

# PROJET DE REAMENAGEMENT DE LA PLAINE DE BOU SIRASSO : DIAGNOSTIC INFILTROMETRIQUE A PARTIR D'UNE NOUVELLE METHODE ET ORIENTATIONS POUR LA REHABILITATION DU PERIMETRE IRRIGUE

## RÉSUMÉ

L'article développe le volet « diagnostic infiltrométrique » d'une étude menée par la C.F.P.I.<sup>1</sup>, sur le périmètre irrigué de Bou Sirasso (Nord de la Côte d'Ivoire), en vue de sa réhabilitation.

L'analyse critique des études conduites avant aménagement, aboutit à la proposition d'une nouvelle approche, visant à mieux expliquer le comportement des sols de cette plaine alluviale. L'étude se déroule en trois étapes : regroupement a priori des sols sur la base de critères conditionnant fortement l'infiltration ; conduite d'une campagne infiltrométrique permettant d'estimer la consommation en eau des sols, dans les conditions de l'irrigation par submersion pratiquée sur le périmètre ; classement des sols suivant leur aptitude à l'irrigation.

Le diagnostic démontre le rôle prépondérant de la position de la nappe phréatique dans la plaine alluviale, sur la vitesse d'infiltration verticale de l'eau dans les sols ; le drainage excessif de la plaine par les cours d'eau, se traduit par l'impossibilité de pratiquer l'irrigation par submersion en dehors des zones basses du périmètre.

La réhabilitation passe donc par le contrôle du drainage de la plaine, par implantation de seuils dans le lit des cours d'eau permanents. Dans ces conditions, il serait possible d'augmenter très sensiblement les surfaces aptes à l'irrigation par submersion en contre saison.

Cette étude est également l'occasion de mettre au point une nouvelle méthode infiltrométrique donnant des mesures plus représentatives des conditions d'infiltration à l'échelle du casier rizicole que les « méthodes classiques ».

<sup>1</sup> C.F.P.I. : Centre de Formation Professionnel à l'Ingénierie de l'EMER et de l'ETSHER

Jacques FOURNIER \*

Ingénieur E.S.A.T. - Montpellier  
ETSHER - Département Gestion des Eaux et des Sols  
01 BP 594 Ouagadougou 01 - Burkina Faso

## ABSTRACT

The article develops the facet « infiltrometric diagnostic » of a study conducted by CFPI<sup>1</sup> on the irrigated perimeter of Bou Sirasso (Northern Côte d'Ivoire) for its rehabilitation. The critical analysis of the studies done before improvement works resulted in proposing a new approach aiming to better explain the soils behavior of this alluvial plain. The study is to be carried out in three steps : a preliminary soils grouping based on criteria which highly condition infiltration ; conducting an infiltrometric campaign which permits to estimate soils water consumption in the conditions of irrigation through flooding practiced on the perimeter ; soils classification according to their aptitude for irrigation. The diagnostic shows the important role of the position of ground water in the fluvial plain on the water vertical infiltration speed in soils : the excessive draining of the plain by rivers makes it impossible to practice irrigation through flooding apart from low zones of the perimeter.

Then rehabilitation occurs through controlling the plain draining with the deposit of sills in the rivers bed. In these conditions it would be possible to noticeably increase surfaces capable for irrigation through flooding during counter seasons.

This study also presents the opportunity to develop a new infiltrometric method which gives more representative measures of infiltration conditions in rice growing areas than « classic methods ».

## INTRODUCTION

**L**e périmètre irrigué de Bou Sirasso est situé dans la région nord de la Côte d'Ivoire, à 70 km au sud-ouest de Korhogo. Il s'agit d'une plaine alluviale aménagée en aval du barrage de Nafoun (60 millions de m<sup>3</sup>). Depuis leur mise en exploitation en 1991, les 400 ha destinés à la riziculture intensive sont nettement sous-utilisés, puisque les surfaces cultivées en riz sont en moyenne de 70 à 80 ha en saison des pluies et en contre saison. Plusieurs facteurs concourent à cette sous-utilisation.

En saison des pluies, les cultures irriguées entrent en concurrence avec les cultures pluviales de versant, coton principalement mais aussi cultures vivrières (maïs et autres céréales, igname et autres tubercules...). Les cultures pluviales restent prioritaires dans les stratégies paysannes. De plus, une partie du périmètre est difficilement accessible en période de crue (C.F.P.I., 1997). En saison sèche, la riziculture reste limitée aux sites accessibles à l'eau (problème de conception et de gestion du système de distribution de l'eau) et sur lesquels l'installation et le maintien d'une lame d'eau sont possibles. Cette dernière caractéristique est fonction de la perméabilité du sol (environ 70 % des sols présenteraient une perméabilité moyenne comprise entre 50 et 100 mm.h<sup>-1</sup> ; D.C.G.Tx., 1988) et de la position du casier dans la toposéquence.

Le dysfonctionnement du périmètre se traduit par une forte démotivation des paysans présents sur le site : mauvaise organisation et exploitation anarchique du réseau d'eau, absence d'entretien, parcelles en friche depuis plusieurs années.

Dans le but de proposer une réhabilitation du site, le B.N.E.T.D.<sup>1</sup> (ex D.C.G.Tx.<sup>2</sup>), organisme responsable de l'aménagement, a confié à la C.F.P.I. la conduite d'une étude devant permettre l'identification des obstacles à l'exploitation du périmètre et la proposition d'orientations techniques en vue d'une mise en valeur plus intensive.

Cette étude s'est déroulée sur 18 mois, de décembre 1995 à juin 1997. Elle comportait trois volets distincts : un volet hydraulique (systèmes de stockage et de distribution de l'eau) ; un volet infiltrométrique (diagnostic du comportement des sols à l'infiltration) ; un volet agronomique (techniques culturales, diversification de la production et des techniques d'irrigation).

L'étude infiltrométrique fait l'objet du présent article. Elle a deux objectifs principaux. En premier lieu, il s'agit de comprendre et de mettre en évidence le ou les facteurs explicatifs d'une perméabilité jugée excessive aux vues d'une campagne infiltrométrique effectuée avant aménagement. Cette perméabilité expliquerait en partie la sous-utilisation actuelle du périmètre. La mise en évidence de ces facteurs explicatifs doit permettre d'orienter une éventuelle réhabilitation.

Le second objectif est de réévaluer la perméabilité des sols, afin d'optimiser la mise en valeur du périmètre et l'utilisation actuelle d'une ressource en eau limitée. Il s'agit ici d'estimer des vitesses d'infiltration verticale à charge constante et dans les conditions de l'irrigation par submersion rencontrées sur le périmètre. Afin d'atteindre ces deux objectifs, une démarche originale a été mise en œuvre par la C.F.P.I.

## La démarche mise en œuvre

A l'origine de cette démarche : une analyse critique des données existantes et de la méthode retenue pour le diagnostic des sols de la plaine de Bou Sirasso et l'orientation de l'aménagement du périmètre irrigué (D.C.G.Tx., 1988 à 1993). Cette analyse met en exergue certaines carences, qui ne sont pas spécifiques aux études conduites ici, mais révèlent le manque d'outils simples et adaptés à ce type d'étude pré ou post-aménagement. Deux points méritent d'être relevés.

