

REPUBLIQUE DU SENEGAL



UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GC.0325

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

Centre de Thiès

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE
CONCEPTION

TITRE : *Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale
dans les parcelles rizicoles dans le Delta du Fleuve Sénégal*

Auteurs : Astou DIOKHANE
Cheikh Tidiane DIOP

Directeur : M. Babacar NDIAYE

Co- Directeur : M. Seyni NDOYE

Année académique 2005-2006

*A celles et ceux qui nous ont donné la vie et qui donneraient la leur pour la notre
A nos proches défunts, qu'ils reposent en paix au paradis
A ceux qui nous ont accompagné dans nos études, dans ce cycle et avec qui nous avons passé
les meilleurs moments de nos vies.*

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce projet.

Nous pensons particulièrement :

- ✦ Monsieur Babacar NDIAYE, professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'avoir proposé ce sujet et de nous avoir encadré tout au long de ce projet ;
- ✦ Monsieur Seyni NDOYE, professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique pour sa grande disponibilité et l'assistance permanente dont il a fait montre ;
- ✦ Monsieur Bamba DIAW, professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique pour ses conseils
- ✦ Mme Adu Thiaw Gaye, responsable du laboratoire assainissement
- ✦ Monsieur Ibrahima THIAM, professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique et responsable du laboratoire de Topographie
- ✦ L'ensemble des professeurs et le personnel administratif notamment le chef de département pour leur collaboration
- ✦ M. Kokou Mensah Abotsi, ingénieur à l'IRD
- ✦ M. Marcel Ciss, propriétaire du site d'études

Table des matières

Liste annexes.....	v
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	viii
Sommaire	ix
Introduction.....	1
Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude.....	2
I. 1 Géographie.....	3
I. 2 Géologie.....	3
I. 3 Climatologie.....	3
I. 4 Pluviométrie.....	4
I. 5 Sols et végétation	5
I. 6 Température.....	5
I. 7 Evaporation.....	6
I. 8 Humidité relative.....	6
I. 9 Hydrographie.....	7
Chapitre II : Présentation de la nappe alluviale du Delta.	8
II. 1 Historique et évolution.....	9
II. 2 Caractéristiques de la nappe.....	9
II. 2. 1 Géométrie du réservoir.....	9
II. 2. 1.1 Limites géologiques.....	9
II. 2. 1.2 Le Toit.....	10
II. 2. 1.3 Le Mur.....	10
II. 2. 1.4 Epaisseur de l'aquifère.....	10
II. 2. 2 Hydrochimie de la nappe.....	10
II. 2. 2. 1 Contexte général.....	10
II. 2. 2. 2 Paramètres physico-chimiques.....	11
II. 2. 2. 3 Résultats obtenus.....	12

II. 2. 2. 4	Interprétation et commentaires.....	15
II. 3	Etude de la piézométrie de la nappe.....	16
II. 3. 1	Choix du site.....	16
II. 3. 2	Mise en place du réseau piézométrique	17
II. 3. 3	Suivi : Résultats et commentaires.....	20
Chapitre III	Elaboration du modèle.....	27
III. 1	Présentation du logiciel.....	28
III. 2	Elaboration des paramètres d'entrée.....	29
III. 2. 1	Granulométrie.....	30
III. 2. 2	Perméabilité.....	33
III. 2. 3	Bilan hydrique.....	36
III. 3	Calage du modèle.....	37
III. 4	Résultats obtenus en post processing.....	40
III. 4. 1	Potentiel de pression en fonction du temps.....	40
III. 4. 2	Teneur en eau.....	40
III. 4. 3	Conductivité hydraulique.....	41
III. 4. 4	Flux d'eau.....	41
III. 4. 5	Les propriétés hydrauliques du sol.....	41
a)	La courbe de rétention $h(\theta)$	41
b)	La courbe de conductivité $K(h)$	42
III. 4. 6	Bilan de masse.....	42
III. 5	Validation du modèle.....	49
Conclusion et Recommandations	61
Bibliographie	63
Annexes		

Liste des annexes

Annexe 1 : Données obtenues au terrain au niveau de la station 1

Annexe 2 : Données obtenues au terrain au niveau de la station 2

Annexe 3 : Données obtenues au terrain au niveau de la station 3

Annexe 4 : Données de terrain pour l'essai avec une charge de 10cm

Liste des figures

Fig. 1 : Moyenne des précipitations de 1986 à 2003 (station Saint-Louis).....	4
Fig. 2 : Variation des précipitations de 1986 à 2003 (station Saint-Louis).....	4
Fig. 3 : Température moyenne mensuelle de 1986 à 2003 (station Saint-Louis).....	6
Fig. 4 : Moyenne de l'évaporation à Saint-Louis (1986 à 2003).....	6
Fig. 5 : Humidité relative moyenne de 1986 à 2003 (station Saint-Louis).....	7
Fig. 6. a : variations de la salinité en fonction des stations au 20 mars 2006.....	12
Fig. 6. b : variations de la conductivité en fonction des stations au 20 mars 2006.....	13
Fig. 6. c : variations du pH en fonction des stations au 20 mars 2006.....	13
Fig. 7. a : variations de la salinité en fonction des stations au 24 mai 2006.....	14
Fig. 7. b : variations de la conductivité en fonction des stations au 24 mai 2006.....	14
Fig. 7. c : variations du pH en fonction des stations au 24 mai 2006.....	15
Fig. 8 : schématisation du site.....	19
Fig. 9 : Variation du niveau de la nappe de la station 1.....	21
Fig. 10 : Variation du niveau de la nappe de la station 2.....	22
Fig. 11 : Variation du niveau de la nappe de la station 3.....	23
Fig. 12 : Variation du niveau de la nappe au niveau des trois stations.....	24
Fig. 13 : Représentation de la conductivité hydraulique.....	41
Fig. 14.a : Teneur en eau au cours du temps de la station 1.....	43
Fig. 14.b : courbe de rétention de la station 1.....	43
Fig.14.c : Conductivité en fonction de la profondeur de la station 1.....	44
Fig.15.a : Teneur en eau au cours du temps de la station 2.....	45
Fig. 15.b : courbe de rétention de la station 2.....	45
Fig.15.c : Courbe de conductivité de la station 2.....	46
Fig.16.a : Teneur en eau au cours du temps de la station 3.....	47
Fig.16.b : Courbe de rétention de la station 3.....	47
Fig.16. c : courbe de conductivité de la station 3.....	48
Fig 17 : Station 1 : Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T1 à 0.75 m.....	50
Fig 18 : Station 1 : Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T2 à 0.5m.....	51

Fig 19 : Station 2 : Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T1 à 0.75 m.....	52
Fig 20 : Station 2 : Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T2 à 0.5m.....	53
Fig 21 : Station 3 : Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T1 à 0.75 m.....	54
Fig 22 : Station 3 : Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T2 à 0.5m.....	55
Fig.23 : potentiel de pression à la station 3.....	57
Fig.24 : potentiel de pression à la station 2.....	58
Fig.25 : potentiel de pression à la station 1.....	59

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques au 20 mars 2006.....	12
Tableau 2 : Paramètres physico-chimiques au 24 mai 2006.....	13
Tableau 3 : Classification granulométrique d'Atterberg.....	30
Tableau 4 : Résultats de l'essai granulométrique du sol.....	32
Tableau 5 : Types de sol en fonction de la profondeur de la colonne de sol.....	33
Tableau 6 : Résultats des mesures de perméabilité obtenus sur le terrain.....	35
Tableau 7 : Conditions initiales.....	39

Sommaire

Le but de ce travail qui s'inscrit dans le cadre du projet GORE-DELTA est de collecter des données précises de caractérisation physique des sols et de la nappe du point de vue des échanges entre l'eau d'irrigation et la nappe peu profonde et très salée. Ceci permettra la mise en place d'un modèle hydrodynamique de la nappe alluviale.

Le delta du fleuve présente une nappe sursalée et ce projet permettra dans le cadre du développement de l'agriculture irriguée la définition d'un ensemble de moyens techniques appropriés à la capacité financière des entrepreneurs par la conception de systèmes d'irrigation performants.

Pour cela, des stations de mesure comprenant des tensiomètres et des piézomètres ont été implantés et suivis sur le terrain pendant 146 jours. De plus des essais d'infiltration et des prélèvements de sols ont été effectués pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques du terrain. Ceci est suivi par la modélisation proprement dite avec le logiciel HYDRUS 1D.

Ces essais nous ont permis d'avoir une perméabilité moyenne de 11,688 cm/j pour la zone et des variations de certains paramètres du sol tels que la teneur en eau et la conductivité hydraulique en fonction des apports. L'étude nous a apporté une confirmation du processus de salinisation par le biais du lessivage des sols avec une salinité qui augmente fortement entre deux périodes de mesures ou il y a eu arrosage.

Mots clés : nappe alluviale, delta, irrigation, tensiomètre, piézomètre, perméabilité, salinisation

Introduction

La pratique de l'agriculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal est une pratique ancienne qui remonte à l'ère coloniale. Elle a connu une expansion véritable au début des années 60 grâce à la création de la SAED (1965). En l'espace de 25 ans, les superficies aménagées passent de 6500 ha à 32271 ha (SAED, 1990). Actuellement avec 50 000 ha aménagés dans le Delta, la rive gauche du Fleuve Sénégal est l'une des grandes zones d'irrigation de l'Afrique de l'Ouest avec le riz comme principale culture. En plus, la construction des barrages de Diama (anti-sel) et de Manantali (stockage de l'eau pendant la saison des pluies) a rendu possible la sécurisation des terres du Delta et l'irrigation pendant toute l'année.

Cependant, les sols du Delta du fleuve Sénégal sont naturellement salés. En effet, la genèse du Delta s'est effectuée par une séquence de transgressions et de régressions de l'Océan Atlantique (Ndiaye et Isabel, 1999) laissant dans le sous-sol sableux, à l'état fossilisé, une grande quantité de sels solubles. Ces sels, actuellement dissous dans la nappe phréatique, expliquent le caractère très salé de celle-ci. La nappe se situant à faible profondeur (1 à 3m), les sels sont généralement transportés par remontée capillaire en surface et peuvent constituer un frein au développement des plantes.

C'est ainsi que la surveillance des fluctuations de la nappe revêt une importance capitale et primordiale dans les zones du Delta où l'agriculture est pratiquée de façon intense.

C'est dans ce sens que le projet a été mis en place et vise à établir un modèle hydrodynamique de la nappe alluviale après avoir procédé à une collecte de données relatives aux périmètres irrigués.

Pour mener à bien cette étude, nous nous proposons le plan suivant :

- Procéder d'abord à une présentation de la zone d'étude
- Ensuite passer à la présentation de la nappe alluviale avec ses différentes caractéristiques
- Et enfin, s'atteler à l'élaboration du modèle qui comprendra entre autres la présentation du logiciel (Hydrus 1-D), l'élaboration des paramètres d'entrée, les résultats obtenus ainsi que la validation du modèle.

Chapitre I. Présentation de la zone d'étude

I. 1 Géographie

Le Delta du fleuve Sénégal est une région qui se situe entre 15°30'-16°30' de longitude Ouest et 16°-17° de latitude Nord. Il appartient au grand bassin Sénégal-mauritanien (Ndiaye, 1989).

I. 2 Géologie

Le log géologique effectué au niveau du forage de Ross Bethio situé à la longitude 16°16'15'' et à la latitude 16°07'48'', montre que le sol du Delta a une composition essentiellement argileuse, sableuse et marneuse. La stratification des couches se résume sommairement ainsi :

- De 0 – 112m, on a la présence de sable moyen à sable fin ou sable argileux qui caractérise le Continental Terminal.
- De 112 – 176 m, nous avons la présence de calcaire et de calcaire marneux de l'Eocène.
- De 176 – 374 m, Le Paléocène constitué essentiellement de marne, marno-calcaire et d'argile noir.
- De 374 – 480 m, nous sommes en présence de sable moyen à grossier avec une bande d'argile : le Maestrichtien

I. 3 Climatologie

Le climat dans le Delta du fleuve Sénégal est marqué par ailleurs et dans le temps par une distinction saisonnière très nette. Dans le littoral, le climat est de type subcanarien. A l'intérieur il est de type sahélien avec une évapotranspiration potentielle dépassant largement la pluviométrie.

I. 4 Pluviométrie

A l'instar de la plupart des régions sénégalaises, la zone du Delta du fleuve Sénégal est caractérisée par une saison hivernale relativement courte (3mois) et une saison sèche plus longue (environ 9 mois).

Les régions côtières sont moins pluvieuses que celles de l'intérieur (la Casamance par exemple). La pluviométrie moyenne annuelle varie entre 300 et 400mm. Rappelons également que, en dehors de la saison hivernale, certaines précipitations peuvent être notées mais elles sont irrégulières, intermittentes et influent peu sur le processus de recharge de la nappe.

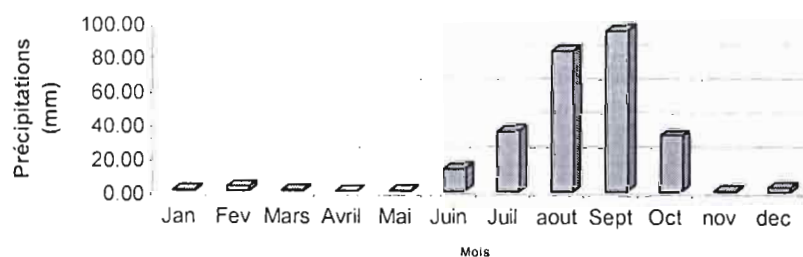


Fig. 1: Moyenne des précipitations de 1986 à 2003 (Station Saint Louis)

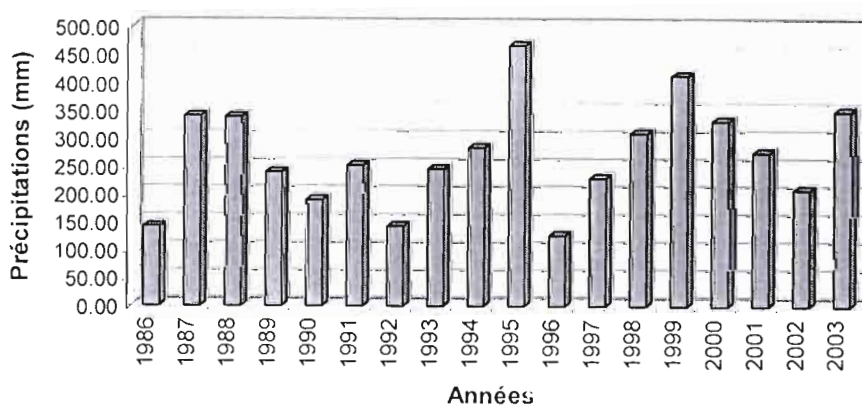


Fig. 2: Variation des précipitations de 1986 à 2003 (Station Saint Louis)

I. 5 Sols et Végétation

Le Delta est une zone caractérisée par des sols halomorphes dont l'évolution est dominée par la présence de sels solubles dont la teneur limite leur productivité et provoque une modification importante de la végétation. Ces sols halomorphes peuvent être regroupés en deux grands ensembles ; les sols salins et les sols alcalins:

- Les sols salins contiennent au moins 0.2 % de sels sodiques et sont de deux types :
 - Les sols à encroûtement salins superficiels : ils sont présents à l'Ouest dans quelques cuvettes de décantations et surtout dans les vasières anciennes et les schorres. Ils présentent une croûte saline blanche ou jaunâtre qui leur confère un faciès de sebkhas due à une nappe à profondeur faible et très riche en chlorure de sodium. Ils ont un pH variable très acide à légèrement basique et présentent parfois un horizon superficiel tourbeux. La végétation est inexistante sur ces sols.
 - Les sols salins à horizon superficiel friable : qui sont dans les cuvettes de décantation peu déprimées, les levées fluvio-deltaïques et les vasières. Une nappe salée peut exister à une profondeur relativement grande, supérieure ou égale à 1 m. La texture des sols est principalement moyenne avec cependant 75 à 85 % d'argile et de limons. Ils ont un indice de percolation très faible et un pH compris entre 6.5 à 8.0. Ils portent une végétation à peuplement clair ou des salsolacés à faible recouvrement.
- Les sols alcalins contiennent plus de 0.2 % de sels sodique avec un pH supérieur à 8.5. Ils sont peu important et se développent sur les terrasses lacustres du lac Rkiz et dans les cuvettes et vasières actuelles du delta. Leur composante argileuse comprend un mélange d'illite et de kaolinite contenant une certaine proportion de quartz. Ces sols ont une capacité d'échange très faible, donc une végétation médiocre.

I. 6 Température

Avec l'influence de l'Océan Atlantique, les températures dans le Delta du fleuve sont modérées presque pendant toute l'année. Elles peuvent atteindre des maxima de 32°C en période hivernale et des minima qui se situent en dessous de 20° C en saison sèche. L'insolation, forte en saison sèche, est favorable aux cultures.

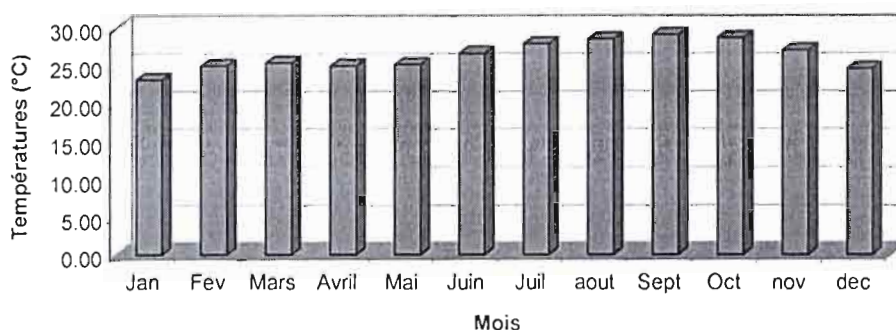


Fig. 3 :Temperature moyenne mensuelle de 1986 à 2003 (Station Saint Louis)

I. 7 Evaporation

L'évaporation est un phénomène physique et physiologique de perte d'eau sous forme de vapeur. Les valeurs mesurées par l'évaporation Piche montrent que les pertes sont beaucoup plus importantes en saison sèche qu'en saison des pluies. En effet, elles varient de 89 mm à 39 mm en février et en septembre respectivement.

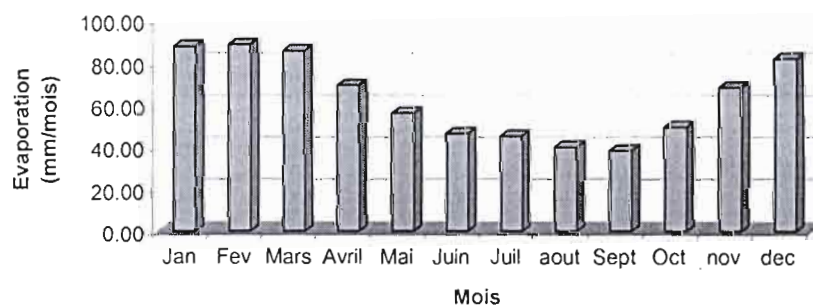


Fig. 4: Moyenne de l'évaporation à Saint Louis (1986 à 2003)

I. 8 Humidité relative

L'humidité relative est généralement inférieure à 60 % pendant la période sèche, puis augmente et atteint environ 80 % pendant la saison hivernale sans dépasser une moyenne annuelle de 69.5%

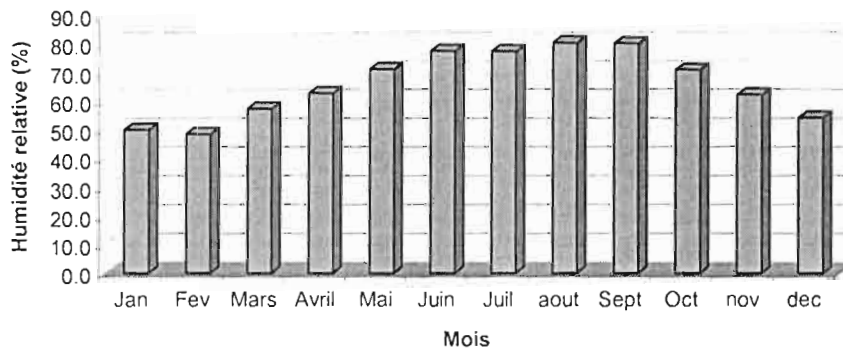


Fig. 5: Humidité relative moyenne de 1986 à 2003 (Station de Saint Louis)

I. 9 Hydrographie

Le Delta du fleuve Sénégal appartient au grand bassin Sénégal-mauritanien.

Le fleuve y coule d'abord d'Est en Ouest puis après une succession de courbes, du Nord au Sud avant de se jeter à la mer à 20 Km de Saint Louis. Dans la région du Delta, le fleuve présente une longueur de 169 Km (mesurée à partir de Dagana), et une faible pente de 0.006 % pour une profondeur moyenne de -5 m I.G.N. Le débit maximal médian de la crue à Dagana est de 2490 m³/s et arrive en novembre. La décrue est très brutale avec une remontée des eaux de mer jusqu'à plus de 200 Km à l'intérieur des terres avant la mise en place du barrage anti-sel de Diama.

La zone d'inondation du fleuve s'élargit à partir du Delta à Dagana. Le Sénégal se divise alors en de nombreux petits bras qui se regroupent avant l'embouchure. Les principaux défluent sont :

- En rive droite, le Garak, le Gouéré et le Ndiadier ;
- En rive gauche, le Gorom, le Kassac-Lampsar-Diovol et le Djeuss ;

Deux cuvettes lacustres peu profondes (profondeur moyenne -2 m I.G.N.) alimentées par les crues du fleuve sont occupées par le lac Rkiz en Mauritanie et le lac de Guiers au Sénégal.

A l'Ouest, on note des cordons littoraux dont le plus typique est la langue de barbarie qui sépare le delta de l'océan atlantique (Ndiaye, 1989).

Cette présentation du site nous conduit à celle de l'objet de notre étude qu'est la nappe alluviale du Delta.

Chapitre II . Présentation de la nappe alluviale du Delta

II. 1 Historique et évolution

Le delta du fleuve est localisé dans une zone de subsidence sur la bordure ouest de l'anticlinal de Guiers et est rempli de sédiments de l'Holocène. Cette région a subi des transgressions marines successives durant l'Holocène. Chacune de ces transgressions est responsable de la présence d'une des couches sédimentaires qui constitue le sol.

- La première est l'Inchirien I qui a couvert la totalité du delta de sédiment argileux et sableux
- La seconde est l'Inchirien II qui a entraîné un dépôt d'argile sur la partie Est de la région et de sable sur la partie Ouest
- Cette transgression marine a été suivie par une ère aride appelée l'Ogolien. Durant cette ère continentale, les dunes de sables se sont formées dans le nord et le sud de la région.
- La troisième et dernière transgression est le Nouakchottien, durant cette période, la mer a érodé les dunes de sables de l'Ogolien et leurs matériaux se sont répandus sur l'ensemble du Delta. Cette couche de sable très imperméable et argileuse trempe dans de l'eau salée.

Cette situation n'a pas beaucoup changé depuis la fin de cette dernière transgression.

