

A-1948

1096659 -

07013

Le dossier du mois



L'EXPERIMENTATION AU CHAMP POUR UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DU FONCTIONNEMENT DU DRAINAGE AGRICOLE

par J.C. FAVROT, directeur-adjoint de recherches au laboratoire de science du sol,
centre INRA de Montpellier (1)
et

B. LESAFFRE, ingénieur du GREF, chef de la division drainage et assainissement agricoles du CEMAGREF
groupement d'Antony (2)

Il n'est plus besoin de rappeler la nécessité d'une approche raisonnée du drainage, qui repose sur une bonne connaissance des phénomènes, sur l'acquisition de références fiables et représentatives, et sur une organisation sérieuse associant l'ensemble des partenaires.

Le Bulletin d'Information du CEMAGREF s'est fait l'écho de cette exigence dans une série d'articles présentant les bases des connaissances actuelles et les démarches retenues en France :

— « Les méthodes modernes de conception des réseaux de drainage », GUYON G. et DEVILLERS J.L., B.I. n° 282, Juillet 1981, pages 19 à 30 ;

— « Recommandations pour la réalisation des études de sols préalables au drainage dans le cadre des « secteurs de référence » et des projets à la parcelle », FAVROT J.C., BOUZIGUES R., CESTRE T. et HERVÉ J.J., B.I. n° 283-284, Août-Septembre 1981, pages 39 à 56 ;

— « Le drainage agricole : principes de fonctionnement », LESAFFRE B. et HERVÉ J.J., B.I. n° 293, Juin 1982, pages 59 à 84 ;

— « L'assainissement agricole : approche technique et institutionnelle », LESAFFRE B., B.I. n° 295-296, Août-Septembre 1982, pages 67 à 83.

Les praticiens du drainage savent que l'application de ces démarches n'est pas toujours facile, à cause de la multiplicité, d'une part, des acteurs et des interlocuteurs et, d'autre part, des domaines scientifiques et techniques impliqués. A propos de ces derniers, citons, sans être exhaustifs : l'agronomie, l'économie, l'hydraulique, l'hydrologie, le machinisme, la mécanique des sols, la pédologie, la physique du sol, la technologie, la topographie, etc.

(1) ENSAM, 9 place Viala, 34060 MONTPELLIER CEDEX
Tél. (67) 63.00.13

(2) B.P. 121, 92164 ANTONY CEDEX
Tél. (1) 666.21.07

L'EXPÉRIMENTATION AU CHAMP POUR UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DU FONCTIONNEMENT DU DRAINAGE AGRICOLE

Il apparaît notamment que, pour bien interpréter l'étude des sols préalable au drainage puis concevoir et dimensionner convenablement le réseau, il est nécessaire de connaître les phénomènes intervenant lors du drainage, notamment les phénomènes hydrauliques.

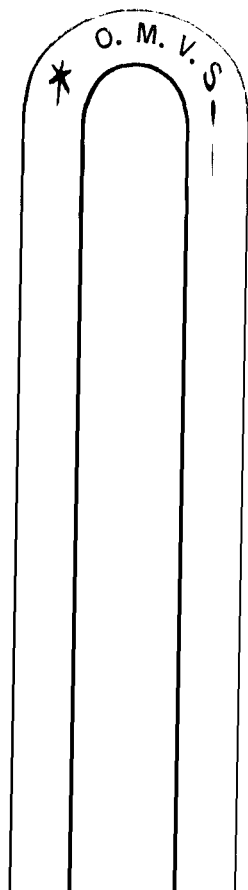
Sur ce sujet, les deux articles qui suivent apportent des éclairages complémentaires. Il s'agit d'articles de synthèse tous deux basés sur la bibliographie existante et sur les données tirées de l'expérimentation au champ ; ils font un point partiel sur l'état actuel des connaissances.

L'expérimentation « lourde » se développe en France depuis le début de la décennie, sous l'impulsion du CEMAGREF, de l'INRA, des SRAE, d'Établissements d'Enseignement (telle l'ENSAIA de Nancy), de Compagnies d'Aménagement (CAG) et grâce principalement à la mise en place de secteurs de référence dans le cadre de l'opération « ONIC - Ministère de l'Agriculture ». Ce développement permettra, d'ici quelques années, d'améliorer la connaissance du fonctionnement agronomique et hydraulique du drainage dans des sols très variés et drainés selon des techniques appropriées.

Citons quelques sites expérimentaux :

- les plus anciens sont suivis pour la plupart depuis le début ou le milieu de la décennie précédente : Arrou (Eure-et-Loir), La Bouzule (Meurthe-et-Moselle), Longnes (Yvelines), Saint-Laurent-de-la-Prée (Charente-Maritime), Thianges (Nièvre), Villars-les-Dombes (Ain), Virey-le-Grand (Saône-et-Loire), ...
- les plus récents datent du début de cette décennie ou sont en cours de démarrage (liste ne comprenant que les expérimentations « lourdes ») : Archigny (Vienne), Rouperroux (Sarthe), Saint-Juvin (Ardennes), Verdun-sur-Garonne (Tarn-et-Garonne), Viglain (Loiret), Villers-Stoncourt (Moselle). D'autres sites (Pontleroy (Loir-et-Cher), Cossé-d'Anjou (Maine-et-Loire), Ruminghem et Nortkerque (Pas-de-Calais), Gayon (Pyrénées-Atlantiques), etc ...) bénéficient de suivis plus légers généralement axés sur un problème plus précis (enrobages, comportement des tranchées sur des techniques associées, drainage sur ados ...).

Le suivi d'une expérimentation est coûteux, en hommes et en moyens. Le Centre INRA de Montpellier et le groupement CEMAGREF d'Antony jettent actuellement les bases d'une banque de données « sol-drainage » dont le but est de faciliter l'interprétation des données, leur conservation et leur diffusion.



L'EXPÉRIMENTATION AU CHAMP POUR UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DU FONCTIONNEMENT DU DRAINAGE AGRICOLE

Il apparaît notamment que, pour bien interpréter l'étude des sols préalable au drainage puis concevoir et dimensionner convenablement le réseau, il est nécessaire de connaître les phénomènes intervenant lors du drainage, notamment les phénomènes hydrauliques.

Sur ce sujet, les deux articles qui suivent apportent des éclairages complémentaires. Il s'agit d'articles de synthèse tous deux basés sur la bibliographie existante et sur les données tirées de l'expérimentation au champ ; ils font un point partiel sur l'état actuel des connaissances.

L'expérimentation « lourde » se développe en France depuis le début de la décennie, sous l'impulsion du CEMAGREF, de l'INRA, des SRAE, d'Établissements d'Enseignement (telle l'ENSAIA de Nancy), de Compagnies d'Aménagement (CACG) et grâce principalement à la mise en place de secteurs de référence dans le cadre de l'opération « ONIC - Ministère de l'Agriculture ». Ce développement permettra, d'ici quelques années, d'améliorer la connaissance du fonctionnement agronomique et hydraulique du drainage dans des sols très variés et drainés selon des techniques appropriées.

Citons quelques sites expérimentaux :

— les plus anciens sont suivis pour la plupart depuis le début ou le milieu de la décennie précédente : Arrou (Eure-et-Loir), La Bouzule (Meurthe-et-Moselle), Longnes (Yvelines), Saint-Laurent-de-la-Prée (Charente-Maritime), Thianges (Nièvre), Villars-les-Dombes (Ain), Virey-le-Grand (Saône-et-Loire), ...

