



HAL
open science

Le fonctionnement du drainage : approche pédo-hydraulique

Jean-Claude Favrot, Michel Penel

► **To cite this version:**

Jean-Claude Favrot, Michel Penel. Le fonctionnement du drainage : approche pédo-hydraulique. Cemagref Editions, pp.246, 1991, Coll. Etudes du Cemagref, série Hydraulique agricole, n° 10, 2-85362-238-X. hal-02576191

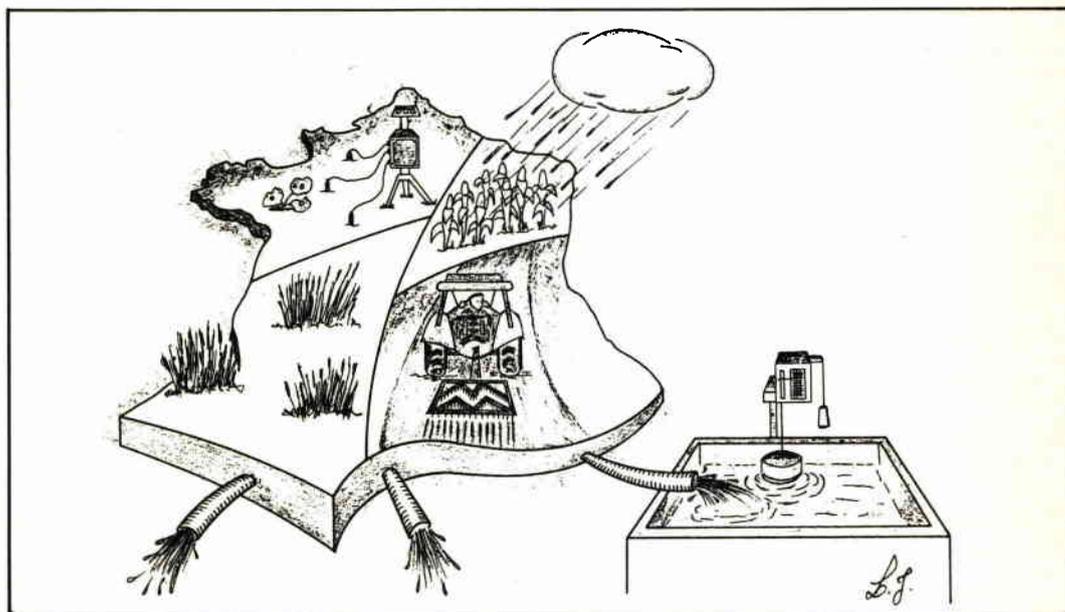
HAL Id: hal-02576191

<https://hal.inrae.fr/hal-02576191v1>

Submitted on 24 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Le fonctionnement du drainage : approche pédo-hydraulique

Coordination : *J. Cl. Favrot et M. Penel*





LE FONCTIONNEMENT DU DRAINAGE : APPROCHE PÉDO-HYDRAULIQUE

Coordination : J.C. Favrot et M. Penel

Compte rendu des travaux effectués dans le cadre de l'Action
Incitative Programmée "Maîtrise des excès d'eau" CEMAGREF-INRA



**CENTRE NATIONAL
DU MACHINISME AGRICOLE
DU GÉNIE RURAL
DES EAUX ET DES FORÊTS**

GROUPEMENT D'ANTONY
Parc de Tourvoie
BP 121, 92185 Antony Cedex
Tél. : (1) 40 96 61 21 - Téléc. : 632 672 F
Télécopie : (1) 40 96 60 36

Les *ÉTUDES* du CEMAGREF

Série : Ressources en eau

N° 1 - Potentiel d'électrode de platine en épuration biologique. 1990, 164 pages, 72 illustrations - Prix : 200 F

N° 2 - Le phosphore et l'azote dans les sédiments du fleuve Charente : variations saisonnières et mobilité potentielle - 1990, 228 pages, illustrations - Prix : 250 F

N° 3 - Typologie aquacole des marais salants de la côte atlantique - 1991, 232 pages - Prix : 200 F

Série : Hydraulique agricole

N° 1 - Etude de la qualité des eaux de drainage. Diagnostic de risque de lessivage d'azote en fin de campagne culturale. La tranchée de drainage. Une nouvelle expression de la hauteur équivalente. A propos des coefficients de forme de la nappe libre drainée - 1986, 21 x 29,7 - 182 pages - Prix : 200 F

N° 2 - Hydraulique au voisinage du drain. Méthodologie et premiers résultats. Application au diagnostic du colmatage minéral des drains - 1987, 21 x 29,7 - 220 pages - Prix : 200 F

N° 3 - Secteurs de références drainage. Recueil des expérimentations - 1988, classeur 20 x 26 - 92 fiches, 106 illustrations - Prix : 150 F

N° 4 - Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA - 1989, 334 pages, 98 illustrations - Prix : 250 F

N° 5 - Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement - 1989, 322 pages, 117 illustrations - Prix : 250 F

N° 6 - Réseaux collectifs d'irrigation ramifiés sous pression. Calcul et fonctionnement - 1989, 140 pages, 85 illustrations - Prix : 150 F

N° 7 - Géologie des barrages et des retenues de petites dimensions - 1990, 144 pages, illustrations - Prix : 200 F

N° 8 - Estimation de l'évapotranspiration par télédétection. Application au contrôle de l'irrigation - 1990, 180 pages, illustrations couleurs - Prix : 250 F

N° 9 - Hydraulique à l'interface sol/drain - 1991, 246 pages - Prix : 250 F

N° 10 - Le fonctionnement du drainage : approche pédo-hydraulique - 1991, 246 pages - Prix : 200 F

Série : Equipement des IAA

N° 1 - Carbonisateur à pailles et herbes pour les pays en développement - 1990, 56 pages, illustrations - Prix : 100 F

Série : Forêt

N° 1 - Annales 1988. 1989, 126 pages, 30 dessins et photos - Prix : 150 F

N° 2 - Le Massif Central Cristallin. Analyse du milieu - Choix des essences - 1989, 104 pages, 14 illustrations - Prix : 150 F

N° 3 - Les stations forestières du pays d'Othe, 1990, 174 pages, 45 illustrations - Prix : 150 F

N° 4 - Culture d'arbres à bois précieux en prairies pâturées en moyenne montagne humide - 1990, 120 pages, illustrations - Prix : 150 F

N° 5 - Annales 1989. 1991, 196 pages, illustrations. Prix 150 F

Série : Production et économie agricoles

N° 1 - GEDE Logiciel d'aide à la décision stratégique pour l'exploitation agricole - 1991, 244 pages - Prix : 200 F

A commander au CEMAGREF - DICOVA, BP 22, 92162 ANTONY CEDEX - Tél. : (1) 40.96.61.32
joindre votre paiement à la commande

Le CEMAGREF est un organisme de recherches dans les domaines de l'eau, de l'équipement pour l'agriculture et l'agroalimentaire, de l'aménagement et de la mise en valeur du milieu rural et des ressources naturelles.

En contact permanent avec les agents économiques et les collectivités, il cherche à constituer des outils mieux adaptés dans différents secteurs d'activités :

- eau
- risques naturels et technologiques
- montagne et zones défavorisées
- forêts
- machinisme agricole
- équipement des industries agroalimentaires
- production et économie agricoles.

Le CEMAGREF est un Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique sous la tutelle des ministères de la Recherche et de l'Agriculture.

Il emploie 970 agents dont 420 scientifiques répartis en 10 groupements : Aix-en-Provence, Antony, Bordeaux, Clermont-Ferrand, Grenoble, Lyon, Montpellier, Nogent-sur-Vernisson, Outre-Mer (La Martinique), Rennes.



Institut National de la Recherche Agronomique

STATUT

L'Institut National de la Recherche Agronomique, créé en 1946, est depuis 1984 un Etablissement Public national à caractère Scientifique et Technologique (EPST) placé sous la tutelle du Ministre chargé de la Recherche et de la Technologie et du Ministre chargé de l'Agriculture et des Forêts.

MISSIONS

L'INRA a en charge :

- D'organiser et d'exécuter toute recherche scientifique intéressant l'agriculture et les industries qui lui sont liées.

- De contribuer à l'élaboration de la politique nationale de recherche dans les domaines relevant de sa compétence.

- De publier et diffuser les résultats de ses travaux et, plus généralement, de concourir au développement de l'information scientifique et à la diffusion des connaissances scientifiques en favorisant l'usage de la langue française.

- D'apporter son concours à la formation à la recherche et par la recherche.

- De participer à la valorisation de ses recherches et de son savoir-faire.

- D'effectuer des expertises scientifiques dans son champ de compétences.

Dans le domaine de la recherche, les missions de l'INRA incluent notamment :

- L'inventaire des ressources du milieu physique (sol, microclimat et réserves hydriques) et l'étude de leur exploitation.

- L'amélioration des productions végétales et animales intéressant l'économie agricole, y compris les espèces forestières et les espèces aquatiques.

- La conservation, la transformation des produits agricoles en produits alimentaires, l'amélioration de la qualité des produits alimentaires et leur adaptation aux demandes des consommateurs.

- Les biotechnologies intéressant l'agriculture et les industries qui lui sont liées.

- La production d'énergie, de protéines ou de molécules par le développement de cultures spécifiques ou par l'utilisation des sous-produits des activités agricoles et industrielles.

- La protection, la sauvegarde et la gestion rationnelle des ressources naturelles et de l'espace rural.

- L'étude des investissements nécessaires au bon fonctionnement des exploitations agricoles et des entreprises agro-alimentaires.

- La compréhension du monde agricole et rural et de ses transformations par le développement des sciences sociales.

- L'amélioration des conditions de travail dans l'agriculture et les industries qui lui sont rattachées.

ORGANISATION

L'INRA est géré par un Conseil d'Administration avec le concours d'un Conseil Scientifique.

Le Président du Conseil d'Administration est également Directeur Général de l'INRA.

Le Président Directeur Général assure la direction générale de l'Institut, assisté d'un directeur général délégué et de deux directeurs généraux adjoints, l'un chargé des questions scientifiques, l'autre des questions administratives et financières.

Les statuts sont en cours de modifications.

STRUCTURES ET MOYENS

Recherches et expérimentations sont conduites au sein d'unités regroupées en 26 Départements de recherche correspondant à des disciplines scientifiques ou des objectifs agronomiques déterminés, placés sous la responsabilité d'un Chef de Département, lui-même assisté d'un Conseil Scientifique et d'un Conseil de Gestion.

Les départements sont regroupés en Secteurs scientifiques placés sous l'autorité d'un Directeur Scientifique qui coordonne les programmes de recherche relevant de son secteur, assiste la Direction Générale pour la définition de la politique scientifique de l'Etablissement.

Les unités et les services communs sont regroupés géographiquement dans 22 Centres de recherches sur tout le territoire national, placés sous l'autorité d'un Président de Centre, lui-même assisté d'un Conseil Scientifique et d'un Conseil de Gestion.

Le Président de Centre peut avoir un adjoint et est assisté dans ses fonctions par un Secrétaire Général. Dans chaque région, le Président-Directeur Général désigne un Délégué Régional chargé de représenter l'ensemble de l'Institut auprès des différentes instances et autorités régionales. Dans la majorité des cas, le Délégué Régional est également Président d'un Centre de Recherches.

Pour la réalisation de ses différentes missions, l'exécution de ses recherches et de ses expérimentations, l'INRA associe près de 8 200 personnes (scientifiques, ingénieurs, techniciens et administratifs).

SOMMAIRE

AVANT - PROPOS	9
SYNTHESE DES TRAVAUX DES THEMES 1 et 2	
M. PENEL	13
- THEME 1 : Evaluation du fonctionnement des réseaux de drainage	
Evaluation du fonctionnement des réseaux de drainage : application aux sols argileux de Lorraine.	
D. ZIMMER	17
- THEME 2 : Fonctionnement hydraulique des systèmes drainants	
Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement.	
D. ZIMMER	47
Expérimentation en sols de boubènes : efficacité d'un réseau de drainage et caractéristiques des sols.	
M. GUIRESSE, F. BOURGEAT	63
Traçage de l'eau d'une parcelle argileuse drainée.	
P. MEROT, H. HAMDI	89
Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA.	
B. LESAFFRE	107
Etude in situ de la mise en charge des tranchées de drainage.	
G. TROUCHE	121

SYNTHESE DES TRAVAUX DES THEMES 3 , 4 , et 5

J.C. FAVROT	139
- THEME 3 : Structure des matériaux et fonctionnement du drainage	
Rôle de la structure sur le fonctionnement hydraulique d'un réseau de drainage en sol lessivé hydromorphe du Bassin Aquitain.	
J.C. FAVROT, R. BOUZIGUES, C. LONGUEVAL, J.C. CHOSSAT, F. BOURGEAT	145
- THEME 4 : Portance et praticabilité des sols	
Estimation de la praticabilité et pénétrométrie sur parcelles drainée et non drainée.	
J.C. CHOSSAT	159
Mise au point d'un pénétromètre à plaque pneumatique destiné à l'appréciation de la portance des sols agricoles.	
J. GUERIF, J. ROYERE	173
Etude de l'interaction entre drainage et état structural de la couche labourée sur l'évolution des profils hydriques d'un sol au printemps.	
M. PENEL, F. PAPY	191
- THEME 5 : Rôle des amendements et conditionneurs de sols sur le comportement structural des matériaux	
Evolution structurale d'une tranchée de drainage reconstituée en laboratoire : différences de comportement induites par les apports de calcaire, de gypse ou de polychlorure d'aluminium basique.	
V. SORANI, A. BRUAND	209

CONCLUSIONS

Physique du sol et drainage.	
R. GUENNELON	227
Drainage agricole et modélisation hydraulique.	
B. LESAFFRE	237

AVANT - PROPOS

L'AIP : objectif, organisation

Le présent ouvrage rend compte des travaux effectués dans le cadre de l'AIP "Excès d'eau - Drainage" conçue par l'INRA et le CEMAGREF en 1985.

Deux constats ont été à l'origine de cette opération : le premier est que, malgré les progrès significatifs accomplis durant les deux dernières décennies en matière de méthodologie d'études, de connaissance des sols hydromorphes, de compréhension du fonctionnement hydraulique du drainage, un effort de recherche devait être maintenu dans ces domaines. Le drainage constitue en effet un aménagement indispensable pour améliorer la compétitivité des exploitations agricoles françaises situées en milieux hydromorphes. Or, en 1985, moins d'un tiers des sols engorgés de notre territoire (qui couvrent environ 6 millions d'ha de SAU) était drainé, contre 60 à 70 % dans d'autres pays de la CEE tels que l'Allemagne, l'Angleterre et les Pays-Bas. En outre, les efforts importants d'équipement réalisés depuis 1982 (130 000 ha drainés en moyenne par an, soit la superficie la plus importante pour l'Europe de l'Ouest) concernent des terres de plus en plus difficiles à aménager. Cela nécessite donc des connaissances toujours plus approfondies pour optimiser les investissements consentis par les agriculteurs avec l'aide de l'Etat et des collectivités territoriales (le drainage d'un hectare coûtait environ 6 000 F HT en moyenne en 1987).

Le deuxième constat était que les différentes équipes françaises de recherche traitant du drainage ne travaillaient pas suffisamment ensemble.

Avec comme objectif de promouvoir des travaux permettant de mieux comprendre et de mieux prévoir la réponse des sols au drainage - pour améliorer in fine la conception, la réalisation puis l'utilisation des réseaux - l'AIP s'est déroulée de 1985 à 1989. Les principales étapes ont été l'élaboration d'un appel d'offre en 1985, le choix des sujets et des équipes en 1986, la réalisation des travaux en 1986-87-88, puis la tenue d'un colloque de clôture les 10 et 11 mai 1989 à Toulouse.

Une douzaine d'unités de recherches ont participé aux actions de l'AIP. Elles appartiennent au CEMAGREF (Division Drainage Antony, Division Ouvrages et Réseaux Hydrauliques de Bordeaux), à l'Enseignement Supérieur Agronomique (ENSAA Dijon, ENSA Toulouse, INA Paris-Grignon) et à l'INRA (pour le département d'Agronomie : station de Dijon ; pour le département de Science du Sol : unités d'Avignon, Montpellier, Orléans, Rennes, Versailles ; pour le département des Systèmes Agraires et du Développement : station de l'INA Paris-Grignon).

En matière budgétaire 780 KF ont été affectés à l'AIP, moitié par le CEMAGREF, moitié par l'INRA.

Un Comité d'AIP, réuni chaque année, comprenant des personnalités du CEMAGREF (1), de l'INRA (2), de l'IRIGM Grenoble (3) et de Paris VI (4), a assuré la coordination des projets scientifiques et des crédits.

L'OUVRAGE

Plus d'une trentaine de documents (articles, thèses, mémoires de DEA ou DAA, rapports, résumés - cf compte-rendu du colloque de clôture) présentent les démarches et les résultats obtenus successivement au cours ou à l'occasion de l'AIP. Lors du colloque de clôture, les participants de l'AIP ont décidé de réaliser le présent ouvrage. Ce document rassemble sous une forme synthétique les résultats obtenus jusque là, lesquels étaient en effet soit déjà présentés, mais de manière dispersée dans des publications multiples, soit non encore publiés.

Sous la responsabilité des membres du CEMAGREF et de l'INRA du Comité d'AIP, faisant fonction de Comité de Lecture (aidé également par R. BOUZIGUES, J.C. CHOSSAT, J. GUERIF pour certains textes), 15 communications sont rassemblées dans le présent ouvrage. Ce dernier est publié dans la série Etudes - Hydraulique Agricole du CEMAGREF sous le double sceau INRA-CEMAGREF. J.C. FAVROT et M. PENEL ont assuré la coordination de sa mise en oeuvre.

(1) : R. HLAWEK, B. LESAFFRE, M. PENEL, D. ZIMMER ;

(2) : J. CONCARET, J.C. FAVROT, R. GUENNELON ;

(3) : Y. FAURE, J.P. GOURC ;

(4) : G. de MARSILY.

Les articles sont présentés dans l'ordre des cinq thèmes principaux de l'AIP - évaluation du fonctionnement des réseaux de drainage, fonctionnement hydraulique des systèmes drainants, structure des matériaux et fonctionnement du drainage, portance et praticabilité des sols, rôle des amendements et conditionneurs de sols sur le comportement structural des matériaux -, puis des synthèses et conclusions dégagent les apports et prolongements essentiels de cette opération de recherche.

Le Comité d'AIP

FONCTIONNEMENT DU DRAINAGE

SYNTHESE DES TRAVAUX DES THEMES 1 et 2 de l'AIP

M. PENEL ¹

1 - CEMAGREF, Division Drainage, 92185 ANTONY Cedex

INTRODUCTION

Eclairer l'agriculteur sur l'opportunité de drainer et choisir la technique de drainage la plus appropriée sont les préoccupations premières du maître d'oeuvre. Les décisions sont prises au regard des contraintes physiques du milieu et des exigences agronomiques et économiques de l'exploitation agricole.

Pour apporter l'éclairage nécessaire, le maître d'oeuvre s'appuie à la fois sur les travaux des scientifiques, sur les résultats d'études préalables et d'expertise, et sur son expérience personnelle d'évaluation des réseaux de drainage qu'il a déjà conçus.

L'objectif du thème 1 de l'AIP est d'apporter un support méthodologique à l'évaluation du fonctionnement des réseaux de drainage, en tentant d'identifier et analyser les variables intervenant dans le verdict qualitatif posé par l'agriculteur. L'étude réalisée en Lorraine par D. ZIMMER conduit à des recommandations concernant plus particulièrement les sols argileux.

Les recherches conduites dans le cadre du thème 2 visaient initialement à caractériser le rôle de la tranchée de drainage, en tant qu'une des frontières du système drainant. Les travaux effectués ont considérablement élargi cette problématique initiale, pour traiter, in fine, du système drainant dans son ensemble.

1. VARIETE DES MILIEUX ET DES APPROCHES METHODOLOGIQUES

Tous les travaux présentés comportent d'importants volets expérimentaux au champ, faisant appel à des mesures comme la tensiométrie, la piézométrie ou la composition isotopique de l'oxygène de l'eau. Conduits dans des milieux variés, allant des sols limoneux du Perche, de la Bresse et du Sud-Ouest aux argiles de Sarthe et de Lorraine, ils associent des approches naturalistes de caractérisation du milieu sol et des approches hydrauliques et hydrologiques visant à quantifier les transferts hydriques. Les deux approches se confortent

mutuellement. Suivant les cas, elles conduisent à des modèles naturalistes, réduisant la variabilité des situations à quelques types de fonctionnement du drainage et permettant de prédire qualitativement ce fonctionnement, ou à des modèles mécanistes, permettant de prédire quantitativement les variables pertinentes pour l'aménagement.

2. EVALUATION DU FONCTIONNEMENT DES RESEAUX DE DRAINAGE

L'évaluation du fonctionnement des réseaux est la démarche indispensable à la valorisation de l'expérience de maîtrise d'oeuvre et à l'identification des questions non résolues qui doivent faire l'objet de recherches. C'est aussi, plus prosaïquement, la première étape du travail de l'expert appelé à connaître d'un contentieux juridique.

Cette évaluation se heurte encore aujourd'hui à deux types de difficultés : d'une part, la subjectivité des avis formulés par le maître d'ouvrage sur la qualité de son réseau, et, d'autre part, à la détermination et à la hiérarchisation des facteurs permettant de quantifier l'efficience de ce réseau.

Les recherches conduites par D. ZIMMER, en collaboration avec le bureau d'études "Organisation et Environnement", dégagent un critère d'évaluation pour les sols argileux lorrains.

L'appréciation, par l'agriculteur, du temps de ressuyage pour une opération culturale et une période données est suffisamment fiable pour être utilisée comme base d'évaluation du fonctionnement des réseaux. Les contraintes propres à l'exploitation, notamment au regard de l'organisation du travail, pèsent fortement sur l'avis qualitatif de l'agriculteur.

Ces travaux débouchent aussi sur une remise en cause, au moins dans ces matériaux argileux lorrains, des critères morphologiques du sol classiquement utilisés pour évaluer la qualité de fonctionnement des réseaux. En effet, si la présence d'un épais manchon humide et plastique au-dessus du drain est associée à des temps de ressuyage élevés, ni les différences de morphologie des horizons travaillés, observés à l'interdrain et à la verticale du drain, ni la netteté du cône de fissuration laissé par la machine de pose, ne sont des facteurs significativement explicatifs du temps de ressuyage. En outre, les critères analytiques les plus simples, comme la granulométrie, ou plus élaborés, comme la minéralogie des argiles ou la capacité d'échange cationique, ne rendent pas compte de la qualité de fonctionnement du drainage.

En conséquence, D. ZIMMER propose de privilégier l'analyse des capacités d'hydratation du matériau argileux, sur pâtes déstructurées et sur agrégats.

3. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU DRAINAGE

Le dimensionnement des réseaux de drainage s'appuie sur une modélisation, déterministe ou non, de la situation à traiter et, tout particulièrement, du fonctionnement hydraulique du réseau. Les travaux du thème 2 ont permis d'avancer grandement dans cette voie modélisatrice, qui conduit non seulement à améliorer les pratiques de conception des réseaux mais aussi, au moins sur certains aspects, à mieux mesurer l'impact du drainage sur l'environnement.

3.1 Modélisation naturaliste

D. ZIMMER analyse les résultats expérimentaux obtenus sur les parcelles de différents sites, limoneux ou argileux, investigués avec des tensiomètres. Il propose une typologie de fonctionnement hydraulique du drainage dans les sols à plancher imperméable peu profond, qui constitue une véritable modélisation naturaliste de ce fonctionnement. Trois types sont définis pour des matériaux argileux, et un type pour le matériau limoneux du site d'Arrou dans le Perche : pour chacun de ces types, des recommandations pratiques pour le choix d'une technique de drainage sont données. Le type "Arrou" est également observé sur le site de boulbènes de Poucharramet (cf. article de GUIRESSE et BOURGEAT).

3.2 Modélisation hydrologique

Le site argileux de Courcival, correspondant à l'un des types de ZIMMER, est étudié de façon complémentaire par P. MEROT et H. HAMDI. Ces auteurs proposent une modélisation hydrologique des résultats de traçage isotopique de l'eau dans le sol. Interprétant les différences de composition isotopique de l'eau recueillie à différentes profondeurs entre le drain et l'interdrain, ces auteurs montrent qu'il n'y a pas mélange homogène de l'eau au sein du massif de sol argileux étudié. Leur analyse confirme le fait, établi également par d'autres moyens d'investigation, que, dans ce type de sol argileux gonflant, la tranchée de drainage joue un rôle particulier dans le fonctionnement du drainage.

3.3 Débits de pointe et système drainant

Sur le site limoneux d'Arrou, ZIMMER montre qu'il n'est pas nécessaire, comme on le fait souvent à la suite de FLODKVIST, de supposer l'existence de circulations préférentielles à la surface du sol ou dans l'horizon labouré, captées par la tranchée de drainage, pour expliquer le phénomène de débit de pointe.

S'appuyant sur les résultats expérimentaux de ZIMMER, LESAFFRE propose un modèle décrivant complètement l'hydrogramme de drainage. Etendant l'approche classique de Boussinesq-Guyon au régime influencé par les pluies, LESAFFRE approfondit la discussion sur la forme de la nappe et fait apparaître un terme de débit de pointe, quasi-proportionnel aux pluies, dépendant de cette forme. Le modèle dérivé, appelé SIDRA, est basé sur l'analyse des conditions expérimentales rencontrées, à Arrou, aux limites du système drainant, tant au drain qu'à la frontière entre les zones saturée et non saturée du sol.

C'est de l'analyse des conditions de charge sur les drains de différentes parcelles expérimentales du site de Virey que traite le projet de recherche de G. TROUCHE. Les résultats montrent que la mise en oeuvre d'un remblai poreux, autour et au-dessus du drain, diminue la fréquence et la durée des mises en charge des drains.

4. CONCLUSION

Les travaux thèmes 1 et 2 de l'AIP ont été réalisés par des équipes de plusieurs organismes, qu'il s'agisse d'organismes de recherche ou d'enseignement, ou d'un opérateur économique comme le bureau d'études "Organisation et Environnement". Voulu par le Comité d'AIP, cette réunion, qui a souligné la complémentarité des approches et des méthodes, a fait naître des volontés de poursuite du travail en commun, notamment sur des thèmes comme le fonctionnement hydrique et la caractérisation des matériaux argileux.

Et si, malgré l'intérêt des résultats présentés par D. ZIMMER, on peut regretter le faible nombre d'actions traitant de l'évaluation du fonctionnement des réseaux, les travaux sur le fonctionnement hydraulique des réseaux constituent une avancée significative pour la science du sol et l'hydraulique du drainage.

**EVALUATION DE LA QUALITE DE FONCTIONNEMENT
DES RESEAUX DE DRAINAGE :
APPLICATION AUX SOLS ARGILEUX DE LORRAINE**

D. ZIMMER ¹

1 - CEMAGREF, Division Drainage, B.P. 121, 92185 ANTONY Cedex

RESUME

A la demande de maîtres d'oeuvre et de maîtres d'ouvrage lorrains, le fonctionnement de réseaux de drainage en sols argileux a été évalué sur une vingtaine de parcelles dont les matériaux et les sols étaient jugés représentatifs de divers étages géologiques. Les agriculteurs enquêtés sont relativement satisfaits de leurs réseaux, bien que les temps de ressuyage (de 1,5 à 11 jours) ne permettent pas toujours de lever les contraintes dues à l'excès d'eau. Il s'avère difficile de relier les temps de ressuyage annoncés à des critères morphologiques du profil sur drain ou à des variables analytiques. Les capacités d'hydratation déterminées sur pâtes déstructurées en laboratoire permettent de discriminer les matériaux des parcelles dont les temps de ressuyage sont supérieurs à cinq jours des autres matériaux. Elles pourraient être la base d'un test permettant de juger l'aptitude d'un sol argileux à être drainé.

MOTS CLES : Evaluation - Drainage - Sol argileux - Rétention d'eau - Temps de ressuyage

ABSTRACT : Drainage network evaluation

Drainage efficiency has been determined on about twenty farm plots with representative heavy clay soils of the Lorraine Region in eastern France. This evaluation has been carried out through (1) inquiries on farmers' opinion with particular emphasis on drying up duration, and (2) in situ examination of the soil, of the trench structure and of the general conditions of the drainage system operation. Drying up duration proved to be a satisfactory criterion for efficiency evaluation. This variable was not clearly related to soil morphological or analytical variables. On the contrary, drying up durations greater than five days seemed to be related to high water retention of remoulded clay samples. This measurement could help building a test to assess opportunity of drainage of heavy clay soils.

KEY WORDS : Evaluation - Drainage - Clayey soil - Water retention - Drying-up duration

*Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 17-46
AIP CEMAGREF-INRA Maîtrise des excès d'eau*

1. INTRODUCTION

1.1 Rappel des enjeux

Avec 130 000 ha drainés annuellement, la France est devenue, au cours de la décennie 80, le pays d'Europe où le rythme annuel des travaux est le plus élevé. Le développement explosif du drainage s'est accompagné d'une évolution des régions et des types de sols touchés par le drainage. Les régions à vocation de grande culture, bénéficiant de conditions pédologiques relativement favorables, ont drainé les premières, mais l'on draine maintenant de plus en plus dans des régions vouées à la polyculture-élevage dont les sols sont souvent qualifiés de "difficiles". De plus, le devenir des systèmes de production de ces régions est affecté à la fois par les quotas laitiers et par la menace de déprise des terres.

Le choix des investissements doit donc s'appuyer sur des références de plus en plus complexes et nombreuses. Pour le drainage, il importe en particulier de s'assurer de la qualité de fonctionnement des réseaux. Or, dans les sols argileux, cette qualité de fonctionnement est difficile à prévoir car les mécanismes d'écoulement de l'eau n'y sont pas encore bien connus et les critères d'évaluation agronomiques habituels n'y sont pas directement transposables.

1.2 La demande lorraine

La région Lorraine est un bon exemple de région où le choix des terrains à drainer pose problème : les substrats géologiques et les types de sols y sont très variables et plus de 50 % des terrains y sont argileux dès la surface.

Pour permettre aux agriculteurs de **mieux choisir les terrains à drainer en priorité**, les maîtres d'oeuvre et les maîtres d'ouvrage lorrains ont souhaité évaluer le fonctionnement des réseaux de drainage existants. Deux programmes ont été mis en place :

1. Une enquête auprès d'un échantillon représentatif d'agriculteurs des départements de Meurthe-et-Moselle et de Moselle a été effectuée (FENEAU et MARGUILLARD, 1987). Les principaux enseignements de ce travail sont (1) la faible proportion, de 2 à 4 %, d'agriculteurs non satisfaits de leur drainage, (2) l'existence de dysfonctionnements ponctuels entraînant un important "service après-vente", l'entreprise étant sollicitée pour réparer des petits défauts dans 10 à 15 % des cas, et (3) la très forte proportion, 40 %, de "mouillères" ou problèmes ponctuels subsistant après travaux.

2. Un programme d'évaluation approfondie de la qualité de fonctionnement de réseaux de drainage implantés sur des matériaux géologiques bien identifiés et représentatifs des terrains drainés -ou à drainer probablement au cours des prochaines années- a été mis en place.

Ce sont les résultats de ce second programme, conduit par le bureau d'études "Organisation et Environnement" et la division drainage du CEMAGREF, qui sont présentés ici.

Les trois étapes du programme d'évaluation sont les suivantes :

- évaluation du fonctionnement des réseaux de drainage ;
- recherche de facteurs explicatifs du fonctionnement ;
- propositions aux maîtres d'oeuvre et maîtres d'ouvrage.

2. EVALUATION DE LA QUALITE DE FONCTIONNEMENT DES RESEAUX DE DRAINAGE

2.1 Méthode retenue

La qualité de fonctionnement d'un réseau de drainage est fonction de nombreuses variables. Sans qu'il soit possible, dans l'état actuel des connaissances, d'en établir une hiérarchie, l'expérience montre qu'interviennent (1) **des facteurs physiques**, tels que le type de sol, le climat, la topographie et l'histoire de la parcelle (anciens fossés, anciennes planches,...), et (2) **des facteurs techniques**, tels que la conception du réseau, le mode et les conditions de réalisation, les pratiques culturales après drainage et l'entretien du réseau.

Apprécier, sur le fonctionnement d'un réseau, **le poids de ces différents facteurs** suppose un examen approfondi et une sélection précise des parcelles à étudier. Deux principes ont été retenus :

1) limiter le champ des variables ; nous nous sommes intéressés à des parcelles dont ni la conception ni le mode de réalisation n'étaient sujets à caution ; nous avons en outre retenu les parcelles mises en culture de préférence à celles laissées en prairie, les appréciations des agriculteurs étant a priori plus précises pour les premières ;

2) distinguer l'appréciation de l'agriculteur et la qualité effective de fonctionnement du réseau ; cette distinction est à la fois importante et délicate car l'agriculteur rend compte à la fois d'une qualité effective de fonctionnement et du degré de satisfaction apporté par son réseau.

Une double évaluation a été réalisée. Celle de l'agriculteur a été obtenue au moyen d'une enquête portant, d'une part, sur l'exploitation et son parc de matériel, d'autre part sur la parcelle drainée, et plus particulièrement sur les temps de ressuyage, sur l'itinéraire technique de la dernière campagne et sur les problèmes éventuels des cultures ou de portance. La seconde approche comprend un examen détaillé de la parcelle. Quatre types de variables sont observés :

1. **état général du réseau** : observation de l'exutoire, de la bouche de décharge et de la situation de la parcelle dans le bassin-versant ;
2. **état des drains** : observations d'éventuels colmatages, de l'existence de contrepenes ou d'autres problèmes d'écoulement ;
3. **caractéristiques morphologiques de la tranchée ou de la saignée de drainage** : elles sont appréciées essentiellement par différence avec le sol en place ;
4. **caractéristiques de l'horizon labouré** : afin d'apprécier les conditions de réalisation du travail du sol et les conséquences de ce travail sur l'état de la couche labourée, l'état structural de l'horizon labouré a été décrit, en insistant sur les différences drain-interdrain.

Une vingtaine de parcelles ont été étudiées au cours des années 1986 à 1988. Les matériaux géologiques de ces parcelles appartiennent aux étages du Muschelkalk (marnes grises et rouges), de la Lettenkohle (marnes vertes), du Keuper (marnes versicolor), du Domérien et du Bathonien (argiles de décarbonatation). La localisation de ces parcelles en Lorraine est présentée sur la figure 1. Les principales caractéristiques des sols et des parcelles sont présentées en annexes 1 et 2.

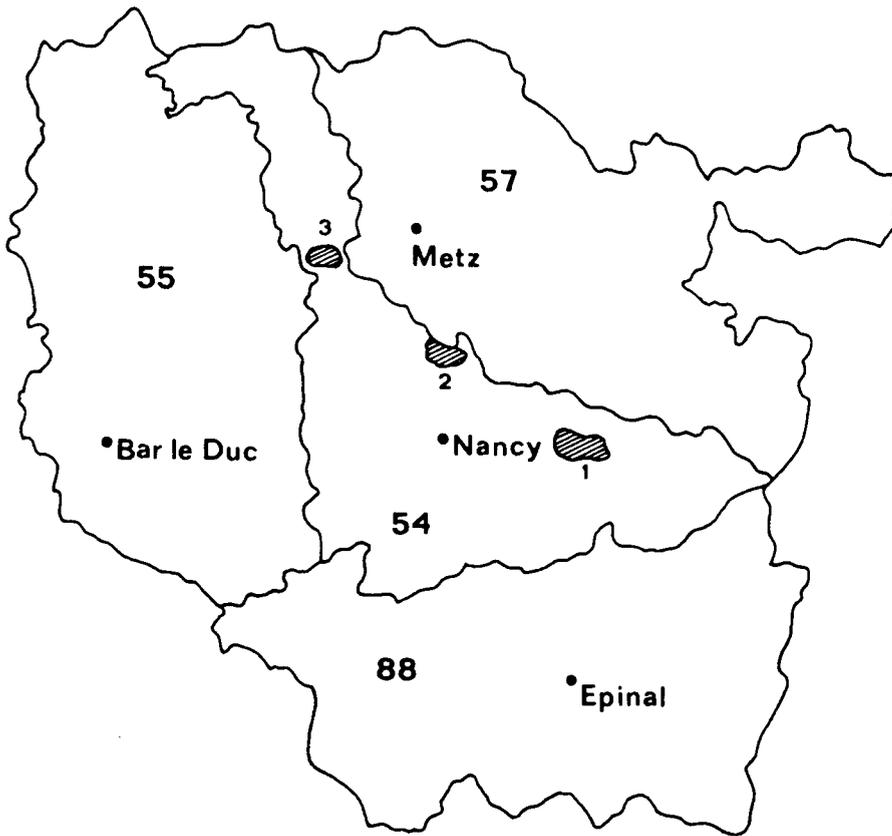


Figure 1 - Localisation des parcelles étudiées en Lorraine

- 1 : parcelles sur Muschelkalk et Lettenkohle
- 2 : parcelles sur Domérien
- 3 : parcelles sur Bathonien

2.2 Appréciations portées par les agriculteurs

Les critères retenus pour évaluer le fonctionnement des réseaux de drainage furent les temps de ressuyage et les problèmes de portance et de travaillabilité rencontrés au printemps. Ce choix se justifie pour trois raisons :

- (1) Dans les sols argileux, les agriculteurs lorrains préfèrent traditionnellement

implanter des cultures de printemps et bénéficier du gel pour la préparation du lit de semences ; les contraintes liées au travail du sol de printemps sont donc fréquemment importantes.

(2) La réponse des cultures, qui pourrait sembler être le meilleur critère, est conditionnée par de nombreux facteurs autres que les excès d'eau et il est souvent difficile de quantifier avec précision les gains de rendement apportés par le drainage ; de plus il est fréquent que le drainage soit la condition sine qua non de la mise en culture.

(3) C'est au printemps, plutôt qu'à l'automne où les sols ne sont pas encore réhumectés, que les transferts d'eau sont les plus proches des modèles servant à concevoir les réseaux de drainage ; il vaut donc mieux évaluer l'efficacité des réseaux en cette saison.

2.2.1 Estimation des temps de ressuyage

Dans l'enquête, **les temps de ressuyage sont évalués pour une situation type : après une période pluvieuse de printemps précédant une reprise de labour.** Par ailleurs, un zonage des temps de ressuyage de la parcelle est réalisé avec l'agriculteur afin de choisir au mieux l'emplacement du profil sur drain. La validité de cette estimation a été testée en demandant aux agriculteurs de situer les temps de ressuyage de leur parcelle drainée par rapport à leurs terrains les plus sains et les plus humides non drainés : au sein d'une même petite région naturelle, les temps de ressuyage de ces terrains de comportements extrêmes, généralement de même nature pour les différents agriculteurs, sont très proches d'un agriculteur à l'autre (FAVROT et ZIMMER, 1988). La précision des temps de ressuyage - tels que définis ci-dessus - peut être évaluée à un jour lorsque ces temps sont inférieurs à une semaine. Au delà, cette précision diminue ; elle est de l'ordre de la semaine pour les temps de ressuyage supérieurs à 15 jours.

Pour la suite du travail, ne disposant pas d'indicateur plus précis, nous avons retenu les temps de ressuyage pour comparer l'efficacité du drainage des parcelles. **Les temps de ressuyage annoncés varient de 1 à 11 jours.**

2.2.2 Appréciation globale et temps de ressuyage

L'appréciation globale portée par l'agriculteur sur la réponse apportée par son réseau au problème d'excès d'eau, sous la forme d'une note comprise entre 0 et 10, est corrélée aux

temps de ressuyage (figure 2). Les notes attribuées par les agriculteurs à leurs réseaux restent supérieures à la moyenne tant que le temps de ressuyage est inférieur à cinq jours environ. Par ailleurs, même pour des délais très longs, les notes ne descendent qu'exceptionnellement au dessous de 4 : après drainage, l'agriculteur observe presque toujours une amélioration, et, dans certains cas, peut cultiver une parcelle qu'il n'avait jamais pu labourer auparavant.

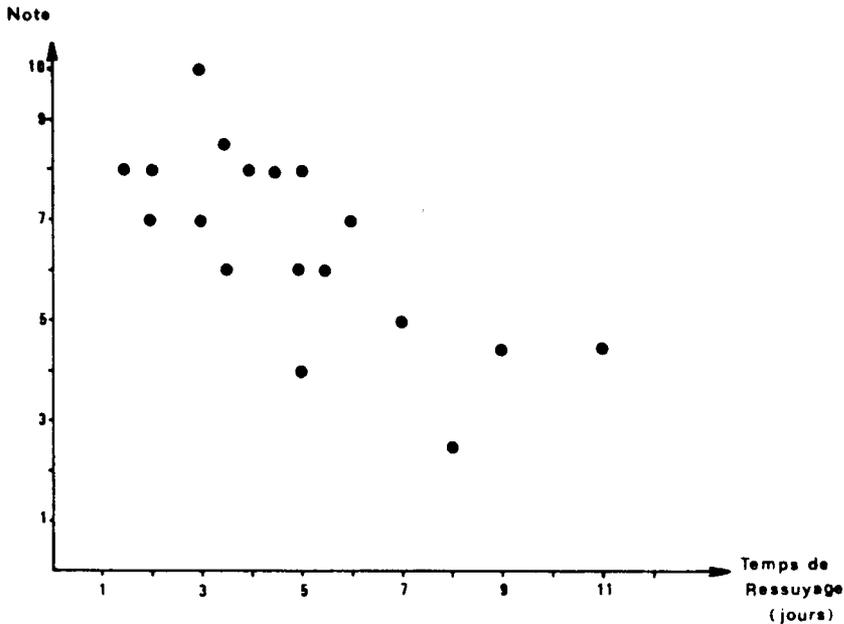


Figure 2 - Relation entre temps de ressuyage, évalué par l'agriculteur, et note donnée par l'agriculteur

2.2.3 Portance et temps de ressuyage

Une illustration des problèmes de portance rencontrés par les agriculteurs des dix premières exploitations étudiées au cours de la campagne culturale 1985-1986 - ayant bénéficié d'un automne sec - est présentée au tableau 1. Ces problèmes sont essentiellement rencontrés lors des passages de printemps (travail du sol et traitements), à l'exception des labours, réalisés lors de périodes de gel. Pour 4 parcelles sur 9, une ou plusieurs opérations n'ont pu être réalisées. Ces contraintes majeures ont été rencontrées sur des parcelles présentant des temps de ressuyage supérieurs à 5 jours.

D'un point de vue agronomique, les temps de ressuyage supérieurs à 5 jours semblent bien être inacceptables pour les agriculteurs de cette petite région. La confrontation des appréciations générales et des problèmes de portance montre que les appréciations relativement favorables portées par les agriculteurs semblent liées à leur relativement faible exigence par rapport au drainage et par rapport aux performances de leurs cultures. Cette faible exigence peut être due au caractère relativement extensif des systèmes de production de ces exploitations, plutôt tournées vers l'élevage.

N° de parcelle	3402	3601	3403	3404	3602	3604	3604	3603	3603
culture	céréale d'hiver	céréale d'hiver	maïs	maïs	céréale printps	céréale d'hiver	céréale printps	céréale d'hiver	céréale printps
temps de ressuyage (jours)	1,5	2	5	5	5,5	9	9	11	11
labour automne	P	P		P		P	P	P	
labour printemps			P		P				P
semis printemps			M	P	m		I		I
traitements - avril - mai - juin	P P/M	m	P		P I	I I	I I	M P P	

Tableau 1 - Problèmes de portance rencontrés sur les parcelles sur marnes du Muschelkalk (34xx) et de la Lettenkohle (36xx) au cours de la campagne 1985 - 1986

P : portant
M : ornières de profondeur inférieure à 10 cm
m : ornières de profondeur comprise entre 10 et 20 cm
I : passage impossible

2.3 Appréciation par l'agro-pédologue

A l'exception d'une parcelle présentant un dysfonctionnement dû à un exutoire insuffisamment profond (parcelle notée 3401 sur le tableau de l'annexe 1), aucune autre parcelle ne présentait de problème manifeste lié aux dispositions constructives du réseau.

Dans les parcelles sans problème apparent, l'appréciation de la qualité de fonctionnement du drainage grâce aux observations des matériaux s'est révélée difficile à

réaliser. Nous nous sommes donc contentés de confronter nos observations morphologiques aux appréciations des agriculteurs, afin de déterminer quels critères ou quelle combinaison de critères permettent de rendre compte du classement des parcelles obtenu en termes de temps de ressuyage. Ces résultats sont présentés dans le paragraphe suivant.

3. RECHERCHE DE FACTEURS EXPLICATIFS DU FONCTIONNEMENT DU DRAINAGE

Le premier résultat est l'absence de corrélation nette entre étage géologique et qualité de fonctionnement des réseaux de drainage. Cette absence de corrélation est due, d'une part, à la variabilité des faciès au sein d'un même étage (ou sous-étage) géologique, d'autre part, aux particularités des histoires des matériaux. Ainsi, les sols de deux parcelles contiguës développés tous deux sur les marnes de la Lettenkohle peuvent présenter des faciès et des caractéristiques analytiques fort différentes (voir en annexe 2, les caractéristiques analytiques des matériaux).

3.1 Morphologie du sol et de la tranchée de drainage

Peu de variables se sont révélées traduire les différences de fonctionnement notées par les agriculteurs. Sur l'échantillon de parcelles étudiées, ni la netteté du cône de fissuration, ni les conditions de réalisation des travaux ne sont corrélés à la qualité de fonctionnement des réseaux (tableau 2). Les variables associées aux temps de ressuyage les plus longs sont les suivantes :

1. l'état de la partie de la tranchée de drainage située juste au-dessus du drain : à l'exception de celle présentant un dysfonctionnement lié à l'exutoire, les parcelles dont les temps de ressuyage sont supérieurs à 5 jours sont caractérisées par la présence d'un manchon **très humide et très plastique** sur une hauteur supérieure à 20 cm au-dessus du drain ; les observations ayant été réalisées durant la même période ces différences ne sont pas dues à des conditions climatiques différentes ;

2. la morphologie de l'horizon labouré : des différences marquées entre les états structuraux au-dessus du drain et à l'interdrain ont été observées -lorsque l'état du champ le permettait- pour les parcelles dont les temps de ressuyage sont supérieurs à 5 jours ; ces différences affectaient, d'une part, les assemblages d'agrégats, plus ou moins soudés et discernables (suivant la terminologie de MANICHON, 1982) et, d'autre part, les redistributions de fer, plus ou moins

marquées. Par ailleurs, alors que pour la parcelle présentant un défaut d'exutoire c'est à l'interdrain que l'état structural paraissait le plus compact, dans une autre parcelle (numéro 3603), c'était au-dessus de la tranchée que l'on notait une plus grande compacité et des redistributions de fer.

N° de parcelle		3402	3601	3403	3404	3602	3604	3401	3603
	temps de ressuage (jours)	1,5	2	5	5	5,5	9	10	11
profils culturaux	différences * drain/interdrain	0	0	1	2	0	0	3	2
différences entre tranchée et sol en place	Cône de fissuration	peu net	peu net	net	net	peu net	peu net	non visible	peu net
	état au-dessus du drain : - humide - plastique	oui oui	oui oui	oui non	oui non	oui oui	oui oui	non non	oui oui
	hauteur de zone plastique (cm)	10	5	-	-	25	40	-	30
caractéristiques du réseau	écartement machine **	10 m S.S.	9 m S.S.	10 m S.S.	11 m S.S.	10 m S.S.	10 m T.	10 m S.S.	10 m S.S.
	période de réalisation	février	février	février	hiver	avril	?	avril	automne
	conditions	pluie	pluie	pluie	?	pluie	?	sec	pluie

Tableau 2 - Caractéristiques des profils sur drains et des réseaux étudiés sur marnes du Muschelkalk (34xx) et de la Lettenkohle (36xx)

* 0 (pas de différence) à 3 (forte différence)

** S.S. = draineuse sous-soleuse, et T. = draineuse trancheuse

3.2 Caractéristiques analytiques

Aucune des caractéristiques analytiques étudiées n'apparaît discriminante. En particulier, ni la granulométrie, ni la minéralogie ne sont corrélées au temps de ressuage. Les cortèges cationiques des argiles ne le sont pas davantage : une forte concentration en magnésium n'est pas corrélée à un dysfonctionnement du drainage (figures 3a et 3b).

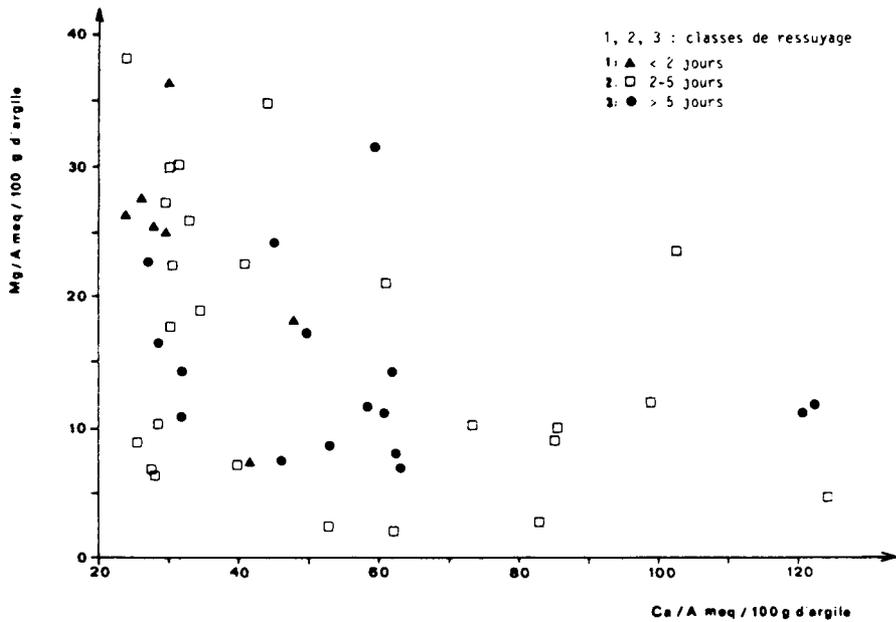


Figure 3a - Relations entre teneurs en calcium et en magnésium des échantillons argileux lorrains étudiés : valeurs exprimées en meq/100 g d'argile

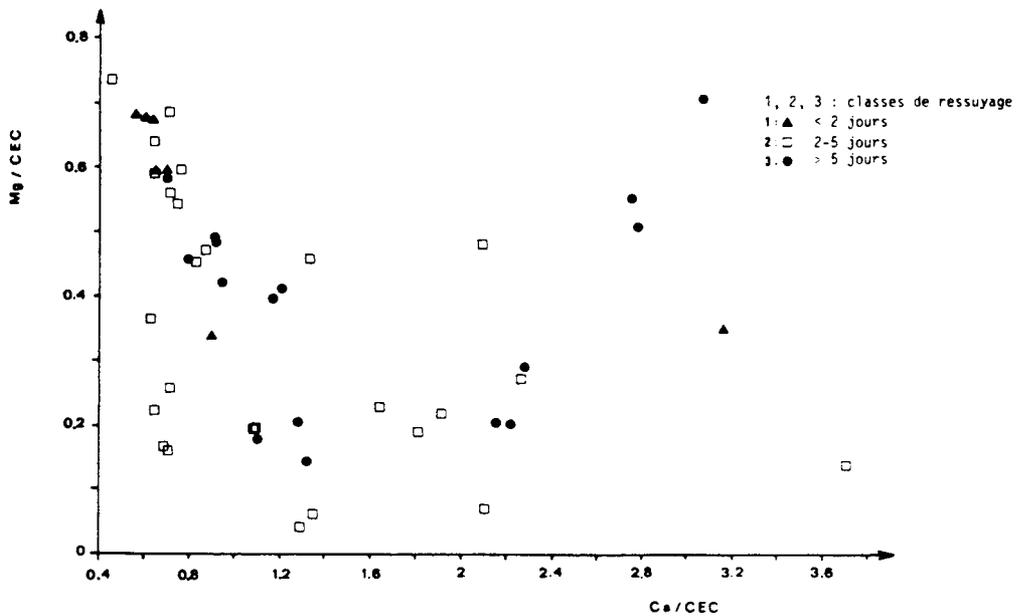


Figure 3b - Relations entre teneurs en calcium et en magnésium des échantillons argileux lorrains étudiés : valeurs exprimées en proportion de la CEC

3.3 Capacité d'hydratation des matériaux

Parmi l'ensemble des propriétés des matériaux, nous faisons l'hypothèse que les capacités d'hydratation sont reliées aux différences de fonctionnement du drainage. L'évaluation de ces capacités n'est pas achevée, mais nous disposons d'ores et déjà de résultats obtenus sur les pâtes déstructurées des différents matériaux.

Les capacités d'hydratation des pâtes sont mesurées grâce à un dispositif adapté des appareils de Richards par Tessier (1985) ; les échantillons sont soumis à des pressions pneumatiques croissantes correspondant aux pF 1; 1,5; 2; 2,5 et 3. Seules les teneurs en eau à pF 1, caractérisant les capacités d'hydratation maximales des échantillons sont présentées ici (tableau 3). Ces teneurs en eau sont corrélées principalement à la teneur en argile et au rapport CEC/argile (figures 4 et 5).

Les terrains présentant les temps de ressuyage supérieurs à 5-6 jours sont, pour l'essentiel, ceux dont les matériaux présentent les teneurs en eau à pF 1 les plus élevées (Figure 4). Les teneurs en eau des matériaux présentant des temps de ressuyage inférieurs sont relativement variables. La valeur seuil de cinq jours environ précédemment notée peut donc s'expliquer ainsi : au delà de 5 jours de temps de ressuyage, et en l'absence de problèmes particuliers liés, par exemple, aux dispositions constructives, les mal-fonctionnements des réseaux de drainage sont liés à une capacité de rétention d'eau élevée du matériau. En deçà de 5 jours, d'autres facteurs ou co-facteurs sont à rechercher.

Il peut paraître surprenant que, après avoir été déstructurés, les matériaux révèlent des différences de propriétés pertinentes pour différencier leur comportement in situ. Des résultats comparables ont cependant été précédemment obtenus : DAVID (1983) et SAFAR (1986) montrent, par exemple, que les pâtes de matériaux prélevés dans un sol drainé présentent de fortes différences de capacités d'hydratation suivant que ces matériaux sont prélevés dans le sol en place (i.e. non perturbé par le passage d'un outil), au voisinage des galeries-taupe ou dans la tranchée de drainage : pour un même matériau argileux, les différences de structure - et de comportement macroscopique - sont en relation avec des différences d'organisation à l'échelle microscopique. Ces résultats sont à rapprocher de ceux de TESSIER (1985) qui montre que les variations de capacité d'hydratation des matériaux sont liées à des variations du nombre de feuillets constitutifs des tactoïdes (particules élémentaires) argileux.

Cependant les capacités d'hydratation des pâtes n'expliquent pas tout : certaines pâtes argileuses à forte capacité d'hydratation correspondent à des temps de ressuyage

ECHANTILLON	A %	cec/A	W pF1	ECHANTILLON	A %	cec/A	W pF1
HP1	45	52	1,09	3701 HP1	67,40	39	1,24
3402 HP1 30-50*	33	38	0,70	3701 HP1/2	72,50	41	1,31
3402 HP1 40-50	33	38	0,65	3701 HP2	44,70	34	0,84
3402 HP2 rouge	41	24	0,83	3701 HP3	61,20	36	1,25
3402 vert	41		0,55	3702 HP1/2	64,10	44	1,22
3403 HP1	46,50	43	0,95	3702 HP2	63,20	48	1,02
3403 HP2	38,10	62	1	3702 HP2 vert	59,20	51	1,16
3403 HP3	39,60	41	0,89	3703 HP1	36,20	65	1,11
3404 HP1	38,20	46	0,75	3703 HP3	47,40	49	1,30
3404 HP2	56,90	46	1,05	3704 HP1	48,20	47	0,93
3601 AP	31,50	53	0,70	3704 50-70	48,50	45	0,99
3601 ss labour	46	42	0,90	3704 HP2	47,10	45	0,98
3601 verticale	44,50	43	0,92	3704 HP3	41,70	44	1,01
3601 HP2	44,50	39	0,86	5001 HP1	62	40	1,14
3601 HP3	40,50	53	0,85	5001 HP1	48,40	40	0,94
3601 sai 55-75	44	41	0,86	5001 HP3	38,60	40	
3602 HP1	27,50	56	0,85	5002 HP1	59,50	39	1,05
3602 HP2	48	46	0,96	5002 HP2	29,80	48	0,82
3602 HP3	35,50	49	1,04	5003 HP1	59,20	42	1,13
3602 drain HP1/2	43	49	1,07	5003 HP3	57,20	38	1,12
3603 45-70	37	54	1,30	5201 HP1	65,50	39	1,02
3603 30-50 drain	35,50	57	1,15	5201 cone fiss	58,90	39	1,10
3604 HP2	54	27	1,25	5201 HP3 (Ca++)	31,60	34	0,71
3604 HP3	53	27	1,27	5202 HP2 (Ca++)	37,60	34	
3605 taupage	55	22		5203 HP1	65,70	48	1,42
3605 g.taupage	55,60	20	1,01	5203 HP2	70,20	42	1,22
3605 tranchée	61,10	21	0,92				

Tableau 3 - Rétention d'eau à pF1 des pâtes argileuses des horizons étudiés

A = teneur en argile

cec = capacité d'échange cationique

W = teneur en eau pondérale

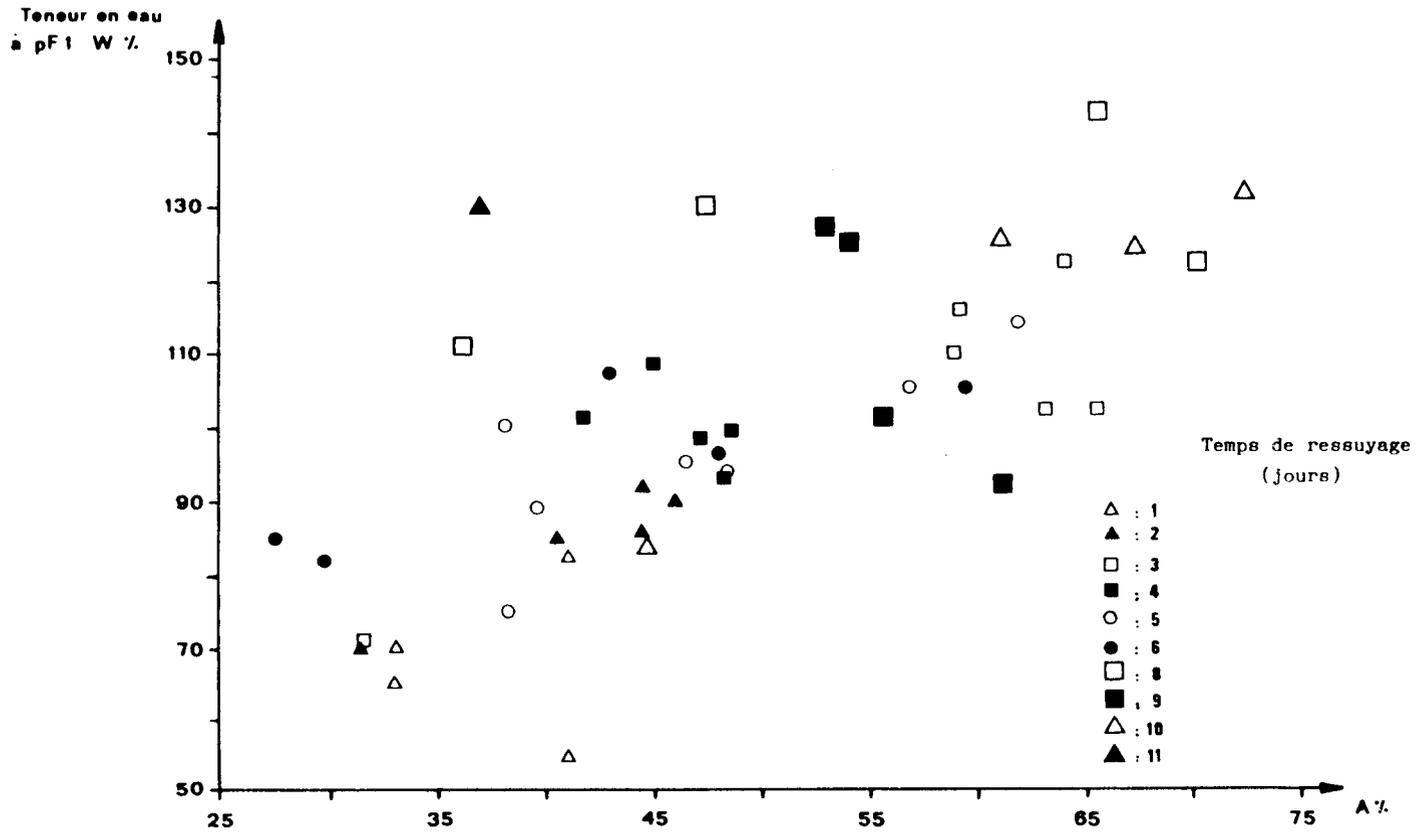


Figure 4 - Relation entre teneur en eau à pF 1, teneur en argile des pâtes déstructurées et temps de ressuyage (en jours)

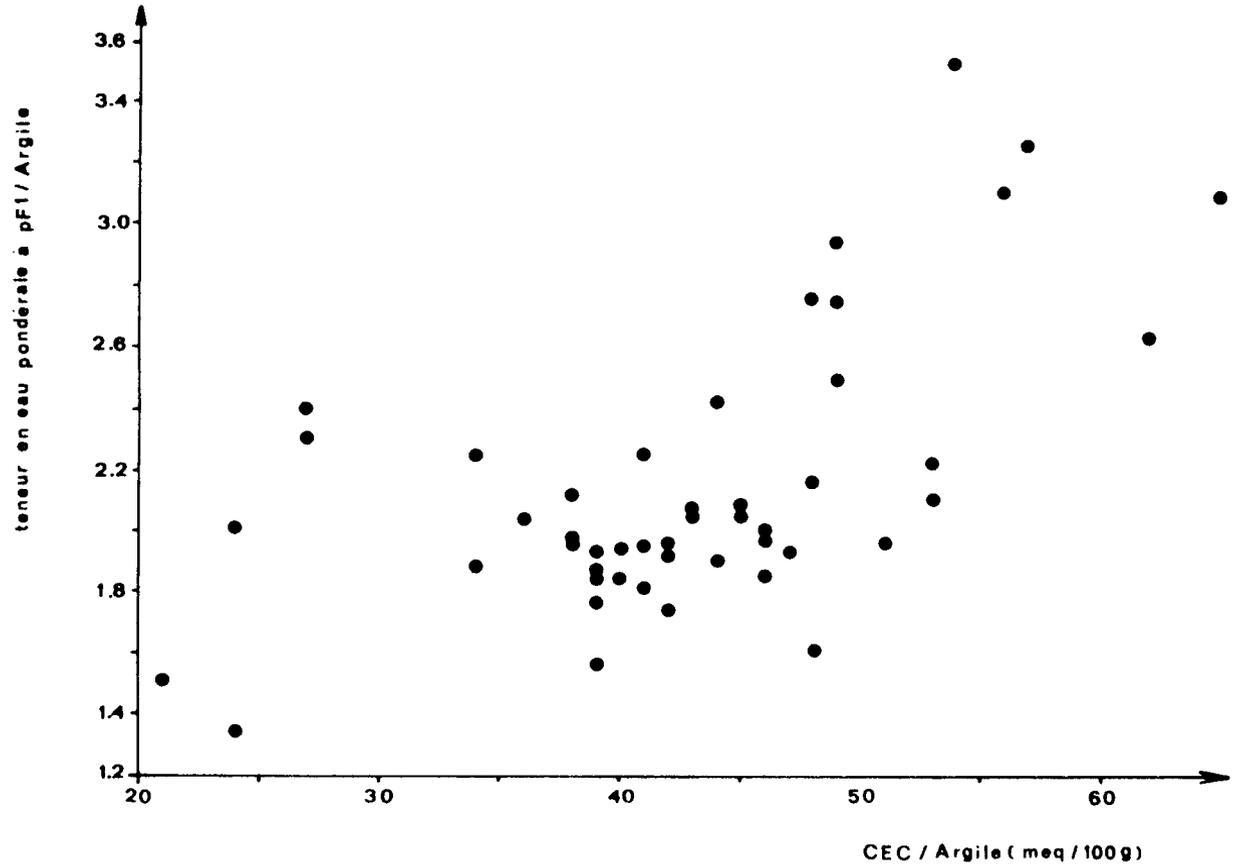


Figure 5 - Relation entre teneur en eau pondérale à pF 1 et CEC des échantillons argileux lorrains étudiés

inférieurs à cinq jours (figure 4). Pour affiner ces résultats, les capacités d'hydratation d'agrégats prélevés in situ seront étudiées, ce qui devrait permettre, entre autres, de comparer les temps de ressuyage à la contrainte équivalente telle que définie par CONCARET et al. (1981).

4. RECOMMANDATIONS - APPLICATIONS

4.1 Classement des sols et prolongements des recherches

En fonction des temps de ressuyage, les matériaux étudiés peuvent être regroupés en trois classes nécessitant des actions de recherche/développement différentes :

1. Classe de temps de ressuyage de 1-2 jours : ces matériaux ne posent pas de problèmes particuliers de drainage.
2. Classe de temps de ressuyage de 2-5 jours : dans ces matériaux, le drainage donne satisfaction pour un système d'exploitation ne présentant pas de surcharge importante de travail au printemps. Les principales améliorations à apporter ont vraisemblablement trait aux techniques de travail du sol sur lequel il convient de concentrer les recherches.
3. Classe de temps de ressuyage supérieur à 5 jours : éviter de drainer ce type de matériau avant d'avoir déterminé expérimentalement les techniques de drainage adaptées.

4.2 Application : l'expérimentation d'Igney

Dans certains matériaux développés sur les marnes vertes de la Lettenkohle, les temps de ressuyage avoisinent les 10 jours. Un champ expérimental a été mis en place dans la commune d'Igney afin de déterminer si et dans quelles conditions le drainage pouvait être réalisé. Cette expérimentation comprend trois parcelles élémentaires : l'une drainée à la draineuse trancheuse à 10 mètres d'écartement, l'autre drainée à l'aide de taupage associé à des collecteurs gravillonnés ; la troisième située dans le même champ, mais sur un sol brun calcaire sain, sert de témoin.

Le suivi réalisé comprend des mesures tensiométriques au pas de temps journalier et des mesures des différentes composantes du rendement. Les principaux résultats de cette expérimentation sont brièvement présentés ci-dessous.

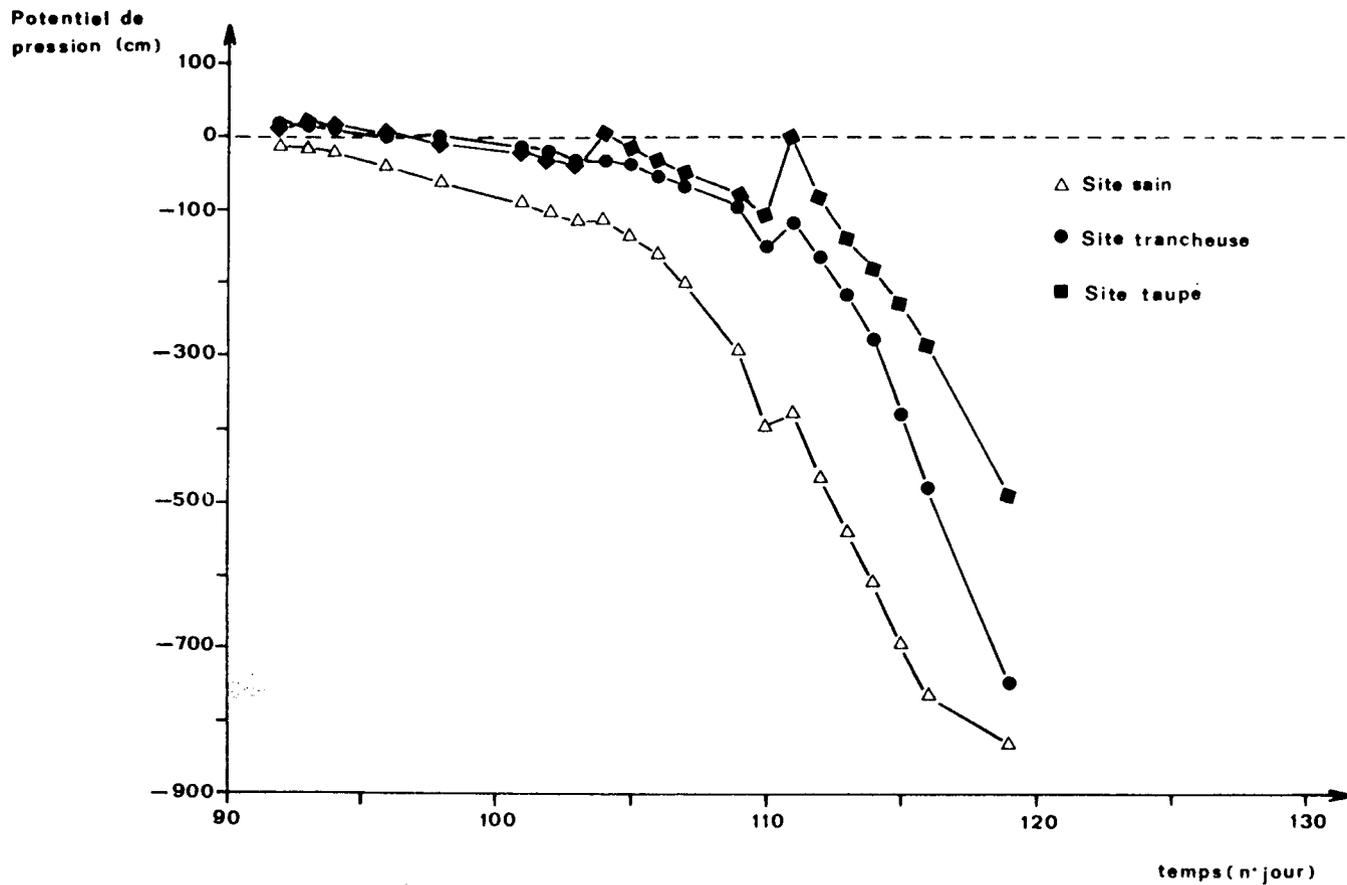


Figure 6 - Chronique des pressions de l'eau mesurées en fond de labour (22 cm de profondeur) sur le champ expérimental d'Igney du 01/04/88 au 28/04/88

4.2.1 Propriétés d'hydratation du matériau et fonctionnement du drainage

Les profils de potentiel mesurés sur ce champ expérimental (ZIMMER, 1989) révèlent que le matériau d'Igney ne parvient pas à se réhumecter complètement même après plusieurs mois d'hiver. Dans ces conditions, le matériau non saturé constitue une barrière imperméable qui demeure proche de la surface du sol pendant toute la saison humide. L'ouverture de fosses au cours de l'été suivant la réalisation du taupage a par ailleurs permis d'observer que les galeries taupes étaient remplies d'un matériau boueux en provenance du sol en place, mais de structure complètement différente de ce dernier. Cette observation, à rapprocher des résultats obtenus sur pâtes argileuses, semble confirmer l'importante capacité de rétention d'eau du matériau notamment après passage d'un outil.

