

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Seyni

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

Titre :

Modélisation numérique de la nappe des sables
quaternaires de Thiaroye :
Phase 1 : Elaboration des paramètres d'entrée du modèle

Année : 2002-2003

Auteurs : Harold KOUKOUI
Ndéné NDIAYE
Directeur : Babacar NDIAYE
Co-Directeur : Seyni NDOYE

X

DEDICACES

*Nous rendons grâce à Dieu et dédions ce modeste travail à tous ceux qui nous
sont proches*

RESUME

Ce projet de fin d'études est consacré à la 1^{ère} phase de l'élaboration d'un modèle numérique de la nappe des sables quaternaires de Thiaroye.

L'aquifère est caractérisé par la présence de sables qui reposent sur un substratum marneux accidenté.

Les paramètres d'entrée du modèle sont synthétisés et correspondent à la topographie de la zone, la géométrie de l'aquifère, la piézométrie de la nappe, les paramètres hydrodynamiques et les prélèvements.

La topographie de la zone d'étude est caractérisée par des zones basses dans le secteur de Thiaroye.

Les états piézométriques de la nappe qui ont pu être restitués pour les années 1971 et 1997 serviront respectivement au calage du modèle en régime permanent et transitoire.

L'étude hydroclimatologique a montré que le secteur se trouve en domaine sahélien avec une pluviométrie moyenne estimée à 359.93 mm entre 1984 et 1996.

Le carte de distribution des perméabilités, qui varient de $0,4 \cdot 10^{-4}$ à $8 \cdot 10^{-4}$ m/s, a été établie et un coefficient d'emmagasinement de 20% sera utilisé en première approximation pour l'élaboration du modèle.

L'alimentation de l'aquifère se fait par infiltration des eaux de pluie et des retours à la nappe. Cette recharge est calculée grâce aux formules empiriques de Albrecht et Thornthwaite. Différentes zones de décharges sont décelées et correspondent aux Niayes et lacs et l'évapotranspiration y est estimée entre 2.6 et 3.28 mm/j.

Il n'en demeure pas moins que plusieurs résultats de cette étude auront à être significativement réajustés lors de la phase de calage du modèle.

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, de par leurs actes ou leurs conseils, ont aidé à la réalisation de cet ouvrage.

En particulier nous tenons à exprimer notre gratitude à :

- o Monsieur Babacar NDIAYE, professeur à l'ESP pour avoir bien voulu proposer et diriger ce projet ;
- o Monsieur Séni NDOYE, professeur à l'ESP pour ses conseils, son soutien constant et sa disponibilité tout au long de cette étude notamment pour l'apprentissage des logiciels SURFER et VISUAL MODFLOW ;
- o Monsieur Bamba DIAW, professeur à l'ESP pour ses conseils avisés ;
- o Messieurs SARR et NGOM, hydrogéologues à la direction de l'Hydraulique - Service de Gestion et de Planification des Ressources en Eau (SGPRE) du Sénégal qui nous ont témoigné d'un soutien et d'une disponibilité sans précédent ;
- o Monsieur Mahécor NDIAYE, de la SONES également pour son assistance dans la collecte de certaines données ;

Nos remerciements vont aussi à l'endroit de :

- o Messieurs DIABY et , de la Direction des Travaux Cartographiques et Géographiques, pour l'obtention des cartes utilisées pour l'étude ;
- o Madame NDIAYE du service documentaire de la SONES ;

qui ont fait preuve d'une parfaite collaboration tout au long du projet.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ANNEXES.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEUX.....	VIII
LISTE DES ABBREVIATIONS.....	IX
INTRODUCTION.....	1
1^{ère} PARTIE : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	
1 Géographie.....	3
1.1 Climatologie.....	3
1.1.1 Pluviométrie.....	3
1.1.2 Température.....	4
1.1.3 Humidité relative.....	4
1.1.4 Evaporation.....	5
1.1.5 Régime des vents.....	5
1.2 Géographie physique.....	6
1.2.1 Géomorphologie.....	6
1.2.2 Hydrographie.....	6
1.2.3 Végétation.....	7
1.3 Démographie.....	7
2 Géologie.....	8
2.1 Cadre géologique.....	8
2.2 La série stratigraphique de Dakar.....	8
2.2.1 Les formations tertiaires.....	9
2.2.2 Les formations du Quaternaire.....	10
3 Hydrogéologie.....	14
3.1 Cadre hydrogéologique.....	14
3.2 Synthèse des connaissances sur le réservoir hydraulique étudié.....	15
3.2.1 Situation et caractéristiques.....	15
3.2.2 Hydrodynamisme.....	16
3.2.3 La pollution de la nappe.....	17
3.2.4 Prélèvements.....	18
2^{ème} PARTIE : PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE-METHODOLOGIE ET OUTILS UTILISES	
1 Problématique de l'étude.....	19

2	Méthodologie et outils utilisés	20
2.1	Méthodologie	20
2.1.1	Recherche et collecte des données	21
2.1.2	Traitement des données	21
2.1.3	Modélisation hydrodynamique.....	22
2.1.4	Cartographie des zones inondables	22
2.2	Outils utilisés	23
2.2.1	Elaboration des cartes d'isocontours.....	23
2.2.2	Modélisation hydrodynamique.....	24
 3^{ème} PARTIE : ELABORATION DES PARAMETRES D'ENTREE DU MODELE		
1	Géométrie de l'aquifère.....	30
1.1	La topographie	30
1.2	Le substratum.....	33
2	Piézométrie de référence	34
2.1	Elaboration des cartes piézométriques de référence.....	34
2.1.1	Piézométrie de 1971	34
2.1.2	Piézométrie de 1997	36
2.1.3	Schéma hydrodynamique	37
3	Les paramètres hydrodynamiques.....	38
3.1	définition des paramètres.....	38
3.2	Détermination de la perméabilité et de la transmissivité.....	39
4	Les conditions aux limites.....	41
5	La recharge.....	42
5.1	Modes d'alimentation de la nappe de Thiaroye.....	42
5.2	Recharge par les eaux de pluie	45
5.3	Retours à la nappe.....	50
6	Les prélèvements.....	51
6.1	Les prélèvements de la SONES.....	51
6.2	Les prélèvement agricoles	52
7	Evapotranspiration	52
8	Carte d'occupation du sol	54
 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		56
BIBLIOGRAPHIE.....		58
ANNEXES		59

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Géométrie de l'aquifère

Annexe 2 : Piézométrie de référence

Annexe 3 : Données climatologiques à la station de Yoff

Annexe 4 : Bilan hydrique à la station de Yoff

Annexe 5 : Zones d'influence des différentes stations météorologiques

Annexe 6 : Débits moyens mensuels par forage au centre de Captage de Thiaroye

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Moyenne des précipitations de 1984 à 1996 (Dakar).....	4
Figure 2: Température moyenne mensuelle à Dakar de 1984 à 1996.....	4
Figure 3 : Croissance de la population périurbaine dans la seconde circonscription	7
Figure 4 : Localisation de la zone d'étude	16
Figure 5 : Débits moyens annuels du champ de Thiaroye	18
Figure 6 : Modèle de représentation dans SURFER.....	24
Figure 7 : Principe de la méthode des différences finies.....	27
Figure 8 : Fenêtre de VISUAL MODFLOW.....	29
Figure 9 : Carte topographique de la zone d'étude.....	30
Figure 10 : Carte topographique de la zone de Thiaroye	33
Figure 11 : Morphologie du substratum marneux	33
Figure 12: Carte piézométrique de la nappe en 1971.....	35
Figure 13 : Schéma Hydrodynamique de la nappe en 1971	35
Figure 14 : Carte piézométrie de la nappe en Juillet 1997	36
Figure 15 : Schéma hydrodynamique de la nappe en Juillet 1997	37
Figure 16 : Carte de distribution des valeurs de perméabilité sur l'aquifère	40
Figure 17 : Conditions aux limites du modèle.....	41
Figure 18 : Schéma de principe du bilan hydrologique d'un aquifère.....	43
Figure 19 : Relation entre la pluie annuelle et la piézométrie de la nappe.....	44
Figure 20 : Zones d'influence des stations météorologiques	45
Figure 21 : Localisation des lacs et Niayes	53
Figure 22 : Evolution des zones d'habitat dans le secteur de Thiaroye	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Humidités relatives moyennes mensuelles à Dakar de 1971 à 2001	5
Tableau 2 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère	39
Tableau 3 : Calcul de l'évapotranspiration potentielle (station de Yoff)	47
Tableau 4 : Calcul de l'évapotranspiration et de la recharge (station de Yoff)	49
Tableau 5 : Valeur de recharge aux différentes stations	49
Tableau 6 : Valeur de retour à la nappe	50
Tableau 7 : Débits moyens annuels des différents forages au centre de Thiaroye	51
Tableau 8 : Caractéristiques des forages au centre de Thiaroye	52
Tableau 9 : Caractéristiques des forages au centre de Beer Thialane	52
Tableau 10 : Valeurs d'évapotranspiration	53

LISTE DES ABBREVIATIONS

NE-SW	:	Nord Est - Sud Ouest
NNE-SSW	:	Nord Nord Est – Sud Sud Ouest
BP	:	Before Present
Cl ⁻	:	Chlore
NO ₃ ⁻	:	Nitrate
OMS	:	Organisation Mondiale de la Santé
SONES	:	Société Nationale des Eaux du Sénégal
ASCII	:	American Standard Code for Information Interchange

INTRODUCTION

Dakar, capitale économique et administrative du Sénégal connaît une croissance démographique accélérée. Le manque d'espace engendré par cette situation pousse une part importante de sa population, aujourd'hui estimée à plus de 2 millions d'habitants, à s'établir dans la banlieue. Cette dernière, marquée par une urbanisation spontanée et non contrôlée, est caractérisée par une insuffisance de réseau d'assainissement. Des études antérieures, il ressort que cet état de fait est la principale cause de la pollution de la nappe des sables quaternaires.

A partir des années 50, l'exploitation de la nappe a contribué pour une grande part à l'alimentation en eau potable de la ville de Dakar. Face à la forte pollution anthropique à laquelle elle est actuellement soumise, la SONES envisage un arrêt total ou partiel des pompages dans le centre de captage de Thiaroye. Une telle perspective pourrait conduire à la remontée du niveau piézométrique et poser des problèmes d'inondation au niveau de certaines agglomérations en particulier les zones basses localisées à Thiaroye. La modélisation de la nappe phréatique des sables quaternaires permettra de reconstituer l'évolution de la piézométrie suite à un tel scénario afin de matérialiser les zones susceptibles d'être affectées par les inondations.

Ce projet réalisé en 2 phases s'inscrit dans ce contexte. Le présent rapport qui constitue la première phase de cette étude vise à :

- o réaliser une synthèse hydrogéologique de la nappe des sables quaternaires de Thiaroye ;
- o élaborer l'ensemble des paramètres d'entrée nécessaires à la modélisation numérique de la nappe à partir du logiciel VISUAL MODFLOW.

Pour y parvenir, nous avons tout d'abord procédé à la recherche et à la collecte des données caractérisant le système aquifère de Thiaroye. Le traitement de ces données a ensuite permis d'élaborer les paramètres d'entrée du modèle.

Ce rapport comprend 3 parties :

- o Présentation de la zone d'étude :
Cette partie est consacrée à la présentation de la zone d'étude et se résume à la description du contexte géographique, géologique et hydrogéologique.

- o Problématique de l'étude – Méthodologie et outils utilisés :

Elle présente le problème de la pollution de la nappe ainsi que la démarche méthodologique retenue dans le cas de cette étude. Les principes généraux de la

modélisation numérique d'une nappe libre et les outils informatiques utilisés y sont également exposés.

o Elaboration des paramètres d'entrée du modèle :

Dans cette dernière partie, les paramètres nécessaires à la réalisation du modèle numérique ont été élaborés. Ces paramètres concernent la géométrie de l'aquifère, la piézométrie, l'hydroclimatologie, les paramètres hydrodynamiques et les prélèvements au niveau de la nappe.



1^{ère} PARTIE

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1 Géographie

La presqu'île du Cap-Vert constitue la partie la plus occidentale de l'Afrique. Elle se situe entre les parallèles 14°25' et 15°5' Nord et les longitudes 16°55' et 17° 32' Ouest.

Le contexte géographique de notre étude se résumera à une synthèse des connaissances du climat et de la géographie physique de cette zone.

1.1 Climatologie

De par sa position avancée dans l'Atlantique, la presqu'île du Cap-Vert possède un microclimat individualisé soumis à la fois aux influences saharienne et océanique.

1.1.1 Pluviométrie

La pluviométrie est caractérisée par une courte saison des pluies qui dure de juillet à octobre et une longue saison sèche de novembre à juin relativement fraîche et humide. De manière générale, le gradient pluviométrique diminue du Sud du pays vers le Nord. Cette baisse peut se justifier par la proximité de la zone saharienne.

L'analyse annuelle de la pluviométrie montre que le cœur de la saison des pluies se situe aux mois d'août et septembre (fig.1). En dehors de cette période de faibles précipitations peuvent être enregistrées. Ces précipitations appelées pluies de 'Heug' sont irrégulières et négligeables dans le processus de recharge de la nappe phréatique de Thiaryoye.

Depuis les années 1970, on note une baisse persistante des précipitations. A titre indicatif la moyenne des précipitations au niveau de Dakar de 1984 à 1996 est de 359,93 mm tandis que celle de 1950 à 1979 s'élève à 517,4 mm.

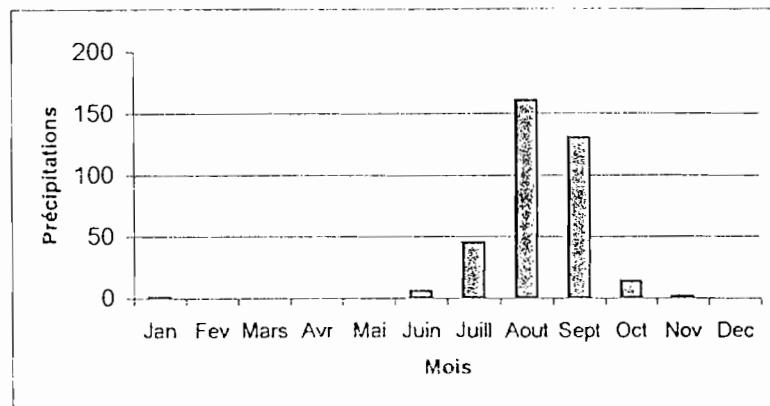


Figure 1: Moyenne des précipitations de 1984 à 1996 (Dakar)

1.1.2 Température

La température moyenne annuelle mesurée dans la région de Dakar est de 27,33°C sur la période de 1984 à 1996.

Cette température est fortement influencée par la proximité de la mer qui a un effet régulateur sur le régime thermique de Dakar. Ce dernier est marqué par une période chaude de mars à octobre et une période froide de novembre à février (A.A.Tandia, 2000).

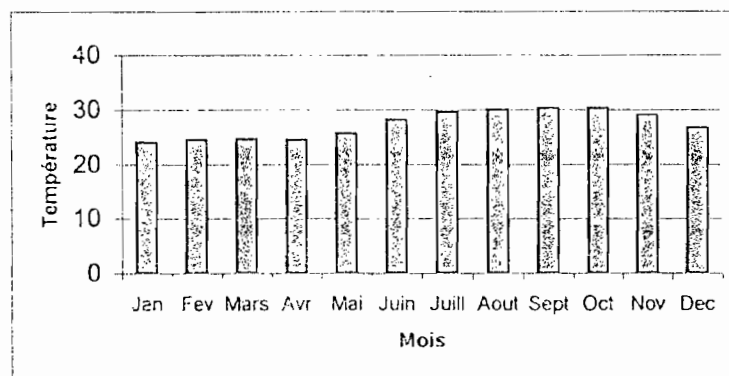


Figure 2: Température moyenne mensuelle à Dakar de 1984 à 1996

1.1.3 Humidité relative

Les variations de l'humidité relative dépendent en partie de la température de l'air et des caractéristiques hygrométriques des masses d'air. Les valeurs d'humidité relative

enregistrées dans la presqu'île du Cap-Vert sont dans l'ensemble très élevées. Ces valeurs élevées sont dues à la permanence de l'Alizé maritime durant la saison sèche

Tableau1: Humidités relatives moyennes mensuelles à Dakar de 1971 à 2001

Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
H R (%)	88.59	91.039	91.868	92.906	91.77	89.74	87.62	90.572	92.65	91.54	89.245	87.648

May - 90,432

1.1.4 Evaporation

L'évaporation correspond à un phénomène de perte d'eau sous forme de vapeur. Il dépend de phénomènes physiques et physiologiques. Les valeurs mesurées à l'évaporation Piche oscillent entre 90 mm en septembre et 120 mm en décembre janvier (Tandia, 2000)

1.1.5 Régime des vents

La presqu'île du Cap-Vert est soumise à des vents d'origine et de direction variables selon les saisons. Les vents du Nord dominant et soufflent en permanence. Mais dans la période de juin à octobre, en plus des vents du Nord s'ajoutent ceux de direction Sud, entraînant ainsi le déplacement du Front Inter-Tropical (FIT).

Les vents du Nord qui sont les alizés se subdivisent en deux classes :

- L'alizé continental : c'est l'hamattan issu des dorsales saharienne et maghrébine. Ce vent chaud et sec est plus important à l'intérieur du pays.
- L'alizé maritime : ce vent prédomine dans la région du Cap-Vert. C'est un vent humide provenant de l'anticyclone des Açores situé au-dessus de l'Atlantique et qui arrive par l'ouest des côtes de l'Afrique sub-tropicale.

1.2 Géographie physique

1.2.1 Géomorphologie

La zone d'étude est caractérisée par de longs alignements de dunes orientés NE-SW. Il s'agit d'un modèle sableux peu accidenté avec un point culminant (43 m) au niveau de Cambérène (HEBRARD, 1966 ; in FAYE, 2001). Trois unités géomorphologiques sont à distinguer :

- Les régions côtières qui s'étendent de la grande côte (Nord) à la petite côte (Sud) avec des systèmes dunaires inhabités.
- Les Niayes qui sont des dépressions interdunaires entre les cordons sableux où la nappe phréatique affleure.
- La région des lacs : elle se situe tout au long de la côte nord et se singularise par un réseau de lacs constitué par les lacs Youi, Warouwaye, Mbeubeuss, Retba et Mbawane. Ces lacs sont en général salés ou sursalés et aujourd'hui asséchés en dehors du lac Retba.

1.2.2 Hydrographie

L'hydrographie de la zone d'étude est caractérisée uniquement par le réseau de lacs précités. On distingue :

- Les lacs Youi, Warouwaye et Mbeubeuss : ces lacs de forme semi-circulaire sont localisés dans la zone de Malika et sont aujourd'hui asséchés et matérialisés par des zones de dépression.
- Le lac Retba : c'est un lac à eaux sursalées de forme allongée. Il correspond à une lagune formée de remblaiements constitués de dépôts de sables marins littoraux qui sont dus à la remontée de la mer.
- Le lac Mbawane : il se localise dans la zone Nord –Est au niveau de Kayar. Asséché, il est aujourd'hui représenté par une zone de dépression.

1.2.3 Végétation

La végétation est surtout marquée par les zones interdunaires formées par les Niayes. Ces zones sont caractérisées par une végétation guinéenne dominée par les palmiers à huile et les cocotiers. Les sols des Niayes sont formés de sables humifères noirs très riches, formés d'humus et de substances minérales ; ce qui explique la localisation dans ces unités de zones de cultures maraîchères.

1.3 Démographie

Au début des années 50, la surface construite de l'agglomération de Pikine-Thiaroye occupait juste une superficie de 2,5km². Face à la pression démographique sur Dakar, les autorités effectuent des déplacements sous formes d'expulsions collectives des populations résidant dans les quartiers insalubres vers le Nord-Est de l'agglomération dans la zone péri-urbaine de Pikine-Thiaroye (deuxième circonscription urbaine de Pikine). De 1952 à 1970 près de 200 000 personnes subissent cet exode et la croissance de cette population sera régulière. On estime aujourd'hui à environ 1 000 000 d'habitants la population résidant dans la deuxième circonscription urbaine de Pikine (fig.3). Cette forte croissance démographique, opérée sans commune mesure avec les réseaux d'assainissement, sera la principale cause de la pollution des eaux au niveau de la nappe étudiée.

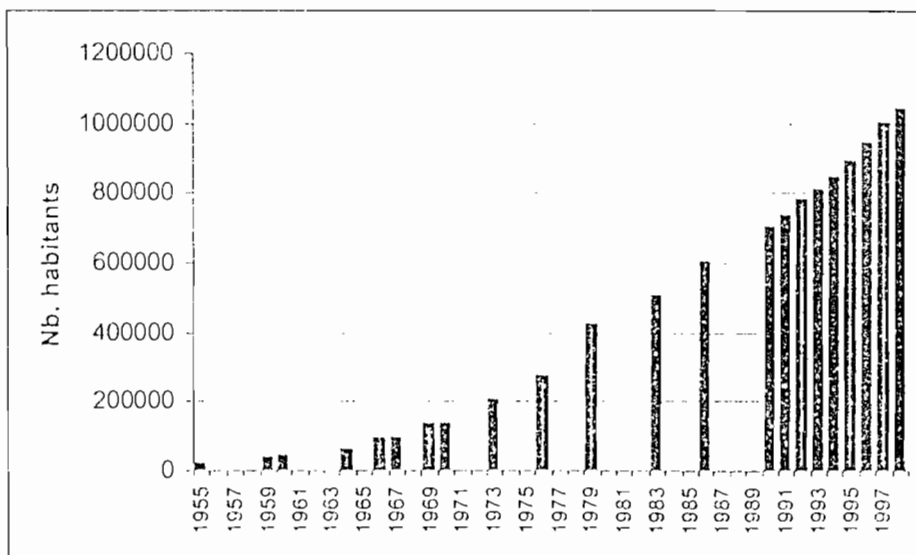


Figure 3 : Croissance de la population périurbaine dans la seconde circonscription

2 Géologie

2.1 Cadre géologique

La géologie du Cap-Vert s'inscrit dans celle du bassin sénégalo-mauritanien et la stratigraphie locale est connue grâce aux affleurements, aux prospections pétrolières et aux forages hydrauliques (Martin, 1970). Le socle anté-mésozoïque se situerait à la verticale de Dakar à une profondeur de 8000 m ou plus. Des dépôts marins continus allant du Lias à l'Oligocène sont connus. Entre le Miocène et le Quaternaire, se produisent différentes manifestations volcaniques, des altérations latéritiques à l'origine de cuirasses et des dépôts de sables éoliens et littoraux. Au plan structural, la partie du bassin entre Thiès et Dakar a été affectée par des failles verticales (NE-SW à NNE-SSW) qui sont à l'origine de la formation des horsts de Diass et de Dakar et du graben de Rufisque-Sangalkam où les dépôts sont subsidents (Castelain et al., 1965 ; in FAYE, 2001). Un basculement général a en outre affecté ces horsts. Leur partie sud s'est soulevée, exposant à l'affleurement des terrains du Crétacé Terminal et du Tertiaire (entre Yène et Popenguine dans le horst de Diass et au sud de Dakar, alors que la partie nord s'est enfoncée et a été recouverte par d'importants dépôts de sables (dépressions du lac Tanma dans le horst de Diass et de Cambéréne-Malika à Dakar).

Après cette brève description de la structure d'ensemble de la presqu'île, nous allons étudier la série litho-stratigraphique qui permet de comprendre l'hydrogéologie de la zone d'étude.

2.2 La série stratigraphique de Dakar

La série stratigraphique de Dakar concerne les formations tertiaires qui constituent le substratum de l'aquifère étudié et les formations quaternaires.

L'étude de cette série est possible grâce à la synthèse des travaux de Castelain et al, 1965 ; Crevola et al, 1994 ; Tessier et l'appartient, 1967 ; Demoulin , 1970 ; Elouard, 1968 in Faye 2001 ; Mais aussi à partir de l'exploitation des rapports de forages hydrauliques et pétroliers.

2.2.1 Les formations tertiaires

Ces formations sédimentaires et volcaniques affleurent au sud de Dakar. Elles ont été reconnues au Nord par les forages pétroliers.

○ Le Paléocène

Il est représenté surtout par des marnes et calcaires argileux constituant la formation des Madeleines. Celle-ci affleure dans l'Anse des Madeleines, à la plage des Enfants et autour du Port Autonome de Dakar. Ces marnes ont été traversées sur 81 m (forage DK1) et sur 105 m (forage CV1) et reposent en discordance sur le Maastrichien. La formation des Madeleines date de la totalité du Paléocène. La formation de l'Hôpital autrefois attribuée à l'Eocène inférieur est maintenant datée du Paléocène supérieur. Selon cet auteur, ces limons constituent un équivalent altéré et silicifié de la partie supérieure des marnes des Madeleines. Les silts argileux silicifiés de l'Hôpital constituent les falaises du sud de la ville de Dakar.

○ L'Eocène inférieur (Yprésien)

Dans les forages au nord de Dakar et le forage DK1, la formation des Madeleines est surmontée par des argiles et des marnes datées à la base de l'Eocène inférieur, l'épaisseur totale de l'Yprésien étant de 105 m au niveau d'un forage DK1. A l'affleurement, l'Eocène inférieur correspond aux Argiles de la prison (15 mètres d'épaisseur) sur la plage de Rebeuss.

○ L'Eocène moyen (Lutétien et Bartonien)

Il affleure à Dakar dans les Marnes de la Poudrière et les calcaires argileux de la plage Bernard. Ces terrains datent du Lutétien inférieur. Le sommet de l'Eocène moyen (Bartonien) est connu uniquement en sondage (CV1) et correspond à la base des Argiles de Yoff. D'une épaisseur totale de 110 m, ces argiles beiges reposent en discordance sur

l'Eocène inférieur. La mer s'est retirée de la plus grande partie du bassin sénégalais après l'Eocène moyen.

○ L'Eocène supérieur (Priambonien)

Il est représenté par la partie supérieure des argiles de Yoff connues par sondage.

A cette époque, la quasi-totalité du bassin sénégalais, à l'exception du golfe casamançais émerge par suite du retrait de la mer amorcé dès la fin de l'Yprésien. Celle-ci ne subsiste que dans de petits golfes entre Dakar et Tivaouane.

○ L'Oligocène

A Dakar, l'Oligocène n'est connu que par des calcaires à lépidocyclines emballés dans les tufs volcaniques de l'Anse Bernard.

○ Le Miocène et le Pliocène

C'est une période d'altération et d'érosion continentales qui s'accompagne d'une intense activité volcanique, commencée depuis l'Eocène supérieur.

Le système éruptif du volcanisme de Dakar (coulées de basalte et tufs volcaniques) se met en place au sud de la presqu'île (Cap Manuel, Gorée, Rufisque). De nombreuses venues volcaniques ont été recoupées par les forages au Nord et au Nord-Ouest de Dakar.

Le volcanisme de Dakar est surmonté par une cuirasse latéritique datée du Pliocène à la base du Pléistocène. Le contact entre ces formations est bien visible à la Pointe de Fann.

2.2.2 Les formations du Quaternaire

Le Quaternaire est une période d'altération continentale caractérisée par des fluctuations climatiques et eustatiques.