Le regroupement des sols de la plaine alluviale en unités simples ou complexes, s'est fait sur la base de critères pédologiques dits « morphogénétiques » (classification CPCS 1967, modifiée par l'ORSTOM pour la Côte d'Ivoire). Il permet essentiellement d'expliquer la genèse de ces sols et l'organisation des horizons au sein du profil type de chaque unité. Par contre, il ne donne pas d'indications suffisantes sur leur comportement à l'infiltration. Celui-ci dépend en grande partie de caractéristiques physiques facilement observables (texture, structure et porosité en grand d'origine structurale ou biologique ; position dans la topographie et par rapport à la nappe...) qui ne sont pas prioritairement prises en compte ici. Seule la texture intervient dans le classement des sols, mais toujours comme critère secondaire. Il en va de même pour l'organisation des différentes unités dans le paysage. Cette zonation pédologique « classique » apparaît pour le moins inadaptée à la problématique d'aménagement posée ici. En outre, elle n'est jamais utilisée dans la suite du diagnostic pour expliquer le comportement des sols à l'infiltration.

Une campagne infiltrométrique lourde est venue compléter l'étude pédologique : 117 sites de mesure au double anneau de Müntz, répartis de façon systématique sur 1000 ha de la plaine alluviale (D.C.G.Tx., 1988). Dans cette

étude, un site (casier de 1 m<sup>2</sup>) est caractérisé par deux mesures d'infiltration dont on fait la moyenne. Les essais d'infiltration sont effectués à charge constante (lame d'eau de 3 cm), jusqu'à obtention d'un régime d'écoulement stabilisé.

Cette campagne a permis de distinguer trois groupes ou classes de perméabilité : un groupe de sols de perméabilité modérée, où l'on mesure des vitesses moyennes d'infiltration de l'ordre de 10 mm.h<sup>-1</sup> ; un groupe de sols perméables, présentant des vitesses moyennes d'infiltration de l'ordre de 20 à 80 mm.h<sup>-1</sup> ; un groupe de sols très perméables, pour lesquels les vitesses moyennes d'infiltration sont de l'ordre de 180 mm.h<sup>-1</sup>.

L'analyse détaillée de cette campagne infiltrométrique pose le problème du système de mesure utilisé, de l'échelle d'étude, du protocole mis en œuvre et finalement de la représentativité des classes d'infiltrabilité proposées ici. Après élimination des essais infiltrométriques incomplets (vitesse d'infiltration non stabilisée), il apparaît que les coefficients de variation des mesures effectuées sur un même site ou sur une même unité texturale (et pendant une même période), sont toujours supérieurs à 60% et peuvent aller jusqu'à 105% (d'après essais D.C.G.Tx.). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette dispersion très importante des mesures sur des sites a priori homogènes :

1 - Le système de mesure utilisé : le double anneau donne des mesures considérées généralement comme précises, mais très ponctuelles (AUDRY, 1973 ; HENIN, 1977), qui ne caractérisent que la surface de mesure (100 cm<sup>2</sup>). HUMBEL (1975), explique la grande dispersion des mesures de conductivité hydraulique *in situ*, par le fait que l'essentiel du débit est assuré par les plus gros conduits de la porosité (d'origine structurale et biologique), dont la répartition est la plus irrégulière. De nombreux travaux de caractérisation hydrodynamique du

<sup>1</sup> B.N.E.T.D. : Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement.  
<sup>2</sup> D.C.G.Tx. : Direction et Contrôle des Grands Travaux.

sol font apparaître l'importance de ces « chemins de circulation préférentielle » affectant, entre autre les transferts liquides (BOIVIN et al., 1988 ; TOUMA et al., 1988 ; GASCUEL et al., 1988). Il s'agit de fissures, crevasses, pores d'origine biologique dont la prise en compte sera fonction de l'échelle d'observation.

2 - La variabilité naturelle des propriétés hydrodynamiques du sol : le sol est un milieu structuré, hétérogène et anisotrope, dont les caractéristiques d'état et de fonctionnement varient d'un site un l'autre, soit de façon aléatoire, soit selon certaines lois (BRUCKLER et al., 1988 ; GASCUEL et al., 1988 ; VOLTZ et al., 1988). L'organisation et les interactions entre constituants (argiles, matières organiques, minéraux plus ou moins inertes), génèrent une variabilité spatiale et une variabilité temporelle toute aussi importante (état hydrique, travail du sol...) des propriétés du sol. La description de son fonctionnement hydrodynamique à partir d'observations ponctuelles (étude de processus locaux), n'est donc pas transposable en tant que tel à la parcelle ou au bassin versant. La dispersion des mesures sur un même site ou une même unité, indique que la taille de l'échantillon (ici, la surface de mesure) est inférieure à la maille de l'hétérogénéité naturelle du sol.

L'étude de ces processus à une échelle macroscopique est une des voies possibles pour une meilleure compréhension du comportement d'un sol (en particulier avec des objectifs d'aménagement), (GUELINON et al., 1988). Cette approche devra, dans la mesure du possible, prendre en compte des états du sol représentatifs de la variabilité temporelle de ses propriétés. C'est l'orientation retenue pour le diagnostic infiltrométrique du périmètre de Bou Sirasso (voir plus loin dans le texte).

3 - Le non-respect d'un protocole standard, en particulier en ce qui concerne les états de surface et la correction des mesures en fonction

nier point semble fondamental en région tropicale. En effet, la campagne infiltrométrique conduite par la C.F.P.I. à Bou Sirasso montre qu'au cours d'un même essai, la température de l'eau fluctue entre 30 et 34°C. Elle peut même atteindre 38°C alors que la température de référence est de 20°C. Ces températures élevées se traduisent par une surestimation de l'ordre de 20 à 30% des vitesses mesurées (C.F.P.I., 1997). Bien sûr, ceci ne préjuge en rien de la température de l'eau dans les casiers rizicoles.

4 - L'absence de contrôle de la profondeur de la nappe phréatique (nappe d'inféro-flux) au moment de la mesure : ce facteur joue un rôle essentiel dans la dynamique d'infiltration de l'eau dans les sols, en particulier lorsqu'ils sont filtrants. Il est à mettre en relation avec la variabilité temporelle et spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols. Les mesures effectuées par la D.C.G.Tx. conduisent au regroupement des sols en classes de perméabilité sur la base de leur situation topographique, entre autre, sans qu'il soit possible de dégager une tendance particulière (les mesures ne sont pas rattachées à une profondeur de la nappe).

Finalement, cette démarche de diagnostic avant aménagement, lourde en investissement, n'a pas permis d'expliquer le comportement à l'infiltration des sols de la plaine alluviale de Bou Sirasso. Une diminution progressive de la vitesse d'infiltration de l'eau dans les sols après quelques années de riziculture (travail du sol, déstructuration de l'horizon de surface, tassements...) ayant été pronostiquée, la D.C.G.Tx. a engagé l'aménagement de la plaine, avec le peu de réussite que l'on connaît. Le seul facteur perméabilité des sols n'explique pas tout dans cet échec. Le dysfonctionnement du système d'amenée d'eau et les blocages d'ordre socio-économiques contribuent pour une part non négligeable à la sous-utilisation du périmètre (C.F.P.I., 1997).

