

Variabilité de la recharge de la nappe de Beauce

Rôle de l'irrigation et des caractéristiques du sol

A. Bruand⁽¹⁾, G. Creuzot⁽²⁾, P. Quélin⁽¹⁾, R. Darthout⁽¹⁾, L. Raison⁽¹⁾, P. Courtemanche⁽¹⁾ et H. Gaillard⁽¹⁾

1 : INRA Orléans -Unité de Science du Sol - SESCOF - 45160 Ardon.

2 : DIREN Centre - SEMA - 5, Avenue Buffon - BP6407 - 45064 Orléans Cedex 2.

RÉSUMÉ

L'amplitude des fluctuations piézométriques de la nappe de Beauce varie suivant les zones. Les caractéristiques du sol sont souvent invoquées pour expliquer ce phénomène, mais sans que cela soit clairement établi. Par ailleurs, on s'interroge de plus en plus fréquemment sur le rôle de l'irrigation. L'objectif de l'étude était par conséquent de mieux comprendre comment et dans quelles conditions les caractéristiques du sol et l'irrigation peuvent effectivement être responsables.

L'étude a concerné trois sols localisés au droit de piézomètres dont les enregistrements sont représentatifs des trois principaux types de fluctuations caractéristiques de cette nappe libre (Trancrainville, Villamblain et Batilly-en-Gâtinais). La teneur en eau des sols et la hauteur des pluies ont été mesurées au pas de temps hebdomadaire du 31 octobre 1994 au 29 mai 1995 ; le niveau piézométrique a été, quant à lui, mesuré au pas de temps horaire mais seules les moyennes au pas de temps hebdomadaire ont été discutées. L'infiltration efficace a été calculée par la méthode du bilan hydrique et comparée aux variations de niveau piézométrique.

Les résultats mettent en évidence que la capacité de stockage en eau potentielle des sols est différente entre les trois sites. En effet, si le stock d'eau accessible aux plantes est utilisé à l'issue de la période de végétation, les sols peuvent induire, par leur capacité de stockage potentielle très variable (117 mm à Trancrainville, 221 mm à Villamblain et 162 mm à Batilly-en-Gâtinais), d'importantes différences d'infiltration efficace. Or, pour l'année considérée, les différences de capacité de stockage n'ont que peu d'influence en raison des premières pluies d'automne et de l'irrigation des précédents culturaux. Au 31 octobre, la capacité de stockage des sols est peu différente entre les trois sites (40 à 60 mm). Compte-tenu de l'imprécision sur la lame d'eau évaporée durant la période considérée, l'infiltration efficace, calculée avec $k = 1, 0,8$ et $0,6$ (évaporation = $k \times \text{ETP}$), varie selon k de 149 à 204 mm à Trancrainville, de 188 à 259 mm à Villamblain et de 225 à 298 mm à Batilly-en-Gâtinais. En l'absence de différence importante de capacité de stockage en eau, les variations d'infiltration efficace durant la période étudiée s'expliquent essentiellement par des variations de hauteur des pluies entre les trois sites. Ces dernières variations sont d'ailleurs supérieures à celles généralement considérées en Beauce pour cette même période. Quant à l'amplitude des fluctuations piézométriques, attribuable à l'infiltration efficace (1,50 m à Trancrainville, 2,05 m à Villamblain et 2,70 m à Batilly-en-Gâtinais), elle s'expliquerait essentiellement par la variabilité de hauteur des pluies et secondairement par des différences de porosité efficace et de temps moyen de transfert dans la zone non saturée, les apports latéraux étant vraisemblablement proches entre les trois sites.

De façon plus générale, les résultats obtenus indiquent que la nature du précédent cultural, en particulier les pratiques d'irrigation, influenceraient plus l'infiltration efficace durant l'hiver et le printemps que ne l'influence la culture en place durant cette même période. Enfin, il apparaît qu'une meilleure maîtrise des entrées dans un modèle de fonctionnement de la nappe de Beauce nécessite une meilleure prise en compte que par le passé des caractéristiques des sols, des pratiques d'irrigation et de la variabilité des hauteurs des pluies.

Mots clés

Bilan hydrique - piézomètre - infiltration efficace - humidimètre neutronique - irrigation - réserve en eau.

SUMMARY

VARIATION IN THE RECHARGE OF THE BEAUCE GROUNDWATER TABLE

Role of irrigation and soil characteristics

The annual piezometric fluctuations vary in Beauce differently according to the location of the piezometer (Figure 1). Usually, the soil characteristics are involved to explain these differences but this was not clearly established. More recently, results of field studies have shown that irrigation could influence also the groundwater recharge. Consequently, the aim of the study is to discuss how the soil properties and irrigation can explain the differences of the annual piezometric fluctuations which have been recorded for many years in Beauce.

Three sites (Trancrainville, Villamblain and Batilly-en-Gâtinais) where the groundwater table exhibited representative piezometric fluctuations are selected (Figures 1, 2 and 3; Table 1). The soil water content (Table 2) and rainfall (Table 3) are measured weekly from 31 October 1994 to 29 May 1995. The depth of the groundwater is measured automatically each hour for the year. The mean weekly value are used. The effective infiltration (downward water flow at the soil bottom) is calculated using the hydric balance method and compared to the groundwater table depth.

The results show that the potential water storage capacity (differences between the water content at the field capacity and the one at the wilting point) varies greatly from one site to another (Trancrainville: 117 mm, Villamblain: 221 mm and Batilly-en-Gâtinais: 162 mm) (Table 4). Nevertheless, in October 1994, the water storage capacities are close between the three sites (from 40 to 60 mm) because of the first rainfalls in early autumn and irrigation which have been applied for the 1994 cropping period. Indeed, this induces a soil water content in autumn which is close to its maximum value for winter (Figure 5). Because of the lack of difference of water storage capacity on the 31 October 1994, the difference of effective infiltration which is calculated using the hydric balance method with $k = 1, 0.8$ and 0.6 (evaporation = $k \times \text{ETP}$) is related mainly to difference of rainfall at each site (Figures 4, 6 et 7). According to the value of k , the effective infiltration varies from 149 to 204 mm for Trancrainville, from 188 to 259 for Villamblain and from 225 to 298 mm for Batilly-en-Gâtinais (Figure 6). This variation in the rainfall is greater than usually considered for the Beauce.

The piezometric fluctuations resulting from effective infiltration are calculated by taking into account the mean transfer time within the unsaturated zone (Figures 2, 7 and 8). The differences between the three sites (Trancrainville: 1.50 m, Villamblain: 2.05 and Batilly-en-Gâtinais: 2.70 m) cannot be explained by differences of effective porosity. Thus, the differences of piezometric fluctuations between the three sites would be related mainly to differences of rainfall between the latter.

A theoretical calculation of effective infiltration was performed by combining the soil and climate at each site (Tables 5). This enables a better estimation of the potential role of soil on the amount of effective infiltration and on its start. Thus, if the soil water content is at its lowest value at the end of the cropping period (wilting point) and if $k = 1.0$, the soil characteristics induce great differences of effective infiltration (Table 5) according to the rainfall and evapotranspiration which can be recorded in Beauce.

Finally, our results show that modelling of the groundwater table behaviour will require to take into account better than in the past (i) the soil characteristics which induce a variation in the water storage properties (soil depth, available water capacity, etc), (ii) the cropping system characteristics, particularly irrigation practices, which induce a variation in the soil water content in autumn, (iii) and the climate characteristics since the variation in rainfall is higher than usually known in Beauce.

Key-words

Water balance - piezometer - effective infiltration - neutron probe - irrigation - water capacity.

RESUMEN

VARIABILIDAD DE LA RECARGA DEL MANTO FREÁTICO DE BEAUCE

Importancia de la irrigación y de las características del suelo

La amplitud de las fluctuaciones piezométricas del manto freático de Beauce varía según las zonas. Las características del suelo son a menudo invocadas para explicar este fenómeno, pero sin que esto este claramente establecido. Por otra parte, la gente se interroga más y más frecuentemente sobre la importancia de la irrigación. El objetivo del estudio era, por consiguiente, de comprender mejor como y en que condiciones las características del suelo y la irrigación pueden efectivamente ser responsables.

Se han estudiado tres suelos localizados al pies de los piezómetros cuyos registros son representativos de tres tipos de fluctuaciones que son características de este manto libre (Trancrainville, Villamblain y Batilly-en-Gâtinais). El contenido en agua y la altura de lluvias se registraron semanalmente del 31 de octubre de 1994 al 29 de mayo de 1995; el nivel piezométrico fue medido cada hora pero solo

las medias semanales fueron discutidas. La infiltración eficaz fue calculada por el método del balance hídrico y comparada a las variaciones del nivel piezométrico.

Los resultados ponen en evidencia que la capacidad potencial de almacenamiento de agua de los suelos es diferente entre los tres sitios. En efecto, si la provisión de agua accesible a las plantas es usada al final del periodo de vegetación, los suelos pueden inducir, por su capacidad de almacenamiento potencial muy variable (117 mm. a Trancainville, 221 mm. a Villamblain y 162 mm. a Batilly-en-Gâtinais), importantes diferencias de infiltración eficaz. Luego, para el año considerado, las diferencias de capacidad de almacenamiento han tenido poca influencia en razón de las primeras lluvias del otoño y de la irrigación de los precedentes cultivos. Al 31 de octubre, la capacidad de almacenamiento de los suelos varía poco entre los tres sitios (40 a 60 mm.). Teniendo en cuenta la imprecisión sobre la lamina de agua evaporada durante el periodo considerado, la infiltración eficaz, calculada con $k = 1, 0.8$ y 0.6 (evaporación = $k \times ETP$), varía según k de 149 a 204 mm. a Trancrainville, de 188 a 259 mm. a Villamblain y de 225 a 298 mm. a Batilly-en-Gâtinais. En ausencia de diferencia importante de capacidad de almacenamiento de agua las variaciones de infiltración eficaz durante el periodo estudiado se explican esencialmente por variaciones de altura de lluvias entre los tres sitios. Estas variaciones son además superiores a las generalmente consideradas en Beauce para este mismo periodo.

En cuanto a la amplitud de las fluctuaciones piezométricas que se atribuía a la infiltración eficaz (1,5m a Trancrainville, 2,5 m a Villamblain y 2,7m a Batilly-en-Gâtinais), se explicaría esencialmente por la variabilidad de la altura de las lluvias y secundariamente por diferencias de porosidad eficaz y de tiempo medio de transferencia en la zona no saturada; los aportes laterales son verosímilmente próximos entre los tres sitios.

De manera más general, los resultados obtenidos indican que un mejor dominio de las entradas en un modelo de funcionamiento del manto freático de la Beauce necesita una mejor toma en cuenta con referencia al pasado de las características de los suelos, de las prácticas de irrigación y de la variabilidad de las alturas de las lluvias.

Palabras claves

Balance hídrico, piezometro, infiltración eficaz, humidimetría neutrónica, irrigación, reserva en agua.