— les plus récents datent du début de cette décennie ou sont en cours de démarrage (liste ne comprenant que les expérimentations « lourdes ») : Archigny (Vienne), Roupperroux (Sarthe), Saint-Juvin (Ardennes), Verdun-sur-Garonne (Tarn-et-Garonne), Viglain (Loiret), Villers-Stoncourt (Moselle). D'autres sites (Pontleroy (Loir-et-Cher), Cossé-d'Anjou (Maine-et-Loire), Ruminghem et Nortkerque (Pas-de-Calais), Gayon (Pyrénées-Atlantiques), etc ...) bénéficient de suivis plus légers généralement axés sur un problème plus précis (enrobages, comportement des tranchées sur des techniques associées, drainage sur ados ...).

Le suivi d'une expérimentation est coûteux, en hommes et en moyens. Le Centre INRA de Montpellier et le groupement CEMAGREF d'Antony jettent actuellement les bases d'une banque de données « sol-drainage » dont le but est de faciliter l'interprétation des données, leur conservation et leur diffusion.



SOMMAIRE

I - LES PHÉNOMÈNES DE TRANSFERT D'EAU EN DRAINAGE AGRICOLE :	69
1. Introduction :	69
1.1. Objectif du drainage :	69
1.2. Modes de drainage :	69
1.3. Informations pour le drainage :	70
2. Fonctionnement d'un réseau de drainage :	70
2.1. Modalités d'étude et critères d'appréciation :	70
2.2. Réponse des sols au drainage : phénomènes généraux :	70
2.3. Amorce du drainage - Dynamique structurale :	72
2.4. Paramètres de la restitution :	73
2.5. Débits de pointe et transferts latéraux de surface :	74
2.6. Tarissement non influencé - Modélisation des transferts dans la masse du sol :	74
3. Démarches préalables au drainage - Mode d'acquisition des paramètres nécessaires :	78
Bibliographie :	80
II - FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE - VALEUR ET DURÉE DES DÉBITS DE POINTE DU DRAINAGE AGRICOLE EN SOLS A PSEUDOGLEY :	81
1. Introduction :	81
2. Le fonctionnement hydraulique des réseaux de drainage :	81
2.1. Quelques définitions : épisodes et saisons de drainage :	81
2.2. Le comportement de l'eau infiltrée et les modèles de l'hydraulique en milieu saturé :	83
2.3. Les débits de pointe en sols à pseudogley : description des phénomènes :	83
2.4. Les débits de pointe : essais d'interprétation :	84
3. Valeur et durée des débits de pointe :	84
3.1. Dispositifs expérimentaux et démarche d'analyse :	84
3.2. Résultats et discussions - Considérations sur le dimensionnement des réseaux :	85
4. Conclusions :	87
Références bibliographiques :	88

I - LES PHÉNOMÈNES DE TRANSFERT D'EAU EN DRAINAGE AGRICOLE (1)

par J.C. FAVROT, laboratoire de science du sol, centre INRA de Montpellier

SOMMAIRE

1. Introduction	69
1.1. Objectif du drainage	69
1.2. Modes de drainage	69
1.3. Informations pour le drainage	70
2. Fonctionnement d'un réseau de drainage	70
2.1. Modalités d'étude et critères d'appréciation	70
2.2. Réponse des sols au drainage : phénomènes généraux	70
2.3. Amorce du drainage - Dynamique structurale	72
2.4. Paramètres de la restitution	73
2.5. Débits de pointe et transferts latéraux de surface	74
2.6. Tarissement non influencé - Modélisation des transferts dans la masse du sol	74
3. Démarches préalables au drainage - Mode d'acquisition des paramètres nécessaires	78
Bibliographie	80

1. INTRODUCTION

1.1. Objectif du drainage :

En Agriculture, le drainage regroupe l'ensemble des dispositions techniques permettant d'éliminer du sol, l'eau (et/ou les sels) en excès. Il y a eau en excès dès lors que le sol reste saturé sur tout ou partie du profil durant des périodes suffisamment longues pour entraver le développement végétatif des cultures (anoxie) et/ou pour empêcher le déroulement normal des façons culturales (portance ou adhérence insuffisante).

Cette saturation prolongée du sol provoque le plus souvent des processus d'hydromorphie qui se traduisent par divers phénomènes : oxydation, réduction, déplacement, accumulation du fer et du manganèse ; accumulation de la matière organique ; concentration des sels (carbonates, gypse, ...). Toutefois, au plan agronomique, le besoin en drainage peut affecter également des sols non hydromorphes stricto sensu mais dans lesquels la permanence d'une teneur en eau élevée entraîne un comportement physique (portance, adhérence, plasticité, ...) préjudiciable aux techniques culturales (et aux sols si les techniques sont réalisées).

Le drainage vise donc le transfert rapide de l'eau en excès hors des premiers horizons du sol puis hors de la parcelle. A titre indicatif, pour des cultures annuelles, les objectifs envisagés habituellement lors du dimensionnement des réseaux de drainage sont, soit la mise hors d'eau de la zone racinaire (0-20/25 cm) durant la pluie locale de fréquence annuelle et de durée trois

jours (exemple : 12 mm/jour - régime permanent), soit le rabattement de la nappe en un jour après la fin de la pluie à une profondeur (45 cm) considérée comme autorisant l'entrée sans dommage des engins agricoles (régime de tarissement, GUYON, 1981).

1.2. Modes de drainage :

Pour réaliser l'élimination de l'eau de saturation, il existe différentes techniques de drainage dont l'utilisation dépend des conditions édaphiques de perméabilité, stabilité structurale, épaisseur, etc ... Ainsi :

- en sol moyennement à très perméable ($K > 0,2$ m/j), à plancher très peu perméable assez profond (> 40 cm), il s'agit de files de tuyaux enterrés parallèles (écartement 10 à 30 m, drains éventuellement enrobés) ;

- en sol peu perméable, c'est-à-dire à plancher (porosité très fine, phénomènes capillaires dominants) proche de la surface (20 à 40 cm), deux techniques sont possibles :

- soit multiplication des drains sous forme de galeries-taupes * peu espacées (2 à 4 m), moulées dans le sol à une profondeur de 0,50 m - 0,60 m (sols argileux homogènes, bonne stabilité structurale à plasticité persistante). Les galeries-taupes, longues de 20 à 60 m environ, recoupent des remblais de graviers surmontant des collecteurs de petit diamètre (« drains collecteurs ») ;

* ou de drains de faible diamètre (35 mm), techniques apparaissant actuellement en Grande-Bretagne.

(1) Document rédigé en Février 1983 dans le cadre d'un ouvrage collectif INRA à paraître.

- soit augmentation artificielle de la perméabilité des couches supérieures du sol (0,40 à 0,70 cm) par sous-solage. L'amélioration de la profondeur d'enracinement est alors également favorisée par l'ameublissement du sol ;

- en sols tourbeux épais, soumis à des tassements et à une minéralisation lors du rabattement de nappe, le recours aux fossés est préférable dans un premier temps ;

- lorsque l'épaisseur du sol, au-dessus d'un substrat rocheux, ne permet pas le recours à des tuyaux enterrés, l'élimination des eaux se fait par transferts de surface (ruissellement) grâce à des fossés associés à un modelé du sol en planches ou en ados ;

- les mouillères sont captées ponctuellement par des tranchées drainantes.

Par ailleurs, les drains peuvent être posés par des engins ouvrant une tranchée (draineuse-trancheuse) ou être enfouis directement dans le sol (draineuse-sous-soleuse). Lorsqu'il y a risques de pénétration de particules minérales dans les drains (colmatage interne), les tuyaux sont protégés par des enrobages de fibres naturelles (coco par exemple), artificielles ou synthétiques, tissées ou non tissées. Ces «filtres» diminuent également la résistance d'entrée de l'eau dans les drains, par une meilleure répartition des filets liquides vers les perforations.

