

Suivi expérimental des transferts d'eau provoqués par l'irrigation dans le périmètre de Ouro Madiou en moyenne vallée du fleuve Sénégal

Bamba El Hadji Diaw¹
Philippe Ackerer²
Pascal Boivin³
Frédéric Laval⁴

¹ Université Cheikh Anta Diop, école supérieure polytechnique (ESP), Département de génie civil, BP A10 Thies, Sénégal
<ehbdiaw@ucad.sn>

² Institut de mécanique des fluides, UMR CNRS, université Louis-Pasteur 7507, 2, rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France

³ Laboratoire de pédologie, ENAC-ISTE, école polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse

⁴ CEDRAT Développement, 10, chemin de Pré Carré, 38246 Meylan, France

Résumé

Alors que l'irrigation paraît être le recours essentiel face aux besoins croissants de la population mondiale en nourriture, la dégradation de la qualité des sols et des eaux annihile presque totalement les efforts d'aménagement. 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 résultent de deux processus : l'alkalinisation et la salinisation des sols. Les parcelles étudiées sont mises en valeur par une culture de contre-saison froide (novembre-mars) de tomate et d'oignon. 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 l'évolution des fronts d'humidification due aux apports d'eau et sa conséquence éventuelle sur le comportement des sols. L'étude a permis une meilleure compréhension de la dynamique hydrique au sein des parcelles équipées : saturation du profil et processus de recharge de la nappe. Elle a notamment permis de montrer que les transferts d'eau vers la nappe pendant la période d'irrigation sont négligeables. L'étude montre également que le lessivage des sols est quasi inexistant durant toute la campagne agricole, ce qui a pour conséquence d'entraîner une accumulation de sels dans le profil du sol. Cette dernière constitue une menace sérieuse pour le comportement agricole du sol qui est appelé à se dégrader par alcalinisation.

Mots clés : Agronomie ; Science des sols ; Eau.

Summary

Experimental study of water transfers induced by irrigation within the Ouro Madiou area in the middle Senegal river valley

While irrigation appears to be the main approach to meet the world population's growing food demand, soil and water degradation nearly annihilate all efforts in agriculture development. The main threat to irrigated agriculture in the middle Senegal River valley is soil degradation. These soils are subject to various types of degradations, particularly salinisation and alkalinisation. To ensure a sustainable development of irrigated agriculture in the area, irrigation must be coupled with a complete and permanent monitoring system of soil and water quality. In this paper, we present a comprehensive study of water transfers in irrigated plots and its effects on soil properties.

The experimental site is located in the Podor department in the Ouro Madiou irrigated area. The surface area is about 11.4 hectares. Water supply is achieved by filling a main canal using a group of pumps on the Doué River. Irrigation of the plots is achieved by means of secondary channels using a pipe or a small channel created at the boundary of the plot. Two experimental plots are created, one being used for an onion crop and the other for a tomato crop during the cold dry season (November-March). There is no drainage system in the area.

The soil consists of a layer made of a silt, clay and sand mixture with a saturated hydraulic conductivity ($K_s = 60$ mm/day) (tomato sector near the river banks) and a second layer made of clay deposits with a saturation hydraulic conductivity of 1 mm/day (onion sector). Due to the development of swelling clay, soils in this second layer are mainly vertisols. Under these two layers, we have fine white sand, which represents the aquifer and corresponds to the Nouackchotian transgression.

Tirés à part : E.H.B. Diaw

The experimental plots were equipped with tensiometers (5 channels mercury tensiometric systems), piezometers and a neutron probe system (one access tube in each plot). Continuous water content profiles were measured during the irrigation period. An Orstom evaporation pan was installed in order to evaluate onion and tomato crop evapotranspiration in the area. This is achieved by evaluating the cultural coefficient of the two crops. Soil water movements in the plots are only due to the irrigation water input. Tensiometers show the direct effect of irrigation on soil suction down to 60 cm, the deepest tensiometers remaining dry. Thus, wetting front caused by irrigation cannot reach the water table. This is confirmed by the water content profiles, where no important fluctuations are observed at a depth of 150 cm. While the water content remains constant below a depth of 150 cm, some water flux can reach the water table. Regarding the piezometer heads, no important rise of the water level has been observed. Therefore we can assume that no groundwater recharge by irrigation water input occurs.

The water balance during the irrigation period showed that the input due to irrigation is less than the water required for tomato. In the onion plot, we can have 4 mm of excess water. This water balance performed in the plots showed that nearly all water input quantity due to irrigation is recovered by evapotranspiration and soil leaching does not occur. It also confirms that deep percolation towards the groundwater is unlikely. While soil leaching is an important factor in the fight against soil degradation in irrigated areas, the soils of our plots are subject to degradation by alcalinisation.

Key words: Agronomy; Soil sciences.

Dans la vallée du fleuve Sénégal, zone d'agriculture traditionnelle extensive, la mise en eau des barrages de Diama et de Manantali ainsi que la sécheresse sahélienne chronique ont créé un engouement certain pour le développement de 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 [1]. Dès lors, les questions de performance et de durabilité des systèmes irrigués sont posées [2]. Au demeurant, la performance et la durabilité d'une telle agriculture dépendent en partie de la qualité des eaux d'irrigation et du comportement des terres irriguées. Des pratiques d'irrigation mal comprises peuvent induire des remontées des nappes, de la salinisation, de l'alcalinisation, de l'érosion et de pollution de l'eau. Les superficies touchées par la salinisation exprimées en pourcentage 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 [3].

Dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, plusieurs auteurs [4-6] ont souligné un risque de dégradation des sols ou montré un processus d'alcalinisation en cours [7], ainsi qu'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. Le processus de dégradation par salinisation/alcalinisation est provoqué ou amplifié par la remontée des nappes superficielles [4] qui favorise la concentration des solutions salines à la surface des sols. Lutter contre cette dégradation des sols sous irrigation en conditions arides (évaporation très forte) suppose d'assurer une fraction de lessivage minimale. Cette eau qui percole à travers le profil risque toutefois de recharger les nappes superficielles. Il est donc nécessaire, lorsque l'on soutient le développement de cultures irriguées en zones arides, de soutenir également les investigations nécessaires à la maîtrise du régime hydrique et salin des sols et, donc, à leur gestion conservatoire. Le fonctionnement hydrodynamique des sols et des nappes doit être caractérisé et modélisé. Dans la vallée du fleuve Sénégal, de nombreuses études se sont focalisées sur l'évolution du sol sous riziculture [7-9] mais très peu de résultats concernent les cultures de diversification sur lesquelles portent aujourd'hui les efforts de développement.

Cet article présente les résultats obtenus à l'aide d'un dispositif expérimental dont l'objectif est d'évaluer, tant qualitative-

ment que quantitativement, les transferts d'eau provoqués par l'irrigation dans un périmètre irrigué villageois, de cultures maraîchères, en moyenne vallée du fleuve Sénégal.

Les observations du système sol-plante-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.

Cadre expérimental

Présentation du site

Le site est localisé dans le département de Podor (*figure 1*) dans le périmètre irrigué de Ouro Madiou et a été aménagé en 1979-1980 par la Société nationale d'aménagement et d'exploitation des terres du delta du fleuve Sénégal et des vallées du fleuve Sénégal et de la Falémé (SAED). La superficie totale cultivée est de 11,4 hectares.

L'alimentation en eau est assurée par un groupe motopompe installé sur le fleuve Doué. Ce groupe remplit un canal principal à partir duquel partent des canaux secondaires. L'irrigation des parcelles cultivées est effectuée à la planche à travers des tuyaux enterrés ou, parfois, par une rupture volontaire de la diguette de la parcelle pendant la période d'irrigation.

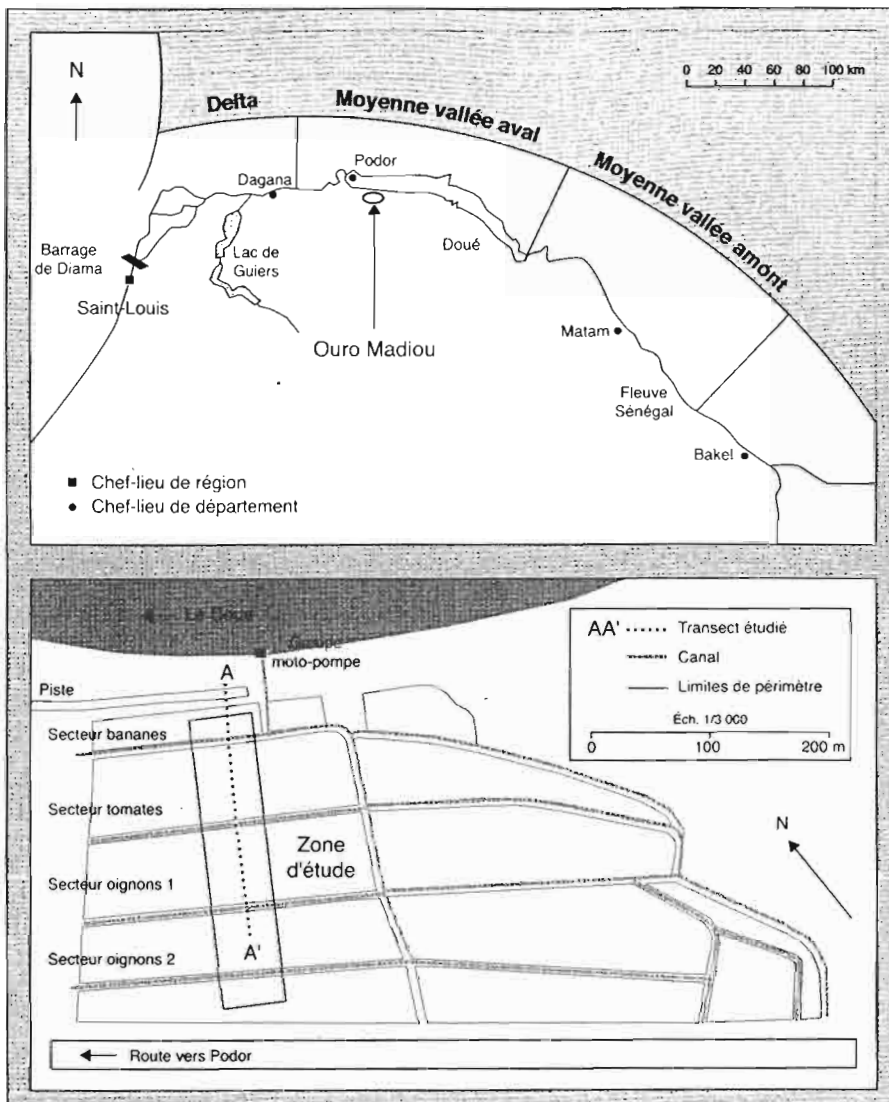


Figure 1. Cartes de situation.

Figure 1. Location maps.

L'eau d'irrigation est répartie dans des raies, les cultures sont plantées sur des billons. Les deux parcelles étudiées sont mises en valeur par une culture de tomate (parcelle n° 1) et une culture d'oignon (parcelle n° 2) (figure 2). Ce sont les deux cultures les plus fréquentes dans la région, après le riz. Aucun système de drainage n'est présent dans le périmètre. Cette installation est représentative des périmètres irrigués villageois (PIV) massivement développés à partir des années 1980 en vallée du fleuve Sénégal [5].

