l'état sec
C = moyenne des deux nombres de coupes mesurés.

A partir de la valeur γ et de l'humidité de l'échantillon du sol prélevé au moment de la mesure et, en

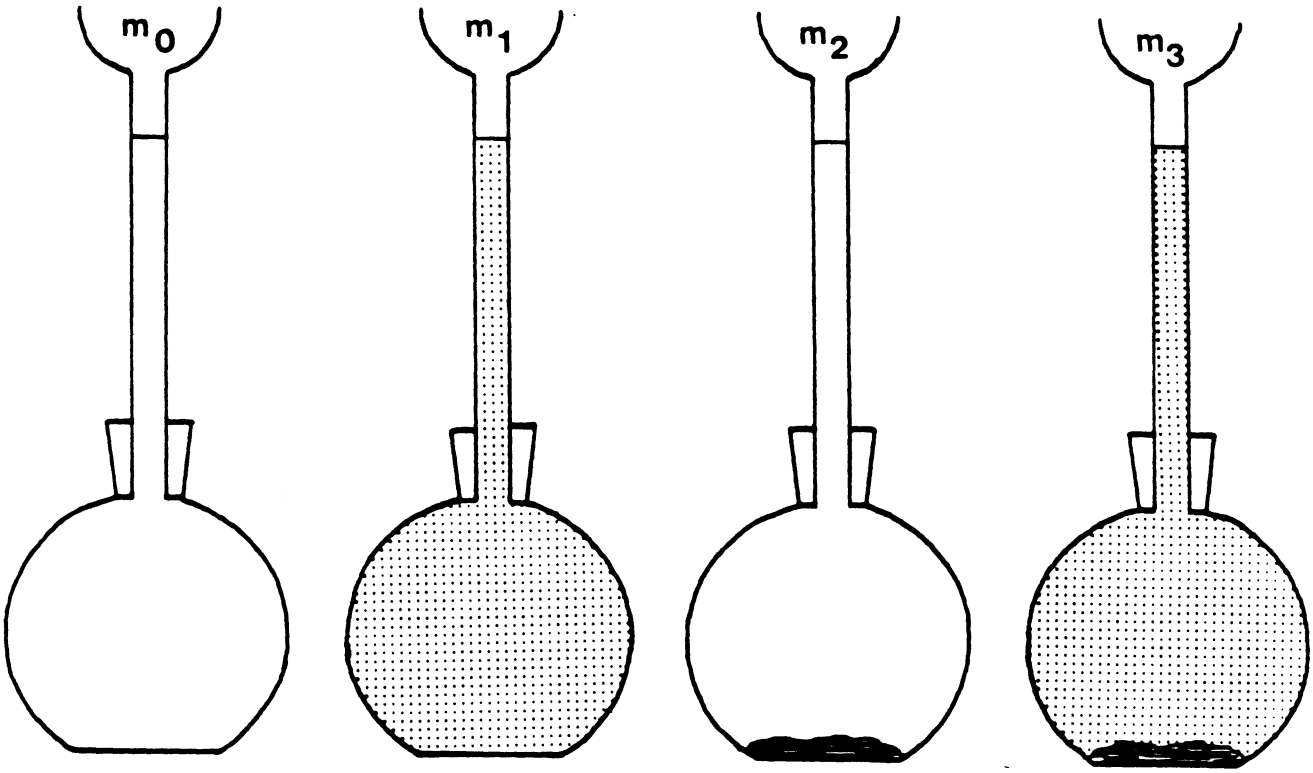


FIGURE 13 : Présentation des différents stades de la mesure de densité réelle à l'aide d'un pycnomètre. In VAN OORT, 1984.

m_0- masse du pycnomètre

m_1 - masse du pycnomètre remplit de l'eau distilée

m_2- masse du pycnomètre + l'échantillon

m_3- masse du pycnomètre + l'échantillon + l'eau distilée

utilisant un programme établi une HP-41 CV, nous avons determiné la densité apparente sèche.

2.4.2. Evaluation de la densité réelle

Pour la détermination de la densité réelle nous nous sommes basé sur la méthode de **BLANCK et al.** (1965), cité par **ABBASSI** (1983), pour mesurer la densité réelle du pétrole. Etant donné qui le produit recommandé (le Kerdane) ne possèdait pas de densité précise, nous avons travaillé avec de l'eau distillée, conformement à **VAN OORT** (1984).

Cette mesure caractérise uniquement la phase solide du sol. Elle est effectuée au laboratoire, dans des conditions de température controlée, sur la terre finement broyée, en utilisant un pycnomètre à eau (voir figure 13). Nous avons utiliséla silice pure, dr = 2.65 , comme témoin.

La densité réelle est déduite de ces mesures :

$$dr = \frac{\text{masse du solide}}{\text{volume du solide}} = \frac{M}{V}$$

où: $M = m_2 - m_0$

$$V = \frac{m_1 - m_0}{\rho_{eau}} - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{eau}}$$

M - poids de l'échantillon en gramme
V - volume de l'échantillon en cm
ρ_{eau} - densité de l'eau distillée à la température du moment de la mesure
déplacée par la tere

2.4.3. Evaluation de la macroporosité totale du sol

La courbe pF = f(humidité) nous reseigne sur la répartition des espaces poraux par catégorie de diamètre. Ainsi, nous avons établi cette courbe, en déterminant l'humidité des échantillons rémaniés de sol (tamisés au tamis 2 mm), pour quatre valeurs de pression appliquée:

300 mbar - pF = 2.48
500 mbar - pF = 2.70
1000 mbar - pF = 3.00
15000 mbar - pF = 4.18

Considérant la microporosité ou porosité capillaire comme correspondant au volume des pores capillaires qui retiennent l'eau après ressuyage ($\phi < 3.00$ à 8.00 μm selon la texture) et la macroporosité, dans les mêmes conditions, comme le volume qui reste occupé par l'air (**BONNEAU et LEVY**, 1979), nous avons determiné la répartition de l'espace poral. Ainsi, si c est la capacité au champ en pourcentage du poids sec, nous avons:

pF	Pression (millibars)	A ‰	(A+Lf)‰	Texture
2,0	100	$A < 50$	$(A+Lf) < 50$	Sol très sableux, non humifère.
2,3	200	$A \leq 50$	$50 < (A+Lf) \leq 150$	Sol sableux.
2,5	320	$50 < A \leq 150$	$150 < (A+Lf) \leq 300$	Sol sablo-argileux, sablo-limoneux.
2,7	500	$150 < A \leq 400$	$300 < (A+Lf) \leq 650$	Sol à texture équilibrée.
3,0	1000	$A > 400$	$(A+Lf) > 650$	Sol argileux, argilo-limoneux.

TABLEAU 8 : Valeurs de **pF** à la capacité de rétention selon la texture. (d'après **HERMANN**, 1980)

microporosité = c x da
macroporosité = porosité totale - microporosité

Nous avons considéré la valeur de pF correspondante à la capacité au champ, selon la texture du sol, d'après **HERMANN** (1980), comme il est montré par le tableau 8.

2.5. TRAITEMENT DES DONNEES

Toutes les données ont été traitées sur un micro-ordinateur KAIPRO-II, 64K RAM, 400 Ko de capacité, deux unités de disquettes 5', simple face, double densité. Pour ce traitement nous avons utilisé un logiciel D BASE II, spécifique pour la gestion de Base de Données. Nous avons donc crée 3 bases de données à savoir: une base pour les mesures d'humidité et de densité apparente, une autre pour les mesures de conductivité hydraulique, et une troisième pour les données spécifiques des galeries de vers de terre. Pour la saisie et le traitement de ces données, seize programmes ont été écrits.

3. CONSIDERATIONS FINALES

Ce protocole a été utilisé sur un site à Aimargues présentant un sol considéré comme homogène, tant au niveau de la parcelle, que au niveau du profil, afin d'apprécier sa valeur et ses limites.

Tout d'abord nous avons fait deux profils d'essai pour vérifier la partie du protocole concernant l'étude des galeries.

Ensuite nous sommes allés en Charente Maritime où nous avons appliqué une partie du protocole afin de vérifier les effets d'une introduction récente de vers de terre sur les mouvements de l'eau dans le sol.

Finalement nous avons appliqué l'intégralité du protocole sur le site d'Aimargues et les résultats de ces expériences seront rapportés et discutés dans le chapitre suivant.

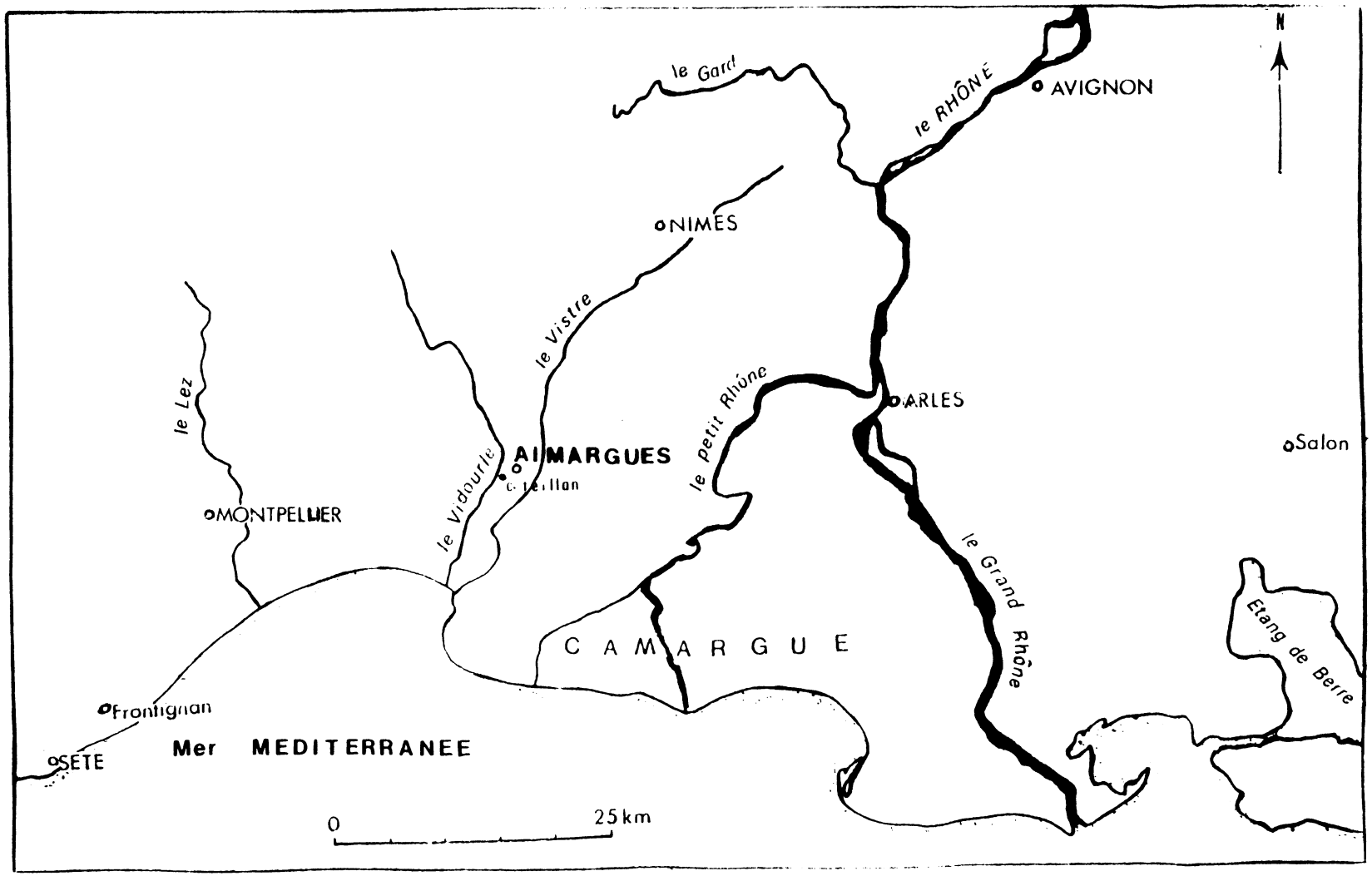


FIGURE 14 : Plan de situation de Aimargues.