La gestion de la ressource en eau nécessite que l'on soit en mesure d'en maîtriser aussi bien les aspects quantitatifs que qualitatifs. Dans le bassin de Paris, de nombreuses zones de grande culture sont localisées au droit de nappes phréatiques libres où les questions relatives à la dégradation de la qualité de l'eau par pollution diffuse d'origine agricole se posent depuis plusieurs décennies (Landreau et Lemoine, 1977 ; Bodelle et Margat, 1980 ; Lallemand-Barrès et al., 1985 et 1987). Dans de telles zones, la qualité de l'eau de la nappe est directement sous la dépendance des pratiques agricoles car la recharge de cette nappe dépend étroitement du bilan hydrique hivernal au niveau de la couverture de sols.

GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU EN BEAUCE

A l'échelle de la France, la Beauce constitue l'une de ces zones particulièrement sensibles à la pollution diffuse d'origine agricole (Landreau et Morisot, 1983). Dès le début des années 80, la quasi totalité de la nappe de Beauce possédait déjà une teneur en nitrate supérieure à 25 mg/l et environ 20% de la surface se voyait déjà affectée de concentrations comprises entre 50 et 100 mg/l (Lallemand-Barrès et al., 1985, 1987 et 1994, Schnebelen, 1995).

A des questions relatives à la gestion qualitative de l'eau de la nappe de Beauce, d'autres relatives à sa gestion quantitative ne cessent de s'ajouter. Les dix dernières années ont vu considérablement augmenter la surface irrigable au point que dans certaines zones, la totalité de la surface cultivée est maintenant irriguée. Cette évolution a vraisemblablement été accélérée par plusieurs années à bilan climatique fortement déficitaire comme ce fut plus particulièrement le cas pour les années 1990, 1991 et 1992. Une augmentation des quantités d'eau prélevées conjuguée avec de faibles recharges de la nappe phréatique, voire nulles certaines années suivant les zones, nécessitent aujourd'hui que soit développé un nouveau modèle de fonctionnement de la nappe de Beauce après celui développé dans les années 70-80 par le BRGM (Roche et Thierry, 1984 ; Thierry et Seguin, 1986). Dans ce contexte, une «Etude de la recharge de la nappe de Beauce» a été lancée dans le cadre du «Programme de protection des eaux souterraines» du Ministère de l'Environnement, contribution à un programme d'études plus ambitieux qui devrait à terme aboutir à un nouveau modèle hydrologique, lequel prendra en compte de façon plus détaillée que le précédent les entrées et sorties (BRGM, 1995 ; Henry, 1996 ; Trawinsky, 1996 ; BRGM-DIREN, 1997 ; Creuzot et al., 1997).

D'importantes variations d'amplitude du niveau piézométrique sont observées en Beauce chaque année (Desprez, 1973 ; Desprez et Mégnien, 1975 ; Mégnien, 1979 ; Creuzot et

al., 1997). Elles peuvent être liées à des différences de porosité efficace, de temps moyen de transfert dans la zone non saturée, de gradient hydraulique et de hauteur de la recharge. Les différences de porosité efficace et de gradient hydraulique semblent faibles et ne peuvent pas expliquer à elles seules les variations d'amplitude enregistrées. C'est pourquoi, on évoque souvent le rôle du sol en tant que compartiment tampon réduisant la hauteur de la recharge et la retardant d'autant plus que sa capacité à stocker de l'eau est élevée. Quant à l'aptitude des sols à infiltrer l'eau au cours de l'hiver et du printemps, elle n'interviendrait que très marginalement puisque la stabilité de la structure est généralement élevée en Beauce ; l'infiltrabilité de la surface du sol demeure suffisamment élevée pour que toute l'eau précipitée pénètre dans le sol.

Le rôle du sol n'a pas pu être jusqu'à maintenant clairement établi. En effet, les données sur les propriétés hydriques des sols sont encore trop générales et concernent de trop grandes zones de Beauce pour pouvoir être reliées au comportement de tel ou tel piézomètre. Ainsi, pour la Beauce d'Eure-et-Loir, la capacité de stockage en eau des sols (reconstitution de la réserve utile) varie de 80 à 250 mm excepté pour 5% de la surface où elle est inférieure à 80 mm (Atlas Agroclimatique d'Eure-et-Loir, 1988). Dans leur synthèse régionale, Ailliot et Verbègue (1995) indiquent que la capacité de stockage varie de 50 à 250 mm en fonction du type de sol, de l'épaisseur prospectée par les racines et du type de matériau sous jacent. La carte réalisée dès 1982 par Mori pour l'ensemble de la France indiquait déjà que pour la Beauce, cette capacité de stockage variait dans une très large gamme, de valeurs inférieures à 70 mm à d'autres supérieures à 200 mm.

L'irrigation pourrait aussi être responsable de variations de capacité de stockage en eau des sols en étant à l'origine des différences de teneur en eau à l'automne. Ce rôle de l'irrigation est aujourd'hui très discuté, car il signifierait qu'un certain nombre d'apports d'eau sont trop tardifs.

Quant au rôle du climat, qui pourrait aussi expliquer le comportement de la nappe phréatique, des variations existent à l'échelle de la Beauce, mais les gradients demeurent faibles et par conséquent imprécis avec le réseau actuel de postes météorologiques de la Météorologie Nationale (Louvrier et Margat, 1983 ; Météorologie Nationale, 1988).

Afin de préciser le rôle du sol, il a été décidé d'étudier le fonctionnement hydrique de trois sols au droit de piézomètres présentant des comportements très différents et représentant la gamme de variations rencontrée pour l'ensemble de la nappe de Beauce. Cette étude a été menée au cours des périodes hivernale et printanière 1994-1995.

LES TROIS SITES ETUDIÉS

Les trois sites étudiés (Figure 1) ont été sélectionnés en

fonction de la typologie de recharge de la nappe de Beauce. Cette typologie a été établie à partir du suivi du réseau de piézomètres installé au cours des 30 dernières années sur l'ensemble de la Beauce (BRGM-DIREN, 1996 et 1997 ; Creuzot et al., 1997). Chaque site a fait l'objet d'une prospection pédologique sommaire de façon à s'assurer de la faible variation de nature du sol dans un rayon de quelques dizaines de mètres autour des piézomètres sélectionnés.

Le site de Trancrainville

Le site de Trancrainville est situé à la limite entre la Beauce et la Petite Beauce (Figure 1), au sein du sous-bassin de la Mauve de St Ay et à proximité de la crête piézométrique qui sépare les bassins Loire - Bretagne et Seine - Normandie. La remontée annuelle de la nappe est généralement tardive et de faible amplitude (Figure 2a). Hormis le sol en surface, l'encaissant est le Calcaire de Pithiviers (calcaire lacustre aquitainien).

Le sol étudié est localisé dans une parcelle de blé avec précédent blé irrigué. Le profil de sol est peu différencié depuis la surface jusqu'au calcaire (dalle de calcaire dur) présent à partir de 75 cm (Figure 3, Tableau 1). Il est de texture argilo-limoneuse et non calcaire sur toute son épaisseur, mais son complexe d'échange demeure saturé en calcium. Ce sol présente les caractères d'un Brunisol selon le Référentiel Pédologique (AFES, 1995). Il correspond aux sols bruns calcaïques décrits en Beauce par Ailliot et Verbègue (1995).

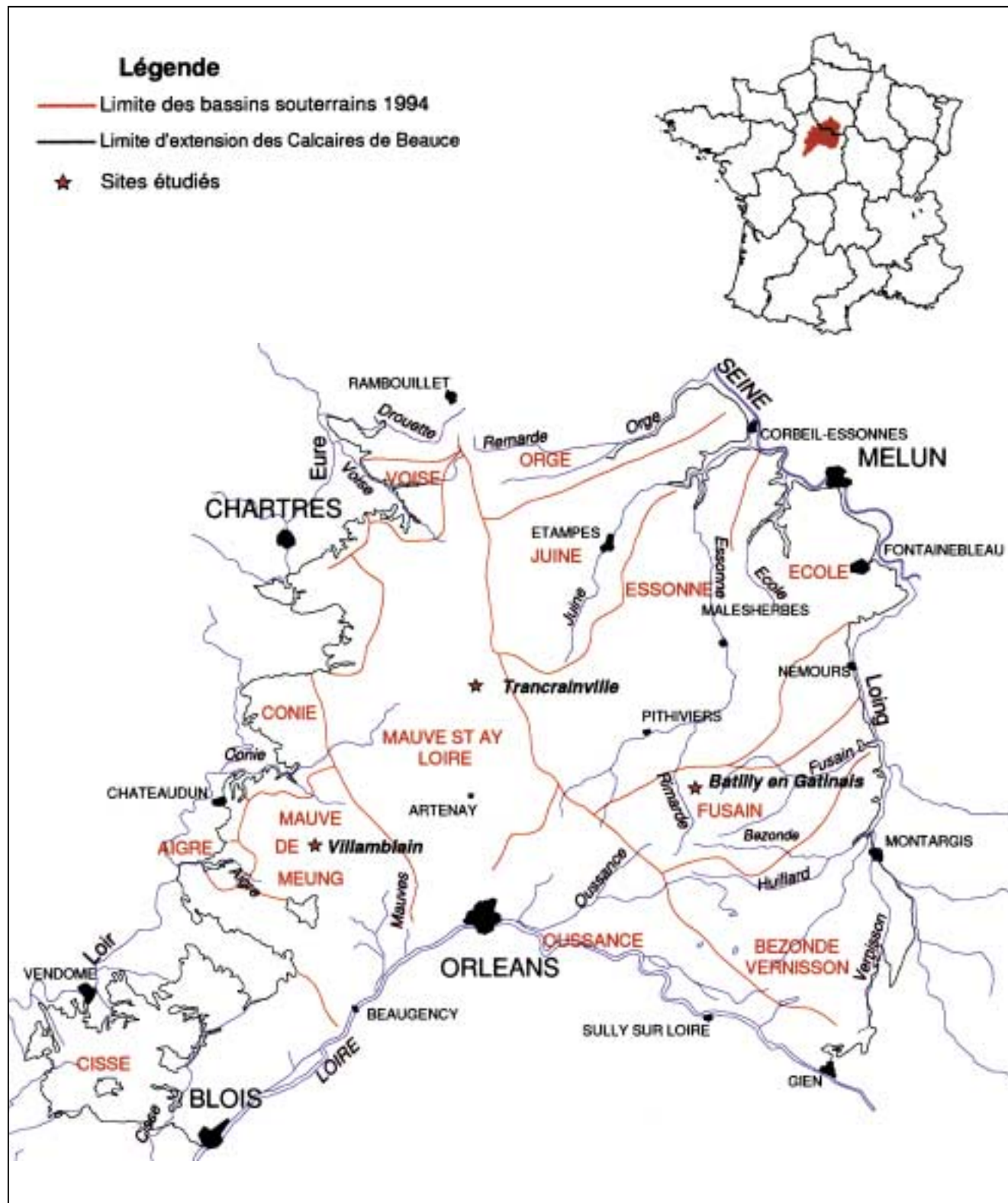
Le site de Villamblain

Le site de Villamblain est situé en Petite Beauce (Figure 1), au sein du sous-bassin de la Mauve de Meung et à une distance variable d'une crête piézométrique, celle-ci se déplaçant beaucoup entre les périodes de basses eaux et de hautes eaux. Ce site a été retenu pour l'étude car la remontée annuelle du niveau piézométrique observé depuis 20 ans sur le piézomètre d'Epieds-en-Beauce (situé à 3 km au sud du piézomètre du site de Villamblain, celui-ci n'étant suivi que depuis 4 ans) se produit tôt et cette remontée est de moyenne amplitude (Figure 2b). Hormis le sol et des matériaux cryoturbés calcaires, l'encaissant de ces deux piézomètres est le Calcaire de Pithiviers (calcaire lacustre aquitainien). Cette région de Beauce a été l'objet de nombreux travaux de recherche depuis plusieurs années (e.g. Ould Mohamed, 1995 ; Chéry, 1995 ; Nicoulaud et al., 1995 ; Chéry et al., 1996 ; Bourennane et al., 1996 ; Ould Mohamed et al., 1997a et b) et en particulier d'un programme mené conjointement par l'INRA, la Chambre d'Agriculture du Loiret et la DIREN Centre (Bruand et al., 1993 ; Darthout et al., 1994, 1995, 1996 et 1997).