En effet, cet aquifère de surface a été envahi par l'eau salée de la mer. Les inondations post Nouakchottiennes sont responsables de la présence de la mince et plus ou moins continue couche de sable d'argile au dessus de celle du Nouakchottien.

La structure hydrogéologique du delta inclut un aquifère peu profond à l'intérieur des sédiments du Nouakchottien et dans l'Inchirien II dans l'ouest de la région. Il se retrouve sous forme semi captif en cas de présence d'une couche d'argile au niveau du toit (Ndiaye et Isabel, 1999).

II. 2 Caractéristiques de la nappe

II. 2. 1 Géométrie du réservoir

II. 2. 1.1 Limites géologiques

Les limites géologiques de la nappe sont constituées latéralement par les sables dunaires qui reposent en discordance sur les argiles inchiriennes et sont considérés comme des limites Nord et Sud-Ouest de l'aquifère. La limite Sud-Est et Est est quant à elle constituée par les formations du Quaternaire ancien à moyen.

II. 2. 1 .2 Le Toit

A l'échelle de la zone d'étude, la nappe est considérée principalement comme captive sur une bande de direction NS de Keur Massene à Ross-Bethio et libre ailleurs (Ndiaye, 1989). Par conséquent, la limite du toit de l'aquifère correspond tantôt à la surface du sol et tantôt à la limite de la couche imperméable.

II. 2. 1 .3 Le Mur

La nappe alluviale du Delta du fleuve Sénégal repose sur un substratum argileux constitué par l'Inchirien I et II. Toutefois, l'Inchirien II constitué de successions de couches alternativement argileuses et gréseuses sauf à l'Ouest et l'Inchirien I représenté par des sédiments argilo-sableux, peuvent être considérés comme des semi-perméables reliant l'aquifère du Nouakchottien aux aquifères sous-jacents.

II. 2. 1. 4 Epaisseur de l'aquifère

L'épaisseur de l'aquifère est très variable avec des minima de 1.035 m et des maxima atteignant des valeurs de 41m. La connaissance du toit et du substratum nous permet d'avoir l'épaisseur de l'aquifère en n'importe quel endroit de la zone.

II. 2. 2 Hydrochimie de la nappe

II. 2. 2. 1 Contexte général

De nos jours, l'agriculture irriguée rencontre d'énormes difficultés entre autre le risque de salinité qui peut être apprécié par la conductivité électrique (CE) et celui de l'alcalinisation de sols qui est due aux échanges ioniques entre l'eau et les argiles du sol et concerne surtout le sodium, le calcium et le magnésium.

En général, les eaux souterraines sont plus stables et de meilleure qualité que les autres eaux naturelles telles que les eaux de surface (eau de mer, des lacs, des cours d'eau...). Cependant les eaux d'infiltration alimentant les nappes phréatiques se chargent de substances minérales et organiques en traversant les couches supérieures du sol. Et ces substances se retrouvent dans ces eaux sous différentes formes.

En plus, les pratiques actuelles des cultures influencent fortement le régime et la qualité des eaux. Les engrais et les produits chimiques utilisés pour le traitement des plantes affectent beaucoup ces dernières et leur transfert à la nappe se fait la plupart du temps par infiltration. (Sidibé, 2004). Ainsi nous procéderons à une analyse sommaire des caractéristiques de l'eau de la nappe dans la zone étudiée.

II. 2. 2 Paramètres physico-chimiques

Dans le Delta du fleuve Sénégal, les eaux sont fortement salées. En effet, lors des phases de transgression et de régression au cours du Quaternaire, une grande quantité de sels solubles a été laissée dans le sous-sol sableux, à l'état fossilisé (Ndiaye et Isabel, 1999). Actuellement, les apports de sels proviennent essentiellement des eaux de mer qui remontent le fleuve jusqu'à Dagana pendant la saison sèche, ce qui a conduit à la construction du barrage anti-sel de DIAMA (Ndiaye, 1989). Par ailleurs, la présence en faible profondeur de la nappe salée du Noukchottien se heurte à la mise en valeur des terres du Delta. Ainsi au niveau des zones de faible profondeur de la nappe, il y a risque de remontée des eaux salées qui peuvent atteindre la zone racinaire des plantes et les endommager (Ndiaye, 1989).

Les paramètres mesurés sur le site étudié sont : la conductivité électrique (CE), le pH, la salinité et la température. Les mesures ont été effectuées directement sur le terrain à l'aide d'un appareil portatif que l'ESP mettait à notre disposition lors de nos campagnes. C'est un appareil numérique du laboratoire qui, après étalonnage et introduction des électrodes dans les échantillons, affiche les valeurs des paramètres souhaités (pH, salinité, CE, température).

- *Le pH* : c'est un nombre compris entre 0 et 14 caractérisant l'acidité ou la basicité d'un milieu. Il mesure l'activité des ions H^+ contenus dans une eau.

$$pH = - \log (H^+)$$

- *La salinité* : elle correspond à la quantité de sels dissous par une quantité de solution donnée. Elle est mesurée en grammes de sel par kilogrammes de solution (g / kg), que l'on peut exprimer en millièmes ou parties par milliers. Elle est liée à la conductivité de l'eau, à sa masse volumique et à la teneur équivalente en chlorures.
- *La conductivité électrique* : elle exprime la capacité de l'eau du sol à laisser passer un courant électrique et elle augmente avec la teneur en ions du milieu. La concentration ionique est liée au contact de l'eau avec les substances surtout minérales du sol. Cette conductivité

électrique est l'inverse de la résistivité (conductance) qui est la résistance offerte au passage d'un courant électrique. Elle est exprimée le plus souvent en mS / cm ou en μ S / cm.

II. 2. 2. 3 Résultats obtenus

Campagne du 20 mars 2006

Paramètres	Conductivité électrique (mS / cm)	salinité	pH	Température (°C)
Station 1	2.29	1.0	4.3	25.8
Station 2	0.734	0.1	5.9	25.1
Station 3	0.733	0.1	5.39	25.6

Tableau 1 : Paramètres physico chimiques au 20 mars 2006

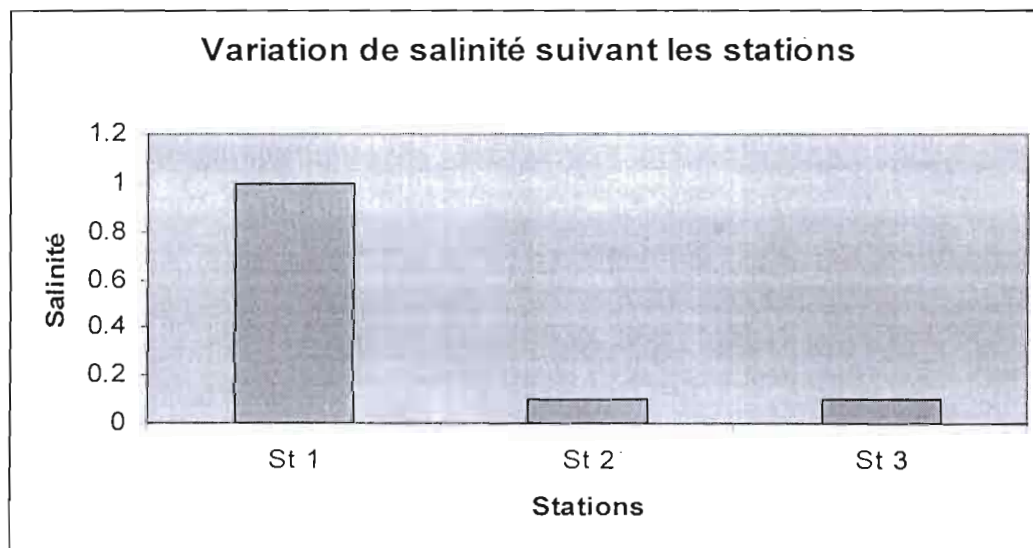


Figure 6.a : variations de la salinité en fonction des stations au 20 mars 2006

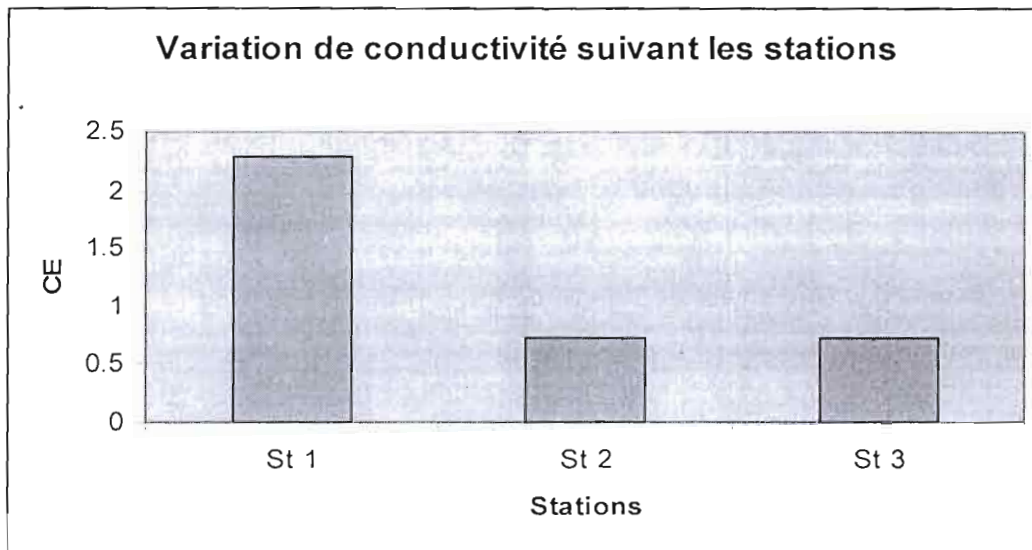


Figure 6.b : variations de la conductivité en fonction des stations au 20 mars 2006

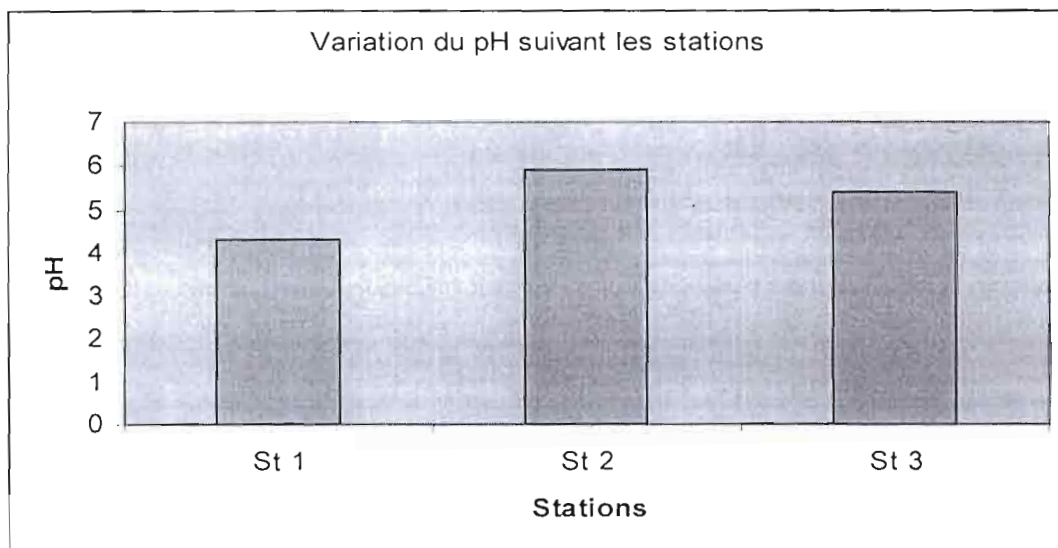


Figure 6.c : variations du pH en fonction des stations au 20 mars 2006

Campagne du 24 mai 2006

Paramètres	Conductivité électrique (mS / cm)	Salinité	pH	Température (°C)
Station 1	2.17	1.0	4.48	25.8
Station 2	1.106	0.4	6.3	25.1
Station 3	1.464	0.5	5.73	25.6

Tableau 2 : Paramètres physico chimiques au 24 mai 2006

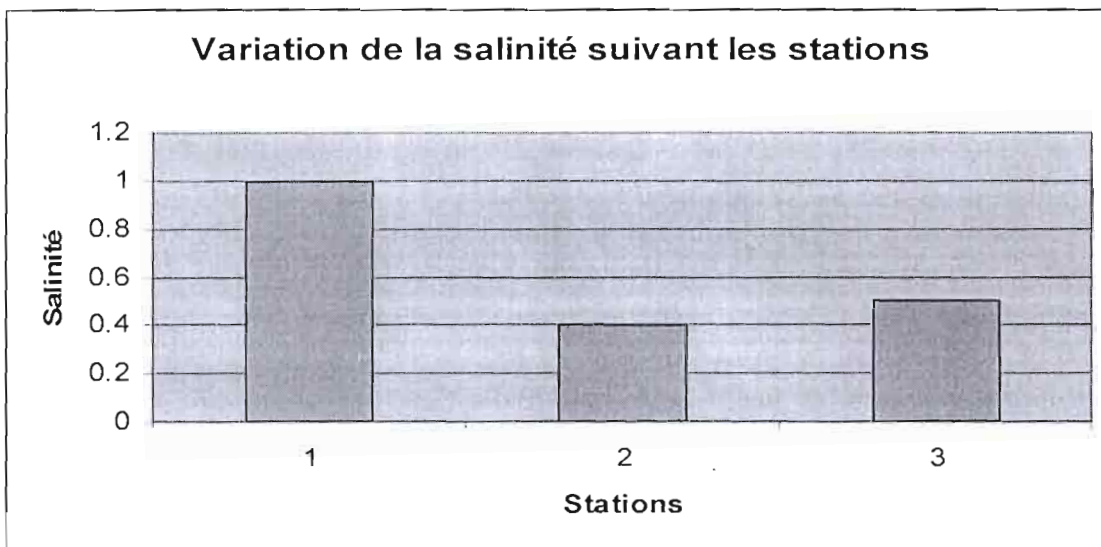


Figure 7.a : variations de la salinité en fonction des stations au 24 mai 2006

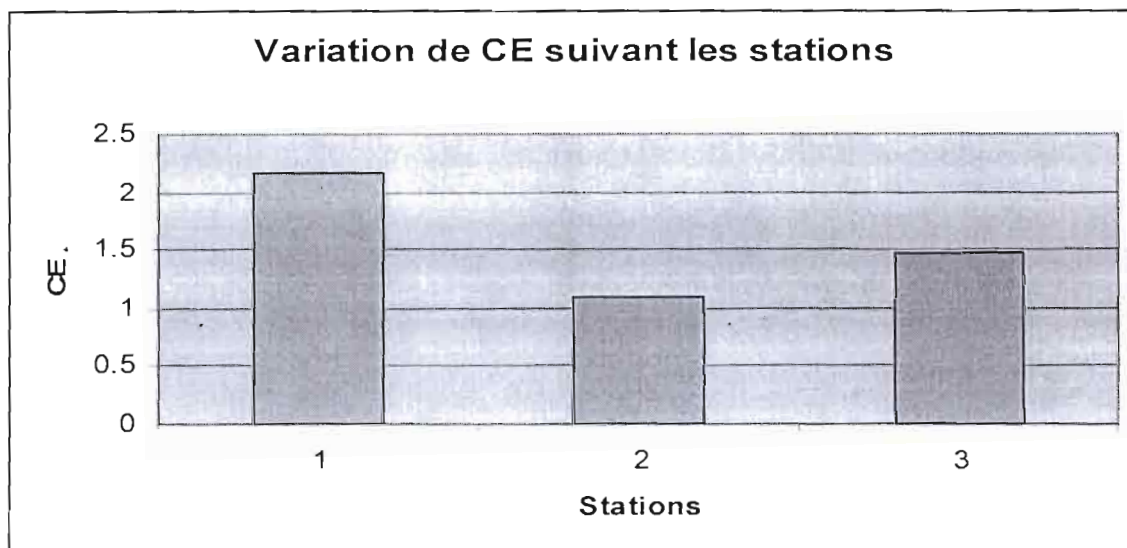


Figure 7.b : variations de la conductivité électrique en fonction des stations au 24 mai 2006

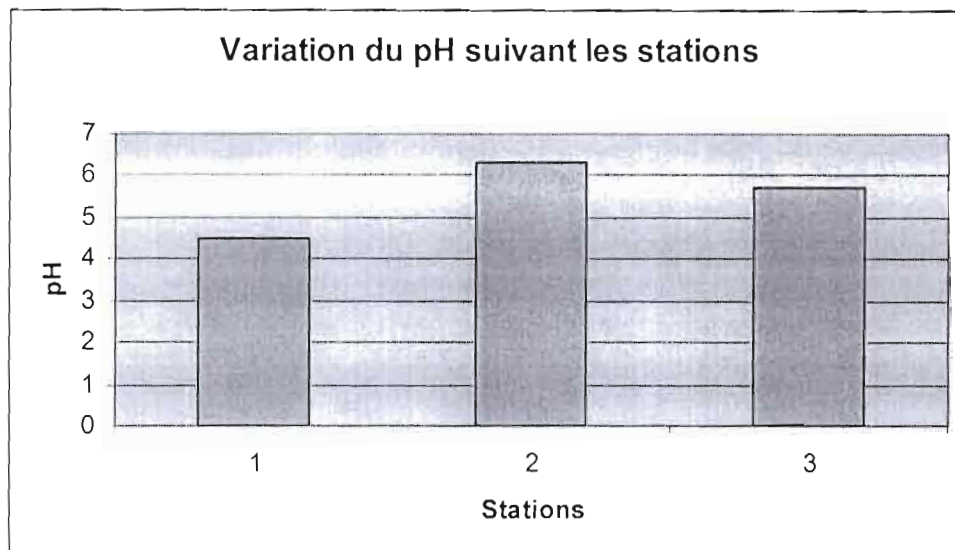


Figure 7.c : variations du pH en fonction des stations au 24 mai 2006

II. 2. 2. 4 Interprétation et commentaires

Après avoir analysé ces résultats, on se rend compte que la salinité est beaucoup plus importante à la station 1 (2.29 mS / cm) qu'aux stations 2 et 3 (0.73 mS / cm) ; ce qui peut s'expliquer par des poches de sel qui se sont formées lors des phases de transgressions et de régressions. Et cela se voyait nettement au champ lors de nos campagnes sur le site : l'oignon qui poussait au niveau des stations 2 et 3 avait une croissance de loin plus développée que celui qui évoluait aux alentours de la station 1 à cause de la forte salinité des terres sur cette partie.

Les mesures de la deuxième campagne montrent, à l'instar des premières, les mêmes variations suivant les stations. Cependant par rapport à une même station, on remarque que la salinité a augmenté (sur les stations 2 et 3 notamment) lors de la dernière campagne : ce qui peut s'expliquer par le fait que pendant cette période, la quantité d'eau irriguée durant toute la culture est devenue significative et a permis de lessiver les sols. Et ce lessivage transporte les sels solubles de ces sols vers la nappe qui, par conséquent, devient plus salée. C'est pourquoi le riz irrigué est la culture qui résiste mieux face à cette salinité (le lessivage est plus important).

La conductivité électrique variant dans le même sens que la salinité, toute cette interprétation peut lui être attribuée.

Quant au pH, il est acide pour toutes les stations. En effet la pyrite formée par un processus bactérien (Deckers et al., 1996), lors de la transgression Dunkerquienne dans les sols à horizon sulfaté acide couvert de mangroves, peut s'oxyder lors de la baisse de la nappe provoquant ainsi une acidification des sols en profondeur.

En ce qui concerne la température, nous constatons qu'elle est la même pour toutes les stations (25°C) et qu'elle est presque égale à la température ambiante, ce qui montre le caractère ouvert du système et sa vulnérabilité vis-à-vis de la pollution.

II. 3 Etude de la piézométrie de la nappe

La surface piézométrique d'une nappe libre constitue la surface supérieure de la zone saturée de l'aquifère. C'est une limite hydrodynamique. Cette surface peut s'élever ou s'abaisser librement dans la formation hydrogéologique perméable soit par recharge ou évaporation. Les mêmes côtes de cette surface forment des courbes de niveau appelées courbes isopiézométriques (ou isopièzes ou hydro isophyses) car elles correspondent à des points de même charge hydraulique. L'eau de la nappe se déplace suivant les lignes de courant perpendiculairement aux courbes isopiézométriques ; sa vitesse est inversement proportionnelle à la distance entre deux courbes consécutives.

L'objectif des réseaux piézométriques est de mesurer le niveau de cette surface en des points distincts. Ces mesures se font sur une certaine durée et suivant une certaine fréquence afin d'estimer les variations possibles du niveau de la nappe.

II. 3. 1 Choix du site

Pour étudier les variations du niveau de la nappe, nous avons choisi sur les conseils d'un agent de la Société d'Aménagement et d'Exploitation du Delta (SAED) un champ dans la cuvette de Savoigne. Celle-ci se trouve dans le Delta à une vingtaine de kilomètre de la ville de Saint Louis et comporte les caractéristiques que nous avons énoncées dans la présentation de la zone d'étude. L'irrigation se fait par des sillons aménagés par la SAED. Il faut signaler que le site d'étude choisi initialement (Ndelle, dans la première phase du projet GORE DELTA) a été changé parce que le terrain devait être préparé pour la culture du riz.

II. 3. 2 Mise en place du réseau piézométrique

Une campagne de deux jours a été organisée les 29 et 30 décembre pour la mise en place de ce réseau. Une personne a été désignée à cet effet pour le suivi quotidien (prise des mesures) et la surveillance du matériel installé.

Pour avoir ces données, il a été procédé à la date du 30 décembre 2005, à la mise en place de 03 *stations de mesures* comprenant chacune :

✓ Un *piézomètre* : c'est un tube en PVC crépiné sur toute sa longueur ou une partie. Il permet de mesurer la charge hydraulique au niveau du point de mesure.

Pour leur mise en place, on a utilisé une tarière pour creuser un trou jusqu'à dépasser la surface piézométrique de la nappe qui se trouvait à environ 1m pour tous les points. Celui-ci est de diamètre supérieur à celui du tube.

Après, on procède à la mise en place du tube qui doit être placé verticalement. Puis tout autour, on met du gravier qui va faire office de drain. Une fois le piézomètre stabilisé, on mesure la hauteur de la margelle c'est-à-dire la distance allant du sol à l'extrémité supérieure du tube.

La mesure du niveau piézométrique par rapport à la margelle est effectuée à partir d'une sonde. La profondeur de la nappe par rapport au sol sera donnée par la différence entre cette mesure et la hauteur de la margelle.

✓ 2 tensiomètres placés autour de chaque piézomètre :

Un tensiomètre permet de visualiser en permanence l'état hydrique du sol. Il ne renseigne pas exactement sur la teneur en eau du sol mais plutôt sur les caractéristiques de disponibilité de cette eau. Il donne la valeur de la pression matricielle au point d'implantation après correction.

Il est composé d'un réservoir hermétique contenant de l'eau, terminé à l'une de ses extrémités par une céramique poreuse et à l'autre d'un manomètre de dépression.