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. Les températures élevées (de 20 °C à plus de 40 °C) et les vents réguliers (harmattan) durant la saison sèche entraînent une évapotranspiration très forte (jusqu'à 1 cm/jour). Les besoins en eau des cultures sont loin d'être satisfaits et l'irrigation s'impose alors comme le principal moyen pour obtenir une production agricole dans la région.

Le sol du périmètre est situé sur un transect qui part d'un bourrelet de berge du

Doué (bras du fleuve Sénégal) et s'achève au début d'une cuvette de décantation. Le sol est léger, de texture argilo-sablo-limoneuse (secteur des tomates) sur le bourrelet, et évolue selon un gradient textural assez régulier en un sol lourd, argileux (secteur des oignons), vers la cuvette de décantation. Un peu plus loin, les sols présentent des caractères vertiques prononcés [10].

Le sol léger, ou *fondé*, dans le secteur des tomates (parcelle n° 1) est caractérisé par une conductivité hydraulique à saturation qui est de l'ordre de 0,06 m/j. Le sol lourd, *hollaldé*, du secteur oignon présente plus de 45 % d'argile dont environ 60 % d'argiles gonflantes (smectites et interstratifiées), ce qui lui confère un caractère vertique [11]. La conductivité hydraulique à saturation est faible, de l'ordre de 0,001 m/j [12].

Un contact abrupt mène au matériau sous-jacent de texture sableuse, l'aquifère sableux. Il est constitué d'un sable fin de couleur blanche attribué à la transgression nouakchottienne [13]. L'aquifère sableux est situé en moyenne à 2 mètres de profondeur au niveau du secteur oignon et à environ 4 mètres au niveau du bourrelet de berge du fleuve, secteur tomate (figure 3). Il est également le siège d'échanges entre le fleuve Doué et la nappe d'eau qui s'y trouve. Ces échanges sont plus perceptibles en période de crue du fleuve. Du point de vue hydrodynamique, il présente une conductivité hydraulique à saturation de l'ordre de 2 m/j [14] correspondant à celle d'un sable fin [15].

Équipement expérimental

Réalisée en saison sèche froide (de novembre à mars), l'étude vise à mieux appréhender les mécanismes d'infiltration, d'évaporation et d'évapotranspiration dans la zone non saturée. Elle s'appuie sur un dispositif agro-pédologique installé à l'intérieur des deux parcelles suivies [12]. Les apports d'eau par irrigation dans les parcelles sont mesurés à partir d'un débitmètre constitué de deux échelles limnimétriques, l'une dans le canal d'alimentation et l'autre dans un canal aménagé à l'intérieur de la parcelle où transite toute l'eau destinée à son irrigation. Un seuil a été réalisé dans le canal d'alimentation et un jaugeage préalable du débit a été effectué avec les différences de hauteur lues sur les échelles amont et aval. Nous avons pu ainsi évaluer les quantités d'eau apportées à chaque irrigation.

