

Irrigation souterraine en limons de Bresse

R. Bouzigues (1), J.C. Favrot (1), J.C. Chossat (2), M. Khadiri (3), E. Lalanne (4)

(1) - Laboratoire de Science du Sol - Centre INRA, 2 place Viala - 34060 MONTPELLIER Cedex 01.

(2) - Division Ouvrages et Réseaux Hydrauliques - Groupement CEMAGREF de Bordeaux - B.P. 3 - 33611 GAZINET Cedex.

(3) - École Nationale du Génie-Rural des Eaux et des Forêts - B.P. 5093 - 34033 MONTPELLIER Cedex 01.

(4) - Chambre d'Agriculture de Saône et Loire - 71270 AUTHUMES.

RÉSUMÉ

Afin de vérifier, dans un luvisol redoxisol, les conséquences hydrologiques et les performances agro-techniques de l'irrigation souterraine - qui consiste à recharger une nappe par apports d'eau à l'aide d'un réseau de drains enterrés - un dispositif expérimental a été installé en 1993 dans une exploitation agricole située sur limons de Bresse. Sur le plan scientifique, à partir de l'injection d'eau dans le sol résultant de ce mode d'arrosage, l'objectif a été d'identifier et de quantifier les transferts d'eau, notamment ceux intervenant au sein des horizons argilluviaux BTg.

Pour cela, de juin à août, des relevés tensio-piézométriques pluri-journaliers et une observation périodique de profils racinaires, ont été effectués dans une parcelle de maïs, arrosée à l'aide d'un réseau de drains installé depuis 1970. Les données recueillies montrent que l'eau apportée par les drains recharge en fait - à travers les horizons argilluviaux BTg - une nappe souterraine associée à un aquifère sableux lenticulaire, apparaissant entre 150 et 250 cm de profondeur. Début juin (maïs au stade 5 feuilles), cette nappe remonte par arrosage jusqu'à 100 cm de profondeur à l'interdrain. Elle prend alors une forme concave avec une perte de charge dépassant 40 cm entre la tranchée de drainage et l'interdrain. Les remontées capillaires atteignent 30 cm à l'interdrain et réhumidifient la base de l'horizon argilluvial. Durant le mois d'août, en période de forte demande climatique, la nappe, malgré un arrosage continu, s'abaisse progressivement au delà de 130 cm de profondeur et la frange capillaire n'est plus observée ; le front racinaire du maïs situé à 80 cm de profondeur ne bénéficie plus d'une alimentation hydrique optimale. Cette recharge insuffisante de la nappe provient du débit limité d'alimentation en eau du réseau, dû au diamètre trop faible du collecteur, calibré initialement pour le seul drainage. Dans la tranchée de drainage, malgré une saturation prolongée liée à la mise en charge rapide des drains après apport d'eau, il n'y a pas de dégradation apparente de la structure du sol.

Mots clés :

Sols hydromorphe - Luvisol - Redoxisol - Limon -Bresse - Drainage - Irrigation - Recharge de nappe - Irrigation souterraine.

SUMMARY

SUBIRRIGATION : WATER FLOW AND ROOT DYNAMIC IN LOAMY SOIL (LUVISOL-REDOXISOL) OF BRESSE.

In France, the use of underground irrigation, in the form of groundwater creation or recharge by the input of water using a subsurface drain network, is relatively recent. This means of watering has been successfully tested on hydromorphic alluvial soils along the Rhône and Aude rivers, as well as in the sandy, podzolic soils of the Landes and the Médoc regions. In other countries, this technique has been widely developed, notably in the United States, since the end of the 1970's, under the term 'subirrigation', and in the polders of Holland. Nevertheless, it has not yet been experimented in luvisol-redoxisol type hydromorphic (tabl. 1 et 2) soils, widespread in France and throughout Europe. These soils, however, often drained, meet most of the conditions required for the implementation of subirrigation : flat topography, nearby water resources and permeable surface horizons. To check the feasibility of this technique, an experimental system was set up in 1993 in a farm located on Bresse silt (fig.1). The objectives, other than the technical aspects, aimed

at using the injection of water into the soils, which is characteristic of this kind of watering, to identify and quantify better the water transfers there, whether convective (percolation by preferential paths) or diffusive (capillary rises). The aim was also notably to specify the hydric behaviour of the argillic horizons by means of the rise or absence of rise of summer groundwater, comparable to that caused by the logging during the rainy season. From June to August 1993, tensiometric and piezometric (fig.2) readings were taken several times a day, and a periodic observation of root profiles was performed in a plot of maize, watered using a drain network installed since 1970. The data collected (fig.4 et 8) show that the water brought in by the drains in fact recharges - through the Btg argillic horizons - groundwater associated with a lenticular sandy aquifer, appearing between 150 and 250 cm in depth. Since June this groundwater has risen by watering to a depth of 100 cm at the mid drain (5-leaf stage maize). It then becomes concave, with a loss of head exceeding 40 cm between the drainage ditch and the mid drain. The capillary rises reach 30 cm at the mid drain and rehumidify the base of the argillic horizon. During the month of August, in the period of high climatic demand, the groundwater, despite constant watering, drops progressively below 130 cm and the capillary fringe is no longer observed; the root front of the maize, situated at a depth of 80 cm, no longer benefits from an optimal supply. This insufficient groundwater recharge thus comes from the excessively low diameter of the network main, initially sized for drainage alone. At the time of rainy periods (mid-June), the groundwater rises up to a depth of 50 cm and, paradoxically (gate closed downstream from the main), the drains nevertheless provide its lowering. In the drainage ditch, prolonged saturation related to the rapid loading of the drains after water input, failed to reveal any apparent degradation of the soil structure.

Key words: Stagnic Luvisol - Bresse - Drainage - Subirrigation - groundwater recharge.

En France, le recours à l'irrigation souterraine, sous forme de création ou de recharge d'une nappe par apports d'eau à l'aide d'un réseau de drains enterrés, est relativement récent (Chossat *et al.*, 1987 ; Chossat et Favrot, 1990). Ce mode d'arrosage a été testé avec succès en sols alluviaux hydromorphes de bordure du Rhône (Meunier, 1987 ; Procopo Burian, 1991) et de l'Aude (Chow-Toun, 1990), ainsi que dans les sols podzoliques sableux des Landes (Dupin, 1981) et du Médoc (Hargous, 1987). Ailleurs, cette technique est largement développée, notamment aux Etats-Unis depuis la fin des années 1970, sous le terme de "subirrigation" (Strickland *et al.*, 1981 ; Smith *et al.*, 1985 ; Wright et Ademsen, 1987 ; Belcher et Kittleson, 1987 ; Skaggs, 1991) et dans les polders de Hollande (Visser, 1992).

Ce mode d'arrosage n'a toutefois, pas encore été expérimenté en sols hydromorphes du type luvisol-redoxisol (AFES, 1992) ou lessivé à pseudogley (CPCS, 1967), largement répandus en France et en Europe (Jamagne et Begon, 1984). Ces sols, souvent drainés, répondent pourtant à la plupart des conditions nécessaires pour la mise en œuvre de l'irrigation souterraine : topographie plane, ressources en eau proches, horizons de surface perméables,... Pour en vérifier la faisabilité, un dispositif expérimental a été installé en 1993 dans une exploitation agricole située sur limons de Bresse. Les objectifs recherchés débordent cependant les seuls aspects techniques. Il s'agit aussi d'utiliser l'injection d'eau dans les sols, propre à ce mode d'arrosage, pour mieux identifier et quantifier les transferts d'eau, de type convectif (percolation par des chemins

préférentiels) ou diffusifs (remontées capillaires). Il s'agit notamment de préciser le comportement hydrique des horizons argilluviaux (AFES, 1992) à travers la formation ou non d'une nappe estivale, comparable à celle qui provoque l'engorgement de ce type de sols en saison pluvieuse. Cette approche complètera l'analyse des restitutions de réseaux expérimentaux de drainage utilisée également dans les mêmes sols pour caractériser les transferts dans les horizons BTg (Zimmer *et al.*, 1991).

Sur le plan technique, le but du suivi a été d'évaluer dans quelle mesure un réseau de drainage initialement conçu pour le seul rabattement d'une nappe hivernale, permettait ensuite une recharge suffisante de celle-ci en été, à la suite d'apports d'eau. La déstabilisation ou non de la structure du matériau de remplissage de la tranchée de drainage devait être vérifiée. Agronomiquement, il fallait contrôler qu'il était possible de conduire la recharge de la nappe et de réguler les remontées capillaires sus-jacentes, pour les adapter à la vitesse et à la profondeur d'enracinement d'une culture de maïs.

C'est en acquérant et en confrontant des données pédologiques, hydrologiques et agronomiques que l'on a tenté de répondre aux objectifs ci-dessus. Les démarches et les résultats de la campagne de mesures de l'été 1993 sont présentés maintenant.