Ainsi en fonction du niveau de la nappe à chaque station, il a été placé un tensiomètre à 0.5 m et un autre à 0.75 m

Les caractéristiques pour chacune des stations sont les suivantes :

Station 1 : nappe à 0.85 m au 30.12.2005 par rapport au niveau du terrain naturel

Piézomètre 1 (P1) : margelle à 0.45 m

Tensiomètre 1 :T1 implanté à 0.75 m de profondeur

Tensiomètre 2 :T2 implanté à 0.5 m de profondeur

Station 2 : nappe à 1.10 m au 31.12.2005 par rapport au niveau du terrain naturel

Piézomètre 2 (P2): margelle à 0.75 m

Tensiomètre 1 :T1 implanté à 0.75 m de profondeur

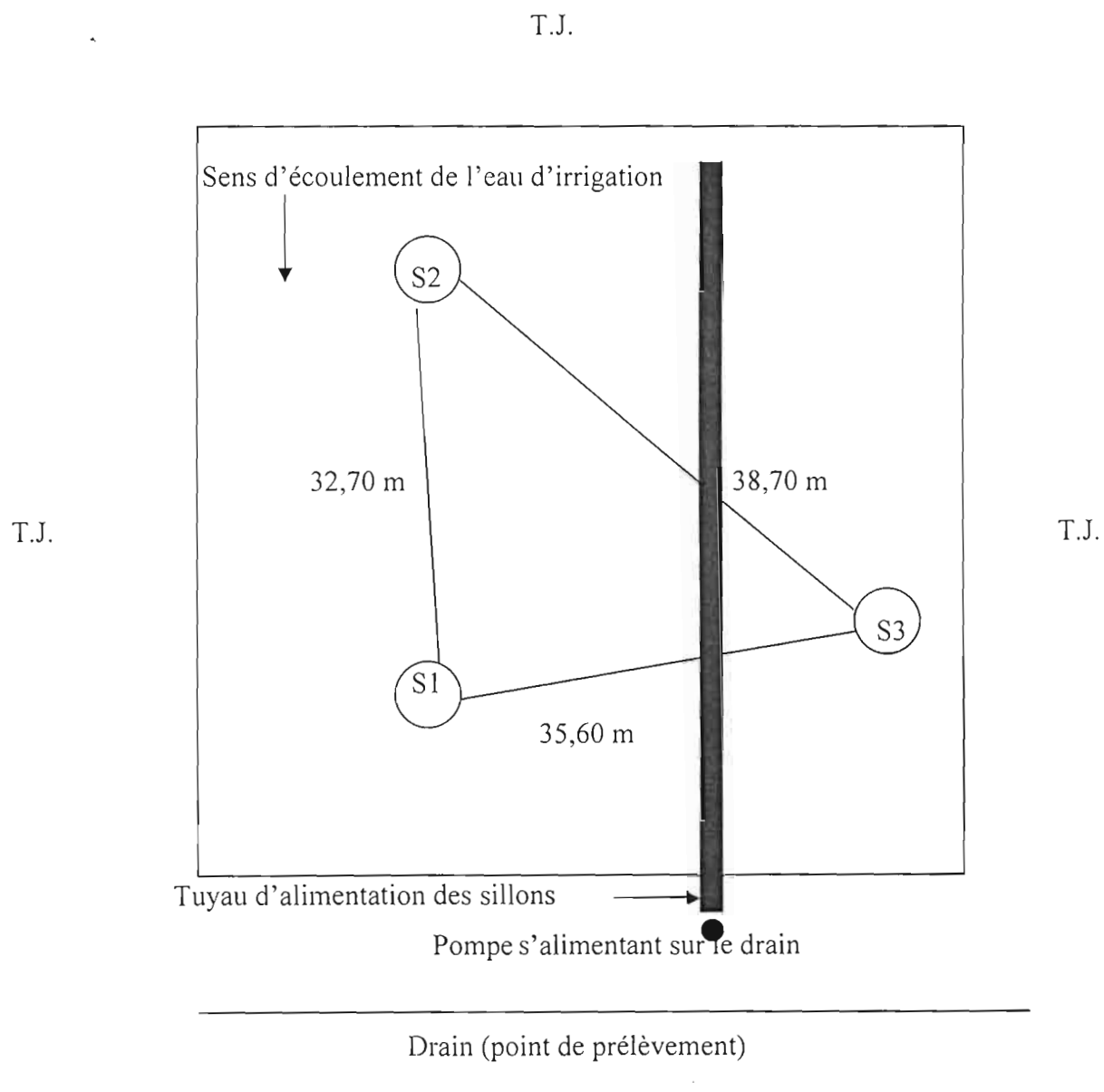
Tensiomètre 2 :T2 implanté à 0.5 m de profondeur

Station 3 : nappe à 0.85 m au 31.12.2005 par rapport au niveau du terrain naturel

Piézomètre 3 (P3): margelle à 0.94 m

Tensiomètre 1 :T1 implanté à 0.5 m de profondeur

Tensiomètre 2 :T2 implanté à 0.75 m de profondeur



T.J. : terrain en jachère

Fig. 8 : schématisation du site



II. 3. 3 Suivi : résultats et commentaires

Résultats

Les résultats sont fournis en annexes 1, 2 et 3;

Dans ceux ci nous avons :

Les P_i correspondent à la profondeur de la nappe par rapport à la margelle en mètre

Les T_i sont les lectures sur les tensiomètres en centibare,

Concernant les valeurs des tensiomètres, il faut apporter des corrections. Ainsi, les valeurs lues directement sur le cadran sont négatives et possèdent un décalage de 5 cbar (par exemple une lecture de -55 cbar sur le cadran correspond à une dépression réelle de -60 cbar). A cette valeur, il faut ajouter la longueur de la colonne d'eau qui est la distance entre le manomètre et le milieu de la céramique poreuse.

Le niveau de la nappe est calculé par rapport au sol en mètre

Ces tableaux ont permis de tracer les courbes suivantes pour chaque station.

variation piézométrie station 1

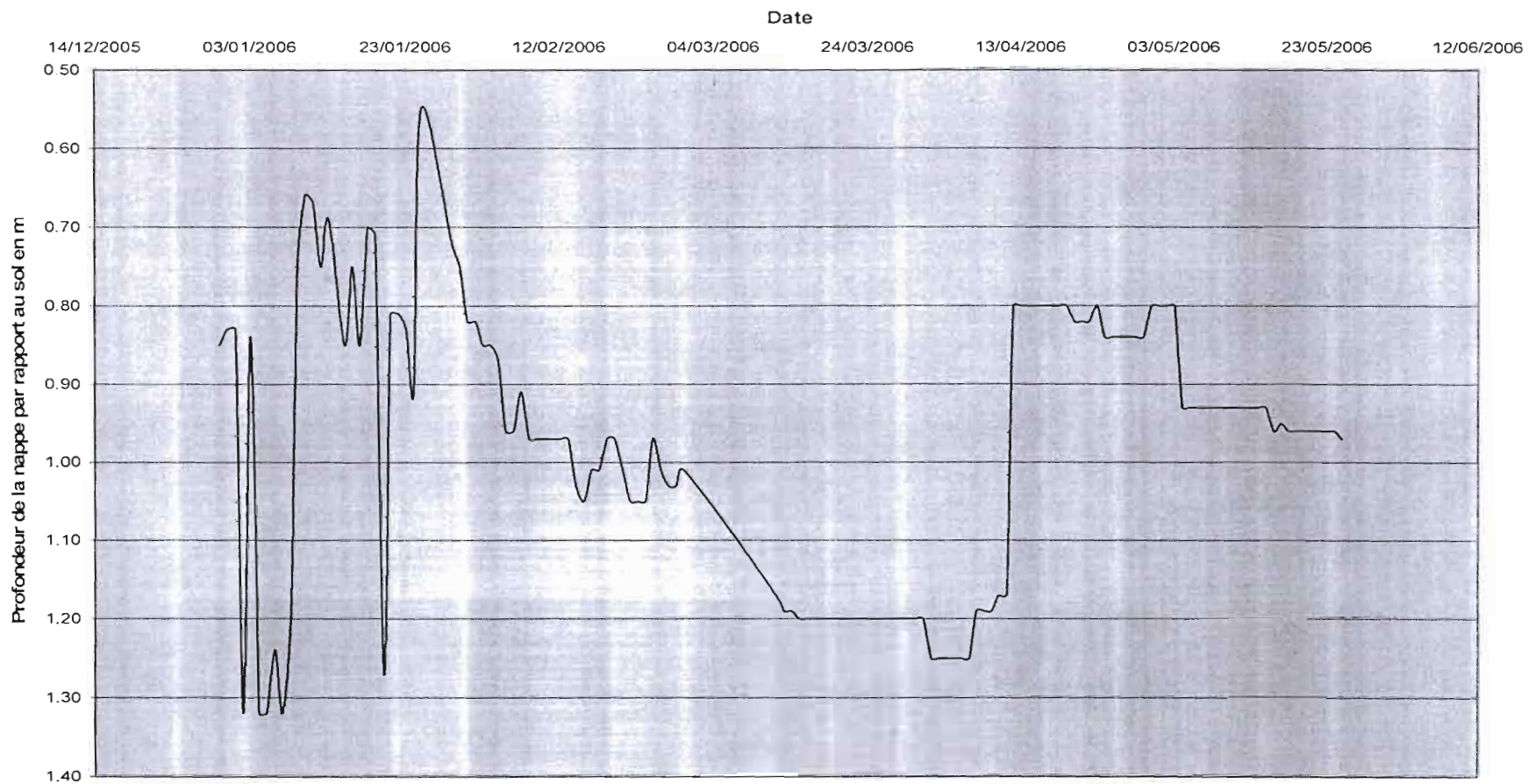


Fig. 9 : Variation du niveau de la nappe de la station 1

variation piézométrie station 2



Fig. 10 : Variation du niveau de la nappe de la station 2

variation piézométrie station 3

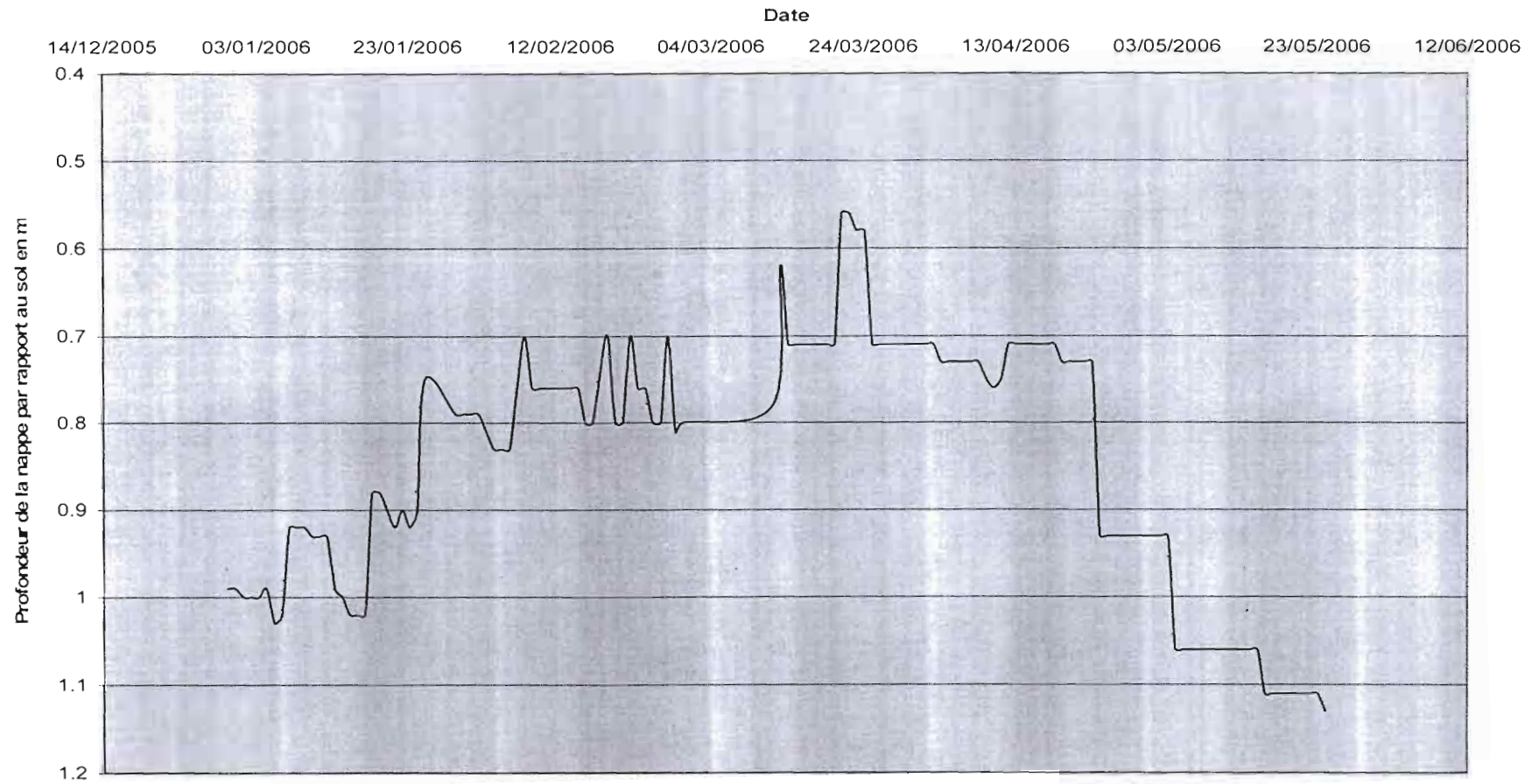


Fig. 11 : Variation du niveau de la nappe de la station 3

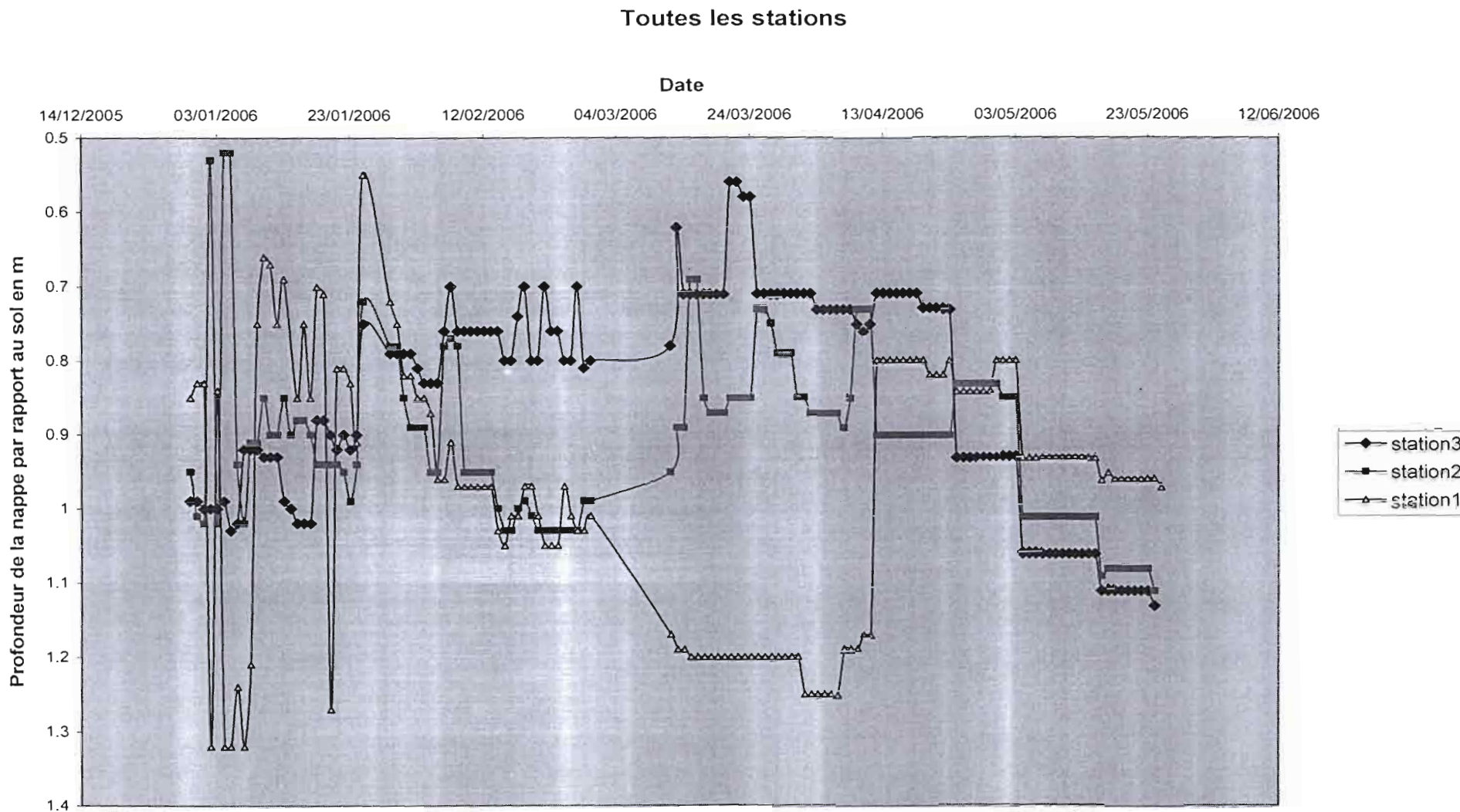


Fig. 12 : Variation du niveau de la nappe au niveau des trois stations

Interprétation

On constate qu'au début (mois de janvier), les variations du niveau piézométrique sont plus importantes. Cela peut s'expliquer par le fait que le terrain en jachère était sec.

Nous pouvons également expliquer ces différences de variations du niveau piézométrique entre les deux périodes par le fait que, lors de la croissance des plantes, la partie de l'eau d'irrigation prélevée par les racines devient plus importante au second mois. Ainsi on note une baisse du niveau moyen de la nappe car il y a moins d'infiltration.

Il faut aussi noter que les arrosages ne se font pas tout le temps de manière périodique (problème de carburant pour alimenter la pompe) et que les durées de ces arrosages diminuent au cours du temps.

Notons également que certains écarts de température entre les différentes périodes peuvent être à l'origine de variations notables de l'évapotranspiration mais qui peut être fortement contrée par la recharge.

D'une façon globale, en comparant les niveaux piézométriques sur les 3 stations, on constate de grandes variations au niveau des stations 1 et 2 (soit de 0.49m pour St1 et 0.5m pour St2) au début de la campagne c'est-à-dire pendant la période du 31-12-2005 au 09-01-2006, alors que la station 3 révèle des variations moins importantes.

Cela peut être dû à un retard de stabilisation des piézomètres 1 et 2 dont l'effet peut-être a été moins senti à la station 3 où le puits a été mieux développé.

Après cette période (du 10-01 au 25-01), ces variations deviennent moins importantes excepté la station 1.

Entre le 29-01 et le 28-02-2006, presque tous les piézomètres se comportent de la même manière concernant les variations. Cependant on note un relèvement du niveau moyen de la nappe pour la station 3 par rapport à la position initiale (0.91m à 0.76m) et un abaissement pour la station 1 alors que le piézomètre 2 revient presque à sa position initiale.

Le relèvement peut s'expliquer naturellement par les apports issus de l'eau d'irrigation qui s'est infiltrée pour atteindre la nappe.

Pour la période du 12-03 au 12-04-2006, on note une bonne évolution des variations au niveau des stations 2 et 3 avec les oscillations du niveau de la nappe qui expriment les apports d'eau par irrigation et les pertes d'eau par évapotranspiration avec un niveau moyen au dessus du niveau initial.

Enfin à partir du 12-04-2006, on a noté un abaissement des niveaux piézométriques au niveau de toutes les stations, abaissement normal dû à l'arrêt de l'arrosage et par conséquent des cultures ce qui va augmenter l'évaporation.

Il a été procédé à un autre essai dans le but de la modélisation, en considérant cette fois ci une charge constante au niveau du sol. Celui-ci a été réalisé après la période de culture des oignons. Cet essai permet de simuler les transferts d'eau lors de la culture du riz (culture la plus utilisée dans cette zone) où le sol est submergé avec une hauteur d'eau de 10cm en moyenne.

Pour cela on a délimité dans le même site d'étude autour de la station 3 une surface d'environ 10 m² qui a été remplie jusqu'à une hauteur de 10cm (des piquets servent de repère de niveau). Un système muni d'un flotteur relié à une bêche à eau permet de maintenir cette hauteur d'eau. L'opérateur sur place se charge de compléter le niveau si le débit d'infiltration est supérieur au débit de la bêche à eau.

Il fallait suivre les variations du niveau de la nappe pendant 10 jours.

Cependant, une fois l'expérience mise en œuvre, la nappe a remonté jusqu'à la surface, ceci étant visible sur le piézomètre.

Ce phénomène s'explique par l'existence d'une brèche au niveau du sol sec qui constitue une liaison directe entre la nappe et la surface, d'où toute l'eau de remplissage est partie vers la nappe.

Donc nous avons suivi les variations potentielles de la piézométrie pendant 5 jours en conservant la charge constante des 10 cm. Lors des 5 jours suivants, nous avons laissé l'eau s'infiltrer en enlevant le flotteur et en suivant la piézométrie. Les résultats de cet essai sont fournis par l'annexe 4.

Après l'avoir caractérisé, nous allons essayer de modéliser le comportement hydrodynamique de cette nappe.

Chapitre III. Elaboration du modèle

III. 1 Présentation du logiciel

Hydrus 1D est un logiciel utilisant la modélisation par éléments finis pour simuler l'écoulement unidimensionnel de l'eau, de la chaleur ou des solutés dans des milieux de degré de saturation variable. La dernière version a été développée par J. Simunek, M. Th Van Genuchten et M. Sejna du département des sciences environnementales de l'université RIVERSIDE de Californie en Avril 2005 et est téléchargeable gratuitement sur Internet. Il existe aussi en 2D et en 3D.

Les raisons qui ont guidé notre choix sur Hydrus plutôt que sur un autre logiciel tel que Modflow sont :

- La nappe est étudiée localement en un point précis
- Hydrus peut simuler aussi bien la zone saturée que la zone non saturée.

Le programme résout numériquement l'équation de Richards pour les flux d'eau en condition saturée et non saturée :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S$$

avec θ la teneur en eau volumique [-] ;

h la charge capillaire [L] ;

K la conductivité hydraulique [LT^{-1}] ;

z la profondeur orientée vers le haut [L] ;

t le temps [T] ;

S un terme source (de pluie ou d'évaporation).

Pour constituer le modèle de fonctionnement hydrodynamique des sols, il faut (1) construire la géométrie du profil (structure pédologique), (2) intégrer les informations sur les caractéristiques hydrodynamiques de chaque horizon à partir des paramètres du modèle de Van Genuchten-Mualem, (3) enfin fixer les conditions aux limites et les conditions initiales.

L'équation de Richards comporte un terme qui prend en compte l'eau prise par les racines des plantes. Elle peut aussi prendre en compte une porosité double avec une partie de l'eau

immobile et l'autre mobile. La région du flux peut être composée de sols non uniformes. Le flux peut arriver verticalement, horizontalement ou incliné suivant une certaine direction.

