Document généré le 12 oct. 2024 04:32

Revue des sciences de l'eau
Journal of Water Science

Étude expérimentale des transferts d'eau provoqués par l'irrigation sur une parcelle en moyenne vallée du fleuve Sénégal

Experimental study of water transfer induced by irrigation over a plot in the middle of the Senegal river valley

E. H.B. Diaw, P. Ackerer, P. Boivin, F. Laval et J. L. Maeght

Volume 15, numéro 4, 2002

URI : https://id.erudit.org/iderudit/705477ar
DOI : https://doi.org/10.7202/705477ar

Aller au sommaire du numéro

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)
1718-8598 (numérique)

Découvrir la revue

Citer cet article

Diaw, E. H., Ackerer, P., Boivin, P., Laval, F. & Maeght, J. L. (2002). Étude expérimentale des transferts d'eau provoqués par l'irrigation sur une parcelle en moyenne vallée du fleuve Sénégal. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, *15*(4), 721–736. https://doi.org/10.7202/705477ar

Résumé de l'article

Alors que l'irrigation paraît être le recours essentiel face aux besoins croissants de la population mondiale en céréales, la dégradation des sols et des eaux annihile presque totalement les efforts d'aménagement. Aussi l'étude de la dégradation des sols dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal constitue l'un des quatre objectifs du pôle de recherches sur les systèmes irrigués sahéliens qui regroupe quatre pays dont le Mali, la Mauritanie, le Niger et le Sénégal. Le suivi de l'évolution des eaux et des sols sous culture apparaît indispensable pour garantir une agriculture irriguée rentable et durable dans la zone. Dans cette région, les risques de dégradation des sols font suite à l'effet de deux processus de dégradation que sont l'alcalinisation et la salinisation des sols. Ces types de dégradation sont fortement corrélés à la remontée des nappes d'eaux souterraines. Dans cet article, l'étude des transferts d'eau dans les parcelles irriguées par le biais d'un suivi expérimental " in situ " met en évidence les relations existantes entre les eaux d'irrigation et les mouvements de la nappe. L'étude a permis une meilleure compréhension de la dynamique hydrique au sein de la parcelle : saturation du profil et processus de recharge de la nappe. Elle a également permis de montrer que les échanges avec la nappe pendant la période d'irrigation sont négligeables. Cette pratique de la riziculture inondée, entraîne une variation de stock importante qui représente plus de 40% des apports et qui se traduit par une remontée de nappe de près de 2 mètres.

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau, 2002

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne.

https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche.

https://www.erudit.org/fr/

REVUE DES SCIENCES DE L'EAU, Rev. Sci. Eau 15/4(2002) 721-736

Étude expérimentale des transferts d'eau provoqués par l'irrigation sur une parcelle en moyenne vallée du fleuve Sénégal

Experimental study of water transfer induced by irrigation over a plot in the middle of the Senegal river valley

EL H.B. DIAW [1], P. ACKERER * [2], P. BOIVIN [3], F. LAVAL [4], J.-L. MAEGHT [5]

Reçu le 21 juillet 2000, accepté le 8 octobre 2002**.

SUMMARY

Whereas irrigation appears to be the main approach to satisfy the growing worldwide demand for cereal, soil and water degradation continues to be an on-going problem in agriculture development. One of the main four concerns of the regional group for research on Sahelian irrigated systems (including Mali, Mauritania, Niger and Senegal) is soil degradation in the middle Senegal River valley. These soils are subject to various forms of degradation, mainly from salinisation and/or alkalinisation. These degradation processes are strongly correlated with water table dynamics, with water level fluctuations being significant. Therefore, to guarantee sustainable development of irrigated agriculture in the area, irrigation must be coupled with complete and permanent monitoring of soil and water quality.

In this paper, we present a complete study concerning water transfer in irrigated plots and its effects on the groundwater table. The experimental site is located in the Podor region, at 16° 37'N, 14° 52'W in the Donaye irrigated area. The surface area is about 50 ha. Water supply is assured by filling a main channel using a group of pumps on the Doué River. Irrigation of the parcels is performed with siphons from this channel. The experimental plot of 0.33 ha is used for an underwater rice crop. One or two rice crop production harvests are made every year, with the decision been taken by the farmers. There is no drainage system in the area.

1. Université Cheikh Anta Diop, École supérieure polytechnique (ESP), département de génie civil, BP A10 THIES-Sénégal.
2. Institut de mécanique des fluides et des solides, UMR CNRS Université Louis Pasteur 7507, 2, rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France.
3. Institut d'aménagement des terres et des eaux – Pédologie, École polytechnique fédérale de Lausanne CH-1015 Lausanne, Suisse.
4. CEDRAT Développement 10, chemin de Pré Carré, 38246 Meylan, France.
5. Institut de recherche pour le développement (IRD) BP 1386, Dakar, Sénégal.

* Correspondance. E-mail : ackerer@imfso.u-strasbg.fr

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 juillet 2003.

The experimental plot was equipped with 8 piezometers located along a stream line. One is situated between the plot and the river in order to study the water movements caused by the exchange between the groundwater and the water in the river. Three are situated in the plot, one close to the Doué River, one in the middle of the plot and one near a dam, which is the opposite boundary compared to the river. Four other piezometers are located beyond the dam to estimate groundwater input and output at this boundary. Five tensiometers at 20, 40, 60, 95 and 135 cm depth are placed close to the piezometers located in the plot. Four water content profiles were measured during the irrigation period at depths 20, 40, 60 95 and 135 cm and the irrigation was performed over 84 days.

The water table level variations at 2 meters were recorded. The groundwater inflow decreased during the first part of the irrigation period due to infiltration below the irrigated experimental plot. This inflow increased during a second period due to water level variations in the river close to this site. At the output, the head gradient did not vary appreciably and the outflow was assumed to be constant during the observation period. Moreover, this gradient is quite low and the flow rate is very low. The water content and pressure profiles clearly show the infiltration of water in the soil during irrigation. The head gradients show the water movement in the unsaturated soil during infiltration and evaporation. Upward flow due to evaporation is observed at about 10 days after irrigation. The last measured water profile (76 days after the end of irrigation) shows that evaporation modifies the water content profile until at least a depth of 120 cm.

The water balance during the irrigation period showed that the input due to irrigation and precipitation was equal to 4150 m^3. The evapotranspiration output was estimated to be 2370 m^3. Groundwater exchange at the downstream boundary can be neglected during the duration of irrigation (84 days), since the average hydraulic gradient remained low (less than 0.8%) and the hydraulic conductivity of the aquifer was not important (about 250 cm/day). It was assumed that the water storage quantified with the rise of the groundwater level was equal to the difference between surface input and evapotranspiration (more than 40% of the contributions), leading to a 27% change in water content, which is quite reasonable for this type of soil (clay).

