

1618

7.26

2-14

**ETUDE EXPERIMENTALE DES TRANSFERTS
D'EAU AU NIVEAU DES PERIMETRES
IRRIGUES DE LA MOYENNE VALLEE DU
FLEUVE SENEGAL**

Le périmètre d'Ouro Madiou

*DLAW El hadji Bamba
ORSTOM-Pédologie Centre de Dakar*

Rap/Rech/N°1

09/1563

Date... 14/02/2000 N° ... 12777 COTE CHIFFRE ... 9
--

Novembre, 1996



Fonds Documentaire IRD Cote : B * 21671 Ex : 7

unique

SOMMAIRE

RESUME	3
I. INTRODUCTION	5
II. PRESENTATION GENERALE ET PLAN DE SITUATION	5
III. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL	6
III.1. LES APPORTS D'EAU.....	7
III.2. LA PIEZOMETRIE.....	8
III.3. LA TENSIOMETRIE.....	9
III.4. EVOLUTION DE L'HUMIDITE DU SOL.....	11
III.5. MESURE DE L'EVAPORATION AU NIVEAU DU PERIMETRE.....	12
III.5.1. Courbe de K_c pour la culture d'oignon.....	14
III.5.2. Courbe de K_c pour la culture de tomate.....	15
IV. ESSAI DE BILAN HYDRIQUE DANS LES PARCELLES	16
IV.1. ESSAI DE BILAN AU NIVEAU DU TUBE N°1 (PARCELLE TOMATE).....	16
IV.2. ESSAI DE BILAN AU NIVEAU DU TUBE N°2 (PARCELLE OIGNON).....	16
V. DISCUSSION ET CONCLUSION	17
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	18
LISTES DES FIGURES	19
ANNEXES	20
A.1. CARACTERISTIQUE DU SOL	20
A.2. CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE	23
A.2.1. METHODES DE CARACTERISATION.....	24
A.2.1.1. Détermination de la conductivité hydraulique à saturation.....	24
A.2.1.2. Détermination de la courbe de rétention des sols.....	24
A.2.2. RESULTATS DES MESURES.....	25
A.2.2.1. horizons de sols supérieurs.....	25
A.2.2.2. Sable l'aquifère de Ouro Madiou.....	25
A.3. VARIATION DE STOCK D'EAU DANS LE SOL	26

RESUME

La dégradation observée des sols au niveau des périmètres irrigués de la moyenne vallée du fleuve Sénégal est la résultante d'une synergie d'action entre deux processus pédogénétiques : salinisation et alcalinisation des sols. Ces deux processus sont fortement liés aux transferts d'eau dans les parcelles irriguées. Alors que l'alcalinisation est liée au mauvais lessivage des sols sous culture, le processus de salinisation quant à lui, est lié à la dynamique des nappes d'eau souterraines. Dès lors, il est important d'acquérir des connaissances plus ou moins exactes sur les processus de transferts d'eau dans les parcelles irriguées. Ceci est d'autant plus nécessaire que si rien n'est fait, les sols deviendront impropres à toute culture. C'est donc dans cette optique, qu'une étude expérimentale des transferts d'eau dans les périmètres de la région y compris celui d'Ouro Madiou, a été entreprise. Dans ce périmètre, nous avons équipé et suivi deux parcelles, une première dans laquelle nous avons une culture d'oignon et une seconde où nous avons une culture de tomate. Le suivi expérimental de ce périmètre durant la campagne de contre saison froide 1995/96 a donné les résultats que nous résumons par la suite.

• Apports d'eau dans les parcelles suivies

Ces apports ont été mesurés au niveau des parcelles à partir d'un dispositif de débitmétrie installé à cet effet. Nous avons ainsi estimé les apports d'eau totaux dans la parcelle tomate comme étant équivalents à une lame d'eau de 272 mm, et ceux dans la parcelle oignon, à une lame d'eau de 431,8 mm (voir § III.1).

• Evaluation des besoins en eau des cultures

Les besoins en eau des cultures dans le périmètre ont été évalués à partir de la détermination de l'évaporation au niveau du site et des coefficients culturaux des cultures. L'évaporation a été obtenue à partir d'un bac de type ORSTOM et les coefficients culturaux à partir des recommandations de la F.A.O. (Bulletin F.A.O. n°24). Ces besoins sont estimés en équivalent lame d'eau à 428 mm pour la culture d'oignon et 446 mm pour la culture de tomate (voir § III.5).

• Evolution de l'humidité du sol

L'évolution de l'humidité du sol a été suivie grâce à l'installation d'une sonde à neutrons qui permet d'avoir des mesures continues de l'humidité. A la fin de la campagne c'est-à-dire après trois mois d'irrigation, le front d'humidité ne dépasse pas la profondeur des 150 cm (voir § III.4) et ce, au niveau des deux parcelles. Ceci permet de dire en fait que les eaux provenant de l'irrigation n'atteignent pas la nappe.

• Suivi tensiométrique

Le suivi tensiométrique a permis de confirmer l'inexistence d'une infiltration profonde. En effet, les résultats fournis par la sonde à neutrons ne suffisent pas pour conclure quant à la recharge de la nappe. Il faudra noter qu'une constance de l'humidité du sol peut s'accompagner d'un transfert d'eau à flux constant, ce qui peut se traduire par une variation de pression. Ainsi l'analyse des tensiomètres en profondeur (100 cm 160 cm), montre que ces derniers sont, durant toute la campagne, dans des conditions sèches (voir § III.3).

- **Suivi piézométrique**

Durant toute la campagne agricole, aucun mouvement de nappe significatif n'a été observé. Ceci résulte du fait de la faiblesse et de l'irrégularité des apports d'eau dans les parcelles qui ont eu pour conséquence une recharge de la nappe nulle.

D'une manière générale, cette étude expérimentale a révélé en fait une relation irrigation-élévation du niveau de la nappe quasi inexistante. Les volumes d'eau apportés par irrigation étant faibles par rapport aux besoins en eau des cultures, il est alors évident qu'aucune percolation profonde n'est observée. L'essentiel des apports d'eau est repris par évapotranspiration. Etant donné que la condition d'une agriculture irriguée durable repose sur un équilibre entre un bon lessivage des sols et une recharge de nappe pas trop importante, il est alors clair que le sol n'étant pas lessivé, il risque alors de se dégrader par alcalinisation.

ETUDE EXPERIMENTALE DES TRANSFERTS D'EAU AU NIVEAU DES PERIMETRES IRRIGUES DE LA MOYENNE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

Le périmètre d'Ouro Madiou

I. INTRODUCTION

L'étude de l'évolution des sols sous irrigation constitue l'un des thèmes de recherche le plus important au niveau des périmètres irrigués de la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Ceci résulte de la dégradation observée des sols sous culture dans cette zone. Il est alors évident que la garantie d'une agriculture irriguée durable passe par la connaissance des processus de dégradation et les moyens pouvant les annihiler. Dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, cette dégradation des sols est fortement corrélée à la dynamique des nappes d'eau superficielles qui deviennent affleurantes dans certaines zones (sol léger) et suivant certaines pratiques culturales (riziculture). Ceci explique l'intérêt d'une étude de la relation irrigation-élévation du niveau de nappe. Nous avons alors procédé, en ce qui concerne le site de Ouro Madiou, par une étude expérimentale. Dans cette étude nous nous sommes fixés deux objectifs principaux : d'une part, permettre d'avoir des connaissances plus détaillées en ce qui concerne les processus de transferts d'eau dans les périmètres irrigués, y compris le comportement des nappes d'eau superficielles et, d'autre part, mener des investigations permettant une caractérisation physique du sol en vue d'une modélisation hydrodynamique de la migration de l'eau dans les sols et ses conséquences sur les sols irrigués. Pour ce faire, nous avons opté pour une méthode basée sur des mesures de la pression de l'eau du sol et de l'humidité (dispositif neutro-tensiométrique), permettant ainsi de suivre l'évolution du front d'humidification dans le profil du sol durant la campagne agricole. Ces mesures sont couplées avec un suivi du niveau des nappes par l'intermédiaire d'un réseau de piézomètres installé à cet effet. Il nous est également nécessaire d'estimer les apports d'eau au niveau des parcelles irriguées de même que les lames d'eau échangées par évapotranspiration. Les dispositifs adéquats ont été installés à ces fins.

II. PRESENTATION GENERALE ET PLAN DE SITUATION

Ce site a été aménagé par la S.A.E.D vers les années 79-80. La superficie totale cultivée est de 11,4 hectares. Le périmètre est resté deux années sans culture et cette jachère était décidée par les paysans du village qui avaient vu leur rendement baisser fortement, passant de 60 à 15 tonnes d'oignon à l'hectare. Cette baisse de rendement est souvent la conséquence des problèmes de salinisation et d'alcalinisation observés dans la zone. D'habitude, les types de culture dans ce périmètre se limitaient à l'oignon et à la tomate, mais cette année, une partie du périmètre est réservée à la plantation de banane. Nous nous intéressons aux deux premiers types de culture, c'est-à-dire la culture d'oignon et celle de la

tomate, qui sont plus fréquents dans la région après la culture de riz. Pour cela, nous avons installé un dispositif expérimental assez complet suivant un transect traversant les différents secteurs du périmètre. L'alimentation en eau se fait à partir d'une motopompe installée sur le fleuve Doué. Nous noterons dans ce périmètre l'absence de tout système de drainage.