Nature et date de l'intervention	Pluie des 3 jours précédents	Pression de l'eau (cm) à 25 cm de profondeur	Appréciation portée par l'agriculteur
Fongicide (26/03)	17,3 mm	Sain : - 17 Taupage : - 12 Trancheuse : - 12	Mauvaises conditions partout
Forescar (01/04)	0,7 mm	Sain : - 32 Taupage : - 45 (?) Trancheuse : - 15	Bon Ornières 10 cm Ornières 20 cm
Herse + Semis (02/04)	0,3 mm	Sain : - 32 Taupage : - 5 Trancheuse : - 12	Mêmes conditions que 01/04
Herse (07/04)	3,6 mm	Sain : - 57 Taupage : - 15 Trancheuse : - 25	Bonnes conditions partout
Azote (15/04)	12,4 mm	Sain : - 23 Taupage : - 12 Trancheuse : - 15	Conditions limites

Tableau 4 - Conditions des opérations culturales de printemps en 1986 sur le champ expérimental d'Igney

4.2.2 Comparaison des techniques de drainage

Les résultats agronomiques, les observations de l'agriculteur et les mesures tensiométriques (figure 6) révèlent que les résultats des deux techniques sont peu différents. Selon l'agriculteur, le drainage permet une amélioration mais il n'est pas certain que cette amélioration soit suffisante pour justifier économiquement le drainage.

4.2.3 Seuil de portance

L'examen des pressions de l'eau en fond de labour lors des traitements de la campagne 1986-1987 (tableau 4) montre qu'à cette profondeur le seuil de pression de l'eau pour lequel le matériau devient portant est compris entre -17 cm et -30 cm de hauteur d'eau. Cette condition est comparable à celle d'une nappe à 45 cm de profondeur (critère retenu en France pour le calcul de l'écartement des drains) associée à un profil de pression hydrostatique au-dessus ou à une pression de - 40 cm à 5 cm de profondeur (critère de portance retenu aux Pays-Bas).

4.2.4 Temps de ressuyage

La chronique des pressions de l'eau en fond de labour (figure 6) permet de comparer les temps de ressuyage des différentes parcelles à la suite d'un épisode pluvieux du printemps 1987. Dans la gamme des pressions de l'eau supérieures à - 100 cm de hauteur d'eau, les parcelles drainées accusent un retard de huit jours environ par rapport à la parcelle saine. Si le temps de ressuyage de cette parcelle est de 1 à 2 jours, le temps de ressuyage des parcelles drainées vaut 9 à 10 jours environ. Cette valeur est identique à celle annoncée par les agriculteurs enquêtés pour ce type de sol, ce qui confirme la pertinence et le bien fondé du choix de ce critère d'évaluation.

5. CONCLUSIONS

Les principales conclusions du travail sont les suivantes :

1. L'appréciation par l'agriculteur du temps de ressuyage pour une opération culturale et une période donnée paraît suffisamment fiable pour être utilisée dans un travail d'évaluation des réseaux de drainage. Une pondération, fonction de l'importance des contraintes de temps de travail et d'excès d'eau rencontrées par l'agriculteur, permettrait vraisemblablement d'améliorer encore l'adéquation de cette variable à la qualité de fonctionnement des réseaux.
2. En Lorraine, région à forte proportion de sols argileux, les agriculteurs sont relativement satisfaits de leurs réseaux de drainage dès lors que le temps de ressuyage ne dépasse pas cinq jours ; les exigences des agriculteurs vis-à-vis de leurs réseaux de drainage ne sont donc pas très fortes.

3. Peu de caractères morphologiques (de la tranchée de drainage, de la structure du sol) sont liés clairement à la qualité du fonctionnement des réseaux. Seul l'état de la partie située au voisinage du drain est apparue corrélée aux temps de ressuyage élevés, dans les cas où le dysfonctionnement n'était pas dû à une disposition constructive du réseau. De même, parmi les caractéristiques analytiques simples, il n'en est pas qui déterminent un mauvais fonctionnement du drainage.

4. L'étude des capacités d'hydratation des matériaux semble être une voie à poursuivre : les pâtes déstructurées des matériaux présentant les temps de ressuyage les plus longs (supérieurs à 5 jours) ont des capacités d'hydratation plus élevées que les autres.

Les résultats présentés ci-dessus doivent être confirmés et approfondis. Ce travail se poursuit depuis 1989 dans le cadre d'une nouvelle AIP CEMAGREF "Maîtrise de l'eau" dans deux directions :

1. Recherche de variables explicatives du fonctionnement des réseaux de drainage, en privilégiant les aspects "capacités d'hydratation" des matériaux.
2. Poursuite de la construction d'une typologie des schémas d'écoulement en sols drainés (ZIMMER, 1989).

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie J.C. RENAT du bureau d'études "Organisation et Environnement" avec qui l'ensemble du travail de terrain a été conçu, réalisé et dépouillé. Il remercie également l'ensemble des partenaires lorrains, et en particulier l'Union des Associations Syndicales Autorisées et Foncières de Meurthe-et-Moselle et la DDAF de Meurthe-et-Moselle, qui a permis la réalisation de ce travail.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CONCRET J., De CRECY J., GUYOT J., PERREY C., TROUCHE G., 1981 - Drainage Agricole. Théorie et pratique. Editeur Chambre régionale d'Agriculture de Bourgogne, Dijon, 507p.

DAVID S., 1983 - Contribution à l'étude du drainage des sols argileux. Evolution des caractéristiques physiques et de la microstructure. Mémoire de DEA de Pédologie, INAPG, Université Paris VII, CEMAGREF.

FAVROT J.C., ZIMMER D., 1988 - Recherches sur l'évaluation du fonctionnement des réseaux de drainage par l'association d'enquêtes auprès des agriculteurs et d'exams de profils sur drains. Actes du séminaire "Drenowanie gleb cieżkich - drainage des sols lourds", Elblag, Pologne. Edition INRA, IMUZ, BIPROMEL, 4353.

FENEAU J., MARGUILLARD C., 1987 - Etude statistique du dysfonctionnement des réseaux de drainage en Lorraine. SRAE Lorraine, ARHA, RNED Hydraulique Agricole, 88 p. + annexes.

MANICHON H., 1982 - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse INA-PG, 214p.

SAFAR T., 1986 - Contribution à l'étude des interactions entre hydraulique agricole, dynamique de l'eau et des sels dans les sols argileux sous climat aride et tempéré. Thèse de Doctorat d'Etat, INPL, Nancy, 276 p.

TESSIER D., 1985 - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris VII, Editeur INRA, 361 p.

ZIMMER D., 1989 - Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement. Thèse de l'Université Paris VI. Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique Agricole, 5, 321 p.

ANNEXE 1

CARACTERISTIQUES DU SOL ET TEMPS DE RESSUYAGE DES PARCELLES ETUDIEES

N°	ECHANTILLON PARCELLE	GEOLOGIE	A %	PROF.CM	CALC	TOT	DESCRIPTION SUCCINCTE	CONTACT MATERIAU GEOLOGIQUE
5456	5003 HP1	ressuyage : ? Domérien	59,20	25-30	-		plastique, dominante prismatique 2-25 cm, pas de faces vertiques avant 35 cm de prof., structure cubique 2-3 cm	?
5457	5003 HP3	Domérien	57,20	40-60	-		plastique, dominante prismatique, 1-25 cm, faces vertiques sub-horizontales 3-10 cm	
5432	5201 HP1	ressuyage : 3 jours Bathonien	65,50	30-50	-		brun olive, plastique, structure dominantes prismes et faces vertiques, 2-4 cm et 5-15 cm faces vertiques surtout vers 50/60 cm	oui
5430	5201 HP1	Bathonien	58,90			9,70	cône de fissuration, moins de faces vertiques	
5433	5201 HP3 (Ca++)	Bathonien	31,60	> 95		54,80	transition vers le calcaire	
5437	5202 HP2 (Ca++)	Bathonien	37,60			41,40		
5427	5203 HP1	ressuyage 7-8 jours Bathonien	65,70	30	-		brun foncé, friable, structure dominante cubique 1-3 cm, prismes existent mais très peu nets	non, remanié
5426	5203 HP2	Bathonien	70,20	40-60	-		rouille, dominante prismatique 3-30cm, et polyédrique 1 cm, faces vertiques 2-3 cm apparaissent en prof. vers 0.60m, deviennent plus grandes 10-30 cm au delà de 0.60 m	fond de thalweg

N°	ECHANTILLON PARCELLE	GEOLOGIE	A %	PROF.CM	CALC	TOT	DESCRIPTION SUCCINCTE	CONTACT MATERIAU GEOLOGIQUE
	3602	ressuyage : 5-6 jours						
5415	3602 HP1	Lettenkohle	28	30-40	-		ocre jaune, se défait très bien, dominante prismatique 3-20 cm, faces verticales: non proche échantillon 5412	oui
5414	3602 HP2 drain	Lettenkohle	48	45-70	3,60		vert, peu modifié par la sous-soleuse, dominante verticale 2-40 cm, prismes 10-15 cm et -> 50 cm	
5416	3602 HP3	Lettenkohle	36	70-80	11,90		marnes vertes à nombreux cailloux plats dominante polyédrique: plaquettes ou cubes 1-3 mm	
5407	3602 HP1/2 drain	Lettenkohle	43		-		mélange 5415 et 5414 remanié par la sous-soleuse	
	3603	ressuyage : 11 jours						
5406	3603 HP2	Lettenkohle	37	45-70	24,80		vert gris, dominante prismatique 1-15 cm, faces luisantes : oui 2-20 cm	oui
5417	3603 drain	Lettenkohle	36	30-50	21,60			
	3604	ressuyage : 9 jours						
5418	3604 HP2	Lettenkohle	54	30-80	?		vert, dominante prismatique 15-20 cm faces verticales: oui 5-15 cm	oui
5419	3604 HP3	Lettenkohle	53	> 80	-		vert, dominante polyédrique fine mais présence de prismes 15-20 cm faces verticales: non	
	3605	ressuyage : 9 jours						
5431	3605 plot taup.	Lettenkohle	55	15-50	24,70		vert foncé, dominante prismatique 5-15 cm et -> 40 cm	oui
5434	3605 g.taupé	Lettenkohle	56	35-55	23,10		zone autour de galerie taupé, très humide et pâteuse très différente de l'horizon 5431	
5429	3605 plot tranché	Lettenkohle	61	25-45	24,70		idem 5431 mais dans plot trancheuse	
	3701	ressuyage : 10-15 jours						
5442	3701 HP1	Keuper	67	25-40	-		gris foncé, dominante prismatique 1-10 cm faces verticales : peu, friable	non Keuper de bas fond remanié
5439	3701 HP1/2	Keuper	73	30-60	-			
5440	3701 HP2	Keuper	45	40-70	-		gris bleuté, dominante prismatique 1 - 5 cm faces verticales : peu, très friable	
5441	3701 HP3	Keuper	61	>70	-		gris bleuté, dominante polyédrique 2-4 mm faces verticales : peu, plastique (nappe)	

N°	ECHANTILLON PARCELLE	GEOLOGIE	A %	PROF.CM	CALC	TOT	DESCRIPTION SUCCINCTE	CONTACT MATERIAU GEOLOGIQUE
7203	Courcival HP1 trancheuse	ressuyage : 3-5 jours Albo-Céno	45	30-60	-		matériau de Courcival, dominante prismatique faces vertiques : oui	oui
3401		ressuyage : 10 jours						
(caractéristiques pédologiques proches de 3402)								
5401	3402 HP1	ressuyage : 1.5 jour Muschelkalk	33	30-50	-		structure prismatique dominante 1-30cm struct. verticale : non	non
5402	3402 HP1	Muschelkalk	33	40-50	-		idem ci-dessus	
5404	3402 HP2 rouge	Muschelkalk	41	60-80	12,20		structure polyédrique dominante 0.3 - 5 cm quelques faces de glissement (<4cm de diamètre)	
5405	3402 vert	Muschelkalk	41	90-100	?		idem ci-dessus	
5421	3403 HP1	ressuyage : 5 jours Muschelkalk	47	50-70	-		gris verdâtre taché d'ocre, structure prismatique dominante, "se défait" très bien	non, remanié
5422	3403 HP2	Muschelkalk	38	50-70	-		faces vertiques: oui quelques 3-15 cm structure héritée de la marne, couleur verte dominance d'agrégats lités	
5423	3403 HP3	Muschelkalk	40	40-60	-		faces vertiques: non mélange limon et argile, dominante prismatique faces vertiques: non	
5424	3404 HP1	ressuyage : 5 jours Muschelkalk	38	25-35	-		dominante prismatique 10-15 cm faces vertiques: non	oui
5425	3404 HP2	Muschelkalk	57	45-55	-		contact marne, dominantes prismatique --> 40 cm et verticale, faces nombreuses et grandes 20 cm assez proche d'échantillon 5411	
5409	3601 AP	ressuyage : 2 jours Lettenkohle	32		-		un peu de self-mulching	non
5410	3601 < labour	Lettenkohle	46	20-30	-		dominantes prismatique et verticale, faces 10*10 cm	remaniement
5411	3601 verticale	Lettenkohle	45	30-40	-		dominante verticale, faces très grandes -> 20*60 cm	
5412	3601 HP2	Lettenkohle	45	50-70	-		dominante prismatique 1-10cm faces vertiques : oui petites, quelques cm2	
5413	3601 HP3	Lettenkohle	41	80-100	-		dominante polyédrique fine	
5408	3601 saignée	Lettenkohle	44	55-75	-		saignée contre S.S., dominante polyédrique fine	

N°	ECHANTILLON PARCELLE	GEOLOGIE	A %	PROF.CM	CALC	TOT	DESCRIPTION SUCCINCTE	CONTACT MATERIAU GEOLOGIQUE
5438	3702 3702 HP1/2	ressuyage : 3-4 jours Keuper	64	25-40	-		brun/rouge, structure peu nette, fissures dans ttes directions, prismes 0.5 - 7 cm, faces vertiques: oui 10-20 cm et > 50 cm	oui marne à > 80 cm
5444	3702 HP2 rouge	Keuper	63	35-50	-		rouge, prismes: peu, polyédrique fine 2-5 mm faces vertiques: oui 10-20 cm	
5443	3702 HP2 vert	Keuper	59	50-80	-		id. ci-dessus mais vert	
5449	3703 3703 HP1	ressuyage : Keuper	36	20-35	-		plastique à très plastique, dominante faces subhorizontales 10-20 cm, prismes peu nets	oui marne à > 80 cm
5450	3703 HP3	Keuper	47	70-85	-		rouge, dominante prismatique 1-10 cm	
5445	3704 3704 HP1	ressuyage : 3-5 jours Keuper	48	20-35	5,40		gris, plastique, dominante polyédrique, prismes 1-3 cm, faces de glissement 20-30 cm	?
5447	3704 50-70	Keuper	49	50-70	3,40		structure peu nette, couleur gris à gris verdâtre, plastique, prismes/ polyèdres 1-5 cm dominants, faces vertiques 10-20 cm	
5446	3704 HP2	Keuper	47	>65	4,90		id. ci-dessus	
5448	3704 HP3	Keuper	42	70-80	9,30		id. ci-dessus	
5452	5001 5001 HP1	ressuyage : 4-6 jours Domérien	62	30-35	-		beige, dominante prismes, 10-20 cm, pas de faces vertiques, structure cubique/lamellaire suite à matraquage	non
5453	5001 HP1+HP2	Domérien	48	35-55	-		structure dominante prismatique, 10-20 cm "se défaisant bien", pas de faces vertiques	
5451	5001 HP3	Domérien	39	60-70	-		id. ci-dessus	
5454	5002 5002 HP1	ressuyage : 5-7 jours Domérien	59,50		-		plastique, dominante prismatique, 1-20 cm, stru- cture cubique 2-5 cm, faces vertiques sub-hori- zontales 10-20 cm	?
5455	5002 HP2	Domérien	29,80	40-60	-		plastique, dominante prismatique, 2-20 cm, faces vertiques 5-10 cm	

ANNEXE 2

CARACTERISTIQUES ANALYTIQUES DES MATERIAUX ETUDIES

Légende du tableau

HZ : dénomination de l'horizon ou du faciès

PROF. : profondeur en cm

A, LF, LG,
SF, SG : teneur (%) en argile, limon grossier, sable fin, sable grossier après
décarbonatation

CA, MG, K,
NA : cations compensateurs de la CEC (meq/100 g)

T : CEC (meq/100 g)

S/T : saturation de la CEC : somme des cations rapportée à la CEC

TOTAL GR : somme des différentes classes granulométriques, après décarbonatation,
en % du poids de terre fine

GEOLOGIE	N°	PROFIL	NZ	PROF.	A	LP	LO	SF	SG	PH	CA	MG	K	NA	T	B/T	CA/A	MO/A	CA/T	MO/T	CALC. TOT	Ca	TOTAL	TOTAL	GR	
LETTEN.	3601	Ap	0 - 20	31.50	34.50	22.20	5.70	6.10	6.90	15.10	5.70	0.50	0.03	16.80	1.27	0.48	0.18	0.90	0.34					100		
	3601	A1	20 - 30	46	29.50	18.30	3.90	2.30	7	13.60	11.50	0.50	0.09	19.30	1.33	0.30	0.25	0.70	0.60					100		
	3601	Mp1	30 - 40	44.50	30	15.30	4.70	5.30	6.90	13.40	11.30	0.50	0.08	19	1.28	0.28	0.25	0.65	0.59					99.80		
	3601	Mp2aal	55 - 75	44	32	14.40	4.70	4.90	7.30	11.50	12.10	0.50	0.08	17.90	1.35	0.26	0.28	0.64	0.68					100		
	3601	Mp2	50 - 70	44.50	29.50	16.20	4.90	4.90	7.10	10.60	11.70	0.40	0.08	17.20	1.32	0.24	0.26	0.62	0.68					100		
	3601	Mp3	80-100	40.50	35	15.60	4.30	4.60	7	12.20	14.70	0.40	0.10	21.50	1.27	0.30	0.36	0.57	0.68					100		
	3602	Mp1	39	27.50	20.40	5.60	7.50	7.40	13.50	7.30	0.40	0.06	15.50	1.37	0.35	0.19	0.67	0.47						100		
	3602	Mp1/2	43	23	15	8	11	7.90	17.60	9.60	0.60	0.09	21.20	1.32	0.41	0.22	0.83	0.45						100		
	3602	Mp2	48	25	12	10	5	8.20	29.30	10	0.50	0.09	21.90	1.82	0.61	0.21	1.34	0.46	3.60					100		
	3602	Mp3	35.50	30.50	12	13.10	8.90	8.40	36.40	8.30	0.60	0.07	17.30	2.62	1.03	0.23	2.10	0.48	11.90					100		
	3603		30 - 50	35.50	30.50	13.60	11.40	8.70	8.30	43.50	4.12	0.50	0.08	20.10	2.40	1.23	0.12	2.16	0.20	21.60					99.70	
	3603		45 - 70	37	26	15.10	13.40	8.50	8.30	44.70	4.08	0.60	0.08	20.10	2.46	1.21	0.11	2.22	0.20	24.80					100	
	3604	Mp2	54	29.50	5.30	5.50	4.10	8.30	33.80	4.30	0.60	0.06	14.80	2.62	0.63	0.08	2.28	0.29							98.40	
	3604	Mp3	53	30.50	12.30	2.80	0.80	8.50	16.90	5.70	0.70	0.07	14.40	1.62	0.32	0.11	1.17	0.40	0.40						99.40	
	3605	taupage	20	55	16.80	3	0.30	0.20	8.30	33.50	6.08	0.77	0.04	12	3.37	0.61	0.11	2.79	0.51	24.70			7.30		75.30	
	3605	g. taupage	35 - 40	55.60	19	2.10	0.10	0.10	8.50	34.50	7.88	0.55	0.07	11.20	3.84	0.62	0.14	3.08	0.70	23.10			6.96		76.90	
	3605	tranché	25	61.10	13.70	0.30	0.10	0.10	8.50	35.70	7.09	0.47	0.05	12.90	3.36	0.58	0.12	2.77	0.55	24.70			7.89		75.30	
	MUSCHEL.	3401	Mp1	25 - 35	44	38	13	3.20	1.80	7.60	17.50	3.10	0.40	0.09	16.10	1.31	0.40	0.07	1.09	0.19						100
		3402	Mp1	30 - 50	32.50	36.50	17.30	6.10	7.60	8	13.50	2.40	0.36	0.05	12.40	1.32	0.42	0.07	1.09	0.19						100
		3402	Mp2	41	41	8	5.60	4.40	8.50	30.70	3.40	0.30	0.05	9.70	3.55	0.75	0.08	3.16	0.35	12.20						100
3403		Mp1	50 - 70	46.50	35	12.80	3	2.70	7.70	15.40	12	0.31	0.08	20.10	1.38	0.33	0.26	0.77	0.60	0.04					100	
3403		Mp2	38.10	47.10	9.20	1.80	3.70	7.70	16.90	13.20	0.26	0.07	23.60	1.29	0.44	0.35	0.72	0.56	0.04	99.90						
3403		Mp3	40 - 60	39.60	34.90	20	3.30	2.20	7.10	12.10	8.80	0.34	0.08	16.20	1.32	0.31	0.22	0.75	0.54	0.04					100	
3404		Mp1	25 - 35	38.20	39.50	14.10	5.20	3	7	11.30	10.40	0.24	0.06	17.60	1.25	0.30	0.27	0.64	0.59	0.03					100	
3404		Mp2	30 - 50	56.90	38.10	4.30	3	2	7.50	17.20	16.90	0.36	0.08	26.40	1.31	0.30	0.30	0.65	0.64	0.05					104.30	
3701		Mp1	67.40	21.50	7.60	1.50	1.70	7.80	18.30	15.23	0.74	0.10	26.20	1.31	0.27	0.23	0.70	0.58	0.30	0.42			99.70			
3701		Mp1/2	30 - 60	72.50	18	6.30	1.70	1	8	36.20	12.28	0.55	0.17	29.80	1.65	0.50	0.17	1.21	0.41	0.50	0.92			99.50		
3701	Mp2	44.70	34.10	12.60	4.30	4	8.10	14.30	6.35	0.33	0.10	13.10	1.40	0.32	0.14	0.95	0.42	0.30	0.47			99.70				
3702	Mp3	61.20	22.50	8.40	2.90	4.70	8.10	17.50	9.97	0.63	0.11	21.80	1.29	0.29	0.16	0.80	0.46	0.30	0.48			99.70				
3702	Mp1/2	40 - 60	64.10	28.80	5.20	0.60	0.50	7.90	20.10	19.25	0.66	0.11	28.10	1.43	0.31	0.30	0.72	0.69	0.80	0.74			99.20			
3702	Mp2	VERT	59.20	36.40	3.50	0.40	0.20	7.80	14.20	22.44	0.68	0.11	30.40	1.23	0.24	0.38	0.47	0.74	0.30	0.52			99.70			
3702	Mp2	ROUGE	63.20	26.10	5.20	2.40	2.90	7.70	19.20	11.07	0.76	0.12	30.40	1.02	0.30	0.18	0.63	0.36	0	0.47			99.80			
3703	Mp1	36.20	38.10	13.90	4.10	7.40	7.90	21.60	11.33	0.50	0.07	23.50	1.43	0.60	0.31	0.92	0.48	0.30					99.70			
3703	Mp2	70-85	47.40	33.40	12.30	2.70	3.80	8.10	21.40	11.38	0.55	0.11	23.40	1.43	0.45	0.24	0.91	0.49	0.40					99.60		
3704	Mp1	20-35	48.20	22.20	10.60	5.90	7.70	7.70	41.10	4.30	1.39	0.06	22.60	2.07	0.85	0.09	1.82	0.19	5.40					94.60		
3704	Mp2	47.10	24	8.80	5.30	9.90	8	40.30	4.64	0.81	0.06	21.10	2.17	0.86	0.10	1.91	0.22	4.90					95.10			
3704	Mp2	50-70	48.50	24.30	8.80	5.50	9.50	8	35.60	4.94	0.73	0.08	21.70	1.91	0.73	0.10	1.64	0.23	3.40					96.60		
3704	Mp3	80	41.70	25.80	7.30	5.30	10.60	8.20	41.30	4.95	0.60	0.10	18.20	2.58	0.99	0.12	2.27	0.27	9.30					90.70		
DOMERIEU	5001	Mp1	35	62	19.40	3.50	4.90	9.90	5.30	17.10	4.14	0.52	0.48	24.90	0.89	0.28	0.07	0.69	0.17	0.30			0.39		99.70	
	5001	Mp1/2	35-55	48.40	15.70	7.80	9.30	18.60	5.30	12.40	4.30	0.33	0.44	19.30	0.91	0.26	0.09	0.64	0.22	0			0.32		99.80	
	5001	Mp3	38.60	12.60	7.80	9.90	30.80	5.50	11	3.94	0.25	0.33	15.30	1.01	0.28	0.10	0.72	0.26	0.30					32	99.70	
	5002	Mp1	59.50	19.70	5.50	5.10	9.90	5.50	16.70	3.74	0.44	0.42	23.40	0.91	0.28	0.06	0.71	0.16	0.30	0.39					99.70	
	5002	Mp2	40-60	29.80	30.70	27.20	9.10	2.90	7.70	18.50	0.59	0.18	0.08	14.40	1.34	0.62	0.02	1.28	0.04	0.30	0.54					99.70
	5003	Mp1	25-35	59.20	23.90	10.30	5.40	0.80	7.70	32.40	3.07	0.37	0.11	24.80	1.45	0.55	0.05	1.31	0.12	0.40	0.82					99.60
	5003	Mp2	40-60	57.20	28.40	11.30	2.60	0.20	7.90	29.20	3.01	0.34	0.10	21.60	1.51	0.51	0.05	1.35	0.14	0.30	0.71					99.70
	5201	Mp1	30 - 50	65.50	16.60	11.50	5.40	0.30	8	34.60	1.58	0.89	0.16	25.80	1.44	0.53	0.02	1.34	0.06	0.70	0.87					99.30
	5201	Mp1	Cône	58.90	16.50	10.50	4.20	0.20	8	48.80	1.59	0.70	0.13	23.20	2.21	0.83	0.03	2.10	0.07	9.70	4.04					90.30
	5201	Mp3	31.60	7.40	4.60	1.50	0.10	8.30	39.30	1.44	0.28	0.23	10.60	3.89	1.24	0.05	3.71	0.14	54.80	20.99					45.20	
5202	COLM.	Sol plac	52.50	18.90	10.20	3.70	0.60	8.30	40.70	9.65	0.58	0.30	19.20	2.67	0.78	0.18	2.12	0.50	14.10	5.49					85.90	
5202	COLM.	int. dra	36.50	31.40	25.10	6.30	0.10	7.70	18	5.35	0.47	0.18	15.90	1.51	0.49	0.15	1.13	0.34	0.60	0.58					99.40	
5202	Mp2	37.60	10	8.50	2.40	0.10	8.30	41.90	1.69	0.28	0.26	12.80	3.45	1.11	0.04	3.27	0.13	41.40	16.25							

TRANSFERTS HYDRIQUES EN SOLS DRAINES PAR TUYAUX ENTERRES

Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement

D. ZIMMER ¹

1 - CEMAGREF, Division Drainage, B.P. 121, 92185 ANTONY Cedex

RESUME

Le fonctionnement hydraulique et hydrologique de réseaux de drainage a été étudié sur des champs expérimentaux caractérisés par des sols de textures limoneuses et argileuses lourdes et par un plancher imperméable peu profond. Une ébauche de typologie des schémas d'écoulement en terres drainées a été bâtie et ses implications en matière de drainage discutées. Le fonctionnement hydraulique des sols limoneux au cours des débits de pointe est peu différent de celui des tarissements : en particulier le captage par la tranchée de drainage de ruissellement de surface ou hypodermique n'est pas une condition nécessaire des débits de pointe.

MOTS CLES : Drainage - Profil de potentiel - Débit de pointe - Sol argileux - Sol limoneux.

ABSTRACT : Subsurface drainage peak flows and flow patterns.

Hydraulic operation of drainage systems has been investigated on different types of loamy and clayey soils with shallow impervious barriers. Water potential profiles and flow patterns were determined and classified; they give indications on drainage techniques to be implemented. In loamy soils, water flow patterns during peak flow and recession stages proved to be very similar; in particular, neither runoff nor preferential flow within the trench backfill occurred during observed peak flows which are related to gravitary rainfall infiltration and relative stability of the water-table shape.

KEY WORDS : Drainage - Potential profile - Peakflow - Loamy soil - Clayey soil.

*Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 47-61
AIP CEMAGREF-INRA Maîtrise des excès d'eau*

AVERTISSEMENT

Cet article présente les principaux résultats du travail de thèse de l'auteur. Les références bibliographiques sont réduites au minimum et doivent, pour l'essentiel, être consultées dans le mémoire de thèse (ZIMMER, 1989).

1. INTRODUCTION

La construction d'outils opérationnels de prédiction et d'évaluation du fonctionnement des réseaux de drainage passe par la compréhension et la modélisation des mécanismes du fonctionnement hydraulique des systèmes drainants. L'étude des schémas d'écoulement de l'eau en sols drainés est nécessaire pour comprendre ce fonctionnement.

Le fonctionnement hydraulique des sols drainés est caractérisé par des débits de pointe très brefs suivis par des phases de tarissement de longue durée (figure 1). Les schémas d'écoulement de l'eau ont été étudiés au cours de ces deux phases sur le champ expérimental d'Arrou dont le sol est de texture limoneuse, ainsi que sur plusieurs champs expérimentaux en sols argileux lourds dont les caractéristiques figurent au tableau 1.

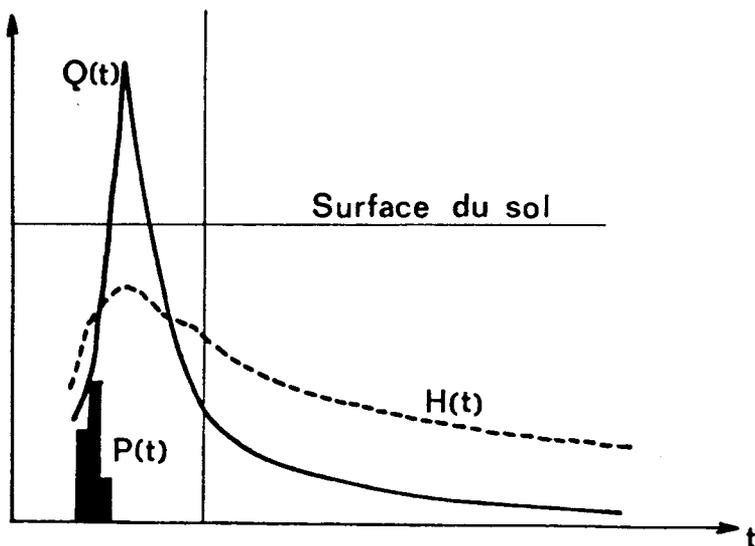


Figure 1 - Réponses débitmétriques $Q(t)$ et piézométrique à l'inter-drain $H(t)$ à un événement pluvieux hivernal simple $P(t)$

2. METHODES DE MESURE ET CHAMPS EXPERIMENTAUX

Sur les champs expérimentaux d'Arrou (28) et de Courcival (72), le dispositif expérimental (figure 2) comprend plusieurs profils de tensiomètres situés à différentes distances de la tranchée de drainage ; une centrale de mesure scrutant les pressions de 24 tensiomètres au pas de temps horaire a été développée pour le travail. Les suivis des autres champs expérimentaux (tableau 1), moins intensifs, ont été réalisés à des pas de temps journaliers ou hebdomadaires grâce à des tensiomètres équipés de manomètres à mercure. Les autres variables, mesurées au pas de temps horaire, étaient les débits et la pluie et, pour les sites d'Arrou et de Courcival, les hauteurs de nappe.

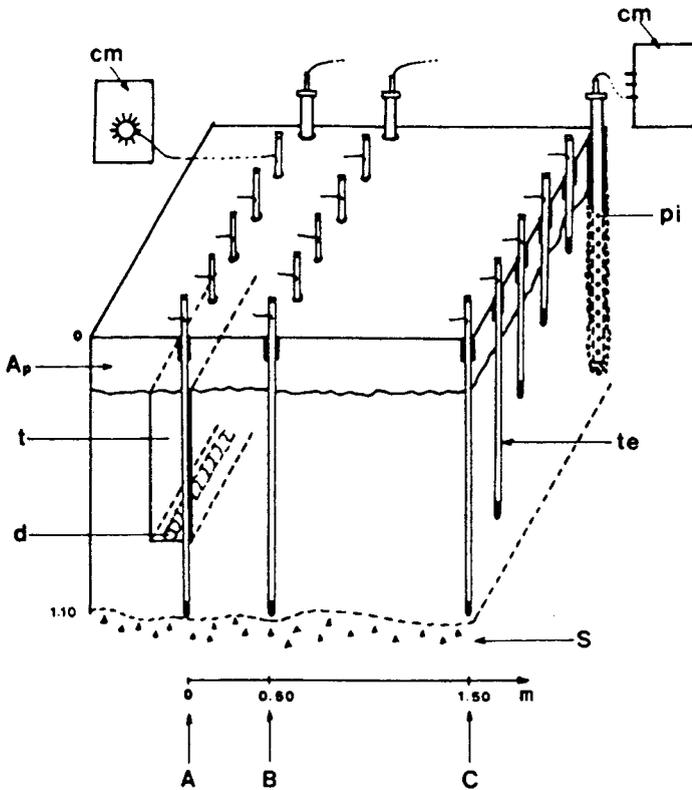


Figure 2 - Schéma du site de mesure intensif

A_p : couche labourée, t : tranchée de drainage, d : drain, S : substratum
te : tensiomètre, pi : piézomètre, cm : centrale de mesure

Dans ce qui suit, l'expression *fonctionnement hydrologique* renvoie aux tendances de fonctionnement du drainage, et notamment à la part de l'eau de pluie restituée par les réseaux de drainage, tandis que l'expression *fonctionnement hydraulique* renvoie aux mécanismes hydrauliques mis en jeu au cours des deux phases de l'hydrogramme du drainage. L'expression *schéma d'écoulement* renvoie à l'organisation générale des lignes équipotentiels de l'eau du sol.

Champ expérimental	Substrat géologique	Type de sol	Argile %	CEC Argile meq/100 g
Arrou (28)	Limon/argile à silex	Sol brun lessivé glossique	15 - 30	46
Bussy (60)	Marne sparnacienne	Brun hydromorphe	40 - 55	55
Courcival (72)	Glauconie Cénomaniens	Brun hydromorphe caractères vertiques	35 - 60	52
Igney (54)	Marne - Lettenkohle	Pélosol	55 - 60	21
Rambouillet (78)	Argile à meulière	Pseudogley argileux	40 - 80	37
S ^t Laurent de La Prée (17)	Alluvions marines	Alluvial marin à nappe salée	60 - 65	44

Tableau 1 - **Caractéristiques des sols des expérimentations**

Les résultats du travail se regroupent en trois rubriques :

- fonctionnement hydrologique des réseaux de drainage : la saison de drainage intense ;
- typologie des schémas d'écoulement, notamment en sols argileux ;
- compréhension et modélisation des débits de pointe : mise en évidence de la sensibilité du fonctionnement du système hydraulique aux conditions imposées à ses limites.

3. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES RESEAUX DE DRAINAGE

Un des points remarquables du fonctionnement hydrologique des réseaux de drainage sous climat tempéré est l'existence de saisons de drainage, mises en évidence après quelques années de suivi du champ expérimental d'Arrou. L'examen des coefficients

de restitution (rapport entre le débit évacué et la pluie incidente) révèle l'existence de trois saisons de drainage : (1) la saison de démarrage du drainage au cours de laquelle les réserves en eau du sol se reconstituent et les coefficients de restitution sont faibles ; (2) la saison de drainage intense au cours de laquelle le coefficient de restitution est maximal et relativement constant ; et (3) la saison de drainage de printemps au cours de laquelle le coefficient de restitution diminue fortement, l'évapotranspiration devenant, en tendance, supérieure à la pluie.

Les courbes de double-cumul "pluie-débit" construites au pas de temps horaire (figure 3) montrent que les passages d'une saison de drainage à l'autre s'effectuent de manière brutale. La comparaison de ces courbes et des hydrogrammes confirme que ces passages s'effectuent en quelques jours.

Par ailleurs, sur le champ d'Arrou, le suivi des profils tensiométriques a révélé que, au cours de la saison de drainage intense, le schéma d'organisation des écoulements de l'eau devient stable : les infiltrations vers la profondeur deviennent minimales (figure 4), la nappe perchée s'installe au-dessus d'un plancher imperméable et sa surface libre acquiert une forme régulière. L'organisation des équipotentielles devient alors conforme aux schémas théoriques observés en laboratoire et **essentiellement déterminée par les conditions aux limites** que sont le drain et la demande évaporative en surface. Ceci s'explique par l'état hydrique proche de la saturation du sol, qui rend les transferts de pression possibles sur une distance de plusieurs mètres.

Au cours de la saison de drainage intense, **la variabilité des propriétés hydrodynamiques (conductivité hydraulique, porosité) des horizons du sol n'a donc plus qu'une influence réduite sur le schéma d'écoulement de l'eau** : cette saison est donc une période privilégiée pour l'étude des transferts d'eau dans le sol.

4. TYPOLOGIE DES MODES DE FONCTIONNEMENT DES RESEAUX DE DRAINAGE EN TERRES DRAINEES A PLANCHER IMPERMEABLE PEU PROFOND

Quatre principaux schémas de potentiel total de l'eau (ou charge hydraulique) ont été déterminés in situ. Nous leur avons donné le nom du site où ils ont été observés.

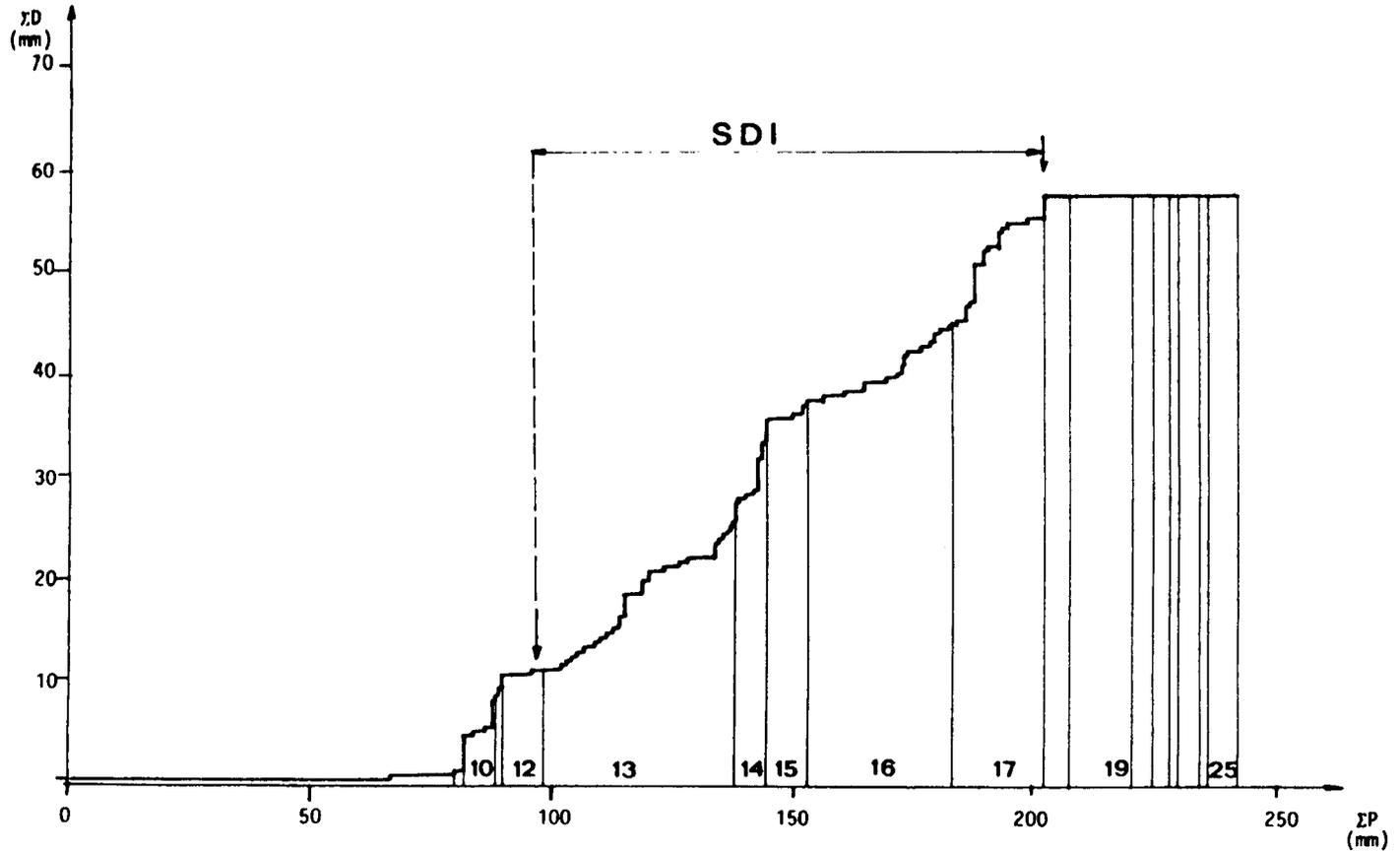
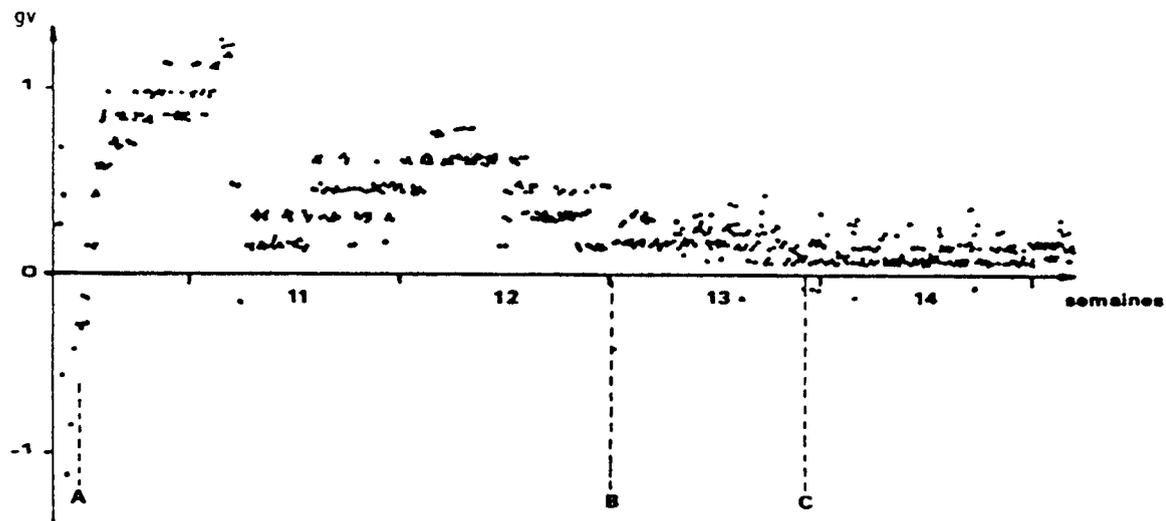


Figure 3 Débits cumulés (ΣD) en fonction des pluies cumulées (ΣP) du 23/12/1985 au 22/06/1986 (semaines 52 à 25)
S.D.I. : saison de drainage intense



A : gel

B : premier débit de pointe et démarrage de la saison de drainage intense

C : second débit de pointe

Figure 4 . Chronique des gradients hydrauliques verticaux (gv) mesurés en profondeur (0,85-1,10 m) à 1,50 m de la tranchée du 5 mars au 8 avril 1986 (semaines 10 à 15) ; les gradients positifs correspondent aux écoulements vers la profondeur

4.1 Le schéma d'Arrou

Dans ce premier schéma (*type Arrou*, figures 5a et 5b), les écoulements sont essentiellement horizontaux dans la nappe, définie comme le lieu des points où la pression de l'eau est positive, et verticaux au-dessus : l'hypothèse de Dupuit-Forchheimer y est donc valide. Ce schéma est celui utilisé dans les modélisations hydrauliques classiques du régime de tarissement non influencé. Il a été observé également sur la partie la moins argileuse du champ de Rambouillet et sur le champ de St Laurent-de-la-Prée.

Ce schéma présente deux variantes :

(1) dans la première variante, les infiltrations vers la profondeur sont négligeables ; dans ce cas, les techniques de drainage conventionnelles sont applicables et l'écartement peut être calculé au moyen de l'approche développée par Guyon ;

(2) dans la seconde variante, des infiltrations vers la profondeur existent, mais ne modifient pas le schéma d'écoulement ; dans ce cas, les techniques de drainage conventionnelles sont applicables, mais il est nécessaire de connaître le flux infiltré vers la profondeur pour calculer l'écartement ; les équations correspondantes ont été développées dans le cas d'un sol homogène, mais on ne sait pas encore en caler les paramètres.

Pour déterminer quelle est la variante applicable, il faut, soit établir des bilans hydriques, soit examiner les relations débits-hauteur de nappe dans la parcelle considérée.

Dans le cas des boubènes (voir les articles de FAVROT et al. et de GUIRESSE et BOURGEAT au sein de ce volume), il semble que les flux infiltrés en profondeur puissent être élevés au point de modifier le schéma d'écoulement : les équipotentielles ne sont plus verticales dans la nappe, l'hypothèse de Dupuit-Forchheimer n'est plus valide et il faut, soit appliquer un terme correctif aux équations développées en utilisant cette hypothèse, soit développer une autre modélisation.

4.2 Le schéma de Courcival

Le second schéma d'écoulement (*type Courcival*, figure 6) a été observé dans un sol argileux fortement gonflant. Il apparaît au cours des périodes les plus humides de l'hiver lorsque le sol est réhumecté. Il est caractérisé par des pressions élevées de l'eau à partir de 40-50 cm de profondeur, résultant d'un emprisonnement de l'eau et de sa mise en pression

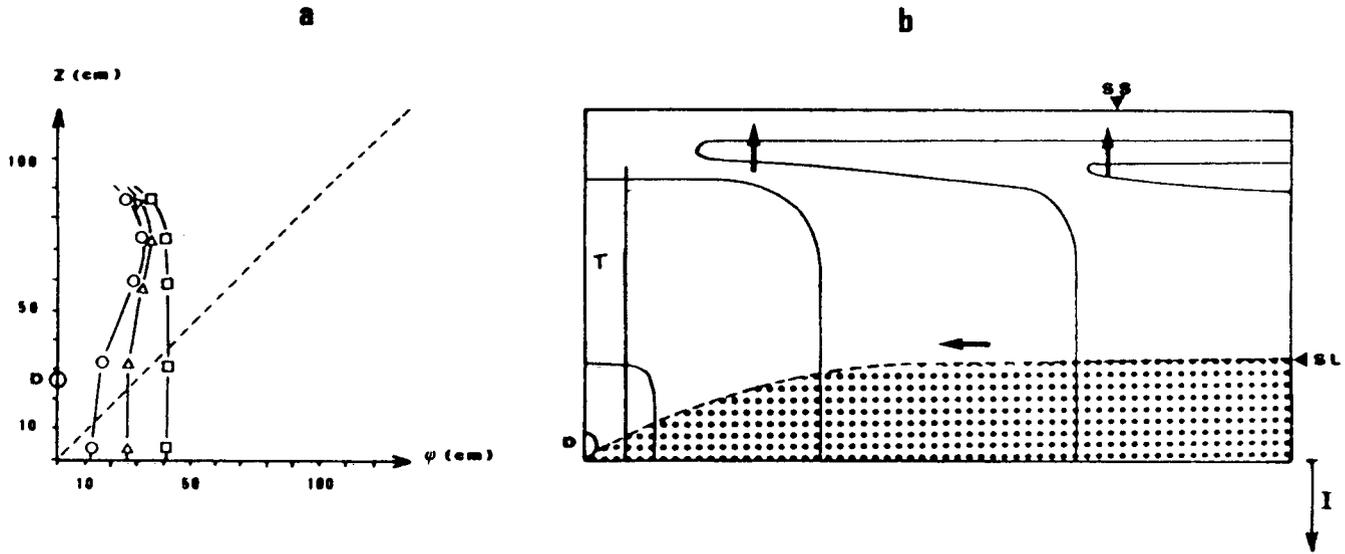


Figure 5 : Profils-types de potentiel total (φ) de l'eau (a) et schéma d'écoulement (b) d'Arrou. Phase de tarissement non influencé

potentiel total : —, potentiel gravitaire : ---, localisation des tensiomètres : tranchée : \circ , 0,50 m de tranchée : Δ , 1,50 m de tranchée : \square .

Drain : D, tranchée : T, Surface du sol : S.S. , Surface libre de la nappe : S.L., Imperméable : I↓, Sens des écoulements : → , zone à pression de l'eau positive : $\cdot\cdot\cdot\cdot$, ligne équipotentielle : —

sous l'effet du **poids de l'ensemble du matériau**. Le potentiel total de l'eau résultant croît donc avec la profondeur ; en conséquence, les écoulements sont ascendants et très peu influencés par la présence du drain sauf dans la tranchée de drainage. Ces surpressions sont comparables aux *pressions anormales* mises en évidence à de plus grandes profondeurs par les hydrogéologues dans des matériaux argileux faiblement consolidés.

Les conditions météorologiques influent très peu sur ce schéma d'écoulement qui, lorsqu'il apparaît, entraîne une forte diminution des débits évacués par le drainage. Cependant, au printemps, alors que l'évapotranspiration augmente, ce schéma d'écoulement laisse progressivement la place au schéma de type Arrou.

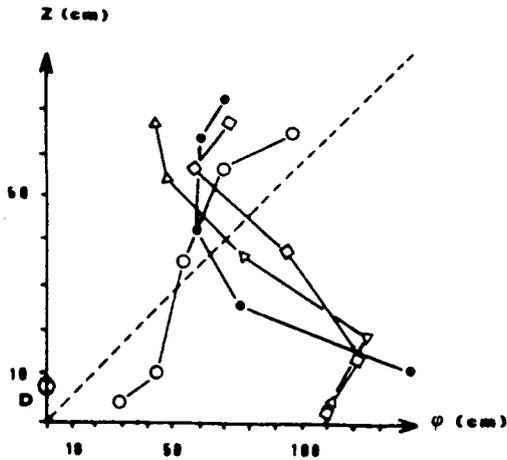


Figure 6 - Profils-types de potentiel total de l'eau (ϕ) à Courcival

Potentiel total : — , potentiel gravitaire : ---, localisation des tensiomètres : tranchée : \circ , 0,50 m de tranchée : Δ , 1,50 m de tranchée : \square , 5 m de tranchée (interdrain) : \bullet

La compréhension de ce schéma est actuellement en cours d'étude. D'un point de vue pratique, dans les sols susceptibles de présenter ce type de schéma d'écoulement, la technique de drainage que nous préconisons est celle du taupage associée à des collecteurs gravillonnées.

Cette technique présente en effet deux avantages :

- les galeries-taube sont moins profondes que les drains classiques (50 à 60 cm) ; or dans sa partie supérieure, le sol se fissure plus tôt au printemps et les mises en pression perturbent moins le fonctionnement du drainage ;

- l'écartement des galeries-taupe n'est que de 2 ou 3 mètres.

Le schéma d'écoulement de type Courcival a également été observé de manière temporaire sur la parcelle la plus argileuse du champ de Rambouillet. Les tensiomètres utilisés étant équipés de manomètres à mercure, ces observations restent à confirmer.

4.3 Autres schémas dans des sols argileux lourds

Les troisième et quatrième schémas ont également été observés dans des sols argileux lourds. Le premier (*type Bussy*, figure 7) est caractéristique d'un matériau imperméable très peu profond reposant sur un matériau relativement perméable induisant des infiltrations profondes importantes. Le second (*type Igney*, figure 8) est caractéristique d'un matériau argileux qui, pratiquement dès la base du labour, est imperméable au point de ne pas se réhumecter jusqu'à la profondeur des drains au cours de l'hiver.

Pour ces deux types de profils, les techniques de drainage préconisées sont respectivement le sous-solage profond et le drainage-taupe.

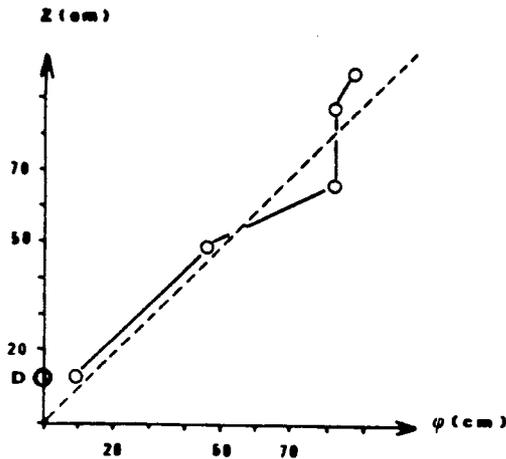


Figure 7 - Profils-types de potentiel total de l'eau (ϕ) de Bussy (tensiomètres à l'interdrain)

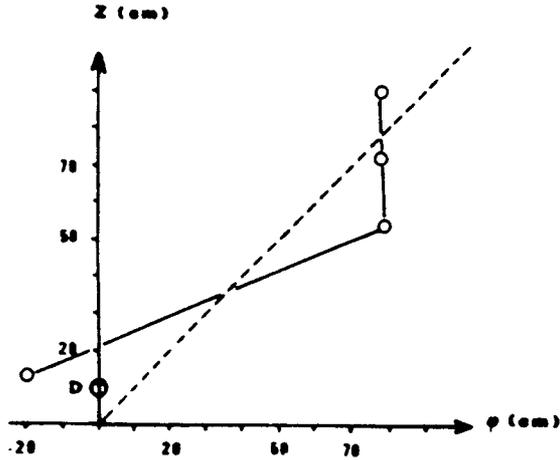


Figure 8 - Profils-types de potentiel total de l'eau (φ) d'Igney (tensiomètres à l'interdrain)

4.4 Conclusion

Ces quatre schémas constituent une ébauche de typologie qui doit encore être complétée. Néanmoins il est d'ores et déjà démontré que la seule connaissance des schémas d'écoulement de l'eau au cours de l'hiver présente un intérêt pratique pour la conception des réseaux de drainage dans les sols argileux lourds, pour lesquels l'empirisme était jusqu'ici la règle.

5. COMPREHENSION ET MODELISATION DES DEBITS DE POINTE

Le schéma d'écoulement déterminé au cours des débits de pointe (figure 9) sur le champ d'Arrou n'a mis en évidence ni ruissellement, ni écoulement horizontal au sein de la couche travaillée du sol capté par la tranchée de drainage. Au cours d'une pluie, la pression de l'eau devient uniforme en tendant vers zéro dans toute la partie non saturée du sol : l'infiltration de la pluie tend à devenir purement gravitaire de la surface du sol jusqu'au toit de la nappe.

Ce résultat inattendu est conforme à la théorie de Philip développée pour des matériaux de propriétés homogènes : lors d'un apport d'eau, la teneur en eau - et donc la pression - d'un matériau s'ajuste de telle sorte que la conductivité hydraulique devienne

égale à l'intensité du flux à infiltrer. Pour le matériau limoneux d'Arrou, une conductivité hydraulique de l'ordre de 1 à 5 mm/h, intensité des pluies lors des débits de pointe observés, est atteinte pour des pressions de l'eau comprises entre - 2 et - 10 cm de hauteur d'eau.

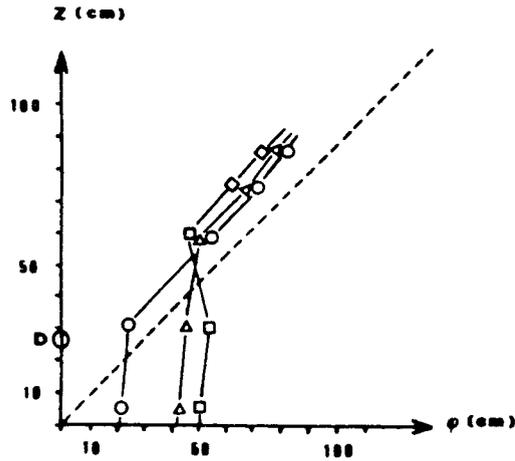


Figure 9 - Profils-types de potentiel total de l'eau (φ) d'Arrou en phase de recharge de la nappe

potentiel total : —, potentiel gravitaire : ---,
 localisation des tensiomètres : tranchée : \circ , 0,50 m de
 tranchée : Δ , 1,50 m de tranchée : \square

Cette réflexion conduit à penser que le schéma observé n'est plus valide dès lors que l'une des deux conditions ci-dessous est vérifiée :

- l'intensité pluviométrique excède la conductivité hydraulique verticale saturée du sol ;
- la nappe atteint la surface du sol.

L'intensité hivernale des pluies étant généralement inférieure à 10 mm/h, la seconde condition est la plus fréquente pour de nombreux sols.

Par ailleurs, ce résultat conduit à émettre l'hypothèse que le seul comportement de la nappe, tel que décrit dans l'approche hydraulique classique, doit permettre d'expliquer les

débites de pointe. Dans cette approche, et dans le cas de matériaux reposant sur un plancher imperméable peu profond, l'intégration de l'équation indéfinie du potentiel (équation de Boussinesq) peut être réalisée avec l'hypothèse d'une forme de nappe constante. Cette hypothèse avait été introduite par Boussinesq comme un outil mathématique permettant la séparation des variables de temps et d'espace. Guyon l'avait ensuite validée expérimentalement dans le cas du tarissement non influencé.

Notre expérimentation a permis d'étendre cette approche. Sur le champ d'Arrou, la forme de la nappe demeure constante pendant les deux phases de l'hydrogramme de drainage (LESAFFRE et ZIMMER, 1987a). Ce résultat permet d'intégrer l'équation indéfinie de potentiel dans le cas d'une nappe soumise à une recharge d'intensité variable. Le résultat de cette intégration est remarquable : **le débit évacué par le réseau de drainage est alors la somme du terme lié à la hauteur de nappe comme dans le cas du régime de tarissement non influencé, et d'un terme égal au produit d'un coefficient lié à la forme de nappe par l'intensité de la recharge.**

L'interprétation physique de ce résultat est délicate. Elle tient au comportement de système de l'ensemble "nappe-conditions aux limites" et en particulier à la sensibilité du comportement de ce système aux conditions aux limites qui lui sont imposées. Cette sensibilité, montrée tout d'abord pour la condition à la limite supérieure (condition de recharge), a également été vérifiée pour la condition imposée à la limite inférieure du système dans le cas d'infiltrations profondes. Des flux infiltrés vers la profondeur cent fois plus faibles que la conductivité hydraulique saturée du sol modifient fortement le fonctionnement hydraulique du drainage en augmentant la vitesse de rabattement de la nappe de manière importante. De plus, si les flux infiltrés vers la profondeur sont indépendants de la hauteur de nappe, on démontre que le débit s'annule pour une hauteur de nappe non négligeable. Un tel comportement avait été observé sur certaines parcelles d'Arrou, le débit s'annulant pour des hauteurs de nappe de l'ordre de 30 cm, sans qu'une explication puisse être apportée.

Grâce à cet ensemble de résultats, un modèle de simulation du fonctionnement du drainage nommé SIDRA (SIMulation du DRAINage) a été bâti. Ce modèle, décrit en détail par LESAFFRE (1989), calcule, à partir de chroniques pluviométriques horaires et d'ETP journalières, les débits et les hauteurs de nappe des réseaux de drainage au pas de temps horaire. Les valeurs et l'occurrence des débits de pointe sont prédits de manière satisfaisante par SIDRA au cours de la saison de drainage intense.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à l'ensemble de mes collègues de la division Drainage du CEMAGREF, ainsi qu'à tous ceux qui, par leurs travaux, leurs conseils et leur soutien, ont contribué au travail réalisé. Une attention particulière revient à B. Lesaffre avec qui l'ensemble du travail a été construit.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les références bibliographiques pourront être trouvées dans les documents suivants :

LESAFFRE B., 1989 - Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique Agricole, 4, 334 p.

LESAFFRE B., ZIMMER D., 1987a - Régime hydrique d'un sol drainé : comparaison des phases débit de pointe et tarissement. *Science du Sol*, 25(4), 217-229.

LESAFFRE B., ZIMMER D., 1987b - Modélisation du comportement hydraulique d'un sol drainé : débits de pointe et tarissements. *Science du Sol*, 25(4), 231-246.

ZIMMER D., 1989 - Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique Agricole, 5, 321 p.

EXPERIMENTATION EN SOLS DE BOULBENES : EFFICACITE D'UN RESEAU DE DRAINAGE ET CARACTERISTIQUES DES SOLS

M. GUIRESSE ¹ - F. BOURGEAT ¹

¹ - Laboratoire Pédologie-Aménagement E.N.S.A.T., 145 avenue de Muret,
31076 TOULOUSE Cedex

RESUME

A la station expérimentale de drainage de Poucharramet (31), l'efficacité du drainage, testée sur 4 parcelles élémentaires - drainées à 10 et 25 mètres d'écartements - en comparaison avec une zone non drainée, est satisfaisante, aussi bien du point de vue agronomique qu'hydraulique. Afin d'expliquer les différences de comportement observées entre les 4 parcelles, les caractéristiques pédologiques des sols sont mises en relation avec les propriétés hydrodynamiques. L'examen approfondi des profils de sol met en évidence que la couche limoneuse superficielle a une épaisseur légèrement variable, mais que ses caractéristiques morphologiques sont constantes. En dessous, l'horizon d'accumulation présente une hétérogénéité importante qui peut être à l'origine de la différence de comportement observée. Les mesures in situ de hauteur de nappe et de débit des drains ont permis de déterminer les propriétés hydrodynamiques. Les résultats montrent qu'en sol concrétionné la conductivité hydraulique horizontale de l'horizon d'accumulation est de l'ordre de 1 m.j^{-1} et sa porosité de drainage proche de 2 %, alors qu'au contraire l'horizon d'accumulation peu concrétionné est imperméable.

MOTS-CLES : Sol lessivé à pseudogley - Drainage - Conductivité hydraulique - Porosité de drainage - Caractéristiques pédologiques.

ABSTRACT : Experimentation in "boulbènes" aqualf soils : drainage efficiency and soil properties.

At the Agricultural Experiment Station of Poucharramet, drainage efficiency was tested on four drained plots with two drain spacings (10 and 25 meters) and compared with an undrained plot. In order to account for differences in drainage operation, the pedological characteristics of the soils were compared to their hydrodynamic properties. The observation of the soil profiles showed that superficial silty layer has not a uniform depth although its morphological characteristics remains constant. On the contrary, the high heterogeneity of the underlying illuvial clay horizon may account for the observed differences in behaviour. Hydrodynamic profiles are calculated using field measurements : watertable level and drain flow rate. The data show that the presence of concretions in clayed illuvial horizon ensures a local horizontal hydraulic conductivity of about 1 m.d^{-1} and an effective porosity of about 2 %, whereas, in the absence of concretions, the illuvial horizon is impervious and its effective porosity is zero.

KEY-WORDS : Aqualf soils - Drainage - Hydraulic conductivity - Effective porosity - Soil properties.

Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 63-87
AIP CEMAGREF-INRA Maîtrise des excès d'eau

1. INTRODUCTION

Les résultats présentés dans ce rapport ont été acquis à la station expérimentale de drainage de Poucharramet (31). Ils s'inscrivent dans un travail de thèse (GUIRESSE, 1989) dont l'objectif est d'approfondir la connaissance des sols lessivés à pseudogley désignés par le terme vernaculaire de "boulbène".

Dans un premier temps, l'efficacité du drainage a été testée aussi bien d'un point de vue agronomique qu'hydraulique.

Ensuite, des méthodes de calcul, présentées ici très brièvement, ont été utilisées pour déterminer in situ les propriétés hydrodynamiques des sols. Avant la présentation des résultats, certaines des hypothèses de base de calcul seront discutées.

Dans une dernière étape, les propriétés hydrodynamiques ont été mises en relation avec les caractéristiques morphologiques, micromorphologiques, physiques et chimiques des sols.

2. PRESENTATION GENERALE DU SITE EXPERIMENTAL

La station expérimentale de drainage de Poucharramet se situe dans le Bassin Aquitain, à une trentaine de kilomètres au Sud-Ouest de Toulouse (31), en rive gauche du Touch. Au sein des dépôts alluviaux de la Garonne, organisés en terrasses étagées (HUBSCHMAN, 1975 ; BOURGEAT et al., 1984), des niveaux graveleux sont recouverts par des matériaux de granulométrie fine. Dans le site étudié, le Touch a entaillé la moyenne terrasse de la Garonne et déposé sur sa rive gauche des dépôts anciens où l'on rencontre des sols lessivés hydromorphes. Les dépôts les plus récents, situés en bordure du fleuve, ont donné naissance à des sols peu évolués.

Les parcelles expérimentales se trouvent sur les dépôts anciens, dans une zone identifiée comme étant relativement homogène lors de la prospection pédologique préalable au drainage.

La pédogenèse de ces sols est marquée, en profondeur, par l'altération du niveau graveleux qui participe à la formation d'un horizon BCg. A travers ce dernier, les passages préférentiels de l'eau aboutissent à l'individualisation de trainées grises à tendance verticale qui préfigurent la formation de glosses. La pédogenèse superficielle est liée à un lessivage important des cations métalliques et des argiles et à un excès d'eau hivernal. Ce lessivage a

conduit à la formation d'un horizon illuvial au sein duquel un pseudogley très net témoigne de l'alternance de conditions réductrices et oxydantes. La migration et la reprécipitation du fer peuvent aboutir à l'individualisation d'un horizon fortement concrétionné.

Généralement on rencontre sur le site la succession pédologique suivante (figure 1) :

- au sommet, des niveaux éluviaux : horizons Ap et A_{2g} ;
- au-dessous, des niveaux illuviaux : horizons Btg, Btg_{Fe} et BCg ;
- à la base, la grave ou cailloutis alluvial.

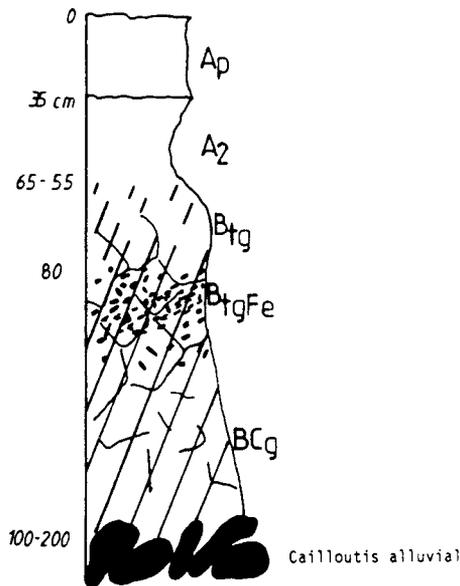


Figure 1 - Profil pédologique schématisé rencontré sur le site de Poucharramet

Ce profil pédologique type présente cependant des variations, notamment en ce qui concerne la morphologie des horizons argilliques Btg et Btg_{Fe}.

La discontinuité texturale qui caractérise ce type de sol, ainsi que la topographie plane, créent des problèmes d'engorgement en hiver. Une nappe perchée se forme durant les mois où l'excédent pluviométrique est important, c'est-à-dire entre décembre et mai.

La conception du réseau expérimental (figure 2) s'est appuyée sur les résultats de la prospection pédologique réalisée à la carrière. Ces observations ont mis en évidence que, sur

une partie du champ expérimental, les horizons éluviaux limoneux sont plus épais, entre 50 et 60 cm d'épaisseur moyenne, que sur l'autre partie où cette épaisseur se situe entre 40 et 50 cm en moyenne. Deux parcelles ont été drainées à 10 mètres d'écartement, et deux autres à 25 mètres. Pour un écartement donné, une parcelle se situe dans la zone de limons plutôt épais, l'autre dans la zone de limons plus superficiels. Les parcelles sont numérotées de 1 à 4 (figure 2). Une zone non drainée sert de témoin.

Ultérieurement, de nouvelles observations ont permis de préciser la variabilité spatiale des caractéristiques morphologiques de ces sols. On a pu ainsi constater que la grave est moins profonde sur la parcelle 4, et que les horizons argilliques présentent une morphologie très hétérogène avec un concrétionnement dont l'intensité varie beaucoup. Celui-ci est plus développé sur les parcelles 1 et 2 que sur les parcelles 3 et 4.

3. RESULTATS DES TESTS DE L'EFFICACITE DU DRAINAGE

3.1 Le point de vue agronomique

Durant la période d'étude, les 5 parcelles ont subi les mêmes traitements et les mêmes techniques culturales : laissées à nu pendant l'hiver pour faciliter l'expérimentation, elles ont ensuite porté, chaque été, une culture de maïs grain irriguée, entre mai 1985 et novembre 1988. Semées au printemps et récoltées à l'automne, ces cultures ont donné des rendements variant entre 80 et 110 qx/ha.

Même s'il est difficile d'attribuer les gains de rendements d'une culture d'été à l'efficacité d'un drainage hivernal, et bien que l'on ne dispose que de trois années de données, nous avons comparé les rendements des 4 parcelles drainées avec ceux de la zone témoin non drainée (tableau 1).

Date de récolte : Variété :	22.10.1986 Clivio	26.10.1987 Sabrina	08.11.1988 Stella
parcelle témoin non drainée	82,6	105,8	83,9
parcelle 1 (E = 10 m)	112,5	113,7	105,9
parcelle 2 (E = 25 m)	102,1	107,3	94,9
parcelle 3 (E = 10 m)		104,5	92,0
parcelle 4 (E = 25 m)		101,1	89,9

Tableau 1 - Rendements* des cultures de maïs grains (en qx/ha)

(* Ces chiffres sont des rendements parcellaires mesurés selon les normes des organismes stockeurs)

On constate que lorsque le printemps n'est pas excessivement pluvieux, comme c'est le cas des deux premières années, certaines parcelles drainées ne donnent pas toujours des rendements significativement meilleurs que le témoin non drainé. Par contre, le printemps 1988 a été très pluvieux, ce qui a repoussé la date du semis à la fin du mois de mai. Sur la parcelle non drainée, le travail du sol n'a pas pu être effectué partout dans de bonnes conditions puisque la traficabilité du sol, très hétérogène, était mauvaise dans les zones les plus humides. Dans ce cas, on constate une diminution générale de la production dans tout le champ expérimental, et un gain de rendement systématique en sol drainé. Par rapport au témoin, ce gain dépasse 20 % sur la parcelle 1 ; il est moins marqué sur les parcelles 2 et 3 et devient très faible sur la parcelle 4.