MILIEU, MATÉRIEL ET MÉTHODES

Situation et caractéristiques de la parcelle expérimentale

Le site d'étude est localisé dans la petite région naturelle Bresse Chalonnaise. Celle-ci, de topographie générale plane, d'altitude 170 à 250 m, est caractérisée par un climat océanique atténué à forte influence continentale : pluviométrie moyenne annuelle de 790 mm ; température moyenne annuelle de 10,6°C. Ce climat provoque dans le sol un excès d'eau printanier une année sur trois et un excès d'eau automnal deux années sur cinq. Les besoins en eau du maïs ne sont satisfaits qu'une année sur deux, avec un déficit important une année sur cinq. En juillet, l'ETM du maïs peut dépasser parfois 5 mm/jour.

Géologiquement, la Bresse Chalonnaise appartient au fossé d'effondrement bressan qui a été comblé par des matériaux fluvio-lacustres assez hétérogènes, avec des variations de faciès latérales et verticales importantes, sous des dépôts limoneux quasi continus.

La parcelle expérimentale est située à St Martin en Bresse (Saône et Loire), à 10 km à l'est de Chalon-sur-Saône. En position sub-horizontale, elle occupe cinq hectares, semés en maïs le 8/5/93 (variété DEA). Elle est équipée d'un réseau de drains espacés de 10 m, profonds de 0,8 à 1,2 m, implantés en

1970 à l'aide d'une draineuse-trancheuse (figure 1). Le diamètre extérieur des drains est de 50 mm, ces derniers étant surmontés d'une couche de graviers de quelques centimètres d'épaisseur. Le collecteur central a un diamètre qui croît de 80 mm à 160 mm, d'amont en aval. Un regard d'alimentation permet d'apporter l'eau à l'extrémité amont. Au milieu de la parcelle, le collecteur est équipé d'un clapet qui permet de réguler le débit de l'eau lors des arrosages. A l'extrémité aval du collecteur, dans un autre regard, une vanne permet de bloquer les écoulements en période d'irrigation.

Le sol de la parcelle (tableau 1) est typique des luvisols-redoxisols largement développés régionalement. Il comprend, au sommet, des horizons Ap et Eg limoneux, poreux (activité biologique), de teinte claire, tachetés de rouille, reposant vers 50 cm sur des horizons argilo-limoneux, bariolés gris et ocre, B₁Tg, B₂Tg, BCg. La structure de ces derniers est nettement prismatique au sommet (B₁Tg, B₂Tg) avec pénétration racinaire verticale, entre les parois très peu poreuses, car comprimées, des prismes. La sous-structure est polyédrique. Vers 60-70 cm apparaît l'horizon B₂Tg qui peut être considéré comme le plancher quasi-imperméable, au sens hydraulique du terme, du fait de sa faible porosité en période humide. En profondeur, (horizon BCg) vers 100-110 cm la structure devient progressivement lamellaire, avec encore une forte diminution de la porosité. Entre 150 et 250 cm apparaît un aquifère finement sableux, à distribution spatiale lenticulaire, de couleur rosée caractéristique.

Figure 1 - Schéma du réseau de drainage.

Figure 1 - Scheme of the drainage network.

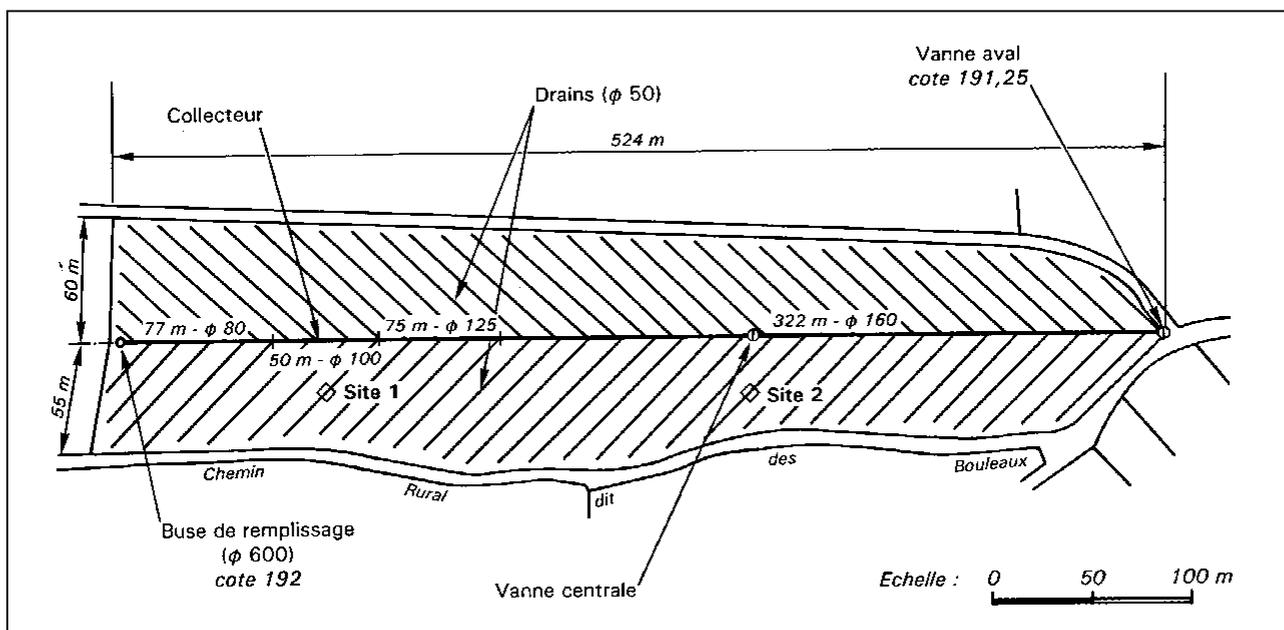


Tableau 1 - Caractéristiques physiques et physico-chimiques du sol de la parcelle étudiée.**Table 1** - Physical and chemical characteristics of soil.

Profondeur en cm	Horizon	Granulométrie %					MO %	pH eau	N total 0/00	Complexe Absorbant meg/100g					Fe total %	Mn total %	P Olsen 0/00
		SG	SF	LG	LF	A				CEC	Ca	Mg	K	Na			
0-35	Ap	1,8	19,3	29,6	34,5	14,8	1,63	6,2	0,97	7,1	6,6	0,39	0,51	0,03	1,61	0,35	0,12
35-40	Eg	1,6	16,2	27,6	34,9	19,7	0,86	6,2	0,52	7,4	6,8	0,53	0,45	0,03	1,88	0,47	0,30
50-65	B ₁ Tg	0,8	10,6	22,8	31,2	34,6	0,52	7,2	0,39	12,9	13,5	1,37	0,35	0,05	3,27	0,33	0,01
65-100	B ₂ Tg	0,6	11,2	22,3	31,3	36,6		7,0		16,2	17,5	2,47	0,23	0,12	3,11	0,18	
100-140	BCg	0,5	14,4	19,6	29,7	35,8		7,1		16,7	18,5	2,82	0,18	0,18	3,13	0,23	
140-170	C ₁ g	0,8	22,8	18,5	22,7	35,2		7,1		17,0	20,6	2,87	0,20	0,18	2,82	0,17	
170-200	C ₂ g	1,4	39,6	16,0	16,4	26,6		7,2									

Tableau 2 - Valeurs des densités apparentes sèches mesurées au site 1 dans la tranchée de drainage et dans le massif de sol adjacent, au début et à la fin de la période d'étude. Chaque valeur représente la moyenne de trois mesures (cylindre de 130,09 cm³).

Table 2 - Bulk density measurements on the site 1, in the trench and in the undisturbed soil near the trench at the beginning and the end of the studied period (each value = average of 3 measurements, for volume of the cylinder = 130,09 cm³).

Profondeur en cm	Tranchée de drainage		Sol en place	
	3/6/93	22/9/93	3/6/93	22/9/93
5-10	1,39	-	1,39	-
22-28	1,25	-		
26-31	1,39	-		
35-40	1,50	1,46	1,54	1,58
52-57	1,47	1,46		
57-62	1,47	-	1,51	1,53
62-67	1,54	-		
72-77	1,51	1,47		
80-85	-		1,61	1,65

La densité apparente du sol (tableau 2) passe de 1,3-1,4 dans l'horizon cultivé Ap, à 1,5-1,6 dans les horizons argillivieux BTg. La réserve utile en eau (R.U.) est de 165 mm pour 100 cm d'épaisseur, selon les valeurs de capacité de rétention et de point de flétrissement mesurées sur presse à plaque en laboratoire sur échantillons remaniés. Des mesures hydrodynamiques, effectuées par la méthode de l'essai de pompage de Guyon (Guyon, 1983) dans le même type de sol en Plaine Dôloise, avaient donné des valeurs de conductivité hydraulique à saturation de 0,09 à 0,14 m/j, et une valeur de porosité de drainage de 0,03 (Bouzigues et Favrot, 1978).