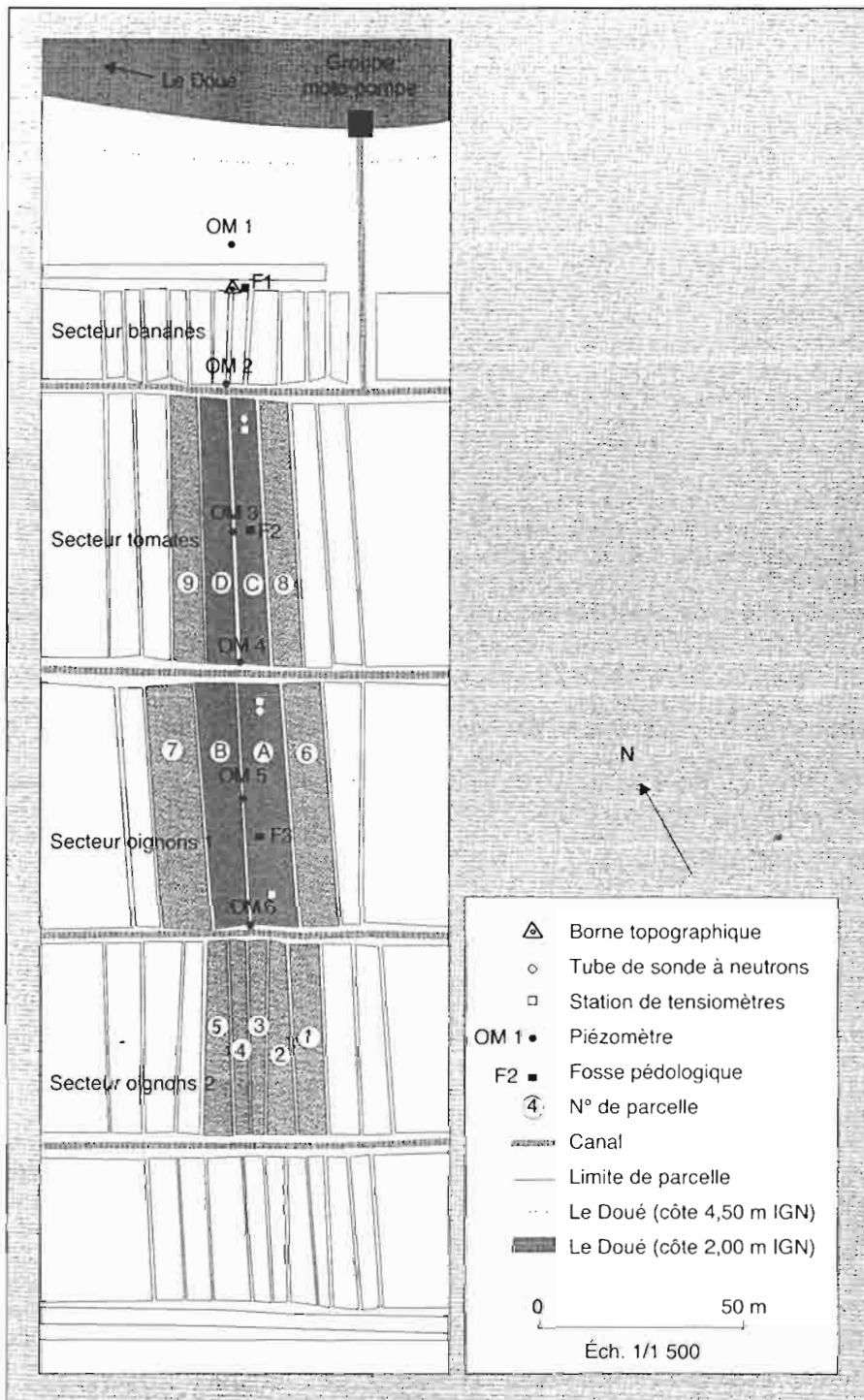


Figure 2. Localisation du dispositif expérimental.

Figure 2. Experimental equipment.

Compte tenu du fait que nous sommes en présence d'une campagne de culture de contre-saison froide, les apports d'eau se limitent aux quantités apportées par l'irrigation.

La teneur en eau volumique du sol est mesurée par une sonde à neutrons. Nous avons installé deux tubes d'accès, l'un dans la parcelle n° 1 (tube n° 1 dans la suite du texte) et l'autre dans la parcelle

n° 2 (tube n° 2 dans la suite du texte). Une sonde gamma densimétrique a été également utilisée pour l'établissement des courbes d'étalonnage de la sonde à neutrons par la méthode gravimétrique.

Un réseau de six piézomètres (OM1 à OM6) a été installé le long d'un transect perpendiculaire à la direction d'écoulement du Doué pour permettre de suivre les fluctuations de la nappe (figure 3).

Pour suivre le potentiel de l'eau du sol, trois batteries de tensiomètres (tensiomètres multivoies à mercure) ont été installées, une batterie S1 dans la parcelle n° 1 (tomates) et deux batteries S2 et S3 dans la parcelle n° 2 (figure 2). Cette dernière est mesurée à 4 profondeurs différentes (20, 40, 60 et 100 cm). Le plan de situation et les éléments du dispositif expérimental sont présentés sur la figure 2. La figure 3 représente une coupe verticale qui permet de visualiser la topographie du terrain, les niveaux des couches de sol supérieures et de l'aquifère sableux, les parties crépinées des piézomètres, le niveau de la nappe avant irrigation et son niveau maximal.

Pour la mesure de l'évaporation nous avons installé un bac de type Orstom. La relation entre l'évapotranspiration de la culture de référence ET_0 et l'évaporation du bac E_{bac} a été établie, et nous avons utilisé la relation :

$$\frac{ET_0}{E_{bac}} = Kp = 0,75$$

où Kp est le coefficient du bac.

L'évapotranspiration maximale des cultures de tomate et d'oignon est obtenue après établissement des coefficients culturaux (K_c) des deux cultures. Elle est donnée par la relation* :

$$ET_{(culture)} = K_c ET_0$$

Les valeurs de K_c (figures 4 et 5) sont déterminées à partir des recommandations de la FAO pour l'estimation des besoins en eau des cultures [16]. Les valeurs proposées dépendent de l'humidité relative minimum (HR_{min}) du milieu ainsi que de la vitesse du vent (vent m/s). Ces deux grandeurs ont été obtenues à partir de la station météo de Podor.

Qualité de l'eau d'irrigation

La qualité de l'eau d'irrigation pompée dans le Doué (un bras du fleuve Sénégal) a fait l'objet d'un suivi [7]. Elle est d'une

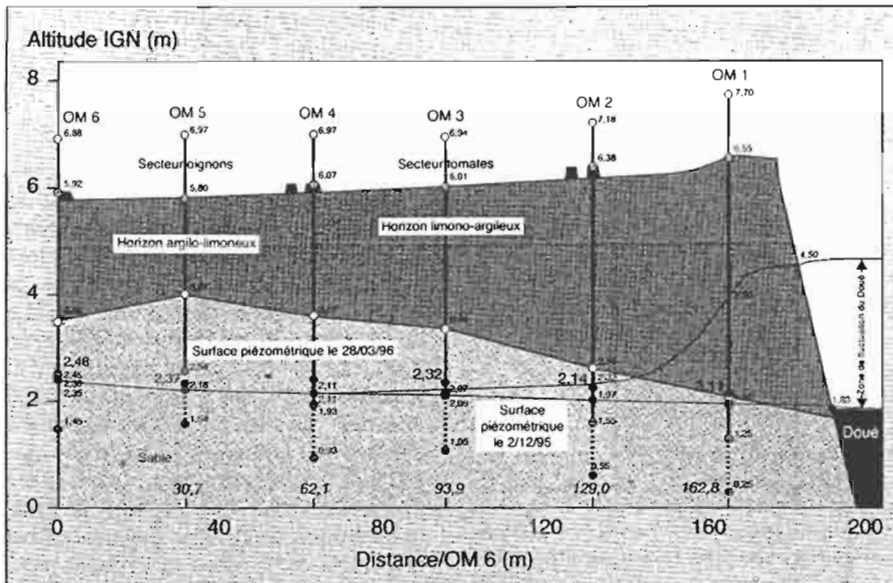


Figure 3. Coupe verticale à travers la parcelle expérimentale.

