

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GC.0007

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

CENTRE DE THIES

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

PROJET DE FIN D'ETUDES

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION
EN GENIE CIVIL**

**TITRE : Modélisation hydrodynamique de la
nappe alluviale du Delta du Fleuve Sénégal :
Impact de l'irrigation sur le relèvement de la nappe
salée dans les casiers rizicoles
(Projet GORE- DELTA)**

Auteur: Mr. Mame Baba SEYE

Directeur: Mr. Babacar NDIAYE

Co-Directeur: Mr. Seyni NDOYE

DEDICACES

Avant tout, je rend grâce au bon DIEU et dédie ce travail à mes quatre parents :

- ♥ Mor SEYE,
- ♥ Awa MBAYE,
- ♥ Mamadou Taïb DIOUF,
- ♥ Sokhna Makha MBAYE,

qui m'ont toujours aidé dans la vie en général et n'ont ménagé aucun effort pour la réussite de mes études en particulier.

Ce dédicace va droit également à mes frères, sœurs, amis, camarades de promotion et à tous ceux qui, de près ou de loin, de par leurs actes ou leurs conseils, ont contribué à la bonne marche de mes études.

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos vifs remerciements à toutes les personnes, qui de par leurs disponibilités et de leurs conseils très avisés, ont contribué et aidé à la réalisation de ce projet.

En particulier nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance et gratitude à :

- Monsieur Babacar NDIAYE, professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique pour avoir bien voulu proposer et diriger ce projet.
- Monsieur Seyni NDOYE, professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique pour son soutien constant et sa disponibilité sans limite durant tout le projet notamment pour l'apprentissage des logiciels Surfer et Visual Modflow.
- Monsieur Bamba DIAW, professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique pour son soutien et ses conseils.
- Madame GAYE, du laboratoire d'assainissement pour sa parfaite collaboration.
- Monsieur THIAM, professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique, laboratoire topographique
- Tout le corps professoral de l'Ecole Supérieure Polytechnique pour les enseignements de qualité qu'il a bien voulu nous faire profiter.
- Monsieur Saliou NGOM, de la Direction de Gestion et de Planification des Ressources en Eau (DGPRE) et élève en DIC 2 à l'E.S.P. pour sa collaboration.
- Monsieur Ousmane NDIAYE, élève en DIC 1 à l'E.S.P.

TABLE DES MATIERES

LISTES DES ANNEXES	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
SUMMARY	xi
RESUME	xii
INTRDUCTION	1
I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	3
I.1_Geographie	3
I.1.1. Climatologie	3
I.1.1.1. Pluviométrie	3
I.1.1.2. Température	4
I.1.1.3. Humidité relative	5
I.1.1.4. Evaporation	5
I.1.1.5. Régime des vents	6
I.1.2. Géographie physique	6
I.1.2.1. Géomorphologie	6
I.1.2.2. Hydrographie	9
I.1.2.3. Sols et Végétation	9
I.1.3. Démographie	10
I. 2_Géologie et Hydrogéologie de la zone	11
I.2.1. Géologie	11

I.2.2. Hydrogéologie	11
I.2.2.1. La nappe alluviale du Delta	11
I.2.2.2. La chimie des eaux	17
I.2.2.3. Hydrodynamisme	22
I.2.2.3.1 Outils de travail.....	22
I.2.2.3.2. Réseau régional	25
I.2.2.3.3. Réseau local	31
II. ETUDE DE LA NAPPE ALLUVIALE DU DELTA DU FLEUVE SENEGAL	33
II.1_ Les données disponibles	33
II.1.1. Bilan des données disponibles	33
II.1.1.1. Projet O.M.V.S. / U.S.A.I.D.	33
II.1.1.2 Projet GORE Delta.....	34
II.1.2. Analyse critique de la banque de données O.M.V.S. / U.S.A.I.D.	35
II.1.2.1. La profondeur de l'eau	35
II.1.2.2. La qualité chimique	35
II.1.2.3. La salinité	35
III. ELABORATION DES PARAMETRES D'ENTREE DU MODELE	38
III.1_ Géometrie du réservoir	38
III.1.1. Limites géologiques	38
III.1.2. Le toit	38
III.1.3. Le mur	38
III.1.4. Epaisseur de l'aquifère.....	41

III.2_ Les caractéristiques hydrodynamiques	42
III.2.1. Coefficient de perméabilité	42
III.2.2. La transmissivité	44
III.2.3. Le coefficient d'emmagasinement	44
III.2.4. La porosité.....	45
III.3_ Les conditions aux limites du modèle	46
III.3.1 Condition de potentiel imposé.....	46
III.3.2 Condition de flux nul.....	49
III.4_ Le bilan hydrique	49
III.4.1. Sorties du système	49
III.4.1.1. Estimation de l'évapotranspiration.....	49
III.4.2. Entrées du système	52
III.4.2.1. Relation entre la nappe et le fleuve Sénégal	52
III.4.2.2. L'infiltration	52
III.4.2.3. La percolation	53
IV. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE	56
IV.1_ Outils du modèle	56
IV.2_ Description du modèle	60
IV.3_ Calibration du modèle	62
IV.3.1 Calage des perméabilités.....	62
IV.3.2 Calage de la recharge.....	62

IV.3.3 Calage de la piézométrie.....62

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS63

LISTES DES ANNEXES

Annexe 1 : Données piézométriques de 1987

Annexe 2 : Données piézométriques de 2002

Annexe 3 : Données du toit et du substratum de l'aquifère

Annexe 4 : Valeurs des coefficients de perméabilité de l'aquifère

Annexe 5 : Mesure des fluctuations en quelques ouvrages

Annexe 6 : Données climatologiques à la station de Saint Louis

Annexe 7 : Charte de bonne pratique pour la modélisation et notes sur Modflow

LISTE DES FIGURES

<u>Figure 1</u> : Moyenne des précipitations de 1986 à 2003 (Station Saint Louis).....	4
<u>Figure 2</u> : Variation des précipitations de 1986 à 2003 (Station Saint Louis).....	4
<u>Figure 3</u> : Température moyenne mensuelle de 1986 à 2003 (Station Saint Louis).....	5
<u>Figure 4</u> : Humidité relative moyenne de 1986 à 2003 (Station Saint Louis).....	5
<u>Figure 5</u> : Moyenne de l'évaporation à Saint Louis (1986 à 2003).....	6
<u>Figure 6</u> : Géomorphologie du delta (d'après Gaucher 1966).....	8
<u>Figure 7</u> : Carte de distribution des ouvrages de références pour l'illustration de la fluctuation de la nappe.....	13
<u>Figure 8</u> : Fluctuation de la nappe au GB0053.....	14
<u>Figure 9</u> : Fluctuation de la nappe au GB0844.....	14
<u>Figure 10</u> : Fluctuation de la nappe au GB0846.....	15
<u>Figure 11</u> : Fluctuation de la nappe au GB0002.....	15
<u>Figure 12</u> : Fluctuation de la nappe au GB0004.....	16
<u>Figure 13</u> : Fluctuation de la nappe au GB0024.....	16
<u>Figure 14</u> : Isovaleurs de profondeur de la nappe en 1987.....	20
<u>Figure 15</u> : Isovaleurs de profondeur de la nappe en 2002.....	21
<u>Figure 16</u> : Variogramme des données de 1987.....	24
<u>Figure 17</u> : Variogramme des données de 2002.....	24
<u>Figure 18</u> : Carte piézométrique 1987.....	27
<u>Figure 19</u> : Carte piézométrique 3D en 1987.....	28
<u>Figure 20</u> : Carte piézométrique 2002.....	29
<u>Figure 21</u> : Carte piézométrique 3D en 2002.....	30
<u>Figure 22</u> : Carte d'isovaleurs de la profondeur de la nappe dans la cuvette de Ndellé.....	32
<u>Figure 23</u> : Apport en sel par ascension capillaire pour différents taux de salinité de la nappe (1 culture/an).....	36
<u>Figure 24</u> : Apport en sel par ascension capillaire pour différents taux de salinité de la nappe (2 cultures/ an).....	36
<u>Figure 25</u> : Le toit de l'aquifère.....	39
<u>Figure 26</u> : Le mur de l'aquifère (substratum).....	40
<u>Figure 27</u> : Coupe de l'épaisseur de l'aquifère.....	41
<u>Figure 28</u> : Situation de la coupe de l'épaisseur de l'aquifère.....	41
<u>Figure 29</u> : Carte des valeurs de coefficient de perméabilité.....	43

<u>Figure 30</u> : Calcul des conditions de potentiel d'après MODFLOW.....	46
<u>Figure 31</u> : Profil en long du fleuve Sénégal.....	48
<u>Figure 32</u> : La percolation fonction de la conductivité électrique de la lame d'eau et de la quantité de sels apportés.....	55
<u>Figure 33</u> : Principe de la méthode des différences finies.....	58
<u>Figure 34</u> : Une fenêtre de Visual MODFLOW.....	61

LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau 1</u> : Mesures de paramètres physico-chimiques du 10/06/2005.....	18
<u>Tableau 2</u> : Mesures de paramètres physico-chimiques du 02/08/2004.....	18
<u>Tableau 3</u> : Mesures de profondeur de la nappe des journées du 15 avril et 30 mai 2004.....	31
<u>Tableau 4</u> : Quelques valeurs de coefficient de perméabilité (Source G. de MARSILY).....	43
<u>Tableau 5</u> : Calcul de l'évapotranspiration potentielle à la station de Saint Louis.....	50
<u>Tableau 6</u> : Calcul de l'évapotranspiration réelle à la station de Saint Louis.....	51
<u>Tableau 7</u> : Valeurs de l'infiltration à la station de Saint Louis.....	53
<u>Tableau 8</u> : Détermination de la Percolation au Pont Gendarme (Bulletin Technique n°11)..	54

SUMMARY

The goal of this work was mainly to collect physical and chemical data of soils and the tablecloth on the perimeter irrigated of Ndellé and in the Delta in view of a critical analysis; to understand the streamlined behavior of the alluvial tablecloth of the Delta of the Senegal stream; to see the impact of the irrigation on its raising and to set in motion a streamlined model of the very salty alluvial tablecloth of the Delta of the Senegal stream whose ascent can put in peril the cultures.

For it, the bank of constituted data besides achieved 200 observation's wells and follow-ups by the O.M.V.S. on a financing of the U.S.A.I.D., will be used in addition to the data acquired on the land by the project GORE-DELTA for the wedging of the streamlined model. The wedging of the model will take in account the debit of irrigation, the demand in water of the cultures and the constraint of a maximum raising of the tablecloth not to embarrass the development of the plants.

The studies led in the setting of the project especially reveal a fluctuation very important of the alluvial tablecloth of the Delta of the Senegal stream during the rainy season. A quantity important of water (about 159.6 mm/yr) arrives toward the tablecloth by percolation in the irrigated perimeters.

An electric conductivity of 4402 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and a pH of 8.11 have been gotten to the level of the pan of Ndellé. These measures well that local, watch that the tablecloth is salted very and can affect the output of the cultures.

Key words: Delta, alluvial tablecloth, irrigation, model

RESUME

Le but de ce travail était principalement de collecter des données physico-chimiques des sols et de la nappe sur le périmètre irrigué de Ndellé et dans le Delta en vue d'une analyse critique ; comprendre le comportement hydrodynamique de la nappe alluviale du Delta du fleuve Sénégal ; voir l'impact de l'irrigation sur son relèvement et mettre en oeuvre un modèle hydrodynamique de la nappe alluviale très salée du Delta du fleuve Sénégal dont la remontée peut mettre en péril les cultures.

Pour cela, la banque de données constituées de plus 200 piézométries réalisées et suivies par l'O.M.V.S. sur un financement de l'U.S.A.I.D., sera utilisées en plus des données acquises sur le terrain par le projet GORE-DELTA pour le calage du modèle hydrodynamique. Le calage du modèle prendra en compte le débit d'irrigation, la demande en eau des cultures et la contrainte d'un relèvement maximum de la nappe pour ne pas gêner le développement des plantes.

Les études menées dans le cadre du projet ont révélé une fluctuation très importante de la nappe alluviale du Delta du fleuve Sénégal surtout pendant la saison pluvieuse. Une quantité importante d'eau (environ 159.6 mm/an) arrive vers la nappe par percolation dans les périmètres irrigués.

Une conductivité électrique de 4402 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et un pH de 8.11 ont été obtenus au niveau de la cuvette de Ndellé. Ces mesures bien que locales, montre que la nappe est très salée, ce qui peut affecter le rendement des cultures.

Mots clés : Delta, nappe alluviale, irrigation, modèle

INTRODUCTION

La pratique de l'agriculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal est une pratique très ancienne qui remonte à l'ère coloniale. Toutefois, son expansion véritable a eu lieu à partir du début des années 60 grâce à la création de la SAED (1965).

Aujourd'hui avec 70 000 ha aménagés dont environ 50 000 ha 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 pratiquée sur les aménagements hydro-agricoles. Le Delta du fleuve Sénégal constitue la principale zone d'irrigation de la vallée avec 70 % de la superficie des aménagements. La construction des barrages anti-sel de Diama et hydroélectrique de Manantali, ont augmenté les potentialités d'irrigation durant toute l'année et rendue possible la sécurisation des terres. Les sols du Delta du fleuve Sénégal sont salés. Les fluctuations très importantes de la nappe alluviale risquent de compromettre l'avenir de l'agriculture irriguée malgré tous les moyens mis en œuvre. Ces sels actuellement dissous dans la nappe phréatique, explique le caractère très salé de celle-ci avec une conductivité électrique moyenne de 20 dS/m (OMVS / USAID, 1990).

Lorsque l'écoulement est médiocre et la nappe très proche du niveau racinaire, la concentration en sel empêche la croissance des plantes. Donc, dans la zone du Delta où l'agriculture est pratiquée de manière intensive, la surveillance de la nappe revêt d'une importance primordiale.

Pour cela, il faudra nécessairement allier l'outil informatique à la gestion optimale et à la surveillance de la nappe.

Le projet vise donc à réaliser un modèle hydrodynamique de la nappe alluviale du Delta par la méthode des différences finies prenant en compte les liens entre les eaux de surface, les eaux souterraines et l'infiltration de l'eau d'irrigation (la percolation).

Pour y arriver, nous utiliserons essentiellement le logiciel Visual Modflow de Waterloo hydrogeologic.inc. En effet, ce logiciel est capable de résoudre l'équation de diffusivité des nappes par la méthode des différences finies. C'est donc un outil indispensable pour la simulation du comportement de la nappe.

Afin de mener à bien cette étude, nous avons jugé nécessaire de :

- faire une présentation de la zone d'étude ;
- ensuite nous avons fait une étude détaillée de la nappe alluviale du delta du fleuve Sénégal ;
- puis s'en est suivi l'élaboration des paramètres d'entrée du modèle ;
- et enfin, à la modélisation proprement dit.

I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE



I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1_Geographie

Le Delta du fleuve Sénégal est une zone bien individualisée. Elle est comprise entre 15° 30'-16° 30' de longitude Ouest et 16°- 17° de latitude Nord.

I.1.1. 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.1.1.1. Pluviométrie

La pluviométrie est caractérisée par une saison des pluies relativement courte allant de juin à octobre et une longue saison sèche de novembre à mai.

De manière générale, la pluviométrie du Sénégal diminue du Sud vers le Nord causée par l'approche de la zone saharienne.

Les données pluviométriques montrent que la saison des pluies est effective entre le mois d'août et de septembre (figure 1).

En dehors de cette période, de faibles précipitations peuvent être enregistrées. Elles sont irrégulières et influencent peu le processus de recharge de la nappe.

Les précipitations de 1986 à 2003 sont marquées par une variation irrégulière avec une moyenne de 272.22 mm/an. Il est à noter que les années 1995 et 1999 sont distinguées par une forte pluviométrie allant jusqu'à 467.30 mm (figure 2).

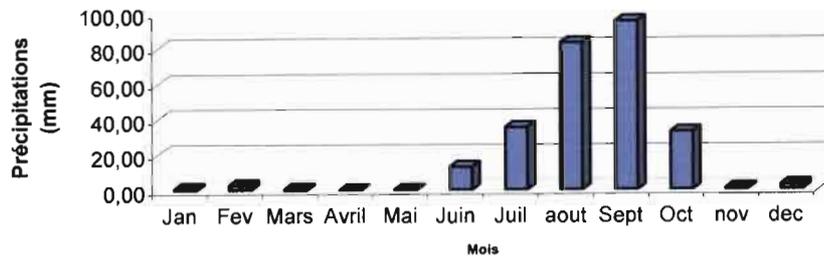


Figure 1: Moyenne des précipitations de 1986 à 2003 (Station Saint Louis)

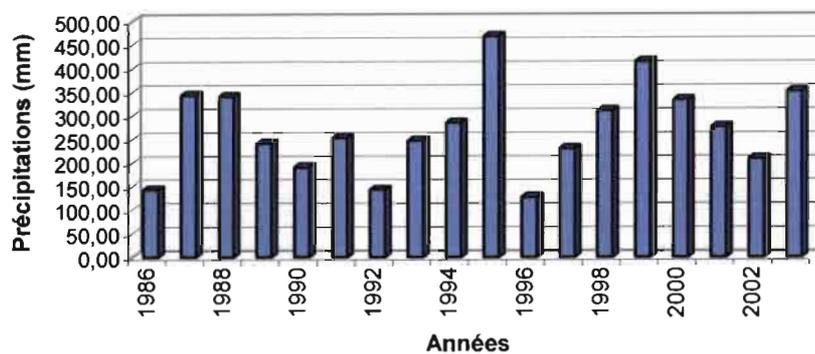


Figure 2: Variation des précipitations de 1986 à 2003 (Station Saint Louis)

I.1.1.2. Température

Du fait de l'influence océanique, les températures dans le Delta du fleuve Sénégal restent modérées pendant toute l'année avec des maxima de 32°C pendant la période hivernale et des minima de 22°C en saison sèche. L'insolation est très favorable aux cultures avec plus de 2889 heures. La température de la zone du delta est relativement stable. La figure 3 montre la variation moyenne mensuelle de la température.

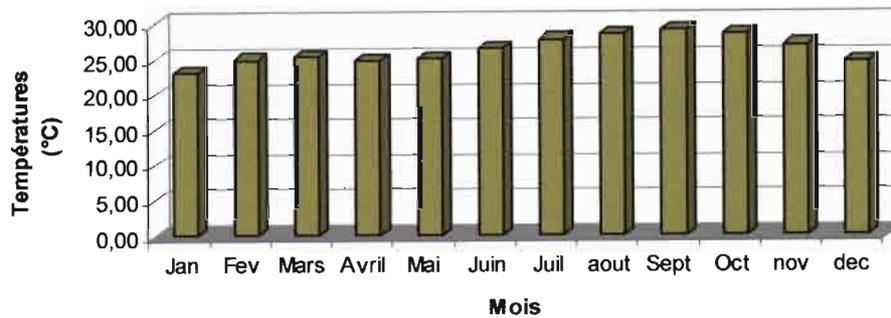


Figure 3 :Température moyenne mensuelle de 1986 à 2003 (Station Saint Louis)

I.1.1.3. 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% (Figure 4).

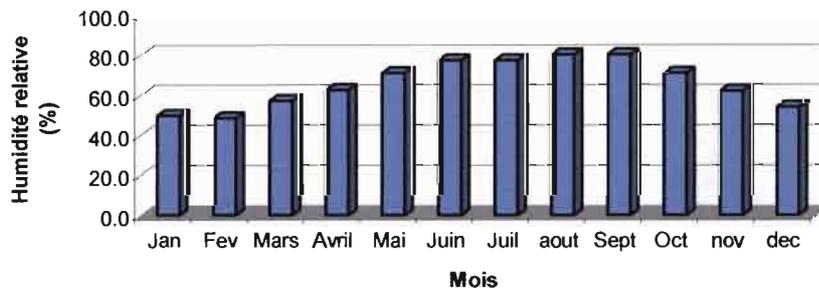


Figure 4: Humidité relative moyenne de 1986 à 2003 (Station de Saint Louis)

I.1.1.4. 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 (figure 5).



Figure 5: Moyenne de l'évaporation à Saint Louis (1986 à 2003)

I.1.1.5. Régime des vents

Pendant la saison sèche, le régime des vents des alizés maritimes de direction NO s'installe près de la côte alors qu'à l'intérieur souffle un vent chaud et sec appelé Harmattan de direction NE. La saison humide est marquée par l'apparition de grains orageux avec des vents dominants de direction NO près de la côte et Ouest à l'intérieur. La vitesse des vents est plus importante au mois d'avril avec une valeur moyenne de 4.65 m/s. (Données de la station de Saint Louis de 1986 à 2003)

I.1.2. Géographie physique

I.1.2.1. Géomorphologie

Le Delta a commencé à se former pendant la transgression dunkerquienne (2000 av. J.C. à nos jours). Pendant cette période, le niveau de l'océan est monté de 1.5 à 2 m. Le Delta est alors constitué d'un complexe de marigots et lagunes, qui sont séparés de la mer par la zone littorale. Le long du cours d'eau principal et des marigots, se sont formés des levées (localement appelée Fondé) près des rives. Ce sont des digues naturelles qui se forment par le dépôt de matériaux grossiers transportés par l'eau à grande vitesse. Par contre perpendiculairement à la rivière, se trouvent les cuvettes de décantation (localement appelées Hollaldé). Elles sont formées de matériaux argilo limoneux (60 à 70 % d'argile kaolinitique)

décantés par suite du peu de turbulence de l'eau dans les zones. Les cuvettes couvrent à peu près le tiers de la superficie du Delta soit environ 60 000 ha. Pendant la crue du fleuve, les levées peuvent s'effondrer, entraînant la formation de Deltas secondaires de rupture dont la texture est comparable à celle des levées (Deckers, 1996).

On peut donc dire que le Delta du fleuve Sénégal est une immense plage sableuse sillonnée par de nombreux bras fluviaux qui délimitent des cuvettes argilo-limoneux aux terres plus ou moins salées (figure 6). L'altitude moyenne se situe en général entre + 1m et + 2 m I.G.N.. Les parties les plus basses sont généralement inondées par la crue. Il est bordé au Nord et au Sud-Ouest par des anciens massifs dunaires dont les crêtes atteignent +8m à +10m I.G.N. (NDIAYE, 1989).

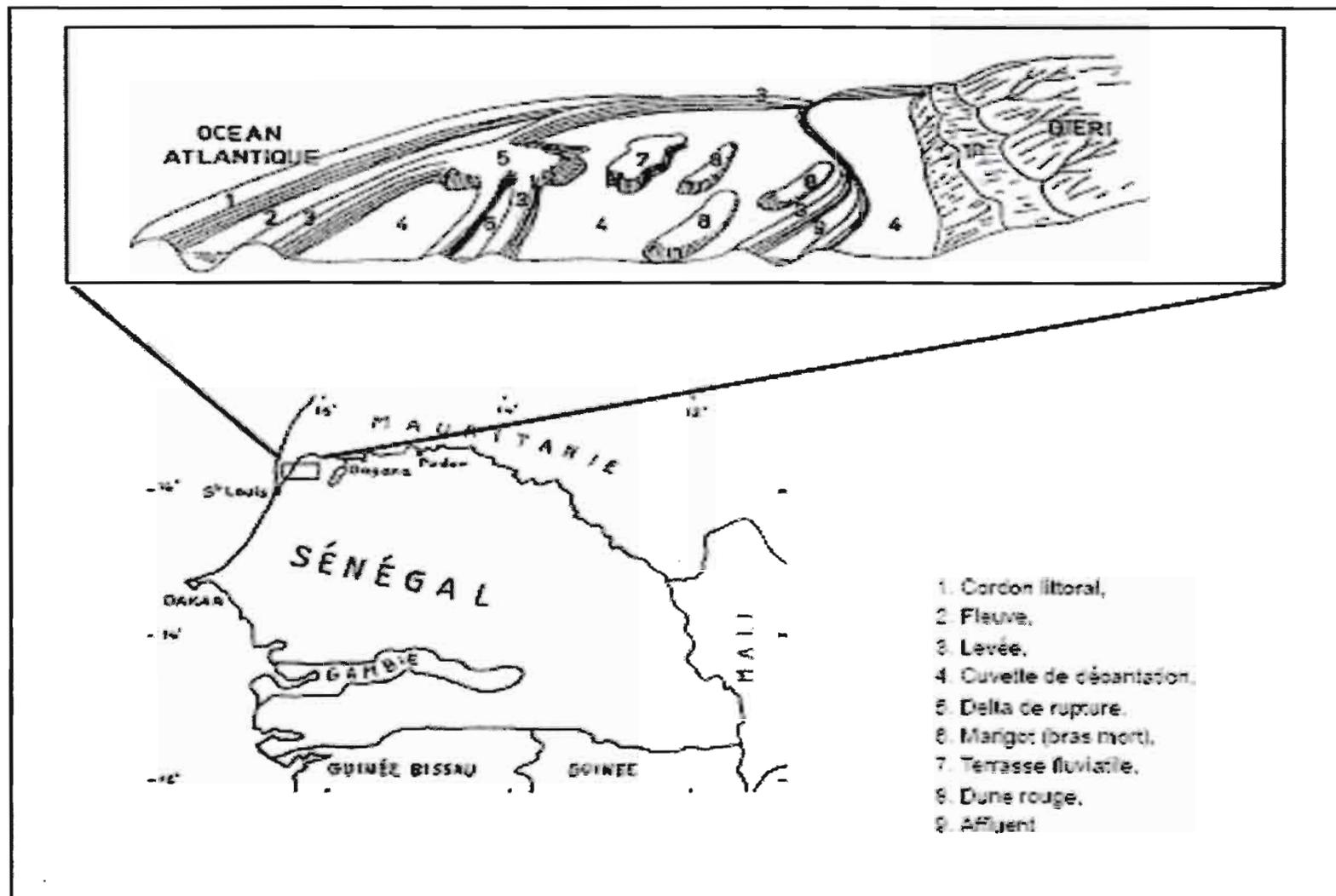


Figure 6 : Géomorphologie du Delta (d'après Gaucher 1966)

I.1.2.2. Hydrographie

Le Delta du fleuve Sénégal est une région bien individualisée. Il 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.

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, il y a présence de cordons littéraux dont le plus typique est la langue de barbarie qui sépare le delta de l'océan atlantique (NDIAYE, 1989).

I.1.2.3. 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.1.3. Démographie

Le Delta du fleuve Sénégal est habité par plusieurs ethnies dont la majoritaire est le Wolof, moins nombreux sont les peuls et les maures.

Le développement de la riziculture irriguée est considéré comme un moyen pour atteindre l'autosuffisance alimentaire nationale entraînant du coup la sédentarisation de la population auparavant semi nomades. Ainsi, la population du Delta estimée à environ 500 000 habitants en 2005, a connu un développement très rapide.

I.2_ Géologie et Hydrogéologie de la zone

I.2.1. Géologie

Le log géologique effectuée au niveau du forage de Ross Bethio situé au longitude 16°16'15'' et au 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 Maastrichtien

I.2.2. Hydrogéologie

I.2.2.1. La nappe alluviale du delta

Une nappe alluviale est une nappe libre sise dans les alluvions qui jalonnent le cours d'eau d'un fleuve. L'eau de la nappe est généralement en équilibre avec celle du fleuve, étant tantôt drainée par le fleuve, tantôt alimentée par lui (MARSILY, 1981).

La première condition pour représenter un état piézométrique, est de disposer de mesures synchrones, afin de s'affranchir des erreurs induites par l'évolution temporelle et spatiale du niveau statique et de sélectionner une piézométrie pendant une durée suffisante, fonction de la dynamique de l'aquifère.

Bien sûr, du fait de l'absence d'un réseau adapté à la surveillance de la nappe, nous ne possédons pas une information suffisante pour satisfaire une bonne répartition sur toute la zone d'étude des points de mesure, en concordance avec le maintien d'une unité temporelle.

Ainsi, nous avons voulu montrer les fluctuations du niveau de la nappe à certains ouvrages de la zone d'étude (figure 7). L'analyse de cette fluctuation est matérialisée sur les figures (8 ; 9 ; 10 ; 11 ; 12 ; 13). De ce fait, nous avons pu remarquer que la nappe phréatique du Delta et de

la basse vallée se trouve généralement à quelques mètres au dessous du sol. Elle connaît une hausse surtout près du fleuve et des marigots permanents en période de crue. La zone d'influence des eaux de surface du fleuve et des marigots n'excède pas quelques centaines de mètres.

On note cependant une fluctuation très importante de la nappe notamment une baisse de niveau pendant la période d'étiage où la nappe est drainée par le fleuve et en saison sèche due aux phénomènes d'évapotranspiration. On note une recharge pendant la saison pluvieuse du fait de l'infiltration des eaux de pluie, la crue du fleuve et à la percolation de la lame d'eau d'irrigation.

On remarque également une irrégularité fulgurante de la fluctuation au niveau des ouvrages.

Par exemple, les fluctuations mesurées au piézomètre GB0053 se distinguent considérablement de celles du piézomètre GB0846. Ceci est dû à la position géographique de ces derniers. En effet, vers l'Est, près de Dagana, les variations sont plus marquées que vers l'Ouest.

Du fait de la salinisation et de l'acidité du Delta dans certaine zone, les eaux souterraines sont impropres pour l'irrigation ou plus spécifiquement à un usage agricole.