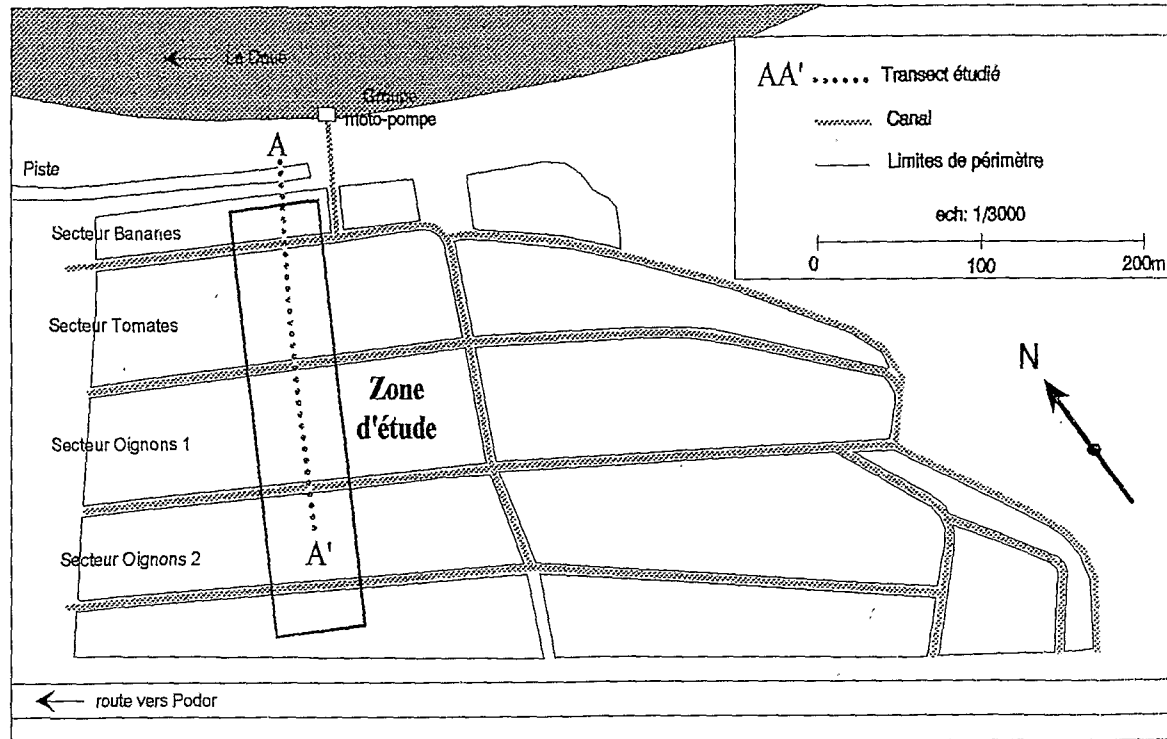


FIG. 1 : Périmètre de OURO MADIOU : Plan de situation

III. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'étude expérimentale des transferts d'eau dans ce site vise à mieux appréhender les mécanismes d'infiltration et d'évaporation qui se font dans la zone non-saturée. Notre souci principal est de mettre en évidence, si elle existe, une recharge de la nappe par les eaux provenant de l'irrigation. Nous envisageons d'utiliser les résultats expérimentaux pour estimer une éventuelle recharge de la nappe. La localisation, de même que l'équipement du site sont présentés dans la figure 2. Le dispositif expérimental se compose d'instruments de mesure des transferts d'eau en milieu non saturé constitués d'appareils de mesures de la variation d'humidité et de la variation de la succion de l'eau du sol, respectivement sonde à neutrons et tensiomètres. Nous avons également installé un bac à évaporation de type ORSTOM pour évaluer l'évaporation. Il comprend aussi un réseau de piézomètres permettant de suivre le niveau de la nappe de même qu'un dispositif de débitimétrie permettant d'estimer la quantité d'eau apportée dans les parcelles à chaque irrigation. Deux parcelles ont été principalement équipées, une parcelle dans le secteur tomate et une autre dans le secteur oignon.

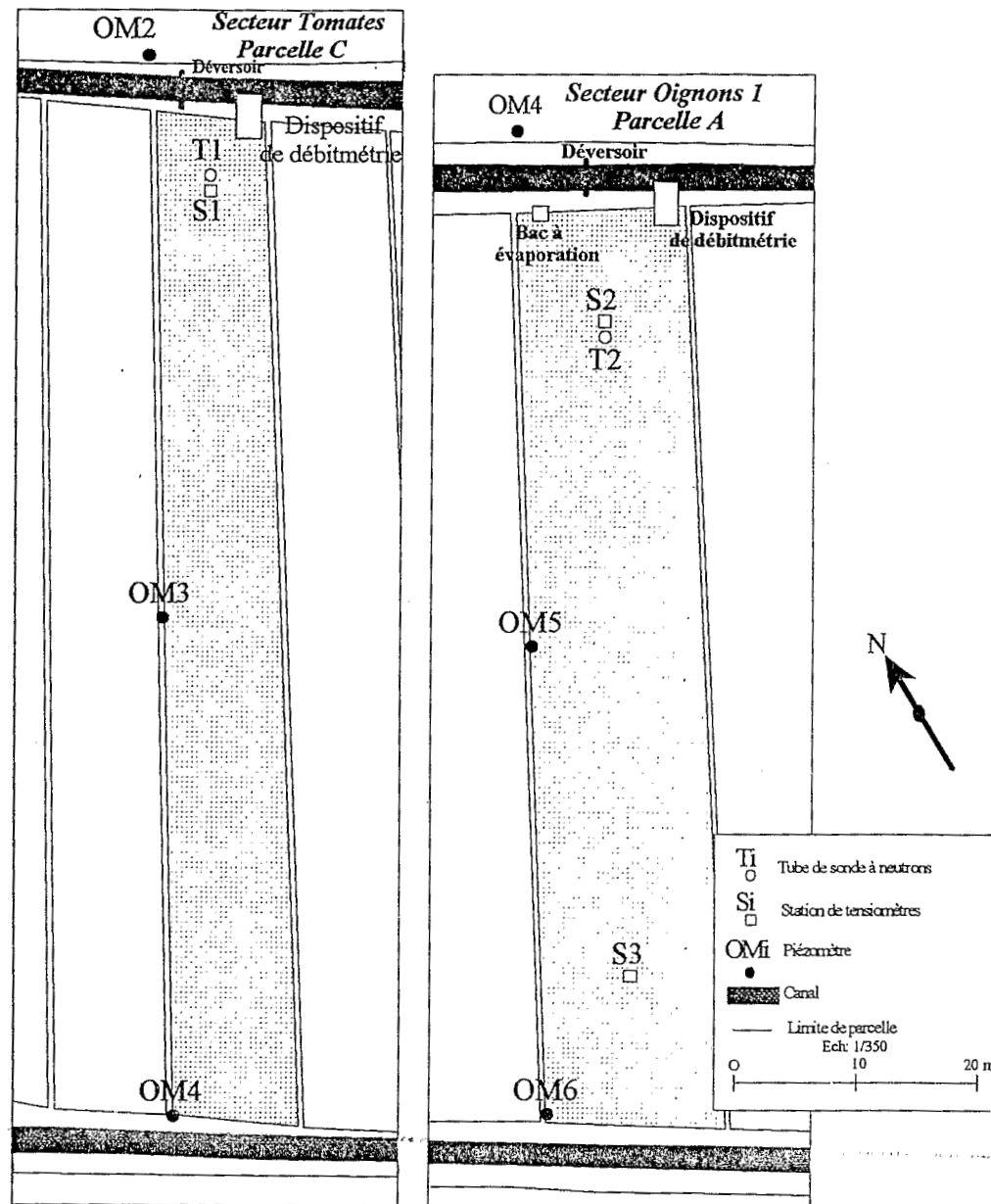


FIG. 2 : Equipement du dispositif expérimental

III.1. Les apports d'eau

Compte tenu du fait que nous sommes en présence d'une campagne de culture de contre saison froide, les apports d'eau se réduisent aux quantités apportées par l'irrigation. Pour évaluer ces apports d'eau, nous avons installé un dispositif de débitmétrie au niveau des deux parcelles suivies. Ce dispositif comprend deux échelles limnimétriques installées, l'une dans le canal principal d'alimentation, et l'autre, dans un chenal à l'intérieur de la parcelle où transite toute l'eau destinée à son irrigation. Entre les deux échelles nous avons installées un tuyau enterré permettant l'entrée de l'eau dans la parcelle au moment de l'irrigation. Auparavant, le niveau d'eau dans le canal principal est relevé par l'installation d'un seuil permettant de maintenir notre tuyau en position noyée à chaque irrigation. Un jaugeage du débit a été effectué à l'aide d'une cuve placée également dans la parcelle. Ainsi, avec les différences de hauteur lues sur les échelles amont et aval, nous avons calé une loi de vanne

et, connaissant la durée de l'irrigation, nous pourrions évaluer approximativement les quantités d'eau apportées à chaque irrigation. La figure 3 ci-dessous montre les lames d'eau apportées durant la campagne au niveau des deux parcelles suivies.

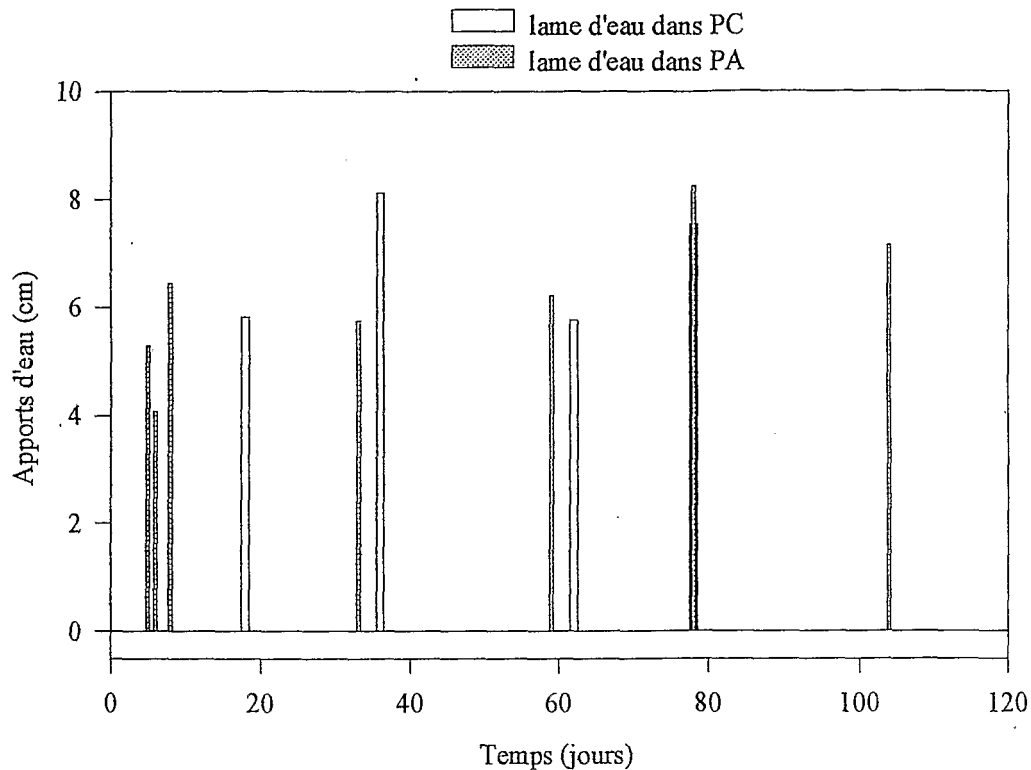


FIG. 3 : Apports d'eau ; PA, parcelle oignons et PC, parcelle tomates. (l'origine des abscisses correspond au 1/12/95 et la 1ère irrigation a eu lieu le 6/12/95 dans PA et le 19/12/95 dans PC)

Nous avons ainsi estimé les apports d'eau totaux dans la parcelle tomate comme étant équivalents à une lame d'eau de 272 mm, et ceux dans la parcelle oignon, à une lame d'eau de 431,8 mm. On notera au passage que nous avons sept irrigations dans la parcelle oignon et quatre seulement dans la parcelle tomate.