III- RESULTATS ET DISCUSSION

1. AIMARGUES

1.1. DESCRIPTION DU MILIEU

1.1.1. Choix du site

Dans le but de vérifier la variabilité spatiale des résultats en milieu homogène, en appliquant la méthode mise au point par **DURET** (1983), nous avons choisi comme parcelle d'étude une prairie située au bord du fleuve Vidourle.

Ce choix a été guidé par les motifs suivants:

- cette prairie, agée d'au moins dix ans, peut être considérée comme stable du point de vue écologique;
- la population de vers de terre que nous pouvons y trouver est quantitativement très importante, et très répresentative des prairies du Midi de la France;
- du point de vue pédologique, elle présente le même type de sol sur toute la surface, lequel sol peut être consideré comme homogène ;
- la végétation présente des variations qui semblent être liées aux variations microtopographiques, conditionnant la disponibilité de l'eau.

En outre, un autre argument important a été l'utilisation de cette parcelle pour d'autres études du milieu (végetation, stabilité structurale, population de vers de terre).

1.1.2. Localisation géographique

La parcelle sur laquelle nous avons travaillé appartient au Chateau de Teillan, situé dans la commune de Aimargues (Gard), à 35 km de Montpellier (voir figure 14). Elle se trouve en rive gauche et en bordure même du Vidourle.

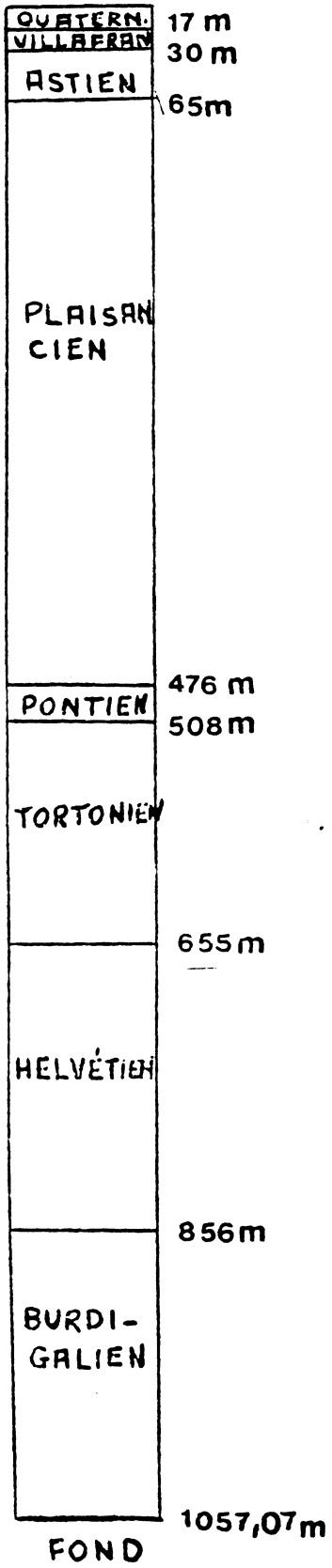
La prairie présente une surface totale de 1.8 ha environ,mais compte-tenu des objectifs de notre étude, nous avons travaillé sur une zone d'environ 7021 m^2 , qui nous a semblé homogène du triple point de vue du sol, de la végetation et de la microtopographie. Cette surface était assez grande pour multiplier le nombre de profils sans trop gêner les autres études réalisées sur la parcelle.

1.1.3. Climat

Du point de vue climatique, nous sommes sous l'influence du climat méditerranéen, qui selon **PEGUY** (1970) "se définit avant tout par un régime pluviométrique qui comporte, dans la forme la plus nette, un maximum d'hiver et un minimun d'été."

La pluviométrie moyenne pour la plaine de Aimargues est

FIGURE 15 : Coupe géologique pour la plaine de Marsillagues (rive droite du Vidourle).



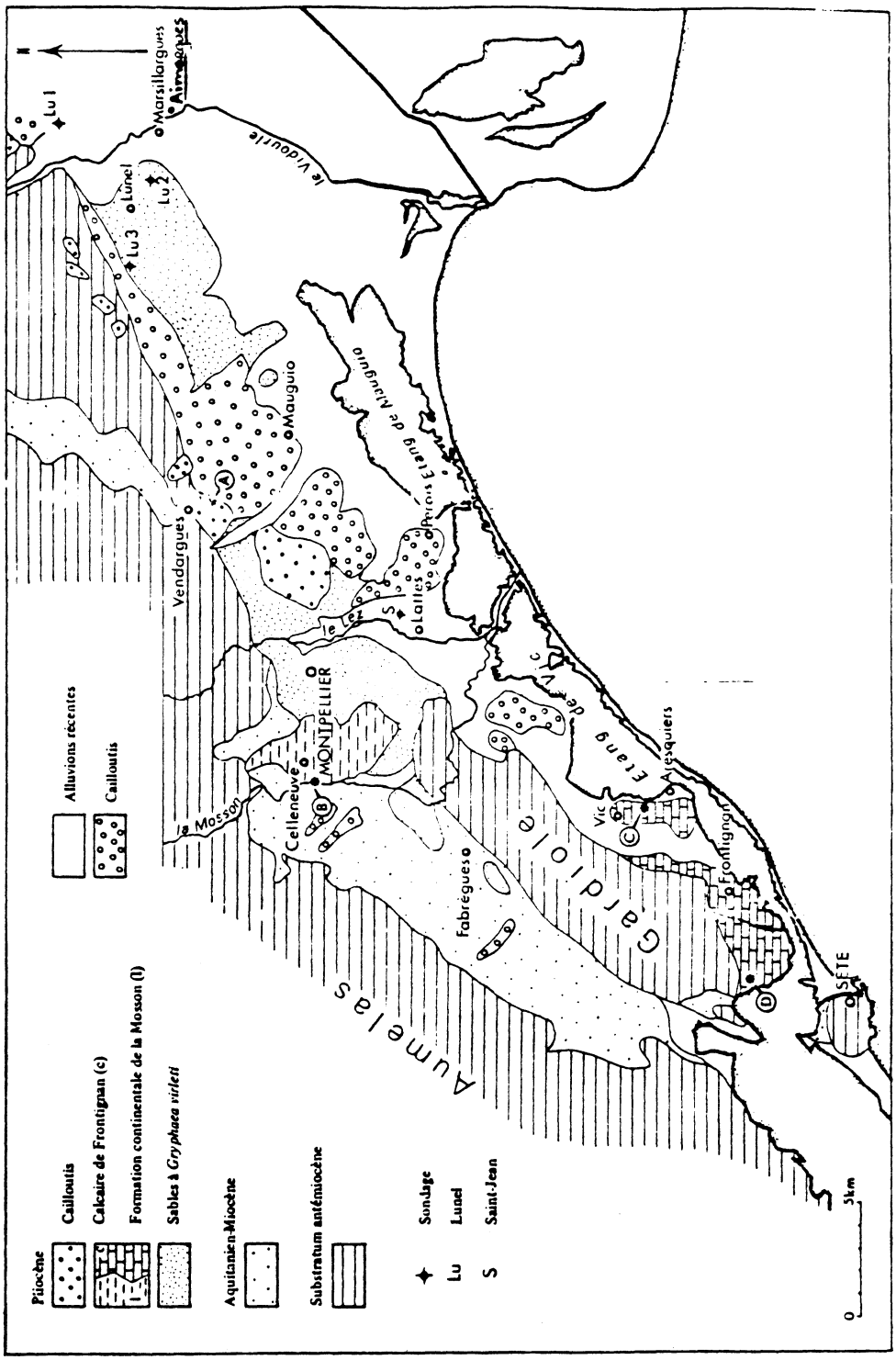


FIGURE 16 : Carte du Bas-Languedoc au SW du Vidourle. gisements : A, Pioch Piallat - B, marnes de Celleneuve C, tour de Vic-la-Gardiole - D, carrière Lafarge (In: BALLESIO, R. , 1973 - Etude stratigraphique du Pliocène Rhodanienn. Doc. Lab. Géol. Fac. Sci. de Lyon, n° 53. 333p.)

supérieure à 700 mm par an, et les pluies tombent surtout en automne et à l'entrée de l'été, un peu au printemps. Elles revêtent souvent un caractère orageux.

La valeur moyenne annuelle des températures est de 13.8°C (Montpellier-Frejorgues), les hivers étant doux (température moyenne du mois le plus froid supérieure à 0°C) et les étés très chauds.

La région est soumise aux vents secs et froids du Nord et Nord-Ouest en hiver (Mistral) et aux vent doux et humides d'Est et Sud-Est (Marin), fréquents en été.

1.1.4. Topographie

La région où se trouve la parcelle d'étude peut être considerée comme une plaine faiblement ondulée, située à moins de 10 m d'altitude.

L'étude microtopographique de la parcelle révèle une différence de niveau maximale de 70 cm, et le microrelief local se caractérise par la présence de plusieurs bosses, dûes principalement au travail des taupes.

1.1.5. Végétation

L'étude de la végétation de la prairie du Chateau de Teillan, effectuée par Mlle. Joelle FISCHER et M. François MESLEARD, stagiaires du CEPE-CNRS, nous indique la prédominance de l'*Agropyrum acutum* et *Poa pratensis* sur la surface de 7000 m2, où nous avons placé nos profils d'étude. Nous y trouvons aussi, en moindre nombre, des spécimens de *Potentilla reptans*, *Centaurea aspera* et *Festuca arundinacea*.

1.1.6. Caractérisation géologique et pédologique

Géologiquement, le terrain se trouve sur les alluvions récentes du Vidourle(fig.15). La figure 16 schématise la coupe du terrain de la plaine de Marsillargues (rive droite du Vidourle), selon un sondage du B.R.G.M., (d'après la carte géologique de LUNEL, au 1/50 000).

Une étude pédologique au 1/5000 de la plaine de Marsillargues a été faite par la Companhie Nationale d'Aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc .

Les sols ont été classés comme peu évolués, non climatiques, légèrement brunifiés, et d'apport alluvial. Le matériau d'origine est constitué par les dépôts alluviaux non caillouteux, holocènes, du Vidourle.

Sur la prairie du Chateau de Teillan les sols ont une couleur jaunâtre; la structure est grumuleuse jusqu'à 10-20 cm, et prismatique au-dela de cette profondeur ; ces sols ont une profondeur supérieure à 1.20 m et la texture est limono-argilo-

TABLEAU 9 : Résultats de l'analyse granulométrique du sol de la prairie du Chateau de Teillan - Aimargues (profil 3 CT)

Prof. (cm)	% Arg	% Limon % LF.	% Limon % LG	% Sable % SF	% Sable % SG
0 - 10	22.05	27.25	25.20	19.25	6.25
10 - 20	21.20	28.90	24.60	19.10	6.20
20 - 30	20.60	28.00	26.30	18.70	6.40
30 - 40	20.90	28.65	25.60	18.80	6.05
40 - 50	22.30	30.95	25.40	17.80	3.55
50 - 60	23.40	29.50	26.85	17.55	2.70
60 - 90	22.30	28.00	26.60	21.15	1.95
90 - 140	20.10	27.35	27.80	21.65	2.05
+ 140	18.40	18.00	28.40	32.40	2.80

TABLEAU 10 : Resume des caracteristique du sol de la prairie du Chateau de Teillan - Aimargues. (profil 3 CT)

Prof.(cm)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-90	90-140
m.org %.	23.3	22.1	18.5	14.9	10.4	8.6	-	-
N %.	1.46	1.40	1.20	1.00	0.74	0.62	-	-
C/N	9.31	9.21	9.0	8.70	8.24	8.06	-	-
pH(eau)	8.0	8.1	8.2	8.2	8.4	8.4	8.4	8.3
calc.tot	383	379	394	384	388	393	396	421
calc.act	80	73	70	70	75	65	60	75
P %.	0.04	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	-	-
cap.éch.	9.4	9.4	9.1	8.4	7.8	7.8	8.4	8.4
Ca %	32.7	33.1	33.1	33.6	33.4	33.2	33.9	34.3
Mg %	1.26	1.17	1.07	1.04	1.01	1.01	1.09	1.27
K %	0.58	0.32	0.20	0.18	0.16	0.15	0.12	0.11
Na %	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13	0.16	0.22	0.12
Cu (ppm)	67.7	86	58.5	38	13.3	7.1	-	-

profondeur supérieure à 1.20 m et la texture est limono-argilo-sableuse sur toute le profil (environ 21% d'argile; 55% de limon; 23% de sable). Les résultats de l'analyse granulométrique sont indiqués dans le tableau 9. Au-dela de 1.70 m de profondeur, le matériau devient de plus en plus sableux (au moins 40 % de sable), et les sables micacés semblent être prédominants.