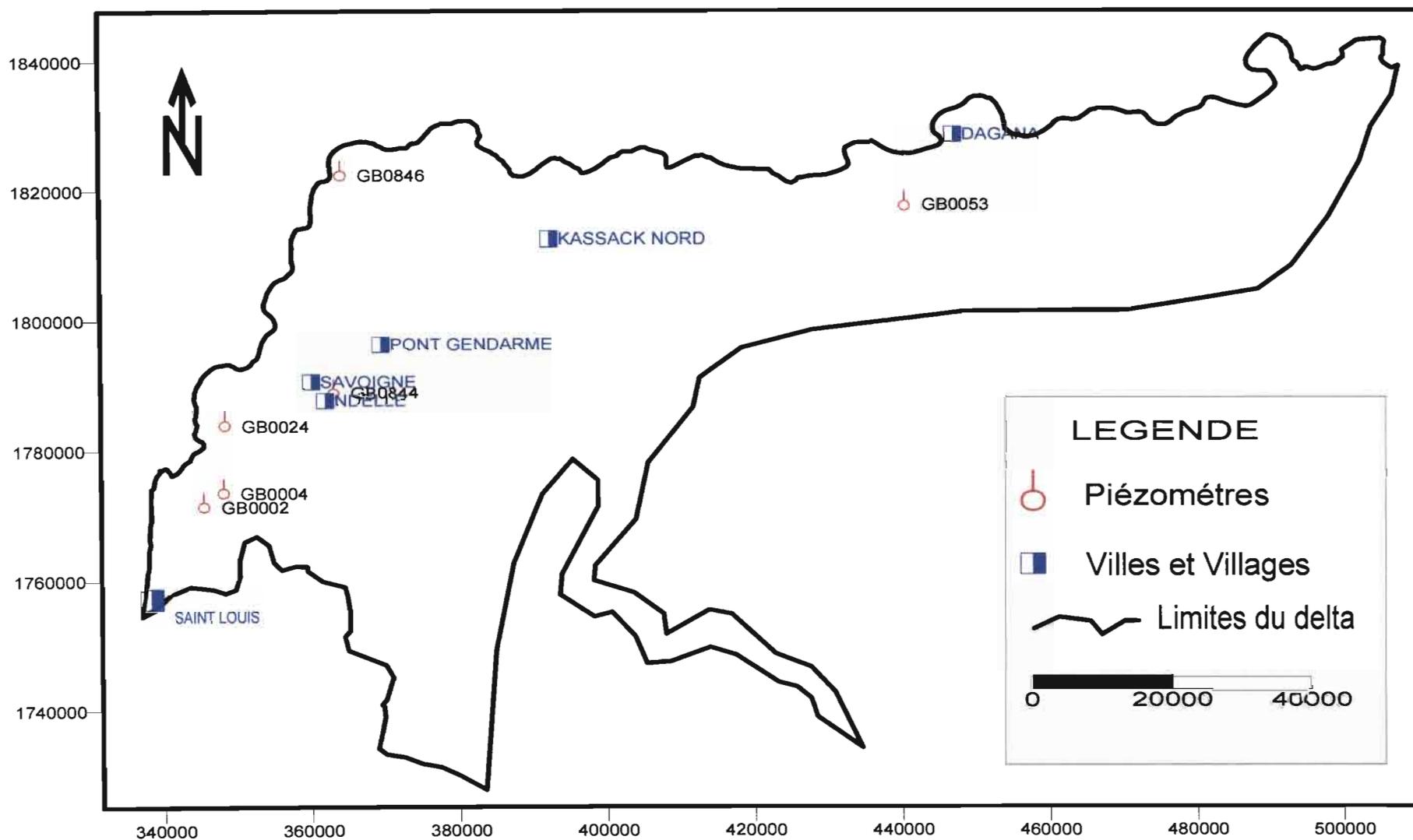


Figure 7 : Carte de distribution des ouvrages de références pour l'illustration de la fluctuation de la nappe

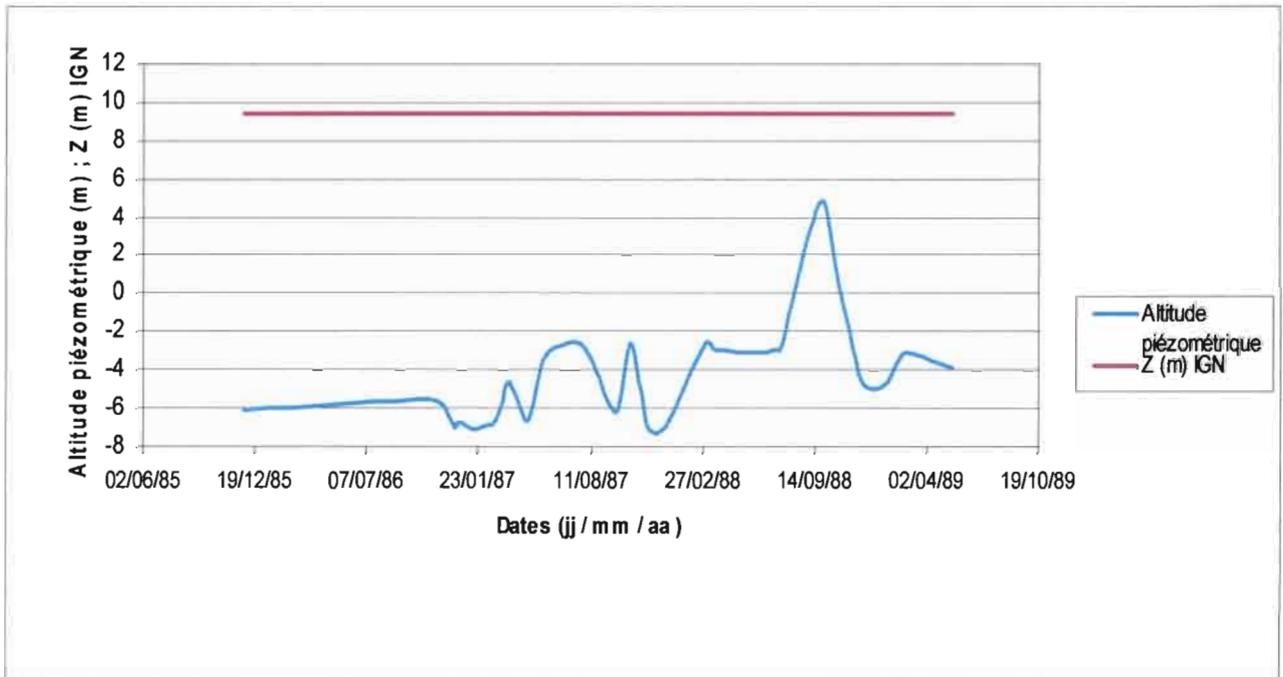


Figure 8 : Fluctuation de la nappe au GB0053

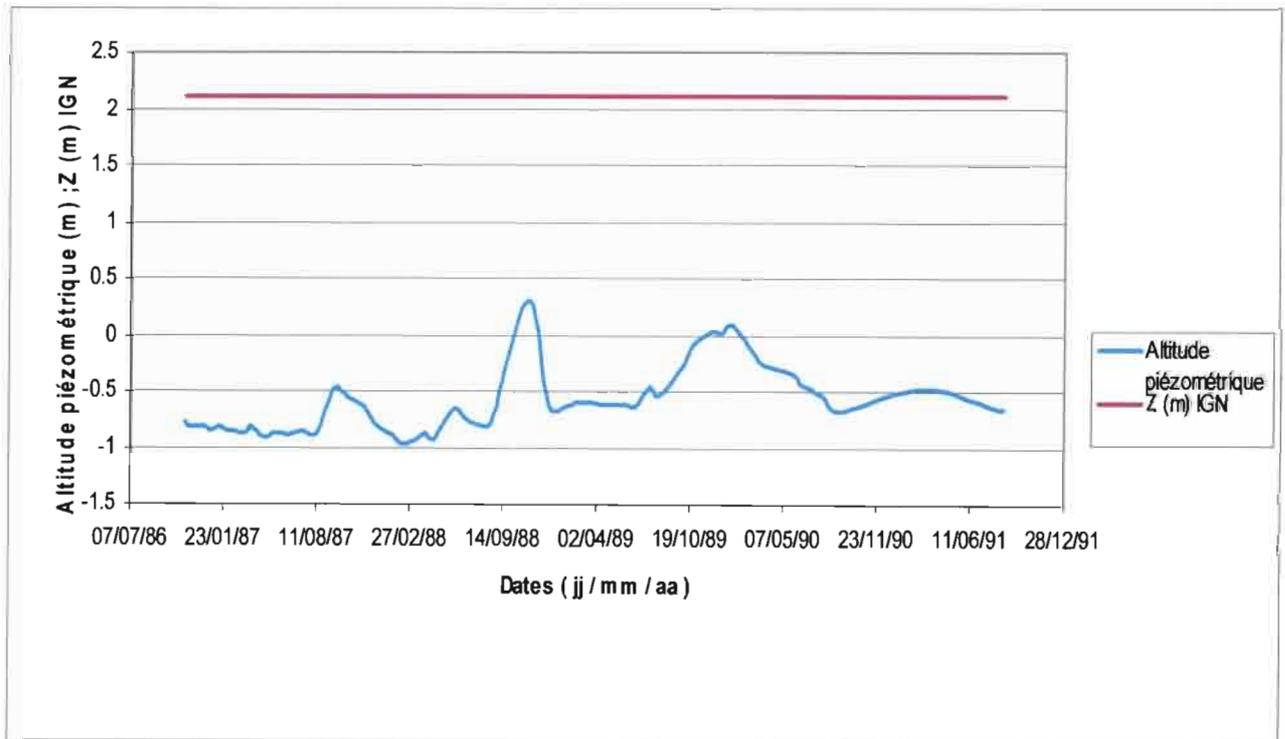


Figure 9 : Fluctuation de la nappe au GB0844

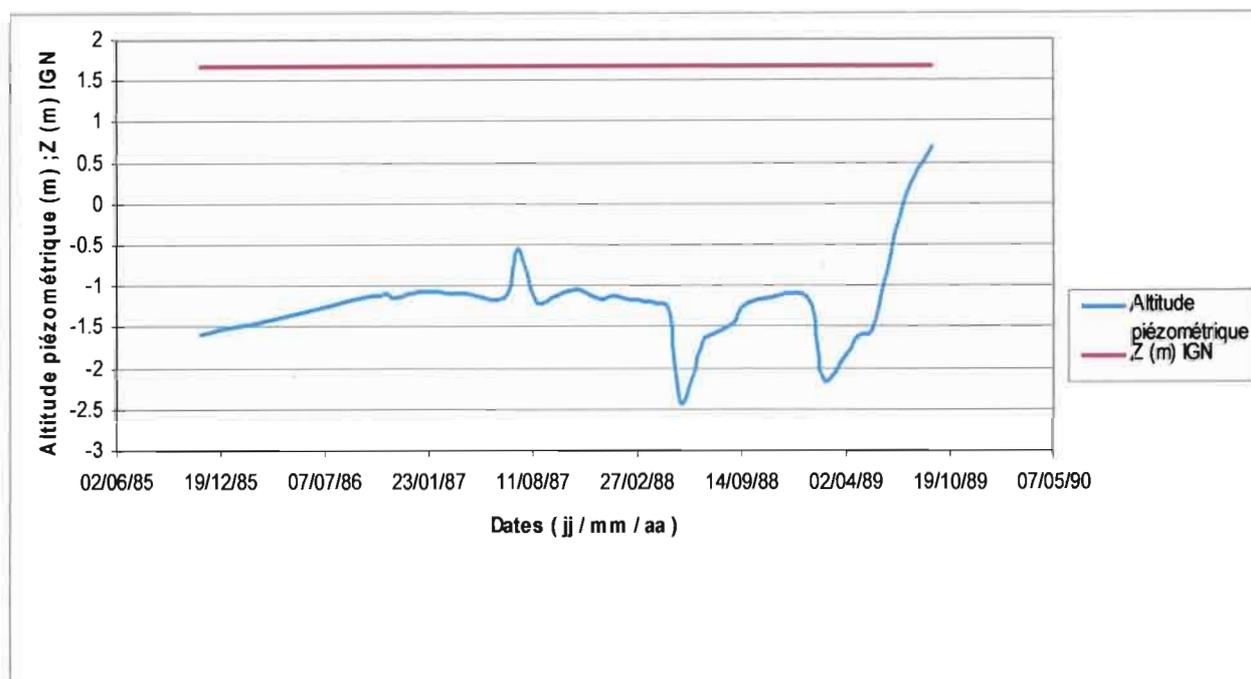


Figure 10 : Fluctuation de la nappe au GB0846

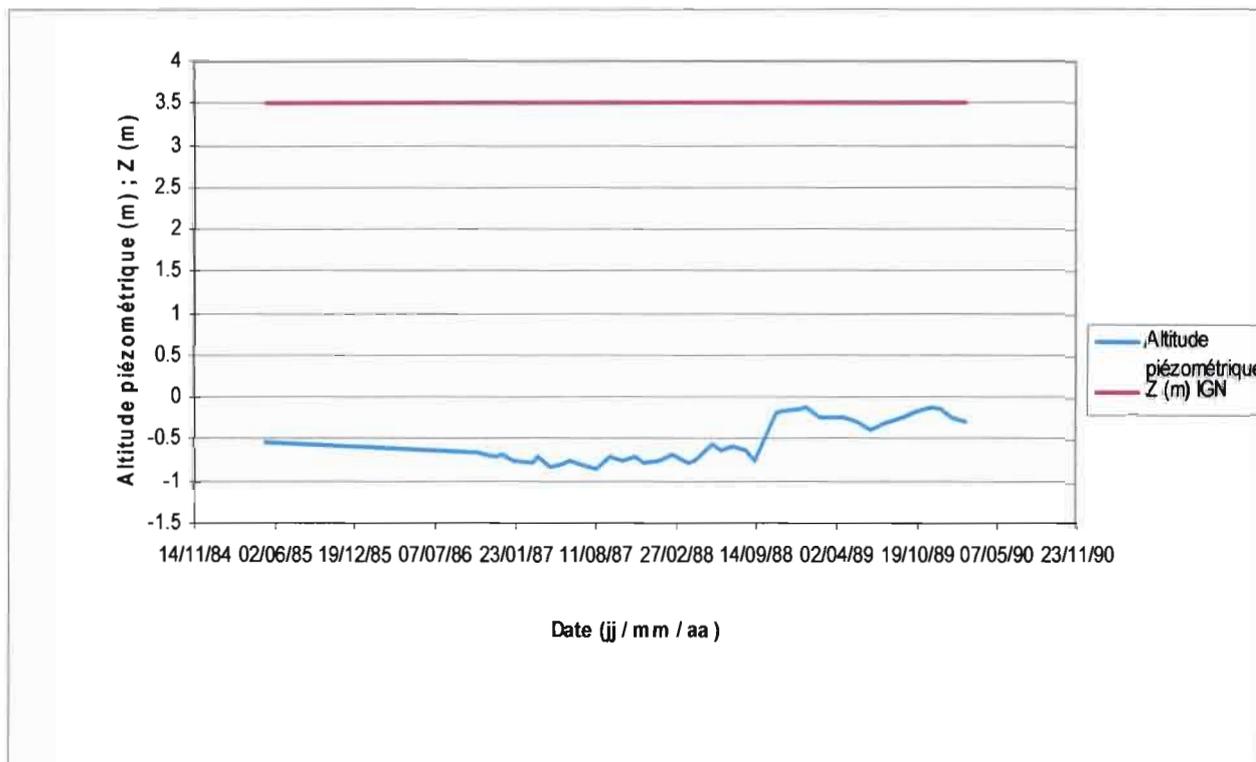


Figure 11 : Fluctuation de la nappe au GB0002

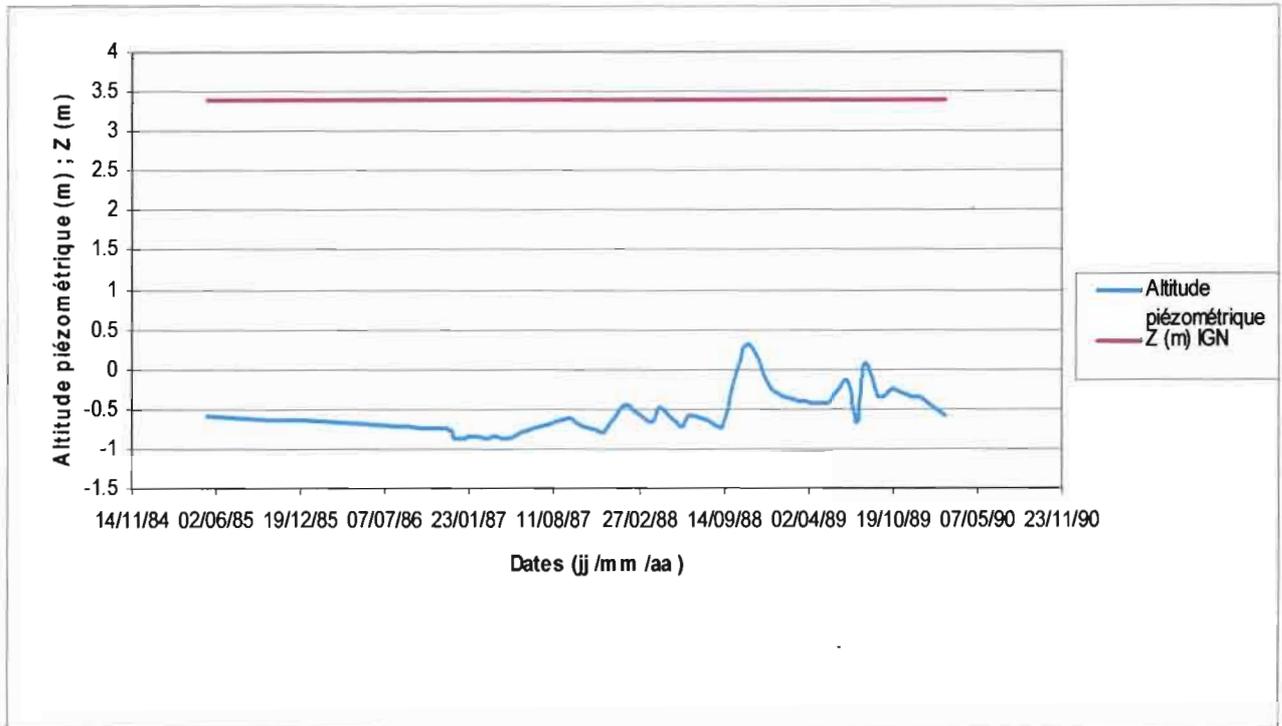


Figure 12 : Fluctuation de la nappe au GB0004

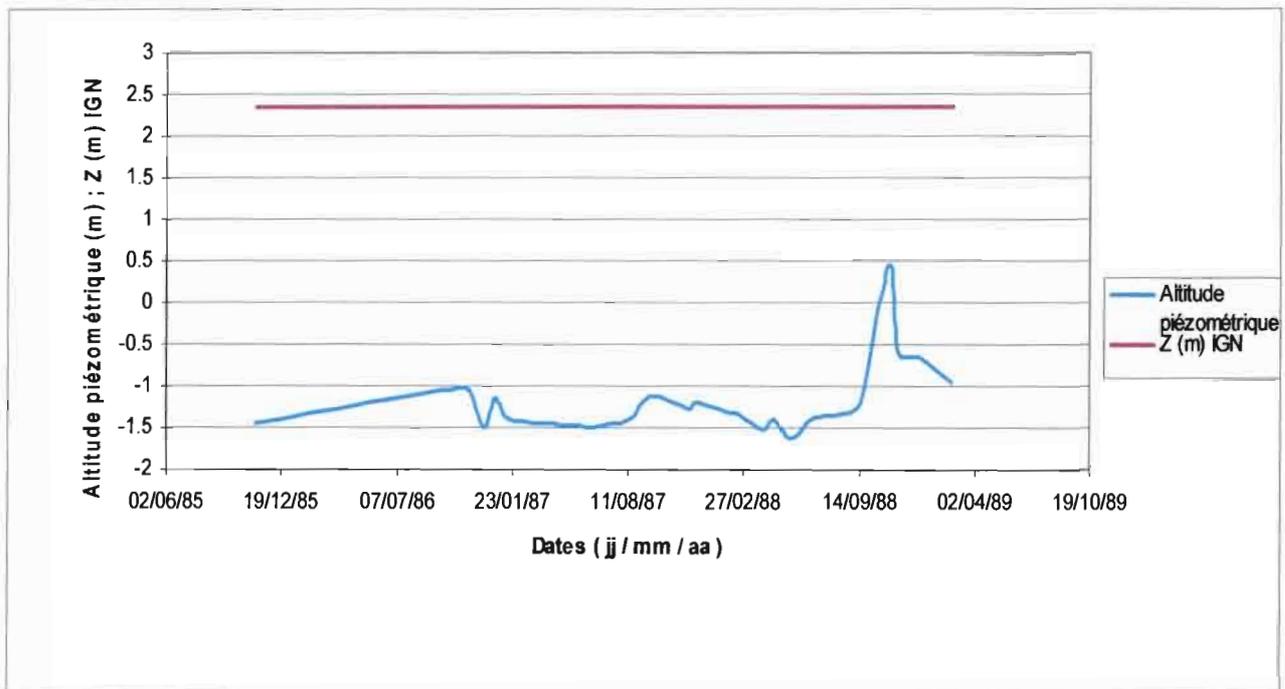


Figure 13 : Fluctuation de la nappe au GB0024

I.2.2.2. La chimie des eaux

Les eaux souterraines du delta du fleuve Sénégal sont fortement salées. En effet, lors des phases de transgressions et de régressions au cours du Quaternaire, les sédiments déposés sont incorporés de sel. Maintenant, 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 Nouakchottien se heurte à la mise en valeur des terres du Delta. La profondeur de la nappe par rapport au sol en 1987 et 2002 est variable dans la zone d'étude (Figure 14 et 15). Dans les zones de faible profondeur de la nappe, il y'a risque de remonté des eaux salées atteignant ainsi la zone racinaire et endommageant les plantes (NDIAYE, 1989).

En effet, l'alcalinisation par voie carbonatée conduit à la dispersion des argiles sodiques, qui s'accompagne d'une dissociation du complexe organo-minéral. Il y'a donc pertes de nutriments, diminution de la réserve en eau, et chute de perméabilité. Le travail du sol devient ainsi difficile avec les problèmes de levées des semis et un mauvais enracinement du riz. En outre, on note une baisse de la disponibilité de certains éléments dont le phosphore et le zinc. La matière organique peut aussi être solubilisée et se déposer à la surface du sol du fait des remontées capillaires.

Les conséquences de cette dégradation peuvent être dramatiques. On peut en effet distinguer différents aspects :

- Une augmentation du potentiel osmotique de la solution qui est à l'origine d'un stress hydrique et qui empêche la plante de s'alimenter correctement en eau,
- Une toxicité de certains ions spécifiques lorsqu'ils sont absorbés par la plante à une concentration préjudiciable,
- Du fait de l'évolution du pH, un blocage de certains éléments entraînant une carence induite en zinc et en phosphore pour la plante,
- Un changement de la dynamique de l'azote (volatilisation) et de la matière organique, conduisant à un problème nutritionnel pour la plante.

Ces conséquences chimiques sont préjudiciables au riz et leur importance est largement fonction de son stade de développement et de son mode d'implantation au champ (semis direct ou repiquage). Le stade juvénile est le plus sensible à la salinité. Une CE (conductivité électrique de l'eau) de moins de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ peut être suffisante pour affecter la survie des

plantules lorsqu'elles restent longtemps exposées aux sels (NDIAYE & GUINDO, 1998). En 1996, Dicko a pu montrer une relation précise entre le pH et le niveau de rendement des cultures. Les pH élevés correspondent aux rendements les plus faibles.

Le relevé des paramètres physico-chimiques de l'eau destinée à l'irrigation a été effectué pendant la campagne du vendredi 10 juin 2005. Ces mesures ont été faites depuis l'alimentation par le Gorom-Lampsar jusqu'au drainage de la lame d'eau des rizières. Ainsi, les résultats sur le pH, la conductivité électrique et la température de l'eau dans le Tawé, la prise, le canal de drainage secondaire, la lame d'eau dans les rizières et le drain sont consignés dans le **tableau 1** qui suit.

	Tawé	Prise d'eau	Canal secondaire	Lame d'eau rizières	Drain
pH	6.14	6.28	6.43	8.11	6.47
C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	72	76	71	1267	734
Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	31.8	30.9	31.1	31.8	29.1

Tableau 1 : Mesures de paramètres physico-chimiques du 10/06/2005

Par ailleurs, les analyses chimiques de pH et de conductivité électrique des échantillons au laboratoire en août 2004, donnent les résultats dans le tableau 2.

	Tawé	Prise d'eau	Nappe	Lame d'eau rizières	Drain
pH	6.94	7.20	6.62	7.02	6.56
C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	54.1	76.5	4402	59.5	278

Tableau 2 : Mesures de paramètres physico-chimiques du 02/08/2004

L'analyse de ces paramètres a permis de voir que la conductivité électrique de l'eau passe de 71 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans le canal secondaire à 1267 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans la lame d'eau des champs dont le pH est basique. Ceci est dû principalement au fait que la nappe très salée est en contact direct avec la surface topographique et influence directement la lame d'eau.

La comparaison des deux tableaux nous permet de dégager un certain nombre de remarques en ce qui concerne la chimie de l'eau. En effet, nous remarquons une hausse considérable de la conductivité électrique dans les échantillons sauf au niveau de la prise où elle est restée pratiquement constante. Toutefois, il faut voir que la conductivité est fonction de la température de mesure. Etant donné que les températures dans le tableau 2 ne sont pas disponibles. Nous pouvons prétendre en première approximation que la différence de conductivité peut être due à la différence de température de mesure. Cette hausse peut également être justifiée par le fait que la nappe très salée (conductivité de 4402 $\mu\text{S}/\text{cm}$) affleurait à la date du 10/06/2005 et influençait directement la lame d'eau de surface.

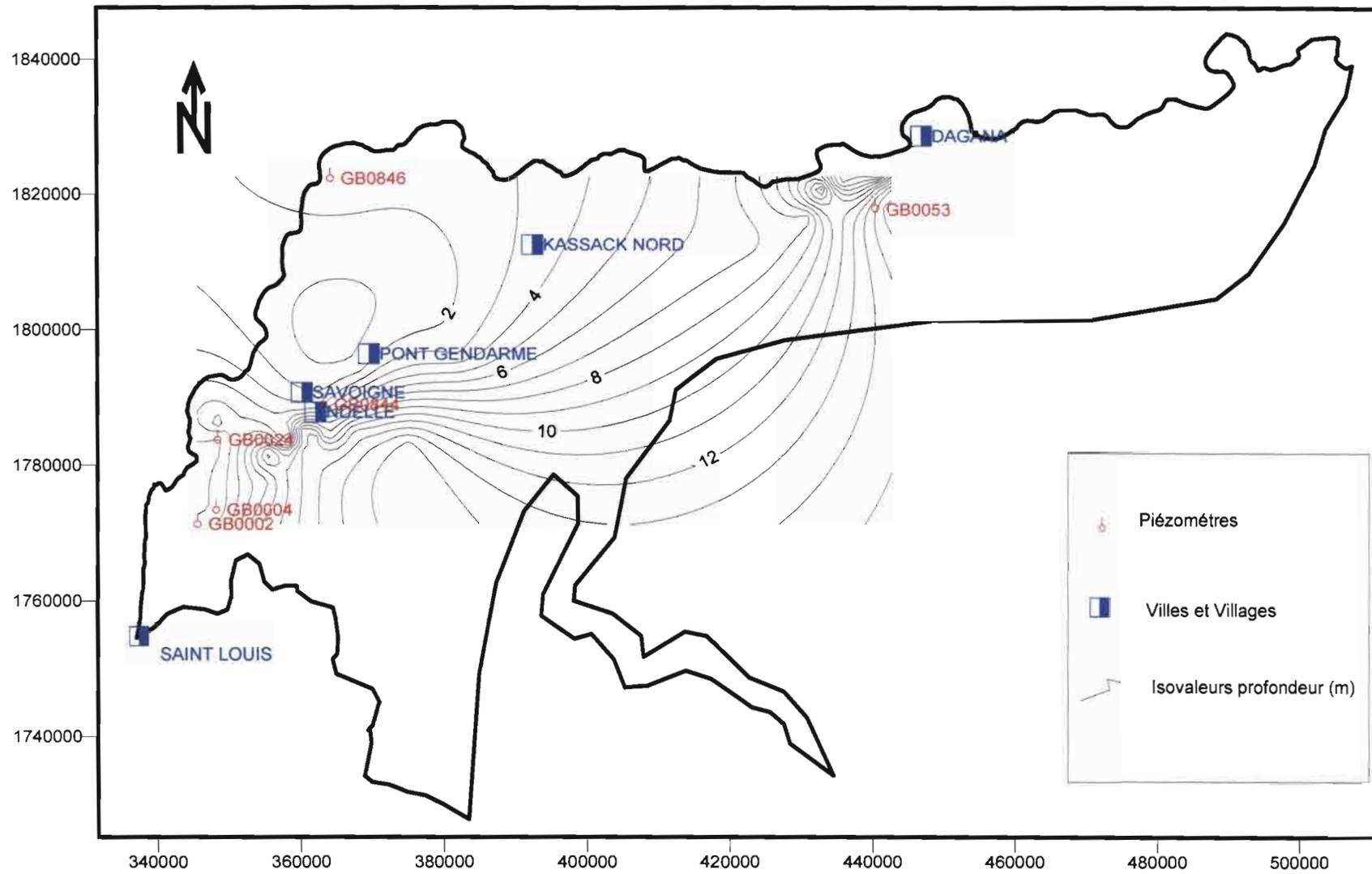


Figure 14 : Isovaleurs de profondeur de la nappe en 1987

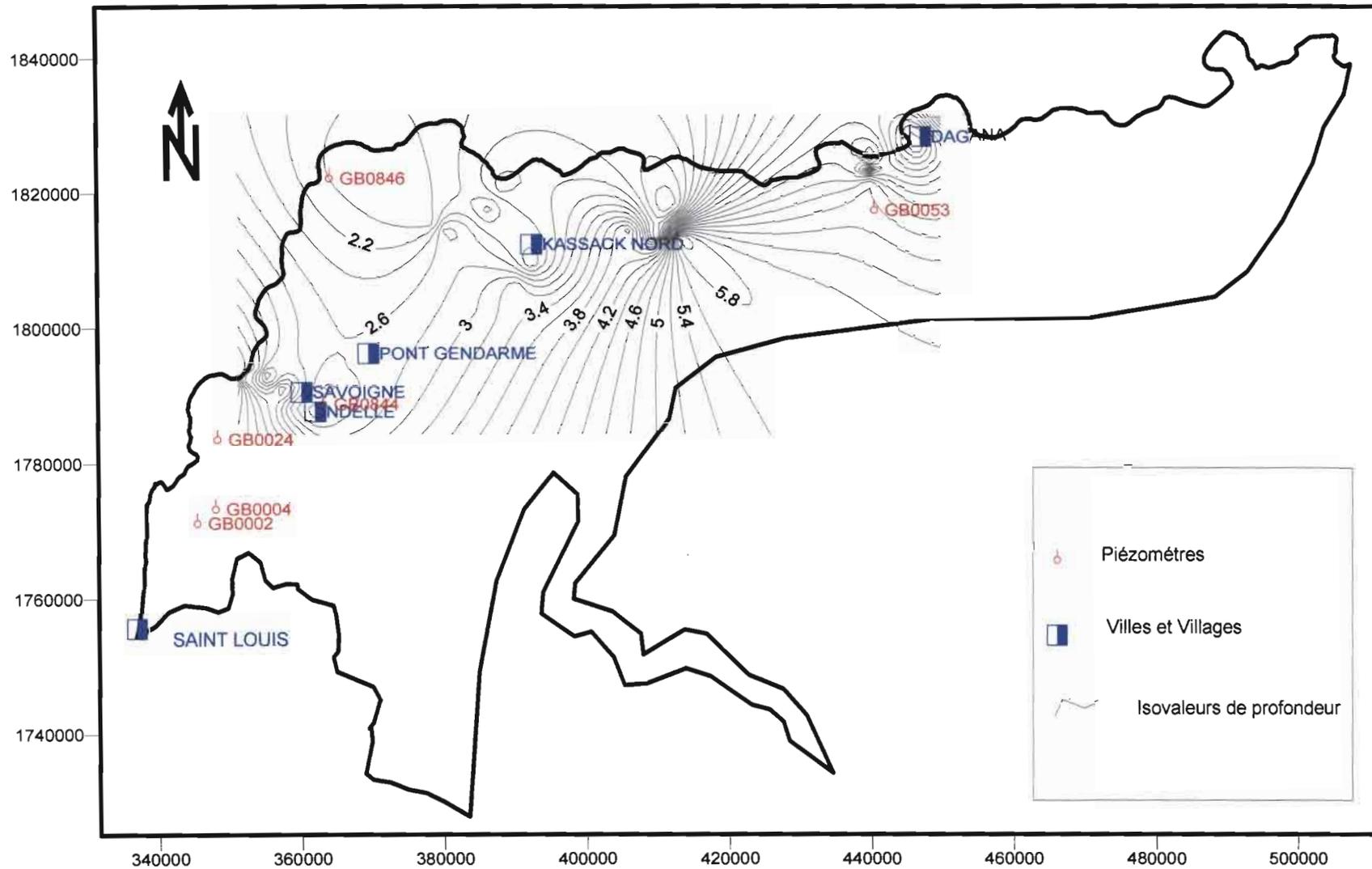


Figure 15 : Isovaleurs de profondeur de la nappe en 2002

I.2.2.3. Hydrodynamisme

La connaissance de l'hydrodynamisme de la nappe alluviale du Delta a été effective grâce à la mesure des niveaux piézométriques, qui est en fait, la seule donnée physique accessible sur le terrain. Les isopièzes aussi appelés hydro isohypses sont obtenus par la différence entre la côte du sol à l'ouvrage et la profondeur de l'eau dans l'aquifère. Ainsi, des cartes piézométriques ont été tracées grâce au logiciel Surfer 7.0

I.2.2.3.1 Outils de travail

Le logiciel Surfer utilise essentiellement la méthode géostatistique qui est par définition l'application de la théorie des fonctions aléatoires à l'estimation des variables régionalisées (V.R.). Elle a principalement deux objectifs :

- Estimer les caractéristiques structurales de la V.R. sous une forme mathématique convenable ;
- Résoudre le problème de l'estimation de la V.R. dans l'espace à partir d'un échantillonnage prélevé en quelques points.

En effet, tous les phénomènes qui se déploient dans l'espace unidimensionnelle, bidimensionnelle ou tridimensionnelle et/ou dans le temps en manifestant une certaine structure, sont dits régionalisés et décrits par des variables régionalisées. Ces dernières comportent deux aspects qui sont :

- Un aspect aléatoire marqué par une haute irrégularité et des variations imprévisibles d'un point à l'autre.
- Un aspect structuré reflétant les caractéristiques structurales du phénomène régionalisé.

