

115



Pôle régional de recherche  
sur les systèmes irrigués  
en Afrique soudano-sahélienne

## Dégradation des sols dans la vallée du fleuve Sénégal

### Rapport d'activités 1997

**Claude HAMMECKER**



*Agriculture irriguée durable  
dans la vallée du Sénégal*

B.P. 1386 Dakar Sénégal  
Fax : (221) 8 32 43 07  
Téléphone : 8 32 34 80 poste 234  
Email : Claude.Hammecker@orstom.sn

Octobre 1997



Fonds Documentaire ORSTOM



010016454

Rapport d'activité PSI - Claude Hammecker *et al.*

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : Bx.16454 Ex :

## Rapport d'activité 1997

**Claude Hammecker**  
avec la collaboration de Jean Luc Maeght

### Introduction.

Dans le cadre de la composante « lutte contre la dégradation des sols », les actions menées depuis début 1997 concernent la caractérisation physique des sols et les suivis de la qualité des eaux et des sols sur différents sites de la vallée.

Par ailleurs, dans le but de simuler l'évolution physico-chimique des sols à moyen terme, plusieurs opérations ont été réalisées.

on a également réalisé une étude prospective par modélisation numérique de la dynamique des nappes sous irrigation d'une part, et des transferts de sels dans les profils de sol sous culture, d'autre part.

### 1. Mise en place des dispositifs de suivi.

#### 1.1 Suivi du bilan hydro-salin.

Plusieurs sites dans la région de Podor, ont été équipés pour suivre la qualité des sols et des eaux ainsi que les transferts d'eaux et de sels dans les sols irrigués.

Dans les parcelles irriguées dans les sites de Donaye (IT1 et IT3), de Guia 4 et de Guédé (IT1), un réseau de tensiomètres, de piézomètres et de bougies poreuses a été installé et est suivi depuis le début de la campagne d'hivernage.

Les résultats des analyses chimiques sur ces sites ne sont pas encore disponibles à l'heure actuelle. Cependant le suivi tensiométrique et piézométrique permet d'ores et déjà de préciser le type d'écoulement qui prévaut dans chaque site. Ainsi sur le site de Donaye IT1 il apparaît qu'à proximité du canal d'irrigation le flux d'eau est avant tout ascendant, ce qui signifie que le profil de sol ne s'humidifie non pas par la surface mais par la remontée de la nappe.

Dans plusieurs sites comme Guia 4 et Donaye IT1, il semble que la combinaison de l'irrigation par immersion et de la présence d'une nappe peu profonde, provoque un phénomène de piégeage d'air dans la partie de sol située entre les deux front d'humectation, qui n'arrive pas à se résorber lors de la campagne de culture. Par conséquent la vitesse d'infiltration de l'eau diminue jusqu'à s'arrêter complètement, favorisant d'une part l'évaporation et la concentration de l'eau d'irrigation en surface et des conditions d'hydromorphie d'autre part.