Les flux d'eau du modèle peuvent dépendre des limites imposées par la charge et le flux, limites contrôlées par les conditions atmosphériques de même que les conditions aux limites de drainage libre.

Les propriétés hydrauliques des sols non saturés sont décrites à l'aide des travaux de Brooks et Corey(1984) et de Van Genuchten (1980) avec ses fonctions analytiques modifiées qui permettent d'améliorer ces propriétés près du point de saturation.

Le code de Hydrus prend en compte l'hystérèse qui peut être défini comme la dépendance entre la teneur en eau et l'état de l'eau du sol qu'elle soit en drainage ou en humidification. Il utilise pour cela les modèles empiriques présentés par Scott et autre (1980), Kool et Parker (1987).

Les équations régissant l'écoulement et le transport sont résolues en utilisant la formulation linéaire de type Galerkin en éléments finis. L'intégration dans le temps est effectuée en utilisant une formulation implicite par différences finies pour les conditions en saturé et en non saturé. Des mesures additionnelles sont prises pour améliorer les solutions pour des problèmes temporaires. La teneur en eau est évaluée en utilisant la méthode de conservation de la matière proposée par Celia et al. (1990)

Hydrus inclut également un algorithme d'optimisation de paramètre qui est une approche indirecte pour la simulation inverse des paramètres hydrauliques du sol. Les méthodes inverses sont typiquement basées sur la minimisation de la fonction objective qui exprime la différence entre les valeurs observées et les valeurs prédites du système.

III. 2 Elaboration des paramètres d'entrée

Elles sont définies en fonction des boîtes de dialogue proposées par le logiciel.

Les paramètres d'entrée dépendent principalement des caractéristiques physiques du sol (la granulométrie et perméabilité) et du bilan hydrique.

III. 2. 1 Granulométrie

Un sol est formé de particules de dimensions très variées. En effet, il peut contenir des éléments gros ou grossiers (cailloux par exemple) tout comme il peut comporter des particules ultrafines de dimension de l'ordre du micron (argile par exemple).

L'analyse granulométrique se définit comme étant une analyse statistique de la répartition des tailles des particules dans une masse de matériau donné tout en estimant l'importance relative de chacune des fractions de sol en allant des gros éléments tels que les enrochements à l'argile en passant par les cailloux, les graviers, les sables et les limons.

L'une des classifications les plus anciennes, les plus connues et les plus simples est celle de l'agronome suédois Atterberg. Sa classification suit une progression géométrique de raison 1/10.

Enrochements.....	>200mm
Cailloux.....	200mm-20mm
Graviers.....	20mm-2mm
Sables gros.....	2mm-0.2mm
Sable fin.....	0.2mm-0.02mm
Limon.....	20 μ -2 μ
Argile.....	2 μ -0.2 μ
Ultrargile.....	<0.2 μ

Tableau 3: Classification granulométrique d'Atteberg

Par ailleurs, à côté de cette classification, il en existe d'autres telles que la classification du Massachusetts Institute of Technology qui n'est pas loin de celle d'Atterberg mais qui apporte une modification concernant la définition des limons : elle stipule que, en dessous de 60 microns, les grains ne sont plus visibles à l'œil nu et possèdent déjà pour la plupart les propriétés les rapprochant plus des limons que des argiles.

La représentation d'une analyse granulométrique sous forme d'une courbe appelée courbe granulométrique est très fréquente et permet une lecture plus facile. Cette courbe est tracée sur

un papier semi-logarithmique en mettant en abscisse les diamètres des tamis (échelle log) et en ordonnées les pourcentages du poids total de l'échantillon.

La connaissance de la granulométrie de la zone non saturée et même de la zone saturée constitue une étape importante dans l'élaboration du modèle hydrodynamique. En effet, elle permet de déterminer certains paramètres hydrodynamiques propres à chaque type de sol. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour déterminer ces paramètres parmi lesquels nous avons les équations de régression de Vereecken qui sont adaptées au modèle de Van Genuchten pour la détermination de la conductivité hydraulique.

Les paramètres de ces équations sont :

θ_s = teneur en eau à saturation ;

θ_r = teneur en eau résiduelle ;

α , m , n , l qui sont des paramètres empiriques ;

l est pris égal à 0.5 (après une étude sur 45 types de sol) ;

$m = 1 - 1/n$;

Ces paramètres sont déterminés à partir d'une étude qui a été menée en Belgique sur 182 types de sol (Vereecken et al, 1989) et au sortir de laquelle étude, les relations suivantes ont été établies (B. Wagner et al):

$$\theta_r = 0.015 + 0.005 \text{ clay} + 0.014 \text{ om}$$

$$\theta_s = 0.81 - 0.283 D + 0.001 \text{ clay}$$

$$\ln(\alpha) = -2.486 + 0.025 \text{ sand} - 0.351 \text{ om} - 2.617 D - 0.021 \text{ clay}$$

$$\ln(n) = 0.053 - 0.009 \text{ sand} - 0.013 \text{ clay} + 0.00015 (\text{ sand})^2$$

avec clay = % d'argile sand = % de sable

D = masse volumique en g / cm^3

om = % de carbone

Ces paramètres peuvent donc être calculés en fonction des pourcentages de chaque composant du sol. Par ailleurs le type de sol peut être déterminé à l'aide d'un logiciel qui permet de classer les sols avec le triangle textural de l'USDA et qui utilise les pourcentages de sable et d'argile. Ce logiciel est élaboré par Aris Gerakis avec l'aide de Brian Baer, nov. 1999.

Il faut noter également qu'au préalable des échantillons de sol ont été prélevés sur le site d'étude et acheminés au laboratoire d'analyse de sol de l'IRD. Ces échantillons sont prélevés tous les 25 cm jusqu'à atteindre la nappe.

Les résultats d'analyse sont consignés dans le tableau suivant :

Echantillons		Granulométrie						Azote %	Carbone %
N° Labo	Références demandeur	Argiles %	Limons fins %	Limons gros%	sables fins %	sables grossiers %	Total		
1	0-25	60.54	18.77	8.71	5.82	1.28	95	0.02	0.21
2	25-50	34.33	15.42	13.27	30.84	4.08	98	<0.02	0.13
3	50-75	14.83	4.78	4.42	67.13	7.33	98	<0.03	0.10
4	75-100	11.58	2.81	0.78	76.21	7.80	99	<0.04	0.14
5	100-125	13.55	3.69	2.14	70.85	8.43	99	<0.05	0.13
6	125-150	13.20	2.51	0.83	70.75	11.19	98	<0.06	0.12
7	150-175	12.02	3.20	0.99	74.35	7.48	98	<0.07	0.12
8	175-200	10.74	3.25	0.86	76.49	7.61	99	<0.08	0.12

Tableau 4 : Résultats de l'essai granulométrique du sol

L'utilisation du logiciel donne les types de sols suivants :

Profondeur (en cm)	Type de sol
0-25	Argile
25-50	Argile limoneuse
50-75	Limon sableux
75-100	Sable limoneux
100-125	Limon sableux
125-150	Limon sableux
150-175	Limon sableux
175-200	Limon sableux

Tableau 5: Types de sol en fonction de la profondeur de la colonne de sol

Cependant la masse volumique n'a pas été déterminée pour les échantillons, ce qui fait que certains paramètres ne peuvent pas être calculés.

Cette granulométrie va jouer sur un autre paramètre que nous essaierons de déterminer sur le terrain, c'est la perméabilité.

III. 2. 2 Perméabilité

Encore appelé conductivité hydraulique, la perméabilité des hydrogéologues est le rapport du flux au gradient hydraulique, c'est-à-dire le rapport entre le volume d'eau traversant une section unitaire par unité de temps et le gradient hydraulique.

Elle a la dimension d'une vitesse [LT^{-1}] et est influencée par la texture qui renseigne sur la taille des particules d'une manière quantitative et qualitative et la structure qui définit l'arrangement réciproque et l'orientation des particules dans le sol. Ainsi la conductivité hydraulique sera plus élevée si le sol est très poreux, fracturé ou agrégé que s'il est compact et dense.

La conductivité hydraulique ne dépend pas exclusivement des propriétés du sol mais aussi des caractéristiques du fluide telles que la densité et la viscosité. C'est pourquoi elle s'exprime ainsi : -

$$K = \frac{\rho g}{\mu} k$$

Où : k = perméabilité intrinsèque du sol

μ = viscosité dynamique

ρ = densité du fluide

g = accélération de la pesanteur

Le terme $f = \frac{\rho g}{\mu}$ est appelé « fluidité » du fluide

Les mesures ont été effectuées à partir de l'infiltromètre de marque SDEC à charge constante.

L'ensemble pour la mesure est constitué par les éléments suivants :

- Un réservoir de saturation de 25 litres muni d'un bouchon avec connexion rapide
- Une cellule de régulation de niveau en acier inoxydable, équipé de 2m de tube silicone muni d'une connexion rapide, et d'un dispositif de suspension réglable en hauteur
- Un réservoir de mesure de 2.5 litres, muni d'une connexion rapide
- Une tarière et un thermomètre

Pour effectuer les mesures, il a fallu procéder aux opérations suivantes :

- Faire un trou d'environ 15 cm de diamètre avec la tarière et de profondeur variant de 40 à 70 cm
- Placer verticalement la cellule de régulation qui se stabilise à 15cm du fond
- Passer à la phase d'imbibition en connectant la cellule au réservoir de saturation qui dure environ 4h et varie en fonction des terrains
- Après la saturation, on passe à la phase de mesure où la cellule est connectée au réservoir de mesure. On observe le volume d'eau percolée V au bout d'un temps t donné.

Résultats obtenus

A titre d'exemple, nous donnons le calcul pour la première mesure de perméabilité effectuée.

Nous avons les données suivantes :

Cellule à $h = 26$ cm au dessus du fond du trou

Diamètre du trou $D = 15$ cm,

Lors de la mesure on a obtenu :

Volume d'eau écoulée $V = 70 \text{ ml} = 70 \cdot 10^{-12} \text{ mm}^3$

Temps d'écoulement $T = 10 \text{ min}$

Ainsi nous avons :

Surface d'écoulement = S = surface latérale + surface du fond

$$\begin{aligned}
 &= (\pi \times h \times D) + \pi \frac{D^2}{4} \\
 &= (\pi \times 260 \times 150) + \pi \frac{150^2}{4} \\
 &= 140194 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

On a la formule suivante de calcul de la perméabilité :

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{V}{S \times T} \\
 &= \frac{70.10^{-12} \times 60}{10 \times 140194}
 \end{aligned}$$

$$K = 2.996 \text{ mm/h} \quad \text{ou} \quad K = 8.32 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$$

Pour pouvoir évaluer correctement cette perméabilité, plusieurs mesures ont été effectuées sur le terrain. C'est ainsi qu'un maillage a été effectué sur tout le champ pour avoir des mesures en différents points. Ce travail a été effectué en collaboration avec un autre étudiant travaillant sur le site et le tableau suivant présente les résultats obtenus :

volume (mm ³)	durée (min)	durée (h)	Surface (mm ²)	Ksat (mm/h)
100000	22	0.37	88357	3.1
100000	7	0.12	88357	9.7
100000	9	0.15	88357	7.5
100000	13	0.22	88357	5.2
100000	36	0.60	88357	1.9
100000	50	0.83	88357	1.4
100000	15	0.25	88357	4.5
100000	9	0.15	88357	7.5
100000	25	0.42	88357	2.7
100000	15	0.25	88357	4.5
100000	10	0.17	88357	6.8
100000	12	0.20	88357	5.7
100000	25	0.42	88357	2.7

Tableau 6 : Résultats des mesures de perméabilité obtenus sur le terrain

En faisant la moyenne, on obtient : $K_{\text{sat}} = 4.87 \text{ mm/h} = 11.688 \text{ cm/j}$

III. 2. 3 Bilan hydrique

Il consiste à écrire l'équation traduisant l'égalité entre les sorties, les entrées et le contenu du système. Il est difficilement estimable en pratique.

L'évapotranspiration potentielle peut être définie comme étant la quantité d'eau transpirée par unité de temps par une végétation courte et verdoyante, recouvrant complètement le sol, de hauteur uniforme et qui ne manque jamais d'eau (Penman,1956). Elle est très difficile à estimer et dépend de la température, de l'humidité relative de l'air, de la luminosité et du déficit hydrique dans le sol.

Lors d'absence de végétation, on l'assimile à l'évaporation à partir du sol nu.

L'équation du bilan d'eau est :

$$I + P = ETP + In + R$$

I: Irrigation

P : précipitation

ETP : évapotranspiration

In : quantité d'eau infiltrée

R : réserve en eau du sol

Evaluation de la quantité d'eau apportée au sol par irrigation

Dans la zone d'étude, le propriétaire du champ utilise un groupe moto pompe dont le débit est de **930 l/min**.

Ce groupe est utilisé pendant environ 6h de façon hebdomadaire.

Le champ où sont implantés les ouvrages a une aire de 0.5 ha soit 5000m².

Ces données nous permettent d'évaluer les apports à :

$$\begin{aligned} \text{Apport} &= 930 \times 6 \times 60 \\ &= 334,8 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

qui sont répartis sur le champ.

Du fait que le logiciel considère ces apports comme des précipitations, on peut estimer la lame d'eau à :

$$P = \frac{\text{Apport d'eau}}{\text{aire}} = \frac{334,8}{5000}$$

$$P = 6,7 \text{ cm}$$

Evaluation de l'évapotranspiration

Dans le cas de notre étude, l'ETP n'a pas été mesurée sur le terrain. Cependant, nous avons utilisé les valeurs d'ETP mesurées sur un champ d'oignon localisé dans la moyenne vallée qui présente les mêmes caractéristiques climatiques que le Delta. Ainsi nous avons une ETP totale, pour tout le cycle de développement de l'oignon égale à 120 jours, de 428 mm (Diaw et al., 2003).

$$\text{Ce qui nous donne une } ETP_{\text{moy}} = \frac{428}{120}$$

$$\text{Soit } ETP_{\text{moy}} = 3.56 \text{ mm par jour}$$

Cette estimation reste cependant très imprécise.

L'étude a été faite en période de saison sèche donc, il n'y a pas eu de précipitations.

La réserve en eau est traduite par la teneur en eau du sol.

Lorsque la quantité d'eau fournie par les précipitations et l'irrigation dépasse la capacité au champ, cette eau s'infiltre vers la nappe, donc se traduit par un relèvement de celui-ci qui dépend des volumes apportés.

Toutes ces données obtenues en plus de la piézométrie nous permettent de caler le modèle.

III. 3 Calage du modèle

Le logiciel se présente sous forme de fenêtre avec des boîtes de dialogue successives en pre-processing.

La fenêtre de travail se présente sous deux colonnes représentant les éléments d'entrée en pre-processing qui nous permettent de caler le modèle et les paramètres de sortie qui donnent les résultats.

L'objectif de ce travail est de modéliser l'écoulement dans la zone saturée ou non saturée.

Pour la géométrie de la colonne étudiée, nous considérons les couches de sol obtenues avec la granulométrie en faisant la modélisation sur une épaisseur de **1,5 m** de sol constitué de 4 types de sol cités au tableau 5.

La durée de la modélisation est de **146 jours** avec des conditions variables en fonction du temps. Les données sont enregistrées pour seulement **132 jours**. Ces durées sont fonction des résultats de la piézométrie.

Selon que l'on considère une porosité simple constituée par les macro pores ou une double porosité avec en plus la porosité intra granulaire, nous disposons de plusieurs modèles de calcul de la conductivité hydraulique. Ces modèles prennent parfois en compte l'hystérèse.

Le modèle utilisé dans notre cas est celui de Van Genuchten-Mualem

Une partie essentielle de la modélisation consiste à donner les paramètres hydrauliques du sol utilisés dans le modèle de Van Genuchten et parmi lesquels nous avons les fonctions de transfert étudiées plus haut.

Les valeurs de Θ_r et n peuvent être calculées à partir des formules spécifiées ci haut et des pourcentages donnés par l'analyse granulométrique. Cependant les autres paramètres faisant intervenir la masse volumique du sol, qui n'est pas une donnée disponible, seront fournis par HYDRUS en fonction du type de sol. Ceci est possible grâce à un petit logiciel qui lui est intégré.

Le paramètre le plus important demeure la conductivité hydraulique. Elle est prise pour toutes les couches comme étant la valeur de K_{sat} moyen déterminée plus haut.

$$K_{sat} = 4,87 \text{ mm / h} = 11,688 \text{ cm / j}$$

Les conditions aux limites sont données pour le haut et la base de la colonne de sol. Celles-ci sont données sur le flux ou la charge et peuvent être variables ou constantes. La condition initiale est donnée sur la teneur en eau ou la charge hydraulique. Ce dernier est utilisé pour notre modélisation, et ainsi pour la face supérieure de la couche de sol, nous avons les conditions atmosphériques à la surface ; la charge à la partie inférieure est variable du fait des fluctuations de la nappe.

Une étape importante de la modélisation consiste à mettre certains éléments constituant le bilan hydrique à savoir l'évapotranspiration et la lame d'eau d'irrigation. Pour l'évaporation pendant les périodes de jachère, elle est calculée à partir des valeurs moyennes entre 1986 et

2003. Ainsi on a pour le mois de décembre (avant culture) l'évaporation qui est égale à 2,65mm et en mai (après récolte) à 1,82mm.

La charge au niveau du bas de la couche de sol est donnée par la piézométrie. Elle est égale à la différence entre la hauteur de sol et le niveau de la nappe et est fournie en annexes 1, 2 et 3.

Le premier arrosage correspond au début des cultures qui est le 02 janvier, après cette date, les jours d'arrosage sont estimées en fonction des variations des piézomètres, car on a remarqué sur le terrain que le niveau de la nappe remontait ces jours. La récolte s'est faite dans la période du 14 avril.

Une interface graphique présentant l'épaisseur de la couche de sol nous permet de spécifier les deux points de mesure situés aux profondeurs des tensiomètres et la superposition des différentes couches. Les valeurs de pression initiale en chaque point de la couche de sol sont données par rapport à la piézométrie de la première journée de mesure. Ainsi, avec une distribution considérée hydrostatique avec une valeur nulle au niveau de la nappe, nous avons :

	Pression a la surface du sol (cm)	Pression au niveau de la nappe	Pression à la base (cm)
Station1	-85	0	65
Station 2	-95	0	55
Station 3	-99	0	51

Tableau 7 : conditions initiales

Toutes ces boites de dialogue nous ont permis de caractériser le système dans le but de la modélisation. Un bon calage des paramètres d'itération contribue à une meilleure convergence. Il faudrait maintenant exécuter le logiciel pour obtenir les résultats donnés en post-processing après la convergence.



III. 4 Résultats obtenus en post processing

On obtient des informations sur les paramètres qui sont définis ci-après :

III. 4.1 Potentiel de pression en fonction du temps

C'est le travail nécessaire pour déplacer de manière réversible une unité de quantité d'eau de l'état de référence jusqu'à la pression de l'eau dans le volume de sol considéré. Il est directement mesurable à l'aide d'un tensiomètre.

Il est le résultat des forces de capillarité et d'adsorption entre l'eau et la matrice solide. L'état de pression dans le sol peut être très différent selon que l'on ait affaire à un sol saturé, ou non saturé. Ce constat amène à faire la distinction de deux types de potentiel de pression : potentiel de pression hydrostatique (positif) et potentiel de pression capillaire (négatif). C'est ce paramètre (potentiel) qui nous intéresse le plus dans notre modélisation car, il nous permet de nous prononcer sur la concordance entre les courbes de pression fournies par le modèle et celles obtenues par les données du terrain.

Le potentiel de pression est donné suivant le temps (durée de l'étude) et pour une profondeur donnée.

Ainsi pour les points de mesures spécifiés sur le calage, les variations du potentiel sont données.

III. 4.2 Teneur en eau

Elle est exprimée comme étant le rapport sans dimension de la masse d'eau à la masse de sol sec ou du volume d'eau au volume total de sol. Ces rapports sont habituellement multipliés par 100 et présentés en pourcentage massique ou volumique.

La mesure de la teneur en eau est une information indispensable pour la compréhension chimique, mécanique et hydrologique des sols ainsi que l'effet sur la croissance des plantes. Il existe plusieurs méthodes directes ou indirectes pour la mesure.

Dans le post processing, la teneur en eau est donnée en fonction du temps (t) et en fonction de la profondeur de la colonne de sol.

III. 4. 3 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est le rapport du flux au gradient hydraulique ou la pente de la courbe du flux en fonction du gradient. C'est une manifestation de l'effet de résistance à l'écoulement dû aux forces de frottement.

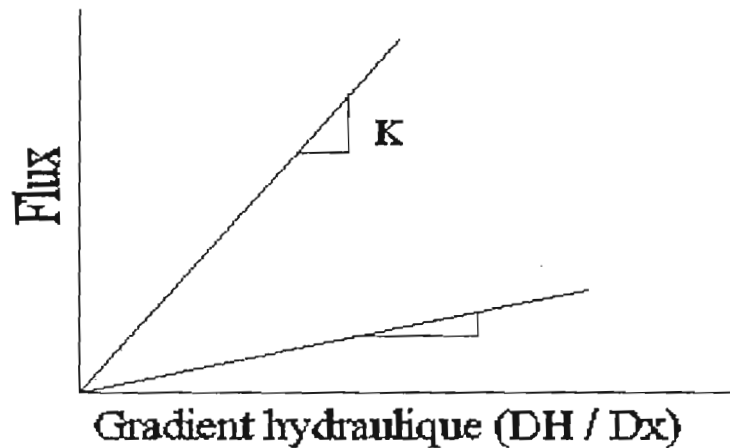


Fig. 13 : Représentation de la conductivité hydraulique

Elle est donnée en fonction du temps (t) et en fonction de la profondeur du colonne de sol (z).

III. 4. 4 Flux d'eau

C'est le volume d'eau traversant une section unitaire normale à la section d'écoulement par unité de temps.

III. 4. 5. Les propriétés hydrauliques du sol

a) La courbe de rétention $h(\theta)$

Quand un échantillon est initialement saturé par un fluide mouillant (eau), le processus par lequel le fluide saturant (eau) est déplacé doucement par le fluide non mouillant (air) est appelé drainage et la relation $h = f(\theta)$ qui définit la pression en fonction de la teneur en eau est appelée la courbe de drainage ou courbe de rétention de l'humidité du sol ou courbe caractéristique de l'humidité du sol (Childs, 1940). Elle est fortement influencée par la texture et la structure du sol.

b) La courbe de conductivité $K(h)$

La succion matricielle étant due à l'affinité physique de l'eau à la surface des particules du sol et aux faibles diamètres des pores capillaires, on remarque que quand un sol est saturé, tous les pores sont remplis d'eau et ont une conductivité hydraulique maximale. Quand le sol devient non saturé, une partie de l'espace poral se remplit d'air et la surface conductrice d'une section d'écoulement décroît de façon correspondante (la conductivité hydraulique diminue). Ces variations sont exprimées sur des courbes appelées courbes de conductivité

Ces deux types de courbes $h(\theta)$ et $K(h)$ sont toutes sujettes au phénomène d'hystérèse.