Ainsi, presque toutes les variables descriptives en hydrogéologie peuvent être considérées comme des variables régionalisées.

Si nous considérons un phénomène régionalisé défini par une V.R. z . A tout point X_0 de l'espace on peut faire correspondre une variable aléatoire $Y(X_0)$. La valeur du phénomène en X_0 , $Y(X_0)$ est le résultat d'un tirage au sort effectué selon la loi de probabilité de Y . La variable régionalisée z peut être considérée comme une famille infinie de Variable Aléatoire (V.A.) $[z(X_i)]_{i=1, \dots, n} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$. Il lui est associé une fonction aléatoire (F.A.) $[Z(X_i)]_{i=1, \dots, n} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$. L'interprétation de la V.R $z(X)$ comme une F:A

$Z(X)$ va permettre d'utiliser les résultats de la théorie des fonctions aléatoires pour son estimation. Pour que cette théorie soit opérationnelle, il faut que l'on puisse reconstituer au moins une partie de la loi de la F.A. $Z(X)$. Or une seule réalisation de la F.A est connue : la variable régionalisée $z(X)$. Il faut donc introduire une hypothèse de stationnarité réduisant le nombre de paramètres dépendant de la loi de la F.A $Z(X)$. La stationnarité implique une invariance par translation c'est à dire que la F.A $Z(X)$ et sa translatée de vecteur h , $Z(X+h)$ ont la même loi.

Ainsi nous avons essentiellement la géostatistique stationnaire et la géostatistique non stationnaire :

- En général, l'hypothèse de stationnarité n'est pas pleinement vérifiée par la F.A $Z(X)$. Elle est donc remplacée par une hypothèse moins forte dite intrinsèque qui nécessite l'invariance par translation des accroissements du type $Z(X+h) - Z(X)$. Ainsi pour tout vecteur h , l'accroissement admet une espérance et une variance indépendante du point d'appui X et ne dépendant que de h .

$$E [Z(X+h) - Z(X)] = 0$$

$Var [Z(X+h) - Z(X)] = 2*\gamma(h)$ où la fonction $\gamma(h)$ est la variogramme évaluée comme la valeur moyenne des carrés des différences de valeurs entre points séparés par la distance h .

En pratique, la variogramme est calculée par la formule suivante :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i+h) - Z(X_i)]^2 \text{ où } N(h) \text{ est le nombre de couple de points}$$

séparés par la distance h . Les figure 16 et 17 donnent les variogrammes pour les données 1987 et 2002

- Au niveau de la non stationnarité, on définit les accroissements généralisés d'ordre k qui filtrent les polynômes d'ordre inférieur à k . La F.A. Z mesurée en n points de coordonnées X_i et n poids λ_i , la combinaison linéaire $Z(\lambda) = \sum_i \lambda_i Z(X_i)$ est un accroissement généralisé d'ordre k si et seulement si :

$$\sum_i \lambda_i f^I(X_i) = 0 \quad I = 0,1,\dots,\dots,\dots, k-1. \text{ avec } f^I \text{ monôme d'ordre } I$$

Les covariances généralisées polynomiales $K(h)$ sont définies comme des combinaisons linéaires des monômes $\delta, -h, h^3, -h^5$. avec δ la fonction de Dirac.

Dans le modèle constitutif, la V.R $z(X)$ est considérée comme une réalisation de la F.A I d'ordre k et de covariance généralisée $K(h)$ connue. Considérons l'estimation de la valeur inconnue $Z(X_0)$ en un point X_0 par la combinaison linéaire des valeurs observées en des

points X_a , $Z^*(X_0) = \sum_a \lambda_a Z(X_a)$. En plaçant les conditions appropriées sur les poids, nous pouvons assurer une erreur d'estimation $Z^*(X_0) - Z(X_0)$ qui est un accroissement généralisé d'ordre k . Donc la variance peut être exprimée en fonction de la covariance $K(h)$. Ainsi, la minimisation de la variance de $[Z^*(X_0) - Z(X_0)]$ sous les contraintes de non biais, donne un système de krigeage et la variance de krigeage est donnée par : $\sigma k^2 = K(0) - \sum_a \lambda_a K(X_a - X_0) + \sum_l \mu^l X_0^l$ en géostatistique non stationnaire et $\sigma k^2 = K(0) - \sum_a \lambda_a \gamma(h)(X_a - X_0) + \mu$ en géostatistique stationnaire.

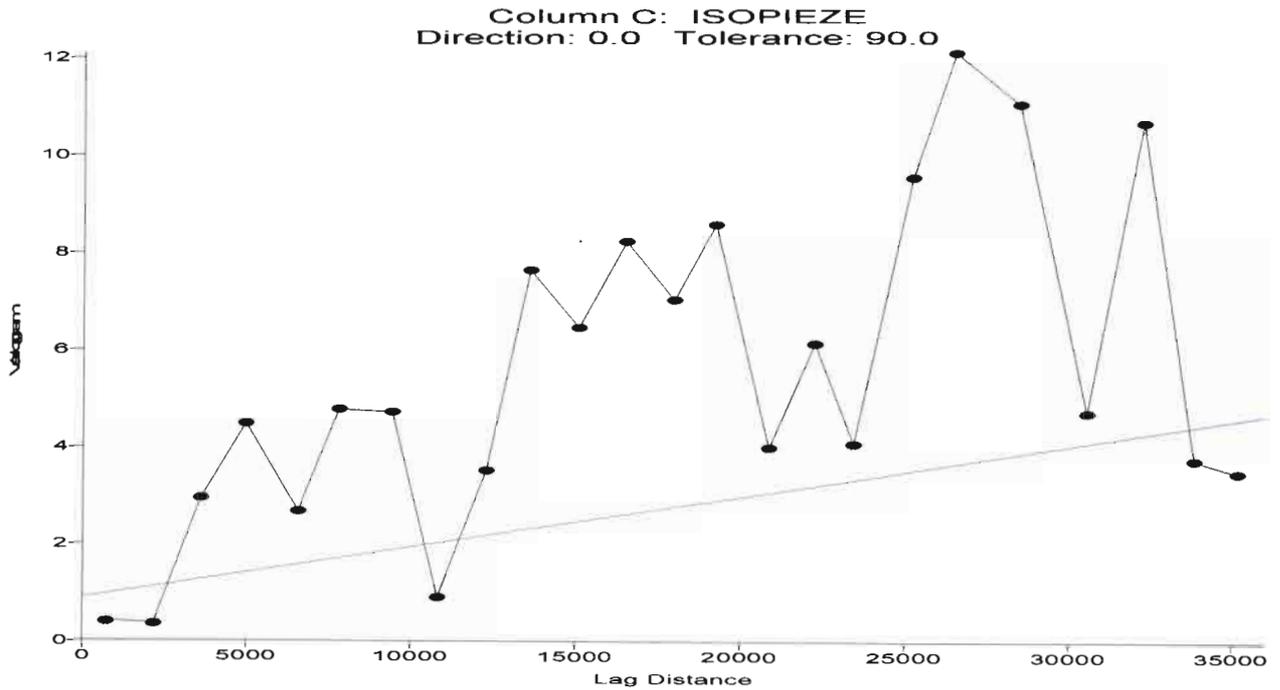


Figure 16 : Variogramme des données de 1987.

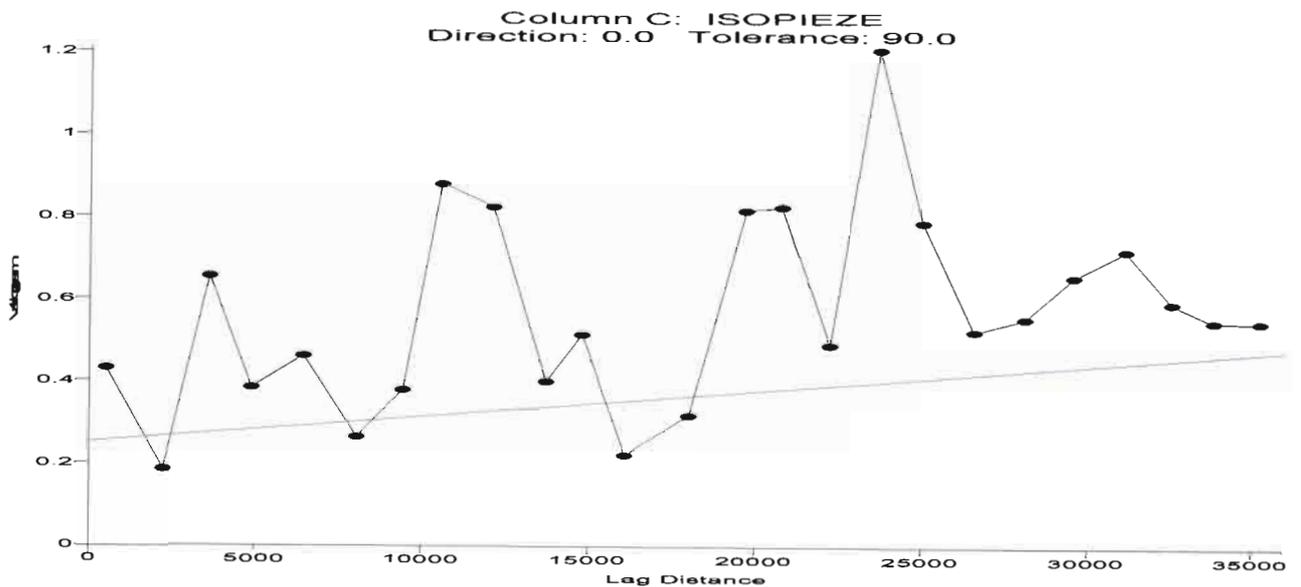


Figure 17 : Variogramme des données de 2002

Avec le logiciel Surfer 7.0, l'interpolation spatiale des grandeurs à distribution à partir de valeurs discrètes en un certain nombre de points est assurée.

En effet, Surfer est un outil de tracé de contours et de surface en 2D et 3D. Il convertit les fichiers ASCII ou les tables de calcul en cartes et surfaces.

Lors de l'élaboration de ces courbes isocontours, Surfer procède par krigeage. Le krigeage est une méthode d'interpolation qui permet de déterminer la meilleure distribution spatiale à partir d'un ensemble de valeurs discrètes. Elle doit intervenir normalement après une étude géostatistique des données. Faute d'une analyse géostatistique, nous avons utilisé, pour le krigeage, le modèle linéaire proposé par défaut dans Surfer 7.0.

Nous étudierons essentiellement deux réseaux piézométriques de tailles différentes :

- Le réseau régional actuellement suivi par la S.A.E.D. et inscrit dans le cadre du projet O.M.V.S. / U.S.A.I.D. avec plus de 200 puits et piézomètres repartis dans le Delta.
- Le réseau local mis en place dans le cadre du projet GORE-DELTA.

I.2.2.3.2. Réseau régional

Depuis un certain moment, le réseau régional est caractérisé par une absence et une irrégularité de données dues tantôt par une défektivité des ouvrages tantôt par un manque de suivi correct (un relevé par an). Pour cela, nous avons décidé de travailler surtout sur les données de 1987 et 2002 (Annexe). La première parcequ'elle regroupe les données les plus complètes et la deuxième parcequ' étant constituée des données les plus récentes.

Les cartes piézométriques ont été tracées à partir de valeurs krigées des points de la maille avec un voisinage composé des 5 points les plus proches. Il faut noter cependant, une mauvaise répartition des piézomètres qui sont regroupés pour la plupart à l'Ouest et un peu à l'Est près de Dagona. Ce qui peut affecter les résultats de krigeage. L'interprétation comparative de ces cartes piézométriques de 1987 (figures 18 ; 19) et 2002 (figures 20 ; 21) révèle une nette différence entre les deux. En effet, les isopièzes de 1987 sont carrément au dessous du niveau moyen de la mer sauf vers le Nord près du pont gendarme et du fleuve où ces valeurs avoisinent celles de la mer. Les valeurs les plus élevées ont été observées sur l'axe Sud-Ouest et Nord avec des niveaux piézométriques de + 0,5 m IGN. L'écoulement se fait principalement sur une direction Nord Sud-Est avec la présence d'une dépression piézométrique près de la cuvette de Ndéllé. Il ressort par ailleurs de la carte que la zone du Delta ne présente pas de sous bassin hydrogéologique. Donc il est constitué d'un seul bassin

dans son ensemble car aucune ligne de partage nette des eaux n'est constatée. L'écoulement se faisant vers les cours d'eau (le fleuve Sénégal), montre que la nappe est drainée par le fleuve sauf de Kassack Nord à Dagana où le fleuve est drainé par la nappe. Ce qui peut expliquer le niveau très élevé de la nappe au GB0053. Le lac de Guiers ne présente aucune relation avec la nappe due éventuellement au colmatage des rives.

Par contre pour les isopièzes de 2002, on remarque une hausse de niveau qui en générale reste au dessus du niveau moyen de la mer avec des valeurs pouvant aller jusqu'à + 0.6 m IGN. On voit donc qu'après 15 ans, la piézométrie de la nappe alluviale du Delta a beaucoup évoluée avec une remonte considérable du niveau. L'écoulement se poursuit dans la même direction avec l'apparition de dômes piézométriques près du fleuve et à Kassack Nord ce qui prouve que la nappe est actuellement alimentée par le fleuve.

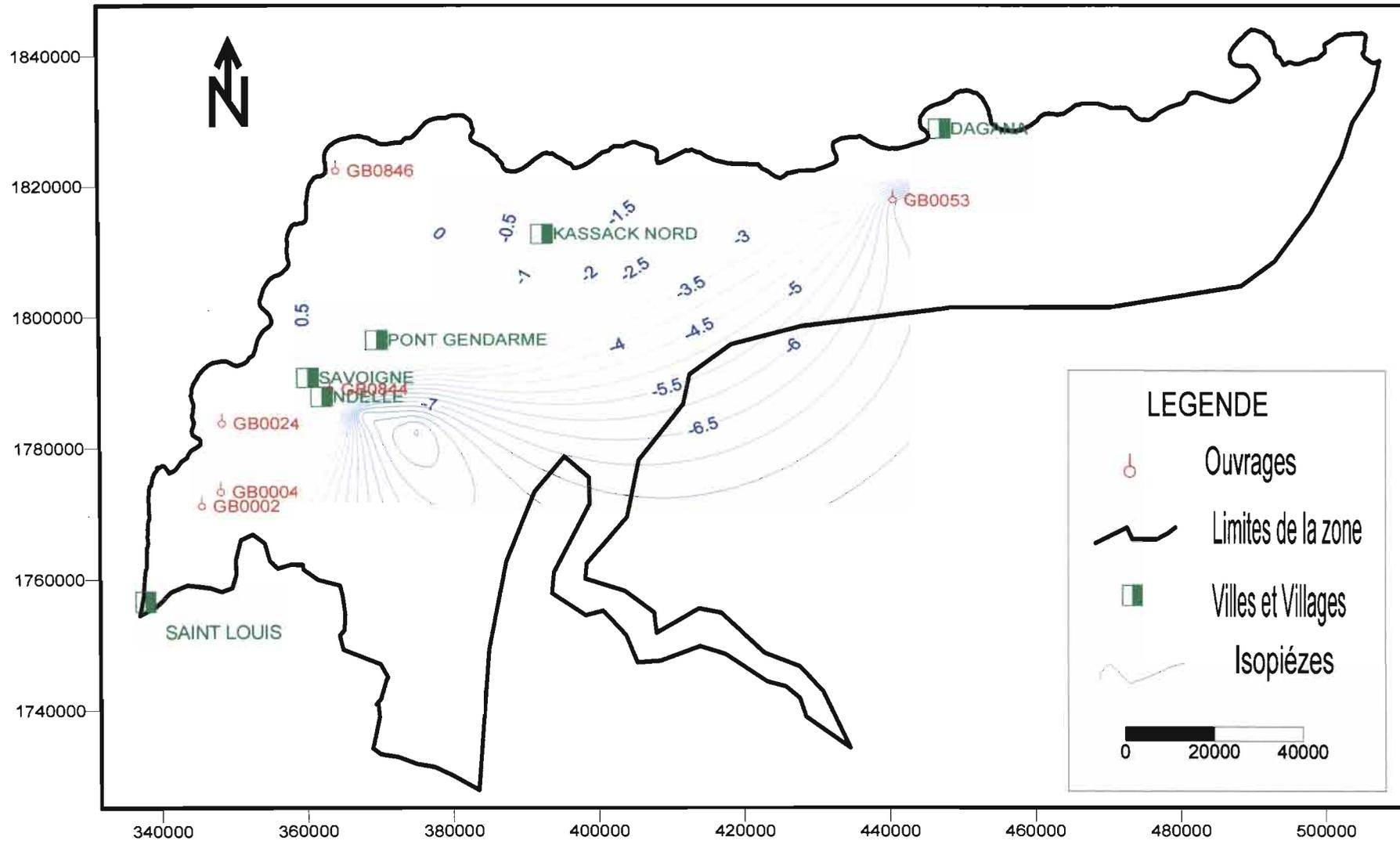


Figure 18 : Carte piézométrique 1987

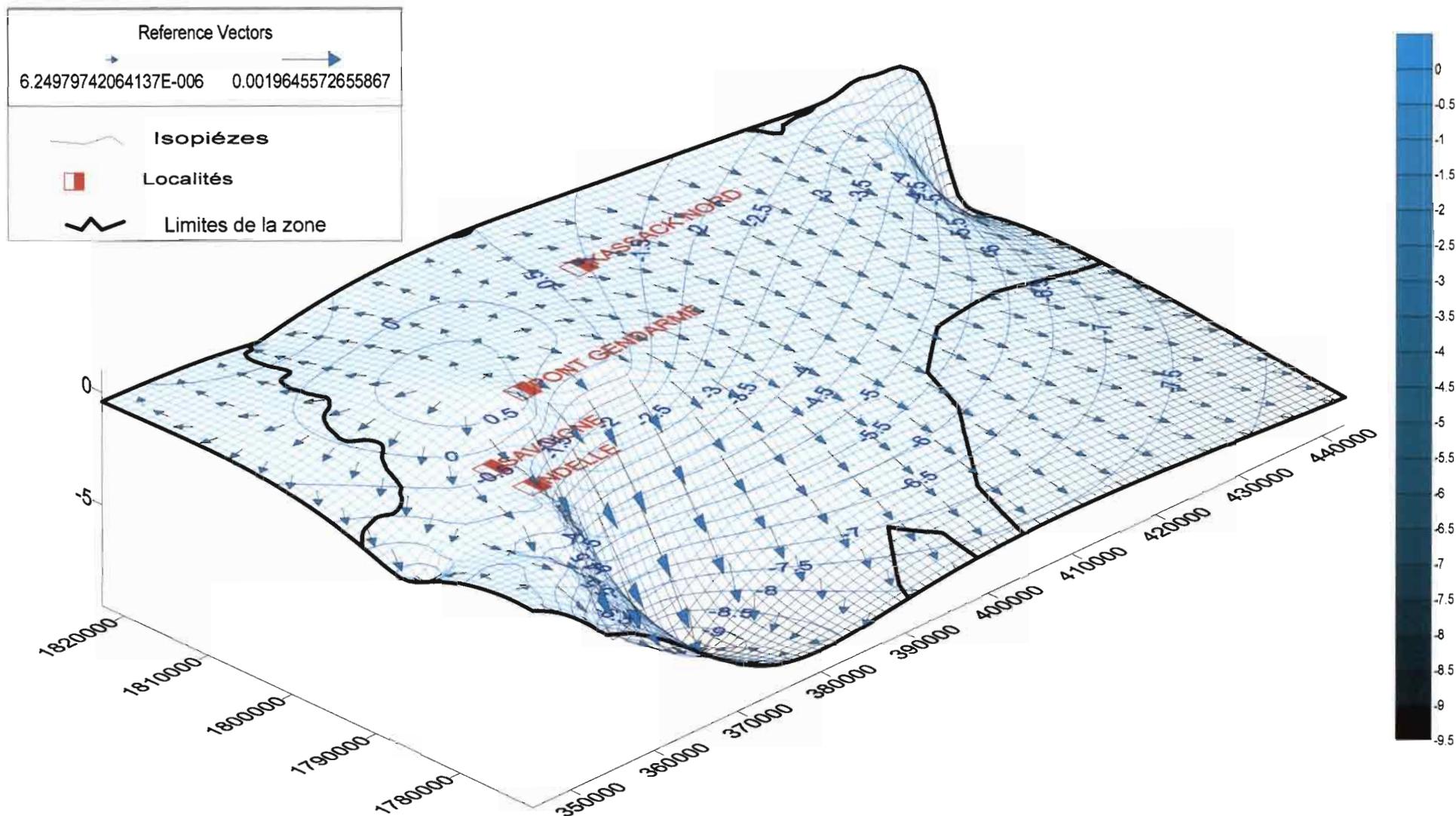


Figure 19 : Carte piézométrique 1987

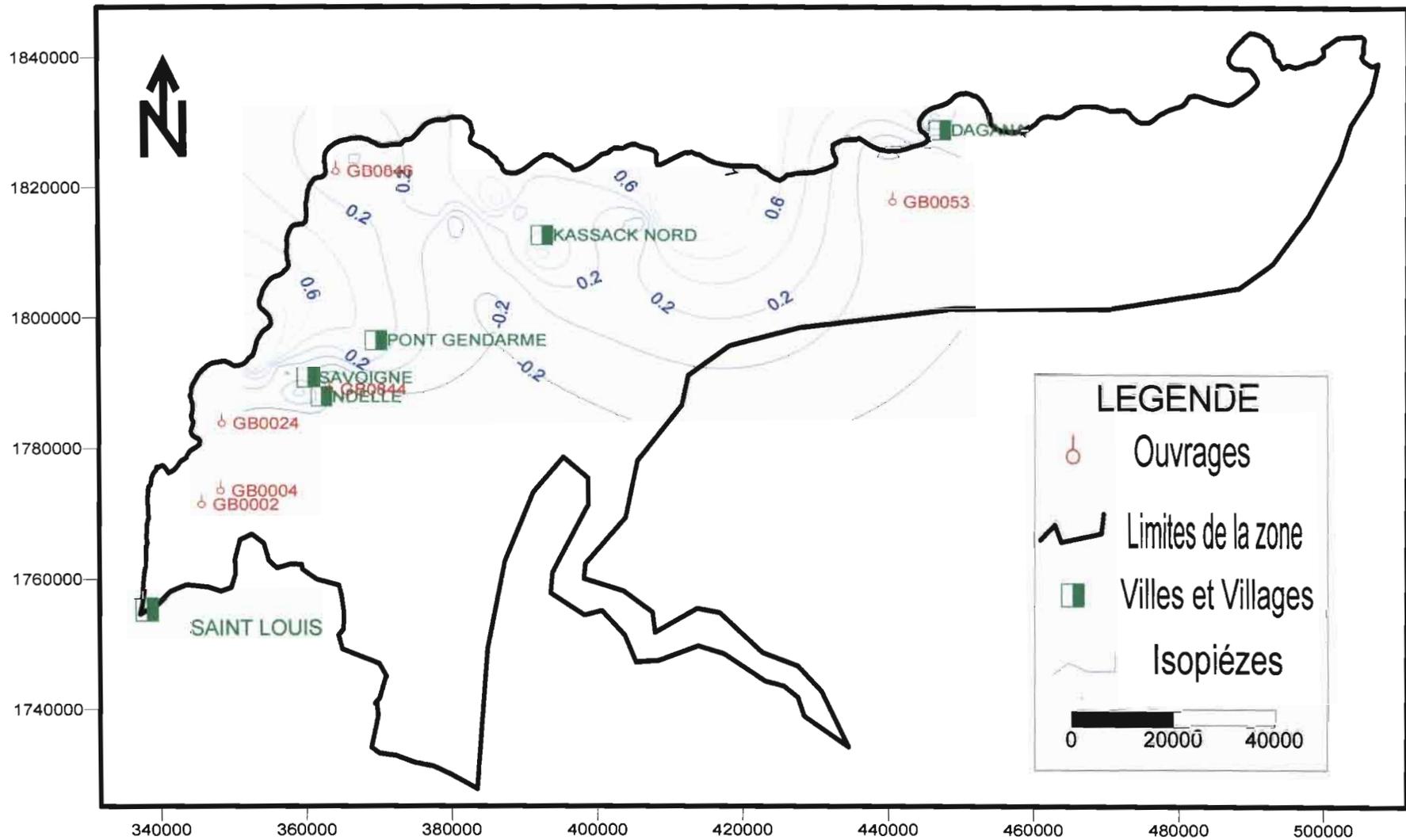


Figure 20 : Carte piézométrique 2002

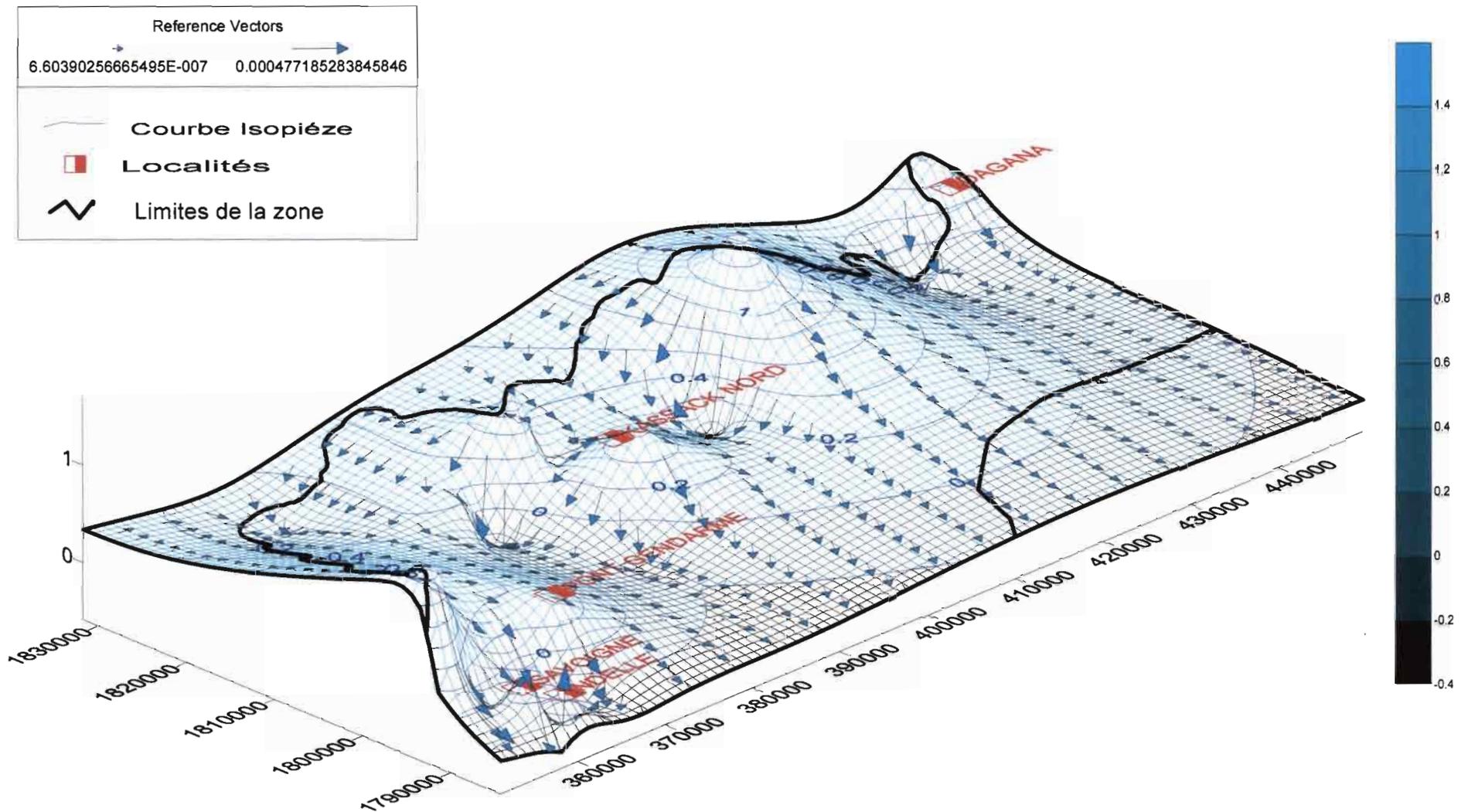


Figure 21 : Carte piézométrique 3D en 2002

I.2.2.3.3. Réseau local

Le réseau local, caractérisé par l'implantation de neuf (9) piézomètres dans la cuvette de Ndellé et suivis dans le cadre du projet GORE-DELTA n'a pas pu être étudié à défaut de nivellement. En effet la campagne menée le vendredi 10 juin 2005 n'a pas abouti car tous les piézomètres installés ont été enlevés. A cause de cela, nous n'avons pas pu étudier la piézométrie locale. Cependant, nous nous intéresserons à la profondeur de la nappe au niveau des piézomètres locaux dont les résultats sont tirés du rapport de SIDIBE, 2004.

IDOUV	X (m)	Y (m)	Profondeur 15 avril 2004 (m)	Profondeur 30 mai 2004 (m)	Margelle (m)
CN1	361402	1787688	1.09	1.31	0.46
CN2	361393	1787749	1.18	1.10	0.51
CN3	361444	1787766	0.80	0.90	0.28
CN4	361456	1787713	1.40	1.30	0.49
CN5	361424	1787732	1.22	1.26	0.60
CN6	361325	1787328	1.32	-	0.52
CN7	361022	1787734	1.12	0.81	0.56
CN8	361290	1788537	0.34	0.25	0.41
CN9	362483	1789413	1.44	1.12	0.82
Stat. Pomp.	360971	1787536	0.50	0.50	0.50

Tableau 3 : Mesures de profondeur de la nappe des journées du 15 avril et 30 mai 2004

De ces valeurs, nous avons tracé les isovaleurs de profondeur de la nappe au niveau de la cuvette de Ndellé.

Nous notons que les profondeurs les plus faibles sont situées au environ du piézomètre CN8 avec une valeur de 0.35 m. Ceci s'explique par le fait que pendant cette période, la culture du riz avait débuté et la nappe en contact direct avec les eaux d'irrigation. Toutefois, les profondeurs ne dépassent que rarement des valeurs de 1.30 m.