Une nouvelle approche tenant

précédente a donc été proposée, afin d'orienter la réhabilitation du périmètre. Cette approche s'organise autour de trois axes principaux.

1- Zonation « a priori » des sols sur la base de critères simples conditionnant fortement la vitesse d'infiltration de l'eau : texture et structure de l'horizon cultural et des horizons sous-jacents ; position dans la toposéquence et altitude par rapport aux exutoires de la nappe phréatique (cours d'eau et drains fonctionnels). A partir de cette cartographie rapide de la plaine alluviale, un plan d'échantillonnage est élaboré pour la nouvelle campagne infiltrométrique. Des regroupements en classes de perméabilité seront proposés à l'issue de cette phase de mesure.

2- Mise au point d'une méthode de mesure qui permet d'estimer des vitesses d'infiltration pouvant être considérées comme représentatives des conditions d'infiltration de l'eau en riziculture inondée, pour une unité de sol (telle que définie en 1) et à l'échelle du casier rizicole.

En outre, cette nouvelle méthode doit conserver les qualités reconnues au double anneau de Müntz : précision des mesures, bonne « simulation » des processus d'infiltration verticale dans le cas d'une irrigation par submersion, simplicité de mise en œuvre et faible coût du matériel.

La conception de cette méthode infiltrométrique repose sur le constat suivant : toutes choses égales par ailleurs, la grande dispersion des mesures effectuées au double anneau de Müntz est liée à l'hétérogénéité naturelle du sol (hétérogénéité s'exprimant principalement par la structure et l'organisation de la porosité du sol) et à une échelle de mesure insuffisante (100 cm<sup>2</sup>) pour appréhender cette hétérogénéité. Une série d'essais à surfaces croissantes (anneau intérieur de 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 3 m<sup>2</sup>) a donc été réalisée sur chacune des unités de sol du périmètre. Compte tenu de l'influence démontrée de la dimension de l'anneau de garde sur les vitesses mesurées (GOM 02/92).

conserver les proportions du dispositif standard de Müntz pour tous les essais, soit un rapport entre la surface de l'anneau de garde et celle de l'anneau intérieur égal à 8.

L'évolution de la dispersion des mesures fait apparaître pour chaque unité de sol et dans des conditions identiques de profondeur de nappe, une "surface seuil" à partir de laquelle le coefficient de variation est inférieur ou égal à 30% (voir figure 2 page suivante). Dans ces conditions, on admet que la mesure effectuée est interprétable. Cette dernière est représentative des conditions d'infiltration pour une unité de sol, telle que définie plus haut, dans une situation donnée (profondeur de nappe, travail du sol, hauteur de la lame d'eau...). Bien sûr, pour caractériser une unité de sol, plusieurs essais infiltrométriques devront être réalisés et la densité des mesures sera liée à la complexité de l'unité de sol.

3- Réalisation d'une campagne infiltrométrique reposant sur la nouvelle zonation des sols et mettant en œuvre cette nouvelle méthode. Les objectifs de cette campagne sont doubles. En premier lieu, il s'agit d'estimer la vitesse d'infiltration verticale de l'eau, à régime stabilisé et à charge constante, dans des conditions

proches de l'irrigation par submersion pratiquée par les paysans sur le périmètre. Ces conditions sont variables au cours de l'année (périodes de crue et d'étiage) et correspondent à des situations piezométriques différentes. De plus, le système d'irrigation ne permet pas la saturation du profil sur toute sa profondeur. Il n'y a pas continuité entre la lame d'eau superficielle et la nappe phréatique, sauf lorsque celle-ci est proche de la surface. Ceci n'est pas systématiquement réalisé pour toutes les unités de sol, même en période de hautes eaux, du fait de leur situation topographique.

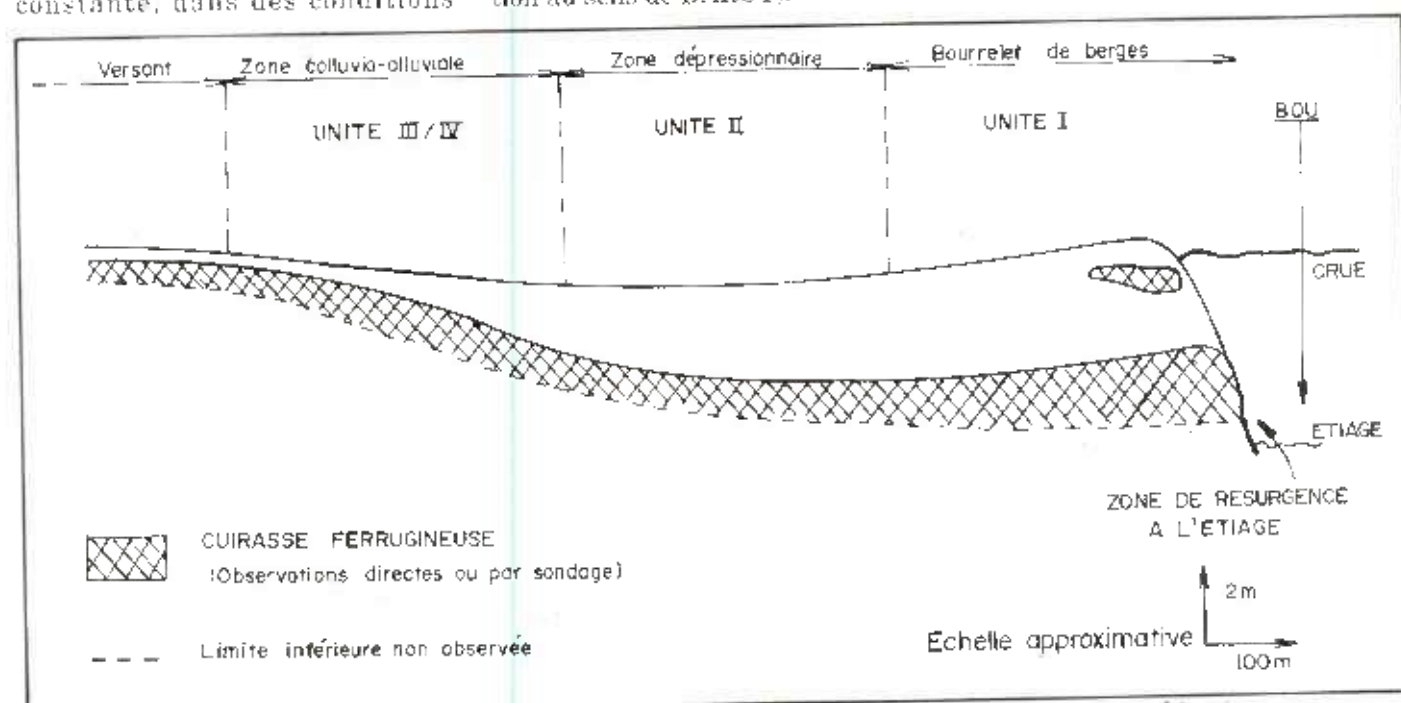
Le second objectif de cette campagne infiltrométrique est la caractérisation de la perméabilité intrinsèque des sols par le coefficient de DARCY ( $K_{sat}$ ). Il s'agit d'une vitesse d'infiltration assimilée à la conductibilité hydraulique de la loi de DARCY, caractéristique du milieu poreux à travers lequel s'écoule l'eau (PHILIPP, 1957 ; HILLEL, 1957 ; HENIN, 1977 ; CHAMAYOU et al., 1989). Cette valeur n'est donc pas indexée à une profondeur de nappe. Elle ne peut être estimée que si la continuité entre la lame d'eau de la parcelle de mesure et la nappe phréatique est assurée (on s'approche dans ces conditions du mécanisme de filtration au sens de DARCY).