L'étude des affleurements et des forages de la presqu'île du Cap-Vert permet de distinguer un Quaternaire ancien sableux marqué par le volcanisme des mamelles, et un Quaternaire

récent dominé par des pulsations climatiques et fluctuations du niveau marin qui sont à l'origine de dépôts sableux et des plages soulevées rencontrées à Dakar.

○ Quaternaire ancien

• Les sables infrabasaltiques

Ce sont les plus anciens dépôts de Quaternaire reposant sur la latérite fini-tertiaire. Ils affleurent à la base des premières coulées de volcanisme des Mamelles sur le littoral entre Mermoz et Ouakam. Ils ont été également retrouvés dans les forages de la tête de la presqu'île. C'est un ensemble de sables à coquillages marins, de sables argileux et dunaires. Cette assise est attribuée à l'Inchirien inférieur dans la stratigraphie régionale et son épaisseur maximale connue est de 74 m.

• Le volcanisme des Mamelles

Le centre d'émission de ce volcanisme est situé à l'ouest de la tête de la presqu'île (Mermoz, Ouakam). Il est marqué par le dépôt de produits pyroclastiques (cinérites, tufs, ponces et bombes volcaniques) et de coulées de basanites et de dolérites. Ces produits volcaniques affleurent largement au Nord-Ouest de la presqu'île (de la pointe de Fann à Yoff) où ils forment des falaises littorales et les collines des Mamelles. Les dolérites de ce volcanisme se rencontrent dans les forages jusqu'à la patte d'Oie (sondage Hydraf 9) et sont interstratifiés avec des sables dunaires de l'Inchirien inférieur. Les dernières coulées volcaniques ont été datées à Mermoz de 570000 ans.

• Les grès à ciment calcaire de Yoff-Cambérène

Ces grès calcaires se retrouvent sur le littoral de Yoff et de Cambérène au-dessus du niveau marin actuel et reposent sur les basanites doléritiques du volcanisme des Mamelles. Ils correspondent à un épisode marin transgressif de l'Inchirien supérieur. Ces grès sont associés à des coquilles de lamellibranches (huîtres) et de gastéropodes.

- **Les alluvions graveleux**

Ces alluvions sont formées de sables grossiers et de graviers reposant en discordance sur des marnes, des argiles pyriteuses, de la latérite et des sables dunaires infrabasaltiques. Elles constituent un niveau lenticulaire d'une épaisseur maximale de 30 m et se rencontrent essentiellement à Thiaroye.

Ces alluvions correspondent à une accumulation en domaine littoral dans un contexte régressif et en climat humide qui régnait à l'Acheuléen (-60000 BP).

- o **Quaternaire récent**

- **Les dunes rouges de Pikine**

C'est une formation de sables à grains de quartz entourés d'une pellicule rubéfiée d'oxyde de fer. Ces sables affleurent largement à Pikine où ils constituent " l'Erg de Pikine ". Ils se rencontrent dans les sondages où ils peuvent être blancs beiges à jaunes roux. L'épaisseur maximale se rencontre au nord-est de Dakar, dans le forage de Beer Thialane (50 m). La formation des dunes rouges s'est formée à l'Ogolien (-20000 à -18000 BP) au cours de la régression maximale post-inchiérienne où le niveau marin est descendu à la cote -100 m par rapport au niveau actuel. Le climat était désertique et un puissant massif dunaire aligné selon la direction NE-SW s'est installé depuis la Mauritanie jusqu'à la Gambie.

- **La plage soulevée à *Anadara senilis***

Elle correspond à un dépôt de sable vaseux, riche en coquilles dont notamment *Anadara senilis* (LINNE). Des affleurements se présentent sous forme d'étendues argilo-sableuses plates sans végétation et montrent souvent des efflorescences salines portant localement le nom de « tann ». Dans la zone de Thiaroye sur mer, le forage Sasif S1 a recoupé ces sables vaseux sur une épaisseur de 11 mètres. Ces dépôts correspondent à l'épisode transgressif et humide du Nouakchottien (Maximum situé autour de - 5500 BP) au cours duquel la mer envahit les anciens golfs des lacs Mbeucuss, Malika, Retba, Youi et Pikine dans la

presqu'île du Cap-Vert. Le niveau de la plage à *Anadara selinis* est à l'altitude + 3,5 m à Pikine.

- **Les sables Humifères interdunaires des Niayes**

Ces sables affleurent dans les dépressions interdunaires de la région des Niayes entre Pikine et Saint-Louis. On les retrouve sous les sables du système dunaire de Cambérène, dans les forages et les puits des jardins maraîchers de la zone de Thiaroye. Leur épaisseur ne dépasse pas un mètre. Ils proviennent de l'accumulation des sols noirs par ruissellement des eaux dans le fond des dépressions marécageuses interdunaires depuis la période Nouakchottienne.

- **Les dunes jaunes de Cambérène**

Elles s'étirent sur une bande large de 1 à 4 km entre Yoff et Kayar sur une longueur de 40 km. La direction des dunes suit généralement celle des alizés maritimes dominants (NNE-SSW). Dans la zone de Pikine, les dunes littorales s'avancent par endroit et surmontent les dunes ogoliennes, la plage à *Anadara selinis* et les sables humifères interdunaires. Les dunes sont constituées de sables fins orangés d'une épaisseur maximale de 15 m. Elles se sont formées au cours d'un épisode régressif en climat aride correspondant au Tafolien de Mauritanie (- 4000 BP).

- **Les plages et « dunes blanches » littorales actuelles**

Un épisode transgressif au cours duquel la mer s'est avancée jusqu'à la cote + 2 m a été enregistré autour de la presqu'île de Dakar. Cet épisode appelé Dakarien (- 3000 BP) a eu pour résultat la formation de plages à galets et coquilles observées aux Almadies, à la Pointe de Fann et à l'Anse Bernard. La mer dakarienne a d'autre part mis en mouvement d'énormes masses de sable immergé à la faveur de la dérive littorale. Ce sont des sables quartzeux fins à débris coquilliers (Donax notamment).

L'accumulation de ces sables a eu pour résultat la formation d'un premier cordon littoral qui va fermer l'accès à la mer des lagunes héritées du Nouakchottien et la régularisation de la côte Nord qui devient plus rectiligne. L'île de Dakar est alors définitivement reliée au

continent par l'isthme de Thiaroye. Des oscillations postérieures du niveau marin (- 2000 BP à nos jours) ont permis la mise en place d'un second cordon littoral qui a abouti à la configuration actuelle de la côte.

3 Hydrogéologie

3.1 Cadre hydrogéologique

Le bassin sédimentaire du Sénégal est caractérisé par deux grands ensembles hydrogéologiques.

- Un ensemble supérieur hétérogène carbonaté ou détritique, constitué d'aquifères superficiels et semi-profonds. Il regroupe notamment les nappes du Quaternaire, du Continental Terminal, de l'Oligo-miocène, de l'Eocène et du Paléocène.
- Un ensemble inférieur profond et homogène appelé « nappe Maestrichtienne ». C'est une nappe captive contenue dans les niveaux gréseux et argilo-sableux du Sénonien ou de la base du Paléocène et qui s'étend sur la quasi-totalité de la partie sédimentaire du Sénégal.

Le système aquifère des sables quaternaires de la région de Dakar est composé de deux nappes :

- La nappe captive des sables infrabasaltiques qui s'étend sous l'extrémité occidentale de la presqu'île du Cap-Vert. Cet aquifère avec, une épaisseur moyenne de 50m, est constitué par des sables marins d'âge quaternaire recouverts par une coulée volcanique de type basaltique qui en constitue le toit. D'après des études antérieures, la transmissivité dans cet aquifère varie de $1.05 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ à $9.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ tandis que le coefficient d'emmagasinement est estimé entre 1.25% et 1.5% ;
- La nappe libre de Thiaroye avec des épaisseurs variant de 30 à 80 m. Elle est composée de sables hétérogènes. Des sables grossiers de diamètre 2 à 10 mm sont intercalés entre des sables argileux reposant sur le substratum tertiaire et

des sables éoliens de diamètre 0.2 à 0.5mm au sommet. Dans cette partie libre, la transmissivité évolue de $1.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ à $6.7 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

3.2 Synthèse des connaissances sur le réservoir hydraulique étudié

3.2.1 Situation et caractéristiques

Le système hydraulique objet de cette étude est dit « sable quaternaire de Thiaroye », il se localise entre Dakar et Kayar sur une superficie d'environ 300 km^2 (fig.4). Ce système est caractérisé par la présence d'un réseau hydrographique dense, marqué par des dépressions (Niayes) où affleure la nappe.

Le réservoir est limité au sud-ouest par une crête piézométrique qui la sépare de la nappe infrabasaltique située dans la tête de la presqu'île, à l'ouest par la limite océanique, au sud-est par le substratum mameux tertiaire qui affleure à partir de Mbao et au nord-est par la dépression de Tamna qui la sépare de la nappe du littoral nord.

La nappe des sables quaternaires de Thiaroye est un réservoir sableux reposant sur des formations argilo-mameuses imperméables qui en constitue le substratum. Ce substratum mameux éocène est marqué par des dépressions comblées par des dépôts sableux, ce qui confère au système des variations d'épaisseur très marquées d'un point à l'autre (Hebrard, 1966 ; in Faye 2001). De plus les formations sableuses sont de nature très différente.

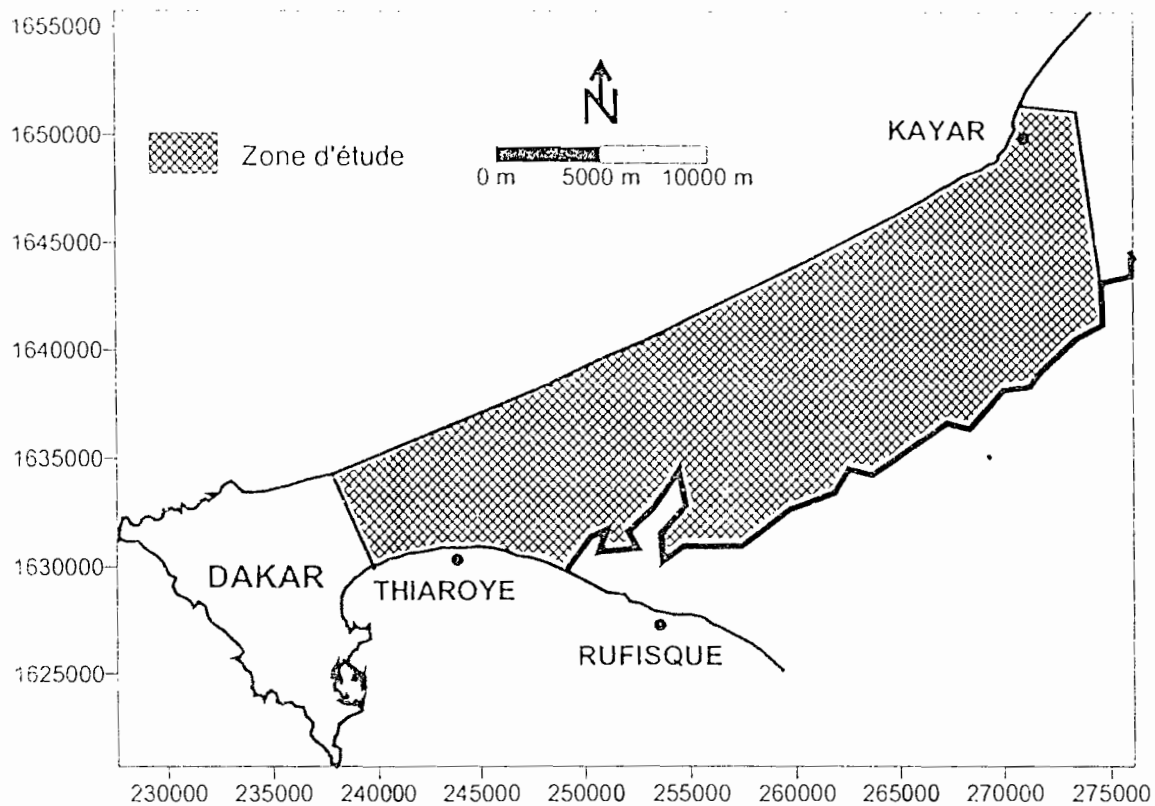


Figure 4 : Localisation de la zone d'étude

3.2.2 Hydrodynamisme

De manière générale la nappe est alimentée annuellement par infiltration directe des eaux de pluie. Elle se décharge par exploitation au niveau des puits et forages, par évaporation au niveau des Niayes et des lacs et par écoulement vers la mer. Une étude antérieure (Geohydraulique, 1972) a mis en évidence :

- des écoulements s'effectuant généralement du sud-est vers le nord-ouest, c'est à dire vers la mer et les lacs intérieurs. Cette étude révèle également qu'avec le débit moyen d'exploitation de l'époque (10 000 m³/j), le biseau salé était maintenu en bordure de l'océan.
- deux dômes piézométriques situés l'un au nord-est entre le lac Mbawane et le lac Tamna, et l'autre au sud-ouest au voisinage des Niayes de Pikine. Ces dômes permettent d'isoler le réservoir en un système hydrodynamique indépendant.

La zone Ouest est marquée par le bassin versant de Thiaroye, caractérisé par une dépression piézométrique résultant de l'exploitation de la nappe.

3.2.3 La pollution de la nappe

En 1948, les premiers forages d'exploitation de Thiaroye sont implantés dans la zone la plus faiblement minéralisée de la nappe. Dans les années 50, la quasi-totalité des forages fournissent une eau d'excellente qualité ; les concentrations en éléments marqueurs de la pollution humaine sont normales : Cl^- inférieur à 60 mg/l et NO_3^- inférieur à 30 mg/l.

Déjà en 1987, des analyses montrent des concentrations en nitrates comprises entre 80 et 285 mg/l rendant les eaux de Thiaroye impropres à la consommation humaine. Sur la majeure partie des forages les concentrations en Cl^- et NO_3^- vont continuer à croître. Une récente étude (Faye, 2001) montre des concentrations en nitrates variant entre 100 et 550 mg/l.

La dégradation de la qualité de l'eau est évidemment liée à l'extension de l'habitat dans le rayon d'influence des pompages. Des études antérieures ont montré un pic de fortes concentrations en nitrates centré sur la zone péri-urbaine de Pikine-Yeumbeul. Lorsqu'on s'éloigne de la zone péri-urbaine non assainie, aussi bien vers l'est que vers l'ouest, les teneurs moyennes en NO_3^- diminuent puis se situent en dessous de la concentration maximum admissible (50mg/l). Il est donc évident que la forte pollution azotée qui rend les eaux de Thiaroye impropres à la consommation humaine a pour origine les concentrations de population en habitat non assaini sur le bassin versant du champ de captage. Les sources de pollution azotée sont les latrines familiales non étanches qui sont souvent noyées dans la nappe en hautes eaux et l'évacuation sur ou dans le sol des déchets organiques. L'eau des puits privés qui captent la partie superficielle de la nappe, en habitat concentré, sans périmètre de protection, montre des teneurs en nitrates comprises entre 350 et 580 mg/l. Ces eaux présentent en particulier un réel danger pour les populations résidentes qui s'approvisionnent exclusivement aux puits.

3.2.4 Prélèvements

o Les prélèvements de la SONES

La nappe de Thiaroye a été mise en exploitation en 1950 avec un débit annuel moyen de 17000 m³/j jusqu'en 1955. Le démarrage de l'exploitation sur la nouvelle ressource de Sébikotane permet de réduire les pompages sur Thiaroye qui, par suite d'une baisse critique de la piézométrie, étaient sujets à des risques d'intrusion saline. Pour cette raison, l'exploitation est pratiquement arrêtée dans les années 1960-1961, puis elle a repris avec des débits moyens de 9000 à 10 000 m³/j jusqu'en 1988 pour faire face à l'accroissement des besoins de la capitale. A partir de cette date, les prélèvements ont décliné régulièrement pour atteindre 5200 m³/j sur les 5 premiers mois de l'année 2002 (fig.5). Parallèlement le nombre de forages en exploitation depuis 1952 a varié de 8 à 6.

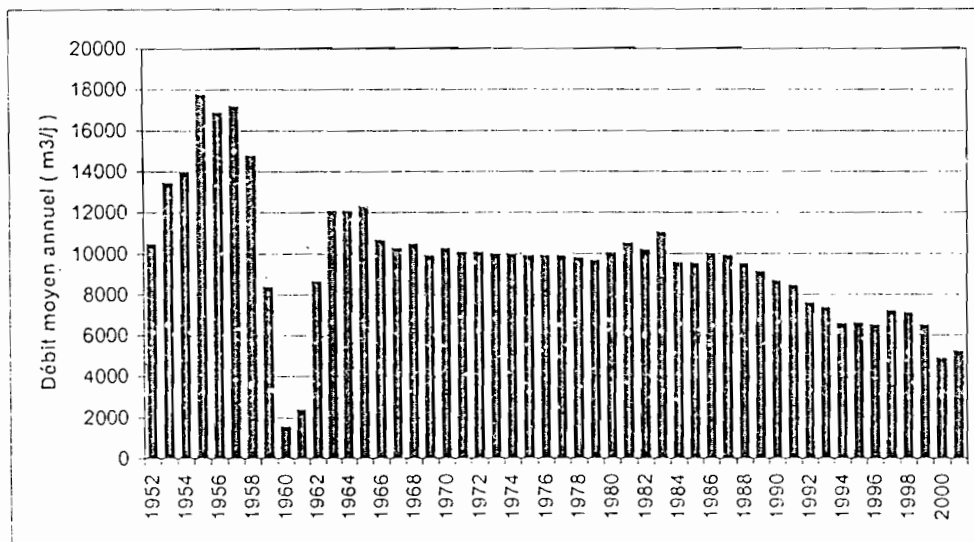


Figure 5 : Débits moyens annuels du champ de captage de Thiaroye

o Les prélèvements agricoles

En plus des ouvrages d'exploitation, la nappe est également sollicitée par puits et puisards traditionnels pour des besoins en eau des populations rurales et pour le maraîchage qui se pratique à grande échelle dans les Niayes. Ces prélèvements, estimés à 100 m³/j dans les secteurs irrigués, sont globalement négligeables.



2^{ème} PARTIE

PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE
METHODOLOGIE ET OUTILS UTILISES

1 Problématique de l'étude

Les pays du Tiers-Monde connaissent une croissance urbaine exceptionnellement rapide et brutale. On qualifie souvent ce phénomène de pseudo-urbanisation pour souligner le fait que l'augmentation de la population urbaine soit sans commune mesure avec la croissance économique, la création de logements ou d'équipements publics. Incapables d'endiguer cette croissance et dépourvus de moyens techniques et financiers nécessaires à son accompagnement, les pouvoirs publics assistent impuissants au développement de quartiers irréguliers périphériques et à la taudification des quartiers anciens. Dans ces banlieues marquées par une insuffisance de réseaux sanitaires, les résidents adoptent des modes autonomes d'alimentation en eau et d'élimination des déchets. Ces pratiques conduisent à une intense pollution des eaux souterraines notamment par les nitrates. L'aquifère des sables quaternaires de Thiaroye en est un exemple patent.

Des études récentes ont montré une contamination de cette nappe par les nitrates essentiellement due au développement de l'habitat informel dans le secteur. Cette dégradation rapide de la qualité des eaux compromet leur usage pour l'alimentation future en eau potable de la ville de Dakar. Les teneurs excessives en nitrates évaluées par endroits entre 100 et 550 mg/l (Faye, 2001) dépassent largement les normes de potabilité fixées par l'OMS à 50 mg/l.

Cet état de contamination des eaux dans le centre de captage de Thiaroye est une contrainte réelle pour la SONES qui, jusque là, procédait à une dilution des eaux avec d'autres ressources hydriques pour ramener cette teneur à des valeurs acceptables. Mais, il est aujourd'hui envisagé un arrêt total ou partiel des pompages vu le niveau très élevé de pollution. Toutefois, la surface piézométrique de la nappe des sables quaternaires est assez proche du sol. En effet, avant 1950, en régime non influencé, elle affleurait dans les séries de dépressions interdunaires (Niayes), les bas-fonds et les marigots qui caractérisent la morphologie de la zone de Thiaroye. De plus la pseudo-urbanisation de la zone n'avait été rendue possible que grâce au rabattement de la nappe induit par la mise en exploitation du champ de Thiaroye. On devrait donc s'attendre à une remontée du niveau de la nappe consécutive à l'arrêt des pompages, ce qui risque d'avoir un impact négatif sur plusieurs plans notamment :

- l'inondation des secteurs construits en zones basses,
- une pollution anthropique accrue de la nappe,
- la dégradation des activités maraîchères qui se sont développées dans la zone de Pikine.

Par rapport à ces contraintes, les différentes phases de cette étude viseront à :

1^{ère} phase

- élaborer l'ensemble des paramètres d'entrée nécessaire à la modélisation numérique du système aquifère de la nappe des sables quaternaires de Thiaroye.

2^{ème} phase

- modéliser les écoulements dans le système aquifère de Thiaroye en vue de fournir un outil de prévision capable d'estimer les variations piézométriques de la nappe en fonction des différents scénarios envisagés par la SONES ;
- évaluer l'impact environnemental d'un arrêt partiel ou total de l'exploitation du champ de captage de Thiaroye en particulier sur les zones susceptibles d'être inondées ;
- proposer des solutions pour atténuer un tel impact sur l'environnement.

Le présent rapport rend compte des résultats obtenus au cours de la première phase de l'étude.

2 Méthodologie et outils utilisés

2.1 Méthodologie

La démarche méthodologique retenue dans le cadre de cette étude se résume comme suit :

2.1.1 Recherche et collecte des données

Cette étape a consisté à récolter toutes les données nécessaires d'une part à l'élaboration du modèle mathématique du système aquifère de Thiaroye et d'autre par à la géographie de la zone d'étude. Ces données concernent :

- la géométrie de l'aquifère
- la piézométrie
- l'hydroclimatologie
- les paramètres hydrodynamiques
- les prélèvements au niveau de la nappe

2.1.2 Traitement des données

Les données de base recueillies dans l'étape précédente nécessitent des traitements préliminaires avant de pouvoir être utilisées comme paramètres d'entrée du modèle hydrodynamique du système aquifère de Thiaroye.

o Les données sur la géométrie de l'aquifère

Les traitements effectués sur ces données ont abouti à l'élaboration de la carte du substratum mameux constituant la limite inférieure de l'aquifère ainsi que de la carte topographique de la zone d'étude constituant sa limite supérieure.

o Les données sur les paramètres hydrodynamiques

Les paramètres hydrodynamiques du système aquifère de Thiaroye, à savoir la perméabilité, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement, n'ont pas été déterminés dans le cadre de cette étude. Les valeurs de ces paramètres ont été reprises des travaux antérieurs menés sur le système aquifère de Thiaroye. Pour mémoire, la détermination de ces paramètres s'effectue à partir des pompages d'essai.

o Les données sur la piézométrie

Dans cette étape les charges piézométriques de 1971 et de 1997 ont été traitées et utilisées respectivement pour le calage en régime permanent et transitoire du modèle. Le krigeage des données piézométriques ainsi que l'établissement des cartes isopièzes ont été élaborés avec le logiciel SURFER 7.

o Les données hydroclimatologiques

Les traitements effectués sur ces données devront aboutir à la définition des valeurs de recharge et d'évapotranspiration. Pour la détermination de ces paramètres nous avons utilisé les formules empiriques de ALBRECHT et THORNTWAITE. Les traitements portent essentiellement sur les données de pluviométrie et de température relevées au niveau des différentes stations météorologiques réparties sur la zone d'étude. L'aire d'influence des différentes stations a été définie par la méthode des polygones de THIESSEN.

2.1.3 Modélisation hydrodynamique

L'étape précédente a permis d'élaborer les paramètres d'entrée nécessaires à la modélisation hydrodynamique du système aquifère de Thiaroye. Le modèle mathématique devra être établi en utilisant le logiciel VISUAL MODFLOW qui se base sur la méthode des différences finies.

2.1.4 Cartographie des zones inondables

Une fois le modèle mathématique établi, des simulations devront être effectuées en fonction des différents scénarios envisagés par la SONES. Les cartes isopièzes résultant de ces simulations combinées à la carte topographique, feront ressortir les zones sensibles sujettes à des inondations.

Ces deux dernières parties constitueront la seconde phase de l'étude

2.2 Outils utilisés

A l'instar de bons nombres de problèmes faisant intervenir des équations aux dérivées partielles, la résolution de l'équation des écoulements n'est possible qu'à partir des outils informatiques. Dans le cadre de cette étude, deux types de traitements informatiques devront être effectués : l'élaboration des cartes d'isocontours avec le programme SURFER 7 et la conception du modèle mathématique avec le programme VISUAL MODFLOW.

2.2.1 Elaboration des cartes d'isocontours

o SURFER 7

L'interpolation spatiale des grandeurs à distribution à partir de valeurs discrètes mesurées en un certain nombre de points est assurée dans cette étude par le logiciel SURFER 7.

Surfer est un outil de tracé de contours et de surfaces en 2D et 3D. Il convertit les fichiers ASCII ou les tables de calculs en cartes et surfaces.

Lors de l'élaboration de ces courbes isocontours, Surfer assure concomitamment le krigeage des valeurs. Le krigeage est une méthode d'interpolation qui permet de déterminer la meilleure distribution spatiale à partir d'un ensemble de valeurs discrètes. Elle intervient normalement après une étude géostatistique (modélisation statistique) des données spatiales. Dans cette étude, faute d'une analyse géostatistique des données, nous avons utilisé, pour le krigeage, le modèle linéaire proposé comme modèle par défaut dans SURFER 7.

SURFER offre plusieurs options graphiques et permet d'obtenir les résultats suivant le type de données analysé. Les opérations suivantes sont notamment possibles :

- * Courbes de niveaux, Surfaces 3D
- * Affichage de points sur une carte
- * Analyse spectrale

- * Aperçu des sens d'écoulement
- * Langage de macros
- * Importation de fonds de cartes géographiques
- * Superposition de graphiques sur des fonds de cartes
- * Feuille de travail et fonctions de type tableur
- * Fonctions d'importation (Excel, Lotus)
- * Fichiers de données de taille illimitée
- * Calculs de surfaces et de volumes.

Pour notre part ce logiciel aura surtout servi à l'élaboration de la carte topographique, de la carte du substratum, des courbes isopièzes et à la discrétisation de la zone d'étude.