Le resumé des caractéristiques du sol de la prairie, plus précisement de deux profils étudiés sur notre parcelle de travail, est presenté dans le tableau 1. Nous pouvons observer que le sol présente une forte teneur en calcaire total (entre 379 %. et 451%.); le pH est supérieur à 8.0 (alcalin) sur tout le profil; le rapport C/N est faible (inférieur à 10); la capacité d'échange (méthode de Metson) est faible (environ 9 meq/100 g de sol pour les 50 premiers centimètres). A remarquer, la teneur en cuivre total, qui peut être considerée commme élévée pour une prairie (supérieure à 58 ppm), ce que nous indique l'usage ancien de traitements phyto-sanitaires.

Le système racinaire dans ce sol présente un très bon développement, étant très dense jusqu'à 50-60 cm et avec plusieurs racines encore à 80cm de profondeur.

Nous avons pu constater aussi la présence occasionnelle de cailloux calcaires sur des profils étudiés, de taille variée , sans que le nombre fût gênant pour nos études des galeries, ni pour l'enfoncement des anneaux de Muntz, lors des mesures de conductivité hydraulique.

1.2. NATURE DES OBSERVATIONS ET DES MESURES

1.2.1. Aspects Généraux

Le travail à Aimargues, étude topographique comprise, s'est déroulé entre le 1 mars et le 8 juin 1984. Comme l'emplacement des sept profils dépendait de l'étude préalable de la végétation, le protocole expérimental, dans son integralité, a été appliqué à partir de la fin du mois d'avril.

Nous avons été limité par les conditions météorologiques de ce printemps, car l'irrégularité des pluies a provoqué un ralentissement anticipé de l'activité des vers de terre. Ceci a rendu difficile le prélèvement de vers de terre, gênant en outre l'établissement de valeurs permettant une comparaison de la conductivité hydraulique et du volume de galeries avec la population récoltée.

Avant la localisation et l'examen des profils qui font le sujet de ce mémoire, nous avons fait l'étude de deux autres profils d'essai qui, pour des raisons évidentes, ne seront pas réportés ici (situés trop près des haies, sur des zones plus au moins remaniées).

1.2.2. Evaluation de la population de vers de terre

Comme signalé,l'application de cette partie du protocole

expérimental a été nettement contrariée par les conditions météorologiques du printemps dernier. Nous avons appliqué la méthode au formol sur les sept profils et la méthode "formol+bêche" sur trois de ces profils, sans observer un seul ver de terre.

Toutefois, les animaux prélévés lors des études d'essai, nous permettent affirmer que la population de lombriciens de cette prairie est composée principalement par des espèces de la famille **Lumbricidae**, genre **Scheroteca**, et nous pouvons y trouver aussi des espèces du genre **Nicodrillus** (**Lumbricidae**). Il s'agit de lombriciens anéciques, en général.

Selon **BOUCHE** (1972), le genre **Scheroteca** comprend des animaux de taille grande à très grande (longueur de corps de 300 à 1100 mm), possédant plus de 170 segments. Le genre **Nicodrilus** est constitué par des individus de taille moyenne à grande (longueur de corps de 100 à 500 mm) et possédant de 150 à 450 segments. (**BOUCHE**, 1972)

1.2.3. Mesure de la conductivité hydraulique

Les mesures de la conductivité hydraulique, realisées au double anneau avec le vase de Mariotte, ont donné les résultats exposés au tableau 11. Ceux ci sont tout à fait satifaisants, comme nous le discuterons par la suite. La valeur inférieure était 6.53 cm/h pour le profil 7 CT et la valeur supérieure 18.36 cm/h pour le profil 4 CT.

Lors de nos mesures nous avons pu observer que les vitesses d'infiltration instantanées variaient légèrement, même si l'allure générale des courbes, conduisant à l' estimation de ks, présentait une certaine stabilité générale.

Un autre point à remarquer est le taux de saturation car, lors de l'ouverture de chaque profil, nous avons pu observer qu'il se formait toujours un "bulbe" plus humide qui allait jusqu'à 50-60 cm de profondeur, les 10-20 premiers centimètres étant saturés ou bien proche de la saturation.

1.2.4. Caractérisation du réseau de galeries

Après la coloration des parois des galeries fonctionnelles avec le bleu de méthylène, nous avons ouvert le profil pour la caractérisation du réseau de galeries.

L'histogramme de la figure 18, nous donne le nombre de galeries par profil et par classe de diamètre moyen (le diamètre d'une galerie peut varier). Nous avons trouvé un nombre variable de galeries fonctionnelles, passant de 17 galeries pour le profil 1 CT à 41 galeries pour le profil 2 CT. Si nous admettons une moyenne de 28 galeries pour une surface de 0.19 m (celle de l'anneau central), nous aurons un total de 1426 galeries fonctionnelles sur 1 hectare.

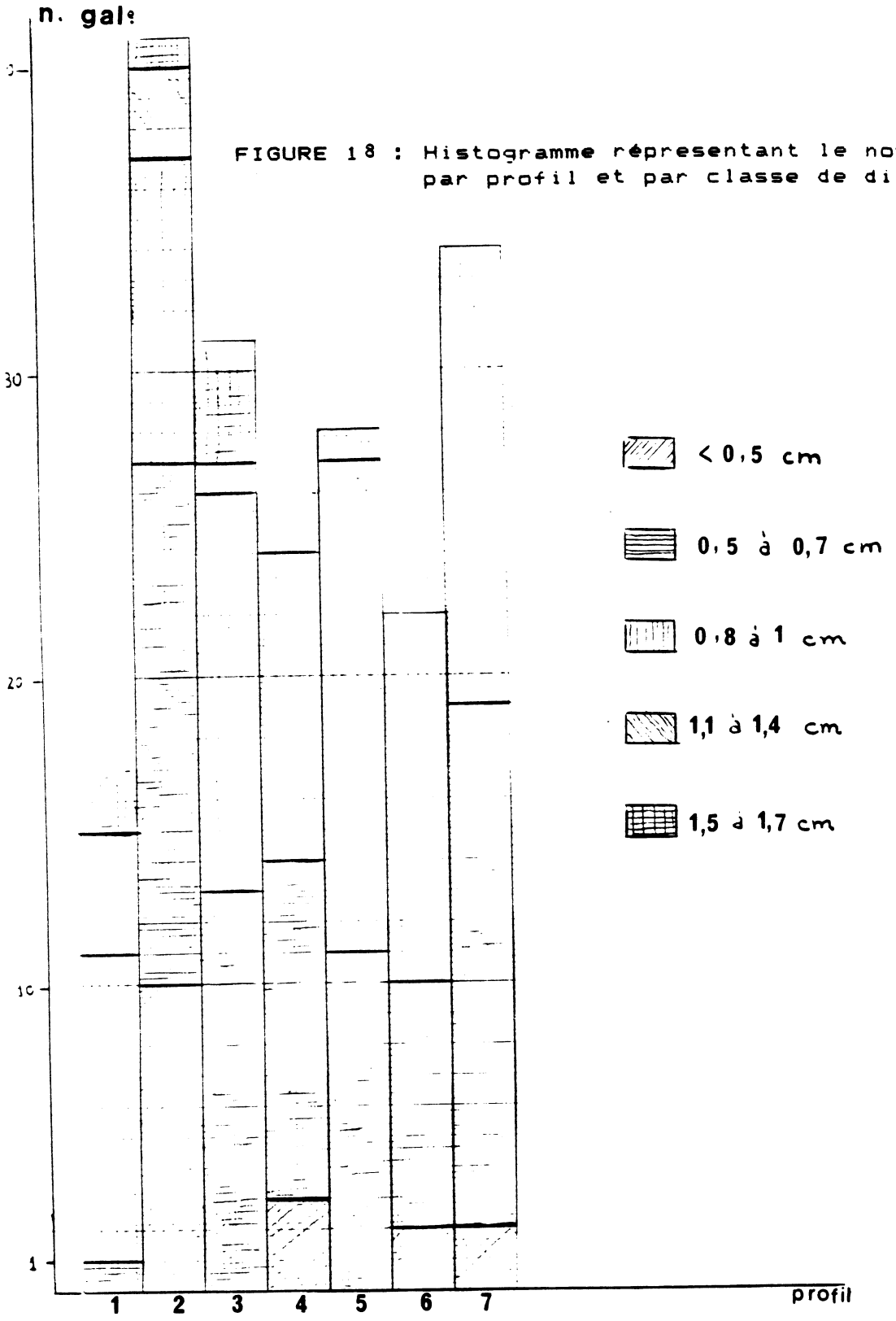


FIGURE 18 : Histogramme répresentant le nombre de galeries par profil et par classe de diamètre. (Aimargues)

TABLEAU 14 : Densité réelle mesurée au pycnomètre (profil 3 CT)

Profondeur (cm)	dr
0 - 10	2.605
10 - 50	2.631
50 - 90	2.603
90 -140	2.694

Deux remarques nous semblent importants:

- le grand nombre de racines dans les 5 premiers centimètres de profondeur empêche une caractérisation précise des galeries de lombriciens, car il nous est difficile de différencier une galerie de ver de terre d'une "galerie racinaire", d'autant que les racines semblent avoir une forte tendance de se développer dans des galeries de vers de terre;

- les racines jouent, elles aussi, un rôle important dans la circulation de l'eau libre du sol.

1.2.5. Evaluation de la densité apparente

La densité apparente a été évaluée en utilisant une double-sonde gammamétrique LPC-INRA. Nous avons fait deux séries de mesures, tous les 5 cm, jusqu'à 50 cm de profondeur, la distance source-détecteur étant de 30 cm.

Pour des raisons de disponibilité de matériel, nous avons travaillé en deux étapes. La première série de mesures a été faite sur les sept profils, avec une descente en bordure de l'emplacement de l'anneau externe . Ces mesures ont été faites faites avant la mesure de la conductivité hydraulique, le sol étant à l'humidité naturelle du jour. A partir de cette série de mesures, réalisée entre le 9 et 10 mai, nous avons pu choisir un profil semblant le plus caractéristique. Sur ce profil, le 3 CT, nous avons réalisé une deuxième série de mesures, contituée par 6 descentes de la double-sonde autour de l'anneau central, tout de suite après la mesure de ks et l'infiltration du colorant. Ces mesures ont été faites entre le 5 et 6 juin.

Les résultats obtenus (présentés en Annexe II) nous montrent la homogénéité des valeurs de densité apparente sur tout le profil, la moyenne pour la première série étant de 1.30 (σ = 0.0349) et pour la deuxième série 1.34 (σ = 0.0506).

1.2.6. Evaluation de la densité réelle du sol

Sur des échantilons prélévés lors de l'ouverture du profil 3 CT nous avons effectué des mesures de densité réelle avec le picnomètre. Les résultats obtenus (tableau 14) nous donnent une valeur de 2.6046 pour la couche 0-10 cm et 2.6309 pour la couche 10-50 cm. Nous allons travailler seulement avec ces deux horizons car nous n'avons pas pu faire des mesures de densité apparente au-delà de 50 cm.

1.2.7. Evaluation de la micro et de la macroporosité du sol

La microporosité du sol a été déterminée à partir de la courbe pF = f(humidité), obtenue à partir de l'application de la méthode de l'extracteur à plaques, en soumettant les échantillons de sol, humectés "par ascensum", à différentes pressions (300 mbar, 500 mbar, 1000 mbar, 15000 mbar). Nous avons travaillé avec des échantillons rémaniés (tamisés) du profil 3 CT, en quatre

TABLEAU 15 : Micro et macroporosité du sol - Aimargues.