The stored water was then recovered by evapotranspiration and groundwater outflow at the plot boundaries. We are away from a reasonable irrigation that would reduce the used water quantity and decrease the risk of soil degradation. This study allows a better understanding of the water dynamics in the experimental plot, which includes soil saturation, recharge processes, and exchanges between the aquifer and the river.

Key-words: *soil hydrodynamics, groundwater recharge, Senegal River valley, soil, irrigation.*

RÉSUMÉ

Alors que l'irrigation paraît être le recours essentiel face aux besoins croissants de la population mondiale en céréales, la dégradation des sols et des eaux annihile presque totalement les efforts d'aménagement. Aussi l'étude de la dégradation des sols dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal constitue l'un des quatre objectifs du pôle de recherches sur les systèmes irrigués sahéliens qui regroupe quatre pays dont le Mali, la Mauritanie, le Niger et le Sénégal. Le suivi de l'évolution des eaux et des sols sous culture apparaît indispensable pour garantir une agriculture irriguée rentable et durable dans la zone. Dans cette région, les risques de dégradation des sols font suite à l'effet de deux processus de dégradation que sont l'alcalinisation et la salinisation des sols. Ces types de dégradation sont fortement corrélés à la

remontée des nappes d'eaux souterraines. Dans cet article, l'étude des transferts d'eau dans les parcelles irriguées par le biais d'un suivi expérimental « *in situ* » met en évidence les relations existantes entre les eaux d'irrigation et les mouvements de la nappe. L'étude a permis une meilleure compréhension de la dynamique hydrique au sein de la parcelle : saturation du profil et processus de recharge de la nappe. Elle a également permis de montrer que les échanges avec la nappe pendant la période d'irrigation sont négligeables. Cette pratique de la riziculture inondée, entraîne une variation de stock importante qui représente plus de 40 % des apports et qui se traduit par une remontée de nappe de près de 2 mètres.

Mots clés : *hydrodynamique des sols, recharge de nappe, vallée du fleuve Sénégal, sol, irrigation.*

1 - INTRODUCTION

L'agriculture irriguée représente 237 millions d'hectares à travers le monde, soit environ 15 % des terres cultivées et augmente d'environ 2 millions d'hectares par an. Elle fournit un tiers de la production alimentaire mondiale. L'irrigation joue un rôle déterminant dans l'augmentation de la production agricole mondiale : on estime que la moitié de cette augmentation dans les 25 dernières années est due à l'expansion des surfaces irriguées. Dans les 30 prochaines années, 80 % des disponibilités vivrières supplémentaires nécessaires pour nourrir le monde résulteront de l'irrigation. Les pratiques d'irrigation mal comprises sont facteurs de remontées des nappes, de salinisation, d'érosion et de pollution de l'eau. Ces dégradations sont parmi les principales causes de la perte de productivité de nombre de périmètres irrigués dans le monde. Vingt pour cent des surfaces irriguées dans le monde seraient déjà affectées de façon sensible. Le programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) estime que le taux de perte de terres en raison de l'engorgement et de la salinité des sols est de 1,5 million d'hectares par an, soit presque autant que celui de l'accroissement annuel des superficies irriguées estimées à 2 millions d'hectares (PNUE, 1992). Les superficies touchées par la salinisation exprimées en % de la surface irriguée totale sont évaluées à 10 % au Mexique, 11 % en Inde, 21 % au Pakistan, 23 % en Chine et 28 % au États-Unis (UMALE, 1993).

La vallée du fleuve Sénégal est considérée comme une zone traditionnellement agricole et la mise en eau des barrages de Diama et de Manantali a créé un nouvel élan de développement pour la culture irriguée. Selon les objectifs de l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS), ces deux barrages doivent permettre l'irrigation de 350 000 hectares dans les trois pays membres (Mali, Mauritanie et Sénégal), dont 240 000 hectares au Sénégal (OMVS, 1991). Plusieurs auteurs (LOYER, 1989 ; BOIVIN *et al.*, 1995 ; BOIVIN et LAVAL, 1996) ont cependant souligné un risque de dégradation des sols, comme il est généralement observé sur les aménagements hydro-agricoles en zone aride. Deux types de dégradation sont susceptibles de se manifester : une salinisation, correspondant à une accumulation de sels solubles dans le profil du sol, et une alcalinisation correspondant à une augmentation du pH du sol et de la proportion de sodium (Na) échangeable sur les argiles. Pour ce qui

est de la zone sahélienne, les travaux effectués au Tchad (CHEVERRY, 1969), au Mali (BERTRAND *et al.*, 1993), au Sénégal (BOIVIN *et al.*, 1995 ; BOIVIN et LAVAL, 1996), et au Niger (BARBIÉRO *et al.*, 1995) montrent que ce dernier processus de dégradation est inquiétant. Une fois enclenché, il est en effet considéré comme irréversible car le coût pour la réhabilitation des sols est très élevé. Le processus de dégradation par salinisation/alcalinisation est provoqué ou amplifié par la remontée des nappes superficielles (LOYER, 1989). Il est donc important de bien comprendre et prévoir la dynamique des nappes superficielles sous irrigation. Ceci suppose de connaître, quantifier et éventuellement modéliser les transferts hydriques dans les zones saturées et non saturées des sols irrigués.

Cet article présente les résultats obtenus à l'aide d'un dispositif expérimental, dont l'objectif est d'évaluer, tant qualitativement que quantitativement, les transferts d'eau provoqués par l'irrigation. Les observations du système sol-nappe sont analysées d'une manière globale par bilan hydrique et d'une manière locale par interprétation des profils hydriques et tensiométriques et des niveaux piézométriques.

2 - CADRE EXPÉRIMENTAL

2.1 Description du site

Le site expérimental est localisé dans le département de Podor (*figure 1*), dans le périmètre irrigué de Donaye situé à 16° 37'N et 14° 52'W. Le périmètre s'étend sur 50 hectares. L'alimentation en eau est assurée par un groupe motopompe installé sur le fleuve Doué et qui remplit un canal principal. L'irrigation des parcelles d'environ 0,84 hectare de superficie est effectuée par des siphons à partir de ce canal. La parcelle expérimentale (0,33 hectare) est mise en valeur par une riziculture inondée. Une ou deux cultures de riz sont menées dans l'année selon ce que décident les paysans. À l'image de tous les périmètres de la région, il n'y a pas de système de drainage.

