

Importance et déterminisme des infiltrations profondes en luvisols-redoxisols drainés. Incidence sur les modalités de drainage.

D. ZIMMER ⁽¹⁾
R. BOUZIGUES ⁽²⁾
J.C. CHOSSAT ⁽³⁾
J.C. FAVROT ⁽²⁾
A.M. GUIRESSE ⁽⁴⁾

RÉSUMÉ

Le suivi de différents sites expérimentaux de drainage en luvisols-redoxisols a mis en évidence l'existence fréquente d'infiltrations vers la profondeur, au sein d'horizons considérés comme les planchers quasi-imperméables de ces sols. L'intensité de ces infiltrations varie dans l'espace et dans le temps. Un ensemble de critères morpho-pédologiques et hydrogéologiques permettant d'expliquer la présence et l'intensité de ces infiltrations profondes a été déterminé pour les luvisols du Sud-Ouest de la France (répondant au nom vernaculaire de boubènes). L'influence de ces infiltrations sur le fonctionnement et la conception des réseaux de drainage est discutée à partir de résultats expérimentaux et d'un travail de modélisation hydraulique.

MOTS-CLÉS : drainage enterré - luvisol-redoxisol - infiltration profonde.

IMPORTANCE AND DETERMINISM OF DEEP SEEPAGE THROUGH DRAINED LUVISOLS-REDOXISOLS

Luvisols-redoxisols are the most commonly drained soils in France. Several field experiments installed on these loamy soils resting on a shallow impervious layer have been monitored in France in the past recent years, in order to determine their relevant drainage design criteria. These experiments have shown that deep seepage through the impervious layer is common in these soils. A set of morphological and hydrogeological features (Tab. 1, Fig. 4) explaining the space and time variability of this deep seepage has been determined. Experimental results help precising the mechanisms involved in the process and indicate that the mid-drain watertable level vs discharge relationship - may be a good indicator of the deep seepage (Fig. 6). These experimental results are compared to theoretical predictions of a hydraulic model based on Boussinesq-Guyon's approach and taking deep seepage into consideration (fig. 7).

KEY-WORDS : subsurface drainage - luvisol - deep seepage.

- (1) CEMAGREF - Division Drainage - BP 121 - 92185 Antony Cedex
(2) I.N.R.A. Laboratoire de Science du sol - Place P. Viala - 34060 Montpellier Cedex - France
(3) CEMAGREF - Division Ouvrages Hydrauliques - B.P. 3 - Gazinet - 33610 Cestas
(4) ENSAT - Laboratoire Pédologie-Aménagement - 145, Av. de Muret - 31076 Toulouse Cedex

Tableau I : Caractéristiques des sols des sites expérimentaux .
Soil characteristics of field experiments

Sites expérimentaux	Type de sol	Structure du B ₂ tg	Profondeur du B ₂ tg en cm	Couleur du B ₂ tg	Teneur en argile B ₂ tg en %	Profondeur cailloutis en m	Profondeur aquifère en m en été	Nature du colmatage du cailloutis
BOUILLAC	Lg**	Prismatique	50-60	Brun rouille et gris clair	37-40	non atteint	>5	non connu
		----- Vertique		Rouille et gris bleuté	40-45			
PARISOT	Lg**	Prismatique	50-60	Brun rouille et gris clair	25 et 45	0,6 à 1,5	>5	Colmaté*
POUCHARRAMET	Lg**	Prismatique	60-80	Brun rouille et gris clair	35	2	2	Colmaté et ferruginisé
				----- Rouille et gris réduit	35-40	1,0	1	Colmaté
VILLEMUR	Lg**	Prismatique	50-80	Brun rouille et gris clair	35	1	>3-4	Colmaté
		----- Vertique		Rouille et gris bleuté	40	1 à 2		
ARROU	Lg**	Prismatique	50-60	Brun franc et gris clair	30	-	>5	-

* Colmaté par argile bariolée ocre et grise

** Lessivé à pseudogley

INTRODUCTION

Les luvisols-redoxisols (AFES, 1990) ou sols lessivés hydromorphes (CPCS, 1967) représentent la majorité des sols drainés de France. Afin d'évaluer l'importance des différents flux d'eau en terrains drainés - à l'échelle d'une parcelle élémentaire d'1 ha environ - et de préciser les mécanismes de fonctionnement du drainage en vue de proposer les recommandations techniques les plus appropriées, plusieurs sites expérimentaux de drainage ont été installés et suivis au cours de la dernière décennie (FAVROT, 1983 ; LESAFFRE et LAURENT, 1983). Parmi ces différents flux, les infiltrations sous la profondeur des drains au sein du plancher quasi-imperméable, que nous nommerons infiltrations profondes, ont été le plus souvent jugées négligeables. Elles peuvent en fait avoir une grande importance pour le bilan hydrique et pour le fonctionnement hydraulique des réseaux de drainage (GUIRESSE, 1989 ; ZIMMER, 1989).

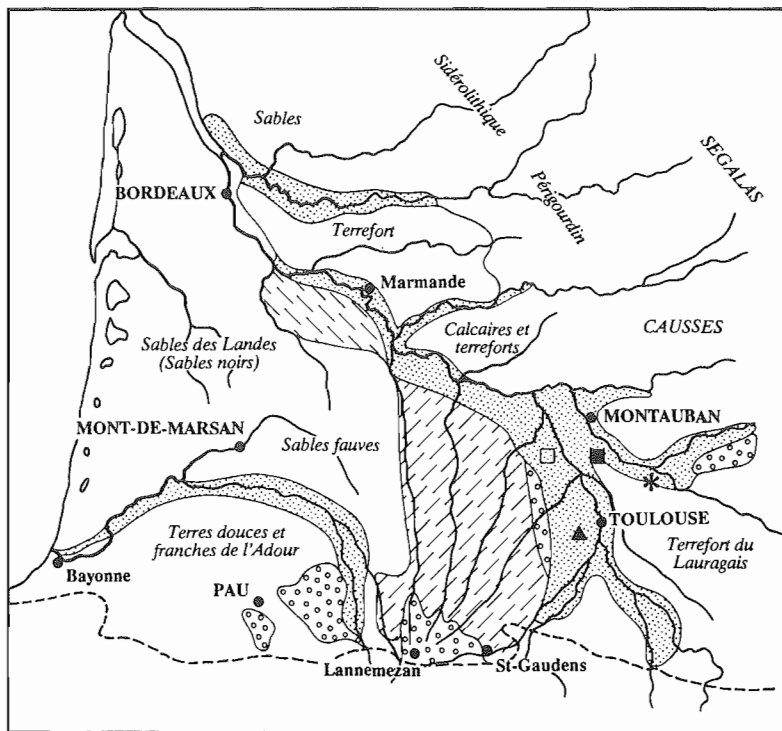
Le but de cet article est de montrer l'importance du phénomène et de tenter d'en expliquer les mécanismes en fonction de l'organisation structurale des sols et de facteurs géologiques et hydrologiques, puis d'en préciser l'incidence sur la modélisation et la conception du drainage.