L'eau d'irrigation de la parcelle provient d'un forage distant de 1 200 m, profond de 32 m, au débit exploitable de 55 m³ par heure.

Protocole expérimental

Pour caractériser les transferts d'eau dans le sol, deux sites de mesures ont été installés dans la parcelle, à l'aval (site 1) et à l'amont (site 2) de la vanne centrale. Au site 1, les horizons limoneux sont légèrement plus épais (50 cm contre 40 cm) et les drains sensiblement moins profonds (85 cm contre 120 cm) qu'au site 2. Chacun des deux sites a été équipé de quatre batteries de tensiomètres à mercure et de piézomètres qui ont été implantées : sur le drain, à 1,0 m du drain, à 2,50 m du drain et à l'interdrain (5,0 m). Chaque batterie comprend quatre tensiomètres et trois piézomètres, posés à des profondeurs variant de 30 à 140 cm (figure 2). Ces appareils ont été relevés (manuellement) de trois à six fois par jour, entre le 8 juin et le 30 août 1993. Des piézomètres à enregistrement automatique (capteurs à ultra sons), de 90 cm de profondeur, ont été également installés.

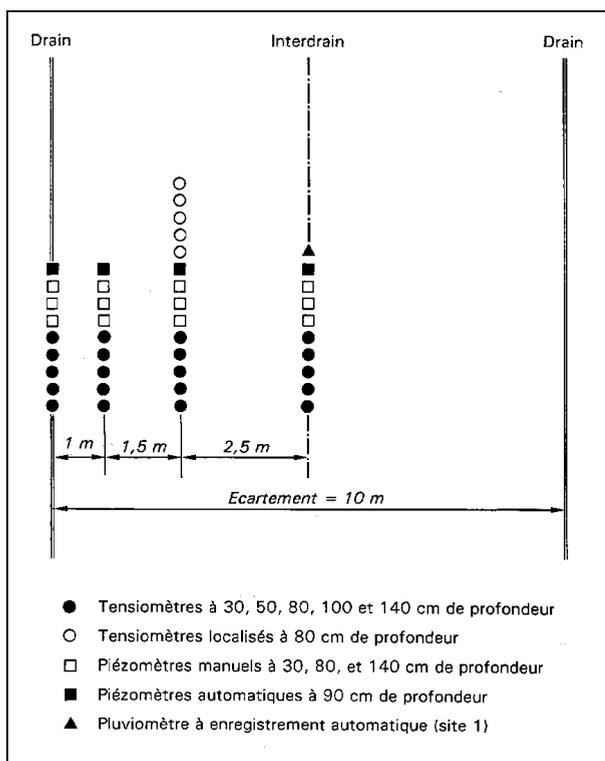
Des profils racinaires ont été observés à trois dates successives : à la floraison mâle du maïs et à deux reprises autour de la floraison femelle. Pour cela, une paroi verticale a été taillée

entre deux pieds consécutifs de maïs sur la ligne de semis, et perpendiculairement aux quatre lignes d'un même passage de semoir. L'observation consiste à compter la présence de racines (avec trois options : 0 = absence, 1 = 1 racine, 2 = 2 racines ou +) au sein de mailles de 2,2 cm d'une grille appliquée contre la paroi verticale, préalablement rafraîchie au couteau. Les points d'observation sont choisis dans une station au peuplement homogène, de 25 m x 25 m de cotés, autour des sites 1 et 2. Un écart minimum de trois mètres est respecté entre ces points, et également avec les placettes réservées aux mesures des composantes du rendement (nombre de pieds levés/ha, nombre d'épis/ha, nombre de rangs/épi, nombre de grains/épi et poids de mille grains). Sur chaque station, ces placettes, au nombre de quatre, représentent chacune 1/1000° d'hectares et sont disposées en diagonale sur les lignes du même passage de semoir.

Des suivis tensio-piézométriques et agronomiques comparables ont été réalisés dans une parcelle adjacente, drainée (écartement : 10 m) et irriguée par aspersion (trois arrosages de 40 mm en août 1993).

Figure 2 - Dispositif piézo-tensiométrique des sites 1 et 2.

Figure 2 - Schematic of piezometry and tensiometry devices on sites 1 and 2.



Pour estimer l'évolution de la structure et de la porosité du sol dans la tranchée de drainage, des mesures de densité apparente (méthode du cylindre) et des observations morphologiques ont été effectuées sur des profils ouverts début juin et à la mi-septembre 1993.

Les hauteurs de pluie ayant affecté la parcelle étudiée ont été mesurées à l'aide d'un pluviomètre installé au site 1. Durant la période d'observation, il est tombé 149 mm. Un bilan hydrique climatique a été établi pour cette même période (figure 3). A noter que des cycles d'irrigation souterraine avaient déjà été effectués en 1972 puis en 1992 dans la parcelle expérimentale.

Les volumes d'eau apportés à chaque arrosage ont été comptabilisés grâce à un compteur débit métrique placé sur la conduite d'amenée. Au total, compte tenu des précipitations assez abondantes des mois de juin et de juillet, trois cycles d'arrosage par drains enterrés ont été suivis : du 8 au 13 juin (155 m³/ha au total), du 17 au 23 juillet (247 m³/ha), du 26 juillet au 26 août (1042 m³/ha). Le débit maximal d'injection d'eau dans les drains, par suite du diamètre limité du collecteur à l'amont, n'a été que de 8 m³/h, soit 3,84 mm/jour en pleine phase d'irrigation (figure 3).

RÉSULTATS

Seront abordés successivement dans ce chapitre les résultats concernant la métrologie utilisée, les suivis hydrologiques, les observations sur les tranchées de drainage et la dynamique de l'enracinement du maïs.

Comparaison entre données piézométriques et tensiométriques

Les valeurs de profondeur de nappe en un point et à un instant donnés, déduites de relevés piézométriques et tensiométriques, ne sont pas toujours rigoureusement concordantes, compte tenu des milieux et des conditions de mesures (Bouma *et al*, 1980 ; Zimmer, 1989). Une vérification de cette variabilité éventuelle a donc été effectuée sur la parcelle expérimentale.

La confrontation des relevés de tensiètres et de piézomètres effectués sur un même site a révélé alors une bonne concordance d'ensemble pour l'évaluation de la profondeur de la nappe. En particulier, lorsque la remontée de la nappe est provoquée par l'irrigation souterraine, à l'interdrain et sur le drain, le décalage est faible, de l'ordre de quelques centimètres (figure 4) entre données tensiométriques et piézométriques.

Par ailleurs, pour vérifier la variabilité à courte distance des données tensiométriques, une batterie de cinq tensiètres distants de quelques décimètres a été implantée à 80 cm de profondeur, au sein de l'horizon argilluvial BTg, dans chacun des sites 1 et 2 (figure 2). Comme précédemment, alors que les écarts sont très faibles à la suite d'une irrigation souterrai-

Figure 3 -Précipitations (P), apports d'eau d'irrigation (I) et bilan climatique cumulé (BC) en mm. BC = ETP (évapotranspiration potentielle) - (P + I).

Figure 3 - Rainfall, irrigation water supply and PET during the studied period.