2.2 Caractéristiques climatiques et pédologiques

La moyenne vallée du fleuve Sénégal est située dans la zone climatique sahélienne. Cette zone est caractérisée par une seule saison des pluies qui s'étend de juin à octobre avec une moyenne pluviométrique annuelle d'environ 250 mm. Les pluies sont souvent très mal réparties, irrégulières et en général faibles. Elles sont en conséquence inefficaces pour une agriculture pluviale sans aléas. Les températures élevées (20 °C à 40 °C), et les vents réguliers durant la saison sèche (harmattan), entraînent une évapotranspiration très forte (jusqu'à 1 cm/jour). Les besoins des cultures sont loin d'être satisfaits et la culture irriguée s'impose alors comme le principal moyen de production agricole dans la région.

Le sol est relativement homogène sur le périmètre et composé de deux matériaux. Un matériau argileux (65 % d'argiles : montmorillonites, kaolinites et illites)

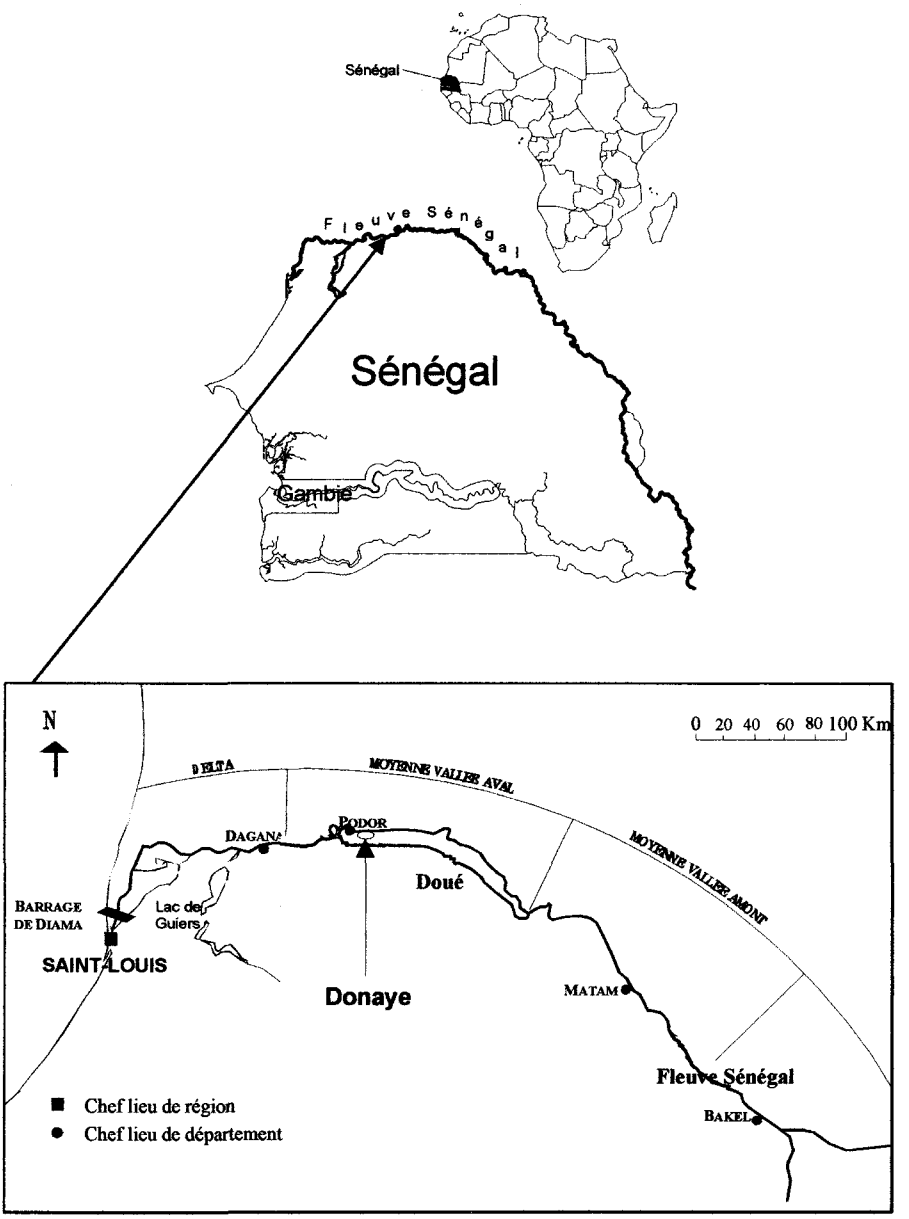

Figure 1 Cartes de situation.
Location maps.

d'une épaisseur d'environ 2 m, présente des propriétés de gonflement/retrait très importantes s'accompagnant de faces de glissements/cisaillements (ZANTE, 1994). Ce sol est appelé *hollaldé* en langue locale Poulaar. Il est caractérisé par une faible conductivité hydraulique à saturation qui est de l'ordre de 1 mm par jour. Un contact abrupt mène à un second matériau sous-jacent de texture

sableuse d'une épaisseur d'environ 6 m observée par des sondages électriques effectués dans la parcelle. C'est un sable fin de couleur blanche attribué à la transgression Nouakchottienne (MICHEL, 1973). Du point de vue hydrodynamique, il présente une conductivité hydraulique à saturation de l'ordre de 250 cm par jour caractéristique d'un sable fin (LAVAL, 1996).

2.3 Équipement expérimental

L'étude s'appuie sur un dispositif agropédologique installé à l'intérieur de la parcelle expérimentale (DIAW, 1996). Les apports d'eau par irrigation dans la parcelle sont mesurés à partir d'un jaugeage du débit des siphons utilisés pour l'irrigation depuis le canal secondaire rehaussé. Ce jaugeage a permis d'établir une relation linéaire entre la hauteur d'eau dans le canal principal et les débits des siphons (MAEGHT, 1995). On ajoutera à ces apports d'eau la pluviométrie, considérée équivalente à celle relevée à la station météo de Podor.

Des échelles limnimétriques ont été installées à l'intérieur de la parcelle pour suivre la lame d'eau la submergeant durant la campagne. Les relevés permettent de déterminer une lame d'eau de submersion moyenne à tout moment de la campagne en tenant compte de la topographie de la parcelle obtenue par krigeage à partir de 80 points de mesure.

Compte tenu de la topographie de la vallée et des pentes de la surface libre des fleuves Sénégal et Doué, les variations des niveaux d'eau du Doué peuvent être considérées comme corrélées à celles relevées à Podor sur le fleuve Sénégal.