Le sol étudié est localisé au sein d'une parcelle en blé avec précédent maïs. Le profil de sol est peu différencié depuis la surface jusqu'aux matériaux limoneux et calcaires présents à partir de 50 cm de profondeur (Figure 3, Tableau 1). Le sol est

Figure 1 : Délimitation de la nappe de Beauce et localisation des sites d'étude (SEMA - DIREN Centre).

Figure 1 : Boundary of the groundwater table of Beauce and location of the study sites (after SEMA - DIREN Centre).



calcaire dès la surface et présente à sa base et de façon discontinue un encroûtement calcaire. Les matériaux limoneux et calcaires sont de couleur brun jaune à beige clair (horizons C1 et C2). Ils varient de composition (teneur en calcaire, charge en graviers calcaires, ...) verticalement et latéralement et sont organisés en poches de dimensions submétriques.

Ce sol présente les caractères d'un Calcosol selon le Référentiel Pédologique (AFES, 1995). Il est à rapprocher des sols bruns calciques peu épais à bruns calcaires décrits en Beauce par Ailliot et Verbègue (1995). Les matériaux de texture limono-argileuse à argilo-limoneuse dans lesquels le sol s'est développé reposent sur des matériaux calcaires réorganisés par des phénomènes de cryoturbation durant les périodes froides du Quaternaire, comme en témoignent les organisations en poche. La présence de matériaux cryoturbés entre la couverture limono-argileuse à argilo-limoneuse et les premières assises aquitaniennes est très fréquente dans ce secteur de Petite Beauce. Une coupe a d'ailleurs été étudiée en détail par Ould Mohamed (1991 et 1995) et Ould Mohamed et Bruand (1994) dans une carrière, au lieu-dit «Les Sapins Dousset», à proximité de l'exploitation agricole «La Mouise».

Le site de Batilly-en-Gâtinais

Il est situé dans le Gâtinais (Sud-Est de Pithiviers), au sein du sous-bassin du Fusain et à proximité d'une crête piézométrique. La remontée annuelle de la nappe se produit tôt durant l'hiver et présente une forte amplitude (Figure 2c). Hormis le sol et quelques mètres d'un calcaire pulvérulent en surface (Marne de Blamont), l'encaissant est le Calcaire de Pithiviers (calcaire lacustre aquitaniens).

Le sol étudié est localisé dans une parcelle qui après avoir été cultivée en blé irrigué en 1993-94 a été mise en jachère nue. Le profil de sol présente un gradient net de teneur en calcaire avec la profondeur. En effet, le sol est calcaire dès la surface et possède des graviers calcaires jusque vers 55 cm de profondeur (Tableau 1). Le maté-

Figure 2 : Variations piézométriques de janvier 1965 à janvier 1997 pour les piézomètres de Trancrainville (cote NGF = 137,16 m), d'Epieds-en-Beauce (cote NGF = 123,50 m) et de Batilly-en-Gâtinais (cote NGF = 113,04 m) (SEMA - DIREN Centre).

Figure 2 : Variation in the groundwater level from January 1965 to January 1997 for the piezometers of Trancrainville (z = 137.16 m), Epieds-en-Beauce (z = 123.50 m) and Batilly-en-Gâtinais (z = 113.04 m) (after SEMA - DIREN Centre).

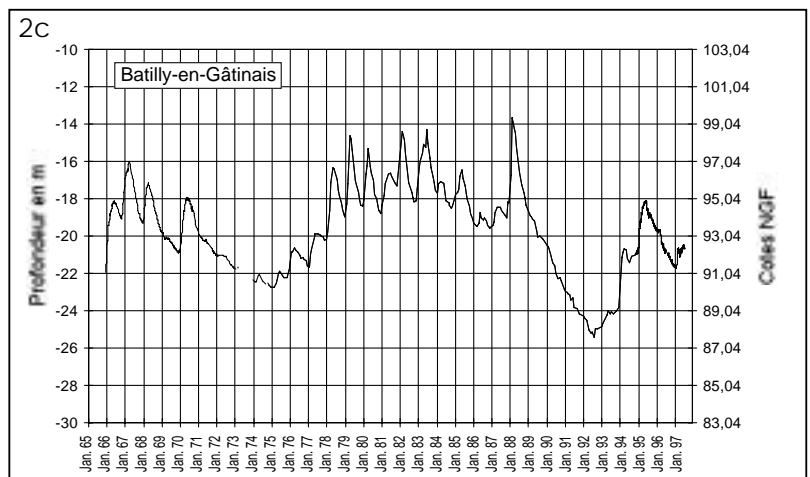
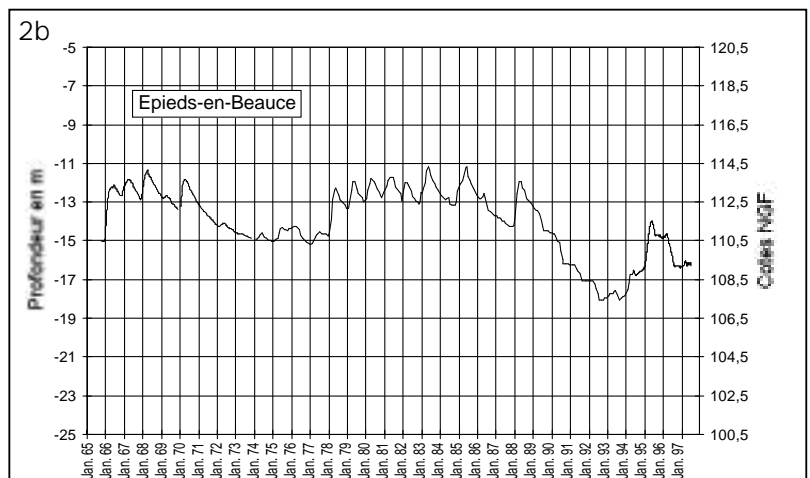
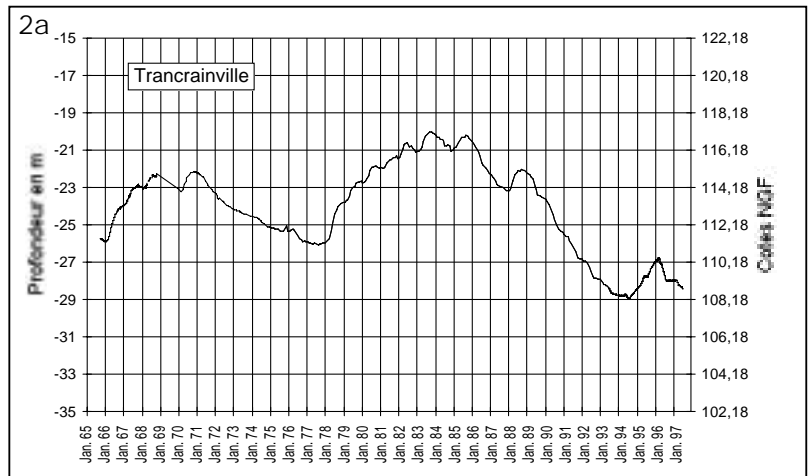


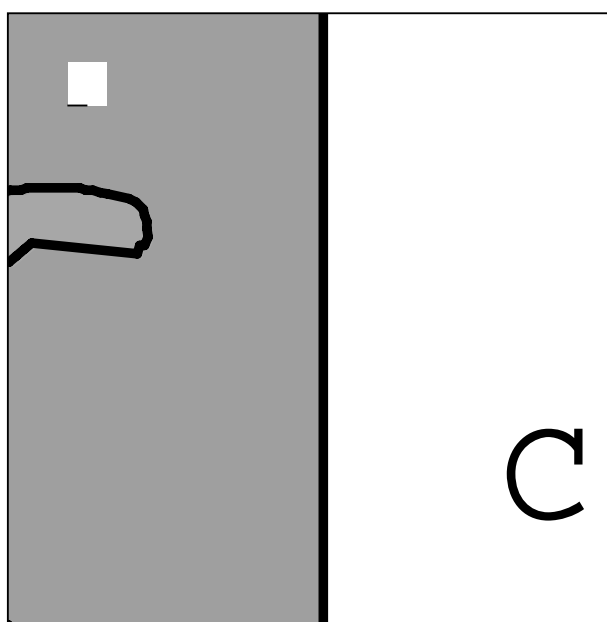
Tableau 1 : Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les profils de sol de Trancrainville, Villamblain et Batilly-en-Gâtinais.
Table 1 : Results from the physico-chemical analyses of the soils of Trancrainville, Villamblain and Batilly-en-Gâtinais.

Horizon	Prof. cm	EG ¹ %	CaCO ₃ %	Granulométrie de la terre tamisée à 2 mm										C %	pH	Complexe				
				% (taille des classes en µm)												cmol ⁺ kg ⁻¹				
				sans décarbonatation					après décarbonatation							CEC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺
A	LF	LG	SF	SG	A	LF	LG	SF	SG											
				<2	2	20	50	200	<2	2	20	50	200							
				-20	-50	-200	-2000	-20	-50	-200	-2000									
Profil de sol de Trancrainville																				
L	0-30	0	0	30,1	30,9	36,3	1,2	1,5	-	-	-	-	-	1,2	7,2	17,2	-	-	-	-
S1	30-50	0	0	37,6	26,6	32,7	1,1	1,0	-	-	-	-	-	0,8	7,4	19,6	18,6	0,9	0,4	0,2
S2	50-75	0	0	37,7	28,9	31,3	1,1	1,0	-	-	-	-	-	0,7	7,5	20,1	-	-	-	-
Profil de sol de Villamblain																				
L	0-30	1	2,8	29,6	35,5	31,7	1,7	1,8	28,3	34,0	32,7	1,7	0,5	1,4	8,0	18,4	sat.	0,7	0,8	0,1
Sca	30-50	<1	13,9	30,2	38,2	29,0	1,7	1,1	28,7	27,7	28,4	1,0	0,3	0,7	8,3	16,1	sat.	0,5	0,3	0,1
C1	50-90	3	63,1	38,4	38,5	13,2	3,9	6,0	16,4	10,1	9,8	0,5	0,1	0,5	8,4	7,9	sat.	0,3	0,2	<0,1
C2	90-150	8	90,3	36,2	38,8	6,7	4,6	13,7	9,0	0,6	0	0	0	0,2	8,6	3,1	sat.	0,2	0,1	<0,1
Profil de sol de Batilly-en-Gâtinais																				
L	0-30	10	7,2	52,1	21,7	3,4	4,1	18,8	-	-	-	-	-	1,6	8,1	29,7	sat.	1,0	1,8	0,1
Sca	30-55	25	26,5	48,0	21,8	7,4	8,6	14,2	52,4	5,6	2,6	1,9	11,0	1,1	8,2	22,5	sat.	0,6	0,6	0,1

1 : Teneur en éléments grossiers exprimée en % de la terre totale séchée à 105 °C.