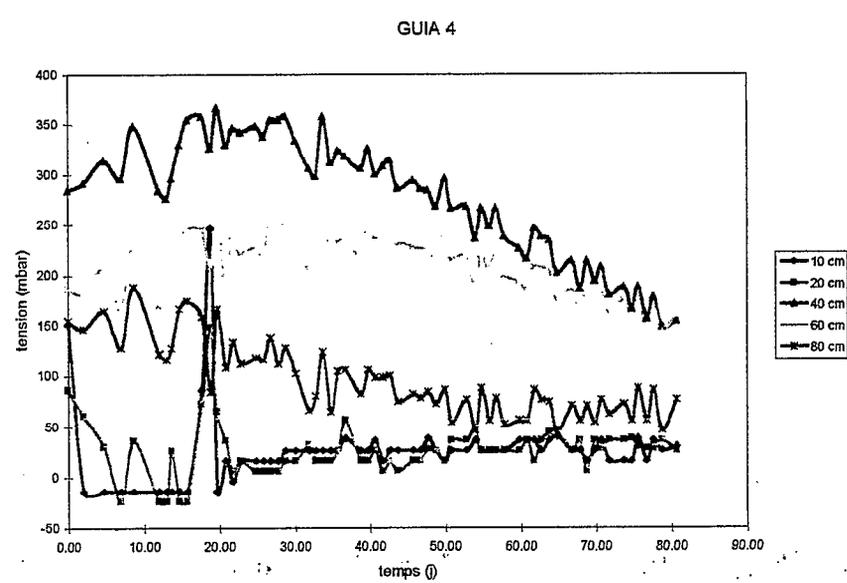
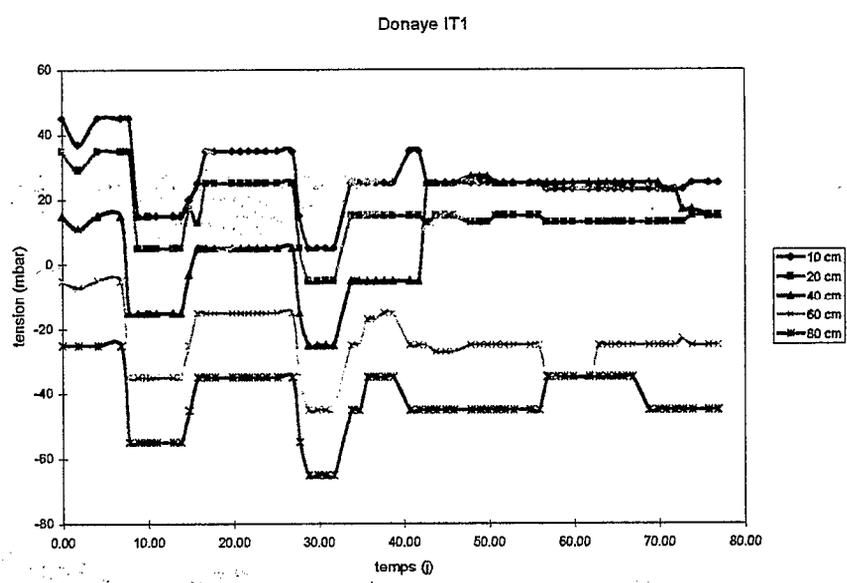
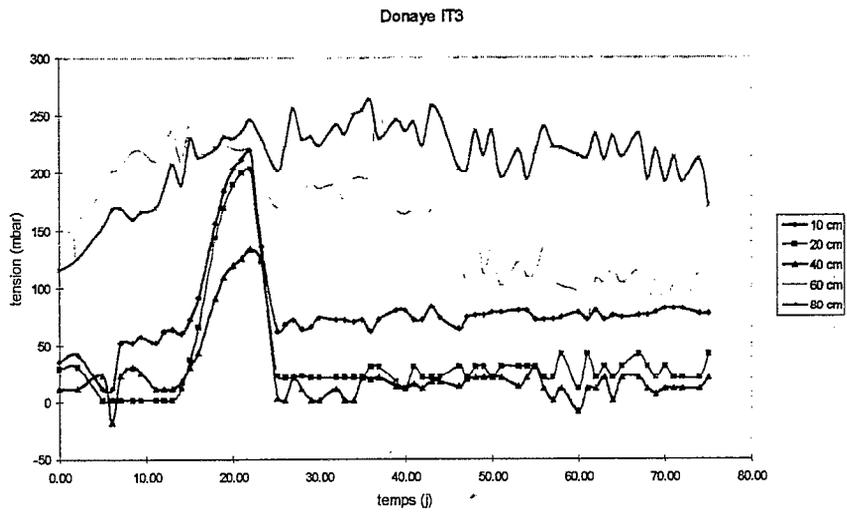


Figure 1 : Relevés tensiométriques sur les sites de Donaye IT3, IT1 et Guia 4

## 1.2. Mise en place d'un réseau de piézomètres à GNITH

Un réseau de 16 piézomètres disposés selon deux axes perpendiculaires (N110 et N20), a été mis en place sur le périmètre irrigué de Gnith. La profondeur atteinte par les piézomètres est variable. Elle a été déterminée d'une part par la présence d'une nappe au moment du forage et d'autre part par la présence d'un niveau argileux blanc. Ce niveau argileux blanc (attapulgite) bien qu'étant apparemment sec à l'ouverture, se sature rapidement et semble être le siège de la nappe lorsque la sol n'est pas irrigué. La disposition des piézomètres sur le périmètre est représentée dans les figures 1 et 2, en fonction des azimuts, des brises vents et des canaux et des coordonnées géographiques des limites du périmètre (points GPS).

Les profondeurs atteintes lors du forage et les horizons pédologiques traversés sont représentés dans la figure 3. De manière générale on a la succession suivante :

- un horizon sableux fin d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur de couleur beige ocre
- un horizon de sable fin rougeâtre en surface puis d'une couleur plus ocre en profondeur
- un horizon de sable très foncé, avec des passées noires, renfermant d'abondants nodules ferrugineux
- un horizon de nodules ferrugineux pouvant atteindre une épaisseur supérieure à 1,50m
- un horizon d'argiles verdâtres en surface puis très blanches (attapulgite) en profondeur. La transition avec l'horizon supérieur peut être marquée par un niveau argileux tacheté de rouge avec des restes de nodules ferrugineux. Ce niveau argileux est d'une épaisseur supérieure à 3m (limite du forage P1)

De manière générale ce profil se contracte en allant vers le lac et au contraire s'épaissit vers les dunes (Diery).

Tableau I.

Profondeur atteintes par le forage dans les différents piézomètres.