III.2. La piézométrie

Six piézomètres dénommés OMi (avec $i=1, \dots, 6$) sont installés le long d'un transect perpendiculaire à la direction d'écoulement du Doué. Ils permettent de suivre l'évolution de la nappe d'eau durant l'irrigation. Cette nappe a été rencontrée à environ 4 mètres de profondeur avant la première irrigation. Tous les piézomètres ont été installés avant le début effectif de la campagne agricole. Les relevés sont faits chaque jour durant toute la durée de la campagne. L'évolution des niveaux piézométriques est illustré à travers la figure 4 ci-dessous.

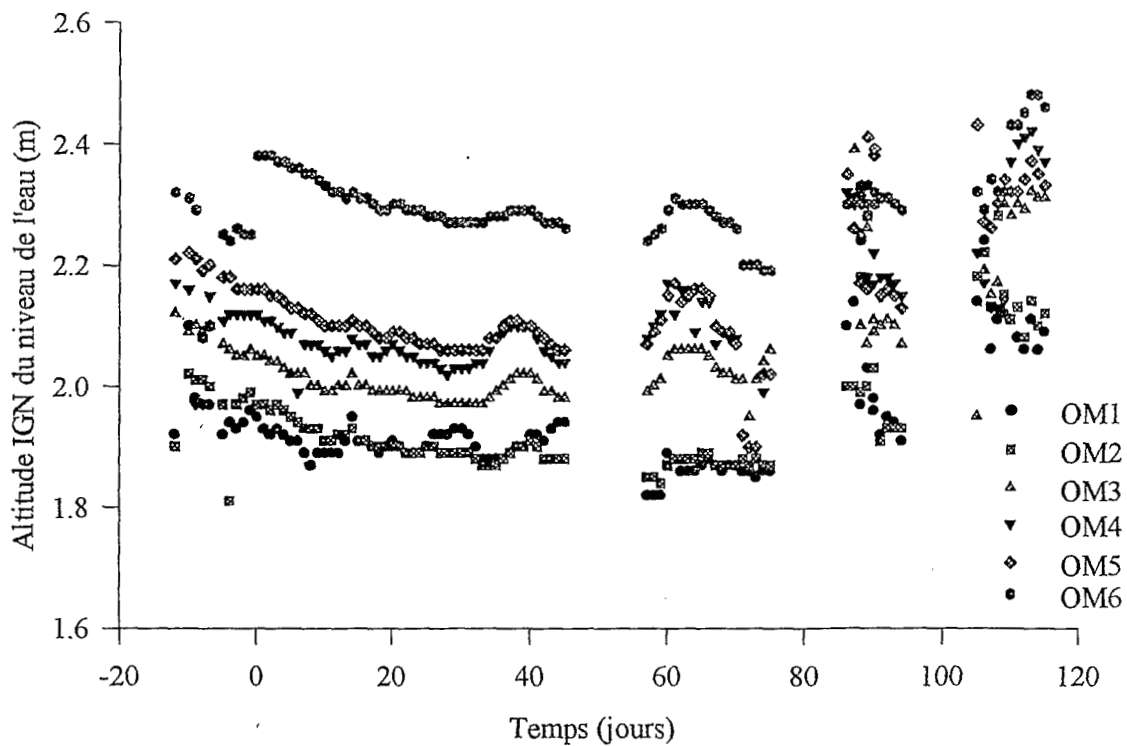


FIG. 4 : Représentation des relevés piézométriques (le zéro des abscisses correspond à la première irrigation de la parcelle oignon et l'irrigation de la parcelle tomate s'est faite le 13^{ème} jour).

Au regard de ce graphique, nous pouvons dire qu'aucun mouvement de nappe important n'a été décelé. Seulement, nous observons un gradient assez faible dans la direction allant de OM6 à OM1 entraînant ainsi un écoulement souterrain vers le Doué, celui-ci étant en période de basses eaux. 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. Mais, cette tendance est moins prononcée pour les piézomètres OM1 et OM2 plus proches du Doué comparés aux quatre autres. Par ailleurs, au regard de l'évolution de l'humidité volumique, on comprendra que ce mouvement de hausse n'est certainement pas du à l'irrigation, c'est-à-dire par front d'humidité à partir de la surface du sol jusqu'à la nappe. Il est possible de supposer l'existence d'une zone préférentielle d'infiltration pouvant entraîner la recharge de la nappe, nous pensons plutôt à la transition sol sablo-limoneux/sol argilo-limoneux (voir Annexe figure A-1 vers 60 m). Les petites fluctuations observées çà et là, résultent des erreurs de mesure, la sonde étant par moment défectueuse. Mais nous observons d'une manière générale, une surface piézométrique assez plane avec un léger gradient vers le Doué sauf en période de hautes eaux où l'influence du Doué se fait sentir jusqu'au niveau du piézomètre OM2.

III.3. La tensiométrie

Les tensiomètres ont été installés pour mesurer la pression de l'eau du sol. Cette pression est mesurée à 5 profondeurs différentes ($Z = 20 ; 40 ; 60 ; 100 ; 160$ cm) pour les sites installés dans les inter-billons et à 3 profondeurs (20 ; 40 ; 60 cm), pour le site installé sur un billon à partir de tensiomètres reliés par un tube capillaire à un flacon de mercure. Trois sites

tensiométriques ont été installés, un site dans la parcelle tomate (S1) avec 3 tensiomètres installés sur un billon et deux sites dans la parcelle oignon (S2) et (S3) (voir figure 2). L'analyse des données permet d'observer, pour les différents sites tensiométriques, l'influence directe de l'irrigation sur le comportement des tensiomètres et ceci, jusqu' à 60 cm de profondeur, les tensiomètres dans les profondeurs supérieures ne réagissant presque pas (voir figure 5). Certaines fluctuations s'expliquent par un désamorçage des tensiomètres à certains moments de la campagne. Par contre, nous notons une réaction décalée dans le temps pour les tensiomètres à 40 cm et 60 cm par rapport aux jours d'irrigation. Partant de ce constat, il est possible de dire que le front d'humidité provenant de la surface n'a pas atteint le niveau de la nappe d'eau souterraine.

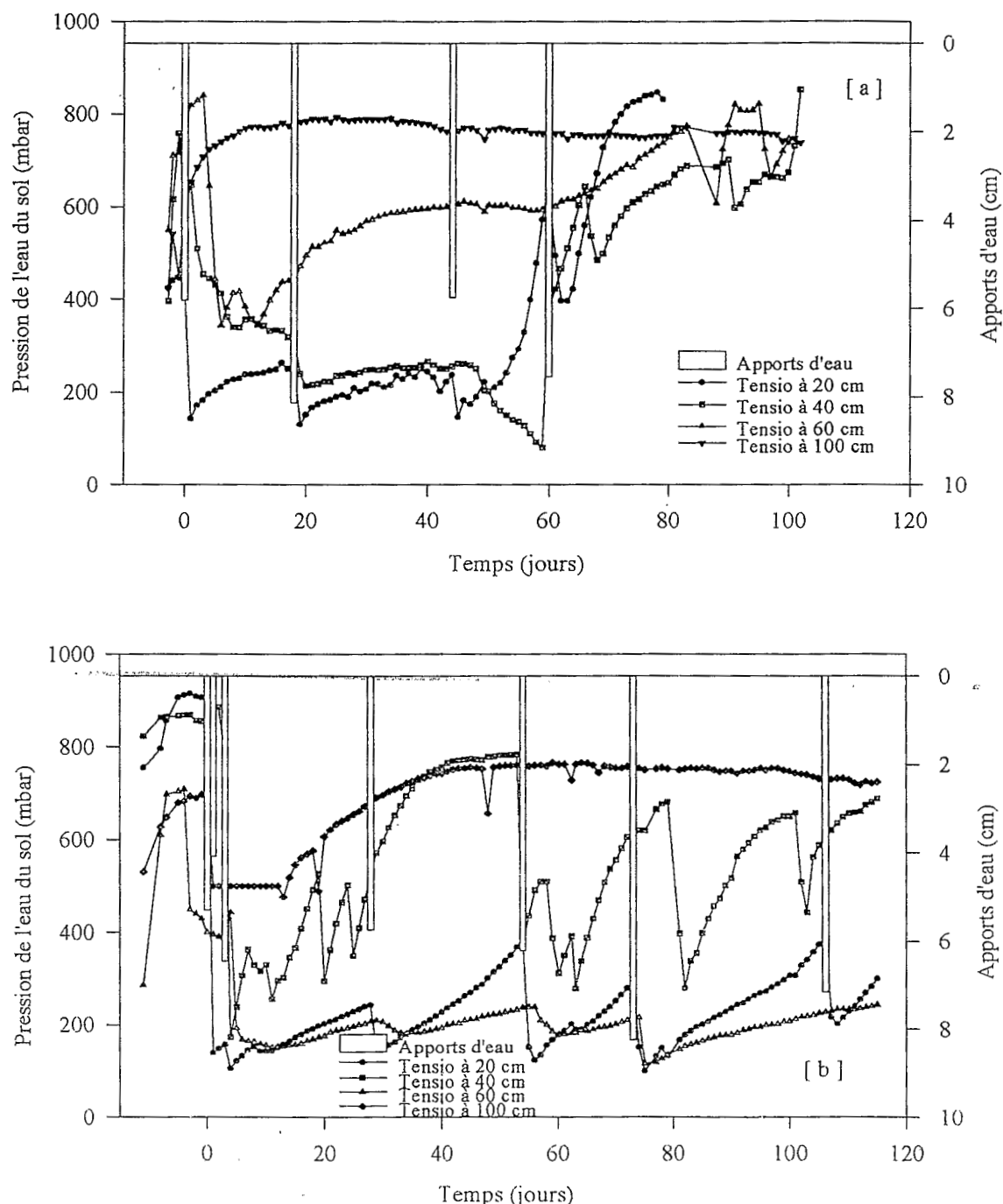
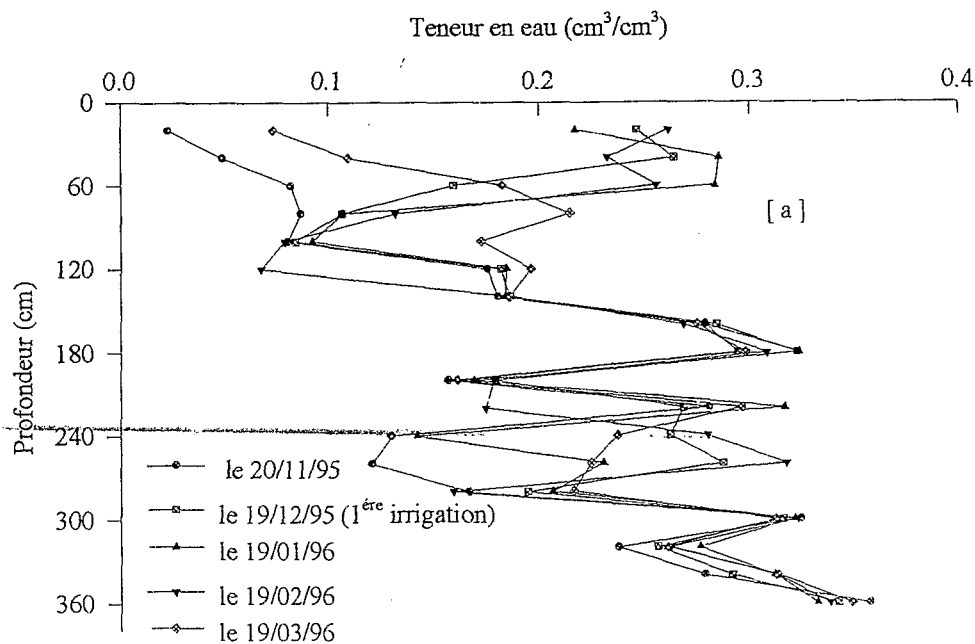