Figure 3. Cross section of the experimental site.

qualité constante au cours du temps. La conductivité électrique est de $60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et le SAR (*sodium adsorption ratio*) est inférieur à 1. De ce fait, cette eau a été considérée comme d'excellente qualité pour l'irrigation (classe C1S1 [17]). Cependant, l'alcalinité résiduelle calcite de l'eau [18] est positive, avec une valeur moyenne de $0,30 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$. En l'absence de lessivage, cette eau présente donc un risque important de sodisation et d'alcalinisation des sols.

Résultats et discussion

Dynamique hydrique du site

La dynamique hydrique au sein des parcelles résulte des apports d'eau par irrigation, de l'évapotranspiration et des échanges éventuels avec la nappe. Les relevés

tensiométriques sont illustrés par la *figure 6*. On observe pour les différents sites l'influence directe de l'irrigation sur le potentiel matriciel du sol et ce jusqu'à 60 cm de profondeur, les tensiètres dans les profondeurs supérieures ne réagissant presque pas à l'irrigation. Certaines fluctuations s'expliquent par un désamorçage des tensiètres à certains moments de la campagne. Partant de ce constat, il est possible de dire que le front d'humidification provenant de la surface n'a pas atteint le niveau supérieur de la nappe. Cela est confirmé par les profils de teneur en eau au niveau des deux parcelles. En effet, ces derniers montrent que, après plus de trois mois d'irrigation, le front d'humidification ne dépasse guère la profondeur 150 cm (*figures 7 et 8*). En revanche, au niveau du tube n° 1, on observe des fluctuations assez importantes de la teneur en eau, notamment vers 200 cm de profondeur. Ces fluctuations peuvent s'expliquer par la présence d'une zone assez humide constituée par la superposition de couches drainantes et de couches imperméables. Les sondages pédologiques (à la tarière) effectués dans cette zone révèlent l'existence d'une langue argileuse entraînant la création d'une forme de nappe perchée. Il faudra nécessairement d'autres investigations plus poussées dans cette zone pour confirmer ou infirmer cette hypothèse. En revanche, les gradients hydrauliques établis à partir des relevés tensiométriques montrent en général un flux descendant entre 60 et 100 cm de profon-

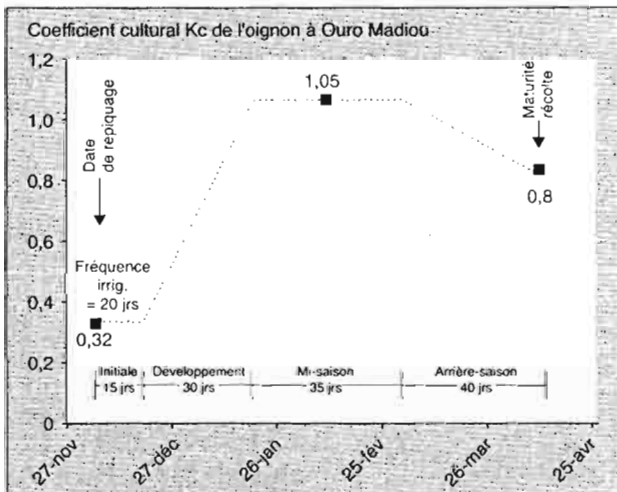


Figure 4. Courbe du coefficient cultural de l'oignon (climat sec, HR_{\min} faible, vent léger à modéré et ET_0 phase initiale = 3 mm/jour).

Figure 4. Cultural coefficient curve of onion (dry climate, weak HR_{\min} , light to moderate wind and ET_0 initial stage = 3 mm/day).

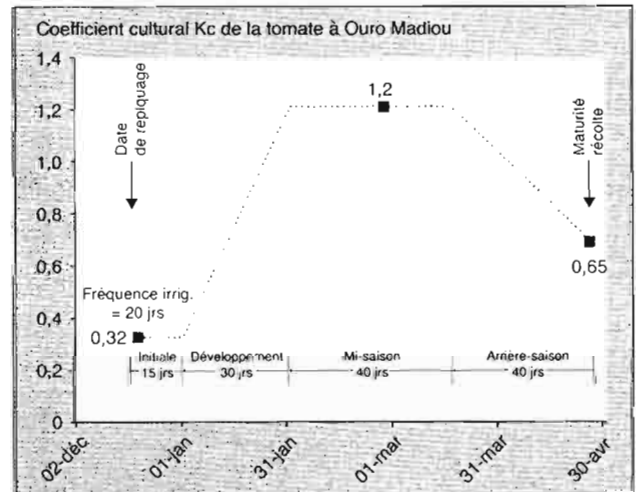


Figure 5. Courbe du coefficient cultural de la tomate (climat sec, HR_{\min} faible, vent léger à modéré et ET_0 phase initiale = 3 mm/jour).

Figure 5. Cultural coefficient curve of tomato (dry climate, weak HR_{\min} , light to moderate wind and ET_0 initial stage = 3 mm/day).

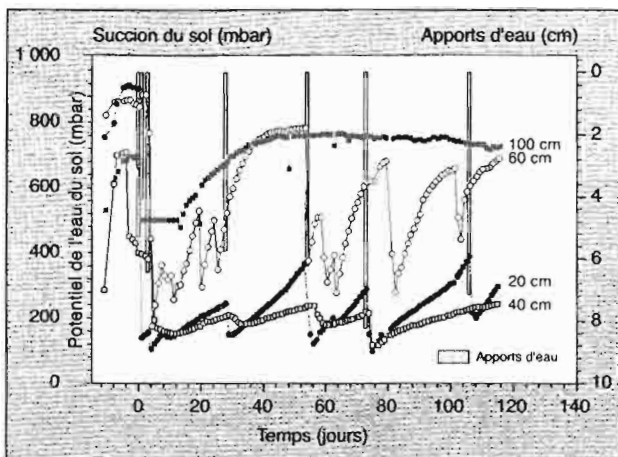


Figure 6. Représentation des relevés tensiométriques dans la parcelle oignon (le zéro des abscisses correspond au 1^{er} jour d'irrigation, soit le 6 décembre 1995).