La teneur en eau pondérale du sol est mesurée par la méthode gravimétrique (pesée et séchage à l'étuve) à différentes périodes de la campagne. Les échantillons sont prélevés à 20, 40, 60, 95 et 135 cm de profondeur à quatre reprises, durant la campagne agricole. Cette méthode permet d'obtenir la teneur en eau pondérale du sol. Un réseau de 8 piézomètres a été installé suivant un transect perpendiculaire au canal d'irrigation pour permettre de suivre les fluctuations du niveau de la nappe (*figures 2* et *3*). Trois piézomètres ont été implantés à l'intérieur de la parcelle (P2, P3 et P4), un piézomètre entre la parcelle et le canal d'irrigation (P1) et les quatre autres en dehors de la parcelle de l'autre côté de la digue de protection (P5 à P8). Ce réseau de piézomètres avait déjà permis un suivi de la nappe durant deux campagnes rizicoles, une en période d'hivernage, l'autre en contre saison en 1994. Trois sites de tensiomètres (tensiomètres multivoies à mercure) sont installés aux pieds des trois piézomètres (P2, P3, P4 situés dans la parcelle, *figure 2*) pour suivre l'état de la succion du sol. Chaque site comporte 5 tensiomètres installés à 5 profondeurs différentes : 20, 40, 60, 95 et 135 cm.

Le plan de situation et les éléments du dispositif sont présentés sur la *figure 2*. La *figure 3* représente une coupe verticale qui permet de visualiser la topographie du terrain, les niveaux d'argile et de sable, les parties crépinées des piézomètres, le niveau de nappe avant irrigation et son niveau maximal.

L'évapotranspiration réelle (ETR) du riz dans la région a été étudiée par SALVIGNOL (1993) et RAES *et al.* (1994). Elle est mesurée dans le cadre de ce travail par des microlysimètres placés près des piézomètres. Les mesures sont effectuées au cours du développement du riz.

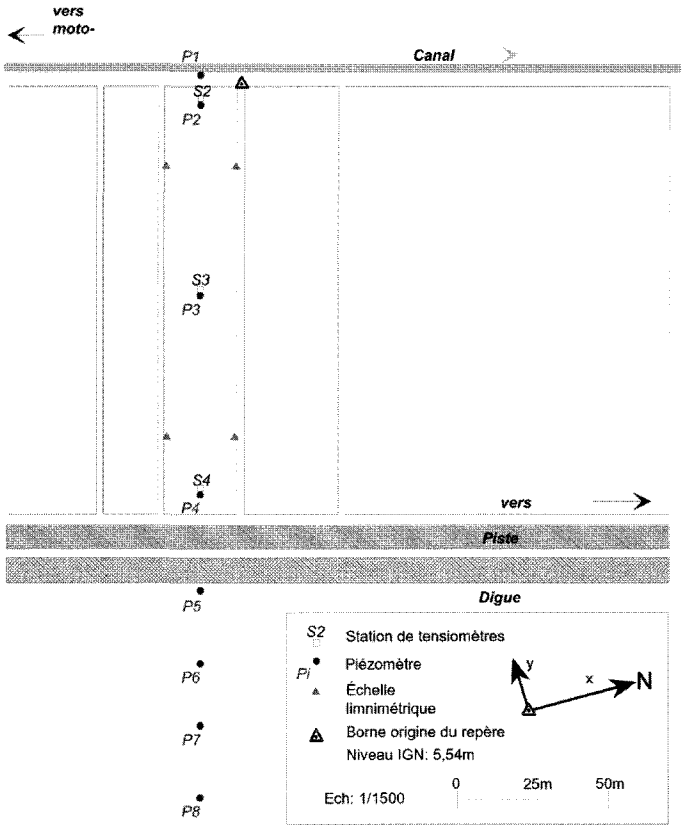

Figure 2 Localisation du dispositif expérimental.
Experimental equipment.

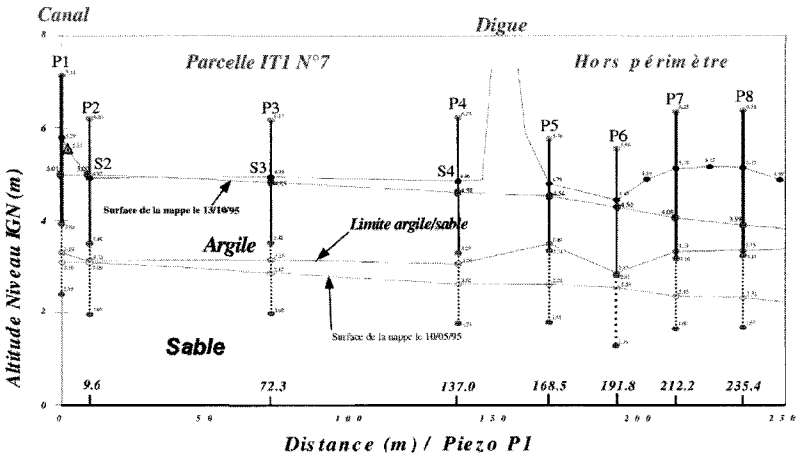

Figure 3 Coupe verticale à travers la parcelle expérimentale.
Cross section at the experimental site.

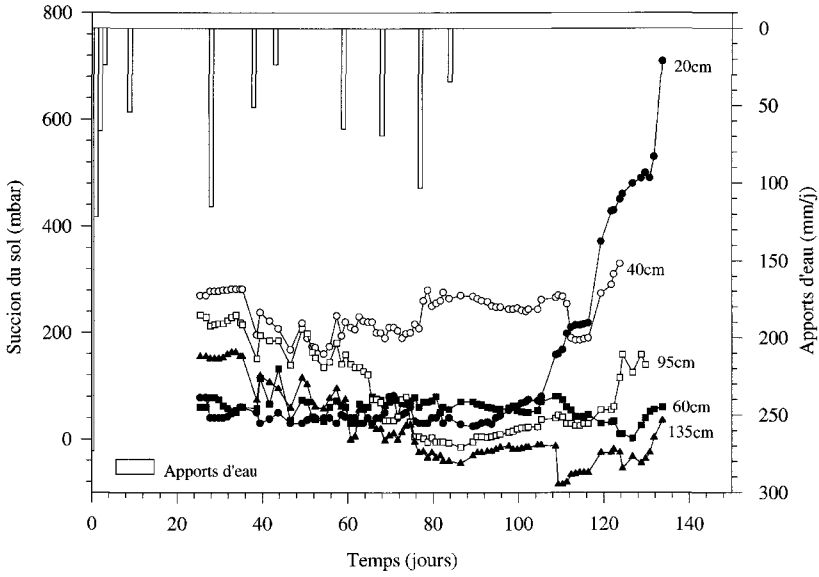

Figure 4 Représentation des relevés tensiométriques à la station S4 (le zéro des abscisses correspond au premier jour d'irrigation, le 19/07/1995).

Succion head profiles at station S4 (the origin of the abscissa corresponds to the first day of irrigation, 19/07/1995).