1.3. Informations pour le drainage :

La conception d'un réseau de drainage efficace, durable et aussi économique que possible, suppose une bonne adéquation entre la nature de l'excès d'eau à éliminer, les résultats agronomiques attendus et les performances de chaque technique. Pour cela, il convient donc de bien connaître les modes de réponse des sols au drainage en liaison avec les divers types de régime hydrique des sols. Il faut notamment déterminer le sens et l'importance des transferts lors du drainage en fonction des formes et de l'origine de l'eau en excès. Cette nécessaire connaissance doit se situer à l'échelle du territoire à aménager qui, en drainage, est celui de la parcelle, elle-même bien intégrée dans un bassin versant défini aux plans hydrologique et pédologique.

L'eau de saturation du sol peut avoir des formes et des origines variées : nappe phréatique permanente, captive ou libre, soutenue ou non ; nappe perchée temporaire ; eau de submersion ; mouillères ; eau d'imbibition (sols peu perméables) ; etc. On distingue aussi, en drainage, les eaux spécifiques à la parcelle (précipitations y tombant directement) et les eaux extérieures, qu'elles soient de surface (ruissellement) ou de profondeur (nappes phréatiques). Cette diversité de situations se retrouve au niveau des phénomènes de transferts intervenant au cours du drainage dans les sols engorgés.

Ces phénomènes vont être d'abord analysés au travers de l'interprétation de données expérimentales, puis seront présentées les démarches adoptées pour en saisir les paramètres explicatifs et raisonner le drainage. Nous nous placerons dans le cas le plus général, celui des sols dont l'excès d'eau provient essentiellement de pluies tombant directement sur le territoire à aménager (sols à pseudogley, pélosols, vertisols, ...). Ils représentent environ 10 millions d'hectares en France dont 4 à 5 à drainer à court et moyen termes, les sols à nappe permanente (sols à gley, tourbes ...) couvrant moins d'un million d'hectares.

2. FONCTIONNEMENT D'UN RÉSEAU DE DRAINAGE

2.1. Modalités d'étude et critères d'appréciation :

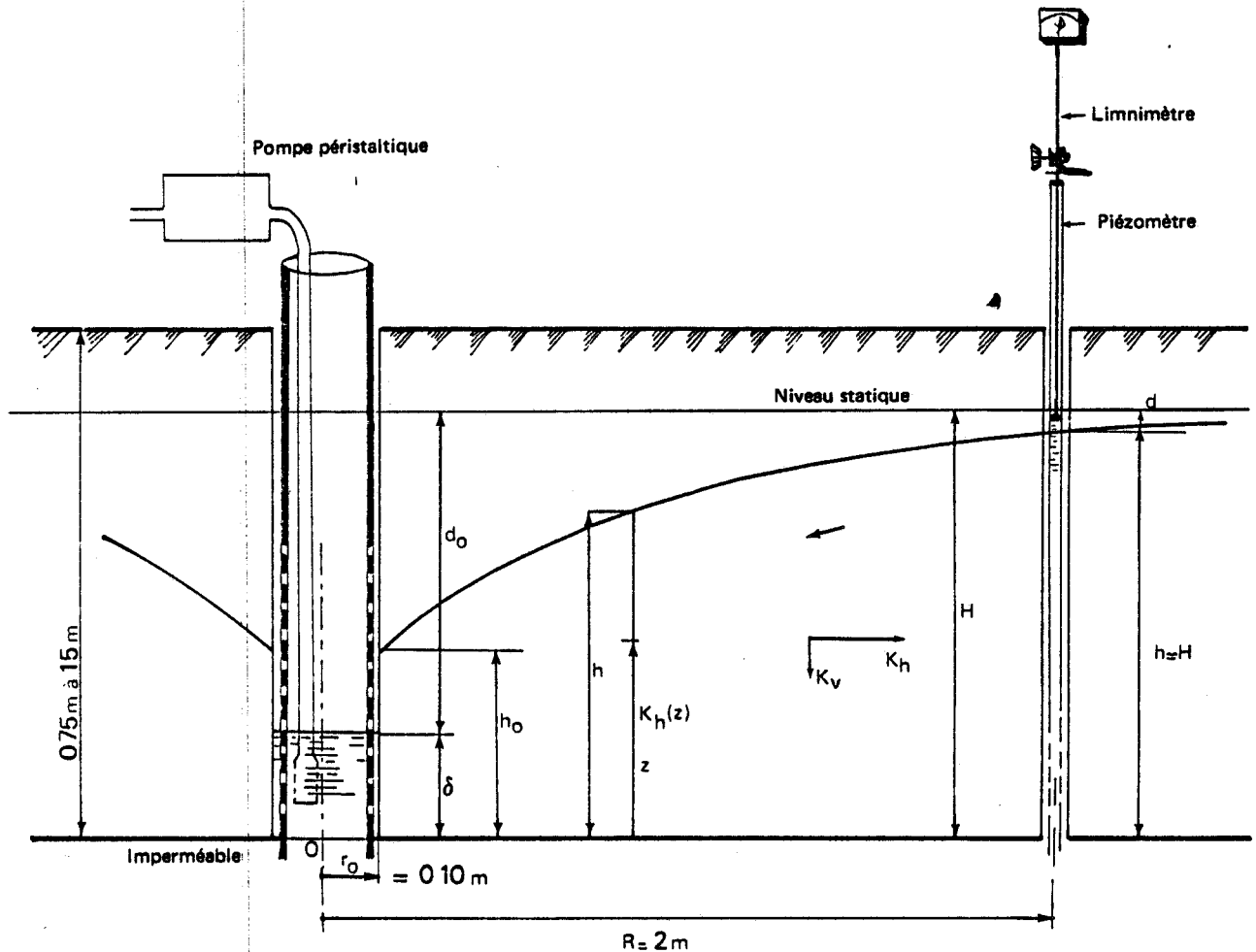
Seuls des dispositifs expérimentaux en vraie grandeur (réseaux de 1 à 2 ha) permettent de bien appréhender le mode de réponse des sols au drainage. Les mesures habituellement réalisées, sur une campagne de drainage (Octobre-Avril) y sont nombreuses, avec des relevés à fréquence variable : débitmétrie (continue ou horaire), pluviométrie (horaire), piézométrie (continue ou horaire), humidimétrie (hebdomadaire), parfois tensiométrie (hebdomadaire).

Le traitement des données porte sur des épisodes de drainage, périodes correspondant à une réponse complète du réseau à une pluie ou à une série de pluies. Il consiste notamment à relier débitmétrie et pluviométrie, débitmétrie et piézométrie. Dans le premier cas est calculé le **coefficient de restitution** du réseau c'est-à-dire le rapport du volume d'eau évacué par les drains au volume des précipitations générant l'épisode étudié. Les **hydrogrammes** permettent de suivre l'évolution du débit dans le temps ; ils sont confrontés aux **profils piézométriques** en continu de la parcelle.

2.2. Réponse des sols au drainage : phénomènes généraux :

Le suivi de réseaux de drainage au cours d'années successives montre une évolution du coefficient de restitution du début à la fin d'une saison de drainage (fig. 1) : d'abord faible et croissant (< 50 %, automne : période d'amorce du drainage), puis très élevé (80-100%, hiver, début du printemps : période de drainage intense), il diminue ensuite (fin du printemps : période de fin de drainage). Cette évolution s'explique par une recharge plus ou moins forte de la réserve en eau du sol, compte tenu de la pluviosité.

La mesure est faite après stabilisation du débit de pompage et obtention d'un régime quasi-permanent.