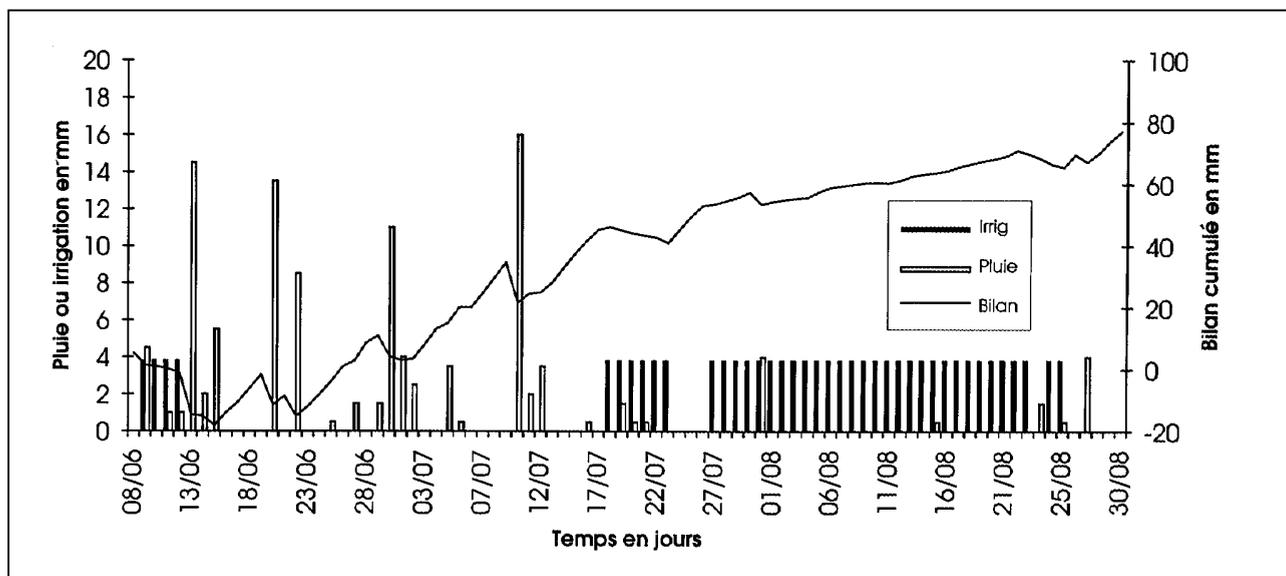
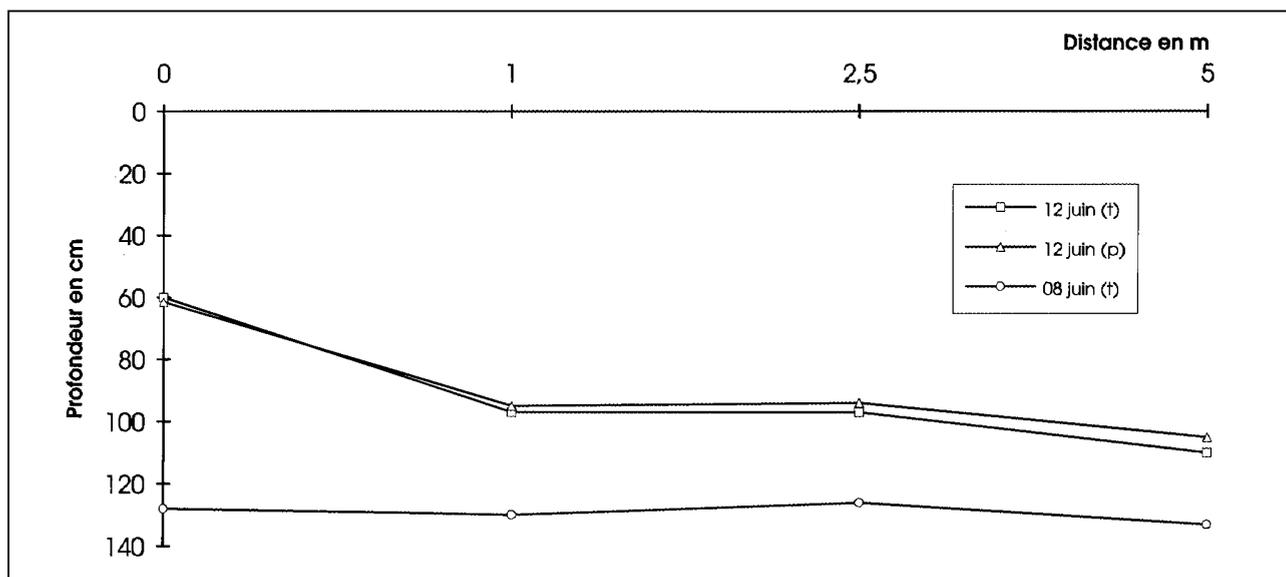


Figure 4 - Évolution du niveau de la nappe mesurée par piézométrie (p) et par tensiométrie (t), selon la séquence drain-interdrain, lors du premier arrosage.

Figure 4 - Piezometric and tensiometric measurements of the water level movement according to the transect drain-middrain during the first period of irrigation.



ne, des différences temporaires de -10 à -15 mb sont observées entre tensiomètres à la suite d'une pluie.

Par la suite, les profondeurs de nappe indiquées seront déduites des données tensiométriques, plus sensibles aux mouvements instantanés de l'eau dans le sol.

Cinétique de la nappe

Pour simplifier la présentation des résultats, seules les données acquises au site 1, le plus représentatif du contexte pédologique et hydrologique régional, seront exposées (figures 3 à 8).

Au cours de la période étudiée, en fonction du cycle végétatif du maïs et des conditions climatiques, trois phases principales ont été distinguées (figure 3) :

ζ la première, du 8 au 13 juin, marquée par une faible demande climatique du maïs, est celle du premier cycle d'arrosage par les drains,

ζ la seconde, du 14 juin au 15 juillet correspond à une succession d'épisodes pluvieux rapprochés,

ζ la troisième, enfin, coïncide avec une période très sèche au cours de laquelle l'irrigation souterraine a été menée pratiquement en continu du 17 juillet au 26 août.

Les résultats des suivis tensiométriques vont être présentés maintenant, en fonction de ces trois phases.

Premier cycle d'arrosage

Avant la mise en œuvre du premier arrosage, les relevés (figure 4) montrent que la nappe se situait vers 130 cm de profondeur, avec un profil drain-interdrain quasi horizontal.

La mise en eau provoqua alors une nette remontée de cette nappe, avec une cinétique contrastée entre le matériau remanié de la tranchée de drainage et le sol en place : alors qu'au dessus du drain la nappe remonte très rapidement de 130 à 75 cm de profondeur (vitesse de 50 cm/jour), puis plus lentement de 75 à 60 cm (6 cm/jour), à l'interdrain la nappe ne remonta que de 130 à 105 cm, avec une vitesse initiale de 21 cm/jour et une vitesse finale de 4 cm/jour.

La forme de la nappe rechargée est nettement concave, avec notamment une forte perte de charge (40 cm) constatée dès le premier mètre à partir de la tranchée de drainage (figure 4). Entre 1 m et 5 m (interdrain) la perte de charge n'est plus que de quelques centimètres.

Phase pluvieuse

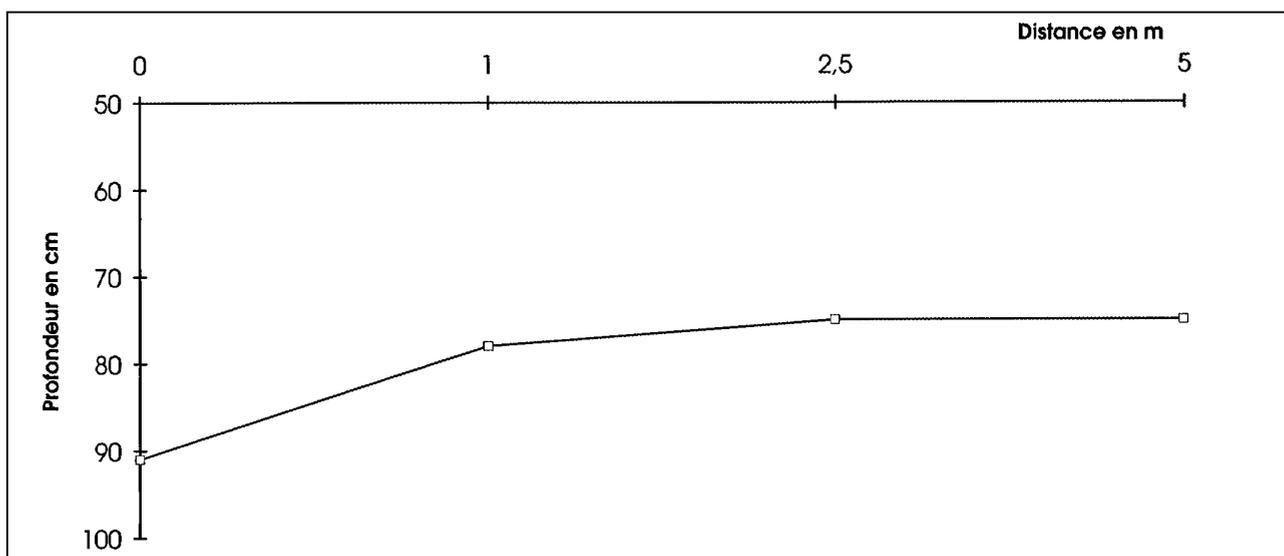
Lors des fortes précipitations de juin et juillet 1993, la nappe a pris une forme convexe totalement inversée par rapport à celle obtenue lors de la phase de remontée acquise à la suite de l'irrigation (figure 5). Durant la première décade de juillet, le sommet de la nappe a subi des fluctuations nombreuses et rapides à l'interdrain. Les vitesses de remontées ou de rabattement de la nappe, entre 70 et 105 cm de profondeur, ont été de l'ordre de 20 à 30 cm/jour.