Prof.(cm)	Porosité (%)	Microp.(%)	Macrop.(%)
0 - 10	53.54	27.20	26.34
10 - 50	48.31	30.25	18.06

FIGURE 19 : Evolution de la masse d'*Eisenia fetida* dans le temps et selon le pF du milieu d'élévage (par gramme de poids frais) In: HEYDET, 1983.

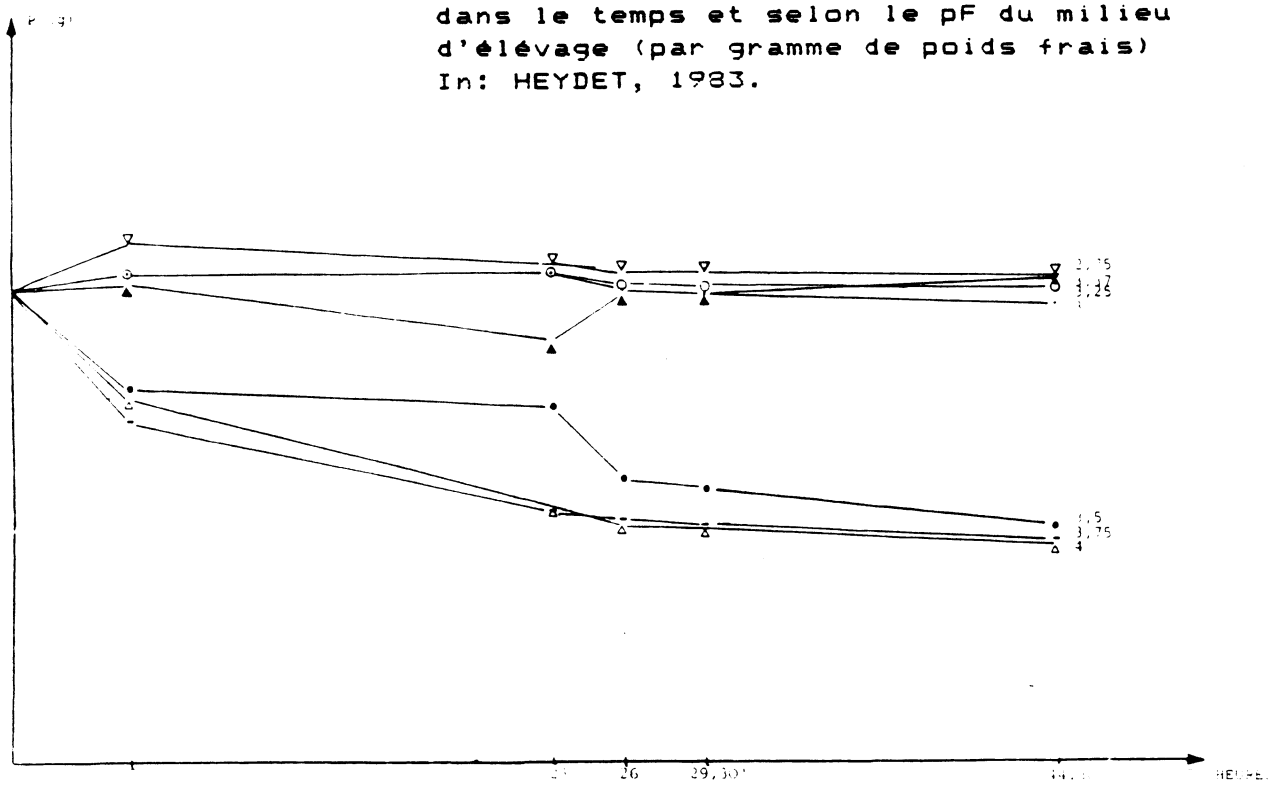


TABLEAU 16 : Humidité du sol, température du sol et longueur de la nuit lors des essais de prélèvement de vers de terre - Aimargues.

Profil	date prélv.	t (°C) à -10cm	H (%) à -10 cm	pF	long.nuit
1 CT	14/05	20	9.23	>4.18	8 :45 h
2 CT	23/05	16	17.63	2.86	8 :23 h
3 CT	05/06	18	18.10	2.84	8 :00 h
4 CT	28/05	19	16.51	2.9	8 :13 h
5 CT	07/06	19	17.21	2.86	7 :57 h
6 CT	30/05	22	15.58	2.78	8 :08 h
7 CT	31/05	19	17.16	2.86	7 :57 h

répétitions. La capacité au champ a été obtenue au pF=2.7. Les résultats obtenus (tableau 15) nous donnent une macroporosité élévée pour la couche 0-10 cm (26.34 %) et une macroporosité moyenne pour la couche 10-50 cm (18.06 %), la microporosité augmentant légèrement (27.20 à 30.20 %).

1.3. ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

1.3.1. Caractérisation de la population de vers de terre

Malgré l'échec des tentatives de prélèvement par les méthodes "formol" et "formol+bêche", ni ces méthodes, ni le protocole dans son intégralité peuvent être mis en cause. En effet, nous avons remarqué lors du deuxième chapitre (2.1.2.) que l'activité des vers de terre était liée à la température et à l'humidité du sol, et principalement à la photopériode (longueur de la nuit) (BOUCHE, 1984).

Nous avons effectivement pu observer, lors de l'étude du deuxième profil d'essai, en mars, un ver de terre apparemment en léthargie, à 38 cm de profondeur, quand la température du sol était encore de 6°C et l'humidité du sol de 15.3% , à 10 cm de profondeur; la longueur de la nuit étant 10h et 17min. (voir tableau 16).

Sans vouloir développer ce sujet, car il ne constitue pas notre objectif direct , nous pouvons signaler que, selon HEYDET (1983), l'humidité limite pour l'activité de l'*Eisenia fetida*, un ver de terre du type épigé , est celle correspondant au pF 3.37 (figure 19). Bien que cette caractéristique peut être généralisée pour les épigés, elle reste encore à préciser en ce qui concerne les anéciques et les endogés.

1.3.2. Variabilité spatiale de k

Le tableau 11 donne les valeurs de conductivité hydraulique à saturation avec les différentes dates de réalisation de chaque mesure.

Nous pouvons remarquer:

- les résultats obtenus présentent une moyenne de 12.40 cm/h, l'écart-type étant de 4.06 cm/h et le coefficient de variation de 32.73%. Cette variation peut être considerée comme tout à fait acceptable si l'on condidère que la variabilité habituelle des valeurs de conductivité hydraulique mesurées au "double-anneau", sur un champ plus ou moins homogène, peut dépasser 100%.

- il y a une variation des résultats dans le temps : les valeurs les plus élevées ont été mesurées jusqu'au 30 mai et les plus basses entre le 31 mai et le 07 juin. Ceci ne nous permet toutefois pas d'affirmer qu'il a eu une diminution de la conductivité hydraulique au long de la saison, étant donné le nombre insuffisant de répétitions et la durée très faible de la période de mesures.

TABLEAU 17 : Volume et longueur des galeries fonctionnelles par profil - Aimargues.
(volume de sol exploité = 0.19635 m^3)

Profil	Volume (cm^3)	Longueur (cm)	classe de diam. prédominante (cm)
1 CT	922.721	905.80	0.8 à 1.0
2 CT	322.180	697.30	0.5 à 0.7
3 CT	458.077	891.00	0.5 à 0.7
4 CT	332.760	605.80	0.5 à 0.7
5 CT	468.216	819.00	0.8 à 1.0
6 CT	375.327	707.00	0.8 à 1.0
7 CT	468.043	1112.00	0.8 à 1.0

TABLEAU 18 : Rapport volume et diamètre de galeries fonctionnelles Aimargues.

PROFIL	DIAMETRE (cm)					
	<0.5	0.5 à 0.7	0.8 à 1.0	1.1 à 1.4	1.5 à 1.7	>1.7
1 CT	0%	2.69%	38.73%	15.03%	26.84%	16.7%
2 CT	3.7%	24.52%	40.95%	13.52%	17.27%	0 %
3 CT	0 %	23.13%	51.94%	5.37 %	9.52%	10 %
4 CT	0.6%	20.24%	51.28%	25.16%	2.66 %	0 %
5 CT	0 %	18.16%	67.11%	14.73%	0 %	0 %
6 CT	0.3%	16.76%	76.95%	6.03%	0 %	0 %
7 CT	1.6%	28.66%	69.76%	0 %	0 %	0 %
moyenne	0.9%	19.17%	56.67%	11.41%	8.04%	3.82%

- en utilisant la classification proposée par **NOWLAND** (1981), nous observons une uniformité presque totale des résultats obtenus; étant donné que même la valeur "hors classe" de 18.36 cm/h, obtenue pour le profil 4 CT, est en fait très proche de la limite inférieure de la classe H2 (16.7 cm/h à 50.0 cm/h).

1.3.3. Variabilité spatiale (latérale et verticale) du réseau des galeries de vers de terre

Le tableau 17 nous montre les valeurs de volume et de longueur totale des galeries fonctionnelles, pour chaque profil étudié, en indiquant la classe de diamètre qui a été la plus rencontrée.

En observant ces données nous pouvons remarquer :

- le volume moyen pour l'ensemble de sept profils est de 478.2 cm , avec un écart-type de 205.66 cm ,ce que nous donne un coefficient de variation de 43.05 %.

- en éliminant le profil 1 CT, pour des raisons que nous expliquerons plus avant, le volume moyen des galeries se ramène à 404.10 cm , l'écart-type tombant à 69.907 cm , soit un coefficient de variation beaucoup plus faible de 17.05 % .

- la longueur moyenne pour l'ensemble des sept profils est de 819.70 cm, avec un écart-type de 168.00 cm, ce que nous donne un coefficient de variation de 20.62 % .

- cependant, l'elimination du profil 1 CT ne nous apporte plus de diminution de la dispersion des données car l'écart-type passe alors à 180.40 cm pour une moyenne de 805.35 cm, ce que donne un coefficient de variation légèrement plus élevé de 22.40 % .

La tentative d'eliminer le profil 1 CT se justifie par le fait qu'il a été étudié à la fin d'une longue période sans pluie. Nous avons trouvé plusieurs galeries qui s'élargissaient, en formant des "logettes". Ceci peut être visualisé par les tableaux 18 et 19 . Ils nous montrent les pourcentages des galeries, en volume et en longueur, pour chaque classe de diamètre. Nous pouvons vérifier que le profil 1 CT présente 43.55 % du volume total de galeries correspondant à des diamètres compris entre 1.5 et 2.0 cm; et 23.11 % de la longueur totale correspondant à cette même classe de diamètre. Pour les six autres profils, en revanche, ces pourcentages sont beaucoup plus faibles.

Finalement, l'observation des données du tableau 17 nous indique que le diamètre des galeries de vers de terre varie principalement entre 0.5 cm et 1.0 cm; sachant qu'une galerie peut comporter un diamètre variable.

La figure 18 nous montre,sous la forme d'un histogramme, le nombre de galeries de vers de terre, pour chaque profil, avec

TABLEAU 19 : Rapport longueur et diamètre des galeries fonctionnelles - Aimargues.

PROFIL	DIAMETRE (cm)					
	<0.5	0.5 à 0.7	0.8 à 1.0	1.1 à 1.4	1.5 à 1.8	>1.8
1 CT	0%	7.73%	58.79 %	12.37 %	14.63 %	6.48%
2 CT	14.5%	48.80%	28.24 %	4.67 %	3.75 %	0 %
3 CT	0%	51.96%	41.65 %	2.24 %	2.56 %	1.6%
4 CT	4.30%	42.01%	40.65 %	12.22 %	0.83 %	0 %
5 CT	0 %	35.77%	56.78 %	7.45 %	0 %	0 %
6 CT	1.97%	34.52%	60.68 %	2.83 %	0 %	0 %
7 CT	30.3%	42.26%	46.53 %	0 %	0 %	0 %
moyenne	7.30%	37.58%	47.62%	5.97 %	3.11 %	1.1%

TABLEAU 20 : Variation volume total et valeur de k par profil - Aimargues.