Si le puits atteint le substratum et pour un sol hétérogène verticalement et anisotrope, on a :

$$\frac{Q}{\pi} \ln \frac{R}{r_{0/e}} = H^2 \widetilde{K}_h(H) - \delta^2 \widetilde{K}_h(\delta) ; \quad \widetilde{K}_h(h) = \frac{2}{h^2} \int_0^h (h-z) K_h(z) dz ; \quad Q \text{ est le débit de pompage en régime quasi permanent.}$$

Figure 5b : Méthode puits-piezomètres - Estimation de la conductivité hydraulique horizontale équivalente \widetilde{K}_h (GUYON, 1981)

Par suite d'une certaine variabilité des résultats, liée au sol et aux conditions de mesure, la caractérisation hydrodynamique d'une unité cartographique implique la répétition des mesures. Pour une série de sol donnée (CAUCHIE et al., 1983), il a été montré que le nombre de mesures souhaitables varie de l'ordre de deux avec la

première méthode à une vingtaine avec la seconde (dont on retiendra, pour valeur définitive, la moyenne logarithmique des résultats isolés).

La profondeur du « plancher imperméable » est appréciée sur le terrain par observations sur sondages à la tarière en période humide (discontinuité de teneur en

eau) et par examen de profils pédologiques pour détecter le principal obstacle à la percolation de l'eau (contraste de structure, de porosité, ...). Sa valeur doit être étroitement associée à celle de la conductivité hydraulique horizontale équivalente pour chaque unité de sol, ces deux paramètres intervenant simultanément dans les formules de drainage.

La porosité de drainage est mesurée également par la méthode du puits-piezomètre (fig. 5a page 10). Sa valeur (moins de 0,01 en sol argileux, 0,02 en sols limoneux, 0,04 en sols sableux), ne peut être assimilée à la macroporosité du sol ou à la porosité structurale.

Par l'introduction de paramètres «extrinsèques», dits paramètres de risques (intensité de la pluie de projet, niveau piézométrique maximal et délai de tarissement admissibles), définissant les objectifs agronomiques à atteindre, la modélisation aboutit à des formules donnant l'écartement entre drains. Ces formules se rangent en deux grandes catégories, l'une dite du régime permanent (fictif), l'autre du régime variable de tarissement (GUYON, 1981).

Dans le premier cas (fig. 6a ci-contre), l'écartement proposé vise à assurer un rabattement rapide de la nappe après la fin de la pluie (1 jour pour les cultures) afin de permettre la réalisation des techniques culturales en temps opportun (1).

Il est admis maintenant que les formules du régime variable, compte tenu des paramètres intrinsèques et extrinsèques utilisés, de leur structure, sont mieux adaptées à l'appréciation des écartements que celles du régime permanent pour les sols à pseudogley (HERVÉ et al. 1982). Rappelons que ces formules décrivent le phénomène de tarissement en sol saturé sous l'horizon cultural (fin automne-hiver).

3. DÉMARCHE PRÉALABLE AU DRAINAGE - MODE D'ACQUISITION DES PARAMÈTRES NÉCESSAIRES

Suivant l'analyse qui est faite des résultats expérimentaux, de la représentativité attribuée à leur inter-

prétation (modélisation), de la difficulté estimée d'appréhender les paramètres de transferts, plusieurs conceptions se dégagent quant à l'approche raisonnée du drainage :

— une démarche de type «hydraulique» consiste à tenter d'estimer différents paramètres explicatifs du drainage (K , μ , ...) et à les intégrer en faisant appel notamment aux équations déterministes du drainage (GUYON, 1966-1981) ;

— une démarche de type «dynamique structurale» privilégie l'examen de la forme, de l'évolution et de l'origine de l'organisation structurale du sol («architecture» ajustée, lâche). Elle vise à apprécier notamment le poids des différents phénomènes de transferts (latéraux, verticaux) pour proposer les modes de drainage (CONCARET et al., 1981) ;

— une approche «cartographique» prend en compte des critères morphologiques (couleur, structure, porosité, nature et forme des discontinuités inter- et intrahorizons) et la distribution des sols dans le passage pour estimer le régime hydrique des sols et leur mode de drainage.

Une intégration des démarches «cartographique» et «hydraulique» est réalisée dans le cadre de la méthode des «secteurs de référence» (FAVROT, 1982). Cette dernière consiste à concentrer études de sol et mesures hydrodynamiques sur un territoire limité mais jugé représentatif d'une région naturelle pour dégager un inventaire des sols significatifs vis-à-vis du drainage. Les séries sont alors caractérisées aux plans pédologique, hydraulique et technologique. Cette méthode repose aussi sur l'interprétation du fonctionnement de réseaux anciens et de dispositifs expérimentaux (cas également de l'approche «structurale»).

En conclusion, en drainage agricole, les phénomènes de transferts de l'eau sont abordés à une échelle macroscopique, aux niveaux d'organisation des sols les plus élevés (parcelle, bassin versant, région naturelle). Dans ce cadre, une bonne connaissance de la succession et du poids relatif des diverses formes d'écoulement au cours du drainage (ruissellement, percolation verticale, circulations latérales) a été obtenue grâce aux dispositifs expérimentaux in situ. Toutefois, si cette connaissance a permis pour certains milieux (sols perméables notamment) de modéliser les processus et, à partir de la mesure de paramètres intrinsèques (K , μ) ou extrinsèques (pluie ...), de proposer des méthodes de prévision du dimensionnement des réseaux, l'approche morphologique reste indispensable dans tous les cas pour apprécier le régime hydrique des sols et proposer les modalités de drainage.

(1) Notons cependant que les propriétés mécaniques du sol* (portance, adhésivité, ...) ne deviennent pas systématiquement favorables aux façons culturales dès la disparition de la saturation (rabattement de la nappe) et qu'une période minimale d'évapo-transpiration doit en outre intervenir pour que les horizons supérieurs présentent les teneurs en eau souhaitables pour le travail du sol.

BIBLIOGRAPHIE

(récente et sommaire)

- ALDANONDO J.C. : 1981. *Étude du fonctionnement du drainage agricole à Arrou*. CEMAGREF, Étude hors série, n° 1, pp. 1-24.
- ALESSANDRELLO E. - CONCARET J. - GUYOT J. - PERREY C. : 1976. *Circulation de l'eau en sols limoneux lessivés hydromorphes drainés*, C.R. Acad. Agric. pp. 364-373.
- BOUYE H.M. - CESTRE T. - LESAFFRE B. : 1983. *Le pompage d'essai appliqué au dimensionnement des ouvrages de drainage agricole*. Étude du CEMAGREF, n° 497-498, Mars- Avril 1983, 49 p.
- CAUCHIE P. - CESTRE T. - FONQUERNIE B. : 1982. *Caractérisation de la conductivité hydraulique saturée du sol dans une même série pédologique*. Document CEMAGREF, Antony, 53 p.
- CONCARET J. et Al. : 1981. *Drainage agricole. Théorie et pratique*. Chambre Région. Agric. Bourgogne, Dijon, 509 p.
- DAMOUR L. : 1981. *Applications du drainage dans les marais du Centre-Ouest Atlantique*. In *Drainage Agricole, Théorie et Pratique*, pp. 457-470, Chambre Région. Agric. Bourgogne, Dijon.
- FAVROT J.C. : 1982. *Acquisition des données nécessaires au drainage des sols difficiles par la méthode des secteurs de référence*. 12ème Congrès Intern. des Irrig. et du drainage, Fort-Collins USA (à paraître), 22 p.
- FLORENTIN L. : 1982. *Contribution à la connaissance des sols hydromorphes et apparentés de Lorraine et de leurs réponses au drainage*. Thèse 3ème cycle ENSAIA Nancy, 157 p.
- GUYON G. : 1966. *Considérations sur l'hydraulique du drainage des nappes*. BTGR, n° 79, pp. 1-115.
- GUYON G. : 1981. *Le drainage agricole. Essai de synthèse en 1980*. BTGR, n° 126.
- HERVE J.J. : 1980. *Limite et validité des modèles hydrodynamiques du drainage*. Document CEMAGREF, Antony, 21 p.
- HERVE J.J. - LESAFFRE B. - ALDANONDO J.C. - LAURENT F. : 1982. *Restitution et débits de pointe d'un réseau de drainage en sols limoneux lessivés hydromorphes battants peu perméables*. 12ème Congrès Intern. des Irrig. et du Drainage, Fort-Collins USA (à paraître), 18 p.