L'étude concerne surtout les sols de "boulbènes", très répandus dans le Sud-Ouest de la France, mais elle s'appuie également sur des résultats obtenus sur des luvisols-redoxisols développés sur les limons du Bassin Parisien.

I. MILIEU ETUDIÉ

En Midi-Pyrénées et en Aquitaine, les sols de boulbènes couvrent plus de 800 km² (ARROUAYS *et al.*, 1990) principalement sur les formations alluviales anciennes du bassin de la Garonne. Au sens strict, il s'agit de luvisols-redoxisols, très largement répandus par ailleurs sur le territoire français (JAMAGNE et BEGON, 1984). Bien que d'apparence peu variable, les profils de sols de boulbènes présentent une hétérogénéité de morphologie et de composition. Cette hétérogénéité a trait principalement à la profondeur d'apparition, à la teneur en argile, à l'organisation structurale et à la richesse en oxy-hydroxydes de fer de leurs horizons B texturaux (BT) et à la profondeur du cailloutis alluvial sous-jacent. Ce dernier peut être plus ou moins colmaté par des argiles d'altération ou cimenté par des hydroxydes de fer et de manganèse formant des cuirasses connues sous le nom vernaculaire de "grepp" (Tableau I).

Pour les luvisols-redoxisols, l'excès d'eau temporaire constitue l'une des principales contraintes à la mise en valeur agricole. Afin d'adapter les techniques de drainage et les paramètres de dimensionnement des réseaux à la variabilité des situations, plusieurs champs expérimentaux ont été installés (Figure 1, Tableau II). Les suivis hydriques réalisés sur ces champs expérimentaux (CACG, 1990 ; LONGUEVAL, 1984 à 1988 ; GUIRESSE, 1989 ; BOUZIGUES et VINAS, 1989) sont présentés au tableau II. Des travaux comparables ont été réalisés sur le champ expérimental d'Arrou en Eure et Loir, suivi depuis 1973, et situé sur les luvisols-redoxisols du Bassin Parisien (LESAFFRE, 1989 ; ZIMMER, 1989). Les caractéristiques de ce champ sont également présentées sur les différents tableaux.







-  Zone à bouldènes
-  Prédominance de bouldènes caillouteuses
-  Bouldènes et terreforts de l'Armagnac (non différenciés sur la carte)
-  Bouldènes et sables du Queryan (non différenciés sur la carte)

Figure 1 : Localisation des sites expérimentaux de drainage en luvisols-redoxisols

□ Bouillac, ■ Villemur, * Parisot, ▲ Poucharramet

Location of field experiments

II. MISE EN ÉVIDENCE DES INFILTRATIONS PROFONDES

Les infiltrations profondes peuvent être mises en évidence, soit de manière indirecte en examinant les restitutions des réseaux de drainage, soit de manière directe par des mesures de charge hydraulique.

1. Restitution des réseaux de drainage et estimation des flux infiltrés

Plusieurs observations montrent l'existence d'infiltrations profondes dans certaines parcelles drainées :

Tableau II : Présentation des champs expérimentaux et des mesures réalisées.

General characteristics of experimental fields

Champs expérimentaux	Vallée	Niveau de terrasse	Topographie	Année de réalisation du réseau	Débitmétrie	Piézométrie	Tensiométrie
BOUILLAC (82)	Garonne	Moyenne	micro-ondulée (0,4 %)	1977	- ch. de mesure avec augets basculeurs - en continu	automatique CR2m	- manuelle hebdomadaire - horaire
PARISOT (81)	Tarn	Moyenne	pente irrégulière 0,5 à 3 %	1986	- ch. de mesure avec minidé-versoirs. - en continu	"	- automatisée CR2m - horaire
POUCHAR-RAMET (31)	Touch	Basse	pente 1 %	1984	"	"	- manuelle - quotidienne à hebdomadaire
VILLEMUR (31)	Tarn	Basse	plat	1985	- manuel (empotement) - périodique	- manuelle	- manuelle - hebdomadaire.
ARROU (28)	Eure et Loir	Plateau	pente 1 %	1972	- déversoirs - en continu CR2 m	- automatique	- automatique CR2m - horaire

1. Les coefficients de restitution des réseaux de drainage, définis comme le rapport des lames d'eau évacuées à la hauteur des précipitations, varient de manière importante et sans relation avec le dimensionnement du réseau de drainage (Tableau III) ; le cas extrême est celui de Bouillac où les restitutions des réseaux en période hivernale varient entre 10 et 50 % de manière totalement indépendante de l'écartement des drains (C.A.C.G., 1990). En hiver, sous climat tempéré et en l'absence d'infiltrations profondes, le bilan "pluie - évapotranspiration", devrait généralement conduire à des restitutions supérieures à 70 % (GUIRESSE, 1989 ; ZIMMER, 1989).

2. Au cours de l'hiver, les intensités des pluies sont généralement inférieures à 10 mm/h, valeur inférieure à la capacité d'infiltration des luvisols-redoxisols en l'absence de croûte de battance. De plus, aucune corrélation n'a pu être mise en évidence entre restitutions et type de couvert du sol et donc état de la surface du sol

(CHOPIN, 1988). Le ruissellement ne peut donc pas expliquer les différences de restitutions.