FIG. 5 : Représentation des relevés tensiométriques et des apports d'eau à Ouro Madiou : [a] parcelle tomates et [b] parcelle oignons

III.4. Evolution de l'humidité du sol

L'utilisation de la sonde à neutrons s'est révélée comme étant un des moyens les plus efficaces pour suivre l'évolution de l'humidité d'un sol donné. Ainsi, dans le souci d'obtenir des mesures régulières et continues d'humidité, nous avons utilisé une méthode de détermination indirecte : la méthode neutronique. Pour suivre l'état de l'humidité du sol et son évolution durant la campagne, nous avons installé deux tubes d'accès pour la sonde à neutrons dont, un dans la parcelle "tomates" (tube N°1) et un autre dans la parcelle "oignons" (tube N°2). La sonde à neutrons permettant d'obtenir des mesures continues et "in situ" de l'humidité du sol, elle sera couplée à une sonde gamma densimétrique pour obtenir des humidités volumiques. Pour le principe, l'installation et l'étalonnage de la sonde à neutrons et la sonde gamma ainsi que les courbes d'étalonnages et quelques résultats obtenus dans ce périmètre voir Diaw 1996. Cependant, nous présentons ci-dessous quelques profils d'humidité obtenus au niveau des parcelles oignon et tomate. L'analyse de ces profils montre qu'après plus de trois mois d'irrigation, le front d'humidité ne dépasse guère la profondeur 150 cm (voir figure 6 : [a]). Cette zone sèche est également confirmée par les relevés tensiométriques dans la parcelle tomate, le tensiomètre à 100 cm de profondeur restant toujours sec (voir figure 5 : [b]).



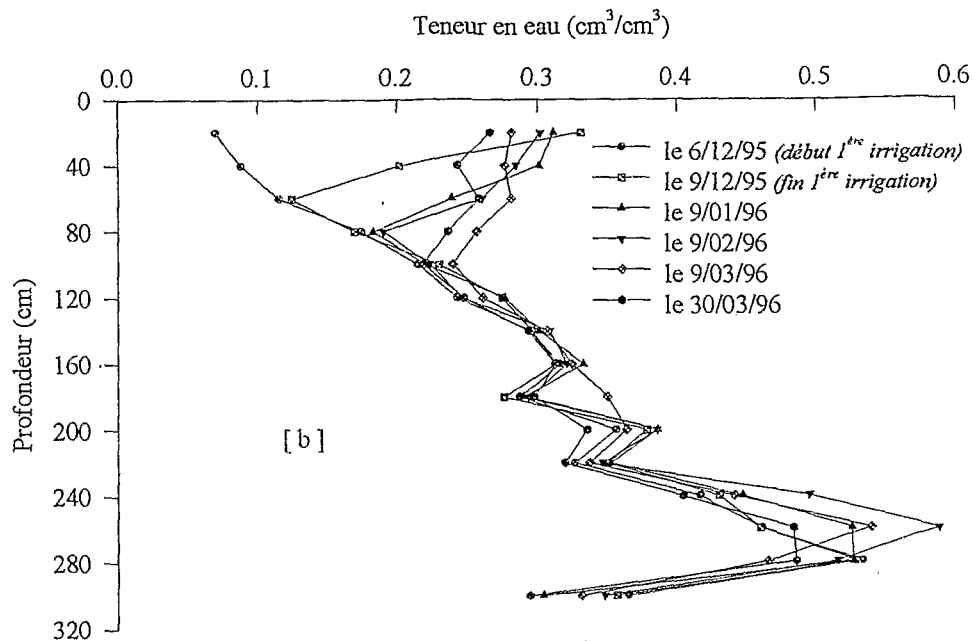


FIG. 6 : Evolution de la teneur en eau du sol durant la campagne agricole : [a] au niveau du tube N°1 et [b] au niveau du tube N°2.

A partir des résultats obtenus à l'aide de la sonde à neutrons, nous pouvons évaluer le volume d'eau contenu dans le sol par unité de surface. Ce volume peut s'exprimer comme une lame d'eau de hauteur définie par :

$$S = \int_{z_0}^0 \theta(z) dz \quad (1)$$

S : stock d'eau [L]

θ : la teneur en eau [$L^3 L^{-3}$]

z : la cote altimétrique [L]

Ainsi, nous avons essayé de représenter en annexe (figure A-4) l'évolution de la lame d'eau stockée dans les deux parcelles.

III.5. Mesure de l'évaporation au niveau du périmètre

La mesure de l'évaporation est souvent très délicate. Pour certaines méthodes basées sur les données climatiques, elle devient laborieuse et nécessite l'installation d'une véritable station météorologique. En ce qui nous concerne, nous avons opté pour l'installation d'un bac évaporatoire à partir duquel nous pouvions déterminer l'évapotranspiration potentielle des cultures à partir d'une évapotranspiration d'une culture de référence ET_0 . Pour ce faire, nous avons installé un bac de type ORSTOM qui est une version à peine modifiée du bac Colorado : bac de $1m^2$ sur 60 cm de profondeur. Il est enterré de sorte que le niveau de l'eau dans le bac et celui du sol soient à 10 cm du rebord (c'est-à-dire que le niveau de l'eau dans le bac est au niveau du sol). Les mesures sont volumétriques : une pointe fixe est calée au niveau normal de l'eau. Pour mesurer la lame d'eau évaporée depuis la mesure

précédente, on verse un volume d'eau connu jusqu'à l'affleurement de la pointe : un litre d'eau ajouté correspond à 1 mm d'évaporation.

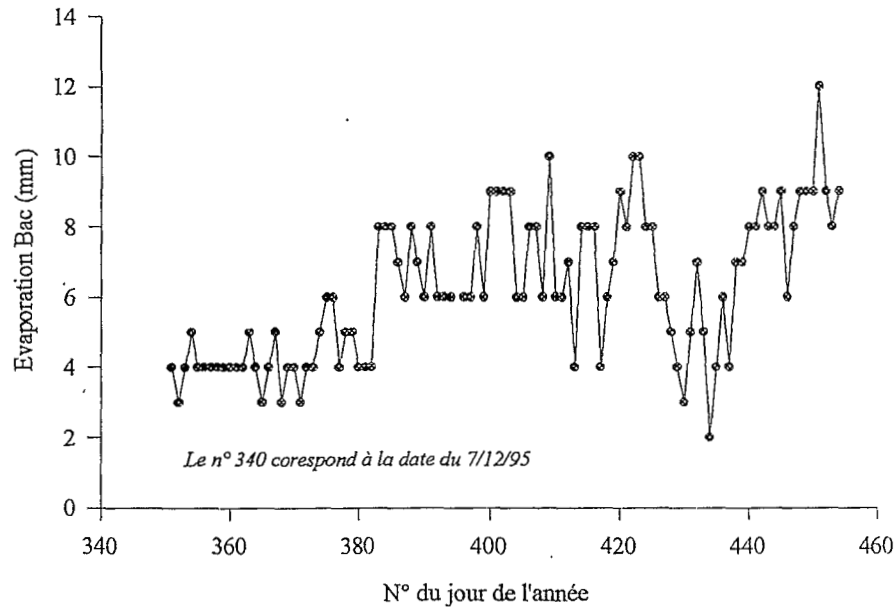


FIG. 7 : Evolution journalière de l'évaporation bac

Le procédé n'est pas très précis pour l'évaporation journalière, mais il devient sûr pour des périodes décennales ou plus longues. Pour établir la relation entre l'évaporation bac et l'évapotranspiration de la culture de référence ET_0 , on utilise des coefficients déterminés empiriquement et qui tiennent compte du climat, du type de bac et du milieu environnant. Le coefficient du bac (K_p) reflète l'effet du climat sur l'évapotranspiration de la culture de référence ET_0 qui est utilisée par la suite pour déterminer l'évapotranspiration de nos cultures. Cette évapotranspiration est déterminée à partir de la relation suivante :

$$ET_0 = K_p E_{bac} \quad (2)$$

ET_0 : évapotranspiration de la culture de référence

E_{bac} : évaporation bac [L]

K_p : coefficient bac [L]

Compte tenu du type de bac que nous avons installé et de l'humidité relative moyenne, nous avons un coefficient bac K_p qui est égal à 0,75.