La pleine efficacité d'un réseau de drainage dépendant surtout de la maîtrise du travail du sol, nous avons également suivi la portance des sols, en caractérisant régulièrement chaque parcelle que l'on considérerait, soit travaillable, soit portante, soit impraticable.

Ces suivis qualitatifs ont montré un effet très significatif du drainage sur la portance des sols. Par contre, la grille de notation utilisée n'a pas permis de mettre en évidence des différences de comportement liées à l'écartement des drains. En effet, pour les 4 parcelles drainées, le nombre de jours disponibles est à peu près le même, sauf pour la parcelle 4 où le sol apparaît moins souvent portant.

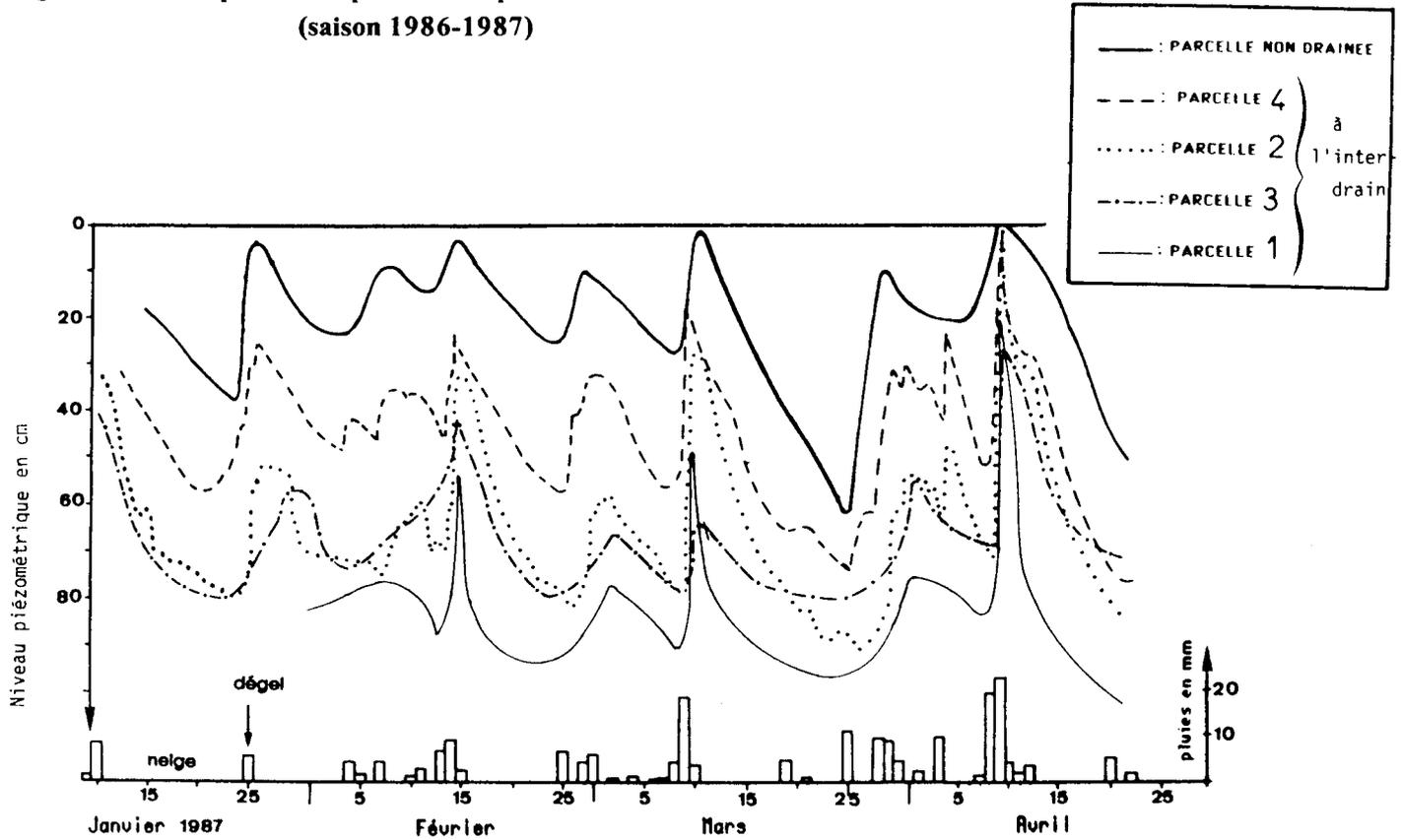
Cette étude de l'efficacité du drainage a été complétée par un suivi piézométrique.

3.2 Le tarissement de la nappe

Au cours de plusieurs saisons de drainage, nous avons mesuré le niveau de la nappe en sol non drainé et à l'interdrain dans les 4 parcelles drainées, à l'aide de piézomètres crépinés aux profondeurs respectives des différents horizons pédologiques Ap, A_{2g} et Btg. Les niveaux de nappe donnés par ces différents piézomètres sont sensiblement identiques. Les courbes obtenues en 1987 sont représentées sur la figure 3.

Globalement, le même scénario se répète chaque hiver : c'est sur le témoin que la nappe reste le plus près de la surface du sol et qu'elle y séjourne le plus longtemps. Cette nappe est à peine un peu plus profonde sur la parcelle 4. Par contre, sur la parcelle 1, le rabattement de la nappe est très rapide. Le comportement des parcelles 2 et 3 est intermédiaire.

Figure 3 - Niveau piézométrique sur les 5 parcelles de Poucharramet
(saison 1986-1987)



Afin de quantifier le temps d'occupation des couches superficielles du sol par la nappe, nous avons totalisé sur 4 campagnes de mesures le nombre de jours, noté SEW40, où le niveau piézométrique apparaît à moins de 40 cm de profondeur. Cette profondeur a été choisie compte tenu, tout d'abord, de l'épaisseur de l'horizon cultural, et, ensuite, parce que cette profondeur de nappe correspond à un seuil dans l'appréciation que porte l'agriculteur sur la portance des sols.

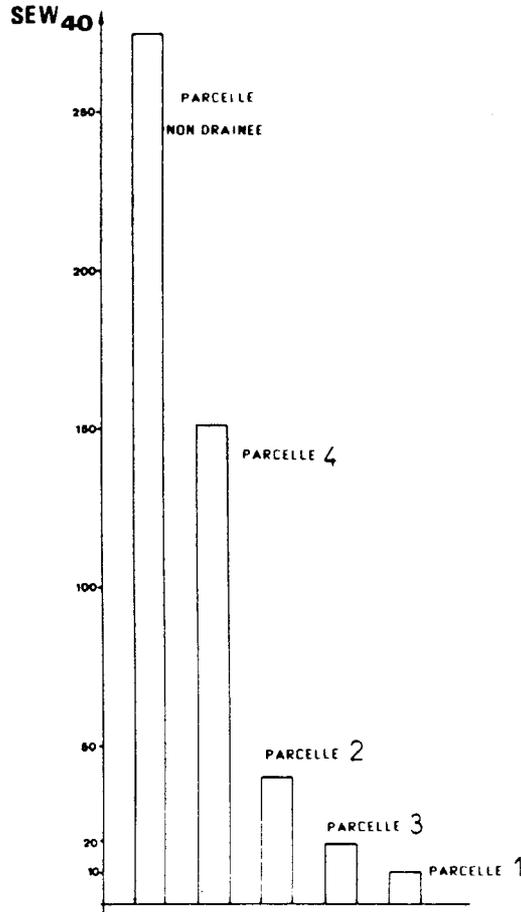


Figure 4 - Total du nombre de jours, SEW40, sur les 4 campagnes de mesures de 1984 à 1988, où le niveau piézométrique est à moins de 40 cm de profondeur

Les résultats (figure 4) mettent en évidence un effet très positif du drainage sur les parcelles 1, 2 et 3. Dans celles-ci on observe un léger effet du resserrement des drains, puisque le drainage est, selon ce critère, sensiblement plus efficace sur les parcelles 1 et 3,

drainées à 10 mètres, que sur la parcelle 2 où l'écartement est de 25 mètres. Par contre, sur la parcelle 4, même si SEW40 est significativement inférieur à celui du témoin, le drainage y est beaucoup moins efficace que sur les autres parcelles drainées.

Tous les résultats convergent et montrent que, sur l'ensemble du champ expérimental, l'efficacité du drainage est certaine, et qu'elle varie peu entre les écartements 10 et 25 mètres, exception faite de la parcelle 4 où le drainage donne de moins bons résultats.

Afin de s'assurer qu'il ne s'agissait pas là d'un dysfonctionnement des drains, nous avons vérifié les points suivants :

- les débits de pointe et les coefficients de restitution y sont élevés ;
- aucune trace de colmatage n'est visible à l'intérieur des drains ;
- malgré un léger début de formation d'une voûte, le matériau de comblement des tranchées de drainage est encore très filtrant sur cette parcelle.

Pour expliquer ces hétérogénéités de fonctionnement, nous avons déterminé les propriétés hydrodynamiques des sols des parcelles 1 et 4, dont les comportements sont extrêmes.

4. DETERMINATION IN SITU DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES

4.1 Hypothèses et méthodes

4.1.1 Généralités

Dans un sol où les caractéristiques morphologiques varient suivant l'axe des profondeurs, les propriétés hydrodynamiques varient également sur une verticale. Afin d'étudier les relations entre la morphologie et la réponse hydraulique d'un sol, nous avons déterminé les valeurs locales de la conductivité hydraulique horizontale $K_h(z)$ et de la porosité de drainage $\mu(z)$ des sols des parcelles 1 et 4. La porosité de drainage $\mu(Z)$ est égale au rapport du volume d'eau écoulé dans un intervalle de temps donné, pendant lequel le toit de la nappe varie autour de la cote Z , au volume de sol ressuyé dans le même temps.

Sur les 2 parcelles, le protocole expérimental se limite au suivi d'un piézomètre situé en position d'interdrain, crépiné depuis la base de l'horizon A_p jusqu'à la profondeur du drain, et d'un débitmètre placé à la sortie du collecteur. Le piézomètre permet de mesurer

la position du toit de la nappe. Lorsque le plan de référence de définition du potentiel de l'eau, ou charge hydraulique, passe par les drains, alors la charge hydraulique à l'interdrain est égale, en faisant l'hypothèse d'une répartition hydrostatique des pressions, à la hauteur du toit de la nappe au-dessus des drains. Les mesures de la décroissance du débit (Q) et de la charge (h) pendant le tarissement de la nappe permettent de déterminer $\mu(z)$ et $K_h(z)$.

Les méthodes de calcul utilisées sont basées sur les lois de l'hydraulique qui régissent le tarissement de la nappe en saison de drainage intense lorsque le sol est proche de la saturation (KINJO et al., 1984 ; LESAFFRE, 1988).

Dans nos régions, où le régime des pluies est variable, les précipitations sont plus ou moins brèves et séparées par des jours sans pluie. Chaque épisode pluvieux déclenche d'abord une phase dite "influencée par les pluies", pendant laquelle les débits augmentent rapidement et atteignent une valeur maximale dite "de pointe". On assiste, après les pluies, à une phase de tarissement pendant laquelle le débit des drains diminue en même temps que la nappe se tarit. L'étude du tarissement, en fonction des propriétés hydrodynamiques du sol, $K_h(z)$ et $\mu(z)$, a fait l'objet de nombreuses publications (GUYON, 1965, 1985 ; CROS, 1971 ; WOLSACK, 1978 ; COLLAS, 1985, par exemple) :

$$Q = - \mu(h) \cdot P \, dh/dt \quad (1)$$

$$Q = 4P/NE^2 \left[\int_0^h (h - z) K_h(z) \, dz + 2 h d'K_d \right] \quad (2)$$

avec ;

h : hauteur de nappe au-dessus du niveau des drains à l'interdrain	L
P et N : coefficients de forme de nappe	sans dimension
E : écartement des drains	L
Q : débit de la nappe mesuré au drain et exprimé par unité de surface	L.T ⁻¹
$K_h(h)$: conductivité hydraulique horizontale locale saturée à la cote h	L.T ⁻¹
K_d : conductivité hydraulique horizontale moyenne de la couche de sol située sous le drain	L.T ⁻¹
d : épaisseur des horizons sous le drain participant à son alimentation	L
d' : profondeur équivalente (fonction de d et h)	L

En mesurant in situ la décroissance simultanée du débit et de la charge, et en supposant que les équations (1) et (2) sont vérifiées au cours des épisodes de tarissement de la saison de drainage intense, on peut donc déterminer $K_h(z)$ et $\mu(z)$.

Les équations (1) et (2) sont obtenues pour certaines hypothèses de milieux et de flux. Nous ne reprendrons ici que celles qui peuvent être les plus discutées, c'est-à-dire :

- il y a absence de puits et de sources internes ;
- les circulations hydrauliques prises en compte dans les calculs proviennent de la vidange d'une nappe libre occupant les horizons supérieurs du sol ; la limite inférieure au-delà de laquelle il n'y a plus d'écoulement vers le drain correspond, sur un plan hydraulique, au substratum imperméable ;
- les écoulements dans la nappe se font en régime variable de tarissement non influencé ;
- la forme de la nappe est supposée constante au cours de la phase de tarissement.

4.1.2 Rôle de la nappe profonde

Etant donné la proximité d'une nappe alluviale observée à l'automne dans la grave, à 2 m de profondeur (1,15 m sur la parcelle 4), il nous fallait vérifier que cette nappe ne participait pas aux écoulements vers le drain.

Pour cela, au cours de la saison de drainage 1988, nous avons installé deux tensiomètres à l'interdrain de chaque parcelle drainée : l'un a été placé au niveau de la grave, et l'autre juste en dessous du niveau des drains. La différence du potentiel total de l'eau divisée par la différence des cotes des 2 tensiomètres donne la valeur moyenne du gradient vertical du potentiel total de l'eau. Un gradient négatif caractérise une circulation ascendante, et, inversement, un gradient positif caractérise des écoulements descendants.

On relève (figure 5) quelques valeurs négatives les 19, 20 et 21 janvier, mais on se trouve, ici, au moment de l'amorce de la saison de drainage. Par la suite, le gradient vertical du potentiel reste positif pendant toute la saison de drainage intense sur les 4 parcelles drainées. Ceci signifie qu'il n'y a pas de circulations ascendantes de la profondeur vers le drain.

4.1.3 Profondeur du substratum imperméable

Bien évidemment, il n'existe pas dans la nature de substratum absolument imperméable. Cette notion est relative, et des circulations vers la profondeur subsistent même pendant la saison de drainage intense.

Afin d'estimer ce flux, les volumes drainés et les volumes des pluies ont été cumulés, au pas de temps horaire, de janvier à mai 1988 (figure 6). Si l'on néglige le ruissellement, ce

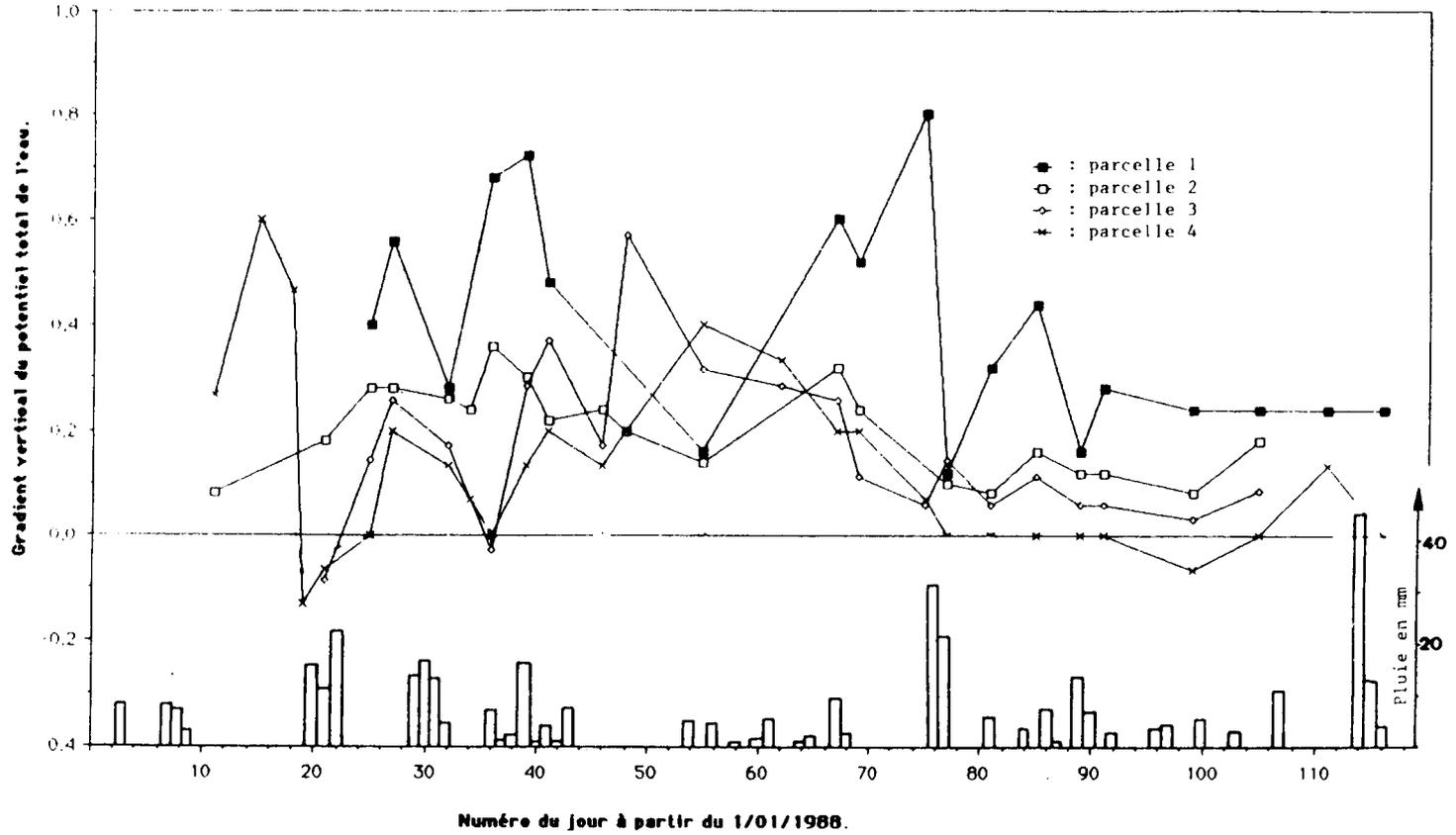


Figure 5 - Gradient vertical du potentiel total en profondeur (1987-1988)

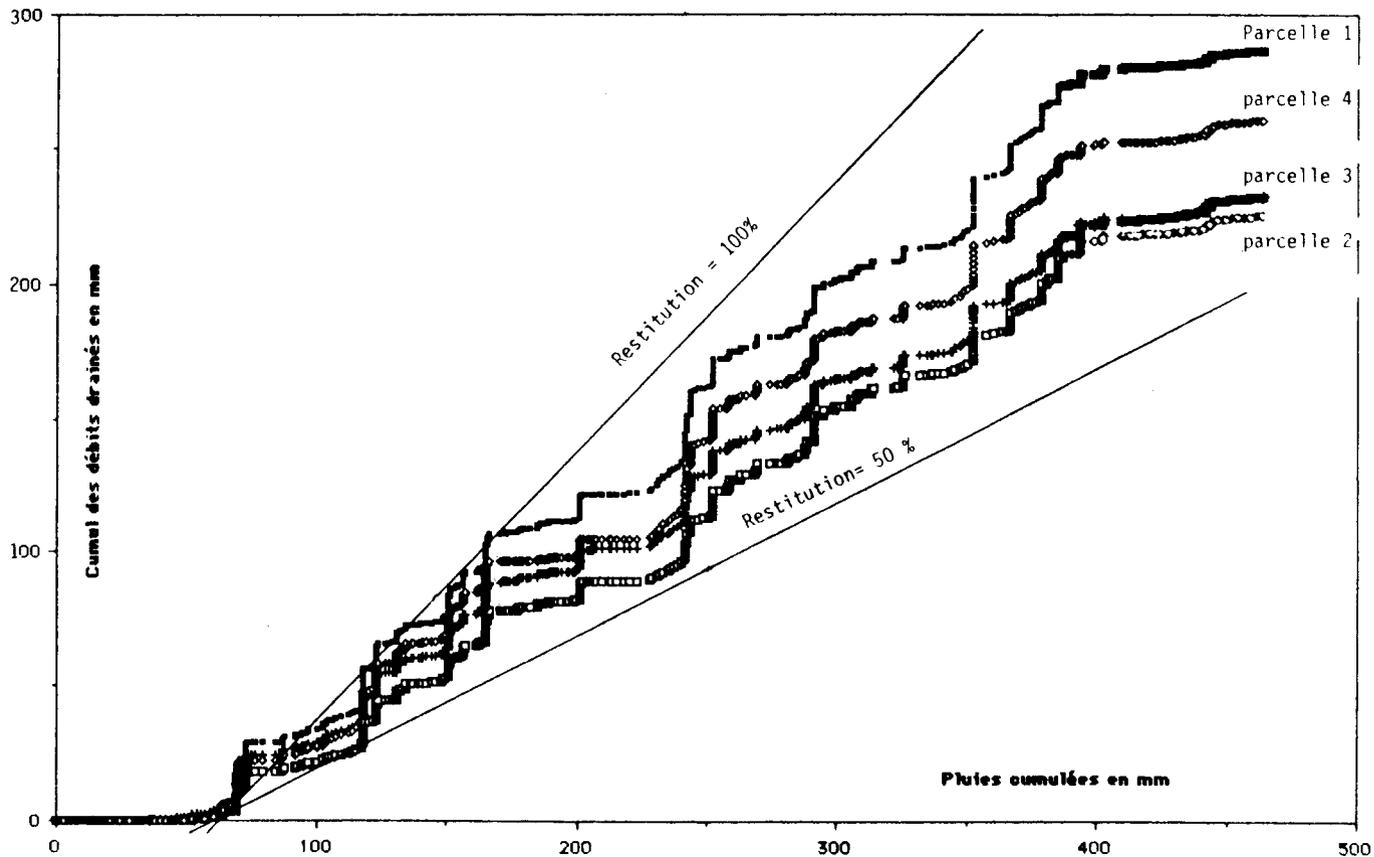


Figure 6 - Courbes double-cumul pluie-débit au pas de temps horaire
 Poucharramet : janvier - mai 1988

qui peut être fait ici (GUIRESSE, 1989), le volume des pluies, cumulé à partir du début des écoulements aux drains et diminué de l'évaporation, devrait être égal au volume drainé, s'il n'y avait pas d'infiltrations profondes. Ceci est vrai sur la parcelle 1 alors que sur les autres parcelles, les déficits valent en moyenne :

- 0,3 mm/j sur la parcelle 4 ;
- 0,5 mm/j sur la parcelle 3 ;
- 0,6 mm/j sur la parcelle 2.

Ces estimations nous ont conduits à n'appliquer les méthodes de calcul précitées que sur les parcelles 1 et 4, où les fuites en profondeur sont les plus faibles : nulles sur la parcelle 1, elles représentent 13 % du total des volumes drainés sur la parcelle 4.

La profondeur de ce substratum a été déterminée, sur ces deux parcelles, en étudiant la loi de variation du débit en fonction de la charge pendant le tarissement de la nappe, et plus précisément la pente de la tangente à l'origine de cette fonction :

- sur la parcelle 4, le débit des drains s'annule pour une charge comprise entre 12 et 20 cm, c'est-à-dire lorsque la nappe se situe entre 73 et 65 cm ; cette profondeur correspond donc à la position du substratum imperméable ;
- sur la parcelle 1, le substratum imperméable est plus profond et correspond à un niveau situé légèrement en dessous des drains puisque nous avons montré, par ailleurs (GUIRESSE, 1989), que la pente de la tangente à l'origine de la fonction $Q(h)$ est nulle, ce qui signifie que la conductivité des horizons situés en dessous des drains est négligeable.

4.1.4 Régime de l'écoulement

On suppose également que les écoulements dans la nappe se font en régime variable de tarissement non influencé par les pluies. Les données traitées dans les calculs sont donc les débits et les hauteurs de nappe mesurés après l'arrêt des précipitations.

On sait cependant, d'après d'autres mesures réalisées à Poucharramet, ainsi que sur d'autres sols limoneux par BRANCHARD (1984) et ZIMMER (1988), que des échanges existent entre la nappe et les couches de sol situées au-dessus. Ceux-ci influencent, d'une certaine manière, le tarissement de la nappe, et plus particulièrement dans les 24 heures qui suivent le débit de pointe. Il nous faudra tenir compte de ces observations lors de l'interprétation des résultats.

4.1.5 Forme de la nappe

Enfin, au cours du tarissement de la nappe, on suppose que la forme de la surface piézométrique reste constante. Des mesures piézométriques ont permis de vérifier qu'en effet la nappe conserve une forme elliptique lors de son tarissement. A la suite de GUYON (1985) et COLLAS (1985), les coefficients de forme de nappe ont été fixés à 0,75 et 0,4, respectivement pour P et N.

Après avoir validé les hypothèses de base de calcul sur le site de Poucharramet, nous pouvons développer le calcul de $K_h(z)$ et $\mu(z)$, afin d'étudier leur variation dans le profil, et ceci dans un objectif de comparaison avec les caractéristiques pédologiques.

4.2 Résultats

La détermination, au cours d'un épisode de tarissement, des porosités de drainage locales, selon l'équation (1), ne présente pas de difficulté, puisqu'il suffit de connaître, à chaque instant, la vitesse de diminution de la charge et le débit Q . Sur la figure 7 sont tracées les courbes expérimentales de la diminution de la charge en fonction du temps au cours de chaque épisode de tarissement, pendant la saison de drainage intense 1988, sur les parcelles 1 et 4. Etant donné la variabilité des courbes obtenues, il était difficile de ne retenir qu'une seule courbe moyenne, caractéristique de chaque parcelle. Nous avons donc traité chaque courbe séparément.

Sur la figure 8, les résultats du calcul de $\mu(z)$ sont représentés pour chaque épisode de tarissement. Seuls deux épisodes ont donné des résultats très différents du reste de la saison de drainage intense : celui du 9 au 23/02 pour la parcelle 1, et celui du 23 au 29/01 pour la parcelle 4. Les autres profils de porosité de drainage sont bien reproductibles d'une phase de tarissement à l'autre.

Sur les 2 parcelles testées, les porosités de drainage sont fortes dans l'horizon cultivé. Pour les raisons évoquées en 4.1.4, on peut difficilement tenir compte des résultats calculés à partir des débits relevés moins de 24 heures après le débit de pointe, lesquels donnent des valeurs de μ supérieures à 10 %. En dessous, la porosité de drainage diminue progressivement dans l'horizon A_{2g} sur les 2 profils de sol étudiés. Mais alors qu'elle s'annule à 65 cm de profondeur sur la parcelle 4, la porosité de drainage conserve une valeur située entre 1 et 2 % sur toute l'épaisseur des horizons argilliques de la parcelle 1. L'analyse des caractéristiques morphologiques des sols justifiera cette différence entre les porosités de drainage de ces 2 parcelles.

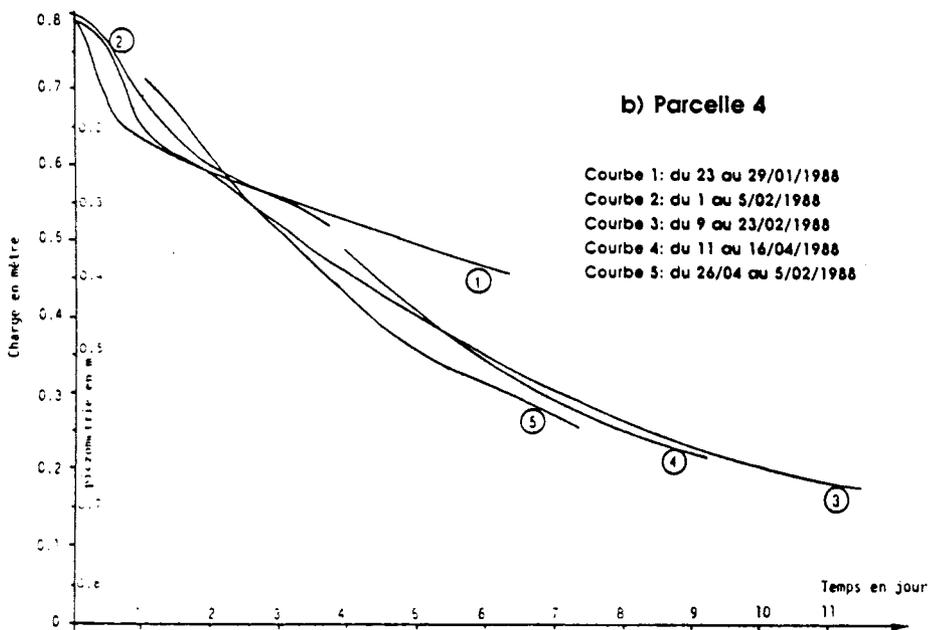
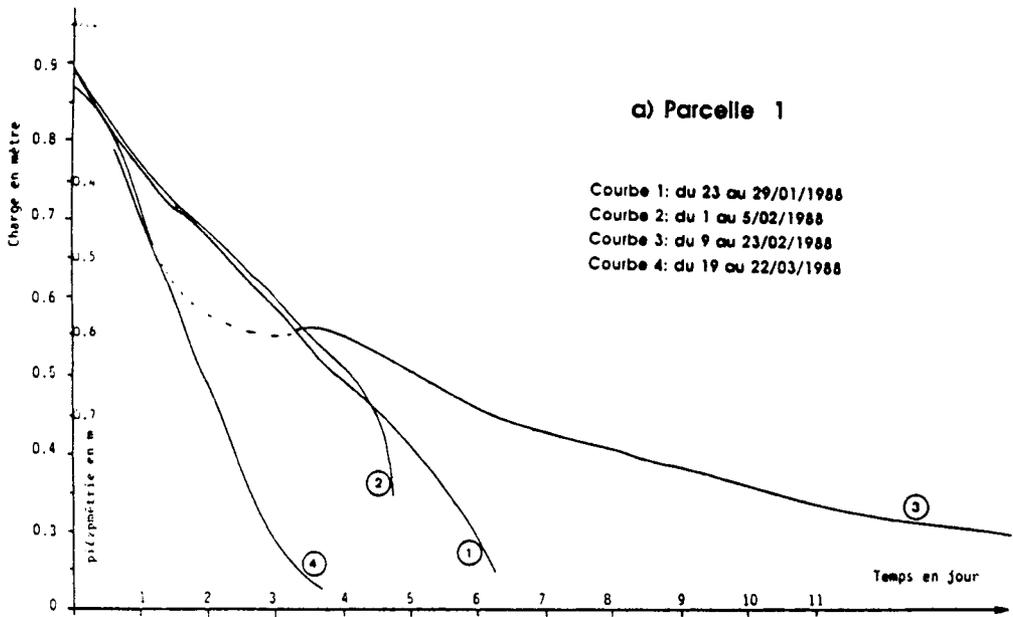
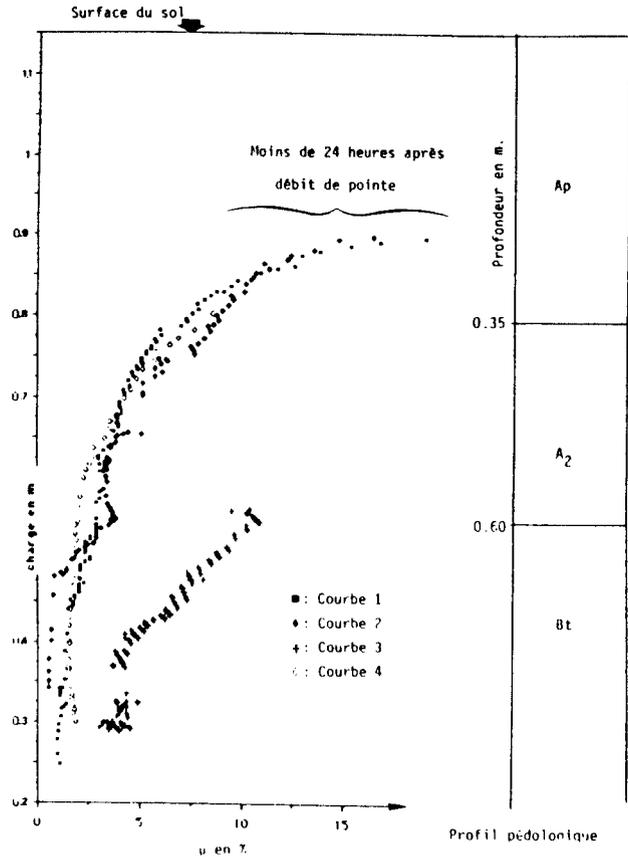
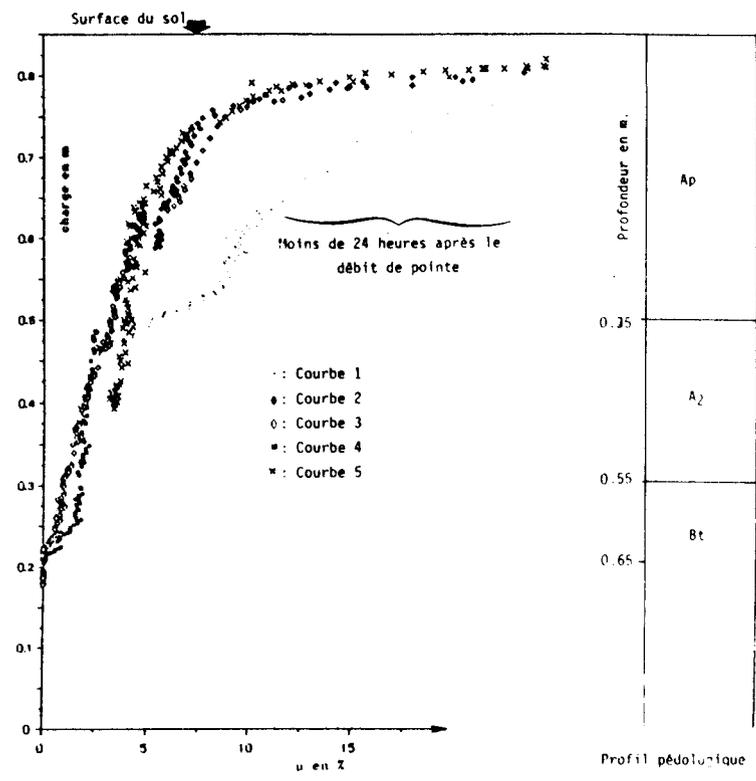


Figure 7 - Variation de la charge hydraulique à l'interdrain au cours des épisodes de tarissement



A) PARCELLE 1



B) PARCELLE 4

Figure 8 - Résultats des calculs de porosité de drainage à Poucharramet

La détermination des conductivités hydrauliques est un peu plus complexe et repose sur l'utilisation de l'équation (2). Après avoir vérifié que le 2^{ème} terme de l'addition dans (2), celui qui concerne les horizons sous le drain, est négligeable, nous avons utilisé l'expression de la dérivée seconde dont le calcul a été développé par GUYON (1985) :

$$d^2Q/dh^2 = 4P/NE^2 K_h(z)$$

La dérivée seconde calculée en un point de la fonction $Q(h)$ donne, à un facteur près, la valeur de la conductivité en ce point. Pour déterminer cette dérivée seconde, plusieurs méthodes existent :

- on peut tenter, comme l'a proposé GUYON (1985), un ajustement des points expérimentaux (débit-charge) sur une loi monomiale qu'il suffit de dériver 2 fois pour calculer $K_h(z)$;
- dans d'autres cas, aucun ajustement mathématique ne convient à l'ensemble des couples débit-charge relevés expérimentalement ; on connaît cependant l'expression numérique de la dérivée seconde $Q''(h)$ d'une fonction quelconque $Q(h)$:

$$Q''(h) = \lim [Q(h + e) + Q(h - e) - 2Q(h)] / e^2 \quad \text{lorsque } e \rightarrow 0 ;$$

le calcul des dérivées secondes s'effectue alors à partir des valeurs (Q, h) constituant l'épisode-type obtenu après lissage visuel des courbes débit-charge expérimentales : avec $e = 5$ cm, les valeurs de $K_h(z)$ sont déterminées entre le niveau des drains et la surface du sol, tous les 5 cm.

Initialement suggérée par COLLAS (1985), cette méthode a été appliquée sur les parcelles 1 et 4, à partir des courbes débit-charge relevées pendant les saisons de drainage intense de 1987 et 1988 (GUIRESSE et al., 1989).

La forte concavité des courbes obtenues (figure 9) illustre bien la vidange d'une nappe perchée au-dessus des drains (COLLAS, 1985).

Sur la parcelle 4, la relation qui lie le débit à la charge est bien reproductible d'une phase de tarissement à l'autre et un seul épisode type a été tracé sur la figure 9b : épisode n° 14. Sur la parcelle 1, les trois premières phases de tarissement (courbes n° 2, 3 et 4 de la figure 9a) divergent légèrement. Le lissage de toutes les autres courbes $Q(h)$ a donné l'épisode n° 11.

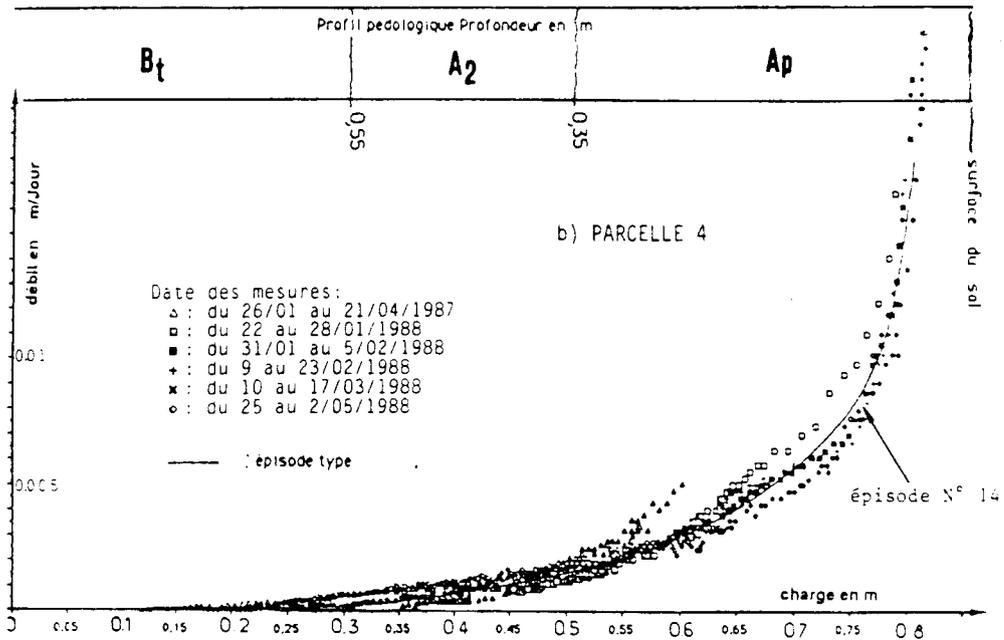
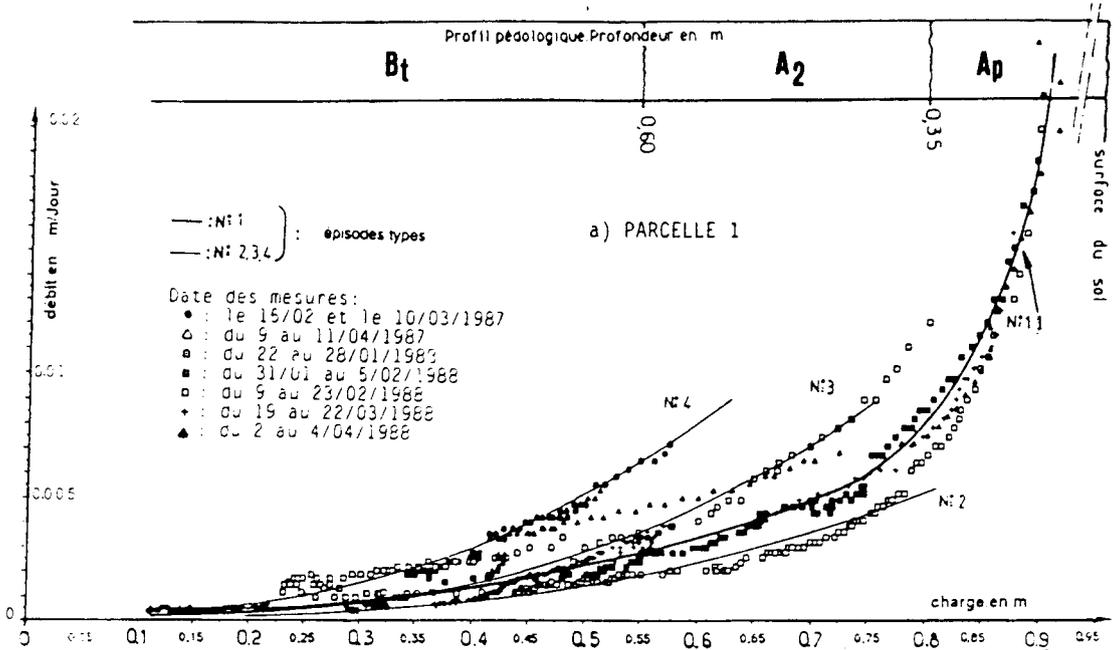


Figure 9 - Courbes débit-charge observées à Poucharramet au cours des saisons 1986-1987 et 1987-1988

Pour ces deux parcelles, les conductivités hydrauliques horizontales ont été calculées, au-dessus du niveau des drains, selon la méthode proposée par COLLAS. Seuls les résultats obtenus à partir des 2 épisodes types principaux n° 14 et 11 (figure 9) sont présentés ici sur la figure 10.

Pour les mêmes raisons que précédemment, on ne peut pas tenir compte des valeurs excessivement fortes obtenues dans les premiers centimètres du sol. En dessous, les calculs conduisent à des valeurs de conductivités élevées et comparables sur les 2 parcelles, jusqu'à la base de l'horizon limoneux. Puis, ces conductivités s'annulent à 70 cm de profondeur sur la parcelle 4, alors qu'elles sont de l'ordre de 1 m.j^{-1} sur toute l'épaisseur de l'horizon argillique de la parcelle 1.

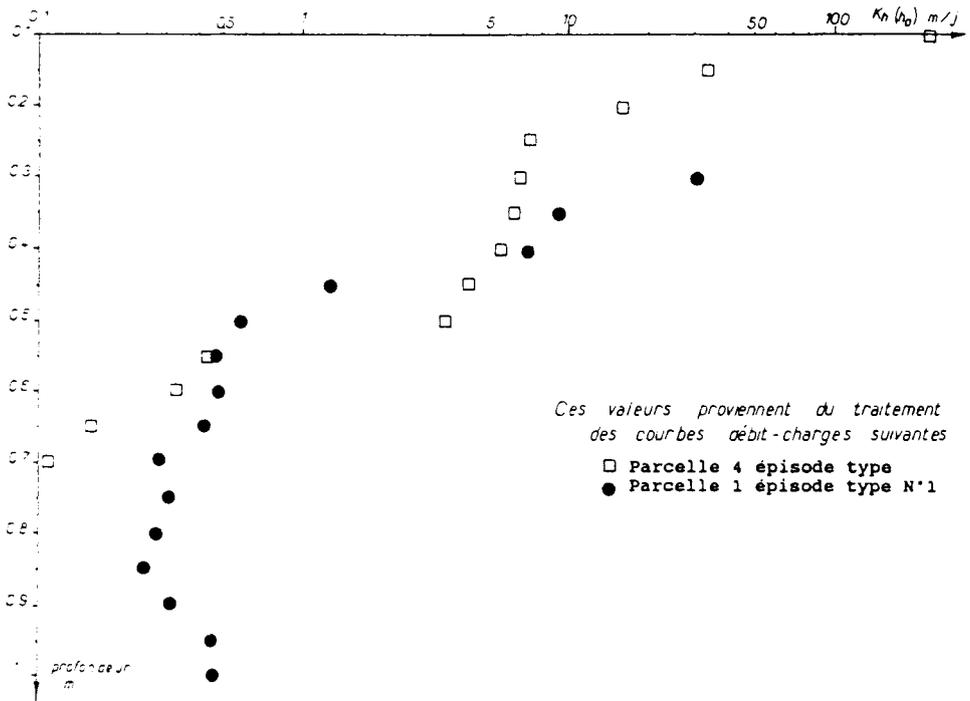


Figure 10 - Conductivités hydrauliques horizontales locales sur les parcelles 1 et 4 du site de Poucharramet

C'est la confrontation avec les caractéristiques morphologiques qui permet d'expliquer ces différences dans les propriétés hydrodynamiques des 2 profils de sol.

5. CORRELATION ENTRE LES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES ET LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES, MORPHOLOGIQUES, MICRO-MORPHOLOGIQUES ET CHIMIQUES DES SOLS

5.1 Profils pédologiques et observations morphologiques

Les résultats moyens des calculs $K_h(z)$ et $\mu(z)$ sont reportés sur les profils pédologiques des 2 parcelles (figure 11), afin de relier les propriétés hydrodynamiques aux caractéristiques pédologiques des deux sols étudiés.

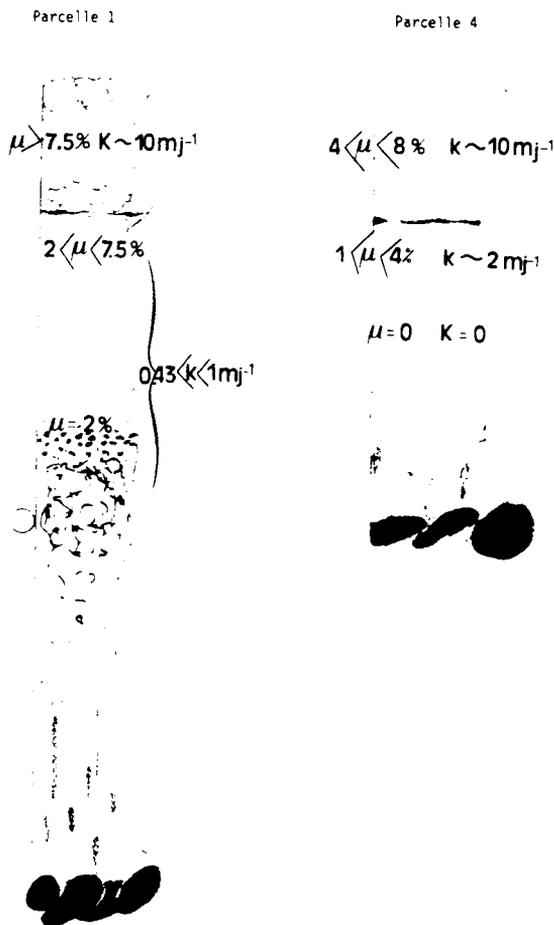


Figure 11 - Propriétés hydrodynamiques et caractéristiques pédologiques (Poucharramet)

Dans l'horizon cultural Ap, même si les valeurs de $K_h(z)$ et $\mu(z)$ sont surestimées, la conductivité et la porosité de drainage de cet horizon sont élevées sur les 2 parcelles. Sur le terrain, on a observé, dans ce niveau superficiel, une forte porosité biologique et surtout d'importantes cavités liées au travail du sol. Les mesures effectuées au densitomètre à membrane donnent d'ailleurs des valeurs de densité plus faibles dans les 30 premiers centimètres du sol, soit 1,49 en moyenne.

Dans l'horizon A_{2g}, la porosité de drainage est légèrement plus faible sur la parcelle 4 (entre 4 et 1 %) que sur la 1 (entre 7,5 et 2 %). Ce résultat peut s'expliquer par la différence texturale relevée à l'analyse granulométrique de cet horizon (22 % d'argile sur la parcelle 1 contre 29 % sur la 4). En revanche, la conductivité demeure du même ordre de grandeur sur les 2 parcelles, ce qui peut se justifier par le fait que cet horizon présente partout la même structure.

Dans les horizons sous-jacents, les propriétés hydrodynamiques diffèrent entre les 2 parcelles. Dans le cas de la parcelle 4, on note que la porosité de drainage, voisine de 1 % au sommet du Btg, s'annule à 65 cm de profondeur. Et parallèlement, la conductivité hydraulique horizontale chute rapidement dans cet horizon Btg qui joue ici le rôle de substratum imperméable. Sur l'autre parcelle, l'horizon argileux conserve des propriétés hydrodynamiques non négligeables : la porosité y varie entre 1 et 2 %, et la conductivité est de l'ordre de 1 m.j⁻¹. Le substratum imperméable est plus profond et correspond au niveau BCg compact, peu poreux et qui reste saturé durant tout l'hiver.

Par ailleurs, dans le cas de la parcelle 4, l'horizon argileux subit une saturation permanente durant toute la saison de drainage. Cet horizon est compact et très peu poreux, et les agrégats sont recouverts d'un revêtement argileux. On note aussi l'absence d'un horizon Btg_{Fe}. A la base de ce niveau argillique, l'horizon BCg se confond avec le gley qui colmate la grave.

A l'inverse, sur la parcelle 1, l'horizon Btg sans concrétion est peu épais et l'on observe à sa base un concrétionnement intense bien développé. Ce concrétionnement augmente la texture sableuse de ce niveau où effectivement on note un pourcentage plus important d'éléments grossiers certainement constitués en partie de pseudo-sables. De plus, dans les horizons argilliques concrétionnés, les dépôts ferromanganiques observés à la surface des agrégats rigidifient la porosité de cet horizon à travers lequel la circulation latérale de l'eau se fait convenablement.

5.2 Observations micromorphologiques

Dans le cas de la parcelle 4, des surfaces polies, réalisées au sein des plages oxydées de l'horizon Btg, montrent une porosité peu développée. Au contraire, sur la parcelle 1, les pores sont plus nombreux et souvent associés aux quelques rares concrétions présentes dans cet horizon Btg.

Dans les plages réduites de ces niveaux Btg, on observe des fissures dont les parois sont recouvertes d'argilanes qui deviennent ferriargilanes de teinte plus rougeâtre à l'approche des zones oxydées. Au stade final de leur ferritisation, ces ferriargilanes ne contiennent plus que du fer et des traces de manganèse, ce qui leur confère une teinte totalement noire. Sur les lames minces réalisées dans l'horizon Btg_{Fe} de la parcelle 1, on distingue très nettement un réseau de pores ferritisés bien développé.

A l'inverse, sur la parcelle 4, la ferritisation des fissures est beaucoup moins soutenue. Ces fissures peu consolidées peuvent diminuer de volume lors du gonflement des argiles.

5.3 Analyses chimiques

Le maintien d'une plus forte porosité, et donc d'une meilleure aération dans l'horizon Btg_{Fe} de la parcelle 1, se trouve confirmé par des teneurs très élevées de manganèse sous forme facilement réductible. Ceci témoigne de l'alternance de périodes de réduction et d'oxydation favorables à la formation de composés oxydés facilement réductibles.

Ensuite, l'abondance de sodium dans les argiles de la parcelle 4 pourrait être à l'origine d'une diminution de la conductivité des niveaux illuviaux.

6. CONCLUSION

L'ensemble des résultats présentés montrent l'existence de liens entre les propriétés hydrodynamiques et les caractéristiques morphologiques des sols. Le squelette ferrique joue un rôle important dans l'élaboration de la structure des horizons argilliques et de leurs propriétés hydrauliques. Le concrétionnement développé au sein d'un horizon augmente sa conductivité. Lorsqu'il y a peu de concrétionnement, les circulations ne se font que dans les horizons limoneux et le Btg peut être considéré comme un imperméable vrai. Ces conclusions soulignent que les caractéristiques texturales et structurales des horizons argilliques doivent constituer un critère important lors des prospections pédologiques

préalables au drainage, la profondeur du substratum imperméable est souvent située par le pédologue au toit du Bt, c'est-à-dire dès que la teneur en argile augmente ; mais sur les sols limoneux d'Arrou, GUYON (1985) montrait déjà que K_h et μ ne sont pas nuls dans le Btg.

La généralisation des résultats demeure cependant difficile, étant donné l'hétérogénéité très marquée des sols de boubènes. De nouvelles analyses des argiles des horizons Btg, BCg et BtgFe devraient compléter cette étude afin de préciser leur composition minéralogique et notamment leur teneur en argile gonflante. Ces études sont déjà en cours au laboratoire pour confirmer les différences de comportement observées.

Ce critère minéralogique est déterminant dans d'autres sols de boubènes où le comportement hydrodynamique des sols est également lié au type de structure (prismatique ou vertique) de l'horizon argillique (FAVROT et al., 1990).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOURGEAT F., ICOLE M., REVEL J.C., 1984 - Les terrasses alluviales dans les petites Pyrénées et l'avant pays molassiques : les conditions de leur mise en place. Bull. Association Française pour l'Etude du Quaternaire, 1-2-3, 60-66.

BRANCHARD J.P., 1984 - Fonctionnement hydrique et qualité des eaux dans les sols drainés et soumis à épandage. Thèse Université de Rennes, 122 p.

COLLAS P., 1985 - Le drainage des sols lourds plus ou moins sodiques des marais de l'Ouest de la France. Thèse Doc. INP Toulouse, 217 p.

CROS P., 1971 - Contribution à la théorie du drainage des sols lourds. B.T.G.R., 110, 3-27.

FAVROT J.C., BOUZIGUES R., LONGUEVAL C., CHOSSAT J.C., BOURGEAT F., 1990 - Structure du sol, drainage et environnement. Rôle de la structure du sol sur le fonctionnement hydraulique et la qualité des eaux d'un réseau de drainage. Actes du 14ème congrès International des Irrigations et du Drainage, Q42, 367-379.

GUIRESSE M., 1989 - Drainage en sols de boubènes. Relations entre les caractéristiques morphologiques et les propriétés hydrodynamiques. Thèse Doct. INP Toulouse, 180 p.

GUIRESSE M., COLLAS P., BOURGEAT F., CHOSSAT J.C., 1980 - Relation entre la conductivité hydraulique de sols drainés et leurs caractéristiques pédologiques. Science du Sol, 27(3), 257-271.

GUYON G., 1965 - Considérations sur l'hydraulique du drainage des nappes. Thèse Univ. Toulouse, 108 p.

GUYON G., 1985 - Considérations sur une théorie simplifiée de l'hydraulique du drainage des nappes perchées. Equation de la surface piézométrique d'une nappe drainée dans un sol hétérogène verticalement. Etudes du CEMAGREF, hors série n° 8, 95 p.

HUBSCHMAN J., 1975 - Morphogenèse et pédogenèse quaternaires dans le piémont des Pyrénées garonnaises et ariégeoises. Thèse Toulouse le Mirail. Diffusion Librairie Honoré Champion, Paris, 734 p.

KINJO A., LESAFFRE B., MOREL R., 1984 - Méthode d'analyse de la restitution du drainage agricole en sols à excès d'eau temporaire. Démarches classiques, courbes de fonctionnement. C.R. Acad. Agric. Fr., 70(2), 278-288.

LESAFFRE B., 1988 - Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA. Thèse Université Paris VI, 373 p.

WOLSACK J., 1978 - Quelques extensions à la théorie du drainage aux cas de sols hétérogènes et anisotropes. Bull. BRGM section 3, n° 2, 101-113.

ZIMMER D., 1988 - Transferts hydriques en sol drainé par tuyaux enterrés : compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulements. Thèse Université Paris VI, 270 p.

TRAÇAGE DE L'EAU D'UNE PARCELLE ARGILEUSE DRAINÉE

P. MEROT¹ - H. HAMDI¹

1 - Laboratoire de Science du Sol INRA ENSA, 65 route de Saint Briec,
35042 RENNES Cedex

RESUME

Le mouvement de l'eau dans une parcelle drainée à sol argileux gonflant a été étudié par traçage à l'aide d'un isotope du milieu (¹⁸O). Les teneurs en oxygène 18 de l'eau du sol ont été mesurées :

1) sur des échantillons d'eau prélevés in situ par des bougies poreuses ou par extraction au laboratoire sur carottes de sol, et ce à différentes profondeurs, sur le drain, à l'interdrain et en position intermédiaire, et ;

2) à la sortie du réseau de drainage.

Les mesures d'oxygène 18 de l'eau du sol révèlent la coexistence à une même profondeur de 2 types d'eau très différents correspondant d'une part à la fraction la plus libre de l'eau, d'autre part à l'eau totale, y compris la fraction la plus liée. Elles montrent également que l'eau circule de façon quasi exclusive dans les 35 premiers centimètres de sol et dans la tranchée drainante.

L'analyse d'un épisode de drainage montre une participation de 26 % de l'eau de pluie à l'écoulement à la sortie du réseau de drainage. Cette eau a nécessairement circulé dans une fraction de la porosité de la tranchée. Un modèle confirme la faible fraction de la porosité utile au transfert (2,5%).

MOTS-CLES : Isotope naturel - Oxygène 18 - Drainage - Sol argileux.

ABSTRACT : Environmental tracing in a drained clayey soil.

Tracing water movement with an environmental tracer in a swelling drained clay soil provides the following results. Environmental tracing by oxygen 18 shows different qualities of water in soil due to non mixing process: slightly bounded water is extracted by porous cup; bulk water is extracted on soil samples; homogeneous mixing does not occur. This result can be applied to other studies on soil water quality to choose between extraction ways.

Isotopic profiles between 2 trenches in a drained field is closed to the same but undrained soil: water movement is actually limited in the bulk soil. Water movement only occurs in the first 35 cm and partly in the trench. In spite of the lack of surface runoff in the outlet of the drainage network, 26 % of the drained water come from direct precipitation. This fast and important participation of direct precipitation seems due to the preferential flow along macropores in the trench. Modelling of water movement through the trench allows to estimate that the flow occurs in 2.5 % of the total porosity.

KEY-WORDS : Environmental isotope - Oxygen 18 - Drainage - Clayey soil.

Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 89-105
AIP CEMAGREF-INRA Maîtrise des excès d'eau

1. INTRODUCTION

De nombreux travaux ont été réalisés sur le transfert de l'eau dans les sols argileux drainés. Ils montrent la grande variabilité dans le temps de la réponse des sols argileux au drainage et l'importance de la structure du sol sur cette réponse (ROBINSON et al., 1987 ; URBANEK et DOLEZAL, 1984 ; LESAFFRE et al., 1984 ; REID et PARKINSON, 1984).

L'objectif ici est une première caractérisation du mouvement de l'eau à l'aide d'un traceur isotopique naturel, l'oxygène 18, dans une parcelle drainée de sol argileux gonflant. L'analyse de profils isotopiques de l'eau du sol donnera les traits généraux du mouvement de l'eau au sein d'une parcelle drainée ; l'analyse d'un épisode de drainage permettra d'en préciser le fonctionnement.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Le site expérimental

Le travail a été réalisé sur un site expérimental à Courcival, à 150 km de Paris (figure 1). La parcelle étudiée (parcelle n° 3 du site), de superficie 1,13 ha a été drainée en 1983 ; une parcelle de référence, non drainée, la jouxte. Les précipitations annuelles sont de 680 mm. La parcelle expérimentale est située sur une pente douce (2,5 %), sur de la glauconie altérée argileuse gonflante. Une caractérisation plus détaillée du site est donnée par ailleurs (ZIMMER, 1989). En hiver la porosité totale est en moyenne de 50 % et la teneur en eau pondérale de 35 % environ, quand le sol est gonflé et les fentes supposées fermées.

Les drains sont disposés dans des tranchées de 28 cm de large, 85 cm de profondeur et distantes de 10 m. Les tranchées sont remplies par le sol remanié. A l'exutoire, une station de jaugeage avec un enregistreur à capteur à ultra-son a été installée. Un échantillonneur automatique prélève de l'eau à l'exutoire toutes les heures (mais seul un échantillon sur 2 est analysé ici) ; les pluies sont prélevées dans un pluviomètre particulier.

Les mesures du potentiel de l'eau dans le sol sont faites par des tensiomètres enregistreurs à différentes profondeurs et placés sur la tranchée, à 1,5 m de la tranchée et entre deux tranchées. Ces données ne seront pas traitées ici (ZIMMER, 1989). Une série de bougies poreuses a été installée dans les mêmes situations. Cinq campagnes de prélèvement d'eau du sol ont eu lieu : le 24/02, les 16 et 17/03, le 28/03 et le 06/05/1988. L'eau a été prélevée par extraction sous vide sur échantillons carottés (appelée par la suite extraction sur échantillon) lors de la première et de la dernière campagne, et par bougie poreuse pour les 3 autres campagnes avec mise en succion pendant 48 h. L'extraction sur échantillon du 24/02

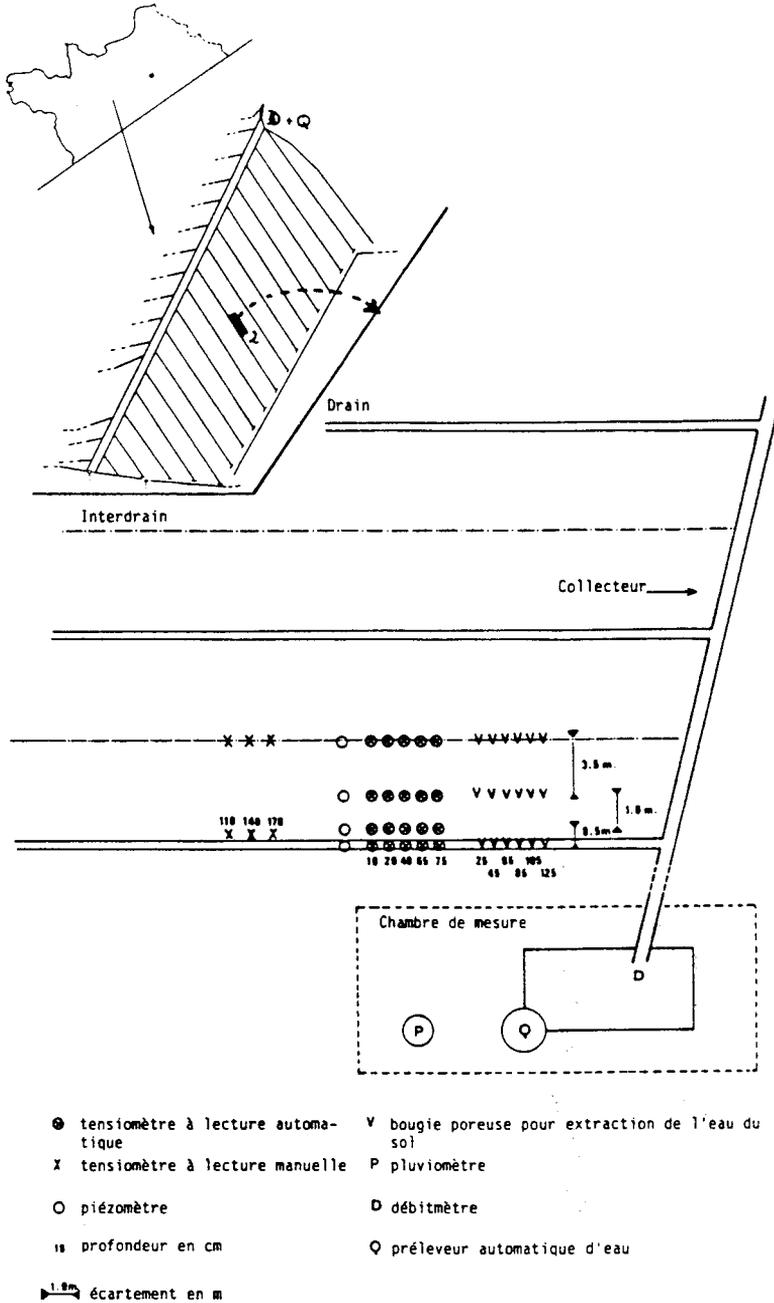


Figure 1 - Protocole expérimental mis en place sur la parcelle 3 du champ de Courcival au cours de la campagne 1987-1988

et du 06/05 a été rendue nécessaire, car à ces dates les bougies poreuses ne donnaient pas d'eau.

2.2 Le traçage isotopique

L'oxygène 18 contenu dans les précipitations est un traceur utilisé pour étudier le cycle de l'eau en conditions naturelles. Les teneurs en oxygène 18 s'expriment en valeurs relatives, en $\delta^{18}\text{O}$:

$$\delta^{18}\text{O} = [\text{R}_{\text{échantillon}} / (\text{R}_{\text{étalon}} - 1)] \times 10^3$$

R est le rapport de la concentration en oxygène 18 sur la concentration en oxygène 16. L'étalon est le SMOW (Standard Mean of Ocean Water). La précision des mesures est de 0,1 $\delta^{18}\text{O}$.

Dans les sols, la distribution verticale de l'oxygène 18 de l'eau le long d'un profil (appelée profil isotopique) dépend des teneurs dans les précipitations d'origine, puis des conditions de transfert et de mélange de l'eau ; les profils isotopiques sont donc interprétés pour caractériser les modalités du mouvement de l'eau dans le sol.

Dans les rivières ou les réseaux de drainage, les techniques de traçage isotopique permettent de séparer un hydrogramme de crue en différentes composantes en fonction de leur origine, selon les équations suivantes :

$$Q_t = \sum Q_n \quad (1)$$

$$C_t Q_t = \sum C_n Q_n \quad (2)$$

avec :

- Q : débit ;
- C : concentration correspondante du traceur ;
- t : référence à l'écoulement total ;
- n : différentes composantes de l'écoulement.

On supposera ici que seules deux composantes sont à prendre en compte : l'eau pré-existante à l'averse - indiquée i - (c'est à dire ici l'eau du sol de la parcelle drainée) et les précipitations directes - indiquées p -. A chaque moment de la crue, les concentrations en isotopes de l'écoulement total sont dues au mélange pondéré entre les 2 composantes

définies précédemment. On peut donc calculer la part relative des précipitations directes dans le débit de drainage, Q_p/Q_t , avec :

$$Q_p / Q_t = (C_t - C_j) / (C_p - C_j) \quad (3)$$

3. RESULTATS

3.1 Les profils isotopiques ; comparaison des deux modes de prélèvement

Les teneurs en eau pondérale des profils des 24/02 et 06/05 sont données dans le tableau 1 ; les profils isotopiques sont fournis en figure 2 : sur chacun des trois graphiques sont représentés les profils pour une situation donnée et pour les quatre dates de prélèvement.

Profondeur cm	24/02 D	24/02 DI	24/02 I	06/05 D	06/05 DI	06/05 I	06/05 ND
5	34,2	37,8	35,9				
15	29,7	34,5	34,8	29,1	29,0	28,7	34,2
25	38,2	27,8	23,9	33,3	28,7	21,1	32,9
35	35,5	23,1	34,6	31,4	24,3	23,5	32,6
45	34,2	27,3	40,0	30,7	33,1	32,6	29,5
55	35,1	39,2	37,6	38,5	41,0	39,2	26,4
65	36,9	45,1	46,7				
75	42,9	43,2	45,9				
85		39,1	39,9	39,4	35,2	40,9	34,9
95		36,7					
105				30,1	37,3	37,8	33,5

Tableau 1 - Teneur en eau pondérale en % des profils de sols le 24/02 et le 06/05/88

D = sur la tranchée ; DI = en position intermédiaire ;
I = à l'interdrain ; ND = sur parcelle non drainée.

Un point important à vérifier est la représentativité de l'eau extraite par les 2 protocoles (extraction sur échantillon et extraction par bougie poreuse). L'eau extraite sous vide sur échantillon de sol correspond à toute l'eau de l'échantillon (JUSSERAND, 1980). L'eau prélevée par bougie poreuse correspond à la fraction d'eau la moins liée au sol ; la succion imposée à la bougie indique le potentiel limite au delà duquel l'eau ne peut être extraite. Des expérimentations menées en milieu contrôlé ont montré qu'il n'y a pas d'action de la bougie poreuse sur la teneur en isotopes de l'eau (JUSSERAND et al., 1982).

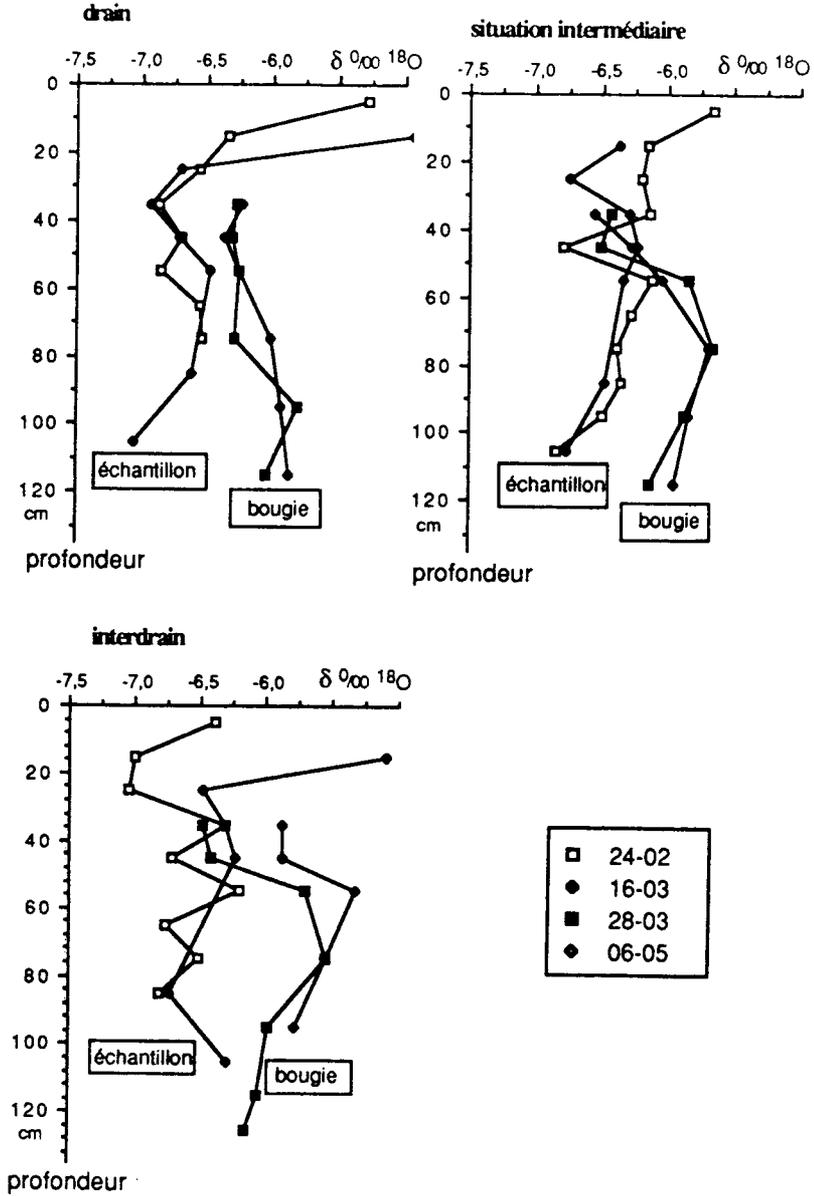


Figure 2 - Profils isotopiques : comparaison de l'extraction sur échantillon et par bougie

Des différences éventuelles entre l'eau extraite, au même moment et au même endroit, par les deux protocoles seraient dues à la présence de différents types d'eau dans le sol. En définitive, soit, à chaque profondeur, il y a un mélange homogène de l'eau de différentes porosités, auquel cas la teneur en isotope ne dépend pas du mode de prélèvement, soit il n'y a pas de mélange homogène et les teneurs en isotopes différeront selon le mode de prélèvement.