2.2. Le comportement de l'eau infiltrée et les modèles de l'hydraulique souterraine en milieu saturé :

Les recherches sur le comportement hydraulique des terres drainées ont d'abord porté sur les débits transitant sous l'horizon labouré. Basées sur la loi de DARCY, 1856, elles avaient pour but de mettre au point les modèles théoriques et de les confronter à l'expérimentation :

- en premier lieu, dans le cas des nappes permanentes. WESSELING (1973), GUYON et WOLSACK (1979) citent un certain nombre d'auteurs : les uns se sont intéressés, dès 1920, au régime permanent entretenu par une infiltration constante par hypothèse (PORCHET, HOOGHODT, BLANC, ERNST, KIRKHAM, DAGAN), ; à partir de 1950, les études ont porté sur le régime variable de tarissement (LUTHIN, KIRKHAM, DUMM, ..., également cités par SKAGGS et Al., 1973) ;

- ensuite, dans le cas des nappes perchées temporaires, caractéristiques des sols à pseudogley : ce sont notamment les travaux de GUYON (1961, 1966, 1981), VAN SCHILFGAARDE (1963, 1965), LAGACE (1977).

Cette priorité s'explique de deux façons :

- dans les sols très perméables sur lesquels les premières expérimentations ont eu lieu, la majeure partie de la pluie s'infiltrait sous l'horizon labouré (GUYON, 1961, 1966 ; DIELEMAN et TRAFFORD, 1982) ;

- la profondeur de la nappe et les débits qu'elle évacue après la fin des épisodes pluvieux apparaissent les plus contraignants pour l'agriculteur (notamment : MINISTÈRE de L'AGRICULTURE, 1972, pages 1071 à 1124 ; VAN DE GOOR, 1973 ; GUYON, 1974).

Les résultats expérimentaux français et étrangers ont justifié cette première démarche ; ils peuvent être ainsi résumés :

- Les lois de l'hydraulique souterraine en milieu saturé décrivent bien la circulation de l'eau sous l'horizon labouré (notamment : MINISTÈRE de L'AGRICULTURE, 1972, pages 917-1028 ; GUYON, 1974 ; SYLVESTRE, 1974 ; GUYON et WOLSACK, 1979 ; DIELEMAN et TRAFFORD, 1982). Il existe, en effet, en l'absence de réalimentation par les pluies, d'une part des relations fonctionnelles entre le débit de la nappe et sa hauteur mesurée à l'interdrain, au-dessus des drains ou du niveau imperméable, d'autre part des relations entre ces deux paramètres (débit et hauteur) et le temps, ce qui permet d'ajuster des courbes théoriques sur les valeurs observées ;

- Certaines valeurs de la profondeur de la nappe peuvent être reliées simplement soit à la sensibilité des plantes à l'excès d'eau, en fonction de la durée de présence de la nappe, soit à la portance des sols

permettant les travaux agricoles (notamment : MINISTÈRE de L'AGRICULTURE, 1972 ; VAN DE GOOR, 1973, ; SYLVESTRE et COTE, 1973). Le premier type de relations décrit mieux les contraintes agricoles dans les sols à nappe permanente, le second celles des sols à nappe perchée temporaire (VAN HOORN, 1973).

Ces acquis sont valables pour des sols : homogènes, stratifiés ou hétérogènes verticalement (WESSELING, 1973 ; WOLSACK, 1978) ; isotropes ou anisotropes ; en situation plane ou en pente (VAN HOORN et VAN DER MOLEN, 1973).

Dans ce qui suit, nous ne nous intéresserons qu'aux sols plus ou moins épais, hétérogènes verticalement et à excès d'eau temporaire, ou sols à pseudogley, qui représentent la majeure partie des terres à drainer en France (LESAFFRE, 1982), y compris les sols dits «lourds» (BOUZIGUES et Al., 1981), auxquels on peut les apparenter (DUCHAUFOR, 1977).

2.3. Les débits de pointe en sols à pseudogley ; description des phénomènes :

Après ces premiers travaux, un certain nombre d'auteurs (AILLIOT, 1972 ; VAN HOORN, 1973 ; LAFOSSE, 1975 ; AL SOUFI et RYCROFT, 1975 ; ALESSANDRELLO et Al., 1976 ; CONCARET et Al., 1976 ; JACQUIN et FLORENTIN, 1977 ; SCHUCH, 1978 ; HERVÉ, 1980 ; ALDANONDO, 1981 ; FLORENTIN, 1982) se sont préoccupés des débits élevés et brefs, non explicables par les modèles décrits précédemment, soit qu'ils apparaissent en des périodes de l'année où le sol est loin de la saturation, soit que les valeurs atteintes soient très supérieures aux débits de tarissement non influencés.

AL SOUFI et RYCROFT (1975) décrivent des hydrogrammes complets de crues de drainage en parcelles taupées à DRAYTON (Royaume-Uni) et établissent un modèle simple de calcul à partir de la pluie et de la capacité de stockage de la parcelle (ou du bassin).

Pour expliquer la genèse des débits de pointe mesurés sur le réseau expérimental de MONTBERTHAULT (Côte d'Or), où - selon les travaux de MERIAUX (1973), la profondeur du niveau quasi-imperméable se situe vers 50 cm (toit de l'horizon argileux Bt) - ALESSANDRELLO et Al. (1976) proposent une analyse hydrologique sans distinguer les comportements hydriques respectifs des horizons labouré Ap et lessivé A2g.

Sur le réseau expérimental de LA BOUZULE (Meurthe-et-Moselle), FLORENTIN (1982) montre que la valeur des débits de pointe dépend de l'époque de l'année et de la nature du sol (ici : pélosol de pente quasi-imperméable, et sol brun lessivé peu perméable, imperméable dès 60 cm de profondeur).

A partir des données du réseau d'ARROU (Eure-et-Loir) situé en sol lessivé hydromorphe peu perméable,

reposant sur un niveau imperméable de profondeur supérieure à 80 cm, et où la valeur des débits de tarissement non influencés est inférieure à 0,5 l/s/ha, que le sol soit griffé ou non, (GUYON, 1983), HERVÉ (1980, 1981b) et ALDANONDO (1981) montrent qu'en période de drainage intense, il y a coexistence de très fortes variations des valeurs des débits élevés et d'une piézométrie peu variable dans l'horizon labouré, la nappe ayant alors tendance à devenir quasi horizontale.

2.4. Les débits de pointe : essais d'interprétation :

Ces débits de pointe qui ne transitent pas par le sol sous labour ne peuvent arriver aux drains qu'en empruntant la tranchée de drainage après avoir cheminé rapidement dans et sur l'horizon labouré. Dès 1934, RUSSELL (cité par FAUSEY et HUNDAL, 1980) décrivait les deux régimes d'écoulement (influencé et non influencé) d'un épisode de drainage, en indiquant que les maxima atteints dépassaient très nettement les valeurs du débit transitant dans la masse du sol non perturbé : il mettait déjà en évidence le rôle de la tranchée de drainage.