Phase de forte demande climatique

Au cours de l'irrigation souterraine continue, et notamment entre le 27 juillet et le 27 août, la cinétique de la nappe a présenté certaines analogies avec celle observée lors du premier arrosage, la remontée étant en particulier

Figure 5 - Forme de la nappe selon la séquence drain-interdrain après les pluies du 29/06 au 30/07/93 (tensiométrie).

Figure 5 - Water table shape according to the transect drain-middrain during rainfall period from 29th June to 3rd July.



toujours nettement plus importante au dessus du drain qu'à l'interdrain.

Toutefois, durant cette période sèche, l'ampleur de la recharge a été beaucoup plus faible. En effet, à l'interdrain, le niveau de la nappe n'est remonté qu'à 120 cm de profondeur, pour redescendre ensuite progressivement à 140 cm. A la verticale du drain, la saturation du sol n'a été maintenue que jusqu'à 95-100 cm de profondeur.

Remontées capillaires

Grâce aux profils tensiométriques, il a été possible de suivre l'évolution des remontées capillaires au cours des deux phases climatiques sèches.

Premier arrosage

Lors de la période du 8 au 13 juin, à l'interdrain (figure 6), seul le tensiomètre situé à 140 cm de profondeur a affiché des pressions positives (chiffre de la pression observé sur le tensiomètre supérieur à la profondeur de ce dernier), traduisant la présence de la nappe dont le sommet se situait vers 105 cm. Les tensiomètres moins profonds ont révélé des pressions négatives matérialisant un milieu non saturé. Toutefois, alors que le potentiel total des tensiomètres posés à 30 et 50 cm décroît avec le temps, pour les tensiomètres situés à 80 et 100 cm, l'évolution des pressions a été très comparable à celle constatée pour le ten-

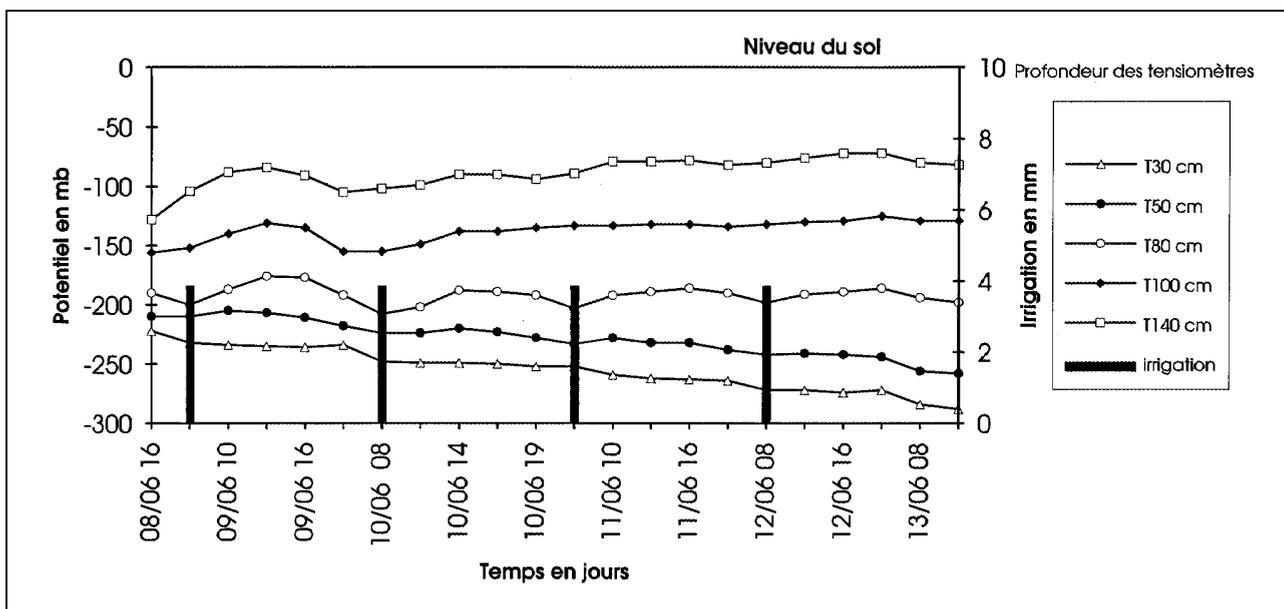
sionmètre 140 (courbes parallèles). A ces deux profondeurs, avec des valeurs voisines de -150 et -180 mb, les potentiels mesurés sont restés constants ou ne se sont élevés que très légèrement durant la période d'apport d'eau. Cette évolution concomitante traduit l'existence d'une frange capillaire qui, pour une profondeur de la nappe de 105 cm, a dépassé 25-30 cm de hauteur.

Période sèche

Malgré un apport d'eau continu dans le sol à partir du 26 juillet, on a constaté un abaissement progressif du potentiel total des tensiomètres, ordonné selon la profondeur. Ainsi à l'interdrain (figure 7), le tensiomètre posé à 30 cm a décroché le premier lorsque le potentiel s'est abaissé au dessous de -800 mb. Ensuite, ont décroché successivement les tensiomètres installés à 50, 80 et 100 cm. En revanche, le tensiomètre situé à 140 cm a affiché toujours des pressions positives malgré un léger abaissement du potentiel total, synchrone du rabattement de la nappe. L'évolution ordonnée des tensiomètres supérieurs a donc résulté de l'épuisement progressif, de haut en bas du profil, des réserves en eau du sol. Le faible abaissement du potentiel à 140 cm de profondeur a traduit un transfert ascendant de l'eau par diffusion capillaire vers le système racinaire du maïs. Ces mouvements ascensionnels sont confirmés par le gradient vertical négatif de potentiel total constaté durant toute la période entre les tensiomètres situés à 100 et 140 cm de profondeur.

Figure 6 - Évolution du potentiel total à l'interdrain, durant la première irrigation.

Figure 6 - Middrain total potential variation during the first period of irrigation.



Saturation et stabilité structurale dans la tranchée de drainage

Les relevés tensiométriques effectués dans la tranchée de drainage du site 2 (drain à 120 cm) ont montré que durant les 37 jours d'arrosage, les matériaux de remplissage de la tranchée de drainage (graviers au contact des drains et sol remanié) ont été constamment saturés entre 100 et 120 cm de profondeur. Au site 1, où le drain est moins profond (85 cm), il y a eu saturation permanente pendant une dizaine de jours sur plusieurs cm d'épaisseur au dessus du drain.

Malgré ces durées, qui excèdent largement le seuil de tolérance pris en compte pour le dimensionnement des réseaux de drainage (de l'ordre de 48 h/an), les examens morphologiques visuels, effectués avant et après la période de suivi hydrologique, n'ont pas relevé de colmatage de pores dans le matériau terreux, ni d'aggravation de la contamination argileuse du remblai graveleux. D'autre part, les valeurs de densité apparente (tableau 2) sont restées les mêmes, avant et après irrigation. Elles correspondent à une porosité totale de 42 à 45 % en dessous de l'horizon labouré. Dans le sol en place adjacent, la porosité totale passe de 42-43 % dans l'horizon BTg à 38-39 % dans l'horizon BCg.

Ce même constat a été fait dans des sols alluviaux hydromorphes de texture comparable (Meunier, 1987 ; Visser, 1992).

A l'intérieur des drains, un dépôt argilo-limoneux de 1,6 cm d'épaisseur au site 1 et de 0,7 cm au site 2 a été observé, sans variation significative d'épaisseur après irrigation. Ce dépôt était absent dans d'autres drains de la parcelle.

Cinétique d'enracinement et composantes du rendement du maïs

Le tableau 3 montre l'évolution dans le temps des profondeurs maximale et moyenne d'enracinement (densité racinaire supérieure à 5 %) du maïs arrosé : après un accroissement rapide, cette profondeur augmente peu au delà de la floraison femelle et se situe alors autour de 80 cm au site 1. Par ailleurs, la profondeur d'apparition, sous les pieds de maïs, de zones vides de racines sur 20 cm de largeur - révélatrice de la répartition spatiale de la colonisation racinaire - varie de 70 cm au site 1 à 62 cm au site 2. Dans les deux sites, il y a donc colonisation partielle de l'horizon argilluvial B₂Tg.

Concernant les valeurs des composantes du rendement (tableau 4), il apparaît que la valeur de 3500 grains par m² - qui est considérée comme optimale dans le milieu régional - a été dépassée alors que le poids de mille grains est très en dessous de l'optimum de la variété DEA qui est située à 300 g dans le contexte régional.

Figure 7 - Évolution du potentiel total à l'interdrain, en phase de forte demande climatique, lors de l'irrigation souterraine.

Figure 7 - Subirrigation period : middrain total potential variation during a high-rate PET period.