Figure 3 : Schémas des profils de sol de Trancrainville, Villamblain et Batilly-en-Gâtinais.

Figure 3 : Schemes of the soil profiles of Trancrainville, Villamblain and Batilly-en-Gâtinais.



riau marneux présent à la base du profil (Marne de Blamont) présente des intercalations de niveaux à charge sableuse et d'autres de texture très argileuse. Le sol présente les caractères d'un CALCOSOL selon le Référentiel Pédologique (AFES, 1995). Il est à rapprocher des sols bruns vertiques sur marne décrits en Beauce par Ailliot et Verbègue (1995).

METHODES D'ETUDE

Afin de déterminer la capacité de stockage potentielle en eau des sols, des échantillons non perturbés de dimensions décimétriques ont été prélevés dans les différents horizons au cours de l'hiver lorsque la teneur en eau était proche de la capacité au champ. La quantité d'eau retenue à -15 000 hPa (pF=4,2) a été déterminée pour chaque horizon sur une quinzaine de mottes de dimensions centimétriques (8 - 12 cm³) obtenues par fragmentation à la main. Ces mottes intègrent une proportion d'éléments grossiers voisine de celle déterminée sur l'horizon (Tableau 1). Le dispositif utilisé au laboratoire est celui décrit par Bruand et al. (1996). La densité apparente des horizons a été mesurée à l'aide de cylindres de 1000 cm³, à raison de deux répétitions par horizon.

Sols et horizons	α	β	γ	δ
Trancrainville				
L (0 - 30 cm)	0,85	9,36	91,44	-75,76
S1 (30 - 50 cm)	0,82	9,59	100,5	-80,83
S2 (50 - 75 cm)	0,82	9,59	100,5	-80,83
Villamblain				
L (0 - 30 cm)	1,15	9,75	102,66	-83,61
Sca (30 - 50 cm)	1,15	9,75	102,66	-83,61
C1 et C2 (50 - 150 cm)	2,44	9,66	88,91	-77,73
Batilly-en-Gâtinais				
L (0 - 30 cm)	0,19	10,38	149,79	-105,28
Sca (30 - 55 cm)	1,40	9,97	112,72	-90,59
Mm (55 - 100 cm)	1,40	9,97	112,72	-90,59
(100 - 140 cm)	0,89	9,93	116,69	90,85

Tableau 2 : Paramètres d'étalonnages lors de l'utilisation de l'humidimètre neutronique.

Table 2 : Calibration parameters which were used for the neutronic humidimeter.

Un suivi de la teneur en eau des sols a été effectué au pas de temps hebdomadaire du 31 octobre 1994 au 29 mai 1995. La teneur en eau du sol a été mesurée à l'aide de la méthode neutronique (Couchat, 1974 ; Bertuzzi et al., 1987) sur une épaisseur suffisante pour que l'on puisse considérer que tout flux d'eau ascendant à la base de la couche de sol étudiée soit négligeable. Par ailleurs, précisons que le Calcaire de Pithiviers est constitué d'une alternance de couches de lithologie très variée, allant du calcaire dur à grain fin au calcaire pulvérulent et que, par conséquent, tout flux ascendant depuis la nappe phréatique est impossible. L'étalonnage de l'humidimètre à neutrons (type Solo 25S) a été effectué par le CEN de Cadarache. Il a consisté en la détermination des coefficients d'absorption (Σa) et de diffusion (Σb) des principaux horizons. Pour chaque horizon, nous avons utilisé la relation d'étalonnage suivante :

$$N/N_0 = (\alpha Da + \beta) \theta_v + \gamma Da + \delta$$

avec :

N : comptage neutronique dans le sol (coups / seconde)

N₀ : comptage de référence dans l'eau (coups / seconde)

Da : densité apparente du matériau sec (sans dimension)

θ_v : teneurs en eau volumique ($m^3 m^{-3}$)

α , β , γ et δ : constantes neutroniques de l'étalonnage du sol dépendant de Σa et Σb .

Les constantes neutroniques d'étalonnage mesurées pour les différents horizons sont présentées dans le tableau 2. Deux tubes d'accès pour l'humidimètre ont été installés jusqu'à des profondeurs de 1,50 m à Villamblain, 0,75 m à Trancrainville (présence d'une dalle de calcaire dur) et 1,40 m à Batilly-en-Gâtinais. Les profondeurs de 1,50 et 1,40 m à respectivement Villamblain et Batilly-en-Gâtinais sont suffisantes pour prendre en compte l'épaisseur de sol affectée par les prélèvements

racinaires et négliger les mouvements d'eau verticaux ascendants durant la période étudiée (Nicoulaud et al., 1994 et 1995 ; Darthout et al., 1995 et 1996). A Trancrainville, la présence d'une dalle calcaire à 0,75 m de profondeur détermine l'épaisseur de sol à prendre en compte et exclut tout mouvement d'eau vertical ascendant.

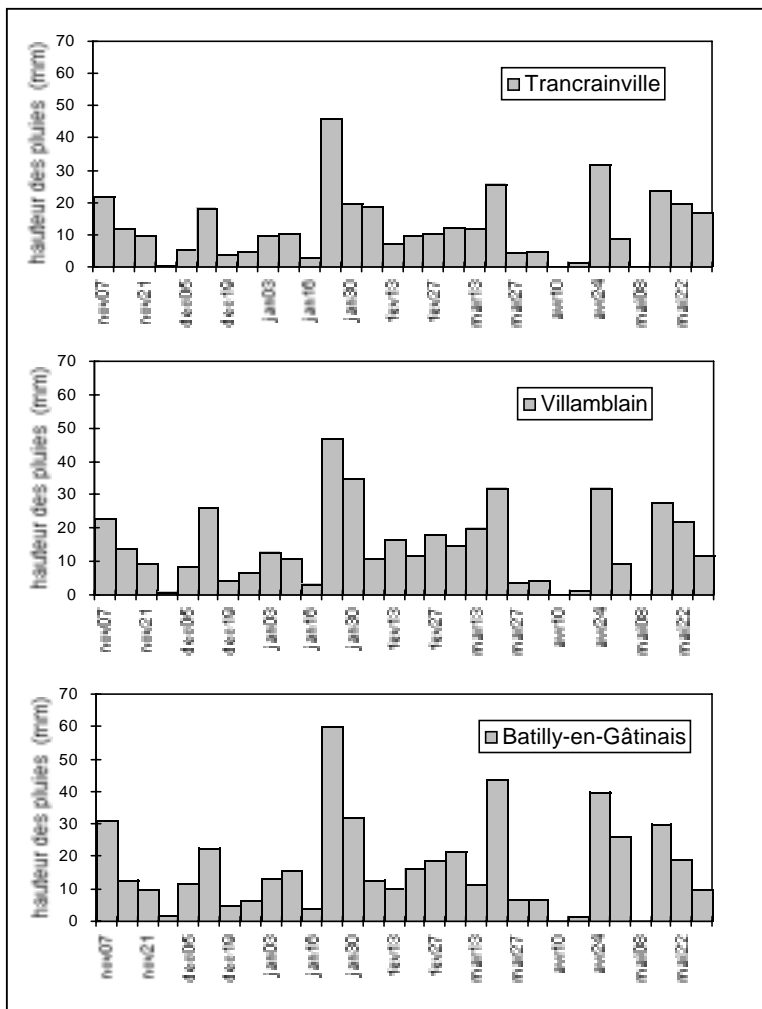
Les quantités d'eau ont été mesurées tous les 10 cm en commençant à partir de 15 cm de profondeur. Pour pallier aux difficultés rencontrées à proximité de la surface avec la méthode neutronique, nous avons effectué des mesures gravimétriques à raison de 3 prélèvements aux profondeurs de 0-10, 10-20 et 20-30 cm avec 3 répétitions à quelques mètres de distance des tubes d'accès à l'humidimètre.

Un pluviographe enregistreur (surface de 2 000 cm^2) a été installé sur chaque site. Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle Penman qui ont été utilisées pour le bilan sont celles des stations de la Météorologie Nationale les plus proches de chaque site : la station de Poinville pour Trancrainville (situé à 7 km), celles de Bricy pour Villamblain (situé à 16 km) et celles de Beaune-la-Rolande pour Batilly-en-Gâtinais (situé à 6 km) (Figure 1). Pour faire coïncider les décades de la Météorologie Nationale avec le pas de temps hebdomadaire de nos relevés, nous avons recalculé ETP au pas de temps hebdomadaire en redistribuant de façon homogène l'ETP décadaire au pas de temps journalier.

Le suivi de la profondeur du toit de la nappe phréatique est assuré de façon automatique au pas de temps horaire, mais seules les valeurs moyennes au pas de temps hebdomadaire ont été retenues.

Figure 4 : Chroniques hebdomadaires des hauteurs de pluies pour les sites de Trancrainville, Villamblain et Batilly-en-Gâtinais (novembre 1994 - mai 1995).

Figure 4 : Variation in the weekly rainfalls for the sites of Trancrainville, Villamblain and Batilly-en-Gâtinais (November 1994 - May 1995).



RESULTATS ET DISCUSSION

Pluviosité et bilan climatique

Du 31 octobre 1994 au 29 mai 1995, la hauteur des pluies a été de 378 mm à Trancrainville, 441 mm à Villamblain et de 503 mm à Batilly-en-Gâtinais (Figure 4). Pour cette même période, la hauteur des pluies a été de 466 mm à Bricy, alors que la normale pour la période 1946-1986 est de 371 mm. Les hauteurs de pluie mesurées pour les trois sites correspondent par conséquent à des hivers et printemps nettement plus humides qu'ils ne le sont pour la normale annuelle..

Le bilan climatique (P - ETP) calculé du 31 octobre 1994 au 29 mai 1995 est 120 mm pour Trancrainville, 156 mm pour Villamblain et de 221 mm pour Batilly-en Gâtinais. Une gamme de variation encore plus importante existe à l'échelle de l'ensemble de la Beauce (Tableau 3). A Baccon (544 mm), P est de 24% supérieure à celle de Poinville (424 mm). Pour la même période, le bilan P-ETP qui est disponible pour un nombre plus faible de stations, varie de 166 mm (Poinville) à 240 mm (Trinay) avec 222 mm à Beaune-la-Rolande. Le bilan P-ETP est par conséquent à Trinay de 45% supérieur à celui de Poinville (+34% à Beaune-la-Rolande).