3. Sur le site d'Arrou, les courbes de doubles-cumuls entre débits de parcelles à faibles et fortes restitutions montrent une différence de fonctionnement constante et continue pendant toute la saison hivernale de fonctionnement du drainage, et donc une indépendance entre le déficit de restitution et les précipitations (ZIMMER, 1989).

En utilisant une approche par doubles cumuls entre débits évacués par les réseaux de parcelles avec et sans infiltrations profondes, CHOPIN (1988) a pu estimer les flux infiltrés en profondeur sur le champ expérimental d'Arrou à 0,4 mm/j. Grâce à un bilan hydrique, GUIRESSE (1989) aboutit à des valeurs variant entre 0,3 et 0,6 mm/j sur le champ expérimental de Poucharramet.

Ces valeurs peuvent paraître faibles, notamment en regard de la conductivité hydraulique des matériaux. Cependant, l'excès d'eau (P-ETP) hivernal mensuel ne dépasse généralement pas 40 - 50 mm, ce qui correspond à un flux de 1,3 - 1,6 mm/j.

Tableau III : Coefficients de restitution et écartements des drains des parcelles des sites expérimentaux étudiés.

Drainage yields and drain spacings of the plots of the field experiments.

Champs expérimentaux	Parcelles à faibles restitutions		Parcelles à fortes restitutions	
	coefficient de restitution	écartements (m)	coefficient de restitution	écartements (m)
Bouillac	10 à 20 %	15, 20, 30	30 à 50 %	15, 20, 30
Parisot	30 à 40 %	12	50 %	12
Poucharramet	60 %	25	70 à 80 %	10
Arrou	30 à 50 %	15, 20	60 à 90 %	10, 15

2. Mesures de charge hydraulique

Différents sites ont été équipés de piézomètres ou de tensiomètres en profondeur, sous le niveau du drain, afin de mesurer les gradients de potentiel total de l'eau (notés gradients hydrauliques dans la suite).

Les résultats des deux types de mesures sont dans l'ensemble cohérents, mais la piézométrie est en général plus difficile à interpréter, et ce, pour deux raisons. D'une part, le piézomètre intègre la charge hydraulique de toute sa partie crépinée et lisse donc les variations de charge. D'autre part, le volume d'eau mis en jeu par le piézomètre est beaucoup plus important que celui du tensiomètre, ce qui allonge le temps de réponse de cet appareil (ZIMMER, 1988).

Sur les champs de Bouillac et Poucharramet - à l'exception d'une parcelle de ce dernier champ -, les différences de hauteurs piézométriques, et donc les gradients hydrauliques moyens, mesurés à la profondeur des drains (0,8 - 0,9 m) ou plus en profondeur (>1,2 m) révèlent des écoulements descendants. Ces différences de hauteurs piézométriques sont inversement proportionnelles aux coefficients de restitution des parcelles (BOUZIGUES et VINAS, 1989 ; GUIRESSE, 1989). Elles sont par contre faibles sur les parcelles témoins non drainées. Un exemple de ces différences, pour une parcelle drainée à 30 mètres d'écartement et présentant des infiltrations profondes modérées, est présenté à la figure 2 ; cette figure sera rediscutée au paragraphe IV.

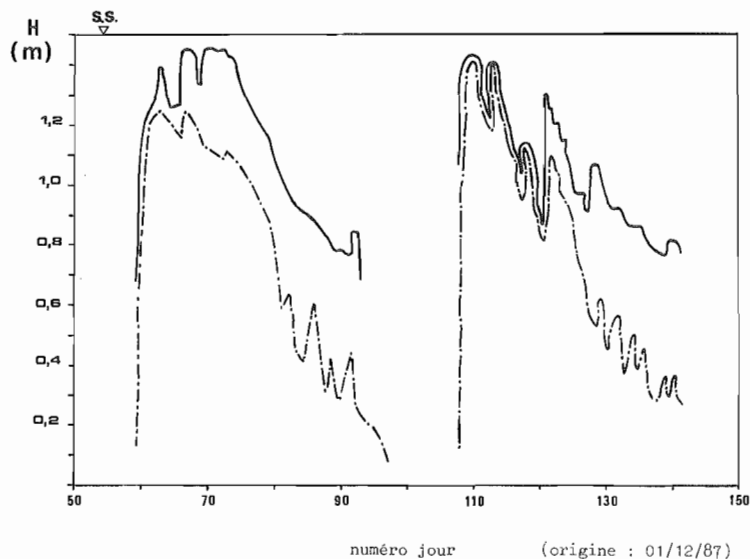


Figure 2 : Chronique des hauteurs piézométriques (H) mesurées au pas de temps horaire à l'interdrain sur le bloc D30 du champ de Bouillac du 28/01/88 (n°59) au 21/04/88 (n°142).

S.S. : surface du sol

Profondeur crépinée du piézomètre : — 60 - 90 cm - - 120 - 150 cm

Hourly measured piezometric heads (H) at drain midspacing in Bouillac field experiment ; Plot D 30 from 01/28/88 (N°59) to 04/21/88 (n°142).

S.S. : soil surface

Screened depth of the piezometer : — 60 - 90 cm - - 120 - 150 cm

Les suivis tensiométriques révèlent également des écoulements vers la profondeur. En 1988, sur le champ de Bouillac, les chroniques de gradients hydrauliques verticaux mesurés sous la profondeur des drains différencient à la fois les parcelles à faible et forte restitution et les périodes de la saison hivernale. Pendant la période de suivi, la parcelle à faibles restitutions (bloc A20) présente des gradients hydrauliques verticaux compris entre 0,5 et 1,5. La parcelle à restitutions plus forte (bloc D30) présente, dans une première période, des gradients élevés (de l'ordre de 3,0), mais ces gradients chutent brusquement pour devenir inférieurs à 0,5 (Fig. 3).