Nous verrons par la suite que cet objectif n'est que partiellement atteint en raison du choix du protocole (épaisseur de la lame d'eau). Toutefois, ce protocole permet de définir un régime permanent saturé dans des conditions proches de celles de la riziculture inondée.

### Les résultats du diagnostic de la C.F.P.I.

1 - Zonation de la plaine de Bou Sirasso : réalisée sur la base de critères simples (voir plus haut dans le texte) dont certains tels que la texture ont été confirmés par analyse, elle met en évidence 4 unités distinctes, organisées comme suit le long de la toposéquence (voir figure 1 ci-dessous) :

- Unité I, dite de bourrelet de berge. Texture argileuse homogène sur tout le profil ; macroporosité très développée sur une grande profondeur (80 cm. au minimum ; voir figure 4), liée à la structure du profil et à l'activité biologique. Elle occupe 47 % de la surface du périmètre.
- Unité II, caractéristique des zones dépressionnaires de la plaine alluviale. Elle est localisée en arrière du bourrelet de berge et occupe 8 % de la surface du périmètre. Horizon de surface à texture de sable argileux, horizon profond plus argileux.



• Unités III et IV. Elles constituent la zone de contact avec le bas-versant cuirassé :

L'unité III est graveleuse sur tout le profil, avec une matrice à texture équilibrée. Elle occupe 19 % de la surface du périmètre.

L'unité IV présente une texture équilibrée sur tout le profil, avec une charge graveleuse faible. Elle occupe 26 % de la surface du périmètre.

En fonction des situations, cette séquence peut-être tronquée (unité III ou unité IV absente).

Enfin, il faut distinguer les cas de figure où les cours d'eau permanents sont encaissés et rabattent fortement la nappe à l'étiage, de ceux où plaine alluviale et cours d'eau sont pratiquement au même niveau (nappe peu profonde toute l'année).

Le tableau 1 ci-contre résume les caractéristiques physiques des sols de la plaine alluviale de Bou Sirasso.

2 - La phase expérimentale de la nouvelle méthode infiltrométrique a permis la définition d'une surface de mesure à partir de laquelle la dispersion des valeurs mesurées est inférieure ou égale à 30 % (figure 2). Cette « surface seuil », dite « surface élémentaire représentative » ou maille d'hétérogénéité naturelle (Humbel, 1975) est représentative de l'hétérogénéité du sol en surface et varie d'une unité à l'autre. Elle est d'autant plus grande que la structure du sol est développée et complexe dans l'horizon de surface (cas de l'unité I) et reste faible lorsque le sol est peu ou pas structuré (cas de l'unité III, graveleuse et de l'unité IV, peu structurée). On constate que la dispersion des mesures sur l'unité II est la plus élevée, même pour les grandes surfaces d'anneau intérieur, alors qu'une des caractéristiques de cette unité est l'absence de structure construite (structure particulière meuble). Comme nous le verrons par la suite, cette unité sablo-argileuse est sensible au phénomène de destruction de l'horizon super-

Tableau 1 : caractéristiques physiques des sols de la plaine de Bou Sirasso (horizon cultural) ; présence/absence d'une discontinuité dans le profil, au-dessus de la cuirasse latéritique)

Horizon cultural <sup>(*)</sup>						
Unité	Profondeur	Classe texturale (G.E.P.P.A.)	% M.O	Aptitude à la fissuration <sup>(**)</sup>	Stabilité structurale (terre fine) <sup>(**)</sup>	discontinuité dans le profil <sup>(**)</sup>
Unité I	0 à 15 cm	argileuse à argile limoneuse	satisfaisant	excellente	bonne à moyenne	profil continu
Unité II	0 à 15 cm	sable argileux à sable argilo-limoneux	très faible	aucune	stable	argileux à 15 cm
Unité III	0 à 25 cm	graveleux (matrice limone-argilo-sableuse à argile limone-sableuse)	satisfaisant à élevée	bonne à moyenne	stable	légèrement plus argileux à 25 cm
Unité IV	0 à 15/20 cm	limone-argilo-sableuse	faible	faible	instable	profil continu

(\*) : évaluation par observation directe et l'ou interprétation à partir des normes GREY (1990) et SOLTNER (1989).

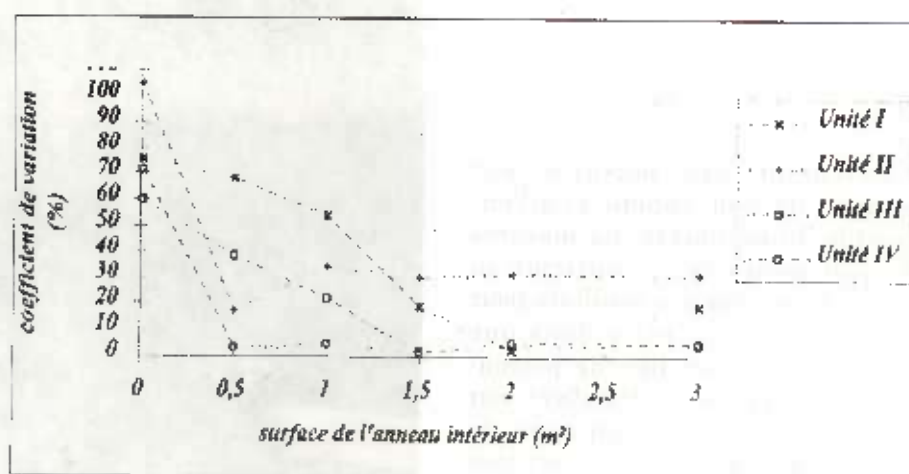


Figure 2 : évolution de la dispersion des mesures de classe d'infiltration à régime stabilisé suivant la surface de l'anneau intérieur.

ficiel lors de la préparation du sol. Ceci se traduit par la formation d'une croûte superficielle argileuse, fortement structurée, à l'origine d'une dispersion plus importante des mesures d'infiltration. La granulométrie relativement hétérogène d'un site à l'autre (texture de sable argileux à sable argilo-limoneux) contribue également à la dispersion des mesures sur cette unité. Les mesures sur grandes surfaces restent toutefois interprétables.

Compte tenu de la fourdeur de ce type de mesure, le plan d'expérimentation a été réduit à 3 répétitions (3 sites homogènes), pour chacune des surfaces de mesure et des unités de

sol (soit 60 mesures). De plus, les coefficients de variation retenus pour l'anneau standard de 100 cm<sup>2</sup> sont ceux observés à l'issue de la campagne D.C.G.Tx. 1992, après correction. La campagne D.C.G.Tx. 1988 a donné lieu à un regroupement des sites de mesures suivant leur situation topographique, sans qu'il soit tenu compte de la texture. Dans ce cas, les coefficients de variation sont compris entre 60 et 88%.