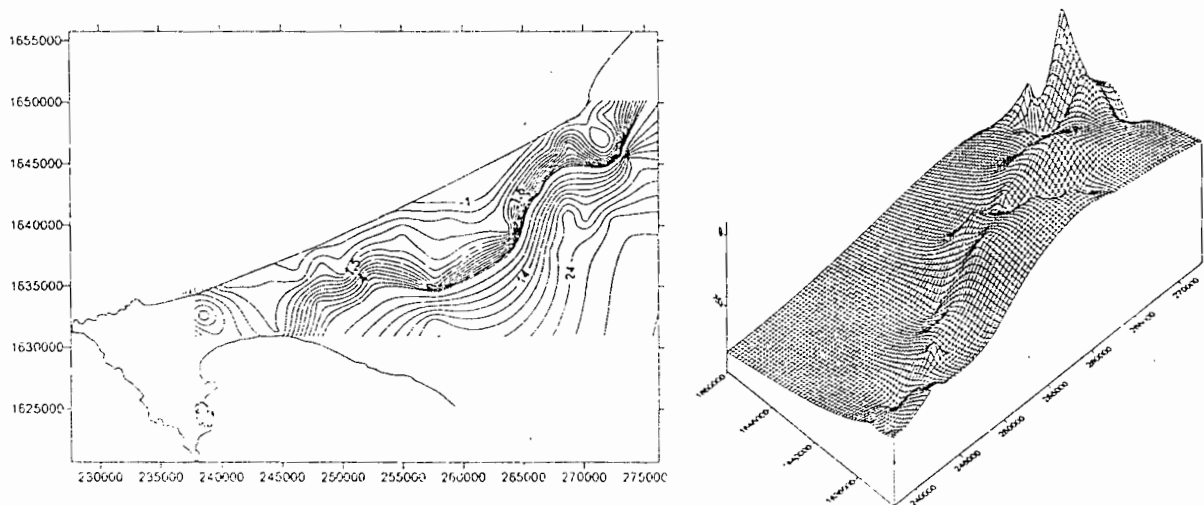


Figure 6 : Modèle de représentation dans SURFER

2.2.2 Modélisation hydrodynamique

o Principes de la modélisation

La modélisation de la nappe phréatique de Thiaroye doit être effectuée dans le but de comprendre le fonctionnement de l'aquifère dans les conditions naturelles par une simulation de son comportement afin de prévoir l'influence d'un arrêt des pompages par la SONES.

▪ Equation de diffusivité en nappe libre

La loi de comportement dynamique de la phase liquide d'un sol traduit l'existence d'une relation entre les forces auxquelles est soumis le fluide et sa vitesse d'écoulement. Cette loi, appelée loi de Darcy propose de calculer le flux d'eau total dans un milieu poreux ou volume d'eau à travers une section donnée comme le produit d'une constante de proportionnalité (le coefficient de perméabilité) et d'un gradient, celui de la charge hydraulique en fonction de la longueur de l'élément de volume. Elle s'exprime comme suit :

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dL}$$

où :

Q : volume traversant une section A [m²] considérée [m³/s]

h : charge hydraulique [m]

L : longueur de l'élément de volume [m]

K : conductivité hydraulique à saturation ou coefficient de perméabilité [m/s].

L'équation de conservation de la masse ou équation de continuité, qui traduit le fait que la quantité d'eau entrée dans l'élément de volume précité est le total de celle qui en sort et de la partie emmagasinée, s'exprime quant à elle de la sorte :

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

avec :

∂M : variation de masse [kg]

δt : variation de temps [s]

ρ : densité du fluide [kg/m³]

n : porosité

dx.dy.dz : volume élémentaire considéré [m³]

La combinaison des deux expressions conduit à l'équation d'écoulement tridimensionnel suivant au sein de l'aquifère:

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

où :

k_x, k_y, k_z : valeurs de perméabilité suivant x, y et z [m/s]

- h : charge piézométrique [m]
 Q : débit d'infiltration ou de pompage [m^3]
 S_s : coefficient d'emmagasinement spécifique [sans unité]
 t : temps [s]

Il s'agit de l'équation de diffusivité en nappe libre.

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

* En régime permanent :

En faisant l'hypothèse d'un milieu homogène et isotrope, l'écoulement en système bidimensionnel avec un régime permanent donne lieu à l'équation suivante de Laplace :

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

* En régime transitoire :

L'équation de diffusivité pour un écoulement plan en régime transitoire s'exprime de la manière suivante :

$$T \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + I = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

▪ Résolution numérique par la méthode des différences finies

L'utilité des méthodes numériques pour la résolution des équations aux dérivées partielles est de faciliter la résolution par voie analytique de certains phénomènes physiques complexes par une discrétisation du problème. La discrétisation consiste à approcher les termes de dérivation par des quotients différentiels. En se basant sur la définition de la dérivée, on peut écrire, que pour un pas h infiniment petit, la dérivée centrée s'exprime de la manière suivante :

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h}$$

Les termes d'ordre 2 sont approchés par :

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} \approx \frac{f(x+h) - 2.f(x) + f(x-h)}{h^2}$$

La résolution de l'équation de diffusivité par la méthode des différences finies, nécessite donc un maillage du domaine pour pouvoir effectuer la discrétisation.

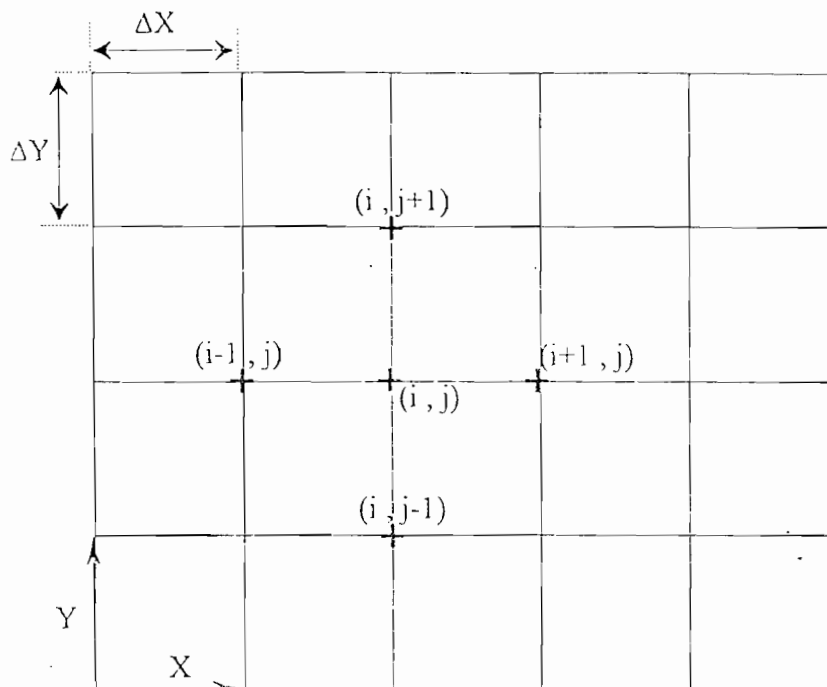


Figure 7 : Principe de la méthode des différences finies

On définit h_{ij} la charge hydraulique au point d'abscisse $x = x_i$ et d'ordonnée $y = y_j$. Plus le maillage est fin (c'est à dire plus le pas h est petit), meilleure est l'approximation : l'erreur $\varepsilon(h^2)$ tendant vers 0 quand h tend vers 0.

Une discrétisation par différences finies centrées avec un maillage régulier de points ($\Delta x = \Delta y = \Delta$), conduit selon le régime d'écoulement aux solutions présentées ci-dessous

* En régime permanent :

$$h_{i,j} = \frac{h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}}{4} \quad \text{où } h_{i,j} = h(x,y) \Big|_{x=x_i; y=y_j}$$

La valeur obtenue constitue la moyenne des charges hydrauliques des 4 nœuds qui entourent le point de coordonnées x_i et y_j .

* En régime transitoire :

La variation dans le temps de la charge hydraulique impose une discrétisation par rapport à ce paramètre. De plus, le choix de la différence à droite pour la résolution numérique de l'équation de diffusivité est guidé par la connaissance de la valeur de la charge hydraulique à l'étape initiale (à l'instant $t = 0$, la charge est supposée connue $h = h^0$).

$$\left. \frac{\partial h}{\partial t} \right|_{i,j} \approx \frac{h_{i,j}^{t+\Delta t} - h_{i,j}^t}{\Delta t}$$

o Présentation du programme VISUAL MODFLOW

VISUAL MODFLOW est un logiciel de Waterloo Hydrogeologic Inc. (1999) fonctionnant sous l'interface Visual Basic (fig.8) qui permet la modélisation numérique des eaux souterraines. Il a pour qualités premières d'être simple, modulaire et doit sa réputation à une utilisation mondiale massive.

Il est possible avec son programme d'établir, de calibrer et d'interpréter un modèle d'écoulement d'eaux souterraines et de transport de contaminant. En somme, VISUAL MODFLOW est un logiciel de base pour la simulation en régime permanent ou transitoire des écoulements laminaires plans ou tridimensionnels dans des systèmes multicouches.

Il résout l'équation de diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines en milieu poreux (combinaison de la loi de Darcy et de l'équation de continuité) par la méthode des différences finies. Pour se faire, l'aquifère est discrétisé en mailles et des conditions aux limites lui sont imposées. Le nombre et la taille des mailles dépendent de la précision attendue et de la nature des données sources. La piézométrie calculée au centre de chaque maille tient compte des paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, ...), des conditions aux limites (potentiel ou flux imposé, possible liaison avec un réseau hydrographique, ...) et des conditions de recharge (infiltration, évapotranspiration, éventuels pompages). Il est souvent difficile de disposer de toutes les données hydrogéologiques pour chaque maille à cause du coût d'exploitation élevé que cela implique. Pour cette raison, des interpolations sont effectuées grâce à MODFLOW sur tout le domaine à partir des données disponibles sur quelques sites particuliers.

Le modèle numérique à mettre en œuvre grâce à VISUAL MODFLOW s'articule autour de deux hypothèses fondamentales : les gradients hydrauliques doivent être faibles et la continuité hydraulique de l'aquifère respectée et aboutit à :

- * la transmission des connaissances sur l'aquifère de manière synthétique,
- * la visualisation de l'influence des paramètres physiques et des conditions aux limites sur les écoulements souterrains,
- * la mise sur pied d'un instrument d'expérimentation et de démonstration,
- * le contrôle, dans une certaine mesure, de la cohérence des hypothèses que l'on fait sur les propriétés physiques du milieu et sur les conditions aux limites (infiltrations, pertes par évapotranspiration, niveau de la nappe).

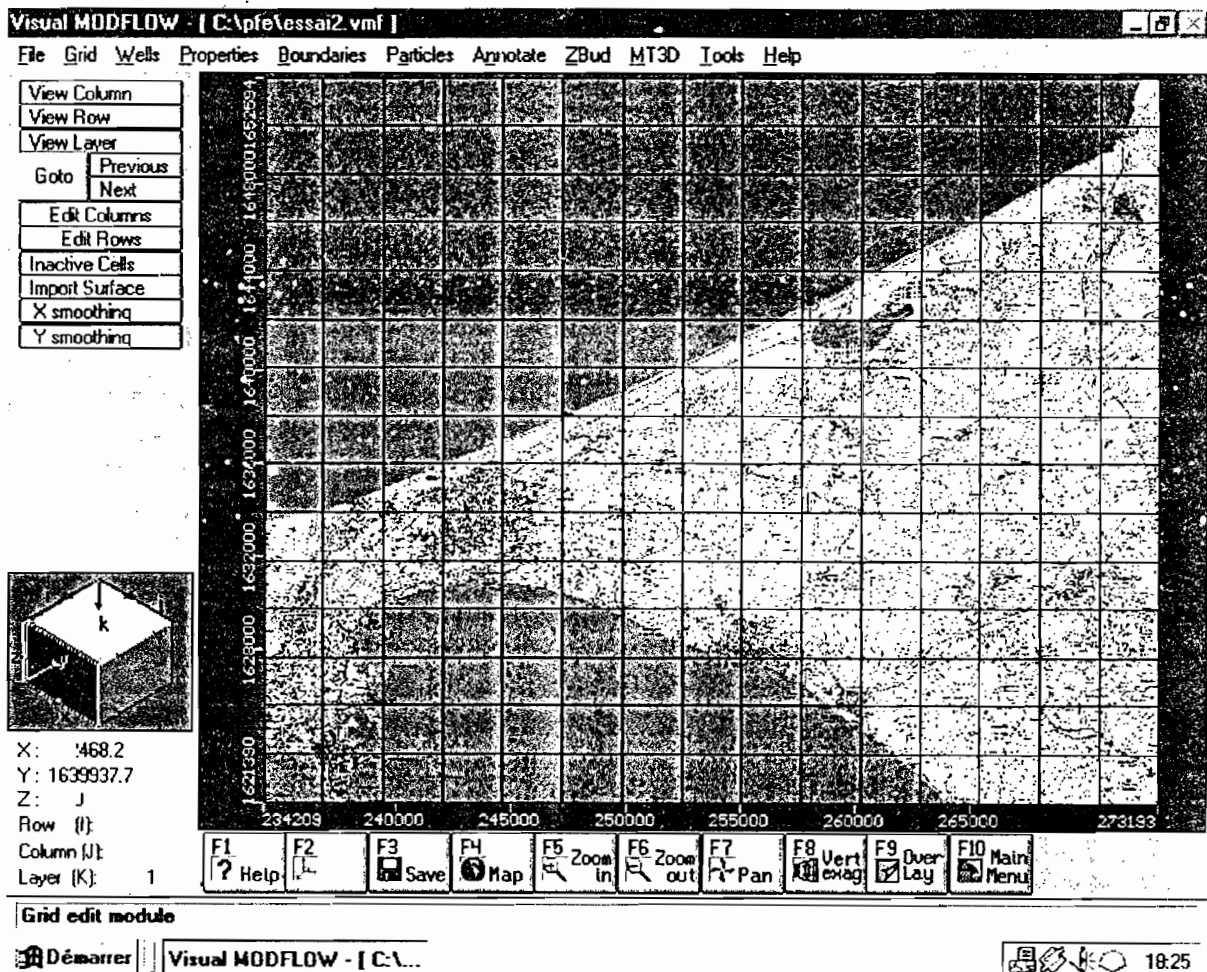


Figure 8 : Fenêtre de VISUAL MODFLOW



3^{ème} PARTIE

ELABORATION DES PARAMETRES
D'ENTREES DU MODELE

1 Géométrie de l'aquifère

Deux surfaces sont nécessaires pour définir la géométrie de l'aquifère dans la conception du modèle mathématique. Il s'agit précisément de la surface topographique et de celle du substratum.

1.1 La topographie

A défaut d'une carte topographique numérique précise couvrant toute la zone d'étude, nous avons reconstitué les courbes de niveau représentatives du relief général de la zone. Ces courbes de niveau ont été tracées à partir du logiciel Surfer 7 en utilisant des valeurs ponctuelles correspondant aux cotes de margelle de 56 ouvrages de suivi couvrant toute la zone d'étude.

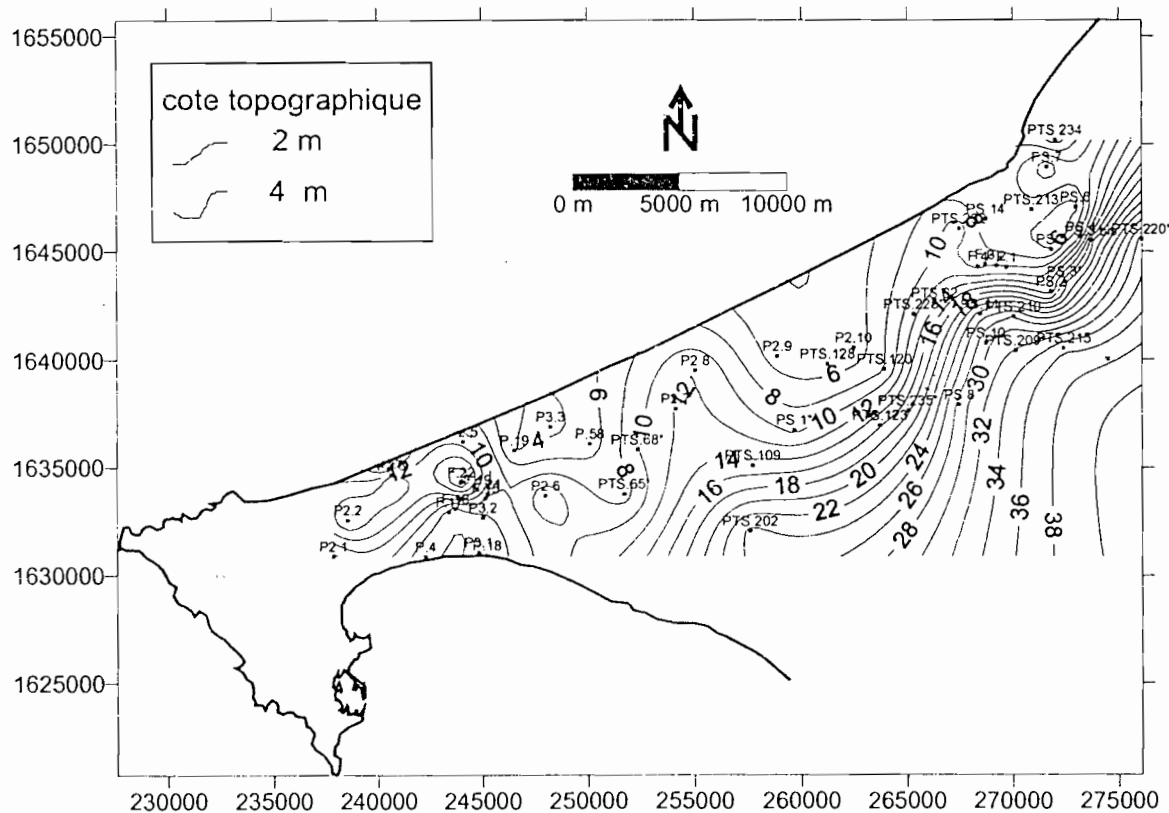


Figure 9 : Carte topographique de la zone d'étude

Il faut noter que cette carte approximative obtenue par interpolation des valeurs données par les ouvrages ne sera utilisée que pour l'élaboration du modèle. De cette carte, il ressort que les zones topographiques basses susceptibles d'être touchées par les inondations sont essentiellement localisées à Thiaroye. Par conséquent, dans le souci de mieux estimer les débordements de la nappe, une carte topographique précise de la zone de Thiaroye a été établie.

Les courbes de niveau des trois cartes topographiques au 1/20 000, édition 1967 (coupures de Dakar, Rufisque et Niakoul Rap) ont été digitalisées à partir du programme Surfer 7. Elles constituent la source d'information la plus précise dont nous avons pu disposer sur la topographie de la zone de Thiaroye. Il existe une carte de la presqu'île plus récente, mise à jour en 1983. Toutefois, cette dernière au 1/50 000 ne permet pas d'atteindre le degré de précision escompté puisque les courbes de niveau y sont espacées de 10 m (contre 2,5 m pour les cartes au 1/20 000).

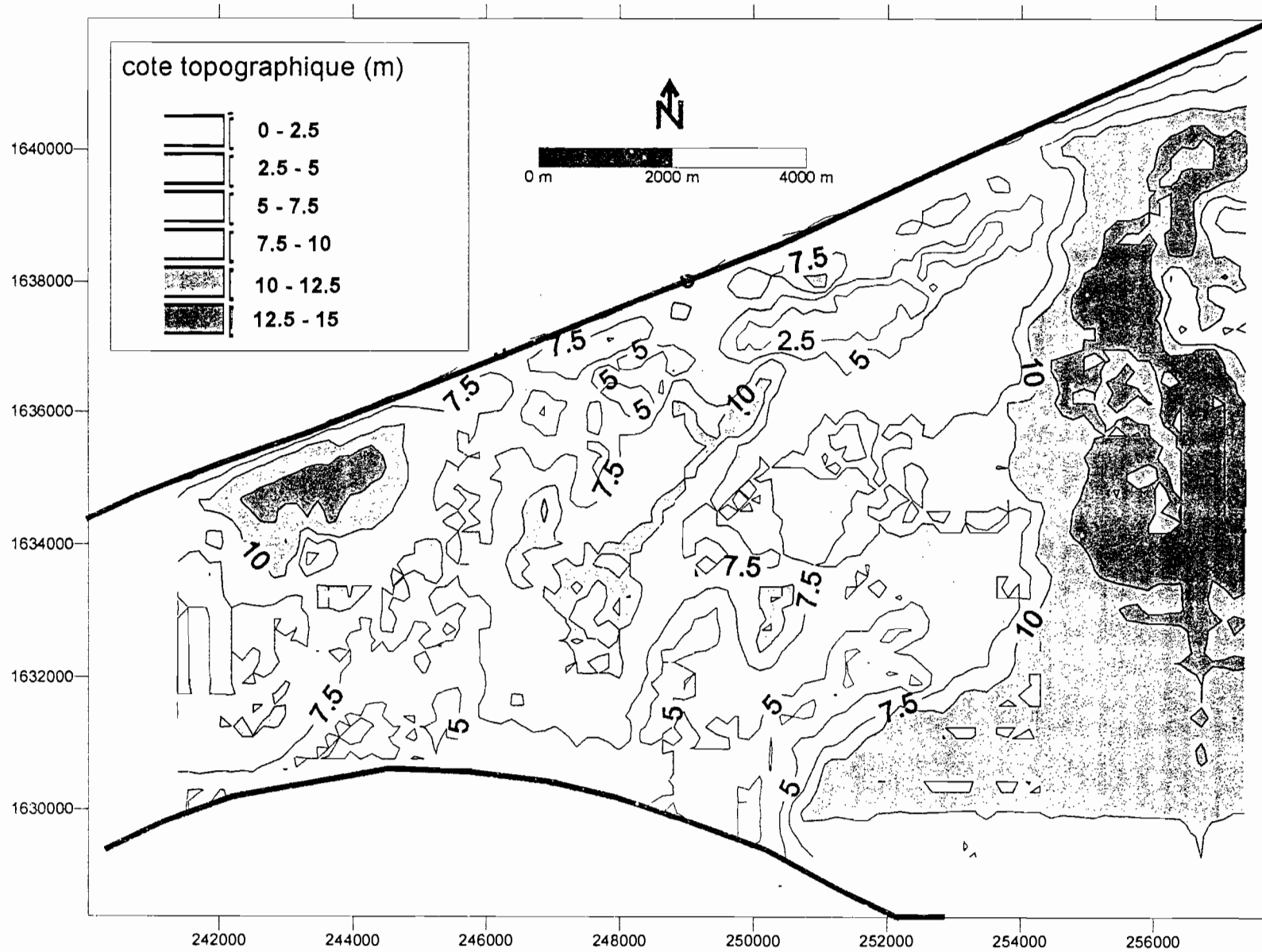


Figure 10 : Carte topographique de la zone de Thiaroye

1.2 Le substratum

La carte du substratum a été élaborée sur Surfer 7 à partir des valeurs discrètes mesurées sur 65 ouvrages répartis sur la zone d'étude. Cette carte numérique sera introduite comme limite inférieure du modèle.

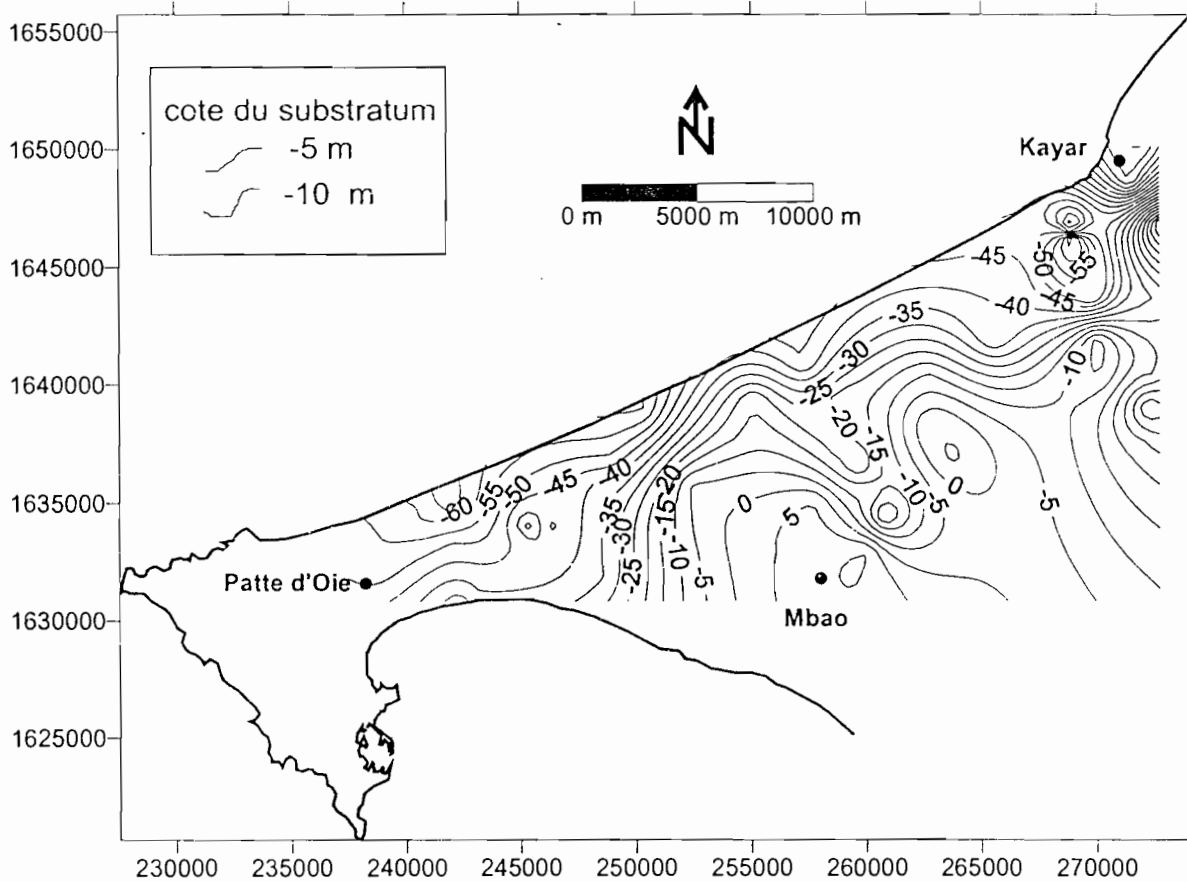


Figure 11 : Morphologie du substratum marneux

La morphologie du substratum décrit une surface accidentée inclinée vers le nord-ouest partant de la cote +10 m à Mbao à la cote -60 m sur le littoral. Au niveau de la Patte-d'Oie à l'ouest et dans la zone de Kayar au nord-est on note des dépressions allant respectivement jusqu'à -60 m et -70 m. Le long du littoral sud la cote du mur avoisine -35 m

2 Piézométrie de référence

2.1 Elaboration des cartes piézométriques de référence

La définition du modèle mathématique nécessite l'élaboration de deux cartes piézométriques de référence :

- l'une pour le calage en régime permanent ;
- l'autre pour la vérification en régime transitoire.

Les cartes piézométriques de la zone d'étude ont été construites pour les années 1971 et 1997 respectivement pour les régimes permanent et transitoire.

2.1.1 Piézométrie de 1971

La piézométrie de 1971 établie dans le cadre de l'étude de GEOHYDRAULIQUE (1972) correspond à l'un des niveaux les plus bas que la nappe ait jamais atteint. L'étiage de la nappe à cette époque traduit d'une part l'extrême sécheresse de l'année 1970 (pluie annuelle = 177 mm) et d'autre part une suite d'années à forts prélèvements sur le champ de Thiaroye (débit moyen annuel = 10 000 m³/j).

Dans le cadre de notre projet, la piézométrie de 1971 a été reconstituée à partir de la carte établie lors de l'étude précédemment citée. La numérisation avec le logiciel Surfer 7 a permis de générer la carte piézométrique digitale nécessaire à l'élaboration du modèle.