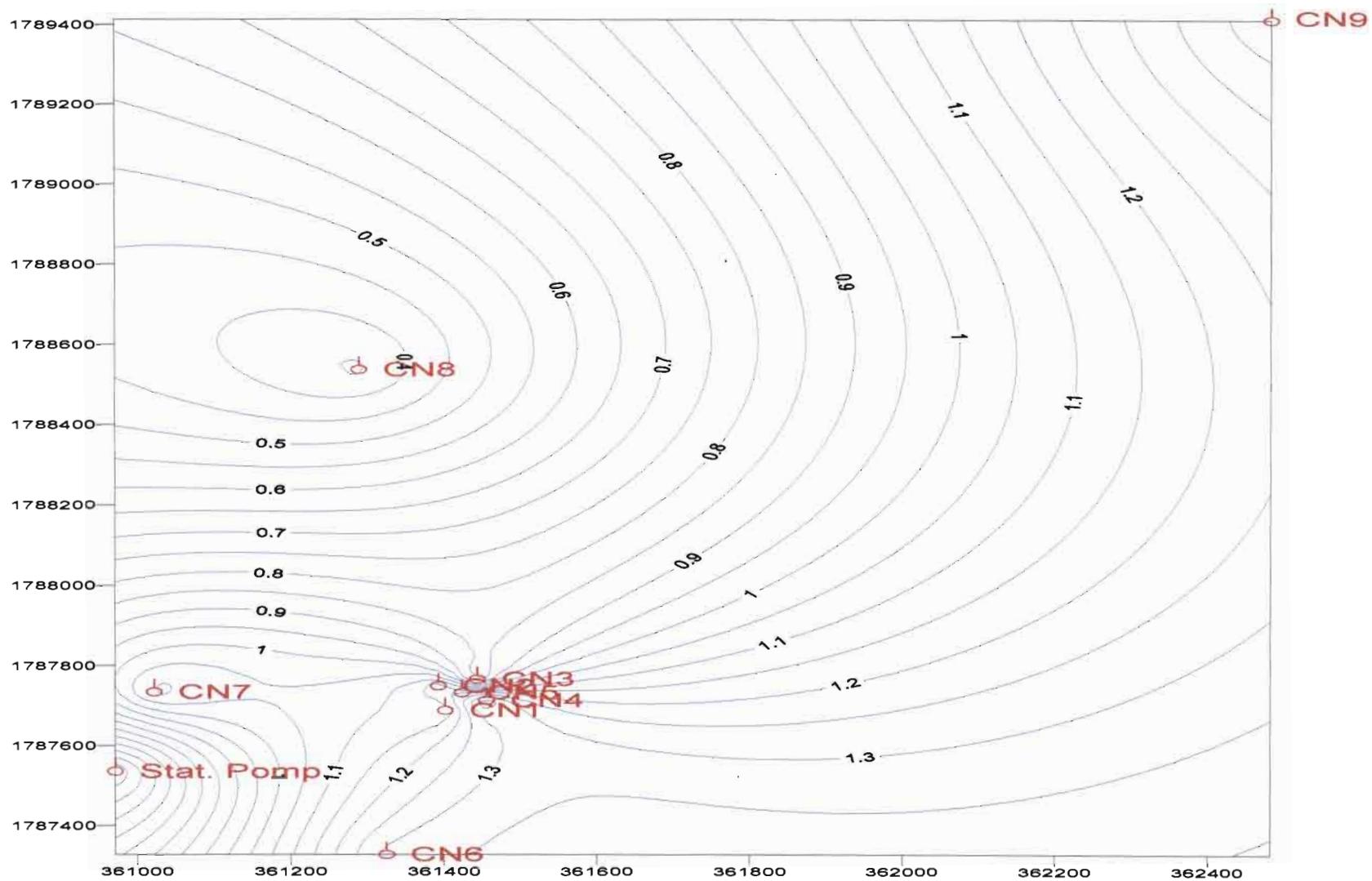


Figure 22 : Carte d'isovaleurs de la profondeur de la nappe dans la cuvette de Ndellé

II. ETUDE DE LA NAPPE ALLUVIALE DU DELTA DU FLEUVE SENEGAL

II. ETUDE DE LA NAPPE ALLUVIALE DU DELTA DU FLEUVE SENEGAL

II.1 _ Les données disponibles

II.1.1. Bilan des données disponibles

Les données que nous avons utilisés pour cette étude proviennent essentiellement de la base de données O.M.V.S. dans le cadre du projet O.M.V.S. / U.S.A.I.D.(1990) et des données de terrains dans le cadre du projet GORE-DELTA (2004).

II.1.1.1. Projet O.M.V.S. / U.S.A.I.D.

L'O.M.V.S. (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal) s'est dotée entre 1985 et 1988 de deux barrages :

- Le barrage de Diama, à 26 km au nord de Saint Louis, a été mis en opération en novembre 1985.

Il a pour but de :

- empêcher l'intrusion des eaux salines de la mer pendant l'étiage,
- créer un lac de retenue d'eau douce en amont du barrage,
- permettre les inondations, permanentes ou saisonnières, des dépressions dans le Delta et la basse vallée, en particulier le lac de Guiers, le lac R'kiz et l'Aftout-es-Saheli.
- Le barrage de Manantali sur le bafing, à 90 km au sud est de Bafoulabé, a été achevé en 1988.

Le barrage a pour but de :

- normaliser le débit du fleuve, et garantir un débit minimal à Bakel de 300 m³/s pendant toute l'année.
- Permettre l'irrigation pendant toute l'année sur 375 000 ha, grâce aux possibilités conjuguées des deux barrages.
- Permettre la navigation sur le fleuve pendant toute l'année en aval de Kayes.

Avec le financement de U.S.A.I.D. (United States Agency for International Development), l'O.M.V.S. a mis en place un vaste projet de surveillance hydrogéologique de la nappe alluviale du Delta du fleuve Sénégal dont les objectifs sont entre autre d'étudier :

- les phénomènes de remontée de la nappe d'eau salée dans les limites des périmètres hydroagricoles en particulier en aval de Podor ;
- le mécanisme de recharge naturelle des l'aquifères sous-jacents à la vallée du fleuve Sénégal ;
- l'impact de l'exploitation des barrages de Diama et Manantali sur les ressources en eau souterraines ;
- les potentialités hydrogéologiques des réservoirs aquifères.

Ce projet concerne l'ensemble de la vallée alluviale avec 569 piézomètres et 582 puits villageois. Ils sont distribués grossièrement à raison de 1 piézomètre court par ha et 1 piézomètre double ou triple par 100 km². Ces derniers permettent de recouper les différents réservoirs aquifères. Donc sur un même site, il peut y avoir 2 à 3 piézomètres.

II.1.1.2 Projet GORE-DELTA

Implantés dans la cuvette de Ndellé, les neuf (9) piézomètres du projet GORE-DELTA vont permettre le suivi local de l'aquifère. La répartition de ces piézomètres est faite de la manière suivante sur le site après une tournée sur les terres agricoles.

- 5 piézomètres sont installés sur une parcelle d'exploitation en double culture : maraîchère en contre-saison sèche ou froide et rizicole en hivernage
- 1 piézomètre sur une parcelle voisine de la précédente mais en jachère depuis deux ans et non soumis à l'irrigation.
- 2 piézomètres placés le long du canal principal d'irrigation ; le premier est situé à quelques dizaines de mètres de la station de pompage et le second un peu plus vers l'intérieur des terres.
- 1 piézomètre est positionné au niveau du canal principal de drainage à la limite des périmètres de la cuvette.

Toutefois, une réserve de 5 piézomètres est faite afin de servir en complément ou en remplacement en cas d'éventuelle défectuosité (SIDIBE, 2004).

II.1.2. Analyse critique de la banque de données O.M.V.S. / U.S.A.I.D.

II.1.2.1. La profondeur de l'eau

La nappe alluviale du Delta est peu profonde et fluctue de manière considérable surtout pendant la saison des pluies durant laquelle elle atteint pratiquement le niveau du terrain naturel. Du fait de la nature très salée de l'eau, cette remontée peut être à l'origine d'endommagement des plantes et ainsi provoqué une baisse de rendement des cultures.

II.1.2.2. La qualité chimique

Les conductivités électriques très fortes mesurées dans la nappe montrent que celle-ci est une eau très minéralisée. Les pH sont basiques avec des valeurs pouvant atteindre 8.11. Ceci montre que toutes cultures pratiquées dans le Delta doivent être suivies avec beaucoup de précaution. Cela passe par une surveillance accrue de la nappe qui fluctue énormément pour éviter une resalinisation des terres.

II.1.2.3. La salinité

La connaissance de la profondeur et de la salinité de la nappe du delta (de 5 à 20 dS/m) a permis d'estimer les apports de sels (environ 1 à 4 tonnes/an.ha) en fonction de l'ascension capillaire et de l'intensité culturale. En effet, une évacuation des sels solubles présents en grand nombre dans la plupart des sols du Delta est nécessaire pour la mise en valeur des terres. Cette évacuation doit se faire de manière continue car pendant la saison sèche, l'eau chargée de sels monte de la nappe vers la surface entraînant une resalinisation des sols. Ce qui est à l'origine de la différence d'apport entre un terrain de culture intensive (2 cultures / an) et un terrain avec une seule culture par an. Nous remarquons donc que pour un même taux de salinité, l'apport est plus important dans le cas d'une culture/an que dans le cas de double culture. Ceci est dû à la différence de période non culturale soumise aux deux types de terrains. Dans les figures 23 et 24 suivantes, sont consignées les résultats des études faites dans le cadre du projet gestion en eau.

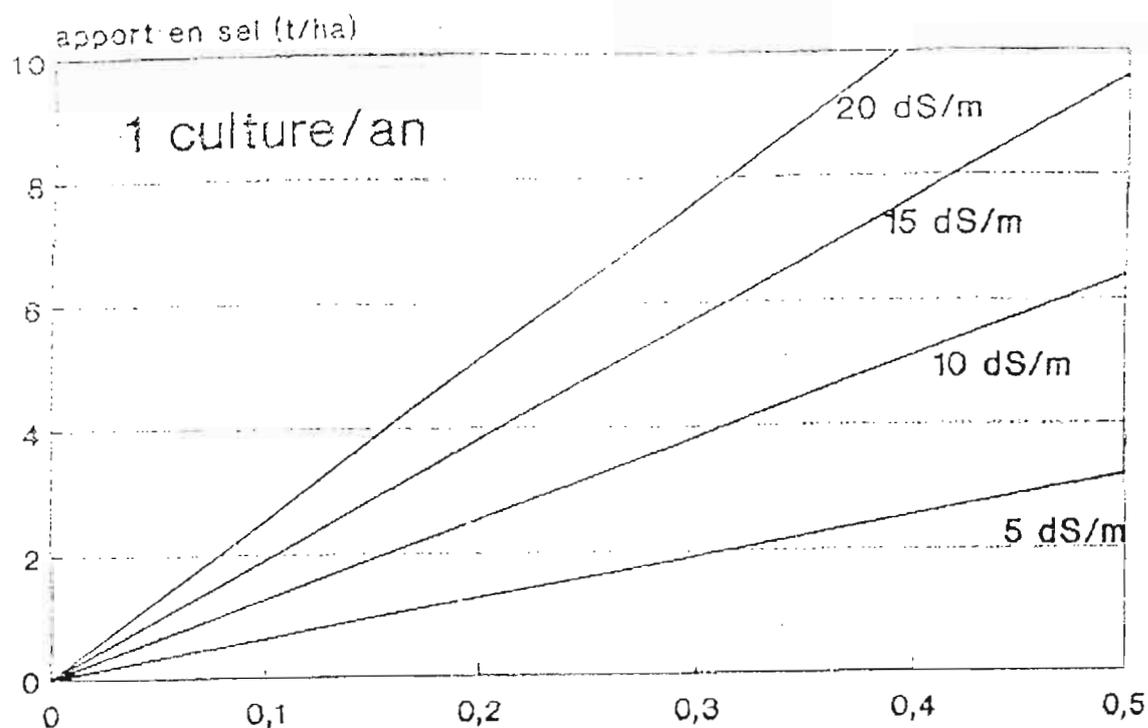


Figure 23 : Apport en sel par ascension capillaire (mm/j) pour différents taux de salinité de la nappe (1 culture/an)

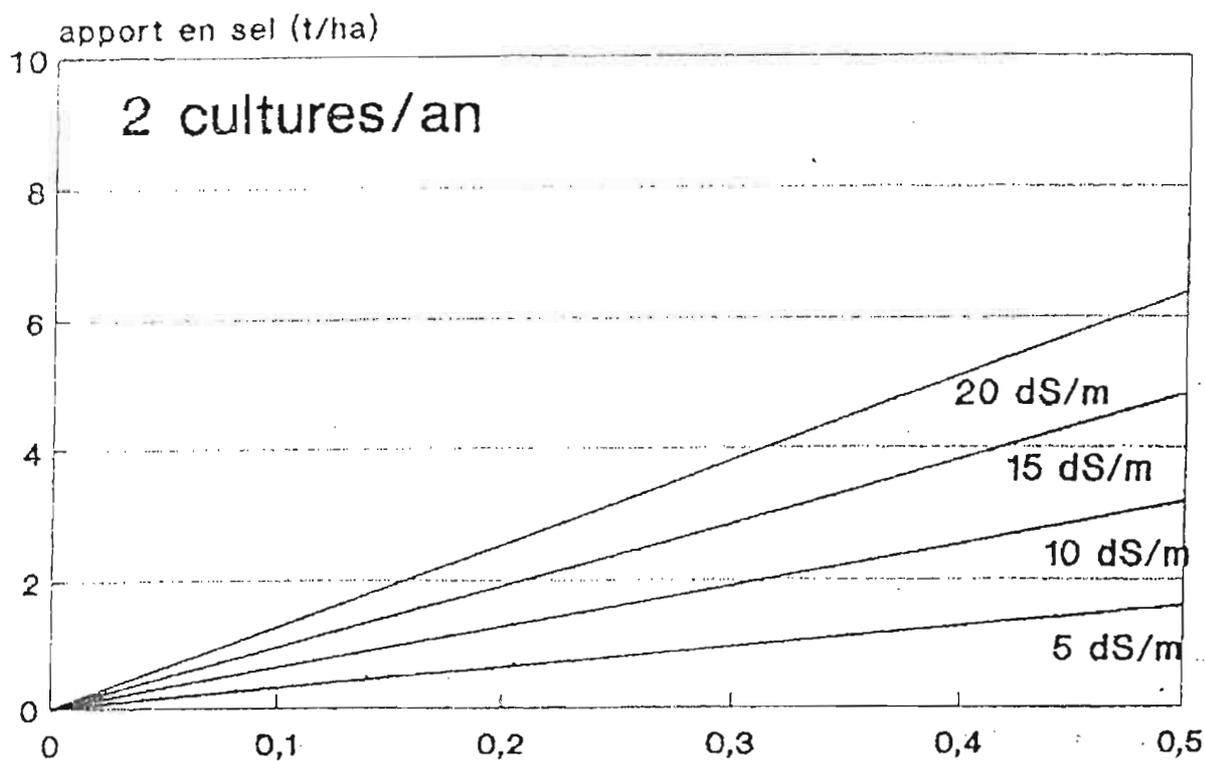


Figure 24 : Apport en sel par ascension capillaire (mm/j) pour différents taux de salinité de la nappe (2 cultures/ an)

Par ailleurs, les rizières sont désalinisées par une percolation de l'eau douce de l'irrigation à travers la zone racinaire et par une évacuation de la lame d'eau devenue saumâtre suite à une dissolution des sels. Il s'en suit pour les terrains très salés et peu perméables dont le drainage ne se fait pas de manière systématique, un abandon après quelques années de culture à cause de la salinisation. D'autre part, il faut voir également qu'une mise à eau trop longue peut entraîner des valeurs de percolation importantes dans les rizières de perméabilités élevées. Ce qui peut provoquer une fluctuation de la nappe salée dont la remontée au niveau de la zone racinaire endommage les plantes.

L'eau du fleuve est de bonne qualité pour l'irrigation de manière générale. Cependant, il faudra faire attention aux détériorations causées par le sel du fait d'une intrusion marine accidentelle ou d'une évacuation des eaux d'exhaure dans le fleuve ou dans ces défluent. Malgré la bonne qualité de l'eau, des quantités énormes de sels peuvent être apportées, vu le grand besoin en eau d'irrigation des rizières. Les besoins en eau pour une campagne de riz sont de 14 000 à 18 000 m³/ha en hivernage et de 18 000 à 25 000 m³/ha en contre-saison chaude. (Rapport Final SAED, 1993).

III. ELABORATION DES PARAMETRES D'ENTREE DU MODELE

III. ELABORATION DES PARAMETRES D'ENTREE DU MODELE

III.1 Géométrie du réservoir

III.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.

III.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. Il n'a pas d'importance dans le modèle du moins tant que la piézométrie modélisée n'atteint pas la surface du sol. Les valeurs obtenues sur le toit de l'aquifère nous permettront de donner à chaque maille du modèle une hauteur de toit conforme à la réalité. Pour tenir compte d'un relèvement maximal de la nappe, nous prendrons la cote topographique comme le toit de l'aquifère. La figure 25 donne la carte du toit de l'aquifère interpolée par krigeage dans Surfer 7.0.

III.1.3. Le Mur

La nappe alluviale du Delta du fleuve Sénégal repose sur un substratum (figure 26) argileux constitué par l'Inchirien I et II. Toutefois, l'Inchirien II constitué de successions de couche 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.

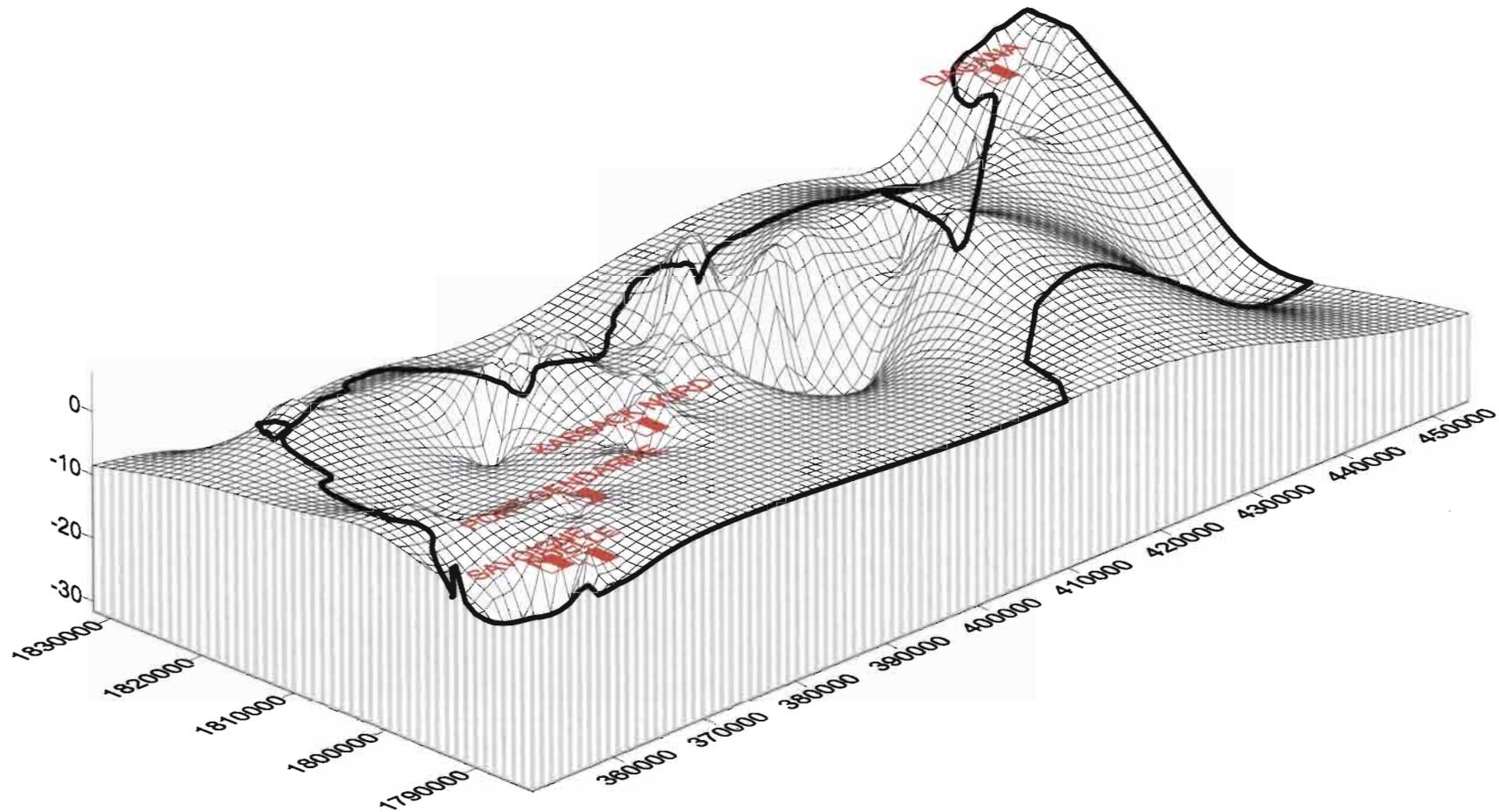


Figure 26 : Le mur de l'aquifère (substratum)

III.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 d'étude grâce au logiciel Modflow. Ainsi nous avons représenté à la figure 27 une coupe de l'aquifère et à la figure 28, la situation de cette coupe.

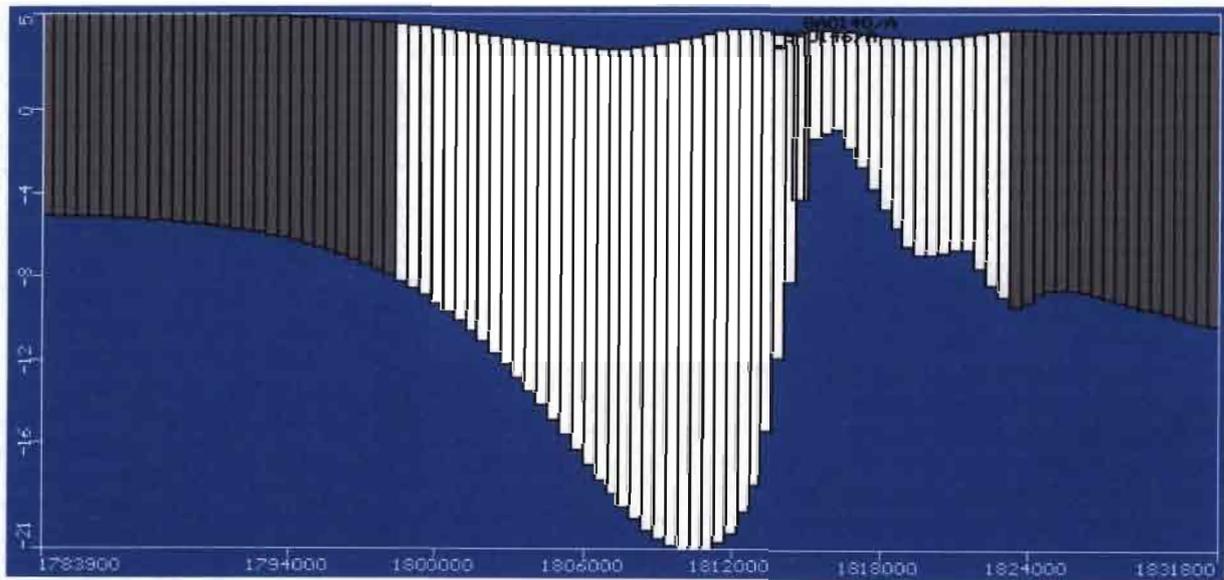


Figure 27 : Coupe de l'épaisseur de l'aquifère

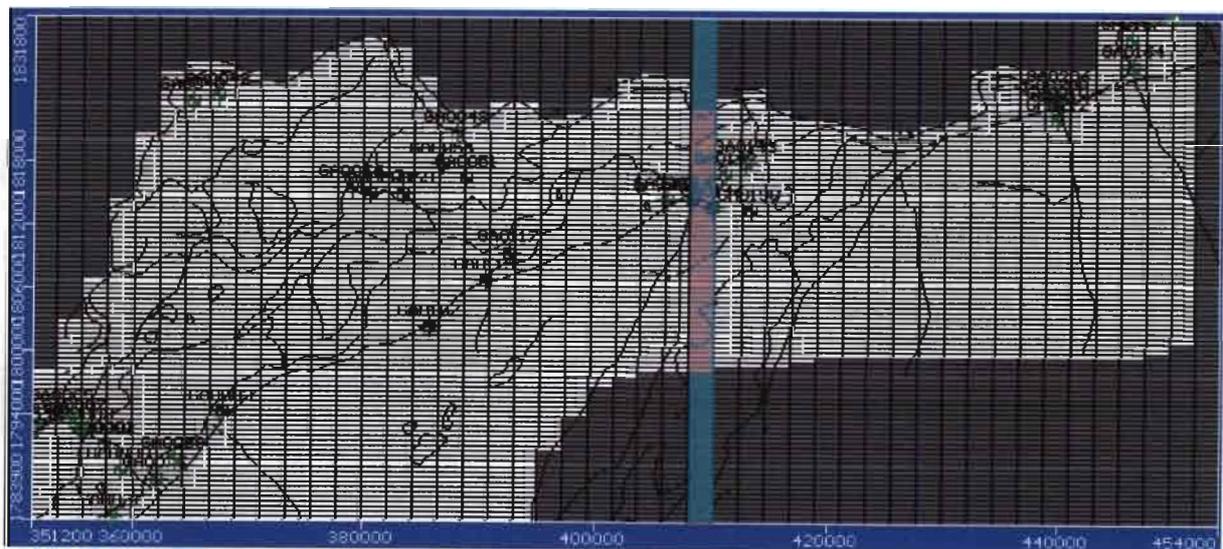


Figure 28 : Situation de la coupe de l'épaisseur de l'aquifère

III.2_ Les caractéristiques hydrodynamiques

III.2.1. Coefficient de perméabilité (La conductivité hydraulique)

D'après la loi de Darcy, le coefficient de perméabilité K peut être défini comme le volume d'eau qui s'écoule pendant l'unité de temps à travers l'unité de surface d'une section de terrain sous un gradient hydraulique égal à l'unité. Autrement dit il mesure la capacité d'un réservoir à conduire l'écoulement de l'eau. Il peut être différent selon la direction de l'écoulement.

En effet, pour les terrains homogènes et isotrope, la vitesse de darcy est donnée par la relation :

$\vec{V} = -K \text{grad} \bar{h}$ où le vecteur vitesse et le vecteur gradient sont considérés comme colinéaire.

Par contre dans un terrain homogène et anisotrope, les vecteurs vitesses et gradient ne sont plus colinéaires. Dans ce cas, on définit un tenseur de perméabilité $[K]$ qui pour des axes de coordonnées de direction principale d'écoulement, se décompose en K_x , K_y , K_z . Les autres termes sont nuls. Ainsi, la vitesse de Darcy s'exprime dans les trois directions sous la forme :

$$V_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} ;$$

$$V_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} ;$$

$$V_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Dans notre modèle, nous considérerons l'isotropie c'est à dire les coefficients de perméabilité $K_x = K_y = K_z = K$

Il est à remarquer que selon la nature du terrain, des valeurs approximatives de coefficient de perméabilité ont été données. (Voir Tableau 4). L'aquifère du Nouakchottien étant constitué de mélange de sable et d'argile, nous considérons des valeurs de perméabilités dans la gamme de 10^{-5} à 10^{-9} m/s.

TYPE DE TERRAIN	COEFFICIENT DE PERMEABILITE K
Graviers sans éléments fins.....	10^{-2} m/s
Sables et graviers	10^{-2} à 10^{-5} m/s
Sables fins et argileux.....	10^{-5} à 10^{-9} m/s
Argiles franches.....	10^{-9} à 10^{-13} m/s

Tableau 4 : Quelques valeurs de coefficient de perméabilité (Source G. de MARSILY)

Les quelques valeurs de coefficient de perméabilité obtenues à partir de la base de donnée OMVS/ USAID permettent de voir l'évolution de ce paramètre sur toute la zone d'étude. (Voir figure 29)

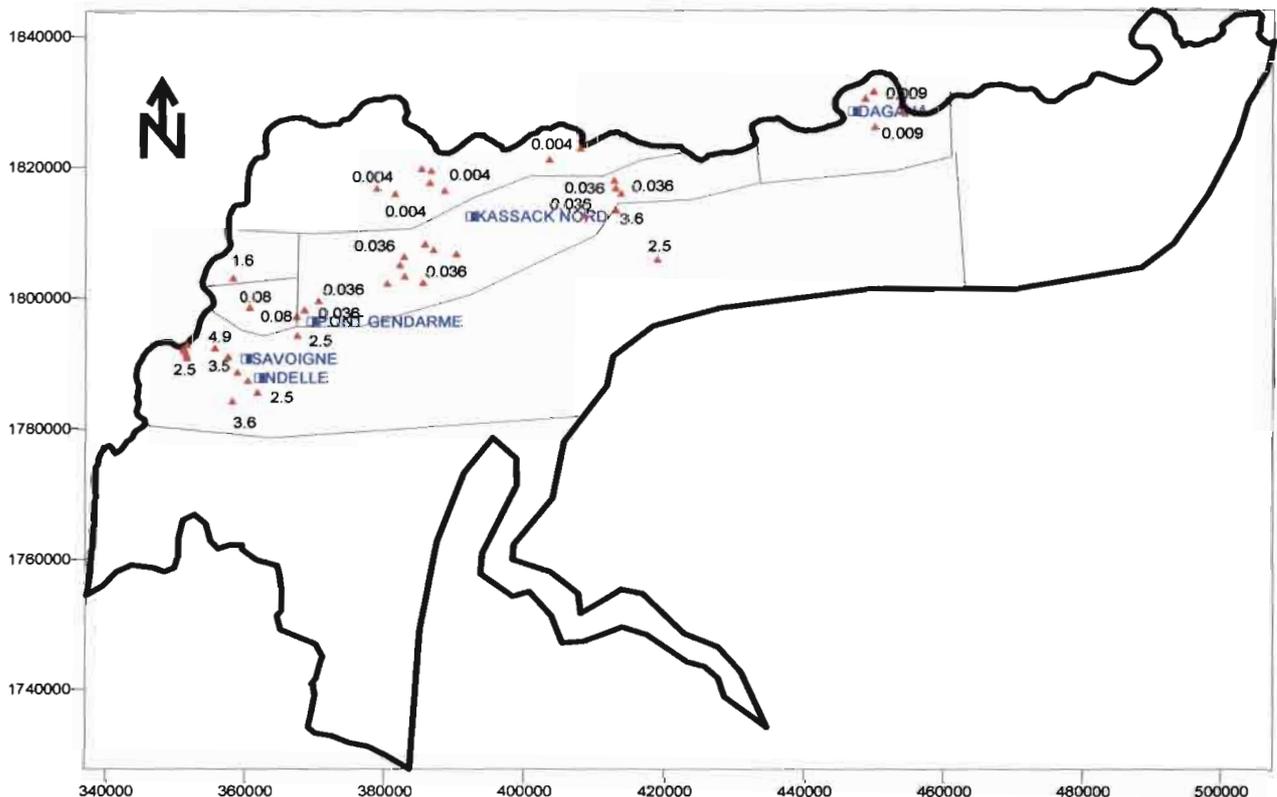


Figure 29 : Carte des valeurs de coefficient de perméabilité (en 10^{-5} m/s)

III.2.2. La transmissivité (T)

C'est un paramètre régissant le flux d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu (mesurée selon une direction perpendiculaire à celle de l'écoulement), et par unité de gradient hydraulique.

C'est le produit de la perméabilité (K) par la puissance aquifère (e), en milieu isotrope ou produit de la composante du tenseur de perméabilité parallèle à la direction d'écoulement par la puissance aquifère (orthogonale à cette direction), en milieu anisotrope.

En effet, si la nappe d'eau souterraine circule dans une couche de puissance (e), et que l'on veuille calculer le flux transitant dans la direction de l'écoulement (ox) dans la couche pour une largeur unitaire dans le plan perpendiculaire à la direction d'écoulement, on obtient :

$Q/l = \int \vec{u} \cdot \vec{n} dz = \int u_x dz$, n étant normale à l'axe (oz) et u_x la composante de la vitesse dans la direction (ox).

En supposant que oz soit une direction principale d'anisotropie, c'est-à-dire que les deux autres directions soient dans le plan de la couche (x, y). Alors, en tout point M de (oz) on a :

$\vec{u} = -\overline{\overline{K}}_M \cdot \text{grad} h$, $\overline{\overline{K}}_M$ étant le tenseur de perméabilité dans le plan xy passant par M, et $\text{grad} h$ le gradient de charge dans le plan. Supposons de plus que ce gradient soit constant sur la transversale (oz) alors :

$$Q/l = -\text{grad} h \int \overline{\overline{K}}_M dz \quad (\text{MARSILY, 1981}).$$

$$\overline{\overline{T}} = \int \overline{\overline{K}}_M dz \quad \text{porte le nom de transmissivité.}$$

Si K est isotrope et constante suivant (oz) alors $T = K \cdot e$.

T s'exprime en m^2/s , et est très utilisée pour les nappes souterraines, qu'elles soient ou non horizontales. Le manque de données sur la transmissivité ne nous permet pas de l'introduire directement dans le modèle. Mais elle interviendra de manière implicite grâce à Modflow.

III.2.3. Le coefficient d'emmagasinement

Il peut être défini comme le volume d'eau pouvant être libéré ou emmagasiné par un prisme vertical du matériau de l'aquifère de section égale à l'unité, à la suite d'une modification unitaire de niveau piézométriques ou de charge.

C'est un coefficient sans dimension. Dans les nappes libres, l'effet de la compressibilité du matériau aquifère et de l'eau étant généralement négligeable, le coefficient d'emménagement correspond pratiquement au volume d'eau gravitaire saturant la roche, donc à la porosité efficace. Son ordre de grandeur est généralement :

Dans les nappes captives

$$10^{-6} \leq S_s \leq 10^{-3}$$

et dans le cas de nappes libres

$$10^{-2} \leq S \leq 2.10^{-1}$$

On ne dispose pas de valeurs directes fiables du coefficient d'emménagement de la nappe alluvial du delta.