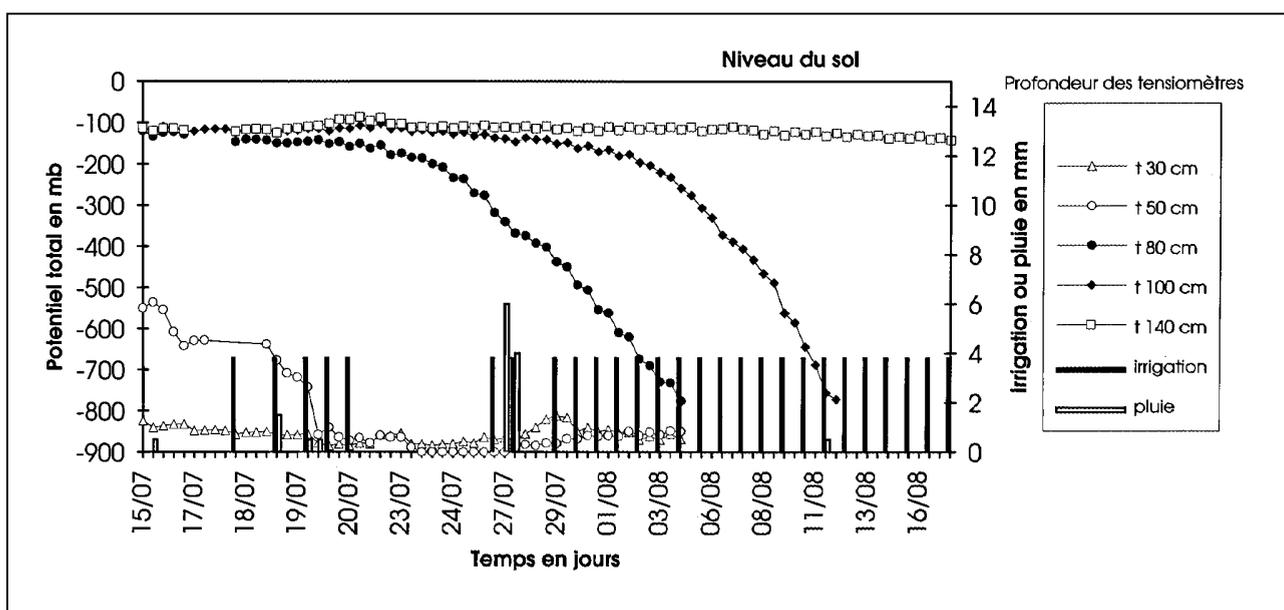


Tableau 3 - Caractéristiques de l'enracinement du maïs au site 1, à trois dates successives**Table 3** - Root zone characteristics near the site 1 at three successive dates.

Date	1 ^{er} juillet 1993			13 juillet 1993			22 juillet 1993		
Stade végétatif	panicule male sensible			début floraison			3j post floraison femelle (Flo. Fem. + 35°.base 6°C)		
Taille des plantes	2,10 m			2,50			> 2,70 cm		
Densité racinaire	% cases avec			% cases avec			% cases avec		
Profondeur	0 racine	1 r.	2 r.	0 racine	1 r.	2 r.	0 racine	1 r.	2 r.
de 0 à 31 cm	66	15	19						
de 31 à 45 cm	86	8	6	75	15	10	77	17,5	5,5
de 45 à 55 cm	97,5	2	0,5	92,5	4,5	3	81,5	15	3,5
de 55 à 68 cm				95	4	1	85,5	12	2,5
de 68 à 79 cm							91,5	8	0,5
Racine la plus profonde	53 cm			70 cm			>79 cm		
Profondeur d'apparition d'une densité racinaire supérieure à 5%	48 cm			64 cm			> 79 cm		
Profondeur d'apparition d'une densité racinaire supérieure à 10%	40 cm			44 cm			66 cm		

Tableau 4 - Composantes du rendement du maïs relevées sur des placettes proches des sites 1 et 2.**Table 4** - Corn yield components on plots near the site 1 and 2.

	pieds levés 10 ³ ha ⁻¹	épis/ m ²	rangs/ épi	grains/ épi	grains/ rang	grains/ m ²	PMG à 15%	Rendement à 15%	humidité moyenne %
Site 1	109,0	103,5	13,0	340	26,1	3518	257,3	90,5	35,6
Site 2	110,2	108,5	13,1	353	26,9	3828	236,1	90,4	30,8

PMG à 15% : poids de mille grains à 15% d'humidité

DISCUSSION

Effets des horizons argilluviaux sur les transferts hydriques

L'interprétation des données hydrologiques conduit à plusieurs constats.

Le premier est que l'apport d'eau dans le sol en période estivale ne se traduit pas par la création d'une nappe perchée mais par la recharge et la remontée de la nappe contenue dans les matériaux sableux apparaissant entre 150 et 250 cm de profondeur. La conductivité hydraulique des horizons BTg et BCg est en effet suffisante pour cela, comme le montre la vitesse de remontée de la nappe entre 140 et 80 cm qui peut atteindre 20 cm/jour. L'horizon B2Tg ne constitue donc pas un niveau strictement imperméable comme le laisseraient supposer les observations de sa porosité apparente. De telles possibilités d'oscillation d'une nappe au sein des horizons argilluviaux avaient déjà été constatées dans des luvisols - redoxisols du Faux Perche et des terrasses de la Garonne, avec des nuances liées aux faciès structuraux de ces horizons (Zimmer *et al*, 1991).

Le second constat a trait aux résultats des piézomètres automatiques (relevés à pas de temps horaire) obtenus durant

la période de pluies (14 juin - 15 juillet). Ces derniers ne mettent pas non plus en évidence de formation d'une nappe perchée au sommet de l'horizon B₂Tg.

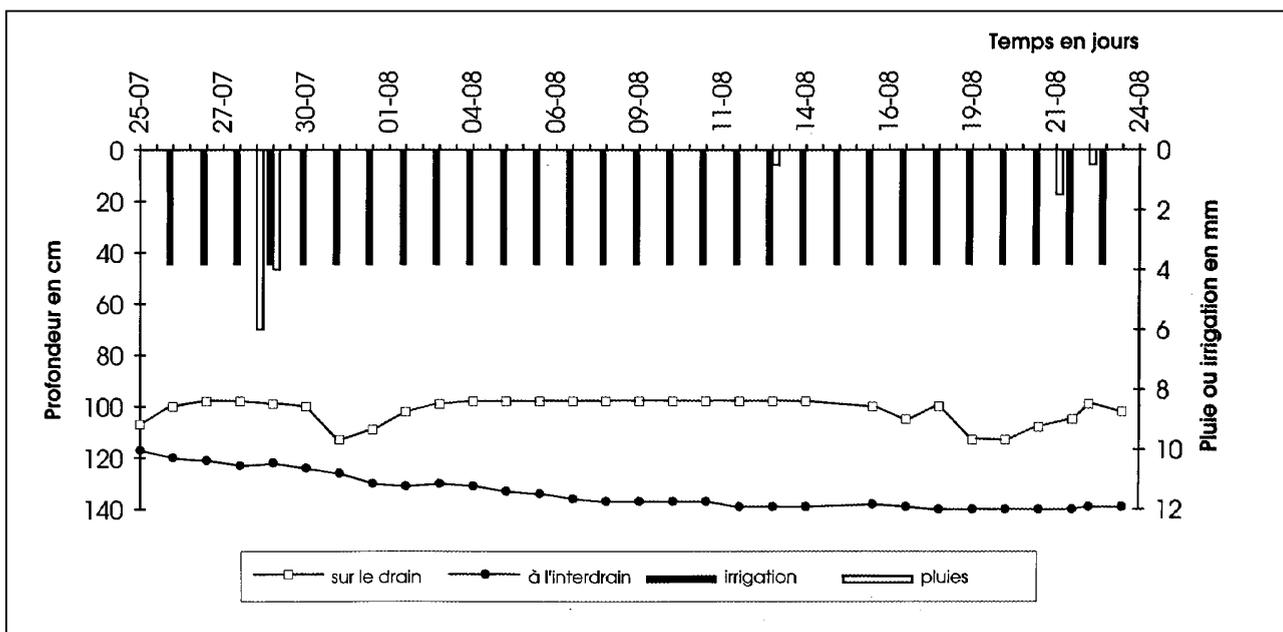
Le troisième constat, est, qu'en période humide comme lors des irrigations par les drains, il y a continuité hydraulique entre les couches de surface saturées et les couches profondes occupées initialement par la nappe souterraine. Comme en période d'irrigation, malgré une charge hydraulique accrue, un équilibre hydrostatique est constaté dans cette nappe ; le même potentiel tensiométrique étant en effet noté sur les divers tensiomètres. Ceci traduit aussi l'absence d'infiltrations profondes.