Elaboration des paramètres d'entrée du modèle

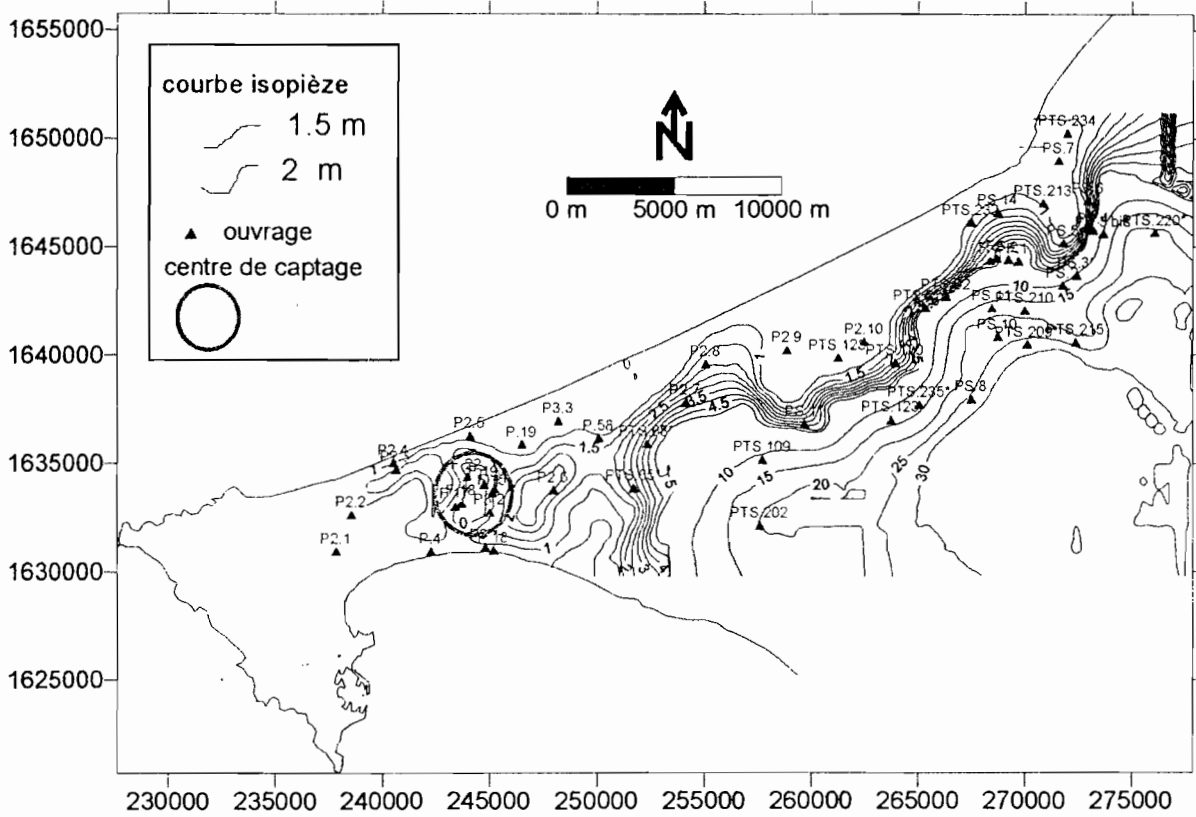


Figure 12: Carte piézométrique de la nappe en 1971

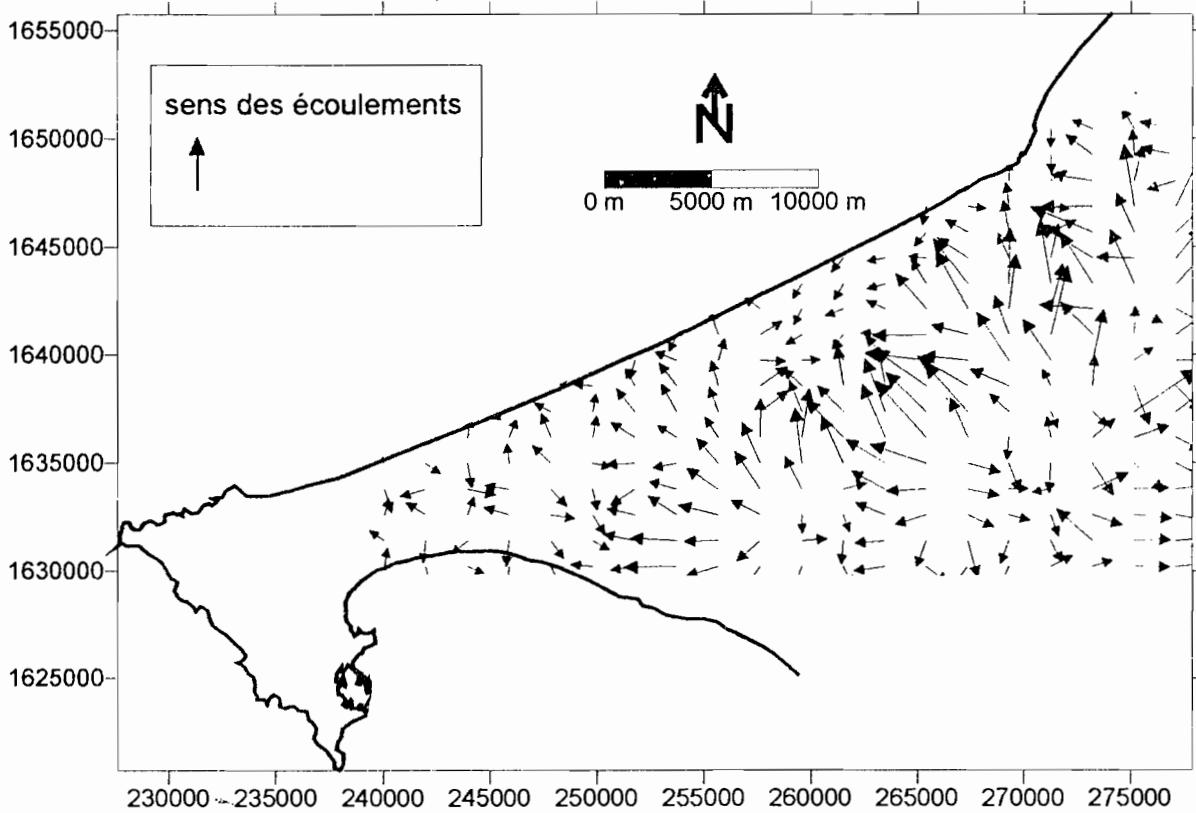


Figure 13 : schéma Hydrodynamique de la nappe en 1971

2.1.2 Piézométrie de 1997

Les données nécessaires à l'élaboration de la carte piézométrique de 1997 ont été obtenues grâce aux travaux de Faye 2001 sur la nappe des sables quaternaires. Au cours de cette étude, des mesures ont été effectuées sur un réseau de 56 ouvrages s'étendant de la Patte d'Oie à Kayar. Les résultats de ces mesures consignés en annexes ont permis d'établir la carte piézométrique de 1997. Faute d'une étude géostatistique, le krigeage a été effectué par le programme Surfer sur la base d'un modèle linéaire.

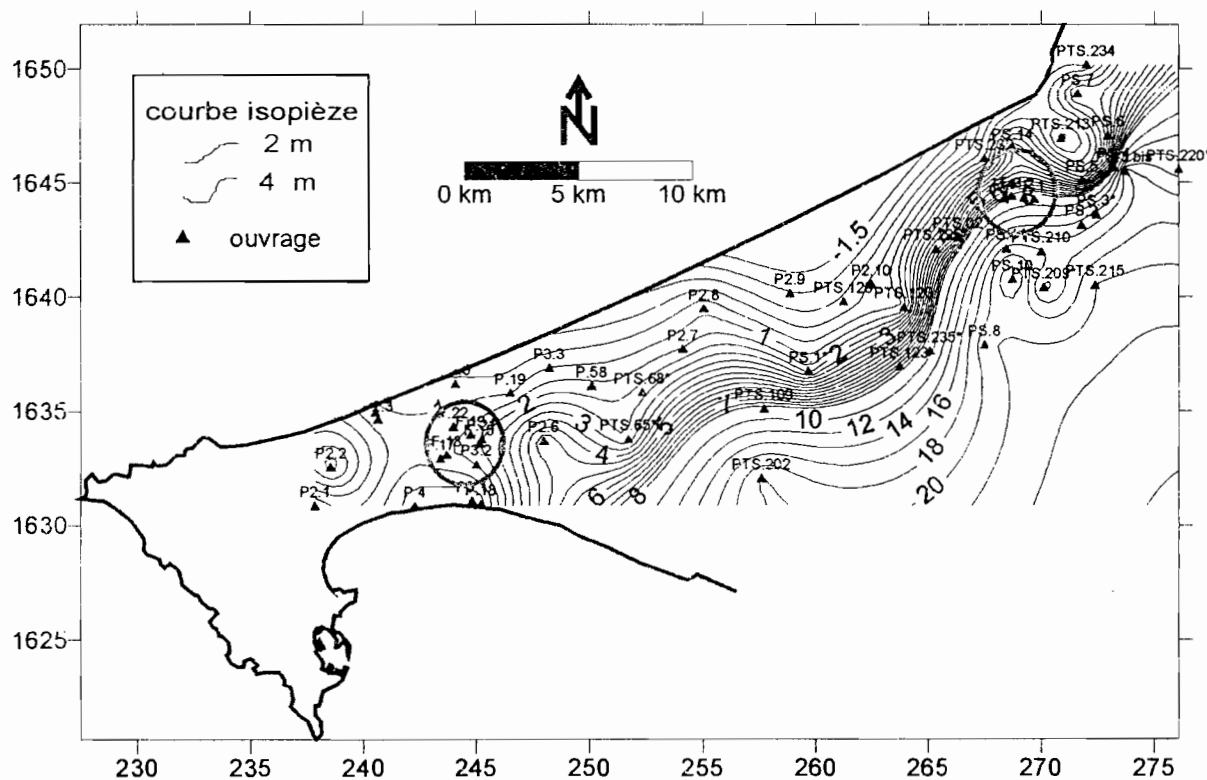


Figure 14 : Carte piézométrique de la nappe en Juillet 1997

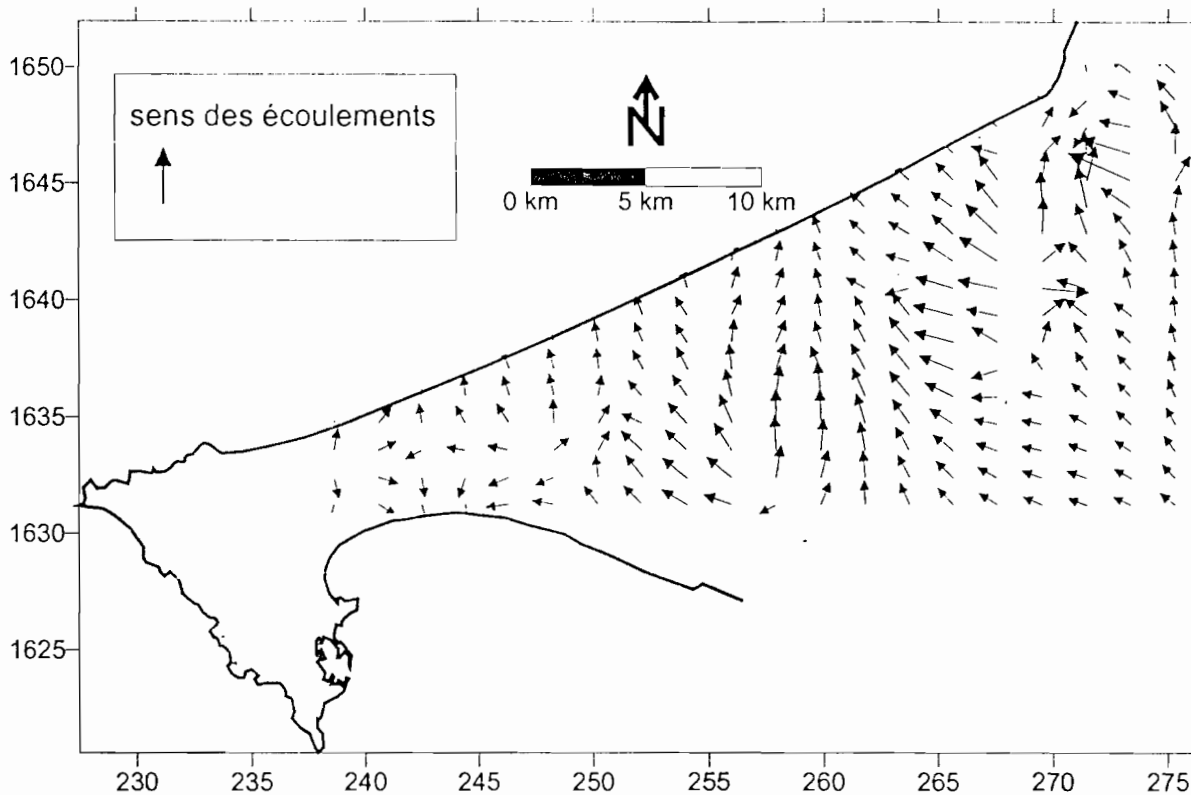


Figure 15 : Schéma hydrodynamique de la nappe en juillet 1997

2.1.3 Schéma hydrodynamique

La carte piézométrique tracée sur la surface de la zone d'étude montre une forme générale en dôme à axes parallèles aux lignes de rivage s'abaissant d'est en ouest. Sur cette forme générale se superpose une dépression provoquée par le pompage au niveau du champ captant de Thiaroye. Le champ de captage de Beer Thialane n'étant pas en exploitation en 1971, aucune dépression n'est notée à ce niveau sur la carte de cette période.

De plus, il est intéressant de noter la présence de dômes piézométriques sur la carte de 1997 au niveau des zones suivantes :

- dans le secteur nord-ouest un dôme axé entre les lacs Tamna et Mbawane avec une cote d'environ 10 m ;
- dans le secteur sud-ouest un second dôme d'environ 4 m axé sur le piézomètre P2-2.

Comme nous le verrons par la suite, ces dômes constituent des limites stables pour l'élaboration du modèle mathématique.

3 Les paramètres hydrodynamiques

La perméabilité, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement, constituent les paramètres hydrodynamiques d'un système aquifère.

3.1 définition des paramètres

Coefficient de perméabilité (K)

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. Il a la dimension d'une vitesse : LT^{-1} et peut être différent suivant la direction d'écoulement envisagée.

Coefficient d'emmagasinement (S)

Il peut être défini comme le volume d'eau pouvant être libéré ou emmagasiné par un prisme vertical du matériau aquifère de section égale à l'unité, à la suite d'une modification unitaire de niveau piézométrique 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'emmagasinement correspond pratiquement au volume d'eau gravitaire saturant la roche, donc à la porosité efficace. Son ordre de grandeur est généralement compris entre 10 % et 35 %.

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 orthogonale à celle de l'écoulement), et par unité de gradient hydraulique.

C'est le produit de la perméabilité (de Darcy) 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.

3.2 Détermination de la perméabilité et de la transmissivité

La détermination de ces paramètres s'effectue in situ à partir des pompages d'essais.

Le pompage d'essai est une méthode définie pour déterminer les caractéristiques hydrauliques des formations géologiques. Cet essai consiste à l'application d'une décharge sur la nappe en fonction du temps pour pouvoir évaluer quantitativement et qualitativement le système aquifère. Des études antérieures menées sur la zone d'étude fournissent les valeurs de ces paramètres en différents points.

Tableau 2 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère

Points	T 10 ⁻³ (m ² /s)	K 10 ⁻⁴ (m/s)	S %
P2-1	1.5	0.8	-
P2-3	3	0.91	-
P2-4	3	0.97	1.9
P2-5	3	1.75	4.8
P2-6	2.9	1.85	2.1
P2-7	4.5	1.22	1.6
P2-8	2.83	1.79	1.5
P2-9	6.26	6.34	2.51
P2-10	6.26	7.4	2.51
P3-1	2.45	0.4	1.06
F-3	6.75	3.4	1.67
P3-2	-	0.8	-
F-21	-	1.3	-
PTS 68	-	1.1	-
PTS 202	-	0.4	-
PS-1	-	1.2	-
PTS 235	-	0.6	-
PTS 128	-	7.81	-
PTS 02	-	1.47	-
PTS 120	-	2.5	-
PS-11	-	1.25	-
PTS 210	-	7.4	-
F-2	-	2.1	-
PS-14	-	1	-
PTS 213	-	1.8	-

Lors de l'élaboration du modèle, seuls la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement sont utilisés comme données d'entrée.

o Perméabilité

Le tableau précédent, tiré de l'étude de GEOHYDRAULIQUE 1972, nous donne un nombre important de valeurs de perméabilité assez bien réparties sur la zone d'étude. La distribution de ces valeurs est présentée sur la figure suivante.

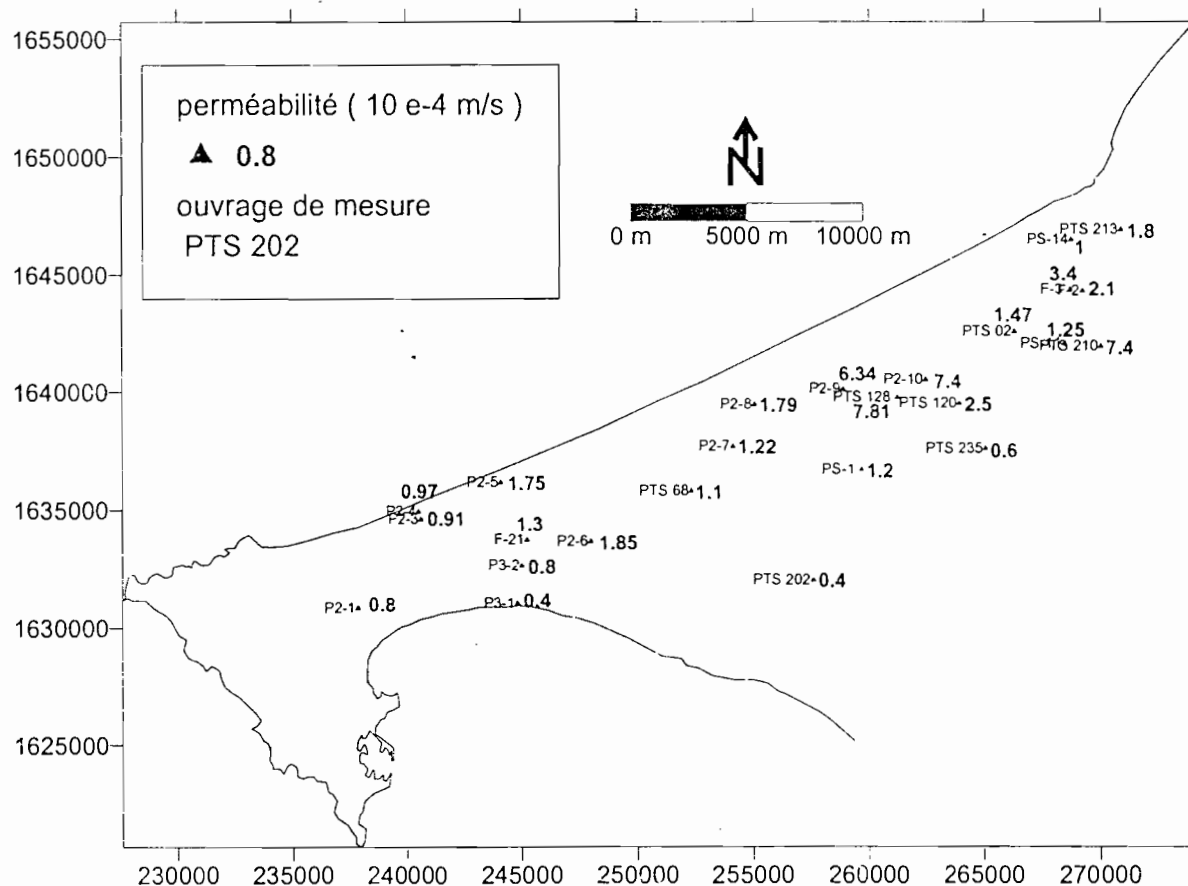


Figure 16 : Carte de distribution des valeurs de perméabilité sur l'aquifère

Les sables quaternaires sont de nature très hétérogène avec des perméabilités variant de 0.4 à 8.10^{-4} m/s. Dans la zone de Thiaroye, les perméabilités sont inférieures à 1.10^{-4} m/s et les plus fortes perméabilités sont localisées dans la zone du lac Retba. Dans le sud-est du système où le substratum marneux affleure ces valeurs deviennent très faibles.

Il convient de noter que les pompages d'essai ne donnent que des ordres de grandeur des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du fait de l'imprécision des mesures. Les valeurs de perméabilité indiquées sur la carte ne sont donc pas figées et seront ajustées lors de la phase de calage jusqu'à ce que les isopièzes calculées soient le plus proche possible de celles relevées sur le terrain.

o Coefficient d'emménagement

Les valeurs du coefficient d'emménagement fournies par l'étude de GEOHYDRAULIQUE et comprises entre 1,06 et 4,8 % se sont révélées trop faibles. En effet, ces valeurs sont de l'ordre de 10 à 35 % pour les aquifères libres. Pour le calage du modèle, une valeur moyenne de 20 %, déterminée à partir d'un bilan hydrique sur deux périodes différentes (saison des pluies et saison sèche), sera appliquée à l'ensemble des mailles. Cette valeur moyenne pourra être ajustée lors de la phase de calage en régime transitoire

4 Les conditions aux limites

La figure 17 présente les conditions aux limites adoptées pour le modèle. Elles sont de 2 types :

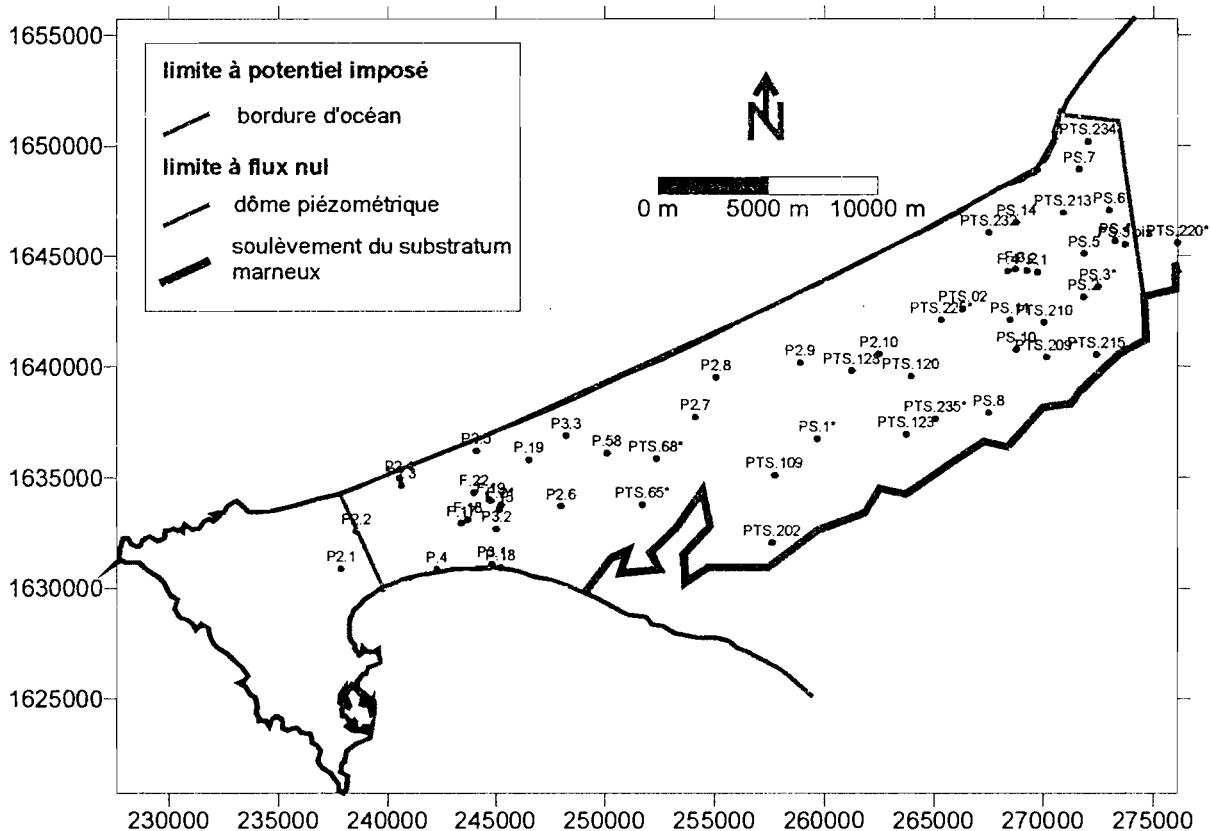


Figure 17 : Condition aux limites du modèle

o les conditions à potentiel imposé

Encore appelées limites de premier ordre ou conditions de DIRICHLET, elles permettent de maintenir une charge constante au niveau de la limite. Elles correspondent généralement à des zones de rencontre entre un domaine aquifère souterrain et des eaux de surface caractérisées par une charge relativement constante dans le temps. Dans notre étude, un potentiel constant égal à 0m est à appliquer sur l'ensemble des mailles situées en bordure d'océan.

o les conditions à flux imposé

Egalement appelées limites de deuxième ordre ou conditions de NEUMANN, elles permettent, dans le cas où les flux d'échanges seraient connus, de fixer le débit susceptible de traverser la limite. Ce flux est nul dans le cas des limites étanches où l'imperméabilité ne permet pas d'échange avec le milieu extérieur. Sur le système aquifère de Thiaroye, des limites à flux nul sont à imposer :

- au sud de la nappe correspondant au soulèvement du substratum marneux ;
- à l'ouest de Thiaroye et à l'est du lac Mbawane où la présence des dômes piézométriques stables empêchent les échanges avec le milieu extérieur

5 La recharge

La recharge est le paramètre qui présente le plus d'incertitude comparé aux autres données d'entrée du modèle. Sa détermination nécessite la connaissance des modes d'alimentation de la nappe.

5.1 Modes d'alimentation de la nappe de Thiaroye

La figure 18 résume le bilan hydrologique de l'aquifère de Thiaroye.