On peut d'ailleurs douter de la possibilité d'obtenir des valeurs représentatives au moyen de pompages d'essai : en effet, dans la mesure où ceux-ci sont, à l'échelle de la durée de l'essai, très influencés par les conditions locales de (semi-) captivité, ils donnent le plus souvent des valeurs sous estimées en ne tenant pas compte de l'effet d'égouttement à long terme.

Le calage du modèle se faisant en régime permanent, le coefficient d'emménagement n'interviendra presque pas. Par conséquent sa valeur exacte importe peu. Nous prendrons dans ce modèle un coefficient d'emménagement $S = 0.2$

III.2.4. La porosité

Lorsqu'une nappe libre est drainée, l'eau stockée ne peut être totalement reprise à cause des forces capillaires qui en retiennent une partie. Donc, le drainage gravitaire ne peut prendre toute l'eau de la zone saturée, une partie reste en permanence retenue dans les pores par les forces capillaires. Lorsque nous supposons que l'aquifère est initialement saturée jusqu'à un niveau h , puis drainée par gravité. Le volume d'eau drainé peut s'écrire sous la forme :

$V = h A n \beta$, avec β le rapport entre le volume d'eau drainé au volume d'eau initial et A section unitaire.

Le terme $n \beta$ nommé porosité efficace S_y (Spécifique Yield en anglais) décrit la propriété de l'aquifère de stocker et de vidanger l'eau en nappe libre tout comme la perméabilité décrit ses propriétés de transmettre l'eau. Les valeurs de S_y varient généralement entre 0.01 et 0.35.

Quand il y'a baisse du niveau piézométrique de Δh , d'un aquifère libre, le volume d'eau libéré est le produit du volume compris entre les deux positions de la surface piézométrique par la porosité efficace S_y . S et S_y jouent le même rôle en nappe libre. Pendant que le coefficient d'emménagement est 10^{-3} à 10^{-4} plus faible en nappe captive. Lorsque nous nous

intéresserons à la quantité d'eau contenue dans l'aquifère, alors nous utiliserons la porosité totale. Il faut noter que souvent on parle de porosité efficace de l'aquifère mais le drainage de l'eau en nappe libre ne s'effectue réellement qu'à la surface libre. Nous sommes dans le cas d'une nappe libre. Pour cela, nous prenons la porosité efficace $S_y = S = 0.2$ sur l'ensemble du domaine d'étude.

III.3 Les conditions aux limites du modèle

III.3.1 Condition de potentiel imposé

C'est la condition de DIRICHLET. Elle permet de maintenir une charge constante à la limite et correspond généralement à des zones de rencontres entre un domaine aquifère souterrain et des eaux de surface caractérisées par une charge relativement constante.

Ainsi, la côte Ouest du delta étant occupée par la mer, nous considérons le potentiel nul dans cette zone. Les échanges entre aquifère d'une part, les sables Ogoliens et le Quaternaire ancien d'autre part sont négligeables (NDIAYE, 1989).

L'analyse de la piézométrie fait ressortir que la nappe était tantôt alimentée par le fleuve qui participe à la recharge. Le manque de données sur la zone ne nous permet pas de quantifier les débits échangés, nous avons donc choisi de représenter le fleuve Sénégal en tant que limite de potentiel et non en tant que limite de flux. MODFLOW calcule les conditions de potentiels de la manière suivante :

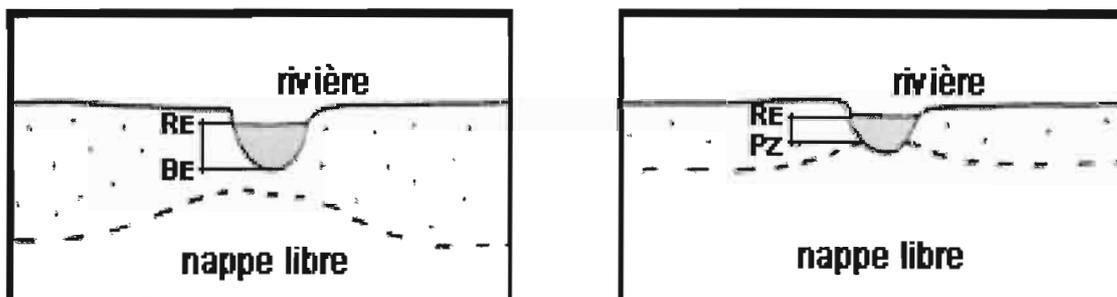


Figure 30 : Calcul des conditions de potentiel d'après MODFLOW

$$Q = C. (R_E - B_E) ; Q = C. (R_E - P_z) \quad \text{avec}$$

C : conductance du milieu m^3/jour

R_E : niveau de la rivière m

B_E : niveau du fond de la rivière m

P_Z : niveau statique m

Le débit échangé est contrôlé indirectement en fixant la valeur de la conductance. Celle ci est approchée de façon empirique selon la relation :

$$C = \frac{K_z \times S}{e} \quad \text{avec}$$

K_z : perméabilité verticale

e : épaisseur colmatée

S : surface de contact par maille

L'estimation de ces trois variables est à revoir. Le profil en long du fleuve réalisé à partir des points cotés référencés sur les cartes IGN fait apparaître les principales ruptures de pente dans la zone d'étude de Saint Louis à Dagana et permet d'avoir une idée du niveau du fond du fleuve Sénégal (figure 31) (NDIAYE,1989). Nous supposons que les sections à pente faible seront plus colmatées que celles à pente plus forte.

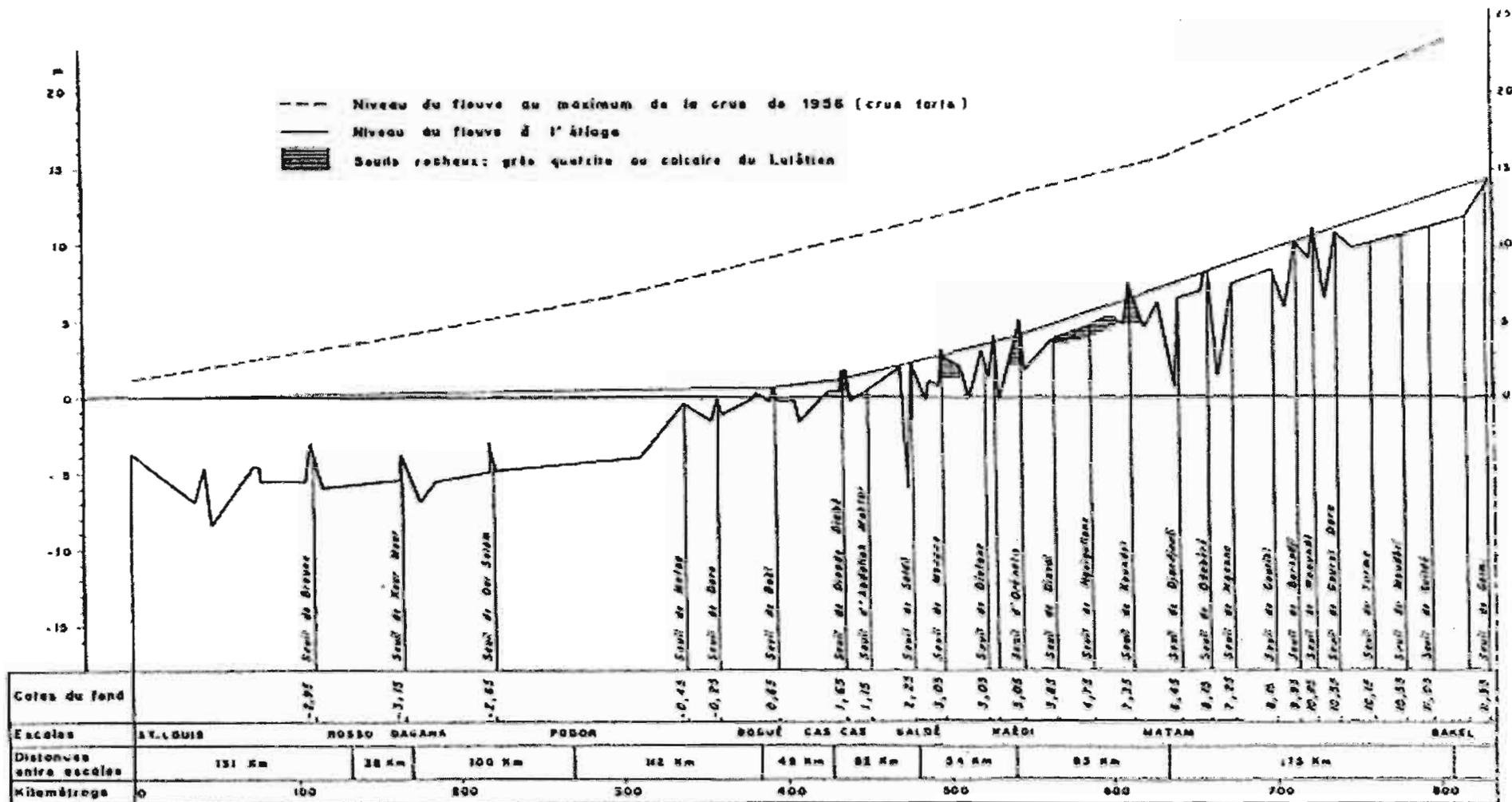


Figure 31 : Profil en long du fleuve Sénégal

III.3.2 Condition de flux nul

L'observation des cartes piézométriques de la nappe alluviale montre l'absence de lignes de partage des eaux souterraines. Cette limite devrait représenter une condition de flux nul pour l'aquifère. Dans la partie Sud de Ndellé, à la limite des courbes isopiézes, Nous considérons un flux nul. Elle sera représentée sous forme de cellules inactives qui n'interviendra pas dans les calculs.

III.4 Le bilan hydrique

III.4.1. Sorties du système

III.4.1.1. Estimation de l'évapotranspiration

Pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle, nous allons utiliser la formule de THORNTHWAITE. Selon ce dernier, l'ETP mensuelle est donnée par la formule suivante :

$$ETP = 16 \times \left[\frac{10 \times t}{I} \right]^A \times F(\lambda) \text{ (DIAW, 2005) avec}$$

- ETP : évapotranspiration potentielle (mm)
- t : température moyenne mensuelle (°C)
- i : $(t/5)^{1,514}$ indice thermique mensuel
- I : indice thermique annuel, somme des douze indices thermiques mensuel i
- A : $6,75 \cdot 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \times I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \times I + 0,49239$
- $F(\lambda)$: coefficient de correction fonction de la latitude et du mois considéré

Les résultats de calcul ont été reportés dans le tableau ci-dessous pour la station de Saint Louis de 1986 à 2003.

	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	aout	Sept	Oct.	nov.	dec
Temp moy (°C)	23.13	24.97	25.33	24.94	25.13	26.60	27.83	28.48	29.03	28.61	26.98	24.57
i	10.16	11.42	11.66	11.4	11.52	12.56	13.45	13.93	14.34	14.03	12.84	11.14
F(λ) (mm)	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
ETP (mm)	78.60	97.64	116.4	111.1	121.83	145.99	178.57	187.51	189.93	178.2	135.3	98.02
Température moy annuelle = 26.30 °C						ETP (mm) annuelle = 1639.16 mm						

$$A = 3.6586$$

$$I = 148.45$$

F(λ) est pris dans les tables avec une latitude de 15° N

Tableau 5 : Calcul de l'évapotranspiration potentielle à la station de Saint Louis

D'après ALBRECHT, la relation liant la précipitation N, l'évapotranspiration potentielle ETP et l'évapotranspiration réelle ETR est défini par la double équation telle que :

$$ETP_n = \frac{N_n + \frac{\sum W_{n-1}}{\sum W_{\max}} \times ETP_n \times g}{1 + \frac{\sum W_{\max} - \sum W_{n-1}}{C \times ETP_n}} \quad (1) \text{ (KOUKOU I \& NDIAYE, 2003)}$$

$$\sum W_n = N_n + \sum W_{n-1} - ETR_n \quad (2)$$

- n et n-1 : indice du mois considéré et du précédent
- ETR : évapotranspiration réelle mensuelle (mm)
- N : pluviométrie moyenne mensuelle (mm)
- $\sum W_n$ et $\sum W_{n-1}$: les réserves du sol
- $\sum W_{\max}$: capacité du champ. C'est la quantité d'eau maximale que peut contenir un sol après ressuage. D'après ALBRECHT, cette valeur est égale à 100mm

quel que soit le type de sol considéré, et elle définit l'eau capillaire contenue dans les couches superficielles du sol.

- g et C : ce sont des constantes qui dépendent de la couverture végétale du sol. Dans le cas d'un sol nu ou peu peuplé, comme dans notre cas, on peut retenir comme valeurs ; $g = 0.37$ et $C = 1.36$.

Si $N > ETP$ alors $ETR = ETP$, on a un excédent agricole.

Si $N < ETP$ alors ETR sera calculée par la formule (1) et sa valeur doit être inférieure à celle de ETP , on a un déficit agricole

Pour chaque mois de l'année, on définit les réserves utiles du sol $\sum W_n$ par la formule (2) avec cependant $\sum W_n < 100$. Ce calcul doit démarrer à un mois où les réserves du sol sont plus ou moins bien estimées. D'après ALBRECHT,

$\sum W_n = 0$ mm après une longue période de sécheresse,

$\sum W_n = \sum W_{\max} = 100$ mm après une période de pluies efficaces.

Le tableau 6 donne les valeurs de l'évapotranspiration potentielle et réelle à la station de Saint Louis calculées avec les données de 1986 à 2003.

	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	aout	Sept	Oct.	nov.	dec
ETP (mm)	78.599	97.64	116.4	111.1	121.83	145.99	178.57	187.51	189.93	178.2	135.3	98.02
N (mm)	0.75	2.80	0.67	0.12	0.37	13.06	35.29	83.02	95.18	32.74	0.74	2.81
W (mm)	11.17	9.87	7.41	0	0.14	4.46	12.31	27.20	33.22	23.11	15.17	12.90
ETR (mm)	2.48	4.09	3.14	1.96	0.23	8.74	27.44	68.13	89.16	42.84	8.69	5.08
Pluviométrie moy. annuelle = 267.56 mm						ETR (mm) annuelle = 261.99 mm						

Tableau 6 : Calcul de l'évapotranspiration réelle à la station de Saint Louis

III.4.2. Entrées du système

III.4.2.1. Relation entre la nappe et le fleuve Sénégal

Les études hydrogéologiques (NDIAYE, 1989) ont montrées l'influence du plan d'eau du fleuve sur la nappe. Ainsi, l'évolution du niveau piézométriques en fonction du niveau d'eau dans le fleuve apparaît négligeable avec un relèvement maximal de 3 cm. Il est à noter que cette influence est beaucoup plus marquée du coté sénégalais que mauritanien. L'élévation maximale augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer avec un maximum de 5.7 cm aux environs de Dagana. Ce qui montre encore l'importance des échanges mer-aquifere près de la côte. Cependant il faudra noter que la zone d'influence des eaux de surface du fleuve et des marigots n'excède pas quelques centaines de mètres (Euroconsult, 1990).

III.4.2.2. L'infiltration

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion.

Elle sera calculée d'après la formule suivante :

$I = R = N - ETR$ (3) où I désigne l'infiltration.

Avec les données recueillies à la station de Saint Louis de 1986 à 2003, nous avons pu calculer les valeurs de l'infiltration dont les résultats sont consignés dans le tableau 7.

	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	aout	Sept	Oct.	nov.	dec
ETR (mm)	2.48	4.09	3.14	1.96	0.23	8.74	27.44	68.13	89.16	42.84	8.687	5.08
N (mm)	0.75	2.80	0.67	0.12	0.37	13.06	35.29	83.02	95.18	32.74	0.74	2.81
R = I (mm)	-	-	-	-	0.14	4.32	7.85	14.89	6.02	-	-	-
Recharge annuelle = 33.22 mm												

Tableau 7 : Valeurs de l'infiltration à la station de Saint Louis

La valeur de l'infiltration annuelle sera introduite dans le modèle en première approximation car on ne dispose que des données d'une seule station. On aura à l'ajuster lors de la phase de calage du modèle jusqu'à ce que les isopièzes calculés avoisinent ceux mesurés.

III.4.2.3. La percolation

Là, il s'agira de voir la lame d'eau capable de provoquer des infiltrations vers la nappe et l'arrivée effective d'eau pouvant provoquer le relèvement de celle-ci. Pour se faire, nous allons nous baser sur les études faites par C. HAMMECKER et al en 2003 au Nord du Sénégal. L'expérience a été faite dans un périmètre irrigué de 0.3 ha au Nord (16°40'N, 15°W), dans la vallée centrale du fleuve Sénégal. Le champ est long de 100 m et large de 30 m et est consacré principalement à la culture de riz paddy. Le profil du sol est constitué d'une couche argileuse de 2 m et d'un sédiment sablonneux fin de 5-6m d'épaisseur. Il contient 65–70 % de minéraux argileux lesquels sont principalement kaolinite. La nappe est établie dans la couche sablonneuse. Le riz grandit sous irrigation et un plan d'eau superficiel de 5 – 25 cm est maintenu pendant toute la croissance de la plante (environ 100 jours). La lame d'eau est alimentée par le fleuve Sénégal qui fluctue entre 2 et 3 m pendant la saison sèche. Pendant la saison pluvieuse, quand le niveau de l'eau dans le fleuve augmente à sa hauteur maximale, le niveau piézométrique atteint quelquefois la surface du sol. De plus, ces mouvements de la nappe sont augmentés localement par la fuite des canaux d'irrigation et par

l'irrigation elle-même. D'après ces études, il a été trouvé des débits d'infiltration moyens de $12.8 \cdot 10^{-6}$ mm/s pour la station de mesure 2 et $0.231 \cdot 10^{-6}$ mm/s pour la station de mesure 3. Soit une recharge due à l'irrigation de $6.52 \cdot 10^{-6}$ mm/s ≈ 0.56 mm / j ≈ 56.33 mm /an.

Par ailleurs, une autre étude sur le delta réalisée durant l'hivernage 1991 au pont gendarme dans le cadre du projet gestion de l'eau (Bulletin Technique N°11) a permis d'avoir quelques valeurs de percolation. La percolation est définie comme étant la quantité d'eau évacuée par drainage profond des sols vers la nappe. Cette quantité d'eau percolée est liée aux types de sol et aux caractéristiques hydrodynamiques. Les mesures effectuées par réglettes graduées ont permis de voir que pour les sols du delta et de la vallée du fleuve Sénégal, la percolation est très faible dans les cuvettes de décantation (environ 1 à 2 mm/ j) et peut être importante au niveau des berges de la rivière. (3 à 4 mm/j). Le Tableau 8 donne quelques valeurs de percolation mesurées au pont gendarme entre juillet et novembre.

Décade		Différence Réglettes (mm/j)	ETriz (mm/j)	Percolation (mm/j)	Superficie en eau (ha)	Percolation (m ³)
Juillet	3	-	7.5	-	19.06	3812
Août	1	-	8.2	-	133.42	26684
	2	7-10	7.4	0-2.60	190.60	38120
	3	8	7.0	1	190.60	38120
Septembre	1	-	8.2	-	190.60	38120
	2	8-10	7.3	0.7-2.70	190.60	38120
	3	9-10	8.4	0.6-1.60	190.60	38120
Octobre	1	7-10	8.3	0-1.70	190.60	38120
	2	-	8.3	-	190.60	38120
	3	9-10	7.3	1.70-2.70	190.60	38120
Novembre	1	9-10	7.0	2-3	190.60	38120
	2	8-10	6.6	2.40-3.40	171.54	34308
	3	-	4.5	-	57.18	11436

Tableau 8 : Determination de la Percolation au Pont Gendarme (Bulletin Technique n°11)

Nous retiendrons une valeur de percolation moyenne égale à $1.14 \text{ mm/j} \approx 159.6 \text{ mm/an}$. Les études menées dans le cadre du projet gestion en eau, en son rapport final, montre que les sels contenus dans le sol pouvait être drainé verticalement de façon importante. Mais il se stabilise après peu de temps à un niveau de 1 à 2 mm/jour dans les cuvettes aménagées et jusqu'à 4 à 5 mm/jour dans les périmètres avec des sols fondés. La figure 32 donne la percolation du terrain en fonction de la conductivité électrique moyenne de la lame d'eau au cours de la campagne 1990/1991. De ces courbes, nous constatons que la percolation est une fonction décroissante de la conductivité électrique de la lame d'eau d'irrigation.

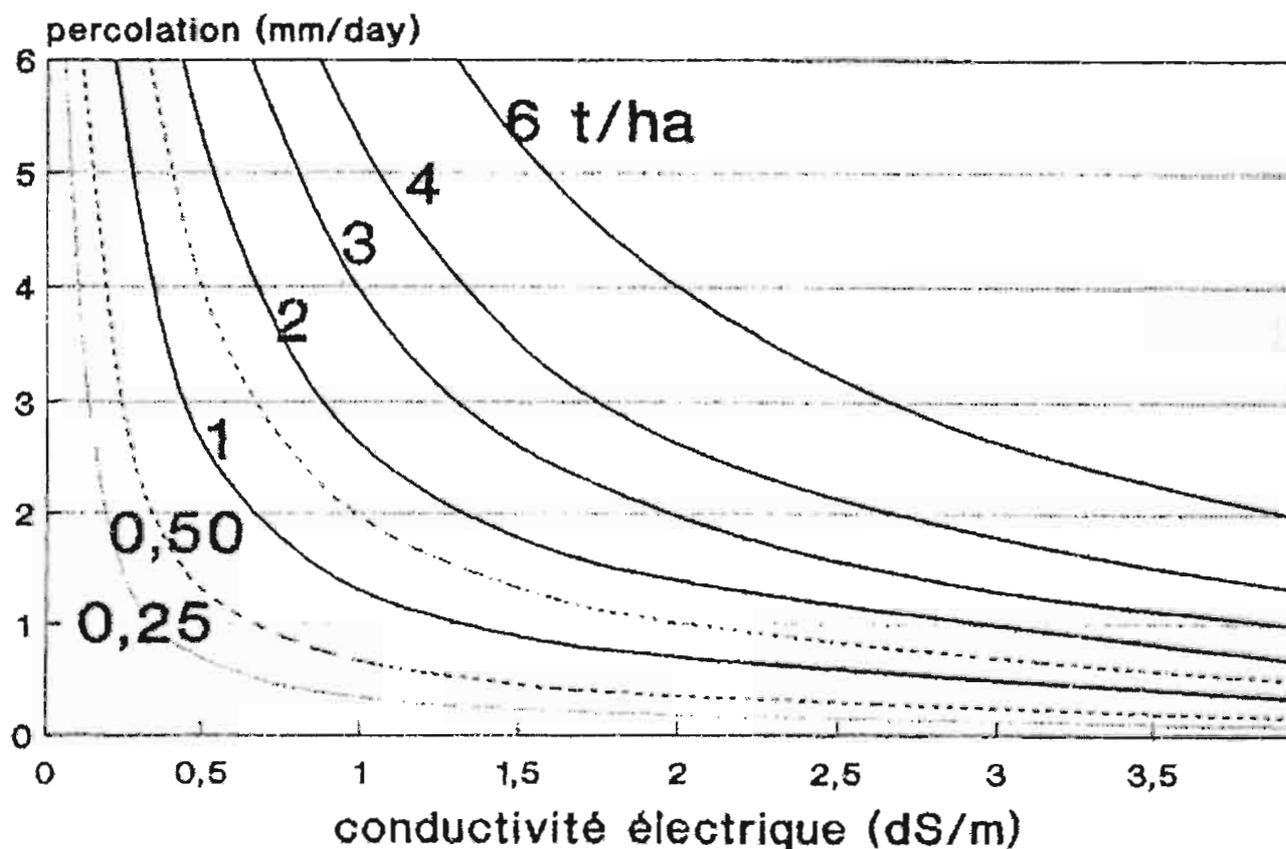
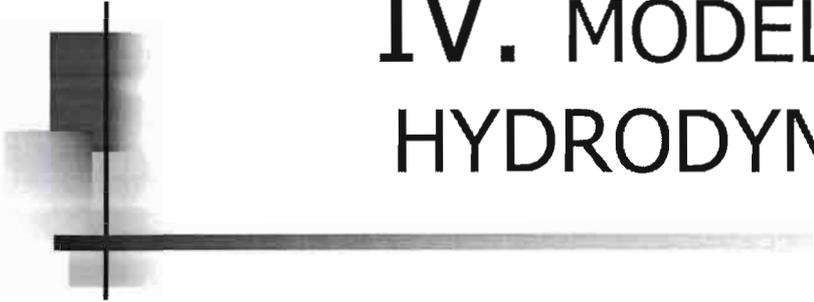


Figure 32 : La percolation fonction de la conductivité électrique de la lame d'eau et de la quantité de sels apportés.

IV. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE



IV. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

IV.1_Outils du modèle

Visual MODFLOW est un logiciel de Waterloo hydrogeologic Inc. qui fonctionne sous l'interface Visual Basic et permet la modélisation numérique des écoulements souterrains et de transport de contaminant. C'est un logiciel simple, modulaire et doit sa réputation à une utilisation mondiale. Pour ce qui nous concerne, nous allons essentiellement travailler sur l'aspect écoulement souterrain.

Nous pouvons donc dire que Visual MODFLOW, est un logiciel de base pour la simulation des écoulements laminaires plans ou tridimensionnels dans des systèmes multicouches en régime permanent ou transitoire. Il permet de résoudre l'équation de diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement souterrains en milieux poreux (combinaison de la loi de Darcy et équation de continuité) par la méthode des différences finies.

En effet, la loi de comportement dynamique de la phase liquide d'un sol se traduit par l'équation de Darcy ou loi de Darcy qui s'exprime sous la forme :

$$\vec{V} = -[\bar{K}] \times \vec{i} \text{ avec :}$$

$[\bar{K}]$ tenseur de perméabilité ;

\vec{i} le vecteur gradient hydraulique ou perte de charge par unité de longueur égale à

$$\frac{\partial h}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial h}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial h}{\partial z} \vec{e}_z \text{ dans les trois directions de l'écoulement ;}$$

h la charge hydraulique.

L'équation de conservation de la masse ou l'équation de continuité traduit le fait que la quantité d'eau entrée dans l'élément de volume $dx dy dz$ est égale à celle qui en sort et de la partie emmagasinée. Elle s'exprime comme suit :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot n \cdot dx dy dz) \text{ où}$$

ρ est la densité de fluide ;

n la porosité

∂M la variation de masse.

La combinaison de la loi de Darcy et de l'équation de continuité nous permet d'écrire l'équation de l'écoulement tridimensionnel dans un aquifère (nappe captive). En supposant

l'épaisseur de l'aquifère faible par rapport à ses dimensions horizontales, on se ramène à l'hypothèse d'écoulement plan.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Q est le débit d'infiltration (pluie, irrigation...) et ou une reprise par évapotranspiration.

S_s coefficient d'emménagement spécifique

k_x, k_y, k_z constituent les perméabilités dans les trois directions qui sont considérées comme principale d'écoulement.

L'hypothèse d'écoulement horizontal de Dupuits autorise l'utilisation d'un bilan dans un élément de volume sur le mur et allant jusqu'à la surface libre. Ainsi, l'équation de diffusivité en nappe libre peut s'écrire :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm Q = S_y \frac{\partial h}{\partial t}$$

- Régime permanent

Lorsque le débit entrant dans l'aquifère équilibre celui sortant, alors on a un régime permanent et la charge ne varie plus en fonction du temps et dans ce cas l'équation de

diffusivité devient : $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$ en cas d'isotropie, sans recharge ni reprise

évaporatoire.

Cette loi est bien connue sous le nom de l'équation de Laplace.

Lorsque nous considérons l'écoulement bidimensionnel dans un aquifère homogène et isotrope, l'équation de Laplace se présente comme suit :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

Cette équation est satisfaite en tous les points de l'aquifère de limite r.

Le niveau piézométrique h doit satisfaire à un certain nombre de conditions aux limites.

$h = h_0$: potentiel imposé (condition de Dirichlet)

$Q_n = 0$: flux nul, imperméable (condition de Neumann)

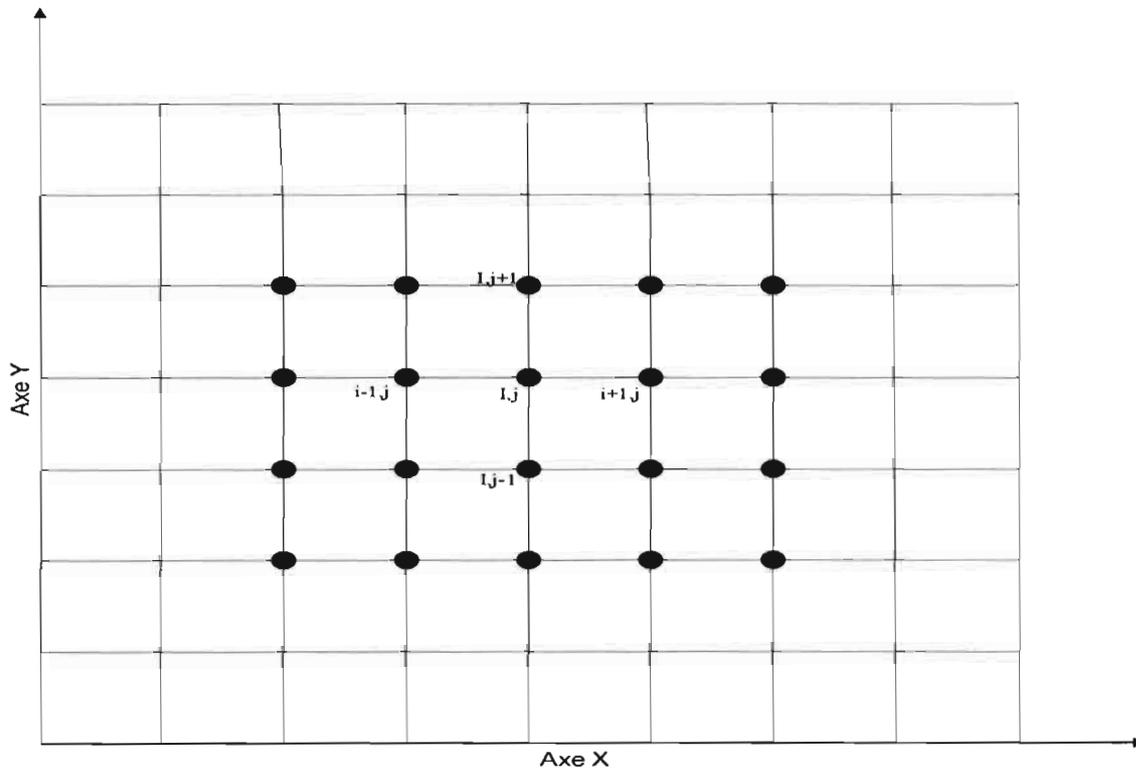


Figure 33 : Principe de la méthode des différences finies

Les différences centrées sont les plus précises et nous les utiliserons.

Pour la dérivée première :
$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h(x + \Delta X, y) - h(x - \Delta X, y)}{\Delta X}$$

Pour la dérivée seconde :
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{h(x + \Delta X, y) - 2h(x, y) + h(x - \Delta X, y)}{\Delta X^2}$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{h_{i+1,j} - 2h_{i,j} + h_{i-1,j}}{\Delta X^2}$$

Ainsi l'équation de Laplace devient

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{h_{i,j-1} + h_{i,j+1} + h_{i-1,j} + h_{i+1,j} - 4h_{i,j}}{\Delta^2} = 0$$

de ce faite l'équation de base de la

méthode des différences finies peut s'écrire sous la forme simplifiée

$$h_{i,j} = \frac{h_{i,j-1} + h_{i,j+1} + h_{i-1,j} + h_{i+1,j}}{4}$$

On dit que la valeur de h aux nœuds i,j est la moyenne des valeurs des quatre nœuds voisins. Cette dernière équation doit être satisfaite par tous les nœuds de l'aquifère. Donc la méthode demande la résolution d'un système avec nombre d'équation égal au nombre d'inconnues. Les nœuds situés aux limites demandent une attention particulière pour satisfaire les conditions aux limites.