PROFIL	Volume (cm3)	ks (cm/h)
1 CT	922.721	14.05
2 CT	322.180	13.29
3 CT	458.077	10.76
4 CT	332.760	18.36
5 CT	468.216	8.59
6 CT	375.327	15.25
7 CT	468.043	6.53

TABLEAU 21 : Variation de la longueur totale et de la valeur de k par profil - Aimargues.

PROFIL	Longueur (cm)	ks (cm/h)
1 CT	905.80	14.05
2 CT	697.30	13.29
3 CT	891.00	10.76
4 CT	605.80	18.36
5 CT	819.00	8.59
6 CT	707.00	15.25
7 CT	1 112.00	6.53

les quantités de galeries pour chaque classe de diamètre. Ainsi, nous pouvons vérifier que ce nombre est variable et que la distribution dans chaque classe est plus ou moins homogène. Il faut remarquer que pour la construction de l'hystogramme nous avons travaillé avec le diamètre moyen de chaque galerie.

1.3.4. Comparaison entre volume, longueur des galeries et valeurs mésurées de k

Les tableaux 20 et 21 nous donnent les valeurs de longueur et de volume total des galeries associées aux différentes mesures de conductivité hydraulique, pour chaque profil.

En observant ces données nous pouvons conclure qu'une augmentation du volume total de galeries ne correspond pas toujours à une augmentation de la valeur de ks, et vice-versa. De la même façon, une augmentation de la longueur totale ne correspond pas à une diminution de ks.

En effet, les coefficients de corrélation (r) établis entre ces données ont été les suivants:

- après l'ajustement de la courbe

$y = 27.2946 - 2.4375 \, Ln(x)$

où: y = condutivité hydraulique

x = volume total

r = 0.2131

- après l'ajustement de la courbe

$y = 124.0907 - 16.6917 \, Ln(x)$

où: y = conductivité hydraulique

x = longueur totale

r = 0.8348

En réalisant les ajustements par plusieurs courbes -linéaire, exponentielle, puissance et logarithmique -, les résultats les plus cohérents (valeur de r plus élevée) ont été obtenus pour cette dernière.

De ces résultats, nous pouvons conclure que malgré la faible corrélation conductivité hydraulique - volume total, la corrélation entre conductivité hydraulique et longueur totale nous paraît satisfaisante dans un premier essai. Le volume total étant directement fonction de la longueur des galeries, cela signifie que le diamètre est un facteur déterminant (rappelons que le diamètre d'une galerie peut varier).

TABLEAU 22 : Estimative de la valeur de ks suivant **McKeague**, 1982

PROFIL	Ks selon NOWLAND	Estimative de Ks suivant McKeague 0-10cm	10-20cm	20-30cm	30-40cm	40-50cm
1 CT	M1	H1	H1	M1	H1	M1
2 CT	M1	H1	H2	M1	M1	M1
3 CT	M1	H2	M1	H2	M1	M1
4 CT	H2	M1	H2	H2	M1	M1
5 CT	M1	H2	H2	H2	H2	M1
6 CT	M1	H2	M1	M1	M1	M1
7 CT	M1	M1	H2	M1	M1	M1

TABLEAU 23 : Estimation des galeries fonctionnelles sur 1 ha

	moyenne de 7 profils	estim. sur 1 ha	valeurs obtenus par KRETZSCHMAR
Longueur	819.70 cm	417.46 km	3 800 km/ha
Volume	478.2 cm^3	24.35 m^3	5 m^3 /ha
Surface développée	2169 cm^2 (*)	1.12 m^2 m^2 sol	4.9 m^2 /m^2 sol

Obs: KRETZSCHMAR (1978) : 68 % du volume du réseau dûs aux galeries de 4 mm de diamètre; pendant que nous avons trouvé 56.67% du volume des galeries fonctionnelles dûs aux galeries de diamètre entre 0.8 et 1.0 cm.

* pour un volume de sol de 0.19635 m^3 .

Une autre façon d'analyser ces résultats est l'utilisation de la classification suggérée par **Mc KEAGUE** (1982), en vue de l'estimation de la conductivité hydraulique à saturation à partir de la morphologie des profils. Les résultats correspondants sont présentés dans le tableau 22, lequel est issu du tableau 14 associé aux données pédologiques (granulométrie, structure, présence ou absence de fissures, etc.).

A partir du tableau 22 nous pouvons observer que d'une façon générale il y a une suréstimation de la valeur de ks dans les couches superficielles, tandis que l'estimation pour les couches 30-40 cm et 40-50 cm semble très cohérente avec les valeurs mésurées; sauf pour la couche 30-40 cm du profil 5 CT et pour la couche 40-50 cm du profil 4 CT. La suréstimation pour les couches superficielles peut s'expliquer par la difficulté de répérage de galeries de ces couches.

1.3.5. Estimation du réseau des galeries d'une surface de 1 hectare a partir des données obtenues

A partir des données obtenues sur chacun de profils, nous avons estimé le volume et la longueur totale des galeries de vers de terre sur 1 hectare, avec une estimation de la surface développée pour ces galeries (tableau 23).

L'estimation se monte à 417 km de galerie pour 1 ha, avec un volume de 24.35 m^3 /ha . Si nous comparons ces valeurs avec les résultats obtenus par **KRETZSCHMAR** (1978) (tableau 23), nous constatons que l'estimation de la longueur totale observé par ce dernier - 3 800 Km/ha - est presque 10 fois supérieure à la notre, alors que le volume estimé était de 5 m^3 /ha.; c'est à dire, bien inférieur à celui que nous avons observé.

Une des explications est le fait que **KRETZSCHMAR** avait recensé l'ensemble des galeries, alors que nous n'avons considéré que les galeries fonctionnelles, c'est à dire, colorées par le bleu de méthylène.

Lors de nos études, nous avons remarqué la présence de plusieurs galeries non colorées, principalement dans les profils 3 CT, 4 CT, 5 CT, 6 CT et 7 CT. Bien que nous n'ayons pas mesuré le nombre et la taille de ces galeries, nous avons pu observer qu'elles présentaient deux caractéristiques générales:

- il y avait un grand nombre (18 pour le profil 7 CT, par exemple)de petites galeries non colorées, de diamètre inférieur à 0.3 cm;

- il y avait des galeries de diamètre plus grand (supérieur à 0.5 cm et quelques unes de 1 cm) situées dans le prolongement de galerie colorée et devenues inactives à la suite de phénomènes d'obstruction par des matériaux semblant être des réjets de vers de terre.

De toute façon, nous pouvons affirmer que la majorité des galeries, dans tous les profils étudiés, était encore

TABLEAU 24 : Comparaison entre le volume des galeries et la densité apparente, pour couche de 5 cm jusqu'à 50 cm de profondeur. Profil 3 CT.

Profondeur (cm)	Volume (cm^3)	densité apparente
0 - 5	20.76	1.21
5 - 10	74.60	1.35
10 - 15	34.94	1.37
15 - 20	133.93	1.36
20 - 25	45.83	1.32
25 - 30	84.52	1.32
30 - 35	3.85	1.35
35 - 40	18.90	1.40
40 - 45	20.79	1.39
45 - 50	17.45	1.36

TABLEAU 25 : Rapport entre la porosité et le volume total de sol . Profil 3 CT - Aimargues.

	COUCHE	
	0 - 10 cm	10 - 50 cm
vol.sol considéré	19 634.95 cm^3	78 539.82 cm^3
vol. galerie	95.37 cm^3	360.21 cm^3
vol.gal/vol.total	0.49 %	0.46 %
porosité	54 %	48.31 %
vol. vides	10 602.87 cm^3	37 942.59 cm^3
macroporosité	26.34 %	18.06 %
vol.macropores	2 792.80 cm^3	6 852.43 cm^3
vol.macro/vol.tot.	14.22 %	8.72 %
vol.gal./vol.macro.	3.42 %	5.26 %

active. Ceci nous amène à conclure que même en totalisant toutes les galeries, actives ou pas, nous sommes encore loin des résultats obtenus par **KRETZSCHMAR** (1978).

Quant au volume inférieur trouvé, il peut s'expliquer par le type de population : il avait travaillé en effet dans un champ où les espèces prédominantes (81.2%) étaient Nicodrillus longus et Nicodrillus nocturnus et le diamètre de leurs galeries variait entre 3 et 5 mm. Rappellons que le diamètre des galeries prédominant sur notre site était compris entre 0.8 et 1.0 cm.

1.3.6. Comparaison volume de galeries et densité apparente du sol

Le tableau 24 donne les valeurs de volume de galeries et de la densité apparente, par couche de 5 cm jusqu'à 50 cm, pour le profil 3 CT.

Nous pouvons observer qu' une augmentation de volume des galeries ne correspond pas toujours à une diminution de la valeur de densité apparente et vice-versa. En effet, la mesure de densité apparente considère tous les vides du sol et le volume des galeries indique seulement celles qui sont fonctionnelles.

Ceci nous permet de conclure que la mesure de densité apparente ne peut pas, en principe, nous apporter d'information précise sur la circulation de l'eau, au moins pour les profils que nous avons étudié.

1.3.7. Comparaison entre la macroporosité biologique dûe aux vers de terre et la macroporosite du sol

Le tableau 25 nous donne les valeurs de volume des galeries et de macroporosité totale du sol , pour les couches 0-10 cm et 10-50 cm du profil 3 CT.

Ces valeurs nous indiquent que le volume des galeries correspond à 0.49 % du volume total de sol considéré pour la couche 0-10 cm (0.019 m^3) et à 0.46 % du volume total du sol pour la couche 10-50 cm (0.078 m^3). Parallèlement, la macroporosité correspond à 14.22 % du volume total du sol pour la coche 0-10 cm et à 8.72 % du volume total pour la couche de 10-50 cm.

Rappelons nous que selon **BREWER** (1964) les macropores correspondent aux pores de taille supérieure à 75 μm.

Ainsi nous pouvons conclure par ces résultats que les galeries fonctionnelles observées dans le profil 3 CT correspondent à 3.42 % de la macroporosité de la couche 0-10 cm et à 5.26 % de la macroporosité totale de la couche 10-50 cm. Nous signalons encore que les résultats obtenus pour les couches superficielles peuvent être surestimées, étant donné la difficulté de répérage des galeries dans ces couches .

TABLEAU 26 : Comparaison entre longueur totale mésurée et longueur totale calculée, par profil.

PROFIL	Long. Mesurée (cm)	Long. Calc. (cm)
1 CT	905.80	613.98
2 CT	697.30	658.95
3 CT	891.00	663.53
4 CT	605.80	573.75
5 CT	819.00	830.37
6 CT	707.00	735.34
7 CT	1112.00	925.38

1.3.8 . Considérations sur les valeurs de longueur et de diamètre des galeries mesurées sur le terrain

La mesure du diamètre des galeries sur le terrain reste encore à améliorer. Car, étant donné les moyens utilisés (une régle graduée au milimètre) et la taille des galeries, cette mesure n'est pas tellement précise.

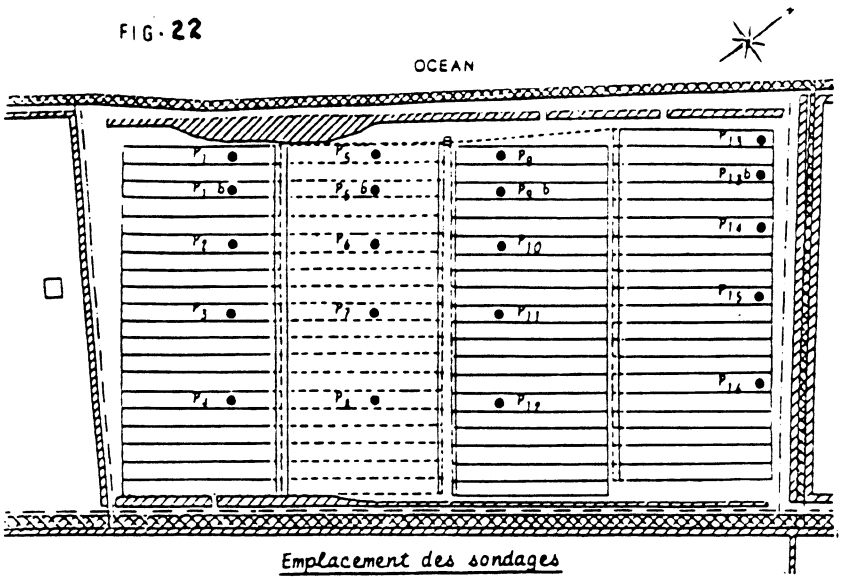
Un autre aspect à remarquer ici est la mesure de la longueur. Comme nous l'avons déjà discuté lors de la présentation du protocole expérimental, nous avons observé que la longueur de galerie mesurée sur le terrain était souvent différente d'une valeur calculée (en se basant sur la position spatiale de la galerie). La comparaison valeur mesurée - valeur calculée est présentée dans le tableau 26 et nous pouvons vérifier que les différences sont même très importantes. Nos expériences jusqu' ici nous conduisent à conclure que:

- le calcul de la longueur ne prend pas en compte la caractéristique de tortuosité d'une galerie,facteur souvent observé sur le terrain;

- la longueur des galeries (ou des parties de galeries) horizontales est aussi négligée lorsque nous faisons le calcul de la longueur totale. Or, il nous est souvent arrivé de trouver au moins une partie de galerie qui avait un cheminement horizontal dans le profil.