Elaboration des paramètres d'entrée du modèle

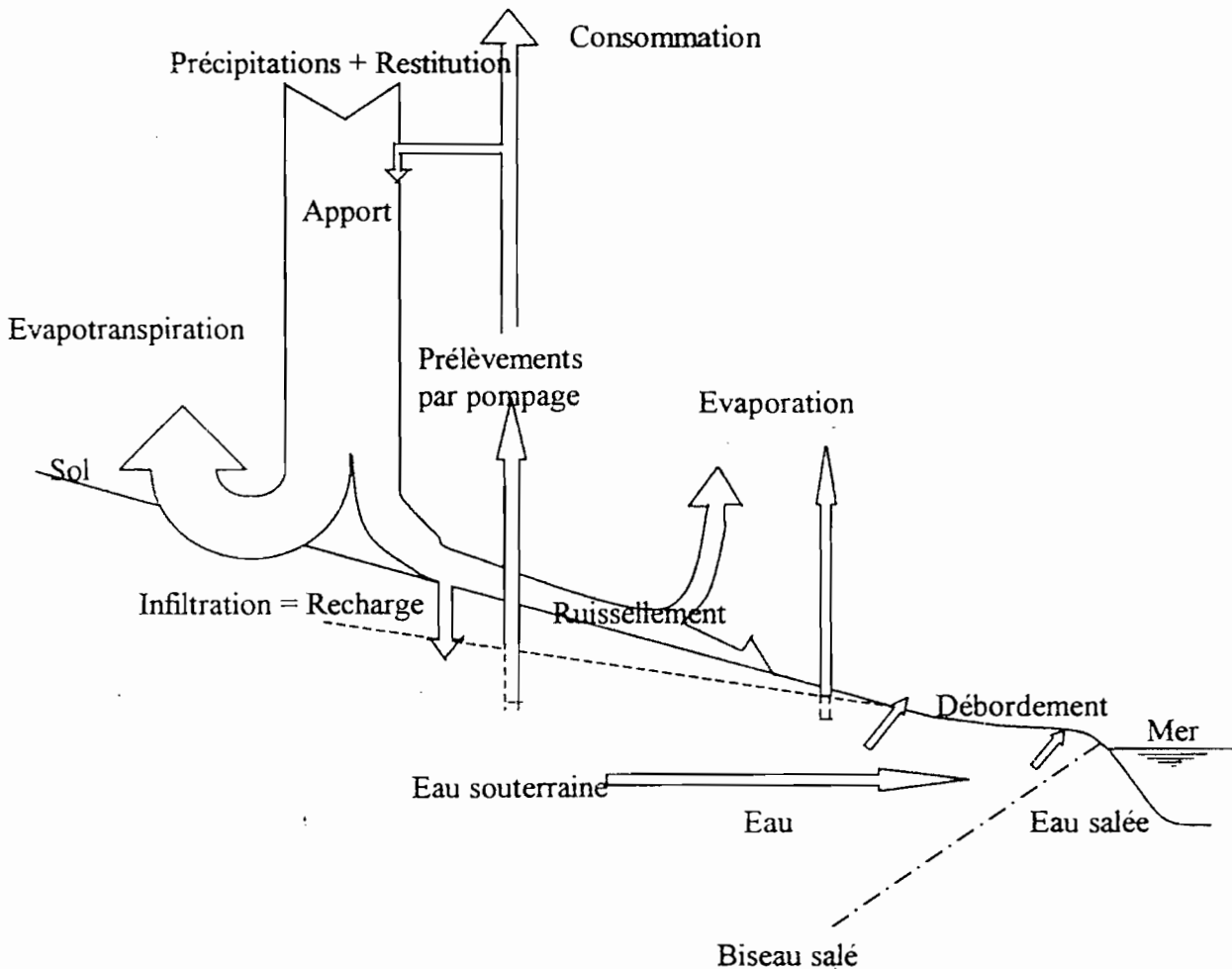


Figure 18 : Schéma de principe du bilan hydrologique d'un aquifère

La principale source d'alimentation naturelle de la nappe est la fraction de pluie qui s'infiltré chaque année dans le sol et atteint l'aquifère. Les mesures effectuées sur l'aquifère de Thiaroye montrent en effet une relation directe entre le niveau de la surface piézométrique et la hauteur de pluie enregistrée sur la même période. La figure 19 fait ressortir cette relation au niveau de 4 ouvrages captant la nappe de Thiaroye. On remarque que la courbe de variation du niveau piézométrique suit étroitement l'histogramme des pluies des années considérées.

La croissance rapide des surfaces habitées depuis les années 80 nous oblige à tenir compte d'un second mode d'alimentation au niveau de la zone urbaine non assainie de Thiaroye : les retours à la nappe. En effet une fraction importante des eaux à usage domestique se retrouve dans le sol du fait de l'absence de réseaux d'assainissement.

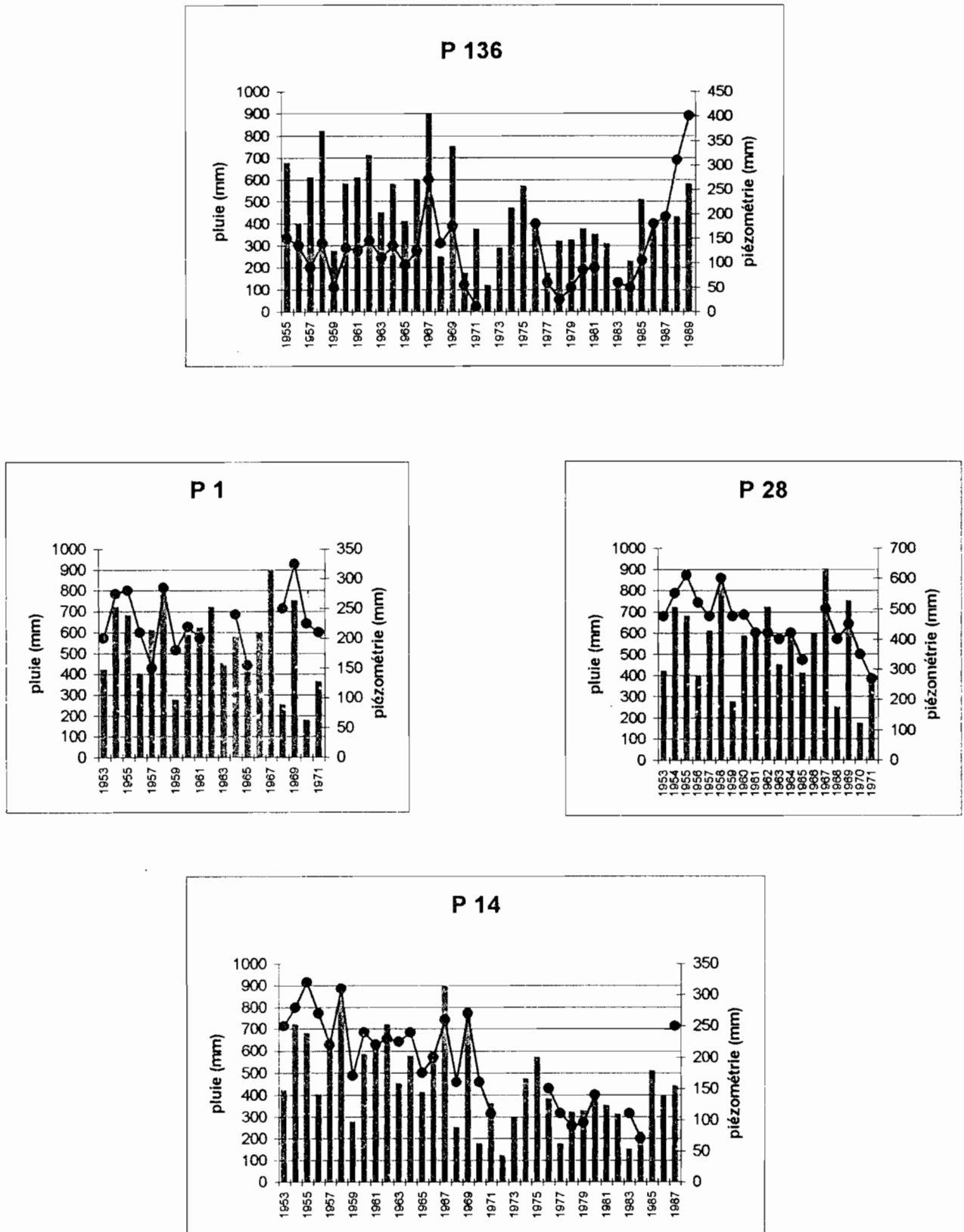


Figure 19 : Relation entre la pluie annuelle et la piézométrie de la nappe

5.2 Recharge par les eaux de pluie

La détermination du bilan hydrique se fait à partir des données mesurées au niveau des différentes stations météorologiques réparties sur la zone d'étude. Ces données sont consignées en annexe.

o Zone d'influence des différentes stations météorologiques

Dans le cadre de cette étude les valeurs de recharge seront déterminées au niveau des 6 stations météorologiques présentes sur la zone d'étude, à savoir : Dakar-Yoff, Mbao, Pikine, Hann, Bambilor et Kayar.

La zone d'influence de ces différentes stations est déterminée par la méthode des polygones de THIESSEN. La figure 20 présente ces zones d'influence.

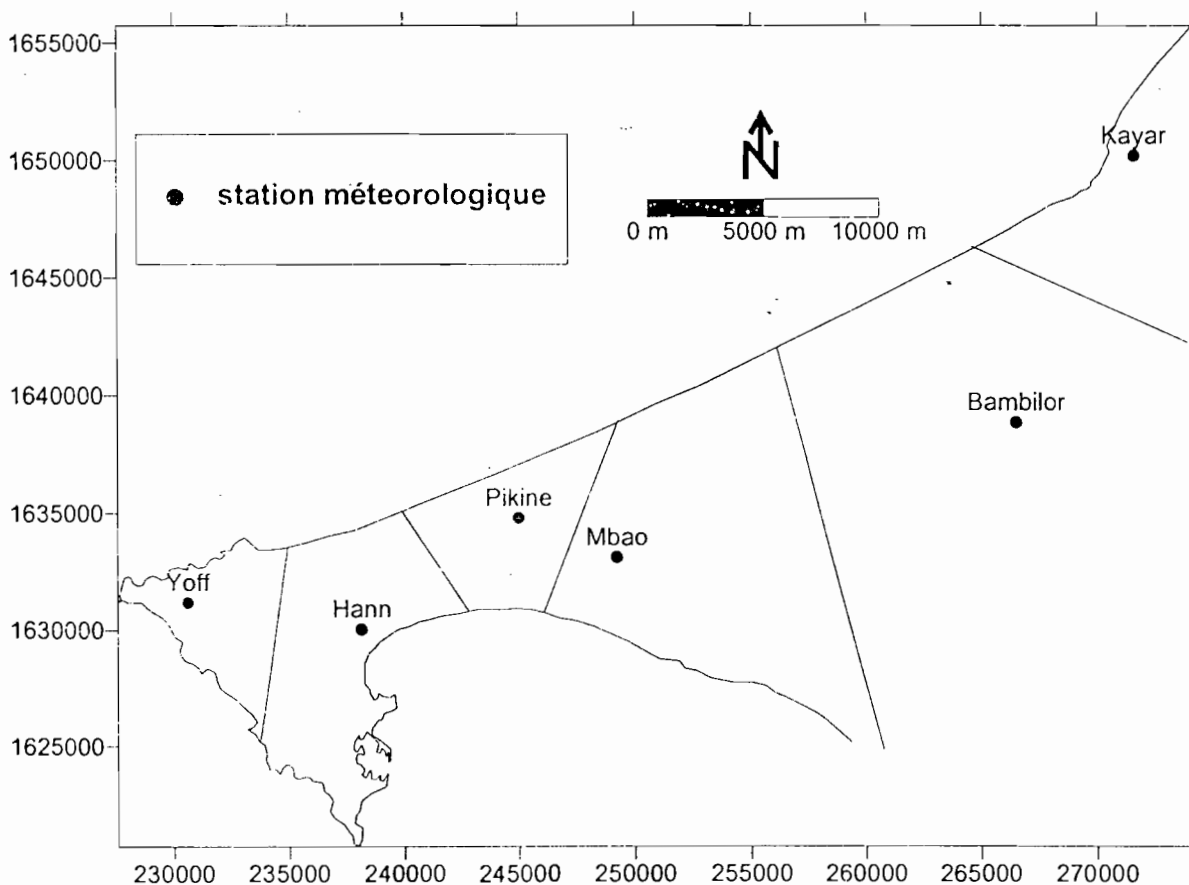


Figure 20 : Zones d'influence des stations météorologiques

o Calcul de la recharge

Selon HÖLTING, le bilan hydrique est défini par les paramètres donnés dans l'équation :

$$N = ETR + Q + I$$

N = précipitation

ETR = évapotranspiration réelle

Q = Ruissellement

I = Infiltration (recharge)

Dans cette formule, le ruissellement sera négligé du fait de l'absence d'un réseau hydrographique dense. L'infiltration définie à partir de la précipitation et de l'évapotranspiration réelle, constitue la recharge de la nappe.

La pluie étant une donnée connue, il nous faut déterminer l'évapotranspiration réelle pour estimer la recharge de la nappe. La recharge au niveau de la station de Dakar- Yoff sera calculée sur la période de 1984 à 1996 où nous disposons de données climatiques. Faute de données, les valeurs de recharge au niveau des autres stations seront tirées de l'étude de FAYE (2001).

• Calcul de l'évapotranspiration potentielle

Pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle, nous avons utilisé la formule THORNTHWAITE. Les données climatiques dont nous disposons ne sont pas suffisantes pour définir l'ETP de ALBRECHT.

Selon THORNTHWAITE l'ETP mensuelle est donnée par :

$$ETP = 16 * \left[\frac{10 * t}{I} \right]^4 * F(\lambda)$$

ETP : évapotranspiration potentielle (mm)

t : temperature moyenne mensuelle (°C)

A := $6,75 \cdot 10^{-7} * I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} * I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} * I + 0.49239$

- I : indice thermique annuel, somme des douze indices thermiques mensuels i
 i : = $(t / 5)^{1.514}$ indice thermique mensuel.
 F(λ) : coefficient de correction fonction de la latitude et du mois considéré.

Le tableau suivant récapitule le calcul de l'ETP au niveau de la station de Dakar-Yoff sur la période de 1984-1996.

Tableau 3 : Calcul de l'évapotranspiration potentielle (station de Yoff)

mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
année												
1984	22.6	26.8	23.2	24.3	26.1	28.6	29.5	30.3	30	30.3	28.4	25.1
1985	21.5	24.2	23.3	23.5	23.9	27.3	29.3	29.5	29.8	30.9	28.7	27.1
1986	22	23	23.8	24.6	25.7	27.3	29.1	29.6	30.1	30.2	28.1	25.8
1987	24.6	24.1	27.2	27.1	26.8	29.4	30.3	30.4	30.2	30.5	29.7	27.6
1988	24.3	23.5	26.6	25	26.2	27.8	29.5	29.7	29.9	29.9	29.1	25.9
1989	24.3	24	23.9	23.1	26	29	29	30	30	25.4	27.2	26.7
1990	21.7	26.2	27.5	24.3	25.2	27.3	29.3	30.4	31.4	31.6	29.2	25.5
1991	24.6	23.9	23.4	24.4	24.3	26.9	28.9	29.6	30.4	30.4	29.8	28
1992	27.2	23.8	25	23.3	25.9	28	29	30	30.4	30	30	26.3
1993	24.7	23.6	24.4	25	25.8	28.7	30.1	30.7	30.7	30.6	26.5	26.5
1994	24.6	24.8	24.1	25.4	25.5	27.8	29.6	29.6	29.9	30.5	29.6	29.6
1995	25.7	26.2	23.3	24	26	28.6	30.7	30.1	31.2	31.9	31.7	27.3
1996	25.7	25	24.6	25.7	27.2	29.5	30.4	30.5	30.4	31.5	31.1	26.5
moy	24.12	24.5	24.64	24.59	25.74	28.17	29.6	30.03	30.34	30.3	29.16	26.76
i	10.83	11.1	11.19	11.15	11.95	13.7	14.8	15.09	15.33	15.3	14.44	12.68
F(λ)	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	86.61	87.3	100.3	100.5	128.9	180.6	229	233.8	230.1	226	182.7	131.9

I (Indice annuel) = 157.5250497

A = 4.037391064

F(λ) est obtenue par les tables pour la latitude de 15° nord.

• Calcul de l'évapotranspiration réelle

Selon ALBRECHT, la relation entre la précipitation (N), l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR) est définie par cette double équation :

$$ETR_n = \frac{N_n + \frac{\sum W_{n-1}}{\sum W_{max}} * ETP_n * g}{1 + \frac{\sum W_{max} - \sum W_{n-1}}{C * ETP_n}} \quad (a)$$

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

où

n et $n-1$: indices du mois considéré et du mois précédent

ETR : évapotranspiration réelle mensuelle (mm)

N : pluviométrie moyenne mensuelle (mm)

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm)

$\sum W_n$ et $\sum W_{n-1}$: les réserves du sol

$\sum W_{max}$: capacité au champ. C'est la quantité d'eau maximale que peut contenir un sol après ressuyage. D'après ALBRECHT cette valeur est égale à 100 mm 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, comme c'est le cas sur la zone d'étude, on retient les valeurs suivantes : $g = 0.37$ et $C = 1.36$.

Pour l'application de la formule de ALBRECHT on a :

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

Si $N < ETP$ alors ETR sera calculée d'après la formule (a) et sa valeur doit être inférieure à celle de ETP. On a un déficit agricole.

Pour chaque mois considéré on définit les réserves utiles du sol ΣW par la formule (b) avec $\Sigma W < 100$. Ce calcul doit démarrer à un mois où les réserves du sol sont plus ou moins bien estimées. Ainsi d'après l'auteur :

$\Sigma W = 0$ mm après une longue période de sécheresse.

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

La recharge est ensuite calculée par la formule :

$$R = I = N - ETR$$

Le tableau 4 récapitule les valeurs d'évapotranspiration réelle et de recharge calculées au niveau de la station de Dakar-Yoff sur la période de 1984-1996.

Tableau 4 : Calcul de l'évapotranspiration et de la recharge (station de Yoff)

mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Somme
ETP (mm)	86.6	87.3	100	101	128.9	180.6	228.5	233.8	230.1	226.2	182.7	131.87	1917.4
N (mm)	1.23	0.03	0	0	0.1	6.09	45.44	160.8	130.3	14.23	1.58	0.13	359.93
ETR (mm)	1.5	0.8	0.78	0	0.064	4.346	35.671	133.6	123.5	33.97	7.546	2.2628	344.11
W (mm)	4.38	3.61	2.82	0	0.036	1.781	11.549	38.72	45.49	12.75	6.782	4.649	119.56
R (mm)	-	-	-	-	0.036	1.744	9.7686	27.18	6.8	-	-	-	45.425

On obtient finalement une valeur de recharge de 45.425 mm/an pour la station de Dakar-Yoff. Cette valeur de recharge est très proche de celle obtenue pour la même période par l'étude de FAYE (2001) qui est de 46.67 mm/an. Faute de données, les bilans hydriques au niveau des autres stations seront directement tirés de cette étude. Ces bilans sont consignés en annexes.

Le tableau 5 récapitule les valeurs de recharges à considérer au niveau de chaque station.

Tableau 5 : Valeur de recharge aux différentes stations

Station	Dakar-Yoff	Mbao	Pikine	Hann	Bambilor	Kayar
Recharge (mm/an)	45.425	42.59	48.23	44.8	38.02	32.26

Ces valeurs, combinées à la délimitation des zones d'influence des différentes stations seront entrées en première approximation dans le modèle. Elles auront à être ajustées lors de la phase de calage du modèle jusqu'à ce que les isopièzes calculées avoisinent les isopièzes mesurées.

5.3 Retours à la nappe

En zone urbaine non assainie, une part importante de l'eau à usage domestique est rejetée par les populations sur le sol. Cette fraction d'eau disponible pour alimenter la nappe est estimée par la SONES entre 60 et 75 % du débit fourni, selon l'état du réseau. Pour cette raison, il est nécessaire de tenir compte des retours à la nappe pour la zone de Thiaroye.

Les volumes à réinjecter dans la nappe seront estimés à partir de l'évolution des populations et des surfaces construites.

Aujourd'hui, la consommation journalière de la deuxième circonscription urbaine est de l'ordre de 30 000 m³/j. Le volume journalier disponible susceptible de participer à l'alimentation de la nappe serait de l'ordre de 20 000 m³/j répartis sur les 40 km² occupés par les surfaces bâties (Retours à la nappe = 0.5 mm/j).

Dans le cadre de cette étude, le volume d'eau consommée est calculé par décennie sur la base d'une estimation de la population de l'agglomération et d'une consommation moyenne par habitant. Ce débit d'apport sera supposé uniformément réparti sur la zone urbanisée de Thiaroye en plus de la recharge par les eaux de pluie.

Tableau 6 : Valeur de retour à la nappe

Année	Population estimée	Consommation estimée (m ³ /j)	Surface habitée (km ²)	Retour à la nappe (mm/j)
1969	150 000	1500	9,2	0,12
1976	280 000	5600	15	0,28
1986	600 000	12 000	21,6	0,42
1997	1000 000	30 000	35	0,65

Remarques :

- La valeur considérée de la recharge due aux retours à la nappe est estimée à 75 % du débit fourni.
- 1969 : consommation spécifique 10 l/j/hab. L'apport d'eau exogène est probablement faible ; la population s'approvisionne surtout aux puits.
- 1986 : consommation spécifique 20l/j/hab. Il est possible qu'une partie de la population s'approvisionne encore aux puits. Dans ce cas, le retour à la nappe est surestimé.
- 1997 : consommation spécifique 30l/j/hab.

6 Les prélèvements

Deux catégories de prélèvement sont à considérer au niveau de l'aquifère de Thiaroye :

6.1 Les prélèvements de la SONES

Ces prélèvements sont essentiellement effectués sur les centres de captage de Thiaroye et Beer Thialane.

La définition du modèle mathématique par le programme Modflow nécessite l'introduction des caractéristiques des différents forages d'exploitation de la nappe. Il s'agit notamment des altitudes supérieure et inférieure des crépines ainsi que du débit moyen d'exploitation sur la période de calage du modèle.

Les données relatives aux débits prélevés par la SONES sur le champ de captage de Thiaroye sont rassemblées dans l'annexe 6. Nous avons établi le débit moyen d'exploitation au niveau des forages en faisant la moyenne des prélèvements de 1989 à 1997. Cette moyenne sera utilisée dans le modèle sur toute la période de calage.

Tableau 7 : Débits moyens annuels des différents forages au centre de Thiaroye

Année	Débit par forage					
	F15	F17	F18	F19	F21	F22
1989	520	2715	1403	2533	675	450
1990	631	2717	1451	2186	679	367
1991	0	2716	1315	0	3876	0
1992	0	2441	1172	0	3444	0
1993	660	2118	770	1956	931	815
1994	332	1906	681	2061	889	603
1995	377	567	702	957	414	318
1996	715	827	1240	2020	869	740
1997	740	1684	1114	1908	825	830
Moy. 89-97	441.67	1965.67	1094.22	1513.44	1400.22	458.11

- les débits sont en m³/j

Tableau 8 : Caractéristiques des forages au centre de Thiaroye

Nom du forage	X	Y	Alt. Sup. Crépine	Alt. inf. Crépine	Débit (m3/j)
F15	245 160	1 633 570	23	42	441.67
F17	243 420	1 632 940	24	46	1965.67
F18	243 720	1 633 090	23	44	1094.22
F19	244 770	1 633 970	25	38	1513.44
F21	245 250	1 633 780	22	42	1400.22
F22	244 000	1 634 320	32	54	458.11

Concernant le centre de captage de Beer Thialane, les valeurs des prélèvements ont été plus difficiles à obtenir. Néanmoins, les débits moyens d'exploitation des différents forages sur la période 1990 à 1997 ont pu être obtenus. Etant donné que les débits prélevés varient peu au niveau de ce centre, ces valeurs moyennes seront considérées sur la période de calage.

Tableau 9 : Caractéristiques des forages au centre de Beer Thialane

Nom du forage	X	Y	Alt. Sup. Crépine	Alt. Inf. Crépine	Débit (m3/j)
F1	269700	1644270	34,8	54,84	480
F2	269230	1644340	47,82	77,25	1680
F3	268690	1644400	44,68	75,24	1824
F4	268360	1644310	42,42	74,86	2088
F5	267703	1643769	50,49	86,60	1800

6.2 Les prélèvements agricoles

La présence des Niayes dans la région favorise une activité maraîchère dans la zone. Cette pratique agricole de même que les besoins humains, expliquent l'exploitation accrue de la nappe par des ouvrages traditionnels tels que les puits et céanes. Estimés à $100 \text{ m}^3/\text{j}/\text{km}^2$ par des études antérieures (Geohydraulique, 1972), ces prélèvements sont de nature très dispersée et globalement négligeables. Ils ne seront donc pas pris en compte dans le modèle.

7 Evapotranspiration

L'élaboration du modèle mathématique implique de considérer l'évapotranspiration au niveau des lacs et des Niayes répartis sur la zone d'étude. Il ressort d'études antérieures (Faye,

2001 ; OMS, 1972), que les valeurs moyennes suivantes d'évapotranspiration calculées sur les lacs et les Niayes peuvent être considérées :

Tableau 10 : Valeurs d'évapotranspiration

Surface d'évaporation	Evapotranspiration (mm/j)
Lac Retba	2,60
Niayes et lacs asséchés	3,28

Ces valeurs sont introduites comme données d'entrée du modèle au niveau des mailles correspondant à des lacs et à des Niayes. Elles seront appliquées proportionnellement aux surfaces occupées par le lac ou la Niaye sur une maille donnée.

La figure 21 présente la localisation des différents lacs et Niayes existant sur la zone d'étude.

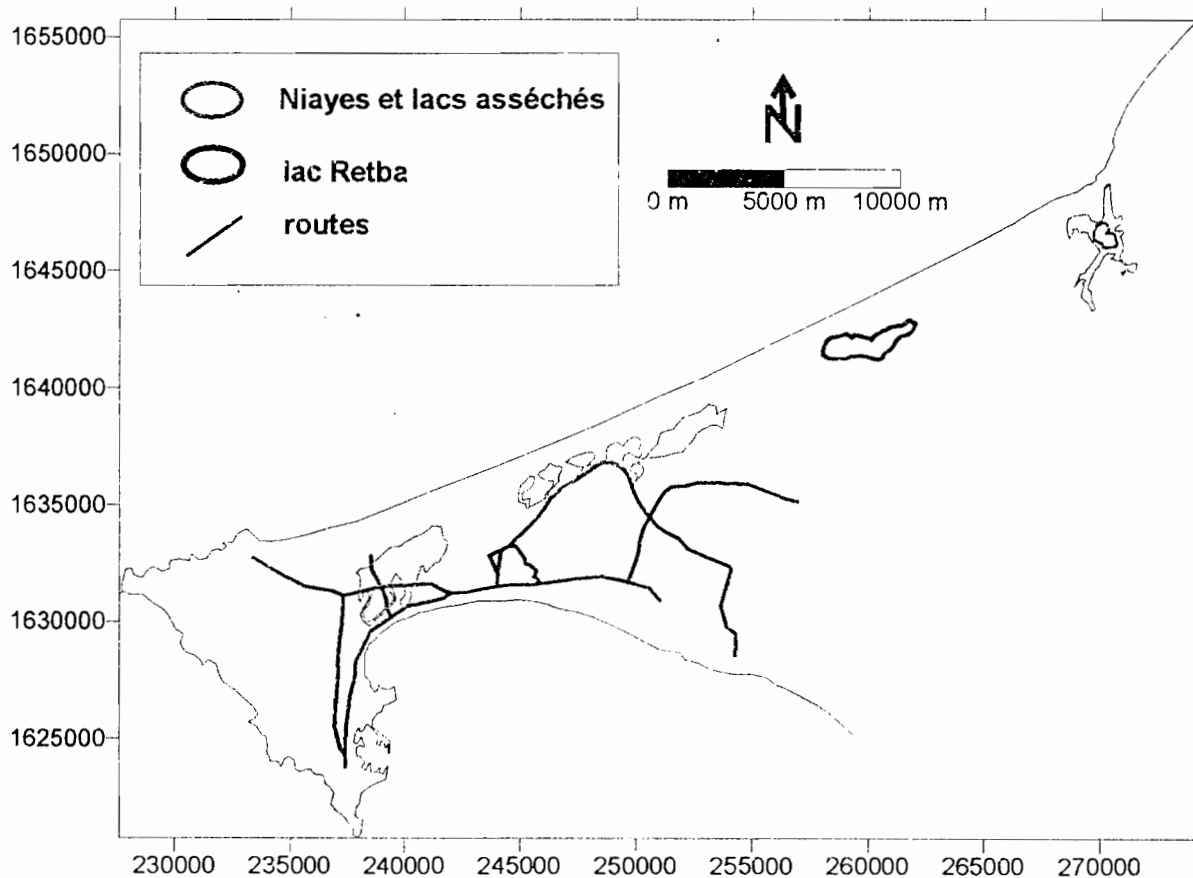


Figure 21 : Localisation des lacs et Niayes

8 Carte d'occupation du sol

L'objectif de cette étude étant de situer précisément les zones susceptibles d'être affectées par des inondations, il s'avère nécessaire de localiser les principales zones d'habitat. A partir des données disponibles, nous n'avons pu élaborer que l'état d'occupation des sols de la zone de Thiaroye en 1997 (fig.22).