Pour l'ensemble des unités, on constate une évolution comparable : réduction de la dispersion des mesures de l'ordre de 80 %, quand on passe d'une surface d'anneau intérieur de 0,01 à 3 m<sup>2</sup>. La « sur-

est comprise entre 0,5 m<sup>2</sup> pour les sols les moins structurés en surface (unité IV) et 1,5 m<sup>2</sup> pour les sols dont la structure est bien développée en surface (unités I et II).

Lorsque les mesures d'infiltration deviennent interprétables pour toutes les unités de sol (à partir d'une surface de mesure de 1,5 m<sup>2</sup>), on observe corrélativement une « stabilisation » de la valeur de la vitesse d'infiltration à régime stabilisé, quelle que soit l'unité considérée (tableau 2 ci-contre). Les essais agronomiques effectués sur des casiers de 20 m<sup>2</sup>, placés dans les mêmes conditions que l'anneau intérieur (témoin non cultivé, travail du sol « standard », anneau de garde assurant une infiltration verticale, contrôle de la profondeur de la nappe) mais avec une lame d'eau variable (12 cm maximum), confirment les mesures effectuées sur un anneau intérieur compris entre 1,5 et 3 m<sup>2</sup> (C.F.P.I., 1997).

L'extension des mesures sur anneau de 3 m<sup>2</sup> (photo 1) à l'ensemble du périmètre (62 mesures complémentaires), confirme la faible dispersion des résultats pour une unité de sol prise dans une situation comparable (de profondeur de nappe, en particulier). Sur l'ensemble de la campagne de mesure, les coefficients de variation (CV %) sont systématiquement inférieurs à 30 % (tableau 3 ci-contre). Les légers écarts constatés entre les coefficients de variation expérimentaux et ceux des mesures d'extension sont liés au choix des sites expérimentaux, plus ou moins représentatifs de l'hétérogénéité des unités de sol définies à l'issue de la zonation C.F.P.I (1997).

3 - La campagne infiltrométrique a donné lieu à des mesures de saison sèche et de fin de saison des pluies, afin de caractériser les situations extrêmes du fonctionnement des sols à l'infiltration (illustration de la variabilité temporelle des propriétés hydrodynamiques des sols). Les vitesses d'infiltration ainsi mesurées, correspondent à des vitesses d'infiltration à régime stabilisé, sous une lame d'eau de 8 cm. Les valeurs obtenues sont indexées

Tableau 2. Evolution de la vitesse d'infiltration à régime stabilisé (en mm.h<sup>-1</sup>), mesurée à des échelles croissantes et à deux profondeurs de nappe.

Unités de sol	Profondeur de la nappe	Vitesse d'infiltration (mm.h <sup>-1</sup> ) pour différentes dimensions de l'anneau intérieur			Moyenne (C.V. %)	Vitesse d'infiltration (mm.h <sup>-1</sup> ) sur casier de 20 m <sup>2</sup>
		1,5 m <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>	3 m <sup>2</sup>		
I	Profonde (°)	64,9	70,2	62,4	66,0 (5)	70 (°°°)
	Peu prof. (°°)	-	-	43,7	-	-
II	Profonde (°°)	-	-	16,29	-	22 (°°°)
	Peu prof. (°°)	9,4	7,0	6,4	7,8 (27)	-
III	Profonde (°)	109,6	77,3	98,3	96,9 (13)	98 (°°°)
	Peu prof. (°°)	-	-	43,69	-	-
IV	Profonde (°)	41,0	39,1	40,8	40,3 (7)	-
	Peu prof. (°°)	-	-	11,18	-	10 (°°°)

(°) : valeurs expérimentales (moyenne sur trois mesures) ; (°°) : valeurs relevées au cours de la campagne infiltrométrique sur 3 m<sup>2</sup> (voir point 3 dans le texte) ; (°°°) : vitesse d'infiltration verticale moyenne, mesurée sur parcelle d'essais agronomiques de 20 m<sup>2</sup>, sous une lame d'eau variable (infiltration répétée d'une lame d'eau de 12 cm), mesures de saison sèche.



Photo 1 : Mesure infiltrométrique sur double anneau de grande dimension (parcelle interne de 3 m<sup>2</sup>, parcelle externe de 24 m<sup>2</sup>). La lame d'eau (8 cm) est maintenue constante par un système de robinet flotteur à gros débit, relié à un réservoir. En cas de débit d'infiltration important, une vanne reliée à une motopompe (alimentation de la parcelle externe) permet d'assurer manuellement le maintien de la charge constante. (Photo J. Fournier, dec. 1996).

Tableau 3 : coefficients de variation observés à l'issue de la campagne infiltrométrique complémentaire, avec des mesures au double anneau de 3 m<sup>2</sup>.

Unités de sol (classement C.F.P.I)	C.V. % expérimentaux (anneau int. de 3 m <sup>2</sup> )	C.V. % des mesures d'extension (anneau int. de 3 m <sup>2</sup> )
I	19	21
II	31	24
III	5	10
IV	5	14

(C.V. % = 100 (écart type / moyenne))

Le tableau 4 résume les caractéristiques infiltrométriques des différentes unités de sol du périmètre :

Pour ces deux unités, les vitesses mesurées à régime permanent saturé (le profil est saturé jusqu'à

La position topographique des unités III et IV ne leur permet pas d'arriver à cette infiltration minimale, même en période de hautes eaux. La situation où la nappe est suffisamment proche de la surface pour permettre la saturation du profil, n'est jamais rencontrée dans ces unités.

**Tableau 4 : bilan des mesures infiltrométriques au double anneau de 3 m<sup>2</sup>, sur 394 ha du périmètre de Bou Sirasso. Il s'agit ici de situations extrêmes de profondeur de nappe (nappe au plus bas et au plus haut dans les différentes unités de sol)**

Unité de sol (classement CFP)	Vitesse d'infiltration à régime stabilisé : nappe profonde (*)	Vitesse d'infiltration à régime stabilisé : nappe peu profonde (**)
Unité I	67 à 80 mm.h <sup>-1</sup> - nappe > 2,0 m	4 à 7 mm.b <sup>-1</sup> - nappe < 0,35 m
Unité II	16 à 29 mm.h <sup>-1</sup> - nappe > 1,5 m	8 à 11 mm.b <sup>-1</sup> - nappe < 0,30 m
Unité III	91 à 100 mm.h <sup>-1</sup> - nappe > 2,0 m	43 à 59 mm.b <sup>-1</sup> - nappe < 1,20 m
Unité IV	39 à 43 mm.b <sup>-1</sup> - nappe > 2,0 m	11 à 18 mm.h <sup>-1</sup> - nappe < 0,60 m

(\*) : période d'étiage (fin de saison sèche) et/ou situation topographique haute par rapport à l'axe de drainage. (\*\*) : période de hautes eaux et/ou situation topographique basse par rapport à l'axe de drainage.