Pour tenir compte de l'effet des caractéristiques culturales sur les besoins en eau des cultures, on propose des coefficients culturaux (K_c) qui permettent d'établir la relation entre ET_0 et l'évapotranspiration de la culture, ET (culture). La valeur de K_c représente l'évapotranspiration d'une culture poussant dans des conditions optimales et produisant des rendements optimaux. L'évapotranspiration de la culture est obtenue par la relation :

$$ET(\text{culture}) = K_c ET_0 \quad (3)$$

Les valeurs de K_c sont déterminées suivant les caractéristiques de la culture, de l'époque de plantation ou de semis, ou des stades de développement de la culture mais également des

conditions climatiques générales, notamment le vent et l'humidité. Dans ce qui suit nous essayerons de déterminer les coefficients culturaux des deux types de culture que nous avons à Ouro Madiou à savoir la tomate et l'oignon.

Pour ce faire, nous nous basons sur les recommandations de la F.A.O. pour l'estimation des besoins en eau des cultures (Bulletin F.A.O. n°24). Elles consistent à considérer quatre phases de développement pour les cultures :

1. la phase initiale, c'est à dire démarrage de la croissance, quand la surface du sol n'est pas, ou à peine couverte par la culture.
2. la phase de développement, depuis le moment où la phase initiale s'achève jusqu'au moment où un couvert total effectif du sol est réalisé.
3. la phase de mi-saison, qui commence à la fin de la phase de développement et s'achève quand débute la maturation.
4. la phase d'arrière saison, depuis la fin de la mi-saison jusqu'à maturation complète ou récolte.

Les valeurs proposées dépendent de l'humidité relative minimum (HR_{min}) du milieu ainsi que la vitesse du vent (vent m/s). Ces deux grandeurs ont été obtenues à partir de la station météo de Podor.

III.5.1. Courbe de K_c pour la culture d'oignon

D'après les renseignements recueillis, la durée de la saison végétative et des phases de développement est estimée à 120 jours. Cette durée est répartie au niveau des quatre phases comme suit : phase initiale 15 jours (après le repiquage), phase de développement 30 jours, phase de mi-saison 35 jours et phase d'arrière-saison 40 jours. Le repiquage a eu lieu en Décembre et nous avons supposé une fréquence d'irrigation de 20 jours pour pouvoir estimer le K_c à l'état initial. L'évolution du coefficient cultural K_c pour l'oignon est présentée à travers la figure 8 ci-dessous.

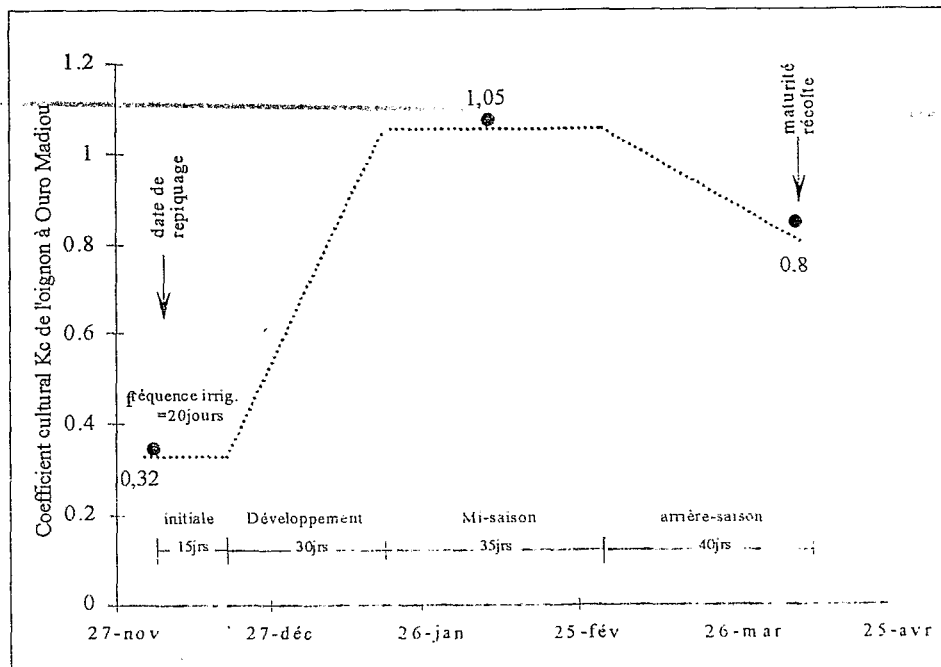


FIG. 8 : Courbe du coefficient cultural de l'oignon à Ouro Madiou (climat sec, HR_{min} faible, vent léger à modéré et ET_0 phase initiale ~ 3 mm/jour).

Le graphique ainsi déterminé permet d'obtenir des valeurs de K_c pour des périodes de 10 jours ou de 30 jours permettant de déterminer l'ETR décadaire ou mensuelle. Estimant la valeur de K_c durant la phase de développement à 0,7, nous avons estimé, sur la base d'un K_c mensuelle, la lame d'eau évapotranspirée par la culture d'oignon à 428 mm. Comparé à la lame d'eau apportée par irrigation qui est de 432 mm, on voit nettement que les chances d'une infiltration profonde sont très faibles, d'où une recharge de la nappe probablement nulle.

III.5.2. Courbe de K_c pour la culture de tomate

S'agissant de la culture de tomate, la durée de la saison végétative et des phases de développement est estimée à 125 jours répartis au niveau des quatre phases comme suit : phase initiale 15 jours après repiquage, phase de développement 30 jours, phase de mi-saison 40 jours et phase d'arrière-saison 40 jours. Comme que pour les oignons, le repiquage a eu lieu en décembre et nous considérons une fréquence d'irrigation de 20 jours. La courbe représentant l'évolution du coefficient cultural K_c pour la tomate est présentée dans la figure 9 ci-dessous.

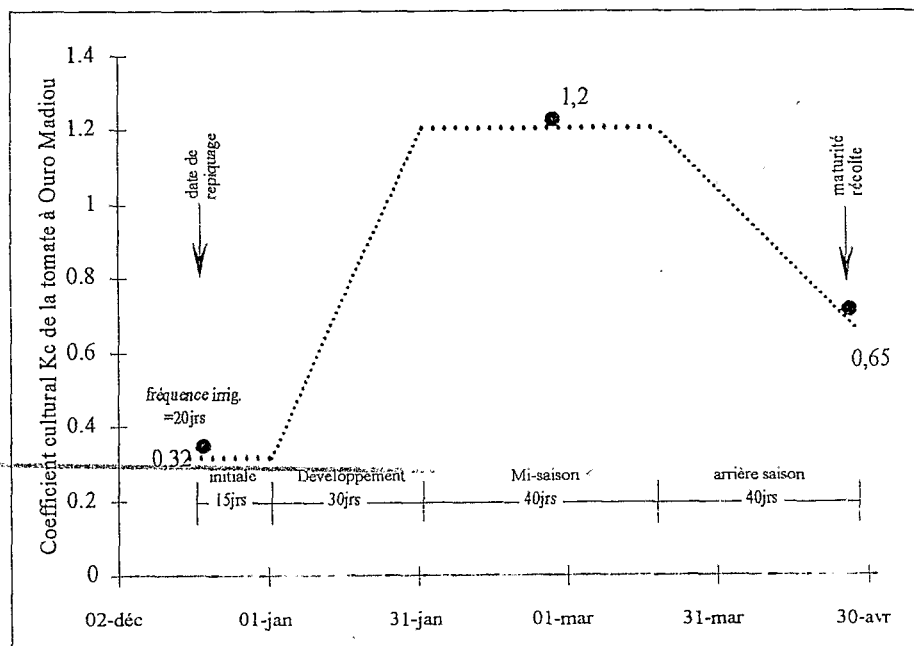


FIG. 9 : Courbe du coefficient cultural de la tomate à Ouro Madiou (climat sec, HRmin faible, vent léger à modéré et ET_0 phase initiale ~ 3 mm/jour).

La courbe de K_c ainsi déterminée, nous procédons de la même manière pour estimer la lame d'eau évapotranspirée par la tomate jusqu'au 30 mars 1996 (dernier jour de mesure). Cette lame d'eau est évaluée à 446 mm. Cette valeur confirme la faiblesse des apports d'eau dans la parcelle tomate 273 mm, et on peut alors se poser des questions sur le comportement de ces cultures et donc, de leur rendement. Elle confirme également que des percolations profondes pour recharger éventuellement la nappe ne sont pas envisageables, sauf localement.

IV. ESSAI DE BILAN HYDRIQUE DANS LES PARCELLES

A partir du calcul des lames d'eau stockées dans les horizons du sol, et connaissant le profil hydrique initial, nous pouvons à chaque instant évaluer la réserve du sol, pour ainsi établir un bilan hydrique.

IV.1. Essai de bilan au niveau du tube N°1 (parcelle tomate)

Si nous considérons le premier mètre de sol, la lame d'eau initiale avant irrigation est évaluée à 171 mm. Cette valeur semble à première vue assez importante. Cette importance s'explique par des débordements répétés des eaux du canal principal dans la parcelle, ainsi que les fuites d'eau provenant des parcelles voisines. Après la première irrigation, c'est-à-dire le 20/12/95, 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 19/03/96, 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. Cette diminution de la lame d'eau stockée dans le sol à la fin de la dernière irrigation peut trouver son explication à travers deux phénomènes : d'une part, une évapotranspiration intense que nous essayerons d'évaluer dans la suite et, d'autre part, par une percolation de cette eau vers les horizons de profondeur. Par contre, les intrusions d'eau dans la parcelle sont importantes et constituent des quantités difficiles, voir impossible à quantifier. Dans ces conditions, il nous est impossible de faire un bilan hydrique correct au niveau de la parcelle. Toutefois, nous allons essayer d'établir un bilan qui se traduit par l'équation suivante :

$$\sum App \doteq RS + ETR + IP \quad (4)$$

$\sum App$: la lame d'eau apportée par irrigation [L]

RS : réserve en eau du sol [L]

IP : infiltration profonde [L]

ETR : évapotranspiration [L]

La somme des apports est estimée à 273 mm. Si l'on considère le déficit de la réserve du sol à la fin de la dernière irrigation (14 mm), nous nous rendons compte que la lame d'eau réservée à l'évapotranspiration est faible (286 mm), comparée aux besoins en eau de la culture pour la même période (446 mm). Il est donc clair que toute l'eau apportée par irrigation sera reprise par évapotranspiration.