Il faut aussi préciser qu'il n'existe pas de modèles théoriques valables dans tous les cas qui puissent prédire le comportement de ces courbes. Seules des fonctionnelles plus ou moins empiriques sont utilisées.

III. 4. 6 Bilan de masse

Il traduit le bilan hydrique donc permet de vérifier l'équilibre entre les entrées et sorties d'eau. Il est traduit en pourcentage et permet d'avoir une idée de la validité de la modélisation.

Ainsi nous avons les résultats pour certains de ces paramètres pré cités, pour chaque station. En bleu nous avons les résultats pour le tensiomètre à 75 cm et en noir pour celui à 50 cm.

Station 1 :

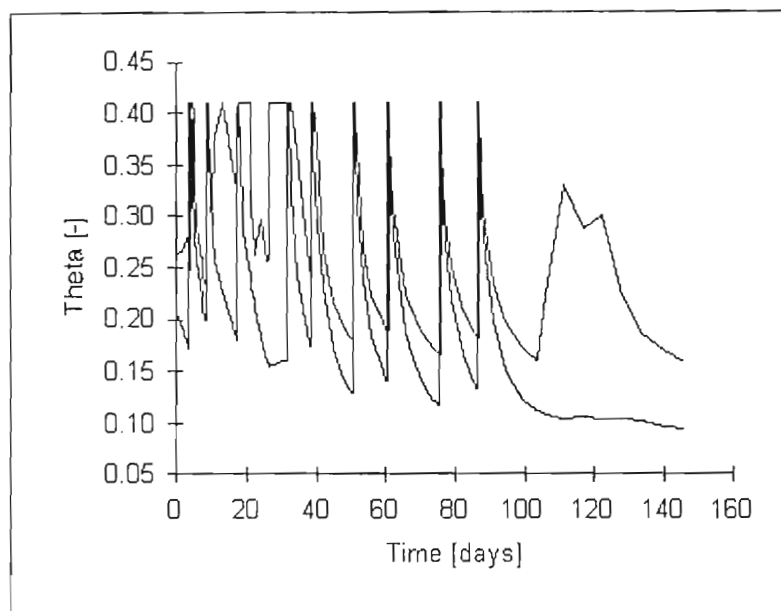


Fig. 14.a : Teneur en eau au cours du temps de la station 1

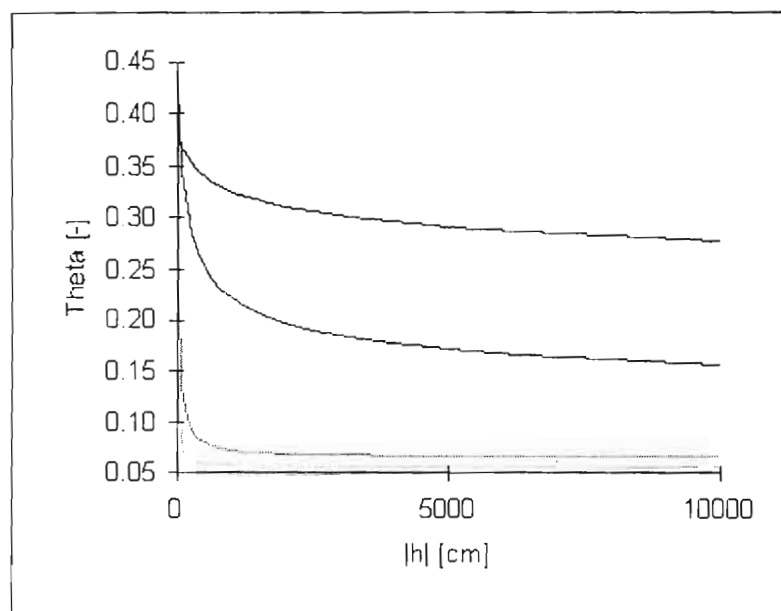


Fig. 14.b : courbe de rétention de la station 1

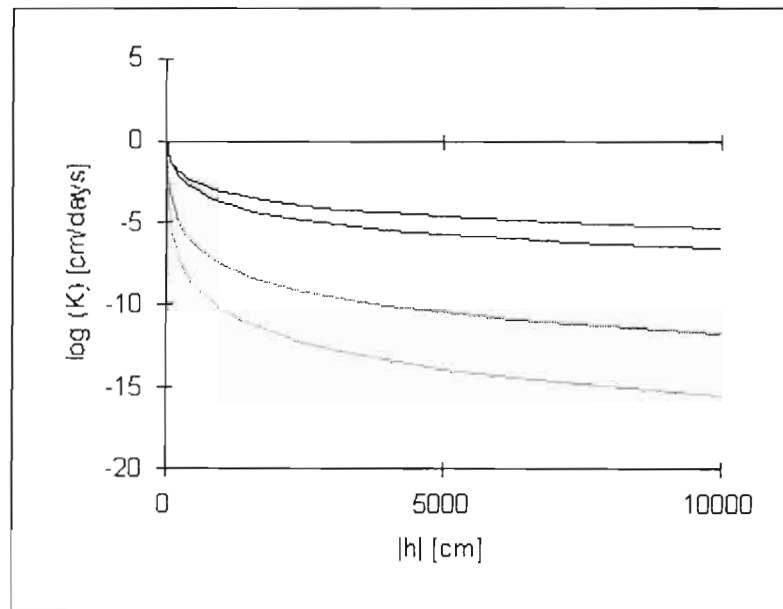


Fig.14.c : Conductivité en fonction de la profondeur de la station 1

Station 2 :

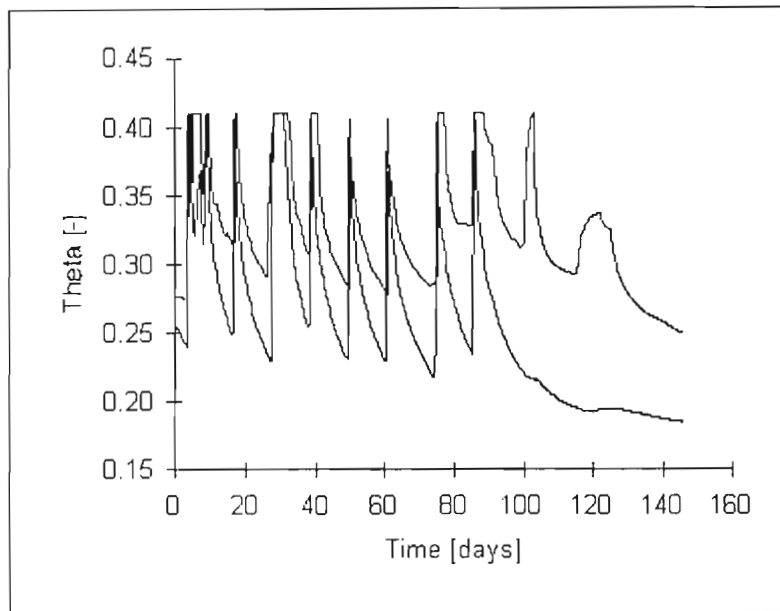


Fig.15.a : Teneur en eau au cours du temps de la station 2

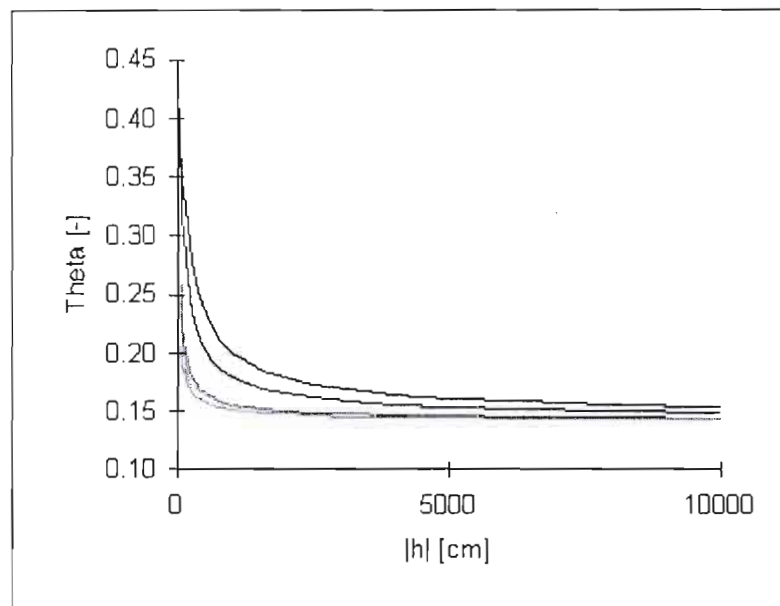


Fig. 15.b : courbe de rétention de la station 2

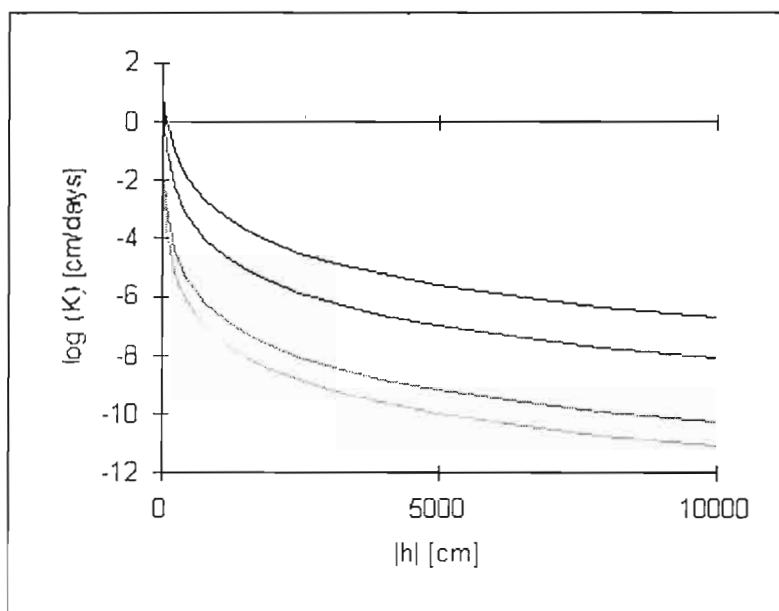


Fig.15.c : Courbe de conductivité de la station 2

Station 3

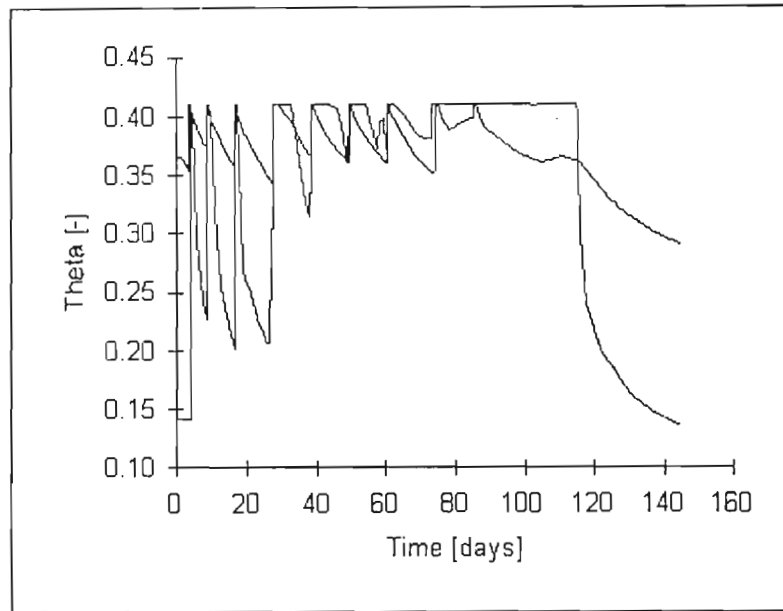


Fig.16.a : Teneur en eau au cours du temps de la station 3

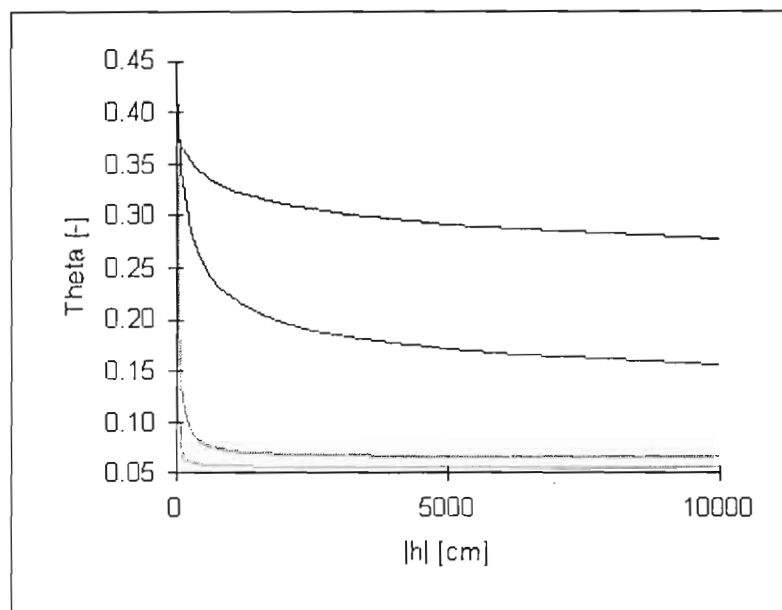


Fig.16.b : Courbe de rétention de la station 3

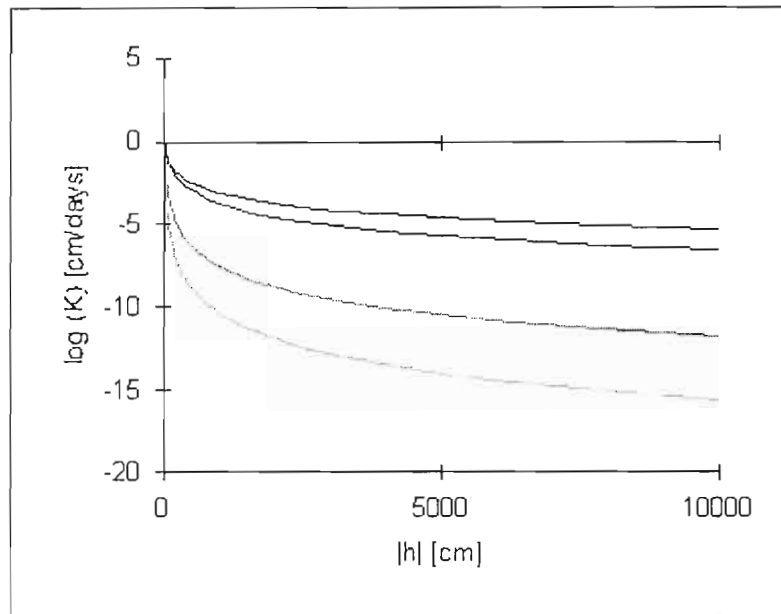


Fig.16. c : courbe de conductivité de la station 3

III. 5 Validation du modèle

Pour la validation du modèle, nous avons besoin des valeurs lues sur les tensiomètres pour chaque station. Ces valeurs sont comparées avec celles obtenues avec HYDRUS au point de mesure spécifié.

Pour les valeurs de pression au niveau des tensiomètres, on applique une correction comme cela a été expliqué précédemment.

La comparaison est effectuée en traçant sur un même graphique ces deux données, en prenant comme abscisse la durée. Il a été aussi tracé les positions de la nappe par rapport à la position du tensiomètre pour vérifier si le tensiomètre était dans la nappe. Ainsi nous avons pour chaque station les courbes ci-après ;

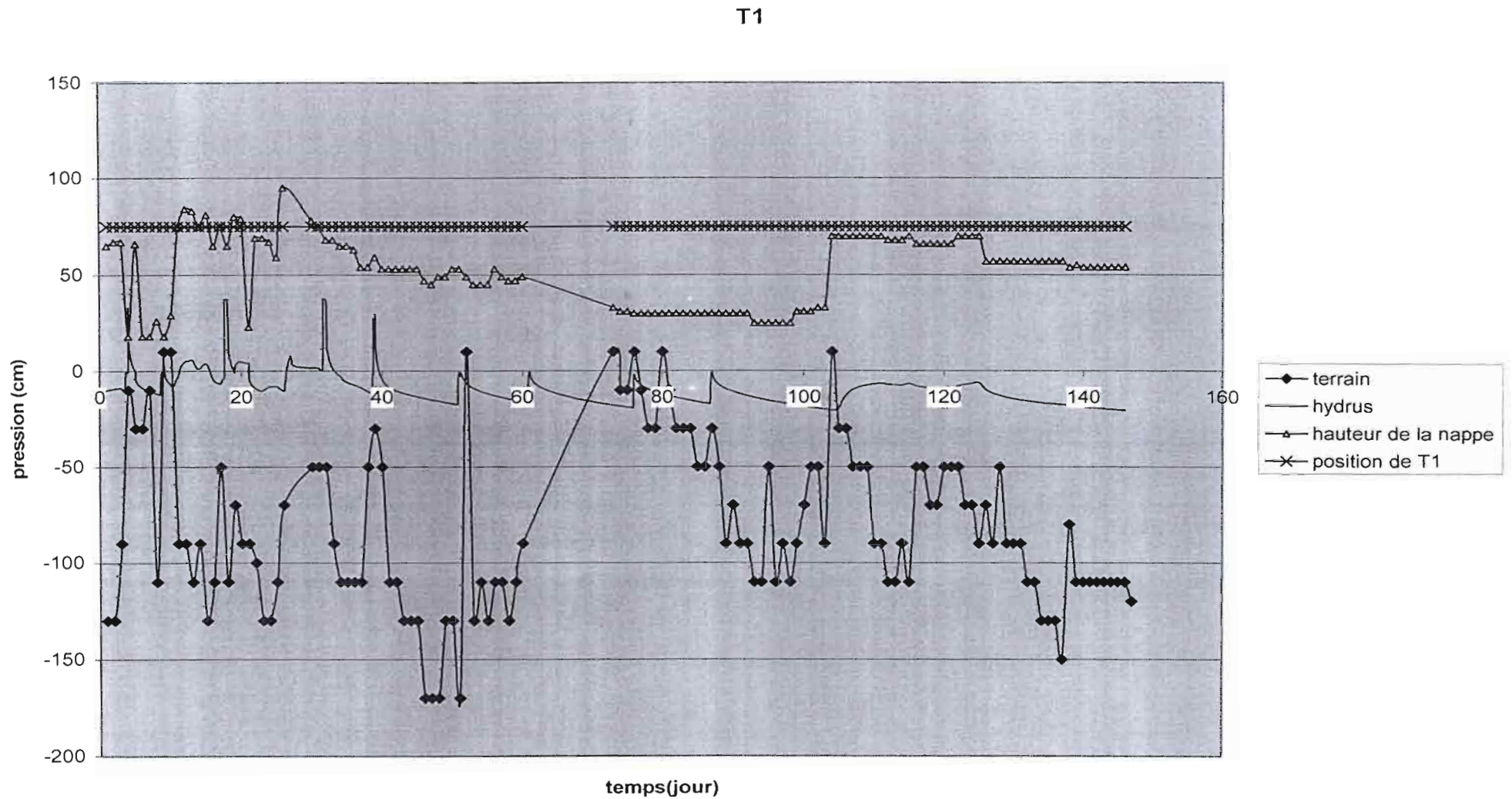


Fig 17 : **Station 1** Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T1 à 0.75 m

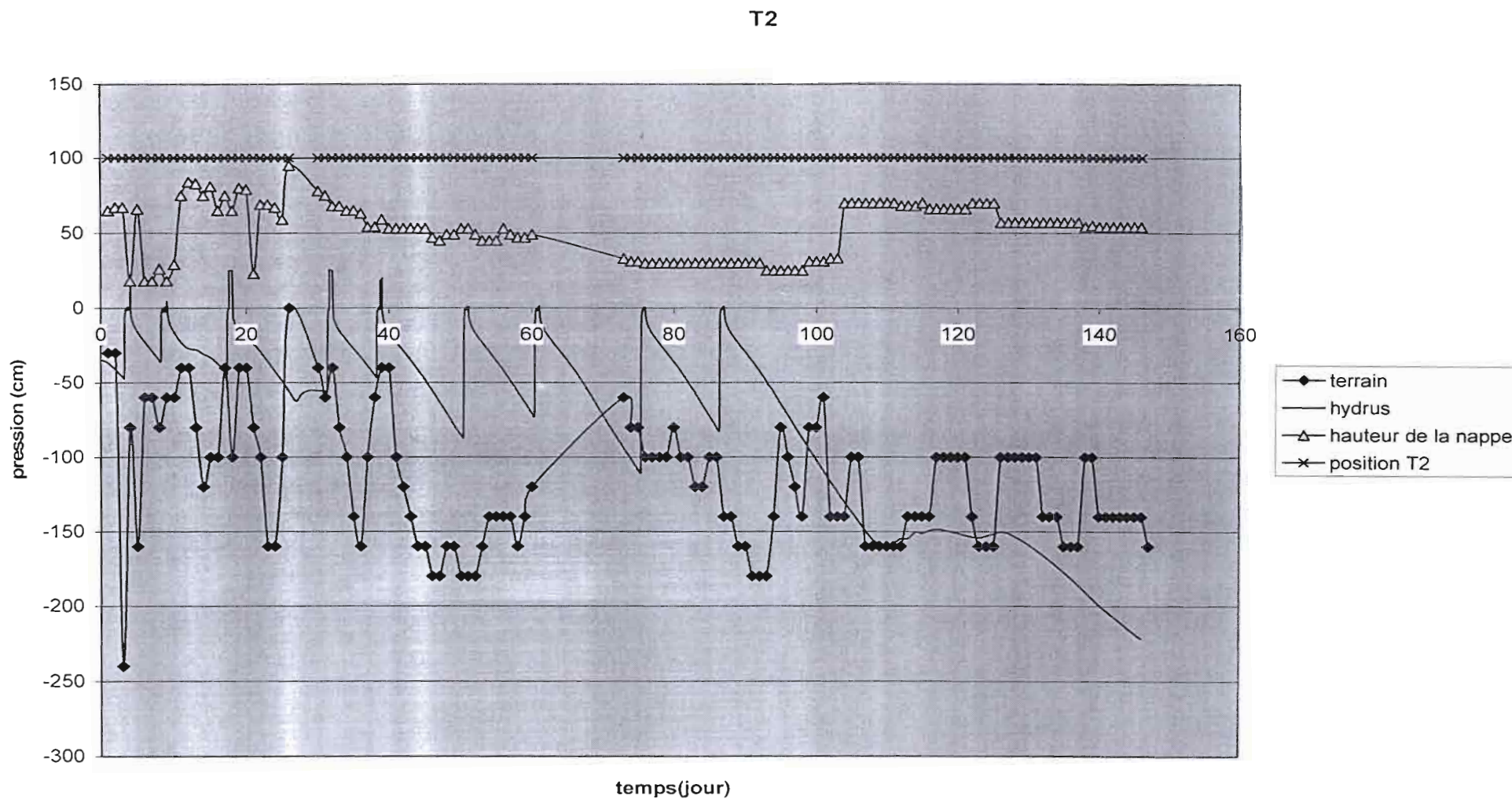


Fig 18 : Station 1 Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T2 à 0.5m