Quelle que soit l'unité de sol, le facteur « profondeur de la nappe » apparaît comme un élément conditionnant la vitesse d'infiltration à régime stabilisé : elle diminue fortement et tend vers une valeur minimale lorsque la nappe est peu profonde (période des hautes eaux dans les cours d'eau ou situation topographique basse). Au-delà des propriétés intrinsèques de chaque sol (texture, structure, type de porosité, organisation du profil), cet effet « profondeur de nappe » s'explique par des phénomènes de succion matricielle exercée par la terre encaissante non saturée sur le volume de sol concerné par la mesure au double anneau (Humbel, 1975). Lorsque la nappe est basse, la succion interne est maximale, alors qu'elle s'annule lorsque l'ensemble du profil est saturé.

Lorsque cela était possible, une courbe caractéristique de l'évolution de la vitesse d'infiltration à régime stabilisé en fonction de la profondeur de la nappe phréatique a été établie. C'est le cas pour les unités I et II (figure 3 ci-dessous) :

la nappe située à moins de 0,30 m) tendent vers une valeur minimale. Cette valeur minimale ne peut être assimilée au  $K_{sat}$  de Darcy, dans la mesure où le gradient hydraulique  $i^1$  au moment de la mesure ne peut être considéré comme égal à 1 (l'épaisseur de la colonne de sol saturé n'est pas connue avec précision). Cependant, cette valeur est caractéristique du mécanisme de filtration pour le sol considéré (valeur non indexée à une profondeur de nappe), placé sous une lame d'eau de 8 cm. On note un « effet profondeur de la nappe » beaucoup moins marqué pour l'unité II. Ceci peut s'expliquer par des phénomènes de déstructuration de l'horizon de surface au moment de la préparation du sol : on observe alors une organisation superficielle de type bi-couche (voir photo 2 page suivante) et la couche argileuse déposée en surface contrôle en partie le processus d'infiltration, rendant ceux-ci moins sensibles aux mouvements de la nappe.

Une caractérisation *in situ* des sols du périmètre complète la campagne infiltrométrique. Elle permet de confirmer et/ou d'expliquer le comportement de chaque unité :

- l'unité I : c'est celle qui présente le plus grand écart de vitesse d'infiltration en fonction de la position de la nappe. En situation de nappe profonde (profondeur supérieure à 2 m), la perméabilité est élevée pour un sol à texture argileuse. Une importante macroporosité d'origine structurale (fentes de retrait et vides d'entassement entre agrégats, de diamètre supérieur à 5 mm) et biologique (chenaux, galeries, grosses racines) s'observe de façon continue sur tout le profil jusqu'à la cuirasse poreuse (figure 4 page suivante), ce qui explique les vitesses mesurées lors de la campagne infiltrométrique de saison sèche. Cette importante macroporosité continue sur tout le profil, se combine avec l'effet « succion matricielle » pour donner une perméabilité élevée. Lorsque la nappe remonte dans le profil, la macroporosité est fortement réduite par gonflement des argiles et déstructuration du profil qui devient faiblement perméable et l'effet de succion matricielle disparaît.

- l'unité II, à texture de sable argileux (sable # 60 %), est l'unité la moins perméable du périmètre lorsque la nappe est profonde (ceci est confirmé par l'exploitation spécifique de cette unité par les paysans, pour une riziculture de contre-saison).

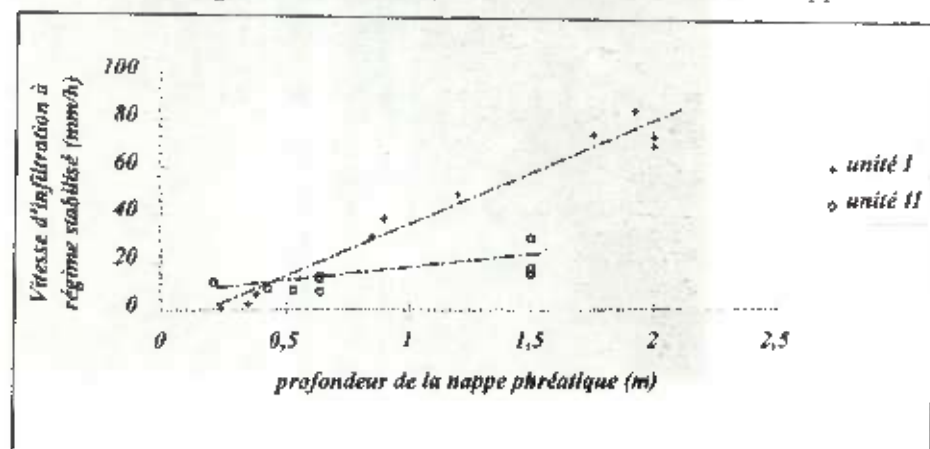


Figure 3 : évolution de la vitesse d'infiltration à régime stabilisé, suivant la profondeur de la nappe : cas des unités I et II.

$K = \frac{Q/S}{i} \times i \times (\mu/p) \times 20$   
 ou  $Q/S$  est le débit infiltré par unité de surface  
 et  $i$  (gradient hydraulique) =  $b/(h + e)$   
 avec  $h$  : la hauteur de la colonne de sol saturé  
 $e$  : épaisseur de la lame d'eau en surface  
 $\mu$  : la viscosité à une température donnée



Photo 2 : état de surface de l'unité II (texture de sable argileux) en riziculture traditionnelle : la préparation du sol se traduit par la formation en surface d'un micro-horizon argileux (noter les fentes de retrait qui contrôlent en partie l'infiltration de la lame d'eau). (Photo J. Fournier, déc. 1996).