Des prélèvements simultanés par les 2 modes d'extraction n'ont pas été réalisés ; cependant, on constate (figure 2) que les profils faits aux différentes dates se regroupent selon deux familles, *qui dépendent du mode de prélèvement* et non pas des dates de prélèvement, et ce pour chaque situation (D sur le drain, DI en situation intermédiaire à 1,5 m du drain ; I à l'interdrain). L'eau extraite sur échantillon a une teneur en oxygène 18 nettement plus faible que celle extraite par bougie, à partir de 35 cm pour D, à partir de 60 cm pour DI et I. On pourrait penser qu'il s'agit d'une évolution dans le temps due au mélange de l'eau du sol avec de l'eau de pluie, qui rendrait les profils moins négatifs en février et mars, puis à nouveau plus négatifs ; mais ceci nécessiterait des volumes de pluie absolument incompatibles avec les hauteurs de pluie mesurées. Il s'avère donc que les deux modes de prélèvement ont donné accès à deux types d'eau très différents : l'eau facilement accessible (dont sans doute une partie de l'eau qui circule au moment des averses) est extraite par bougie ; la totalité de l'eau du sol, y compris l'eau fortement retenue est extraite sur échantillon. Les différences de teneur en oxygène 18 de l'eau extraite par les deux modes de prélèvement montrent que ces deux types d'eau ne se mélangent pas, du moins à partir de 35 cm de profondeur sur le drain et de 60 cm dans les autres situations.

3.2 L'évènement Pluie - Débit de drainage

3.2.1 Données hydrologiques

L'évènement étudié est montré figures 3a (hyétogramme) et 3b (hydrogramme). Une averse de 13,2 mm a débuté le 17/03 à 17 h ($t = 4$ h sur la figure) et a duré 19 h, après plusieurs jours sans pluie significative. Deux heures après le début de la pluie, l'hydrogramme s'élève jusqu'au pic de crue atteint pour $t = 14$ h. La courbe de récession est interrompue à $t = 22$ h par une nouvelle averse.

Le volume écoulé lors de la crue est de $11,86 \text{ m}^3$ soit une lame d'eau de 1,05 mm. Le rendement (écoulement total sur hauteur totale des précipitations) est donc de 8 %. C'est une valeur sous-estimée, car le gonflement de crue n'est pris en compte que jusqu'à $t = 22$ h avant la fin de la phase de récession. Un calcul du volume total de la crue peut être fait en

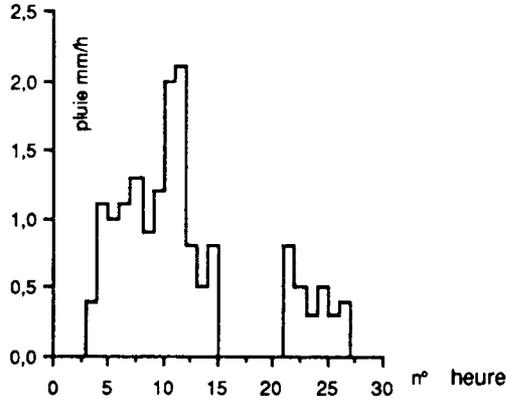


Figure 3a - Hyetogramme de l'évènement pluviométrique du 16/03

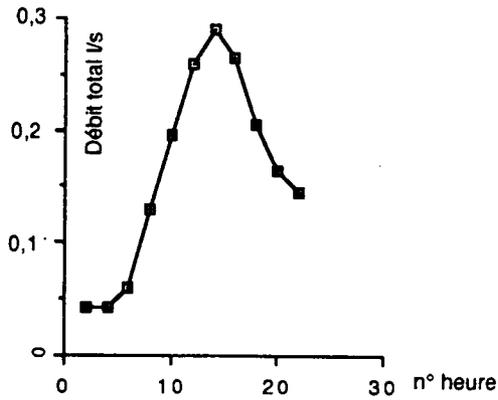


Figure 3b - Hydrogramme à la sortie du réseau de drainage pour le même évènement

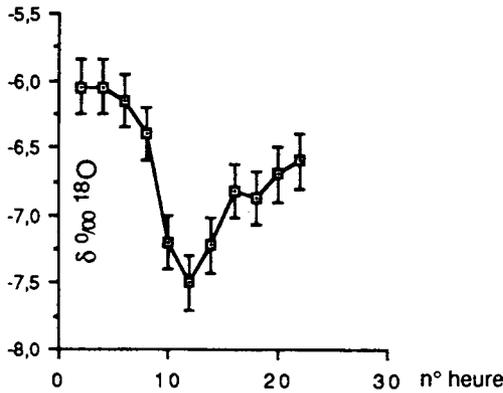


Figure 3c - Variation de la teneur en oxygène 18 de la crue

estimant la forme de la courbe de récession, connue sur d'autres événements ; le volume écoulé est alors de $19,85 \text{ m}^3$ et le rendement de 13,3 %. Rappelons ici que, étant donnée la géométrie des installations expérimentales, tout l'écoulement reçu dans la station de jaugeage a nécessairement traversé le sol (il n'y a pas de ruissellement direct arrivant à la station).

3.2.2 Données isotopiques

La teneur moyenne en oxygène 18 de l'averse est de $-9,6 \text{ ‰}$. La distribution de teneur en isotopes dans l'eau du sol au moment de l'averse est présentée figure 4 (le 16/03). Les teneurs en isotopes de l'eau du sol sont supérieures à $-6,5 \text{ ‰}$ pour la fraction la plus libre et à $-7,0 \text{ ‰}$ pour toute l'eau, y compris la fraction liée, et ce quelle que soit la situation (D, DI, I).

L'écart entre les teneurs en oxygène 18 de la pluie et de l'eau du sol (de $2,5$ à 3 ‰) est élevé, ce qui est une bonne situation pour un suivi par traçage naturel.

Comme on le voit sur la figure 3c, la teneur en oxygène 18 décroît au début de la crue, puis augmente à partir de $t = 12 \text{ h}$, sans toutefois atteindre les valeurs initiales. La comparaison avec les teneurs basses en oxygène 18 des précipitations indique que cela est, à l'évidence, dû à une participation directe des précipitations à l'écoulement : une fraction de celle-ci se mélange à l'eau du sol pendant la crue.

4. INTERPRETATION

4.1 Mouvement de l'eau dans le sol à partir des profils isotopiques

4.1.1 Evolution dans le temps

On pourra comparer l'évolution dans le temps des profils isotopiques pour chaque famille séparément (extraction sur échantillon d'une part, extraction par bougie d'autre part), mais non pour l'ensemble, puisqu'on a montré à la section précédente qu'il ne s'agit pas du même type d'eau.

Les profils isotopiques (figure 4) effectués sur le drain par bougies le 16/03 et le 28/03 peuvent être considérés comme identiques (5 points sur 6 ont des valeurs identiques à $0,2 \text{ ‰}$ près). Ceci est normal, puisque 12 jours seulement et une pluviosité faible séparent ces profils. De même, les profils isotopiques effectués sur le drain par extraction sur

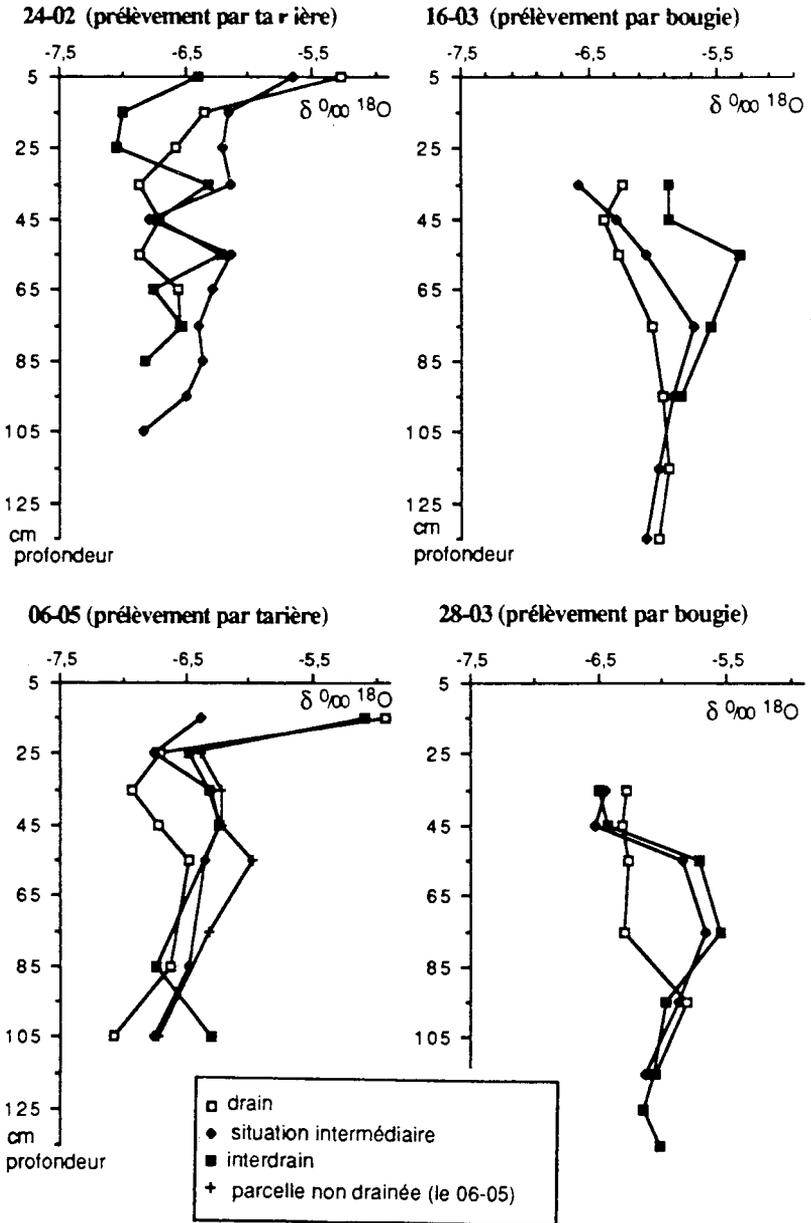


Figure 4 - Profils isotopiques de l'eau aux différentes dates

échantillon sont identiques à partir de 25 cm, malgré les 3 mois qui les séparent. On peut donc considérer que peu de mouvements ont affecté l'eau présente dans le sol à partir de 25 cm, puisque, sinon, le mouvement de l'eau aurait entraîné une variation de la teneur en oxygène 18.

Le même raisonnement peut être appliqué aux situations intermédiaire (DI) et de l'interdrain (I), à partir de 50 cm de profondeur, puisque les profils au sein de chaque famille sont très proches l'un de l'autre.

4.1.2 Evolution dans l'espace

La comparaison des teneurs en isotopes de l'eau du sol pour les 3 situations (D, DI, I) à chaque date permet de visualiser le mouvement de l'eau dans la parcelle drainée (figure 2).

Sur les moyennes (tableau 2) des teneurs en oxygène 18 des profils faites entre 40 et 80 cm (80 cm est la profondeur du drain), on constate que les différents profils sont quasiment identiques le 24/02, puis que le profil sur drain a des valeurs systématiquement plus faibles que DI et I ; du fait des pluies à teneur inférieure à -7 ‰ qui sont tombées à partir de fin mars, cela s'expliquerait par une pénétration de ces pluies dans le profil de sol au niveau du drain plus importante que dans les autres situations.

Date et mode de prélèvement	sur le drain	intermédiaire	interdrain	non drainé
24/02 sur échantillon	- 6,68	- 6,32	- 6,60	
06/05 sur échantillon	- 6,75	- 6,47	- 6,41	- 6,30
16/03 par bougie	- 6,22	- 6,14	- 5,65	
28/03 par bougie	- 6,29	- 6,11	- 6,04	

Tableau 2 - Valeurs moyennes des teneurs en oxygène 18 des profils entre 40 et 80 cm (en ‰)

Notons que, le 06/05, un profil fait en situation non drainée, dans une parcelle adjacente, affiche une valeur moyenne moins négative. On a ainsi une séquence ordonnée, bien que les différences soient faibles : profil sur drain, situation intermédiaire, interdrain, non drainé ; respectivement, $-6,75 / -6,5 / -6,4 / -6,3 \text{ ‰}$. Le profil sur drain se distingue plus nettement des trois autres profils.

L'analyse des profils (figure 4) et non plus des moyennes confirme l'influence du drainage. On remarque tout d'abord une plus grande hétérogénéité des profils sur

échantillon, particulièrement le 24/02, que des profils par bougie. Ceci a déjà été observé en d'autres situations (JUSSERAND et al., 1982) : l'eau extraite sur échantillon provient d'un volume de sol plus limité et reflète plus l'hétérogénéité du sol que ne le fait l'eau extraite par bougie.

Les profils isotopiques du 16/03 et du 28/03 montrent de façon claire l'effet du drainage sur les teneurs en isotopes : en dessous de 80 cm (profondeur du drain), les 3 profils isotopiques de D, DI et I, sont superposés ; entre 25 et 80 cm de profondeur au contraire, les profils se différencient ; les profils au-dessus du drain sont quasi verticaux (les valeurs oscillent entre -6,25 et -6,4 ‰), témoignant d'un mélange homogène sur cette hauteur ; les profils intermédiaires et à l'interdrain montrent par contre entre 50 et 80 cm des valeurs beaucoup moins négatives. Les profils sur échantillon sont plus confus ; cependant, on constate tant le 24/02 que le 06/05 que les profils au-dessus drain varient peu (respectivement de -6,6 à -6,9 et de -6,5 à -6,9 ‰) relativement aux autres profils ; ils semblent donc être le siège de mélanges plus importants.

4.1.3 Conclusion

De l'interprétation des profils isotopiques de l'eau du sol, il ressort les points suivants.

On a mis en évidence deux types d'eau de qualité isotopique différente, correspondant, d'une part à de l'eau relativement libre, et d'autre part à l'eau totale, y compris l'eau fortement liée (figure 2).

Les transferts d'eau au sein de la masse du sol, en dessous de 35 cm de profondeur, sont extrêmement limités, comme l'indique la permanence dans le temps des profils isotopiques (figure 2). Cependant, les différences entre les profils sur drain et les autres profils, de même que l'évolution en surface des teneurs en oxygène 18 (figure 4), supposent un comportement différencié de la tranchée drainante par rapport aux autres situations ; l'homogénéité des teneurs en oxygène 18 de la tranchée suggère des mélanges verticaux en son sein. L'ensemble des transferts semble donc confiné dans la partie superficielle du sol (entre 0 et 35 cm) et dans la tranchée drainante.

4.2 Interprétation de l'épisode de drainage

4.2.1 Bilan isotopique de la crue

Le débit total est supposé avoir deux composantes : l'eau pré-existante, constituant avant la crue un très faible débit de base et dont la teneur en oxygène 18 est voisine de celle de la fraction la plus libre de l'eau du sol ($- 6,25 \delta^{‰}$), d'une part, et une fraction des précipitations, dont la teneur est de $-9,6 \delta^{‰}$, d'autre part.

La part de précipitations dans l'écoulement a été calculée pour chaque pas d'échantillonnage d'après l'équation 3 (figure 5). Cette part, représentée par le rapport $(C_t - C_i) / (C_p - C_i)$ dans le tableau 2, est variable en cours de crue : elle croît rapidement dès le début de la crue et atteint jusqu'à 40 % de l'écoulement, pour la 12ème heure. Par intégration sur la période de crue, on calcule la contribution des précipitations directes à l'écoulement (volume de la crue provenant des précipitations/volume total de la crue) ; elle est égale à 26 % : en première interprétation, une telle participation implique que l'écoulement ne peut se faire que dans une fraction du sol ; en effet, un drainage se faisant classiquement par rabattement de nappe, entraînerait un mélange plus important entre l'eau du sol et l'eau de précipitations, et on n'observerait pas un changement fort et rapide de la teneur en oxygène 18 dans l'eau récoltée dans le réseau de drainage ; le mouvement de l'eau est rapide, sans mélange ou avec des mélanges limités. D'après les caractéristiques texturales et morphologiques de ce sol argileux, d'après la teneur en isotope des profils de sol, on peut avancer que le mouvement de l'eau se fait dans une fraction de la tranchée (écoulement préférentiel). Nous allons maintenant vérifier cette hypothèse.

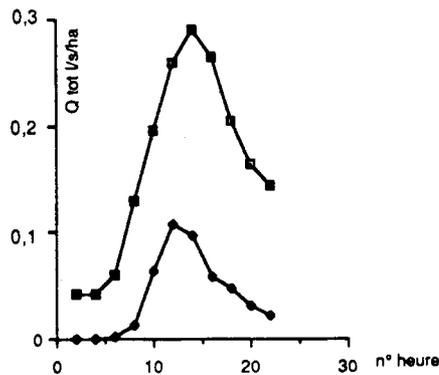


Figure 5 - Débit total (carrés) et débit provenant de la pluie (losanges)

4.2.2 Mouvement de l'eau dans la tranchée

On suppose que, à l'échelle de la crue, tout se passe comme si la tranchée drainante était complètement isolée du sol environnant, sur un plan hydrodynamique : tout le mouvement de l'eau se fait dans la tranchée. Nous allons donc étudier et modéliser le fonctionnement hydrique du système suivant : une colonne de sol ayant les caractéristiques de la tranchée ; sous pluie, l'eau s'infiltré dans la colonne jusqu'au drain. Les variations de teneur en isotope de l'eau de drainage seront interprétées comme une courbe d'élution, en fonction du volume de pore de la colonne (et non plus en fonction du temps).

Prenant en compte les caractéristiques géométriques de la parcelle, du réseau de drainage, et les caractéristiques de l'événement pluie-débit, on calcule les paramètres suivants : la hauteur d'eau qui traverse la tranchée est égale au volume de drainage calculé jusqu'à $t = 22$ h (1,05 mm sur 1,13 ha), divisé par la surface horizontale de la tranchée. Cette dernière est égale à la longueur cumulée des tranchées, 1107 m, multipliée par leur largeur, 0,28 m, soit 310 m^2 ou encore 2,7 % de la surface de la parcelle. La hauteur d'eau traversant la tranchée est donc de $1,05 \times 1,13 \times 10^4 / 310$, soit 38,2 mm. Le volume de pore de la tranchée, depuis la surface jusqu'au drain est, pour une surface unitaire, de 400 mm (porosité de 50 % sur 80 cm de profondeur).

L'évolution de la concentration relative en fonction du volume de pore est donnée figure 6a. Il apparaît que la sortie du traceur commence lorsque seulement quelques millimètres d'eau ont été restitués à la sortie du réseau de drainage. De plus, la hauteur totale de l'écoulement est une faible fraction du volume total de pores (38,2/400 mm, soit 9,55 %).

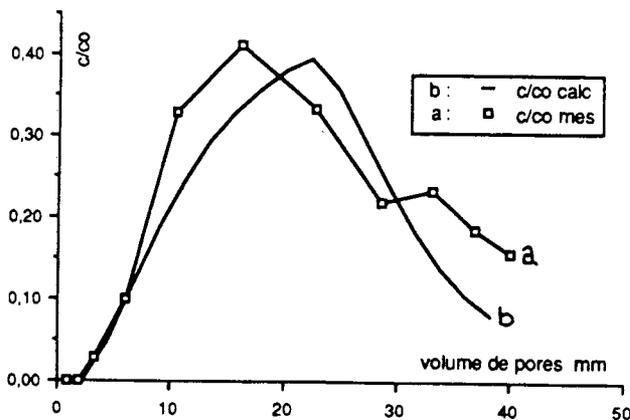


Figure 6 - Concentration relative en ^{18}O en fonction du volume de pores

D'après les interprétations classiques de courbes d'élution, cela implique une très large distribution de vitesse et une fraction de porosité avec de grandes vitesses (CALVET et GRAFFIN, 1974).

4.2.3 Simulation de la courbe d'élution

Un modèle avec deux séries de réservoirs de mélange en cascade simulant un transfert en deux phases le long d'un profil de sol a été appliqué pour tester l'hypothèse faite. Le modèle décrit la tranchée comme une série de couches de sol saturées. On suppose de plus que le débit est constant pendant le drainage. Ceci n'est évidemment pas vrai, mais, en fonction de l'objectif fixé, nous permet de calculer le débit moyen dans la tranchée (38,2 mm pendant 17 h, soit $0,624 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Chaque couche est composée deux parties : une première est supposée être la macroporosité avec de l'eau mobile, la seconde la microporosité avec de l'eau immobile, ou plus lente. A chaque pas, un coefficient d'échange mélange l'eau de 2 parties. Ce coefficient d'échange permet de simuler la mobilisation d'une fraction de l'eau de la microporosité.

Une série de simulations a été faite pour rechercher le meilleur ajustement entre la courbe simulée et la courbe mesurée. Cet ajustement est présenté figure 6b. Il y a le meilleur accord avec la courbe mesurée pour une macroporosité correspondant à 5 % de la porosité totale et un coefficient d'échange de 12 %.

Du fait de certaines hypothèses grossières, en particulier sur le débit constant, le modèle ne peut pas simuler correctement la queue de la courbe, quand les conditions d'infiltration changent. Cependant, le but était de vérifier le rôle de la macroporosité ; à cet égard la simulation est satisfaisante. Le mouvement de l'eau se fait principalement dans la macroporosité, qui est de l'ordre de grandeur de 5 % de la porosité de la tranchée ; puisque la porosité est de l'ordre de 50 %, on en déduit que la macroporosité dans laquelle se fait le transfert est de 2,5 %. Ce résultat rejoint les travaux de différents auteurs (HOOMOED et BOUMA, 1980 ; BEVEN et GERMAN, 1981), qui montrent l'importance de la macroporosité - au sens de vides continus et de large diamètre (BEVEN et GERMAN, 1982) -, sur l'écoulement en milieu argileux, lorsque la conductivité hydraulique de la matrice est faible.

5. CONCLUSION

Le traçage isotopique de l'eau dans une parcelle argileuse drainée fournit les résultats suivants.

Les mesures de teneur en oxygène 18 ont montré qu'il n'y a pas de mélange homogène de l'eau au sein de la porosité du sol argileux étudié ; la fraction d'eau la plus libre et la fraction liée ont des teneurs en isotopes très différentes. Ainsi, sur le plan méthodologique, on ne pourra pas étudier indifféremment dans ce type de sol l'eau extraite en totalité sur échantillon et la fraction de l'eau extraite par bougie poreuse.

Les mouvements au sein de la masse du sol sont extrêmement limités : les profils isotopiques à l'interdrain sont quasi identiques à des profils non drainés. Les seuls mouvements importants ont lieu dans les 35 premiers centimètres du sol et pour partie dans la tranchée drainante.

Lors de l'épisode de drainage étudié, 26 % de l'écoulement récolté à la sortie du réseau provient des précipitations. Cette participation rapide et importante des précipitations semble due à un écoulement préférentiel au sein de macropores dans la tranchée. Au sein de la macroporosité, estimée par modélisation de l'écoulement à 5 % de la porosité totale, se déplace donc l'eau des précipitations à laquelle se mélange une partie de l'eau contenue dans la microporosité de la tranchée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEVEN K., GERMAN P., 1981 - Water flow in soil macropores II. A combined flow flow model, *J. Soil Sc.*, 32, 15-29.
- BEVEN K., GERMAN P., 1982 - Macropores and water flow in soils. *Water Res. Research*, 18 (5), 1311-1325.
- BOUMA J., WOSTEN, 1979 - Flow patterns during extended saturated flow in clay soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 16-22.
- CALVET R., GRAFFIN Ph., 1974 - Description mathématique des phénomènes de transport des solutions aqueuses dans les milieux poreux. *Ann. Agron.*, 1974, 25 (2-3), 123-155.
- DIAB M., MEROT P., CURMI P., 1988 - Waterflow in a glossaqualf as measured by two tracers. *Geoderma*, 43, 143-161.
- HOOGMOED, BOUMA J., 1980 - A simulation model for predicting infiltration into cracked clay soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 458-461.

JUSSERAND C., 1980 - Extraction de l'eau intersticielle des sédiments et des sols. Comparaison de l' ^{18}O par différentes méthodes ; premiers résultats. *Catena*, 7, 87-96.

JUSSERAND C., MEROT P., DELLIS T., 1982 - Contribution à l'étude des mélanges d'eau dans les sols par l'utilisation de deux modes d'extraction. *Bull. GFHN*, 32-33.

LESAFFRE B., MOREL R., KINJO A., FLORENTIN L., JACQUIN F., 1984 - Hydraulic and hydrological operating of a field experiment in Lorraine heavy clay soil over a period of 8 years. Proc. of the ISSS symp. on water and solute movement in heavy clay soils. Bouma and Raats, Wageningen, 191-196.

REID I., PARKINSON R.J., 1984 - Seasonal changes in soil - water redistribution processes. Proc. of the ISSS symp. on water and solute movement in heavy clay soils edited by Bouma and Raats, Wageningen, 156-159.

ROBINSON M., MULQUEEN J., BURKE W., 1987 - On flow from a clay soil-seasonal changes and the effect of mole drainage. *J. of Hydrol.*, 91, 39-350.

URBANEK J., DOLEZAL F., 1984 - The role of earthworm channeling waterflow on a drain clay soil Proc. of the ISSS symp. on water and solute movement in heavy clay soils. Bouma and Raats, Wageningen, 152-155.

WHITE R.E., 1984 - Evaluating a model for nitrate leaching in clay soil with macropores. Proc. of the ISSS symp. on water and solute movement in heavy clay soils. Bouma and Raats, Wageningen, 246-252.

WHITE R.E., THOMAS G.W., SMITH M.S., 1984 - Modelling waterflow through undisturbed soil cores using a transfer fonction model derived from ^3HOH and Cl transport. *J. of Soil Science*, 35, 159-168.

ZIMMER D., 1989 - Transfert hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés : compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement. Thèse Univ. Paris VI, Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique agricole, 5, CEMAGREF, 321 p.

FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE DU DRAINAGE SOUTERRAIN DES SOLS TEMPORAIREMENT ENGORGES : DEBITS DE POINTE ET MODELE SIDRA

B. LESAFFRE ¹

1 - CEMAGREF, Parc de Tourvoie, 92160 ANTONY

RESUME

Le fonctionnement hydraulique des sols drainés est caractérisé par des débits de pointe très brefs et brusques, suivis par une phase de tarissement de longue durée. Une expérimentation, menée pendant les hivers 1985-1986 et 1986-1987 à Arrou sur un sol limoneux peu profond subissant un excès d'eau temporaire, a montré que la forme de la nappe restait constante pendant la phase débits de pointe. En conséquence, compte-tenu des travaux antérieurs sur les écoulements en milieu saturé, l'approche classique de BOUSSINESQ-GUYON en régime variable a été étendue pour élaborer le modèle SIDRA, qui prend également en compte l'hétérogénéité verticale du sol. Ce modèle a été appliqué à la simulation de débits et hauteurs de nappe au pas de temps horaire, après discrétisation des équations par les différences finies. Les valeurs simulées et mesurées sur le site expérimental d'Arrou au cours des hivers 1980-1981 et 1985-1986 sont comparées.

MOTS-CLES : Drainage - Débits de pointe - Modélisation - Expérimentation - Régime transitoire - Milieu saturé.

ABSTRACT : Subsurface drainage hydrological and hydraulic operation on seasonally waterlogged soils : peak flows and SIDRA model

Subsurface drainage operation of soils is characterized by very sudden and very brief peak flows followed by long lasting tail recessions. A field experiment, conducted on a seasonally waterlogged shallow loamy soil in Arrou (France), showed that the water-table shape remains constant during the peak flow stage. Consequently, and as a result of previous investigations on saturated flow, BOUSSINESQ-GUYON's usual transient state approach has been extended to elaborate SIDRA, a theoretical model in which the soil vertical heterogeneity is taken into account as well. The model has been applied to simulate hourly water-table levels and drain flow rates by finite differences. Observed on Arrou's site versus predicted values of both 80-81 and 85-86 winters are compared.

KEY-WORDS : Drainage - Peak flows - Simulation model - Field investigations - Transient flow - Saturated flow.

*Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 107-120
AIP CEMAGREF-INRA Maitrise des excès d'eau*

1. INTRODUCTION

Cet article présente les grandes lignes du travail de recherche mené sur l'élaboration du modèle SIDRA (SIMulation du DRAINage) et les principales conclusions qui peuvent en être tirées (LESAFFRE et ZIMMER 1987, LESAFFRE 1989).

Le fonctionnement hydraulique des sols à excès d'eau temporaire drainés par tuyaux enterrés est caractérisé par des débits de pointe brefs, suivis par des tarissements de longue durée (figure 1). Les déterminismes de ces deux phases ont, jusqu'ici, été jugés très différents l'un de l'autre : si l'on considère généralement que les modèles hydrauliques saturés reproduisent convenablement la phase de tarissement, on estime par contre, à la suite de FLODKVIST, que les débits de pointe sont dus à des écoulements superficiels captés par les tranchées de drainage.

L'objectif du travail réalisé est, d'une part, de décrire le fonctionnement hydrologique du drainage pour déterminer le poids respectif des deux phases de fonctionnement hydraulique, et, d'autre part, de bâtir un modèle simulant en même temps débits de pointe et tarissements, et testé sur les données expérimentales recueillies sur le site d'Arrou.

2. LE SITE ET LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'expérimentation a été menée sur le champ d'Arrou (Eure-et-Loir), disposant de près de quinze années de données pluviométriques et débitométriques recueillies, au pas de temps horaire, sur sept parcelles de 2 hectares (figure 2). Ce champ expérimental est situé dans le Faux-Perche sur un sol lessivé à pseudogley développé sur limon des plateaux. Le sol comprend un horizon labouré (0-30 cm) limoneux battant peu humifère, un horizon éluvial (30-50 cm) reposant lui-même sur un horizon d'accumulation d'argile dégradé glossique à 30-35 % de teneur en argile ; le substrat constitué par un mélange de limon et d'argile à silex imperméable apparaît à une profondeur de l'ordre de 0,8 à 1 m. La pente moyenne du terrain est de 0,5 %.

Le climat est de type océanique ; la hauteur moyenne annuelle des précipitations s'élève à 620 mm. La nappe perchée est généralement présente à partir de décembre et peut persister jusque fin avril. L'écartement entre les drains est compris entre 10 et 20 m selon les parcelles et leur profondeur varie de 75 à 85 cm ; le débit de projet est égal à $11.5^{-1}.ha^{-1}$.

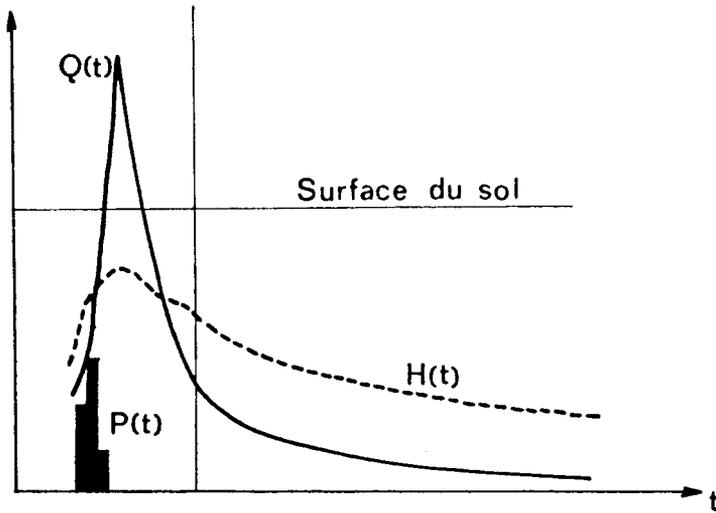


Figure 1 - Réponse débitmétrique $Q(t)$ et piézométrique à l'inter-drain $H(t)$ à un évènement pluvieux hivernal simple $P(t)$

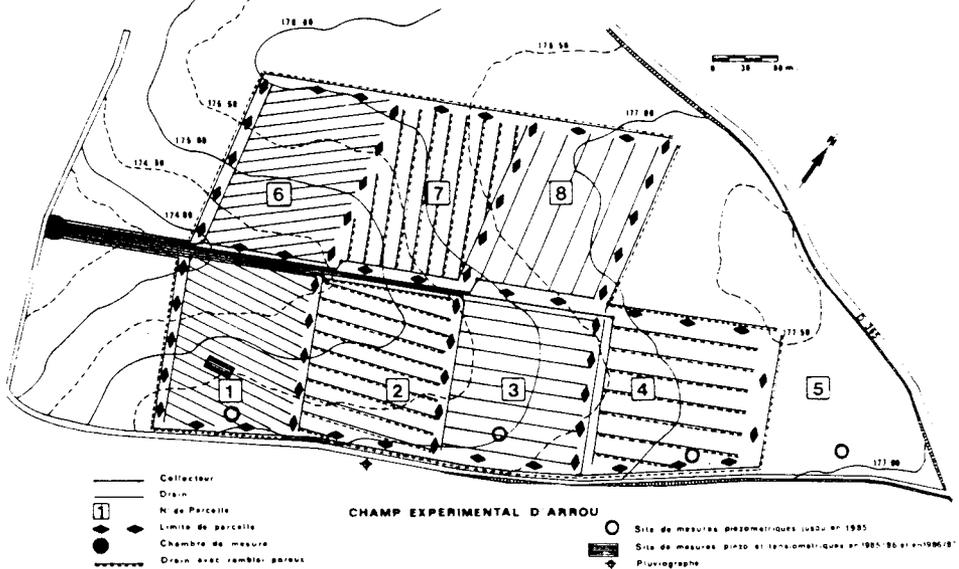


Figure 2 - Champ expérimental d'Arrou (Eure-et-Loir)

L'équipement permanent d'Arrou est constitué d'un pluviomètre à augets basculeurs et d'une chambre de mesure débitométrique : les eaux des parcelles expérimentales y arrivent dans des déversoirs triangulaires où la hauteur d'eau est actuellement mesurée au moyen de capteurs à ultrasons et stockée sur support électronique.

Au cours des hivers 1985-1986 et 1986-1987, trois sites tensiométriques et piézométriques ont été installés sur la parcelle n° 1 drainée à 10 m d'écartement : chaque site comprend 4 profils de 5 mesures tensiométriques (aux profondeurs de 25, 35, 50, 80 et 110 cm), avec un profil situé sur la tranchée, deux profils situés à 0,5 m de part et d'autre de la tranchée et un profil situé à 1,5 m de celle-ci. Des piézomètres ont été installés au même endroit que les tensiomètres ; par ailleurs, de nombreuses données piézométriques ont été recueillies auparavant. De diamètre égal à 25 mm, les piézomètres sont crépinés à une profondeur comprise entre 40 et 80 cm ; les entrées d'eau par infiltration sont évitées par la mise en place de bentonite entre la surface du sol et la limite supérieure de la partie crépinée ; les niveaux d'eau sont mesurés au moyen du même appareillage que celui utilisé dans les déversoirs.

3. MODELISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE DU DRAINAGE SOUTERRAIN DES SOLS A EXCES D'EAU TEMPORAIRE

Les treize années de données pluviométriques ont été validées après comparaison avec celles de la station météorologique de Châteaudun, par la méthode des doubles-cumuls. Celle-ci, appliquée aux couples pluie-débit d'une parcelle ou débits de deux parcelles, permet de définir précisément les saisons de drainage et d'analyser les tendances des différentes périodes d'écoulement ; la comparaison avec les bilans pluie-évapotranspiration montre que la nature du milieu a, en hiver (saison de drainage intense), plus d'influence que les dispositions constructives sur la restitution des réseaux. L'étude statistique des débits de pointe s'est faite sur deux variables aléatoires : les débits instantanés maximaux ; les durées de dépassement des débits. Les débits instantanés atteignent une limite maximale, inversement proportionnelle à l'écartement entre les drains ; les durées de dépassement des débits suivent une loi de Montana très similaire à celle des pluies. Le dimensionnement hydraulique des réseaux de drainage peut se baser sur la définition d'une durée maximale admissible de mise en charge des tuyaux.

L'expérimentation tensiométrique montre que les débits de pointe ne sont pas dus à des écoulements superficiels captés par les tranchées de drainage. Au contraire le sol, complètement saturé, est séparable en deux zones (figure 3) : la pression effective de l'eau

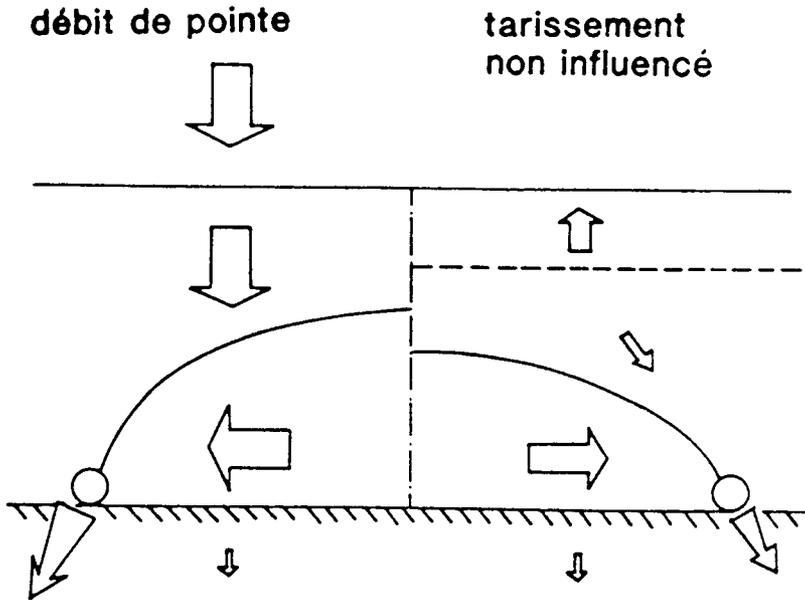


Figure 3 - Schéma des écoulements déduit des données tensiométriques d'Arrou

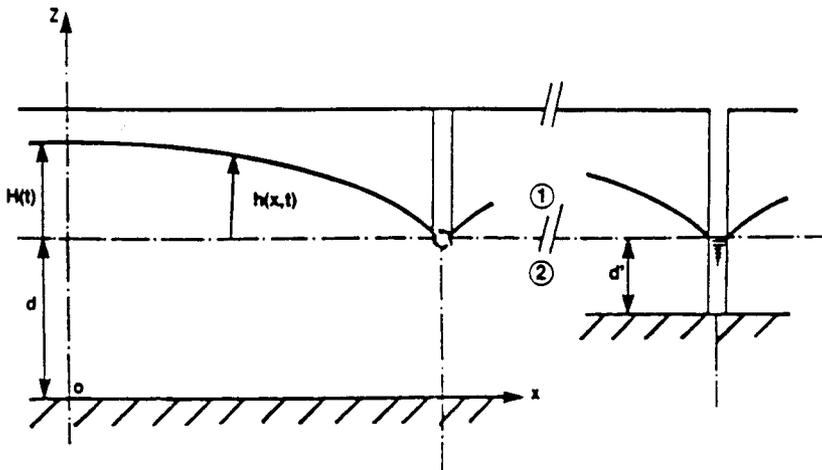


Figure 4 - Schéma du dispositif drainant

- . Origine des cotes = centre du tuyau ;
- . h = hauteur piézométrique ;
- . $H = h$ à l'inter-drain.
- . d = profondeur du plancher imperméable ;
- . d' = profondeur équivalente de Hooghoudt ;

est strictement positive dans la zone inférieure où les écoulements sont quasi-horizontaux (c'est la nappe *stricto-sensu*) ; au-dessus et jusqu'à la surface du sol, la pression effective de l'eau est nulle et les écoulements sont verticaux. La forme de la nappe variant peu pendant toute la période de mesure, le modèle SIDRA, basé sur les lois de l'hydraulique souterraine et sur l'extension des principes théoriques de BOUSSINESQ et de GUYON, a pu être construit pour reproduire le fonctionnement du système drainant au cours de la saison de drainage intense.

Le système hydraulique modélisé est défini par les hypothèses suivantes :

- en chaque point du domaine saturé, le débit par unité de surface est proportionnel à la perte de charge hydraulique (loi de Darcy) ; le coefficient de proportionnalité est la *conductivité hydraulique*, supposée fonction uniquement de la cote ;

- l'eau et le sol sont incompressibles ;

- le plancher imperméable, limite inférieure du domaine saturé, est horizontal ou peu pentu ;

- la surface piézométrique, limite supérieure de la nappe *stricto-sensu*, est la limite inférieure de la zone où la pression effective de l'eau est nulle ; lorsque la nappe fluctue, le volume d'eau libéré ou stocké par unité de volume de sol est égal à la *porosité de drainage*, supposée fonction uniquement de la cote ; la recharge de la nappe par infiltration de l'eau de pluie est uniformément répartie ;

- à l'interdrain, première limite verticale, le débit est nul ; au droit des drains, deuxième limite verticale, soit la charge hydraulique est nulle, soit la pression effective de l'eau au-dessus du drain est nulle ; il n'y a donc pas de mise en charge des drains, mais l'approche théorique peut tenir compte de cette dernière, sans altération significative des formules finales.

Ces hypothèses s'appliquent à une échelle dite *macroscopique* (de l'ordre du décimètre ou du mètre), où les variables et paramètres apparaissent continus ; elles n'ont pas de sens à l'échelle *microscopique* (au niveau du pore par exemple) et ne prétendent pas expliquer les mécanismes élémentaires. Elles permettent d'élaborer, par déduction, des équations différentielles décrivant le fonctionnement du système drainant.

De manière générale, en hydraulique, les équations et leurs domaines d'application sont suffisamment complexes pour que l'on ne dispose pas de formules finales analytiques ; la résolution numérique par ordinateur permet, en revanche, le calcul pas à pas des valeurs

des variables recherchées. En drainage, grâce à l'adjonction d'*hypothèses complémentaires déduites de l'expérimentation*, de telles de formules analytiques peuvent être obtenues à l'échelle parcellaire. Ces hypothèses complémentaires sont les suivantes, les deux premières étant habituelles :

- les lignes de courant sont quasi horizontales au-dessus des drains (hypothèse de DUPUIT) ;

- la convergence des lignes de courant en-dessous des drains peut être prise en compte par le concept de *profondeur équivalente* développé par HOOGHOUDT ; cette profondeur est la profondeur de l'eau dans un système de fossés drainants où l'hypothèse de DUPUIT est applicable sur tout le domaine saturé et pour lequel la solution serait identique (figure 4) ;

- l'équation de la surface piézométrique n'est fonction que de la hauteur piézométrique à l'interdrain, hypothèse que nous avons émise à partir de nos résultats expérimentaux et de considérations théoriques, et dérivée de l'hypothèse de BOUSSINESQ-GUYON considérant constante dans le temps la forme géométrique de la nappe :

$$h(x,t) = H(t) \cdot W(X,H) \tag{1}$$

avec : x = abscisse à partir de l'inter-drain ;

$X = x/L$, abscisse réduite, L étant le demi-écartement ;

$h(x,t)$ = hauteur piézométrique au-dessus des drains ;

$H(t)$ [également noté H] = hauteur piézométrique au-dessus des drains à l'inter-drain ;

$W(X,H)$ = hauteur piézométrique réduite au-dessus des drains.

Nous avons d'abord montré que l'influence de la pente topographique est plus importante sur les faibles débits que sur les débits élevés qui traversent le sol, et que le remplacement de la loi de DARCY par une loi d'écoulement turbulent n'est pas suffisant pour prédire les débits de pointe. Grâce à l'utilisation de la fonction de potentiel de débit unitaire et des facteurs de forme de nappe qui, ici, ne sont pas constants, nous avons ensuite déterminé des formulations *mégascopiques* (ou parcellaires) des équations dynamique et de continuité, qui présentent deux avantages : les variables débit et hauteur piézométrique à l'inter-drain ne sont fonctions que du temps ; un terme *débit de pointe*, fraction de la recharge nette, est mis en évidence :

$$Q(t) = A J(H) + (1 - A) I(t) \tag{2}$$

avec : $Q(t)$ = débit surfacique ;

$J(H)$ = fonction de HOOGHOUTD ;

$A = A(H)$, facteur de forme de la nappe, égal à environ 0,8 - 0,9 ;

$I(t)$ = recharge nette, égale à la différence entre la pluie et l'évapotranspiration.

A partir de ce modèle théorique et d'une technique de gestion de la zone non-saturée commentée plus loin, le logiciel SIDRA est construit par discrétisation des équations parcellaires (figure 5). Il est testé sur deux années à Arrou et comparé aux résultats expérimentaux : les chroniques piézométriques et débitométriques, déterminées à partir de chroniques pluviométriques et d'évapotranspiration et des paramètres hydro-pédologiques, reproduisent convenablement les séquences mesurées (figure 6).

4. COMMENTAIRES SUR LE MODELE ELABORE

Les recherches qui sont à la base de ce travail montrent l'intérêt des modèles dits *saturés* pour *prédire* le fonctionnement hydraulique et hydrologique d'un réseau de drainage installé en sol à excès d'eau temporaire. Elles se traduisent par une *methodologie* de l'expérimentation au champ en drainage agricole. Enfin, par le *changement d'échelle déterministe* qu'elles opèrent, elles ont permis la construction, sur des bases physiques, de SIDRA, modèle hydraulique et hydrologique, en faisant notamment apparaître un terme débit de pointe : ce dernier est, en outre, un outil d'analyse de l'influence du drainage sur les crues.

Comparé à des modèles plus *complets*, prenant par exemple en compte le fonctionnement hydraulique et mécanique de la zone non saturée, le modèle SIDRA est très simple. Il crée uniquement des chroniques horaires, donc quasi-continues, de débits et de hauteurs de nappes, ce qui est suffisant, dans une première étape, pour évaluer le fonctionnement hydraulique et hydrologique du drainage : ainsi, l'influence des paramètres de dimensionnement des réseaux sur les performances de ces derniers peut-elle être analysée.

Un modèle, quel qu'il soit, ne peut être utilisé que dans le cadre du contexte expérimental qui le justifie. D'où la démarche méthodologique que nous avons en partie retenue ici sur le champ expérimental d'Arrou et qui nous apparaît indispensable de suivre avant d'utiliser SIDRA : (a) après, bien sûr, la présentation du champ expérimental vient la validation des données pluviométriques, phase essentielle ; (b) la description structurée du fonctionnement hydrologique du drainage est basée sur la définition des saisons de drainage et l'étude statistique des crues de drainage ; (c) le modèle est calé par l'étude de

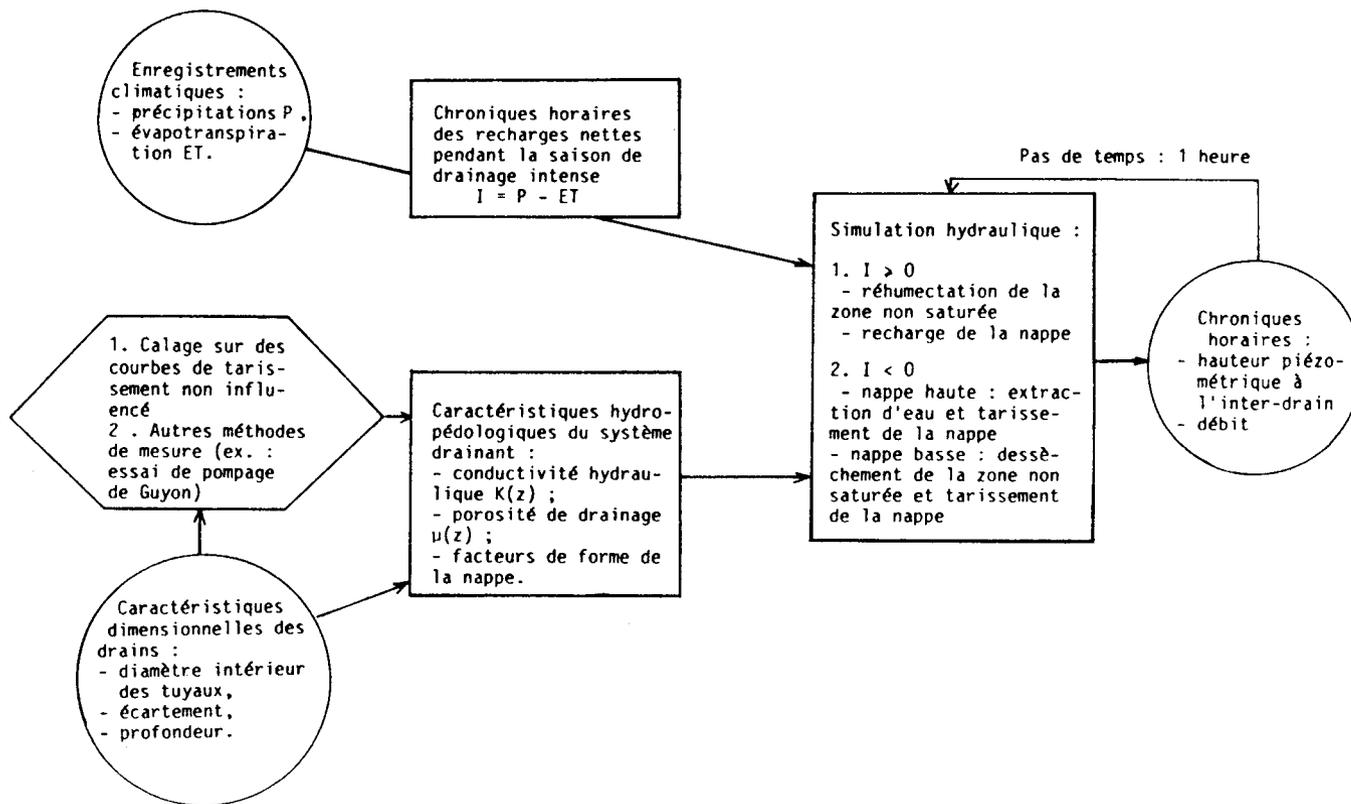


Figure 5 . Principe de fonctionnement de SIDRA

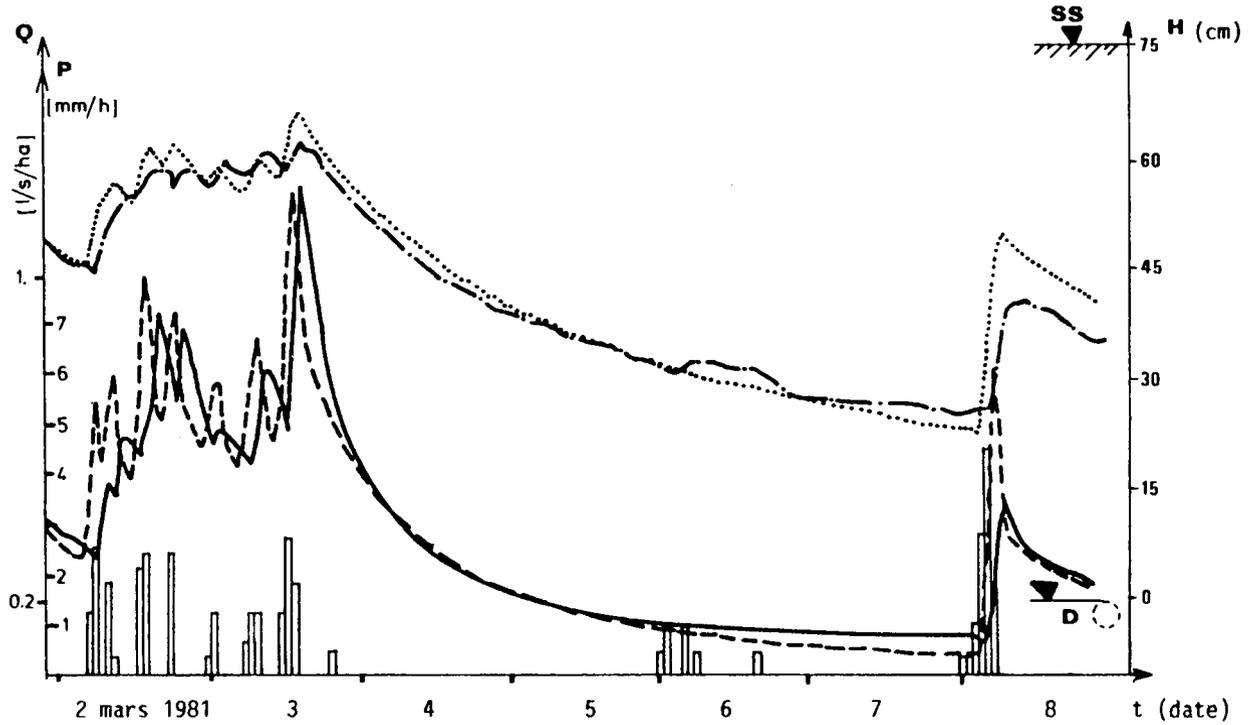


Figure 6 . Comparaison des chroniques mesurées et simulées à Arrou, parcelle 1, en 1980-1981

a - 22 décembre 1980 au 22 mars 1981 (saison de drainage intense)

b - 2 au 8 mars 1981

▮ : Pluie P (mm/h).

D : Drain

S.S. : Surface du sol

Hauteurs de la nappe à l'inter-drain H (cm), mesurées ——— ; simulées.....

Débits Q (l/s/ha), mesurés ——— ; simulés - - - - -

courbes de tarissement ; (d) la simulation des chroniques à partir d'une longue série de données climatiques permet d'évaluer le fonctionnement du drainage, voire de tester différentes techniques de drainage.

On parle souvent de changement d'échelle *stochastique*, technique consistant à combiner modélisation déterministe macroscopique (généralement à l'échelle de l'échantillon), description probabiliste des paramètres et analyse statistique des résultats de la modélisation. Notre propre démarche a consisté à effectuer un changement d'échelle *déterministe* ; nous en avons déduit deux résultats principaux, que nous commentons ci-après : (a) la résolution numérique est originale, la discrétisation spatio-temporelle habituelle étant remplacée par une discrétisation spatiale puis temporelle ; (b) un terme débit de pointe a été mis en évidence.

La méthode de résolution numérique retenue est née, non d'un choix délibéré au départ, mais de l'analyse des résultats expérimentaux obtenus à Arrou et sur d'autres sites expérimentaux. Les faibles déformations de la nappe observées, jointes à une analyse théorique des formes de nappe, nous ont conduit à reprendre les principes théoriques féconds de BOUSSINESQ et GUYON : leur technique de séparation des variables d'espace et de temps (traduction mathématique de la constance de la forme de la nappe) est remplacée ici par une "pseudo-séparation" des variables (équation 1).

L'intégration spatiale des équations macroscopiques dynamique et de continuité fait apparaître, la nappe étant supposée ne pas affleurer, un terme débit de pointe dans l'équation dynamique parcellaire : en termes hydrologiques, cette équation est une *fonction de transfert* (équation 2). La gestion de la zone non saturée, par l'intermédiaire du concept physique de profondeur de stockage, définit une *fonction de production* traditionnelle : l'excès cumulé de la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration génère la recherche nette qui alimente la nappe perchée. Vu sous cet angle, SIDRA peut être considéré comme un modèle hydrologique basé sur une approche déterministe hydraulique.

Pour des pluies inférieures à des valeurs très élevées, pour lesquelles la nappe affleure, et suffisamment fortes pour que le terme $A J(H)$ soit négligeable dans l'équation (2), c'est à dire pour des pluies *moyennement élevées* (0,75 à 2 l/s/ha à Arrou sur la parcelle 6), les débits sont quasi-proportionnels aux pluies, si la nappe est peu déformable :

$$Q(t) \approx (1 - A) I(t) \tag{3}$$

Ce résultat est cohérent avec la proportionnalité trouvée entre les ajustements statistiques de Montana des pluies et des débits. On en déduit également que, en cas de forte pluie, et sous réserve qu'il n'y ait ni affleurement de la nappe, ni ruissellement, une fraction seulement de la pluie arrive à l'exutoire du drainage, le reste étant stocké au sein de la nappe dans le sol : comparé à un sol saturé non drainé sur lequel ruissellerait cette même pluie, le réseau de drainage écrête les pointes de crue, pas tellement parce qu'il stockerait *totalement* la pluie pour la restituer ensuite (comme cela est sous-entendu lorsque l'on parle de l'*effet-tampon* du sol), mais simplement parce qu'il en stocke la majeure partie.

Au terme de cette analyse, il n'est pas inutile de rappeler les limites de la modélisation saturée. Si la simulation, par SIDRA, des débits et des hauteurs piézométriques peut être considérée comme convenable, il est clair que les conditions de travail du sol par l'agriculteur ne peuvent être que très imparfaitement estimées, par exemple à partir des durées de présence de la nappe à une certaine profondeur au cours d'une période donnée. La prise en compte explicite de la zone non saturée semble alors nécessaire, et un autre type de modèle est requis.

La procédure de calage des courbes de tarissement peut également être critiquée, puisque l'on utilise, par construction, des valeurs de débit mesurées à la sortie d'un réseau de drainage (de superficie valant, à Arrou, 2 ha) et des hauteurs piézométriques locales. Elle n'empêche pas des bonnes prévisions, mais les caractéristiques hydrodynamiques sont ainsi déterminées à une échelle métrique, voire décamétrique : on peut comprendre la difficulté de comparer des mesures de laboratoires à de telles mesures de terrain, d'autant que les valeurs obtenues dépendent, dans tous les cas, des modèles utilisés. Une voie de recherche reste, sur ces comparaisons, toujours ouverte.

Le rejet de l'hypothèse de FLODKVIST sur le champ expérimental d'Arrou a d'importantes conséquences sur le choix de la technique de pose. En effet, une tranchée perméable ne sert pas, alors, à capter des écoulements superficiels, mais tend à rendre le drain plus proche de son état idéal, c'est-à-dire totalement poreux : c'est, en fait, le voisinage du drain qui joue un rôle déterminant, vu l'importance des débits qui transitent par la masse du sol et qui arrivent au drain par son pourtour. Un soin particulier est donc à apporter à la qualité de l'environnement immédiat du drain : les investigations sur le fonctionnement de réseaux existants doivent concerner autant, sinon plus, cette zone que l'ensemble de la tranchée.

Enfin, d'un point de vue physique, puisque la même *porosité de drainage*, définie comme le volume d'eau évacué ou stocké par unité de volume de sol lorsque la nappe

fluctue, est utilisée pendant les deux phases du fonctionnement hydraulique, il n'est pas nécessaire d'invoquer deux types de porosité pour expliquer les débits observés au cours de ces deux phases.

Ces constatations faites, trois voies de recherche peuvent être proposées pour la suite :

- la version actuelle du modèle ne prend pas en compte un éventuel ruissellement et ne peut donc prédire le fonctionnement hydraulique du drainage dès lors que la nappe affleure, ce qui peut se produire suite à des pluies très fortes ou très souvent en sol lourd peu perméable ; l'hypothèse de FLODKVIST est alors de nouveau plausible et doit donc être testée au cours de la poursuite de l'expérimentation ;

- un calage automatique du modèle, qui dépend d'un faible nombre de paramètres, conduirait à déterminer la valeur des facteurs de forme de la nappe permettant la meilleure prévision du débit et du niveau de la nappe ; sur les seules données débitométriques, il permettrait de tester la sensibilité du modèle aux différents paramètres et de faire le lien avec des modèles hydrologiques conceptuels ;

- en été, des débits de pointe brusques ont déjà été enregistrés sur plusieurs sites expérimentaux ; l'explication avancée est qu'ils sont dus à des écoulements préférentiels à travers les fissures ; la compréhension de ces derniers est nécessaire si l'on veut étendre l'utilisation du modèle à l'année complète.

5. REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont plus particulièrement à D. ZIMMER, avec qui ce travail a été construit et mené, à J.M. BOUYE, A. DIMITRIU, A. MAMECIER et N. MAILLY pour la saisie et le traitement des données, et à tous les collègues de la division Drainage du CEMAGREF.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

6.1. Les références bibliographiques pourront être trouvées dans les deux publications suivantes :

LESAFFRE B., ZIMMER D., 1987 - Modélisation du comportement hydraulique d'un sol drainé : débits de pointe et tarissements. *Science du sol*, 25(4), 231-246.

LESAFFRE B., 1989 - Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA. Extension des principes théoriques de Boussinesq et Guyon ; exemple du champ expérimental d'Arrou (Eure-et-Loir). Thèse Université Paris VI. Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique Agricole, 4, 334 p.

6.2. Les références en langue anglaise sont les suivantes :

LESAFFRE B., ZIMMER D., 1987 - Field evaluation of a subsurface drainage simulation model predicting peak flows. 5th Nat. Drain. Symposium ASAE (Chicago, USA), 128-135.

LESAFFRE B., ZIMMER D., 1988 - Subsurface drainage peak flows in shallow soil. *Jour. of Irr. and Drain. Eng.*, 114(3), 387-406.

6.3. Pour un document pédagogique, on peut se référer à :

PENEL M., LESAFFRE B., 1989 - Réseaux de drainage par canalisations enterrées : (1) Aspects généraux de la maîtrise des excès d'eau ; (2) Fonctionnement, dimensionnement et mise en oeuvre. *Techniques Agricoles*, fascicules 5550, 10 pages, et 5551, 12 pages.

ETUDE IN SITU DE LA MISE EN CHARGE DES TRANCHEES DE DRAINAGE

Premières observations à VIREY (71)

G. TROUCHE¹

avec la collaboration technique de G. LOUVIOT² et V. BOILLOUX³

1 - E.N.S.S.A.A. Chaire de Productions Végétales, 26 Bd. Docteur Petitjean,
21000 DIJON

2 - I.N.R.A. Station d'Agronomie, 17 rue Sully, 21034 DIJON Cedex

3 - Etudiant B.T.S. agricole

RESUME

Les premières informations recueillies à partir du dispositif piézométrique mis en place sur le réseau expérimental de drainage de VIREY (71) montrent que l'utilisation d'un remblai poreux de gravier limite le risque d'insuffisance des drains pendant les périodes de débit de pointe.

Par contre, dans les tranchées remblayées avec le matériau autochtone, des mises en charges de durée et hauteur variables ont été enregistrées. Quoiqu'incomplets, ces résultats suggèrent que ces phénomènes sont liés aux performances hydrauliques du drainage, au fonctionnement hydrologique du sol et aux conditions climatiques. Pour mieux cerner les mécanismes intervenant dans la dégradation du remblai des tranchées l'étude du fonctionnement hydraulique de la tranchée doit être poursuivie.

MOTS CLES : Drainage - Eau et sol - Piézométrie - Tranchée de drainage.

ABSTRACT : In situ study of hydraulic head in drainage trenches.

First data from the piezometric device set on the drainage experimental field in Virey (71) show that gravel backfill limits the risk for insufficiency of drains during peak flow periods.

On an other side, hydraulic head increasings with variable duration and height are recorded in trenches back-filled with autochtonous material. Although incomplete, these results suggest a relation between this phenomenon and hydraulic performances of drainage, hydrologic functioning of soil and climatic conditions. In order to improve the understanding of mechanisms involved in the degradation of trench backfill, the study of hydraulic functioning in the trench will be continued.

KEY-WORDS : Drainage - Water and soil - Piezometer - Drainage trench.

Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 121-138
AIP CEMAGREF-INRA Maîtrise des excès d'eau

1. INTRODUCTION

Des observations effectuées sur des drainages défailants ont permis de relier la pérennité de fonctionnement de ces réseaux et l'état des tranchées de pose des drains (revue bibliographique de ZIMMER, 1986). D'origines diverses, les causes de dégradations peuvent être liées aussi bien à la conception et à la réalisation du drainage qu'à l'exploitation de la parcelle aménagée (TROUCHE et PERREY, 1984). Pour des raisons d'économie sur le dimensionnement des ouvrages de drainage et d'assainissement, le débit de projet des réseaux est inférieur aux valeurs des débits de pointe (CONCARET, 1981 ; LESAFFRE, 1988).

Dans les sols drainés à régime de nappe perchée où les débits de pointe sont en relation avec la vidange des couches superficielles du sol, la tranchée constitue un réservoir tampon entre le sol et le drain pendant les périodes d'insuffisance du réseau. Une étude antérieure, sur modèle physique au laboratoire, a montré que la succession de périodes de submersion dans une tranchée entraîne la diminution de la porosité du remblai (TROUCHE , 1981). La dégradation de l'état physique du matériau de remplissage de la tranchée peut provoquer une diminution progressive de l'efficacité du drainage au cours du temps.

Nous présentons ici les résultats obtenus à partir d'un dispositif piézométrique, mis en place sur le réseau de drainage expérimental de VIREY entre 1985 et 1988, qui permet d'étudier, à partir d'observations au champ, la mise en charge de tranchées de drainage.

2. DISPOSITIF DE MESURE

2.1 Réseau expérimental de VIREY

Le réseau expérimental de VIREY occupe 8 ha d'un champ cultivé situé sur une terrasse ancienne de la Saône près de Chalon-sur-Saône (71). La pente moyenne est de l'ordre de 0,5 % et 9 parcelles, combinant diverses modalités techniques, permettent de comparer des écartements (12, 18, 24 et 30 m), la présence ou l'absence de filtre d'enrobage (coco), de remblai poreux (gravier) et de sous-solage.

Le drainage a été mis en place en 1976 à la trancheuse ; l'épaisseur du remblai poreux au dessus du drain est en moyenne de 40 cm et le sous-solage, réalisé avec une dent à ailettes, atteint la profondeur de 80 cm environ. Un dispositif de contrôle hydraulique, par

débitmètre à augets basculeurs, enregistre en continu les réactions des drains de chaque parcelle élémentaire.

Plusieurs études déjà publiées ont permis de caractériser le comportement du sol et du réseau (TROUCHE, 1981 ; CONCARET et al., 1985 ; CONCARET et de CRECY, 1989). Le sol limoneux est soumis à des excès d'eau temporaire de type nappe perchée. Le fonctionnement du drainage est schématisé sur la figure 1.

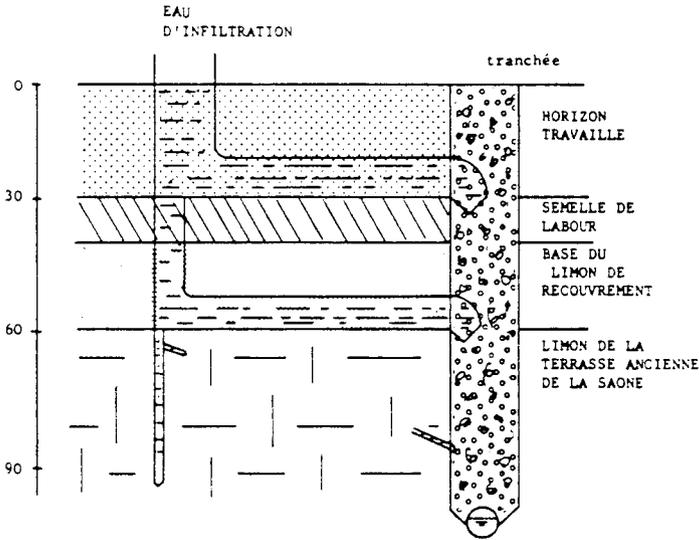


Figure 1 - Schéma du fonctionnement du drainage à Virey (Trouche, 1981)

2.2 Appareils d'enregistrement piézométrique

Un modèle original de piézographe a été conçu et réalisé avec le concours de la chaire de Machinisme et Génie Rural de l'ENITA de Quétigny (CHOPINET et al., 1986).

La partie enterrée est classiquement constituée d'un tube en PVC (ϕ 50 mm) crépiné dans la partie inférieure et installé dans le sol dans un avant-trou flanqué au moyen de gravier. A l'intérieur de ce tube, coulisse un cylindre de PVC plein, lui-même suspendu par un ressort à une potence (figure 2). L'entrée d'eau dans le piézomètre provoque, par la poussée d'Archimède exercée sur le cylindre coulissant, une modification de la résultante des forces appliquées sur le ressort. Un stylet inscrit sur un cylindre, animé d'un mouvement de rotation continu par un mécanisme d'horlogerie, les variations de l'allongement du ressort, proportionnel à la hauteur d'eau dans le tube. Les valeurs ainsi enregistrées sont

également fonction des caractéristiques propres des appareils et des réglages de sensibilité retenus sur le terrain. L'étalonnage préalable de chaque piézographe au laboratoire permet de quantifier les paramètres utilisés au dépouillement des diagrammes hebdomadaires et d'apprécier l'incertitude instrumentale qui est inférieure à 5 cm en valeur absolue.

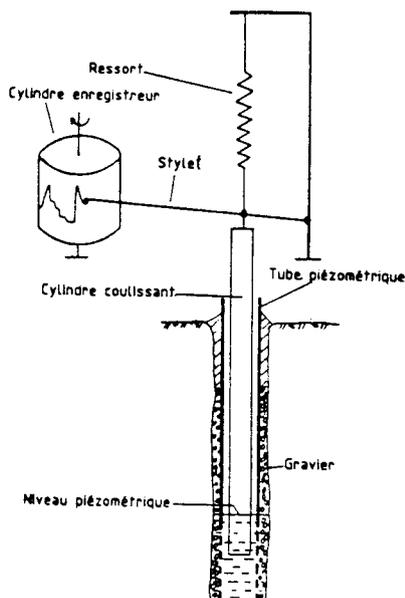


Figure 2 - Schéma du principe de fonctionnement des piézographes

2.3 Implantation du dispositif

Les piézographes sont implantés dans la tranchée et répartis sur la longueur d'une antenne. Le fond du tube crépiné repose sur le fond de la tranchée ou sur le drain, et sur le toit du massif de gravier quand un remblai poreux est présent. Un appareil est également installé dans le sol à l'interdrain à une profondeur de 35 cm pour suivre la nappe perchée dans la couche labourée.

Dans la suite, chaque appareil est identifié par un code à 3 caractères :

- le premier est un chiffre correspondant au numéro de la parcelle ;
- le deuxième est une lettre indiquant la situation (T : Tranchée, S : Sol à l'interdrain);
- le troisième est un chiffre, numéro d'ordre le long de l'antenne, repéré à partir de l'extrémité amont.

Lors de la première campagne (1985/1986) les piézographes sont installés sur la parcelle 2 puis en 1986/1987 et 1987/1988 sur les parcelles 7 et 8. La figure 3 reproduit le plan du dispositif dont les principales caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 1.