Figure 6. Suction head profiles in onion plot (zero in abscissa corresponds to the first day of irrigation, i.e. December 6, 1995).

Estimation du bilan hydrique à l'échelle des parcelles

Considérant le premier mètre de sol, le bilan hydrique est évalué sur la période d'irrigation dite de contre-saison froide du 6 décembre 1995 (date de la première irrigation) au 19 mars 1996 (date de la dernière irrigation) au niveau de la parcelle n° 2, et du 19 décembre 1995 (date de la première irrigation) au 19 février 1996 (date de la dernière irrigation) dans la parcelle n° 1. Les apports d'eau totaux dans la parcelle n° 1 sont estimés à 272 mm en équivalent lame d'eau et à 432 mm dans la parcelle n° 2. On notera au passage que nous avons sept irrigations dans la parcelle n° 2 et quatre dans la parcelle n° 1. Ainsi, à l'échelle de la parcelle, l'équation du bilan hydrique s'écrit :

$$\sum App = RS + ETR + IP$$

où (toutes les valeurs sont exprimées en litres) :

$\sum App$: lame d'eau apportée par irrigation ;

RS : réserve en eau du sol (jusqu'à 100cm de profondeur) ;

IP : infiltration profonde ;

ETR : évapotranspiration.

deur mais les tensiomètres à 100 cm restent toujours secs (figure 9).

Les relevés piézométriques sont présentés sur la figure 10. Au regard de ce graphique, nous pouvons dire qu'aucun mouvement de nappe important n'a été observé, mais on remarque une légère pente de la surface de la nappe vers le fleuve Doué. Vers la fin du mois de mars, nous observons une tendance générale

de légère hausse du niveau de la nappe dans l'ensemble des piézomètres.

L'ensemble de ces observations montre qu'il n'y a pas de relation directe entre les eaux d'irrigation et la nappe : autrement dit, pas de recharge directe importante de la nappe à partir de l'irrigation. Aucun lessivage des sols n'a donc lieu sous ces cultures, ce qui signifie qu'une dégradation par sodisation est à craindre à long terme.

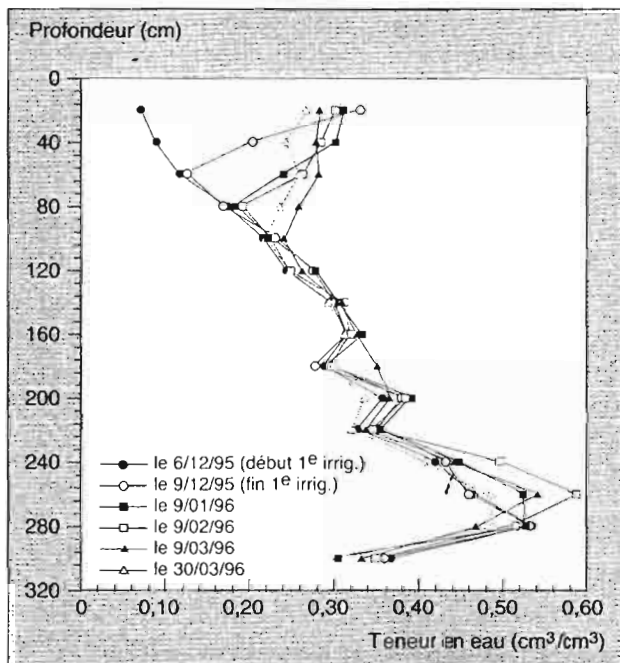


Figure 7. Évolution de la teneur en eau volumique dans la parcelle n° 2.

Figure 7. Water content profile in plot n° 2.

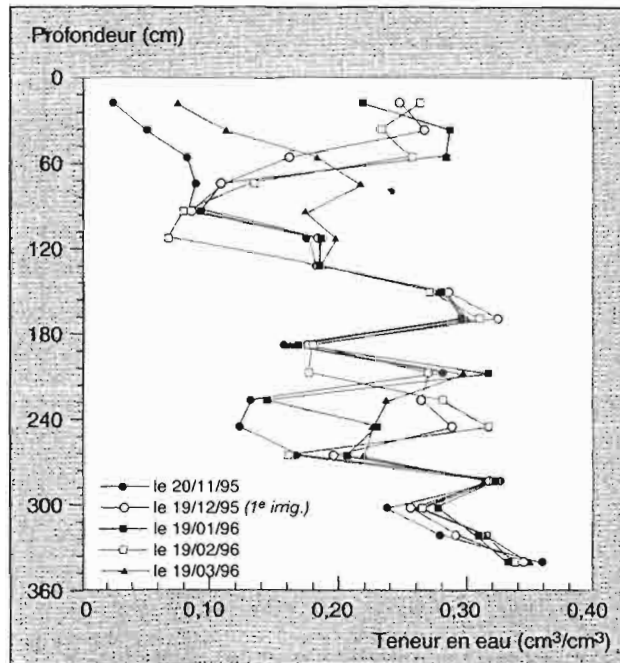


Figure 8. Évolution de la teneur en eau volumique dans la parcelle n° 1.

Figure 8. Water content profile in plot n° 1.