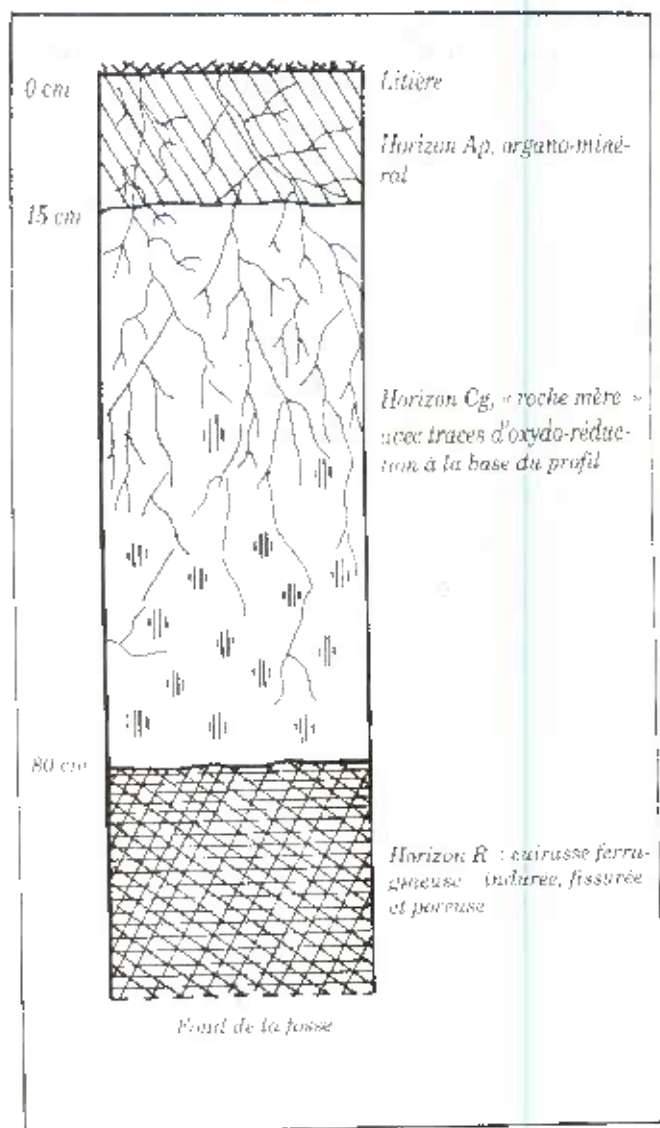


Figure 4 : profil moyen de l'unité I. Profil de type A/Cg/R (caillasse), présentant une importante macroporosité d'origine structurale et biologique. Pas de discontinuité texturale au-dessus de la cuirasse poreuse.



Photo 3 : Profil de sol dans l'unité II. La transition brutale dans le profil A/Cg/R, correspond à une discontinuité texturale (horizon Cg argileux). Noter la présence de la nappe à 40 cm de profondeur, au mois de décembre (Photo J. Fournier, déc. 1996).



Trois facteurs concourent à ce comportement particulier :

- la texture discontinue de cette unité favorise la formation d'une couche superficielle millimétrique d'argile au moment du travail du sol (déstructuration de l'horizon de surface ; photo 2). Cette couche argileuse « contrôle » en partie les mécanismes d'infiltration. Ce phénomène est décrit par TOUMA (1988), dans le cas de sols bi-couche argile/sable, lorsque la couche argileuse se trouve au-dessus de la couche sableuse.

- le profil présente une discontinuité texturale nette (horizon C argileux) ; (photo 3). Cette discontinuité tend à limiter la vitesse d'infiltration et à bloquer la nappe.

- la position topographique de cette unité, dans des dépressions, se traduit par un battement limité de la nappe phréatique (1,5 m de profondeur à l'étiage), ce qui réduit l'effet de « succion matricielle » des couches sous-jacentes.

- les unités III et IV ont des comportements « conformes » à leurs caractéristiques physiques et à leur situation dans la toposéquence :

- l'unité III graveleuse reste très perméable, même en période de hautes eaux (période durant

laquelle la nappe reste la plus profonde dans cette unité).

- l'unité IV présente un profil homogène jusqu'à la cuirasse. Sa structure est modérément développée et peu stable : structure polyédrique sub-anguleuse fine à très fine en profondeur. Cette structure ainsi qu'une activité biologique importante confèrent à cette unité une perméabilité élevée à modérée, en fonction de la position de la nappe.

### Conclusions et recommandations

Le diagnostic infiltrométrique tel qu'il a été conduit ici semble indiquer qu'au-delà des caractéristiques physiques de chaque unité de sol, c'est la dynamique de la nappe phréatique qui est le principal facteur explicatif du comportement à l'infiltration des sols du périmètre.

Les cours d'eau permanents (Méryudia et Bou) constituent à l'étiage des axes de drainage qui rabattent la nappe phréatique de façon excessive. Ceci se manifeste plus particulièrement dans les parties du périmètre où ces cours d'eau sont encaissés (marnage de l'ordre de 3 m). Le rabattement excessif de la nappe phréatique induit des

vitesses d'infiltration à régime stabilisé très élevées. Dans ces conditions, seules les zones basses du périmètre et les sols localisés dans les dépressions topographiques sont aptes à la riziculture par submersion. Les autres unités devront être réservées à l'irrigation gravitaire ou à l'aspersion (tableau 5 ci-dessous).

Le « fonctionnement » du périmètre de Bou Sirasso apparaît aux vues de ce diagnostic comme très différent de celui des périmètres irrigués « classiques » aménagés sur des sols peu filtrants ( $K_{sat} \leq 4 \text{ mm.j}^{-1}$ ). Ceci nous a conduit à proposer un classement de ces sols à partir de normes d'interprétation spécifiques à ces conditions particulières, très proches de celles des bas-fonds à lit majeur filtrant, aménagés par contrôle du drainage de la nappe (C.F.P.I., 1997).

La réhabilitation du périmètre passe donc par un aménagement des cours d'eau permettant le contrôle du drainage de la nappe phréatique. Elle pourrait alors être maintenue à faible profondeur dans la plaine alluviale, même à l'étiage ; dans ces conditions, les vitesses d'infiltration à régime stabilisé tendent vers une vitesse minimale (régime permanent saturé, sous une lame d'eau de 8 cm) sur une grande partie du périmètre. Les

Tableau 5 : aptitude à l'irrigation des sols du périmètre de Bou Sirasso. D'après normes d'interprétation SYS, 1986, modifiées C.F.P.I. 1997.

Unité de sol	Profondeur de la nappe	Vitesse d'infiltration à régime stabilisé	Classe de perméabilité	Aptitude à l'irrigation / type d'irrigation
Unité I	peu profonde	4 à 7 mm.h <sup>-1</sup> (à 1 mm.h <sup>-1</sup> )	faible classe VII	marginal pour l'irrigation gravitaire ; optimale pour la submersion du riz si la nappe participe à l'alimentation
Unité I	profonde	67 à 80 mm.h <sup>-1</sup>	élevée classe III	moyennement apte à l'irrigation gravitaire, submersion exclue
Unité II	peu profonde	8 à 11 mm.h <sup>-1</sup>	modérée classe VI	apte à l'irrigation gravitaire et à l'aspersion ; submersion du riz possible si la nappe participe à l'alimentation
Unité II	profonde	16 à 29 mm.h <sup>-1</sup>	modérée classe V	optimale pour l'irrigation gravitaire, submersion du riz exclue, et pour l'aspersion
Unité III	peu profonde	43 à 59 mm.h <sup>-1</sup>	modérée classe IV	optimale pour l'irrigation gravitaire, submersion exclue, et pour l'aspersion
Unité III	profonde	91 à 100 mm.h <sup>-1</sup>	élevée classe III	moyennement apte à l'irrigation gravitaire, submersion exclue
Unité IV	peu profonde	11 à 18 mm.h <sup>-1</sup>	modérée classe V	optimale pour l'irrigation gravitaire, submersion exclue, et pour l'aspersion
Unité IV	profonde	39 à 43 mm.h <sup>-1</sup>	modérée classe IV	optimale pour l'irrigation gravitaire, submersion exclue, et pour l'aspersion

mesures infiltrométriques effectuées pendant la période de hautes eaux ou dans les zones basses du périmètre permettent de simuler une situation avec contrôle du drainage : environ 50 % de la surface aménagée seraient aptes à la riziculture par submersion plusieurs mois après la fin de la saison des pluies, contre 15 à 20 % actuellement. Les unités III et IV resteraient exploitables par irrigation gravitaire, dans des conditions optimales (tableau 5). Il s'agit d'une projection visant à illustrer les effets d'une réhabilitation du périmètre par contrôle du drainage de la nappe. Ces estimations doivent nécessairement être précisées, après définition du niveau optimal de la nappe phréatique sur le site. D'autre part, ces perspectives de mise en valeur sont étroitement liées au fonctionnement du système d'amenée d'eau jusqu'à la parcelle.