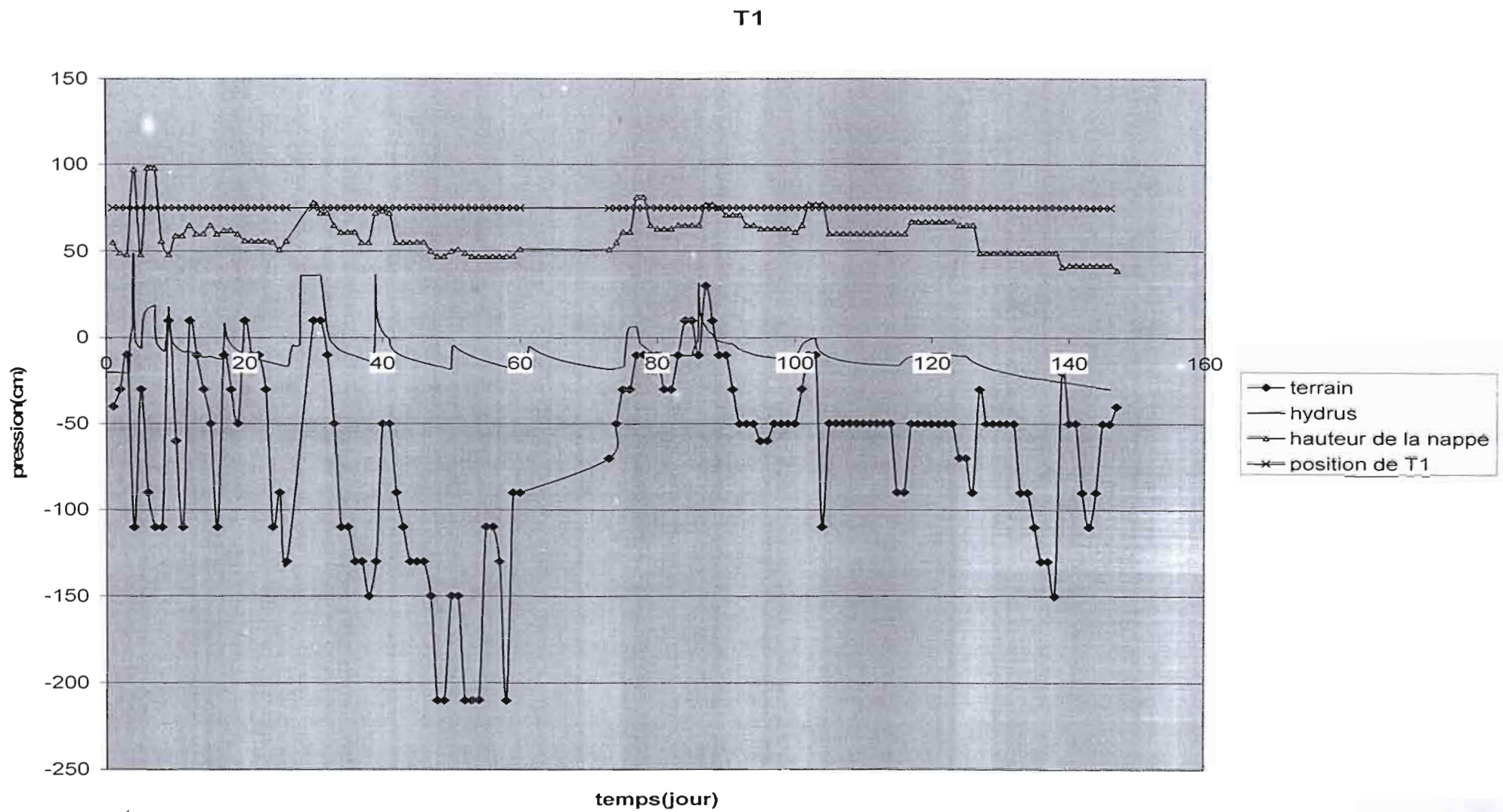


Fig 19 : Station 2 Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T1 à 0.75m

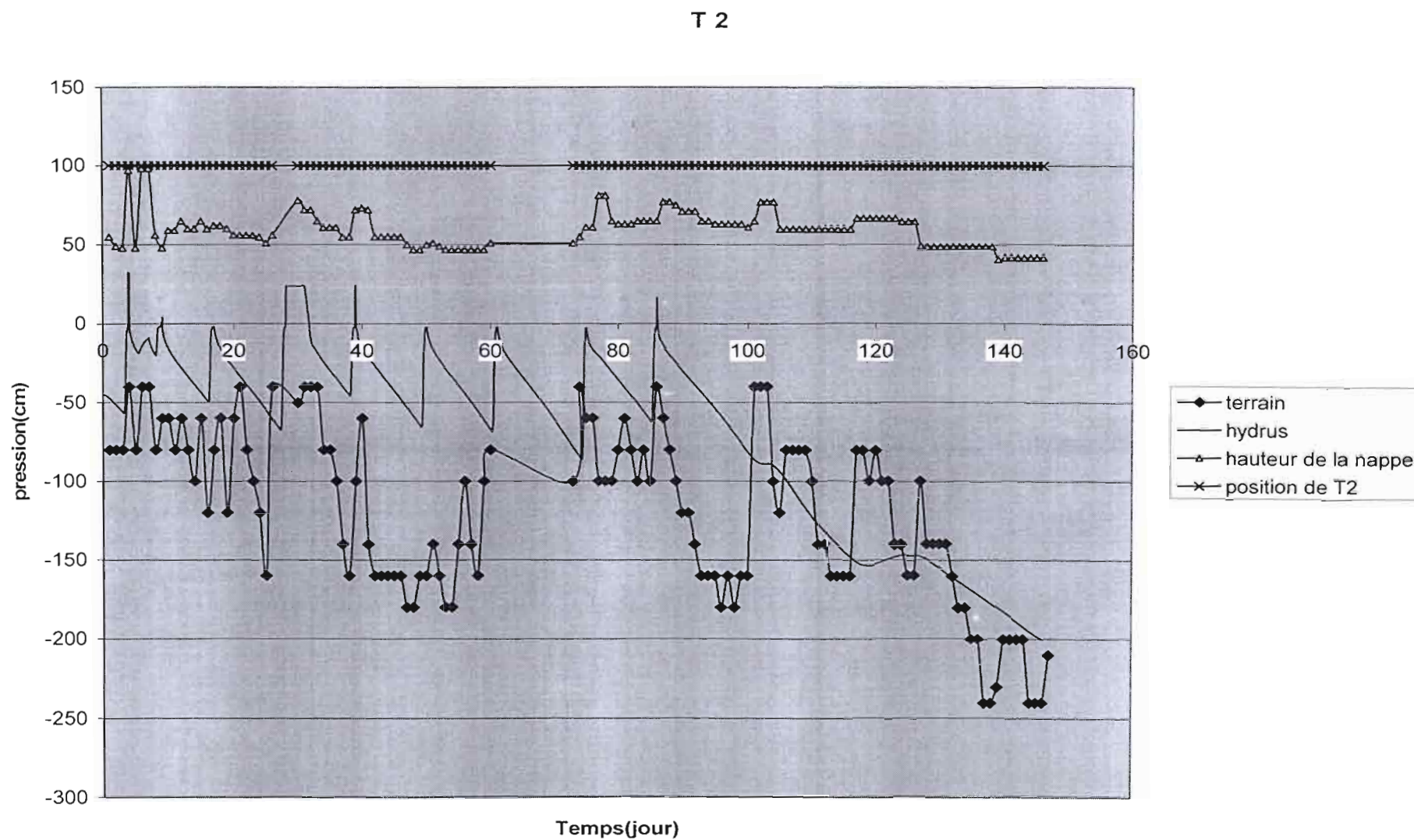


Fig 20 : **Station 2** : Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T2 à 0.5

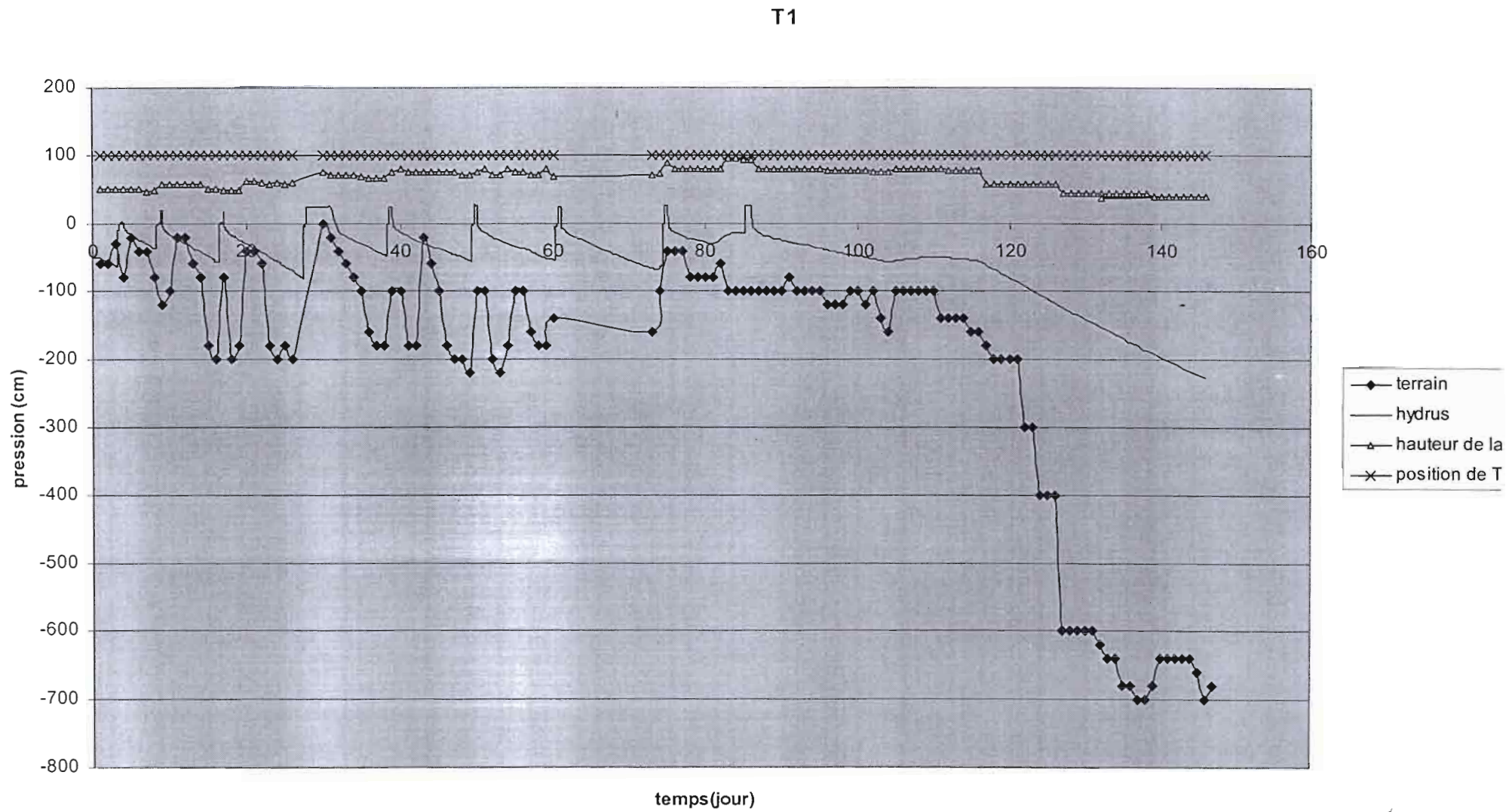


Fig. 21 : **Station 3** : Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T1 à 0.5m

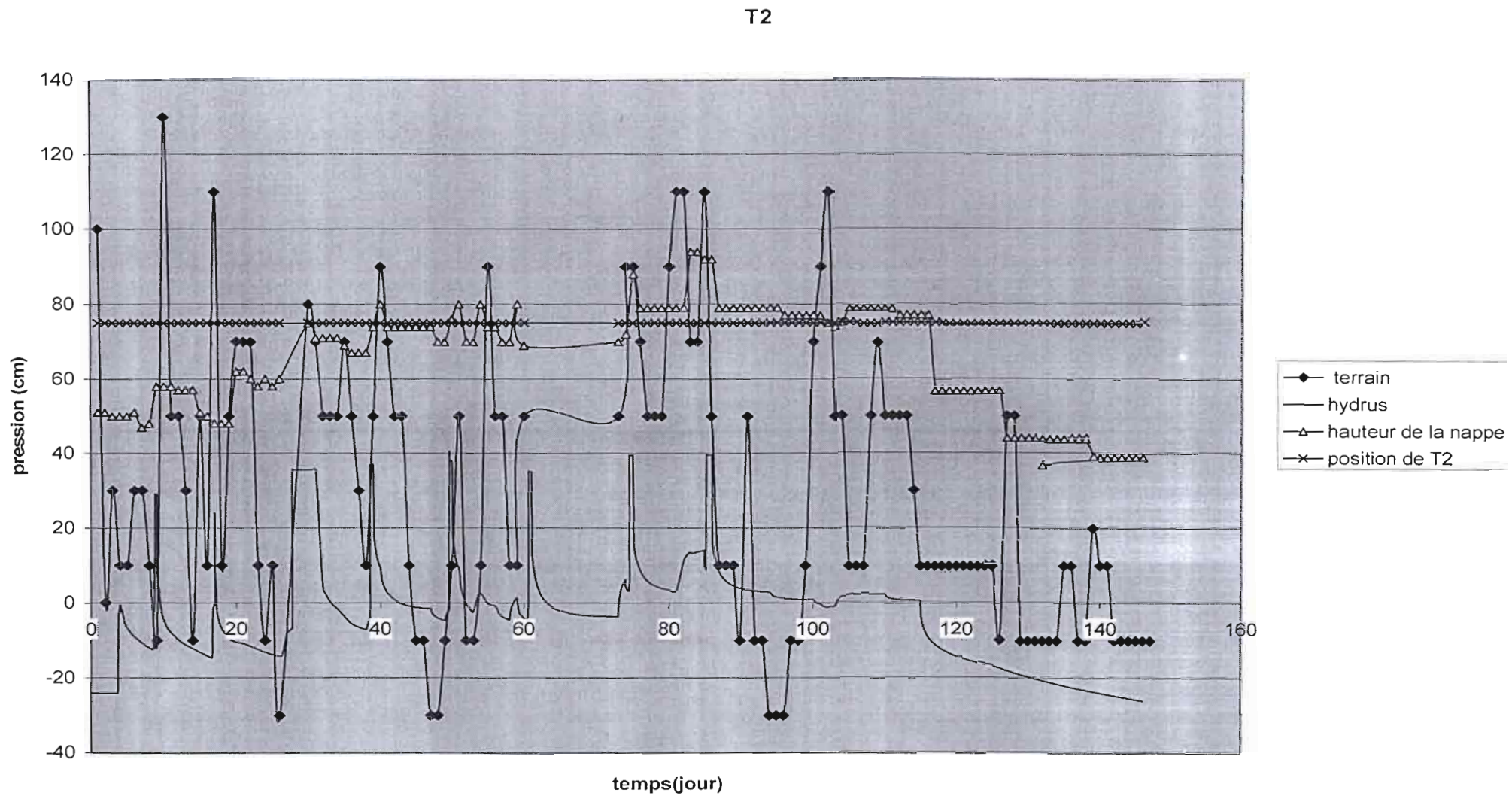


Fig. 22 : **Station 3** : Résultats de la modélisation comparés aux données du terrain au niveau du tensiomètre T2 à 0.75m

Commentaires

On constate que d'une manière générale la succion est plus importante au niveau des données du terrain comparées avec les valeurs obtenues sur Hydrus. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'hypothèse que tout le volume d'eau d'irrigation est équitablement sur le terrain n'est pas toujours vérifiée. De plus, la durée de pompage estimée à environ 6h d'après l'opérateur est variable, ce qui peut influencer sur les quantités d'eau apportées au terrain. En plus de cela, l'évapotranspiration n'a pas été estimée d'une manière exacte.

Cependant, l'allure des 2 courbes est approximativement identique même si un décalage est observé entre ces courbes.

Pour les tensiomètres placés à 0.5m, on note une meilleure adéquation entre les deux courbes (Hydrus et terrain), ce qui peut s'expliquer par le phénomène spécifié précédemment. Et on note généralement que les pressions sont presque toutes négatives, chose qui est tout à fait normale étant donné que ces tensiomètres se trouvent dans la zone non saturée et que la nappe n'atteint jamais le niveau 0.5m par rapport au sol.

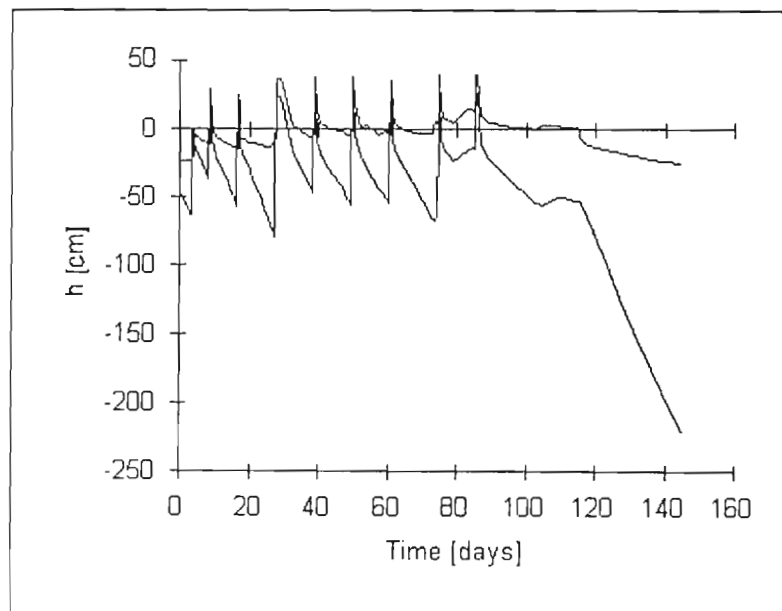
Pour les tensiomètres placés à 0.75m, l'adéquation entre les courbes est moins bonne, mais on note que certaines pressions sont positives et cela se voit sur la courbe du niveau de la nappe par rapport à la position du tensiomètre. En effet, la nappe dépasse de temps en temps le tensiomètre qui mesure ainsi des pressions en zone saturée donc positives.

Amélioration des volumes d'irrigation

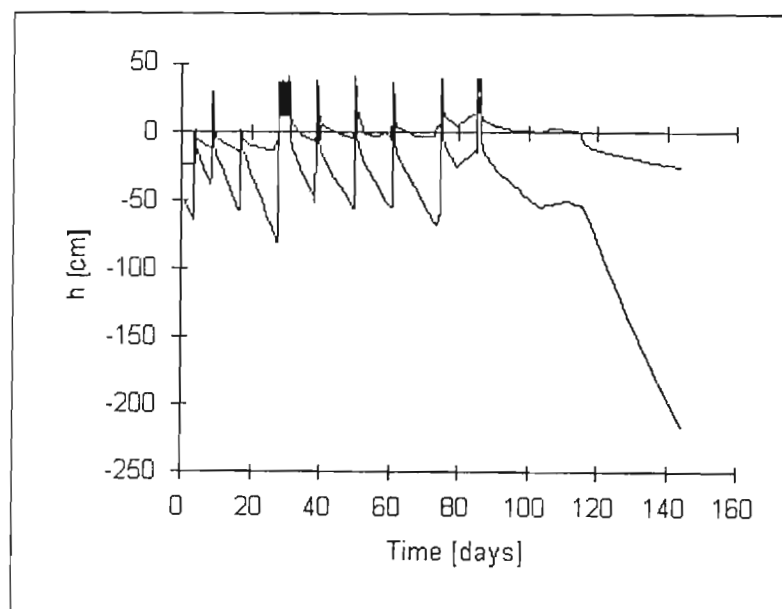
Afin d'optimiser la quantité d'irrigation, nous avons fait la modélisation en divisant la hauteur d'irrigation par deux c'est-à-dire avec 3,35 mm.

Ainsi nous avons les pressions pour les deux types d'arrosage et pour chaque station.