Pour la condition de Dirichlet (potentiel imposé), la valeur de h pour les nœuds situés sur la limite sont connus et la même équation est utilisée.

Pour la condition de Neumann (flux nul), la valeur de h est inconnue mais le débit doit être nul dans l'élément. Cette condition est introduite simplement en imposant que h reste le même pour les nœuds situés de part et d'autre de l'élément. La valeur de h du nœud imaginaire situé à l'extérieur doit être égale à celle du nœud situé à l'intérieur. Par exemple pour un nœud sur une limite vertical, la condition est décrite par : $h_{i-1,j} = h_{i+1,j}$

- Régime transitoire

L'équation de diffusivité pour un écoulement plan en régime transitoire est donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x h \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y h \frac{\partial h}{\partial y}) \pm Q = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

$k_x h$, $k_y h$, $k_z h$ sont les transmissivité T_x , T_y , T_z respectivement

La résolution de l'équation de diffusivité qui est une équation aux dérivées partielles est très difficile voir même impossible analytiquement, nous allons utiliser les méthodes numériques de calcul à travers le logiciel Visual MODFLOW.

En réalité, le logiciel procède à la résolution par différences finies qui consiste en une approximation des dérivées partielles par des expressions algébriques.

L'idée de base de la méthode des différences finies est que l'aquifère est discrétisé en mailles rectangulaires. La valeur de h aux nœuds situés à la ligne i et à la colonne j est notée $h_{i,j}$. L'ensemble des valeurs $h_{i,j}$ sera déterminé de manière à approximer la fonction continue $h(x,y)$ aux points de coordonnées ($x = x_i$; $y = y_j$). Ceci peut être accompli par une approximation des dérivées partielles dans l'équation de diffusivité.

La puissance et la simplicité de la méthode deviennent plus évidentes quand on considère l'écoulement en régime transitoire.

L'équation de diffusivité pour un écoulement transitoire dans un aquifère captif, avec infiltration net du à la recharge naturelle ou artificielle et ou évapotranspiration est :

$$T(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}) \pm Q = S \frac{dh}{dt}$$

La position complète du problème demande de cerner les conditions aux limites et les conditions initiales.

$h = h_0$ (Dirichlet)

$$Q_n = -T \frac{\partial h}{\partial n} = 0 \text{ (Neumann)}$$

Initiale: $t = 0$ lorsque $h = h^0$

La discrétisation des termes à droite se fait comme précédemment. Il apparaît naturel pour le terme de gauche d'utiliser les différences à droite comme nous chercherons à prédire les valeurs futures de h à partir d'aujourd'hui. On a donc :

$$\frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{h^1_{i,j} - h^0_{i,j}}{\Delta t}$$

Δt : pas de temps

h^1 : valeur de h à la fin du pas de temps

h^0 : valeur de h au début du pas de temps

La solution numérique approchée ne donnera jamais une solution exacte du problème. En général il est impossible d'évaluer la précision simplement parce que la solution exacte est inconnue.

Nous étudierons la nappe alluviale du Delta du fleuve Sénégal à travers le modèle hydrodynamique élaboré grâce au logiciel Visual MODFLOW.

IV.2_ Description du modèle

Les objectifs de la modélisation sont la mise sur pied d'un instrument d'expérimentation et de démonstration et la connaissance de la distribution des perméabilités permettant la reconstitution de la piézométrie et ainsi mieux appréhender le fonctionnement hydrodynamique du système. Le maillage du domaine d'étude est celui proposé par le logiciel Surfer et imposé par les données disponibles. Ainsi, le modèle comportera 100 lignes et 47 colonnes. Une modélisation en régime permanent sera retenue, avec pour référence la piézométrie reconstituée de 1987 et 2002. L'aquifère du Delta sera ainsi considéré comme un système monocouche et une valeur de porosité efficace uniforme de 0.2 sur tout le domaine d'étude. Le milieu sera considéré comme homogène et isotrope avec des valeurs de conductivité hydraulique égales dans toutes les directions ($k_x = k_y = k_z$). La piézométrie calculée au centre de chaque maille tiendra compte des paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique, porosité), des conditions aux limites (potentiel ou flux imposé, possible liaison avec un réseau hydrographique, etc.) et des conditions de recharge (infiltration, évapotranspiration, percolation). Le modèle s'articulera autour de deux hypothèses fondamentales :

- les gradients hydrauliques doivent être faibles et
- la continuité hydraulique de l'aquifère doit être respectée.

Nous avons montré que ces conditions étaient vérifiées pour la nappe alluviale du Delta. Une carte de base contenant l'ensemble des piézomètres de 2002 sera utilisée et permettra de reporter la piézométrie observée sur les puits d'observation. Nous considérons qu'il n'y a pas de pompage. Une cote minimale de -38.3 m et maximale de +10.28 m sera prise dans le modèle. Pour satisfaire nos objectifs, nous utilisons un modèle régional. De ce fait, nous sommes parfaitement en mesure de représenter les écoulements généraux, mais au détriment des phénomènes locaux. La figure 34 qui suit montre une fenêtre de Visual MODFLOW avec le domaine d'étude.

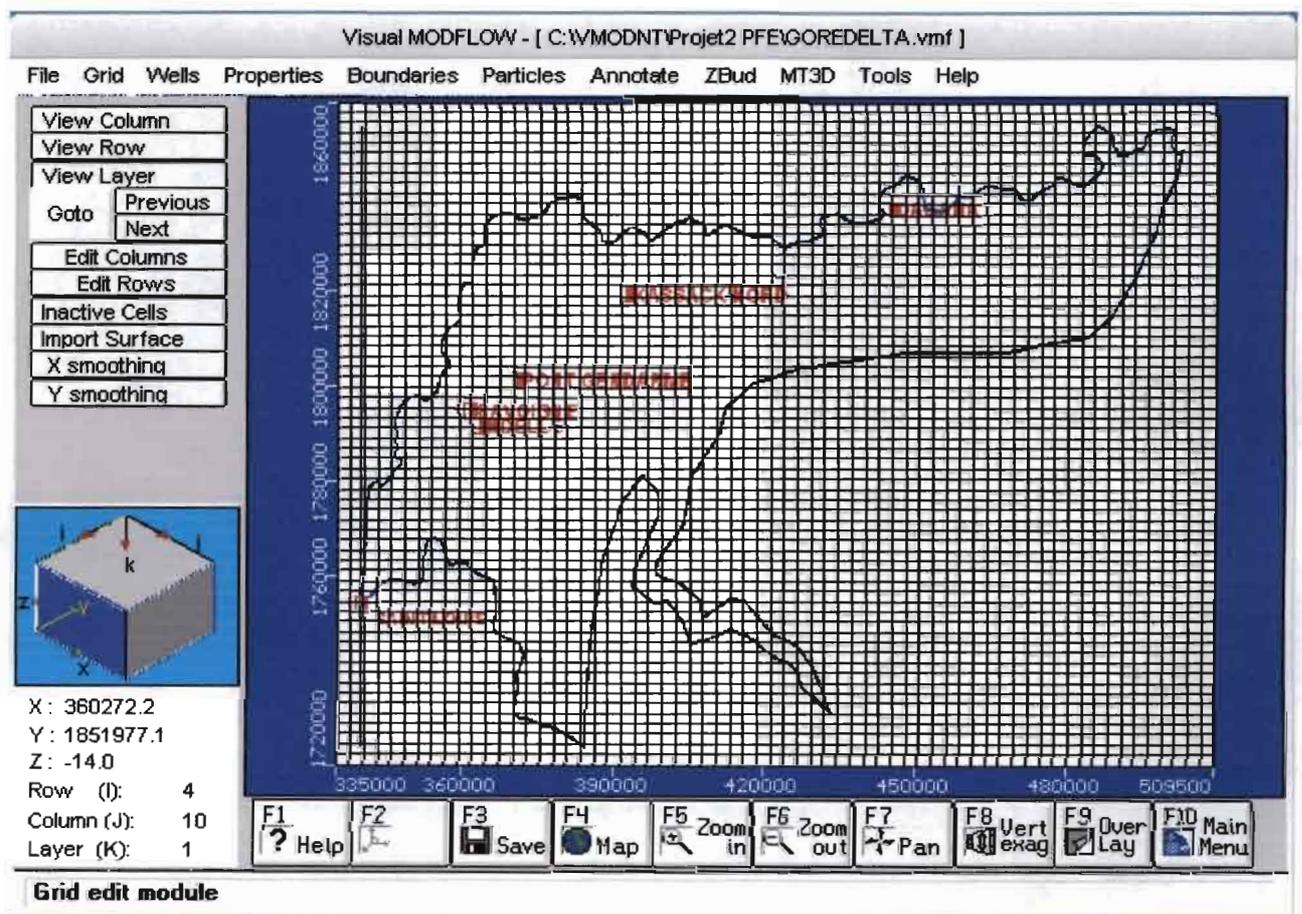


Figure 34 : Une fenêtre de Visual MODFLOW

IV.3_Calibration du modèle

Nous avons essayé de conduire le calage du modèle en nous rapprochant le plus souvent possible des contraintes imposées et de la réalité du terrain.

IV.3.1 Calage des perméabilités

Dans la partie III.2.1., nous avons présenté des valeurs ponctuelles de coefficient de perméabilités mesurées sur le terrain. Il est évident qu'à partir des données en notre possession, la gamme des perméabilités que nous pouvons utiliser est étendue. Dans ces conditions, nous entrerons dans le modèle, comme première base de travail, la distribution spatiale des perméabilités établie aux chapitres III.2.1 que nous affinerons au fur et à mesure du calage dans une gamme de variation d'environ de 10^{-5} à 10^{-8} m/s . Etant donné que la distribution de ces perméabilités n'est pas très nette, nous considérerons pour le calage que les perméabilités les plus élevées seront au centre avec des valeurs de $2.5 \cdot 10^{-5}$ à $3.6 \cdot 10^{-7}$ m/s. Les plus faibles sont auprès du fleuve et un peu vers Dagana avec respectivement $4 \cdot 10^{-8}$ et $9 \cdot 10^{-8}$ m/s. Toutefois, on essayera de retrouver au mieux la piézométrie de 2002.

IV.3.2 Calage de la recharge

Les valeurs de la recharge obtenue par estimation de l'infiltration des eaux de pluie et la percolation au niveau des rizières, seront utilisées pour la recharge de la nappe. Bien que nous ignorions exactement le processus de recharge de la nappe, nous considérerons les dômes piézométriques et le fleuve comme zones de recharge préférentielles. Pour cela, nous utiliserons la piézométrie de 2002. Une valeur de 33.22 mm/an sera retenue pour l'infiltration et une valeur de 159.6 mm/an pour la percolation. Soit une recharge nette de 192.82 mm/an.

IV.3.3 Calage de la piézométrie

Pour le calage, nous ferons appel à la piézométrie de 1987 qui est notre référence. Le modèle sera ajusté jusqu'à ce que la piézométrie calculée se rapproche le plus près possible de la piézométrie observée.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La connaissance de la nappe alluviale du Delta du fleuve Sénégal en général et de la cuvette de Ndellé en particulier passe nécessairement par une étude hydrogéologique et chimique basée sur des outils très modernes.

Dans une première partie, nous avons procédé à une présentation de la zone d'étude dont la connaissance est indispensable pour la bonne marche du travail. De cette étude découle que la zone du delta du fleuve Sénégal est une région bien individualisée avec des potentialités énormes et un climat très favorable à la culture. Mais avec les fluctuations très importantes des eaux salines de la nappe ; les sols du Delta sont mis en péril face à la salinisation.

La deuxième partie du travail a consisté à l'étude de la nappe alluviale du Delta du fleuve Sénégal. Les données que nous avons utilisés pour cette étude proviennent essentiellement de la base de données O.M.V.S. / U.S.A.I.D. et des données de terrains dans le cadre du projet GORE-DELTA. Une critique des données nous permet de dire que la nappe du Delta est peu profonde et basique avec des valeurs pH au environ de 8.11. La connaissance de la profondeur et de la salinité de la nappe du Delta (environ 4402 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a permis d'estimer les apports de sels (environ 1 à 4 tonnes/an.ha) en fonction de l'ascension capillaire et de l'intensité culturale. Nous remarquons donc que pour un même taux de salinité, l'apport est plus important dans le cas d'une culture/an que dans le cas de double culture.

L'élaboration des paramètres d'entrées du modèle hydrodynamique de la nappe a été possible grâce aux données de la base OMVS/USAID. Une infiltration de 33.22 mm/an et une percolation de 159.6 mm/an au pont gendarme ont été estimées au niveau de la zone comme valeur de recharge. L'évapotranspiration potentielle obtenue par la formule de THORNTHWAITE donne une valeur de 1639.16 mm/an. Les perméabilités variant de 10^{-5} à 10^{-8} et une porosité de 20 % ont été retenue.

La modélisation proprement dite a consistée d'abord au rappel des principes qui gouvernent un modèle hydrodynamique par la méthode des différences finies. Le modèle sera réalisé en régime permanent. Nous avons retenu un domaine homogène et isotrope et un système

aquifère monocouche. La surface topographique a été prise comme le toit de l'aquifère pour tenir compte de la contrainte d'un relèvement maximale de la nappe dans le modèle.

Ce dernier s'articulera autour de deux hypothèses fondamentales :

- les gradients hydrauliques doivent être faibles et
- la continuité hydraulique de l'aquifère doit être respectée.

Bien que ces paramètres soient suffisants pour la connaissance et la modélisation de la nappe alluviale du delta, nous tenons à formuler ces quelques recommandations pour réaliser et affiner le modèle :

- Il faudra favoriser la double culture du riz qui résiste mieux à la salinité et minimise l'apport de sel dans le sol tout en ayant en pensée qu'une mise à eau trop importante des rizières peut entraîner des remontées considérables de la nappe.
- Il faudra penser à un processus de désalinisation des sols et au rabattement de la nappe qui fluctue beaucoup par la mise en place de tranchée de drainage adéquat.
- Il faudra également procéder à une sensibilisation de la population sur l'utilité des piézomètres et effectuer un suivi régulier de ces derniers pour avoir des données synchrones permettant de simuler le modèle en régime permanent et éventuellement en régime transitoire.
- Enfin, nous recommandons vivement qu'un bon logiciel MODFLOW soit disponible pour pouvoir lancer la simulation du modèle et vérifier le calage.

C'est uniquement enrichi de ces nouvelles conditions que la modélisation hydrodynamique pourra apporter une contribution à la connaissance du fonctionnement complexe de la nappe alluviale du Delta du fleuve Sénégal.

BIBLIOGRAPHIE CONSULTEE

1. BANTON et BANGOY, Hydrogéologie multi science environnementale des eaux souterraines, presse université du Québec, 1997
2. CROUSSE, MATHIEU et SECK, la vallée du fleuve Sénégal, Evaluation et perspective d'une décennie d'aménagement (1980-1990), Karthala, 1991
3. DECKERS et Al, Evolution de l'acidité dans les sols du delta du fleuve Sénégal sous l'influence anthropogène, 1996
4. DIAW, cours d'hydrogéologie (un exposé pour comprendre), ESP, 2005
5. GUIGUER et FRANZ, User manuel for Visual Modflow, Waterloo hydrogeologic, 2000
6. NDIAYE, Etude hydrogéologique du delta du fleuve Sénégal, juillet 1989
7. MARSILY, hydrogéologie quantitative, Masson, 1981
8. Profil de l'environnement de la vallée du fleuve Sénégal, Euroconsult, janvier 1990
9. HAMMECKER et Al, Experimental and numerical study of water flow in soil under irrigation in northern Senegal: evidence of air entrapment, 2003
10. KOUKOUI et NDIAYE, Projet de fin d'étude, Modélisation de la nappe des sables quaternaires de Thiaroye, ESP, 2002-2003
11. NDIAYE et ISABEL, Geostatistical analysis of hydrogeology and agricultural land reclamation in Senegal river Delta, April 1999
12. NDIAYE et GUINDO, Evolution des sols irrigués de la vallée du Niger (Mali) : Sodisation et Alcalinisation sous riziculture, 1998
13. NDIAYE, cours d'hydrogéologie, ESP, 2004
14. SAED, Rapport final projet gestion de l'eau, Octobre 1993

15. SAED/ DPDR, Méthodologie à suivre pour établir un bilan d'eau. Exemple : Pont Gendarme et Aero Lao, Bulletin n°11, novembre 1996

16. SIDIBE, Projet de fin d'étude, Gestion optimale des Ressources en Eau du Delta du fleuve Sénégal (Projet GORE-DELTA), ESP, 2003-2004

LES ANNEXES

Annexe 1 : Données piézométriques de 1987

<i>IDOUV</i>	<i>AnnéeVis</i>	<i>PROFNSND</i>	<i>ISOPIEZE</i>	<i>X (m)</i>	<i>Y (m)</i>	<i>Z (m)</i>
GB0002	1987	4.29	-0.73	345600	1771300	3.519
GB0004	1987	4.21	-0.87	348200	1773400	3.409
GB0005	1987	8.88	-3.3	354300	1771600	5.474
GB0010	1987	7.63	-1	355000	177800	6.651
GB0018	1987	11.97	-1.86	355700	1781700	10.144
GB0021	1987	7.9	-1.05	363600	1784400	6.753
GB0024	1987	3.73	-1.36	348400	1783700	2.357
GB0025	1987	6.9	-2.72	348700	1786200	4.315
GB0026	1987	5.36	-1.31	349300	1786200	3.135
GB0030	1987	2.26	-1.21	358300	1783900	1.027
GB0032	1987	10.79	-1.26	359800	1782000	9.491
GB0035	1987	4.164	-1.04	360200	1787900	3.081
GB0038	1987	10.75	-0.93	360000	1785000	9.799
GB0039	1987	11.62	-1.43	362100	1784400	10.149
GB0045	1987	1.37	0.8	367800	1794400	2.249
GB0046	1987	14.36	-9.56	375100	1783000	4.718
GB0053	1987	14.73	-7.08	440400	1817700	9.454
GB0055	1987	16.38	-7.97	441900	1817700	10.635
GB0056	1987	14.89	-3.61	442800	1821000	11.588
GB0058	1987	6.56	-2.07	435500	1821800	4.606
GB0060	1987	15.42	-2.94	432900	1820600	12.549
GB0063	1987	6.16	-2.25	440800	1822600	4.155
GB0065	1987	12.85	-2.32	440800	1822600	10.23
GB0075	1987	7.55	-3.49	431100	1816500	4.488
GB0076	1987	10.16	-3.13	432900	1816300	7.253

GB0126	1987	2.67	-0.64	381800	1797000	2.057
GB0840	1987	9.24	-2.55	358400	1780900	6.645
GB0841	1987	11.16	-8.43	367500	1785000	2.901
GB0842	1987	4.11	-1.02	348900	1780900	3.053
GB0843	1987	4.47	-1.72	348800	1784500	2.828
GB0844	1987	2.88	-0.81	363200	1788900	2.101
GB0845	1987	14.56	0.12	362100	1784400	14.723
GB0846	1987	2.74	-1.08	364200	1822300	1.668
GB0847	1987	6.76	-3.15	423100	1812600	3.299
GB0850	1987	11.52	-2.77	440600	1821200	8.903

Annexe 2 : Données piézométriques de 2002

IDOUV	DATVIS	AnnéeVis	SemVis	PROFNSND	ISOPIEZE	X (m)	Y (m)	Z (m)
GA0048	03/01/2002	2002	1	2.71	0.47	388000	1820800	3.18
GA0051	03/01/2002	2002	1	2.28	0.11	388600	1816500	2.39
GA0054	03/01/2002	2002	1	1.87	1.05	386500	1817700	2.92
GA0066	03/01/2002	2002	1	1.9	0.23	378700	1815600	2.13
GA0067	03/01/2002	2002	1	2.45	-0.36	378700	1815600	2.09
GA0068	03/01/2002	2002	1	2.89	-0.39	380200	1814900	2.50
GA0069	03/01/2002	2002	1	2.69	0.04	383100	1814900	2.73
GA0076	03/01/2002	2002	1	2.23	-0.03	362100	1787800	2.20
GA0079	03/01/2002	2002	1	2.58	-0.67	363600	1789800	1.91
GA0080	03/01/2002	2002	1	2.3	-0.57	363800	1790900	1.73
GA0083	03/01/2002	2002	1	2.64	0.41	367500	1794300	3.05
GA0107	03/01/2002	2002	1	3.03	-0.24	385500	1802400	2.79
GA0117	03/01/2002	2002	1	2	0.7	392300	1809500	2.70
GA0119	03/01/2002	2002	1	3.3	0.11	390300	1806800	3.41
GA0120	03/01/2002	2002	1	5.54	-2.1	390300	1806800	3.44
GA0255	03/01/2002	2002	1	2.09	0.86	386500	1817700	2.95
GA0040	04/01/2002	2002	1	1.94	0.01	365000	1823800	1.95
GA0042	04/01/2002	2002	1	1.86	-0.02	367200	1824200	1.84
GA0140	08/01/2002	2002	1	3.04	0.73	408300	1814600	3.77
GA0142	08/01/2002	2002	2	2	1.83	411100	1817000	3.83
GA0143	08/01/2002	2002	2	2	1.41	412800	1818100	3.41
GA0146	08/01/2002	2002	2	1.93	1.09	410100	1813800	3.02
GA0164	08/01/2002	2002	2	2.9	0.06	446400	1827200	2.96
GA0167	08/01/2002	2002	2	3.28	0.67	446300	1829900	3.95
GA0186	08/01/2002	2002	2	5.34	0.33	449800	1831700	5.67
GA0198	08/01/2002	2002	2	6.31	0.96	413100	1813500	7.27

GA0200	08/01/2002	2002	2	6.3	0	413100	1813500	6.30
GA0203	08/01/2002	2002	2	4.12	-0.14	406200	1814600	3.98
GA0206	08/01/2002	2002	2	5.08	-0.32	439900	1824800	4.76
GA0207	08/01/2002	2002	2	5.07	-0.37	439900	1824800	4.70
GA0208	08/01/2002	2002	2	2.7	-0.45	439800	1824100	2.25
GA0209	08/01/2002	2002	2	2.47	-0.22	439800	1824100	2.25
GA0210	08/01/2002	2002	2	3.65	0.27	439800	1823200	3.92
GA0211	08/01/2002	2002	2	3.61	0.37	439800	1823200	3.98
GA0212	08/01/2002	2002	2	5	-0.21	439800	1822200	4.79
GA0001	09/01/2002	2002	2	3.94	-0.27	357600	1791100	3.67
GA0002	09/01/2002	2002	2	3.87	-0.23	357600	1791100	3.64
GA0003	09/01/2002	2002	2	2.57	0.01	355700	1792400	2.58
GA0004	09/01/2002	2002	2	2.39	0.2	355700	1792400	2.59
GA0005	09/01/2002	2002	2	3.64	1.33	353900	1794100	4.97
GA0006	09/01/2002	2002	2	3.51	1.38	353900	1794100	4.89
GA0007	09/01/2002	2002	2	2.36	0.77	355100	1793200	3.13
GA0008	09/01/2002	2002	2	2.65	0.38	358900	1788700	3.03
GA0020	09/01/2002	2002	2	3.8	0.99	351700	1792900	4.79
GA0021	09/01/2002	2002	2	3.4	1.49	351700	1792900	4.89
GA0022	09/01/2002	2002	2	3.02	1.27	351700	1792800	4.29
GA0023	09/01/2002	2002	2	3.27	1.01	351700	1792800	4.28
GA0025	09/01/2002	2002	2	4.88	0.22	351300	1792000	5.10
GA0026	09/01/2002	2002	2	6.04	-0.94	351300	1792000	5.10
GA0071	09/01/2002	2002	2	3.46	-0.43	358200	1784300	3.03
GA0072	09/01/2002	2002	2	3.44	-0.37	358200	1784300	3.07

Annexe 3 : Données du toit et du substratum de l'aquifère

TOIT		
X (m)	Y (m)	Z (m)
351200	1792400	4.941
351300	1792000	5.103
351600	1791400	5.348
351700	1792900	4.791
351700	1792800	4.289
351700	1790900	5.948
353900	1794100	4.965
355100	1793200	3.134
355700	1792400	2.58
357100	1783900	1.424
357500	1803100	2.473
357600	1791100	3.672
357900	1803000	2.51
358100	1803100	2.555
358100	1803000	2.588
358200	1784300	3.031
358300	1803100	2.689
358500	1803100	2.413
358800	1803200	2.413
358900	1788700	3.034
359200	1803300	2.624
360200	1790700	1.994
360400	1787400	2.031
360700	1798600	2.807
360900	1791500	2.056
361300	1792400	1.931
361800	1785600	4.596
362000	1790300	1.769
362100	1787800	2.2
363600	1789800	1.912
363800	1790900	1.733
364400	1790900	2.104
365000	1823800	1.951
366200	1826600	3.005
366200	1826800	3.125
366200	1827800	3.034
366300	1826300	1.848
366500	1825700	2.053
366600	1824200	2.15
367100	1794500	2.598
367200	1824200	1.841
367400	1797200	2.487
367500	1794300	3.047
367900	1795700	2.253
368300	1824100	1.654

SUBSTRATUM		
X (m)	Y (m)	Z (m)
351200	1792400	3.7
351300	1792000	-8.1
351600	1791400	-5.8
351700	1792900	-7.3
351700	1792800	-8
351700	1790900	-8.2
353900	1794100	-9.2
355100	1793200	-8.2
355700	1792400	-7.7
357100	1783900	-1.7
357500	1803100	-0.6
357600	1791100	-12.6
357900	1803000	-7.6
358100	1803100	-7.6
358100	1803000	-0.6
358200	1784300	-6.2
358300	1803100	-0.5
358500	1803100	-8.6
358800	1803200	-0.7
358900	1788700	-38.3
359200	1803300	-10.4
360200	1790700	0.8
360400	1787400	0.9
360700	1798600	-2.4
360900	1791500	-2.3
361300	1792400	-5.4
361800	1785600	-5.8
362000	1790300	-5.4
362100	1787800	-4
363600	1789800	-3.2
363800	1790900	-1.3
364400	1790900	-1.8
365000	1823800	-2.1
366200	1826600	-5.9
366200	1826800	-0.9
366200	1827800	-16
366300	1826300	-8.1
366500	1825700	-3.1
366600	1824200	-2.9
367100	1794500	-4.6
367200	1824200	-5.3
367400	1797200	-1.7
367500	1794300	-2.1
367900	1795700	-4.9
368300	1824100	-5.4

368500	1798200	2.398	368500	1798200	-3.8
368700	1825300	2.221	368700	1825300	-8.9
369600	1796400	2.523	369600	1796400	-3.7
369800	1824900	1.882	369800	1824900	-2.6
370300	1824100	2.033	370300	1824100	-5.1
370500	1799600	1.93	370500	1799600	-8.2
375000	1800600	2.703	375000	1800600	-4.6
375800	1800600	2.666	375800	1800600	-3.5
375900	1799300	2.799	375900	1799300	-3.4
378700	1815600	2.127	378700	1815600	-19.9
378900	1816800	2.289	378900	1816800	-1.7
380200	1814900	2.503	380200	1814900	-1.5
380400	1802300	3.061	380400	1802300	-6.1
380800	1816600	2.881	380800	1816600	-0.2
381500	1816000	2.727	381500	1816000	-1.3
381500	1803900	1.872	381500	1803900	-6.4
382200	1805100	2.301	382200	1805100	-1.8
382300	1802700	2.186	382300	1802700	-11
382800	1806400	3.067	382800	1806400	-8
382900	1816400	2.732	382900	1816400	-21.4
382900	1803400	2.968	382900	1803400	-5.3
383100	1814900	2.732	383100	1814900	-1.3
383700	1802700	2.725	383700	1802700	-3.3
383900	1806200	2.657	383900	1806200	-6.5
384100	1802000	2.515	384100	1802000	-2.5
384300	1816900	2.418	384300	1816900	-1.6
384400	1803800	2.897	384400	1803800	-0.2
384600	1805700	2.94	384600	1805700	-1.2
384800	1815800	2.57	384800	1815800	-0.4
385300	1819800	2.68	385300	1819800	-1.5
385500	1818600	2.423	385500	1818600	-0.7
385500	1802400	2.788	385500	1802400	-3.3
385600	1807400	2.44	385600	1807400	-7.6
385700	1816500	2.342	385700	1816500	-1.7
385800	1808300	2.776	385800	1808300	-3.3
386500	1817700	2.947	386500	1817700	-19.9
386700	1819500	3.101	386700	1819500	-1
386700	1803400	2.569	386700	1803400	-5.5
387000	1807400	2.835	387000	1807400	-1.3
388000	1820800	3.202	388000	1820800	-15.9
388600	1816500	2.387	388600	1816500	-0.6
388800	1818800	2.413	388800	1818800	-0.7
390300	1806800	3.414	390300	1806800	-7.6
392300	1809500	2.696	392300	1809500	-0.3
392400	1812500	2.28	392400	1812500	-19.7
393800	1810200	2.43	393800	1810200	-0.6
403100	1821600	3.34	403100	1821600	-14.7
403400	1820200	3.467	403400	1820200	-0.6
403600	1821200	3.272	403600	1821200	-0.7
404400	1819300	2.847	404400	1819300	-1.2
406100	1822400	3.436	406100	1822400	-0.6
406200	1814600	3.978	406200	1814600	-23.1

406800	1820300	3.031
406900	1822400	3.349
407700	1821100	3.206
407700	1819900	3.219
408000	1823000	3.391
408300	1814600	3.765
408500	1812700	5.002
408600	1823000	3.927
410000	1815300	4.061
410100	1813800	3.024
410100	1812800	2.919
411100	1817000	3.826
412800	1818100	3.408
413000	1816900	3.982
413100	1813500	7.266
413200	1809200	1.189
413800	1816100	3.582
415000	1819500	3.923
417300	1807300	2.129
417500	1807500	2.041
419000	1806000	7.934
420800	1812500	2.073
421600	1812200	2.135
421900	1816100	2.707
421900	1813000	2.596
422700	1814000	2.71
423500	1816900	2.451
423900	1815400	2.592
424000	1817700	2.387
424600	1816600	2.896
439800	1824100	2.247
439800	1823200	3.916
439800	1822200	4.792
439800	1822000	10.28
439900	1824800	4.779
446300	1829900	3.949
446400	1827200	2.908
446900	1828600	4.702
447400	1831700	3.845
447700	1826000	4.362
447800	1807700	2.503
448600	1830600	3.93
449000	1829400	2.955
449800	1831700	5.673
450000	1826300	4.45
452700	1827800	5.276
452700	1831800	5.804
454000	1828600	6.163

406800	1820300	0
406900	1822400	-0.6
407700	1821100	-0.8
407700	1819900	-10.8
408000	1823000	-0.6
408300	1814600	-1.2
408500	1812700	-18
408600	1823000	-11.1
410000	1815300	1.1
410100	1813800	-19
410100	1812800	-20.1
411100	1817000	-1.2
412800	1818100	-0.7
413000	1816900	0
413100	1813500	-8.8
413200	1809200	-20.8
413800	1816100	-0.4
415000	1819500	-1.1
417300	1807300	-1.9
417500	1807500	-6
419000	1806000	6.9
420800	1812500	-8.9
421600	1812200	1.1
421900	1816100	-1.3
421900	1813000	-2.4
422700	1814000	-12.3
423500	1816900	-1.5
423900	1815400	-0.4
424000	1817700	-2.6
424600	1816600	-0.1
439800	1824100	-3.8
439800	1823200	-3
439800	1822200	-26.2
439800	1822000	-0.7
439900	1824800	-27.9
446300	1829900	-1
446400	1827200	-2.2
446900	1828600	-8.3
447400	1831700	-1.1
447700	1826000	1.4
447800	1807700	-28.6
448600	1830600	-3.1
449000	1829400	-11.1
449800	1831700	0.7
450000	1826300	-4.6
452700	1827800	2.3
452700	1831800	-4.2
454000	1828600	1.1