Tout contrôle du drainage de la plaine alluviale par implantation de seuils dans le lit des cours d'eau permanents pose le problème de la submersion d'une grande partie du périmètre en période de crue. Il faudra mettre en place un système modulable (du type seuil basculant ou vanne) permettant alternativement de réduire le drainage par les cours d'eau ou d'évacuer les excès d'eau. Il est impératif dans cette optique d'aménagement, de prévoir l'endiguement et le drainage des parties basses de la plaine si l'on veut continuer à les mettre en valeur.

Bien sûr le seul volet « comportement des sols à l'infiltration » n'est pas suffisant pour orienter une éventuelle réhabilitation du périmètre, même si cet aspect semble

fondamental ici. Les autres volets de l'étude font apparaître des possibilités d'amélioration du système de distribution de l'eau (reprofilage et étanchéification des canaux) et des systèmes de culture (travail du sol en particulier), ainsi que des possibilités de diversification de la production devant permettre une meilleure valorisation de la ressource en eau (C.F.P.I., 1997). Toutefois, il ne s'agit là que d'une approche technique du fonctionnement du périmètre et les blocages d'ordre socio-économique restent à aborder : organisation et gestion de l'aménagement ; concurrence avec les activités de versant en saison des pluies et disponibilité de la main d'œuvre ; organisation des filières de production...

Enfin, cette étude a été l'occasion de mettre au point une méthode infiltrométrique de terrain donnant des mesures plus fiables et plus représentatives des conditions d'in-

filtration à l'échelle du casier rizicole (infiltration verticale). En ce qui concerne la mise en œuvre de cette méthode, ceci se traduit par une réduction notable du nombre de mesures, en regard des campagnes infiltrométriques conduites au double anneau standard (Audry -1973- préconise 10 répétitions pour un même site de mesures). Dans l'étude conduite ici, la réduction du nombre de mesure compense largement la lourdeur de la méthode (consommation en eau, mise en place) et l'opération est également bénéficiaire du point de vue économique (gain de temps, faible coût de la main d'œuvre supplémentaire).

Cette nouvelle méthode validée sur une gamme de sols assez large et en conditions réelles d'étude, devra être testée plus largement avant de faire l'objet d'une diffusion auprès des professionnels. □

*L'opération n°95.12.10 D.C.G.Tx. / C.F.P.I. conduite par la C.F.P.I. sur le périmètre de Bou Sirasso, à la demande de la D.C.G.Tx., puis du B.N.E.T.D., s'est déroulée de décembre 1995 à juin 1997, sous la responsabilité technique de M. T. M. DUC (directeur de la recherche et de l'ingénierie à l'EIER) et de M. J.C. DEMOULIN (directeur de la C.F.P.I. à l'EIER et à l'ETSHER), pour la coordination du projet.*

*Ce projet d'étude comportait trois volets complémentaires :*

- le volet ressources en eau, conduit par M. Lamine MAR (EIER) ;*
- le volet agronomie, conduit par M. Tran Minh DUC (EIER) ;*
- le volet sols et perméabilité, conduit par M. Jacques FOURNIER (ETSHER).*

*L'article proposé ici fait principalement référence aux résultats du troisième volet.*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUDRY P., COMBEAU A., HUMBEL F. X., ROOSE E., VIZIER J.F. ; 1973 : Comité technique de pédologie ; bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols. N°2, juillet 1973. ORSTOM, Paris. pp. 48-58.

BOIVIN P., TOUMA J., ZANTE P. ; 1988 : Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneau. 1. Résultats expérimentaux. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIV, n°1. pp. 17-25.

BRUCKLER L., BERTUZZI P., GAUDU J.C. ; 1988 : Transferts de masse et de chaleur entre le sol et l'atmosphère : comparaison entre modélisation et expérience in situ. Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère. INRA, 1988. pp.21-70

C.F.P.I., collectif ; 1997 : Projet d'aménagement hydro-agricole de la plaine de Bou Sirasso - programme d'expérimentation. Rapport final. EIER, ETSHER, Ouagadougou.

CHAMAYOU H., LEGROS J.P. ; 1989 : Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. P.U.F. ; Paris. 593p.

COLOMBANI J., LAMAGAT J.P., THIEBAUX J. ; 1972 : Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode MÜNTZ. Une extension de la méthode PORCHET aux sols hétérogènes. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. IX, n°3 ; pp. 15-46.

D.C.G.Tx., collectif ; 1988 : Aménagement hydro-agricole de la plaine de Bou Sirasso. Mémoire technique. Abidjan. 82p.

D.C.G.Tx., collectif ; 1992 : Projet d'aménagement hydro-agricole de la plaine de Bou Sirasso - Consolidation de la première tranche (APS). Mémoire technique. Abidjan. 39p.

D.C.G.Tx., collectif ; 1993 : Projet d'aménagement hydro-agricole de la plaine de Bou Sirasso - Consolidation de la première phase et extension potentielle du périmètre. Etudes complémentaires à la prospection pédologique. Mémoire technique. Abidjan. 13p + annexes.

GASCUE-ODOUX C., MEROT PH., 1988 : Variabilité spatiale du transfert de l'eau : géostatistique, traçage isotopique, relation avec l'organisation des sols. Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère. INRA, 1988. pp.133-152.

GUENNELON R., CALVET R., 1988 : Propriétés physiques des sols et transferts (masse et énergie). Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère. INRA, 1988. pp.9-20.

HENIN S ; 1977 : Cours de physique du sol. Vol. II. ORSTOM, Paris. pp. 59 à 112.

HILLEL D ; 1974 : L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Vander Ed., Louvain, 1 vol., 288p.

HUMBEL F. X. ; 1975 : Etude de la macroporosité des sols par des tests de perméabilité : application d'un modèle de filtration aux sols ferrallitiques du Cameroun. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XIII, n°2. pp. 93-117.

GRET, FAMV, collectif ; 1990 : Manuel d'agronomie tropicale appliquée à l'agriculture haïtienne. Paris. pp. 41-90.

PHILIPP J.R. ; 1957 : The theory of infiltration. 1. The infiltration equations and its solution. Soil Sci., 83, p. 345-357. 6. Effect of water depth over soil. Soil Sci., 85, p. 278-286.

SOLTNER D. ; 1989 : " Les bases de la production végétale - Tome 1 : le sol, 17 ième édition ". Angers, collection Sciences et Techniques agricoles.

SYS, collectif ; 1985 : Land evaluation, general administration for development cooperation. Brussels. 352p.

TOUMA J., BOIVIN P., 1988 : Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneau. 2. Résultats numériques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIV, n°1. pp.27-37.

VOLTZ M., BORNAND M., 1988 : Analyse de la variabilité spatiale des propriétés physiques du sol. Contribution à la recherche de méthodes quantitatives simples de cartographie des paramètres hydrodynamiques. Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère. INRA, 1988. pp.101-132.