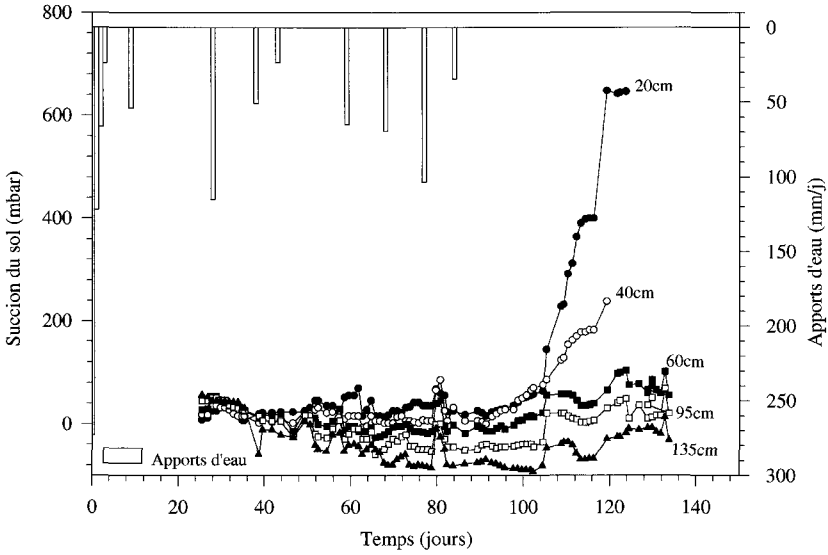

Figure 5 Représentation des relevés tensiométriques à la station S2 (le zéro des abscisses correspond au premier jour d'irrigation, le 19/07/1995).

Succion head profiles at station S2 (the origin of the abscissa corresponds to the first day of irrigation, 19/07/1995).

3 - RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Dynamique hydrique du site

La dynamique hydrique au sein de la parcelle est relativement complexe. Elle résulte des apports d'eau provenant de la surface (précipitation et irrigation), des échanges éventuels entre la nappe et le canal et des écoulements souterrains vers l'extérieur de la parcelle.

Les relevés tensiométriques sont illustrés par les *figures 4* et *5*. Les fonctionnements des 3 sites tensiométriques S2, S3 et S4 (*figure 2*) sont très proches, à l'exception des tensiomètres du site S2 aux profondeurs de 40 et 95 cm (*figure 4*). On observe des valeurs de succion proches de la saturation dès les premiers jours au niveau des tranches de sol supérieures. Ceci trouve son explication dans le fait que les tensiomètres ont été installés sous eau, 24 jours après le début de l'irrigation. Le sol se sature ensuite progressivement en profondeur témoignant ainsi des transferts d'eau vers la nappe. Ceci est confirmé par les gradients hydrauliques (*figure 6*) déterminés à partir des relevés tensiométriques et qui permettent de déterminer le sens des flux d'eau transférés (MUSY et SOUTTER, 1991). Les gradients évoluent peu, mais dans la plupart des cas, les transferts d'eau se font vers la profondeur. La saturation du profil du sol se fait de manière progressive, par front d'humidité à partir de la surface du sol. En revanche, à l'arrêt des irrigations (11/10/1995), le mouvement de l'eau devient ascendant. Les profils hydriques (*figures 7* et *8*) indiquent qu'à partir de 120 cm de profondeur, l'humidité varie peu pendant la campagne agricole pour le profil situé à proximité du canal. Pour le profil situé à l'autre extrémité de la parcelle, la reprise par évaporation se fait sentir jusqu'à 160 cm de profondeur au moins (limite de notre dispositif de mesure).

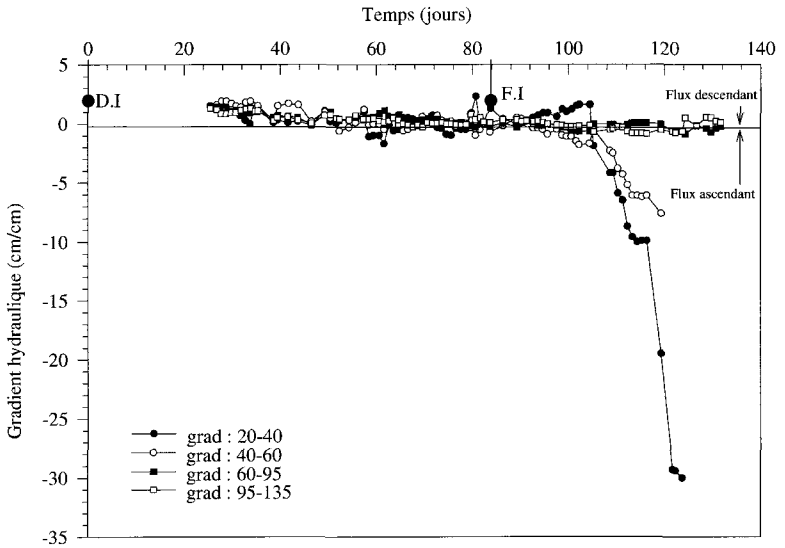

Figure 6 Évolution des gradients hydrauliques à la station S2.
Hydraulic gradients at station S2.

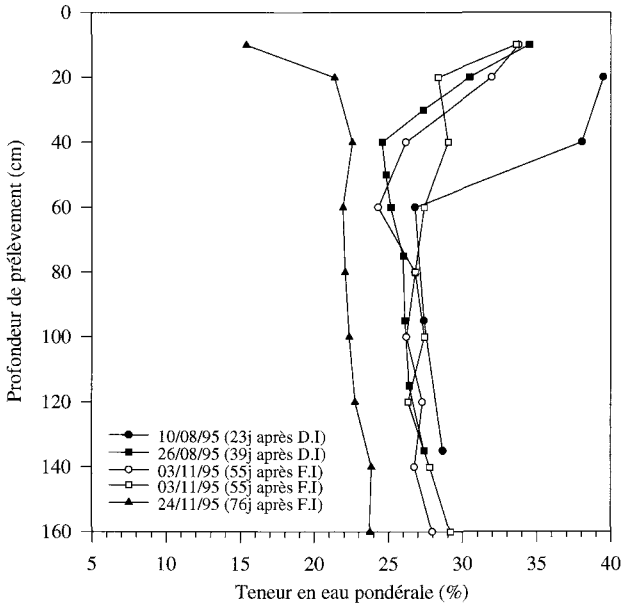

Figure 7 Évolution de la teneur en eau pondérale à P4 (D.I et F.I : début et fin d'irrigation).

Humidity profiles at P4 (D.I and F.I: beginning and end of irrigation).