Reconstitution de la réserve en eau du sol

Dès le 31 octobre 1994, les sols étaient déjà largement réhumectés puisque les stocks d'eau étaient de 40 à 60 mm seulement en deçà des stocks maximum enregistrés au cours de l'hiver (Figure 5). Cette proximité du stock maximum s'explique aisément à Villamblain en raison du précédent maïs irrigué. Des stocks analogues ont été observés au mois d'octobre dans plusieurs parcelles de Petite Beauce par Chéry (1995) après maïs irrigué. De telles observations ont aussi été faites par Darthout et al. (1995 et 1996) lors de suivis hydriques de sols du secteur expérimental de Villamblain. A Trancrainville, la plus faible épaisseur du sol (75 cm) conjuguée aux premières pluies d'automne et à l'irrigation du précédent blé explique que le stock se soit en grande partie déjà reconstitué dès le 31 octobre. Les mesures effectuées par Chéry (1995) ont effectivement aussi montré qu'après un blé irrigué, le stock d'eau présent dans le sol au mois d'octobre était supérieur à celui des parcelles cultivées en blé non irrigué. Quant au sol de Batilly-en-Gâtinais dont le précédent est aussi un blé irrigué mais qui est beaucoup plus épais que celui de Trancrainville, la proximité du stock maximum s'explique à la fois par le précédent cultural comme à Trancrainville et par un bilan P-ETP largement positif dès le début du mois d'octobre alors que ce n'était pas le cas à Trancrainville et Villamblain.

Les stocks d'eau augmentent ensuite faiblement jusqu'à la fin du mois de janvier (Figure 5). Cette augmentation du stock d'eau traduit vraisemblablement une lente réhumectation du sol dans «sa masse». Ainsi, même si de l'eau s'é-

coule à la base, contribuant ainsi à l'infiltration efficace, cela ne signifie pas pour autant que le sol ait atteint son maximum de réhumectation. A partir de la fin du mois de janvier, les stocks d'eau semblent être stables aux faibles variations près apparaissant sur les courbes. Enfin, ces stocks décroissent à partir de la fin mars, date à partir de laquelle le bilan climatique (P-ETP) devient négatif. Cette diminution de stock est néanmoins plus faible à Batilly-en-Gâtinais en raison de l'absence de végétation, la parcelle étant en jachère nue durant la période du suivi hydrique.

Il est difficile de fixer avec précision une date à partir de laquelle on peut considérer que la réserve du sol est reconstituée et que l'on entre dans une période de régime de pluies dites «efficaces». Pour l'année climatique étudiée, la réserve en eau maximale du sol était reconstituée à la fin du mois de janvier, mais cela n'implique absolument pas qu'il n'y ait pas eu d'écoulement vers la nappe durant la période précédente. La mise en évidence (comme nous le verrons dans le paragraphe suivant) de phase d'infiltration efficace bien avant la fin du mois de janvier est un argument supplémentaire en faveur de l'existence d'écoulements vers la nappe avant que la teneur en eau maximale du sol ne soit atteinte.

Variation de la lame d'eau infiltrée

En l'absence de ruissellement, d'irrigation et de flux d'eau ascendant à la base du volume de sol pris en compte durant la période de suivi, le bilan hydrique appliqué à un volume de sol entre deux instants i et $i+1$ s'écrit :

$$S_{i+1} - S_i = P - E - I_e \quad [1]$$

avec :

S_{i+1} : stock d'eau (mm) au temps $i+1$

S_i : stock d'eau (mm) au temps i

P : pluie (mm) entre i et $i+1$

E : évaporation et évapotranspiration réelle (mm) entre i et $i+1$

I_e : infiltration efficace ou flux vertical descendant (mm) entre i et $i+1$

En posant $(S_{i+1} - S_i) = S$ = différence de stock (mm), le terme infiltration efficace, I_e , s'écrit alors :

$$I_e = P - E - S \quad [2].$$

En l'absence de données précises pour E , nous avons calculé l'infiltration efficace selon trois hypothèses en utilisant E égal à ETP, $0,8 \times$ ETP et

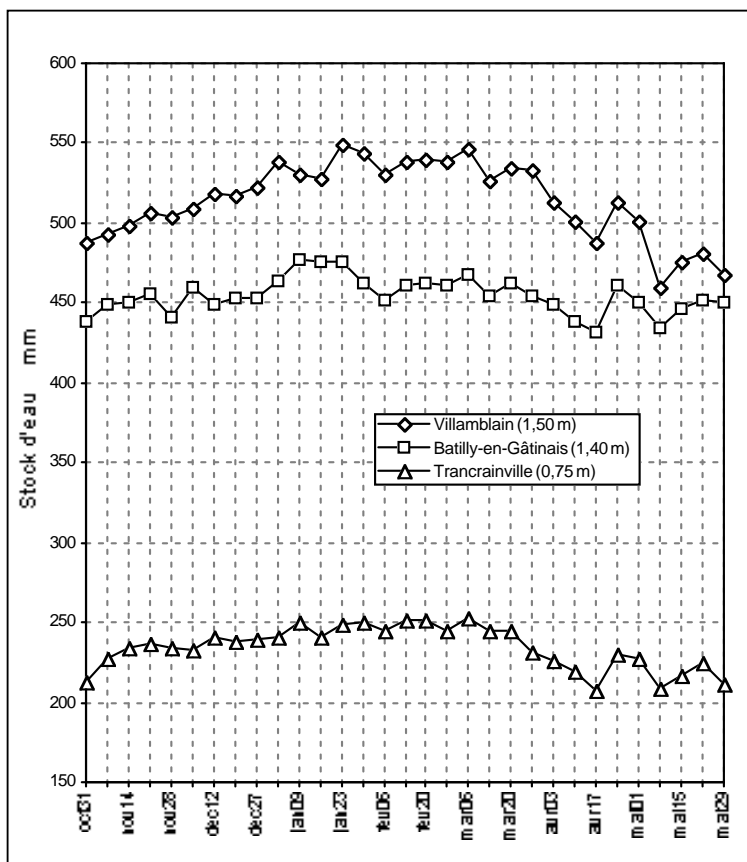
Tableau 3 : Somme des pluies (P), évapotranspiration potentielle (ETP) et bilan P-ETP pour différentes stations météorologiques de Beauce (période du 31/10/1994 au 29/05/1995, données Météorologie Nationale).

Table 3 : Sum of rainfalls (P), potential evapotranspiration (ETP) and difference P-ETP for different meteorological stations of Beauce (from 31/10/1994 until 29/05/1995, after the National Meteorology).

	P	ETP	P-ETP
Baccon	544	-	-
Beaune-la-Rolande	502	280	222
Bricy	466	285	181
Châteaudun	468	272	196
Intville-la-Guétard	517	-	-
Patay	478	-	-
Pithiviers-le-Vieil	460	252	208
Poinville	424	258	166
Trinay	466	226	240

Figure 5 : Evolution du stock d'eau total des sols des sites de Trancrainville, Villamblain et Batilly-en-Gâtinais.

Figure 5 : Change in the soil water storage for the sites of Trancrainville, Villamblain and Batilly-en-Gâtinais.



0,6 x ETP. Les suivis de teneur en eau ont concerné le sol sur une épaisseur de 0,70 m à Trancrainville, 1,50 m à Villamblain et 1,40 m à Batilly-en-Gâtinais.

L'infiltration efficace ne débute nettement ($le > 5$ mm) que lors de la semaine du 5 au 12 décembre à Trancrainville et Villamblain alors qu'elle a déjà débuté dès la semaine du 31 octobre au 7 novembre à Batilly-en-Gâtinais (figure 6).

Pour la période étudiée (31/10/94 au 29/05/95), la lame d'eau infiltrée calculée avec $E = ETP$ est de 149 mm à Trancrainville, 188 mm à Villamblain et 225 mm à Batilly-en-Gâtinais (Figure 6). Avec $E = 0,6 \times ETP$, cette lame d'eau infiltrée est de 204 mm à Trancrainville, 259 mm à Villamblain et de 298 mm à Batilly-en-Gâtinais.

La lame d'eau infiltrée croît par conséquent dans le sens Trancrainville, Villamblain, Batilly-en-Gâtinais (d'environ 50% supérieure à celle de Trancrainville) et cette différence s'explique essentiellement par des variations de P entre les trois sites, puisque les sols étaient largement réhumectés au 31 octobre 1994. Rappelons en effet que pour la période allant du 31/10/94 au 29/05/95, la hauteur des pluies est, à Villamblain et Batilly-en-Gâtinais, respectivement 17% et 33% supérieure à celle de Trancrainville. Quant aux valeurs de ETP, elles sont en revanche proches entre les trois sites étudiés.

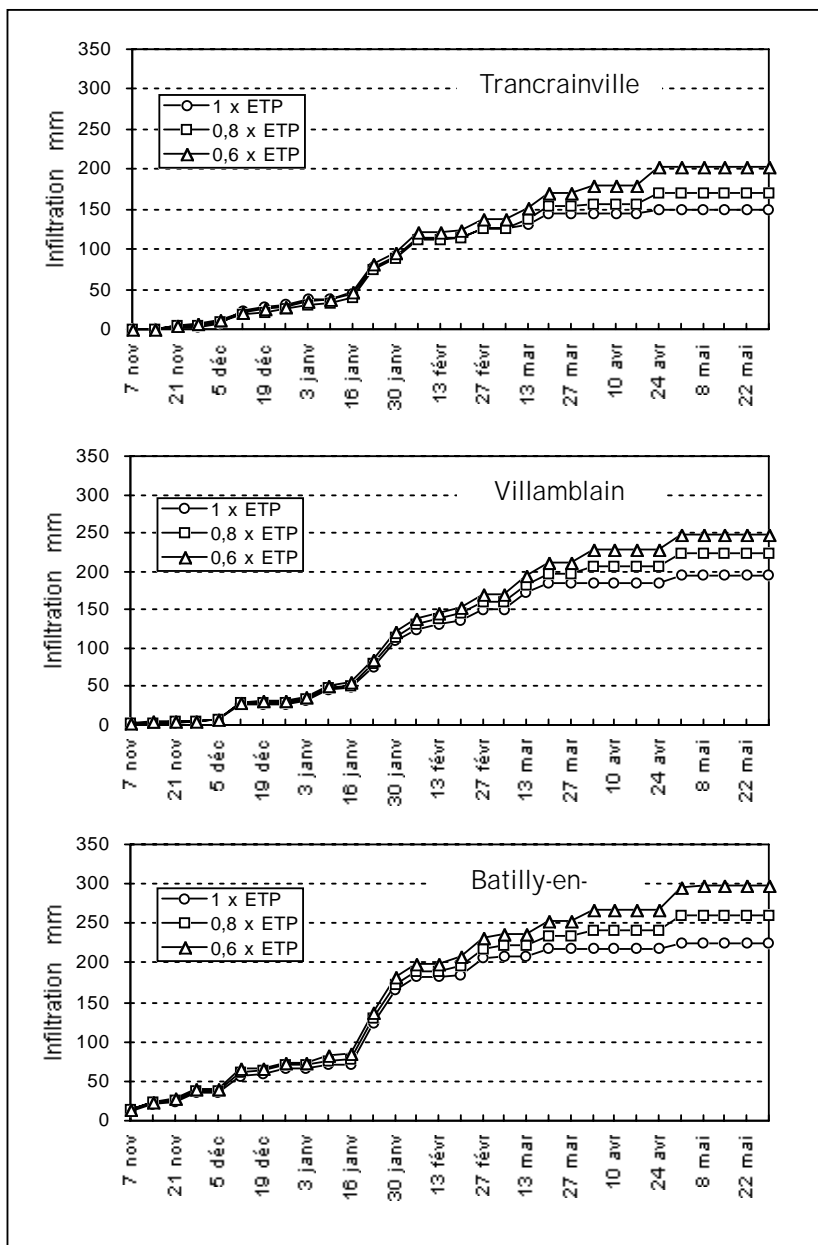
Variations de niveau piézométrique

Pour la période allant du 31/10/94 au 29/05/95, la variation de niveau piézométrique est de 0,77 m à Trancrainville, de 2,09 m à Villamblain et de 2,77 m à Batilly-en-Gâtinais (Figure 7). La différence de niveau piézométrique varie donc comme la hauteur de la lame d'eau infiltrée. Elle croît dans le sens Trancrainville, Villamblain, Batilly-en-Gâtinais.