AILLIOT (1972) estime, à LA BOUZULE, que la fonction hydraulique de la tranchée est plus importante dans le pélosol que dans le sol brun lessivé. JACQUIN et FLORENTIN (1977) étendent ces conclusions à l'ensemble des sols lourds lorrains. VAN HOORN (1973) décrit également le fonctionnement de la tranchée dans de tels sols. CONCARET et Al. (1976), TROUCHE (1981) utilisent le terme d'«effet tranchée», et jugent cet effet prépondérant dans les sols peu épais (niveau imperméable inférieur à 0,5 ou 0,6 m), mais inexistant dans les sols profonds. DAMOUR (1980) estime que, dans les sols des Marais de l'Ouest, étudiés à SAINT-LAURENT (Charente-Maritime) — sols à excès d'eau permanent —, le rapport entre les flux venant de la nappe et les débits circulant dans la couche travaillée est fonction des états structuraux du sol en place, de la tranchée et des horizons de surface ; sur ces bases DUPRAT (1979, 1983) a construit un modèle de simulation du fonctionnement du drainage dans ces sols.

Pour estimer le débit transitant dans les fossés d'assainissement, LAFOSSE (1975) s'interroge sur le devenir de l'eau non infiltrée. HERVÉ (1980) estime que, dès que la capacité d'infiltration ou de stockage d'eau par le sol sous labour est atteinte, l'horizon labouré et la surface du sol transitent rapidement des débits importants captés ensuite par la tranchée — et ceci, quelle que soit la profondeur de l'imperméable —, généralisant ainsi les propositions de CONCARET et Al. (1976), et concluant que le comportement hydrique de tous les sols à pseudogley est identique.

HERVÉ (1981a) précise que l'«effet tranchée» existe quelle que soit la machine de pose utilisée, des

précautions d'emploi devant cependant être prises selon le contexte pédo-climatique ; JACQUIN et FLORENTIN (1977) ajoutent que, dans les sols argileux gonflants, les écoulements rapides peuvent également emprunter les fissures de retrait en automne et au printemps. WALEED (1983) analyse l'influence de la structure et de la stabilité de la tranchée de drainage de divers sols lourds lorrains, en fonction du type de sol, des conditions climatiques lors du chantier, et de la machine de pose.

Dans une synthèse bibliographique exhaustive, FAUSEY et HUNDAL (1980) présentent les conclusions suivantes sur le rôle de la tranchée de drainage, quelle que soit sa nature (sol remanié ou stabilisé, remblai artificiel) :

- elle accroît le débit évacué et la vitesse de rabattement de la nappe ;
- elle améliore l'évacuation de l'eau superficielle et le ressuyage de l'horizon labouré. La pérennité de cette fonction dépend des pratiques culturales ;
- elle assure la connexion hydraulique, en sol peu épais, entre les horizons perméables et les drains, lorsque ceux-ci sont posés dans l'horizon imperméable (voir également GUYON, 1968 ; HOREMANS et LESAFFRE, 1981).

Ils ajoutent qu'en l'état actuel des connaissances, il n'y a pas de différence significative de fonctionnement entre les réseaux posés à la tranchée et ceux posés à la sous-soleuse.

En conclusion, la tranchée, où, en régime de tarissement, s'établit un potentiel hydraulique servant de condition à la limite pour l'écoulement, remplit en outre deux autres fonctions :

- transit de débits de pointe, toujours brefs et d'autant plus importants que le sol en place est peu perméable ;
- connexion hydraulique entre les horizons superficiels des sols peu épais et le drain.

3. VALEUR ET DURÉE DES DÉBITS DE POINTE

3.1. Dispositifs expérimentaux et démarche d'analyse :

Les débits de pointe ainsi présentés, il s'agit maintenant de quantifier leur valeur et leur durée, en fonction de leur fréquence d'apparition, et en liaison avec les variables pédo-climatiques et le mode de drainage.

Nous présentons ici les résultats acquis sur deux réseaux, ARROU (Eure-et-Loir) et LONGNES (Yvelines), bénéficiant de séquences débitométriques exceptionnelles car quasi-continues d'Octobre à Mai, sur respectivement sept et huit ans, ce qui en permet l'analyse statistique, grâce à des techniques d'échantillonnage permettant d'enrichir les données et au calcul systématique d'intervalles de confiance (COLIN et Al., 1978). Après une

FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE - VALEUR ET DURÉE DES DÉBITS DE POINTE DU DRAINAGE AGRICOLE EN SOLS A PSEUDOGLEY

brève description de la méthode retenue et des sites expérimentaux (LAURENT et LESAFFRE, 1983), nous résumerons les résultats sous forme de graphiques.

La démarche adoptée ici, et qui est classique en hydrologie, consiste à constituer un échantillon de valeurs indépendantes que l'on classe et auxquelles on attribue une fréquence empirique ; on ajuste ensuite une fonction de répartition statistique sur les couples ainsi obtenus ; on peut alors faire correspondre, à toute fréquence d'apparition — exprimée en durée de retour —, une valeur statistiquement observable, avec un intervalle de confiance à 70 %.

Cette démarche a été appliquée aux deux types de variables suivantes :

- les débits instantanés maximaux, exprimés en l/s/ha, soit annuels (survenant au cours d'une campagne complète), soit saisonniers (choisis parmi chacune

des trois saisons de drainage) ;

- les durées non consécutives de dépassement de divers débits, cumulées sur une campagne complète.

Le tableau 1 présente les caractéristiques des deux sites ayant servi de support à notre étude.

3.2. Résultats et discussions — Considérations sur le dimensionnement des réseaux :

La figure 2 résume l'essentiel des résultats. Les commentaires suivants peuvent être faits quant à l'influence des dispositions constructives et au caractère saisonnier du phénomène :

- lorsque l'écartement entre les drains augmente, les débits annuels maximaux instantanés de durée de retour 1 an et 10 ans diminuent, de même que les durées annuelles moyennes de dépassement des débits, dont notamment le débit de projet ;

TABEAU 1
DESCRIPTION SOMMAIRE DES SITES EXPÉRIMENTAUX

Rubrique \ Site	ARROU (Eure-et-Loir)	LONGNES (Yvelines)
• Nombre de campagnes de mesure dépouillées (1 campagne = chronique pluies-débit au pas de temps horaire, d'Octobre à Mai) :	7 campagnes (1974/75 à 1980/81)	8 campagnes (1971/72 à 1978/79)
• Climat :	Type océanique altéré	Type océanique altéré
Moyenne pluviométrique annuelle :	620 mm (Chateaudun 1931-1960)	490 mm (Dreux 1931-1960)
Pluie annuelle de 3 jours :	11 mm/jour	9 mm/jour
• Roche-mère :	Limon des plateaux chargé de silex et à démarcation peu nette avec l'argile à silex	Limon des plateaux sur argile verte de Romainville
• Sol :	Lessivé hydromorphe sur argile à silex quasi-imperméable profonde de 0,8 à 2,0 mètres	Lessivé sur argile quasi-imperméable profonde de 0,9 à 1,1 mètre et surmontée d'un lit de meulière peu épais.
— Texture :	Argilo-limoneuse (50-130 cm)	Argilo-limono-sableuse (20-100 cm)
— Conductivité hydraulique horizontale équivalente (mesurée in situ) :	0,3 m/jour	1,4 m/jour
— Porosité de drainage :	0,014	0,03
• Dispositif drainant :	7 parcelles de 2 ha drainées à 10, 15 et 20 m d'écartement, avec tranchées gravillonnées ou non ; drains en poterie ou PVC posés à 0,8 m à la tranchée en 1972 1 témoin non drainé (parcelle n° 5)	2 parcelles de 1,89 et 2,03 ha drainées à 16 m d'écartement avec drains en poterie posés vers 0,9 m de profondeur à la tranchée en 1960
— Débit de projet :	1,0 l/s/ha	1,0 l/s/ha
— Pente moyenne du terrain :	5 ‰	4 ‰

L'étude statistique des débits élevés à ARROU et à LONGNES fait apparaître que le débit ainsi calculé (en retenant comme coefficient de restitution celui qui est effectivement observé en saison de plein drainage et qui, par exemple, est compris à ARROU, entre 60 et 90 % suivant les modes de drainage) est dépassé en moyenne un jour par an environ.