Annexe 4 : Valeurs des coefficients de perméabilité de l'aquifère

X (m)	Y (m)	Z (m)	K (10 ⁻⁵ m/s)
357600	1791100	3.672	3.50
355700	1792400	2.580	4.90
358900	1788700	3.034	3.60
361800	1785600	4.596	3.60
351700	1792900	4.791	4.90
351700	1792900	4.891	2.50
351200	1792400	4.941	3.60
351300	1792000	5.103	2.50
351600	1791400	5.348	2.50
351700	1790900	5.948	4.90
358200	1784300	3.031	3.60
358200	1784300	3.075	3.60
360400	1787400	2.031	2.50
367500	1794300	3.047	2.50
358300	1803100	2.689	1.60
388600	1816500	2.387	0.00
386500	1817700	2.970	0.04
386700	1819500	3.101	0.01
385300	1819800	2.680	0.01
381500	1816000	2.727	0.00
378900	1816800	2.289	0.00
367400	1797200	2.487	0.00
368500	1798200	2.398	0.08
360700	1798600	2.807	0.08
370500	1799600	1.930	0.04
382200	1805100	2.301	0.04
382900	1803400	2.968	0.02
385500	1802400	2.788	0.01
382800	1806400	3.067	0.01
385800	1808300	2.776	2.50
387000	1807400	2.835	3.60
390300	1806800	3.414	0.03
380400	1802300	3.061	0.01
408000	1823000	3.391	0.04
408000	1823000	3.402	0.04
403600	1821200	3.272	0.00
412800	1818100	3.408	0.04
413000	1816900	3.982	0.09
413800	1816100	3.582	0.00
419000	1806000	7.934	2.50
413100	1813500	6.305	3.60
408500	1812700	5.002	0.04
448600	1830600	3.927	0.10
450000	1826300	4.465	0.90
454000	1828600	6.163	0.01
449800	1831700	5.673	0.01

Annexe 5 : Mesure des fluctuations en quelques ouvrages

IDOUV	DATVIS	AnnéeVis	SemVis	PROFNSND	Alt. Piézo (m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
GB0053	29/11/1985	1985	48	15.6	-6.15	440400	1817700	9.454
GB0053	29/10/1986	1986	44	14.96	-5.51	440400	1817700	9.454
GB0053	17/11/1986	1986	47	15.19	-5.74	440400	1817700	9.454
GB0053	11/12/1986	1986	50	16.49	-7.04	440400	1817700	9.454
GB0053	22/12/1986	1986	52	16.23	-6.78	440400	1817700	9.454
GB0053	12/01/1987	1987	3	16.53	-7.08	440400	1817700	9.454
GB0053	28/01/1987	1987	5	16.45	-7	440400	1817700	9.454
GB0053	11/02/1987	1987	7	16.33	-6.88	440400	1817700	9.454
GB0053	24/02/1987	1987	9	16.12	-6.67	440400	1817700	9.454
GB0053	17/03/1987	1987	12	14.07	-4.62	440400	1817700	9.454
GB0053	26/03/1987	1987	13	14.59	-5.14	440400	1817700	9.454
GB0053	23/04/1987	1987	17	16.07	-6.62	440400	1817700	9.454
GB0053	17/05/1987	1987	21	13.01	-3.56	440400	1817700	9.454
GB0053	27/06/1987	1987	26	12.11	-2.66	440400	1817700	9.454
GB0053	23/07/1987	1987	30	12.1	-2.65	440400	1817700	9.454
GB0053	17/08/1987	1987	34	13.1	-3.65	440400	1817700	9.454
GB0053	26/09/1987	1987	39	15.61	-6.16	440400	1817700	9.454
GB0053	21/10/1987	1987	43	12.07	-2.62	440400	1817700	9.454
GB0053	22/11/1987	1987	48	16.39	-6.94	440400	1817700	9.454
GB0053	23/12/1987	1987	52	16.41	-6.96	440400	1817700	9.454
GB0053	03/03/1988	1988	10	12.11	-2.66	440400	1817700	9.454
GB0053	22/03/1988	1988	13	12.41	-2.96	440400	1817700	9.454
GB0053	06/06/1988	1988	24	12.58	-3.13	440400	1817700	9.454
GB0053	29/06/1988	1988	27	12.45	-3	440400	1817700	9.454
GB0053	16/07/1988	1988	29	12.28	-2.83	440400	1817700	9.454
GB0053	20/09/1988	1988	39	4.75	4.7	440400	1817700	9.454
GB0053	19/10/1988	1988	43	7.94	1.51	440400	1817700	9.454
GB0053	21/11/1988	1988	48	12.37	-2.92	440400	1817700	9.454
GB0053	13/12/1988	1988	51	14.35	-4.9	440400	1817700	9.454
GB0053	22/01/1989	1989	4	14.05	-4.6	440400	1817700	9.454
GB0053	16/02/1989	1989	7	12.7	-3.25	440400	1817700	9.454
GB0053	14/03/1989	1989	11	12.62	-3.17	440400	1817700	9.454
GB0053	19/05/1989	1989	20	13.28	-3.83	440400	1817700	9.454

IDOUV	DATVIS	AnnéeVis	SemVis	PROFNSND	Alt. Piézo (m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
GB0002	11/05/1985	1985	45	4.07	-0.55	345600	1771300	3.519
GB0002	23/10/1986	1986	43	4.19	-0.67	345600	1771300	3.519
GB0002	11/11/1986	1986	46	4.2	-0.68	345600	1771300	3.519
GB0002	08/12/1986	1986	50	4.22	-0.7	345600	1771300	3.519
GB0002	26/12/1986	1986	52	4.2	-0.68	345600	1771300	3.519
GB0002	13/01/1987	1987	3	4.25	-0.73	345600	1771300	3.519
GB0002	22/01/1987	1987	4	4.27	-0.75	345600	1771300	3.519
GB0002	11/03/1987	1987	11	4.3	-0.78	345600	1771300	3.519
GB0002	22/03/1987	1987	13	4.22	-0.7	345600	1771300	3.519
GB0002	23/04/1987	1987	17	4.35	-0.83	345600	1771300	3.519
GB0002	18/05/1987	1987	21	4.34	-0.82	345600	1771300	3.519

GB0002	12/06/1987	1987	24	4.28	-0.76	345600	1771300	3.519
GB0002	10/07/1987	1987	28	4.32	-0.8	345600	1771300	3.519
GB0002	14/08/1987	1987	33	4.38	-0.86	345600	1771300	3.519
GB0002	17/09/1987	1987	38	4.22	-0.7	345600	1771300	3.519
GB0002	18/10/1987	1987	43	4.28	-0.76	345600	1771300	3.519
GB0002	20/11/1987	1987	47	4.23	-0.71	345600	1771300	3.519
GB0002	11/12/1987	1987	50	4.31	-0.79	345600	1771300	3.519
GB0002	20/01/1988	1988	4	4.29	-0.77	345600	1771300	3.519
GB0002	18/02/1988	1988	8	4.2	-0.68	345600	1771300	3.519
GB0002	30/03/1988	1988	14	4.31	-0.79	345600	1771300	3.519
GB0002	17/04/1988	1988	17	4.28	-0.76	345600	1771300	3.519
GB0002	31/05/1988	1988	23	4.09	-0.57	345600	1771300	3.519
GB0002	21/06/1988	1988	26	4.15	-0.63	345600	1771300	3.519
GB0002	18/07/1988	1988	30	4.11	-0.59	345600	1771300	3.519
GB0002	20/08/1988	1988	34	4.15	-0.63	345600	1771300	3.519
GB0002	13/09/1988	1988	38	4.27	-0.75	345600	1771300	3.519
GB0002	05/11/1988	1988	45	3.72	-0.2	345600	1771300	3.519
GB0002	15/11/1988	1988	47	3.68	-0.16	345600	1771300	3.519
GB0002	30/12/1988	1988	53	3.67	-0.15	345600	1771300	3.519
GB0002	18/01/1989	1989	3	3.65	-0.13	345600	1771300	3.519
GB0002	23/02/1989	1989	8	3.76	-0.24	345600	1771300	3.519
GB0002	22/04/1989	1989	16	3.76	-0.24	345600	1771300	3.519
GB0002	26/05/1989	1989	21	3.8	-0.28	345600	1771300	3.519
GB0002	30/06/1989	1989	26	3.9	-0.38	345600	1771300	3.519
GB0002	27/07/1989	1989	30	3.84	-0.32	345600	1771300	3.519
GB0002	15/09/1989	1989	37	3.77	-0.25	345600	1771300	3.519
GB0002	19/10/1989	1989	42	3.68	-0.16	345600	1771300	3.519
GB0002	30/11/1989	1989	48	3.64	-0.12	345600	1771300	3.519
GB0002	21/12/1989	1989	51	3.66	-0.14	345600	1771300	3.519
GB0002	17/01/1990	1990	3	3.77	-0.25	345600	1771300	3.519
GB0002	20/02/1990	1990	8	3.81	-0.29	345600	1771300	3.519

IDOUV	DATVIS	AnnéeVis	SemVis	PROFNSND	Alt.Piézo (m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
GB0846	13/11/1985	1985	46	3.25	-1.58	364200	1822300	1.668
GB0846	02/11/1986	1986	45	2.77	-1.1	364200	1822300	1.668
GB0846	14/11/1986	1986	46	2.82	-1.15	364200	1822300	1.668
GB0846	05/12/1986	1986	49	2.79	-1.12	364200	1822300	1.668
GB0846	25/12/1986	1986	52	2.77	-1.1	364200	1822300	1.668
GB0846	08/01/1987	1987	2	2.75	-1.08	364200	1822300	1.668
GB0846	21/01/1987	1987	4	2.74	-1.07	364200	1822300	1.668
GB0846	10/03/1987	1987	11	2.76	-1.09	364200	1822300	1.668
GB0846	21/03/1987	1987	12	2.77	-1.1	364200	1822300	1.668
GB0846	25/04/1987	1987	17	2.8	-1.13	364200	1822300	1.668
GB0846	20/05/1987	1987	21	2.83	-1.16	364200	1822300	1.668
GB0846	26/06/1987	1987	26	2.77	-1.1	364200	1822300	1.668
GB0846	14/07/1987	1987	29	2.22	-0.55	364200	1822300	1.668
GB0846	17/08/1987	1987	34	2.86	-1.19	364200	1822300	1.668
GB0846	26/09/1987	1987	39	2.78	-1.11	364200	1822300	1.668
GB0846	02/11/1987	1987	45	2.71	-1.04	364200	1822300	1.668
GB0846	01/12/1987	1987	49	2.8	-1.13	364200	1822300	1.668
GB0846	22/12/1987	1987	52	2.85	-1.18	364200	1822300	1.668
GB0846	14/01/1988	1988	3	2.78	-1.11	364200	1822300	1.668

GB0846	14/02/1988	1988	8	2.83	-1.16	364200	1822300	1.668
GB0846	03/04/1988	1988	15	2.89	-1.22	364200	1822300	1.668
GB0846	28/04/1988	1988	18	2.95	-1.28	364200	1822300	1.668
GB0846	22/05/1988	1988	22	4.1	-2.43	364200	1822300	1.668
GB0846	30/06/1988	1988	27	3.37	-1.7	364200	1822300	1.668
GB0846	22/07/1988	1988	30	3.25	-1.58	364200	1822300	1.668
GB0846	29/08/1988	1988	36	3.13	-1.46	364200	1822300	1.668
GB0846	23/09/1988	1988	39	2.9	-1.23	364200	1822300	1.668
GB0846	29/12/1988	1988	53	2.76	-1.09	364200	1822300	1.668
GB0846	26/01/1989	1989	4	2.91	-1.24	364200	1822300	1.668
GB0846	21/02/1989	1989	8	3.82	-2.15	364200	1822300	1.668
GB0846	25/04/1989	1989	17	3.29	-1.62	364200	1822300	1.668
GB0846	24/05/1989	1989	21	3.2	-1.53	364200	1822300	1.668
GB0846	24/07/1989	1989	30	1.65	0.02	364200	1822300	1.668
GB0846	15/09/1989	1989	37	0.97	0.7	364200	1822300	1.668

IDOUV	DATVIS	AnnéeVis	SemVis	PROFNSND	Alt.Piézo (m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
GB0004	11/05/1985	1985	45	4	-0.59	348200	1773400	3.409
GB0004	11/11/1986	1986	46	4.15	-0.74	348200	1773400	3.409
GB0004	08/12/1986	1986	50	4.18	-0.77	348200	1773400	3.409
GB0004	19/12/1986	1986	51	4.27	-0.86	348200	1773400	3.409
GB0004	14/01/1987	1987	3	4.28	-0.87	348200	1773400	3.409
GB0004	22/01/1987	1987	4	4.25	-0.84	348200	1773400	3.409
GB0004	11/03/1987	1987	11	4.27	-0.86	348200	1773400	3.409
GB0004	22/03/1987	1987	13	4.25	-0.84	348200	1773400	3.409
GB0004	23/04/1987	1987	17	4.28	-0.87	348200	1773400	3.409
GB0004	18/05/1987	1987	21	4.22	-0.81	348200	1773400	3.409
GB0004	12/06/1987	1987	24	4.17	-0.76	348200	1773400	3.409
GB0004	14/08/1987	1987	33	4.07	-0.66	348200	1773400	3.409
GB0004	16/09/1987	1987	38	4.03	-0.62	348200	1773400	3.409
GB0004	18/10/1987	1987	43	4.13	-0.72	348200	1773400	3.409
GB0004	20/11/1987	1987	47	4.17	-0.76	348200	1773400	3.409
GB0004	11/12/1987	1987	50	4.18	-0.77	348200	1773400	3.409
GB0004	20/01/1988	1988	4	3.86	-0.45	348200	1773400	3.409
GB0004	18/02/1988	1988	8	3.93	-0.52	348200	1773400	3.409
GB0004	30/03/1988	1988	14	4.08	-0.67	348200	1773400	3.409
GB0004	17/04/1988	1988	17	3.9	-0.49	348200	1773400	3.409
GB0004	31/05/1988	1988	23	4.13	-0.72	348200	1773400	3.409
GB0004	21/06/1988	1988	26	3.99	-0.58	348200	1773400	3.409
GB0004	18/07/1988	1988	30	4.03	-0.62	348200	1773400	3.409
GB0004	20/08/1988	1988	34	4.09	-0.68	348200	1773400	3.409
GB0004	13/09/1988	1988	38	4.12	-0.71	348200	1773400	3.409
GB0004	05/11/1988	1988	45	3.1	0.31	348200	1773400	3.409
GB0004	30/12/1988	1988	53	3.62	-0.21	348200	1773400	3.409
GB0004	18/01/1989	1989	3	3.7	-0.29	348200	1773400	3.409
GB0004	23/02/1989	1989	8	3.79	-0.38	348200	1773400	3.409
GB0004	22/04/1989	1989	16	3.84	-0.43	348200	1773400	3.409
GB0004	26/05/1989	1989	21	3.8	-0.39	348200	1773400	3.409
GB0004	30/06/1989	1989	26	3.54	-0.13	348200	1773400	3.409
GB0004	27/07/1989	1989	30	4.06	-0.65	348200	1773400	3.409
GB0004	14/08/1989	1989	33	3.35	0.06	348200	1773400	3.409
GB0004	15/09/1989	1989	37	3.77	-0.36	348200	1773400	3.409

GB0004	19/10/1989	1989	42	3.64	-0.23	348200	1773400	3.409
GB0004	30/11/1989	1989	48	3.77	-0.36	348200	1773400	3.409
GB0004	21/12/1989	1989	51	3.76	-0.35	348200	1773400	3.409
GB0004	20/02/1990	1990	8	4	-0.59	348200	1773400	3.409

IDOUV	DATVIS	AnnéeVis	SemVis	PROFNSND	Alt.Piézo (m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
GB0024	06/11/1985	1985	45	3.8	-1.44	348400	1783700	2.357
GB0024	22/10/1986	1986	43	3.39	-1.03	348400	1783700	2.357
GB0024	11/11/1986	1986	46	3.4	-1.04	348400	1783700	2.357
GB0024	06/12/1986	1986	49	3.87	-1.51	348400	1783700	2.357
GB0024	24/12/1986	1986	52	3.52	-1.16	348400	1783700	2.357
GB0024	09/01/1987	1987	2	3.72	-1.36	348400	1783700	2.357
GB0024	19/01/1987	1987	4	3.75	-1.39	348400	1783700	2.357
GB0024	07/03/1987	1987	10	3.82	-1.46	348400	1783700	2.357
GB0024	19/03/1987	1987	12	3.81	-1.45	348400	1783700	2.357
GB0024	24/04/1987	1987	17	3.84	-1.48	348400	1783700	2.357
GB0024	19/05/1987	1987	21	3.83	-1.47	348400	1783700	2.357
GB0024	12/06/1987	1987	24	3.86	-1.5	348400	1783700	2.357
GB0024	13/07/1987	1987	29	3.82	-1.46	348400	1783700	2.357
GB0024	14/08/1987	1987	33	3.77	-1.41	348400	1783700	2.357
GB0024	17/09/1987	1987	38	3.48	-1.12	348400	1783700	2.357
GB0024	19/10/1987	1987	43	3.53	-1.17	348400	1783700	2.357
GB0024	23/11/1987	1987	48	3.64	-1.28	348400	1783700	2.357
GB0024	11/12/1987	1987	50	3.56	-1.2	348400	1783700	2.357
GB0024	22/01/1988	1988	4	3.66	-1.3	348400	1783700	2.357
GB0024	19/02/1988	1988	8	3.71	-1.35	348400	1783700	2.357
GB0024	30/03/1988	1988	14	3.88	-1.52	348400	1783700	2.357
GB0024	18/04/1988	1988	17	3.76	-1.4	348400	1783700	2.357
GB0024	20/05/1988	1988	21	3.99	-1.63	348400	1783700	2.357
GB0024	22/06/1988	1988	26	3.75	-1.39	348400	1783700	2.357
GB0024	19/07/1988	1988	30	3.7	-1.34	348400	1783700	2.357
GB0024	21/08/1988	1988	35	3.69	-1.33	348400	1783700	2.357
GB0024	14/09/1988	1988	38	3.59	-1.23	348400	1783700	2.357
GB0024	05/11/1988	1988	45	1.92	0.44	348400	1783700	2.357
GB0024	19/11/1988	1988	47	2.94	-0.58	348400	1783700	2.357
GB0024	26/12/1988	1988	53	3.02	-0.66	348400	1783700	2.357
GB0024	25/01/1989	1989	4	3.15	-0.79	348400	1783700	2.357
GB0024	22/02/1989	1989	8	3.3	-0.94	348400	1783700	2.357

IDOUV	DATVIS	AnnéeVis	SemVis	PROFNSND	Alt.Piézo (m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
GB0844	01/11/1986	1986	44	2.87	-0.77	363200	1788900	2.101
GB0844	08/11/1986	1986	45	2.92	-0.82	363200	1788900	2.101
GB0844	12/12/1986	1986	50	2.92	-0.82	363200	1788900	2.101
GB0844	25/12/1986	1986	52	2.95	-0.85	363200	1788900	2.101
GB0844	13/01/1987	1987	3	2.91	-0.81	363200	1788900	2.101
GB0844	21/01/1987	1987	4	2.94	-0.84	363200	1788900	2.101
GB0844	10/03/1987	1987	11	2.97	-0.87	363200	1788900	2.101
GB0844	21/03/1987	1987	12	2.92	-0.82	363200	1788900	2.101
GB0844	17/04/1987	1987	16	3.01	-0.91	363200	1788900	2.101
GB0844	13/05/1987	1987	20	2.97	-0.87	363200	1788900	2.101
GB0844	08/06/1987	1987	24	2.99	-0.89	363200	1788900	2.101

GB0844	11/07/1987	1987	28	2.95	-0.85	363200	1788900	2.101
GB0844	12/08/1987	1987	33	2.97	-0.87	363200	1788900	2.101
GB0844	14/09/1987	1987	38	2.58	-0.48	363200	1788900	2.101
GB0844	16/10/1987	1987	42	2.66	-0.56	363200	1788900	2.101
GB0844	18/11/1987	1987	47	2.73	-0.63	363200	1788900	2.101
GB0844	12/12/1987	1987	50	2.9	-0.8	363200	1788900	2.101
GB0844	21/01/1988	1988	4	2.99	-0.89	363200	1788900	2.101
GB0844	15/02/1988	1988	8	3.07	-0.97	363200	1788900	2.101
GB0844	29/03/1988	1988	14	2.98	-0.88	363200	1788900	2.101
GB0844	16/04/1988	1988	16	3.03	-0.93	363200	1788900	2.101
GB0844	30/05/1988	1988	23	2.76	-0.66	363200	1788900	2.101
GB0844	20/06/1988	1988	26	2.84	-0.74	363200	1788900	2.101
GB0844	17/07/1988	1988	30	2.9	-0.8	363200	1788900	2.101
GB0844	19/08/1988	1988	34	2.88	-0.78	363200	1788900	2.101
GB0844	12/09/1988	1988	38	2.51	-0.41	363200	1788900	2.101
GB0844	05/11/1988	1988	45	1.8	0.3	363200	1788900	2.101
GB0844	21/12/1988	1988	52	2.74	-0.64	363200	1788900	2.101
GB0844	24/01/1989	1989	4	2.74	-0.64	363200	1788900	2.101
GB0844	23/02/1989	1989	8	2.7	-0.6	363200	1788900	2.101
GB0844	19/04/1989	1989	16	2.71	-0.61	363200	1788900	2.101
GB0844	27/05/1989	1989	21	2.72	-0.62	363200	1788900	2.101
GB0844	23/06/1989	1989	25	2.74	-0.64	363200	1788900	2.101
GB0844	23/07/1989	1989	30	2.56	-0.46	363200	1788900	2.101
GB0844	10/08/1989	1989	32	2.63	-0.53	363200	1788900	2.101
GB0844	03/10/1989	1989	40	2.37	-0.27	363200	1788900	2.101
GB0844	19/10/1989	1989	42	2.2	-0.1	363200	1788900	2.101
GB0844	30/11/1989	1989	48	2.08	0.02	363200	1788900	2.101
GB0844	20/12/1989	1989	51	2.09	0.01	363200	1788900	2.101
GB0844	17/01/1990	1990	3	2.02	0.08	363200	1788900	2.101
GB0844	20/02/1990	1990	8	2.21	-0.11	363200	1788900	2.101
GB0844	20/03/1990	1990	12	2.37	-0.27	363200	1788900	2.101
GB0844	23/05/1990	1990	21	2.45	-0.35	363200	1788900	2.101
GB0844	11/06/1990	1990	24	2.54	-0.44	363200	1788900	2.101
GB0844	25/07/1990	1990	30	2.63	-0.53	363200	1788900	2.101
GB0844	25/08/1990	1990	34	2.77	-0.67	363200	1788900	2.101
GB0844	28/12/1990	1990	52	2.61	-0.51	363200	1788900	2.101
GB0844	25/03/1991	1991	13	2.59	-0.49	363200	1788900	2.101
GB0844	23/07/1991	1991	30	2.74	-0.64	363200	1788900	2.101
GB0844	21/08/1991	1991	34	2.76	-0.66	363200	1788900	2.101

Annexe 6 : Données climatologiques à la station de Saint Louis

Températures moyennes mensuelles en degrés et dixièmes												
	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
1986	21.60	23.10	24.90	25.60	24.60	26.10	27.50	28.60	28.40	28.80	26.10	23.6
1987	22.20	24.40	26.20	28.00	26.70	27.90	28.70	29.20	29.20	29.10	27.20	25
1988	22.50	26.60	27.30	25.70	25.80	26.20	27.60	28.00	28.80	28.00	26.00	21.8
1989	23.60	24.90	24.60	24.50	25.80	28.00	28.50	28.40	29.00	28.70	25.30	24.9
1990	21.90	27.00	27.70	24.30	25.50	25.40	27.00	28.60	29.80	29.80	26.60	23.8
1991	23.40	23.70	24.00	24.40	23.40	25.40	27.60	28.20	29.20	27.30	27.20	25.2
1992	23.90	22.90	25.80	23.90	25.30	26.90	26.70	28.20	29.10	28.20	27.10	24.3
1993	23.20	24.30	24.80	24.10	25.70	26.20	27.70	27.60	28.70	28.10	25.00	23.9
1994	22.20	24.10	24.40	24.70	24.00	26.00	27.60	28.70	28.20	27.90	27.10	25
1995	22.10	24.00	21.20	21.60	23.40	25.60	28.30	28.70	28.50	25.30	26.60	23.3
1996	23.70	25.50	24.30	25.10	26.40	26.40	27.80	28.70	28.90	29.40	27.70	24.5
1997	24.00	28.10	25.60	24.50	26.10	27.70	28.40	27.90	28.70	29.20	28.50	24.6
1998	24.40	27.10	27.40	25.70	25.30	26.10	27.30	28.60	29.20	29.20	28.10	24.8
1999	21.30	23.60	24.00	24.50	25.00	27.70	28.00	28.30	29.30	28.90	26.70	24.8
2000	23.90	24.80	26.50	26.50	23.50	26.10	27.70	28.70	29.50	29.30	27.20	23.9
2001	24.50	26.40	26.20	25.40	25.80	27.40	28.40	29.10	29.20	29.80	28.40	27.3
2002	24.20	25.30	24.90	24.50	25.10	27.60	27.90	28.10	29.60	28.90	27.70	26.3
2003	23.70	23.70	26.10	26.00	24.90	26.10	28.20	29.10	29.30	29.10	27.20	25.2
Moy mens	23.13	24.97	25.33	24.94	25.13	26.60	27.83	28.48	29.03	28.61	26.98	24.57

Moyennes mensuelles de l'insolation en heures et dixièmes												
	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
1986	6.10	9.30	8.20	8.10	7.90	6.70	7.40	7.80	6.55	8.60	6.80	5.50
1987	8.60	9.00	9.50	7.60	5.70	6.70	7.00	7.40	6.70	7.00	7.60	8.50
1988	6.30	5.00	8.40	9.20	8.60	4.30	5.90	7.30	7.50	9.10	8.30	5.80
1989	7.10	5.30	8.30	9.30	8.70	6.10	6.10	7.60	7.90	7.90	6.20	8.60
1990	5.10	8.20	7.20	9.20	10.30	5.90	7.60	8.20	8.40	7.60	7.60	8.20
1991	4.70	7.70	9.30	9.80	8.60	5.40	5.90	8.40	7.00	7.90	6.90	5.20
1992	6.30	7.10	7.80	8.80	7.00	4.60	7.00	8.40	7.70	8.10	5.90	7.50
1993	4.50	7.80	8.30	8.40	8.30	6.20	7.20	7.50	7.30	7.30	7.20	6.60
1994	7.00	8.70	8.50	8.50	8.70	4.00	7.40	6.60	7.50	8.60	7.10	6.50
1995	7.00	7.40	8.50	9.90	10.10	7.70	5.30	6.80	6.90	8.00	8.30	5.30
1996	9.90	9.30	9.00	9.90	9.40	7.10	5.90	7.10	7.60	8.40	3.90	6.20
1997	4.20	7.30	7.90	10.70	6.60	4.50	5.30	6.50	5.10	7.40	8.10	6.00
1998	4.30	5.60	5.70	6.40	4.70	2.00	3.70	4.40	6.70	9.10	7.40	6.80
1999	8.80	5.20	9.40	8.80	8.80	6.30	6.30	7.00	6.80	7.10	8.00	8.00
2000	7.70	6.80	8.60	8.50	8.40	6.70	7.40	7.50	7.40	7.60	7.80	7.50
2001	10.70	8.70	9.60	10.20	10.70	8.50	7.20	8.20	8.30	8.70	8.20	7.30
2002	8.10	7.60	8.90	9.20	8.70	7.90	8.50	7.90	7.30	8.10	7.40	7.40
2003	8.50	8.10	9.10	9.10	7.60	6.40	6.90	7.10	7.20	6.90	9.50	7.40
Moy mens	6.94	7.45	8.46	8.98	8.27	5.94	6.56	7.32	7.21	7.97	7.34	6.91

Evaporation Piche												
	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
1986	65	43	56	45	31	29	25	24	22	32	18	60
1987	43	49	57	56	40	29	28	29	23	30	46	56
1988	54	44	64	49	45	31	30	26	23	38	52	64
1989	74	65	66	53	47	41	29	27	26	45	40	54
1990	62	80	71	43	45	27	26	26	28	32	48	59
1991	50	54	50	43	36	29	27	30	28	38	53	67
1992	53	41	81	48	44	40	23	31	33	53	74	56
1993												
1994	69	72	55	51	31	27	30	25	25	35	48	71
1995	82	73	40	38	30	29	30	27	27	41	58	37
1996	52	59	45	43	55	28	29	21	28	41	70	54
1997	53	93	75	44	38	30	33	29	26	39	50	56
1998	57	59	66	47	41	32	33	26	23	43	60	52
1999	56	70	51	35	32	34	31	26	26	31	34	57
2000	189.9	211.1	180.2	156.4	96	77.3	84.7	61.6	79.6	98.3	137.2	165.9
2001	188.8	221.2	165.5	131.5	112.7	101.8	101	89.7	75.4	101.7	130.7	148.5
2002	154.6	156.8	156.7	144.9	129.8	115.4	109.5	89.8	89.7	65.7	137.1	168.6
2003	192.3	118.8	181.7	156.9	105.2	89.8	100.3	95.8	70.6	79.2	108.6	168.8
Moyenne	87.98	88.82	85.95	69.69	56.39	46.49	45.26	40.23	38.43	49.58	68.51	82.05

Humidité Relative												
	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
1986	42.0	57.0	53.0	58.5	73.0	74.5	78.5	80.0	78.5	68.0	52.5	42.5
1987	58.5	55.5	54.5	57.0	67.0	76.5	77.0	77.0	79.5	71.5	59.5	52.5
1988	55.5	62.0	53.0	64.0	70.0	77.5	44.8	85.0	85.0	68.5	61.0	52.5
1989	45.5	38.6	63.0	61.0	67.0	74.5	78.0	82.0	80.0	73.0	67.5	61.0
1990	51.0	40.0	48.0	65.0	70.5	80.5	82.0	82.0	79.5	72.0	86.0	83.0
1991	53.0	53.5	62.0	64.5	72.0	79.5	78.0	81.0	79.0	69.0	58.5	50.5
1992	57.0	58.5	44.0	50.5	74.5	73.0	78.5	77.0	77.0	62.0	46.5	51.5
1993	45.0	52.0	59.0	68.0	64.0	78.0	80.0	81.5	79.0	74.0	59.0	45.5
1994	39.0	42.0	61.0	61.0	65.0	75.0	80.5	77.0	80.5	73.5	59.5	41.5
1995	35.5	37.0	64.5	67.0	77.5	80.0	80.0	80.0	79.5	66.5	54.0	62.5
1996	54.5	53.0	61.5	66.5	64.5	81.0	81.0	83.0	79.5	69.0	81.0	56.0
1997	56.5	39.0	61.0	57.5	72.0	76.0	79.0	79.0	81.0	70.0	60.5	56.0
1998	54.5	54.5	52.5	63.5	69.5	78.5	77.0	80.5	80.5	67.5	53.0	54.5
1999	52.5	40.5	62.5	70.5	77.5	77.0	80.5	82.5	82.0	76.0	67.0	48.5
2000	52.1	36.8	54.5	59.4	75.1	80.3	78.5	81.2	78.5	76.4	61.7	53.0
2001	47.0	40.6	58.6	65.8	73.7	78.2	78.3	79.0	80.6	72.9	62.8	54.0
2002	53.7	47.5	58.5	63.2	69.4	74.6	78.4	79.1	79.4	64.5	60.6	53.0
2003	46.2	63.4	58.6	65.9	76.5	78.5	81.0	78.6	81.6	79.9	66.5	54.5
Moy mens.	49.9	48.4	57.2	62.7	71.0	77.4	77.3	80.3	80.0	70.8	62.1	54.0