La sensibilité des zones inondées sera jugée selon qu'elles se situent en zone d'habitat ou en zone non-habitée. En effet, on ne parlera de risques d'inondations qu'en zones d'habitat. Dans ces zones, les lieux à considérer inondés seront ceux où la surface piézométrique sera à moins de 1.5 m du sol. Selon la SONES, à cette profondeur il existe des risques majeurs de pollution de la nappe et des problèmes d'assainissement.

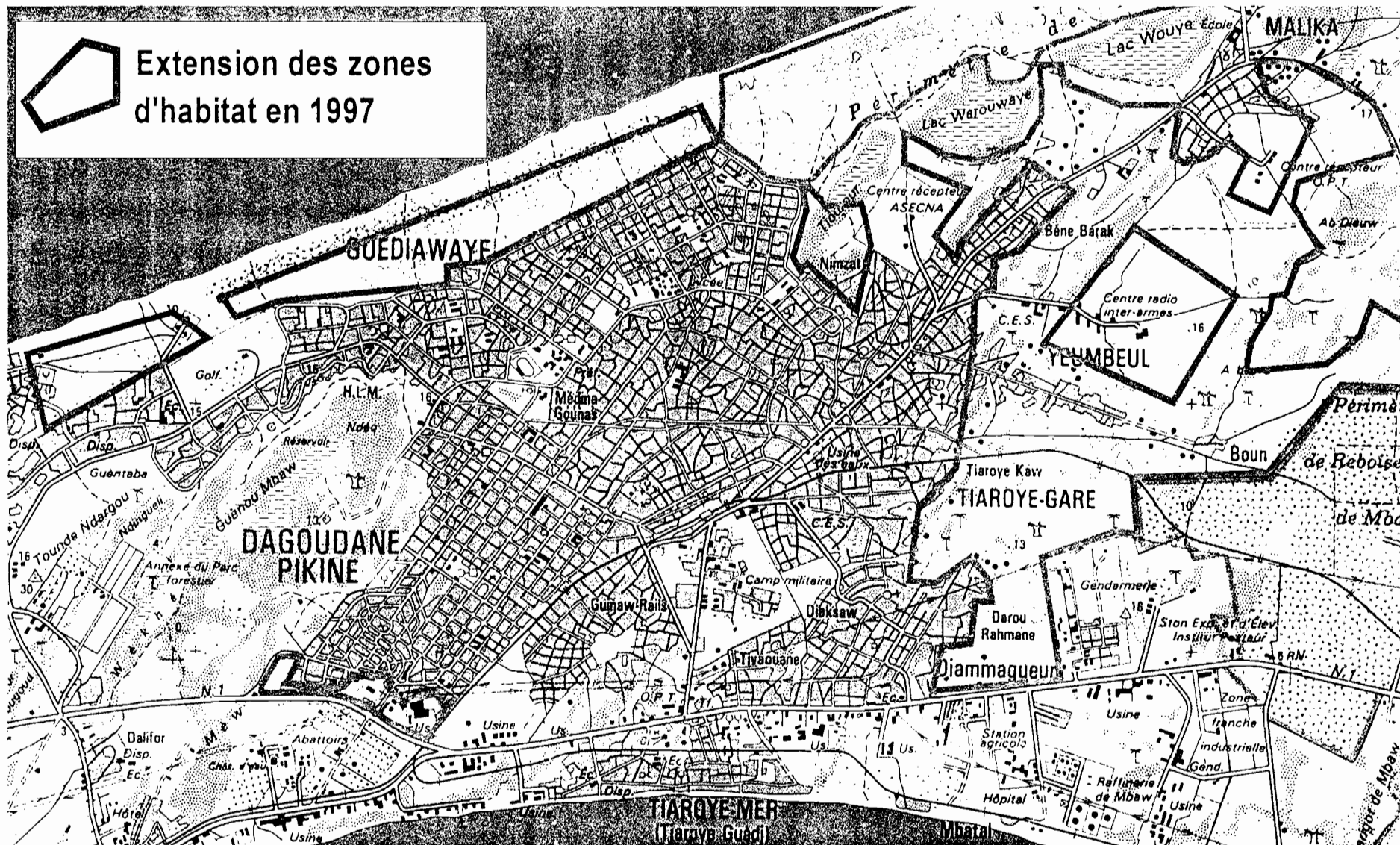


Figure 22 : Evolution des zones d'habitat dans le secteur de Thiaroye en 1997

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les recherches documentaires relatives aux contextes géographique, géologique et hydrogéologique ont permis d'effectuer une synthèse des données nécessaires à la présentation de la nappe phréatique des sables quaternaires de Thiaroye. Parallèlement, elles ont contribué à lier le niveau avancé de pollution de la nappe à l'accroissement rapide de l'habitat informel dans ce secteur .

La modélisation numérique de cette nappe, dans le but de simuler la remontée du niveau piézométrique consécutive aux scénarios d'arrêt total ou partiel des pompages à Thiaroye et d'en évaluer l'impact environnemental, a nécessité une définition exhaustive des paramètres d'entrée du modèle.

Les données relatives à la géométrie de l'aquifère recueillies au niveau des ouvrages couvrant la zone d'étude auront servi à l'élaboration des cartes topographique et du substratum marneux. Une topographie précise de la zone de Thiaroye (courbes de niveau équidistantes de 2.5 m) s'est avérée nécessaire en vue de localiser les zones basses menacées par la remontée du niveau piézométrique.

La restitution de l'état piézométrique de la nappe en 1971 et en 1997 servira respectivement au calage du modèle en régime permanent et transitoire.

L'étude hydroclimatologique a révélé que la nappe s'alimente principalement par les eaux de pluie et les retours à la nappe dans la zone non assainie de Thiaroye. Les valeurs de recharge par les eaux de pluie sont comprises entre 32 et 48 mm/an et celles des retours à la nappe évaluées entre 0.12 et 0.65 mm/j .

Les valeurs de perméabilité fournies montrent le caractère hétérogène de l'aquifère. Elles sont en effet comprises entre $0,4 \cdot 10^{-4}$ et $8 \cdot 10^{-4}$ m/s. Les valeurs du coefficient d'emménagement, obtenues par pompages d'essai dans les études antérieures, se sont quant à elles avérées très faibles. Une valeur moyenne de 20 % sera donc appliquée à l'ensemble de l'aquifère

Les prélèvements à considérer pour l'élaboration du modèle sont essentiellement effectués par la SONES au niveau des centres de captage de Thiaroye et Beer Thialane. Les prélèvements à usage agricole par puits et céanes, principalement localisés dans la zone des Niayes, sont estimés à $100 \text{ m}^3/\text{j}/\text{km}^2$ et sont dans l'ensemble négligeables.

Bien que ces paramètres constituent une base de données suffisante pour la modélisation numérique de la nappe phréatique de Thiaroye et la localisation des zones inondables, nous

tenons à formuler les recommandations suivantes pour affiner le modèle dans la seconde phase de cette étude :

- Utiliser dans la mesure du possible une piézométrie plus récente que celle de 1997 pour le calage en régime transitoire.
- Effectuer une étude géostatistique des données piézométriques afin de restituer au mieux les surfaces piézométriques de référence.
- Disposer de la carte d'occupation des sols de la zone Thiaroye la plus récente possible du fait que les zones d'habitat connaissent une croissance rapide dans ce secteur.

BIBLIOGRAPHIE

1. CASTANY, Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Dunod Université, 1982.
2. FAYE, Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane (Dakar, Sénégal) Etude de la contamination par les Nitrates sur la base d'un système d'information géographique (PC ARC/INFO), Thèse de 3^{ème} Cycle, 2001.
3. FILDIER, La réalimentation des nappes, AFEE, 1983.
4. GEOHYDRAULIQUE, Etude sur modèle mathématique du système aquifère de la presqu'île du Cap Vert, Géoh.388. Rapport final, 1972.
5. GUIGUER & FRANZ, User's manual for Visual Modflow, Waterloo Hydrogeologic, 2000.
6. MARTIN, Les nappes de la presqu'île du Cap Vert (République du Sénégal). Leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 1970.
7. MINISTERE DU DEVELOPPEMENT RURAL ET DE L'HYDRAULIQUE, Contrôle piézométrique et hydrochimique des nappes souterraines du Sénégal, PNUD/OPS, 1991.
8. NDIAYE, Notice sur la géologie du quaternaire de la feuille de Niakoulrab presqu'île du Cap Vert, 1968.
9. TANDIA, La nappe des sables quaternaires de la région de Dakar, Thèse de 3^{ème} Cycle, 2000.

ANNEXES

Annexe 1 : Géométrie de l'aquifère

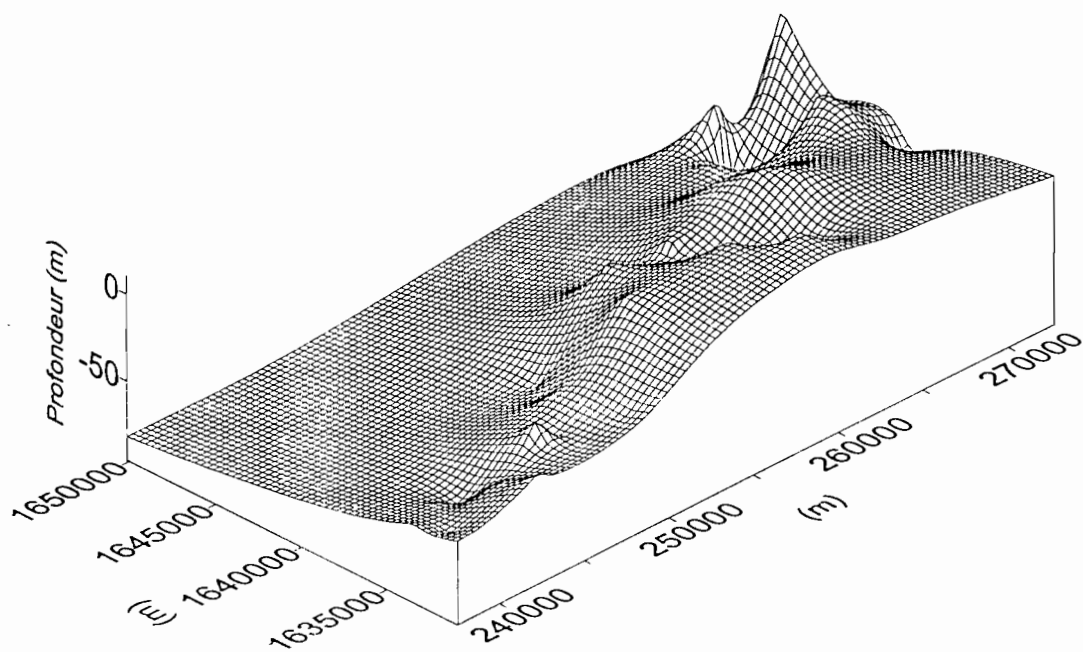
o Cote du substratum

Ouvrage No_IRH	Désignation	coordonnée métrique (m)		Prof Substratum
		X	Y	
10-3X-0065	BEER THIALANE	268920.688	1 646 388.851	-76.00
10-2X-0081	THIAROYE S13	241885.334	1635012.047	-68.00
10-3X-0207	BEER THIALANE F3 bis	269793.302	1643767.5	-58.00
10-2X-0062	THIAROYE F1 ter	243440.311	1634871.516	-57.00
10-2X-0078	THIAROYE SS2	241985.847	1633226.641	-49.00
10-2X-0041	THIAROYE F17 bis	243660.192	1633056.092	-48.00
10-2X-0057	THIAROYE S21-E	246272.753	1634011.458	-46.18
10-2X-0054	THIAROYE S21-B	245 222.639	1633715.893	-42.50
10-2X-0036	THIAROYE F11 bis	246076.228	1632323.323	-42.45
10-3X-0112	KEUR GUILAYE	272200.143	1 639 072.081	-40.40
10-2X-0032	THIAROYE F21	245283.269	1633745.14	-40.00
10-2X-0056	THIAROYE S21-D	246272.753	1634011.458	-40.00
10-2X-0076	THIAROYE S2 P140	243190.814	1 631 153.889	-39.50
10-2X-0055	THIAROYE S21-C	246272.753	1634011.458	-38.75
10-2X-0038	THIAROYE F21 bis	245282.954	1633715.258	-38.00
10-2X-0053	THIAROYE S21-A	245283.595	1633776.13	-28.00
10-3X-0140	SANGALKAM S1	260789.183	1634478.861	-27.00
10-3X-0139	SANGALKAM PS1-I (BAS)	259704.122	1636703.18	-27.00
10-3X-0044	KEUR SEGA	271977.031	1637567.976	-24.00
10-3X-0249	NIAGA F5	258436.856	1638560.847	-24.00
10-3X-0247	NIAGA F3	258751.729	1637204.094	-22.00
10-3X-0064	BEER THIALANE	268922.767	1646604.642	-22.00
10-3X-0285	NIAGA NIASSENE F5	258382.715	1639175.659	-20.00
10-3X-0248	NIAGA F4	259140.161	1637170.33	-20.00
10-3X-0290	NIAGA NIASSENE F7	258924.156	1639477.923	-19.00
10-3X-0136	SANGALKAM	260123.625	1636760.987	-18.80
10-3X-0289	NIAGA NIASSENE F8	259046.128	1639722.41	-18.60
10-3X-0284	NIAGA NIASSENE F2	258502.542	1639205.448	-16.15
10-3X-0142	SANGALKAM P2	260199.561	1635406.647	-11.00
10-3X-0141	SANGALKAM P1	261908.371	1635697.425	-11.00
10-2X-0100	GUEDIAWAYE P2.3	240740.487	1634224.002	-60.00
10-2X-0099	GUEDIAWAYE P2.4	240538.051	1634933.494	-60.00
10-2X-0101	GUEDIAWAYE (HAMO 7) P2.5	244112.05	1636156.137	-55.00
10-2X-0092	GUEDIAWAYE P3.3	248877.109	1636998.24	-50.00
10-3X-0332	BAYAKH PT 209	270149.599	1640383.081	-5.00
10-2X-0098	CAMBERENE P2.2	238566.413	1632403.265	-55.00
10-2X-0120	PZ.52	248247.678	1636850.944	
10-3X-0325	PT.201	256104.999	1632865.468	5.00
10-3X-0326	KOUNOUN Puits 202	257592.667	1632020.426	8.00
10-3X-0327	PT.203	260026.082	1633011.095	10.00
10-3X-0328	PT.SALIM	257263.04	1640909.091	-45.00
10-2X-0118	PZ.31	248087.077	1635806.634	-40.00

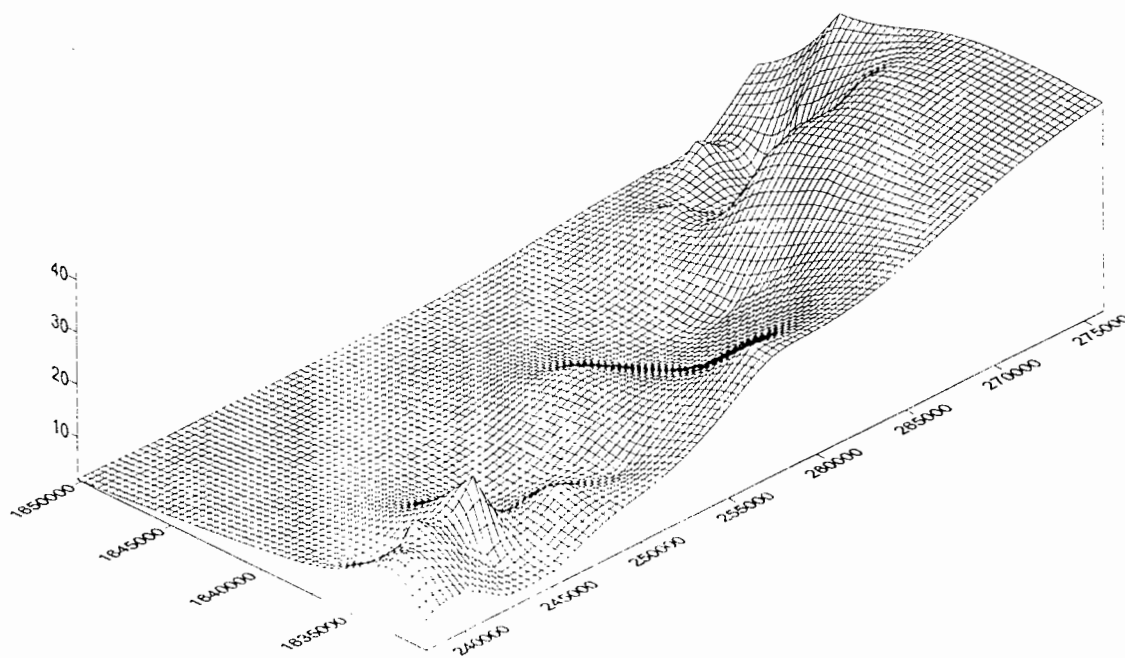
Annexes

10-2X-0117	PZ.19	246531.32	1635762.033	-45.00
10-2X-0111	PZ.4	242289.925	1630825.851	-32.00
10-2X-0128	PARCELLES ASSAINIES PIB3	237500.581	1633459.75	-50.00
10-2X-0046	THIAROYE F8	248644.646	1631834.959	-35.00
10-3X-0338	KEUR MASSAR PT 68	252335.897	1635793.684	-5.00
10-3X-0333	DENY NIAYE PT 225	265528.071	1641902.927	-40.00
10-3X-0209	TIVAOUANE PEULH P2.8	255065.008	1639393.988	-15.00
10-3X-0238	PS-13	266541.846	1644628.925	-40.00
10-3X-0236	BAYAKH PS-10	268774.58	1640488.103	-10.00
10-3X-0233	KAYAR PS-7	271453.949	1648578	-90.00
10-3X-0232	PS-6	272722.641	1646845.01	8.00
10-3X-0229	PS-3 BIS	272543.039	1643680.445	-30.00
10-3X-0241	PZ.109	257713.628	1635062.889	5.00
10-3X-0211	GOUYE GUEWEL P2.10	262702.899	1640485.196	-10.00
10-3X-0321	DAROU BAYAKH PUIITS 210	270014.925	1641951.473	-3.00
10-3X-0283	NIAGA NIASSENE F4	258232.738	1639146.173	-25.00
10-3X-0208	TIVAOUANE PEULH P2.7	254239.899	1637680.177	-15.00
10-3X-0266	MBEUBEUSS (MALIKA)	250363.55	1638888.811	-60.00
10-3X-0242	PZ.123	263714.446	1636909.289	6.00
10-3X-0339	KEUR MASSAR PT 65	25556.736	1633740.838	-10.00
10-3X-0322	GOLLAM Puits 215	272393.306	1640484.613	-20.00
10-3X-0317	KAYAR Puits 234	272006.992	1650140.935	-95.00
10-3X-0149	SANGALKAM P9	262770.776	1638301.995	5.00

o Représentation 3D de la morphologie du substratum



o Représentation 3D de la Topographie de la zone d'étude



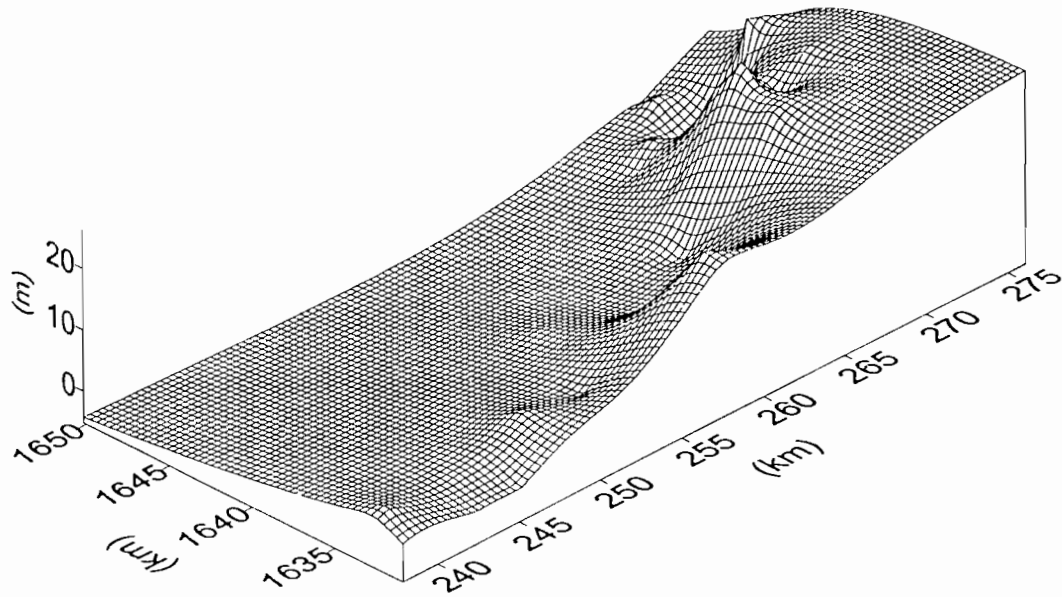
Annexe 2 : Piézométrie de référence**o Piézometrie moyenne de 1997**

ouvrage	localité	coordonnées				Piézométrie	
		X	Y	Z cote margelle		N.S cote marg	N.P
				donnée	corrigée		
P2.1	Patte d'oie	237860	1630880	13	7.41	6.4	1.01
P2.2	Crois. Cambèrène	238560	1632570	30	16.22	12.33	3.89
P2.3	Golf Club	240650	1634650	15	16.2	15	1.2
P2.4	HLM Guédiawaye	240540	1634970	13	5.71	4.59	1.12
P2.5	Les Filaos	244110	1636200	18.4	11.3	10.66	0.64
P2.6	Boune	248000	1633700	15	11.74	9.9	5.01
P2.7	Tivaouane Peulh	254120	1637720	21	12.15		
P2.8	Tivaouane Peulh	255050	1639500	21	12.1	11.2	0.9
P2.9	Niaga Peulh	258870	1640160	5			
P2.10	Gouye Guéwel	262460	1640560	5		4.75	0.25
P3.1	Thiar/M: Nestl.	244830	1631080	4.5			
P3.2	Camp militaire	245030	1632680	5.52			
P3.3	Lac Malika	248240	1636890	3.43			
P.4	Thiaroye/mer	242290	1630870	4.3			
P.58	Malika	250090	1636100	5.78	5		
P.19	Warouwaye	246530	1635800	3.8			
P.18	Thiaroye/mer	245220	1630930	4.17			
PS.1*	Toll M.Sarr	259670	1636740	9	9.5	7.82	1.68
PS.2	Sangalkam	271790	1643140	14.46			
PS.3*	Santhe Mame Gor	272450	1643600	19.6		4.8	14.8
PS.3 bis	Ndam Lo	273690	1645520	19.27		0.7	18.57
PS.4	Santhe Mame Gor	273220	1645680	9.73		4.99	4.74
PS.5	Mbawane	271810	1645110	5.87		2.69	3.18
PS.6	W. Santhe M.G	272960	1647070	5.13		1.83	3.3
PS.7	Rte. Kayar	271600	1648920	29.21	11.8	7.48	3.85
PS.8	Gorom II	267490	1637900	28.85		7.34	21.55
PS.10	Gorom I	268740	1640770	29.46		4.68	24.78
PS.11	Gorom I	268460	1642100	25.09		6.2	18.89
PS.14	W. Keur A.Ndoye	268740	1646520	6.26		2.16	4.1
PTS.68*	Keur Massar	252330	1635830	10			
PTS.65*	Keur Matar Ba	251710	1633780	7			
PTS.225*	Deni Niayes	265320	1642100	11.5		7.3	4.2
PTS.02	Denie.B.Ndao	266310	1642610	13.35		8.22	5.13
PTS.120	Mar.wayamba	263920	1639560	7.79		7.36	0.44
PTS.128	Wayambame	261230	1639800	5.11			
PTS.232	Kaniack	267480	1646070	11.12		10.39	0.73
PTS.213	K.Ab.Ndoye	270870	1646960	7.64		7.42	0.22
PTS.234	Kayar (Ecole Prim)	272000	1650180	2.63		1.81	0.82
PTS.210	Dara Bayakh.Syll	270010	1641990	28.3		10.2	18.1
PTS.202	Kounone	257590	1632060	24.63		4.35	20.28
PTS.109	Santiane	257710	1635100	14.63			