Station 3



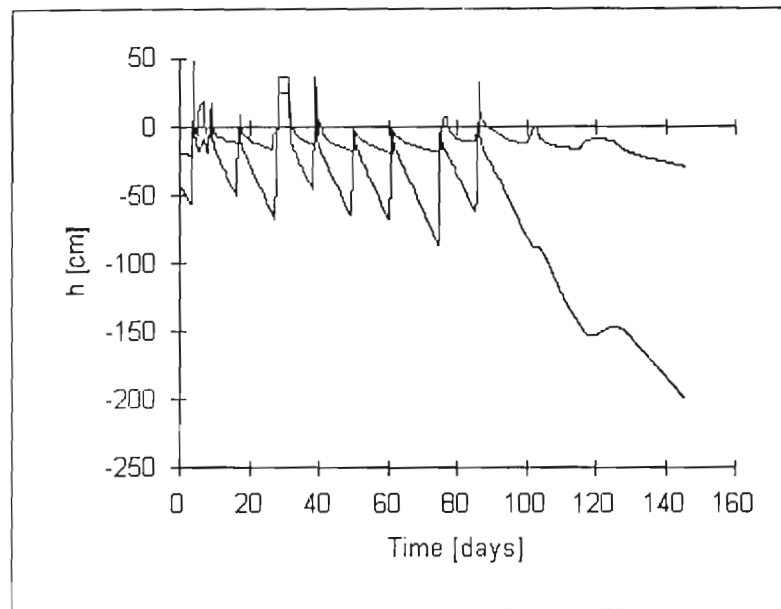
Irrigation = 6,7 cm



Irrigation = $I / 2 = 3,35\text{cm}$

Fig.23 : potentiel de pression à la station 3

Station 2



Irrigation = 6,7 cm

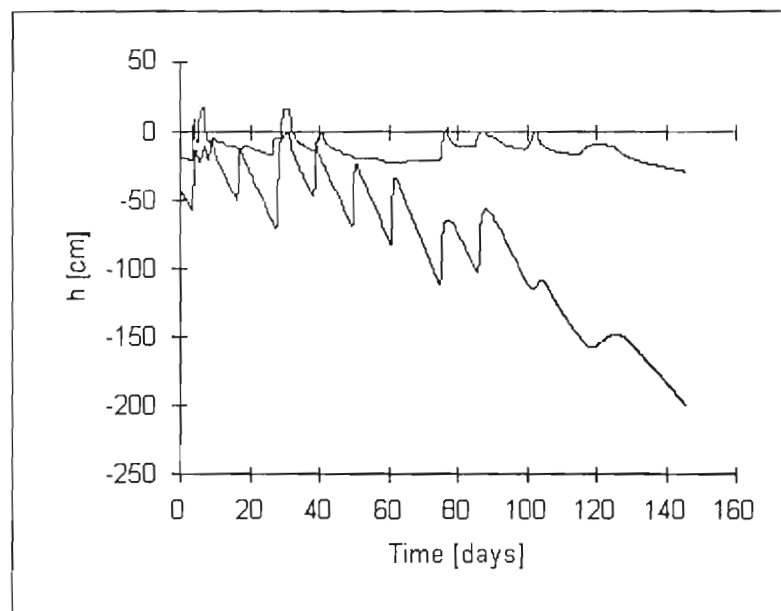
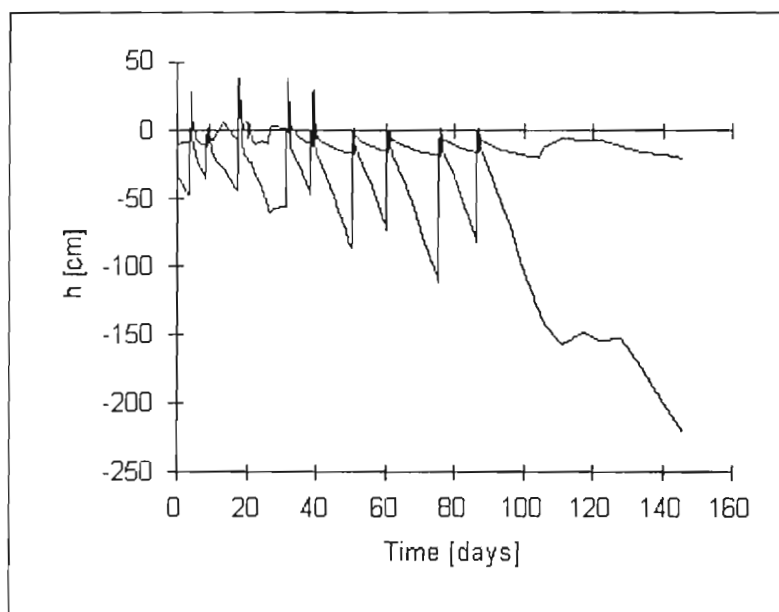
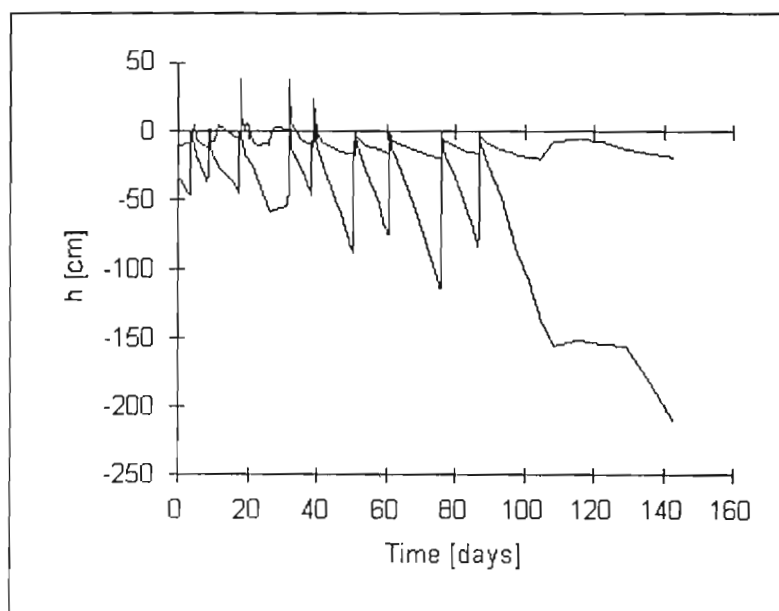
Irrigation = $I / 2 = 3,35$ cm

Fig.24 : potentiel de pression à la station 2

Station 1



Irrigation = 6,7 cm



Irrigation = $I / 2 = 3,35$ cm

Fig.25 : pression à la station 1

On obtient pratiquement les mêmes courbes de potentiel de pression dans la zone non saturée. Ce qui se traduit par des teneurs en eau similaires. Ce qui veut dire que le propriétaire du champ pourrait gagner en économisant sur le coût de pompage de l'eau d'irrigation.

Conclusion et Recommandations

L'étude de la nappe alluviale dans le Delta du fleuve Sénégal a permis d'avoir des informations importantes concernant sa composition chimique et son comportement (ses variations).

Nous avons dans un premier temps présenté la zone d'étude avec ses différentes caractéristiques (température, climat, hydrographie...) qui sont fondamentales et qui conditionnent les paramètres d'entrée du modèle. C'est une zone très favorable aux cultures avec la présence du fleuve Sénégal bien qu'elle est sujette à une nappe salée.

Dans un second temps, nous avons procédé à la présentation de la nappe alluviale du Delta. Ainsi, l'étude de la piézométrie nous a permis de voir que la nappe fluctue fortement avec des variations qui peuvent aller de 0.5m à 0.75m dans la cuvette de Savoigne. De même, l'hydrochimie de la nappe révèle qu'on est en présence d'une nappe très salée avec des valeurs de conductivité électrique qui peuvent atteindre 2290 $\mu\text{S} / \text{cm}$ et des pH variant entre 4.3 et 6.3 toujours dans la cuvette de Savoigne.

Enfin, l'élaboration du modèle proprement dit a été traitée dans la dernière partie. Ainsi, après avoir présenté le logiciel, nous avons essayé tant soit peu de bien caler le modèle avec les paramètres d'entrée. Le sol est essentiellement constitué de sable et d'argile avec une perméabilité moyenne de 11.688 cm/j. Une hauteur d'eau d'irrigation d'environ 6.7 mm par semaine a été considérée avec une évapotranspiration moyenne de 3.56 mm. Ce qui nous a permis d'obtenir des résultats satisfaisants. En effet, les résultats obtenus avec le modèle sont en moyenne en concordance avec résultats du terrain avec quelques incohérences notées. Ce qui peut être dû à une évaluation pas très exacte ou approximative de certains paramètres tels que le bilan hydrique.

Bien que nous ayons obtenus des résultats probants, nous ne pouvons pas nous passer de formuler ces quelques recommandations.

- La nappe se situant à faible profondeur, il serait bon de mettre sur place un système de drainage performant pour une bonne irrigation qui permettrait d'évacuer les sels hors des surfaces cultivables en même temps qu'un système de drainage souterrain efficace qui permet le rabattement de la nappe hors de la zone racinaire.
- L'utilisation d'un appareil permettant d'évaluer correctement de façon quotidienne l'évaporation serait un plus pour l'élaboration du modèle (bac évaporatoire, évaporation Piche...)

- En simulant un arrosage sur deux ou en simulant chaque arrosage avec la moitié du volume d'eau utilisée, les entrepreneurs agricoles gagneraient à optimiser le débit d'irrigation
- Ainsi, il serait bon que le programme d'optimisation par les méthodes de recherche opérationnelle qui constitue la dernière phase de ce projet soit mis sur place.

Station 1

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
30/12/2005	1.30	18	3	0.85	0.00	65	-155	-30
31/12/2005	1.28	18	3	0.83	0.00	67	-155	-30
01/01/2006	1.28	14	24	0.83	0.00	67	-115	-240
02/01/2006	1.77	6	8	1.32	6.70	18	-35	-80
03/01/2006	1.29	8	16	0.84	0.00	66	-55	-160
04/01/2006	1.77	8	6	1.32	0.00	18	-55	-60
05/01/2006	1.77	6	6	1.32	0.00	18	-35	-60
06/01/2006	1.69	16	8	1.24	0.00	26	-135	-80
07/01/2006	1.77	4	6	1.32	6.70	18	-15	-60
08/01/2006	1.66	4	6	1.21	0.00	29	-15	-60
09/01/2006	1.2	14	4	0.75	0.00	75	-115	-40
10/01/2006	1.11	14	4	0.66	0.00	84	-115	-40
11/01/2006	1.12	16	8	0.67	0.00	83	-135	-80
12/01/2006	1.2	14	12	0.75	0.00	75	-115	-120
13/01/2006	1.14	18	10	0.69	0.00	81	-155	-100
14/01/2006	1.3	16	10	0.85	0.00	65	-135	-100
15/01/2006	1.2	10	4	0.75	6.70	75	-75	-40
16/01/2006	1.3	16	10	0.85	0.00	65	-135	-100
17/01/2006	1.15	12	4	0.70	0.00	80	-95	-40
18/01/2006	1.16	14	4	0.71	0.00	79	-115	-40
19/01/2006	1.72	14	8	1.27	0.00	23	-115	-80
20/01/2006	1.26	15	10	0.81	0.00	69	-125	-100
21/01/2006	1.26	18	16	0.81	0.00	69	-155	-160
22/01/2006	1.28	18	16	0.83	0.00	67	-155	-160
23/01/2006	1.36	16	10	0.91	0.00	59	-135	-100
24/01/2006	1	12	0	0.55	0.00	95	-95	0
25/01/2006	1.17	10	4	0.72	0.00	78	-75	-40
29/01/2006	1.2	10	6	0.75	6.70	75	-75	-60
30/01/2006	1.27	10	4	0.82	0.00	68	-75	-40

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
31/01/2006	1.27	14	8	0.82	0.00	68	-115	-80
01/02/2006	1.3	16	10	0.85	0.00	65	-135	-100
02/02/2006	1.3	16	14	0.85	0.00	65	-135	-140
03/02/2006	1.32	16	16	0.87	0.00	63	-135	-160
04/02/2006	1.41	16	10	0.96	0.00	54	-135	-100
05/02/2006	1.41	10	6	0.96	0.00	54	-75	-60
06/02/2006	1.36	8	4	0.91	6.70	59	-55	-40
07/02/2006	1.42	10	4	0.97	0.00	53	-75	-40
08/02/2006	1.42	16	10	0.97	0.00	53	-135	-100
09/02/2006	1.42	16	12	0.97	0.00	53	-135	-120
10/02/2006	1.42	18	14	0.97	0.00	53	-155	-140
11/02/2006	1.42	18	16	0.97	0.00	53	-155	-160
12/02/2006	1.42	18	16	0.97	0.00	53	-155	-160
13/02/2006	1.48	22	18	1.03	0.00	47	-195	-180
14/02/2006	1.5	22	18	1.05	0.00	45	-195	-180
15/02/2006	1.46	22	16	1.01	0.00	49	-195	-160
16/02/2006	1.46	18	16	1.01	0.00	49	-155	-160
17/02/2006	1.42	18	18	0.97	6.70	53	-155	-180
18/02/2006	1.42	22	18	0.97	0.00	53	-195	-180
19/02/2006	1.46	4	18	1.01	0.00	49	-15	-180
20/02/2006	1.5	18	16	1.05	0.00	45	-155	-160
21/02/2006	1.5	16	14	1.05	0.00	45	-135	-140
22/02/2006	1.5	18	14	1.05	0.00	45	-155	-140
23/02/2006	1.42	16	14	0.97	0.00	53	-135	-140
24/02/2006	1.46	16	14	1.01	0.00	49	-135	-140
25/02/2006	1.48	18	16	1.03	0.00	47	-155	-160
26/02/2006	1.48	16	14	1.03	0.00	47	-135	-140
27/02/2006	1.46	14	12	1.01	0.00	49	-115	-120
28/02/2006	1.62	4	6	1.17	6.70	33	-15	-60
12/03/2006	1.64	6	8	1.19	0.00	31	-35	-80
13/03/2006	1.64	6	8	1.19	0.00	31	-35	-80

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
14/03/2006	1.65	4	10	1.20	6.70	30	-15	-100
15/03/2006	1.65	6	10	1.20	0.00	30	-35	-100
16/03/2006	1.65	8	10	1.20	0.00	30	-55	-100
17/03/2006	1.65	8	10	1.20	0.00	30	-55	-100
18/03/2006	1.65	4	8	1.20	0.00	30	-15	-80
19/03/2006	1.65	6	10	1.20	0.00	30	-35	-100
20/03/2006	1.65	8	10	1.20	0.00	30	-55	-100
21/03/2006	1.65	8	12	1.20	0.00	30	-55	-120
22/03/2006	1.65	8	12	1.20	0.00	30	-55	-120
23/03/2006	1.65	10	10	1.20	0.00	30	-75	-100
24/03/2006	1.65	10	10	1.20	0.00	30	-75	-100
25/03/2006	1.65	8	14	1.20	6.70	30	-55	-140
26/03/2006	1.65	10	14	1.20	0.00	30	-75	-140
27/03/2006	1.65	14	16	1.20	0.00	30	-115	-160
28/03/2006	1.65	12	16	1.20	0.00	30	-95	-160
29/03/2006	1.65	14	18	1.20	0.00	30	-115	-180
30/03/2006	1.65	14	18	1.20	0.00	30	-115	-180
31/03/2006	1.7	16	18	1.25	0.00	25	-135	-180
01/04/2006	1.7	16	14	1.25	0.00	25	-135	-140
02/04/2006	1.7	10	8	1.25	0.00	25	-75	-80
03/04/2006	1.7	16	10	1.25	0.00	25	-135	-100
04/04/2006	1.7	14	12	1.25	0.00	25	-115	-120
05/04/2006	1.7	16	14	1.25	0.00	25	-135	-140
06/04/2006	1.64	14	8	1.19	0.00	31	-115	-80
07/04/2006	1.64	12	8	1.19	0.00	31	-95	-80
08/04/2006	1.64	10	6	1.19	0.00	31	-75	-60
09/04/2006	1.62	10	14	1.17	0.00	33	-75	-140
10/04/2006	1.62	14	14	1.17	0.00	33	-115	-140
11/04/2006	1.25	4	14	0.80	0.00	70	-15	-140
12/04/2006	1.25	8	10	0.80	0.00	70	-55	-100
13/04/2006	1.25	8	10	0.80	0.00	70	-55	-100
14/04/2006	1.25	10	16	0.80	0.00	70	-75	-160

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
15/04/2006	1.25	10	16	0.80	0.00	70	-75	-160
16/04/2006	1.25	10	16	0.80	0.00	70	-75	-160
17/04/2006	1.25	14	16	0.80	0.00	70	-115	-160
18/04/2006	1.25	14	16	0.80	0.00	70	-115	-160
19/04/2006	1.27	16	16	0.82	0.00	68	-135	-160
20/04/2006	1.27	16	14	0.82	0.00	68	-135	-140
21/04/2006	1.27	14	14	0.82	0.00	68	-115	-140
22/04/2006	1.25	16	14	0.80	0.00	70	-135	-140
23/04/2006	1.29	10	14	0.84	0.00	66	-75	-140
24/04/2006	1.29	10	10	0.84	0.00	66	-75	-100
25/04/2006	1.29	12	10	0.84	0.00	66	-95	-100
26/04/2006	1.29	12	10	0.84	0.00	66	-95	-100
27/04/2006	1.29	10	10	0.84	0.00	66	-75	-100
28/04/2006	1.29	10	10	0.84	0.00	66	-75	-100
29/04/2006	1.25	10	14	0.80	0.00	70	-75	-140
30/04/2006	1.25	12	16	0.80	0.00	70	-95	-160
01/05/2006	1.25	12	16	0.80	0.00	70	-95	-160
02/05/2006	1.25	14	16	0.80	0.00	70	-115	-160
03/05/2006	1.38	12	10	0.93	0.00	57	-95	-100
04/05/2006	1.38	14	10	0.93	0.00	57	-115	-100
05/05/2006	1.38	10	10	0.93	0.00	57	-75	-100
06/05/2006	1.38	14	10	0.93	0.00	57	-115	-100
07/05/2006	1.38	14	10	0.93	0.00	57	-115	-100
08/05/2006	1.38	14	10	0.93	0.00	57	-115	-100
09/05/2006	1.38	16	14	0.93	0.00	57	-135	-140
10/05/2006	1.38	16	14	0.93	0.00	57	-135	-140
11/05/2006	1.38	18	14	0.93	0.00	57	-155	-140
12/05/2006	1.38	18	16	0.93	0.00	57	-155	-160
13/05/2006	1.38	18	16	0.93	0.00	57	-155	-160
14/05/2006	1.38	20	16	0.93	0.00	57	-175	-160
15/05/2006	1.41	13	10	0.96	0.00	54	-105	-100
16/05/2006	1.4	16	10	0.95	0.00	55	-135	-100

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
17/05/2006	1.41	16	14	0.96	0.00	54	-135	-140
18/05/2006	1.41	16	14	0.96	0.00	54	-135	-140
19/05/2006	1.41	16	14	0.96	0.00	54	-135	-140
20/05/2006	1.41	16	14	0.96	0.00	54	-135	-140
21/05/2006	1.41	16	14	0.96	0.00	54	-135	-140
22/05/2006	1.41	16	14	0.96	0.00	54	-135	-140
23/05/2006	1.41	16	14	0.96	0.00	54	-135	-140
24/05/2006	1.42	17	16	0.97	0.00	53	-145	-160

Annexe 1 : Données obtenues au terrain au niveau de la station 1

Station 2

Date	P2	T1	T2	niveau de la nappe en m	precipitation en cm	charge en cm	T1(75)	T2(50)
30/12/2005	1.7	9	8	0.95	0.00	55	-40	-80
31/12/2005	1.76	8	8	1.01	0.00	49	-30	-80
01/01/2006	1.77	6	8	1.02	0.00	48	-10	-80
02/01/2006	1.28	16	4	0.53	6.70	97	-110	-40
03/01/2006	1.77	8	8	1.02	0.00	48	-30	-80
04/01/2006	1.27	14	4	0.52	0.00	98	-90	-40
05/01/2006	1.27	16	4	0.52	0.00	98	-110	-40
06/01/2006	1.69	16	8	0.94	0.00	56	-110	-80
07/01/2006	1.77	4	6	1.02	6.70	48	10	-60
08/01/2006	1.66	11	6	0.91	0.00	59	-60	-60
09/01/2006	1.66	16	8	0.91	0.00	59	-110	-80
10/01/2006	1.6	4	6	0.85	0.00	65	10	-60
11/01/2006	1.65	6	8	0.9	0.00	60	-10	-80
12/01/2006	1.65	8	10	0.9	0.00	60	-30	-100
13/01/2006	1.6	10	6	0.85	0.00	65	-50	-60

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
14/01/2006	1.65	16	12	0.9	0.00	60	-110	-120
15/01/2006	1.63	6	8	0.88	6.70	62	-10	-80
16/01/2006	1.63	8	6	0.88	0.00	62	-30	-60
17/01/2006	1.65	10	12	0.9	0.00	60	-50	-120
18/01/2006	1.69	4	6	0.94	0.00	56	10	-60
19/01/2006	1.69	6	4	0.94	0.00	56	-10	-40
20/01/2006	1.69	6	8	0.94	0.00	56	-10	-80
21/01/2006	1.69	8	10	0.94	0.00	56	-30	-100
22/01/2006	1.7	16	12	0.95	0.00	55	-110	-120
23/01/2006	1.74	14	16	0.99	0.00	51	-90	-160
24/01/2006	1.69	18	4	0.94	0.00	56	-130	-40
25/01/2006	1.47	4	5	0.72	0.00	78	10	-50
29/01/2006	1.53	4	4	0.78	6.70	72	10	-40
30/01/2006	1.53	6	4	0.78	0.00	72	-10	-40
31/01/2006	1.6	10	4	0.85	0.00	65	-50	-40
01/02/2006	1.64	16	8	0.89	0.00	61	-110	-80
02/02/2006	1.64	16	8	0.89	0.00	61	-110	-80
03/02/2006	1.64	18	10	0.89	0.00	61	-130	-100
04/02/2006	1.7	18	14	0.95	0.00	55	-130	-140
05/02/2006	1.7	20	16	0.95	0.00	55	-150	-160
06/02/2006	1.53	18	10	0.78	6.70	72	-130	-100
07/02/2006	1.52	10	6	0.77	0.00	73	-50	-60
08/02/2006	1.53	10	14	0.78	0.00	72	-50	-140
09/02/2006	1.7	14	16	0.95	0.00	55	-90	-160
10/02/2006	1.7	16	16	0.95	0.00	55	-110	-160
11/02/2006	1.7	18	16	0.95	0.00	55	-130	-160
12/02/2006	1.7	18	16	0.95	0.00	55	-130	-160
13/02/2006	1.7	18	16	0.95	0.00	55	-130	-160
14/02/2006	1.75	20	18	1	0.00	50	-150	-180
15/02/2006	1.78	26	18	1.03	0.00	47	-210	-180
16/02/2006	1.78	26	16	1.03	0.00	47	-210	-160
17/02/2006	1.75	20	16	1	6.70	50	-150	-160

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
18/02/2006	1.74	20	14	0.99	0.00	51	-150	-140
19/02/2006	1.76	26	16	1.01	0.00	49	-210	-160
20/02/2006	1.78	26	18	1.03	0.00	47	-210	-180
21/02/2006	1.78	26	18	1.03	0.00	47	-210	-180
22/02/2006	1.78	16	14	1.03	0.00	47	-110	-140
23/02/2006	1.78	16	10	1.03	0.00	47	-110	-100
24/02/2006	1.78	18	14	1.03	0.00	47	-130	-140
25/02/2006	1.78	26	16	1.03	0.00	47	-210	-160
26/02/2006	1.78	14	10	1.03	0.00	47	-90	-100
27/02/2006	1.74	14	8	0.99	0.00	51	-90	-80
28/02/2006	1.74	12	10	0.99	6.70	51	-70	-100
12/03/2006	1.7	10	4	0.95	0.00	55	-50	-40
13/03/2006	1.64	8	6	0.89	0.00	61	-30	-60
14/03/2006	1.64	8	6	0.89	6.70	61	-30	-60
15/03/2006	1.44	6	10	0.69	0.00	81	-10	-100
16/03/2006	1.44	6	10	0.69	0.00	81	-10	-100
17/03/2006	1.6	6	10	0.85	0.00	65	-10	-100
18/03/2006	1.62	6	8	0.87	0.00	63	-10	-80
19/03/2006	1.62	8	6	0.87	0.00	63	-30	-60
20/03/2006	1.62	8	8	0.87	0.00	63	-30	-80
21/03/2006	1.6	6	10	0.85	0.00	65	-10	-100
22/03/2006	1.6	4	8	0.85	0.00	65	10	-80
23/03/2006	1.6	4	10	0.85	0.00	65	10	-100
24/03/2006	1.6	6	4	0.85	0.00	65	-10	-40
25/03/2006	1.48	2	6	0.73	6.70	77	30	-60
26/03/2006	1.48	4	8	0.73	0.00	77	10	-80
27/03/2006	1.5	6	10	0.75	0.00	75	-10	-100
28/03/2006	1.54	6	12	0.79	0.00	71	-10	-120
29/03/2006	1.54	8	12	0.79	0.00	71	-30	-120
30/03/2006	1.54	10	14	0.79	0.00	71	-50	-140
31/03/2006	1.6	10	16	0.85	0.00	65	-50	-160
01/04/2006	1.6	10	16	0.85	0.00	65	-50	-160