En conséquence, à la justification agronomique traditionnelle de la procédure de calcul s'ajoute une justification hydraulique, s'exprimant simplement ainsi : *«comme pour tout aménagement hydro-agricole, il s'agit d'associer à un débit à évacuer un risque d'insuffisance — débordement pour une rivière, mise en charge pour un réseau de drainage —, et non de dimensionner le réseau pour les débits maximaux relevés»*, par exemple 6,6 l/s/ha sur la parcelle n° 1 à ARROU, le 11 Février 1978.

Le fonctionnement satisfaisant pour l'agriculteur des deux réseaux, respectivement dix ans et vingt ans après leur pose, montre qu'une faible durée de mise en charge des drains et collecteurs n'est pas à première vue préjudiciable. Ce qu'il faut éviter, c'est d'aggraver artificiellement cette mise en charge par un défaut d'évacuation des eaux à l'aval.

Le débit de tarissement non influencé maximal en parcelle 1 à ARROU, qui ne dépasse pas la valeur de 0,5 l/s/ha, que le sol soit griffé ou non (GUYON, 1983), est inférieur à la moitié du débit de projet et diminue lorsque l'écartement augmente. Il faut donc distinguer le débit de la nappe, lié à l'écartement retenu, et le débit de projet, qui sert au dimensionnement des col-

lecteurs. Par exemple, dans les formules du régime permanent servant au calcul de l'écartement, on introduira la valeur du débit de la nappe et non celle du débit de projet. On préférera, d'ailleurs, les formules du régime variable de tarissement de la nappe, qui évitent la confusion entre ces deux débits.

Enfin, malgré leur forte valeur, la brièveté des débits de pointe (à ARROU, la valeur — pourtant faible — de 0,5 l/s/ha est dépassée, suivant les parcelles, de 2 à 7 jours en moyenne annuelle) et le fait qu'ils ne surviennent qu'au cours des épisodes pluvieux, induisent qu'ils ne sont pas en eux-mêmes une contrainte pour l'agriculteur, à condition bien sûr d'être évacués ! Autrement dit, s'il faut assurer un bon fonctionnement de la tranchée, il faut continuer à ne baser le dimensionnement du réseau qu'à partir des objectifs de l'agriculteur — pour lesquels HERVÉ (1980) introduit la notion de paramètres de risques — exprimés en terme d'entrée au champ, mesurée par la portance du sol ou estimée par l'humidité de surface, la profondeur de la nappe en tarissement, etc.

L'agriculteur est en effet beaucoup plus sensible à l'influence de l'excès d'eau sur le travail du sol qu'à son influence directe sur les cultures. C'est ce que l'on traduit souvent par l'objectif suivant : il s'agit de rabattre la nappe un jour après l'arrêt de la pluie d'une profondeur initiale à la base de l'horizon labouré à une profondeur finale de l'ordre de 45 cm, permettant l'entrée au champ. Le calcul se fait à partir des formules de régime variable de tarissement de la nappe (GUYON, 1974).

4. CONCLUSIONS

Les résultats expérimentaux montrent que les modèles de l'hydraulique souterraine en milieu saturé décrivent bien la circulation de l'eau infiltrée sous l'horizon labouré : au-dessous d'une valeur débitométrique maximale, fonction de la conductivité hydraulique horizontale équivalente et de l'écartement entre les drains, les valeurs des débits en fonction du temps s'ajustent bien à des courbes théoriques. Au-dessus de cette valeur, la tranchée drainante transite des écoulements rapides, qu'on appelle débits de pointe, et qui empruntent des cheminements préférentiels dans l'horizon labouré, voire dans les fissurations du sol en période non saturée.

L'étude statistique que nous avons menée sur les débits élevés de deux réseaux expérimentaux montre que la valeur et la durée de ces débits, pour une durée de retour donnée, sont fonctions du contexte pédo-climatique et des dispositions constructives des réseaux. Le débit dépassé en moyenne 24 heures par an correspond à peu près à la valeur du débit de projet, égal à la restitution de la pluie de trois jours de fréquence annuelle (calculée entre Octobre et Mai) ; cette dernière valeur peut être nettement supérieure au débit de la nappe.

Enfin, la brièveté des débits de pointe montre qu'ils ne sont pas en eux-mêmes une contrainte pour l'agriculteur.

Nombre de questions restent posées : quels sont les facteurs expliquant la pérennité d'une tranchée de drainage ? Quelle durée de mise en charge la tranchée peut-elle supporter, et en fonction de quels paramètres ? Comment mieux appréhender les contraintes de l'agriculteur, et son besoin en jours disponibles ? ...

Outre la poursuite des études statistiques sur d'autres réseaux drainés, nécessitant la constitution d'une banque de données sol-drainage, ces interrogations induisent des axes de recherche tant sur le plan fondamental pour expliquer la pérennité d'une structure remaniée dans un sol perturbé, que sur le plan pratique pour adapter l'investissement drainage aux préoccupations des agriculteurs.