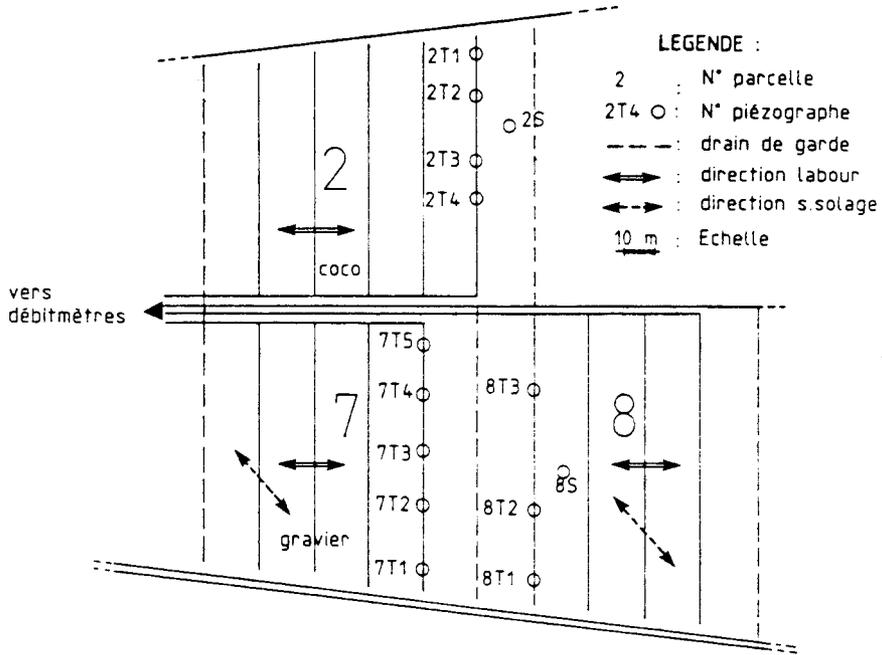


Figure 3 - Plan des dispositifs piézométriques (campagnes 1985/1986 et 1987/1988)

Les principales critiques pouvant être formulées à l'égard du protocole retenu pour ces essais portent sur :

- les discontinuités de l'information fournie par chaque piézographe à la suite des pannes liées à des incidents mécaniques, comme des arrêts d'horloge, ou aux conditions climatiques comme le givre ou la tempête ;

- les incertitudes altimétriques sur le profil réel des antennes et, par conséquent, sur la position du fond du tube piézométrique par rapport au drain, écart inférieur à 65 mm toutefois ;

- la synchronisation délicate des systèmes d'enregistrement débimétriques et piézométriques, électronique et situé dans le bâtiment d'exploitation pour le premier, mécanique et situé en plein-champ pour le second ;

- la différence des surfaces concernées par les mesures de débit relatives à une parcelle de près d'un hectare, et de piézométrie, relatives à une antenne, soit une dizaine d'ares seulement.

Campagne	1985/86	1987/1988	
Parcelle	2	7	8
Drainage :			
écartement (m)	18	18	18
traitement spécial	filtre coco	remblai poreux	néant
sous-solage	non	oui	oui
∅ drain (mm)	65	65	65
Antenne observée :			
longueur (m)	90	85	90
pente (moyenne (%))	0,2	0,4	0,7
débit maximum théorique (l/s/ha)	3,1	4,5	5,6
Piézographes			
Sol : . nombre	1	0	1
. profondeur (cm)	35	-	37
Tranchée :			
. nombre	4	5	3
. profondeur (cm)	78, 111, 112, 133	83, 96, 59, 71, 87	53, 72, 142
(de l'amont à l'aval)			
Mesures piézographiques			
période d'implantation	février-mai 1986	décembre 1987-mai 1988	
Durée (jours)	97	173	

Tableau 1 - Principales caractéristiques des dispositifs de mesure

L'état physique des tranchées étudiées est caractérisé, préalablement à la mise en place de chaque piézographe, par la réalisation d'un profil pénétrométrique au moyen d'un pénétromètre dynamique à enfoncement par battage (de CRECY et al., 1981). La figure 4 reproduit les profils obtenus. L'accroissement important des valeurs de résistance pour les points les plus profonds correspond au contact de la pointe de l'appareil avec le drain. Sur la parcelle 2, non sous-solée, les résistances mesurées dans la tranchée au delà de 40 cm de profondeur sont uniformément faibles, alors que sur les parcelles 7 et 8, sous-solées, ces valeurs sont plus élevées et dispersées. Ces résultats, en concordance avec des observations

antérieures sur fosses, traduisent le remaniement de la tranchée provoqué par le passage de la dent de sous-solage.

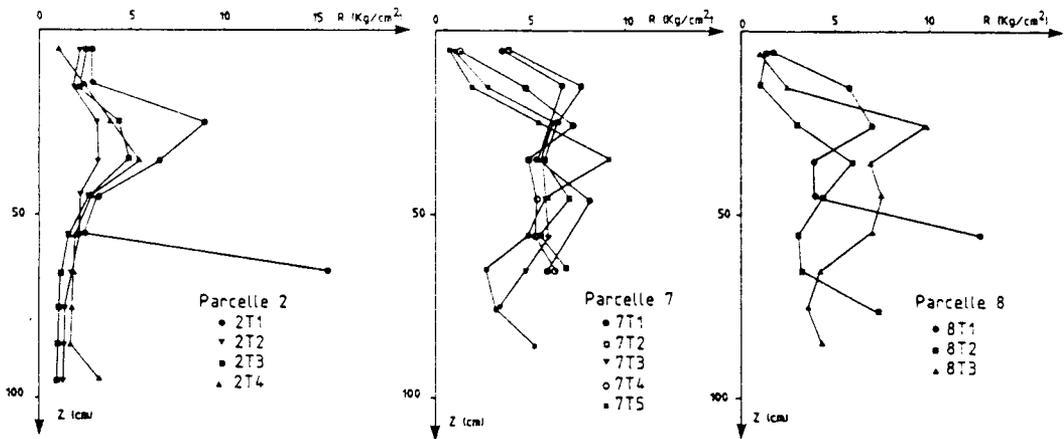


Figure 4 - Profils pénétrométriques dans les tranchées

N.B. Les valeurs de résistance sont des valeurs moyennes calculées, avec la formule des Hollandais, pour la couche de sol d'épaisseur 10 cm centrée sur le point représenté.

3. RESULTATS

3.1 Conditions et importance des mises en charge des tranchées

Seule la pluviométrie hivernale de la campagne 1986/1987 est inférieure à la moyenne interannuelle de la période considérée (tableau 2). Une seule phase de mise en charge de courte durée, une trentaine d'heures, est alors enregistrée à l'extrémité amont de l'antenne de la parcelle 8.

Campagne	Hauteur (mm)	Rapport à la moyenne de 42 ans (%)
1985/86	545,8	121
1986/87	311,7	70
1987/88	677,1	150

Source : bulletin météorologique de Saône et Loire. Poste M. N. Chalon sur Saône, P. et C.

Tableau 2 - Pluviométrie cumulée d'octobre à mai

Dans la parcelle 7, il n'y a pas eu, durant la période de mesure, de mise en charge de la partie de la tranchée surmontant le massif de graviers.

Des mises en charge de hauteurs et durées variables s'observent par contre sur les parcelles 2 et 8. A partir des données enregistrées, le calcul des durées de dépassement des hauteurs de charges, celle-ci étant exprimée à partir du fond de chaque tube crépiné, permet d'approcher globalement l'importance de ce phénomène.

Campagne parcelle	N° Piézo.	Durée d'enregistrement (h)	Durée de dépassement d'une charge de :						
			10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
1985/86	2T1	1891	381 (20)*	153 (8)	104 (5)	84 (4)	60 (3)	42 (2)	25 (1)
	2T2	352	136 (38)	55 (15)	27 (7)	7 (2)			
	2T3	1824	81 (4)	8 (-)	3 (-)	1 (-)	0,5 (-)		
	2T4	2176	263 (12)	46 (2)	29 (1)	6 (-)	1 (-)	0,5 (-)	0,2 (-)
1987/88	8T1	3842	122 (3)	58,5 (1)	33 (1)	2 (-)			
	8T2	1637	924 (56)	556 (34)	358 (22)	226 (14)	116 (7)	41 (2)	
	8T3	1355	1191 (88)	1034 (76)	746 (55)	138 (10)			

* Les valeurs entre parenthèses sont exprimées en % de la durée d'enregistrement de chaque piézographe, le signe - remplace les valeurs <1%.

Tableau 3 - Durées de dépassement des hauteurs de charges enregistrées (hauteurs en cm, temps en heure).

Les résultats rassemblés dans le tableau 3 montrent que les périodes de forte charge, supérieures à 50 cm, sont rares dans les tranchées. Par contre, des charges de 10 à 30 cm peuvent se maintenir pendant des périodes beaucoup plus longues, et affectent alors le remblai de la tranchée dans la zone la plus proche du drain.

3.2 Relation entre mise en charge des tranchées et débit des drains

Les figures 5 et 6 permettent de relier les débits et les hauteurs piézométriques dans les tranchées pour des épisodes pluvieux représentatifs des deux campagnes de mesure. La

pluviométrie et la charge hydraulique dans l'horizon labouré du sol à l'interdrain sont également représentées.

Ces diagrammes mettent en évidence le parallélisme des réactions du réseau de drainage aux précipitations, tant au niveau de la débitmétrie que de la piézométrie. Dans le détail cependant, une variabilité importante des phénomènes apparaît entre les séquences pluvieuses successives et les points d'observations, pour un même couple année-parcelle.

Sur la parcelle 2, pour les trois crues des 3, 7 et 8 avril (figure 5a), les charges les plus importantes, 60 cm environ, sont enregistrées à l'amont de la tranchée (2T1). L'appareil intermédiaire (2T3) ne réagit pas le 7 avril et le niveau maximum est atteint le 8 avril ; alors qu'à l'extrémité aval (2T4), seule la crue du 3 avril provoque une mise en charge. Les hauteurs maximales d'eau dans les piézomètres sont moins élevées pour la période du 22 au 26 avril (figure 5b) alors que les débits sont du même ordre de grandeur, de 2 à 4 l/s/ha. La crue du 24 avril entraîne une remontée du niveau dans le piézomètre aval alors que le piézomètre intermédiaire ne réagit pas.

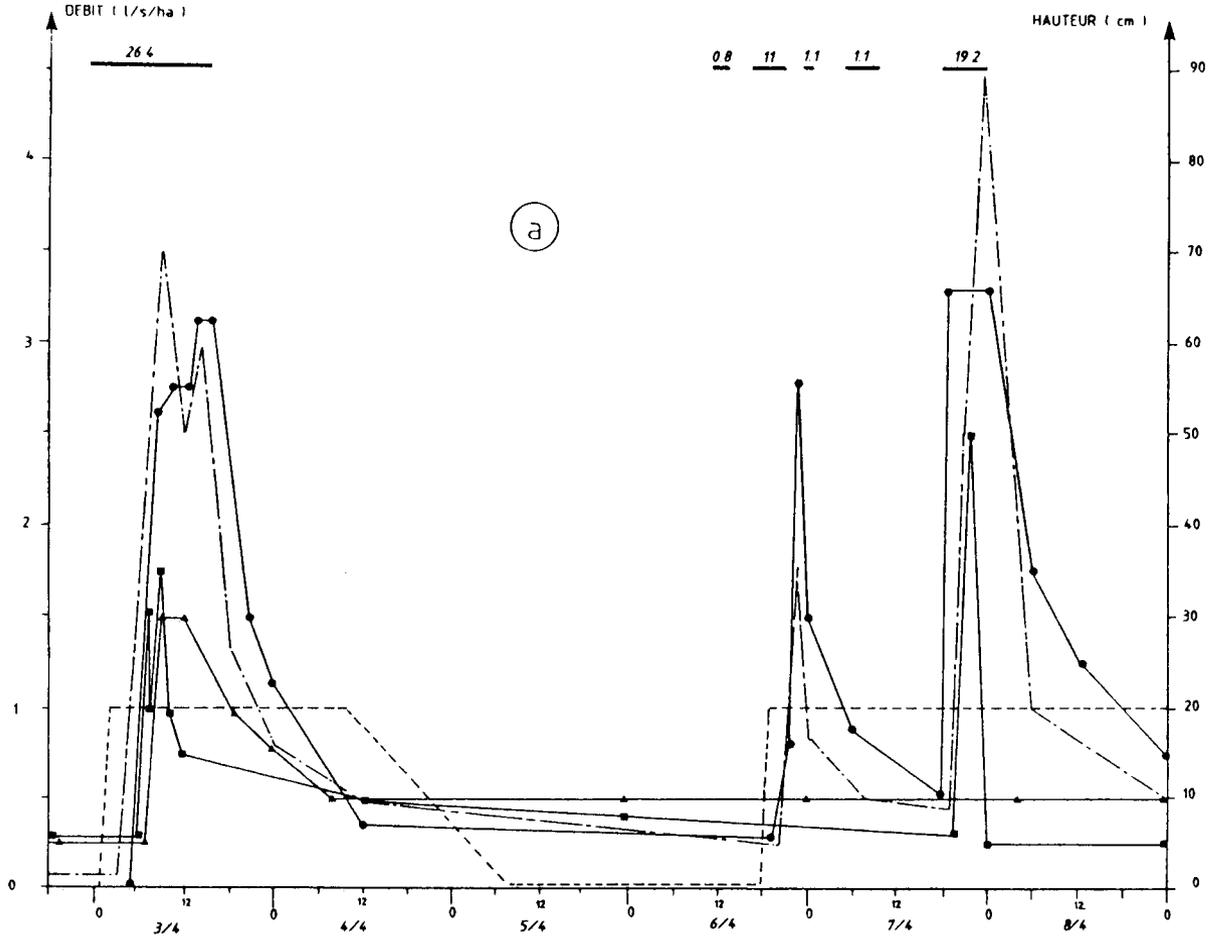
Sur la parcelle 8 (figure 6), les hauteurs d'eau les plus importantes sont enregistrées au niveau du piézomètre intermédiaire (8T2). Accompagnant les épisodes pluvieux successifs entre le 8 et le 13 février, la piézométrie dans la tranchée se caractérise par des fluctuations, de forte amplitude dans la partie amont, qui paraissent s'amortir le long de l'antenne jusqu'à la zone proche du raccordement sur le collecteur.

3.3 Forme des lignes d'eau

Les résultats précédents montrent que, pendant les périodes de débit de pointe, le fonctionnement du réseau installé à VIREY ne remplit pas les conditions des modèles hydrauliques où l'écoulement de l'eau dans le drain s'effectue à surface libre.

L'étude de l'évolution des formes de lignes d'eau, à partir des cotes piézométriques enregistrées, constitue une première approche dans la compréhension des mécanismes en jeu. De telles courbes sont représentées sur les figures 7 et 8 où il a été fait abstraction des piézomètres n'ayant pas réagi durant toutes ces périodes. Elles correspondent à des instants successifs de décrues extraites des séquences présentées au paragraphe précédent.

L'abaissement du niveau d'eau dans les tranchées, qui accompagne la diminution du débit, se déroule suivant des modalités nettement différentes sur les deux sites d'observations.



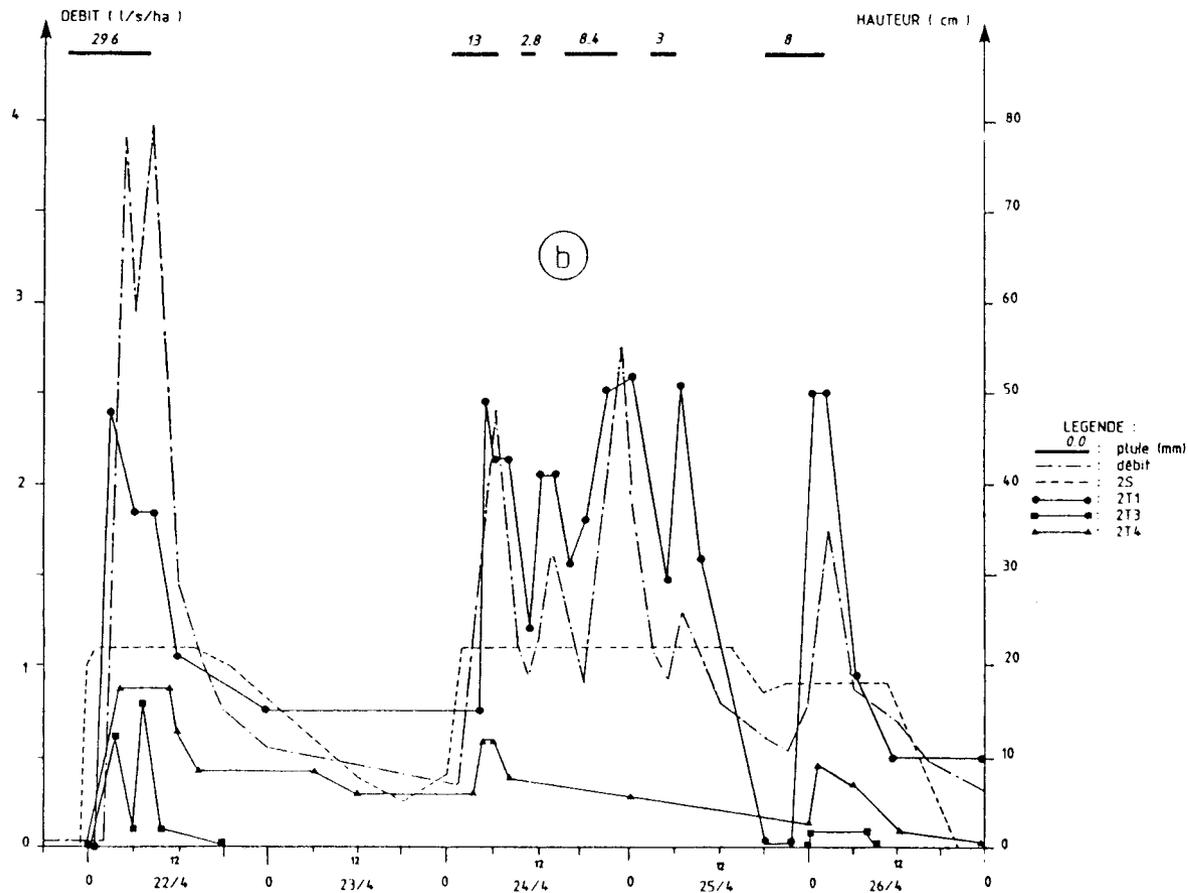


Figure 5 - Débits et charges enregistrés sur la parcelle 2 en 1986 ; a) du 3 au 8 avril, et ; b) du 22 au 26 avril

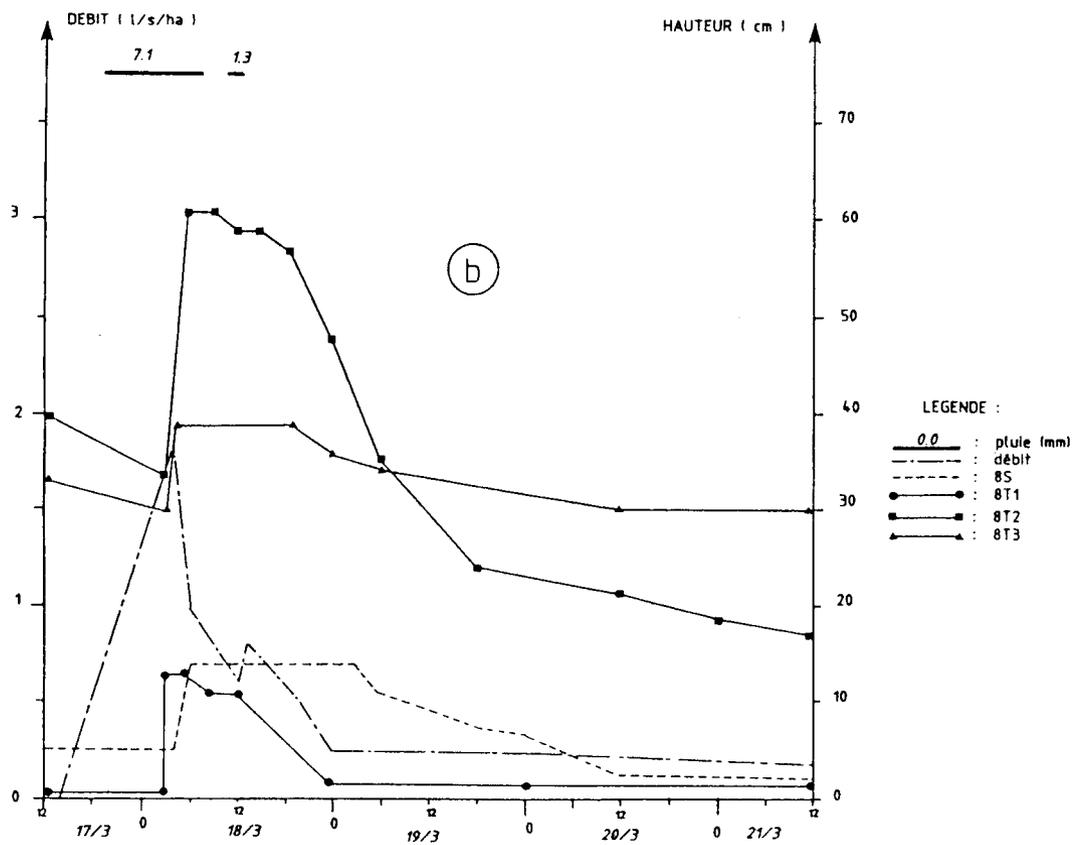


Figure 6 - Débits et charges enregistrés sur la parcelle 8 en 1988 ; a) du 8 au 13 février, et ; b) du 17 au 21 mars

Ainsi, le niveau piézométrique maximum se maintient pendant un temps plus long dans la partie amont de la tranchée sur la parcelle 2, et dans la partie intermédiaire sur la parcelle 8. De même, un accroissement de débit survenant en cours de décrue provoque une remontée de la ligne d'eau au niveau initial dans le piézomètre amont sur la parcelle 2, et dans le piézomètre intermédiaire sur la parcelle 8.

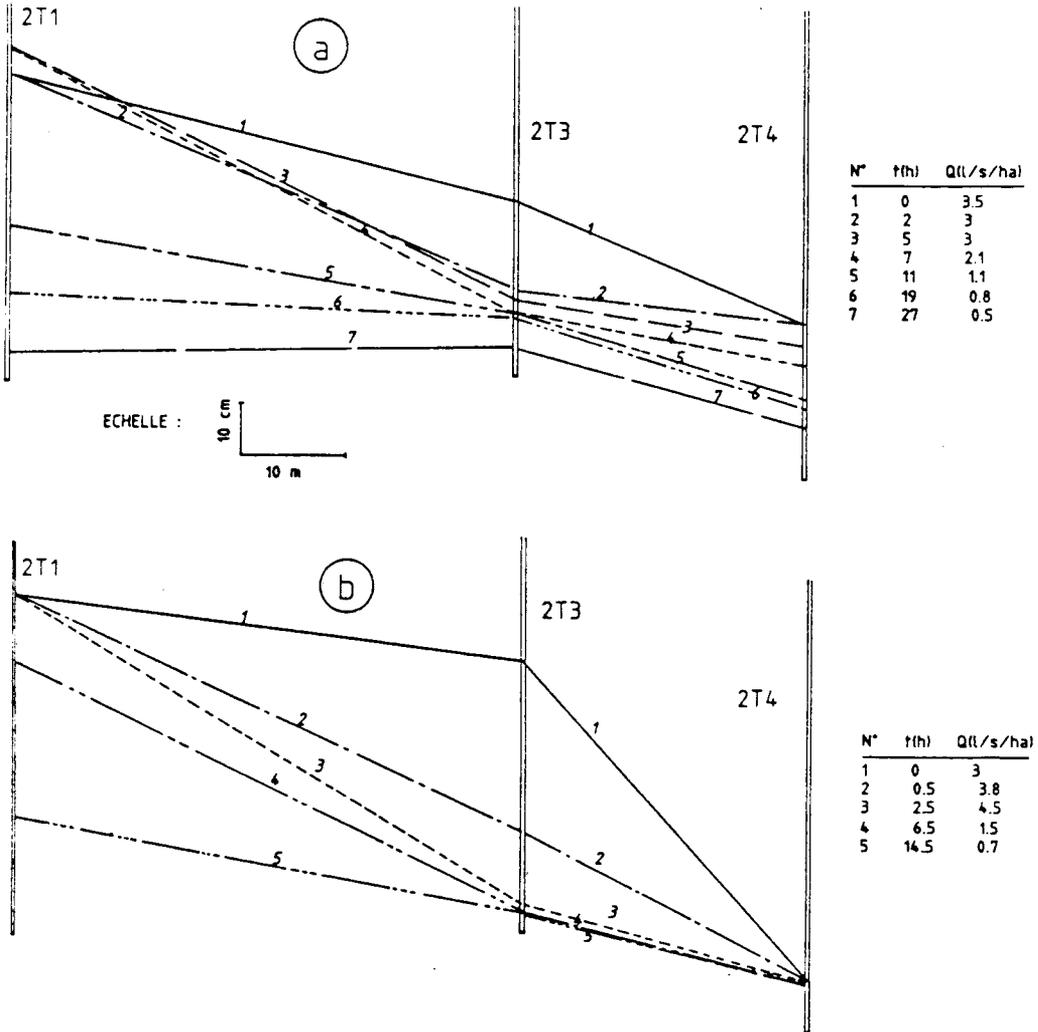


Figure 7 - Evolution des lignes d'eau dans la tranchée de la parcelle 2 en 1986 au cours de la décrue ; a) 3 et 4 avril, et b) 8 avril

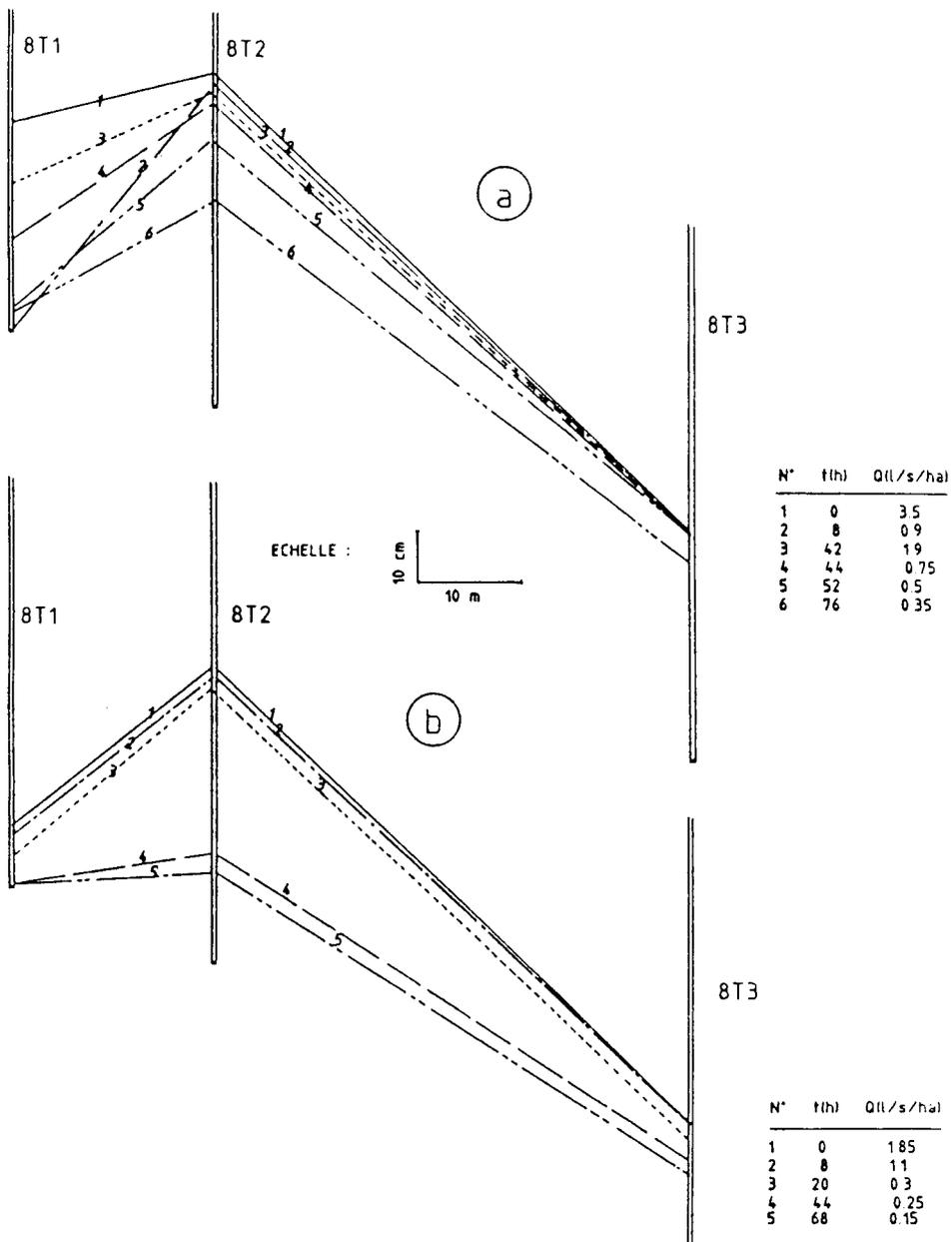


Figure 8 - Evolution des lignes d'eau dans la tranchée de la parcelle 8 en 1988 au cours de la décrue ; a) du 8 au 13 février, et ; b) du 18 au 21 mars

4. DISCUSSION

Les résultats enregistrés sur le dispositif mis en place à VIREY ne constituent, en raison des réserves émises précédemment, qu'une première approche, essentiellement descriptive, du phénomène de mise en charge des tranchées de drainage. Ils suggèrent néanmoins des hypothèses sur le rôle de certains facteurs dans le fonctionnement de ce type de réseau pendant les périodes de débit de pointe.

Il apparaît ainsi que la présence d'un massif de graviers au dessus du drain supprime le risque de mise en charge du remblai naturel de la tranchée. Tout se passe alors comme si le débit de l'ensemble gravier plus drain était suffisant pour assurer l'évacuation de l'eau, même pendant les périodes de débit de pointe.

Pour les tranchées recomblées avec le remblai naturel, les modalités de mise en charge paraissent différentes entre les deux parcelles suivies. Outre le facteur année climatique, la présence d'un sous-solage profond (70 à 80 cm) associé au drainage, sur la parcelle 8, peut être une des causes de cette différenciation. Des observations antérieures (résultats non publiés) montrent que la saignée réalisée dans le sol par la dent de sous-solage constitue une zone de circulation latérale de l'eau excédentaire. Au débouché dans la tranchée, ces flux peuvent provoquer des mises en charge ponctuelles dont les effets se cumulent avec les hétérogénéités du remblai signalées plus haut, en 2.3.

On peut également penser que la faible pente de l'antenne suivie sur la parcelle 2, voire la contre-pente du tronçon amont que semble indiquer le profil en long du dispositif (figure 7), explique les phénomènes enregistrés. Cependant, il paraît raisonnable d'estimer que, plus de 10 ans après la réalisation du drainage, un défaut de fonctionnement aurait déjà été constaté par l'exploitant sur cet emplacement, d'autant que la rotation pratiquée inclut le colza, plante réputée colmatante et dont les racines sont particulièrement aptes à révéler ainsi les défauts de réalisation.

5. CONCLUSION

Le dispositif de suivi piézométrique mis en place sur le réseau de drainage expérimental de VIREY fournit un certain nombre d'indications sur le phénomène de mise en charge des tranchées pendant les phases de débit de pointe.

Ces premiers résultats obtenus au champ montrent que la mise en place d'un remblai poreux constitue une assurance contre le risque d'envolement des tranchées. Cependant le surcoût qu'entraîne cette technique en limite l'usage au plan pratique.

Une meilleure connaissance du risque de dégradation du remblai naturel de la tranchée dans la zone la plus voisine du drain incite à poursuivre ces investigations pour préciser le rôle des paramètres tels que les conditions climatiques, le régime hydrologique du sol, les caractéristiques hydrauliques du drain. D'autres facteurs pourraient également être pris en compte et notamment la géométrie d'ensemble du réseau : pentes et répartition spatiale des tronçons de collecteurs et des antennes.

Ces informations devraient également contribuer à améliorer la connaissance des mécanismes de fonctionnement des réseaux pendant les périodes de débit de pointe. A terme, ceci permettrait de préciser le poids de certains critères pris en compte lors de la conception des réseaux, dans une perspective de maîtrise des coûts du drainage, notamment au niveau de la valeur du débit de projet.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOILLOUX V., 1989 - Etude de la submersion des tranchées de drainage. Rapport de stage B.T.S. Productions Végétales. ENSSAA DIJON, Lycée Agricole Quétigny.

CHOPINET B., COQUILLE J.C., LOUVIOT G., TROUCHE G., 1986 - Conception et description d'un piézographe. Cah. Tech. INRA, 14, 1-11.

CONCARET J., 1981 - Risques de colmatage. in : Drainage Agricole, théorie et Pratique. Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne, 229-243.

CONCARET J., de CRECY I., 1989 - Composition des eaux de drainage. Résultats expérimentaux. Soil technology, 2, 185-303.

CONCARET J., de CRECY I., PERREY C., 1984 - Fonctionnement hydraulique de parcelles drainées en liaison avec la dynamique structurale. Essai d'interprétation. Agronomie, 4 (8), 749-761.

de CRECY J., GUYOT J., TROUCHE G., 1981. Observations et mesures in : Drainage Agricole, théorie et pratique. Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne, 394-422.

LESAFFRE B., 1988 - Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés. Thèse Univ. Paris VI, 334 p.

TROUCHE G., 1981 - Aspects agronomiques et hydrodynamiques du drainage des sols à profil différencié du Val de Saône. Th. Doct. Ing. Université DIJON, 201 p.

TROUCHE G., PERREY C., 1984 - Facteurs de dégradations de l'effet tranchée. Conséquences sur le fonctionnement des réseaux de drainage C.R. Colloque "Fonctionnement hydrique et comportement des sols", A.F.E.S., DIJON, 151-165.

ZIMMER D., 1986 - La tranchée de drainage : étude bibliographique. Etude du CEMAGREF, Série Hydraulique Agricole, 1, 85-129.

STRUCTURE DU SOL ET FONCTIONNEMENT DU DRAINAGE

SYNTHESE DES TRAVAUX DES THEMES 3, 4 et 5 de l'AIP

J.C. FAVROT ¹

1 - INRA, Laboratoire Science du Sol, 2 Place Viala, 34060 MONTPELLIER Cedex

1. INTRODUCTION

Cinq communications rendent expressément compte des travaux effectués dans le cadre des thèmes 3, 4 et 5 de l'AIP. Elles abordent des sujets assez variés : évaluation du rôle de la structure sur la réponse des sols au drainage (FAVROT et al.) - pour le thème 3 - ; analyse de méthodes de prévision des jours disponibles (CHOSSAT), élaboration d'un pénétromètre à plaque (GUERIF et ROYERE), mise en évidence des relations possibles entre état structural et profils hydriques, avec et sans drainage (PENEL et PAPY) - pour le thème 4 - ; et, enfin, étude de l'action d'amendements et de conditionneurs de sol sur l'évolution structurale d'une tranchée de drainage reconstituée en laboratoire (SORANI et BRUAND, thème 5).

Malgré la variété des buts recherchés et des démarches utilisées, ces travaux visent en commun une meilleure identification de l'organisation structurale des sols hydromorphes en vue d'en comprendre puis d'en prévoir le rôle sur la réponse des terres au drainage. Cette dernière est caractérisée soit en termes d'évolution des caractéristiques hydriques des profils, soit sous forme de modalités différentes de restitution des eaux en excès par les drains. Dans une certaine mesure, d'autres articles, relevant des thèmes 1 et 2 de l'AIP, contribuent également à la compréhension de l'incidence du comportement physique des sols sur le fonctionnement des réseaux de drainage.

La synthèse de ces divers travaux sera présentée en deux parties : la première, la plus importante, abordera le domaine méthodologique, la seconde évoquera celui des connaissances de base et des applications techniques.

2. ASPECTS METHODOLOGIQUES

Les démarches mises en oeuvre dans les thèmes 3, 4 et 5 se rapportent toutes à des situations réelles de terrain et s'appuient généralement sur le suivi de sites expérimentaux de drainage. Même lorsqu'il s'agit de recherches en laboratoire, avec des échantillons de

volume limité, les matériaux étudiés ont été prélevés dans un contexte pédologique bien identifié, précaution permettant ensuite une généralisation raisonnée des résultats (moyennant une certaine connaissance de la variabilité des propriétés constitutives et fonctionnelles du site).

Les apports méthodologiques décrits ci-après ont été permis grâce à l'association d'équipes relevant de deux ou plusieurs disciplines. Leur intérêt réside le plus souvent dans le mode de combinaison et l'amélioration de techniques d'études existantes, plus que, sauf exception, dans l'élaboration proprement dite d'outils de mesure nouveaux.

2.1 Amélioration des techniques d'étude

La mise au point d'un prototype de pénétromètre à plaque pneumatique, en tant qu'outil nouveau destiné à l'appréciation de la portance des sols cultivés (GUERIF et ROYERE), constitue précisément l'exception au constat précédent.

Ce travail était destiné à rendre compte du comportement mécanique global des couches de surface, en se rapprochant le plus possible des situations réelles de traficabilité : la surface de la plaque utilisée est voisine de celle du contact sol-pneumatique lors du passage des roues ; cependant la reproduction d'une pression en temps court n'a pu totalement être obtenue. L'objectif de ce pénétromètre est aussi de permettre une meilleure comparaison du caractère portant de sols soumis à différentes conditions hydriques (parcelles drainées et non drainées, parcelles drainées à des écartements variables ou selon des techniques différentes). Ce prototype opérationnel nécessite un tracteur. Il suppose toutefois d'ultimes essais pour définir un protocole d'utilisation éprouvé.

Il devrait compléter, à terme, la technique du pénétromètre à pointe utilisée jusque là et dont CHOSSAT montre l'intérêt lorsqu'elle est associée à d'autres mesures (teneur en eau) et à des enquêtes (traficabilité ou travaillabilité estimée par les agriculteurs), pour évaluer la portance.

Dans un autre domaine expérimental, SORANI et BRUAND décrivent les précautions à prendre pour reconstituer en laboratoire un dispositif permettant de simuler le fonctionnement d'une tranchée de drainage. Au champ, PENEL et PAPY font état de techniques culturales particulières permettant de créer des organisations structurales différentes pour les couches de surface.

2.2 Conception des sites expérimentaux de drainage

Deux projets de recherche (FAVROT et al., GUIRESSE et BOURGEAT) ont paradoxalement bénéficié de facteurs a priori défavorables : une connaissance incomplète des sols lors de la localisation de dispositifs expérimentaux de drainage et le recours à un protocole inhabituel. En effet, sur les sites de Bouillac (81) et de Poucharramet (31), les reconnaissances pédologiques préalables avaient conclu à une homogénéité acceptable des sols (de type "boulbènes"), autorisant alors la comparaison de parcelles élémentaires drainées à des écartements différents. En outre, des répétitions du même traitement (écartement) ont été effectuées, alors que cet objectif est difficilement mis en oeuvre habituellement pour des raisons matérielles : surface disponible limitée d'où parcelles élémentaires de taille réduite ; coût excessif du dispositif.

Dans ces deux cas, les restitutions différentes des réseaux élémentaires, présentant pourtant des écartements entre drains comparables, ont conduit à mener des investigations pédologiques approfondies. Celles-ci ont permis à leur tour l'identification d'organisations structurales différentes des horizons argilliques, non décelées jusqu'alors : faciès prismatique et vertique à Bouillac ; faciès prismatique à charge ferrugineuse variable à Poucharramet. Des mesures et observations complémentaires (cf. paragraphe 2.3) ont permis ensuite de comprendre le rôle de ces états structuraux sur le fonctionnement des réseaux.

La technique du drainage s'est donc comportée ici comme un moyen de révélation de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques et structurales des sols.

Ce type de finalité offert par le drainage pourrait être valorisé davantage dans l'avenir pour étudier le comportement hydrique des sols engorgés, à condition d'associer pour cela les multiples démarches mises en oeuvre sur les sites mentionnés.

2.3 Approche pluridisciplinaire

Les avantages du recours effectif à des méthodes d'investigations différentes, appliquées sur le même milieu, ont été bien montrées dans les différents programmes engagés. A cet égard, l'AIP a normalement joué son rôle de rapprochement d'équipes de spécialités différentes.

Les techniques le plus souvent mises en oeuvre simultanément (en totalité ou en partie) ont été notamment les observations macro et micromorphologiques, les suivis hydrauliques, hydrologiques (humidimétrie, tensiométrie, débitmétrie, piézométrie, détermination de la conductivité hydraulique), des déterminations physiques du sol (courbes de gonflement-retrait, pénétrométrie, tests de contrainte équivalente), la cartographie, les enquêtes.

Cette conjugaison d'approches se retrouve aussi bien pour des essais en laboratoire (SORANI et BRUAND), que lors d'études in situ (GUIRESSE et BOURGEAT, ZIMMER, FAVROT et al., CHOSSAT, PENEL et PAPY).

L'intérêt de ce type de démarche est évident : le pédologue peut caler une interprétation de données descriptives (en termes de comportements) sur des données objectives telles que direction et intensité des flux hydriques ; l'hydraulicien peut relier des mesures à des organisations structurales identifiables et disposer ainsi d'éléments de généralisation de ses modèles par la cartographie ; le physicien du sol peut rapporter le comportement de matériaux à celui d'horizons ou de profils réels.

2.4 Outils de prévision

Deux communications abordent plus spécifiquement le problème de la prévision du comportement des sols vis à vis du drainage.

Dans le premier cas (CONCARET et al., non publié ici), il s'agit de la recherche de tests simplifiés permettant de caractériser le comportement mécanique des sols ; ces tests comportent la mesure de la contrainte équivalente ou du déficit de teneur en eau à pF3 entre pâte déstructurée et agrégats issus du même prélèvement, ou encore la mesure de la variation de hauteur de terre dans une colonne soumise à une pression standardisée. La confrontation des résultats de ces tests avec l'observation de comportements effectifs de sols réagissant différemment vis-à-vis du drainage devrait permettre de mieux choisir les techniques de drainage à mettre en oeuvre, en fonction de la nature des sols identifiés lors des études préalables.

3. ASPECTS SCIENTIFIQUES ET APPLIQUES

Malgré le caractère finalisé des recherches entreprises lors de l'AIP, un certain nombre de résultats ont été obtenus qui relèvent de l'amélioration des connaissances relatives à la genèse, aux propriétés et au comportement des sols.

SORANI et BRUAND par exemple ont mis en évidence le rôle important de la réduction de l'absorption de l'eau dans les mécanismes d'évolution du comportement structural d'échantillons soumis à l'action de molécules particulières (amendements et conditionneurs de sols). Autre exemple : GUERIF et ROYERE, pour la mise au point du pénétromètre à plaque, abordent les relations pression-déformation des matériaux d'un sol soumis à une contrainte mécanique. CHOSSAT, grâce au pénétromètre à pointe utilisé au laboratoire et au champ, établit des relations entre teneurs en eau du sol, résistance mécanique à la pénétration et portance.

FAVROT et al., en associant des données minéralogiques, hydrologiques et cartographiques, expliquent la genèse des structures verticales et prismatiques des sols de boubènes par une altération différente de la smectite initiale. Cette altération résulte d'une acidification plus ou moins forte du milieu selon les possibilités de drainage interne et de soutirage des cations.

Parmi les résultats de l'AIP directement transposables dans la pratique agricole, le rôle bénéfique des amendements sur le fonctionnement du drainage dans les argiles de Lignièrès a été vérifié à la fois au cours d'études au laboratoire (SORANI et BRUAND), puis lors d'essais au champ (thèse de SORANI). La conception des réseaux de drainage dans les sols de boubènes du Sud-Ouest (choix des écartements) a été affinée par l'interprétation des données acquises sur les sites de Bouillac (FAVROT et al.) et de Poucharramet (GUIRESSE et BOURGEAT). Les tests de mécanique des sols orientent également le choix des modes de drainage, l'objectif étant de ne recourir aux techniques les plus coûteuses (remblai poreux) qu'en cas de nécessité.

4. CONCLUSION

Les publications relatives aux thèmes 3, 4 et 5 de l'AIP traduisent concrètement la réponse apportée par différentes équipes de recherches aux questions posées dans l'appel d'offre rédigé en 1985. Mais bien d'autres documents rendent compte également des efforts accomplis dans ce sens, qu'il s'agisse de mémoires de thèse, de DEA ou de publications

parues dans des revues scientifiques et techniques non reprises dans cet ouvrage (voir à cet égard les pages 8 à 11 du compte rendu du colloque de l'AIP - FAVROT, 1989).

L'objectif méthodologique affiché en 1985, notamment dans le domaine de la complémentarité de techniques différentes appliquées sur des mêmes sites, peut être considéré comme atteint. En revanche, les travaux souhaités dans le domaine de l'étude du rôle des conditionneurs de sol et des amendements sur le fonctionnement du drainage, n'ont pas été aussi nombreux que prévus.

Plusieurs des sujets abordés dans les thèmes précédents font l'objet de prolongements ; il s'agit notamment des études in situ du rôle des états structuraux sur la dynamique des transferts hydriques et sur la portance (CEMAGREF Antony, INRA-SAD Grignon), de l'analyse plus approfondie de l'incidence de l'organisation structurale des sols de boubènes sur leurs réponses au drainage (INRA Montpellier et Versailles, ENSA Toulouse), auxquels peuvent se rattacher les travaux sur la caractérisation des matériaux argileux (CEMAGREF Antony, INRA Orléans et Rennes) entrepris dans le cadre du thème 2.

Toujours dans le domaine de la structure du sol, la collaboration effective et durable entre équipes de disciplines et d'organismes de recherches différents constitue enfin un autre acquis important de l'AIP.

ROLE DE LA STRUCTURE DU SOL SUR LE FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE D'UN RESEAU DE DRAINAGE EN SOL LESSIVE HYDROMORPHE DU BASSIN AQUITAIN

J.C. FAVROT¹ - R. BOUZIGUES¹ - C. LONGUEVAL² -
J.C. CHOSSAT³ - F. BOURGEAT⁴

1 - INRA, Laboratoire Science du Sol, 2 Place Viala, 34060 MONTPELLIER Cedex

2 - Compagnie d'Aménagement des Côteaux de Gascogne, Chemin de l'Alette,
B.P. 215, 65000 TARBES

3 - CEMAGREF, Division Hydraulique Agricole, 50 Avenue de Verdun, B.P. 3,
33610 GAZINET

4 - ENSA, Chaire de Pédologie, 145 av. de Muret, 31000 TOULOUSE

RESUME

Le volume et la composition des eaux de drainage d'un dispositif expérimental situé près de Toulouse sont suivis, depuis 1977, sur 12 parcelles élémentaires adjacentes. Le sol est limoneux en surface, limono-argileux en profondeur ; il surmonte un cailloutis alluvial profond (sol lessivé hydromorphe ou luvisol gleyique FAO). Affecté par une nappe perchée temporaire, il est représentatif des sols régionaux ("boulbènes"). La réponse au drainage des parcelles élémentaires permet de les regrouper en deux catégories principales. Un examen minutieux du sol a montré que ces résultats s'expliquaient par la juxtaposition de deux faciès structuraux au sein des horizons argilliques de ce sol, considéré jusque là comme homogène. Il existe en effet un faciès "prismatique" à plans verticaux nets et un faciès "vertique" avec slickensides. Des suivis hydrologiques (piézométrie, tensiométrie), des analyses d'eau et des déterminations hydrodynamiques (conductivités hydrauliques horizontale et verticale) ont montré la cohérence du comportement hydrique de chacun de ces faciès avec leur mode de réponse au drainage.

MOTS-CLES : Drainage - Expérimentation - Structure du sol - Sol lessivé hydromorphe - Comportement hydrique.

ABSTRACT : Effect of soil structure on hydraulic behaviour of a drainage system on gleyic luvisol.

Drainage experimental field of Bouillac (near Toulouse -France) has been monitored since 1977. 3 drain spacings were tested on 12 plots. Drainage outflow and water chemical analysis were measured. The soil is a gleyic luvisol with a loamy surface layer (clay content less than 15 %) and a 45 % clayed layer appearing between 50 and 60 cm. The substratum is an alluvial pebbly layer 1.5 m and 3.5 m in depth. Experimental plots are of two types according to their drainage response. Detailed soil observations show strong differences between the two groups according to soil structure (subhorizontal structural plans with slickensides for the first one, vertical prismatic structure for the second). Each type of structure can be related to a specific hydric behaviour which is consistent with drainage response.

KEY-WORDS : Drainage - Field experimentation - Soil structure - Gleyic Luvisol - Hydraulic behaviour.

Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 145-158
AIP CEMAGREF - INRA Maitrise des excès d'eau

Nota : *Ce texte reprend, avec quelques modifications et compléments, le contenu de la communication "Structure du sol, drainage et environnement" présentée par les mêmes auteurs au XIV^e Congrès International des Irrigations et du Drainage de Rio de Janeiro 1990, Q42, 367-379.*

1. INTRODUCTION

Le suivi régulier de dispositifs expérimentaux de drainage, implantés sur des milieux bien identifiés, permet de déterminer de manière inter- et intra-annuelle, le volume et la composition des eaux de drainage (ALESSANDRELLO et al., 1976 ; LESAFFRE et LAURENT, 1983). Les résultats obtenus permettent non seulement d'améliorer la conception et l'utilisation du drainage au plan régional, mais également d'évaluer son incidence sur la qualité des eaux naturelles, de surface et de profondeur. Ces interprétations supposent toutefois une bonne analyse du fonctionnement du réseau, entre autres l'évaluation de l'importance relative des différents flux (débit de pointe, phase de tarissement) en liaison avec les épisodes climatiques (FAVROT, 1983 ; LESAFFRE et LAURENT, 1983). A cet égard, la prévision des transferts hydriques au cours du drainage ne peut être obtenue sans une étude approfondie préalable de l'organisation structurale du milieu concerné (BOUZIGUES et FAVROT, 1984). C'est précisément ce type de démarche permettant de bien relier l'organisation de la couverture pédologique et la réponse des sols au drainage qui va être présenté ci-après. L'exemple choisi est représentatif de sols sur alluvions anciennes très fréquents dans le Sud-Ouest de la France. Après avoir montré comment peut être mis en évidence le rôle de la structure du sol sur les paramètres révélateurs du fonctionnement d'un réseau de drainage, nous présenterons les diverses approches complémentaires visant à identifier le rôle de la structure sur le comportement hydrique des sols.

2. MISE EN EVIDENCE DU ROLE DE LA STRUCTURE DES SOLS SUR LEUR MODE DE REPONSE AU DRAINAGE

2.1 Milieu régional et site expérimental étudié

Le contexte géologique étudié est celui des terrasses d'alluvions anciennes de la Garonne. Schématiquement, les formations rencontrées se caractérisent par la présence de matériaux à dominance limoneuse, irrégulièrement épais (1,5 à 3,5 m), au-dessus d'un cailloutis alluvial, siège d'une nappe phréatique. Les sols issus de ces dépôts sont désignés par le terme vernaculaire de "boulbènes". Ils présentent une forte discontinuité texturale vers 50 cm de profondeur et une intense hydromorphie. Ils couvrent plusieurs centaines de milliers d'hectares, en Midi-Pyrénées et Aquitaine.

Figure 1 - Localisation du dispositif expérimental

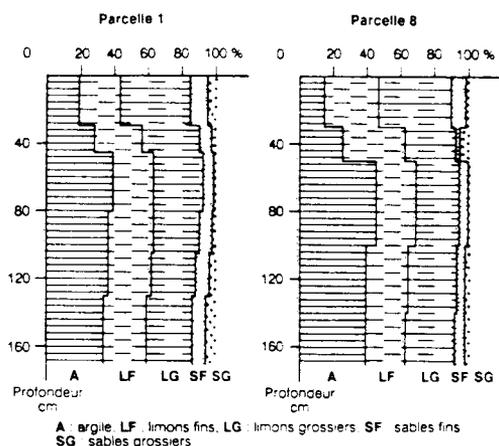
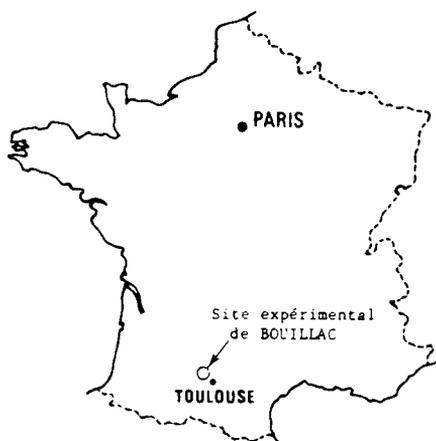


Figure 2 - Profils granulométriques traduisant l'homogénéité texturale des sols

N° de parcelle	Profondeur cm	PH eau	Complexe absorbant en meq 100 g					Sat
			Ca	Mg	K	Na	H	
1	0-30	7,5	8,1	0,69	0,25	0,53	7,3	Sat
	30-45	7,5	9,3	0,81	0,19	0,61	8,6	Sat
	45-80	7,4	13,5	2,78	0,26	0,43	13,2	Sat
	80-105	6,4	10,4	4,25	0,24	0,31	12,4	Sat
	105-130	5,5	8,4	4,48	0,23	0,24	11,8	Sat
	150-170	5,5	7,7	4,12	0,21	0,25		Sat
8	0-30	7,6	7,4	0,63	0,25	0,64	6,9	Sat
	30-50	7,9	10,9	1,00	0,23	0,64	10,3	Sat
	50-100	7,6	17,3	2,94	0,34	0,82	17,1	Sat
	100-140	7,0	13,4	4,86	0,29	0,47	14,8	Sat
	150-160	6,5	11,4	5,12	0,28	0,47	14,3	Sat

Tableau 1 - Caractéristiques chimiques des sols de deux parcelles adjacentes marquées par une organisation structurale différente

Le dispositif expérimental de drainage étudié a été installé par la Compagnie d'Aménagement des Côteaux de Gascogne (C.A.C.G.) en 1977. Il se situe près du village de Bouillac (Tarn), sur une terrasse moyenne de la Garonne (figure 1). Les caractéristiques physico-chimiques du sol (figure 2 et tableau 1) révèlent de faibles variations intra-parcellaires. L'ensemble des données détaillées acquises sur le site de Bouillac par différentes équipes, dans le cadre de l'AIP Maîtrise des excès d'eau, est rassemblé dans un rapport spécifique (BOUZIGUES et VINAS, 1989).

Les essais ont été installés sur une parcelle de 16 ha, de pente générale de 0,4%. Le dispositif expérimental (figure 3) comprend 4 blocs de 3 parcelles élémentaires (d'une superficie de 5.400 m² chacune), bien isolées hydrauliquement entre elles. Trois écartements sont testés dans chaque bloc : 15 m, 20 m et 30 m. Les appareillages, rassemblés dans deux chambres de mesure, permettent d'enregistrer les débits de chaque réseau élémentaire et de prélever des eaux de drainage. Un pluviographe enregistre les précipitations au pas de temps horaire.

2.2 Réponse au drainage des parcelles élémentaires

Dans cet article, on ne s'intéressera pas au rôle de l'écartement des drains sur l'efficacité du drainage. On mettra l'accent, en revanche, sur le mode de réponse au drainage des différents réseaux élémentaires suivis, en tant que révélateur de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol. Cette variabilité est révélée par les valeurs de paramètres différents : le coefficient de restitution, la forme de l'hydrogramme et la composition des eaux évacuées.

2.2.1 Coefficient de restitution

Telles qu'elles sont représentées sur les figures 3 et 4, les valeurs obtenues durant la saison de drainage (décembre à avril) pour les coefficients de restitution (rapport du volume d'eau restitué par le réseau au volume de la pluie ayant généré l'épisode de drainage) permettent d'ordonner les parcelles élémentaires en 3 catégories :

- les réseaux à très faible coefficient de restitution (moins de 5 %) ;
- les réseaux intermédiaires (10 à 20 %) ;
- les réseaux à coefficient de restitution élevé (20 à 30 %).

Toutefois, ces coefficients de restitution varient fortement, selon l'intensité des épisodes pluvieux et le degré de saturation du sol. Par exemple, pour la période du 28/1 au

7/2/85, ils représentent 70% pour la parcelle 8 et seulement 9% pour la parcelle 1. L'écartement entre drains intervient peu puisque des parcelles élémentaires de même écartement relèvent de 2 classes définies précédemment.

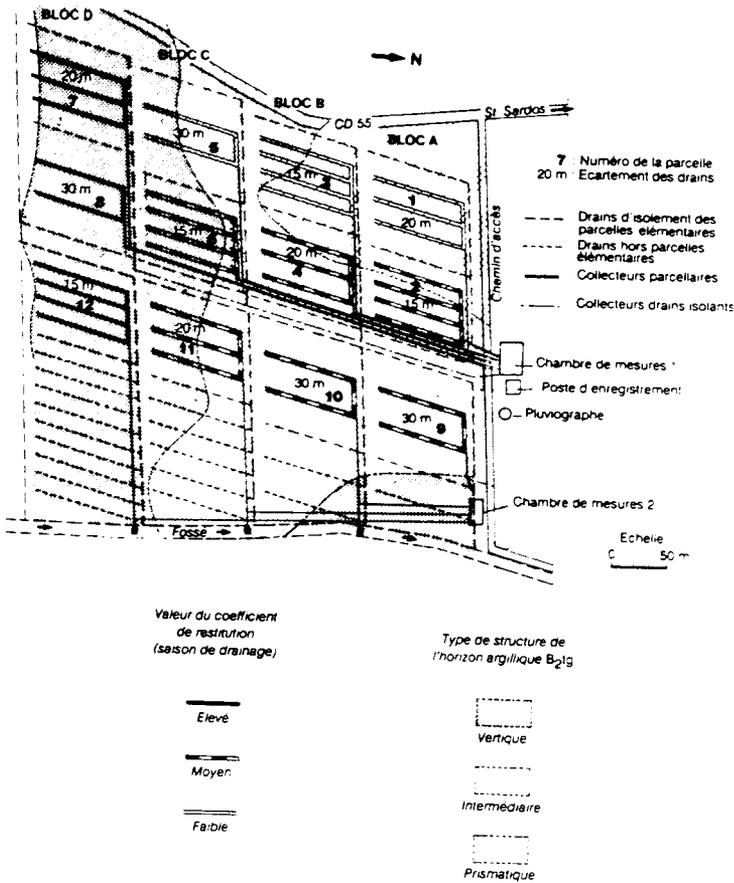


Figure 3 - Plan du site expérimental de Bouillac, avec importance relative du coefficient de restitution de chaque réseau élémentaire et répartition des faciès structuraux

2.2.2 Débits de pointe

L'examen de la forme des hydrogrammes (figure 5) met aussi en évidence deux situations extrêmes. Dans les parcelles élémentaires 7-8-12, les débits de pointe sont très marqués (3,0 l/s/ha). En revanche ils ne dépassent pas 0,5 l/s/ha sur la parcelle 1. Ici encore, le classement constaté ne dépend pas de l'écartement des drains.

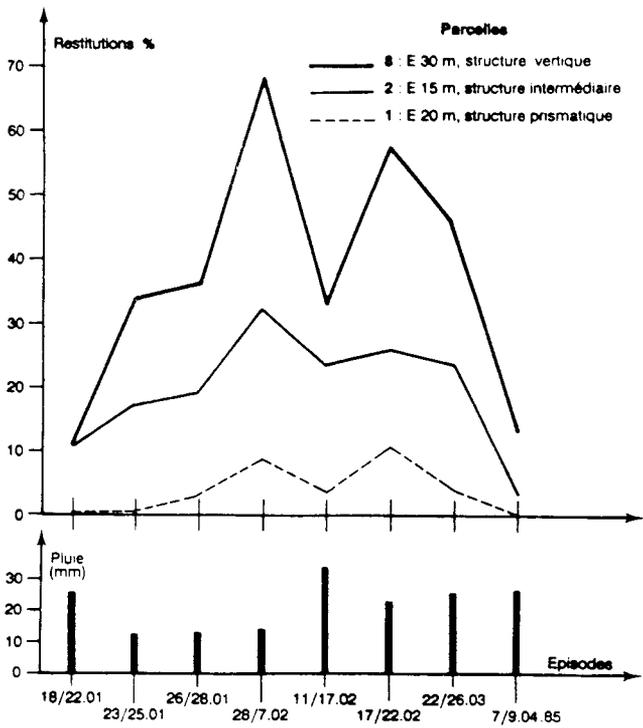


Figure 4 - Variation du coefficient de restitution pour des sols seulement différenciés par leur structure

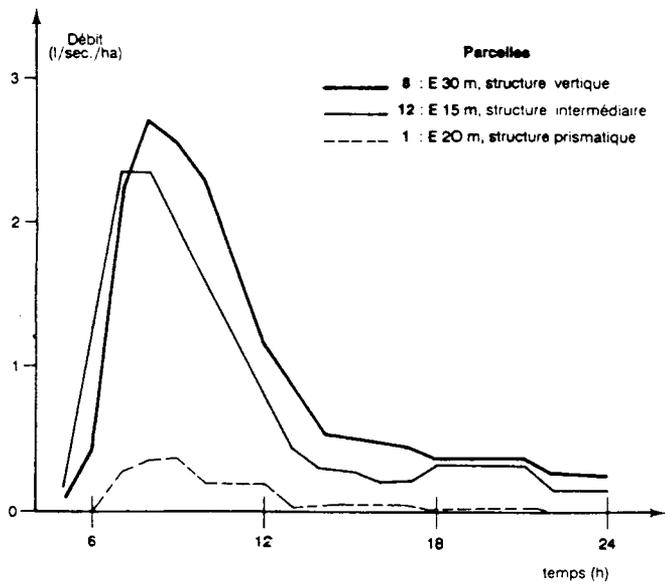


Figure 5 - Débits de pointe pour des sols seulement différenciés par leur structure

2.2.3 Composition chimique des eaux de drainage

L'évolution dans le temps des teneurs en cations, anions et en P_2O_5 des eaux prélevées sur chacune des parcelles élémentaires varie sensiblement. Toutefois, deux groupes de parcelles s'individualisent, représentés respectivement par les parcelles 1 et 8. Ainsi, par exemple, les concentrations en K^+ , P_2O_5 sont plus élevées dans le groupe de la parcelle 8 que dans celui de la parcelle 1 (tableau 2). D'une manière générale, la composition chimique des eaux de drainage montre :

- des concentrations anormalement élevées en Na^+ , Cl^- et HCO_3^- ; ces éléments proviennent des eaux d'irrigation qui en sont fortement chargées ;
- des teneurs assez élevées en NO_3^- en liaison avec les épandages azotés et la minéralisation de la matière organique ;
- des concentrations relativement importantes en K^+ et P_2O_5 , en relation avec les fumures ;
- des entraînements assez importants en Ca^{++} et Mg^{++} .

N° de parcelle	Episodes	Vol. m ³ /ha Pluie	Drainé	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	CO ₃ ⁻⁻⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	P ₂ O ₅ mg/l											
1	27.1.86	563	13	Dosage non réalisé faute d'écoulements suffisants																			
	29.4.86																						
	20.1.88			657	72	46	10,8	7,4	3,5	1,2	1,1	81	69	1,1									
	04.2.88																						
	05/16.2.88														710	148	36	9,6	69	2,7	0	100	63
15/28.3.88	887	19	54												8,4	76	4,0	0	106	74	43	6,7	
8	27.1.86	112	31	66	13,2	57	3,9	3,7	13,4	88	93	1,8											
	04.2.86																						
	06/12.4.86												51	21	84	16,8	71	3,9	3,4	13,4	113	87	1,8
	19/24.4.86												240	8	70	12,0	61	4,7	4,2	13,4	89	61	1,8
	25/29.4.86												160	31	54	5,4	57	3,8	3,6	108	70	93	3,4
	20.1.88	657	201	28	4,8	71	10,1	0	1,6	58	38	0,0											
	04.2.88																						
	05/16.2.88												710	336	14	3,6	55	10,1	0	151	18	20	1,7
	15/28.3.88												887	128	50	7,2	60,5	19,5	0	103,7	140	30	12,0

Tableau 2 - Composition chimique des eaux de drainage de deux parcelles adjacentes différenciées par la structure du sol

En définitive, les exportations d'éléments fertilisants par le réseau de drainage varient d'une année à l'autre et diffèrent aussi sensiblement selon le fonctionnement hydrique de la parcelle élémentaire. Ainsi, pour l'année 1986 peu pluvieuse et l'année 1988 plus humide, les pertes varient respectivement de 8 à 18 kg/ha en NO_3^- , de 0,4 à 8,0 kg/ha en K^+ et de

0,2 à 2,5 kg/ha en P₂O₅ pour la parcelle 8. Pour la parcelle 1 ces entrainements par les eaux de drainage, qui n'ont même pas pu être chiffrés en 1986, ne s'élèvent qu'à 14 kg/ha en NO₃⁻, 0,7 kg/ha en K⁺ et 0,3 kg/ha en P₂O₅ en 1988.

3. IDENTIFICATION DU ROLE DE LA STRUCTURE SUR LA REPOSE DES SOLS AU DRAINAGE

3.1 Investigations de terrain

3.1.1 Description morphologique

Grâce à l'observation détaillée de nombreux profils, il est apparu que la structure du sol permettait de bien différencier les parcelles élémentaires. En effet, l'organisation structurale des horizons argilliques B_{tg} s'est révélée être de deux types principaux (figure 6):

- dans le 1^{er} faciès (parcelle 1), elle est de type prismatique, les fissures présentant une continuité verticale très nette ;
- dans le 2^{ème} faciès (parcelle 8), la superposition de vastes slickensides subhorizontaux (> 1m²), tous les 5 à 10 cm, donne une apparence verticale à cette organisation.

Des formes de transition entre ces deux faciès se rencontrent également (parcelles 2 et 3, figure 3).

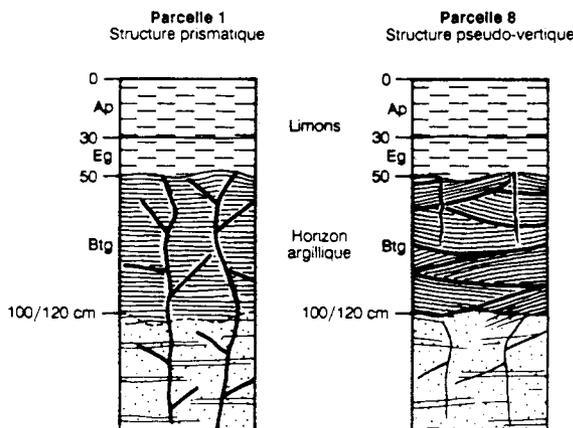


Figure 6 - Coupe schématique de sols semblables différenciés par la structure des horizons argilliques

3.1.2 Extension spatiale des faciès structuraux

Une cartographie très détaillée des sols du site de Bouillac (puis d'autres parcelles plus ou moins éloignées), sur la base de sondages à la tarière et de profils pédologiques, a permis de préciser les modes de distribution et l'extension des faciès structuraux (BOUZIGUES et VINAS, 1989 ; de SUREMAIN, 1989).

Ainsi, sur la moyenne terrasse de la Garonne, en fonction du microrelief, la structure prismatique se rencontre en position de sommet alors que le faciès vertique se localise dans les creux ou sur les parties planes. Un faciès intermédiaire occupe les pentes, plus ou moins longues, raccordant creux et bosses dont l'écart des cotes ne dépasse pas 0,50 m. Le passage d'un faciès à l'autre est progressif, lié aux ondulations de la microtopographie.

Ces divers faciès structuraux ont été observés également, avec cette même règle de distribution, sur les parcelles adjacentes au site expérimental et sur des terrains éloignés de plusieurs kilomètres. En outre, à une trentaine de kilomètres de là, sur la basse terrasse du Tarn, dans et à proximité d'un autre dispositif expérimental de drainage (à Villaudric, près de Villemur), les faciès prismatique et vertique ont aussi été observés. Toutefois, le mode de répartition est différent : alors que le premier coïncide avec une faible profondeur d'apparition du cailloutis alluvial (100 à 120 cm), le second, vertique, n'apparaît que lorsque cette profondeur est plus grande (> 120 cm). Le passage d'un faciès à l'autre est parfois brutal car lié aux irrégularités d'apparition des galets.

Afin de vérifier si la présence de ces deux faciès pouvait être le facteur explicatif de la réponse différente au drainage des réseaux élémentaires, d'autres investigations ont été mises en oeuvre, notamment pour comparer la dynamique de l'eau dans chaque cas.

3.2 Etude du comportement hydrique des deux faciès structuraux

La dynamique hydrique des deux types de sols a été caractérisée grâce à un suivi piézométrique et tensiométrique, et à la détermination des valeurs des conductivités hydrauliques saturées.

3.2.1 Suivi piézométrique

Sur deux parcelles élémentaires (1 et 8), représentatives des deux faciès précédents, une batterie de 4 piézomètres (30 à 150 cm) a été installée à l'interdrain. Le dépouillement des enregistrements réalisés à pas de temps horaire conduit aux constatations suivantes : à la

suite d'épisodes pluvieux de la saison hivernale (1988), la nappe perchée s'installe et colonise parfois l'horizon travaillé. Toutefois, le temps de présence et la hauteur de nappe sont plus faibles pour le sol à faciès prismatique (parcelle 1).

3.2.2 Suivi tensiométrique

Dans chacune des deux parcelles précédentes, à proximité des piézomètres, une batterie de tensiomètres a été installée aux profondeurs suivantes : 28, 50, 70, 90 et 150 cm.

Les résultats obtenus concordent avec les données piézométriques. Ils font apparaître (figure 7) de nettes différences de comportement hydrique en liaison avec l'organisation structurale. Pour la parcelle 8 à faciès verticale, les gradients de potentiel très limités caractérisent une nappe sans écoulement profond. Ces faibles variations de potentiel impliqueraient des transferts de flux d'eau horizontaux (LESAFFRE et ZIMMER, 1987) d'où les restitutions et les débits de pointe plus élevés pour ce type de sol. A l'inverse, pour la parcelle 1 à faciès structural prismatique, les gradients de potentiel soulignés entre 90 et 150 cm de profondeur expliqueraient les écoulements verticaux profonds non interceptés par le réseau de drainage.

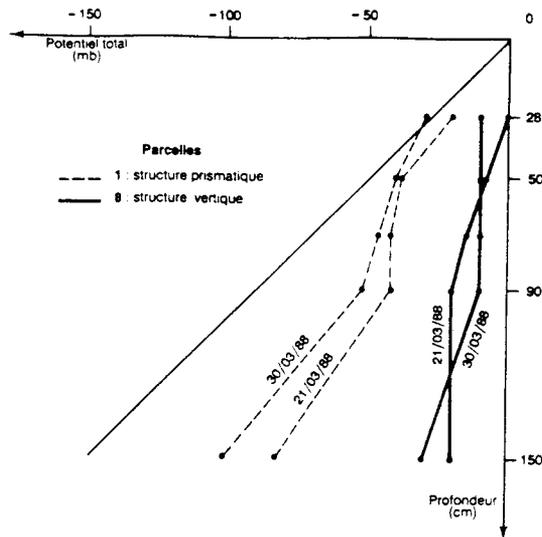


Figure 7 - Evolution des profils de potentiel total observés à l'inter-drain pour des sols seulement différenciés par leur structure

3.2.3 Mesures de conductivité hydraulique

Des mesures de conductivité hydraulique verticale K_V et horizontale K_H ont été effectuées en 1988 au laboratoire sur six gros monolithes cubiques (30 cm d'arête) prélevés en période humide dans les horizons argilliques (3 cubes dans le faciès prismatique et 3 dans le faciès vertique). Les valeurs obtenues (BOUZIGUES et VINAS, 1989) avec une mise en charge à la partie supérieure du cube ont été les suivantes (figure 8) :

- K_V de l'ordre de 0,35 m/j pour le faciès prismatique, 0,2 m/j pour le faciès vertique ;
- K_H respectivement de 0,03 m/j et 0,1 m/j.