Profondeur (cm)		profondeur (cm)	
<b>P1</b>	370	<b>P9</b>	302
<b>P2</b>	310	<b>P10</b>	315
<b>P3</b>	360	<b>P11</b>	245
<b>P4</b>	285	<b>P12</b>	224
<b>P5</b>		<b>P13</b>	210
<b>P6</b>	350	<b>P14</b>	315
<b>P7</b>	342	<b>P15</b>	307
<b>P8</b>	420	<b>P16</b>	264

DIERY

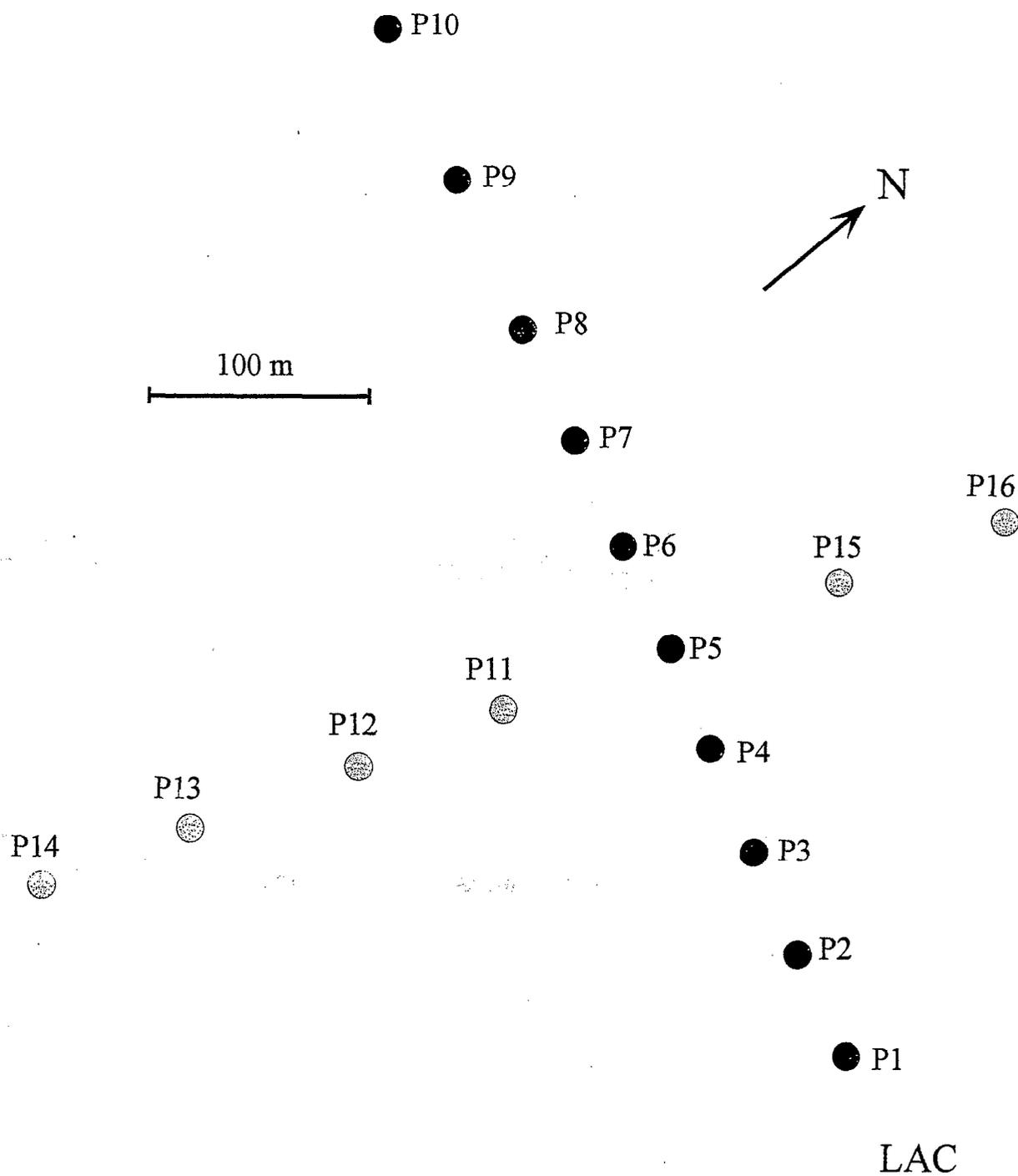


Figure 2. Disposition des piézomètres dans le périmètre de Gnith

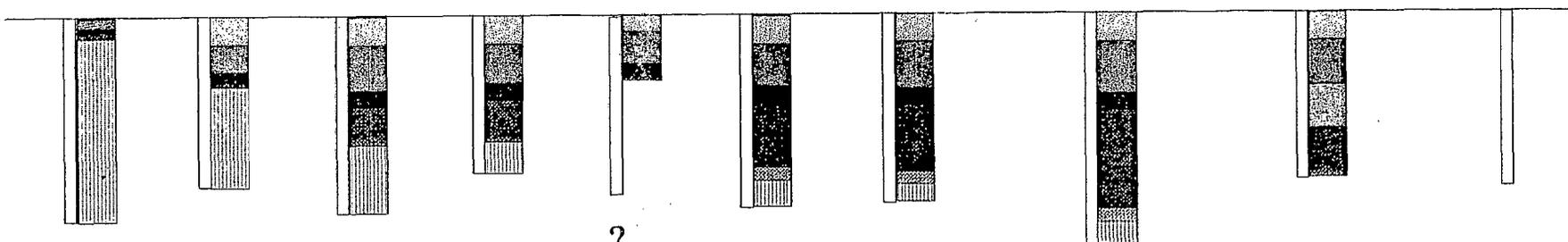
Figure 3 : position des deux axes de mesure piézométriques, coordonnées géographiques des limites du périmètres (points GPS)

Figure 4 : profils pédologiques le long des transects de piézomètres.