Le quatrième constat concerne l'existence de transferts hydriques en milieu non saturé. Ces transferts se traduisent soit par la frange capillaire de 25 à 30 cm d'épaisseur constatée lors du premier arrosage, soit par des mouvements diffusifs ascensionnels mis en évidence lors de la période très sèche. Cette ascension capillaire apparaît entre le front racinaire située à 80 cm de profondeur et le sommet de la nappe, lequel s'abaisse progressivement de 120 à 140 cm de profondeur au cours du mois d'août (figure 8).

Le dernier constat est que la structure des horizons argilluviaux explique la double possibilité de transferts convectifs et diffusifs (Bouzigues et Favrot, 1984). En effet, les premiers

Figure 8 - Évolution de la profondeur de la nappe, sur le drain et à l'interdrain, en phase de forte demande climatique.

Figure 8 - Water level variation on the drain and middrain during a high-rate PET period.



sont autorisés par les vides fissuraux et biologiques (lombrics, racines), même très modestes, existant à l'interface des blocs structuraux prismatique. Les seconds sont rendus possibles par la microporosité constatée au sein des prismes, microporosité également d'origine biologique (radicelles) et physique, celle-ci étant liée à l'ajustement fort des polyèdres constituant la sous-structure. La réalité des transferts convectifs peut être déduite notamment des écarts, de l'ordre de 10 à 15 mb, relevés entre tensiomètres de même profondeur (80 cm) lors des pluies, écarts s'expliquant par la localisation de tensiomètres à la fois au centre des unités structurales prismatiques et à leurs interfaces, lesquelles constituent les zones de transferts préférentiels. Le même phénomène a été signalé par Bouma *et al* (1980) en sols argileux.

Pérennité de la tranchée de drainage

L'un des risques importants pouvant découler de l'irrigation souterraine en luvisol-redoxisol est la déstabilisation de la structure des matériaux de remplissage de la tranchée de drainage, avec diminution de la porosité, par suite de leur saturation prolongée. Les valeurs relativement élevées des indices d'instabilité structurale (tests Henin) constatées dans ces sols vont dans ce sens (log 10 Is # 1,3-1,5).

Toutefois, malgré les cycles d'arrosage opérés en 1970, 1992 puis 1993, nos observations et mesures de 1993 n'ont pas révélé d'altérations structurales et porales visibles. Des observations périodiques sont néanmoins nécessaires pour confirmer ce premier constat favorable. Trouche (1981) constate toutefois, en laboratoire, que malgré un tassement progressif du matériau de remplissage de la tranchée après des phases périodiques de saturation, il n'y a pas de modification significative du débit du drain par rapport à une tranchée non soumise à une saturation prolongée.

Concernant le colmatage minéral interne des drains, les cycles d'irrigation souterraine ne semblent pas aggraver ce phénomène. En fait, dans la parcelle étudiée, compte tenu de la grande variabilité de l'épaisseur des dépôts constatée d'un drain à l'autre, il semble bien que le colmatage soit attribuable à la technique de pose des drains utilisée en 1970 (guidage par nivelettes), technique conduisant à une certaine irrégularité de la profondeur des drains. La technologie actuelle (guidage laser) limite heureusement les imperfections de pose et les éventuels risques de colmatages en luvisol-redoxisol et évite donc les inconvénients liés à ce phénomène (accroissement des pertes de charge et réduction de la section efficace).

Recharge de la nappe et dynamique racinaire.

Techniquement, l'objectif de l'irrigation à partir de drains enterrés est d'adapter la recharge de la nappe à l'abaissement progressif puis à la stabilisation du front racinaire du maïs, compte tenu de l'importance des remontées capillaires. Il s'agit

en particulier d'assurer une alimentation hydrique optimale lors de la levée puis de la floraison mâle du maïs.

En 1993, par suite des épisodes pluvieux, cet objectif a été pratiquement atteint. En effet, le système racinaire du maïs, descendu progressivement à 80 cm de profondeur a partiellement colonisé les horizons argilluviaux B₁Tg et B₂Tg et a coïncidé à la floraison avec une profondeur de nappe pas trop élevée. De même, lors du premier arrosage, le front racinaire peu profond (moins de 50 cm) a pu bénéficier néanmoins d'une alimentation hydrique suffisante, grâce à la frange capillaire importante (25-30 cm) surmontant la nappe et aux flux ascensionnels susjacentes, révélés par l'existence d'un gradient et potentiel vertical négatif.

Cependant, l'abaissement progressif du sommet de la nappe à partir de la mi-juillet n'a pas permis une alimentation hydrique optimale. Il montre que malgré des apports d'eau continus, certaines périodes ou années très sèches, il ne sera pas possible de remonter la nappe à une hauteur compatible avec une faible profondeur d'enracinement. Cette impossibilité est ici conjoncturelle car liée au dimensionnement insuffisant de la partie du réseau étudié, lequel limite le débit d'injection d'eau à 38 m³/ha/jour.

Modes d'irrigation et rendement du maïs

Par rapport à la parcelle adjacente arrosée par aspersion, les volumes d'eau mis en jeu pour l'irrigation souterraine sont supérieurs : 1 440 m³/ha contre 1 200 m³/ha. La comparaison des rendements bruts n'est toutefois pas possible à cause d'un écart de semis de 18 jours et surtout d'une phytotoxicité accidentelle de désherbage.

L'analyse des composantes du rendement montre que si le nombre de grains par mètre carré, élevé, indique que l'alimentation en eau du maïs a été bien assurée dans la parcelle subirriguée jusqu'au seuil d'avortement des grains (200° en base 6°C post floraison femelle) intervenu le 3 août 1993, en revanche, le poids de mille grains est très en dessous de l'optimum de la variété DEA. Ce dernier constat traduit un déficit d'alimentation hydrique du maïs à partir de début août et un écart important du régime d'alimentation en eau entre les phases floraison et remplissage des grains. Alors que le potentiel de rendement se situait à la floraison à 110 qx/ha, l'alimentation hydrique incomplète en fin de cycle, due au débit d'apport d'eau insuffisant, a limité le rendement final à 90 qx/ha.

Conception des réseaux

A l'image du réseau étudié, le dimensionnement actuel des anciens réseaux de drainage ne garantit pas une alimentation hydrique suffisante du maïs, par irrigation souterraine, lors de périodes très sèches. Pour remédier à cela, deux modes d'action sont à envisager :

ζ pour les réseaux en place, il conviendra de réaménager les dispositifs existants, soit en installant plusieurs regards

d'alimentation en eau le long des collecteurs principaux, soit en reliant les extrémités amont des drains à de gros collecteurs de ceinture ;

ζ pour de nouveaux réseaux, il faudra prévoir dès la conception des regards d'alimentation et un dimensionnement des collecteurs adaptés à la double fonction d'irrigation et de drainage. En l'absence de démonstration contraire, il apparaît prudent de recourir à un remblai poreux (graviers) au dessus des drains.

Concernant le diamètre extérieur de ces derniers, certains auteurs préconisent des valeurs plus élevées que 50 mm, pour réduire les pertes de charge qu'ils attribuent à une superficie linéaire insuffisante des perforations, augmentant la résistance de sortie de l'eau des drains (Bounival *et al*, 1987 ; Mohamad et Skaggs, 1984). La rapide remontée de l'eau de saturation dans les tranchées de drainage après apport d'eau nous permet de penser qu'en luvisol redoxisol le diamètre habituel (50 mm) sera suffisant.

CONCLUSION

Dans les luvisols redoxisols de Bresse, l'irrigation souterraine à l'aide de réseaux de drains posés à la draineuse trancheuse est possible techniquement. Elle repose sur la recharge d'une nappe souterraine associée à un aquifère sableux et bénéficie de la structure favorable des horizons argilluviaux qui autorisent à la fois une ascension rapide de la nappe et des remontées capillaires.

Moyennant des adaptations des réseaux en place ou des nouveaux, ce mode d'arrosage peut s'avérer intéressant au plan régional. Par rapport à l'irrigation par aspersion, il compense des exigences en eau sensiblement plus élevées par de moindres frais d'investissement (le drainage est de toutes façons nécessaire) et de main d'œuvre. En outre, la portance des sols pour les interventions culturales n'est pas affectée par les cycles d'arrosage. Enfin, cette technique limite les risques de pollution des nappes par entraînement des nitrates et pesticides (Kalita *et al*, 1992).