IV.2. Essai de bilan au niveau du tube N°2 (parcelle oignon)

Dans ce cas aussi, nous considérons le premier mètre de sol, ce qui nous donne 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 259 mm à la fin de la dernière irrigation, soit au total une augmentation de la lame d'eau de 128 mm. Dans cette parcelle, les intrusions d'eau étant très faibles, nous pouvons essayer de dresser un bilan hydrique à partir de l'équation (4).

Les apports d'eau sont estimés à une lame d'eau équivalente de 432 mm et la réserve en eau du sol à 128 mm. Comme le niveau de la nappe ne fluctue presque pas durant toute cette

période, nous pouvons supposer que les infiltrations profondes sont nulles, de ce fait la lame d'eau évapotranspirée au niveau de la parcelle est estimée en moyenne à 304 mm. Cette lame d'eau est inférieure aux besoins en eau de la culture estimés dans le paragraphe III.5.1 à 428 mm. Nous pouvons donc en déduire que les cultures ne fonctionnent pas non plus de manière optimale et qu'il faudrait augmenter les doses d'irrigation ou tout simplement les fréquences.

V. DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans ce périmètre, l'irrigation se fait avec une fréquence assez faible (parfois un mois d'intervalle entre deux irrigations). Le volume d'eau nécessaire est estimé environ à 450 m³ par hectare pour une campagne de culture d'oignons. Les cultures ne demandent certes pas beaucoup d'eau comparé à une campagne rizicole, mais le constat général est que les apports d'eau par irrigation sont très faibles (quatre irrigations pour la parcelle "tomates" et cinq pour la parcelle oignons, voir figure 3). Nous venons de voir aussi que les besoins en eau de ces cultures durant la période de mesures sont estimés à 446 mm pour la culture de tomate et 428 mm pour la culture d'oignon. Ainsi, pour un bon fonctionnement des cultures, il faudrait qu'elles aillent s'alimenter dans la réserve en eau du sol. Nous avons déjà constaté dans la parcelle tomate une diminution de la réserve en eau du sol par rapport à l'état initial. Il est donc clair que la faible fréquence des apports d'eau conjuguée à l'effet de l'évapotranspiration, a pour conséquence une infiltration profonde presque nulle. Nous pouvons ainsi dire qu'il est difficile d'observer, dans ces conditions, une recharge de la nappe à partir des eaux d'irrigation dans le périmètre d'Ouro Madiou et ce, pour la campagne de contre saison froide 1995/96. En outre, les profils hydriques obtenus à partir de la sonde à neutrons montrent que le front d'humidité de surface ne dépasse pas la profondeur 150 cm (voir figure 6). Partant de ce constat, nous pouvons même remettre en cause le bon lessivage des sols par l'irrigation, d'où une dégradation probable des sols par alcalinisation (Boivin et laval 1996).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARYA L. M. and PARIS J. F., 1981 :

A physicoempirical Model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data : Soil Sci. Soc. Am. J. 45: p. 1023-1030.

Boivin P. et 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, 29p.

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. Thèse de l'Université Louis Pasteur, Institut de Mécanique des Fluides, Strasbourg, France, 239p. plus annexes.

F.A.O., 1986 :

Les besoins en eau des cultures. Bulletin F.A.O. d'irrigation et de drainage N°24, 198p.

Hillel D., 1988 :

L'eau et le sol : principes et processus physiques. Ed Vander, Bruxelles, 288p.

Laval F., 1996 :

Caractérisation hydrodynamique des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal. Région de Podor, NDiaye. Méthode du Slug test, ORSTOM-Dakar, 21p et annexes.

Luca A. de, 1996 :

Caractérisation physique des sols alluviaux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal : étude préliminaire pour une détermination des conductivités hydrauliques à saturation. Travail pratique de diplôme-EPLF-département de génie rural IATE-Pédologie, 33p + annexes.

Russo, D., 1988 :

Determination soil hydraulic properties by parameter estimation : on the selection of a model for the hydraulic properties. Water resources research, vol. 24, n°3, p. 453-459.

Vachaud G., Dancette C., Sonko S. et Thony J.L., 1978 :

Méthodes de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. Ann. agron., 1978, 29 (1), pp 1-36.

Van Genuchten M.Th., Leij F.J. and Yates S.R. 1991 :

The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, U.S. Salinity Laboratory ; U.S. department of agricultural research service, Riverside, California 92501.

Van Genuchten, M., Th. 1980 :

A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp. 892 -898.

LISTES DES FIGURES

	<i>pages</i>
FIG. 1 Périmètre de OURO MADIOU : Plan de situation	3
FIG. 2 Equipement du dispositif expérimental	4
FIG. 3 Apports d'eau ; PA, parcelle oignons et PC, parcelle tomates. (l'origine des abscisses correspond au 1/12/95 et la 1ère irrigation a eu lieu le 6/12/95 dans PA et le 19/12/95 dans PC)	5
FIG. 4 Représentation des relevés piézométriques (le zéro des abscisses correspond à la première irrigation de la parcelle oignon et l'irrigation de la parcelle tomate s'est faite le 13 ^{ème} jour).	6
FIG. 5 Représentation des relevés tensiométriques et des apports d'eau à Ouro Madiou : [a] parcelle tomates et [b] parcelle oignons	8
FIG. 6 Evolution de la teneur en eau du sol durant la campagne agricole : [a] au niveau du tube N°1 et [b] au niveau du tube N°2.	9
FIG. 7 Evolution journalière de l'évaporation bac	10
FIG. 8 Courbe du coefficient cultural de l'oignon à Ouro Madiou (climat sec, HRmin faible, vent léger à modéré et ET_0 phase initiale ~ 3 mm/jour).	12
FIG. 9 Courbe du coefficient cultural de la tomate à Ouro Madiou (climat sec, HRmin faible, vent léger à modéré et ET_0 phase initiale ~ 3 mm/jour).	13
FIG. A-1 : Cartes d'isovaleurs de pourcentage en argiles	17
FIG. A-2 : Coupe lithologique, positionnement des piézomètres et de la nappe	19
FIG. A-3 : Courbes granulométriques de différents horizons (établies à partir d'échantillons prélevés lors des premiers sondages sur le terrain).	20
FIG. A-4 : Evolution du stock d'eau cumulé dans le sol : [a] au niveau du tube de sonde N°1 et [b] au niveau du tube de sonde N°2. (abscisse 0 correspond au 18/11/95).	23

ANNEXES

A.1. CARACTERISTIQUE DU SOL

Ce périmètre représente un des rares endroits où l'on peut rencontrer les différents types de sol de la région. En effet, le transect considéré part d'un bourrelet de berge récent, composé d'un sol léger ou *fondé* (sol de levées), et évolue par épandage avec un gradient argileux assez régulier en un sol lourd ou *hollaldé* vers la cuvette de décantation exploitée par le périmètre de Nianga. Les investigations faites montrent que généralement, dans le secteur des tomates, nous avons un sol limoneux-sableux et, dans le secteur des oignons, nous avons un sol lourd (sol des cuvettes de décantation, voir figure A-1).

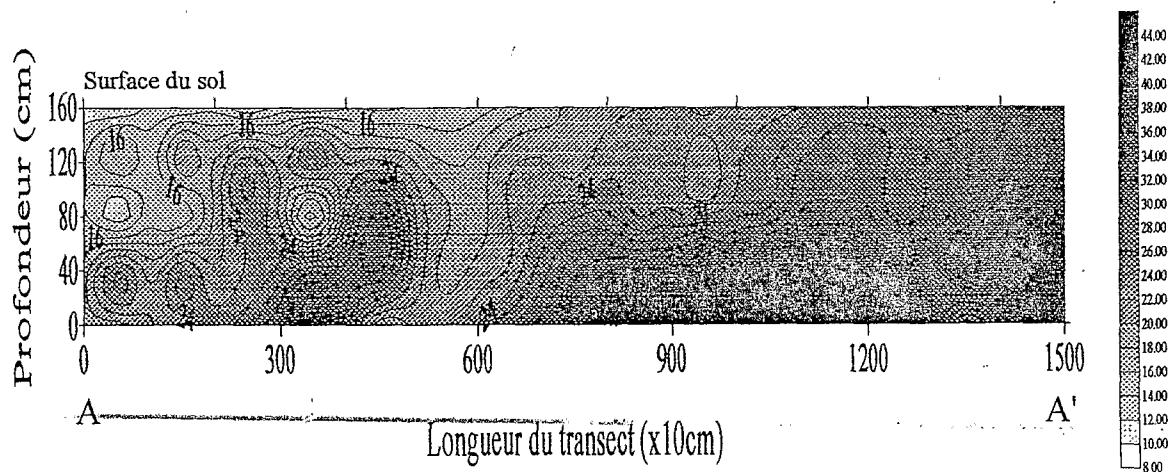


FIG. A-1 : Cartes d'isovaleurs de pourcentage en argiles

Une tentative d'analyse texturale du matériau poreux a été effectuée à partir des résultats de la granulométrie d'échantillons de différents sondages effectués sur le transect. Cette analyse granulométrique nous a permis de déterminer des classes texturales qui sont caractérisées par des variations limitées et connues des teneurs en sables, limons et argiles. Concrètement, on se réfère à un triangle de texture qui n'est rien d'autre qu'un diagramme permettant de figurer par un point dans le plan, une composition granulométrique donnée. Les sondages représentés ci dessous sont positionnés; dans le secteur tomates pour le sondage 1, à la limite entre le secteur tomates et le secteur oignons pour le sondage 2 et dans la secteur oignons pour le sondage 3.