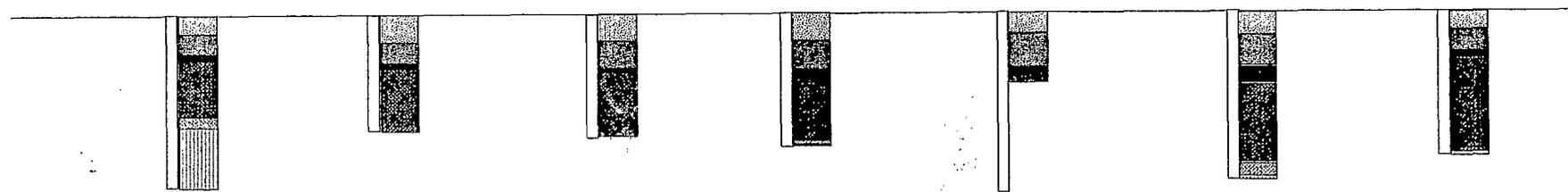
LAC

DIERY

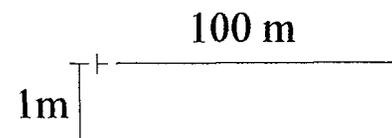
P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9 P10



P14 P13 P12 P11 P5 P15 P16

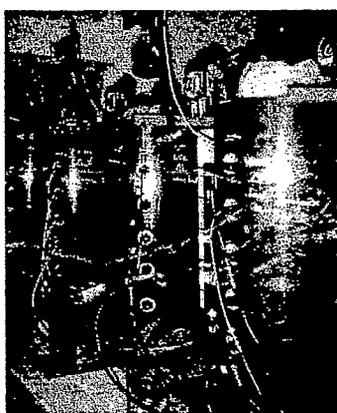


-  sable fin beige ocre
-  sable fin rougeâtre
-  sable fin ocre clair
-  sable foncé à nodules ferrugineux
-  nodules ferrugineux
-  argiles blanches à taches ferrugineuses + quelques nodules
-  argiles blanches (attapulgites ?)

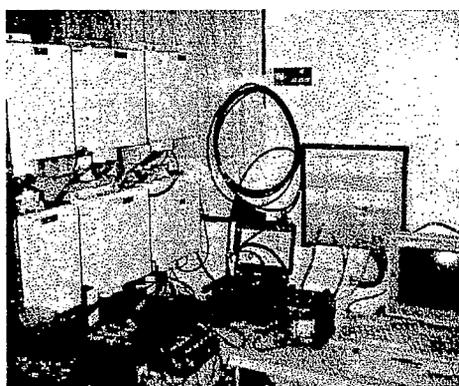


### 1.3. Mise en place du banc de colonnes de sol du Sénégal et du Mali

Dans le cadre du suivi du bilan hydro-salin dans diverses situations d'irrigation, un banc de colonnes de sols non remaniés provenant de la vallée du fleuve Sénégal et de l'Office du Niger au Mali a été mis en place au laboratoire à Dakar. Les colonnes ont été équipées de différents capteurs et sondes de manière à suivre les transferts d'eau et de sels de manière optimale. Par ailleurs les conditions « dégradantes » pour les sols sont artificiellement amplifiées dans cette expérimentation en imposant un fort flux évaporatoire (jusqu'à 4cm/j), pour tenter de simuler leur évolution physico-chimique à long terme. Le protocole expérimental est actuellement en cours d'élaboration avec nos collègues du PSI-Mali.



Ph.1



Ph.2

**Ph. 1** : colonnes de sol équipées de capteurs de pression, sondes TDR, lampes IR et ventilation

**Ph. 2** : tableau de commande des divers capteurs et acquisition des données.

## 2. Détermination des propriétés physiques sur les sols des sites de NDER, GNITH et DONAYE (IT1 et IT3).

L'étude des transferts d'eau et de sels dans les sols irrigués, exige la connaissance d'un certain nombre de paramètres physiques, dont les plus importants sont la conductivité hydraulique à saturation et la courbe de pression capillaire.

### 2.1. La conductivité hydraulique à saturation.

Les mesures de conductivité hydraulique ont été réalisées *in situ* avec un infiltromètre à membrane (CLOTHIER et WHITE, 1981 ; PERROUX et WHITE, 1988) qui présente l'avantage de pouvoir contrôler la taille maximale des pores par lesquels a lieu l'infiltration, en maintenant une dépression sur la colonne d'eau.