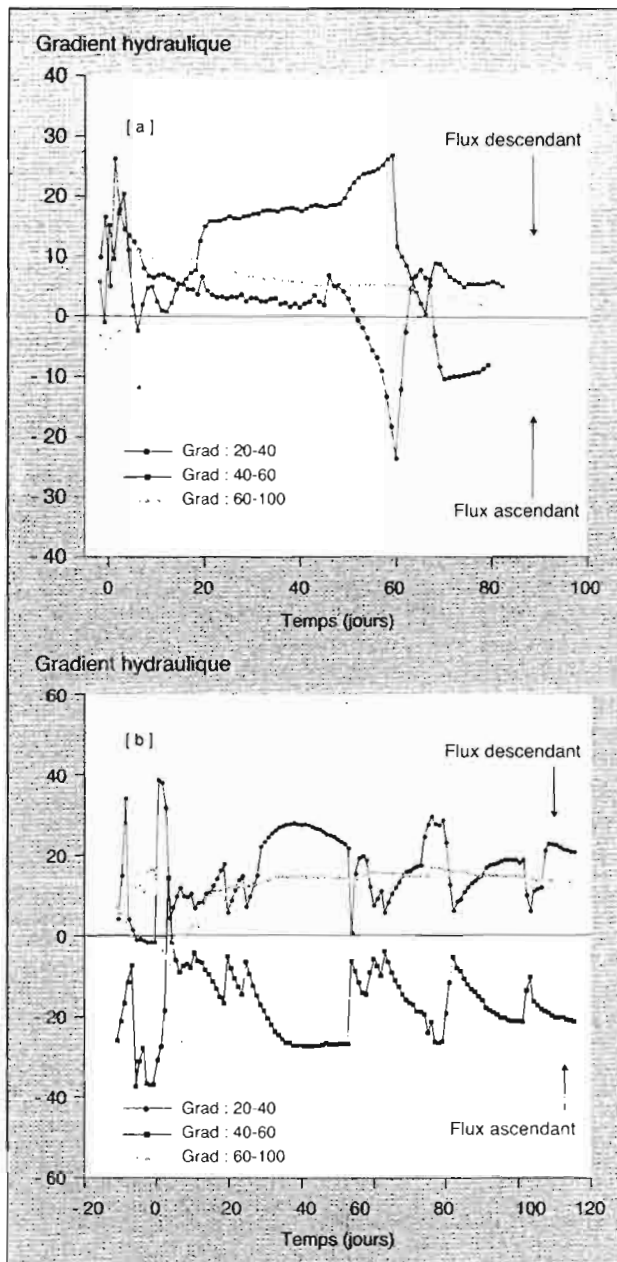


Figure 9. Évolution des gradients hydrauliques : [a] dans la parcelle n° 1 et [b] dans la parcelle n° 2 (le 0 des abscisses est le 1^{er} jour d'irrigation, i.e le 6 décembre 1995 pour [b] et le 19 décembre 1995 pour [a]).

Figure 9. Hydraulic gradient profiles : [a] in plot n° 1 and [b] in plot n° 2 (zero in abscissa corresponds to the first day of irrigation, i.e December 6, 1995 for [b] and December 19, 1995 for [a]).

À partir des profils de teneur en eau obtenus à l'aide de la sonde à neutrons, nous pouvons évaluer le stock d'eau contenu dans le sol par unité de surface traduit en équivalent lame d'eau [19].

En ce qui concerne la parcelle n° 1, la réserve en eau du sol avant irrigation est évaluée à 171 mm sur une profondeur de 1 m. Cette valeur semble à première vue assez importante et s'explique par des débordements répétés des eaux du canal

principal dans la parcelle ainsi que par les fuites d'eau provenant des parcelles voisines. Après la première irrigation, c'est-à-dire le 20 décembre 1995, elle est évaluée à 197 mm, soit une augmentation de 26 mm, et à 158 mm à la fin de la quatrième irrigation, à savoir le 19 février 1996, soit une diminution de 14 mm par rapport au stock d'eau initial et de 50 mm par rapport à la fin de la première irrigation.

La quantité d'eau évapotranspirée par la culture de tomate estimée jusqu'au 30 mars 1996 (dernier jour de mesure) est de 446 mm en équivalent lame d'eau.

Pour la parcelle oignon, nous avons une lame d'eau initiale dans le profil de 132 mm. Nous sommes dans la partie la plus argileuse du domaine (40 à 50 % d'argile), ce qui se traduit par une rétention hydrique assez importante. Cette même lame d'eau passe à 228 mm après la première irrigation, soit une augmentation de 95 mm, et à 159 mm à la fin de la dernière irrigation, soit au total une augmentation de la lame d'eau de 128 mm. La quantité d'eau évapotranspirée par la culture d'oignons estimée jusqu'au 30 mars 1996 (dernier jour de mesure) est de 428 mm en équivalent lame d'eau.

En observant les besoins en eau des cultures, on constate que l'ensemble des apports d'eau est repris par évapotranspiration dans la parcelle n° 1 de même qu'une partie de la réserve en eau initiale du sol. En revanche, pour la parcelle n° 2, nous avons un excédent d'eau d'environ 4 mm. Les infiltrations profondes sont donc négligeables. L'essai de bilan hydrique ainsi effectué permet de voir que la presque totalité des quantités d'eau apportées est reprise par évapotranspiration et que le lessivage des sols n'est pas du tout assuré. Il confirme également que des percolations profondes pour recharger éventuellement la nappe ne sont pas envisageables.