Un comportement semblable a été observé sur le site d'Arrou (CHOPIN, 1988). Il s'explique par la présence d'un front de réhumectation migrant progressivement vers la profondeur au cours de l'hiver. Cette explication semble valable également sur le champ de Bouillac où la forte décroissance des gradients sur la parcelle à faibles infiltrations profondes correspond au passage de ce front dans la zone de mesure. Sur les parcelles à fortes infiltrations profondes, ce front descend plus rapidement vers la profondeur, ce qui explique que les gradients verticaux y soient, au départ, moins élevés.

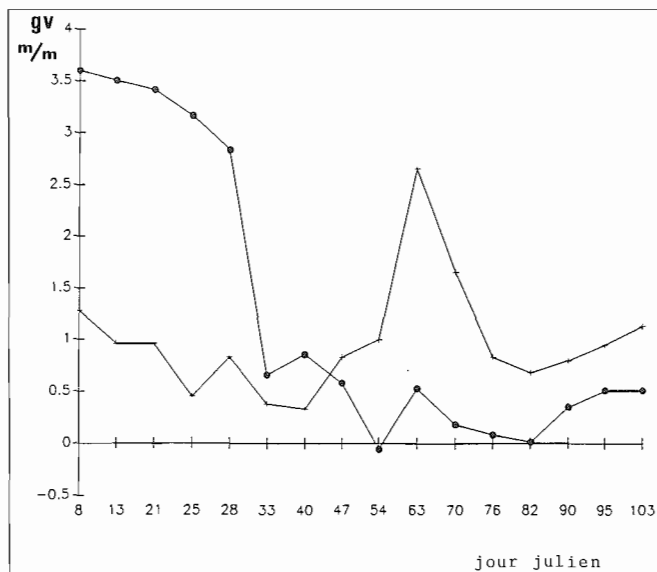


Figure 3 : Chronique des gradients verticaux (gv) mesurés sur le champ expérimental de Bouillac du 08/01/88 au 13/04/88 entre les tensiomètres situés à 90 et 150 cm de profondeur.

infiltrations profondes : ● faibles-parcelle D30 ; + fortes-parcelle A20

Sequence of vertical hydraulic gradients (gv) between 0,90 m and 1,50 m in depth in Bouillac field experiment from 01/08/88 to 04/13/88.

deep seepage rate : ● low-plot D30 ; + high-plot A20

III. CRITÈRES MORPHOLOGIQUES ET INFILTRATIONS PROFONDES

Les examens approfondis de fosses pédologiques réalisés sur les différents champs expérimentaux ont montré que certains traits morphologiques, pour l'essentiel la structure de l'horizon B textural (BT), la profondeur du cailloutis, et la présence d'un aquifère peu profond (Fig. 4) sont corrélés aux coefficients de restitution et donc aux infiltrations profondes.

1. Caractéristiques de l'horizon B textural (BT) et infiltrations profondes

a) Structure de l'horizon B textural (BT).

Les relations entre l'arrangement structural de l'horizon B textural (BT) et les infiltrations sous les drains ont été bien mises en évidence sur les champs expérimentaux de Bouillac et de Villemur. Il y existe en effet deux faciès structuraux bien différents : l'un de type *vertique*, l'autre de type *prismatique*.

Le *faciès vertique* est caractérisé par la superposition de plaques subhorizontales, épaisses de 5 à 10 cm, présentant des faces grisâtres, brillantes, lissées et striées, enrobant une matrice rouilleuse (BOUZIGUES et VINAS, 1989, FAVROT *et al.*, 1990). Ce mode d'arrangement, caractérisé aussi par une conductivité hydraulique -mesurée par la méthode Porchet- très faible à nulle, limite fortement la circulation verticale de l'eau. De ce fait, les écoulements ont une composante horizontale importante et sont, en grande partie, interceptés par les drains. Néanmoins, des transferts hydriques d'intensité variable dans le temps s'opèrent également en direction de couches profondes, essentiellement selon 3 voies :

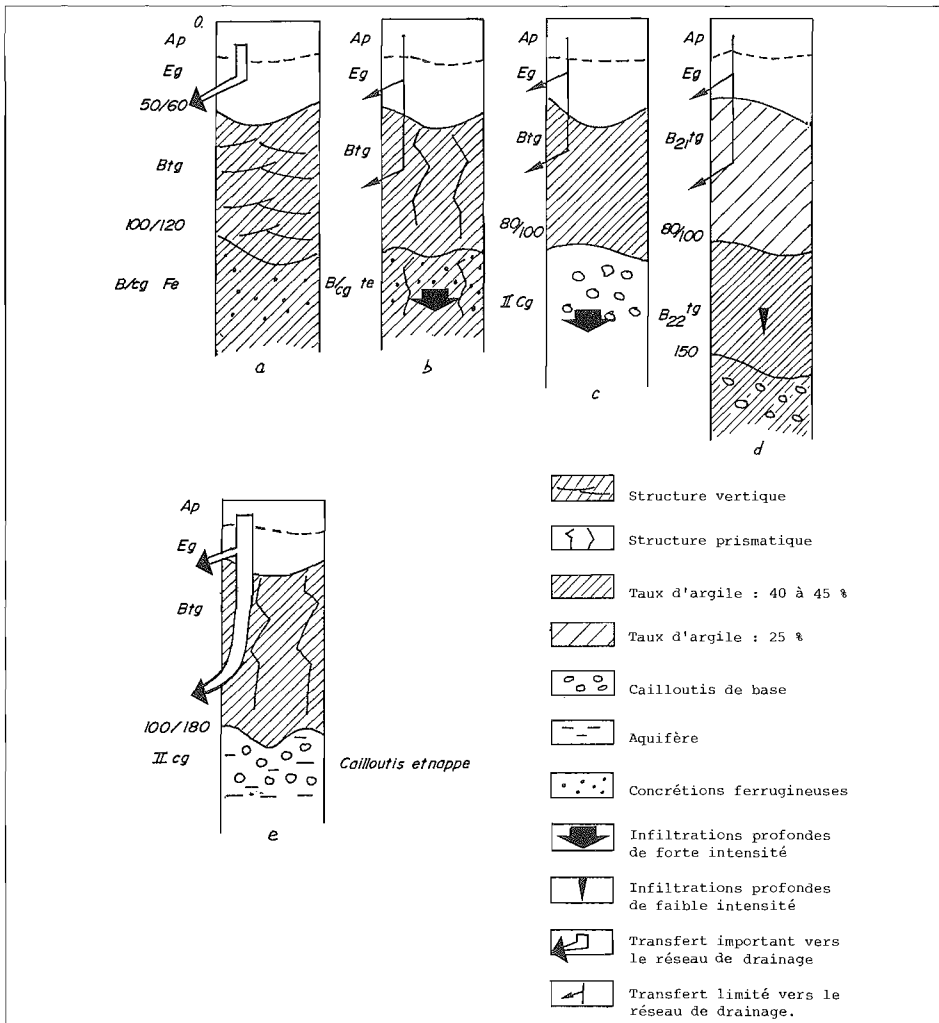
- par les vides séparant les plaques subhorizontales, où subsiste, même après gonflement des matériaux, un réseau d'empreintes racinaires constitué de pores de 150 à 200 μm ;
- par certaines fissures verticales interconnectant les plans subhorizontaux et comblées par des dépôts limoneux en provenance des horizons supérieurs ;
- via les rares pores racinaires ou galeries de vers traversant l'horizon.