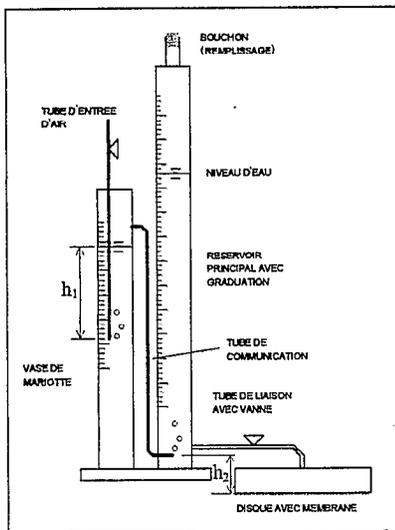


Figure 5 : Schéma de l'infiltromètre à membrane

Le fonctionnement de l'infiltromètre et la méthode de mesure de la conductivité hydraulique à saturation sont exposés plus en détail dans les rapport de mission du 12-14/02/97 et 15-18/07/97.

Le long de la parcelle d'essai du PSI à Nder, une toposéquence a été étudiée. (4 fosses pédologiques et une vingtaine de sondages à la tarière). Elle a permis de définir entre autres quatre horizons pédologiques superficiels représentatifs du site et crucial pour l'irrigation :

- 1 : une croûte superficielle de 5 à 10 mm d'épaisseur formée de sable fin de dépôts éolien « cimenté » par un voile algair verdâtre.
- 2 : un niveau de dépôts éoliens
1. : un horizon de sable blanchi
2. : un horizon sablo-limoneux verdâtre plus compact.

Le long du transect sur le périmètre Gnith, lors de l'installation des piézomètres, on a pu définir trois horizons pédologiques représentatifs du site et déterminants pour l'irrigation :

1. : un horizon sableux fin de couleur beige ocre présentant une épaisseur de 50 cm environ dans la parcelle, et 15 cm au bord du lac.
2. : un horizon sableux foncé d'une épaisseur de 20 cm (avec des passées très sombres), renfermant de nombreux nodules ferrugineux de taille centimétrique.
3. : un horizon argileux d'abord verdâtre puis très blanc, renfermant quelques nodules ferrugineux.

Sur les sites de Donaye (IT1 et IT3) un seul horizon superficiel caractéristique a été déterminé. Il s'agit d'un horizon de sol argileux d'une épaisseur de 100 à 150 cm.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2. Sur les sols sableux de NDER et de GNITH, les résultats sont cohérents et conformes à ce qui est généralement décrit pour ce type de sols. Par contre les résultats obtenus sur les sols de DONAYE ne correspondent pas aux valeurs généralement attendues pour des sols argileux. Ces valeurs de conductivité hydraulique ( $K_s$ ) semblent surestimées et montrent que pour les sols argileux, cette technique n'est pas aussi simple à mettre œuvre que sur les sols plus légers. Les mesures sur ces sols

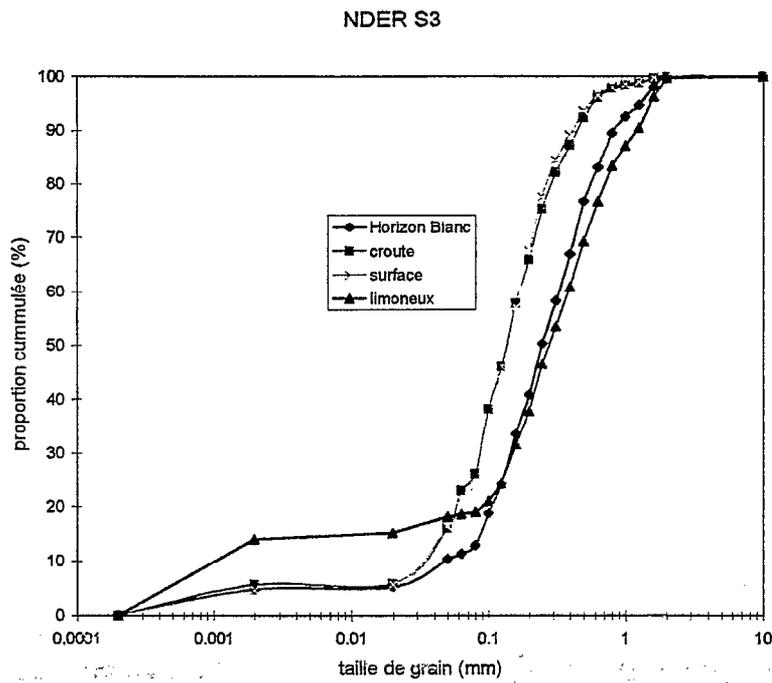
seront reprises ultérieurement en maintenant des infiltrations plus longues dans le temps et en comparant différentes techniques.

Tableau 2 : succions (h) auxquelles les mesures ont été effectuées, flux constants (q) correspondants, paramètres  $\alpha$  et conductivités hydrauliques à saturation (Ks) pour les différents horizons définis à NDER et à GNITH.