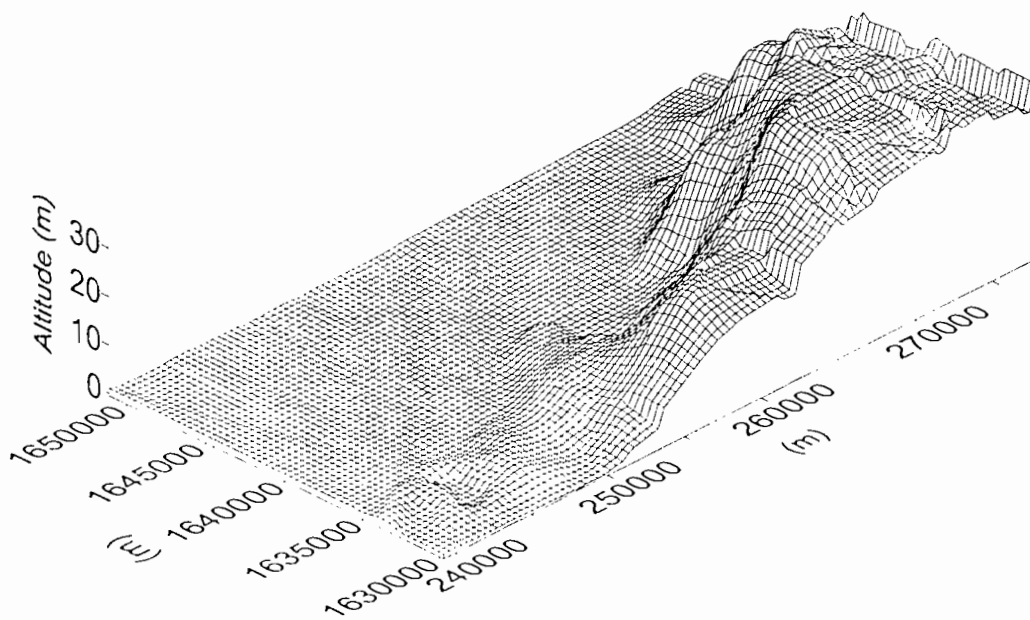
Annexes

PTS.235*	Bambilor	265060	1637640	17.5		8.2	9.3
PTS.123	Ndiougouye	263710	1636950	15.8			
PTS.215	Golam	272390	1640520	35.6		13.5	22.1
PTS.209*	Croisem.Bayakh	270120	1640420	32		17.15	14.85
PTS.220*	Djender	276090	1645590	33		18.15	14.85
F.22	Thiaroye	244000	1634320	19			
F.17	Thiaroye	243420	1632940	5			
F.21	Thiaroye	245250	1633780	8			
F.15	Thiaroye	245160	1633570	8			
F.18	Thiaroye	243720	1633090	5			
F.19	Thiaroye	244770	1633970	12			
F.1	Beer Tialane	269700	1644270	10			
F.2	Beer Tialane	269230	1644340	10			
F.3	Beer Tialane	268690	1644400	9.5			
F.4	Beer Tialane	268360	1644310	9			

o Représentation 3D de la surface piézométrique moyenne de 1997



o Representation 3D de la surface piézométrique de 1971



Annexe 3 : Données climatologiques à la station de Yoffo **Température**

temperature maximale (en°C) à la station de Dakar-Yoff													
Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	moyenne
Année													
1970	25.40	26.20	25.70	26.90	26.40	29.30	30.10	32.10	31.00	31.20	29.00	27.90	28.43
1971	25.90	24.10	23.60	23.50	24.60	27.10	29.50	29.80	30.90	31.80	28.10	26.00	27.08
1972	24.40	22.90	22.30	23.30	23.90	28.00	29.20	30.40	30.60	31.00	28.90	24.70	26.63
1973	24.70	23.50	24.50	24.80	26.30	29.60	29.10	29.30	30.10	30.70	30.10	25.80	27.38
1974	25.70	23.30	21.10	23.10	24.60	26.70	29.10	29.50	30.00	29.90	28.40	27.10	26.54
1975	26.30	24.40	24.50	23.60	24.10	27.60	28.80	29.50	29.10	30.60	28.10	26.50	26.93
1976	24.10	23.20	22.60	23.70	23.90	23.10	29.70	30.10	30.60	29.70	27.90	23.10	25.98
1977	23.60	24.90	26.70	26.40	25.60	28.30	30.00	30.10	30.40	30.40	30.50	27.20	27.84
1978	24.50	24.40	25.50	24.60	26.10	29.30	29.60	29.80	29.90	30.80	30.30	26.80	27.63
1979	24.20	26.40	24.00	25.80	25.60	29.20	29.40	29.90	30.50	30.30	29.00	28.80	27.76
1980	24.40	25.20	23.80	25.50	25.10	27.00	28.80	29.40	29.60	29.20	27.50	25.70	26.77
1981	25.60	22.60	25.90	24.50	25.80	28.10	29.50	30.10	30.40	30.70	31.20	27.90	27.69
1982	22.60	22.70	24.50	23.90	24.30	27.30	29.40	29.30	30.70	30.20	29.00	24.60	26.54
1983	27.60	26.20	26.50	24.60	24.80	28.80	30.10	30.50	30.50	31.20	29.80	26.40	28.08
1984	22.60	26.80	23.20	24.30	26.10	28.60	29.50	30.30	30.00	30.30	28.40	25.10	27.10
1985	21.50	24.20	23.30	23.50	23.90	27.30	29.30	29.50	29.80	30.90	28.70	27.10	26.58
1986	22.00	23.00	23.80	24.60	25.70	27.30	29.10	29.60	30.10	30.20	28.10	25.80	26.61
1987	24.60	24.10	27.20	27.10	26.80	29.40	30.30	30.40	30.20	30.50	29.70	27.60	28.16
1988	24.30	23.50	26.60	25.00	26.20	27.80	29.50	29.70	29.90	29.90	29.10	25.90	27.28
1989	24.30	24.00	23.90	23.10	26.00	29.00	29.00	30.00	30.00	25.40	27.20	26.70	26.55
1990	21.70	26.20	27.50	24.30	25.20	27.30	29.30	30.40	31.40	31.60	29.20	25.50	27.47
1991	24.60	23.90	23.40	24.40	24.30	26.90	28.90	29.60	30.40	30.40	29.80	28.00	27.05
1992	27.20	23.80	25.00	23.30	25.90	28.00	29.00	30.00	30.40	30.00	30.00	26.30	27.41
1993	24.70	23.60	24.40	25.00	25.80	28.70	30.10	30.70	30.70	30.60	26.50	26.50	27.28
1994	24.60	24.80	24.10	25.40	25.50	27.80	29.60	29.60	29.90	30.50	29.60	29.60	27.58
1995	25.70	26.20	23.30	24.00	26.00	28.60	30.70	30.10	31.20	31.90	31.70	27.30	28.06
1996	25.70	25.00	24.60	25.70	27.20	29.50	30.40	30.50	30.40	31.50	31.10	26.50	28.18
1997	25.90	28.90	26.90	24.80	26.80	29.30	29.80	29.10	30.80	30.90	30.60	27.60	28.45
1998	27.90	27.10	26.80	25.60	25.70	27.90	29.50	30.20	30.50	32.10	31.90	27.70	28.58
1999	23.30	23.60	23.00	24.60	26.30	30.00	30.70	30.10	30.70	30.70	28.70	27.60	27.44
2000	24.10	25.80	27.80	25.60	24.70	28.20	29.60	29.10	31.10	29.90	29.40	28.40	27.81
2001	25.81	27.40	25.70	25.30	26.10	29.50	30.50	31.20	31.30	32.50	31.10	30.00	28.87
2002	26.40	25.10	24.10	23.90	25.70	28.70	29.90	30.40	30.80	31.00	30.00	28.80	27.90

○ Pluviométrie

Données pluviométriques dakar Yoff			
Année	Pluviométrie annuelle	Ecart pluviométrique	Evapotranspiration réelle
1960	581.7	0.47	570
1961	612.9	0.55	600
1962	708.5	0.79	680
1963	450.6	0.14	460
1964	568.9	0.44	550
1965	410	0.04	390
1966	594.5	0.51	580
1967	894.6	1.26	820
1968	258.4	-0.35	266
1969	750	0.9	678.7
1970	176.9	-0.55	184.7
1971	366.1	-0.01	368.3
1972	116.7	-0.7	122.4
1973	286.3	-0.27	293.6
1974	364.7	-0.07	366.2
1975	562.9	0.43	533.5
1976	387.3	-0.02	386.7
1977	170.3	-0.57	177.8
1978	322.8	-0.18	329.1
1979	340.4	-0.14	345.9
1980	376.2	-0.05	378.1
1981	336.3	-0.15	342.1
1982	309.9	-0.22	316.3
1983	158.3	-0.6	165.6
1984	236.4	-0.4	244.5
1985	508.4	-0.3	491
1986	387.2	-0.02	387.4
1987	441.9	0.12	439.4
1988	443.5	0.12	438.6
1989	549	0.39	536.7
1990	262.8	-0.33	272.5
1991	269.4	-0.32	277
1992	151.4	-0.62	158.4
1993	325.1	-0.18	330.8
1994	240.7	-0.39	248.8
1995	475.9	0.21	468.4
1996	454.2	0.15	454.2
1997	202	-0.49	210.4
1998	341.5	-0.13	348.1
1999	486.2		
2000	498.6		
2001	285.8		
2002	290.3		

o Humidité relative maximale

Humidité relative maximale (en %) à la station de Dakar-Yoff												
année	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
1971	98	96	99	96	94	92	89	95	96	95	95	96
1972	96	97	94	96	94	91	86	89	90	91	90	92
1973	89	92	95	92	95	90	90	97	96	93	91	88
1974	87	93	95	94	95	91	89	93	94	95	93	90
1975	88	96	92	93	92	88	91	91	93	94	90	92
1976	89	93	93	92	92	89	89	92	94	90	93	94
1977	93	91	91	95	93	90	88	87	95	93	96	95
1978	90	97	93	95	89	87	87	92	92	92	86	90
1979	93	93	92	93	91	90	87	89	91	87	87	87
1980	93	91	92	91	94	89	84	88	93	93	88	82
1981	83	91	91	92	90	88	87	92	91	88	88	84
1982	88	93	92	92	91	90	88	91	92	90	87	85
1983	86	90	92	95	92	89	84	87	90	91	89	82
1984	85	88	90	95	91	89	88	90	92	94	87	91
1985	94	92	90	94	93	93	93	94	96	96	93	84
1986	85	92	93	91	92	92	85	92	97	91	87	97
1987	94	94	92	90	89	90	90	92	96	93	94	85
1988	86	91	92	94	93	92	88	93	95	95	87	83
1989	85	88	92	94	92	91	91	92	95	92	95	90
1990	88	92	92	94	93	93	87	91	90	90	85	88
1991	88	87	93	91	93	90	88	88	92	92	91	90
1992	90	96	88	92	91	91	90	87	91	90	82	85
1993	83	87	92	91	87	86	85	88	90	87	88	83
1994	85	88	90	92	92	90	84	88	88	88	87	81
1995	80	86	90	91	90	89	85	90	90	89	91	87
1996	90	91	91	92	88	88	86	89	91	91	88	85
1997	88	86	87	95	91	90	90	88	91	92	87	86
1998	86	92	89	91	92	90	85	90	93	89	86	84
1999	87	87	92	94	93	88	87	90	93	91	92	84
2000	86	85	92	91	92	88	86	92	91	93	89	89
2001	93.3	87.2	91.9	92.1	91	88	89.1	90.74	94	92.6	84.6	88.1
2002	51				91	88	83	88	92	90	85	90

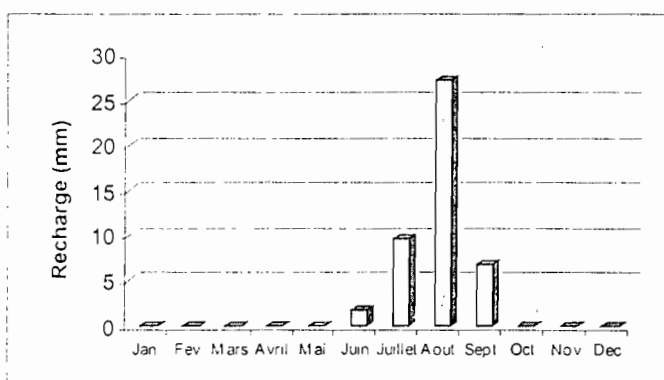
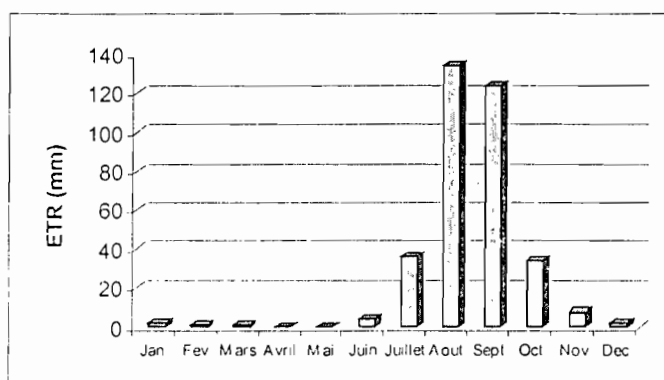
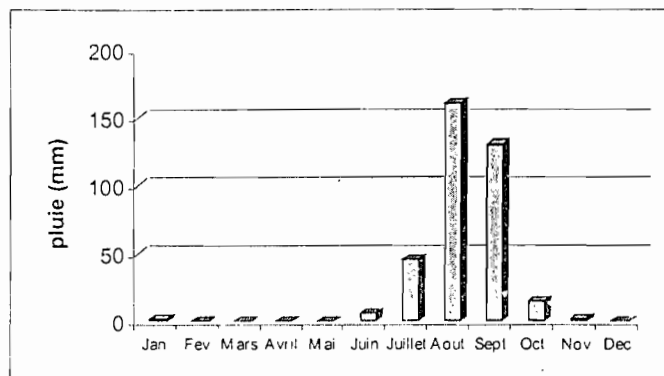
o Humidité relative minimale

Humidité relative minimale (en %) à la station de Dakar-Yoff

année	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
1971	51	60	71	69	67	69	67	74	71	61	67	49
1972	56	60	64	67	67	65	66	65	67	64	44	51
1973	39	57	58	63	71	67	72	77	73	60	50	42
1974	37	53	59	67	69	71	68	72	69	64	50	39
1975	34	53	59	65	65	62	70	72	73	68	48	51
1976	45	57	66	66	66	65	68	72	74	67	50	64
1977	58	42	49	62	68	66	68	67	75	67	50	54
1978	53	69	55	67	65	63	65	71	70	58	38	46
1979	63	45	57	61	64	68	67	69	68	63	54	36
1980	59	50	62	63	67	69	65	68	73	68	58	43
1981	35	59	57	66	66	68	67	70	68	62	47	41
1982	37	63	59	66	66	68	66	71	67	61	49	44
1983	33	51	69	70	70	69	66	66	68	65	58	41
1984	46	36	66	71	67	67	68	68	70	63	52	47
1985	60	54	59	67	69	69	72	75	75	65	54	40
1986	46	59	56	64	70	72	65	72	73	65	47	41
1987	51	56	47	58	66	67	66	70	74	67	52	41
1988	44	58	51	65	66	68	67	73	76	66	52	38
1989	43	57	60	65	65	65	71	74	49	68	69	51
1990	54	47	57	67	69	71	69	68	69	66	51	52
1991	54	54	62	64	67	69	66	69	73	65	54	49
1992	49	71	47	68	66	69	73	68	71	62	40	53
1993	44	54	62	66	65	65	65	67	68	65	55	44
1994	42	47	56	64	70	73	67	71	69	61	51	28
1995	30	47	63	65	67	68	64	71	70	58	46	51
1996	56	57	62	66	62	64	66	70	74	65	41	52
1997	49	32	45	66	68	68	68	69	70	67	54	45
1998	43	55	54	66	69	69	65	72	76	60	39	43
1999	50	45	63	66	69	66	65	72	71	67	61	46
2000	51	46	55	63	70	68	67	75	72	69	53	42
2001	45.9	39.3	57.9	62.7	68.6	67	67.5	69.23	69.1	62.6	55	45.5

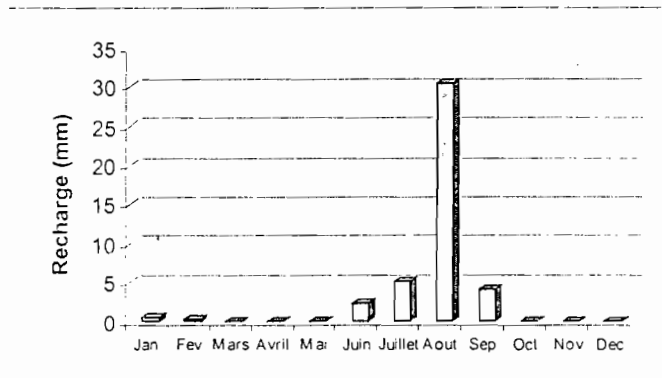
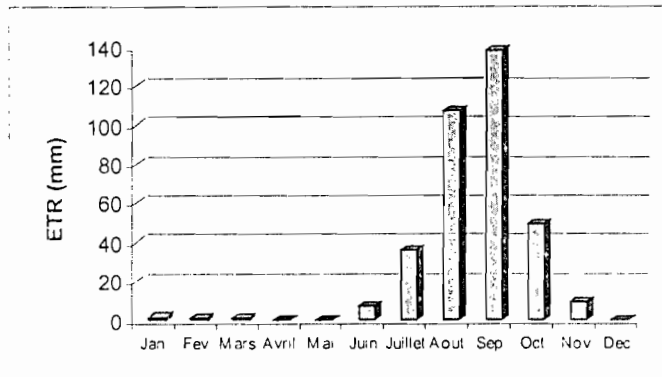
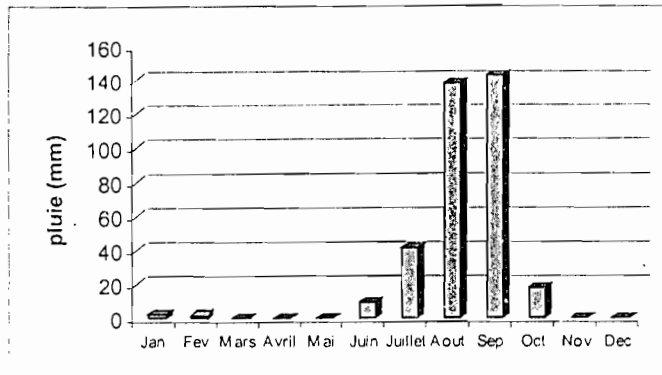
Annexe 4 : Bilan hydrique à la station de Yoff

STATION DE YOFF



Bilan hydrique (1984-1996)													
mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Som
ETP	86.6	87.3	100	101	128.9	180.6	228.5	233.8	230.1	226.2	182.7	131.9	1917.4
N (mm)	1.23	0.03	0	0	0.1	6.09	45.44	160.8	130.3	14.23	1.58	0.13	359.93
ETR	1.5	0.8	0.78	0	0.064	4.346	35.67	133.6	123.5	33.97	7.546	2.263	344.11
W (mm)	4.38	3.61	2.82	0	0.036	1.781	11.55	38.72	45.49	12.75	6.782	4.649	119.56
R (mm)	0	0	0	0	0.036	1.744	9.769	27.18	6.8	0	0	0	45.425

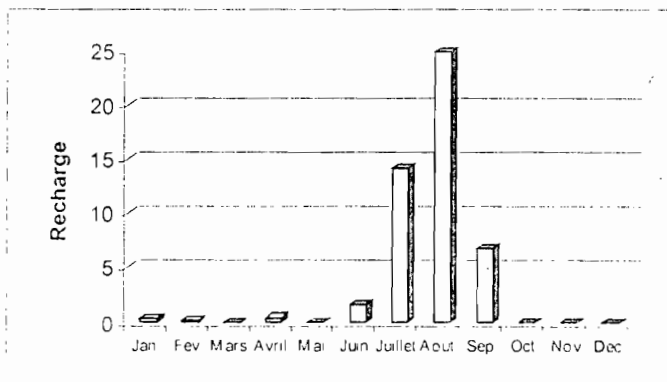
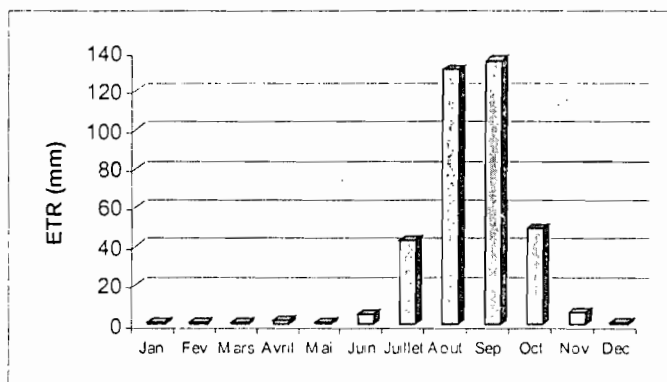
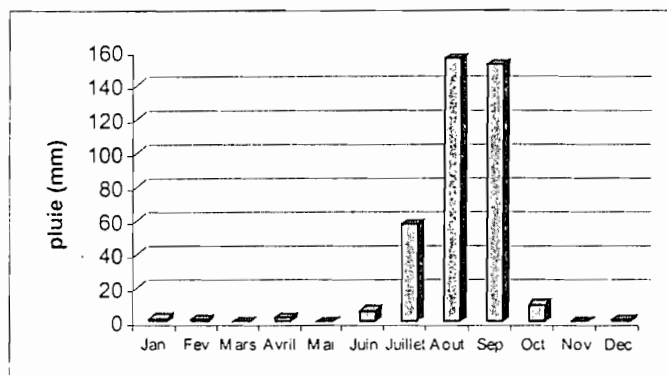
STATION DE MBAO



Bilan hydrique (1984-1996)

mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Som
ETP	161.1	154	191.5	199	230.5	222.1	213.7	205.9	206.3	210.9	235	198.3	2428.6
N (mm)	1.75	1.46	0	0	0	8.96	41.5	137.6	142.3	17.6	0	0	351.17
ETR	1.3	1.22	0.48	0	0	6.73	36.31	107.2	138.4	49.6	9.1	0.18	350.52
W (mm)	0.45	0.77	0.1	0	0	1.2	6.39	36.27	40.26	9.4	0.26	0.08	95.18
R (mm)	0.45	0.24	0	0	0	2.23	5.19	30.48	4	0	0	0	42.59

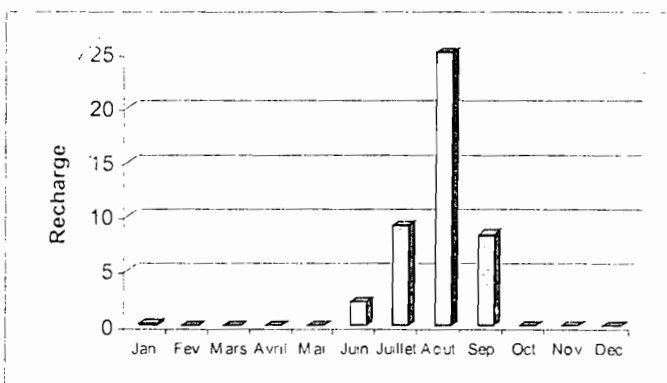
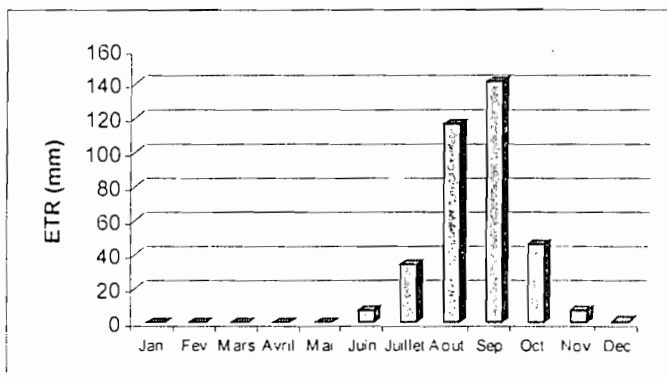
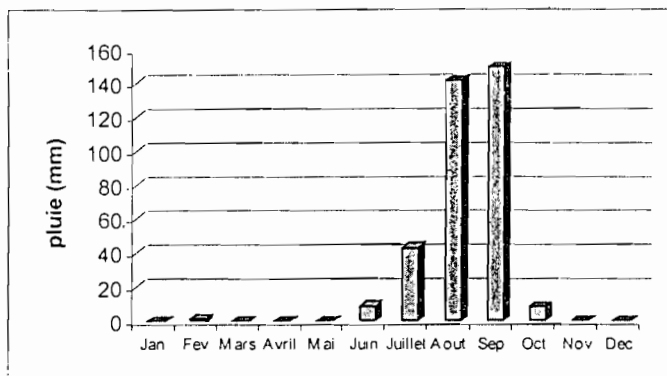
STATION DE PIKINE



Bilan hydrique (1984-1996)

mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Som
ETP	161.1	154.4	191.5	198.6	230.5	222.1	213.7	205.9	206.3	210.9	235.3	198.3	2428.6
N (mm)	1.48	1.33	0.09	2.21	0	6.2	57.12	155.8	152.3	9.85	0.02	0.45	386.85
ETR	1.18	1.22	0.56	1.79	0.58	4.66	42.9	130.9	135.5	49.32	6.11	0.81	375.53
W (mm)	0.61	0.72	0.25	0.1	0	0.5	14.61	59.5	66.23	16.76	0.67	0.31	160.26
R (mm)	0.3	0.11	0	0.42	0	1.56	14.22	24.89	6.73	0	0	0	48.23

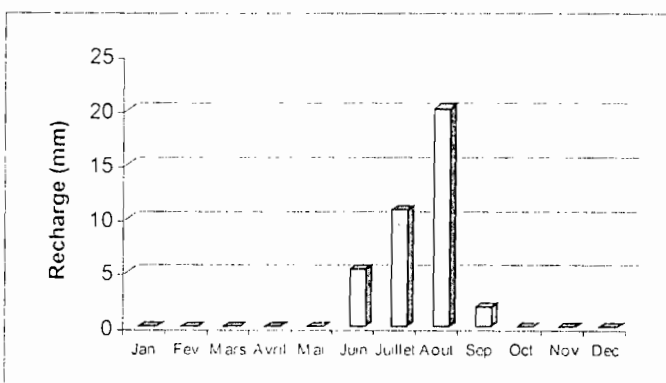
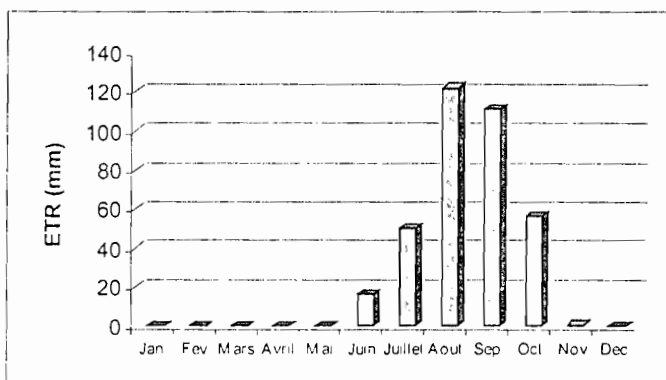
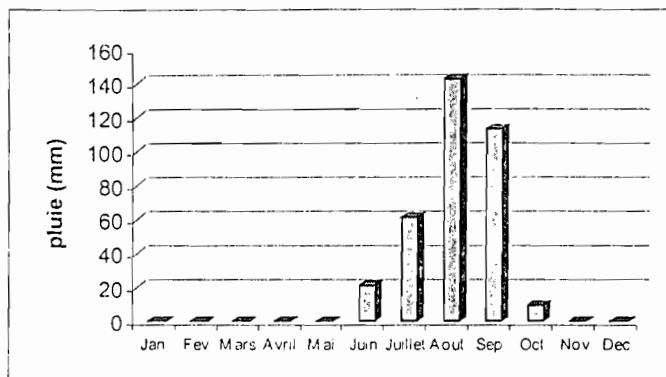
STATION DE HANN



Bilan hydrique (1984-1996)