Si l'on examine les enregistrements

Figure 6 : Variation de l'infiltration efficace cumulée pour les sites de Trancrainville, Villamblain et Batilly-en-Gâtinais avec ETP, 0,8xETP et 0,6xETP (période du 31/10/1994 au 29/05/95).

Figure 6 : Variation in the cumulated effective infiltration for the sites of Trancrainville, Villamblain and Batilly-en-Gâtinais with ETP, 0.8xETP and 0.6xETP (from 31/10/1994 to 29/05/95).



sur une période plus longue (septembre 1994 à septembre 1995, Figure 7), on note qu'à Villamblain et Batilly-en-Gâtinais, la remontée du niveau piézométrique est achevée ou quasi achevée quand l'irrigation débute en juin. Henry (1996) a d'ailleurs montré que le temps moyen de transfert dans la zone non saturée serait de l'ordre de

quelques mois à Epieds-en-Beauce et Batilly-en-Gâtinais. La variation de niveau piézométrique attribuable à l'infiltration efficace est donc appréciée par différence entre le niveau de hautes eaux et le point d'inflexion de la courbe qui matérialise une accélération nette de la remontée ; cette variation de niveau piézométrique est alors estimée à 2,05 m à Villamblain et 2,70 m à Batilly-en-Gâtinais. A noter que la tendance à la remontée au cours de l'automne est liée à un rééquilibrage local de la nappe (apports latéraux) consécutif à l'abaissement localisé de la nappe suite aux prélèvements du printemps et de l'été 1994 et qu'il est difficile de distinguer l'influence des premières infiltrations efficaces (figures 8b et c).

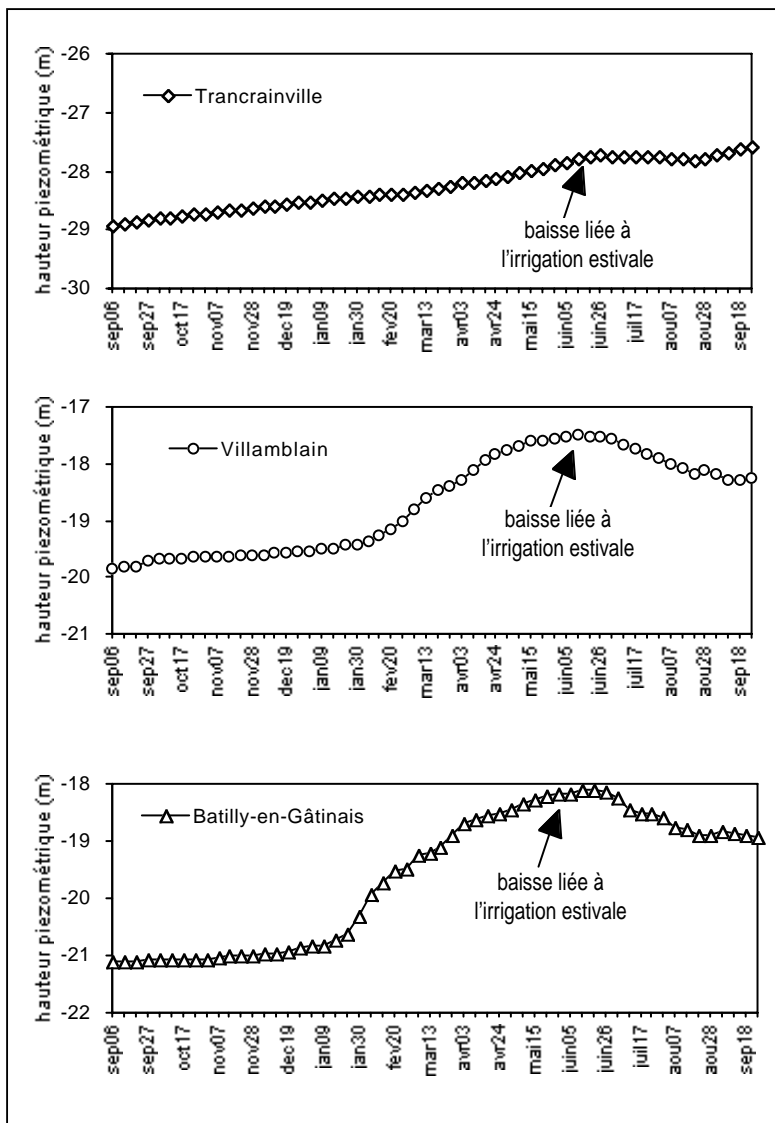
Pour Trancrainville, la forte inertie de l'aquifère fait que la recharge est fortement décalée dans le temps (Henry, 1996) et que l'on enregistre toujours celle de l'hiver précédent quand on observe une accélération de la remontée fin mars 1995 due à la recharge de l'hiver 1994-1995 (figures 7 et 8a). Le temps moyen de transfert dans la zone non saturée serait de l'ordre de l'année (Henry, 1996). L'estimation de la variation de niveau piézométrique attribuable à l'infiltration efficace de l'hiver 1994-1995 est appréciée sur une chronique longue : elle est d'environ 1,50 m, si l'on considère que le niveau de hautes eaux est atteint début 1996 (Figure 2a).

Des différences de porosité efficace au niveau de la zone non saturée directement susjacent à la nappe, ainsi que la position de chaque piézomètre par rapport aux crêtes piézométriques et aux exutoires, pourraient expliquer les variations enregistrées entre les trois sites. Farah et Lepiller (1996) ont d'ailleurs montré que la vidange s'accélère avec l'augmentation du niveau piézométrique et qu'il existe une étroite corrélation entre le niveau de la nappe et le débit des rivières exutoires. Les données dont nous disposons indiquent que de telles différences seraient faibles entre les trois sites et qu'elles ne pourraient être responsables des différences de variation de niveau piézométrique enregistrées.

Même si les différences de porosité effi-

Figure 7 : Variations des hauteurs piézométriques de septembre 1994 à septembre 1995 pour les 3 piézomètres étudiés.

Figure 7 : Variation in the groundwater level from September 1994 until September 1995 for the 3 studied piezometers.



cace et de position par rapport aux crêtes piézométriques et aux exutoires ne peuvent être écartées pour expliquer les variations de niveau piézométrique enregistrées pour chaque site, elles ne peuvent à elles seules les expliquer. Les variations de hauteur des pluies seraient par conséquent en grande partie à l'origine des différences enregistrées (Figure 8). Quant au rôle du sol, nous avons vu plus haut que, pour l'année considérée, il avait peu influencé l'infiltration efficace. Concernant le rôle du sol, notons que bien que l'on ait pris la précaution d'étudier des sols représentatifs de l'environnement de chaque piézomètre, une grande incertitude demeure quant à la taille de la zone à prendre en compte autour de

chaque piézomètre pour rendre compte de son fonctionnement.

Nature et état hydrique du sol

Pour caractériser l'aptitude des sols à différer la date de début de l'infiltration efficace (en l'absence d'irrigation de la culture précédente et de pluies au début de l'automne), nous pouvons faire l'hypothèse que pour chaque site étudié les stocks d'eau sont à leur minimum au début de l'automne. Dans ce cas, le calcul du bilan hydrique s'écrit :

$$S_{i+1} = S_i + P - E \quad [3]$$

Si S_{i+1} est supérieur au stock correspondant au stock maximum (S_{max}), il apparaît un terme d'infiltration efficace (le) tel que :

$$S_{i+1} - S_{max} = le \quad [4]$$

Si $S_{i+1} < S_{max}$, alors on calcule S_{i+2} à l'aide de la relation [3] et on le compare à S_{max} comme précédemment.

Pour initialiser le calcul à l'automne, le stock a été considéré comme étant à son minimum (S_{min}). Le calcul du stock a alors consisté à considérer $E = ETP$ et à cumuler les valeurs hebdomadaires $P-ETP$ en ayant commencé à S_{min} . Dès lors que :

$$S_{min} + \sum_0^i (P-ETP) > S_{max} \quad [5]$$

il apparaît un terme d'infiltration efficace (le) dans le bilan tel que :

$$le = S_{min} + \sum (P-ETP) - S_{max} \quad [6]$$

La lame d'eau infiltrée est obtenue en cumulant les valeurs de le calculées pour les semaines où la condition décrite par la relation [5] est réalisée.

La différence $S_{max} - S_{min}$ correspond à la capacité de stockage potentielle, c'est-à-dire à l'aptitude maximale du sol à différer l'apparition d'une lame d'eau infiltrée vers la nappe. Cette différence