<b>NDER</b>	h (cm)	q (cm/s)	$\alpha$	<b>Ks (cm/s)</b>
croûte	-16.5	$6 \times 10^{-4}$	0.091	<b><math>2.4 \times 10^{-3}</math></b>
	-4	$1.89 \times 10^{-3}$		
horizon superficiel	-9.5	$3.3 \times 10^{-3}$	0.031	<b><math>3.9 \times 10^{-3}</math></b>
	-3	$4.04 \times 10^{-3}$		
horizon blanchi	-14.4	$6.35 \times 10^{-4}$	0.016	<b><math>7.1 \times 10^{-4}</math></b>
	-2.4	$7.69 \times 10^{-4}$		
horizon induré	-11.5	$5.23 \times 10^{-5}$	0.011	<b><math>5.1 \times 10^{-5}</math></b>
	-5.5	$5.59 \times 10^{-5}$		
<b>GNITH</b>	h (cm)	q (cm/s)	$\alpha$	<b>Ks (cm/s)</b>
sable beige surface	-12	$1.07 \times 10^{-3}$	0.127	<b><math>2.47 \times 10^{-3}</math></b>
	-6	$2.29 \times 10^{-3}$		
sable gravillonnaire foncé	-6	$9.09 \times 10^{-4}$	0.293	<b><math>3.7 \times 10^{-3}</math></b>
	-3	$2.19 \times 10^{-3}$		
horizon argileux blanc	-5	$1.0 \times 10^{-4}$	0.325	<b><math>3.68 \times 10^{-4}</math></b>
	-2	$2.65 \times 10^{-4}$		
<b>DONAYE</b>	h (cm)	q (cm/s)	$\alpha$	<b>Ks (cm/s)</b>
IT1	-2	$9.8 \times 10^{-5}$	1.55	<b><math>2 \times 10^{-3}</math></b>
	-1	$4.6 \times 10^{-4}$		
IT3	-5	$3.3 \times 10^{-4}$	0.158	<b><math>4.2 \times 10^{-4}</math></b>
	-2	$5.4 \times 10^{-4}$		

## 2.2. Granulométrie et courbes de pression capillaire (h- $\theta$ )

L'analyse texturale pour les sols des différents sites a été déterminée à partir des courbes de répartition granulométrique. Ces données permettent par ailleurs d'estimer plus ou moins précisément la relation (h - $\theta$ ) entre la teneur en eau et le potentiel matriciel (Arya and Paris, 1981). La connaissance de ces relations est indispensable pour l'utilisation ultérieure de modèles numériques de simulation des transferts hydriques. A titre d'exemple, les courbes de granulométrie et de pression capillaire pour le sols de NDER sont présentées dans la figure 6. Cette méthode de détermination de la relation h( $\theta$ ) à partir de la granulométrie est satisfaisante pour les sols sableux, mais pour les sols argileux elle n'est pas adaptée. Dans ce cas d'autres méthodes ont été adoptées (pF, méthode de Wind, etc..)



N'DER - courbes de rétention d'eau  
Arya & Paris

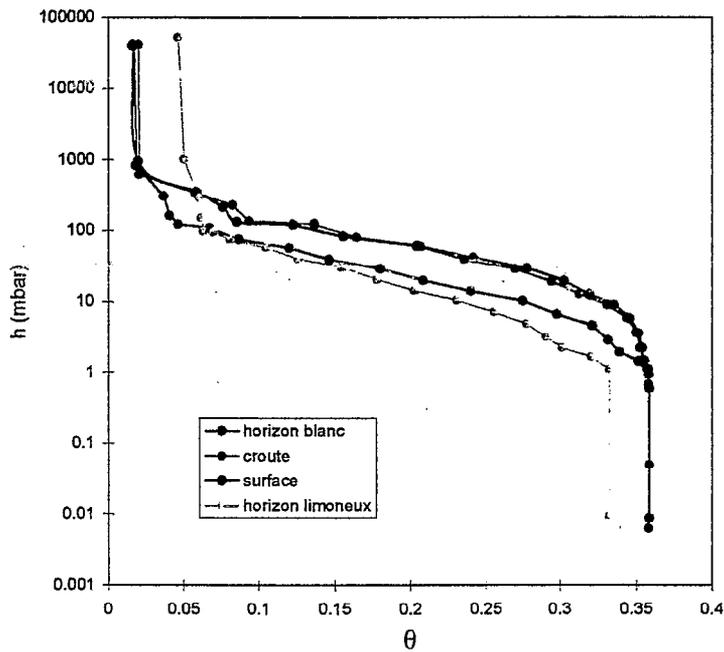


Figure 6 : (a) courbe granulométrique et (b) courbe de pression capillaire  $h(\theta)$  sur le sable de Nder

### 3. Simulation numérique de l'évolution du bilan hydro-salin sur différents sites dans la vallée du fleuve.

L'objet de cette étude consiste à essayer de d'envisager les différentes possibilité d'évolution du système sol-eau afin de desceller les risques de dégradation du sol et de tester différents scénarios de gestion de l'irrigation afin d'éviter ou du moins de limiter ces risques.

Des suivis de terrains des transferts hydro-salins ont été réalisés pendant plus de deux ans sur plusieurs sites de la vallée : N'Diaye dans le delta, Fanaye dans la moyenne vallée et Donaye sur l'Ile à Morphil dans la région de Podor.