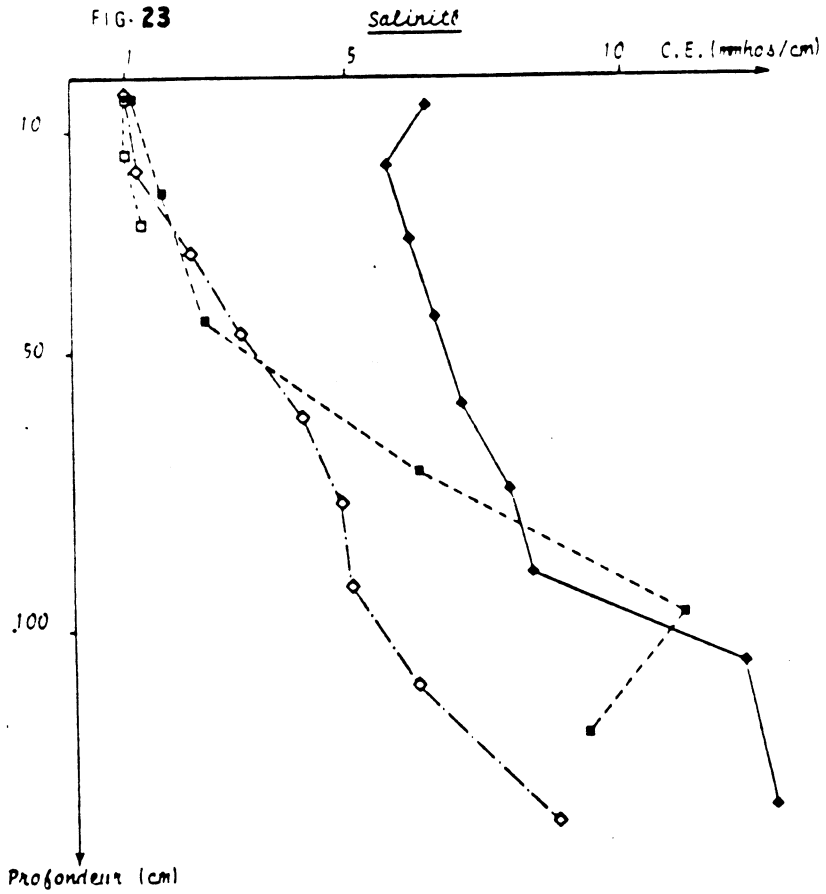
Nous admettons que la mesure de la longueur des galeries reste aussi à mieux préciser.

FIG. 22



Emplacement des sondages

FIG. 23



2. POLDER DE MOUEZE BROUAGE

2.1. Introduction

Dans le but de vérifier l'effet de l'introduction d'une population lombricienne sur la circulation de l'eau dans un site ou elle était absente auparavant, nous avons appliqué le protocole expérimental dans le polder de MOUEZE-BROUAGE, en Charente Maritime.

Ce travail constitue une des étapes d'un projet plus global d'étude des différentes conséquences de l'introduction de vers de terre, programme mené par J.-C. HEIDET, stagiaire du Laboratoire de Zooécologie du Sol de l'INRA.

Le travail a été donc développé dans un polder récemment gagné sur la mer. Nous avons executé les mesures de conductivité hydraulique et la caractérisation de la macroporosité biologique dûe aux vers de terre sur six parcelles qui rélevent d'autant de modalités agronomiques différentes mise en place à MOUEZE-BROUAGE.

2.2. Description du milieu

Le polder de MOUEZE-BROUAGE est situé à 9 km de Rochefort (Charente Maritime). Il se situe au bord de l'Ocean Atlantique et les caractéristiques pédologiques du terrain réfletent l'influence de la mer.

Les caracteristiques analytiques des sols de la parcelle (voir Annexe 3),dont les profils pédologiques étudiés sont localisés sur la figure 22, nous indiquent qu'il s'agit de sols à forte teneur en argile (environ 50 % d'argile, 47 % de limon et 3 % de sable); de pH supérieur à 8.0 (alcalin à très alcalin) sur tout le profil; à faible teneur en calcaire total (110 %. environ). La capacité d'échange est moyenne à forte (18 à 22 meq/ 100g de sol) et la salinité est forte (voir figure 23).

La couverture végétale des profils que nous avons étudié était formée de fétuque.

2.2.1. Caractéristiques des profils étudiés

Nous avons effectué des mesures de ks sur six profils et l'étude des galeries sur deux de ces profils, dont les caracteristiques sont les suivantes:

Profil	Caracteristiques
1 MB	profil témoin, drainage par ados, + 33 T/ha de gypse
2 MB	profil avec lombriciens, drainage par ados, +33 T/ha de gypse
3 MB	profil témoin, drainage par ados, sans gypse
4 MB	profil témoin, drainage avec drains enterrés à 0.80 m de profondeur, + 33 T/ha gypse

TABLEAU 27 : Caractéristiquesdes sols du marais de Poitevin, où les vers de terre ont été prélevés pour être introduits sur le polder de Moueze-Brouage.

		0/- 30 cm	- 60/- 90 cm
sables grossiers	(%)	1	0,4
sables fins	(%)	13,2	12,1
limons	(%)	31,3	32,7
argile	(%)	37,9	53,4
pH		8,1	8,4
résistivité (mmohs)		3,936	4,080
calcaire total		20	16
matière organique	(%)	16,6	1,4
azote	(%)	8,87	0,70
C/N		10,9	11,6
P_2O_5	(ppm)	246	23
MgO	(ppm)	463	390
K_2O		300	450
chlorures	(meq/100g)	37,2	36

TABLEAU 28 : Caractéristiques de la population de vers de terre prélevéesur le polder de Moueze-Brouage un an après l'introduction.

Profil	Nombre et poids des animaux
2 MB	2 adultes, poids respectif: 20.925 g et 13.565 g 1 juvénile,poids de 11.461 g 1 cocon, poids de 0.726 g
5 MB	2 adultes, poids respectif: 16.775 g et 14.192 g 2 juvéniles, poids respectif: 4.811 g et 6.906 g 1 cocon de 0.721 g des tronçons ; poids: 4.8 g; 6.963 g; 1.555 g; 2.895 g; 2.695 g et 2.376 g .

5 MB profil avec lombriciens, drainage avec drais enterrés à 0.80 m de profondeur, + 33 T/ha de gypse

6 MB profil témoin, drainage avec drains à 0.80 m de profondeur, sans gypse

2.2.2. Caractéristique des lombriciens introduits

L'introduction de lombriciens a été faite au début du printemps de 1983. L'espèce introduite était Scherotecs savignyi savignyi, du type anécique, qui avait été prélévée dans une parcelle de mais du marais de Poitevin (partie marais mouillé), en Charente Maritime. Les caracteristiques analytiques des ces sols sont données par le tableau 27. Le taux d'introduction a été de une dizaine de S. savignyi savignyi adultes au mètre carré.

2.3. Nature des mesures et des observations

A MOUEZE-BROUAGE nous avons appliqué seulement une partie du protocole expérimental, celle comportant la mesure de conductivité hydraulique et la coloration des parois des galeries avec l'évaluation du réseau correspondant.

Nous avons aussi effectué des mesures de permeabilité ks sur des profils témoins, pour vérifier l'amélioration de la conductivité hydraulique après l'introduction de vers de terre.

2.3.1. Evaluation de la population de lombriciens

Le prélevement de vers de terre a été fait en utilisant la méthode au formol, entre le 9 et le 11 avril 1984. Les résultats obtenus sont indiqués par le tableau 28, où nous pouvons observé la présence des lombriciens juvéniles et de cocons. Ces résultats seront mieux analysés par la suite.

2.3.2. Mesure de ks

La conductivité hydraulique a été mesurée avec les anneaux de Muntz et le vase de Mariotte. Les résultats obtenus sont indiqués par le tableau 29. Nous pouvons observer une importante variation de la valeur de ks, donnant dans la classification **NOWLAND**, des classes qui vont de ks très rapide (48.93 cm/h) à lente (0.98 cm/h).

2.3.3. Coloration des parois des galeries et évaluation du réseau

Sur les profils où il a été fait des introductions de lombriciens il y a un an (2 MB et 5 MB), nous avons effectué la coloration des galeries avec le bleu de méthylène. La caractérisation du réseau a été faite ensuite, les données étant indiquées sur le tableau 30.

2.4. Analyse et interprétation des résultats

Etant donné le faible nombre de repétitions et la

TABLEAU 29 : Valeurs de ks mesurées sur le polder de Moueze-Brouage.

Profil	ks (cm/h)	classe selon NOWLAND
1 MB	1.63	M3
2 MB	19.53	H2
3 MB	6.79	M1
4 MB	20.83	H1
5 MB	40.93	H2
6 MB	0.98	M3

TABLEAU 30 : Volume totale et longueur totale des galeries Polder de Moueze-Brouage

Profil	Vol.Tot.(cm^3)	Long.Tot.(cm)
2 MB	128.55	181.30
5 MB	57.21	104

diversité des caractéristiques de chaque profil, nous ne pouvons pas établir des comparaisons strictes entre les résultats obtenus. Néanmoins nous pouvons faire quelques remarques qui nous semblent importantes:

2.4.1. Sur la population prélevée

Les prélèvements de lombriciens effectués sur les profils 2 MB et 5 MB nous permettent de faire les dédutions suivantes:

- le fait d'avoir retrouvé des cocons et des juvéniles montre qu'il y a eu accouplement et reproduction;

- une année est sûrement un temps trop court pour un développement optimal du peuplement.

2.4.2. Sur les valeurs de ks

Les valeurs de ks obtenues ne sont pas comparables entre elles car:

- pour les profils sur les ados (1 MB, 2 MB et 3 MB) il n'a pas été possible de se situer à la même altitude par rapport au fossé de drainage, donc une différence de la valeur de ks peut provenir des effets de pente et pas forcement d'un effet du gypse;

- pour les profils sur les drains (4 MB, 5 MB et 6 MB), le drain de la parcelle gypsée a un fonctionnement différent (les raisons n'ont pas été elucidées) du drain du témoin non gypsé (6 MB);

- quant aux témoins sur des parcelles gypsées, ils peuvent être comparés aux parcelles d'introduction, bien que la manque de répétitions nous amène à beaucoup de précautions.

Ainsi nous pouvons observer une nette augmentation de la valeur de ks sur les profils d'introduction (2 MB et 5 MB) par rapport aux témoins corespondants (1 MB et 4 MB, respectivement).

Nous pouvons vérifier aussi (tableau 5) que le ks est plus que doublé (x 2.35) sur drain, pour les profils 4 MB et 5 MB et multiplié par 12 (x 11.98) pour les profils 1 MB et 2 MB, sur ados.

Cette augmentation de ks, induite par les lombriciens, est du même ordre de grandeur que celle observée dans d'autres expériences precedentes. STOCKDILL (1966) a mesuré un accroissement de 86 % dans une prairie de NOUVELLE-ZELANDE après l'introduction de Allolobophora caliginosa. HOOGERKAMPS et al. (1983) ont mésuré dans un polder de HOLLANDE une capacité d'infiltration multipliée par 120 à 140 dûe à l'introduction de Allolobophora caliginosa.