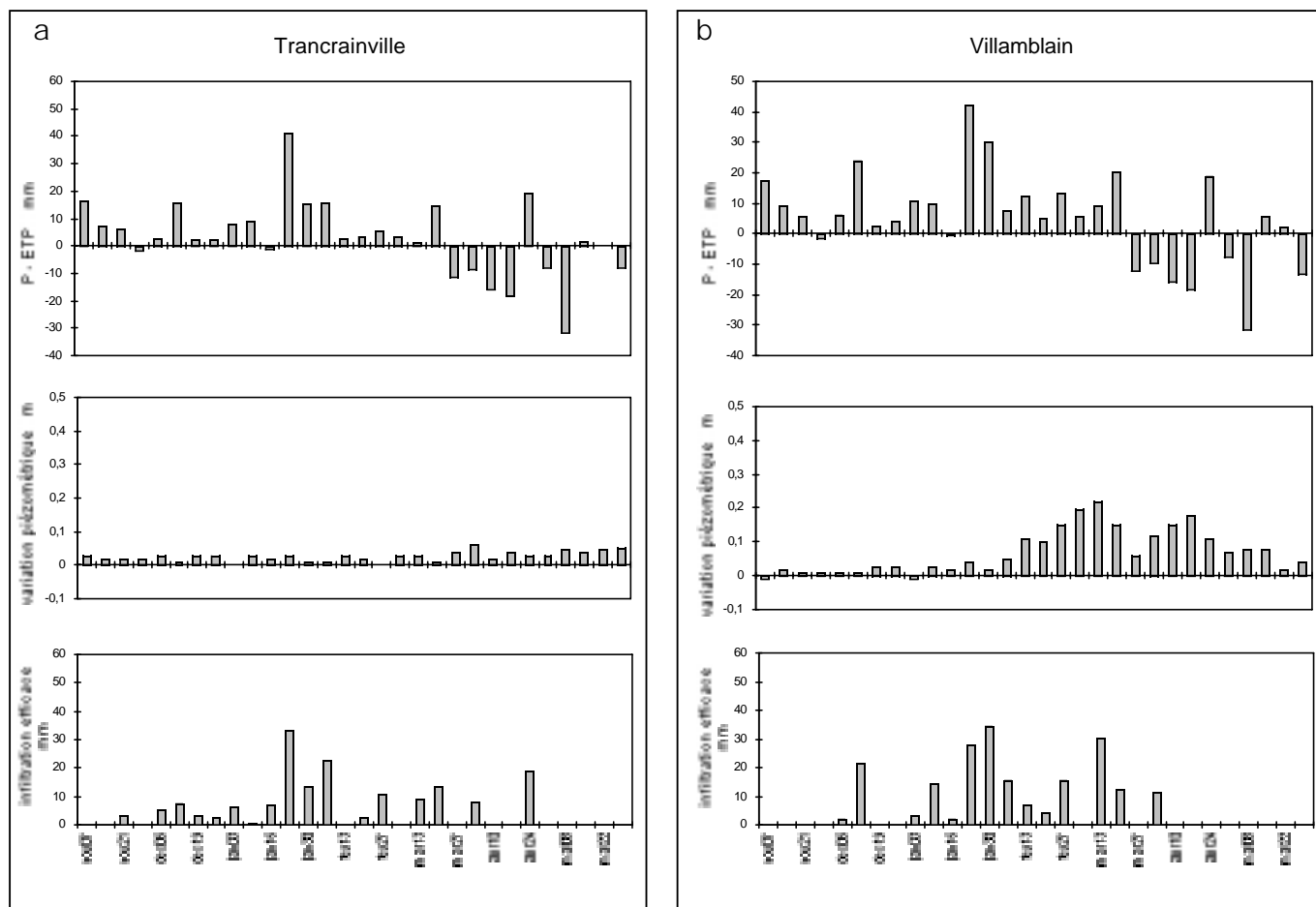
Tableau 4 : Calcul de la capacité potentielle de stockage des sols.

Table 4 : Calculation of the potential water storage capacity of the soils.

Sols et horizons	Prof. cm	Teneur en eau maximale θ_{max} $cm^3 cm^{-3}$ a	Teneur en eau minimale			Capacité potentielle de stockage en eau $mm cm^{-1}$ e = 10 x (a - d)	Epaisseur des horizons cm f	Capacité potentielle de stockage en eau des horizons mm e x f
			W_{min} $g^1 g^{-1}$ b	Da c	θ_{min} $cm^3 cm^{-3}$ d = b x c			
Trancrainville								
L	0-30	0,333	0,128	1,40	0,179	1,54	30	46,2
S1	30-50	0,363	0,130	1,52	0,198	1,65	20	33,0
S2	50-75	0,356	0,137	1,50	0,206	1,50	25	37,5
							Total	116,7
Villamblain								
L	0-30	0,342	0,146	1,35	0,197	1,45	30	43,5
Sca	30-50	0,335	0,155	1,40	0,217	1,18	20	23,5
C1	50-90	0,273	0,078	1,51	0,118	1,55	40	62,0
C2	90-150	0,261	0,072	1,50	0,108	1,53	60	91,8
							Total	220,8
Batilly-en-Gâtinais								
L	0-30	0,376	0,210	1,20	0,252	1,24	30	37,1
Sca	30-55	0,426	0,183	1,43	0,262	1,64	25	41,0
Mm	55-140	0,371	0,162	1,68	0,272	0,99	85	84,2
							Total	162,3

Figure 8 : Bilan P - ETP, variation de niveau piézométrique et infiltration efficace (calculée avec $E = ETP$) au pas de temps hebdomadaire (période du 31/10/1994 au 29/05/1995) pour les sites de Trancrainville (a), Villamblain (b) et Batilly-en-Gâtinais (c).

Figure 8 : Weekly P-ETP balance, piezometric fluctuation and effective infiltration (calculated with $E = ETP$) for the sites of Trancrainville (a), Villamblain (b) and Batilly-en-Gâtinais (c) (from 31/10/1994 to 29/05/1995).

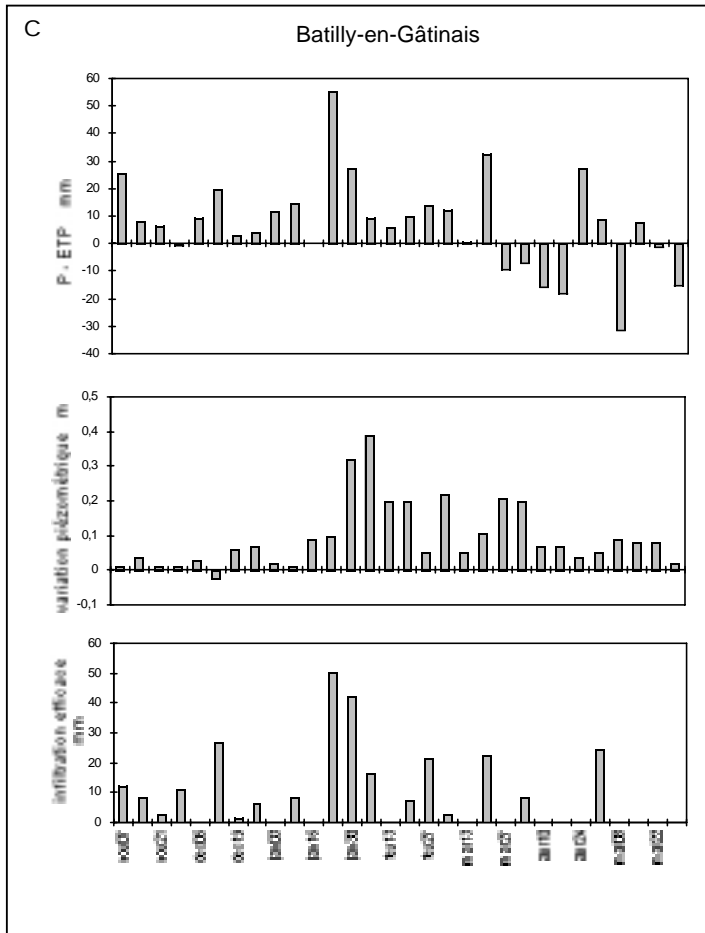


de stock a été calculée en faisant la différence pour chaque sol entre le stock maximum mesuré lors du suivi hydrométrique et le stock minimum déduit des teneurs en eau mesurées sur mottes à un potentiel de l'eau de -15 000 hPa ($pF=4,2$) (Tableau 4). Il s'agit là d'un cas extrême car une telle valeur de potentiel de l'eau n'est que rarement atteinte sur toute l'épaisseur du sol, même en l'absence d'irrigation. Néanmoins, la prise en compte de cette limite permettra de comparer les sols en se référant à un même état de dessiccation.

Si l'on considère les épaisseurs étudiées pour chaque site, la capacité de stockage potentielle est de 117 mm à Trancrainville (0,75 m), de 221 mm à Villamblain (1,50 m) et de 162 mm à Batilly-en-Gâtinais (1,40 m) (Tableau 4). A Trancrainville, on peut aisément admettre que l'ensemble du sol est affecté par les prélèvements racinaires en raison de sa faible épaisseur. A Villamblain, les mesures de teneur en eau

effectuées en été et à l'automne après une culture de blé ont montré que les prélèvements d'eau par les plantes affectaient les horizons C jusqu'à une profondeur d'environ 1,50 m (Darthout et al., 1996 et 1997) et ceci bien que la densité racinaire soit généralement très faible dans de tels horizons (Nicoulaud et al., 1995). Pour le sol de Batilly-en-Gâtinais, les profils racinaires réalisés par Nicoulaud et al. (1994) sur des sols analogues indiquent, ainsi que nous l'avons déjà discuté plus haut, que l'on peut prendre en compte une épaisseur voisine de celle prise en compte à Villamblain.

Pour chaque site, le calcul de l'infiltration efficace a été effectué ensuite en considérant que les trois sols étudiés pouvaient être rencontrés et en commençant le calcul le 01/10/1994, de façon à prendre en compte l'ensemble de la période où l'on observe des valeurs de P-ETP positives au pas de temps hebdomadaire. La date de début de l'infiltration effi-



cace et la hauteur cumulée de la lame d'eau infiltrée ainsi calculées sont reportées dans le tableau 5. Ces résultats montrent que dès lors que les sols sont largement desséchés à l'issue de la période estivale, ils peuvent être à l'origine de très importantes variations d'infiltration efficace au sein d'un même site. Sur la base des hypothèses faites, on enregistre alors entre les trois sites une variation de un ordre de grandeur de l'infiltration efficace et un décalage d'environ deux mois de la date de début de l'infiltration efficace, et ceci en combinant seulement les sols et les hauteurs de pluies propres à chaque site (Tableau 5).

CONCLUSION

Les sols des trois sites étudiés possèdent des capacités de stockage potentielles de l'eau très différentes, mais ces différences ne sont que peu intervenues durant l'hiver et le printemps 1994 - 1995. La capacité de stockage des sols au 31 octobre 1994 était en effet du même ordre de grandeur entre les trois sites en raison des pratiques d'irrigation et des premières pluies d'automne. En l'absence de différence de capacité de stockage, l'infiltration efficace a

Tableau 5 : Hauteur de l'infiltration efficace calculée par la méthode du bilan hydrique en considérant que le stock d'eau des sols est au minimum au 01/10/1994.

Table 5 : Effective infiltration calculated using the hydric balance method and assuming the soil water storage at its minimum value on the 01/10/1994.

	Date de début de l'infiltration efficace Entre le :	Hauteur de la lame d'eau drainée
Site de Trancrainville		
- sol type Trancrainville	16/01 et le 23/01	145 mm
- sol type Villamblain	20/02 et le 27/02	41 mm
- sol type Batilly-en-Gâtinais	23/01 et le 30/01	100 mm
Site de Villamblain		
- sol type Trancrainville	16/01 et le 23/01	118 mm
- sol type Villamblain	13/03 et le 20/03	14 mm
- sol type Batilly-en-Gâtinais	23/01 et le 30/01	73 mm
Site de Batilly-en-Gâtinais		
- sol type Trancrainville	27/12 et le 03/01	181 mm
- sol type Villamblain	30/01 et le 06/02	81 mm
- sol type Batilly-en-Gâtinais	16/01 et le 23/01	144 mm

essentiellement varié comme les hauteurs des pluies et ces dernières sont apparues être le premier facteur expliquant les fluctuations de niveau piézométrique. Cette faible importance du facteur sol est liée à l'histoire culturale des sols durant les mois qui ont précédé la période pendant laquelle la teneur en eau des sols a été suivie. En effet, le sol qui possède la capacité à stocker l'eau la plus élevée ayant été cultivé en maïs irrigué en 1994, il était déjà très largement réhumecté au début du suivi hydrique.