Grâce à ces suivis il a été possible d'analyser la dynamique saline de ces sites lors de leur mise en culture qui a pu être comparée aux résultats de modèles numériques simulant les transferts de sels et de solutés dans les sols ainsi que les équilibres chimiques. Par ailleurs la modélisation numérique, lorsqu'elle est validée sur de courtes périodes pour lesquelles on peut la confronter à des résultats expérimentaux, peut également servir d'outil de prévision de l'évolution de la chimie du sol et des solutions sur des échelles de temps plus longues (décennie).

#### 3.1 Principe de la modélisation et utilisation du modèle LEACHM ©

La modélisation mathématique des transferts d'eau et de solutés est maintenant largement utilisée en science du sol. Elle est basée sur plusieurs relations mathématiques décrivant au mieux les processus physiques et chimiques impliqués.

- Pour le transfert de l'eau dans les milieux poreux non saturés (c'est le cas des sols) c'est l'équation de Richards qui décrit le mieux le phénomène :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] - U(z, t)$$

où:

$\theta$	teneur en eau	K	conductivité hydraulique
t	temps	U	terme source (prélèvement d'eau par les plantes)
z	profondeur	H	potentiel matriciel

- Pour le transfert des solutés dans les milieux poreux on utilise les équations de convection-diffusion en considérant qu'il n'y a pas d'adsorption, ni de volatilisation de certains éléments chimiques :

$$\frac{\partial C_L}{\partial t} \theta = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \theta \cdot D(\theta, q) \frac{\partial C_L}{\partial z} - q_{C_L} \right]$$

où :

$C_L$	concentration de la solution en $\theta$ différents éléments dissous	teneur en eau
$t$	temps	$D(\theta, q)$ coefficient de « diffusion » apparente
$z$	profondeur	$q C_L$ flux de la solution

$D(\theta, q)$  est un terme global qui renferme le coefficient de diffusion moléculaire et le coefficient de dispersion mécanique.

De par la complexité des ces équations différentielles, il n'existe pas de solutions analytiques. Ces équations sont donc résolues numériquement par la méthode des différences finies en discrétisant le temps et l'espace en intervalles suffisamment petits pour minimiser les erreurs dues à cette méthode de calcul.

- La concentration et l'activité des différentes espèces chimiques est recalculée dans chaque intervalle  $dz$ . Les interactions entre la solution et les cations échangeables fixés à la surface des minéraux argileux, sont ensuite calculées à partir de l'équation de Gapon :

$$K_G = \frac{(M^{m+})^{1/m} \cdot XN_{1/n}}{(N^{n+})^{1/n} \cdot XM_{1/m}}$$

où :

$K_G$	coefficient de sélectivité entre les $m$ cations M et N	valence du cation M
$(M)$	activité du cation M en solution	$XM$ quantité de M fixé sur la surface minérale

Pour cette étude 4 cations différents et donc 6 coefficients de sélectivité, ont été considérés :

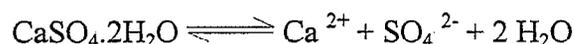


Dans les rapports précédents l'importance de la nature des cations adsorbés à la surface des minéraux argileux a déjà été évoquée. Pour résumer, c'est la quantité de sodium adsorbée sur le complexe d'échange qui est déterminante sur la qualité structurale du sol. En effet le sodium a la propriété de disperser les argiles ce qui a pour conséquence l'effondrement de la structure du sol qui devient alors « incultivable ». Ce phénomène, associé à l'alcalinisation, est appelé la sodisation. C'est pourquoi on suit particulièrement la proportion de sodium échangeable sur les argiles (ESP) :

$$ESP = XNa \times 100 / (XCa + XMg + XNa + XK)$$

- L'état de saturation de la solution est testé par rapport à différents minéraux susceptibles de précipiter ou de se dissoudre dans le profil étudié. Pour ceci on compare le produit de solubilité  $K_{min}$  du minéral testé, au produit de ionique  $Q_{min}$  :

pour chaque minéral, comme pour le Gypse par exemple, on a une équation de dissociation :



avec un produit de solubilité connu pour une température donnée :  $K_{\text{gypse}} = 1.024.10^{-2}$  à 25°C

On calcule alors le produit ionique à partir des activités des différents ions en solution

$$Q_{\text{gypse}} = \frac{(Ca^{2+}) \cdot (SO_4^{2-}) \cdot (H_2O)^2}{(CaSO_4 \cdot 2H_2O)}$$

et on le compare au produit de solubilité :

$Q/K = 1$  : la solution est à l'équilibre avec le gypse

$Q/K < 1$  : la solution est sous saturée par rapport au gypse

$Q/K > 1$  : la solution est sur saturée par rapport au gypse

Pour cette étude nous avons utilisé le modèle LEACHM © version 3 de Cornell University (Ithaca, New York) qui permet de modéliser une infiltration monodimensionnelle dans le sol en fonction de différentes conditions d'irrigation. Les données de base à introduire dans le modèle sont :

- les propriétés physiques du sol : courbe de rétention d'eau  $h(\theta)$  et la conductivité hydraulique à saturation  $K_s$ , coefficient de dispersion et de diffusion
- les propriétés physico-chimiques du sol : granulométrie, densité, cations échangeables et capacité d'échange, coefficients de sélectivité.
- les compositions chimiques des solutions dans le sol à différentes profondeurs
- les quantités d'eau apportées lors de l'irrigation, la composition de l'eau, les pluies et les dates des différents apports.
- l'évapotranspiration potentielle hebdomadaire ainsi que les maxima et amplitude de température, sur toute la période de la simulation.