Ces valeurs sont cohérentes avec l'organisation structurale des horizons.

En revanche, en 1989, de nouvelles mesures de K_V , effectuées sur six nouveaux cubes, mais en assurant une mise en charge à partir de la base des cubes, n'ont pas donné les mêmes résultats. Si la conductivité hydraulique verticale du faciès prismatique est toujours de l'ordre de 0,4 m/j, elle dépasse 2,0 m/j en moyenne pour le faciès vertique, avec de fortes variations d'un monolithe à l'autre (0,9 à 3,4 m/j) (de SUREMAIN, 1989).

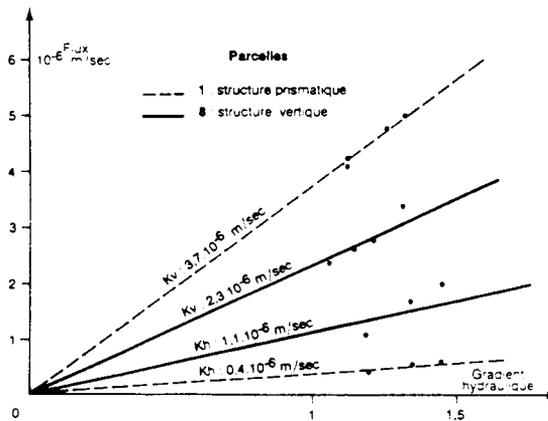


Figure 8 - Conductivités hydrauliques verticales (K_V) et horizontales (K_H), à saturation, pour des sols seulement différenciés par leur structure

3.2.4 Interprétation - Discussion

Si l'on rapproche les données hydrologiques, hydrodynamiques et débitmétriques des observations morphologiques de terrain, on constate qu'il y a une bonne cohérence entre elles. Ainsi, le faciès prismatique est le plus perméable et favorise des transferts hydriques

en profondeur, l'inverse étant vérifié dans le faciès vertique. L'ensemble des résultats peut se résumer par le tableau 3.

Si l'on interprète le mode de réponse au drainage des réseaux, en termes de risques de pollution, les conclusions suivantes peuvent être dégagées. Pour les sols à faciès vertique, où les restitutions par les réseaux de drainage sont beaucoup plus importantes, les risques potentiels de pollution concernent les eaux de surface. En revanche, dans l'autre cas, où prédomine une évacuation verticale non interceptée par les drains, les risques concernent principalement les eaux profondes de la nappe phréatique. Toutefois, les exportations par les eaux de drainage d'éléments minéraux sont assez modestes, et varient sensiblement selon les années, résultats constatés aussi dans d'autres milieux (ARLOT, 1990 ; BRANCHARD, 1984 ; SKAGGS et GILLIAM, 1981). La présence de Na^+ , Cl^- , HCO_3^- en quantité non négligeable pose par ailleurs le problème de la qualité des eaux d'irrigation.

Critères étudiés	Faciès prismatique	Faciès vertique
- Situation topographique	micro-butte	micro-creux
- Coefficient de restitution	faible	moyen
- Débit de pointe	faible	élevé
- Composition des eaux (K^+ , P_2O_5)	faibles	moyens
- Piézométrie : présence et hauteur de nappe	réduit	plus élevé
- Tensiométrie	transferts en profondeur	transferts en profondeur limités
- Conductivité hydraulique verticale	moyenne	variable
- Conductivité hydraulique horizontale	très faible	faible

Tableau 3 - Comparaison entre faciès prismatique et faciès vertique

4. CONCLUSION

Le rôle de l'organisation structurale de certains horizons sur leur comportement hydrique est bien connu, mais il est rarement quantifié (KOOSTRA et al., 1985). Sur le site expérimental de Bouillac, grâce à l'analyse de la réponse au drainage de réseaux élémentaires, combinée à des approches hydrologique et pédologique, une meilleure compréhension et une caractérisation approfondie de ce rôle ont pu être apportées. Dans les mêmes sols lessivés hydromorphes (boulbènes) du bassin de la Garonne, GUIRESSE (1989) a également démontré un rôle comparable, les différents types de structure identifiés étant alors définis en fonction de la teneur en fer et du mode de distribution des oxyhydroxydes ferrugineux présents dans les horizons argilliques.

Grâce à la mise en évidence de critères morphologiques (couleurs, compacité) pour la différenciation des faciès structuraux (BOUZIGUES et VINAS, 1989), il est possible de généraliser, par la cartographie des sols, les résultats obtenus ponctuellement. La délimitation plus détaillée d'unités de sols de boubènes permettra notamment d'améliorer la conception des nouveaux réseaux de drainage (écartement plus faible sur sol à structure verticale).

Par ailleurs, l'interprétation de données physico-chimiques (pH) et minéralogiques, acquises sur le plan régional, permet de proposer une première hypothèse quant à la genèse de ces faciès (BOUZIGUES et al., à paraître). Tout se passe comme si, après une phase de genèse de smectites par transformation de minéraux micacés, le bon drainage interne des sols en position de micro-butte (ou sur cailloutis peu profond en vallée du Tarn) avait entraîné une forte acidification du profil puis une altération des argiles gonflantes conduisant à des structures prismatiques. En revanche, en positions basses, le mauvais drainage naturel aurait limité le départ de cations et aurait permis de maintenir la smectite, cause principale d'une structure verticale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALESSANDRELLO E., CONCARET J., GUYOT J., PERREY C., 1976 - Circulation de l'eau en sols limoneux lessivés drainés. CR. Ac. Agri., 62(5), 364-373.

ARLOT M.P., 1990 - Exportation d'azote par les eaux de drainage souterrain. Actes du 14^e Congrès Int. des Irrig. et du Drainage - Rio de Janeiro, Q42, 345-365.

BRANCHARD J.P., 1984 - Fonctionnement et qualité des eaux dans des sols drainés soumis à épandage. Thèse ENSA Rennes, 122 p.

BOUZIGUES R., FAVROT J.C., 1984 - Analyse morphologique de la porosité des horizons B_g de deux sols lessivés à pseudogley. Contribution au diagnostic de leur fonctionnement hydrique. Colloque sur le fonctionnement hydrique comportement des sols. AFES Dijon, 41-54.

BOUZIGUES R., FAVROT J.C., TESSIER D., VALLES V. (à paraître) - Caractérisation de séquences de sols lessivés hydromorphes à structure prismatique et verticale dans le bassin de la Garonne.

BOUZIGUES R., VINAS A., 1988 - Identification de différents faciès structuraux dans les horizons argilliques des sols de boubènes. Conséquences sur les transferts hydriques. INRA Montpellier n° 595, 92 p.

FAVROT J.C., 1983 - Les phénomènes de transfert en drainage agricole. Bull. Inf. CEMAGREF n° 310, 3-14.

GUIRESSE M., 1989 - Drainage en sols de Boubènes. Relations entre les caractéristiques morphologiques et les propriétés hydrodynamiques des sols. Thèse INP Toulouse, 212 p.

KOOSTRA M.J., BOUMA J., BOERSMA O.H., JAGER A., 1985 - Soil structure differences and associated physical properties of some loamy typic fluvaquents in the Netherlands. *Geoderma*, 36, 215-228.

LESAFFRE B., LAURENT F., 1983 - Valeur et durée des débits de pointe du drainage agricole en sol à pseudogley. *C.R. Ac. Agri.*, 69(16), 1371-1381.

LESAFFRE B., ZIMMER D., 1987 - Régime hydrique d'un sol drainé : comparaison des phases débit de pointe et tarissement. *Science du Sol*, 25(4), 217-229.

LONGUEVAL C., 1984 à 1988 - C. R. annuels. Fonctionnement du réseau expérimental de drainage de BOUILLAC, CACG, 30 à 50 p.

LONGUEVAL C., 1986 - Etude du Secteur de Référence de Garganvilar (Tarn et Garonne). Opération ONIC-MINAG - 159 p.

SKAGGS R.W., GILLIAM G.W., 1981 - Effect of drainage system design and operation on nitrate transport. *Trans. of ASAE*, 24(4), 929-934.

de SUREMAIN B., 1989 - Cartographie détaillée et suivi hydrologique des faciès structuraux des sols de boubènes. Mémoire DEA - ENSA - USTL Montpellier, 81 p.

ESTIMATION DE LA PRATICABILITE ET PENETROMETRIE SUR PARCELLES DRAINEE ET NON DRAINEE

J.C. CHOSSAT ¹

1 - CEMAGREF, Division Hydraulique Agricole, 50 Avenue de Verdun, B.P. 3
33610 CESTAS

RESUME

L'étude des variations de l'état hydrique du sol sous l'influence des conditions climatiques est une voie d'approche dans la quantification des jours disponibles. Pour accéder à la traficabilité, il faut compléter cette étude par la réaction mécanique du sol. Cet aspect peut être abordé en prenant en compte l'ensemble de la variabilité de la parcelle comme le fait un expert agriculteur, en confrontant ces résultats avec une mesure objective, telle que la pénétrométrie. Les relations qu'on en tire permettent de définir des seuils qui seront utilisés pour établir un calendrier des possibilités d'intervention.

MOTS-CLES : Drainage - Jours disponibles - Pénétrométrie.

ABSTRACT : Penetration resistance and trafficability on drained and undrained plots

The study of the soil moisture content, under climatic conditions, is an approach of the quantification of the working days in field. Trafficability or workability are also fonction of the mechanical properties of the soil. In the field the principle is to allow the farmer to estimate the trafficability and the workability of his plot. This valuation is related to tests of moisture content and penetration resistance. By correlating such measurement, it is possible to define critical levels for change of state, these can be used, in simulation models, for study of suitable days for field work.

KEY - WORDS : Drainage - Trafficability - Penetrometry.

*Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 159-172
AIP CEMAGREF-INRA Maîtrise des excès d'eau*

1. INTRODUCTION

Dans le contexte économique actuel, la gestion des entreprises agricoles demande une attention toute particulière et, dans le cadre des décisions stratégiques prises par l'exploitant, la connaissance du nombre de jours disponibles apporte des informations déterminantes pour l'organisation du travail dans l'exploitation agricole.

Ces jours sont définis par THOMASSON (1982) comme ceux où l'on a "la capacité de réaliser une opération culturale proche de l'optimum et sans provoquer de dommages excessifs", ce qui sous-entend l'idée d'évaluation de ces dommages. Comme FEODOROFF et al. (1972), PAPY et SERVETTAZ (1986), nous les définirons comme ceux "où les conditions de travail permettent d'obtenir un état du sol acceptable".

Divers facteurs influencent la disponibilité d'une parcelle. Le rôle du climat est évidemment prépondérant et, dans une première approche, on peut penser que l'estimation des jours disponibles ne dépend que de lui. Ainsi, historiquement, c'est d'abord avec les précipitations que le travail sur les parcelles fut mis en relation. Puis, les modèles statistiques proposés par FEODOROFF et al. (1972) utilisent une relation directe entre climat et praticabilité en prenant en compte la pluie et l'ETP. Ces relations sont reprises dans des modèles économiques plus élaborés, tel celui d'ATTONATY et al. (1987). Des relations statistiques avec le régime des pluies ont aussi été recherchées par BOUE et THIEBAULT (1985) ainsi que l'utilisation des facteurs météorologiques liés directement à l'avis d'experts (REBOUL, 1969 ; REBOUL et al., 1979).

Mais dans une démarche cohérente d'évaluation du nombre de jours disponibles on ne peut pas ne pas tenir compte des propriétés hydriques du sol. Des modèles faisant intervenir le sol ont donc été mis au point, comme DRAINMOD, qui repose sur une relation entre la hauteur de la nappe et la praticabilité (SKAGGS, 1980), ou comme SWATER, qui simule les mouvements de l'eau dans un profil en présence d'une nappe en profondeur (BELMANS et al., 1983).

Une relation univoque entre état hydrique du sol et praticabilité présente l'inconvénient de ne pas pouvoir faire intervenir la réaction mécanique du milieu. Cette réaction mécanique est l'élément important qui entre dans la notion de traficabilité et de travaillabilité.

Ainsi nous avons jugé nécessaire de l'introduire dans notre démarche en distinguant deux étapes :

- dans un premier temps sera étudiée la relation entre l'humidité du profil et un test mécanique standardisé ;

- dans un deuxième temps, ce test sera relié à la praticabilité.

La praticabilité peut, en effet, être estimée par un expert-agriculteur qui, grâce à l'expérience accumulée, peut l'évaluer d'une façon globale sur sa parcelle. Pour cela, il donnera un avis, à partir de trois possibilités (impraticable, portant, travaillable) qui permettront de préciser des seuils de changement d'état.

L'introduction de ces seuils dans un modèle de simulation du profil hydrique du sol sous l'effet des conditions climatiques devrait permettre de déterminer les périodes pendant lesquelles la parcelle sera praticable ou non.

Nous n'aborderons ici qu'un exemple de cette démarche dans le cas de sols limoneux.

2. EXEMPLE D'UTILISATION DE CETTE DEMARCHE : L'INFLUENCE DU DRAINAGE SUR LA MODIFICATION DE L'ITINERAIRE TECHNIQUE

En Chalosse, dans le Sud-Ouest de la France, les labours de printemps sont traditionnellement effectués entre le 15 avril et le 15 mai ; ils sont immédiatement suivis par la préparation du lit de semences et le semis.

La réalisation de ces opérations culturales entraîne un pic de travail pour l'exploitant, qui a tendance à se suréquiper pour faire face à cette période. Une étude statistique de la répartition des précipitations (BOUE et THIEBAULT, 1985) montre qu'il existe de courtes périodes, peu pluvieuses, pendant lesquelles il est possible de travailler le sol. Il est donc apparu intéressant d'essayer d'avancer la date des labours de façon à étaler les périodes de travail et à mieux utiliser le matériel existant.

De plus, afin d'apprécier l'intérêt de la technique du drainage sur les jours disponibles, un essai a été mis en place pour comparer deux parcelles contiguës, l'une drainée et l'autre non drainée.

2.1. Caractéristiques du milieu

Les parcelles d'essai sont situées sur des terrasses anciennes de l'Adour dont les sols limoneux sont lessivés et hydromorphes. Elles sont cultivées par deux agriculteurs différents. Les tableaux 1 et 2 donnent quelques-unes de leurs propriétés physiques, et on remarquera les valeurs de densité particulièrement élevées.

Horizons	Argile %	Limon %	Sable %	M.O. %	pH eau
0-25 cm	12	60	28	1,7	6
45-70 cm	16	51	33		
70-110 cm	24	48	28		

Tableau 1 - Quelques caractéristiques des différents horizons

Profondeur	Parcelle drainée	Parcelle non drainée
0-5 cm	1,52	1,57
5-10 cm	1,67	1,67
25-30 cm	1,70	1,72
30-35 cm	1,69	1,70

Tableau 2 - Densités apparentes réalisées à différents niveaux : prélèvement au cylindre, dans le courant de l'hiver

2.2. Etude de la relation entre l'humidité de la couche travaillée et un test mécanique standardisé

Il a été nécessaire de mettre en oeuvre, sur le terrain, un indicateur de l'état mécanique du sol. Le choix s'est porté sur le pénétromètre. KOOLEN et KUIPERS (1983) le présentent comme un appareil permettant d'acquérir rapidement des mesures et ayant l'avantage de prendre en compte les propriétés du sol (voir encadré en page suivante).

Sur les deux parcelles, des tests de pénétrométrie ont été mis en oeuvre. Ces tests ont été effectués en des endroits repérés - à l'interdrain pour la parcelle drainée- où ils étaient

couplés avec la mesure d'humidité de l'horizon (0-25cm). La période des observations va du mois de janvier au mois d'avril 1986. Ces mesures sont pratiquées une ou deux fois par semaine avec trois à cinq répétitions, destinées à prendre en compte la variabilité importante qui caractérise les mesures effectuées au champ. La profondeur d'investigation est de quarante centimètres.

Les valeurs obtenues pendant la campagne de mesure ont été reportées sur la figure 1c. Ces valeurs ont varié dans de grandes proportions, de 0 à $5 \cdot 10^5$ Pa. Une différence très nette est visible entre la parcelle drainée et la parcelle non drainée : pour cette dernière, la résistance à la pénétration n'a jamais dépassé $3 \cdot 10^5$ pascal, alors que cette valeur est souvent dépassée sur l'autre parcelle (figure 1c).

LE PENETROMETRE

Le pénétromètre présente l'intérêt d'être un outil simple, facile à mettre en oeuvre sur le terrain. Il a l'avantage de réagir globalement à certaines propriétés mécaniques du sol, comme la cohésion et l'angle de frottement interne. Mais, comme il ne permet pas d'isoler l'effet de ces paramètres, on ne peut le considérer que comme un indicateur global des caractéristiques mécaniques d'un sol. MAERTENS (1964), EHLERS et al. (1983) ont utilisé le pénétromètre comme un simulateur de l'extrémité d'un végétal en croissance. BILLOT (1982), O'SULLIVAN et al. (1987) s'en servent pour détecter les compactages en mesures comparatives. COLLAS (1985) propose de l'utiliser comme un outil d'appréciation de la variation de la portance des sols.

Le pénétromètre dynamique utilisé pour cette étude est constitué par une tige à pointe conique sur laquelle on applique des chocs successifs à l'aide d'une masselotte tombant d'une hauteur déterminée. On considère que la résistance du sol à la pénétration est proportionnelle au rapport du nombre de chocs appliqués à la hauteur d'enfoncement du pénétromètre dans le sol. La transformation du nombre de coups en pression est réalisée à l'aide de la formule dite "des hollandais".

L'étude de la relation entre la résistance à la pénétration et l'humidité moyenne de la couche travaillée permet d'aborder le problème de praticabilité (figure 2).

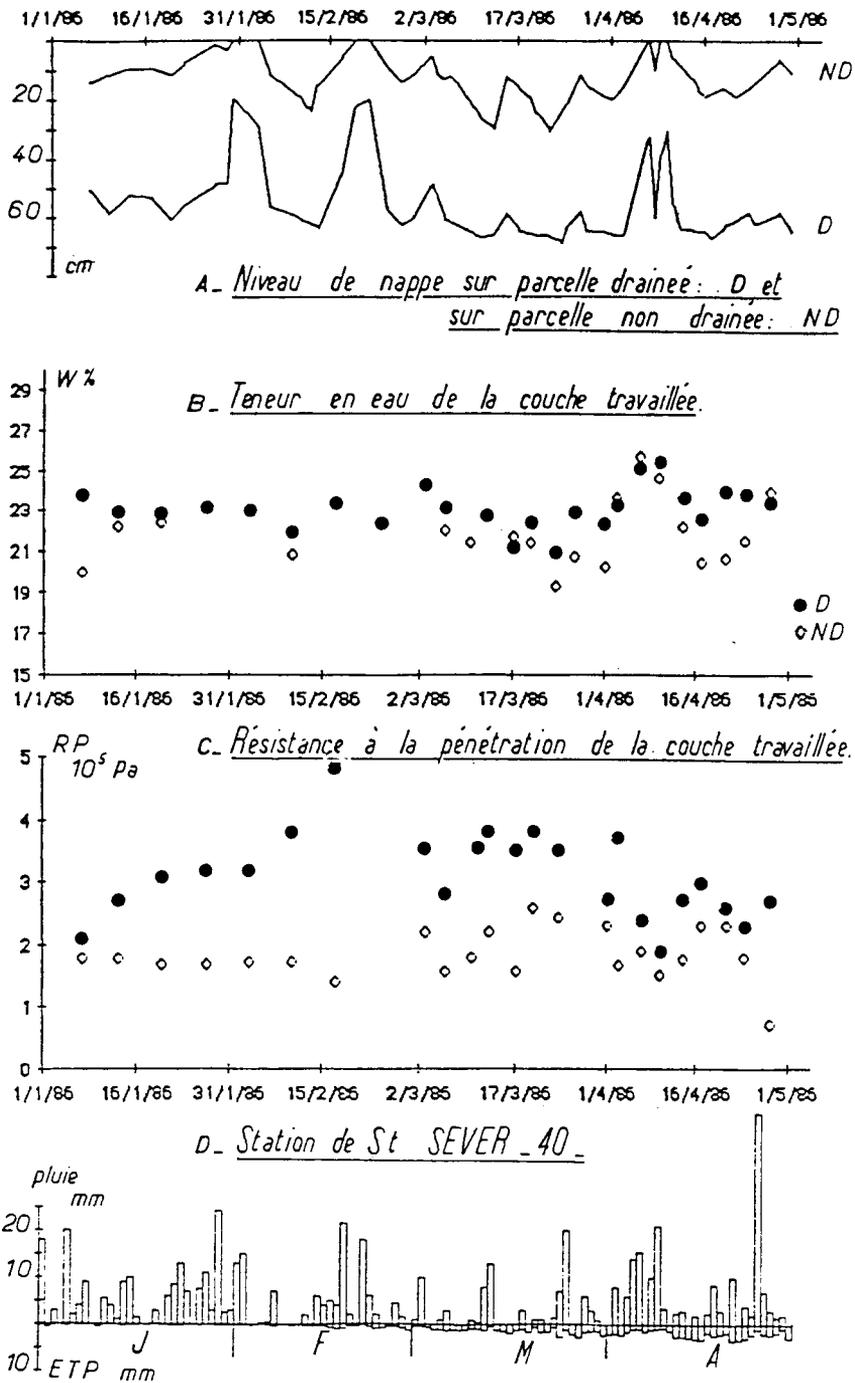


Figure 1 - Evolution de la nappe, de l'humidité et de la résistance mécanique à la pénétration pour les deux parcelles en fonction des conditions climatiques

Il n'a pas été possible, sur la parcelle non drainée, d'établir ce type de relation, car la nappe étant souvent proche du niveau du sol (figure 1a), les échantillons présentaient de l'eau libre qui rendait le prélèvement invalide. Sur la parcelle drainée, la relation entre la résistance à la pénétration R_p (en Pa) et l'humidité pondérale W (en %) est la suivante :

$$R_p = 4,3 \cdot 10^4 W^{-3,8} \quad (N=21, r=0,90)$$

Le coefficient de la fonction puissance, qui lie la résistance à l'humidité, est voisin de quatre, résultat proche de celui obtenu, ailleurs, par de CRECY et al. (1984).

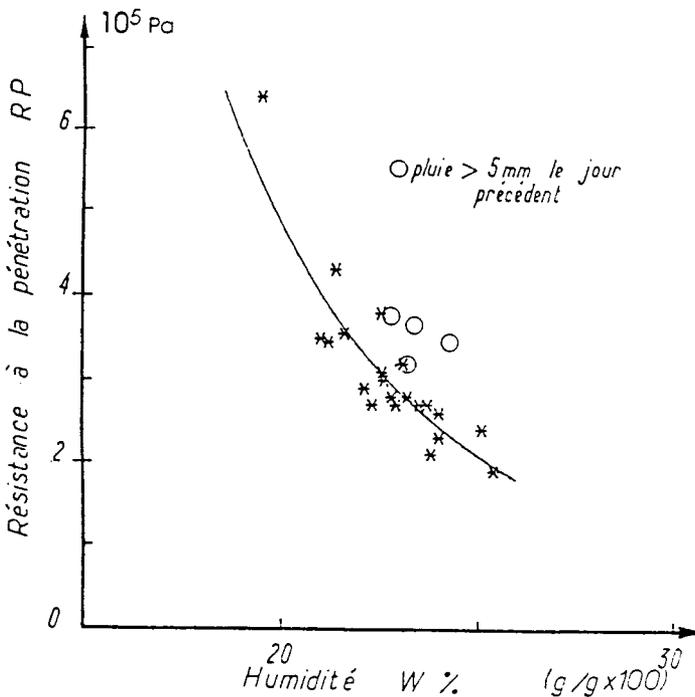


Figure 2 - Relation entre la résistance à la pénétration et l'humidité sur la parcelle drainée

On peut se demander si les relations obtenues sont les mêmes d'une année sur l'autre. Des mesures ont été réalisées sur un autre site dont les sols sont argileux gonflants, plusieurs mois après la dernière intervention culturale. Dans ces sols la structure évolue fortement avec l'état hydrique, ce qui n'est pas le cas des sols limoneux. Les résultats sont donnés sur le tableau 3 pour trois campagnes (COLLAS, 1985).

Année	Nombre de répétitions	Nombre de couples	Coefficient de corrélation Log (Rp) =	Droite de régression
1982	3	14	0,94	24,4 - 3,25 Log (W%)
1983	5	43	0,84	24,4 - 3,23 Log (W%)
1984	3	16	0,94	25,1 - 3,47 Log (W%)
Moy.		73	0,88	24,5 - 3,27 Log (W%)

Tableau 3 - Régression sur 3 années entre la résistance à la pénétration et l'humidité sur le site de St-Laurent de la Prée

On constate que, pour ces sols argileux, la liaison proposée par de CRECY et al. (1984) est forte, quelle que soit l'année ($r > 0,84$). L'analyse de la variance ne permet pas, au seuil de confiance de 0,95, de mettre en évidence une différence entre les trois courbes.

L'absence de différence interannuelle montre que l'effet de l'état structural, à cette période de l'année, varie peu d'une année sur l'autre.

Nous avons vu que pour la parcelle drainée en sol limoneux la relation est aussi du type puissance (figure 2). Il est nécessaire de noter qu'il a fallu éliminer un certain nombre d'observations pour améliorer la relation. En effet, pour les mesures réalisées moins de 24 heures après une forte pluie (précipitation supérieure à 5 mm) les valeurs obtenues s'écartent de la courbe. La cinétique de l'hydratation des éléments structuraux est lente. Ainsi la pluie augmente la teneur en eau globale du profil sans affecter la résistance mécanique interne des éléments structuraux.

Les tests de résistance à la pénétration montrent une très nette différence de comportement mécanique entre les horizons travaillés des deux parcelles (figure 1c). Le sol de la parcelle drainée est toujours plus résistant que celui de la parcelle non drainée. L'examen des figures 1a et 1c nous permet de dire que ces deux facteurs varient en sens inverse. Lorsque la nappe remonte dans l'horizon travaillé (0-25 cm), la résistance à la pénétration devient inférieure ou égale à $2 \cdot 10^5$ Pa, mais, lorsque le toit de la nappe est situé au-dessous de l'horizon 40-50 cm, le rabattement conduit à une augmentation de la résistance à la pénétration jusqu'à $3 \cdot 10^5$ Pa et plus.

2.3. Liaison test mécanique-praticabilité

Nous allons plus particulièrement étudier la liaison entre la résistance à la pénétration de la couche labourée et l'avis donné par l'expert-agriculteur sur la praticabilité de sa parcelle. Trois classes de praticabilité sont distinguées :

- le sol est impraticable lorsque le tracteur ne peut pas circuler ;
- le sol est portant quand on peut y passer avec un tracteur et y apporter engrais et traitements phytosanitaires ;
- le sol est travaillable lorsqu'il est portant et que, de plus, on peut y réaliser des labours ou des reprises profondes.

Pour ces sols de Chalosse, les avis donnés par deux agriculteurs, l'un cultivant la parcelle drainée et l'autre la parcelle non drainée, confirme la grande différence de comportement entre les deux parcelles (tableau 4).

Jugement	Sol drainé	Sol non drainé
Impraticable	47	63
Portant	42	26
Travaillable	15	0

Tableau 4 - Jugement des agriculteurs en nombre de jours entre le 1er janvier et le 30 avril 1986

En classant les fréquences d'observation suivant les classes de résistance à la pénétration (figure 3) il est possible de définir des seuils qui limitent un état non portant, portant ou travaillable. Ces seuils critiques de résistance à la pénétration sont $2 \cdot 10^5$ Pa et $3 \cdot 10^5$ Pa.

La figure 4 permet la comparaison entre le jugement de l'expert agriculteur et la résistance à la pénétration. On constate que, sauf lors d'une courte période de 4 jours en février -correspondant à une période de gel-, les agriculteurs ont attendu la fin du mois de février pour juger le sol comme portant et ce malgré des séquences relativement sèches. On peut avancer, pour expliquer ce comportement, que lors de cette période les agriculteurs

n'ont pas l'habitude d'intervenir et donc ont tendance à juger le sol comme impraticable à priori.

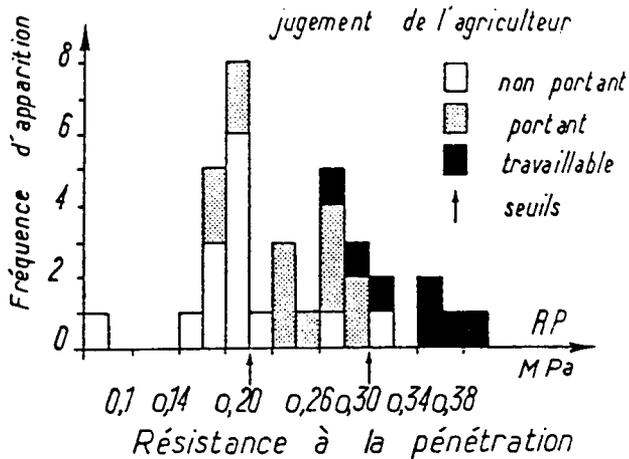


Figure 3 - Fréquence d'apparition des avis donnés par les agriculteurs des parcelles drainées et non drainées pour différentes classes de résistance à la pénétration

Si l'on compare les avis donnés par les deux agriculteurs, on peut noter que celui qui cultive la parcelle non drainée est le moins sévère. En effet, il admet que le sol est portant pour des résistances inférieures à $1,8 \cdot 10^5$ Pa le 17 mars. D'une manière systématique, les agriculteurs ont jugé comme impraticables les jours qui suivent une pluie supérieure à 5 mm, même lorsque la couche travaillée avait une résistance élevée. Dans ce cas, la résistance à la pénétration peut ne pas être liée au jugement de l'agriculteur.

2.4. Discussion

Le jugement des agriculteurs est relativement bien corrélé avec la résistance à la pénétration dans les parcelles. Ceci permet de définir des seuils de résistance limitant différents états : dans le cas étudié, le sol est jugé portant lorsque la résistance est supérieure à $2 \cdot 10^5$ Pa et travaillable lorsque celle-ci est supérieure à $3 \cdot 10^5$ Pa.

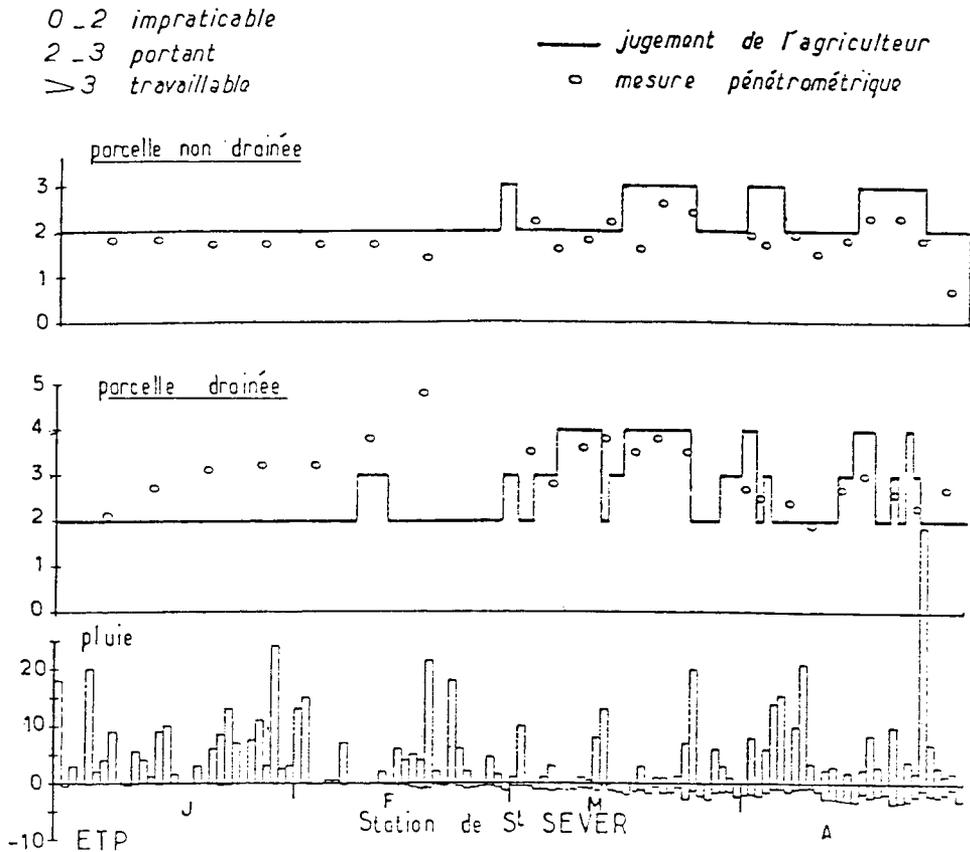


Figure 4 - Chronique des résistances à la pénétration et des avis des experts-agriculteurs

Des contrôles réalisés au champ permettent de nuancer ce jugement. Par exemple, à $3 \cdot 10^5$ Pa, un labour réalisé sur la parcelle drainée a été jugé grossier. Lorsque, dans un essai ultérieur, la résistance à la pénétration a été plus élevée, le labour a été jugé comme plus émietté.

La fiabilité du test pénétrométrique au champ requiert toutefois certaines conditions de milieu :

- la structure du sol doit être suffisamment homogène, et, dans le cas présent, les sols étudiés n'avaient pas été travaillés depuis plus de 3 mois ;

- les gradients hydriques à l'intérieur de l'horizon travaillé ne doivent pas être trop importants ; ainsi par exemple, après une pluie, il ne faut pas qu'il y ait une hétérogénéité trop grande de la distribution de l'eau entre les différents niveaux de cet horizon, ou bien entre la surface des mottes et l'intérieur de celles-ci.

L'étude de la liaison résistance à la pénétration - jugement de l'agriculteur permet "d'étalonner" le sévérité de l'agriculteur sur des critères objectifs et de rendre son jugement plus fidèle dans le temps.

Les résultats ont permis de montrer l'influence du drainage sur les jours disponibles. Les mesures de résistance à la pénétration effectuées montrent que, sur la parcelle drainée, le seuil de $3 \cdot 10^5$ Pa est dépassé 12 fois sur les 23 mesures effectuées durant les 4 mois, alors qu'il ne l'est jamais sur la parcelle non drainée. Au vu de la résistance à la pénétration, si l'on considère que le sol est labourable au delà du seuil de $3 \cdot 10^5$ Pa, le drainage a permis de gagner 14 jours labourables du 20 février au 31 mars 1986.

Les liaisons qui ont pu être établies entre l'humidité et la résistance à la pénétration, puis entre la résistance à la pénétration et la praticabilité, permettent de relier directement l'humidité à la praticabilité.

3. CONCLUSION

Si, pour mettre en évidence l'effet du drainage, il suffit de comparer le niveau et la vitesse de rabattement de la nappe, en ce qui concerne la traficabilité, il en va tout autrement. Par contre, il est possible, en introduisant une mesure objective, mais ponctuelle, et en prenant en compte l'avis de l'expert-agriculteur :

- de vérifier que la travaillabilité du sol est bien liée à l'humidité de la couche travaillée, alors que la portance est plutôt liée quant à elle, à l'humidité de surface ;

- de déterminer des seuils de changement d'état en terme de praticabilité.

La mesure pénétrométrique permet aussi une interprétation et une critique du jugement de l'agriculteur. L'avis de celui-ci est rendu plus "fidèle" dans le temps et l'on peut étalonner la sévérité de plusieurs notateurs.

La démarche proposée ici a comme avantage d'assurer une fiabilité plus grande des diagnostics portés sur la praticabilité des sols. Elle introduit également la notion de seuils

de travaillabilité. Cette notion essentielle permet de reconstituer, en utilisant des modèles d'évolution du profil hydrique, des séquences de jours disponibles avec des chroniques climatiques journalières sur de nombreuses années et ainsi d'établir un calendrier de possibilités culturales.

Les résultats obtenus lors de cet expérimentation ne suffisent pas pour établir à eux seuls la traficabilité de ces sols. Un complément d'observations serait nécessaire qui permettrait de s'assurer de la forme de la courbe et de confirmer les seuils.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

ATTONATY J.M., LAPORTE C., PAPY F., SOLER L.G., 1987 - La simulation de l'organisation du travail comme outil de gestion : application à l'analyse des niveaux d'équipement et de main-d'oeuvre en exploitation de grande culture. Perspectives agricoles, 117, 45-49.

BELMANS C., WESSELING J.G., FEDDES R.A., 1983 - Simulation model of the water balance of a cropped soil : Swatre. Journal of hydrology, 63, 271-286.

BILLOT J.F., 1982 - Les applications agronomiques de la pénétrométrie à l'étude des sols travaillés. Science du Sol, 3, 187-202.

BOUE A., THIEBAULT J., 1985 - Mise au point d'un modèle à priori de calcul des jours potentiellement disponibles pour les travaux des champs : l'exemple landais. FNGDA, CDM des Landes.

COLLAS Ph., 1985 - Comportement mécanique d'un sol argileux d'une parcelle drainée des marais de l'ouest. Actes du séminaire sur les "Conditions et effets des excès d'eau en agriculture", Commission d'Agrométéorologie de l'INRA, 367-375.

de CRECY J. CONCARET J., PERREY C., 1984 - Essai de caractérisation du comportement des sols par pénétrométrie. Actes du colloque AFES (Dijon) sur "fonctionnement hydrique et comportement des sols", 329-343.

EHLERS W., KOPKE V., HESSE F., BOHM W., 1983 - Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. Soil tillage Res., 3, 261-275.

FEODOROFF A., REBOUL C., FELIX L., 1972 - Excès d'eau et jours indisponibles pour les emblavures de printemps. Bul. Tech. d'Inf., 273-274, 1077-1090.

KOOLEN A.J., KUIPERS H., 1983 - Agricultural soil mechanics. Berlin : Springer-Verlag.

MAERTENS C., 1964 - La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs, son influence sur l'enracinement. Ann. Agron., 15(5), 539-554.

O'SULLIVAN M.F., DICKSON J.W., CAMPBELL O.J., 1987 - Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. *Journal of soil science*, 38, 137-148.

PAPY F., SERVETTAZ L., 1986 - Jours disponibles et organisation du travail : exemple des chantiers de préparation des semis de printemps. *Bull. Tech. Inf.*, 412-413, 693-703.

REBOUL C., 1969 - Météorologie et jours disponibles pour les travaux agricoles. *Bull. Tech. Inf.*, 238, 309-320.

REBOUL C., MAAMOUN M., DESBROSSES B., 1979 - Météorologie et jours disponibles pour les travaux des champs. *Résultats statistiques en Ile de France*. 176 p.

SKAGGS, R.W. 1980 - A water management model for artificially drained soils. *Tech. bull. N° 267 North Carolina Agri. Res. Serv., State University Raleigh, N.C.*, 54 p.

THOMASSON A.J., 1982 - Soil and climatic aspects of workability and trafficability. A. Butorak (ad.), *Proceedings of the 9 th conference of the International Soil Tillage Research Organization, ISTRO, Osijek*, 551-557.

MISE AU POINT D'UN PENETROMETRE A PLAQUE PNEUMATIQUE DESTINE A L'APPRECIATION DE LA PORTANCE DES SOLS AGRICOLES

J. GUERIF ¹ - J. ROYERE ¹

¹ - INRA, Centre de Recherches Agronomiques d'Avignon, Station de Science du Sol,
BP 91, 84140 MONTFAVET

RESUME

Un prototype de pénétrömètre à plaque, mü par un vérin pneumatique et fixé sur le système trois points d'un tracteur servant de point d'appui, a été mis au point. Il a été conçu dans l'objectif d'accéder à la cinétique de déformation du sol ainsi qu'à la relation "pression-déformation" au cours de cette cinétique. On présente ici l'étude critique du réseau pneumatique du prototype dans des conditions standard de fonctionnement. Ses performances et son aptitude à différencier des états apparemment très proches ont été testées dans des conditions physiques de sol bien différenciées. Sous réserve de quelques modifications ce prototype est susceptible de servir de base à l'élaboration d'un test de portance.

MOTS - CLES : Portance - Sols agricoles - Pénétrömètre à plaque - Cinétique
Déformation - Test.

ABSTRACT : Development of a plate penetrometer dedicated to soil bearing capacity
assessment in agricultural conditions.

A prototype of plate penetrometer, dedicated to soil bearing capacity investigations, has been developed according to the specificities of agricultural soil conditions. The plate is driven into the soil by a pneumatic jack, fixed on the three points linkage of a tractor. The system was designed to establish the strain-time and stress-strain relationships. The pneumatic network has been tested in standard conditions. The prototype performances have been tested in a wide range of soil physical conditions. Although a few modifications are needed, this apparatus appeared to be a good basis for various bearing test procedures.

KEY WORDS : Bearing capacity - Agricultural soils - Plate penetrometer - Kinetics
Strain-stress relationship - Test.

Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 173-190
AIP CEMAGREF-INRA Maitrise des excès d'eau

1. INTRODUCTION

On peut définir la portance comme la capacité d'un sol à résister à l'enfoncement sous l'action d'une charge. Dans le domaine agricole elle concerne, notamment, le passage des engins et le piétinement par les animaux. Diverses modalités d'appréciation de ce comportement existent mais la profondeur d'enfoncement, correspondant à une sollicitation donnée, apparaît comme la caractérisation la plus satisfaisante.

Certains tests privilégient le rôle de la constitution du matériau, et sont fondés sur des tests de laboratoire comme le point d'adhésivité ou les limites d'Atterberg. Ils permettent de classer des matériaux, indépendamment des états structuraux qu'ils peuvent présenter. Le principe consiste à confronter le test à des estimations d'experts, notamment des agriculteurs, et/ou à des tests de terrain comme la pénétrométrie à aiguille (COLLAS, 1985). La principale limitation du recours aux experts réside dans le fait que, même si leurs jugements semblent cohérents par rapport au test choisi, les jugements portés ne sont valables que pour une région, pour des sols, des conditions climatiques, et pour des pratiques familières aux experts. Ils sont, de surcroît, contingents de l'état du parc de véhicules au moment de son élaboration, et ne permettent pas de prévoir la faisabilité ou les conséquences de l'apparition d'un nouveau type de matériel ou d'une nouvelle technique.

Cependant, si la portance dépend de la nature du matériau et de son humidité, au niveau de ses propriétés mécaniques intrinsèques, elle dépend aussi de la structure des horizons à l'instant où ils sont soumis à la sollicitation mécanique.

Les tests de terrain les plus classiques dans le domaine agricole utilisent des pénétromètres à aiguille à extrémité cônica. On mesure la force nécessaire pour atteindre une profondeur donnée, ou, réciproquement, la profondeur atteinte avec une force appliquée donnée. Ils diffèrent par le mode d'enfoncement, la technique de mesure de la force, et par le niveau d'automatisation.

Le pénétromètre dit "statique" est enfoncé à une vitesse supposée constante, (couramment 3 mm/s). La force nécessaire à la pénétration peut être appliquée manuellement, ou mieux à l'aide d'une crémaillère ou d'un vérin, appareillages qui nécessitent un point d'appui généralement fourni par un véhicule. La mesure consiste à évaluer la résistance de pointe au cours de l'enfoncement. Cette mesure peut être effectuée avec un dynamomètre à ressort et enregistrée sur papier (MORLON, 1983 ; DURET, 1984), ou avec un capteur de force couplé à une acquisition de données (ANDERSON et al., 1980 ; O'SULLIVAN et al., 1983 ; BILLOT et MARIONNEAU, 1988).

Les pénétromètres "dynamiques" comportent généralement une tige à extrémité cônica, pénétrant dans le sol sous l'effet d'un battage (une masse métallique, coulissant sur la tige joue le rôle de "mouton"). Leur fabrication est peu onéreuse, et ne nécessitent aucun point d'appui ; mais ils ne peuvent servir en fait que de tests comparatifs (SIMONIN, 1985). Les pénétrogrammes dynamiques, qui relient profondeur d'enfoncement et nombre de coups de mouton, sont difficilement interprétables en terme de résistance statique.

De façon plus générale, les utilisateurs de la pénétrométrie remarquent que les sols cultivés présentent, relativement à la taille du cône, une hétérogénéité telle que les profils pénétrométriques ne renseignent pas sur le comportement mécanique global des couches de sol traversées, mais sur la résistance à la rupture de chaque élément structural rencontré au cours de la descente. L'utilisation d'une plaque devrait permettre de s'affranchir de ce problème d'échelle, en approchant, de plus, des valeurs courantes de la surface de contact sol-pneumatique. Cependant les efforts à mettre en jeu pour des plaques de quelques décimètres carré imposent l'utilisation d'un point d'appui, généralement fourni par un véhicule. Ce véhicule doit pouvoir pénétrer dans la parcelle expérimentale, au besoin en ayant recours à des plaques à sable; on peut aussi utiliser un véhicule à chenilles.

La possibilité de combiner différentes surfaces de plaque, ainsi que différentes forces appliquées, permet d'analyser l'effet propre de la pression de contact et de la charge sur essieu. Des travaux antérieurs ont montré que, à pression de contact égale, une augmentation de charge sur l'essieu se traduit par une augmentation du volume affecté par le compactage, et ceci tout particulièrement en profondeur (SOHNE, 1958 ; SUDAKOV et OKHYTIN, 1987).

L'utilisation de plaques circulaires permet la simplification des calculs grâce à la symétrie de révolution des volumes de sol concernés par les tassements. Le principe d'utilisation de ce type de pénétromètre consiste à enfoncer une plaque à vitesse constante et à mesurer la force qu'il convient d'exercer pour atteindre une profondeur z donnée. Ces tests à plaque sont utilisés dans des modélisations ayant toutes comme point de départ l'ajustement de BEKKER (1956) :

$$P = k z^n \quad (1)$$

où P est la pression appliquée et z la profondeur d'enfoncement de la plaque. La plupart des auteurs s'emploient à relier les coefficients d'ajustement n et k à des propriétés du sol, comme la cohésion et l'angle de frottement, paramètres de la théorie de Mohr-Coulomb, et

des caractéristiques (taille et forme) de la plaque utilisée (SELA et EHRLICH, 1972), mais l'absence de réelle signification analytique de cette formule n'est que rarement évoquée dans la bibliographie (WIENDIECK, 1968).

L'utilisation des tests à plaque semble tout à fait adaptée à des comparaisons de traitements (drainage / non drainage, par exemple), ou à l'étude du comportement au compactage de couches de sol in situ (GUERIF, 1984). Cependant la déformation du sol au roulage ne se fait pas à vitesse constante, et résulte de l'application de la charge pendant un temps très court. Bien que la cinétique de déformation ne soit pas classiquement prise en compte dans les tests de portance, on dispose dans la littérature de travaux théoriques relatifs à la rhéologie des sols, nombreux en génie civil, plus rare en génie rural. Par ailleurs on trouve quelques travaux expérimentaux montrant l'influence significative de la vitesse d'avancement des véhicules et donc du temps de contact sol/pneumatique sur la profondeur d'enfoncement (POPE, 1971 ; SUDAKOV et OKHYTIN, 1987).

Il apparaît donc souhaitable d'accéder à l'appréciation de la déformation au cours du temps, consécutive à l'application d'une pression donnée. On pourra donc exprimer alors la profondeur d'enfoncement en fonction de la pression, et d'un temps de mise en charge donné.

C'est donc vers un aspect cinétique que nous allons porter l'effort, dans la construction du prototype. Il conviendra donc de pouvoir procéder à l'application rapide d'une charge donnée (pression comprise entre 0 et $10 \cdot 10^5$ Pa, et surface de contact de quelques décimètres carré), ainsi qu'à la mesure et à l'enregistrement de la déformation au cours du temps. Ce prototype étant destiné à l'élaboration de protocoles d'estimation de la portance dans des conditions variées, il convient qu'il offre le maximum de possibilités dans le cadre de l'option choisie, et que les variables en jeu soient accessibles à la mesure et à l'enregistrement, de manière à contrôler au mieux le processus.

Après avoir décrit le prototype obtenu à partir de ce cahier des charges, nous présenterons ses performances pour un sol dans des conditions d'états physiques bien différenciés.

2. PRESENTATION DU PROTOTYPE

2.1 Présentation générale

Le prototype est présenté en figure 1. Une plaque circulaire (3) d'un diamètre de 0,25 m, appliquée au sol par l'intermédiaire d'un vérin pneumatique (6), permet d'exercer des pressions d'intensité variable à la surface du sol. Le vérin est fixé sur un bâti rigide par l'intermédiaire d'une rotule (9) assurant la verticalité du vérin, indépendamment de l'horizontalité du bâti. L'ensemble est fixé au système trois points (4) d'un tracteur, véhicule choisi comme point d'appui. Sur le plan pratique, le pénétromètre étant attelé à l'arrière du tracteur, l'approche de la zone d'essai doit se faire en marche arrière pour ne pas créer un compactage préalable à la réalisation du test lors du passage des roues.

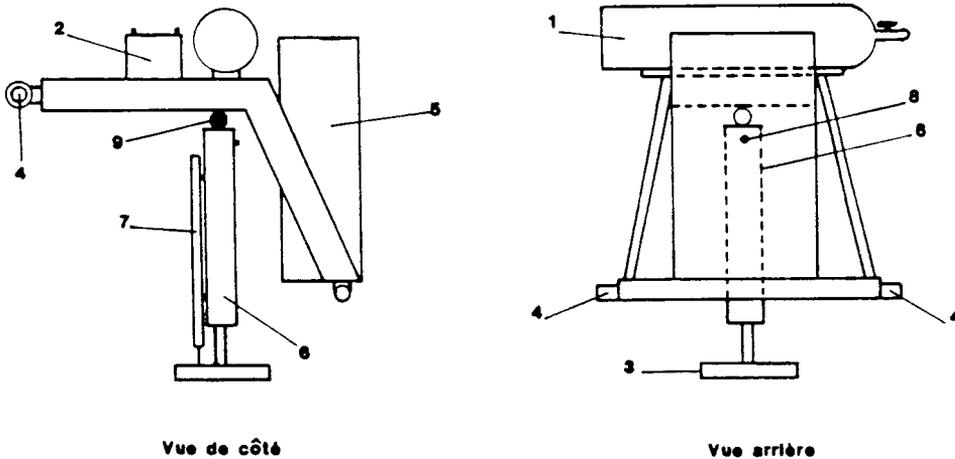


Figure 1 - Prototype de pénétromètre à plaque. Vue générale

Afin que les vibrations du moteur du tracteur ne viennent pas perturber la cinétique d'enfoncement, on doit utiliser un système indépendant pour alimenter le vérin. On utilise en alternance deux bouteilles d'air comprimé (1), dont le remplissage s'effectue facilement sur le terrain à l'aide d'un compresseur autonome. Ces bouteilles contiennent 12 litres d'air comprimé à 200 bar ($200 \cdot 10^5$ Pa). Compte tenu des pressions maximales admissibles par le piston et les différents éléments du circuit pneumatique, un détendeur primaire, situé à la sortie de la bouteille et réglé à 10 bar ($10 \cdot 10^5$ Pa), interdit toute surpression dans le réseau.

Une armoire métallique (5) abrite les éléments du circuit pneumatique, ainsi que les instruments de mesures (capteurs et conditionneurs). Deux batteries de 12 volt montées en série (2) assurent leur alimentation.

Enfin, pour accéder aux variables qui nous permettront d'analyser la cinétique de déformation du sol, deux capteurs sont nécessaires :

- un capteur de déplacement (7) fixé parallèlement au cylindre du vérin ;
- un capteur de pression (8) fixé dans la partie supérieure du vérin.

L'ensemble du montage représente une masse d'environ 130 kg.

2.1.1 Fonctionnement de l'appareil

La descente du piston (figure 2) est provoquée par une surpression dans la chambre supérieure (A) du vérin. Le contrôle d'une contre pression dans la chambre inférieure (B), permet de moduler la vitesse.

L'air pénètre dans la chambre (A) du vérin lorsque l'électrovanne (2) est activée. Le piston ne descend que lorsque la pression dans la chambre (B) est inférieure à celle de la chambre (A). La chambre (B) peut être purgée de deux façons selon que l'électrovanne (3) oriente le départ de l'air vers la fuite (9a) pour une 'descente rapide' ou vers la fuite (9c) après le bipasse (5b) pour une "descente lente".

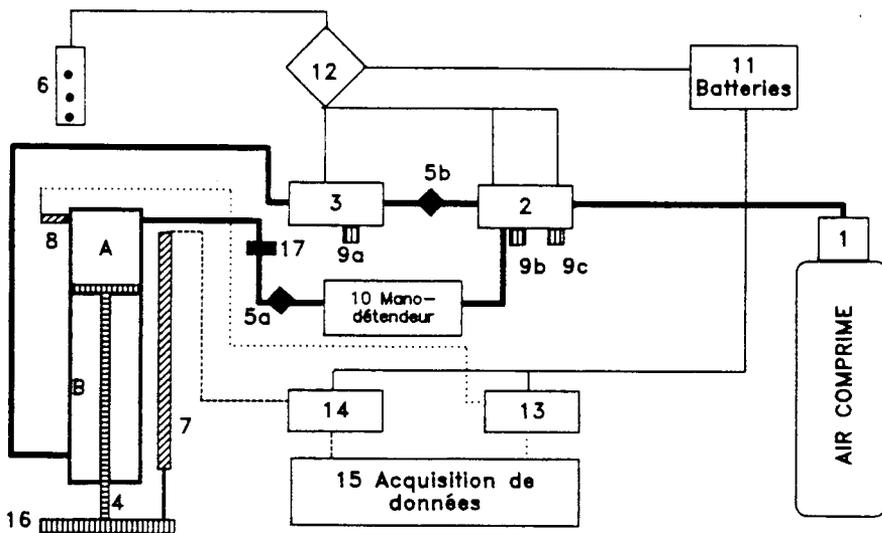


Figure 2 - Schéma général du circuit pneumatique du pénétromètre à plaque

La **remontée du piston** doit pouvoir être effectuée à une vitesse suffisamment faible pour éviter de perturber la zone compactée, lorsque des mesures ultérieures sont effectuées (prélèvements, densimétrie gamma, résistance au cisaillement...). Elle est assurée par une surpression dans la chambre (B) l'arrivée d'air étant pilotée par l'électrovanne (2). La régulation (5a) de la purge (9b) de la chambre (A) commande la vitesse de remontée du piston. Une purge brutale et/ou totale peut être éventuellement effectuée par la vanne manuelle (17).

2.1.2 Mesures, acquisition, et restitution des données

La course du **capteur de déplacement** (7), à induction différentielle, est de 30 cm. Le corps cylindrique du capteur est fixé parallèlement au vérin. Sa tige coulissante, fixée à la plaque, suit la cinétique d'enfoncement du pénétromètre dans le sol. Il délivre en sortie une tension proportionnelle au déplacement.

La cinétique de mise en pression du vérin dépend du débit du circuit pneumatique, du volume de la chambre supérieure (A) du piston, et de ses variations instantanées. L'évaluation du prototype nécessite le contrôle de cette cinétique. Un **capteur de pression** (8), à effet piezorésistant, a donc été installé dans la partie supérieure du piston; il mesure la pression dans la chambre supérieure (A) et permet de suivre son évolution.

On peut déduire, de la pression pneumatique P_A dans la chambre (A) et de la résultante f des frottements dus au joint situé entre piston et cylindre, la pression au sol P_S . On peut écrire :

$$P_S = (F-f)/S_{\text{plaque}} \quad (2)$$

où F est la force appliquée sur la plaque.

En utilisant l'abaque fourni par le constructeur, qui donne $F-f$ en fonction de P_A , il vient :

$$P_S = 0.096 P_A^{1,0814} / S_{\text{plaque}} \quad (3)$$

Les conditionneurs (13-14) associés à chaque capteur assurent une alimentation stabilisée, l'amplification du signal de sortie, et permettent l'étalonnage des capteurs (gain et zéro).

Les données de pression $P_A(t)$ et de déplacement $d(t)$ sont enregistrées avec une **acquisition de données** de type "micrologger 21X" de chez Campbell Scientific. Celle-ci est programmable, dispose de 8 voies d'entrées analogiques, et d'une capacité de stockage de 20000 données. La programmation permet entre autre la gestion individuelle de la scrutation des voies (gamme de sensibilité des capteurs, fréquence de scrutation), le stockage des données, et leur restitution à un micro-ordinateur compatible PC.

La scrutation, effectuée tout les 1/10ème de seconde, permet d'obtenir les courbes $P_A(t)$ et $d(t)$ au faible de temps nécessaire à la description fine du phénomène. La conversion analogique/digital utilise un temps d'intégration de $250 \cdot 10^{-9}$ s.

Un ensemble de logiciels fourni par Campbel permet le transfert, sur micro PC, des données en provenance de l'acquisition "micrologger 21X". Il gère le port RS 232, et permet la **mise en forme d'un fichier ASCII**.

La mise en forme des données, effectuée sur tableur, consiste à :

- choisir une origine des temps propre à chaque test ;
- ramener l'origine des déplacements à zéro, le zéro électrique du capteur ne coïncidant pas avec le contact de la plaque à la surface du sol, à cause par exemple de l'enfoncement des roues du tracteur ou de la rugosité de surface ;
- extraire la composante du déplacement propre à la déformation du sol. En effet comme nous le verrons en 2.2.2 le déplacement mesuré résulte de trois composantes, la déformation du sol, l'élasticité du système trois points, et celle des pneumatiques du tracteur.

2.2 Caractéristiques de fonctionnement du système

L'étude des caractéristiques de fonctionnement du système pneumatique dans des conditions standard et indépendamment du comportement du sol a été effectuée. Pour ce faire on a enregistré, pour différentes pressions, les cinétiques de montée en pression du vérin et les déplacements du piston, dans l'air, d'une part, et en appui sur un sol bétonné considéré comme non déformable, d'autre part.

2.2.1 Vitesse de déplacement potentielle du piston permise par le montage

Pour des pressions $P_A > 300\text{kPa}$ la vitesse de déplacement du piston dans l'air, sans résistance au niveau de la plaque, ou vitesse potentielle de déplacement, est pratiquement constante. Le développement maximum du piston est obtenu en 2s.

Pour les pressions faibles ($<10^5\text{ Pa}$) les frottements au niveau du joint entre piston et cylindre, diminuent la vitesse potentielle de déplacement.

La durée de la cinétique de mise en pression, en l'absence de résistance au niveau de la plaque, et pour un développement maximal du vérin, est comprise entre 3 et 4 s (figure 3). Elle dépend à la fois du débit d'air comprimé dans le circuit, de la pression à atteindre, et du volume de la chambre (A) lui même fonction du déplacement du piston. On constate (figure 4), au cours d'une cinétique dans l'air, que la mise en pression se fait en deux phases. La portion de courbe AB correspond à mise en pression, alors que le piston se déplace, et que le volume de la chambre (A) varie. Au delà de B, le développement du vérin étant achevé, la mise en pression se fait à volume constant, la vitesse d'avancement de la plaque dépend alors uniquement du débit du circuit pneumatique.

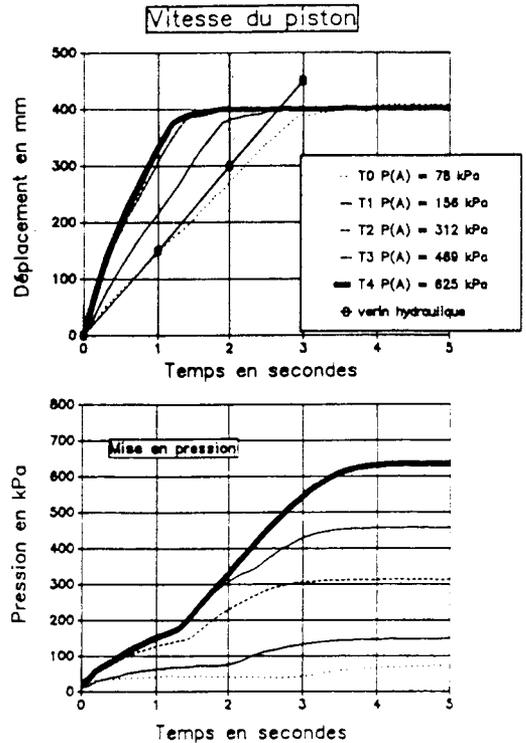


Figure 3 - Cinétiques de mise en pression dans l'air

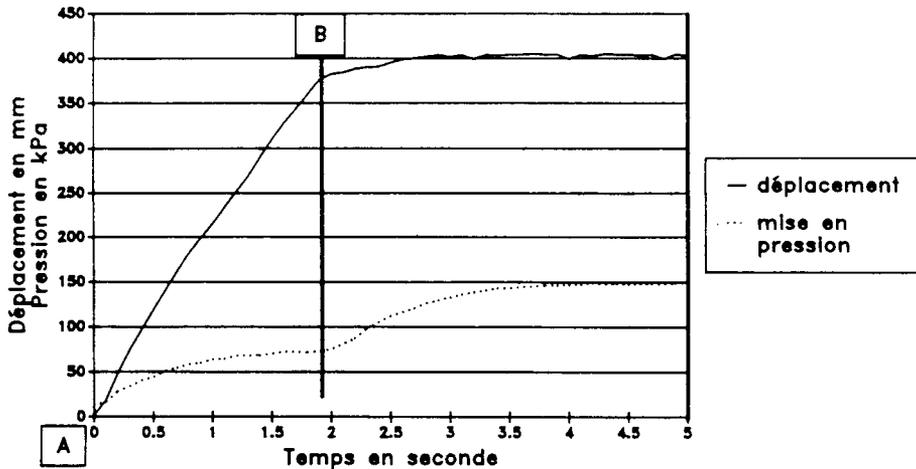


Figure 4 - Exemple de cinétiques de mise en pression : déplacement, montée en pression

2.2.2 Les trois composantes de la mesure, principe de correction

Le déplacement mesuré résulte en fait de trois composantes :

- l'enfoncement de la plaque et donc la déformation de la surface du sol ;
- un déplacement du bâti, consécutif à la déformation du système trois points, lié à l'élasticité du système d'amortissement du point supérieur ;
- un soulèvement du tracteur, qu'accompagne l'élasticité des pneumatiques.

Pour éliminer de la mesure ces deux derniers déplacements parasites, on peut soit les mesurer avec un capteur dédié, soit les estimer. Cette estimation est possible en écrivant, qu'à tout instant la somme des déplacements parasites est proportionnelle à la pression (P_A) mesurée dans la chambre (A), il vient :

$$Z_{\text{sol}} = Z_{\text{mesuré}} - (a P_A + b) \quad (4)$$

On étalonne cette relation à partir de mesure du déplacement du point d'appui lors d'essais réalisés sur sol bétonné.

Sa validation a été obtenue en mesurant *in situ*, à l'aide d'un capteur de déplacement additionnel fixé au sol, le déplacement du point d'appui simultanément à l'enregistrement du déplacement total normalement mesuré.

3. COMPORTEMENT DU PROTOTYPE IN SITU

3.1 Objectifs

Après avoir mis en évidence quelques caractéristiques générales intrinsèques au prototype, nous avons étudié son comportement *in situ* (HEDOIRE, 1988). Nous avons choisi de réaliser, sur un matériau classé argile limoneuse, des parcelles expérimentales qui correspondent à des états physiques bien différenciés.

Dans tous les cas les parcelles ont été conduites de manière à ce que les horizons de surface soient, au moins au départ, au voisinage de la capacité de rétention ($W = 0,22$ g/g).

Les trois situations obtenues correspondent à :

- un matériau compacté (indice des vides structuraux inférieur à 0,1), homogène (ne présentant pas d'éléments structuraux distincts) continu (ne présentant pas d'horizons distincts, ni de discontinuités verticales) et isotrope (présentant les mêmes propriétés dans toutes les directions), vis à vis de sa structure, comme de sa teneur en eau ;
- un matériau hétérogène et discontinu, le travail du sol induisant l'hétérogénéité (mottes et terre fine, avec un indice des vides structuraux compris entre 0,3 et 0,5) et la discontinuité (distinction entre la couche travaillée et la couche sous jacente à - 25cm), et isotrope au niveau de chaque couche ;
- un matériau hétérogène, présentant les mêmes caractéristiques que ci-dessus auxquelles se superpose un gradient vertical marqué de teneur en eau ; celui ci est induit par évaporation.

3.2 Résultats et discussion

3.2.1 Comportement du prototype dans des matériaux présentant des structures bien différenciées

La vitesse de déformation du sol dépend :

- de sa viscosité, et donc de sa densité et de son humidité ;
- de la cinétique de mise en pression.

La vitesse de mise en pression dépend :

- du débit d'air comprimé, qui ne dépend significativement de la pression, que pour des pressions $P_A < 10 \cdot 10^5 \text{ Pa}$;
- du volume de la chambre (A), et de la vitesse de déplacement du piston, et donc de la déformabilité du sol et de sa viscosité.

Ainsi, on constate (figure 5), que dans le cas d'un matériau compacté, la déformabilité relativement faible du sol et sa viscosité élevée ont pour conséquence un temps d'accès élevé à la déformation à l'équilibre. On enregistre par contre une montée relativement rapide de la pression.

Cette faible déformabilité et cette vitesse de déformation du sol entraînent de faibles variations instantanées du volume de la chambre (A). Ainsi le débit d'alimentation en air comprimé est suffisamment élevé pour atteindre rapidement la pression visée. Le temps de mise à l'équilibre de la pression visée croît avec celle-ci, il est compris dans cet exemple entre 3 et 6 secondes.

Dans des matériaux compactés, et à la capacité de rétention, la vitesse de déplacement potentielle du piston permet sans ambiguïté d'enregistrer la déformation du sol. Mais le temps de mise en pression visée ne peut pas être négligé, l'étude d'application de pressions pour des temps inférieurs à la seconde est impossible dans ces conditions.

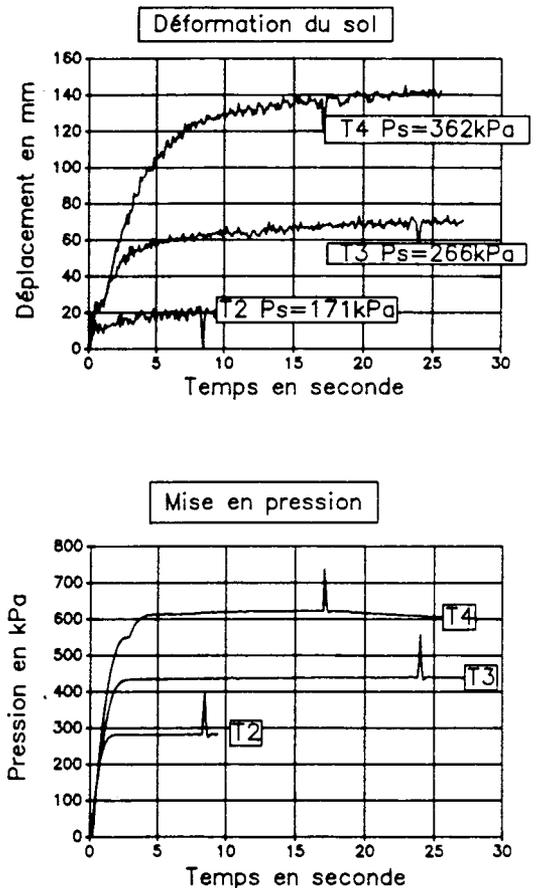


Figure 5 - Déformation et mise en pression en matériau compacté

Le matériau travaillé présente l'état physique pour lequel la déformabilité et la vitesse de déformation peuvent être les plus grandes. En comparant (figure 6) avec la cinétique du piston dans l'air, on peut vérifier que le prototype permet d'accéder à l'étude de la vitesse de déformation réelle du sol. La viscosité du matériau, dans ces conditions, reste suffisamment importante pour que le débit d'air comprimé ne soit pas limitant compte tenu de la vitesse de variation du volume de la chambre (A). On enregistre donc de ce fait une mise en pression plus régulière que dans l'air. La discontinuité consécutive au déplacement rapide du piston suivi de son arrêt en butée disparaît. Le temps d'accès aux pressions visées est supérieur à 6s. Contrairement aux matériaux à faible déformabilité, le temps d'accès à la pression visée est d'autant plus court que cette dernière est faible. En effet quand la pression visée augmente la déformation augmente : le débit d'air reste un facteur limitant.

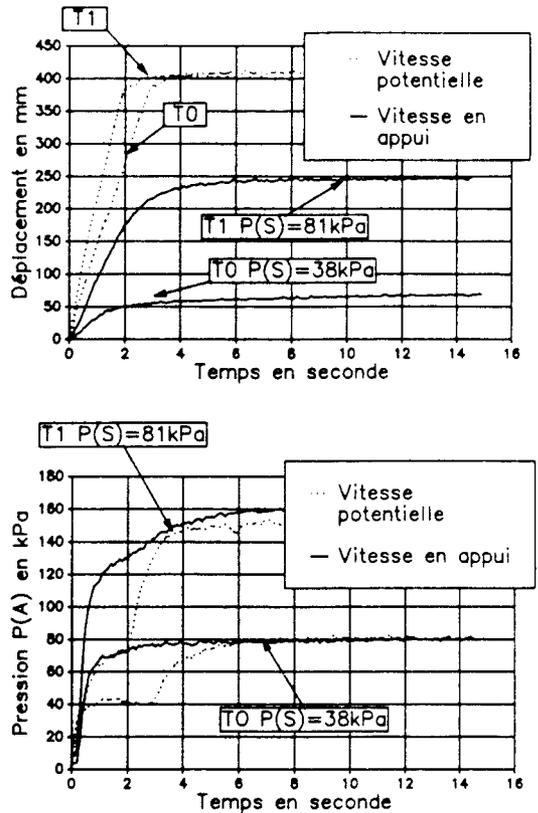


Figure 6 - Déformation et mise en pression en matériau travaillé

En résumé, le débit d'air comprimé, dans la configuration actuelle du prototype, est limitant vis à vis des montées en pression rapide (quelques 1/10 s), il est cependant suffisamment élevé pour donner accès à la cinétique de déformation du sol. Pour mieux apprécier la pertinence de cet aspect du prototype il faudrait disposer des cinétiques de déformation de volumes élémentaires de sol à l'aplomb du passage d'une roue. En tout état de cause, le temps de mise en pression dépend en fait des conditions expérimentales (état physique du sol, pression visée).

3.2.2 Aptitude du prototype à différencier des situations faiblement contrastées

Les différentes situations induites par une dessiccation par évaporation sont de deux types (figure 7). Dessi1 et Dessi2 se différencient de l'état initial Dessi0 essentiellement par la présence d'une mince couche plus ou moins sèche en surface. Dessi3 et Dessi4, outre une couche de surface sèche "à l'air", présentent une dessiccation générale du profil de 5 à 7 points par rapport à Dessi0.