Dans les horizons sous-jacents, les transferts verticaux s'opèrent plus facilement en raison de la présence de nombreux pisolithes, d'agrégats ferruginisés limitant les phénomènes de gonflement et de pores biologiques plus ou moins tapissés d'hydroxydes de fer.

Le *faciès prismatique* est caractérisé par la présence de plans fissuraux de direction essentiellement verticale, traversant tout l'horizon B textural (BT), de glosses à forte porosité biologique et de petits pores racinaires colonisant l'ensemble du matériau. La conductivité hydraulique mesurée par la méthode Porchet y est plus élevée (0,3 à 0,6 m/j). Ce faciès ne constitue donc pas un obstacle à la circulation verticale. De plus, comme dans le cas précédent, les écoulements peuvent se poursuivre en profondeur grâce à la ferruginisation abondante des très nombreux pores d'origine racinaire. Dans ce faciès, les restitutions des réseaux sont beaucoup plus faibles et l'intensité des infiltrations profondes sensiblement accrue.

Sur le champ de Bouillac, la structure de l'horizon B textural (BT) est le principal facteur explicatif des différences de restitutions observées entre les parcelles. Les blocs D30 et A20 ayant fait l'objet du suivi présenté ci-dessus sont caractérisés par des structures respectivement vertique et prismatique. Sur le terrain, des différences de tonalité de la couleur des horizons, de légères modifications du modelé, ou des variations de profondeur du cailloutis, permettent, après un bon calage sur des profils représentatifs, d'identifier et de délimiter ces faciès structuraux à partir de simples sondages à la tarière à main (BOUZIGUES et VINAS, 1989).

Les autres champs expérimentaux montrent que le type de structure n'est pas le seul facteur des infiltrations profondes ; en particulier, des infiltrations profondes faibles peuvent également être observées avec le faciès prismatique. En fait, les couches situées sous l'horizon B textural (BT) jouent également un rôle qui peut être conditionné par plusieurs facteurs, tels que la profondeur et le colmatage du cailloutis alluvial.



pour la plupart des autres dispositifs expérimentaux, le taux d'argile de l'horizon BT se situe aux environs de 40 %, il n'est que de 25 % à Parisot. Toutefois, sur la parcelle n°2 de ce champ, la teneur en argile du BT s'accroît brutalement au delà de 0,8 m et dépasse 45 %. Cette teneur en argile semble le seul élément explicatif des faibles infiltrations profondes observées sur cette parcelle.

2. Profondeur du cailloutis alluvial

L'incidence de la profondeur du cailloutis est variable d'un site expérimental à l'autre.

1 - Sur le champ de Parisot, les infiltrations profondes sont plus abondantes lorsque l'assise caillouteuse est proche de la surface (0,6/0,8 m au lieu de 1,3/1,5 m). Leur intensité demeure cependant relativement faible. Ceci peut être attribué au colmatage du sommet du cailloutis alluvial par une argile bariolée ocre et grise.

2 - A Villemur, sur la basse terrasse du Tarn, il existe une étroite relation entre le type de structure des horizons B texturaux (BT) et la profondeur de ce cailloutis. Lorsque ce dernier se localise aux environs de 1 m, c'est une structure prismatique, plus favorable aux infiltrations profondes qui se développe. A l'inverse, lorsque le cailloutis de base apparaît au delà de 1,20 m, une structure vertique, freinant les infiltrations, s'individualise.

3 - Sur le champ de Poucharramet, dans la vallée du Touch, la variation de cote du cailloutis alluvial semble avoir également une importance (GUIRESSE, 1989). Ainsi, ce niveau caillouteux apparaît aux alentours de 1 m sur la parcelle n°4 et oscille entre 2,0 et 2,3 m de profondeur sur les autres parcelles. Dans tous les cas, ce cailloutis, bien que colmaté par une argile bariolée d'altération, régit directement la profondeur de l'aquifère (cf. paragraphe suivant) dont la présence paraît déterminante sur les mécanismes de transferts.

3. Présence d'un aquifère peu profond

La présence d'un aquifère permanent peu profond, situation spécifique du champ de Poucharramet, influe également sur les infiltrations profondes. Ces dernières s'avèrent plus faibles que sur le champ de Bouillac. Toutefois, l'influence de ce paramètre est modulée à la fois par l'épaisseur de l'horizon BT et par la variation de cote du cailloutis alluvial évoqué ci-dessus.

IV CONSÉQUENCES POUR LA MODÉLISATION ET LA CONCEPTION

1. Modélisation du fonctionnement du drainage

a) Examen des hypothèses

Le calcul de l'écartement entre files de drain s'effectue au moyen d'équations résultant d'une modélisation du fonctionnement du système drainé. Cette modélisation fait appel à des hypothèses sur les lois physiques et les conditions aux limites s'appliquant au système.