### 3. Résultats.

Le modèle a été testé sur trois sites soumis à des contraintes hydriques et chimiques très différentes :

- A N'Diaye le site représentatif de la situation dans le delta, est caractérisé par la présence d'une nappe salée à très faible profondeur (30 cm, parfois affleurante) et par la présence d'un stock de calcite et de gypse très important dans le sol.
- A Fanaye dans la moyenne vallée, le sol ne contient ni calcite ni gypse au départ et le site est caractérisé par une absence de nappe (au moins jusqu'à 6 m de profondeur)
- A Donaye, sur l'île à Morphil le sol est très lourd et peu perméable, et le site présente une nappe à 2 m de profondeur.

Sur le site de N'Diaye le modèle décrit un phénomène de salinisation du sol lié à la mise en eau et la migration des sels vers la surface au cours des périodes de séchage, qui à long terme peut être néfaste pour les cultures. Ce processus est amplifié par la simple culture par rapport à la double culture. Cependant grâce aux simulations numériques on a pu montrer que s'il l'on parvenait à rabattre, et maintenir tout au long de la culture, la nappe à une profondeur minimale de 2 mètres ce phénomène s'inverserait. Et l'écoulement vers la nappe permettrait de désaler le profil de sol.

A Fanaye on constate que dans les conditions chimiques et hydrodynamiques mesurées actuellement, le risque d'alcalinisation ou même de salinisation est quasi inexistant de par l'absence de nappe en profondeur. En effet bien que le sol présente une conductivité hydraulique très faible « la fuite » vers le bas est d'autant plus importante qu'il n'y a pas de nappe pouvant la bloquer. Par contre si après une longue période d'irrigation intense une nappe venait à se former, il existerait alors un risque de salinisation voire d'alcalinisation. Comme nous l'avons montré précédemment, il est cependant important de rappeler que la conductivité hydraulique mesurée sur les sols argileux avec l'infiltromètre à membrane est sujette à critique.

En conclusion sur le site de Donaye, les résultats de la simulation montrent que sur une longue durée de culture (10ans) le profil de sol risque de se saliniser par « contamination » de l'eau d'irrigation par les solutions plus salines de la nappe, sans que pour autant celle-ci ne vienne affleurer en surface. D'après les éléments fournis au modèle, les résultats obtenus écartent tout risque d'alcalinisation. Cependant cette conclusion doit être nuancée par le fait que l'on sait qu'il existe un phénomène (le piégeage d'air lors de la mise en eau) qui limite l'infiltration de l'eau, qui peut être un facteur favorisant l'alcalinisation, mais dont on ignore l'importance à ce jour.

## **PERSPECTIVES DE RECHERCHE POUR 1998**

Le dispositif de suivi de qualité des eaux et des sols est actuellement installé dans la région de Podor et de Gnith. Un site de suivi représentatif du Delta central devant être équipé, le site de Boundoum a été sélectionné. On procédera à la caractérisation physique de ces sols (mesure des conductivités hydrauliques, analyse texturale et des pressions capillaires), ainsi qu'à la mise en place d'un réseau de piézomètres afin de suivre la hauteur et la qualité des eaux de la nappe. Le cas échéant on pourra envisager l'installation d'un réseau de tensiomètres.

Le suivi physico-chimique sera poursuivi dans les sites de la région de Podor et de Gnith. Des simulations numériques de transferts d'eau et de solutés seront réalisées dans ces sites afin d'évaluer les risques de salinisation ou autres problèmes de dégradation susceptibles de se développer avec la pratique de l'irrigation.

L'expérimentation sur le banc de colonnes de sols va débiter dès que le protocole sera arrêté avec nos collègues de la composante « dégradation des sols » du Mali.

Compte tenu des problèmes de détermination de conductivités hydraulique à saturation dans les sols argileux exposés ultérieurement, et de l'importance primordiale de ce paramètre dans la quantification des transferts hydriques, on procédera à une détermination plus fine de ce paramètre. Des mesures de conductivité hydraulique des sols argileux sera menée en imposant des durées d'infiltration plus longues, avec différentes techniques. Parallèlement à ceci on effectuera des mesures de quantification des pressions de l'air piégé afin de pouvoir déterminer son influence exacte sur la cinétique d'infiltration.

Par ailleurs des missions d'appui à la composante « dégradation des sols » mauritanienne sont prévues en particulier pour la détermination des propriétés physiques des sols de Fom Gleita.