Tableau 1 : Caractéristiques granulométriques et classe texturale du matériau poreux; [a] sondage 1, [b] sondage 2 et [c] sondage 3

[a]

Profondeur (cm)		Composition granulométrique [%] et Classe Texturale		
Sondage 1	Argile	limons totaux	sables totaux	Classe Texturale*
0 - 40	11,8	31,8	54,8	SL
40 - 80	13,2	33,0	52,1	SAL
80 - 120	34,8	47,9	15,6	ALS
120 - 200	41,5	45,0	13,5	AL
200 - 260	16,3	45,6	38,1	LSA
260 - 350	35,1	47,7	17,8	ALS
350 - 380	27,4	49,3	24,2	ALS
380 - 440	24,2	39,9	37,1	LAS
440 - 480	12,6	24,5	64,0	SA

[b]

Profondeur (cm)		Composition granulométrique [%] et Classe Texturale		
Sondage 2	Argile	limons totaux	sables totaux	Classe Texturale*
0 - 40	19,1	42,3	38,8	LSA
40 - 120	22,5	47,5	30,0	LAS
120 - 140	23,5	31,2	45,5	LAS
140 - 180	30,2	36,8	33,1	LAS
180 - 200	26,9	34,1	38,5	ALS
200 - 260	33,2	34,9	31,3	A
260 - 300	45,0	34,1	21,7	A
300 - 340	54,8	28,1	17,3	SS
340 - 380	5,7	9,3	85,5	SS

[c]

Profondeur (cm)		Composition granulométrique [%] et Classe Texturale		
Sondage 3	Argile	limons totaux	sables totaux	Classe Texturale*
0 - 40	40,4	40,5	19,9	ALS
40 - 120	30,0	33,5	35,9	LAS
120 - 150	35,1	42,4	22,3	ALS
150 - 200	50,8	37,7	11,5	A
200 - 240	56,5	34,1	6,8	A
240 - 270	21,5	16,9	61,3	SA
270 - 320	12,7	23,4	64,0	SA
320 - 350	2,9	3,9	92,7	SS
350 - 380	4,1	4,6	91,5	SS

* Type de texture : Très lourde : A argileuse; Lourde : ALS d'argile limono-sableuse, AL d'argile limoneuse, LAS limono-argilo-sableuse; Moyenne SA de sable argileux, SAL de sable argilo-limoneux; LSA de limon sablo-argileux; Légère : SL de sable limoneux; Très légère : SS de sable.

La classification texturale ainsi représentée est obtenue à partir du triangle de texture utilisé par le "Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée" (GEPPA). Il est clair que des matériaux qui diffèrent seulement de quelques pour cent d'argile, de limons ou de sable, auront probablement des comportements agronomiques assez voisins, toutes choses égales par ailleurs.

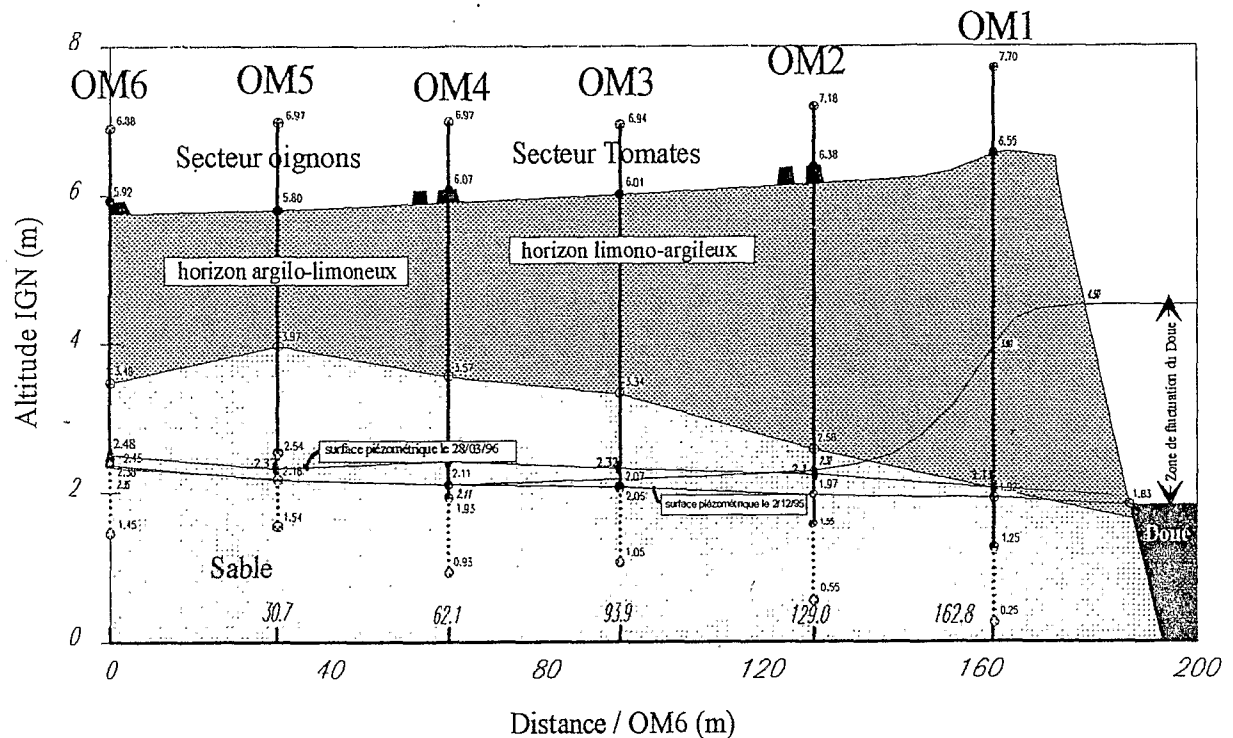
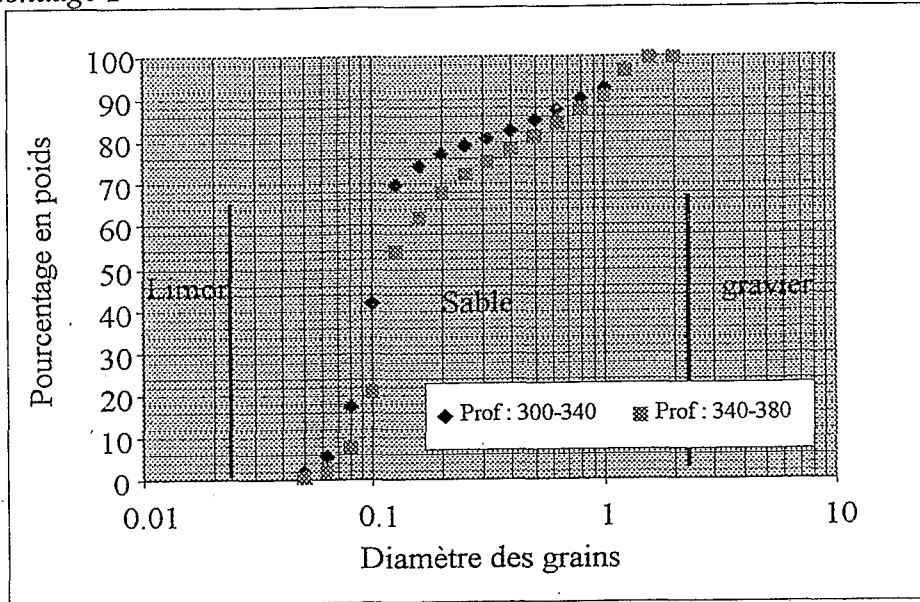


FIG. A-2 : Coupe lithologique, positionnement des piézomètres et de la nappe

En ce qui concerne le sable aquifère, il est constitué d'un sable fin de type nouakchottien (voir figure A-2). Ce sable est situé en moyenne à 2 mètres au niveau du piézomètre OM5 de la surface du sol et à 4 mètres au niveau du piézomètre OM1. 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, période à laquelle la nappe se trouve au niveau du piézomètre OM1 à la cote de 3,90 mètre IGN et au même moment à la cote 2,2 mètres IGN en OM5 le niveau du Doué étant à la cote 4.50 (voir figure A-2). En condition de basses eaux dans le Doué, la nappe est à 4 mètres en moyenne de la surface du sol. L'installation des piézomètres a permis également de dresser une coupe lithologique au niveau du transect (figure A-2). Cette coupe lithologique permet d'avoir une idée sur l'évolution en profondeur du matériau poreux, y compris le niveau de transition avec le sable aquifère. Rappelons également les principaux intérêts de ce site : un intérêt pratique dans la mesure où il est facile d'accès et un intérêt scientifique vu la variabilité du matériau poreux.

Sondage 2



Sondage 3

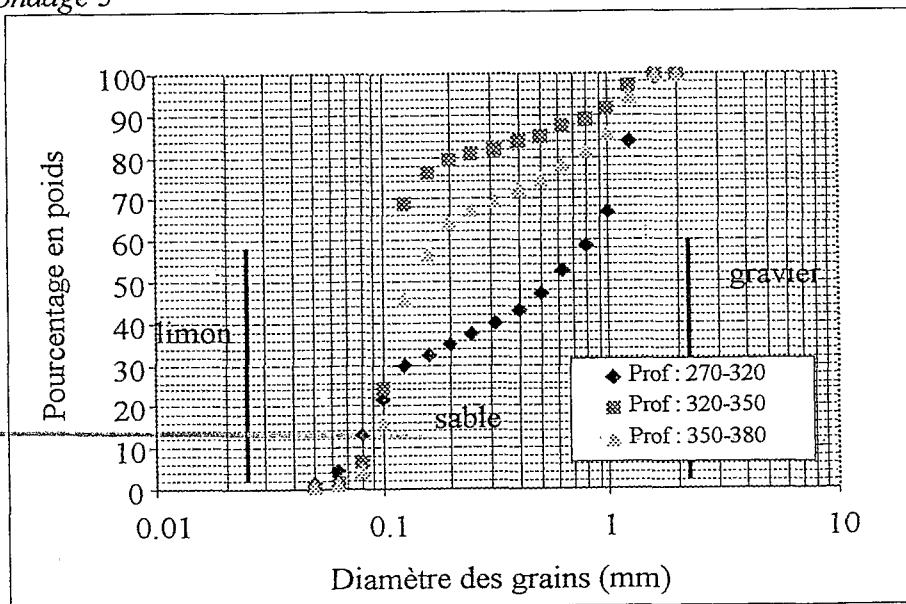


FIG. A-3 : Courbes granulométriques de différents horizons (établies à partir d'échantillons prélevés lors des premiers sondages sur le terrain).