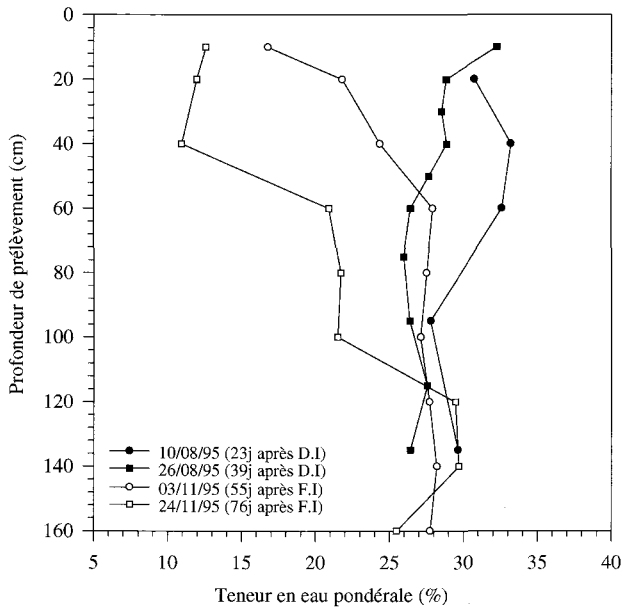

Figure 8 Évolution de la teneur en eau pondérale à P2 (D.I et F.I : début et fin d'irrigation).

Humidity profiles at P2 (D.I and F.I: beginning and end of irrigation).

Le profil d'humidité établi au milieu de la campagne (26/08/1995) confirme que la saturation du profil du sol se fait progressivement par front d'humidification provenant de l'irrigation. Après arrêt de l'irrigation, le mouvement de l'eau s'inverse et la reprise par évaporation est bien mise en évidence. Les dysfonctionnements observés aux profondeurs de 40 cm et 95 cm au site S2 (*figure 4*) pourraient être expliqués par un piégeage d'air dans les fentes de retrait lors de la mise en eau. Ce phénomène est parfois suffisant pour constituer, durant un temps assez long, un obstacle à l'infiltration rapide et profonde des eaux (TOUMA, 1984). Cette hypothèse reste possible, même si elle n'est pas confirmée par les mesures de teneur en eau.

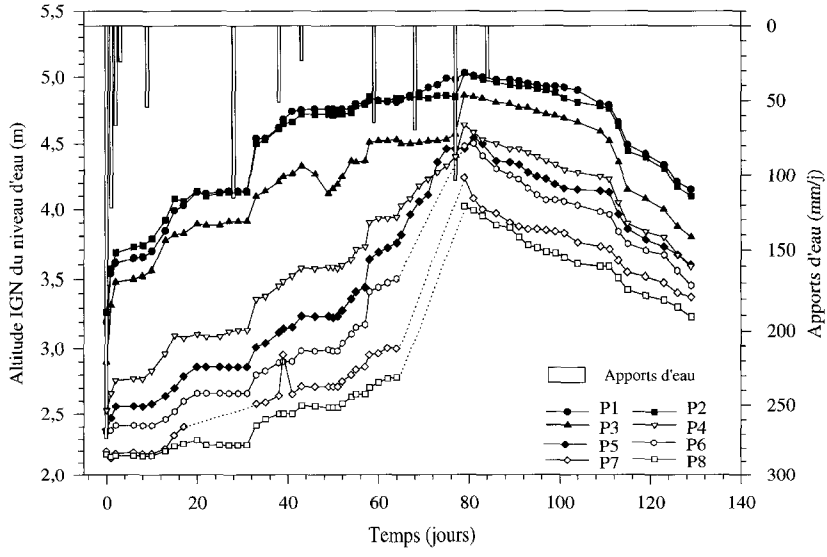

Figure 9 Évolution des piézomètres au niveau de la parcelle expérimentale (le zéro des abscisses correspond au premier jour d'irrigation, le 19/07/95).

Piezometric heads at the experimental parcel (the origin of the abscissa corresponds to the first day of irrigation, 19/07/95).

Les relevés piézométriques pour la campagne agricole d'hivernage 1995 sont présentés sur les *figures 9* et *10*. On observe un rehaussement important (environ 2 m) et très régulier du niveau de la nappe pendant l'irrigation puis une lente décrue, même en dehors de la parcelle irriguée (piézomètres P5 à P8). L'évolution spatiotemporelle du niveau piézométrique à travers les différents piézomètres (*figure 10*) met en évidence une composante de l'écoulement souterrain du canal vers la parcelle pendant toute la période d'observation, avec cependant des gradients hydrauliques qui diminuent avec le temps. L'analyse des variations des gradients hydrauliques permet de mettre en évidence la dynamique complexe du système sol-aquifère. Nous avons représenté les gradients hydrauliques au niveau des échanges canal-nappe, qui représentent les entrées d'eau dans l'aquifère au sein de la parcelle, et au niveau de la sortie de la parcelle. Ces gradients sont calculés à l'aide des piézomètres P1 et P3 pour l'entrée (le piézomètre P2 est trop proche du piézomètre P1 pour obtenir une

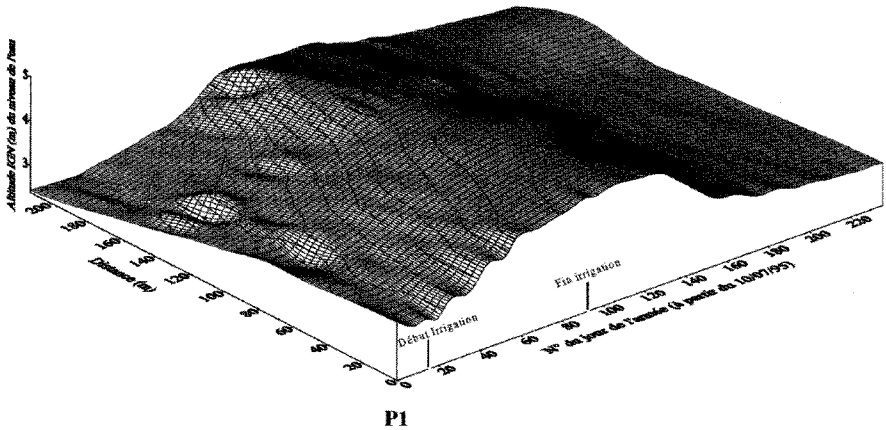

Figure 10 Évolution spatiotemporelle des niveaux piézométriques.
Evolution in time and space of the piezometric heads.