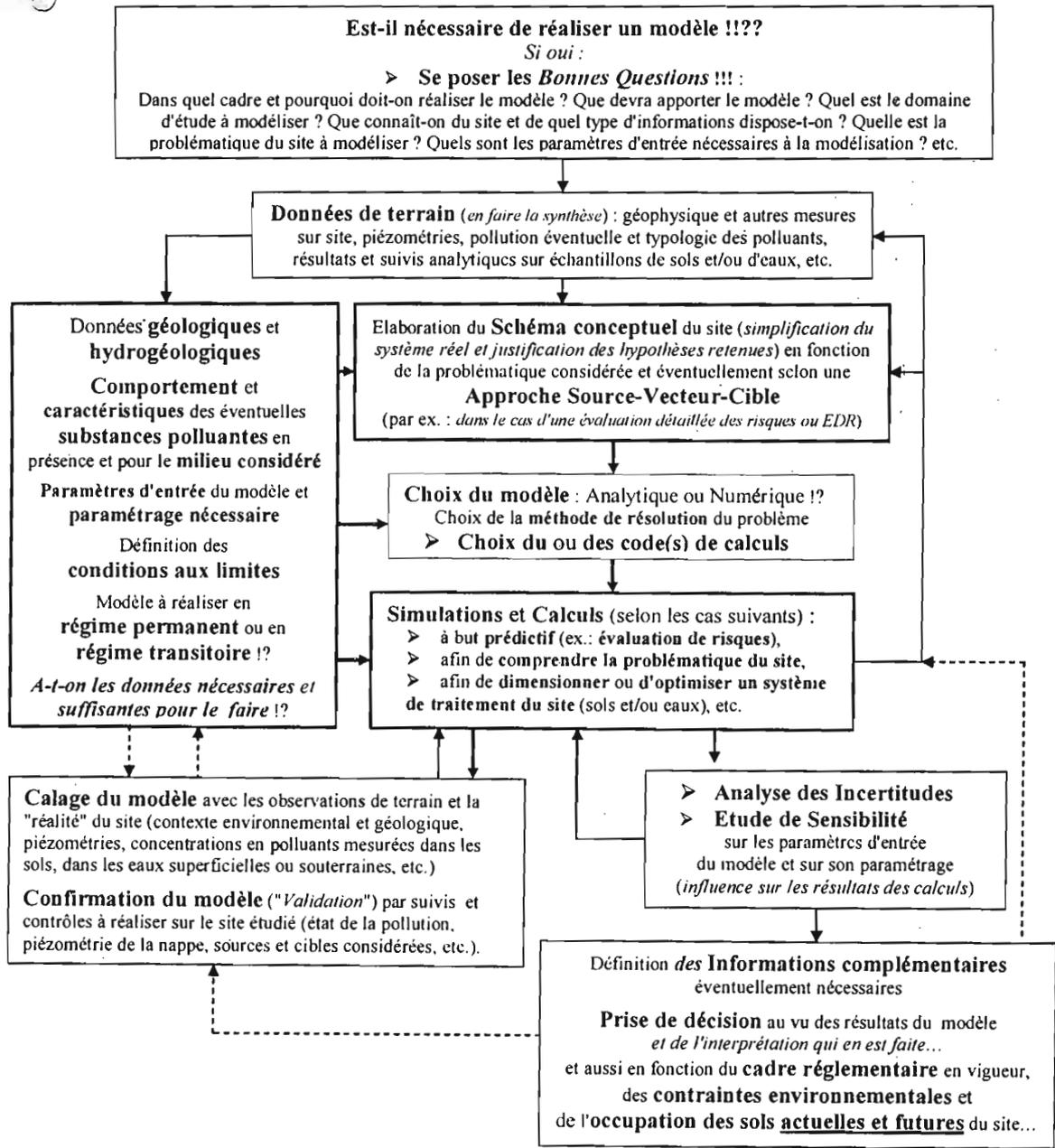
Vitesse moyenne du vent en m/s												
	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
1986	4.60	4.30	4.80	5.30	4.90	4.70	4.80	4.10	3.10	3.80	3.40	3.60
1987	3.90	4.10	4.60	4.80	4.90	5.10	4.20	4.20	2.50	3.10	3.30	3.70
1988	4.20	4.40	4.10	5.70	5.70	5.20	5.20	4.30	4.10	4.30	4.40	3.70
1989	4.60	5.20	5.60	6.20	6.10	5.40	4.70	4.20	4.30	4.00	4.30	4.00
1990	4.80	4.60	5.10	6.50	6.00	5.20	4.60	3.80	3.70	3.50	3.70	4.10
1991	3.70	4.40	5.10	5.20	5.10	4.40	4.30	4.20	3.80	3.40	3.60	3.50
1992	3.20	4.30	4.60	5.50	4.80	4.20	4.10	4.20	3.50	4.20	3.70	3.70
1993	3.70	4.40	5.10	5.50	5.60	4.90	4.40	3.60	3.10	3.40	3.80	3.10
1994	4.00	4.20	5.00	5.60	5.20	4.60	4.50	3.40	3.10	3.40	3.00	3.60
1995	4.40	3.60	5.00	7.90	6.40	5.10	4.50	4.30	3.80	4.00	3.60	3.10
1996	3.90	5.30	5.00	6.00	6.30	4.90	5.80	5.40	5.00	5.20	3.50	3.50
1997	4.30	4.40	5.30	5.40	5.40	4.90	5.70	4.30	3.70	4.10	3.50	3.70
1998	4.20	4.30	4.70	5.30	5.10	4.00	3.70	3.60	3.00	3.20	2.80	3.30
1999	3.60	4.60	5.90	4.90	5.00	4.70	3.70	3.40	3.10	3.50	3.00	3.50
2000	3.90	4.00	4.30	5.60	5.40	4.60	3.70	2.80	3.20	2.60	2.90	3.20
2001	4.10	4.10	4.80	4.90	4.40	4.40	3.60	3.40	2.80	2.80	3.00	3.00
2002	3.20	3.80	4.40	5.00	4.30	3.70	4.00	3.60	3.30	3.10	3.60	3.00
2003	3.50	4.00	4.20	4.80	4.50	3.90	3.50	3.40	2.90	2.60	2.90	2.90
Moyenne	3.99	4.33	4.87	5.56	5.28	4.66	4.39	3.90	3.44	3.57	3.44	3.46

**Annexe 7 : Charte de bonne pratique pour la modélisation et notes sur
Modflow**

Annexe A : Proposition d'une « Charte de Bonne Pratique » pour la réalisation de modélisations en écoulement et en transport de polluants



Modélisation : Mode d'emploi ...

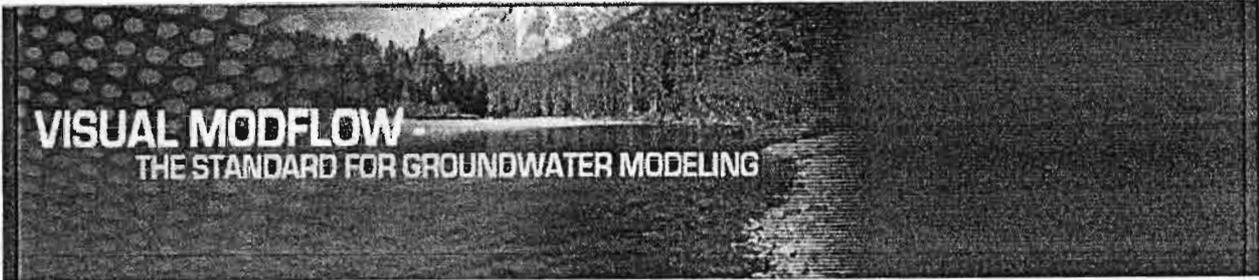


Thierry BLONDEL

Cabinet-Conseil BLONDEL
 Le Parc Technologique de Lyon
 12, allée Irène Joliot-Curie – Bâtiment B2
 69 791 Saint-Priest Cedex – France

(SIRET : 439 192 428 000 19, Code APE : 742C)
 Tél. : 04 78 90 87 60 – Fax : 04 78 90 84 26
 Mobile : 06.61.10.96.75 - E-mail : tblondel@aol.com
 URL Site Internet : <http://www.cblondel.com>

Forum de discussion "Modélisation-Hydrogéologie-Pollution" : <http://groups.yahoo.com/group/modhydropoll/>



VISUAL MODFLOW
THE STANDARD FOR GROUNDWATER MODELING

Waterloo Hydrogeologic's

Visual MODFLOW Pro

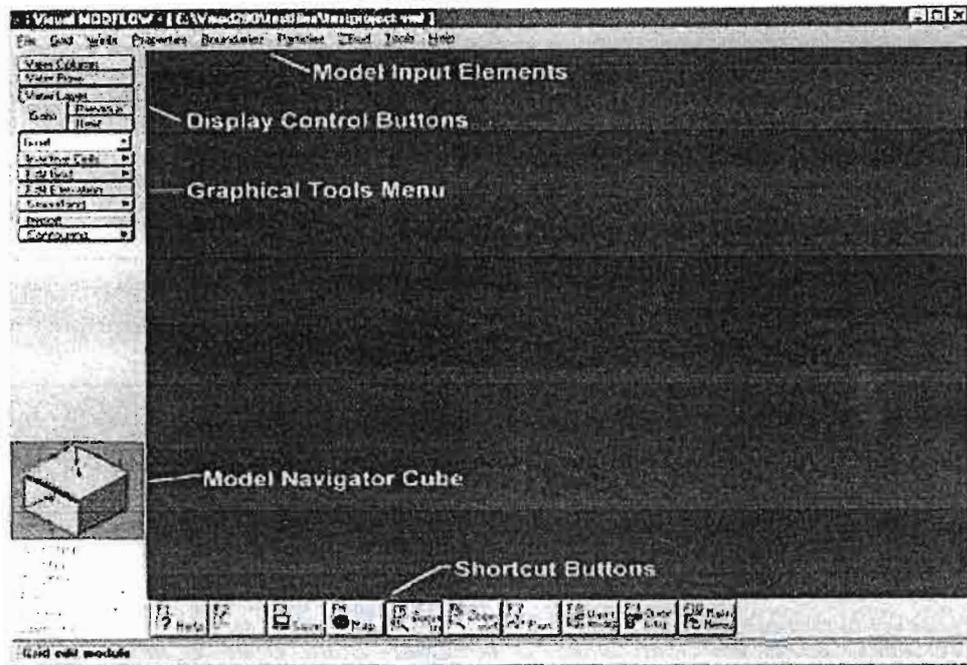
For Windows 98/NT/2000/XP



About the Visual MODFLOW Interface

The Visual MODFLOW interface has been specifically designed to increase modeling productivity and decrease the complexities typically associated with building three-dimensional groundwater flow and contaminant transport models. The interface is divided into three separate modules: the Input Module, the Run Module, and the Output Module. When you open or create a file, you will be able to seamlessly switch between these modules to build or modify the model input parameters, run the simulations, and display the results (in plan view or full-screen cross section).

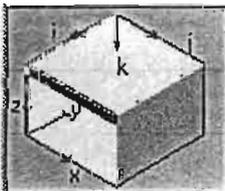
Each module of the Visual MODFLOW interface has the same basic screen layout as shown in the figure below.



View Column	
View Row	
View Layer	
Goto	Previous
	Next

The Display Control Buttons

The ability to quickly and easily switch between plan view and cross-section display of the model is a powerful feature of Visual MODFLOW that allows the user to gain a better perspective on the three-dimensional aspects of the model input parameters and simulation results. The display control buttons have the same function for each module and are located in the same location for each module. Simply select the desired display button and then click on the row, column or layer you would like to view.



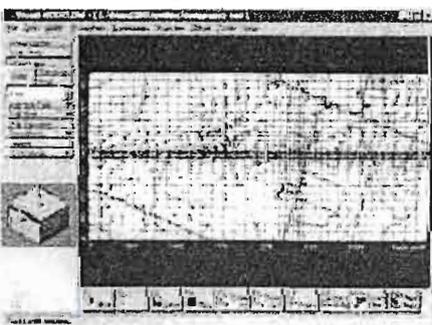
The Navigator Cube

The Navigator Cube provides a 3-D schematic representation of the model grid and layers. This navigator cube gives a quick visual reference of your active position within the model domain. This is particularly useful when you are dealing with multilayer models or if you are viewing a model in cross section. In addition, the active mouse location (X,Y,Z model coordinates and I, J, K grid coordinates) are interactively displayed below the Navigator Cube as you move the mouse around the screen.

X: 1723.9
 Y: 2008.4
 Z: 255.2
 Row (I): 8
 Column (J): 9
 Layer (K): 1

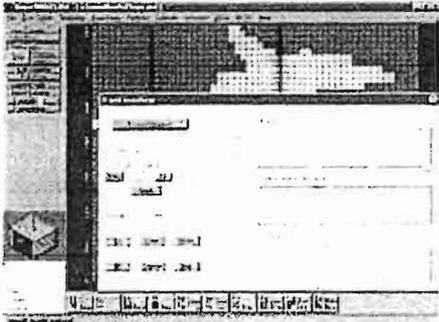
Shortcut Buttons

Each menu screen of the Visual MODFLOW interface has a set of shortcut buttons located along the bottom of the screen. These buttons allow the user to quickly access some of the more common graphical functions such as zooming in or zooming out, panning the display in any direction, adding or removing overlay displays, saving the existing data file, and returning to the Main Menu.



Grid Design

Visual MODFLOW allows you to rotate the model domain over the site map (.DXF or .BMP format) to align the model grid with the site characteristics and groundwater flow direction. The finite-difference grid can be modified by adding, deleting, moving and automatically refining rows, columns and layers using standard 'point-and-click' methods.

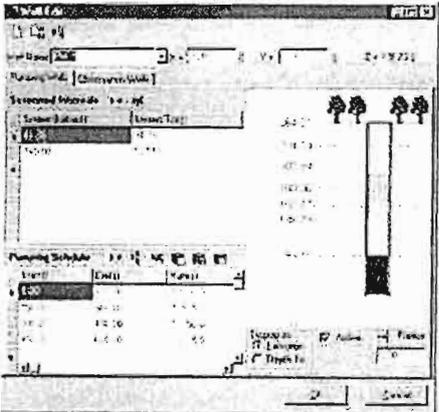


Automatic Grid Smoothing: A poorly designed grid can cause numeric instability and may lead to non-convergence of the model solution. Therefore, it is important to design the model grid with proper grid spacing to give you the level detail you need in important regions of the model and still maintain the numerical stability you need for the solution to converge. Automatic grid smoothing is used to identify and fix regions of the grid which are poorly designed and optimize (smooth) the transition from small grid spacing to large grid spacing.

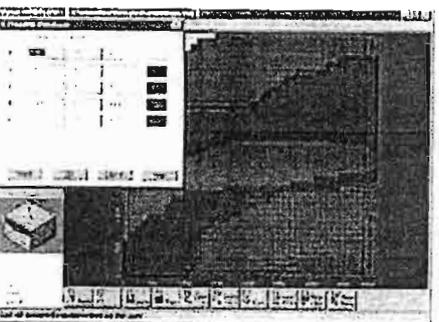
Importing Layer Elevations: Since most aquifers are not "flat" layers, Visual MODFLOW allows you to import layer surface data from ASCII (X,Y,Z) text files or SURFER (.GRD) files. It even has a built-in check to prevent layer surfaces from intersecting each other. The layer surface elevations and thicknesses can be visualized using plan view contours or by viewing the model grid in cross section.



Grid Cell Elevation Editor: A new feature in the latest version of Visual MODFLOW is the grid cell elevation editor. This tool allows you to modify the individual elevations of each cell using an array editor to modify the elevation value. The cell elevations can also be modified in cross section using 'drag-and-drop' methods to stretch or compress a cell thickness.

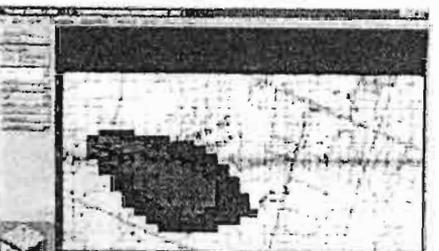


Pumping Wells
Pumping wells or injection wells can be added, deleted, copied or moved using the intuitive well edit tools that allow you to graphically delineate the well screen interval and enter or import real-time pumping schedules from an ASCII text file. For sites with many pumping wells, Visual MODFLOW can also import all relevant pumping well data. Multiple well screens for a single well are easily accommodated while the pumping rate distribution between layers is automatically calculated based on the transmissivity of the layers through which it is screened. The well details and pumping schedule can be readily accessed and changed at any time. Observed head at the well can be adjusted according to the position of the well within the grid cell and radius of the well.



Properties
Visual MODFLOW defines a model property as a physical or chemical attribute of the model that remains static throughout the entire simulation. Visual MODFLOW separates the model properties into two distinct categories.

1. Flow Properties: Those physical model properties affecting the groundwater flow simulation. Flow properties include: hydraulic conductivity (K_x , K_y , and K_z), specific storage (S_s), specific yield (S_y), porosity and initial heads. Each of these flow properties must be defined for each cell in the model domain.

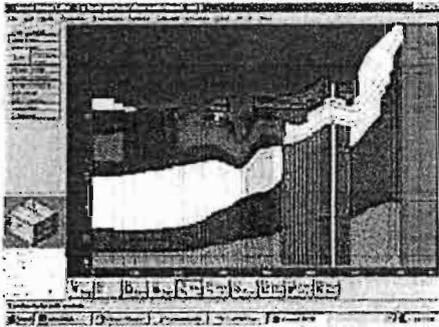


2. Transport Properties: Those physical and chemical model properties affecting the fate and migration of a contaminant plume in groundwater. Transport properties include dispersion

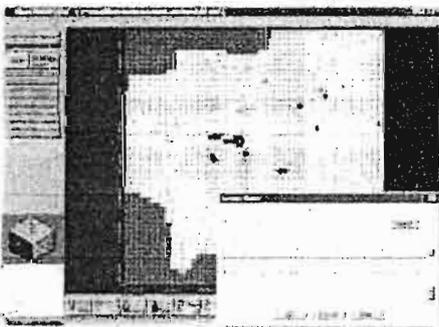
(Dx, Dy and Dz), bulk density, distribution coefficient (Kd), decay constants, and initial concentrations.

All model properties are assigned to individual grid cells or to zones of grid cells by either painting single cells, delineating polygons, or stretching a window around the selected grid regions. Each different property zone is color-coded to visually differentiate it.

Visual MODFLOW also has many time-saving tools that allow you to copy the property distribution from a single layer to any other layer(s) to eliminate repetitive steps involved in developing the model input files. Individual property values and property zones can be edited at any time using the property database to make global modifications.



For complex stratigraphy and varying hydraulic conductivity, it is important to be able to display and modify the model property distributions in plan view and cross section to gain a proper perspective on the geologic characteristics of the site. Visual MODFLOW is the only modeling environment that provides an active cross-sectional view allowing you to edit and modify cell properties.

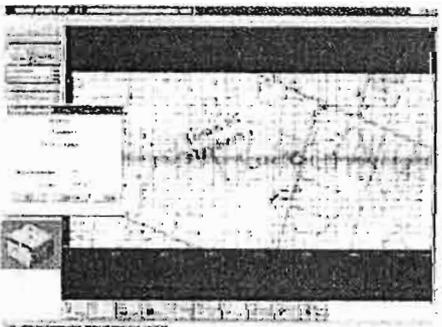


Boundary Conditions

MODFLOW boundary conditions supported by Visual MODFLOW include both steady-state and transient Constant Heads, Rivers, General Heads, Drains, Recharge and Evapotranspiration. The Horizontal Flow Barrier package is also supported.

Visual MODFLOW also supports all contaminant transport boundary conditions available for the latest versions of MT3D (including MT3D99 for cell-by-cell mass budgets, MT3DMS for multispecies transport, and RT3D for reactive transport and natural attenuation simulations). MT3D99, the latest commercial version of MT3D, is also fully supported.

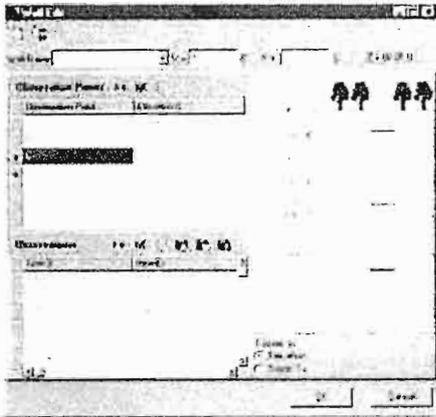
Each type of boundary condition has a specific color code to differentiate them from one another. The convenient graphical tools allow you to assign these boundaries as either single cells, a polyline of cells with automatic interpolation of values, a polygon of cells, or a rectangular window of cells. For transient simulations, real-time schedules of boundary condition values can be entered directly or imported into the time schedule from an ASCII text file.



Particles

Forward or backward tracking particles can be easily assigned for determining advective transport, preferred flow pathways and delineating well capture zones. Visual MODFLOW's intuitive graphical tools allow you to easily assign single particles, lines of particles and a circle of particles anywhere in your model domain. These particles can be easily toggled from forward to backward tracking with the click of the mouse. For transient simulations, the release times for the particles can also be assigned to groups of particles or individually to single particles or groups of particles. This is particularly useful for

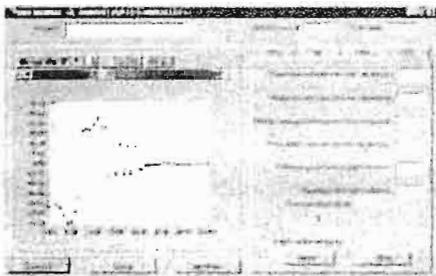
demonstrating how the flow system and directions of flow change with time during varying pumping schedules or flow variation due to seasonal influences.



Observation Wells

Visual MODFLOW is the only MODFLOW modeling environment that allows you to assign multilevel observation wells, just like ones you have in the field. In addition, Visual MODFLOW is the only modeling software package that allows you to group the observation points into one or more observation groups. This grouping feature is used for interpreting the calibration data for an isolated section(s) of your model domain. This grouping feature is particularly useful for complex models simulating more than one aquifer over a large region.

The user-friendly graphical tools allow you to assign observation points or import data for situations where you have temporal data for many different observation points. Once an observation well has been entered, it can be copied or moved to any location within the model domain.

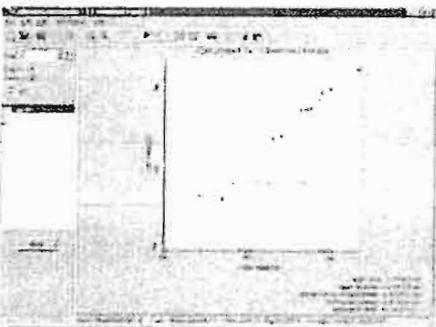


The Win32 MODFLOW Suite

Visual MODFLOW includes the Win32 MODFLOW Suite with MODFLOW-96, MODPATH, Zone Budget, MT3DMS and RT3D compiled to run as true Windows 32-Bit applications. This unique and powerful modeling utility actually provides you with the ability to control the numerical solution process by manipulating the solver parameters and convergence criteria while the solution is in progress. In addition, it provides a real-time graphical display of the solution convergence data and a detailed graphical summary of the Zone Budget results.

After each successful run has completed, the Win32 MODFLOW Suite automatically produces all of the necessary files required for you to analyze and interpret the results, and to produce full-color, report-quality graphical presentations using Visual MODFLOW's postprocessing graphical features.

Visual MODFLOW is the only modeling software package that provides a truly seamless integration with 32-Bit Windows versions of MODFLOW, MODPATH, MT3D, Zone Budget and RT3D.



Calibration Scatter Plot

Visual MODFLOW provides a scatter plot of calculated vs. observed values of heads or concentrations for the flow and contaminant transport models, respectively. This plot can be used to examine all calibration targets from the entire model domain or it can be used to examine specified groups of observation points relating to certain sections of the model. The ability to select predefined groups of observation points is particularly useful for large, complex groundwater models involving several different aquifer systems.

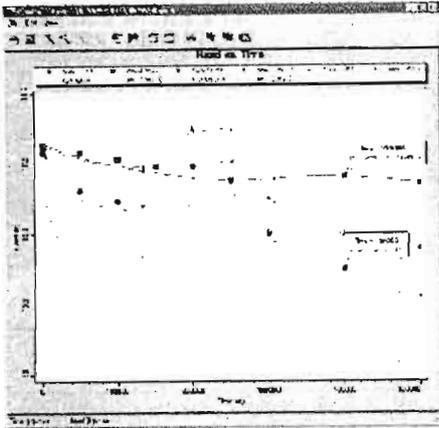
Calibration statistics are also displayed with the graph and are updated according to the data displayed on the scatter plot. Calibration statistics include:

- Mean Error
- Absolute Mean Error
- Standard Deviation
- Root Mean Square of the Error
- Normalized Root Mean Square of the Error

The 95% confidence interval is indicated on the calculated vs. observed plot. The calibration data located within this interval can be expected to provide correct results 95% of the time.

Calibration Residuals Histogram

The calibration residuals histogram plots the normalized population of the observations vs. the interval range of normalized residual values. This plot is compared to a Student t distribution and is used to: (i) assess the quality of the fit between the calculated and observed data and (ii) identify any positive or negative bias in the calibration data.



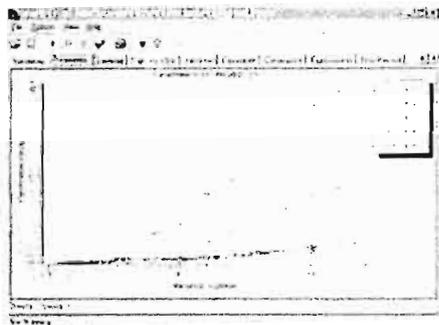
Time Series Plots

For transient simulations, Visual MODFLOW creates temporal plots of calculated and observed heads, drawdown or concentrations at any observation point in the model domain. Temporal plots of calibration statistics can also be created to determine the quality of the model calibration throughout the simulation.



Automated Calibration with WinPEST

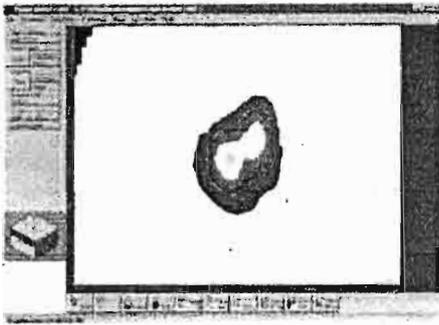
WinPEST is a fully-functional Windows version of the popular model independent Parameter ESTimation program known as PEST. The DOS version of PEST has been optimized for the 32-Bit Windows environment, and a run-time graphical display of the PEST data has been added using a variety of evolving, colorful and informative graphics.



Visual MODFLOW is the only modeling environment that provides a truly seamless integration with WinPEST for selecting the model parameters, setting the WinPEST controls, and launching the WinPEST simulation. Once the WinPEST simulations have started, you will continue to have full control over the optimization process. The run-time graphical reporting of the WinPEST data lets you know how the optimization procedure is progressing and you can pause the procedure to modify the settings at any time. Furthermore, Visual MODFLOW is in constant communication with WinPEST, whereby every time WinPEST modifies a parameter value, it is automatically

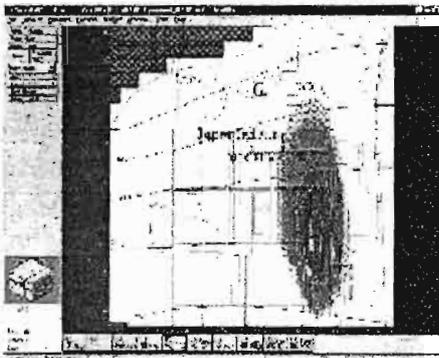
updated in the Visual MODFLOW data files as well. This is a very important step that other modeling software programs do not incorporate. If this step is missing, it becomes very difficult to reload the calibrated model data files.

After the WinPEST optimization procedure is completed, the calibrated model data files can be easily loaded back into Visual MODFLOW for graphical display of the simulation results or for further modifications and fine-tuning. In addition, WinPEST produces a graphical interpretation of the analytical optimization d

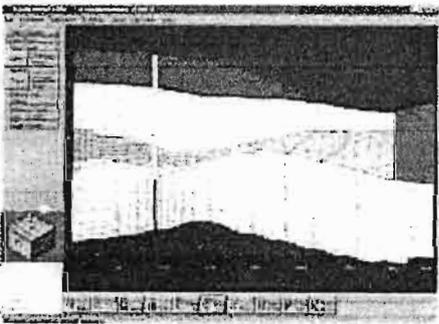


Contour Plots

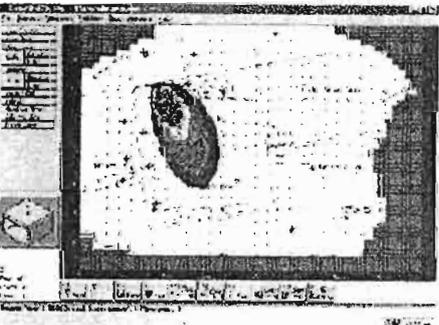
The contouring menu selection allows you to contour the results of the modeling simulation in plan view or cross section. The contouring selections are as follows: Heads, Drawdown, MT3D concentrations, Water table elevations, Head difference between layers, Flux between layers, Layer elevations (top, bottom and thickness), and Net recharge.



Visual MODFLOW accommodates multiple contour overlays to be able to compare several types of plots together. Color shading is also available for high-impact presentation of all contoured results. The contouring options button along the left-hand menu bar allows you to adjust the maximum, minimum, and interval of the contour lines, assign customized contour levels, adjust the speed/resolution of the contouring, change the color of the contour lines, and produce color fills of contours.

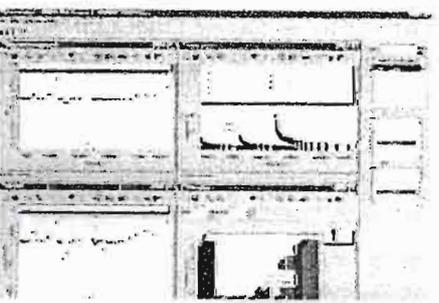


The right mouse button can also be used to activate contour options that allow you to add, move or delete contour labels, or add a contour line at any location by pointing and clicking. For transient simulations, Visual MODFLOW allows you to advance to successive output times or to manually select the desired output time from a list of available time steps.



Velocities

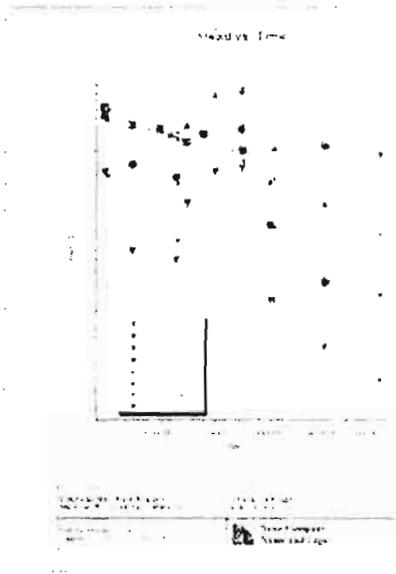
The flow velocity vectors provide an important representation of the groundwater flow direction within a particular layer, row or column. Each velocity vector is color coded to indicate whether it is flowing up or down relative to the plane being displayed. Display options include setting the number of velocity vectors per line, adjusting the scale, and toggling between simple direction vectors or magnitude vectors.



Zone Budget

Visual MODFLOW provides a detailed summary of the mass balance results and zone-to-zone flow exchanges. These mass balance results provide important information on the quality and reliability of the groundwater model you have built. If you do not achieve a reasonable mass balance between the flow entering

the system and the flow leaving the system, your model will not yield reliable results. The mass balance results are summarized according to flow contributions from each type of boundary condition and can be used to identify regions where there are unreasonable flux rates. For a more localized summary of zone-to-zone flow exchanges, Visual MODFLOW uses Zone Budget to provide a detailed summary of the inflows and outflows from specified zones throughout the model domain.



Printing

Visual MODFLOW prints full-color, high-resolution graphics to any printer or plotter supported by Windows 95/98/NT. The graphical display of the simulation results and/or input files can be printed in portrait or landscape format as a full page image or with a title block that describes the details of the model and the results being displayed. Color-shaded contours can be printed with or without a color legend.

For all X-Y graphs, the WYSIWYG print preview and page design features allow you to customize the page design and import bitmap logos for display on the printed page.

Visual MODFLOW also exports the on-screen display to several graphics file formats including AutoCAD (dxf), Enhanced Windows Metafile (emf) and ESRI shape files (shp).

Data files of the results can also be exported to 2-D or 3-D ASCII data files for use in virtually any 3-D visualization software product.



3-D Visualization and Animation

Visual MODFLOW project files can be visualized and animated in 3-D using the built-in Visual MODFLOW 3-D Explorer. All input parameters and modeling results are read into the Visual MODFLOW 3-D Explorer and displayed using color-shaded contouring on slices, multiple 3-D isosurfaces, and 3-D pathlines.