Dans la modélisation habituellement utilisée en France (GUYON, 1981 ;

LESAFFRE, 1989), trois hypothèses sont remises en question par l'existence d'infiltrations profondes (ZIMMER, 1989) :

- l'hypothèse de flux vertical nul à la limite inférieure du système que constitue le toit de l'horizon quasi-imperméable ;
- l'hypothèse de Dupuit-Forchheimer (gradients hydrauliques verticaux nuls au sein de la nappe au dessus du niveau des drains) ;
- l'hypothèse de forme de nappe constante.

Ces trois points peuvent être pris en compte de la manière suivante.

1 - Les différences de fonctionnement entre parcelles drainées et non drainées sont invariantes au cours de la saison hivernale de fonctionnement du drainage sur le champ d'Arrou. Nous considérerons en première approximation le flux d'infiltrations profondes constant, et donc indépendant de la hauteur de la nappe perchée, au cours de la saison de drainage intense.

2 - En toute rigueur, l'éventuelle déviation de l'orientation des équipotentiels par rapport à la verticale devrait être prise en compte dans la formulation du potentiel de débit unitaire (GUYON, 1981). L'intensité des infiltrations profondes, de l'ordre de 1mm/j, est cependant relativement faible par rapport à la conductivité hydraulique saturée à la profondeur du drain des matériaux considérés : elle est de l'ordre du centième de cette conductivité dans l'ensemble des sites étudiés (BOUZIGUES et VINAS, 1989 ; GUIRESSE *et al.*, 1990). Dans la nappe à la profondeur des drains, ce flux se traduira par un gradient hydraulique de 0,01, valeur très faible, non mesurable avec précision, et donc par des équipotentiels quasi-verticales. Dès que la réhumectation en profondeur est complète, les gradients hydrauliques au-dessus du niveau du drain deviennent en effet très faibles dans les matériaux étudiés. La figure 2 ci-dessus en fournit un exemple pour le site de Bouillac : au cours du second épisode pluvieux (jours juliens 108 à 130), les hauteurs piézométriques mesurées à 0,90 m et à 1,50 m de profondeur sont très comparables tant que la nappe se situe à faible profondeur (<0,7 m). Au cours du tarissement, lorsque la nappe se rapproche de la limite inférieure de la zone crépinée du piézomètre le moins profond, les temps de réponse de ce dernier sont considérablement augmentés, ce qui explique les différences de hauteurs en dessous de la profondeur 0,7 m.

3 - Sur le champ d'Arrou, pour des flux infiltrés de l'ordre de 0,4 mm/j, la forme de la nappe est constante : le rapport des hauteurs piézométriques mesurées à deux distances du drain est en effet invariant (CHOPIN, 1988 ; Fig. 5). Une telle constance avait déjà été observée par GUYON (1983), la forme de la nappe étant proche de l'ellipse.

Dans ces conditions, les équations décrivant le comportement du système peuvent être résolues (ZIMMER, 1989). Les principales conclusions des équations obtenues sont présentées ci-dessous.

b) Relation débit-hauteur de nappe

Dans le cas de sols hétérogènes verticalement, lorsque l'imperméable est situé à la profondeur des drains et lorsque le flux infiltré en profondeur est constant, le débit évacué par le réseau de drainage comprend un terme proportionnel au carré de la

hauteur de la nappe et un terme proportionnel aux infiltrations profondes. L'équation est la suivante :

$$Q(H) = A \bar{K}(H) \frac{H^2}{L^2} - (1-A) I \quad (1)$$

où : Q débit, K conductivité hydraulique horizontale équivalente, A facteur de forme de nappe (forme elliptique : 0,87), H charge hydraulique au-dessus des drains à l'interdrain, L demi-écartement des drains et I flux infiltré en profondeur.

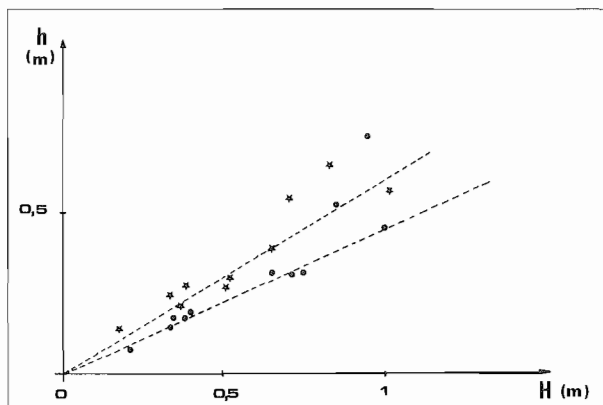


Figure 5 :

Relation entre hauteurs de nappe à proximité de l'interdrain (H) et à proximité du drain (h) sur une parcelle à infiltrations profondes négligeables (parcelle 7) et une parcelle à infiltrations profondes élevées (parcelle 4) au cours de la campagne 87-88 sur le champs d'Arrou (d'après ZIMMER, 1989).

☆ parcelle 7 ● parcelle 4

Relationship between watertable heights measured at drain midspacing (H) and near the drainage trench (h) in Arrou field experiment during 87-88 winter season.

☆ plot 7 : low deep seepage rate

● plot 4 : high deep seepage rate.

Le coefficient (1-A) étant positif, le débit s'annule pour une valeur non nulle de la charge hydraulique à l'interdrain. Cette valeur, notée H_f , a pour expression :

$$H_f = \left[\frac{\left[\frac{1}{A} - 1 \right] I L^2}{\bar{K}(h_f)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Un tel fonctionnement avait été observé par GUYON (1983) sur les parcelles à infiltrations profondes d'Arrou. Le débit s'annule en effet sur la parcelle 8 de ce champ pour une hauteur de nappe de 0,34 m. Cette valeur est proche, quoiqu'un peu plus

élevée, de la valeur théorique évaluée par l'équation (2) en utilisant une valeur de conductivité de 0,2 m/j proche de celle de la parcelle 1 du champ d'Arrou (ZIMMER, 1989). Les courbes du site de Bouillac présentent également ce comportement (Fig. 6). Sur la parcelle à faciès verticale étudiée (D30), les débits s'annulent pour une valeur de hauteur de nappe au-dessus du niveau du drain d'environ 0,30 m.