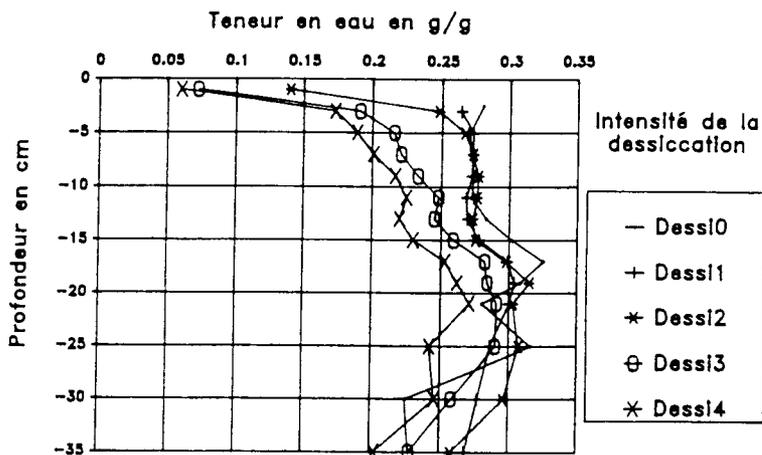


Figure 7 - Profils de teneurs en eau obtenus après dessiccation

■ Déformations à l'équilibre et mise en pression

Quelles que soient les situations Dessi1 à Dessi4, le temps de mise en équilibre est, pour la pression appliquée $P_S = 80,7 \text{ kPa}$, supérieur à 16 s. En Dessi0, par contre, l'équilibre est atteint en 8s, le piston venant prendre appui sur le fond de la couche travaillée.

Les déformations à l'équilibre enregistrées pour les différents traitements se différencient clairement. Les changements de teneurs en eau qu'accompagne le blanchiment de surface (Dessi1), bien que non mesurables avec notre mode de prélèvement pour la mesure de la teneur en eau, provoquent pratiquement une diminution de moitié de la déformation du sol par rapport au témoin.

Le temps d'accès à la pression visée est de l'ordre de 6 à 8 secondes, et les cinétiques de mise en pression n'apparaissent pas significativement différentes. Seule la mise en pression en Dessi0 est sensiblement ralentie à partir de $1.20 \cdot 10^5$ Pa, et, dans ce cas, le débit d'air comprimé pourrait être limitant.

■ Interprétations possibles

Les graphes (figure 8) de la relation pression - déformation donnent une représentation plus synthétique que précédemment. Dans le cas de Dessi0, Dessi1, et Dessi2, les profils hydriques ne se différencient que par la présence d'une couche de sol, d'humidité décroissante, dont l'épaisseur n'excède pas 1 ou 2 cm. Les propriétés mécaniques de la couche sous-jacente ne sont donc pas en cause. On peut envisager deux mécanismes susceptibles d'expliquer l'influence de ces couches sèches sur la portance :

- soit la croûte de surface présente une résistance importante au poinçonnement, cette hypothèse ne peut expliquer que les légers décalages des pressions à partir desquelles la déformation majeure s'amorce ;

- soit, plus vraisemblablement, tout se passe comme si la couche sous-jacente à la couche sèche n'était soumise qu'à une pression inférieure à la pression effectivement appliquée en surface ; la présence d'une couche sèche en surface modifie la transmission des contraintes en profondeur.

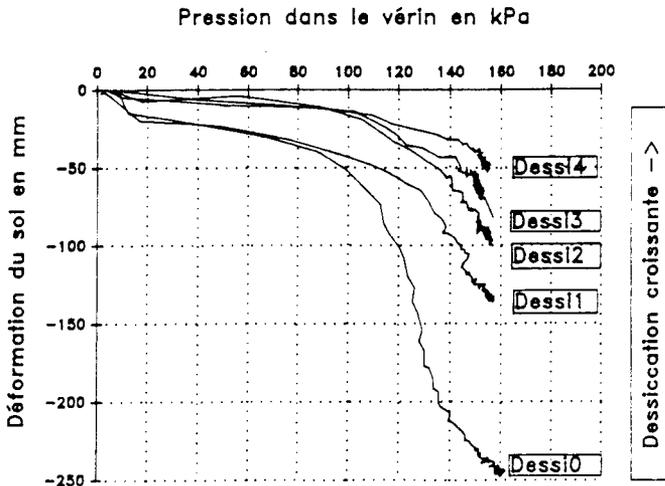


Figure 8 - Profils présentant différents niveaux de dessiccation

En tout état de cause le prototype permet de mettre en évidence des différences de comportement résultant d'états physiques, notamment hydriques, apparemment faiblement contrastés.

5. CONCLUSION

Le prototype réalisé présente, par rapport au cahier des charges fixé, un certain nombre de qualités mais reste susceptible d'améliorations.

Son **défaut majeur**, mais incontournable, est la nécessité d'avoir recours à un véhicule relativement lourd servant de point d'appui. Néanmoins il est toujours possible d'utiliser un chenillard, ou à défaut des plaques à sable, pour augmenter la portance.

Ses **qualités essentielles** sont :

- une totale autonomie sur le terrain ;
- la répétabilité satisfaisante de la mesure de déplacement par rapport à la précision requise ;
- la possibilité d'accéder à la cinétique de déformation du sol, pour une cinétique de mise en charge contrôlée.

Les **améliorations souhaitables et possibles** dans un premier temps tiennent en trois points principaux :

1 - Il est nécessaire d'obtenir une mise en charge plus rapide, si l'on veut étudier les temps courts d'application des pressions, en modifiant les caractéristiques dimensionnelles du piston et de la plaque.

La réduction du temps d'accès à la pression nominale dépend soit d'une augmentation du débit, soit d'une diminution du volume de la chambre (A).

En pratique il semble que l'on ne puisse plus augmenter le débit avec la technologie choisie. On peut par contre, en acceptant de diminuer la gamme possible de pressions applicables au sol, et/ou la surface de contact plaque-sol, diminuer le temps d'accès à la pression nominale en réduisant le volume de la chambre (A), c'est à dire le diamètre du piston utilisé.

Dans les deux cas un gain de temps de 50% est possible, mais on reste encore loin des temps de contact rencontrés lors des roulages (quelques 1/10èmes de seconde).

2 - La déformation de la surface du sol doit être mesurée directement, indépendamment du soulèvement du tracteur et de l'élasticité du système trois points.

Le mode de correction du déplacement total semble actuellement satisfaisant, il serait préférable néanmoins d'accéder à une mesure directe de la déformation du sol. Deux solutions apparaissent pour l'instant relativement simples à mettre en oeuvre :

- la première, la moins onéreuse, mais aussi la plus problématique au niveau pratique, consiste à désolidariser le capteur de déplacement du vérin pour le fixer sur une potence solidaire du sol ; cette solution présente l'inconvénient d'alourdir les manipulations sur le terrain ;

- l'autre solution consiste à fixer un second capteur sur le bâti de la machine, pour mesurer son déplacement par rapport au sol ; l'acquisition de données offre la possibilité de traiter les données en temps réel.

3 - La pression au sol doit, elle aussi, être obtenue directement.

Celle ci peut être obtenue par la mise en place d'un capteur de force au niveau du raccord piston-plaque, se substituant au capteur de pression pneumatique de la chambre du vérin. L'utilisation de ce dernier ne se justifie que pour en contrôler la mise en pression.

En ce qui concerne **l'aptitude du prototype à apprécier la portance d'un sol**, il faut d'abord souligner sa capacité à discriminer le comportement mécanique de couches de sol même faiblement différenciés par leurs profils hydriques. D'autre part, l'étude des graphes des relations profondeur d'enfoncement - pression appliquée au sol permet d'avancer des hypothèses comportementales concernant les mécanismes de déformation à partir des profils d'humidité et d'indices des vides structuraux.

Le prototype, avec les quelques améliorations proposées, est tout à fait susceptible de servir de base à l'élaboration d'un test de portance. Mais la définition d'un protocole précis à mettre en oeuvre pour parvenir à quantifier l'amélioration de portance dans des essais comparatifs (de type parcelle drainée/non drainée, par exemple) suppose

l'acquisition préalable d'un jeu d'essais à partir de situation réelle et fera l'objet d'un travail ultérieur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON G., PIDGEON J.D., SPENCER H.B., PARKS R., 1980 - A new hand-held recording penetrometer for soil studies. *J. Soil Sci.*, 31, 279-296.
- BEKKER M.G., 1956 - Theory of land locomotion. Ann Arbor : Univ of Michigan Press.
- BILLOT J.F., MARIONNEAU A., 1988 - Soil compaction : analysis of field and lab experiments. International Soil Tillage Research Organisation. 11th International Conference, Edinburgh, Scotland, 1, 197-203.
- COLLAS Ph., 1985 - Comportement mécanique d'un sol argileux d'une parcelle drainée des marais de l'ouest. Actes du séminaire sur les "Conditions et effets des excès d'eau en agriculture", Commission d'Agrométéorologie de l'INRA, 367-375.
- DURET J.L., 1984 - Essai du pénétromètre pour estimer la portance des prairies permanentes. Mémoire de fin d'étude ENITA de DIJON, 30p.
- GUERIF J., 1984 - The influence of water-content gradient and structure anisotropy. *J. Agric. Eng. Res.* 29, 367-374.
- HEDOIRE P., 1988 - Mise au point d'un prototype de pénétromètre à plaque destiné à l'étude de la portance des sols. Note interne INRA Science du Sol Avignon, Mémoire de fin d'étude ENITA de DIJON, 35p.
- MORLON P., 1983 - Notes bibliographiques préliminaires sur le piétinement des prairies pâturées par les animaux domestiques. INRA SAD, Unité Versailles-Dijon, Note Interne, 95p.
- O'SULLIVAN M.F., DICKSON J.W., HENSHALL J.K., ANDERSON G., 1983 - Electronic collection and storage data from hand held recording penetrometer. *J. Agric. Eng. Res.*, 29, 175-178.
- POPE G., 1971 - Effect of wheel speed on rolling resistance. *J. Terramechanics* 8, 51-58.
- SELA A.D., EHRLICH I.R., 1972 - Load support capability of flat plates of various shape in soils. *J. Terramechanics* 8, 36-69.
- SIMONIN X., 1985 - Essais de pénétromètres sur prairies drainées, Note Interne SESCPF-INRA Science du Sol, Orléans. 54p.
- SOEHNE W.H., 1958 - Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agric. Engineering*, 39, 276-290.
- SUDAKOV A.B., OKHYTIN A.A., 1987 - Appareil d'enregistrement du compactage provoqué par les déplacements sur le sols (en russe), *Zemlediele*, 9, 23-25.
- WIENDIECK K.W., 1968 - Stress displacement relations an terrain-mechanics : A critical discussion. Final report. *J. Terramechanics*. 5, 67-85.

**ETUDE DE L'INTERACTION
ENTRE DRAINAGE ET ETAT STRUCTURAL DE LA COUCHE LABOUREE
SUR L'EVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES D'UN SOL AU PRINTEMPS**

M. PENEL ¹ - F. PAPY ²

1 - CEMAGREF, Division Drainage, 92185 ANTONY Cedex
2 - INRA - Unité SAD (Paris-Grignon), 78850 THIVERVAL-GRIGNON

RESUME

Deux états structuraux de couche travaillée ont été réalisés sur deux parcelles, respectivement drainée et non drainée, d'un champ expérimental en sol lessivé à pseudogley. La dynamique de transfert hydrique sur les sites est étudiée grâce aux mesures tensiométriques réalisées de 10 à 75 cm de profondeur au cours de deux épisodes climatiques d'avril 1988, l'un correspondant à une dessiccation, l'autre à une humectation.

Pendant la période de mesure, qui débute cinq semaines après la fin de la saison de drainage intense, l'effet de la structure de la couche labourée est manifeste sur l'ensemble du profil hydrique. L'existence d'une interaction drainage - état structural de la couche labourée apparaît très vraisemblable.

MOTS-CLES : Drainage - Etat structural.

ABSTRACT : Interaction of drainage and tith structure on drying and wetting of a loamy soil during springtime

On the low permeable luvisol of a drainage experimental field, influence of the structure of the ploughed layer on water transfer through the soil has been investigated. Evolution of water total potential profiles during two climatic events, one drying event and one wetting event in april 1988, is given using tensiometer measurements at different depths, ranging from 0.10 to 0.75 cm.

During the measurement period, beginning five weeks after the end of the intense drainage season, the structure of the ploughed layer proves to have influence on the whole water potential profile. Interaction between drainage and arable layer structure is strongly suggested.

KEY-WORDS : Drainage - Tilt type.

*Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 191-207
AIP CEMAGREF-INRA Maitrise des excès d'eau*

1. INTRODUCTION

Le comportement structural d'un sol de texture donnée soumis à compactage dépend de l'énergie appliquée et de la durée d'application (FAURE, 1978 ; GUERIF, 1982). Il dépend également de l'état structural initial, ainsi que de l'état hydrique (PAPY, 1984 ; MANICHON, 1987, 1988). Toutes choses égales par ailleurs, à même état structural initial, le tassement d'un sol en place est moindre lorsque la contrainte est appliquée sur un sol "sec", même sur une faible épaisseur (GUERIF 1984).

Dans les conditions de la pratique agricole, ce sont principalement les variations d'état hydrique qui induisent des variations de comportement du sol au compactage. A partir des travaux de PAPY (1984), on peut imaginer que la différence de comportement hydrique au printemps, entre une couche finement fragmentée et une autre constituée de gros blocs compactés, réside dans une évaporation plus intense et une infiltration plus rapide dans la seconde, du fait de la circulation préférentielle de l'air et de l'eau au travers des lacunes.

Si cette représentation des phénomènes est valide, le drainage, en augmentant la rapidité de rabattement de la nappe, doit accentuer la différence de comportement des deux types d'état structural de la couche labourée. C'est cette hypothèse d'une interaction entre drainage et état structural de la couche labourée que nous avons cherché à tester en suivant l'évolution des profils hydriques d'un sol au printemps.

2. MATERIEL ET METHODES

Le dispositif expérimental est implanté sur les parcelles 4 et 5 du site d'Arrou (figure 1) en Eure-et-Loir. Les sols, de texture limoneuse, sont de type lessivé à pseudogley (figure 2) et l'hydromorphie est marquée dès la surface. Ils reposent, à l'aval du champ, sur un substrat constitué par un mélange de limon et d'argile à silex imperméable apparaissant à une profondeur d'environ 0,8 m à 1 m ; à l'amont, sur les parcelles 4 et 5 (tableau 1), les sols sont développés sur du loess apparemment légèrement plus perméable que l'argile à silex.

2.1 Milieu d'étude

2.1.1 Situations drainée et non drainée

La parcelle 5 sert de témoin non drainé du champ expérimental d'Arrou. La parcelle 4 est drainée par des drains PVC de 50 mm de diamètre extérieur, posés à 80 cm de profondeur, surmontés par une épaisseur de 5 à 10 cm de gravillons et disposés à 20 m d'écartement.

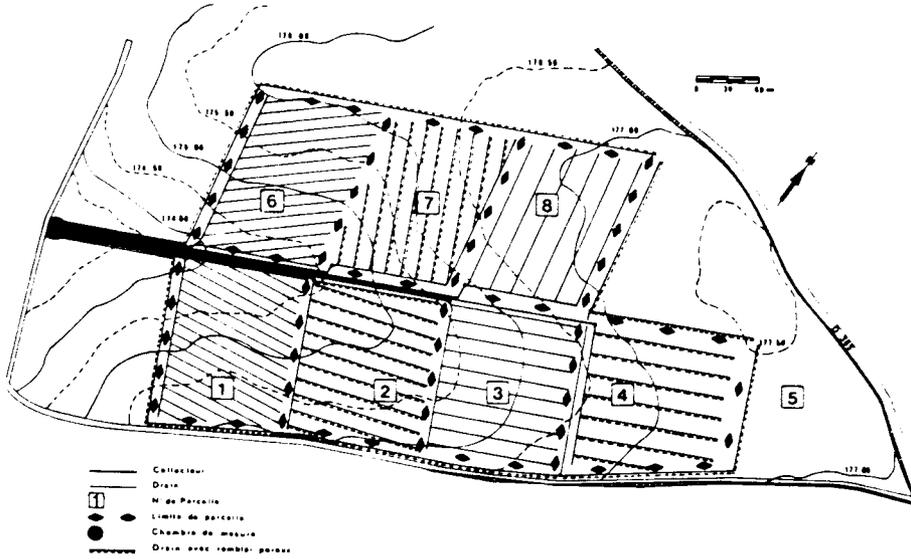


Figure 1 - Champ expérimental d'Arrou (Eure-et-Loir)

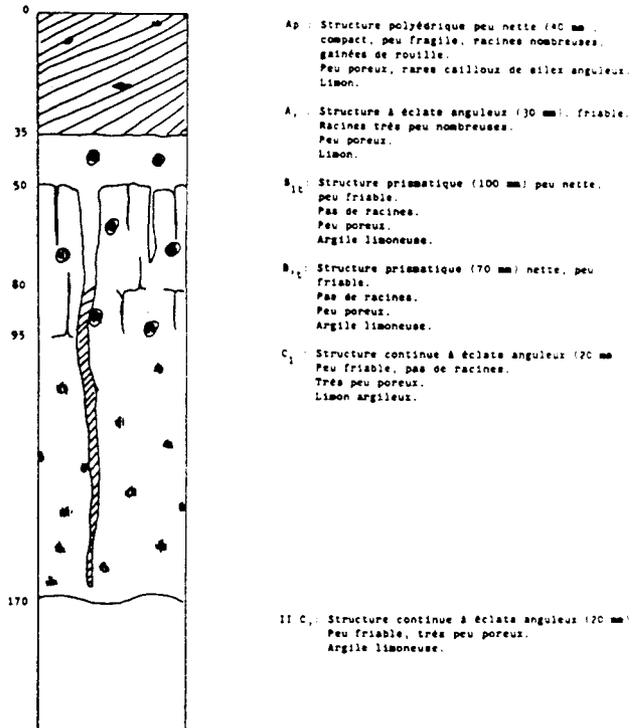


Figure 2 - Profil de sol de la parcelle 5 du site d'Arrou

PARCELLE	HORIZON PRELEVE (en cm)	GRAMULOMETRIE						pH EAU	MATIERE ORGANIQUE % (Anne)	P ₂ O ₅ (Dyer)	MgO échangeable	TENEURS EN EAU VOLUMIQUES (%)	
		ARGILE (%) 0-2 μ	LIMONS (%)		SABLES (%)		TEXTURE GEPPA					TENEUR EN EAU A LA SATURATION	
			FINS 2-20 μ	GROSSIERS 20-50 μ	FINS 50-200 μ	GROSSIERS 0.2-2mm						AU LABORATOIRE	AU CHAMP
4	0-25	11	36	44	2	2	L	6.1	1.45	0.25	0.09	46.2	38.4
	25-35	18	36	41	2	1	La	6.5	0.55	Traces	0.20	44.9	37.6
	45-60	28	30	32	2	1	La	7.0		Traces	0.33	41.5	36.6
	70-80	29	31	33	3	1	Al	6.8		Traces	0.41	40.9	36.2
	90-110	29	29	33	4	2	Al	6.1		Traces	0.52	38.7	33.0 (10.04.75)
5	0-30	13	35	45	3	2	L	6.5	1.54	0.15	0.07	44.5	38.0
	35-50	15	37	41	3	2	L	6.8	0.7		0.10	44.5	38.5
	50-80	30	31	33	3	1	Al	7.0			0.31	41.1	37.1
	80-95	30	33	31	3	1	Al	6.3			0.44	39.4	35.1
	100-140	26	34	36	3	1	La	5.2			0.48	38.7	33.6
175-185	36	34	26	3	2	Al	5.3			0.99			(10.04.75)

Tableau 1 - Analyses du sol du champ expérimental d'Arrou (analyses faites en décembre 1983 par la Chambre d'Agriculture du Loiret, selon un plan d'échantillonnage établi par CESTRE et VINCENT)

Textures GEPPA

A : argile ; Als : argile limono-sableuse ; Al : argile limoneuse ; La : limon argileux ; L : limoneux

2.1.2 Profils cultureux

Deux états structuraux de la couche labourée ont été réalisés dans chacune des parcelles 4 et 5. Ils correspondent aux deux types de profils cultureux obtenus par labour (MANICHON 1987). Le type O est meuble et fragmenté ; il résulte d'un labour fait en bonnes conditions à partir d'un état initial non compact. Le type B est constitué de blocs compacts séparés par d'importantes lacunes ; il est obtenu par un travail effectué en mauvaises conditions, après que le sol a été fortement compacté, par exemple par des récoltes faites sur sol humide. En 1987 la récolte de maïs ayant été réalisée en bonnes conditions, un état structural O a été facilement obtenu. L'état de type B a été réalisé par une opération de labour précédée d'un roulage intensif après une pluie. Chacune des deux zones travaillées a ensuite été reprise au canadien, en bonnes conditions, pour obtenir un nivellement de la surface, nécessaire à la mise en place des instruments de mesure. Les deux types d'état structural réalisés dans la couche de surface sont présentés en figure 3.

Sur une zone de 1,44 ha, recouvrant pour partie les parcelles 4 et 5, quatre situations (figure 4) ont donc été mises en place, occupant chacune le quart environ de cette zone, soit 0,36 ha :

- état structural de type O, en situation drainée ;
- état structural de type O, en situation non drainée ;
- état structural de type B, en situation drainée ;
- état structural de type B, en situation non drainée.

Tous les sites sont arrosés d'herbicide pour laisser le sol nu pendant la durée de l'étude.

2.2 Instrumentation

2.2.1 Débitmétrie, pluviométrie

Le débit des drains de l'ensemble de la parcelle 4 est mesuré, au pas de temps horaire, à l'aide du dispositif, décrit par LESAFFRE (1989), constitué d'une sonde immergée à ultrasons placée dans un bac déversoir étalonné. La pluviométrie est mesurée, au pas de temps horaire, par un pluviomètre placé sur le site.

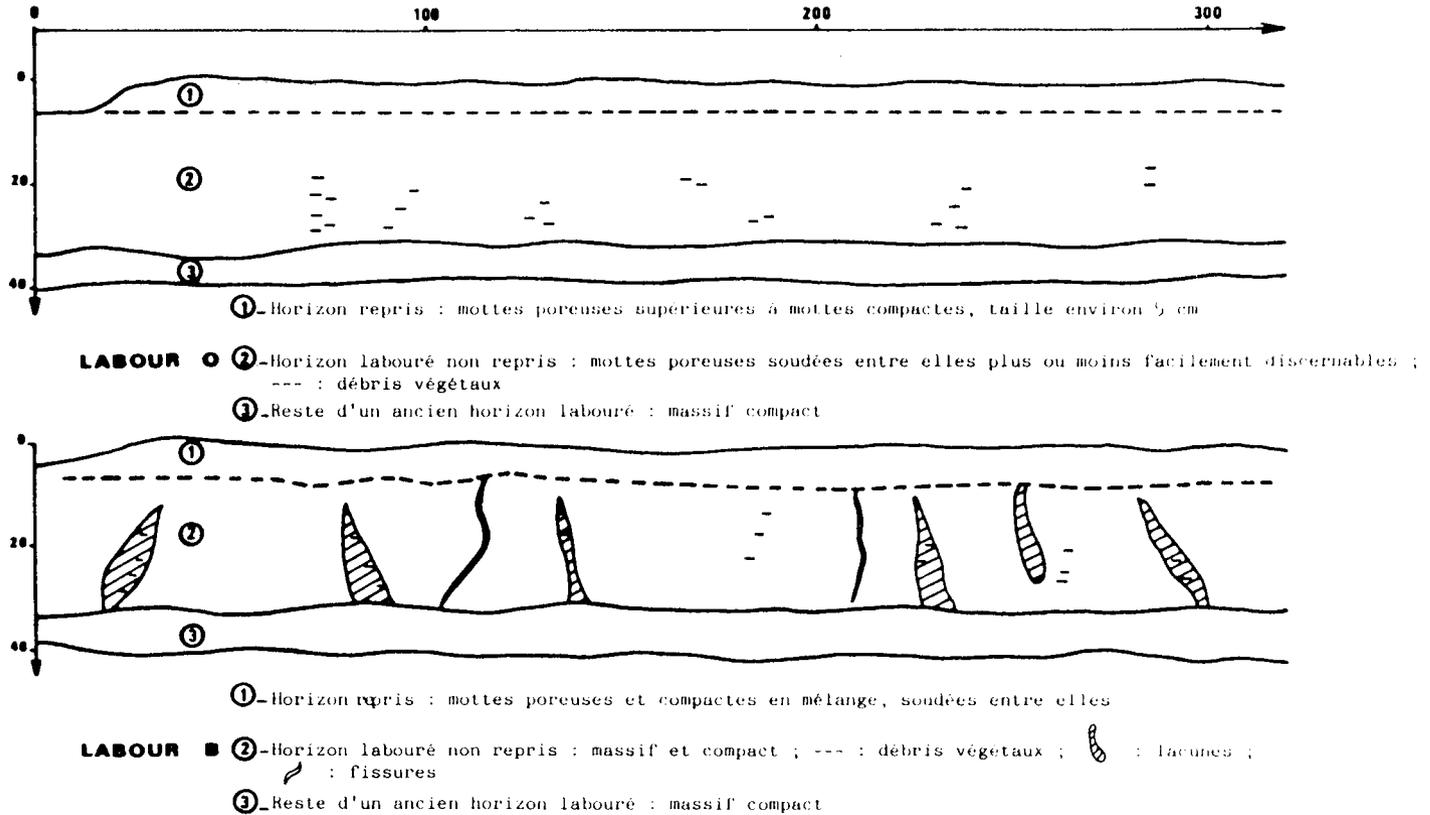


Figure 3 - Les deux types de labour au moment de la mise en place des appareils de mesure

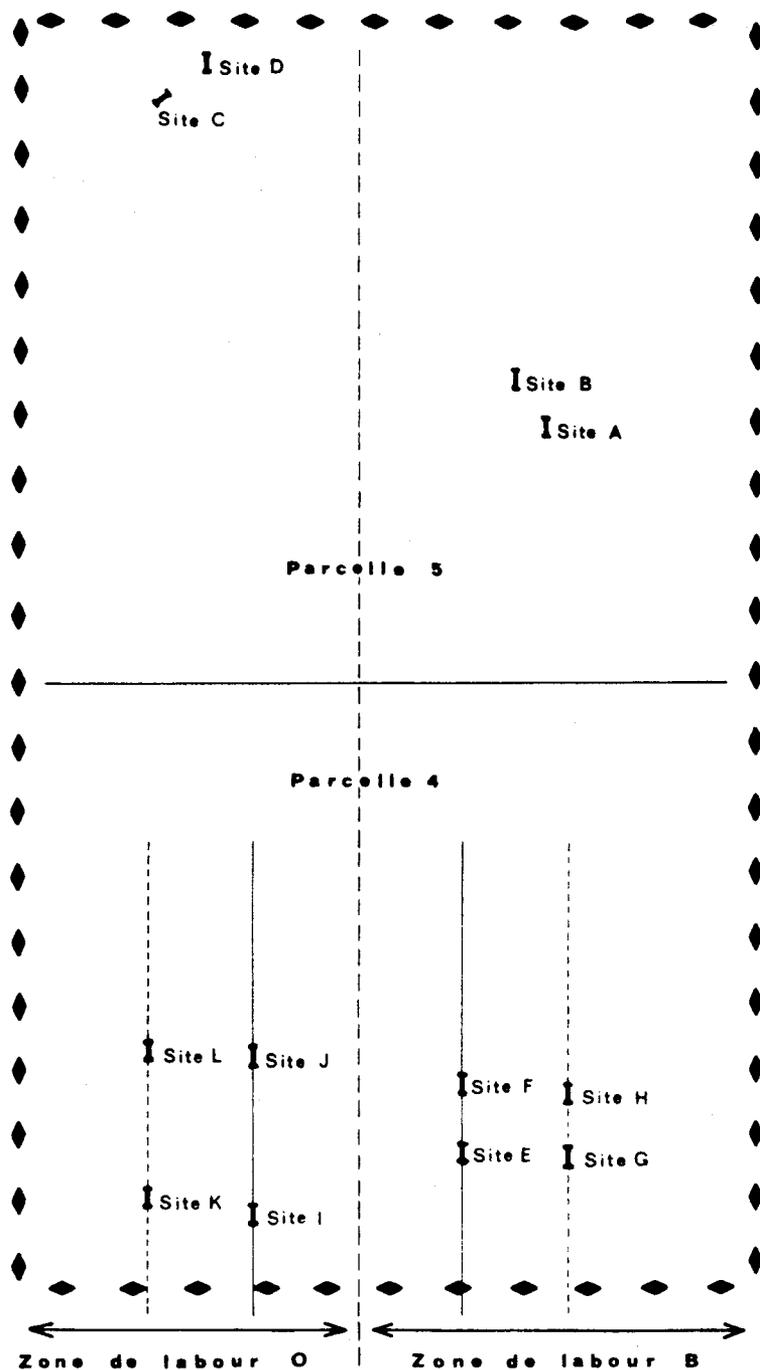


Figure 4 - Localisation des zones de labour de types O et B et des sites de mesures tensiométriques équipés à Arrou (Parcelles 4 et 5, du 31/03 au 31/05/1988)

2.2.2 Tensiométrie

Chaque situation résultant des combinaisons "Drainage/Non drainage et Etat structural O/Etat structural B" est instrumentée, sur plusieurs sites de mesure, à l'aide de six tensiomètres placés entre 75 et 10 cm de profondeur. Sur la partie drainée, les sites sont placés à la verticale du drain préalablement repéré, d'une part, en position interdrain, d'autre part.

On a évité d'implanter les sites à l'aplomb des zones de passage du tracteur ayant réalisé la reprise de labour. On dispose à chaque fois d'une répétition (tableau 2 et figure 4).

SITE	DRAINAGE ou NON DRAINAGE		TYPE de LABOUR	
	DRAINE	NON DRAINE	O	B
A		X		X
B		X		X
C		X	X	
D		X	X	
E	sur drain			X
F	sur drain			X
G	interdrain			X
H	interdrain			X
I	sur drain		X	
J	sur drain		X	
K	interdrain		X	
L	interdrain		X	

Tableau 2 - Caractérisation des sites de mesures tensiométriques équipés à Arrou (Parcelles 4 et 5, du 31/03 au 31/05/1988)

Les tensiomètres sont équipés de manomètres à mercure : les mesures sont faites, à pas de temps variable (une heure environ pendant quelques uns des épisodes pluvieux intenses observés et les premiers jours de dessiccation consécutive, quelques jours en dehors de ces périodes), par lecture de la hauteur de la colonne de mercure établie au dessus du réservoir de mercure dont le niveau est, lui aussi, mesuré.

Chaque site tensiométrique est isolé à l'amont et à l'aval par des rigoles superficielles évitant l'alimentation du site par le ruissellement de l'amont et prévenant le ruissellement

vers l'aval. Pour éviter le phénomène de battance auquel ces sols sont sensibles et qui, de plus, pourrait intervenir de façon différentielle sur les traitements O et B, la surface du sol est maintenue motteuse, par un léger griffage réalisé à intervalle régulier.

Les tensiomètres et les cannes de lecture ont fait l'objet d'un nivellement à ± 1 cm. L'erreur de mesure sur le potentiel total de l'eau est donc majorée par la somme de l'erreur de lecture sur la canne (± 1 mm Hg) et de l'erreur de mesure de la profondeur du centre de la bougie poreuse du tensiomètre (± 3 cm) : l'erreur de mesure sur le potentiel total de l'eau peut être estimée à ± 5 cm de hauteur de colonne d'eau.

2.3 Conditions climatiques

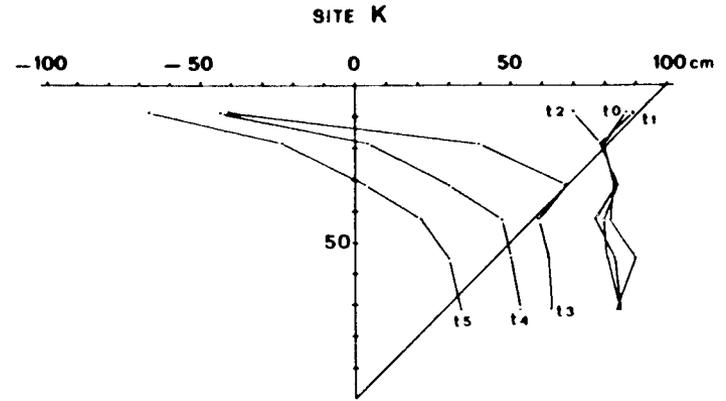
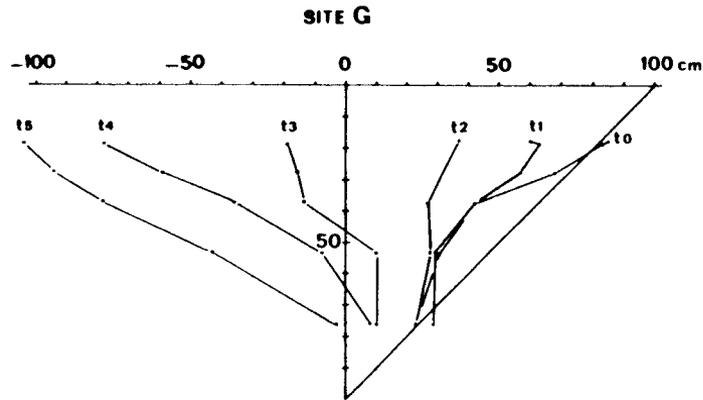
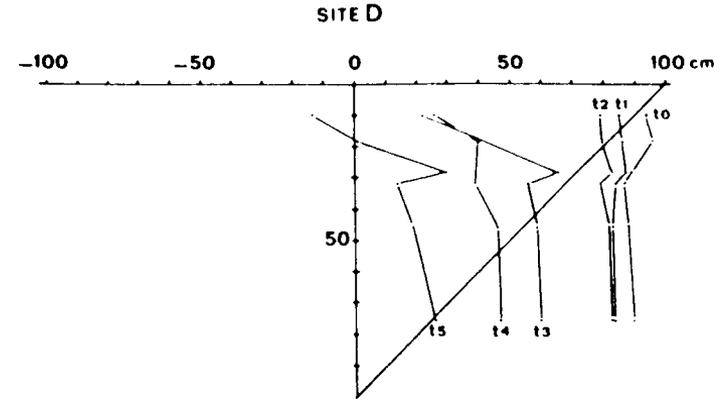
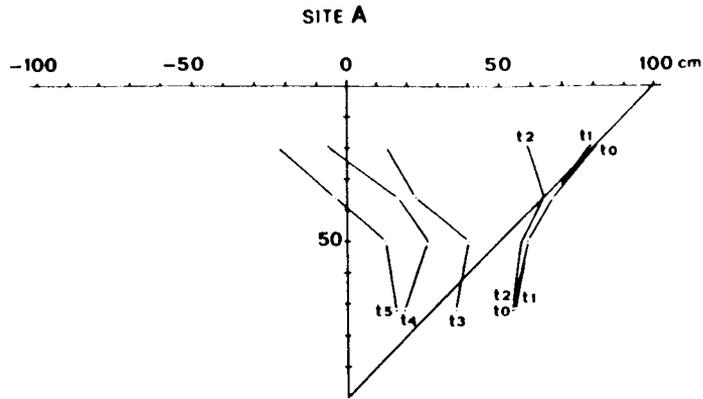
L'hiver 1987-1988 est très humide et, entre le 13 novembre 1987 et le 22 février 1988, la pluviométrie est de 274 mm, valeur nettement supérieure à la moyenne interannuelle de cette période. La saison de drainage intense, définie par ALDANONDO (1981), s'étend du 20 décembre au 22 février, avec un coefficient de restitution de 54% pour le réseau de la parcelle 4. Après la fin de saison de drainage intense, quelques écoulements sont encore observés en sortie du réseau de la parcelle 4, qui, du 22 février au 24 avril, écoule une lame d'eau de 15 mm pour une pluviométrie de 104 mm.

Les caractéristiques climatiques des trois mois de suivi sont récapitulées dans le tableau 3.

	Pluie sur site (mm)	ETP Châteaudun (mm)
mars	70,7 (*)	42,2
avril	40,8	70,6
mai	61,8	83,0

* dont 60,2 mm dans la deuxième quinzaine du mois

Tableau 3 - Caractéristiques climatiques (Pluie et ETP) des mois de mars à mai 1988 à Arrou



Site A : non drainé, état structural B

Site G : drainé, état structural B

Site D : non drainé, état structural O

Site K : drainé, état structural O

Figure 5 - Profils de potentiel total observés du 31/03 (16^h10 = t₀) au 11/04 (11^h35 = t₅)

t₁ = t₀ + 16^h50 ; t₂ = t₀ + 40^h35 ; t₃ = t₀ + 91^h30 ; t₄ = t₀ + 136^h30 ; t₅ = t₀ + 259^h25

3. RESULTATS

Les mesures tensiométriques débutent le 31 mars, soit cinq semaines après la saison de drainage intense, après un épisode pluvieux de 11,2 mm du 29 mars à 20 h au 31 mars à 14 h. Les tensiomètres installés dans le labour B à 10 cm de profondeur ont très vite décroché : placées dans la couche fragmentée, les bougies ne devaient pas avoir un bon contact avec la terre.

En dehors de la saison de drainage intense, l'effet du drainage est démontré par l'existence d'une pression de l'eau plus élevée, en profondeur et à même cote, sur les sites non drainés que sur les positions "drain" des sites drainés, quel que soit le type d'état structural. Par ailleurs, le réseau de drainage de la parcelle 4 est fonctionnel puisque la pression de l'eau est toujours nettement inférieure, à cote égale, en position "drain" à celle observée en position "interdrain", quel que soit le type d'état structural. En position "drain", la pression de l'eau est, sauf lors d'un épisode pluvieux intense, toujours négative à partir de 50 cm de profondeur, et la saturation n'est pas atteinte.

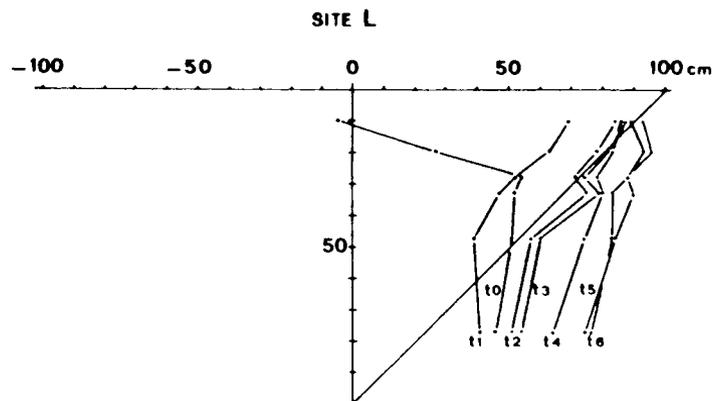
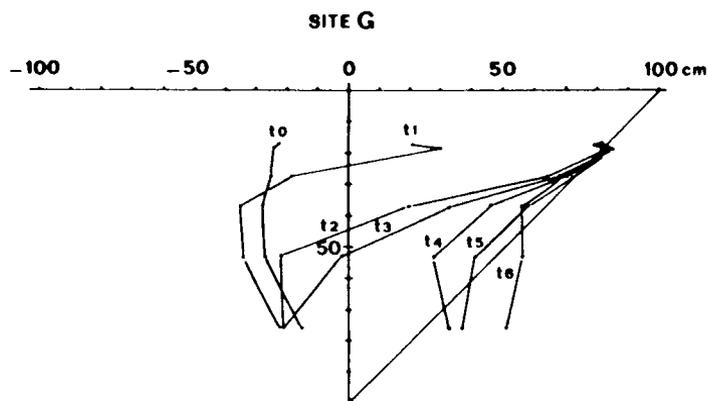
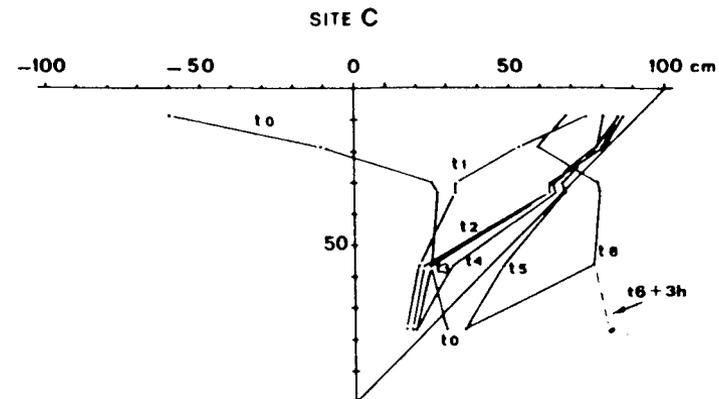
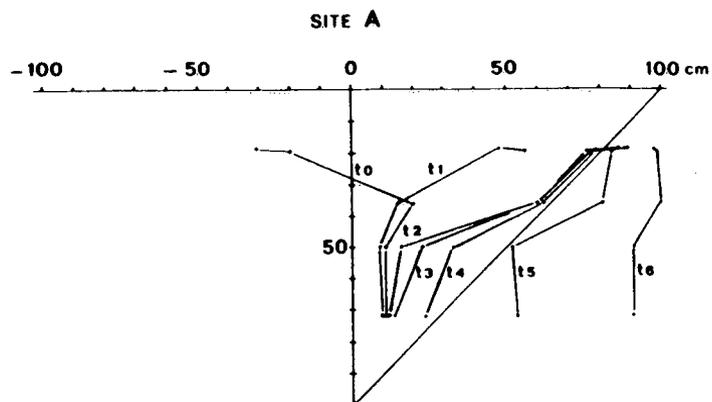
Les répétitions fournissent, aux erreurs instrumentales près, des résultats semblables : les différences observées peuvent s'expliquer par une variabilité, même faible, du profil de sol. Les dynamiques de ressuyage et d'humectation, comme les états initiaux à partir desquels elles sont observées, présentent beaucoup plus de variabilité entre traitements qu'entre répétitions d'un même traitement.

3.1 Dessication

La séquence de dessication présentée en figure 5 s'étend du 31 mars à 16h10 (t_0) au 11 avril à 10h35 (t_5). Elle débute immédiatement après un épisode pluvieux de 11,1 mm et se termine après une période de 257 heures au cours de laquelle l'ETP cumulée vaut 20 mm.

La pluie n'a pas saturé le profil de sol du site G (état structural B, interdrain). Au temps t_1 , l'évaporation a déjà desséché les 35 premiers centimètres de sol, et la dessication ultérieure est sensible sur l'ensemble du profil de sol. Aucun plan de flux nul n'apparaît.

Sur le site K (état structural O, interdrain), la recharge pluviométrique a conduit à la formation d'une nappe, dont le profil de pression est sensiblement hydrostatique. Jusqu'au temps t_1 , cette nappe est alimentée par infiltration des eaux provenant des 20 premiers centimètres. Jusqu'au temps t_2 , l'évaporation puise dans ces 20 premiers centimètres, sans affecter la nappe. Au temps t_3 , un plan de flux nul, situé vers 30 cm de profondeur, sépare une zone supérieure, soumise à l'évaporation, d'une zone inférieure, qui se dessèche par rabattement de la nappe. Mais, à partir du temps t_4 , 136 h après t_0 , ce plan de flux nul a disparu.



Site A : non drainé, état structural B

Site G : drainé, état structural B

Site C : non drainé, état structural O

Site L : drainé, état structural O

Figure 6 - Profils de potentiel total observés du 18/04 (16^h05 = t₀) au 20/04 (9^h00 = t₆)

$$t_1 = t_0 + 17^h25 ; t_2 = t_0 + 21^h50 ; t_3 = t_0 + 23^h55 ; t_4 = t_0 + 25^h50 ; t_5 = t_0 + 26^h40 ; t_6 = t_0 + 40^h55$$

Le profil initial de potentiel sur le site D (état structural O, non drainé) est quasi identique à celui observé sur le site K. Jusqu'au temps t_2 , la dynamique de dessiccation est, également, presque identique : mais sur ce site D, la dessiccation est, à même date, moins prononcée que sur le site K, drainé, même si les morphologies des profils de potentiel sont semblables.

Le profil de potentiel total observé sur le site A (état structural B, non drainé) au temps t_0 montre qu'initialement le profil est saturé à partir de 20 cm de profondeur et que des écoulements vers la profondeur ont lieu à partir de 20 cm de profondeur : au temps t_0 , la nappe est formée mais la répartition des pressions n'y est pas hydrostatique. La dessiccation a une dynamique voisine de celle observée sur le site D, mais, parce que les écoulements vers la profondeur subsistent jusqu'au temps t_1 et que la nappe initiale est plus basse qu'en D, le profil de potentiel au temps t_5 traduit un état de dessiccation plus poussée que dans le site non drainé sur labour de type O.

3.2 Humectation

La séquence d'humectation présentée en figure 6 s'étend du 18 avril à 16h05 (t_0) au 20 avril à 9h00 (t_6). Après une pluie de 6,1 mm le 16 avril, qui réhumecte un profil desséché par deux semaines sans pluie, un nouvel épisode pluvieux débute le 18 avril à 3h00, pour finir le même jour à 24h00. La pluviométrie totale de l'épisode est de 27,2 mm, principalement concentrée entre 12h et 22h (23,1 mm). Le temps t_0 se place donc au coeur de l'épisode pluvieux, et le temps t_1 neuf heures vingt-cinq minutes après la fin de la pluie. Les sites A et B, malgré les dispositions prises, ont été soumis à des apports par ruissellement au cours de cet épisode et sont restés submergés un certain temps après l'arrêt de la pluie. A titre indicatif, les mesures réalisées sur le site A sont portées sur la figure 6 ; la comparaison avec les autres sites doit tenir compte du fait que l'apport d'eau y a été plus important.

Sur le site G (état structural B, interdrain), initialement loin de la saturation sur tout le profil, le front d'humectation descend régulièrement, sans saturation des horizons jusqu'au temps t_3 . Une nappe se forme vers 70 cm de profondeur entre t_3 et t_4 . Après t_4 , la nappe, qui se gonfle légèrement pour atteindre la profondeur de 45 cm au temps t_6 , est alimentée par l'eau s'écoulant gravitairement des horizons supérieurs.

Sur le site L (état structural O, interdrain), le profil initial est plus humide : la saturation est atteinte vers 60 cm de profondeur. Jusqu'au temps t_3 , la nappe, qui se gonfle, est alimentée par l'écoulement gravitaire des eaux des 50 premiers centimètres de sol. Après t_3 , le flux vers la profondeur, dont l'existence est démontrée par l'allure des profils de

potentiel, ne compense pas les apports des horizons superficiels : la nappe se gonfle et remonte encore pour atteindre une profondeur de 10 cm au temps t_6 .

Sur le site C (état structural O, non drainé), le profil initial de potentiel total est morphologiquement semblable au profil initial observé sur le site L, mais il témoigne d'un profil de sol moins humide ; seuls les horizons situés en dessous de 80 cm de profondeur sont proches de la saturation. Jusqu'au temps t_5 , le drainage gravitaire vers la profondeur évite la formation d'une nappe : celle-ci apparaît, vers 30 cm de profondeur, au temps t_6 et occupera, quatre heures après t_6 , tous les horizons plus profonds que 30 cm.

Sur le site A (état structural B, non drainé), l'état initial ainsi que l'évolution des profils de pression sont très voisins de ceux décrits pour le site C.

4. DISCUSSION

Sauf dans un cas (celui où le labour B a reçu un apport d'eau externe), l'état initial du labour B est toujours plus sec que celui du labour O. Mais on peut raisonnablement penser qu'à la fin de la saison de drainage intense - qui a duré deux mois - les deux types de couche labourée avaient un même état hydrique. L'identité des profils obtenus après la dessiccation (t_6 dans les sites A et C de la figure 6) suivant l'inondation accidentelle du site A rend l'hypothèse vraisemblable.

Nos observations ont malheureusement débuté plus d'un mois après la fin de la saison de drainage intense, nous empêchant de vérifier cette hypothèse d'une identité des états hydriques au cours de cette phase. Si cependant nous l'acceptons, alors, comme on constate qu'au 31 avril (cf. les différents profils t_0 de la figure 5) les profils sur labour B sont plus secs que ceux sur labour O et que la différence est plus forte en situation drainée qu'en situation non drainée, on peut y voir la confirmation d'une différenciation plus forte des comportements des deux types de profil cultural du sol drainé, ainsi que nous l'avions supposé.

Les séquences climatiques que nous avons présentées permettent de discuter des différences de comportement des deux types de labour.

En régime de dessiccation (figure 5), on peut comparer les vitesses respectives de dessiccation dans la couche de surface à partir de l'instant où apparaît un plan de flux nul. A partir de t_3 , les flux sont tous ascendants au-dessus de 30 cm, sur les quatre sites présentés. Or on constate qu'entre t_3 et t_5 , en non drainé, B, en surface, se dessèche plus que O, bien

qu'étant initialement plus sec en t_3 ; en situation drainée, B, étant toujours initialement plus sec, se dessèche autant que O. Ces résultats s'expliquent par l'application à la couche B d'une énergie d'évaporation plus forte que dans la couche O, résultat d'une meilleure diffusion de l'air au sein de la couche, en raison de la présence de lacunes.

En régime d'humectation (figure 6), la comparaison des comportements des deux types de labour ne peut se faire que dans les sites drainés (sites G et L), le site A (non drainé) ayant été submergé. Neuf heures après l'arrêt de la pluie (t_1), le profil correspondant au labour B est beaucoup plus sec que celui de O. Douze heures plus tard (t_2), l'eau sature les deux profils entre 20 et 30 cm et descend gravitairement. Mais, en l'absence de mesures au-dessus de 20 cm dans B, et faute d'avoir pu obtenir un même état initial, il est difficile de tirer de ces données la démonstration d'une différence de comportement du sol à l'infiltration. Nos résultats sont cependant tout à fait compatibles avec l'hypothèse d'une arrivée de l'eau plus rapide au fond du labour B.

N'ayant pu commencer les mesures tensiométriques dès la fin de la saison de drainage intense, nous n'avons pas suivi le processus de la différenciation des profils hydriques en fonction du type de labour. Il s'ensuit que la démonstration des différences de comportement reste à faire. Cependant, aucun des résultats expérimentaux n'infirme les hypothèses faites en introduction.

5. CONCLUSION

Nos résultats confirment (PAPY 1984) que le labour B permet un gain de praticabilité, au printemps, sur le labour O, puisqu'il se dessèche plus rapidement. Ils confortent les hypothèses faites sur la différence de vitesse des circulations d'eau et d'air dans les deux types de labour.

Si l'on admet l'idée qu'à la fin de la longue saison de drainage intense de l'hiver 1987-1988 - deux mois -, les profils de potentiel hydrique étaient identiques pour les deux types de profils structuraux, on est conduit à constater que la différence de structure de la couche labourée a entraîné, au cours de la période qui a suivi, une différenciation de l'ensemble des profils hydriques : la nappe est toujours plus profonde sous une couche B que sous une couche O.

Les modèles de fonctionnement du drainage dits "saturés" ne comportent généralement qu'une gestion très simplifiée, voire simpliste, de la zone non saturée. LESAFFRE et ZIMMER (1988), à la suite de SKAGGS (1972), s'appuyant sur l'existence expérimentale, pendant la phase de tarissement non influencé du drainage, d'un plan de

flux nul situé vers 20-30 cm de profondeur, gèrent le transfert de la recharge pluviométrique vers la nappe par le biais d'un réservoir superficiel, représentant conceptuellement cette zone non saturée et limitée inférieurement par la profondeur de stockage.

LESAFFRE (1989), avec le modèle SIDRA, montre que cette formalisation est opératoire, pendant la période de drainage intense, pour prévoir débit et profondeur de nappe, mais que l'état hydrique du réservoir de surface est, à date fixée, très dépendant de la valeur de la profondeur de stockage. De plus, nos résultats - sous réserve de l'hypothèse faite - montrent que, lorsque l'on a quitté la saison de drainage intense, l'organisation structurale de la couche labourée a une influence manifeste sur l'ensemble du profil hydrique. Or c'est bien à ce moment que deviennent possibles les opérations culturales de printemps et qu'on doit apprécier l'effet du drainage sur l'amélioration des conditions hydriques d'intervention dans les parcelles (DELCEY, 1989).

Pendant la période de drainage intense, l'influence éventuelle de la structure de la couche travaillée sur la profondeur de stockage doit être étudiée, et une modélisation de l'effet du drainage sur l'état hydrique de l'ensemble du profil après la saison de drainage intense reste donc à faire. Nos résultats expérimentaux montrent la nécessité de tenir compte, dans la définition des conditions aux limites sol-atmosphère, de l'organisation structurale de la couche travaillée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Ahcène LABOU, qui a effectué les mesures de terrain, et l'Opération "Secteurs de Références - Drainage" qui a accordé un soutien financier à ces recherches.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALDANONDO J.C., 1981 - Etude du fonctionnement du drainage agricole à Arrou. Etudes du CEMAGREF, Hors-série, 1, 24 p.

DELCEY B., 1989 - Eléments pour les choix d'organisation du travail au printemps en vue d'avancer les semis de maïs : étude par simulation. Mémoire DAA. INA-PG, 62 p. + annexes.

FAURE A., 1978 - Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse de l'Université de Grenoble, 179 p.

GUERIF G., 1982 - Compactage d'un massif d'agrégats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*, 2(3), 287- 294.

GUERIF G., 1984 - The influence of water-content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. *Journ. of Agric. Engng. Res.*, Diamond Jubilee of Nat. Inst. Agr. Engng. Res.

LESAFFRE B., 1989 - Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA. Thèse Université Paris VI. *Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique Agricole*, 4, 334 p.

LESAFFRE B., ZIMMER D., 1988 - Subsurface drainage peak-flows in shallow soil. *Jour. of Irr. and Drain. Engng.*, 114(3), 387-406.

MANICHON H., 1987 - Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. *In Soil compaction and regeneration*, MONNIER G. and GOSS M.J. Eds, Balkema, 39-52.

MANICHON H., 1988 - Compactage et décompactage du sol et systèmes de culture. *C.R. Acad. Agric. de France*, 74(1), 43-54.

PAPY F., 1984 - Comportement du sol sous l'action des façons de reprise d'un labour au printemps. Thèse INA-PG, 232 p.

SKAGGS R.W., 1972 - Effect of surface drainage on water-table response to rainfall. Paper 72-732, Winter Meeting, ASAE.

**EVOLUTION STRUCTURALE D'UNE TRANCHEE DE DRAINAGE
RECONSTITUEE AU LABORATOIRE : DIFFERENCES DE COMPORTEMENT
INDUITES PAR LES APPORTS DE CALCAIRE, DE GYPSE OU DE
POLYCHLORURE D'ALUMINIUM BASIQUE**

V. SORANI¹ - A. BRUAND²

1 - Laboratoire des sols - INA.PG - Grignon - 78850 Thiverval Grignon
Adresse actuelle : Centro de Edafologia. Colegio des Postgraduados - Montecillos
- Texcoco - Edo. de Mexico - Mexique.

2 - INRA Orléans - Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France, Ardon,
45160 OLIVET - France.

RESUME

Un dispositif a été construit pour étudier l'évolution structurale de massifs de mottes devant simuler le remplissage d'une tranchée de drainage. Le matériau argileux étudié a été traité soit par du calcaire, soit par du gypse, soit encore par un polychlorure d'aluminium basique. L'évolution structurale des massifs soumis à une série d'arrosages a été comparée à celle d'un massif témoin non traité. Cette comparaison a été faite à partir de l'observation directe du mode d'arrangement des mottes et de l'analyse de propriétés hydrodynamiques des massifs. Parmi les modes d'action des différents composés employés, ceux concernant les propriétés mécaniques des mottes apparaissent être les plus importants pour expliquer les évolutions structurales enregistrées.

MOTS-CLES : Sol argileux - Bilans de volume - Gonflement - Propriétés mécaniques.

ABSTRACT : Structural evolution of simulated drainage trenches treated with inorganic soil conditioners

The influence of inorganic conditioners on the structural evolution of a clayey backfill was studied in the laboratory. The structure of an untreated backfill was compared to the structure of three other backfills treated with inorganic conditioners (limestone, gypsum and a basic aluminium polychloride). The structural evolution during the sprinkling sequence is studied using several ways. The treated backfills showed a better structure than the untreated one. Among the mechanisms involved to explain the differences in structure, mechanical properties appeared to be highly significant. Finally, the function of each treatment, which would be related to the amount of water absorbed by the clods during the sprinkling events, was discussed.

KEY-WORDS : Clayey soil - Volume balance - Swelling - Mechanical properties.

*Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 209-226
AIP CEMAGREF-INRA Maitrise des excès d'eau*

AVANT PROPOS

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Docteur Ingénieur de V. SORANI soutenue le 24 juin 1988 (Laboratoire des Sols et d'Hydrologie, INA-PG, R. CALVET et B. FOURNIER). Outre le soutien financier de l'AIP "Excès d'Eau - Drainage", V. SORANI a bénéficié d'une bourse de thèse de la Région Centre.

1. INTRODUCTION

En sols lourds, l'efficacité des réseaux de drainage, leur pérennité, sont en partie liées au maintien de la structure des matériaux présents dans la tranchée où sont installés les drains (JACQUIN et FLORENTIN, 1977 ; CONCARET, 1981). Le gonflement du matériau, rendu possible dans la tranchée par l'existence d'un volume macroporal élevé, peut en effet limiter l'infiltration jusqu'au drain des écoulements dits "de surface" (ruissellement superficiel, écoulements localisés dans la couche travaillée) et entraîner des pertes de charge au voisinage du drain. De nombreux travaux ont porté sur l'état structural de la tranchée et ses conséquences pour le fonctionnement du drainage (JACQUIN et FLORENTIN, 1977 ; LESAFFRE et LAURENT, 1983 ; ISAMBERT et DABURON, 1984 ; SAFAR, 1980 et 1986 ; TROUCHE et PERREY, 1984 ; ZIMMER, 1988).

La structure du matériau de remplissage d'une tranchée de drainage est définie à la fois par la structure interne des mottes et par leur mode d'assemblage. Ces mottes peuvent être différentes par leur taille, la nature et l'organisation de leurs constituants suivant l'horizon dont elles proviennent et les contraintes mécaniques auxquelles elles ont été soumises lors de la réalisation du réseau. Leur mode d'assemblage évolue au cours du temps par tassement lors des premiers apports d'eau puis, à la suite de transferts verticaux de particules fines, de phénomènes de gonflement-retrait ou de fragmentation par éclatement ou fissuration (CONCARET, 1981 ; TROUCHE, 1981). Cette évolution structurale a pour conséquence de modifier les propriétés hydrodynamiques de la tranchée en diminuant sa conductivité. Des expériences ont été faites en laboratoire pour limiter l'évolution structurale de la tranchée à l'aide d'apports de substances minérales ou organiques (BISHAY et DIERICKX, 1975 ; DE BOODT, 1978 ; GOOSSENS et al., 1979 ; GUYOT et al., 1984). Le mode d'action de ces différentes substances serait de stabiliser la structure, soit en limitant le gonflement du matériau, soit en établissant des liaisons entre les constituants, soit encore en maintenant des conditions floculantes (DE BOODT, 1972 ; ROBERT et al., 1983).

L'objectif de ce travail est d'analyser au laboratoire l'évolution structurale d'une tranchée de drainage en fonction du traitement appliqué au matériau. En raison de sa forte teneur en argile et de son faible développement de structuration pédologique, le matériau de sol choisi est susceptible de donner lieu à une évolution structurale importante lors des expériences. L'évolution de tranchées traitées par du calcaire, du gypse ou un polychlorure d'aluminium basique sera comparée à celle d'une tranchée témoin, et l'on cherchera à préciser quel est le mode d'action de ces différents traitements.

2. MATERIAU ET METHODES

2.1 Matériau

Le matériau choisi pour ce travail a été prélevé dans l'horizon (B) d'un profil de pélosol développé dans la formation Eocène des argiles de Lignières dans le département du Cher (SERVANT et DUPONT, 1984). Les résultats des analyses physico-chimiques sont données dans le tableau 1. Les analyses minéralogiques ont montré que les minéraux argileux sont constitués en majeure partie d'illite, et secondairement de kaolinite (SORANI et al., 1987). La teneur en eau lors du prélèvement était de 0,29 g/g et la masse volumique de 1,50 g cm⁻³. Ce matériau a été conservé humide jusqu'à la confection des mottes.

Granulométrie %			pH Carbone organique		Complexe absorbant mEq g ⁻¹					Surface externe BET
< 2µm	2 50µm	50 2000µm	g g ⁻¹		CEC	cations échangeables Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺ K ⁺ Na ⁺				m ² g ⁻¹
94,7	2,6	2,7	4,8	0,003	0,27	0,13	0,04	0,01	<0,01	127

Tableau 1 - Caractéristiques du matériau argileux étudié

2.2. Dispositif expérimental

Quatre bacs en PVC de 25 x 40 x 120 cm ont été construits. Ce dispositif s'inspire de celui utilisé par TROUCHE (1981). Il s'en différencie par le choix de privilégier la dimension verticale et la localisation de la paroi verticale transparente qui est perpendiculaire à l'axe de la tranchée et située du côté de l'évacuation (figure 1). L'eau est apportée à la partie supérieure du bac à l'aide d'un réservoir en PVC percé de 40 trous à partir desquels partent autant de capillaires (diamètre intérieur : 1 mm). Le niveau de l'eau

l'eau dans le réservoir est maintenu constant à l'aide d'un système de trop plein. Le débit total est de 18 l/h, pour une charge de 25 cm et à 20 °C. Le fond du bac est constitué du matériau tassé et saturé d'eau sur lequel repose un drain en PVC de 50 mm de diamètre. Celui-ci évacue l'eau vers un système de pesée.

2.3 Constitution des massifs de mottes

Les bacs sont remplis jusqu'à une hauteur de 105 cm avec des mottes de dimensions centimétriques (5-10 cm³) obtenues par fragmentation à la main. Chaque massif subit un traitement différent, soit avec du calcaire broyé, soit avec du gypse broyé, soit encore avec une solution de polychlorure d'aluminium basique (p.a.b). Le calcaire et le gypse ont été apportés lors du remplissage en saupoudrant 1/20 de la dose totale (2 kg) sur chaque nouvelle couche d'environ 5 cm d'épaisseur. La solution de p.a.b (41 à 60 g.l⁻¹) est apportée de la même façon mais par aspersion.

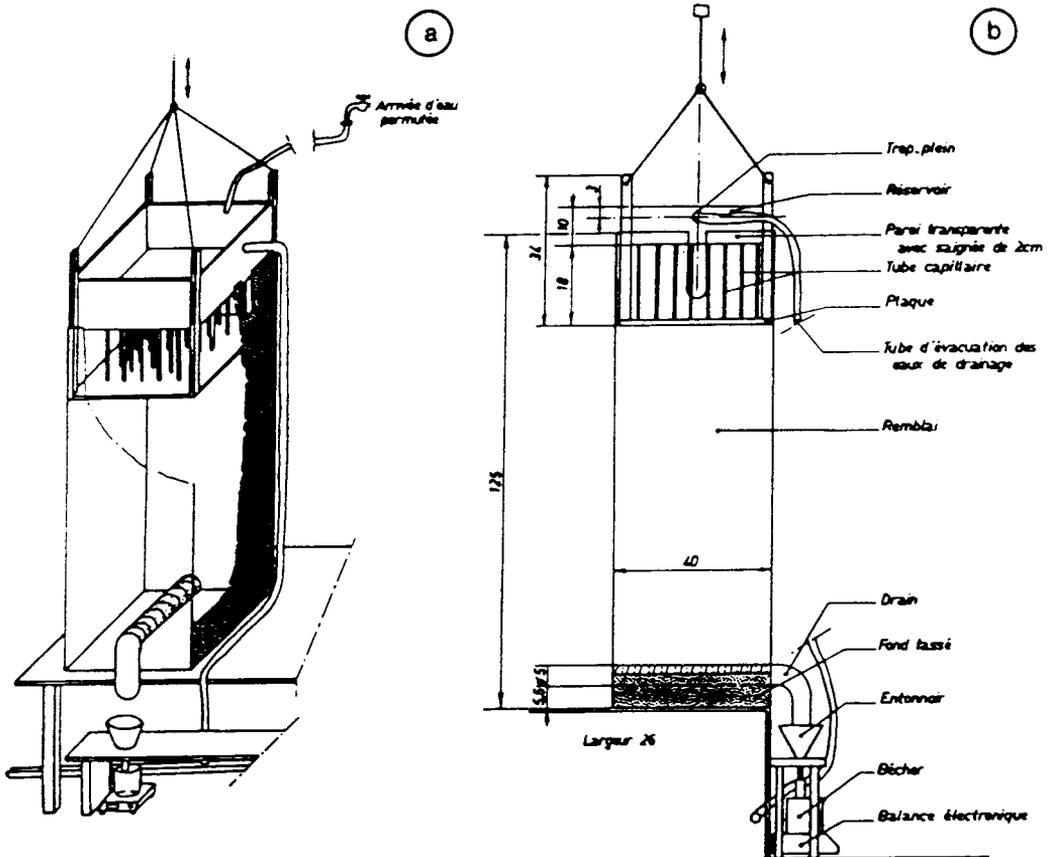


Figure 1 - Dispositif utilisé. Vue générale (a) et plan simplifié (b) avec cotes en cm

2.4 Arrosages

Huit arrosages ont été réalisés suivant le protocole présenté dans le tableau 2. La quantité d'eau ayant transité dans chaque massif est de 3085 l.

	A ₁	R ₁	A ₂	R ₂	A ₃	R ₃	A ₄	R ₄
Quantité d'eau apportée (litres)	26,1	-	758	-	8,3	-	758	-
Durée (heures)	1,4	74	42	720	0,5	5	42	5

	A ₅	R ₅	A ₆	R ₆	A ₇	R ₇	A ₈	Total
Quantité d'eau apportée (litres)	8,7	-	758	-	9,8	-	758	3084,9
Durée (heures)	0,5	43	42	2800	0,5	0,5	42	3818,4

Tableau 2 - Protocole d'arrosage donnant les quantités d'eau apportées durant les arrosages (A) et leur durée, ainsi que la durée des ressuyages (R) entre deux tarissements

2.5 Etat structural des massifs

L'état structural des massifs a été étudié de plusieurs façons :

- en suivant la hauteur du massif, mesurée par référence au plan horizontal qui passe par l'axe du drain; cette hauteur renseigne sur les variations du volume de vides; chaque valeur correspond à la moyenne de mesures en 5 points du massif ;

- en mesurant le poids du massif avant et après l'expérience, la cuve ayant été préalablement pesée vide ; ceci permet de faire des bilans volumiques pour les volumes d'eau, d'air et de solide ;

- en effectuant des observations du mode d'arrangement des mottes à travers la paroi transparente tout au long de l'expérience ; une description précise du mode d'arrangement a été réalisée en début et en fin d'expérience ; l'arrangement final a aussi été décrit à l'aide de lames minces obtenues par imprégnation avec une résine polyester après substitution de l'eau par de l'acétone en phase liquide ; une mise en évidence des chemins d'écoulement de

l'eau a été faite en les colorant avec du bleu de méthylène lors du dernier arrosage ; ces chemins d'écoulement ont été observés pendant le démontage des massifs ;

- enfin, en mesurant le temps mis par l'eau pour arriver au drain au début de chaque arrosage et le volume d'eau qui s'écoule entre la fin de l'arrosage et le tarissement ; ceci nous renseigne indirectement sur l'état structural des massifs.

Traitement	Volume (cm ³ .g ⁻¹)					
	Initial			Final		
	V _e	V _a	V _v	V _e	V _a	V _v
témoin	0,29	0,78	1,07	0,46	0,01	0,47
p.a.b.	0,35	0,53	0,88	0,42	0,15	0,57
gypse	0,29	0,79	1,08	0,42	0,16	0,58
calcaire	0,29	0,81	1,10	0,41	0,18	0,59

Tableau 3 - Volumes d'eau (V_e), d'air (V_a) et de vide (V_v = V_e+V_a) en début et en fin d'expérience

3. RESULTATS

3.1 Evolution globale du massif

Connaissant la hauteur, le poids et la teneur en eau du massif, on calcule son volume d'eau (V_e), son volume d'air (V_a) et son volume de vides (V_v, avec V_v = V_e + V_a) au début et à la fin de l'expérience après ressuyage. Ces trois volumes sont rapportés à la masse totale de sol et exprimés en cm³.g⁻¹. Les résultats sont donnés dans le tableau 3. Le volume du drain et celui de la couche de matériau tassé ne sont pas pris en compte dans le calcul.

En début d'expérience, V_e est supérieur pour la cuve traitée au p.a.b. à sa valeur pour les trois autres cuves. Ceci est dû à l'apport de 4 litres de p.a.b. sous forme de solution. Pour ce même massif, par contre, V_v est très inférieur aux trois autres valeurs à la suite d'un tassement plus important lors du remplissage que pour les autres traitements.

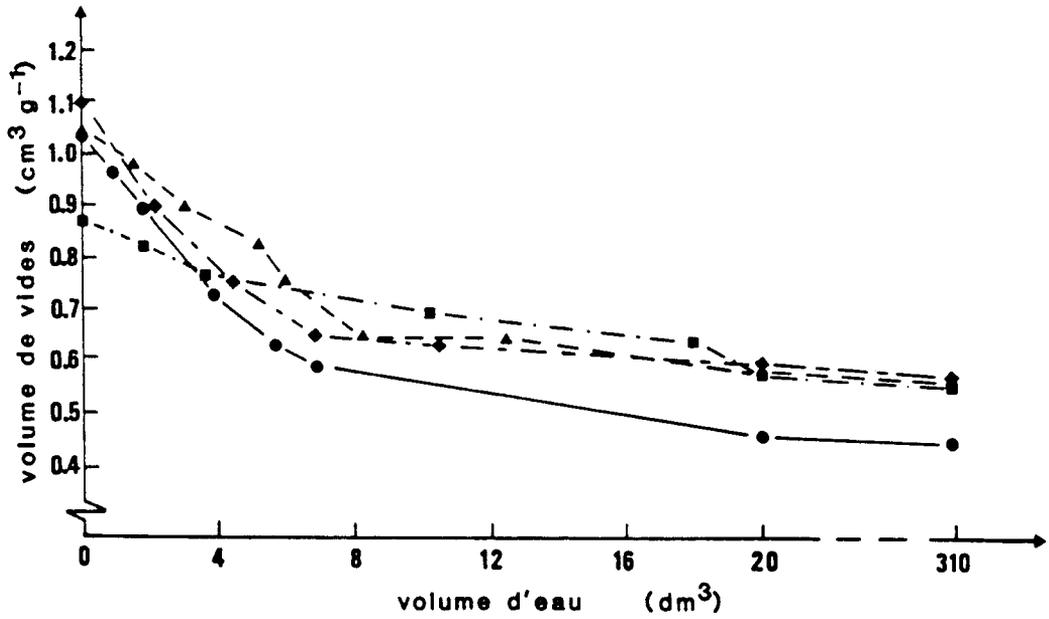


Figure 2 - Variation du volume de vides (V_v) en fonction du volume d'eau apporté sur les massifs : massif témoin (●), massifs traités avec du p.a.b. (■), du gypse (▲) et du calcaire (◆)

A la fin de l'expérience, les valeurs de V_v (et leur répartition en V_e et V_a) sont semblables pour les trois massifs traités (tableau 3). Pour le massif témoin, V_v est plus faible parce que V_a a beaucoup diminué à la suite des huit arrosages. Nous ne connaissons pas le poids de chaque massif durant l'expérimentation; néanmoins, nous pouvons discuter la cinétique des évolutions précédentes en calculant V_v à partir de la hauteur des massifs (figure 2). Le suivi de cette hauteur montre que l'essentiel de la diminution du volume de vides (90 à 95 %) intervient dès le premier arrosage (A_1) (figure 1 et tableau 2). Très rapidement, le massif traité au p.a.b. se comporte comme les massifs traités par du calcaire ou du gypse, à la différence du massif témoin qui s'en distingue de plus en plus nettement.