A.2. CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE

En milieu non saturé, l'une des caractéristiques physiques principales est la courbe de rétention et il est donc indispensable de la déterminer pour toute caractérisation qui se veut conséquente d'un sol non saturé donné. Plusieurs méthodes sont employées pour leur connaissance, d'aucuns optent pour une détermination au champ et d'autres pour une détermination au laboratoire. La méthode de détermination au champ la plus utilisée est celle du drainage interne qui repose sur la mesure simultanée des variations de la teneur en eau et de la charge hydraulique en conditions de ressuyage contrôlé après un apport d'eau important (Vachaud, 1977). En laboratoire, la relation fonctionnelle entre l'humidité du sol

et la succion est souvent déterminée à l'aide d'une plaque de tension pour les basses succions (< 1 bar) et au moyen d'un appareil de pression à membrane (Hillel, 1988) pour les succions supérieures. Par contre, si l'échantillon de mesure n'est pas représentatif, il est clair qu'on n'aura pas de concordance entre les mesures *in situ* et les mesures de laboratoire. Ces deux méthodes, souvent utilisées pour la détermination des courbes de rétention sont laborieuses, et demandent un investissement temporel et financier important. Une autre possibilité est d'opter pour une caractérisation hydrodynamique par estimation de paramètres de lois empiriques. En effet, les relations $h(\theta)$ et $K(\theta)$ d'un sol peuvent être décrites par des modèles déterministes comportant un nombre limité de paramètres à déterminer (Russo, 1988). Pour ce faire, nous avons déterminé les courbes de rétention de nos sols en utilisant un modèle physico-empirique proposé par Arya et Paris (1981) basé sur l'analyse granulométrique, la densité de l'échantillon de sol de même que la densité des particules (voir Diaw, 1996). Les propriétés physiques des sols sont décrites par l'utilisation des fonctions de Mualem et de Van Genuchten. Nous avons ajusté la fonctionnelle $h(\theta)$ obtenue à partir de la granulométrie et du modèle de Arya et Paris, à la fonction de Van Genuchten. Cet ajustement nous a permis d'estimer les paramètres physiques (θ_r , θ_s , α , n) qui sont des caractéristiques intrinsèques de chaque type de sol.

A.2.1. Méthodes de caractérisation

Dans cette partie, nous présentons les différentes méthodes utilisées pour la caractérisation hydrodynamique de nos sols. Il s'agit des méthodes mises en oeuvre pour déterminer les conductivités hydrauliques à saturation ainsi que celles employées pour établir la courbe de rétention des sols. A son tour, cette courbe de rétention nous permet de déterminer les paramètres hydrodynamiques autres que la conductivité hydraulique à saturation et qui sont des caractéristiques des sols.

A.2.1.1. Détermination de la conductivité hydraulique à saturation

La détermination de la conductivité hydraulique des sols a été faite à partir de deux méthodes suivant le type de sol. En effet, pour les horizons de sol supérieur au niveau des périmètres, nous avons procédé à des prélèvements d'échantillon, pour ensuite les traiter avec un perméamètre à charge variable. La méthode et les résultats sont décrits en Annexe A. Pour les aquifères, la détermination de la conductivité hydraulique à saturation a été effectuée par la méthode du "Slug-test" ou choc hydraulique (Laval, 1996). Nous avons obtenu des résultats assez cohérents du reste, et les valeurs sont caractéristiques du type d'aquifère que nous avons dans la région, à savoir du sable fin (voir Diaw 1996).

A.2.1.2. Détermination de la courbe de rétention des sols

Nous avons utilisé le modèle de Arya et Paris (1981) pour déterminer les courbes de rétention de nos sols. Il est essentiellement basé sur les résultats de l'analyse granulométrique, la densité apparente de l'échantillon de sols traité ainsi que la densité des particules. Le traitement de la granulométrie de nos échantillons, nous a permis d'obtenir une série de courbes de rétention (une pour chaque échantillon). A partir de ces différentes courbes, nous avons estimé une courbe de rétention moyenne du sol étudié (Diaw 1996). Ainsi, l'estimation des caractéristiques hydrodynamiques de chaque type de sol a été effectuée à partir du code RETC (Van Genuchten, 1991).

A.2.2. Résultats des mesures

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus au niveau du périmètre. Il s'agit là d'exposer l'ensemble des caractéristiques hydrodynamiques des différents types de sol.

Il nous est très difficile de localiser précisément chaque hétérogénéité. Ainsi, dans le souci de simplifier le problème, nous avons alors, en première approximation, considéré deux types de sols dans ce périmètre : le sable aquifère et les horizons de sols supérieurs. Pour les horizons de sols supérieurs, nous considérons deux secteurs. Le premier secteur s'étend du bourrelet de berge du fleuve Doué jusqu'au piézomètre OM4, le sol sera considéré comme limono-argileux. Le second secteur s'étend du piézomètre OM4 jusqu'au piézomètre OM6, le sol est considéré comme argilo-limoneux.

A.2.2.1. horizons de sols supérieurs

Pour le premier secteur, nous avons une conductivité hydraulique à saturation moyenne de $K_{sat1} = 7,0 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$ (soit une valeur de $6,0 \text{ cm/j}$). Dans le second secteur, nous avons une valeur moyenne de la conductivité hydraulique à saturation qui est de $K_{sat2} = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$ (soit une valeur de $3,3 \text{ cm/j}$).

Evidemment dans le second secteur nous avons une conductivité hydraulique à saturation plus faible qui s'explique par l'importance de l'argile dans cette partie du périmètre.

Pour l'ensemble des deux secteurs, les paramètres hydrodynamiques sont déterminés par ajustement de la fonction de Van Genuchten sur la courbe de rétention du sol. Nous avons établi des courbes caractéristiques pour le secteur tomates constitué d'un sol plus ou moins léger, et également pour le secteur oignons constitué d'un sol plus lourd (voir Diaw 1996).

A.2.2.2. Sable l'aquifère de Ouro Madiou

La conductivité hydraulique à saturation est estimée en moyenne à $K_{sat} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$ (soit une valeur de $126,0 \text{ cm/j}$).

Les paramètres hydrodynamiques résultant de l'ajustement de la fonction de Van Genuchten sur la courbe de rétention du sable aquifère, sont présentés dans la tableau 1 ci-dessous.

Ainsi, le tableau récapitulatif ci-dessous nous permet de voir l'ensemble des paramètres hydrodynamiques des sols du périmètre de Ouro Madiou.

Tableau 2 : Récapitulatif des paramètres hydrodynamiques des sols à Ouro Madiou

Matériaux	θ_r [%]	θ_s [%]	α [cm^{-1}]	n [-]	Ks [cm/j]
1	6,7	34,6	0,0025	1,93	6,0
2	8,8	30,2	0,0015	1,72	3,3
3	2,2	30,6	0,007	1,58	126,0

1 : secteur tomate, 2 : secteur oignon, 3 : sable aquifère

A.3. VARIATION DE STOCK D'EAU DANS LE SOL

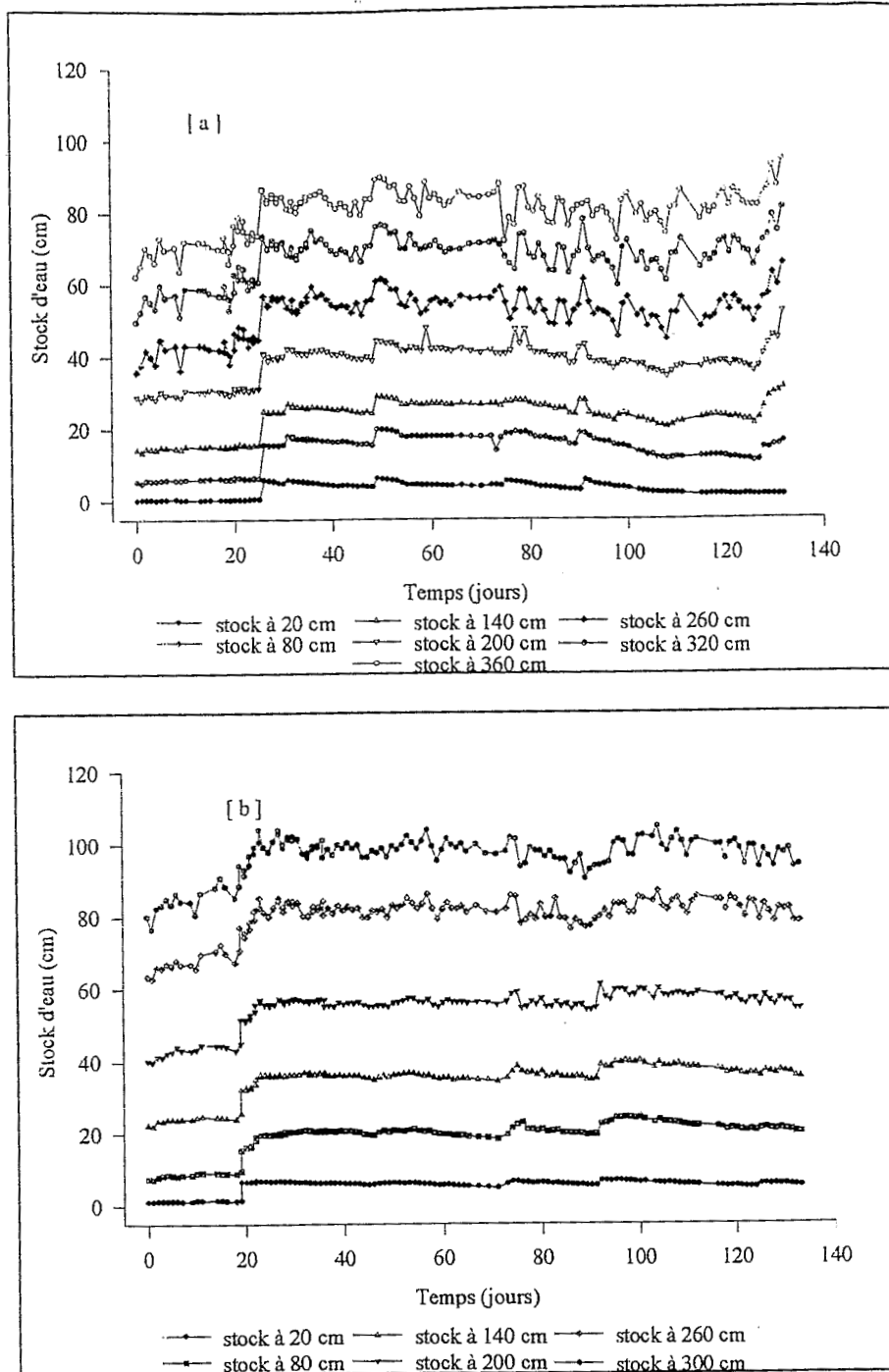


FIG. A-4 : Evolution du stock d'eau cumulé dans le sol : [a] au niveau du tube de sonde N°1 et [b] au niveau du tube de sonde N°2. (abscisse 0 correspond au 18/11/95).