Les pratiques d'irrigation s'étant considérablement développées durant les dix dernières années, une proportion importante de la surface cultivée est aujourd'hui affectée par ces pratiques et l'on ne peut en aucun cas considérer que la couverture de sol est dans le même état hydrique quels que soient le mode d'occupation du sol et les pratiques d'irrigation. De façon plus générale, l'irrigation a considérablement modifié le cycle de l'eau à l'échelle du système hydrologique que représente la nappe phréatique de Beauce. Les mesures effectuées par la DIREN Centre montrent clairement que prélèvements printaniers et estivaux pour l'irrigation affectent très nettement les niveaux piézométriques. Les résultats présentés dans cette étude montrent que les pratiques d'irrigation influencent aussi le stock d'eau présent dans les sols en automne, et que cette influence a vraisemblablement été sous-estimée jusqu'alors. Ces résultats rejoignent ceux obtenus par Chéry (1995) et Ould Mohamed et al. (1997b) lors d'une étude prenant en compte la variabilité climatique interannuelle. Enfin, ces résultats suggèrent que la nature du précédent cultural, en particulier les pratiques d'irrigation, pourraient influencer davantage l'infiltration efficace durant l'hiver et le printemps que ne l'influence la culture en place durant cette même période.

Les résultats révèlent aussi que les variations de hauteur des pluies seraient plus élevées qu'on le considère généralement pour la Beauce et qu'elles expliqueraient, à elles seules, une part importante de la variabilité d'amplitude des fluctuations piézométriques observées en Beauce. Une grande imprécision demeure néanmoins pour la lame d'eau évaporée, les coefficients nécessaires au passage de ETP à une estimation de cette lame d'eau n'étant connus que très approximativement.

Plus généralement, il résulte de cette étude que toute tentative de meilleure maîtrise des entrées dans un modèle de fonctionnement de la nappe de Beauce devra mieux prendre en compte que par le passé (i) les caractéristiques du sol pour ce qu'elles induisent comme variation de capacité de stockage, (ii) les pratiques culturales pour ce qu'elles induisent comme variation de stock d'eau dans les sols en automne et (iii) la hauteur des pluies qui varient de façon tout à fait significative en Beauce.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Messieurs J. Margat (BRGM Orléans) et P. Mérot (INRA Rennes) pour leurs critiques constructives sur le manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 1995 - Référentiel Pédologique. INRA éd., Paris.
- Ailliot B., Verbèqne B., 1995 - Les terres de Beauce. Typologie des sols. Chambres d'Agriculture de l'Eure-et-Loir, du Loiret et du Loir-et-Cher éd., 52 p.
- Atlas Agroclimatique d'Eure-et-Loir, 1988 - Direction de la Météorologie Nationale éd., Paris, 95 p.
- Bertuzzi P., Bruckler L., Gros C., 1987 - Régression linéaire avec erreur sur les variables : Application à l'étalonnage d'un gammadensimètre à transmission et d'un humidimètre à neutrons. *Agronomie*, 7(7), 507-515.
- Bodelle J., Margat J., 1980 - L'eau souterraine en France. Masson éd., Paris.
- Bourennane H., King D., Chéry P., Bruand A., 1996 - Improving the kriging of soil variable using slope gradient as external drift. *European Journal of Soil Science*, 47, 473-483.
- BRGM, 1995 - Piézométrie du système aquifère de Beauce. Basses eaux 1994. Rapport BRGM R 38572, 33 p.
- BRGM - DIREN, 1996 - Réseau Piézométrique de la Région Centre (Situation 1995), Rapport BRGM R 38919, 200 p.
- BRGM-DIREN, 1997 - Réseau piézométrique de la Région Centre. Situation 1996. Rapport BRGM R 39342, 231 p.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., 1996 - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 27-40.
- Bruand A., Duval O., Isambert M., Courtemanche P., 1993 - Site expérimental de Villamblain (Beauce). Contrat de recherche INRA n° 2326 B. Janv. 1993. 80 p.
- Chéry P., 1995 - Variabilité de l'épaisseur de la couverture de sol. Conséquences pour le bilan hydrique hivernal d'un secteur de Petite Beauce. Thèse de Doctorat Univ. Nancy I. 253 p.
- Couchat Ph., 1974 - Mesure neutronique de l'humidité des sols. Thèse d'Etat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 123 p.
- CPCS, 1967 - Classification des sols. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. INRA. 96 p.
- Creuzot G., Brunson F., Grave R., 1997 - Variations piézométriques de la nappe des calcaires de Beauce 1996. Rapport DIREN Centre, SEMA, 86 p.
- Darthout R., Nicoulaud B., Courtemanche P., Raison L., Duval O., Bruand A., 1994 - Rapport intermédiaire, 01/1993-01/1994. Site expérimental de Villamblain (Beauce). Contrat de recherche INRA n° 2326 B. Fév. 1994. 29 p.
- Darthout R., Nicoulaud B., Courtemanche P., Raison L., Duval O., Bruand A., 1995 - Rapport intermédiaire, 01/1994-01/1995. Site expérimental de Villamblain (Beauce). Contrat de recherche INRA n° 2326 B. janvier 1995, Orléans, 52 p.
- Darthout R., Nicoulaud B., Courtemanche P., Raison L., Duval O., Bruand A., 1996 - Rapport intermédiaire, 10/1994-10/1995 - Site expérimental de Villamblain (Beauce). Contrat de recherche INRA n° 2326 B. mai 1996, Orléans, 47 p.
- Darthout R., Nicoulaud B., Courtemanche P., Raison L., Duval O., Bruand A., 1997 - Rapport intermédiaire, 10/1995-10/1996 - Site expérimental de Villamblain (Beauce). Contrat de recherche INRA n° 2326 B. mars 1997, Orléans, 35 p.
- Desprez N., 1973 - L'hydrogéologie des formations lacustres en Beauce et en Sologne. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 60-67.
- Desprez N., Ménégnien C., 1975 - Atlas hydrogéologique de la Beauce. Rapport BRGM, 73 p.
- FAO, 1974 - Soil map of the world. Vol. 1. Legend. Unesco, Paris.
- Farah A., Lepiller M., 1996 - Synthèse sur les assèchements de rivières du bassin de la Seine et de la Loire issues de la formation des calcaires de Beauce. Laboratoire d'Hydrogéologie, Univ. Orléans, 74 p.
- Henry A., 1996 - Etude des relations entre les pluies efficaces et les variations piézométriques de la nappe de Beauce. Mémoire Université de Franche-Comté, Besançon, 41 p.
- Lallemand-Barrès A., Landreau A., Margat J., Roussel P., 1985 - Teneurs en nitrates des nappes phréatiques de la France. Etat 1983. Carte à 1/1 500 000 et notice explicative. Ministère de l'Environnement, Rapport BRGM 85 SGN 442 EAU, 18 p.
- Lallemand-Barrès A., Debuissou J., Landreau A., Margat J., Roussel P., 1987 - Teneurs en nitrates des nappes phréatiques de la France. Etat des connaissances - 2ème édition 1986. Carte à 1/1 500 000 et notice explicative. Ministère de l'Environnement, Rapport BRGM 87 SGN 237 EAU, 15 p.
- Lallemand-Barrès A., Leteur M., Roux J.C., 1994 - Teneurs en nitrates des eaux souterraines en France. Etat des connaissances en 1993. Carte à 1/1 500 000 et notice explicative. Ministère de l'Environnement, BRGM éd., 12 p.

- Landreau A., Lemoine B., 1977 - Carte de la qualité chimique des eaux souterraines de France. Carte et notice explicative. Rapport BRGM 77 SGN 606 HYD, 12 p.
- Landreau A., Morisot A., 1983 - Evaluation de la vulnérabilité des aquifères libres aux nitrates d'origine agricole. Cartes à 1 / 1 500 000 et notice explicative, Rapport BRGM 83SGN 026, 70 p.
- Louvrier M., Margat J., 1983 - Précipitations efficaces annuelles en France (1946-1976). Carte à 1/1 500 000 et notice explicative. Rapport BRGM 83 SGN 003 EAU, 40 p.
- Mégnien C., 1979 - Hydrogéologie de la Beauce. Mémoire BRGM 98, 144-149.
- Météorologie Nationale, 1988 - Précipitations en France. Cartes des précipitations en France (moyenne annuelle et moyennes mensuelles, 1951-1980). Direction de la Météorologie Nationale, 2ème édition, IGN éd., Paris.
- Mori A., 1982 - Notices explicatives de la carte des sols de France affectées par l'hydromorphie et de la carte des réserves en eau utile des sols de France (échelle 1 / 2 000 000). INRA, Paris, 54 p.
- Nicoullaud B., Darthout R., Duval O., 1995 - Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce. *Etude et Gestion des Sols*, 2(3), 183-200.
- Nicoullaud B., King D., Tardieu F., 1994 - Vertical distribution of maize roots in relation to permanent soil characteristics. *Plant and Soil*, 159 (2), 245-254.
- Ould-Mohamed S., 1991 - Prise en compte de l'organisation du sol dans l'étude des transferts d'eau et de solutés. Apport à la compréhension des transferts de nitrates dans le bassin de Villamblain (Beauce). DEA de Pédologie. 56 p.
- Ould-Mohamed S., 1995 - Etude du fonctionnement hydrique hivernal d'un sol limono-argileux de petite Beauce. Application d'un modèle d'infiltration et incidence sur la lixiviation du nitrate. Thèse de Doctorat Univ. Orléans. 196 p.
- Ould-Mohamed S., Bertuzzi P., Bruand A., Raison L., Bruckler L., 1997a - Field evaluation and error analysis of soil water content using capacitance and neutron probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 888-894.
- Ould-Mohamed S., Bruand A., 1994 - Morphology and origin of secondary calcite in soils from Beauce (France). In: A.J. Ringrose-Voase and G.S. Humphreys (Editors), *Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis*. Proc. IX Int. Working Meeting on Soil Micromorphology, Townsville, Australia, July 1992. *Developments in Soil Science* 22, Elsevier, Amsterdam, 25-36.
- Ould-Mohamed S., Bruand A., Bertuzzi P., Bruckler L., Guillet B., Raison L., 1997b - Estimating long-term drainage at a regional scale using a deterministic approach. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 1473-1482.
- Stengel P., Gabilly Y., Bertuzzi P., Brifault A., 1986 - La double sonde gamma LPC-INRA. Définition, expérimentation et utilisation en agronomie. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 109-120.
- Trawinsky C., 1996 - Introduction à l'étude du déphasage entre les pluies efficaces et les variations piézométriques de la nappe de Beauce, Rapport Université Orléans.
- Roche P.A., Thierry D., 1984 - Simulation globale de bassins hydrologiques. Introduction à la modélisation et description du modèle GARDENIA. Rapport BRGM 84 SGN 337 EAU, décembre 1984.
- Schnebelen N., 1995 - Modélisation du transfert de nitrates vers l'aquifère des calcaires de Beauce : Site expérimental de Villamblain. DEA National d'Hydrologie, 52 p.
- Thierry D., Seguin J.J., 1986 - Un modèle hydrologique global de transfert de nitrates dans un bassin versant. Application aux sources de Provins et à la nappe de la Beauce à Pithiviers. *Hydrogéologie*, 1, 87-99.