Pour ce dernier point, une voie souhaitable est la mise au point de modèles complets de comportement d'une terre drainée, permettant une simulation et une prévision du fonctionnement du système eau-sol drainé-plante (exemples : WIND, 1976 DUPRAT, 1983 ; VAN WIJK et FEEDES, 1981).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AILLIOT B. : 1972. *Étude du drainage d'un pélosol avec référence à un sol brun marmorisé*. Thèse 3ème cycle, ENSAIA Nancy, pp. 80-92.
- ALDANONDO J.C. : 1981. *Étude du fonctionnement du drainage agricole à ARROU*. CEMAGREF, Étude hors série, n° 1, pp. 1-24.
- ALESSANDRELLO E. ; CONCARET J. ; GUYOT J. ; PERREY C. : 1976. *Circulation de l'eau en sols limoneux lessivés hydromorphes drainés*. C.R. Académie d'Agriculture de France, pp. 364-373.
- AL SOUFI R. ; RYCROFT D.W. : 1975. *A method for calculating the effects of mole drainage*. FDEU Technical Bulletin, 75/1/1, pp. 1-7.
- BOUZIGUES R. ; FAVROT J.C. ; HALLAIRE V. : 1981. *French heavy soils ; characterisation and cartography in relation to drainage*. Land drainage seminar Cambridge, Balkema Editor, Rotterdam, pp. 33-53.
- COLIN E. ; MICHEL C. ; OBERLIN G. : 1978. *Étude statistique d'événements hydrologiques observés sur un nombre réduit d'années*. CEMAGREF, Étude n° 22.
- CONCARET J. ; GUYOT J. ; PERREY C. : 1976. *Circulation dans les sols de l'eau excédentaire. Conséquences sur la technologie du drainage*. Station de Science du sol, INRA, Dijon, pp. 1-78.
- DAMOUR L. : 1980. *L'application du drainage dans les marais du centre-ouest atlantique*. Note INRA SAD/INAPG, Domaine de Saint-Laurent, pp. 1-17.
- DIELEMAN P.J. ; TRAFFORD B.D. : 1982. *Les essais de drainage*, n° 28, Rome, pp. 45-70.
- DUCHAUFOR P. : 1978. *Pédogénèse et classification*. Masson éditeur, pp. 357-395.
- DUPRAT J. : 1979. *Essai de drainage enterré à Saint-Laurent de-la-Prée*. Note CEMAGREF, pp. 1-41.
- DUPRAT J. : 1983. *Simulation du comportement hydraulique d'une parcelle de marais cultivée et drainée. Application à une estimation des possibilités d'interventions culturales*. Séance du 4/5/83 de l'Académie d'Agriculture (compte rendu à paraître).
- FAUSEY N.R. ; HUNDAL S.A. : 1980. *Role of trench backfill in subsurface drainage, a review*. Transactions of the ASAE (23-5), pp. 1197-1200.
- FLORENTIN L. : 1982. *Contribution à la connaissance des sols hydromorphes et apparentés de Lorraine et de leurs réponses au drainage*. Thèse Doctorat, ENSAIA Nancy, pp. 90-123.
- GUYON G. : 1961. *Quelques considérations sur la théorie du drainage et premiers résultats expérimentaux*. BTGR n° 52, Ministère de l'Agriculture, pp. 1-44.
- GUYON G. : 1966. *Considérations sur l'hydraulique du drainage des nappes*. BTGR n° 79, Ministère de l'Agriculture, pp. 1-115.
- GUYON G. : 1968. *Le drainage des nappes perchées*. ENGREF.
- GUYON G. : 1974. *Le drainage agricole. Essai de synthèse*. BTGR, n° 117, CEMAGREF, pp. 1-66.
- GUYON G. ; WOLSACK J. : 1979. *L'hydraulique souterraine et le drainage agricole*. C.R. Académie d'Agriculture (13) pp. 1123-1131.
- GUYON G. : 1981. *Hydraulique des nappes des sols drainés*. BTGR n° 127, CEMAGREF pp. 1-81.
- GUYON G. : 1983. *Le périmètre expérimental de drainage d'ARROU. Aspects hydrauliques*. Études du CEMAGREF, Hors Série n° 5, pp. 1-45.
- HERVÉ J.J. : 1980. *Limite et validité des modèles hydrodynamiques du drainage agricole*. Note CEMAGREF, pp. 1-21.
- HERVÉ J.J. 1981a. *Incidence du matériel de pose sur le fonctionnement de deux réseaux de drainage*. Revue drainage, n° 22, pp. 16-19.
- HERVÉ J.J. : 1981b. *Improving the permeability of heavy soils by subsoiling*. Land drainage Seminary Cambridge, Balkema editor, Rotterdam, pp. 200-202.
- HOREMANS P. ; LESAFFRE B. : 1981. *Secteurs de référence du Loir-et-Cher*. DDA Loir-et-Cher, pp. 34-72.
- JACQUIN F. ; FLORENTIN L. : 1977. *Possibilité de drainage dans les sols lourds de Lorraine. Effet tranchée dans un pélosol*. C.R. Académie d'Agriculture, (13), pp. 907-914.
- LAFOSSE B. : 1975. *Périmètre des Wateringues (Nord). Estimation du débit moyen de pointe des drains*. Note interne, Ministère de l'Agriculture, 31/1/75, pp. 1-10.
- LAGACE R. : 1977. *Le tarissement des nappes en sol agricole et la porosité de drainage*. Thèse de maîtrise, Université Laval, Québec, pp. 1-118.
- LAURENT F. ; LESAFFRE B. : 1983. *Étude statistique des débits élevés en drainage agricole*. Études du CEMAGREF, hors série, n° 6, pp. 1-122.

FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE - VALEUR ET DURÉE DES DÉBITS DE POINTE DU DRAINAGE
AGRICOLE EN SOLS A PSEUDO GLEY

- LESAFFRE B. : 1982. *Assainissement agricole, approche technique et institutionnelle en France*. Bulletin d'Information du CEMAGREF, n° 295-296, pp. 67-83.
- LESAFFRE B. ; HERVÉ J.J. : 1982. *Le drainage agricole : principes de fonctionnement*. Bulletin d'Information du CEMAGREF, n° 293, pp. 59-84.
- MÉRIAUX S. : 1973. *Sur le processus de fonctionnement des drains en sol lessivé hydromorphe*. Annales agronomiques, 24 (6), pp. 639-650.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, FRANCE (différents auteurs) : 1972. *Assainissement et drainage* (2 volumes). BTI, n° 271-274, pp. 693-1133.
- SCHUCH M. : 1978. *Regulation of water regime of heavy soils by drainage subsoiling and lining and water movement in this soils*. Proceedings of the int. drainage workshop. Wageningen, 25, pp. 253-267.
- SKAGGS R.W. ; KRITZ G.T. ; BERNAL R. : 1973. *Field Evaluation of transient drain spacing Equations*. Transactions of the ASAE, 16 (3), pp. 590-595.
- SYLVESTRE G. : 1974. *Comportement des systèmes de drainage dont les écartements varient de 8 à 70 mètres*. Société Canadienne de Génie Rural, pp. 1-13.
- SYLVESTRE G. ; COTE D. : 1973. *Fermes pilotes en drainage souterrain*. Université Laval, Québec, pp. 1-7.
- THOMASSON A.J. : 1981. *The distribution and properties of British soils in relation to land drainage*. Land Drainage Seminar, Cambridge, Balkema editor, Rotterdam, pp. 1-19 et 55-56.
- TROUCHE G. : 1981. *Drainage par tuyaux enterrés*. In Drainage, théorie et pratique, Chambre d'Agriculture de Bourgogne, pp. 199-214.
- VAND DE GOOR : 1973. *Plant growth in relation to drainage*. Drainage Principles and applications, ILRI n° 16, vol. I, pp. 91-122.
- VAN HOORN J.W. : 1973. *Drainage of heavy clay soils*. Drainage Principles and applications, ILRI n° 16, vol. IV, pp. 313-326.
- VAN HOORN J.W. ; VAN DER MOLEN W.H. : 1973. *Drainage of sloping lands*. Drainage Principles and applications, ILRI n° 16, vol. IV, pp. 327-339.
- VAN SCHILFGAARDE J. : 1963. *Design of tile drainage for falling water table*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceeding of the ASCE 89 (IR.2), Juin 1963, pp.1-12.
- VAN SCHILFGAARDE J. : 1965. *Transient design of drainage systems*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceeding of the ASCE 4458 (IR.3), Septembre 1965, pp. 9-22.
- VAN WIJK A.L.M. ; FEDDES R.A. : 1981. *A mode approach to the evaluation of drainage effects*. Land Drainage Seminar, Cambridge, Balkema editor, Rotterdam, pp. 131-141.
- WALEED J. : 1983. *Comportement hydrodynamique des sols lourds lorrains drainés en fonction des technologies de drainage*. Thèse doctorat d'ingénieur, ENSAIA, Nancy, pp. 1-150.
- WESSELING J. : 1973. *Subsurface flow into drains*. Drainage Principles and applications. ILRI n° 16, vol. II, pp. 1-56.
- WIND G.P. : 1976. *Application of numerical model to investigate the influence of drainage on workability in spring*. Nether - J. Agri. Sci., 24, pp. 155-172.
- WOLSACK J. : 1978. *Quelques extensions de la théorie du drainage aux sols hétérogènes et anisotropes*. Bulletin du BRGM, Mars 1978.