Néanmoins, en vue d'une meilleure conception et d'une conduite optimale de réseaux à la double fonction d'irrigation et de drainage, des travaux expérimentaux sont à poursuivre lors des années qui viennent, dans aux moins trois directions :

ζ la réalisation d'essais au champ avec des réseaux posés à la draineuse trancheuse garantissant des apports d'eau suffisants pour remonter la nappe à une profondeur adaptée à l'alimentation en eau des racines et - si nécessaire - jusque vers la surface du sol,

ζ la réalisation d'essais au champ avec des réseaux posés à la draineuse sous-soleuse et sans remblai poreux, technique la plus répandue actuellement,

ζ et l'adaptation de modèles tels que SIDRA (Lessaffre, 1988 ; Zimmer, 1992), Drainmod (Tang et Skaggs, 1977 ; Skaggs, 1991) et Swadre (Van Bakel, 1973), facilitant une généralisation de la conception et de la mise en œuvre de cette technique dans d'autres régions françaises.

BIBLIOGRAPHIE

- A.F.E.S., (1992) : Référentiel pédologique. Ouvrage collectif. INRA éditeur Paris, 222 p.
- Belcher H.W., Kittleson (1987) : Regional approach to subirrigation planning. ASAE paper n° 87 - XXXX. 1987 International Winter Meeting of the ASAE.
- Bouma J., Dekker L.W., Haans J.C.F.M., (1980). Measurement of depth to water table in heavy clay soil. Soil Science Vol. 130, 5, 264-270.
- Bounival P., Prasher S., Von Hoyningen Huene B. and Broughton R.S. (1987) : Measurements of head losses in a subirrigation system. Transactions of the ASAE, v. 30, (1). 183-186.
- Bouzigues R., Favrot J.C. (1978) : Étude pédologique dans la plaine dôloise (Jura). INRA Montpellier n° 333, rapport 217 p.
- Bouzigues R., Favrot J.C. (1984) : Analyse morphologique de la porosité des horizons Bg de deux sols lessivés à pseudogley. Actes du colloque AFES "fonctionnement hydrique et comportement des sols" Dijon. INRA Dijon, 41-54.
- Chossat J.C., Favrot J.C., Meunier M., Tiercelin J.R. (1987) : L'irrigation par drains enterrés : résultats d'expérimentations et perspectives. Drainage. Revue du Syndicat National des Entreprises de Drainage, deuxième semestre, n° 32, 3-9.
- Chossat J.C., Favrot J.C. (1990) : Subirrigation : Control of water table level and effect on drainage system. Actes Sympos. on Land Drainage for salinity control in Arid and Sem. Arid Regions. IIRD. le Caire, 126-136.
- Chow-Toun F. (1990) : Étude de la dynamique de l'eau et des sels dans deux parcelles adjacentes de la basse plaine de l'Aude, près de Narbonne, lors de l'irrigation à partir de réseaux de drains enterrés. Rapport de Stage, INRA. Montpellier, 46 p.
- C.P.C.S., (1967) : Classification des Sols. Ouvrage collectif, 87 p.
- Dupin M. (1981) : Irrigation par le réseau de drainage, une expérimentation dans les Landes. Drainage. Revue semestrielle du Syndicat National Professionnel des Entrepreneurs de Travaux de Drainage, premier semestre, n° 22, 9-11.
- Guyon G., (1983) : Le périmètre expérimental de drainage d'Arrou. Aspects hydrauliques. Étude du CEMAGREF, 5, 45 p.
- Hargous S. (1987) : Approche d'un système d'irrigation par drains enterrés en sol sableux. DEA Science et Technique de l'eau. Université Louis Pasteur, STRASBOURG, 81 p.
- Jamagne M., Begon J.C. (1984) : Les sols lessivés de la zone tempérée. Apport de la pédologie française. Livre jubilaire du Cinquantenaire. AFES. 55-76.
- Kalita D.K., Kanwar R.S., Melvin S.W. (1992) : Subirrigation and controlled Drainage: Management Tools for Reducing Environmental Impacts of Nonpoint source Proceed. of the 6th intern. Drainage symposium. Nashville - UJA. ASAE, 129-136.
- Lessaffre B. (1988) : Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés. Thèse université PARIS VI, n° 4., Collection Études du CEMAGREF. Série Hydraulique agricole, 334 p.
- Meunier M. (1987) : Étude du fonctionnement d'un système d'irrigation par un réseau de drains enterrés. Mémoire de DAA, INRA. Montpellier, 58 p.

- Mohammad F.S., Skaggs R.W. (1984) : Effect of Drain Tube Openings on Drainage and Subirrigation. Transactions of the ASAE, vol.27(5), 1455-1462.
- Procopo-Burian G. (1991) : Contribution à l'étude de l'irrigation par drains enterrés. Mémoire de DEA National d'hydrologie, INRA, ENGREF et USTL. Montpellier, 59p.
- Skaggs R.W. (1991) : Modeling Water Table Response to Subirrigation and Drainage : Transactions of the ASAE, vol. 34(1), 169-175.
- Smith M.C., Skaggs R.W., Parsons J.E. (1985) : Subirrigation System Control for Water use Efficiency. Transactions of the ASAE, vol. 28(2), p. 489-496.
- Strickland E.E., Ligon J.T., Doty C.W., Wilson T.V. (1981) : Water and energy requirements for subsurface and center pivot irrigation. ASAE Paper n° 81-1062, ASAE, St Joseph, M, 49085.
- Trouche G. (1981) : Aspects agronomiques et hydrodynamiques du drainage de sols à profil différencié du Val de Saône. Mém. Thèse Docteur. Ing. Univ. Dijon. 201 p.
- Tang Y.K., Skaggs R.W. (1977) : Experimental evaluation of theoretical solutions for subsurface drainage and irrigation. Water resources research, v. 13(6), 957-967.
- Van Bakel et al. (1973). Dynamic simulation of automated subsurface irrigation systems. Transactions of the ASAE, v. 16(6), 1095-1099.
- Visser J., (1992). Some Results of a 12 years Experiment with Different Subirrigation levels in a Young Marine Clay Soil in the Ijsselmeerpolders in the Netherlands. Proceed. of the 6th intern. drainage Symposium. Nashville. USA. ASAE, 474-483.
- Wright F.S., Ademsen F.J. (1987) : Peanut and corn yield response to water table level. ASAE Paper n°,87-2550, 1987 International Winter Meeting of the ASAE. 9p.
- Zimmer D. (1989) : Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schéma d'écoulement,. Thèse Uni. Paris VI. Études du CEMAGREF. Série Hydraul. Agric., 5, 327 p.
- Zimmer D., 1992. Effect of Deep Seepage on Drainage Functioning and Design in Shallow Soils. Proceed of the 6th Internat. Drainage Symposium. Nashville USA-ASAE 272-279.
- Zimmer D., Bouzigues R., Chossat J.C., Favrot J.C. et Guirese A.M. (1991) : Importance et déterminisme des infiltrations profondes en luvisols-redoxisols drainés. Incidence sur les modalités de drainage. Science du sol. Vol. 29(4), 321-327.

PUBLICATIONS ET DOCUMENTS PUBLIÉS PAR L'AFES

REVUES

SCIENCE DU SOL

Revue scientifique disponible de 1952 à 1993.

Elle comporte 300 à 400 pages par an. Un index est présenté tous les ans dans le quatrième numéro.

A cessé de paraître fin 1993. Disponible.

LA LETTRE DE L'ASSOCIATION

Publiée quatre fois par an, ce journal annonce les nouvelles de l'association, les réunions nationales et internationales ; il donne des critiques d'ouvrages, de thèses, de la documentation, etc.

La Lettre est envoyée à chaque adhérent de l'association : elle accompagne l'adhésion.

Rédacteur en chef : J.P. Rossignol, ENITH Angers.

ETUDE ET GESTION DES SOLS

Nouvelle revue trimestrielle, francophone traitant de la connaissance et de l'usage des sols ; création en juillet 1994.

Rédacteur en chef : M. Jamagne.

Secrétariat de rédaction : Micheline Eimberck et J.P. Rossignol.

Le Comité Éditorial est composée de trente membres de France et de pays francophones.

OUVRAGES

LE LIVRE JUBILAIRE (1984) :

point sur les acquis récents en matière de science du sol et de pédologie.

FONCTIONNEMENT HYDRIQUE ET COMPORTEMENT DU SOL (1984).

PODZOLS ET PODZOLIZATION,

par D. Righi et A. Chauvel ; ouvrage publié en coédition par l'AFES et l'INRA, avec le concours du CNRS, de l'ORSTOM, et de la région Poitou-Charentes.

MICROMORPHOLOGIE DES SOLS/SOIL MICROMORPHOLOGY

par N. Fédoroff, L.M. Bresson, Marie Agnès Courty ; publié par l'AFES avec le concours du CNRS, de l'INAPG, de l'INRA, du Ministère de l'Environnement et de l'ORSTOM.

CARTE MONDIALE DES SOLS ET SA LÉGENDE,

présentée sous forme de deux diapositives.

LE RÉFÉRENTIEL PÉDOLOGIQUE :

principaux sols d'Europe, édition 1992. Ouvrage collectif publié par l'AFES et l'INRA.