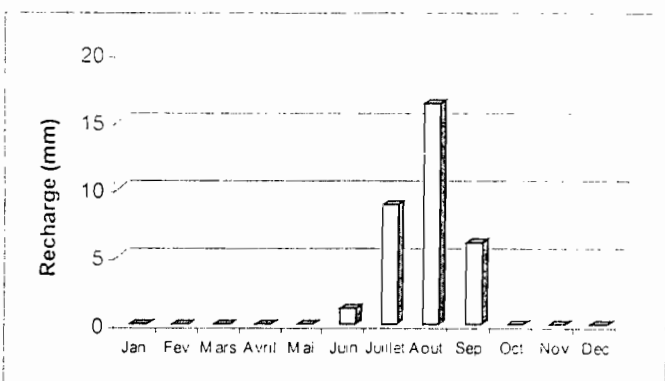
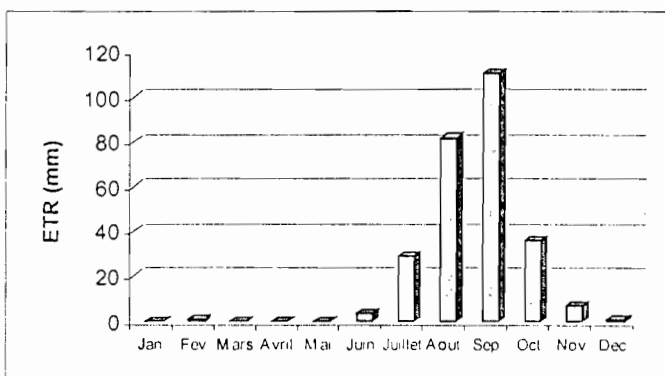
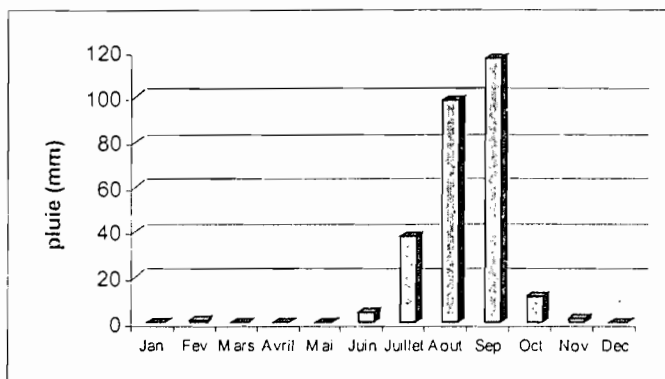
mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Som
ETP	161.1	154.4	191.5	198.6	230.5	222.1	213.7	205.9	206.3	210.9	235.3	198.3	2428.6
N (mm)	0.21	0.8	0	0	0	8.56	42.89	141.4	149.8	7.91	0	0	351.57
ETR	0.077	0	0	0	0	6.43	33.76	116.4	141.5	45.56	7.21	0.36	351.3
W (mm)	0.002	0	0	0	0	2.13	11.26	76.71	84.95	7.3	0.5	0.14	182.99
R (mm)	0.2	0	0	0	0	2.13	9.13	25	8.34	0	0	0	44.8

STATION DE BAMBILOR



mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Som
ETP	161.1	154.4	191.5	198.6	230.5	222.1	213.7	205.9	206.3	210.9	235.3	198.3	2428.6
N (mm)	0	0	0	0	0	21.2	61.03	142.4	113.5	8.75	0	0	346.88
ETR	0	0	0	0	0	15.91	50.22	122.2	111.7	56.5	0.23	0	356.76
W (mm)	0	0	0	0	0	5.29	24.1	93.59	80.02	0	0	0	203
R (mm)	0	0	0	0	0	5.29	10.81	20.16	1.76	0	0	0	38.02

STATION DE KAYAR

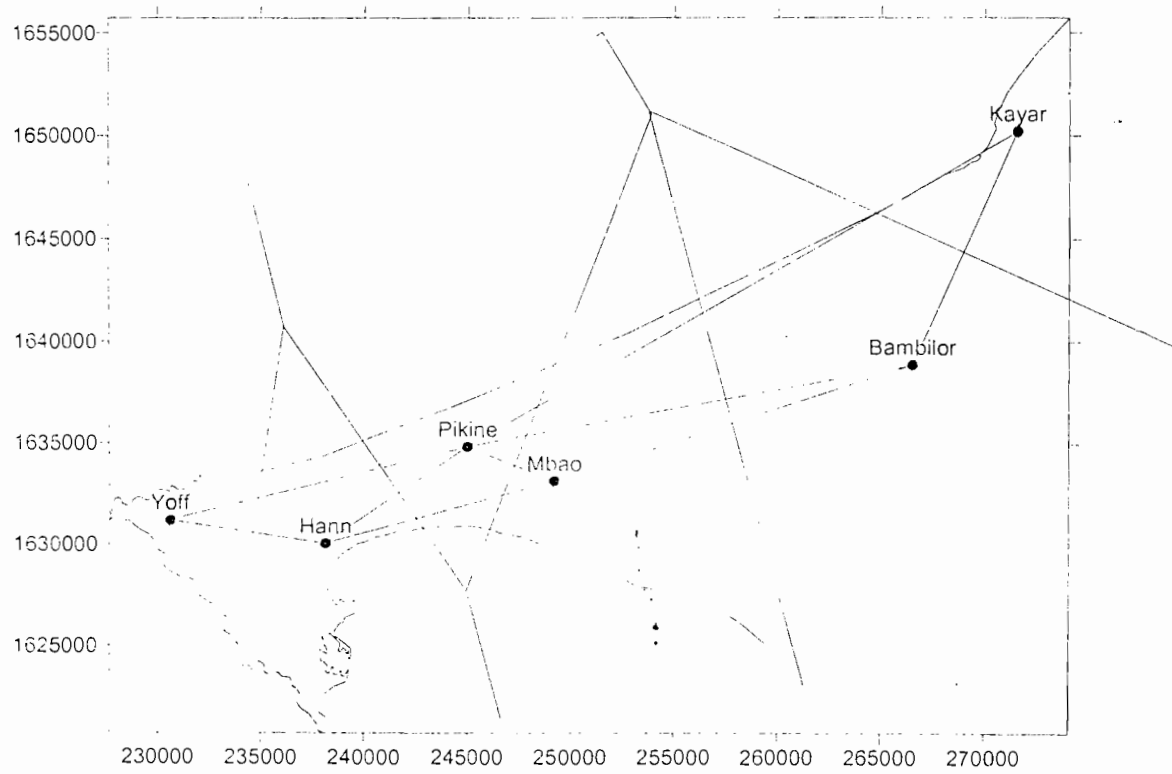
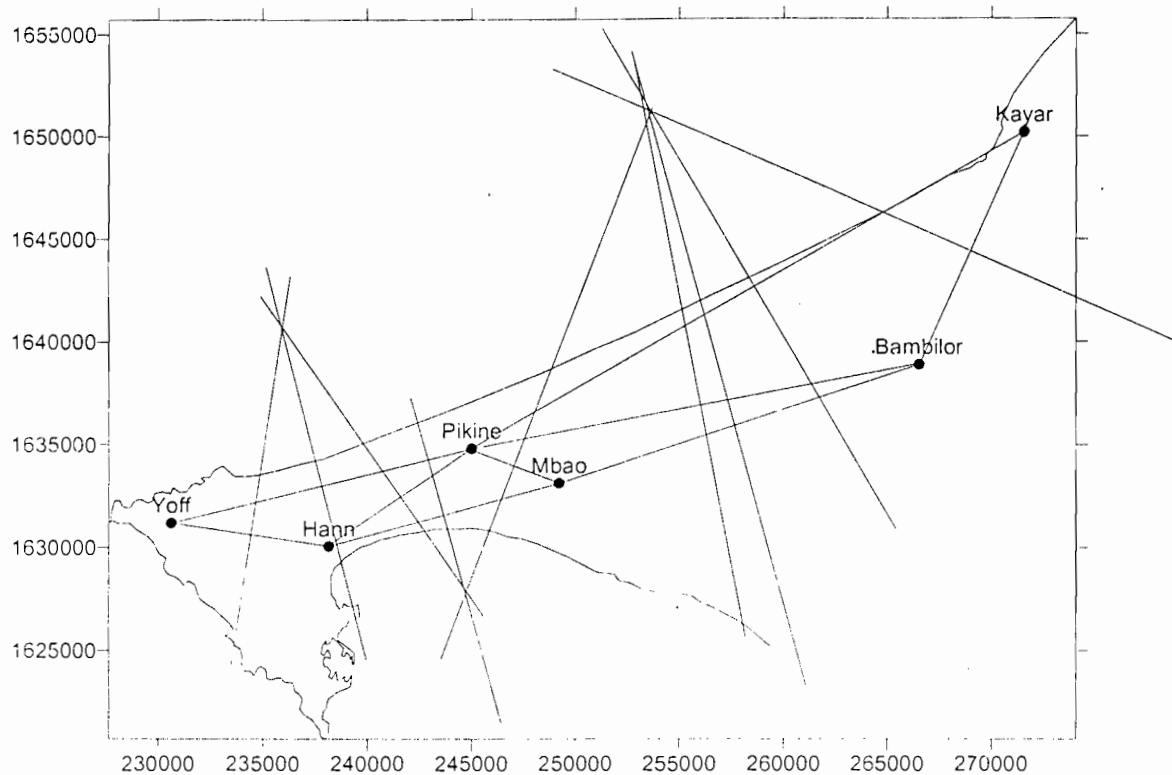


Bilan hydrique (1984-1996)

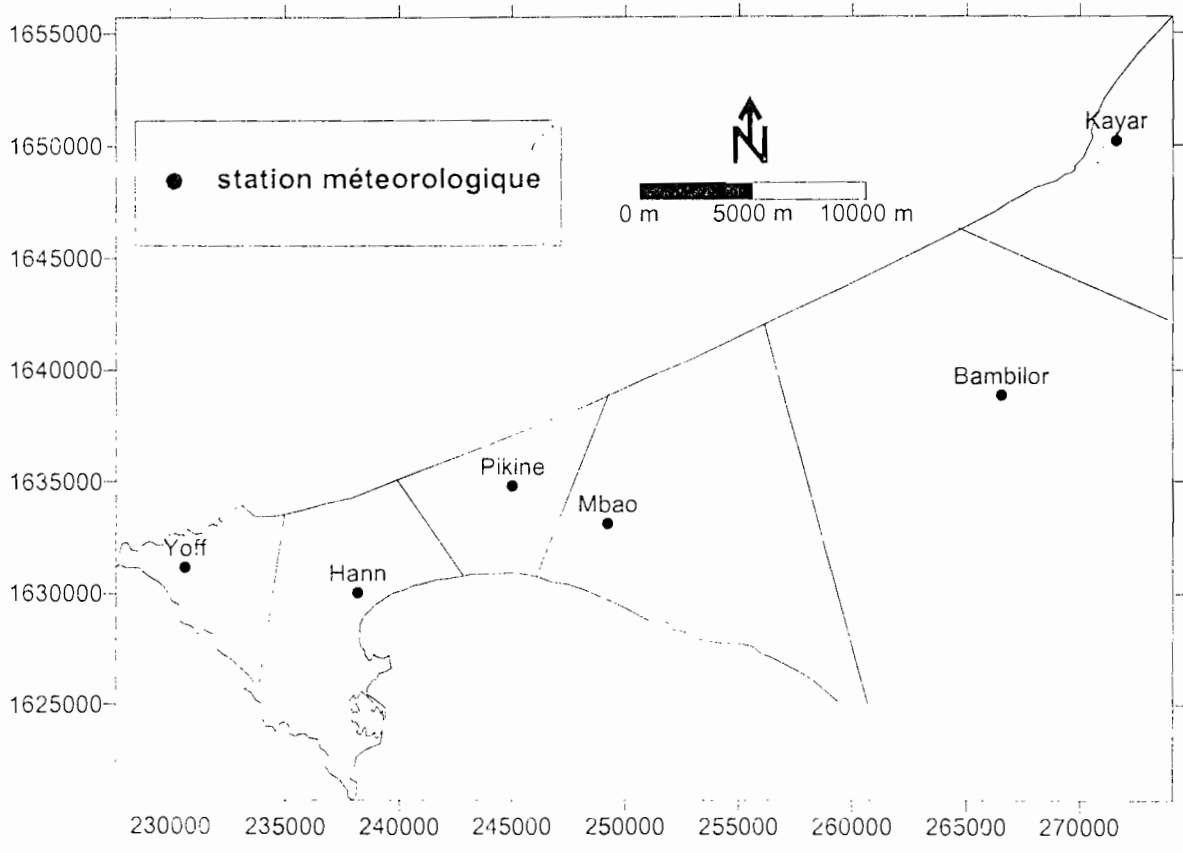
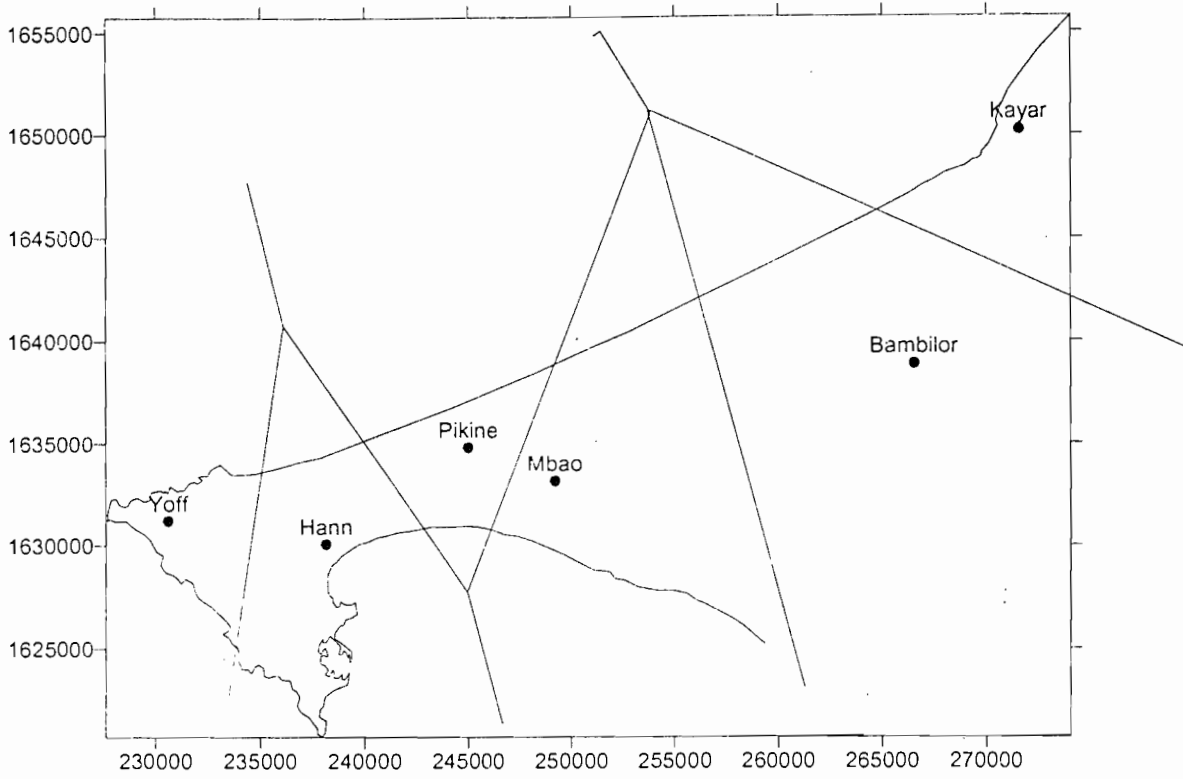
mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Som
ETP	161.1	154.4	191.5	198.6	230.5	222.1	213.7	205.9	206.3	210.9	235.3	198.3	2428.6
N (mm)	0	0.6	0	0	0	4.45	37.66	98.1	116.4	11.32	1.55	0	270.08
ETR	0.14	0.4	0.01	0	0	3.34	28.88	81.75	110.3	36.4	6.7	0.67	268.59
W (mm)	0	0.02	0	0	0	1.01	19.79	76.14	82.16	6.04	0.93	0.26	186.35
R (mm)	0	0	0	0	0	1.11	8.78	16.35	6.02	0	0	0	32.26

Annexe 5 : Zones d'influence des différentes stations météorologiques

Etapes de la méthode des polygones de THIESSEN



Annexes



Annexes

Annexe 6 : Débits mensuels par forage au centre de captage de Thiaroye

Champ de Thiaroye. Débits moyens mensuels par forages

1989	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F 17	84738	77262	73359	64564	88658	79801	79021	92881	84188	89690	87017	89630	990809	2715
F 18	41264	28125	42374	34482	48399	46639	46310	41525	43457	45050	45568	48729	511922	1403
F 15	21360	20950	14976	13203	16881	15507	15153	13929	14285	14092	14530	14760	189626	520
F 19	83788	78015	70233	66620	88525	82417	62022	85403	81943	61205	81884	82562	924617	2533
F 21	25393	22905	20148	16286	25100	21668	16376	13519	20429	20857	20486	21193	246360	675
F 22	21360	21420	15938	10310	13421	14778	12100	6545	10644	12258	12822	12742	164338	450
F 1	27549	22727	21622	20983	26985	20478	22484	13929	19041	20188	24384	35336	275706	755
m3	305452	271404	258650	228448	307969	281288	253466	267731	273987	263340	286691	304952	3303378	9050
m3/j	837	744	709	626	844	771	694	734	751	721	785	835	9050	
1990	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F 17	90214	74956	87723	90096	87372	84193	86236	82943	79843	84192	75393	66567	991728	2717
F 18	40572	52201	48002	48781	47976	42847	44193	40688	38965	42016	39913	43318	529472	1451
F 15	14860	18439	25637	22122	23620	24012	22621	21399	16460	14682	11799	14592	230243	631
F 19	84472	70529	80547	79710	71664	30735	62730	64900	62209	64752	60504	65046	797798	2186
F 21	21440	17812	23414	18755	19089	15573	28178	22438	21011	21799	16514	21894	247917	679
F 22	13507	9660	12368	12071	9917	10012	12008	3153	1122	13865	11740	13378	134101	367
F 1	27009	12497	25637	18033	17136	18153	14396	14392	15698	15152	15743	9058	202904	556
m3	292074	256094	303328	289568	276774	225525	270362	249913	246608	255458	231606	235853	3134163	8587
m3/j	800	702	831	793	758	618	741	685	676	703	635	646	8587	
1991	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F 17	85548	77347	84881	82968	87803	84965	86803	82268	83661	85135	85128	64670	991177	2716
F 18	37806	39971	41622	40124	40911	36860	40046	39339	38702	40836	41350	42316	479883	1315
F 15														
F 19														
F 21	124814	110920	119600	118704	119722	105981	127006	110169	116815	126454	108583	126131	1414899	3876
F 22														
F 1	12259	10431	8838	17939	17883	6988	14083	14247	16224	12586	22290	14044	167812	460
m3	260427	238669	254941	259735	266319	234794	267938	246023	255402	265011	257351	247161	3053771	8366
m3/j	713	654	698	712	730	643	734	674	700	726	705	677	8366	
1992	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F 17	73358	78687	78523	69451	70880	67559	72885	74287	73610	67720	79708	84478	891146	2441
F 18	40162	37972	39668	36822	36651	29202	29658	28953	37879	35615	38128	37155	427865	1172
F 15														
F 19														
F 21	120918	112718	118161	130579	123948	117185	130726	53055	78745	18135	125187	127668	1257025	3444
F 22														
F 1	12217	14389	17181	17194	13171	3840	8800	22413	7915	13873	15282	14525	160800	441
m3	246655	243766	253533	254046	244650	217786	242069	178708	198149	135343	258305	263826	2736836	7498
m3/j	676	668	695	696	670	597	663	490	543	371	708	723	7498	
1993	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F 17	66821	57639	61157	45144	58275	68250	73687	72422	64863	69884	63005	71892	773039	2118
F 18	37205	33443	35617	34502	32400	33256	32862	18737	17316	5652	0	0	280990	770
F 15	22643	21300	23218	21932	22311	21219	27133	17043	15274	16885	15250	16799	241007	660
F 19	49312	47320	55262	58310	60253	61227	64294	65183	61677	64735	62363	64003	713939	1956
F 21	35859	30958	34758	32916	26364	25212	27133	27103	20085	26744	24514	28251	339897	931
F 22	20916	18710	18418	21496	25179	23380	27732	27503	29934	30557	25051	28528	297404	815
F 1	1668	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1668	5
m3	234424	209370	228430	214300	224782	232544	252841	227991	209149	214457	190183	209473	2647944	7255
m3/j	642	574	626	587	616	637	693	625	573	588	521	574	7255	

Annexes

Champ de Thiaroye. Débits moyens mensuels par forages

1994	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F 17	71544	63589	70271	68120	72331	60172	71098	55036	43939	47379	31224	40875	695578	1906
F18	0	0	0	0	0	0	27788	45602	40528	44493	44116	46082	248609	681
F15	16329	14507	15909	15228	16613	15109	16276	11278	0	0	0	0	121249	332
F19	65055	57838	65703	62549	62186	61474	64699	64106	61858	61802	61959	62962	752191	2061
F21	28327	25250	27974	26418	28670	27199	27341	28466	27270	25313	25355	26919	324502	889
F22	20497	17191	15917	19219	19714	19948	18784	16295	16066	17435	19560	19297	219923	603
F1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m3	201752	178375	195774	191534	199514	183902	225986	220783	189661	196422	182214	193135	2362052	6471
m3/j	553	489	536	525	547	504	619	605	520	538	499	537	6471	
1995	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F 17	22938	34796	38025	37712	37412	36064							206947	567
F18	39434	42684	40197	45390	44790	43705							256200	702
F15	6373	24012	23496	23287	23466	22354							122988	337
F19	61375	54034	51149	54236	66958	61509							349261	957
F21	25588	23881	25512	24073	26489	25416							150959	414
F22	26505	17157	19908	18660	18184	15577							115991	318
F1	0	0	0	0	0	0							0	0
m3	182213	196564	198287	203358	217299	204625	0	0	0	0	0	0		
m3/j	499	539	543	557	595	561	0	0	0	0	0	0		
1996	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F17	34222	30952	34103	32909	33787	32949	33834	33289	19630	1247	0	14819	301741	827
F18	45347	39813	37836	33061	42879	39381	41041	37627	32469	34852	35428	32970	452704	1240
F15	23776	21606	23714	27834	23342	13795	22375	21599	21050	21846	19530	20384	260851	715
F19	63635	59777	63776	62118	65542	62379	61788	59450	58110	58663	58679	63236	737153	2020
F21	27383	25895	28555	33451	28279	27298	27837	27253	26947	16351	22496	25487	317232	869
F22	22021	19896	22066	20957	22129	22060	23100	22678	22946	24004	24149	23941	269947	740
m3	216384	197939	210050	210330	215958	197862	209975	201896	181152	156963	160282	180837	2339628	6410
m3/j	593	542	575	576	592	542	575	553	496	430	439	495	6410	
1997	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F17	20321	6715	7250	60710	71575	62247	66951	66142	62990	58981	64807	65799	614488	1684
F18	35725	30225	31089	31481	35148	32629	36329	37489	34593	35144	31742	35009	406603	1114
F15	21400	18605	20818	21296	21333	24231	25593	23107	23359	24019	23279	23077	270117	740
F19	56099	51089	55162	58131	57354	52472	57181	58064	62586	62625	62769	62706	696238	1908
F21	27567	23173	21205	27887	25252	22827	24886	25752	26130	25802	24759	25840	301080	825
F22	27639	24576	25186	24323	27125	25441	26047	25991	26539	26569	22803	20817	303056	830
m3	188751	154383	160710	223828	237797	219847	236987	236545	236197	233140	230159	233248	2591582	7100
m3/j	517	423	440	613	651	602	649	648	647	639	631	639	7100	
1998	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F17	79252	73197	79013	76293	80112	61216	66420	48552	53325	64300	53835	53316	788831	2161
F18	34758	29823	33178	30648	30198	33122	30331	21457	22184	27168	20653	25436	338956	929
F15	24639	21842	23780	20000	13755	22116	24031	23375	21415	23334	20914	21375	260376	713
F19	65893	54558	61561	58982	57800	54250	53750	54620	35200	42950	75180	79810	694354	1902
F21	27195	23705	25577	25116	26689	25065	24823	25256	24100	26751	23071	24723	302071	828
F22	18980	16086	17695	16840	12744	16465	15010	17068	12786	14862	10826	11813	181175	496
m3	250717	219011	240804	227879	221298	212234	214365	190328	169010	199365	204479	216273	2565763	7029
m3/j	687	600	660	624	606	581	587	521	473	546	560	593	7029	

Annexes

Champ de Thiaroye. Débits moyens mensuels par forages

1999	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F17	59350	48872	51693	50985	51863	45360	39832	45513	49567	54408	53960	52470	603873	1654
F18	29794	25231	27142	24220	24798	18506	21066	22820	22720	25000	23370	21880	285547	782
F15	23775	20395	20336	18317	18084	16464	18068	18606	17923	18761	17203	16183	224115	614
F19	87250	74150	81260	79240	77970	69980	79290	84460	81270	84730	82210	23610	905420	2481
F21	25988	20632	25388	24287	23683	21909	18077	20253	8551	0	0	0	188762	517
F22	10475	10241	10728	12433	11941	10378	11235	12193	11529	12412	11838	11429	136832	375
m3	235632	199521	216547	209482	208339	182597	187562	203845	191560	195311	188581	125572	2344549	6423
m3/j	646	547	593	574	571	500	514	558	525	535	517	344	6423	
2000	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F17	58701	46737	53670	55292	55659	54994	52204	53153	44566	56273	54320	55628	641197	1757
F18	23070	20450	22070	20930	17730	20290	19600	19240	17060	19490	18290	18150	236370	648
F15	16475	10848	11898	4037	2273	10229	9663	10341	9051	10284	9993	9977	115069	315
F19	62310	0	23310	36720	47480	35680	24730	45160	35010	47960	45550	46460	450370	1234
F21	0	0	0	0	13672	23077	21102	25144	22122	25687	23817	22767	177388	486
F22	12114	10396	11489	11277	11619	11463	11432	11328	9231	10815	10335	9588	131087	359
m3	172670	88431	122437	128256	148433	155733	138731	164366	137040	170509	162305	152570	1751481	4799
m3/j	473	242	335	351	407	427	380	450	375	467	445	445	4799	
2001	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F17	59911	52360	56215	51490	54666	56862	59993	60349	55533	55586	57827	60910	681702	1868
F18	19260	16350	17050	16600	16350	15200	16110	15410	12400	15070	15160	15890	190850	523
F15	10533	8560	7141	2729	5180	3965	3317	6845	1474	5270	5293	5468	65775	180
F19	51580	44360	44230	47630	49700	46770	48440	46230	41600	44030	44330	46040	554940	1520
F21	25361	22290	23652	23592	24781	24530	24811	24513	23355	24621	24623	25422	291551	799
F22	10341	7949	6113	8152	8726	8338	8652	8373	6885	7068	7398	2451	90446	248
m3	176986	151869	154401	150193	159403	155665	161323	161720	141247	151645	154631	156181	1875264	5138
m3/j	485	416	423	411	437	426	442	443	387	415	424	428	5138	
2002	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	m3	m3/j
F17	61212	59043	58651	51991	55345									
F18	15640	13880	14750	12770	13660									
F15	20	0	0											
F19	44680	42220	51260	66440	60720									
F21	25506	22442	24788	23700	24995									
F22	12301	13299	14872	2517	0									
m3	159359	150884	164321	157418	154720									
m3/j	437	413	450	431	424									