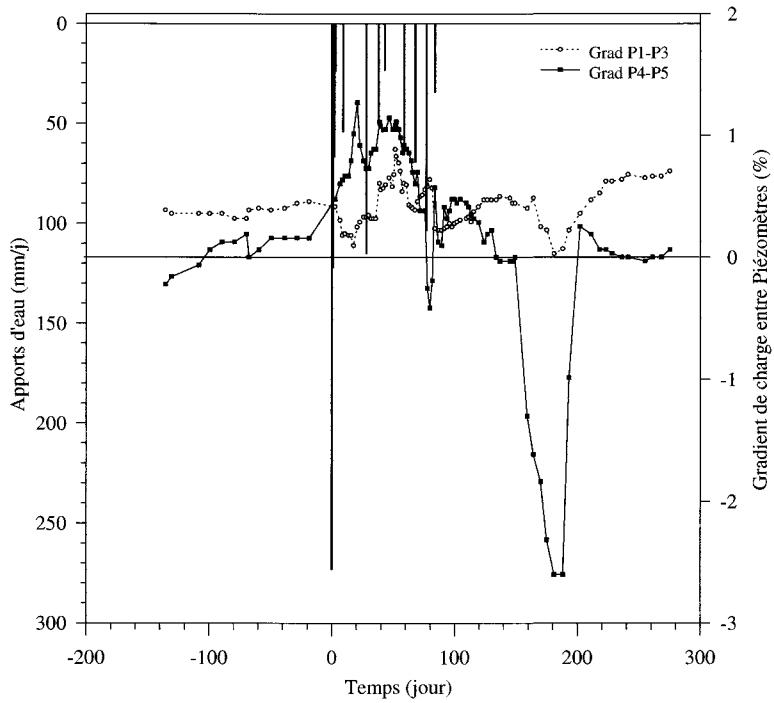

Figure 11 Apports d'eau par irrigation et évolution des gradients hydrauliques aux limites de la parcelle (le zéro des abscisses correspond au premier jour d'irrigation, le 19/07/1995).

Water input by irrigation and hydraulic gradients at parcel boundaries (value zero in abscissa corresponds to the first day of irrigation, 19/07/1995).

bonne représentativité) et des piézomètres P4 et P5 pour la sortie (*figure 11*). L'évolution des échanges canal-nappe laisse apparaître :

- un gradient stable, de l'ordre de quelques ‰, avant le début de l'irrigation ;
- une baisse du gradient, et donc de l'alimentation, pendant les premiers jours de l'irrigation, due à la remontée de la nappe au droit de la parcelle ;
- une augmentation des gradients jusqu'à 50 jours après le début de l'irrigation, consécutive au remplissage du canal en début d'irrigation ; le niveau d'eau au droit de la parcelle continuant à augmenter à cause de l'infiltration, le gradient et donc les échanges nappe-canal diminuent à nouveau ;
- un retour à l'état initial à la fin de l'irrigation et après la crue du fleuve.

Au niveau de la sortie, les gradients hydrauliques augmentent nettement pendant la période d'irrigation. Ils deviennent supérieurs aux gradients observés à l'entrée. Si l'on admet que la conductivité hydraulique est du même ordre de grandeur (riziculture inondée entraînant une saturation du profil) aux deux extrémités de la parcelle (ce qui est vraisemblable d'après les observations faites lors de la mise en place des piézomètres), le débit d'eau souterraine qui sort de la parcelle est nettement supérieur au débit d'entrée, suite aux infiltrations pendant la période d'irrigation. Une inondation a eu lieu dans la dépression située au niveau des piézomètres P5 et P6 (*figure 3*) 160 jours après le début de l'irrigation. Cette inondation explique le changement de sens des écoulements observés et la diminution des gradients et donc des échanges à l'interface canal-nappe.

3.2 Estimation du bilan hydrique à l'échelle de la parcelle

Le bilan hydrique est évalué sur la période d'irrigation dite d'hivernage, du 19/7/1995 (début de l'irrigation) au 11/10/1995 (fin de l'irrigation) soit 84 jours. Le volume d'eau apporté par irrigation durant cette campagne agricole est de 3 320 m^3 soit environ 1 000 mm en équivalent lame d'eau. L'apport provenant de la pluie est de 830 m^3 soit 250 mm d'où un apport d'eau global dans la parcelle de 4 150 m^3 soit 1 250 mm en équivalent lame d'eau (volume d'eau rapporté à la surface de la parcelle). L'apport d'eau souterraine au droit du canal peut être considéré comme négligeable sur la durée de la période par rapport aux autres entrées. En effet, pour cette période, le volume d'eau apporté par la nappe s'élève à 26 m^3 par mètre de profondeur de nappe, en admettant un gradient moyen de 0,5 %, une conductivité hydraulique de 2,50 m/j (LAVAL, 1996) sur une largeur de parcelle de 25 m. Même si l'on admet que ces apports se font sur les premiers mètres de la nappe, ils restent négligeables par rapport aux apports par précipitations et irrigation.

À l'échelle de la parcelle, l'expression du bilan hydrique s'écrit :

$$\Sigma App = \Delta S + RS + ETR + P_{er}$$

ΣApp : la lame d'eau apportée par irrigation et précipitations [L] ;

RS : le stock d'eau dans le sol (jusqu'à 160 cm de profondeur) [L] ;

ΔS : la variation de stock d'eau dans la nappe [L] ;

ETR : l'évapotranspiration du riz [L] ;

P_{er} : les pertes hors parcelle par la surface et les écoulements souterrains [L].

La variation de stock d'eau est estimée à partir de l'amplitude moyenne des fluctuations du niveau de la nappe en prenant une porosité efficace de 20 % pour l'aquifère composé de sable fins (DE MARSILY, 1981). Le stock d'eau dans le sol est estimé à partir des profils hydriques, (teneur en eau pondérale) en prenant une densité apparente égale à 1,8 g/cm^3 pour le *hollaldé*. L'état initial est supposé être celui observé 76 jours après la fin de l'irrigation (profils du 24/11/95 sur les *figures 7* et *8*). L'augmentation du stock d'eau est de l'ordre de 1 287 m^3 (DIAW, 1996).

L'évapotranspiration est celle du riz dans la région. Entre le début et la fin de l'irrigation, la lame d'eau consommée par évapotranspiration est évaluée à 2 370 m^3.

Les sorties d'eau par écoulement souterrain au droit de la digue sont estimées comme les entrées d'eau souterraine avec un gradient moyen 0,8 % avec toujours une conductivité hydraulique de 2,50 m/j sur une largeur de parcelle de 25 m. Elles s'élèvent donc à 42 m^3 par mètre de profondeur de nappe. Les autres pertes hors parcelle (fuites, rupture de diguette, vidange) sont difficiles à quantifier, sauf si elles sont programmées, par exemple lors d'une vidange de parcelle, auquel cas il est possible d'accéder aux volumes évacués grâce aux variations de la lame d'eau. En 1995, ces pertes sont négligeables.