2.4.3. Sur le réseau de galeries de lombriciens

Les tableaux 31, 32 et 33 nous donnent les

TABLEAU 31 : Nombre de galeries par profil - Polder de Moueze Brouage

PROFIL	Nombre de galeries
2 MB	9
5 MB	7

TABLEAU 32 : Volume et longueur de chaque galerie.
Profil 2 MB - Polder Moueze-Brouage.

Galerie	Volume (cm^3)	Longueur (cm)
1	0.883	4.50
2	1.347	3.50
3	42.952	61.80
4	2.749	3.50
5	0.707	2.50
6	31.612	44.00
7	12.960	16.50
8	23.562	30.00
9	11.781	15.00

TABLEAU 33 : Volume et longueur de chaque galerie
Profil 5 MB - Polder de Moueze-Brouage

Galerie	Volume (cm^3)	Longueur (cm)
1	3.927	5.00
2	28.997	44.50
3	7.854	10.00
4	11.581	25.50
5	2.262	8.00
6	1.178	6.00
7	1.414	5.00

caractéristiques des réseaux des galeries observées sur les profils 2 MB et 5 MB.

Nous pouvons remarquer le faible nombre de galeries (9 pour le profil 2 MB et 7 pour le profil 5 MB) et la faible taille de ces galeries (les plus grandes ont 44 cm de longueur). En effet, comme les sols des profils étudiés ont une structure massive bien marquée à partir de 35-40 cm, au dessous de l'enracinement dense de la fétuque, les galeries observées ont une forte tendance à s'arreter vers 35-40 cm.

Un autre aspect observé était la présence prédominante de galeries à distribution plutôt horizontale que verticale. Ceci peut s'expliquer par la salinité croissante en profondeur, caractéristique importante de ces sols (figure 23).

CONCLUSION

Dans ce mémoire nous avons tenté de contribuer à une meilleure connaissance de la macroporosité biologique du sol, plus précisement celle provoquée par l'action des lombriciens, en vérifiant son influence sur les transferts hydriques. Notre objectif principal était la validation de la méthode proposée en en 1983 par T. DURET.

Cette méthode, rappelons le, associe la caractérisation de la population de lombrics présente dans le sol (après prélevemnt au formol) et la description minutieuse des galeries fonctionnelles (après indentification par un colorant) à la mesure de la conductivité hydraulique (à l'aide du double-anneau de Muntz).

Il s'agissait de vérifier, par voie statistique, sur un territoire de 7021 m^2, choisi pour son homogeinété aux plans du sol (limono-sableux sur alluvions du Vidourle), de la végétation (faciès à Agropirum acutum et Proa pratensis d'une prairie permanente) et de la topographie (zone légèrement déprimée de la parcelle), que les résultats des determinations effectuées sur 7 profils distincts ne présentaient pas de variations excessives et imprévisibles.

Le traitement de nos données conduit à considérer comme tout à fait normale les variabilités constatées (coefficients de variation de 32.73 % pour la mesure de ks et de 17.05 % pour le volume de galeries). Celles ci se situent à l'intérieur des seuils habituellement reconnus en pédologie.

D'autres informations ont pu être tirées de nos investigations:

- la dynamique hydrique est très conditionnée par la nature du réseau de galeries, compte-tenu de leur gros diamètre et de leur développement sur toute la hauteur du profil;

- il existe une corrélation assez étroite entre la longueur des galeries dans un profil et la conductivité hydraulique mesurée (ks = f (1 / L)); en revanche, il n'est pas apparu de liaisons entre cette permeabilité et le volume des galeries (peut-être à cause de la variabilité du diamètre au long d'une galerie), ni entre ce dernier et la porosité totale;

- la longueur totale des galeries fonctionnelles peut être évaluée à 417 km par hectare dans la prairie du Chateau de Teillan.

Ces premiers résultats ne doivent pas masquer toutefois certaines difficultés rencontrées:

- le phenomène de diapause des lombriciens (liée à la sécheresse du printemps de 1984) a contrarié l'identification de la population locale;

- l'évolution du profil hydrique dans le temps a modifié les conditions des mesures successives de la permeabilité;

- la longueur des galeries tend à être sousestimée lorsque la tortuosité est élevée (avec tronçons horizontaux).

Ces premieres conclusions paraissent toutefois suffisamment encourageantes pour prolonger notre démarche en vue de relier "in fine" la caractérisation morphologique de la porosité lombricienne à la valeur de la conductivité hydraulique des sols. L'application de la méthode testée, sur des milieux hydromorphes variés (sols sableux de Sologne, sols argileux des marais de l'Ouest, sols limoneux de Bresse), constitue une direction envisageable. Elle devra comporter parallelement diverses opérations tendant à preciser et completer la demarche actuelle. La recherche de critères simples d'identification des differentes galeries d'origine biologique, à partir d'études fines constitue une première étape (colonisation de lombriciens et racinaire sur modèles en laboratoire, observations par voie microscopique,etc).

Ainsi, les travaux que nous avons ménés nous permettent d'envisager de nouvelles recherches visant à l'approfondissement des connaissances acquises jusqu'ici.

BIBLIOGRAPHIE

ABBASSI, Z. , 1983 - Recherches sur la fixation de phosphore et de potassium dans un granulat poreux de tuf volcanique à zéolites. Mise au point d'un amendement fertilisant à effet prolongé. Thèse 3ème Cycle , USTL-Montpellier. 168 p.

ANDERSON, J.L. et BOUMA, J. , 1973 - Relationsships between ks and morphometric data of an argilic horizon. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 37, 408-413.

ANDERSON, J.L. et BOUMA, J. , 1977 - Water movement through pedal soils: I. Saturated flow. II. Unsaturated flow. Soil Sci. Soc. Am. J., 41, 413-423.

AUBERTIN, G.M. , 1971 - Nature and extent of macropores in forest soils and their influence on subsurface water movement. Research paper USDA Forest Service , NE 192 , 33 p.

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 ELLIS, F.B. , 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.

BLACK et al., 1965 - Characterization of particles and pores, hydraulic properties and water-air rations of artificial grouth media and soils. In: Fifth International Congress on Soils Culture (ISOSC), pp.63-81.

BONNEAU, M. et LEVY, G. , 1979 - Assemblage et organisation physique des particules. In: Constituants et Proprietés du Sol. Masson Ed., Paris, 234-250.

BOUCHE, M.B. , 1969 - Comparaison critique des méthodes d'évaluation des populations des Lombricidés. Pedobiologia, 9, I-2, 26-34.

BOUCHE, M.B. , 1970 - Relations entre les structures spatiales et fonctionnelles des écosystèmes, illustrées par le rôle pédobiologique de vers de terre. In: PG. Pesson, "La vie dans le sol. Aspects nouveaux. Etudes expérimentales", éd. Gauthiers-Villars, Paris 187-209.

BOUCHE, M. B. , 1972 - Lombriciens de France. Ecologie et systématique. Ed. INRA, Ann. zool. écol., n° spécial, 72-2, 1-671.

BOUCHE, M. B. , 1982 - Ecosystème prairial - Un exemple d'activité animale : le rôle des lombriciens. Acta

Oecologica, Oecol. Gener., vol.3, n° 1, 127-154.

BOUCHE, M.B. , 1984 - Les vers de terre. La Recherche, n° 156, vol. 15, 796-804.

BOUMA, J. , 1977 - Soil Survey and the study of water in unsaturated soil. Soil Survey n° 13 . Soil Survey Institute, Wageningen, Hollande. 107.

BOUMA, J. , 1981 - Comment on micro, meso and macroporosity of soils. Soil Sci. Am. J. , 45, 1244-1245.

BOUMA, J. , JONGERIUS, A. , BOERMA, O. , JAGER, A. and SCHOONDERBEEK, D. , 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. , JONGERIUS, A. and SCHOONDERBEEK, D. , 1979 - Calculation of hydraulic conductivity of some saturated clay soils using micromorphometric data. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38, 124-127.

BOULAINE, J. , 1978 - Cours d'Hydropédologie. Inst. Nat. Agr. - ENGREF. 193 p.

BREWER, R. , 1964 - Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Carte Géologique de la France à 1/50 000. Feuille LUNEL (XXVIII-43). Bureau de Recherches Géologiques et Minières. 1970.

Carte de Sols au 1/5 000 . Basses Plaines du Vidourle (Marsillargues - Cabanes de Gascon) . Compagnie Nationale d'Aménagement de la Région du Bas-Rhône et du Languedoc. Ministère de l'Agriculture

CARTER, A. , HEINONEN, J. and URIES, J. , 1982 - Earthworms and water mouvement. Pedobiologia, 23 , 395-397.

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 , vol. 6 , 11, 335-341.

DARWIN, C.R. , 1881 - The formation of vegetable mould through the action of worms with observations on their habits. Ed. John Murray and Co., London, I-326.

DENNING, J.L., BOUMA, J., FALAYI, O. and VAN ROYEN, D.J. , 1974 - Calculation of hydraulic conductivities of horizons in some major soils in Wiscosin. Geoderma, 11 , 1-16.

DIXON, R.M. and PETERSON, A.E. , 1971 - Water movement in large soils pores : chanel system concept of infiltration. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35, 968-973.

DURET, T. , 1983 - Essai d'appréciation de la macroporosité lombricienne. Recherche méthodologique. Premiers résultats. Mémoire D.A.A. , ENSAM. 51 p.

EHLERS, W., 1975 - Observations on earthworms channels and infiltration on tilled loess soil. Soil Sci. J., vol. 119, 3, 242-249.

FONTES, L.R. , 1984 - Os estranhos canais subterrâneos de Tucurui. Sinais fosseis da açao de cupins. Ciência Hoje , vol.2, n°12, 50-56.

GUENNELON, R., DE COCKBORNE, A.M. , 1975 - In: Colloque International de la Société de Géophysique. Strasbourg. Décembre 1975.

GUILD, W.J.Mc L. , 1952 - Variation in earthworm numbers within field populations. J. Anim. Ecol. , 21 , 169-181.

GUILD, W.J.Mc L. , 1955 - Earthworms in soil structure. In: "Soil Zoology" (Kevan, D.K. Mc E. Ed.) Butterworth, London. pp 83-98.

HENIN, S. , 1976 - Cours de Physique du Sol. Tomes I et II - ORSTOM - Editest, Initiations-Documentations Techniques, n°29, 159 p.

HERMANN, P. , 1980 - Travaux Pratiques. ENSAM. 63 p.

HEIDET, J.C. , 1983 - Essai de biostimulation de sols par introduction de lombriciens. Mémoire D.E.A. USTL. 57 p.

HILLEL, D. , 1974 - L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Ed. Vander, Paris. 288 p.

HOOGERKAMPS et al. , 1983 - Effect of earthworms on grassland on recently reclaimed polder soils in the Netherlands. In: J.E. SATCHELL ED. , 1983 - "Earthworm ecology from Darwin to vermiculture". Chapman and Hall, London, 85-105.

HOPP, H. and SLATER, C.S. , 1948 - Influence of earthworms on soil productivity. Soil Sci., 66, 421-428.

JOHNSON, W.M., McCLELLAND, J.E., McCALEB, S.A. , 1960 - Classification and description of soil pores. Soil Sci. 89, 319-321.

JONGERIUS, A. , 1957 - Morphometric investigations on soil structure. Versl. Landbouwkdi. Onder. 63, 12 p.

KISSEL, D.E., RITCHIE, J.T. and BURNETT, E. , 1973 - Chloride movement in undisturbed swelling clay soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 37, 21-24.

KRETZSCHMAR, A. , 1978 - Quantification écologique des galeries

de lombriciens. Techniques et premières estimations. Pedobiologia, 18, 31-38.

LEE, K.E. , sous presse - Physical effects on soils. In: Earthworms: their ecology and relationships with soils and land use. pp 249-288. Academic Press.

LUC, J.P. , 1978 - Caractérisation hydrique des sols. Utilisation des mesures d'humidité et de charge in situ.Comparaison avec les mesures de laboratoire. Thèse Doct. Ing. USTL-Montpellier, 169 p.