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
02/04/2006	1.62	11	16	0.87	0.00	63	-60	-160
03/04/2006	1.62	11	18	0.87	0.00	63	-60	-180
04/04/2006	1.62	10	16	0.87	0.00	63	-50	-160
05/04/2006	1.62	10	18	0.87	0.00	63	-50	-180
06/04/2006	1.62	10	16	0.87	0.00	63	-50	-160
07/04/2006	1.64	10	16	0.89	0.00	61	-50	-160
08/04/2006	1.6	8	4	0.85	0.00	65	-30	-40
09/04/2006	1.48	6	4	0.73	0.00	77	-10	-40
10/04/2006	1.48	6	4	0.73	0.00	77	-10	-40
11/04/2006	1.48	16	10	0.73	0.00	77	-110	-100
12/04/2006	1.65	10	12	0.9	0.00	60	-50	-120
13/04/2006	1.65	10	8	0.9	0.00	60	-50	-80
14/04/2006	1.65	10	8	0.9	0.00	60	-50	-80
15/04/2006	1.65	10	8	0.9	0.00	60	-50	-80
16/04/2006	1.65	10	8	0.9	0.00	60	-50	-80
17/04/2006	1.65	10	10	0.9	0.00	60	-50	-100
18/04/2006	1.65	10	14	0.9	0.00	60	-50	-140
19/04/2006	1.65	10	14	0.9	0.00	60	-50	-140
20/04/2006	1.65	10	16	0.9	0.00	60	-50	-160
21/04/2006	1.65	10	16	0.9	0.00	60	-50	-160
22/04/2006	1.65	14	16	0.9	0.00	60	-90	-160
23/04/2006	1.65	14	16	0.9	0.00	60	-90	-160
24/04/2006	1.58	10	8	0.83	0.00	67	-50	-80
25/04/2006	1.58	10	8	0.83	0.00	67	-50	-80
26/04/2006	1.58	10	10	0.83	0.00	67	-50	-100
27/04/2006	1.58	10	8	0.83	0.00	67	-50	-80
28/04/2006	1.58	10	10	0.83	0.00	67	-50	-100
29/04/2006	1.58	10	10	0.83	0.00	67	-50	-100
30/04/2006	1.58	10	14	0.83	0.00	67	-50	-140
01/05/2006	1.6	12	14	0.85	0.00	65	-70	-140
02/05/2006	1.6	12	16	0.85	0.00	65	-70	-160
03/05/2006	1.6	14	16	0.85	0.00	65	-90	-160

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
04/05/2006	1.76	8	10	1.01	0.00	49	-30	-100
05/05/2006	1.76	10	14	1.01	0.00	49	-50	-140
06/05/2006	1.76	10	14	1.01	0.00	49	-50	-140
07/05/2006	1.76	10	14	1.01	0.00	49	-50	-140
08/05/2006	1.76	10	14	1.01	0.00	49	-50	-140
09/05/2006	1.76	10	16	1.01	0.00	49	-50	-160
10/05/2006	1.76	14	18	1.01	0.00	49	-90	-180
11/05/2006	1.76	14	18	1.01	0.00	49	-90	-180
12/05/2006	1.76	16	20	1.01	0.00	49	-110	-200
13/05/2006	1.76	18	20	1.01	0.00	49	-130	-200
14/05/2006	1.76	18	24	1.01	0.00	49	-130	-240
15/05/2006	1.76	20	24	1.01	0.00	49	-150	-240
16/05/2006	1.84	7	23	1.09	0.00	41	-20	-230
17/05/2006	1.83	10	20	1.08	0.00	42	-50	-200
18/05/2006	1.83	10	20	1.08	0.00	42	-50	-200
19/05/2006	1.83	14	20	1.08	0.00	42	-90	-200
20/05/2006	1.83	16	20	1.08	0.00	42	-110	-200
21/05/2006	1.83	14	24	1.08	0.00	42	-90	-240
22/05/2006	1.83	10	24	1.08	0.00	42	-50	-240
23/05/2006	1.83	10	24	1.08	0.00	42	-50	-240
24/05/2006	1.86	9	21	1.11	0.00	39	-40	-210

Annexe 2 : Données obtenues au terrain au niveau de la station 2

Station 3

Date	P3	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	charge en cm	T1(50)	T2(75)
30/12/2005	1.93	6	5	0.99	0.00	51	-60	100
31/12/2005	1.93	6	15	0.99	0.00	51	-60	0
01/01/2006	1.94	3	12	1	0.00	50	-30	30
02/01/2006	1.94	8	14	1	6.70	50	-80	10
03/01/2006	1.94	2	14	1	0.00	50	-20	10
04/01/2006	1.93	4	12	0.99	0.00	51	-40	30
05/01/2006	1.97	4	12	1.03	0.00	47	-40	30
06/01/2006	1.96	8	14	1.02	0.00	48	-80	10
07/01/2006	1.86	12	16	0.92	6.70	58	-120	-10
08/01/2006	1.86	10	2	0.92	0.00	58	-100	130
09/01/2006	1.86	2	10	0.92	0.00	58	-20	50
10/01/2006	1.87	2	10	0.93	0.00	57	-20	50
11/01/2006	1.87	6	12	0.93	0.00	57	-60	30
12/01/2006	1.87	8	16	0.93	0.00	57	-80	-10
13/01/2006	1.93	18	10	0.99	0.00	51	-180	50
14/01/2006	1.94	20	14	1	0.00	50	-200	10
15/01/2006	1.96	8	4	1.02	6.70	48	-80	110
16/01/2006	1.96	20	14	1.02	0.00	48	-200	10
17/01/2006	1.96	18	10	1.02	0.00	48	-180	50
18/01/2006	1.82	4	8	0.88	0.00	62	-40	70
19/01/2006	1.82	4	8	0.88	0.00	62	-40	70
20/01/2006	1.84	6	8	0.9	0.00	60	-60	70
21/01/2006	1.86	18	14	0.92	0.00	58	-180	10
22/01/2006	1.84	20	16	0.9	0.00	60	-200	-10
23/01/2006	1.86	18	14	0.92	0.00	58	-180	10
24/01/2006	1.84	20	18	0.9	0.00	60	-200	-30
25/01/2006	1.69	0	7	0.75	0.00	75	0	80
29/01/2006	1.73	2	8	0.79	6.70	71	-20	70
30/01/2006	1.73	4	10	0.79	0.00	71	-40	50
31/01/2006	1.73	6	10	0.79	0.00	71	-60	50

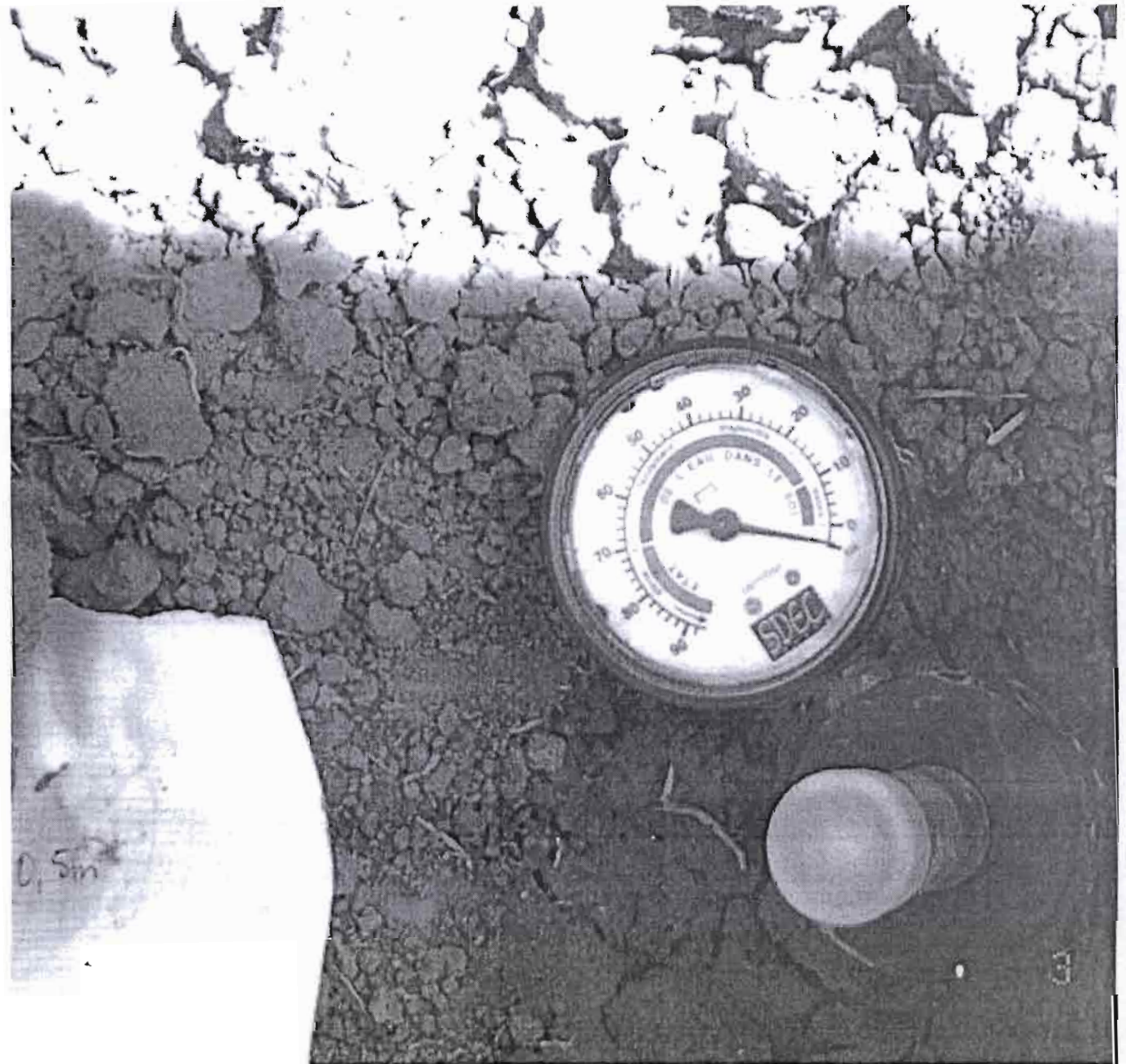
Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
01/02/2006	1.73	8	10	0.79	0.00	71	-80	50
02/02/2006	1.75	10	8	0.81	0.00	69	-100	70
03/02/2006	1.77	16	10	0.83	0.00	67	-160	50
04/02/2006	1.77	18	12	0.83	0.00	67	-180	30
05/02/2006	1.77	18	14	0.83	0.00	67	-180	10
06/02/2006	1.7	10	10	0.76	6.70	74	-100	50
07/02/2006	1.64	10	6	0.7	0.00	80	-100	90
08/02/2006	1.7	18	8	0.76	0.00	74	-180	70
09/02/2006	1.7	18	10	0.76	0.00	74	-180	50
10/02/2006	1.7	2	10	0.76	0.00	74	-20	50
11/02/2006	1.7	6	14	0.76	0.00	74	-60	10
12/02/2006	1.7	10	16	0.76	0.00	74	-100	-10
13/02/2006	1.7	18	16	0.76	0.00	74	-180	-10
14/02/2006	1.7	20	18	0.76	0.00	74	-200	-30
15/02/2006	1.74	20	18	0.8	0.00	70	-200	-30
16/02/2006	1.74	22	16	0.8	0.00	70	-220	-10
17/02/2006	1.68	10	14	0.74	6.70	76	-100	10
18/02/2006	1.64	10	10	0.7	0.00	80	-100	50
19/02/2006	1.74	20	16	0.8	0.00	70	-200	-10
20/02/2006	1.74	22	16	0.8	0.00	70	-220	-10
21/02/2006	1.64	18	14	0.7	0.00	80	-180	10
22/02/2006	1.7	10	6	0.76	0.00	74	-100	90
23/02/2006	1.7	10	10	0.76	0.00	74	-100	50
24/02/2006	1.74	16	10	0.8	0.00	70	-160	50
25/02/2006	1.74	18	14	0.8	0.00	70	-180	10
26/02/2006	1.64	18	14	0.7	0.00	80	-180	10
27/02/2006	1.75	14	10	0.81	0.00	69	-140	50
28/02/2006	1.74	16	10	0.8	6.70	70	-160	50
12/03/2006	1.72	10	6	0.78	0.00	72	-100	90
13/03/2006	1.56	4	6	0.62	0.00	88	-40	90
14/03/2006	1.65	4	8	0.71	6.70	79	-40	70
15/03/2006	1.65	4	10	0.71	0.00	79	-40	50

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
16/03/2006	1.65	8	10	0.71	0.00	79	-80	50
17/03/2006	1.65	8	10	0.71	0.00	79	-80	50
18/03/2006	1.65	8	6	0.71	0.00	79	-80	90
19/03/2006	1.65	8	4	0.71	0.00	79	-80	110
20/03/2006	1.65	6	4	0.71	0.00	79	-60	110
21/03/2006	1.5	10	8	0.56	0.00	94	-100	70
22/03/2006	1.5	10	8	0.56	0.00	94	-100	70
23/03/2006	1.52	10	4	0.58	0.00	92	-100	110
24/03/2006	1.52	10	10	0.58	0.00	92	-100	50
25/03/2006	1.65	10	14	0.71	6.70	79	-100	10
26/03/2006	1.65	10	14	0.71	0.00	79	-100	10
27/03/2006	1.65	10	14	0.71	0.00	79	-100	10
28/03/2006	1.65	10	16	0.71	0.00	79	-100	-10
29/03/2006	1.65	8	10	0.71	0.00	79	-80	50
30/03/2006	1.65	10	16	0.71	0.00	79	-100	-10
31/03/2006	1.65	10	16	0.71	0.00	79	-100	-10
01/04/2006	1.65	10	18	0.71	0.00	79	-100	-30
02/04/2006	1.65	10	18	0.71	0.00	79	-100	-30
03/04/2006	1.67	12	18	0.73	0.00	77	-120	-30
04/04/2006	1.67	12	16	0.73	0.00	77	-120	-10
05/04/2006	1.67	12	16	0.73	0.00	77	-120	-10
06/04/2006	1.67	10	14	0.73	0.00	77	-100	10
07/04/2006	1.67	10	8	0.73	0.00	77	-100	70
08/04/2006	1.67	12	6	0.73	0.00	77	-120	90
09/04/2006	1.69	10	4	0.75	0.00	75	-100	110
10/04/2006	1.7	14	10	0.76	0.00	74	-140	50
11/04/2006	1.69	16	10	0.75	0.00	75	-160	50
12/04/2006	1.65	10	14	0.71	0.00	79	-100	10
13/04/2006	1.65	10	14	0.71	0.00	79	-100	10
14/04/2006	1.65	10	14	0.71	0.00	79	-100	10
15/04/2006	1.65	10	10	0.71	0.00	79	-100	50
16/04/2006	1.65	10	8	0.71	0.00	79	-100	70

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
17/04/2006	1.65	10	10	0.71	0.00	79	-100	50
18/04/2006	1.65	14	10	0.71	0.00	79	-140	50
19/04/2006	1.67	14	10	0.73	0.00	77	-140	50
20/04/2006	1.67	14	10	0.73	0.00	77	-140	50
21/04/2006	1.67	14	12	0.73	0.00	77	-140	30
22/04/2006	1.67	16	14	0.73	0.00	77	-160	10
23/04/2006	1.67	16	14	0.73	0.00	77	-160	10
24/04/2006	1.87	18	14	0.93	0.00	57	-180	10
25/04/2006	1.87	20	14	0.93	0.00	57	-200	10
26/04/2006	1.87	20	14	0.93	0.00	57	-200	10
27/04/2006	1.87	20	14	0.93	0.00	57	-200	10
28/04/2006	1.87	20	14	0.93	0.00	57	-200	10
29/04/2006	1.87	30	14	0.93	0.00	57	-300	10
30/04/2006	1.87	30	14	0.93	0.00	57	-300	10
01/05/2006	1.87	40	14	0.93	0.00	57	-400	10
02/05/2006	1.87	40	14	0.93	0.00	57	-400	10
03/05/2006	1.87	40	16	0.93	0.00	57	-400	-10
04/05/2006	2	60	10	1.06	0.00	44	-600	50
05/05/2006	2	60	10	1.06	0.00	44	-600	50
06/05/2006	2	60	16	1.06	0.00	44	-600	-10
07/05/2006	2	60	16	1.06	0.00	44	-600	-10
08/05/2006	2	60	16	1.06	0.00	44	-600	-10
09/05/2006	2	62	16	1.06	0.00	44	-620	-10
10/05/2006	2	64	16	1.06	0.00	44	-640	-10
11/05/2006	2	64	16	1.06	0.00	44	-640	-10
12/05/2006	2	68	14	1.06	0.00	44	-680	10
13/05/2006	2	68	14	1.06	0.00	44	-680	10
14/05/2006	2	70	16	1.06	0.00	44	-700	-10
15/05/2006	2	70	16	1.06	0.00	44	-700	-10
16/05/2006	2.05	68	13	1.11	0.00	39	-680	20
17/05/2006	2.05	64	14	1.11	0.00	39	-640	10
18/05/2006	2.05	64	14	1.11	0.00	39	-640	10

Date	P1	T1	T2	niveau de la nappe en m	Précipitation en cm	Charge en cm	T1(75)	T2(50)
19/05/2006	2.05	64	16	1.11	0.00	39	-640	-10
20/05/2006	2.05	64	16	1.11	0.00	39	-640	-10
21/05/2006	2.05	64	16	1.11	0.00	39	-640	-10
22/05/2006	2.05	66	16	1.11	0.00	39	-660	-10
23/05/2006	2.05	70	16	1.11	0.00	39	-700	-10
24/05/2006	2.07	68	16	1.13	0.00	37	-680	-10

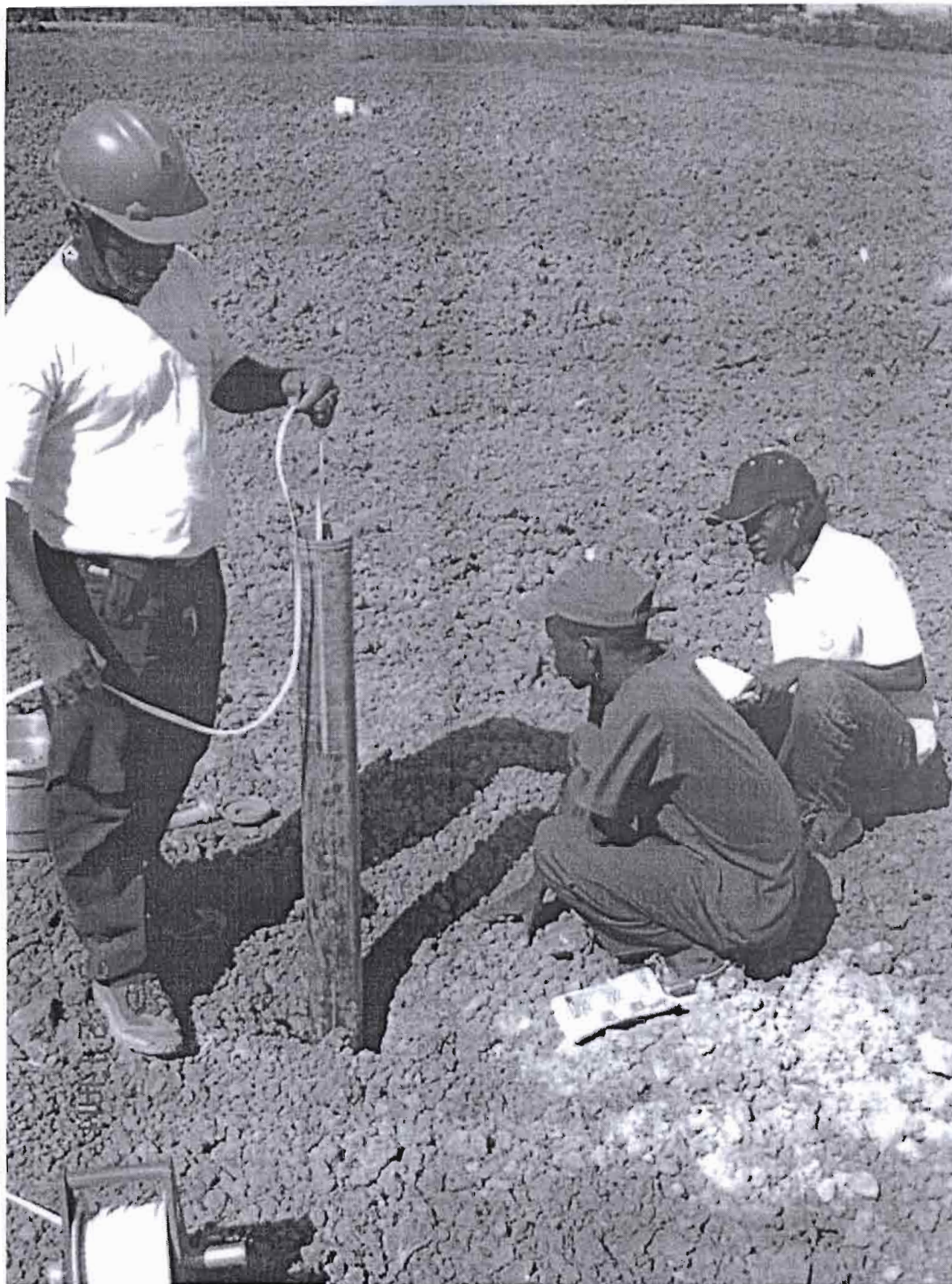
Annexe 3 : Données obtenues au terrain au niveau de la station 3



Tensiomètre placé à 0.5m



Infiltromètre : Appareil permettant de mesurer la perméabilité



Un opérateur effectuant une mesure piézométrique avec une sonde



Un opérateur effectuant des mesures de certains paramètres chimiques (salinité, pH...) de la nappe



Bibliographie

1. **D. Hillel**, L'eau et le sol,
2. **B. Seye**, Projet de fin d'études, Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale dans le Delta du Fleuve Sénégal : Impact de l'irrigation sur le relèvement de la nappe salée dans les casiers rizicoles, ESP, 2005
3. **E. H. B. Diaw, P. Ackerer, P. Boivin et F. Laval**, Suivi expérimental des transferts provoqués par l'irrigation dans le périmètre de Ouro Madiou en moyenne vallée du fleuve Sénégal, Cahiers Agricultures 2003 ; 12 ;103-10
4. **B. Sidibé**, Projet de fin d'études, Gestion Optimale des Ressources en Eau du Delta du Fleuve Sénégal (projet GORE- DELTA), ESP, 2004
5. **B. Ndiaye, C. Gascuel, S. Ndoye et C. Cheverry**, Modélisation du transfert de l'eau et des sels dans les casiers rizicoles du Delta du Fleuve Sénégal, 2005
6. **SAED / DPDR**, Méthodologie à suivre pour établir un bilan d'eau. Exemple : Pont Gendarme et Aere Lao, Bulletin technique n° 11, novembre 1996
7. **B. Ndiaye**, Etude hydrogéologique du Delta du fleuve Sénégal, juillet 1989
8. **B. Ndiaye**, Cours d'hydrogéologie, ESP, 2006
9. **Ndiaye Babacar et Isabel Denis**, Geostatistical analysis of hydrogeology and agricultural land reclamation in Senegal river Delta, Journal of the American water resources association, vol. 35,NO,2, 1999
10. **Deckers et al.** , Evolution de l'acidité dans les sols du delta du fleuve Sénégal sous l'influence anthropogène, Etude et gestion des sols 3, 3, 1996, page 151-166
11. **B. Wagner, V.R Tarnawski, V. Hennings, U. Muller, G. Wessolek, R. Plagge**, Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set, Geoderma 102 (2001) 275-297