3.2 Morphologie des assemblages et identification des chemins d'écoulement

Après cette analyse globale de l'évolution structurale, nous avons observé l'évolution des assemblages au cours des arrosages et les avons décrits pour chaque massif en fin d'expérience. L'évolution rapide enregistrée lors du premier arrosage (A₁) consiste en une diminution de volume des massifs et résulte d'un déplacement des mottes les unes par rapport aux autres. L'assemblage des mottes observé à travers la paroi transparente devient plus compact. A partir du deuxième arrosage (A₂), les modifications sont beaucoup plus difficilement perceptibles. Les zones représentées en noir sur la figure 3 correspondent aux surfaces de contact entre le matériau et la face transparente du dispositif à la fin de l'expérience. Les critères morphologiques utilisés pour décrire les différents types d'organisation (tableau 4) ont permis de délimiter des zones de même organisation (figure 3).

Organisation n°	Nombre de mottes entrées en coalescence	Localisation du bleu de méthylène	Aspect général
1	2	sur toute la surface des mottes	mottes isolées nombreuses
2	3-4	sur toute la surface des mottes	mottes isolées rares
3	5-7	sur une partie de la surface des mottes	mottes absentes
4	8-10	uniquement dans chemins d'écoulement préférentiel	aspect compact
5	> 11	uniquement dans chemins d'écoulement préférentiel	aspect compact

Tableau 4 - Définitions des types d'organisations observés à travers la paroi transparente du dispositif

Les lames minces réalisées pour deux profondeurs (10 et 60 cm) montrent la présence, associée aux mottes initiales déformées, de petits fragments (20 -500 μm) qui occupent partiellement les vides inter-mottes (tableau 5). Les zones à organisation de type 1 se caractérisent par la présence d'un nombre important de ces fragments entre les mottes et la porosité inter-mottes est voisine de 0,5. Pour les zones à organisation de type 3, 4 et 5, aucune distinction n'a pu être faite à l'échelle microscopique. La porosité est, cette fois, voisine de 0,1 et les fragments sont absents ou non observables parce qu'ils sont incorporés aux mottes qui se sont soudées et déformées.

% de la surface de la lame mince occupé par les :						
Traitement	mottes à la profondeur de :		fragments à la profondeur de :		vides à la profondeur de :	
	10cm	60cm	10cm	60cm	10cm	60cm
témoin	85-90	95	1	0	14-9	5
p.a.b.	40-45	95	10	0	50-45	5
gypse	30-35	85	15	0	55-50	15
calcaire	45-50	85	5	0	50-45	15

Tableau 5 - Observations sur lame mince. Proportion de la surface occupée par les mottes et les petits fragments

Seuls quelques chemins d'écoulement, colorés par du bleu de méthylène, ont été mis en évidence dans le massif témoin. Par contre, ils sont très nombreux pour les massifs traités, même si ils sont apparus l'être un peu moins pour la zone à organisation de type 5 dans le massif traité au p.a.b. (figure 3). Les différences d'évolution volumique, discutées précédemment à partir des variations de hauteur des massifs, correspondent donc à des modes d'assemblage des mottes distincts. De plus, ces observations indiquent que les modes d'assemblage observés au travers de la paroi transparente sont les mêmes que ceux présents au coeur des massifs.

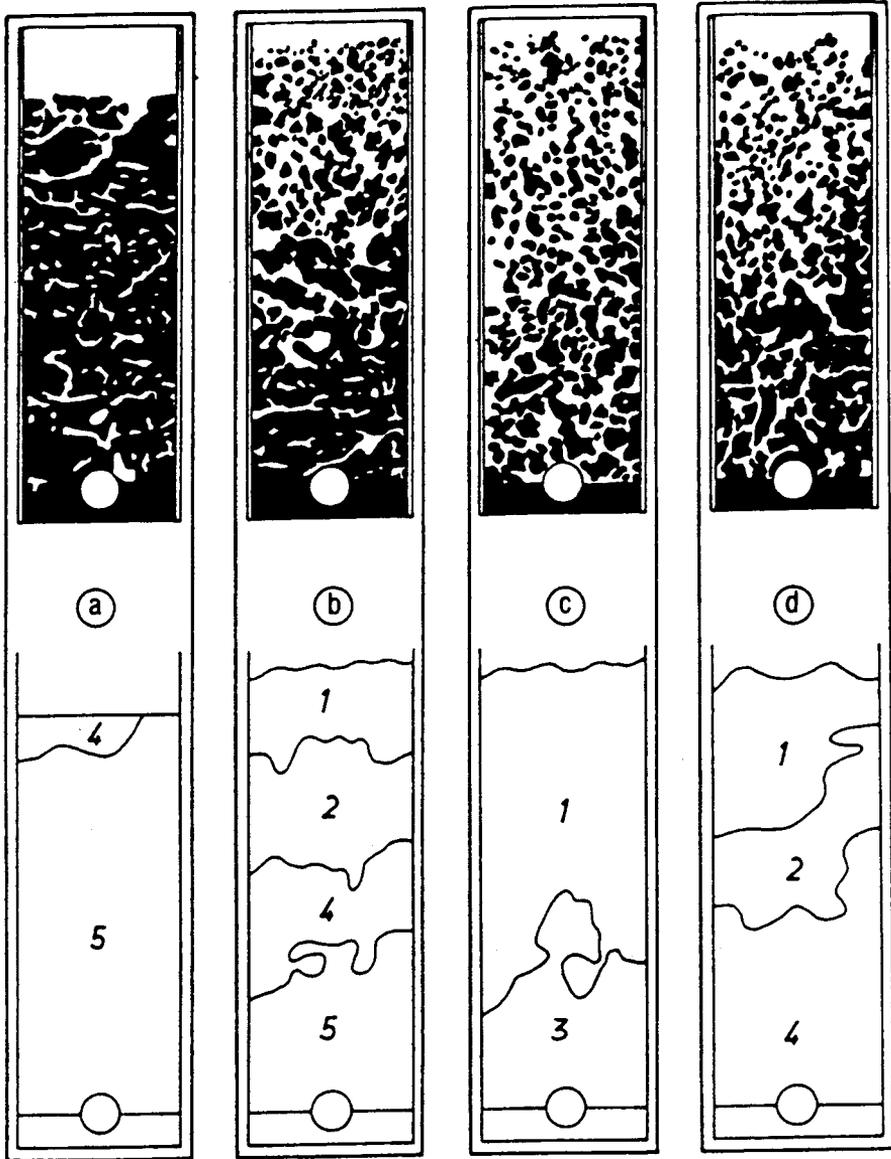


Figure 3 - Aspect général du mode d'arrangement des mottes et délimitation des différents types d'organisation (voir tableau 4) pour le massif témoin (a) et les massifs traités par du p.a.b. (b), du gypse (c) et du calcaire (d)

3.3 Caractéristiques des écoulements

Le temps de réponse du drain est l'intervalle de temps entre le début de l'arrosage et l'apparition d'eau à la sortie du drain. Ce temps de réponse dépend de la vitesse maximale de circulation de l'eau dans le massif. On peut caractériser cette vitesse en calculant une vitesse équivalente (*v.e.*) par rapport à l'épaisseur du massif (figure 4). *v.e.* augmente lentement au cours des arrosages successifs pour les trois massifs traités tout en demeurant du même ordre de grandeur. Pour le témoin, *v.e.* augmente beaucoup plus rapidement pour atteindre en fin d'expérimentation une valeur trois fois supérieure à sa valeur initiale.

En régime stationnaire de percolation, aucune lame d'eau n'est apparue en surface des massifs, excepté pour le massif témoin. Dans ce dernier cas, une lame d'eau de trop faible épaisseur (< 3 cm) pour que toute la surface soit submergée est apparue dès le deuxième arrosage (A₂). Par ailleurs, seul le massif témoin donne lieu à des écoulements avec une charge solide.

Le volume d'eau qui s'écoule lors d'un tarissement est considéré comme étant une approximation du volume de vides qui participent aux écoulements. Les valeurs sont présentées dans le tableau 6.

Traitement	Volume total écoulé (litres)	
	V _t	
	tarissement	
	A ₂	A ₈
témoin	3,58	1,64
p.a.b.	3,81	3,09
gypse	3,30	2,60
calcaire	3,26	2,63

Tableau 6 - Volume total écoulé durant le deuxième tarissement (A₂) et le dernier (A₈)

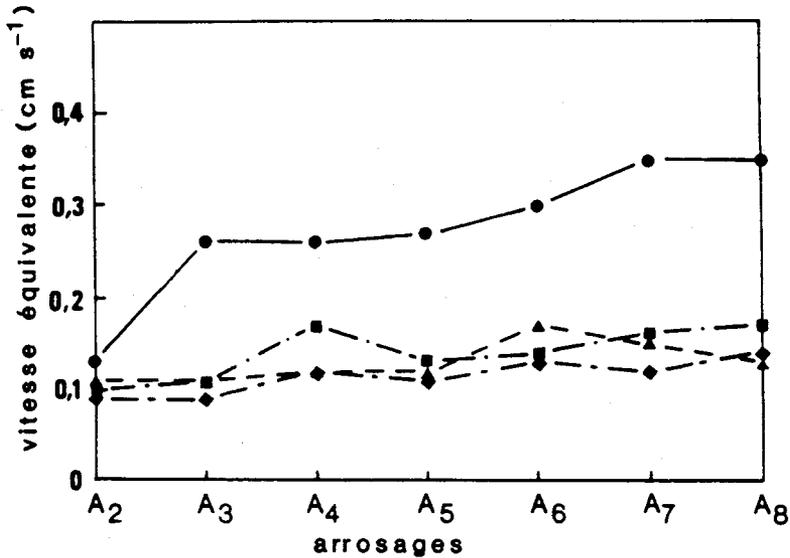


Figure 4 - Vitesse équivalente lors de chaque début d'arrosage pour le massif témoin (●), les massifs traités par du p.a.b. (■), du gypse (▲) et du calcaire (◆)

4. DISCUSSION

Les résultats obtenus mettent en évidence une évolution en deux étapes. La première consiste en un tassement rapide lors des premiers apports d'eau et la seconde, en un tassement beaucoup plus lent mais tout à fait significatif. Pour expliquer cette évolution, on peut envisager plusieurs mécanismes. Avant de les discuter, nous analyserons à partir des résultats précédents l'évolution structurale du massif témoin, puis celle des massifs traités.

4.1 Evolution structurale du massif témoin

En fin d'expérience, l'état structural du massif témoin est très compact et les écoulements ne s'effectuent que par quelques chemins préférentiels révélés par le bleu de méthylène. Leurs caractéristiques sont vraisemblablement liées à la taille des mottes initiales. Une distribution de taille plus hétérogène aurait conduit à un assemblage plus compact où de tels chemins d'écoulement auraient été moins nombreux, voire absents.

Le volume d'air total calculé pour ce massif en fin d'expérience à partir de V_a (tableau 3) est égal à 1,2 l. Ce volume est proche du volume d'eau total qui s'est écoulé lors du dernier tarissement (V_t) (tableau 6). Outre la cohérence de ces deux résultats obtenus indépendamment, ceci indique qu'en régime d'arrosage, le massif témoin est considéré comme saturé d'eau. Le fait que V_t soit supérieur au volume d'air total dans le massif s'explique par des imprécisions de mesure mais aussi par la présence d'une lame d'eau en surface du massif. L'épaisseur de cette lame n'était pas suffisante pour que toute la surface, très irrégulière même en fin d'expérience, soit recouverte. Le volume des pores par lesquels se fait l'écoulement est faible (1,2 l, soit une porosité de drainage de 1%), et correspond aux quelques chemins qui ont pu être observés lors du démontage du massif. Ce volume de pores diminue au cours des arrosages successifs puisque *v.e.* est multiplié par trois (figure 4). Lors des derniers arrosages, cette évolution est beaucoup plus lente mais encore significative. L'état structural obtenu à l'issue du dernier arrosage ne serait donc pas un état stable.

La comparaison des valeurs de V_e en début et fin d'expérience montre que les mottes ont gonflé (+ 52 %) (tableau 3). Cette absorption d'eau modifie vraisemblablement les propriétés mécaniques du matériau et peut expliquer que le massif se réorganise sous l'effet de son propre poids.

4.2 Evolution structurale des massifs traités

Pour les trois massifs traités, les comportements enregistrés sont proches et l'évolution structurale est moins importante que pour le témoin. *v.e.* croît plus lentement que pour le massif témoin, mais il semble que, comme pour ce dernier, l'état structural en fin d'expérience ne soit pas un état stable (figure 4).

Pour les massifs traités, le volume d'air total dans les massifs peut être calculé à partir de V_a (tableau 3). Ce volume d'air est voisin de 11 l pour chaque massif, c'est à dire très supérieur à V_t en fin d'expérimentation (tableau 6). Moins de un tiers de ce volume d'air se remplit d'eau en régime d'arrosage. Ainsi, seule une faible proportion du volume des vides participe aux écoulements, comparé à ce qui se produit pour le massif témoin. Comme pour ce dernier, les valeurs de V_e en fin d'expérience indiquent que les mottes ont gonflé en absorbant de l'eau. L'absorption d'eau est importante (+ 20% pour le massif traité au p. a. b. et + 45% pour les massifs traités au gypse ou au calcaire) mais inférieure à celle enregistrée pour le massif témoin.

4.3 Mode d'action des traitements

L'évolution structurale des massifs nous semble devoir être mise essentiellement en relation avec une modification des propriétés mécaniques des mottes suite à l'absorption d'eau. Ceci n'exclut pas, comme nous le verrons, d'autres mécanismes mais ils semblent intervenir de façon plus limitée.

Dès les premiers apports d'eau, on enregistre une évolution rapide du mode d'arrangement des mottes pour les quatre massifs. La vitesse de cette évolution, qui consiste en une diminution de volume du massif et qui décroît fortement au cours du premier arrosage (A₁) (figure 2), serait due à l'absorption d'eau par les mottes. Cette absorption d'eau, rapidement suffisante pour modifier les propriétés mécaniques à la périphérie des mottes, permettrait ainsi une réorganisation de chaque couche de mottes sous l'effet du poids des couches susjacentes. A l'occasion de cette réorganisation, les mottes se déforment en se déplaçant les unes par rapport aux autres, et entrent en coalescence pour former des assemblages de plus en plus compacts. Ceci est en accord avec les observations à travers la paroi transparente du dispositif et la description des assemblages de mottes en fin d'expérience. Ceci explique aussi que pour le massif traité au p.a.b., les mottes soient assemblées de façon plus compacte dès la constitution de ce massif. En effet, les propriétés mécaniques des mottes auraient été modifiées dès l'aspersion par la solution de p.a.b.

Si l'on retient ce mécanisme comme étant à l'origine de l'évolution structurale des massifs, les trois traitements appliqués interviendraient sur l'intensité de la modification des propriétés mécaniques en agissant sur l'absorption d'eau de deux façons.

Le premier mode d'action concernerait les phénomènes d'échange à la surface des particules d'argile. Les résultats présentés dans le tableau 1 indiquent que le complexe d'échange est fortement désaturé. Or, pour les traitements par du calcaire ou du gypse, les cations Ca⁺⁺ fournis par dissolution doivent entraîner une saturation des sites d'échange plus élevée que pour le massif témoin. Le matériau étant constitué à plus de 60% par des particules d'illite (SORANI 1985), les liaisons inter-particules par l'intermédiaire des cations Ca⁺⁺ hydratés seraient alors plus nombreuses et limiteraient le gonflement à la suite de ces traitements. Avec le traitement au p.a.b., du calcium est aussi apporté puisque la solution contient environ 0,5 g l⁻¹ de calcium total (SORANI 1988). Néanmoins, même si l'on admet que la totalité de ce calcium est disponible pour participer à des phénomènes d'échange, ce qui n'est vraisemblablement pas le cas, cela ne représente que 0,1 Eq de Ca⁺⁺. Or, compte tenu de la masse de matériau présent dans le dispositif et de son degré de

désaturation, 5,3 Eq de Ca^{++} seraient nécessaires à sa saturation. Les cations Ca^{++} n'ont donc au plus qu'un rôle très limité pour le traitement au p.a.b. Par contre, ce sont les ions hydroxoaluminium $\text{Al}_x(\text{OH})_{2,5x}^{+0,5x}$, présents en concentration élevée dans le p.a.b., qui interviennent pour limiter le gonflement inter-particules (ROBERT et al., 1983). En effet, selon ces auteurs, le degré d'hydroxylation de l'aluminium étant faible dans le p.a.b. (LE BISSONNAIS, 1985 ; LE SOUDER, 1987), les polycations se fixeraient sous forme peu polymérisée sur les sites d'échange.

Le deuxième mode d'action serait à relier au fait que ce n'est pas de l'eau qui percole dans les massifs traités, mais une solution. Par conséquent, l'activité de l'eau dans cette solution étant inférieure à 1, l'absorption d'eau par les mottes traitées serait inférieure à celle des mottes du massif témoin. Ainsi s'expliquerait que V_e soit plus faible en fin d'expérience pour les mottes des massifs traités que pour celles du massif témoin (tableau 3). Il faut ajouter que l'absorption d'eau ne modifie pas uniquement les propriétés mécaniques des mottes d'une couche donnée, mais aussi le poids des couches susjacentes.

On peut aussi envisager que les grains de calcaire et de gypse jouent un rôle de "frein". Les mottes se déplaçant, les grains de calcaire et de gypse présents à la surface des mottes s'opposeraient à ce mouvement. Ce mode d'action strictement mécanique est directement lié au degré de fragmentation du calcaire et du gypse et à leur répartition au sein du massif. Si un tel "rôle de frein" intervient, ceci ne peut être que lors de la première étape de l'évolution structurale lorsqu'elle est due à une modification des propriétés mécaniques de la périphérie des mottes. Par la suite, l'absorption d'eau concerne la totalité du volume des mottes; il n'est plus alors possible d'évoquer un tel mode d'action puisque c'est pour la totalité du volume des mottes que les propriétés mécaniques sont modifiées. A ce propos, l'absence de différence dans l'évolution du volume de vides, dès la fin du premier arrosage (A_1) et pour les trois massifs traités (figure 2), serait liée à la disparition de ce "rôle de frein" dû aux grains de calcaire et de gypse, ou à son absence si il n'intervient pas. Néanmoins, à la fin de l'expérience, seul le massif traité au p.a.b. possède une organisation de type 5. Or, l'absorption d'eau à l'échelle du massif est la même que pour les massifs calcaire et gypse. L'absence d'un mode d'action propre aux grains de calcaire ou de gypse, et ceci même si il n'existe plus à partir du deuxième arrosage (A_2), en serait la cause.

Quant aux petits fragments de mottes identifiés à partir des observations de lames minces, ils pourraient résulter d'une fragmentation des mottes au cours de l'expérience. En fait, sans que l'on puisse discuter la réalité puis l'importance de cette fragmentation, il nous semble plus vraisemblable d'attribuer leur création à l'étape de fabrication des mottes de dimensions centimétriques. De tels fragments existaient effectivement lors de la fabrication

des mottes. Ils seraient mobilisés par les écoulements au sein du massif, s'accumuleraient en certains endroits particuliers et ne seraient distinguables que lorsque les mottes initiales le sont aussi. Ils ne proviendraient donc pas d'une fragmentation des mottes lors des arrosages et leur présence serait liée au protocole opératoire.

Enfin, un dernier mécanisme possible doit être évoqué, c'est celui de la dispersion de l'argile constituant les mottes. L'action des traitements serait alors de maintenir des conditions flocculantes par dissolution de calcaire ou de gypse, ou présence en solution de p.a.b. (désorption de molécules adsorbées à la surface des argiles lors de la constitution du massif). Ceci est confirmé par l'absence d'argile en suspension dans l'eau ayant percolé les massifs traités et sa présence dans celle ayant percolé le massif témoin. Ce mode d'action joue donc un rôle mais nos différentes observations montrent qu'il n'interviendrait dans notre dispositif que secondairement. En effet, pour qu'il intervienne, il est nécessaire que l'argile soit mobilisée puis qu'elle se dépose. Or, nous n'avons observé que très peu de dépôts d'argile en lame mince. C'est la raison pour laquelle ils n'ont pas été pris en compte lors de la définition des types d'organisation. Néanmoins, tout ceci doit être relativisé par le fait que le type d'organisation dans lequel les dépôts devraient être les plus nombreux (type 5 du massif témoin) est celui pour lequel ils sont les plus difficilement identifiables (organisation très compacte).

5. CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif d'analyser en conditions contrôlées l'évolution structurale de tranchées de drainage soumises à différents traitements. Le dispositif utilisé a permis de réaliser des mesures et observations qui renseignent sur l'état structural du massif au cours d'une succession d'arrosages. Elles mettent en évidence que les différences de comportement enregistrées entre les massifs traités et le massif témoin seraient à attribuer à des différences de propriétés mécaniques des mottes. Les trois traitements interviendraient en limitant l'absorption d'eau au cours des arrosages. Compte tenu des modes d'arrangement des mottes en fin d'expérience, il semble que le classement des traitements soit : gypse > calcaire > p.a.b.

D'un point de vue pratique, les résultats obtenus au laboratoire sur mottes de taille calibrée ne peuvent être utilisés directement pour discuter de l'emploi de tel ou tel traitement. Outre les aspects techniques et financiers, le comportement sur le terrain d'un remplissage de tranchée sera vraisemblablement différent de celui observé au laboratoire. L'état structural du matériau est en effet très différent dans les deux cas. C'est l'une des raisons pour lesquelles un réseau expérimental de drainage a été installé à l'automne 1988.

Son suivi hydraulique et agronomique, qui est réalisé par le Service Régional d'Aménagement des Eaux de la Région Centre et la Chambre d'Agriculture du Cher, devrait conduire à une meilleure estimation de l'intérêt des trois traitements étudiés.

D'un point de vue méthodologique, on peut constater que l'état initial du massif traité au p.a.b. était différent de celui des trois autres massifs. Même si cette différence initiale ne semble pas avoir eu de conséquences sur les évolutions enregistrées au cours de l'expérience, il serait préférable de l'éviter. Il suffirait pour cela d'apporter aux trois autres massifs une quantité d'eau identique à celle apportée lors de la constitution du massif p.a.b. et de la même façon. D'autres déterminations pourraient être aisément effectuées avec le dispositif utilisé dans cette étude. Un suivi des éléments en solution permettrait de discuter la cinétique d'élimination des produits apportés lors des traitements. De la sorte, il serait aussi possible de mettre en relation les caractéristiques de la solution percolant le massif et l'évolution structurale de ce dernier. Par ailleurs, une description précise des courbes de tarissement renseignerait plus sur l'évolution des vides participant aux écoulements que ne le permet le volume total d'eau écoulé lors d'un tarissement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement MM. J. DUPONT, J.F. MORIN et J. SERVANT (FDGEDA Cher, Bourges) pour leur aide et les nombreux conseils apportés au cours de cette étude et M. P. COURTEMANCHE (SESCPF, INRA Orléans) pour la réalisation des dispositifs expérimentaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BISHAY B.G., DIERICKX W., 1975 - Drainage efficiency in a low permeable clay-loam soil through physical modification of the trench backfill. *Pédologie*, 25(3), 179-189.

CONCARET J., 1981 - Drainage agricole. Théorie et pratique. Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne. 390 p.

DE BOODT M., 1972 - Improvement of soil structure by chemical means. Reprinted from optimizing the soil physical environment toward greater crop yield. Academic Press, Inc., New York and London, 43-55.

DE BOODT M., 1978 - Artificial soil stabilisation of backfill in field drainage. *J. Sci. Fd. Agric.*, 29, 417-422.

GOOSSENS F., DIERICKX W., GABRIELS D., DE BOODT M., 1979 - Soil conditioners for stabilising trench backfill in an unstable loam soil of low permeability. *J. Sci. Fd. Agric.*, 30, 1139-1147.

GUYOT J., DELMAS A.B., JACQUIN F., 1984 - Amélioration de la structure de sols salés par le gypse. in Comptes Rendus du Colloque Fonctionnement hydrique et comportement des sols. Dijon, 22-25 mai 1984, AFES éd., 359-376.

ISAMBERT M., DABURON É., 1984 - Sols très argileux du cénomanien du Perche. Comportements hydriques en mécanique au champ. Application au drainage agricole. *in* Comptes Rendus du Colloque Fonctionnement hydrique et comportement des sols. Dijon, 22-25 mai 1984, AFES éd., 175-189.

JACQUIN F., FLORENTIN L., 1977 - Possibilités de drainage dans les sols lourds Lorrains. Effet tranchée dans un pélosol. C.R. Acad. Agric. Fr., 907-914.

LESAFFRE B., LAURENT F., 1983 - Le fonctionnement hydraulique des réseaux de drainage agricole. Débits de pointe et de tarissement non influencé, rôle de la tranchée de drainage. C.R. Acad. Agric. Fr., 1167-1178.

LE BISSONNAIS Y., 1985 - Etude expérimentale de l'influence des conditionneurs de sol sur la micro-organisation et les propriétés physiques des argiles et des sols. DEA Univ. Orléans, 113 p.

LE SOUDER C., 1987 - Effet d'un conditionneur minéral sur la battance des sols cultivés. Etude en conditions naturelles et sous pluie simulée. DAA, INA PG, 86 p.

ROBERT M., VENEAU G., HERVIO M., 1983 - Rôle des composés amorphes du fer et de l'aluminium sur quelques propriétés des argiles. Influence du degré d'hydroxylation du cation. *Science du Sol*, 3-4, 235-251.

SAFAR T., 1980 - Interaction entre phosphogypse et effet tranchée dans le cadre des techniques d'assainissement des sols. DEA, INPL-Univ. Nancy I, 51 p.

SAFAR T., 1986 - Contribution à l'étude des interactions entre hydraulique agricole, dynamique de l'eau et des sels dans les sols argileux sous climat aride et tempéré. Thèse d'Etat, INPL Nancy, 228 p.

SERVANT J., DUPONT J., 1984 - Carte des sols de la Région Centre au 1/50 000. Feuille de St Amand Montrond (Cher). Chambre d'Agriculture du Cher, FDGEDA Carte et notice explicative. 142 p.

SORANI V., 1985 - Contribution à l'étude du comportement hydrodynamique des sols développés sur les argiles de Lignièrès (Région Centre). DAA, INA PG, 84 p.

SORANI V., BRUAND A., FOURNIER B., TESSIER D., 1987 - Comportement des horizons d'un sol argileux en fonction de l'état hydrique : étude d'échantillons à structure conservée. *Science du Sol*, 25(3), 133-144.

SORANI V., 1988 - Evolution structurale de la tranchée de drainage. Sols argileux lourds de l'Eocène du Cher. Thèse Doc. Ing. INAPG, 131 p.

TROUCHE G., 1981 - Aspects agronomiques et hydrodynamiques du drainage des sols à profil différencié du Val de Saône. Thèse Doc. Ing., Inst. Sci. Terre Univ. Dijon, 147 p.

TROUCHE G., PERREY C., 1984 - Facteurs de dégradation de l'effet tranchée. Conséquences sur le fonctionnement des réseaux de drainage. *in* Comptes Rendus du Colloque Fonctionnement hydrique et comportement des sols. Dijon, 22-25 mai 1984, AFES éd., 151-165.

ZIMMER D., 1988 - Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement. Thèse Univ. Paris 6, 321 p.

RUSSELL J.L., 1934 - Scientific research in soil drainage. Jour. of Agric. Sci., 24, 544-573.

VAN DER MOLEN W.H., 1986 - Land Drainage : Art, Skill, Science or Technology ? In : Hydraulic Design in Water Resources Engineering : Land Drainage. Springer-Verlag, 1-8.

ZIMMER D., 1989 - Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement. Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique Agricole, 5, 26.

Lire aussi :

ADDISCOTT T.M., WAGENET R.J., 1985 - Concepts of solute leaching in soils : a review of modelling approaches. Jour. of Soil Science, 36, 411-424.

LLIBOUTRY L., 1985 - Modèles et révolution en Sciences de la Terre. La Recherche, 16 (163), 272-278.

VACHAUD G., VAUCLIN M., ADDISCOTT T.M., 1990 - Solute transport in the vadose zone : a review of models. Int. Symposium on Water Quality Modeling of Agricultural Non-Point Sources, USDA-ARS, Part 1, 81-104.

YOUNGS E.G., 1988 - Soil physics and hydrology. Jour. of Hydrology, 100, 411-431.

Le sol en place étant un milieu polyphasique (solide, liquide et gaz), il est évident que les modifications quantitatives relatives de ces phases vont influencer sur les propriétés et le comportement physiques du sol : le drainage, diminuant l'importance de la phase liquide, va donc affecter ces propriétés, ce comportement.

De plus, la phase solide comporte généralement une proportion plus ou moins grande de minéraux argileux dont certaines propriétés changent en fonction de l'état énergétique de l'eau du sol ; le drainage, après avoir éliminé plus ou moins l'eau présentant un potentiel matriciel voisin de zéro, va permettre, par des effets mécaniques ou thermiques, le déplacement et le départ de l'eau de rétention des argiles, et donc, la modification de leurs assemblages.

L'augmentation de l'importance de la phase gazeuse, conséquence du drainage, et les phénomènes de retrait et de gonflement dûs aux modifications de teneur en eau, vont donc faire évoluer la plupart des propriétés physiques et mécaniques des sols drainés. Une approche de ces différentes actions a été présentée lors d'un Colloque de l'Académie d'Agriculture de France (GUENNELON, 1987 a). Mais est-il possible, sur la base de cette seule connaissance de l'évolution hydrique des sols et de ses répercussions sur chaque propriété physique en particulier, de prévoir le comportement global du sol, et donc, de prévoir quantitativement l'effet du drainage ? Peut-on adopter une telle démarche déterministe, ou bien faudra-t-il se limiter à des études de cas, ne débouchant que sur des typologies semi-quantitatives. Le second type d'approche a fait l'objet de nombreux travaux dans le passé ; plusieurs sont cités par J.L. RUSSEL (1934), dans son article : "*Scientific Research in Soil Drainage*".

En fait, il ne semble pas possible de relier, de façon simple, l'établissement d'un réseau de drainage, son fonctionnement et son résultat, à l'évolution d'une propriété physique donnée.

On peut prendre comme exemple l'influence du drainage sur les propriétés thermiques des sols, problème qui n'a d'ailleurs pas été abordé lors des travaux relatés dans le présent ouvrage. En effet, il peut sembler évident que les diverses expressions du comportement thermique d'un sol soient la résultante du comportement thermique de chacun de ses constituants. Si l'on pouvait donc prévoir l'évolution relative des proportions des différentes phases, on pourrait en déduire l'évolution du sol lui-même. Plusieurs travaux réalisés dans le cadre de l'action programmée, relatée dans le présent ouvrage, tentent de prévoir cette évolution hydrique, en sols drainés, à laquelle on pourrait relier l'évolution des propriétés thermiques.

Malheureusement, les études menées en ce domaine se situent à deux pôles opposés et le rapprochement est assez difficile à faire : d'une part, les propriétés thermiques de sols ont été étudiés sur des échantillons ramenés au laboratoire ainsi que leurs modifications en fonction de la teneur en eau ; d'autre part, des travaux ont été effectués sur des comportements thermiques globaux, comme l'évolution de la température *in situ* ou même, de façon plus globale encore, sur les comportements des peuplements végétaux (germination, croissance), tels qu'influencés par les propriétés thermiques. Le lien de causalité n'est pas, alors, mis clairement en évidence.

L'exemple d'un travail concernant l'influence du drainage sur les propriétés thermiques d'un sol cultivé peut être tiré d'une expérience réalisée sur les possibilités théoriques de l'émergence de blé de printemps et de l'activité bactérienne dans des sols lourds (WATERS, 1977). Sur deux parcelles, l'une drainée, l'autre non drainée, l'auteur observe, grâce à des enregistrements continus de température à 1, 2, 4, 8, 16, 32 et 64 cm de profondeur, des différences de comportement thermique entre ces deux parcelles. Ces différences portent sur la température moyenne (température de part et d'autre de laquelle se produisent les oscillations diurnes à une période courte donnée), sur l'amplitude (différence entre la température moyenne et la température maximale atteinte, vers 16 h. GMT) et la phase (durée en heures, à partir de minuit avant le dépassement de la température moyenne : de 10 à 16 heures, selon la profondeur de mesure). Ces trois variables rendent compte de la fonction d'onde sinusoïdale des variations diurnes de la température : jusqu'à 8 cm de profondeur, la température moyenne et l'amplitude sont plus élevées en sol drainé qu'en sol non drainé, surtout lorsqu'on a dépassé la période de drainage intense.

L'auteur explique alors (mais les mesures hydriques qui corroboreraient cette explication ne sont pas présentées) que la teneur en eau, plus faible en sol drainé, augmente l'efficacité de l'énergie thermique reçue par le sol pour accroître la température du sol et donc la somme des degrés de température nécessaire à la germination et à l'émergence du blé de printemps; la température minimale de germination étant de 4,5 °C, et la somme de température pour l'émergence de 93 °C, l'effet du drainage permettrait une *précocité* théorique de trois jours environ, pour une profondeur de semis de 4 cm. Les différences de température observées permettraient également une augmentation théorique de 200% de l'activité microbienne en sol drainé. L'auteur précise que ce résultat peut n'être dû qu'en partie aux propriétés thermiques, mais aussi aux conséquences du drainage sur l'aération du sol et la diffusion de l'oxygène.

Mais une telle approche est liée à la représentativité des mesures : or, les différences de température relevées sont faibles (généralement de l'ordre de 1 °C), que ce soit pour les températures moyennes ou pour les amplitudes. L'extrapolation pour le calcul de la somme de température de 93 °C aboutit à une précision de l'ordre d'un jour pour une précocité annoncée de 3 jours. D'autre part, ces mesures, obtenues sur un site unique par parcelle, ne tiennent compte ni de la localisation de la mesure par rapport au drain, ni de la variabilité spatiale intrinsèque des matériaux eux-mêmes, conductivité hydrodynamique et diffusivité conditionnant l'évolution hydrique. Ce type d'approche, s'il n'est pas multiplié et n'est pas soumis à une analyse statistique, ne permet pas d'affirmer une quelconque influence potentielle du drainage sur l'évolution effective des propriétés thermiques des sols.

C'est également ce qui ressort des travaux anciens relatés par RUSSEL (loc. cit.) : les expériences réalisées, et citées dans cet article, font apparaître des différences faibles, de 1 ° à 5 °C, entre sols drainés et sols non drainés, mais, dans certains cas, la seule situation par rapport aux drains peut engendrer également des différences de température pouvant aller jusqu'à 1 °C.

On peut, dès lors, adopter un autre type de démonstration plus déterministe qui consiste, partant des paramètres thermiques eux-mêmes, à étudier la sensibilité, à ces paramètres, d'un modèle décrivant l'évolution thermique d'un sol, au fur et à mesure de l'évolution hydrique conditionnée par l'opération de drainage.

Ces paramètres thermiques sont :

- la **capacité thermique** (capacité calorifique volumique) C , qui représente la possibilité d'absorption par le sol de l'énergie calorifique reçue ; en première approximation, c'est une grandeur additive que l'on peut appréhender par la somme pondérée des capacités thermiques de tous les constituants : solides minéraux, matières organiques, phase liquide, phase gazeuse ($J \cdot m^{-3} \cdot ^\circ K^{-1}$) ;
- la **conductivité thermique apparente**, λ^* ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$) ;
- la **diffusivité thermique apparente**, α , qui est le quotient λ^*/C des deux premiers paramètres, qui s'exprime donc en $m^2 \cdot s^{-1}$.

Ce sont ces paramètres qui vont déterminer les variations de la température du sol à diverses profondeurs en fonction des conditions aux limites (énergie calorifique incidente), toutes choses égales par ailleurs.

On peut mettre en évidence l'influence de ces paramètres dans un modèle, simulant un domaine monodimensionnel vertical, semi-infini, homogène et isotrope soumis à sa limite supérieure à une condition de flux ; le flux de chaleur entrant est exprimé proportionnellement à la différence entre la température du milieu extérieur supposée constante (T_0) et la température à la cote $z = 0$, à la surface du milieu (T_e) (PASSERAT DE SILANS, 1986) :

$$qh = \bar{h} (T_e - T_0)$$

Dans ce cas, et si T_i est la température initiale du sol, la température T , à la profondeur z et au temps t , est donnée par :

$$\frac{T - T_i}{T_e - T_i} = 1 - \operatorname{erf}(\sigma) - \left[\exp\left(\frac{\bar{h}z}{\lambda^*} + \frac{\bar{h}^2 \alpha t}{\lambda^{*2}}\right) \right] \left[1 - \operatorname{erf}\left(\sigma + \frac{\bar{h} \sqrt{\alpha t}}{\lambda^*}\right) \right]$$

où λ^* est la conductivité thermique apparente et α la diffusivité thermique apparente, avec :

$$\sigma = \frac{z}{\sqrt{4\alpha t}}$$

La dépendance de T vis-à-vis de λ^* et α peut être mise en évidence dans des cas plus complexes de profils de sol, non uniformes, et d'évolution conjointe des profils hydriques (PASSERAT DE SILANS, loc. cit.). Conductivité et diffusivité peuvent donc être testées, quant à leur influence, par des simulations réalisées par un tel modèle.

Or les variations de la diffusivité et de la conductivité thermique sont relativement faibles, tant que le sol reste à des humidités volumiques supérieures à 20%. SCOTTER et HORNE (1985) citent une variation de la conductivité thermique de 1,1 à 1,2 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, quand le potentiel d'un sol de limon passe de - 4 kPa (teneur en eau pondérale de 0,55) à la saturation (teneur en eau de 0,61).

La diffusivité thermique, quant à elle, ne varie pratiquement pas.

En fait, ces paramètres phénoménologiques ne changent significativement que lorsque les sols sont soumis à une forte dessiccation par évapotranspiration, c'est-à-dire après la période où le drainage a produit son effet, et si n'intervient aucune phase de précipitations.

Ces observations sur les paramètres de transfert thermique, et les utilisations faites en simulation sur des modèles de répartition des températures, semblent montrer qu'il ne faut pas attendre de l'effet du drainage, des différences notables sur la vitesse de réchauffement du sol, par exemple. En général, les écarts de température relevés, entre parcelles drainées et non drainées, dans des expériences bien contrôlées, sont de l'ordre de 0,2 °C et atteignent rarement 0,8 °C, en dépit de l'effet bien marqué sur le niveau de la nappe et sur les variations de teneurs en eau. Or, pour un même traitement, sur une même parcelle, la variabilité mesurée de la température du sol est souvent bien plus grande. Des différences de température plus importantes doivent plutôt être attribuées à la variation d'autres facteurs que les paramètres thermiques *sensu stricto* (SCOTTER et HORNE, loc. cit.).

Au travers de l'exemple des variations des propriétés thermiques, on peut voir que la mise en évidence spécifique des effets du drainage sur les propriétés des sols ne peut découler de la simple étude de la variation des paramètres physiques en jeu, en relation avec l'état hydrique du sol ; *a fortiori*, la détermination de ces paramètres au laboratoire, sur des échantillons plus ou moins perturbés, n'est-elle pas suffisante pour faire apparaître des différences significatives entre parcelles drainées et parcelles non drainées. Les exemples d'observations contradictoires sont nombreux, et souvent, le recours à la modélisation et à la simulation, complété par des études de sensibilité, explique ces divergences expérimentales.

Doit-on, pour autant, renoncer à prévoir le comportement physique d'un sol drainé, autrement que par la constatation globale du résultat final ?

En d'autres termes, quels problèmes restent posés, à propos du drainage, qui découlent de propriétés physiques des sols dont on connaît, par ailleurs, à peu près correctement, le déterminisme ? Actuellement, sans exclure systématiquement d'autres orientations de recherches, deux voies finalisées sont importantes à considérer : ce sont, d'une part, l'évolution des propriétés mécaniques conditionnant la traficabilité, et, d'autre part, les problèmes d'exportation de substances en solution qui relèvent, pour partie, de la protection de l'environnement.

En ce qui concerne la première préoccupation, le travail de GUERIF et ROYERE (1991), figurant dans le présent ouvrage, devrait apporter une amélioration des techniques d'étude, car l'augmentation de la dimension du volume représentatif pris en compte par rapport au pénétromètre à pointe, devrait déjà intégrer une partie de la variabilité du milieu. On pourrait aussi envisager une étude, sur transect, des caractéristiques géométriques de l'ornièrre créée par le passage d'un engin ; ces caractéristiques sont, bien

sûr, à choisir avec soin : profondeur de l'ornière, profils des densités à diverses cotes sous l'ornière, etc. Ces grandeurs pourraient être étudiées selon les méthodes de la Géostatistique, par comparaison à la variabilité spatiale sur le même transect (ou un transect voisin comparable), des propriétés de constitution du milieu et de ses propriétés hydrodynamiques. Ce n'est qu'une proposition, parmi d'autres potentielles, de la prise en compte de la variabilité du milieu et du changement d'échelle, permettant de résoudre le problème posé par la représentativité réelle de mesures isolées. Dès lors, le couplage avec un modèle décrivant l'évolution hydrique des couches de surface, après la phase de drainage intense, pourrait permettre la comparaison entre sites drainés et non drainés d'un même milieu, dès lors que ces propriétés sont mesurables *in situ*.

En ce qui concerne les transferts de solutés, le problème se pose d'une manière analogue. L'étude de la migration d'un soluté sur une verticale n'a de signification que dans des systèmes homogènes ou régulièrement stratifiés. Or, la configuration des champs de potentiels durant les différentes phases du drainage amène à considérer des migrations convectives obliques, en direction des drains et de la nappe, qui vont modifier radicalement les processus de transferts. Il est également fort probable que le fonctionnement des drains induit un réseau de chemins préférentiels actifs, différent de celui qui se crée spontanément dans un système naturel, non drainé.

L'évolution hydrique peut être connue quant à son influence sur les paramètres de transfert (coefficient de diffusion, de dispersion hydrodynamique, rétention dans la microporosité ou facteur retard), mais la géométrie de l'espace poral est difficilement prise en compte dans les modèles de transfert (GUENNELON, 1987 b), *a fortiori* lorsque les matériaux sont déformables (VAUCLIN, 1987). Là encore, il faut agrandir la maille d'observation et de mesure, et les paramètres de transfert ne sont plus que des coefficients globaux apparents, qui prennent en compte des systèmes de porosité de nature, de taille et de géométrie différentes.

L'équation de transfert, en admettant des fonctions d'entrée et sortie accessibles, ne peut plus être alors qu'une fonction de transfert dont les paramètres n'auront plus de véritable signification physique (JURY et al., 1986). Pour un nombre important de sites divers étudiés, leur ordre de grandeur pourrait cependant être lié statistiquement à des caractéristiques géologiques, pédologiques ou autres, des milieux considérés : d'où l'établissement possible d'un classement typologique des risques d'entraînement des espèces chimiques présentes ou apportées.

Les paramètres de transfert classiques ne reprennent leur signification, et donc leur intérêt, que dans les couches de surface non saturées, pendant, et, surtout après la période de tarissement non influencé, lorsque la porosité de transfert n'est plus fortement dépendante de la structure. Mais, en tout état de cause, ils seront difficilement utilisables pour prévoir l'entraînement rapide des ions pendant le fonctionnement intensif des drains, c'est-à-dire durant la période cruciale de circulation rapide vers les exutoires et les cours d'eau. Si l'on peut espérer disposer de modèles déterministes opérationnels de transfert de solutés, pour des milieux (si complexes soient-ils), dont l'hydrodynamique reste dépendante de leur configuration et de leurs propriétés naturelles, il est, sans doute, illusoire de tenter la même démarche pour prévoir quantitativement l'influence de l'hétérogénéité introduite par la mise en place d'un réseau de drainage. Cependant, une modélisation discrétisant, par la méthode des éléments finis, la circulation de l'eau de part et d'autre d'un drain, et tenant compte des relations de diffusion entre les chemins préférentiels et la microporosité, pourrait peut-être être testée. Cette possibilité dépend cependant d'hypothèses ou, mieux, de description quantifiée de la configuration de ces chemins préférentiels.

Le drainage, entraînant une modification des teneurs en eau et de leur distribution par rapport à une situation non drainée, agit certainement sur les propriétés physiques des sols. La connaissance locale de ces variations n'est toutefois pas suffisante pour prévoir le comportement global du sol vis-à-vis de tel ou tel phénomène physique. Elle peut, tout au plus, donner des ordres de grandeur probables des effets du drainage, et conforter ou infirmer certaines affirmations déductives, qui ne prennent pas en compte toute la complexité des phénomènes et négligent la variabilité spatiale du comportement fonctionnel des sols.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GUENNELON R., 1987-a - Influence du drainage sur les propriétés physiques, biologiques et mécaniques des sols. C.R. Acad. Agric. Fr., 73(4), 45-59.

GUENNELON R., 1987-b - Transferts d'eau et de sels en milieux fissurés. *in* "Les phénomènes de transferts dans les milieux poreux déformables". Public. I.N.R.A., Isle/Sorgue, Octobre 1987, 7-61.

GUERIF J. et ROYERE J., 1991 - Mise au point d'un pénétromètre à plaque pneumatique destiné à l'appréciation de la portance des sols cultivés. AIP CEMAGREF-INRA Maîtrise de l'excès d'eau. Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique agricole, 10, 173-190.

JURY W.A., SPOSITO G. et WHITE R.E., 1986 - A transfer function model of solute transport through soil : I. Fundamental Concept. *Wat. Resour. Res.* 18(2), 369-375.

PASSERAT DE SILANS A., 1986 - Transferts de masse et de chaleur dans un sol stratifié soumis à une excitation atmosphérique naturelle. Comparaison : modèles-expérience. *Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble*, thèse 205 p. et annexes.

RUSSEL J.L., 1984 - Scientific research in soil drainage. *J. of Agric. Sci.*, 24, 544-573.

SCOOTER D.R. et HORNE D.J., 1985 - The effect of mole drainage on soil temperatures under pasture. *J. of Soil Sci.*, 36, 319-327.

VAUCLIN M., 1987 - Hydrodynamique dans les sols partiellement saturés déformables. *in* "Les phénomènes de transferts dans les milieux poreux déformables". *Public. I.N.R.A., Isle/Sorgue*, Octobre 1987, 63-113.

WATERS P., 1977 - The effect of drainage on soil temperature at DRAYTON EHF. *Agr. Dev. Advis. Serv. Tech. Bull.* 77-(6), 16 p.



DRAINAGE AGRICOLE ET MODELISATION HYDRAULIQUE

B. LESAFFRE ¹

1 - CEMAGREF, Parc de Tourvoie, 92160 ANTONY, FRANCE.

RESUME

L'approche scientifique du milieu naturel est très souvent une combinaison de démarches naturaliste et modélisatrice, qualitative et quantitative. Ces démarches sont habituellement opposées l'une à l'autre ; il est préférable de voir en quoi elles sont complémentaires, moyennant certaines précautions. La réflexion est illustrée par l'analyse critique d'un modèle de ressuyage des sols drainés, basé sur les équations de l'écoulement en milieu saturé. Enfin, différents types de modèles de l'hydraulique du drainage agricole sont confrontés aux conditions de leur utilisation pour un objectif donné.

MOTS-CLES : Drainage - Hydraulique - Milieu saturé - Milieu non saturé -
Expérimentation au champ - Conception.

ABSTRACT : Land drainage and water flow modelling

Scientific investigations on environment most often combine naturalist and modelling, qualitative and quantitative approaches. These usually conflict each other ; it should be better to see how they complement each other, provided some precautions are taken. This thought is illustrated by an analytical review of a drained soil drying-up model, based on saturated flow equations. Lastly, conditions of the use of different kinds of land drainage hydraulics models are related to the aim to achieve.

KEY-WORDS : Drainage - Hydraulics - Saturated flow - Unsaturated flow -
Field experiment - Design.

1. FAUT-IL DES MODELES EN DRAINAGE AGRICOLE ?

En Sciences du Sol, on a souvent, dans le passé, opposé tenants de l'Agrochimie, ou chimie du sol, et ceux de la Pédologie, ou description des sols. Les premiers considéraient le sol d'abord comme un substrat fournisseur de nutriments à la plante cultivée (PEDRO 1986) ; la connaissance des mécanismes impliqués permet, grâce à la modélisation des phénomènes physiques en jeu, de reproduire ces derniers, de prédire leurs effets, d'extrapoler à d'autres situations. Les seconds voyaient le sol essentiellement comme un objet en soi, dont l'originalité et la spécificité le distinguent irréductiblement d'autres objets ; il s'agit alors d'identifier, de décrire, de classer, et de relier les caractéristiques intrinsèques de ces objets aux effets qu'ils peuvent avoir sur leur environnement. La démarche des uns est dite *modélisatrice*, ou *réductrice*, puisque toutes les propriétés du sol ne sont pas représentées ; l'approche des autres est appelée *naturaliste*, ou *globale*, le sol étant d'abord perçu comme un tout. Et chacun, selon sa formation et ses penchants, attribue à ces différents adjectifs des connotations positives ou péjoratives.

Ce débat n'est pas propre à la Science du Sol. En drainage agricole, jusqu'à encore récemment, hydrauliciens et agronomes campaient sur des positions très éloignées, souvent caricaturées de la façon suivante : soit, l'hydraulique agricole tient en un certain nombre de formules, qu'il suffit d'appliquer pour dimensionner convenablement les réseaux ; soit, aucune formule n'étant apte à représenter l'ensemble des mécanismes du drainage agricole, seule l'expérience de terrain est capable de fournir des règles de conception. La discussion est, ici aussi, ancienne et il est, par exemple, instructif de lire la synthèse de RUSSELL (1934), qui tente d'écrire l'historique des deux démarches de dimensionnement des réseaux de drainage : une première école s'attache à définir les dispositions constructives à partir des propriétés hydrodynamiques du milieu, également utilisées en hydrogéologie ; la deuxième approche consiste à corrélérer les critères de dimensionnement à des paramètres physico-chimiques du sol, tels que granulométrie, taux de calcaire, teneur en fer, chaleur d'humectation...

Ainsi, et c'est peut-être le trait majeur des *Sciences du milieu naturel* : comme le souligne ZIMMER (1989), soit "on cherche des lois générales dont les paramètres ont un sens physique et on mesure ensuite ces paramètres sur les matériaux d'étude", soit on considère que "le milieu est si complexe et la variabilité des paramètres nécessaires au

calage des modèles physiques si grande que (...) un modèle calé en un site ne sera jamais prédictif que pour ce site".

Chez les tenants de l'approche globale, naturaliste, on trouve souvent les critiques suivantes, rarement explicitées, vis-à-vis des modélisateurs. D'une part, ceux-ci segmentent la réalité : non seulement ils la réduisent, mais en plus ils ne reproduisent bien que ce qu'ils peuvent modéliser, renvoyant le reste aux approches empiriques qu'eux-mêmes décrivent. D'autre part, ils réintroduisent bien souvent la complexité du milieu en rendant variables des coefficients, ou en en ajoutant d'autres de façon à faire se superposer prédiction et réalité : c'est le "coefficient de sécurité", "le coefficient d'ajustement", etc.

Pour les modélisateurs, les naturalistes ne disposent que de règles empiriques, qui ne permettent pas l'extrapolation à d'autres cas, d'autres situations que ceux pour lesquelles elles ont été élaborées. Plus grave, si les méthodes de dimensionnement ainsi obtenues donnent satisfaction, il n'est pas possible de savoir pourquoi, ce qui est source de surdimensionnement des ouvrages et donc à l'origine de surcoûts.

Dans ce débat entre modélisateurs et naturalistes, la pensée philosophique moderne fournit quelques points de repère utiles. Ainsi, pour BACHELARD (1938), "l'hostilité aux mathématiques est un mauvais signe quand elle s'allie à une prétention de saisir directement les phénomènes scientifiques". Cette affirmation ruine l'approche naturaliste, en fait pas tellement parce que celle-ci est hostile aux mathématiques, mais en ce qu'elle croit trop souvent que le réel est un absolu existant par lui-même. POPPER (1934) est moins définitif quand il écrit que "les théories explicatives les plus abstraites, mais même les énoncés singuliers les plus ordinaires, transcendent l'expérience. Car les énoncés singuliers ordinaires eux-mêmes sont toujours des *interprétations des "faits" à la lumière des théories*". Cependant un résultat scientifique n'a de sens que s'il est discutable (POPPER dit : "falsifiable" ou "réfutable") au sens de pouvant être discuté : une démarche naturaliste, appuyée sur une réflexion conceptuelle et des hypothèses discernables, est de facto une interprétation des faits à la lumière d'une théorie, c'est-à-dire un modèle.

Tous les modèles ne se valent pas : pour un objectif donné, certains types de modèles sont plus adaptés que d'autres. A contrario, il n'est pas envisageable, ni probablement souhaitable, qu'existe un seul type de modèle : confondre par exemple, modèle et équations serait un non-sens, même si un modèle basé sur la résolution d'équations est souvent plus facile à vérifier et à valider sur des données expérimentales que ceux qui ne le sont pas. Un modèle *qualitatif* n'est pas moins utile qu'un modèle *quantitatif* ; il en est même parfois le préliminaire ! Seule est dépourvue d'intérêt une démarche reposant seulement sur des

sensations, et qui reste la tentation de certains naturalistes... Lisons encore BACHELARD (1938) : "Une connaissance objective immédiate (...) est nécessairement fautive (...). Elle charge fatalement l'objet d'impressions subjectives (...). En prenant la réalité comme son bien, elle donne des certitudes qui entravent, plutôt qu'elles ne la servent, la connaissance objective".

2. ESSAI D'ANALYSE CRITIQUE D'UN MODELE DE RESSUYAGE DES SOLS DRAINES

Dès lors qu'il y a théorie confrontée à des faits et validée par ceux-ci, on peut donc parler de modélisation ; une modélisation n'est jamais exhaustive et, pour être opérationnelle, ne doit pas confondre son champ d'application et le domaine général dont elle ne représente qu'une partie. Illustrons cette assertion sur un exemple concret : celui du ressuyage des sols drainés.

Une approche purement naturaliste consisterait à dire que le ressuyage des sols n'est pas modélisable : d'une part les propriétés des sols impliquées dans le ressuyage sont difficilement identifiables, puis difficilement mesurables, soit du fait de leur variabilité, soit parce qu'elles sont dépendantes du phénomène qu'il s'agit de mesurer ; d'autre part, et toutes conditions climatiques égales par ailleurs, un ressuyage n'a de sens que pour une plante, un stade de développement de celle-ci et un type de travail du sol donnés, tous facteurs qui eux-mêmes influent sur le ressuyage. En conséquence, on ne peut accéder à la connaissance que par l'observation de situations réelles, qui peut se traduire ici par l'appréciation portée par l'agriculteur sur la "qualité" du ressuyage, sans essai de formulation quantitative.

A l'opposé, voici un exemple de formule (GUYON 1964) permettant de prédire la durée de ressuyage d'un sol drainé, moyennant quelques hypothèses que nous discuterons ensuite :

$$t = \frac{2}{9} \frac{\mu}{K} E^2 \frac{P_0 - P_t}{(S - P_0)(S - P_t)} \quad (1)$$

- où : P_0 = profondeur initiale de la nappe à l'inter-drain ;
- P_t = profondeur de la nappe au temps t à l'inter-drain ;
- μ = porosité de drainage homogène ;
- K = conductivité hydraulique homogène ;
- S = profondeur du plancher imperméable sur lequel les drains sont posés ;
- E = écartement entre les drains.

Cette formule est élaborée à partir de la modélisation des écoulements de la zone saturée du sol, drainé par tuyaux enterrés coulant sans mise en charge et installés sur un plancher imperméable empêchant toute infiltration profonde ; le sol est un milieu poreux supposé indéformable et homogène, et représentable par deux paramètres hydrodynamiques, la conductivité hydraulique et la porosité de drainage, dont la signification physique est précise dans le cadre de la modélisation retenue. Cette formule, pour être utilisable, repose également sur les hypothèses suivantes : (a) l'influence néfaste la plus importante de l'excès d'eau concerne la réduction des possibilités de travail du sol ; (b) un sol est ressuyé, c'est-à-dire portant pour le travail de la terre, dès que la nappe entre deux drains atteint une certaine profondeur P_t . Alors, si on peut caractériser le milieu (composantes K , μ et S de l'équation 1) et définir les paramètres technico-économiques P_0 , P_t et la durée de ressuyage t admissible par l'agriculteur, on peut en déduire l'écartement E nécessaire entre les drains.

Quand la phrase précédente est prononcée - et tous les attendus sont nécessaires ! - on peut utiliser la formule (1). Le progrès apporté par cet outil, par comparaison avec l'approche qualitative précédente, est que, tout réducteur de la réalité qu'il soit, il réduit également les limites du champ d'investigations à poursuivre, ce qui est un guide pour le chercheur, tout en offrant d'ores et déjà une méthode de réflexion pour l'ingénieur chargé de la conception des ouvrages : même si celui-ci doit être très prudent dans l'utilisation de cette formule, il peut au moins quantifier l'influence de la variation des paramètres sur le résultat final. Croire que la formule suffit méconnaît par contre les deux questions suivantes : le modèle est-il applicable ? Comment mesure-t-on les paramètres ? Si les composantes du milieu sont, avec précaution, mesurables, les paramètres technico-économiques sont eux encore choisis empiriquement. Ainsi, à une formule rigoureusement obtenue, est associée une démarche qualitative, et c'est probablement un autre trait majeur des *Sciences du milieu naturel* : le dimensionnement d'un ouvrage est le plus souvent le résultat d'une démarche semi-empirique, combinant modélisation et appréciation subjective de certains paramètres.

Le travail de recherche consiste alors, dans ce contexte, à restreindre la part de l'empirisme, et à fournir des outils à des coûts acceptables pour le concepteur des équipements. La personne capable de faire la synthèse entre l'utilisation des modèles et les connaissances empiriques, c'est-à-dire l'*expert*, rejoint la pensée de BACHELARD (1940) : "l'empirisme et le rationalisme sont liés, dans la pensée scientifique, par un étrange lien, aussi fort que celui qui unit le plaisir et la douleur".

3. LES MODELES HYDRAULIQUES EN DRAINAGE AGRICOLE

De ce qui précède, la question du début de ce texte "faut-il des modèles en drainage agricole ?", même réduite au champ de l'hydraulique du drainage agricole, est mal posée. Il faudrait plutôt se demander : "des modèles, lesquels et pour quel objectif ?". Un modèle n'est pas non plus séparable des instruments de mesure, et ne peut être utilisé en dehors du contexte expérimental qui le justifie ; il faut également tenir compte de l'échelle à laquelle il est élaboré. Enfin, un modèle n'a de sens et d'intérêt que si la représentation simplifiée de la réalité qu'il opère est prédictive, c'est à dire dépasse les seuls cas à partir desquels il a été construit.

Elaborer une classification des modèles hydrauliques n'est pas aisée, même si certains principes sont connus. On distingue, par exemple, modèles *mécanistes*, basés sur la représentation des processus physiques des écoulements, et modèles *empiriques*, obtenus par mise en relation entre différentes variables ou caractéristiques. On distingue également modèles *stochastiques* et *certaines*, selon que les variables d'entrée et les paramètres sont, ou non, des variables aléatoires. Cependant, il est rare qu'un modèle appartienne totalement à une catégorie : où mettre, par exemple, les modèles hydrologiques conceptuels, dont les paramètres ne sont pas mesurables par ailleurs, et qui s'apparentent plus à des boîtes noires, même si leurs lois de comportement sont souvent formellement proches d'équations déterministes ? Plus fondamentalement, comme nous l'avons vu sur l'exemple du ressuyage, un modèle de dimensionnement d'ouvrages, pour rester applicable, n'est-il pas condamné à conserver une part d'empirisme ? A l'opposé, une démarche typologique apparaît d'abord empirique : est-ce encore le cas d'une typologie des écoulements en terre drainée, basée sur des profils types de potentiel total de l'eau, et qui permet de mieux définir le système sur lequel on appliquera des équations ? Enfin, il est rare qu'un modèle suppose le milieu entièrement aléatoire, que ce soit pour des raisons fondamentales ou à cause des difficultés de résolution.

Lorsque l'objectif est de prédire le plus exactement possible les transferts d'eau (et de solutés !), on peut supposer que l'élaboration de modèles complets, c'est à dire totalement mécanistes et traitant toute la variabilité du milieu, est un objectif de recherche nécessaire : elle doit alors se baser sur la thermodynamique des milieux continus polyphasiques.

Cependant, pour le praticien chargé de concevoir un réseau de drainage, de nombreux écueils apparaissent :

- le nombre et la complexité des équations utilisées, qui doivent alors être discrétisées, induit des temps de calcul souvent rédhibitoires, même à l'heure actuelle ;

- les données à recueillir, notamment hydrodynamiques, sont telles que ce type de modèle ne peut pas être largement utilisé à des fins d'aménagement ; en outre, malgré le coût de leur acquisition, leur faible qualité est souvent incompatible avec la sophistication des modèles ;

- les connaissances fondamentales pour définir les différentes équations ou les différents compartiments du modèle n'ont pas forcément atteint le même niveau ; il en résulte que certaines parties du modèle peuvent être plus sensibles ou précises que d'autres, ce qui rend illusoire le gain permis théoriquement par les améliorations partielles apportées ;

- les conditions aux limites des systèmes *in situ* étudiés sont souvent mal connues : le raffinement des équations de comportement est alors sans commune mesure avec les approximations faites aux frontières ;

- enfin, les processus numériques, qui transforment les équations différentielles de base en une succession d'opérations élémentaires, rend inutile la recherche de lois analytiques alors que ces dernières sont souvent des guides précieux pour faciliter la compréhension des phénomènes physiques étudiés.

On n'insistera jamais assez sur le fait qu'il est plus facile d'écrire un modèle que de le confronter à la réalité du milieu, surtout lorsque celle-ci est mesurée *in situ* et pas seulement au laboratoire. L'expérimentation au champ permet de valider les hypothèses émises pour construire le modèle, encore que les imprécisions sur les mesures et sur la définition du système concerné rendent parfois cette validation incertaine ; elle suscite également des réflexions sur la conception même du modèle, ce qui permet parfois de déterminer des relations plus simples.

Les mesures expérimentales *in situ* posent cependant toujours un problème de représentativité : outre le fait, habituel, qu'un instrument de mesure met un certain temps avant d'être en équilibre avec le milieu, la variabilité du milieu est telle que la signification d'une mesure ponctuelle doit être analysée de près. Par ailleurs, toutes les mesures ne sont pas faites à la même échelle : en drainage agricole, mesures tensiométriques, piézométriques, débitométriques, pluviométriques n'intéressent pas le même volume de

milieu. Passer d'une échelle à l'autre, changer d'échelle, est souvent nécessaire, de façon déterministe ou stochastique, pour les modèles mécanistes ; des modèles conceptuels peuvent par contre comprendre des paramètres globaux.

En drainage agricole, la modélisation a, dès l'origine et encore maintenant, eu pour objet le dimensionnement des réseaux de drainage. Moyennant un certain nombre d'hypothèses que nous avons déjà vues, les modèles d'écoulement en milieu saturé, qui fournissent des variables piézométriques et débitométriques, ont d'emblée permis d'atteindre ce but. Sans nous étendre ici sur les nombreuses variantes de ces modèles dont la naissance remonte à BOUSSINESQ, au début de ce siècle (voir par exemple LESAFFRE 1987, 1989), notons que la caractéristique de la plupart d'entre elles est de reposer sur un faible nombre de paramètres relativement accessibles par l'utilisateur.

Le développement des recherches sur le fonctionnement de la zone non saturée, avec la prise en compte, soit de l'écoulement de l'eau seulement (équation de RICHARDS), soit également de l'écoulement de l'air, n'a débouché sur des modèles en drainage que plus récemment, encore que les outils réellement opérationnels pour l'ingénieur restent relativement simples. Par exemple, l'équation de RICHARDS en monodimensionnel avec un terme d'extraction racinaire, couplée avec une représentation sommaire du fonctionnement hydraulique de la zone saturée, est utilisée aux Pays-Bas (modèle SWACRO) pour prédire le développement de certaines plantes et les périodes où le sol est travaillable : les relations entre l'état hydrique du sol et les variables agronomiques restent cependant encore en grande partie empiriques. Une autre démarche consiste à résoudre l'équation de RICHARDS, -- appliquée à un système drainant bi-ou tri-dimensionnel et après discrétisation par des éléments finis --, dans un certain nombre de cas particuliers et de confronter les solutions à un couplage de solutions partielles plus simples, qui sont alors préférées pour l'usage quotidien (exemple du modèle DRAINMOD aux Etats-Unis).

On peut alors s'interroger sur la démarche à suivre pour répondre à des questions plus compliquées et néanmoins essentielles actuellement. Comment améliorer la gestion de la terre drainée ? En quoi le dimensionnement des réseaux de drainage influence-t-il le transfert des solutés ? Sur quelles bases rationnelles choisir la technique de drainage des sols lourds ? Quelle typologie des systèmes drainants peut-on élaborer pour les études préliminaires ?

4. EN GUISE DE CONCLUSION ..

Nous ne pouvons pas, dans cette modeste réflexion, cerner complètement le sujet "drainage agricole et modélisation hydraulique". Nous avons préféré partir des travaux menés depuis longtemps sur ce sujet à l'étranger, mais surtout en France et notamment au CEMAGREF, ainsi que ceux qui ont été poursuivis ou initiés dans le cadre de l'action commune entre l'INRA et le CEMAGREF de 1986 à 1988 et qui sont présentés dans cet ouvrage.

Pour reprendre l'exergue de VAN DER MOLEN, la part de la science continue à augmenter en hydraulique du drainage agricole : ce domaine d'action bénéficie des progrès des recherches plus fondamentalistes et, en retour, doit questionner ces dernières. Mais le drainage agricole n'utilise pas seulement les connaissances en hydraulique : c'est une technique complexe, notamment à cause de la multiplicité des disciplines scientifiques impliquées. Outre l'hydraulique, citons l'agronomie, le droit, l'économie, le machinisme, la mécanique des sols, la pédologie, la physique du sol, la topographie ...

Science, oui. Technologie, bien évidemment ... Il reste que, lorsqu'il faut rendre cohérents les apports de ces diverses disciplines, une grande part de savoir-faire demeurera nécessaire, et pour longtemps ... Seul, peut-être, l'Art est perdant !

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BACHELARD G., 1938 - La formation de l'esprit scientifique. Vrin, édition 1972, 211 et 228.

BACHELARD G., 1940 - Philosophie du non. PUF, édition 1983, 5.

GUYON G., 1964 - Considérations sur l'hydraulique des nappes de drainage par canalisations souterraines. Théorie et expérimentation. B.T.G.R., 65, 45 p. + annexes.

LESAFFRE B., 1987 - Recherches théoriques et expérimentales sur le fonctionnement du drainage. Essai de synthèse des travaux français. C.R. Acad. Agric. de France, 73(4), 11-21.

LESAFFRE B., 1989 - Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA. Extension des principes théoriques de Boussinesq et Guyon. Exemple du champ expérimental d'Arrou (Eure-et-Loir). Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique Agricole, 4, 147-149.

PEDRO G., 1986 - La science des sols en France. Editions ORSTOM, 21-35.

POPPER K.R., 1934 - La logique de la découverte scientifique. Payot, édition 1973, 432.

PHYSIQUE DU SOL ET DRAINAGE

R. GUENNELON ¹

1 - I. N. R. A., Science du Sol, 78000 VERSAILLES

RESUME

Le drainage n'est pas seulement une opération dont le résultat est l'élimination de l'eau excédentaire ; cet effet primaire entraîne aussi des modifications de la plupart des propriétés physiques des sols. On peut prendre pour exemple le comportement thermique, et voir, à cette occasion, s'il est possible de prévoir les modifications de ce comportement, suite à la variation de teneur en eau du matériau, dans les parcelles drainées. Une approche déterministe, par modélisation et simulation, est-elle possible, ou doit-on envisager plutôt une démarche semi-quantitative, aboutissant à une typologie, définissant des situations où des résultats "probables" sont attendus ?

MOTS-CLES : Sol - Drainage - Propriétés physiques - Propriétés thermiques.

ABSTRACT : Soil physics and drainage

The drainage of soils will not only eliminate water in excess, but influences also their physical properties. It is the case, for example, of thermal properties. Are the modifications of these properties predictable by deterministic approach ? In an other way, is it necessary to study many cases of drained and undrained fields, in the same conditions, for establishing a typological classification of soils which gives only a "probabilistic", semiquantitative prediction of the variations of soil physical properties ?

KEY-WORDS : Soils - Drainage - Physical Properties - Thermal Properties.

Etudes du CEMAGREF, Hydraulique Agricole, 1991, n° 10, 227-235
AIP CEMAGREF-INRA Maîtrise des excès d'eau

Le fonctionnement du drainage : approche pédo-hydraulique - 1991 - 1^{re} édition, ISBN 2.85362.238.X - Dépôt légal 2^e trimestre 1991 - Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique Agricole n°10. Collection dirigée par Benoît Lesaffre, chef du département. Numéro préparé par J.C. Favrot (INRA) et M. Penel (CEMAGREF) - Comité de lecture : R. Hlavec, B. Lesaffre, M. Penel, D. Zimmer (CEMAGREF) ; J. Concaret, J.C. Favrot, R. Guennelon (INRA). Dessin de couverture : L. Jean - Impression intérieure : CEMAGREF-DICOVA, impression couverture et façonnage : imprimerie BIALEC 54012 Nancy - Edition et diffusion : CEMAGREF-DICOVA ; BP 22, 92162 Antony cedex, tél. (1) 40.96.61.32 et CEMAGREF Division Drainage, Parc de Tourvoie, BP 121, 92185 Antony cedex, tél. (1) 40.96.61.21. Vente aux libraires : TEC et DOC, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex, tél. (1) 47.40.67.00 - Prix 200 F TTC.