En négligeant les entrées/sorties dues aux écoulements souterrains, le total des apports s'élève à 4 150 m^3 et le total des reprises d'eau (évapotranspiration, variation de stock de la nappe, réserve du sol) à 4 108 m^3 soit une différence entre apport et reprise d'eau de 42 m^3. Les ordres de grandeurs estimés pour les apports par précipitations, par irrigation et pour l'évapotranspiration sont relativement fiables, l'erreur de bilan peut être attribuée à la variation de stock d'eau dans le sol. Le profil de teneur en eau mesuré 76 jours après la fin de l'irrigation a été pris comme profil initial. Compte tenu des propriétés de gonflement/retrait très importantes (ZANTE, 1994), le profil initial est sans doute différent et plus sec que celui supposé dans le calcul de bilan. En admettant que la variation de stock est égale à la somme des volumes d'eau apportés diminuée des reprises par évapotranspiration, on obtient une variation de teneur en eau volumique moyenne sur l'épaisseur de la zone argileuse de 27 %, ce qui est un ordre de grandeur tout à fait acceptable pour ce type de sol et de conditions climatiques.

Cette évaluation *a posteriori* de la variation du stock permet d'affirmer que les termes du bilan représentent une quantification possible des flux à l'échelle de la parcelle pendant la période d'irrigation. En relatif, la variation de stock d'eau dans le sol représente 43 % et l'évapotranspiration 57 % des entrées et les apports/pertes par écoulements souterrains sont négligeables.

4 – CONCLUSION

L'étude menée sur la parcelle de Donaye met en évidence la dynamique hydrique complexe d'un système sol-aquifère soumis à des sollicitations dues à l'irrigation, aux précipitations et aux variations de niveau d'eau dans le canal.

L'irrigation entraîne un stockage d'eau important au sein de la parcelle qui se traduit par une remontée de nappe de l'ordre de 2 mètres.

L'étude de la dynamique hydrique montre bien l'effet de l'irrigation qui se traduit par une avancée rapide d'un front d'humectation dans le sol et une montée régulière du niveau de nappe. Après irrigation, le niveau de nappe baisse sous l'effet de l'évapotranspiration et des écoulements souterrains. L'analyse des gradients hydrauliques a permis de bien décrire la dynamique de la nappe au droit du canal (entrée d'eau) et au droit de la digue (sortie). Nous avons montré les effets de la variation du niveau d'eau dans le canal et de l'irrigation sur la dynamique des eaux souterraines au droit de la parcelle.

D'un point de vue quantitatif, les apports et pertes par les eaux souterraines sont négligeables par rapport aux flux dus à l'irrigation et à l'évapotranspiration et aux variations de stock d'eau. Cette variation de stock d'eau représente plus de 40 % des apports si l'on admet une variation de teneur en eau volumique de 27 % entre le début et la fin de l'irrigation. Ce stock est ensuite repris par évapotranspiration et écoulements souterrains hors de la parcelle. Nous sommes loin d'une irrigation raisonnée qui permettrait une diminution de la quantité d'eau utilisée et une baisse des risques de dégradation des sols.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARBIÉRO L., VALLES V., RÉGEARD A., 1995. Précipitation de la fluorine et contrôle géochimique du calcium dans les sols alcalins du Niger. Conséquence pour une estimation quantitative de l'évolution géochimique des sols, *C. R. Acad. Sci. Paris,* t. 321, Série II a, 1147-1154.

BERTRAND B., KEÏTA B., N'DIAYE M., 1993. La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud sahariennes (cas de l'office du Niger au Mali). *Cahier Agriculture,* 2, 318-329.

BOIVIN P., DIA I., LERICOLLAIS A.,POUSSIN J.C., SANTOIR C., SECK S.M., 1995. Agriculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal : une approche pluridisciplinaire. *ORSTOM actualités,* 45, 8-12 et 21-23.

BOIVIN P., LAVAL F., 1996. Expérimentations ORSTOM-FED dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, région de Podor. Volet irrigation et dynamique des nappes superficielles contre saison chaude et hivernage 1995. Rapport final ORSTOM-FED, 29 p.

CHEVERRY C., 1969. Salinisation et alcalinisation des sols des polders de BOL. Conséquences sur la fertilité et l'aptitude à l'irrigation des sols. *Rapport ORSTOM-IRD*, 106 p.

DIAW E.B., 1996. Modélisation du transfert d'eau en milieu poreux non saturé. Application à l'étude de la recharge des nappes d'eaux souterraines en région soudano-sahélienne. *Th. Doct. Univ. Louis Pasteur,* Institut de Mécanique des Fluides, Strasbourg, France, 239 p + annexes.

LAVAL F., 1996. Caractérisation hydrodynamique des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal. Région de Podor, Méthode du Slug test. *Rapport ORSTOM-Dakar,* 21 p.

LOYER J.Y., 1989. Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous culture. Édition de l'ORSTOM, coll. Études et Thèse, Paris.

MAEGHT J.L., 1995. La monoculture comme principale ressource et source de nombreuses difficultés. *Mémoire d'Ingénieur Bioforce,* Aquitaine.

MARSILY G. de, 1981. Hydrogéologie quantitative, coll. Sciences de la terre, Masson, Paris, 215 p.

MICHEL P., 1973. Les bassins du fleuve Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique. Mémoires ORSTOM, Paris.

MUSY A., SOUTER M., 1991. Physique du sol. 6, coll. Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes, 355 p.

OMVS, 1991. Plan directeur de développement intégré pour la rive gauche du fleuve Sénégal. GESAR A. GIBB, EUROCONSULT, SONED Afrique, PNUD/BIRD et MPC (éd.), République du Sénégal, Dakar, avril 1991, 5 volumes.

PNUE, 1992. Sauver notre planète. PNUE, Nairobi.

UMALE D.L., 1993. Irrigation-induced salinity: a growing problem for development and the environment. Document technique de la Banque mondiale, n° 215, Banque mondiale, Washington.

RAES D., SY B., Van PASSEL L., 1994. The water balance of the rice irrigation schemes in the Senegal river delta. In: J. FEYEN, E. MWENDERA, M. BADJI (eds), *Advances in planning, design and management of irrigation systems related to sustainable land use*, Center of Irrigation Engeneering, KU Leuven (B), 835-844.

SALVIGNOL C., 1993. Gestion de l'eau en riziculture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Essai de bilan hydrique et salin. Mémoire de fin d'études ESITPA, 34 p.

TOUMA J., 1984. Étude critique de la caractérisation hydrodynamique des sols non saturés : rôle de l'air et influence de l'écoulement multidimensionnel de l'eau. *Thèse de l'INP Grenoble*.

ZANTE P., 1994. Culture irriguée et évolution des sols argileux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Essai de caractérisation physique, DESS *Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales*, Université Paris XII Val-de-Marne, 86 p.