LUXMOORE, R.J. , 1981 - Micro, meso and macroporosity of soil. Soil Sci. Am. J., 45 , 671-672.

McINTYRE, D.S. and SLEEMAN, J.R. , 1982 - Macropores and hydraulic conductivity in a swelling soil. Aust. J. Soil Res., 20, 251-254.

MAC KEAGUE, J.A., WANG, C. and TOPP, G.C. , 1982 - Estimating saturated hydraulic conductivity from soil morphology. Soil Sci. Soc. Am. J., 46 , 1239-1244.

MAC KEAGUE, J.A. and WANG, C. , 1982 - Soil structure: concepts, description and interpretation. LRRI Contribution, 82-15, 1-42.

MONNIER, G. , 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse , Fac. Sci., Univ. Paris, éd. INRA , Paris, I 140.

MUNTZ, FAURE, LAINE, 1905, 1907, 1912 , cité par LUC (1978) - Etude de la permeabilité des terres. Annales Hydrauliques.

NOWLAND, J.L. , 1981 - Soil water regime classification. 1981 pp.64-74. In: J.H.DAY (ed.) Proc. 3rd. Meeting Expert Committee on Soil Survey. Ottawa, 2-6 Mar. 1981. Agriculture Canada, Ottawa.

OMOTI, U. and WILD, A. , 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 WILD, A. , 1979 - Use of fluorescent dyes to mark the pathways of solute movement trough soil under leaching conditions. 2- Field experiments. Soil Sci., 128, 2, 98-104.

O'NEAL, A.M. , 1952 - A key of evaluating soil permeability by means of certain field clues. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 16 , 312-315.

PEGUY, Ch. P. , 1970 - Précis de climatologie. Masson et Cie Editeurs, Paris. 468 p.

REYNOLDS, E.R.C. , 1966 - The percolation of rain water through soil demonstrated by fluorescent dyes. Soil Sci. J. , 17, 127-132.

RITCHIE, J.T., KISSEL, D.E. and BURNETT, E. , 1972 - Water movement in undisturbed swelling clay soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36 , 874-879.

SLATTER, C.S. and HOPP, H. , 1947 - Relation of fall protection to earthworm populations and soil physical conditions. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 12 , 508-511.

STOCKDILL, S.M.J. , 1966 - The effect of earthworms on pastures. Proc. N.Z. Ecol. Soc., 13 , 68-74.

VACHAUD, G. , 1981 - Hydrodynamique en milieux poreux. INPG - Ec. Nat. Sup. d'Hydraulique de Grenoble. 112 p.

VAN OORT, F. , 1984 - Geométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pedogénèse. Application a des sols sous prairie et alpage. Thèse de Doc.Ing. ,Inst. Nat. Agr. Paris-Grignon, 255 p.

ANNNEXES

Guidelines for Estimating K_{sat}

Several widely different combinations of soil morphological features can give rise to K_{sat} values in each of the eight classes defined (Nowland, 1981). Some of the typical morphological features giving rise to values within each class are specified in these guidelines. No attempt is made, however, to include all combinations of morphological features that occur in soils. Thus, much judgment is required in applying the guidelines. Any one of the features listed under each class can give rise to K_{sat} values of that class.

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 · 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 separating 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 equivalent 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% biopores, 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 m^2 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.

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.

ANNEXE I - Lignes directrices proposées par Mac Keague pour estimer la conductivité hydraulique à saturation Ks.

ANNEXES II

Densité apparente sec , moyenne des 7 profils

PROF	HUMIDITE MOYENNE	HUMIDITE ECART TYPE	HUMIDITE CV	DENSITE MOYENNE	DENSITE ECART TYPE	DENSITE CV
0-05cm	9.49	0.482	5.08%	1.29	0.046	3.59%
5-10cm	9.35	0.327	3.51%	1.35	0.053	3.93%
10-15cm	9.62	0.557	5.79%	1.33	0.031	2.31%
15-20cm	9.67	0.700	7.23%	1.30	0.037	2.87%
20-25cm	10.31	0.820	7.95%	1.28	0.028	2.19%
25-30cm	10.92	0.897	8.22%	1.23	0.090	7.30%
30-35cm	12.06	0.801	6.65%	1.31	0.081	6.20%
35-40cm	11.99	0.910	7.63%	1.34	0.036	2.72%
40-45cm	12.84	0.765	5.96%	1.27	0.102	8.02%
45-50cm	13.18	0.748	5.68%	1.29	0.042	3.24%
50cm	13.18	0.748	5.58%	1.31	0.043	3.27%

Densité apparente sec mesurée après l'infiltration du colorant sur le profil 3 CT.

PROF	HUMIDITE MOYENNE	HUMIDITE ECART TYPE	HUMIDITE CV	DENSITE MOYENNE	DENSITE ECART TYPE	DENSITE CV
0-05cm	26.34	3.000	11.4%	1.21	0.095	7.85%
5-10cm	22.27	1.395	6.27%	1.35	0.042	3.12%
10-15cm	19.53	0.876	4.49%	1.37	0.032	2.32%
15-20cm	19.76	0.568	2.87%	1.36	0.020	1.48%
20-25cm	19.93	0.751	3.77%	1.32	0.062	4.65%
25-30cm	20.75	1.270	6.12%	1.32	0.048	3.63%
30-35cm	19.51	1.083	5.55%	1.35	0.065	4.81%
35-40cm	19.06	0.940	4.93%	1.40	0.032	2.32%
40-45cm	19.42	0.480	2.47%	1.39	0.030	2.17%
45-50cm	19.23	0.361	1.88%	1.36	0.281	2.07%
50cm	19.23	0.361	1.88%	1.35	0.043	3.21%

ANNEXE III- Caractéristiques des sols du Polder de Mouezé-Brouage.

Profondeurs des horizons (cm)	Composition granulométrique (%)					Calcaire total (%)	pH (H_2O)	Conductivité (mmhos/cm)	Capacité d'échange (meq./100 g)	Na^+ soluble (meq./100 g)	Na^+ échangeable (meq./100 g)	K^+ soluble (meq./100 g)	K^+ échangeable (meq./100 g)	Ca^{++} soluble (meq./100 g)	Mg^{++} soluble (meq./100 g)	Chlorures solubles (meq./100 g)	Sulfates solubles (meq./100 g)
	Argile	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers												
Profil P_1																	
0 - 10	47,1	42,0	3,8	1,0	0,1	12,3	8,1	6,45	18,6	28,43	8,39	0,66	2,36	1,35	2,75	29,50	2,96
10 - 23	51,3	41,3	6,6	0,5	0,3	12,8	8,2	5,73	19,5	25,65	7,80	0,51	2,30	1,05	2,0	26,0	3,06
23 - 36	51,9	42,4	5,1	0,5	0,1	12,1	8,2	6,13	19,5	27,91	7,06	0,51	2,23	1,15	2,16	28,0	3,09
36 - 51	53,8	41,7	3,3	0,6	0,6	11,2	8,2	6,59	19,5	30,52	8,71	0,48	2,10	1,3	2,58	30,25	3,71
51 - 68	57,2	38,4	3,6	0,3	0,5	10,6	8,2	7,06	19,5	31,43	10,44	0,51	2,21	1,3	2,83	32,50	3,96
68 - 82	56,3	38,7	4,4	0,2	0,4	10,6	8,3	7,96	19,1	35,47	11,71	0,61	2,21	1,55	3,66	38,0	4,18
82 - 98	56,3	39,9	3,0	0,6	0,2	8,1	8,3	8,33	19,7	37,39	10,47	1,38	3,28	1,75	4,33	38,0	5,59
98 - 114	56,6	38,2	4,9	0,3	0	9,6	8,2	12,14	19,5	50,30	14,10	1,74	2,99	3,70	9,0	59,5	8,03
114 - 150	52,6	39,0	6,5	1	0,9	10,0	8,2	12,64	17,9	51,17	13,99	1,71	2,59	4,95	10,83	62,0	11,12
Profil P_3																	
0 - 8	49,7	41,5	7,7	0,9	0,2	10,2	8,5	1,16	21,3	5,43	4,38	0,25	2,66	0,25	0,25	4,02	0,83
8 - 34	57,0	37,6	4,8	0,5	0,1	11,6	8,7	1,69	20,6	6,39	9,31	0,17	2,98	0,1	0,16	5,94	1,08
34 - 54	57,4	37,0	5,1	0,5	0	11,3	8,5	2,39	20,6	11,43	8,47	0,28	2,99	0,2	0,33	9,25	1,30
54 - 88	57,8	35,8	4,6	1,4	0,4	10,0	8,2	6,28	20,9	28,82	10,02	0,69	2,63	1,15	2,25	27,74	4,18
88 - 107	53,0	40,3	4,4	1,8	0,5	7,7	8,1	11,05	20,4	44,52	10,85	1,51	2,54	9,15	8,25	47,0	18,53
107 - 130	49,9	46,1	2,9	0,6	0,5	10,1	8,3	9,29	20,2	40,52	9,71	1,53	3,21	3,85	6,0	41,37	10,65

Caractères analytiques généraux des profils P_1 et P_3

Profondeurs des horizons (cm)	Composition granulométrique (%)					Calcaire total (%)	pH (H_2O)	Conductivité (mmhos/cm)	Capacité d'échange T (meq. 100 g)	Na^+ soluble (meq. 100 g)	Na^+ échangeable (meq. 100 g)	K^+ soluble (meq. 100 g)	K^+ échangeable (meq. 100 g)	Ca^{++} soluble (meq. 100 g)	Mg^{++} soluble (meq. 100 g)	Chlorures solubles (meq. 100 g)	Sulfates solubles (meq. 100 g)	Carbone organique (%)	Matière organique (%)
	Argile	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers														
Profil P_2																			
0 - 10	37,5	50,4	11,0	0,9	0,2	10,1	8,2	1,02	21,5	4,69	3,29	0,28	2,31	0,25	0,33	3,38	0,81	2,49	4,29
10 - 24	51,3	41,5	6,4	0,6	0,2	9,7	8,6	1,22	22,2	6,21	7,44	0,20	2,33	0,15	0,16	4,15	0,84	1,0	1,72
24 - 40	55,9	39,6	3,9	0,6	0	9,9	8,5	2,22	22	10,65	7,88	0,28	2,56	0,20	0,33	9,08	1,25	0,87	1,49
40 - 53	52,2	40,0	6,8	0,9	0,1	10,5	8,4	3,08	21,3	15,08	7,80	0,35	2,52	0,35	0,50	13,02	1,96	0,86	1,48
53 - 70	53,4	42,0	3,9	0,6	0,1	10,5	8,3	4,20	21,3	19,78	8,10	0,48	2,63	0,55	1,0	18,30	2,71	1,04	1,78
70 - 84	49,8	43,3	3,0	1,0	2,9	13,3	8,4	4,89	21,3	21,86	8,16	0,56	2,57	0,90	1,33	20,42	3,93	0,89	1,53
84 - 100	49,8	47,2	2,7	0,3	0	11,3	8,4	5,05	21,1	22,39	7,83	0,66	2,64	1,0	1,41	22,39	3,87	0,87	1,49
100 - 120	44,9	49,0	5,1	0,9	0,1	10,9	8,3	6,26	20,4	27,08	8,08	0,92	2,79	1,7	2,41	28,09	5,93	0,89	1,53
120 - 150	38,5	53,0	6,7	0,9	0,9	12,8	8,3	8,78	20,4	35,39	8,23	1,53	3,0	4,6	5,33	42,53	14,84	1,03	1,77
Profil P_4																			
0 - 8	47,6	46,2	5,6	0,4	0,2	9,1	8,4	1,02	22,7	4,13	4,28	0,23	2,48	0,20	0,25	3,23	0,53	2,09	3,60
8 - 20	50,7	45,2	3,1	0,8	0,2	11,0	8,6	1,03	21,5	5,21	6,24	0,23	2,65	0,10	0,16	3,52	0,71	0,91	1,56
20 - 35	53,6	42,2	3,6	0,5	0,1	11,2	8,8	1,30	21,3	6,30	7,82	0,30	2,72	0,10	0,16	4,01	0,93	0,62	1,07

Caractéristiques analytiques des profils P_2 et P_4