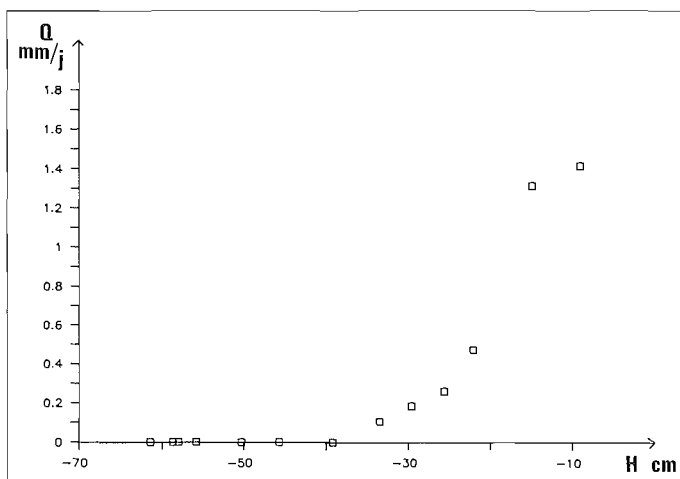


Figure 6 : Relation débit (Q) - profondeur de nappe (H) mesurée à l'interdrain sur le bloc D30 du champ expérimental de Bouillac du 11/02/88 au 29/02/88.

Relationship between drainage discharge (Q) and watertable depth at drain midspacing in Bouillac field experiment - Plot D30, from 02/11/88 to 02/29/88.

c) Equation du tarissement non influencé

Au cours du tarissement non influencé, l'équation différentielle décrivant les variations de hauteurs de nappe en fonction des paramètres hydrodynamiques du sol peut être résolue en sol homogène. La loi décrivant le tarissement non influencé est alors la suivante :

$$H = L \sqrt{\frac{I}{K}} \tan \left[\text{Arctg} \left[\sqrt{\frac{K}{I}} \frac{H_0}{L} \right] - \frac{\sqrt{K.I}}{C\mu} t \right] \quad (3)$$

où t temps, μ porosité de drainage, H_0 hauteur de nappe initiale ($t=0$) et C facteur de forme de nappe, I flux infiltré en profondeur.

La figure 7 montre l'influence du flux infiltré en profondeur sur les vitesses de rabattement de la nappe. Pour des valeurs supérieures à 0,4 mm/j, les relations $H(t)$ sont quasi linéaires. Pour les valeurs de conductivité du site d'Arrou et des infiltrations profondes de 0,4 mm/j, les temps théoriques de rabattement de la nappe de la base du

labour à la profondeur de 0,50 m sur une parcelle drainée à 10 m d'écartement sont identiques à des temps de rabattement d'une parcelle drainée à 15 m d'écartement sans infiltrations profondes.

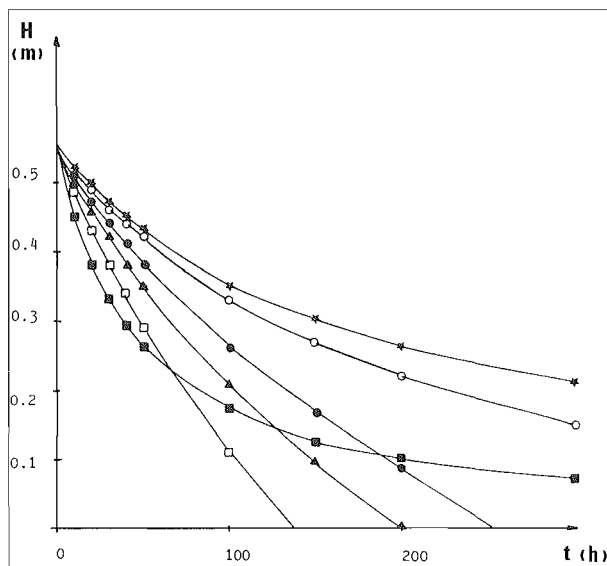


Figure 7 :

Hauteurs de nappe (H) calculées pour un tarissement en présence ou non d'infiltrations profondes (I_p). Les paramètres hydrauliques sont ceux de la parcelle 1 du champ d'Arrou : $K = 0,3$ m/j, $\mu = 0,014$ (d'après ZIMMER, 1989).

★ $I_p = 0$, écartement des drains 20 m

○ $I_p = 0,1$ mm/j, écartement des drains 20 m

● $I_p = 0,4$ mm/j, écartement des drains 20 m

▲ $I_p = 0,6$ mm/j, écartement des drains 20 m

□ $I_p = 1$ mm/j, écartement des drains 20 m

■ $I_p = 0$, écartement des drains 10 m.

Calculated watertable heights (H) during recession stage with or without deep seepage (I_p).

★ $I_p = 0$, drain spacing 20 m

○ $I_p = 0,1$ mm/j, drain spacing 20 m

● $I_p = 0,4$ mm/j, drain spacing 20 m

▲ $I_p = 0,6$ mm/j, drain spacing 20 m

□ $I_p = 1$ mm/j, drain spacing 20 m

■ $I_p = 0$, drain spacing 10 m.

2. Discussion - Application à la conception du drainage

Cet ensemble de résultats théoriques demande à être confronté à l'ensemble des données recueillies sur les sites expérimentaux en sols de boubènes. L'examen des relations débit-hauteur de nappe sur le site de Bouillac apporte cependant un début de confirmation de la pertinence du modèle. Son application suppose cependant que soit développée une méthode de détermination appropriée des paramètres hydrodynamiques du sol. En effet, tant le calcul à partir des courbes de tarissement non influencé que la méthode de l'essai de pompage de Guyon (méthode du puits et des piézomètres) sont inappropriés en présence d'infiltrations profondes.