Conclusion

L'étude menée au niveau des deux parcelles équipées du périmètre de Ouro Madiou permet de voir que, du point de vue hydrodynamique, les variations importantes de la teneur en eau volumique ne dépassent pas la profondeur de 150 cm. Mais il faudra noter que l'invariabilité de la teneur en eau au niveau des horizons profonds n'exclut pas forcément un transfert de flux d'eau vers la nappe. En ce qui concerne les apports d'eau, le constat général est qu'ils sont faibles comparés aux besoins en eau des cultures (446 mm pour la tomate et 428 mm pour l'oignon). D'un point de vue quantitatif, l'essai de bilan hydrique a montré que les apports d'eau et les reprises par évapotranspiration sont quasi identiques, ce qui laisse supposer que la fraction de lessivage minimale des sols pour éviter une

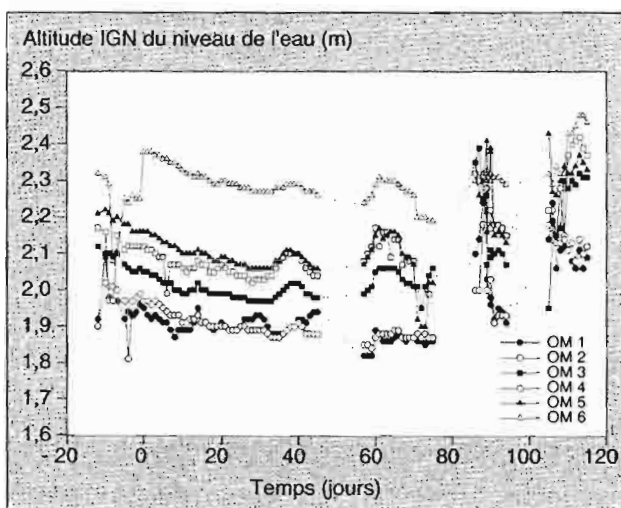


Figure 10. Évolution des piézomètres (le zéro des abscisses correspond à la première irrigation de la parcelle n° 2, le 6 décembre 1995 et l'irrigation de la parcelle n° 1 s'est faite 13 jours après).

Figure 10. Piezometric heads (zero in abscissa corresponds to the first day of irrigation in plot n° 2, i.e. December 6, 1995 and plot n° 1 irrigation began 13 days later).

accumulation de sels solubles dans le profil n'est pas assurée. Le sol est alors appelé à se dégrader de manière certaine par alcalinisation [6]. Dans ces conditions, et contrairement aux recommandations générales dans ce milieu, il est conseillé de réaliser de temps en temps une campagne de riziculture inondée sur ces sols relativement légers, en alternance après quelques campagnes de maraîchage. Bien qu'entraînant une surconsommation d'eau, cela devrait permettre de lessiver les sols et d'éliminer l'excédent de carbonates stockés. En raison des vitesses d'écoulement des nappes vers le fleuve, aucune remontée n'est à craindre dans ce cas ■

Références

1. Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS). *Plan directeur de dé-*

veloppement intégré pour la rive gauche du fleuve Sénégal. Gesar, Gibb A, Euroconsult Soned Afrique, eds. Dakar : Pnud ; Bird ; MPC, 1991 ; 5 vol., 807 p.

2. Poussin JC, Boivin P. Performances des systèmes rizicoles sahéliens. *Cahiers Agricultures* 2002 ; 11 : 65-73.

3. Umale DL. *Irrigation-induced salinity: a growing problem for development and the environment*. Document technique de la Banque mondiale, n° 215. Washington : Banque mondiale, 1993 ; 153 p.

4. Loyer JY. *Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous culture*. Paris : Orstom, 1989 ; 137 p.

5. Boivin P, Dia I, Lericollais A, Poussin JC, Santoir C, Seck SM. *Nianga laboratoire de l'agriculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal*. Paris : Orstom, 1995 ; 562 p.

6. Boivin P, Laval F. *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. Paris : Orstom-Fed, 1996 ; 29 p.

7. Boivin P, Favre F, Hammecker C, et al. Processes driving soil solution chemistry in a flooded rice-cropped Vertisol. Analysis of long-time monitoring data. *Geoderma* 2002 ; 110 : 87-107.

8. Wopereis, Ceuppens J, Boivin P, Ndiaye AM, Kane A. Preserving soil quality under irrigation in the Senegal River Valley. *Netherlands J Agric Sci* 1997 ; 46 : 97-107.

9. Favre F, Tessier D, Abdelmoula M, Génin JM, Gates WP, Boivin P. Iron reduction and changes in cation exchange capacity in intermittently waterlogged soil. *European J Soil Sci* 2002 ; 53 : 175-83.

10. Colleuille H. *Approches physique et morphologique de la dynamique structurale des sols. Application à l'étude de deux séquences pédologiques tropicales*. Thèse de doctorat de l'université Paris VI, sciences de la terre, 1993 ; 312 p.

11. Boivin P, Favre F, Maeght JL. Les sols de la moyenne vallée du fleuve Sénégal : caractéristiques et évolution sous irrigation. *Étude et Gestion des sols* 1998 ; 5 : 235-46.

12. Diaw EB. *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*. Thèse de doctorat, université Louis Pasteur, Institut de mécanique des fluides, Strasbourg-France, 1996 ; 239 p + annexes.

13. Michel P. *Les bassins du fleuve Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique*. Paris : Orstom, 1973 ; 752 p.

14. Laval F. *Caractérisation hydrodynamique des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal. Région de Podor, Méthode du Slug test. Rapport Orstom*. Dakar : Orstom, 1996 ; 21 p.

15. de Marsily G. *Hydrogéologie quantitative*. Paris : Masson, 1981 ; 215 p.

16. Food and Agriculture Organisation. Les besoins en eau des cultures. *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage* 1986 ; 24 ; 198 p.

17. Richards LA. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. In : *Agricultural Handbook*. Washington : USDA, 1954 ; n° 60, 160 p.

18. Vallès V, Bertrand R, Bourgeat F, N'Diaye K. Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques. Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l'oued Medjerdah (Tunisie). *Agronomie Tropicale* 1989 ; 44 : 157-63.

19. Musy A, Souter M. *Physique du sol*. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1991 ; 355 p.