Les infiltrations profondes ont une grande influence sur le fonctionnement du

drainage comme le montrent la figure 7 et le tableau III. Cette influence est vraisemblablement plus marquée en ce qui concerne la vitesse de rabattement de la nappe qu'en ce qui concerne les débits. En effet, une fraction importante des débits élevés évacués par les réseaux de drainage est directement proportionnelle à l'intensité pluviométrique (LESAFFRE et ZIMMER, 1987), elle-même généralement supérieure aux flux infiltrés en profondeur. *En matière de dimensionnement des réseaux, les infiltrations profondes jouent donc vraisemblablement un rôle plus important vis-à-vis de l'écartement des drains que vis-à-vis du débit de projet.*

V. CONCLUSIONS

Le suivi de champs expérimentaux drainés en luvisols-redoxisols révèle l'existence d'infiltrations non interceptées par les drains, au sein des matériaux considérés comme les planchers quasi-imperméables de ces sols. Les flux correspondants sont compris entre 0 et 0,6 mm/j. Certains critères morphologiques de ces matériaux permettent d'estimer l'importance de ces phénomènes.

Tout d'abord, la présence sous l'horizon BT, soit d'un matériau très argileux (Parisot, Arrou), soit d'une nappe alluviale (Poucharramet) limite les infiltrations profondes.

Lorsque le matériau profond n'est pas très argileux et qu'aucune nappe alluviale n'est présente, des infiltrations se produisent. Deux mécanismes sont possibles : (1) la réhumectation du matériau argilo-limoneux peut prendre très longtemps et elle induit des infiltrations profondes ; (2) la nappe s'installe depuis le cailloutis ou le matériau argileux imperméable (cas d'Arrou) jusqu'à la surface du sol et les conditions aux limites de l'ensemble du système expliquent la drainance. Le premier schéma prévaudrait plutôt en première partie de l'hiver, le second plutôt en fin d'hiver.

Dans tous les cas, la conductivité hydraulique de l'horizon BT, qui dépend de sa structure et de sa teneur en argile, joue un rôle de frein ou de facteur limitant (condition de flux maximum imposé) vis-à-vis de ces infiltrations : au sein d'ensembles de parcelles à infiltrations globalement élevées (Bouillac) ou faibles (Poucharramet), la structure de l'horizon BT explique en grande partie la variabilité résiduelle de ces infiltrations.

En termes de dimensionnement des réseaux, les premiers résultats de la modélisation confirment l'importance des infiltrations profondes sur le fonctionnement hydraulique des réseaux de drainage et permettent d'entrevoir le développement prochain d'une méthode de prise en compte de ces infiltrations dans le calcul de l'écartement des drains.

Reçu pour publication : Mai 1991

Accepté pour publication : Novembre 1991

BIBLIOGRAPHIE

- A.F.E.S., 1990 - *Référentiel Pédologique*. Ouvrage collectif, éditeur AFES, 203 p.
- ARROUAYS D., BEGON J.C., WILBERT J., BERLAND M., 1990 - Répartition schématique des sols lessivés hydromorphes et lessivés dégradés (boulbènes) du Grand Sud-Ouest de la France. In : *Les sols de boulbènes*. Colloque AFES, TOULOUSE 18.10.90, 11 p.
- BOUZIGUES R., VINAS A., 1989 - Identification de différents faciès structuraux dans les horizons B texturaux (BT) des sols de boulbènes. Rapport INRA Montpellier, SES 595, 92 p.
- C.A.C.G. 1990 - Champ d'essai de drainage de Bouillac. Compte rendu des campagnes 1986-1987 et 1987-1988. Rapport 50 p.
- CHOPIN O., 1988 - *Contribution à l'étude du fonctionnement hydrologique du drainage. Etude des infiltrations profondes*. Mémoire de fin d'études ENITRTS Strasbourg, 95 p.
- CHOSSAT J.C., GUIRESSE A.M., 1989 - Note sur le fonctionnement du drainage à Parisot. Rapport CEMAGREF, 60 p.
- C.P.C.S., 1967 - *Classification des Sols*. Ouvrage collectif, 87 p.
- FAVROT J.C., 1983 - Les phénomènes de transferts en drainage agricole. *Bull. Inf. CEMAGREF*, **310**, 3-14.
- 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 14e congrès de la CIID, Rio de Janeiro, vol I-B, 367-379.
- GUIRESSE A.M., 1989 - *Drainage en sols de boulbènes. Relation entre les caractéristiques morphologiques et les propriétés hydrodynamiques des sols*. Thèse de l'INP Toulouse. 177 p + annexes.
- GUIRESSE A.M., COLLAS P., BOURGEAT F., CHOSSAT J.C., 1989 - Relation entre la conductivité hydraulique de sols drainés et leurs caractéristiques pédologiques. *Science du Sol*, **27**(3), 257-279.
- GUYON G., 1981 - Hydraulique des nappes des sols drainés. *Bull. Tech. Génie Rural*, **127**, 35 p.
- GUYON G., 1983 - Le périmètre expérimental de drainage d'Arrou. Aspects hydrauliques. *Etudes du CEMAGREF*, **5**, 45 p.
- JAMAGNE M., BEGON J.C., 1984 - Les sols lessivés de la zone tempérée. Apports de la pédologie française. In : *Livre jubilaire du cinquantenaire de l'AFES*, 55-76.
- LESAFFRE B., 1989 - *Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés*. Thèse Univ. Paris VI. Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique Agricole, **4**, 334 p.
- LESAFFRE B. et LAURENT, 1983 - Valeur et durée des débits de pointe en drainage agricole en sol à pseudogley. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **69**(16), 1371-1380.
- 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., 1984-1988 - Comptes-rendus annuels du fonctionnement du réseau de drainage de Bouillac. Rapports C.A.C.G.
- ZIMMER D., 1988 - Comparaison des mesures de hauteurs de nappe par tensiomètres et piézomètres. *Milieux poreux et transferts hydriques*. *Bull. du G.F.H.N.*, **23**, 53-75.
- 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 Univ. Paris VI. Etudes du CEMAGREF, Série Hydraulique Agricole, **5**, 321 p.

