

**UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DEPARTEMENT DE GEOLOGIE**



THESE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR de 3^{ème} cycle en Géologie Appliquée

(Mention HYDROGEOLOGIE)

par

Seynabou CISSE

**NAPPE LIBRE DES SABLES QUATERNAIRES THIAROYE/BEER
THIALANE
ETUDE DE LA CONTAMINATION PAR LES NITRATES SUR LA
BASE D'UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE
(PC ARC/INFO)**

Le 15 Janvier 2000 devant le jury:

**A. LY
S. WOHNLICH
C. B. GAYE
A. FAYE
S. FAYE
Mme. A. FALL**

**Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur**

**Université C. A. Diop DAKAR
L. Maximilians Universität MUNICH
Université C. A. Diop DAKAR
Université C. A. Diop DAKAR
Université C. A. Diop DAKAR
Ministère de l'hydraulique DAKAR**

AVANT-PROPOS

Je remercie le bon **DIEU** de m'avoir donné force et courage de terminer ce travail et retourner dans mon pays.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un programme "Sandwich" du **DAAD** (Deutscher Akademischer Austauschdienst) à L'IAAG (Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie) de l'Université de Munich (Ludwig-Maximilians-Universität) en collaboration avec le département de Géologie de l'Université de Dakar (UCAD).

Au terme de ce travail, il m'est agréable de remercier ici toutes les personnes ayant contribué à son déroulement, en particulier:

- Au **DAAD** (Deutscher Akademischer Austauschdienst) pour m'avoir accordé leur bourse durant tout mon séjour en Allemagne et le financement pour la réalisation de ce travail.

- Messieurs les Pr. Cheikh Bécaye Gaye et Stefan Wohnlich, à qui j'adresse mes remerciements pour m'avoir proposé ce sujet et accepté de le diriger pour sa réalisation. Leurs critiques et suggestions pertinentes ont été d'un apport considérable pour la finalisation du document. Qu'ils trouvent ici mes très sincères remerciements et l'expression de ma profonde gratitude.

- Monsieur le Pr. Ababacar Ly, qui a accepté de présider mon jury. Ses encouragements et conseils ont été précieux tout au long de ce travail. Je lui prie de croire à ma sincère reconnaissance.

- Dr. Abdoulaye Faye, Maître de conférences et responsable du 3ème cycle d'hydrogéologie à qui ses suggestions ont été d'un grand apport. Qu'il trouve ici mes sincères remerciements.

- Dr. Raphael Sarr, Maître de conférences, je lui témoigne ici ma reconnaissance d'avoir accepté de corriger une bonne partie du manuscrit, malgré la distance.

- Dr. Serigne Faye, Maître Assistant, avec qui j'ai eu beaucoup de discussions et ses critiques et suggestions pertinentes ont été d'un grand apport pour la finalisation de ce document. Je lui témoigne ici mes très sincères remerciements, et qu'il trouve l'expression de ma profonde gratitude.

- Monsieur Jean Louis Pinault du BRGM d'Orléans, pour l'intérêt tout particulier qu'il a porté à ce travail et pour m'avoir facilité l'accès à la documentation.

- Dr. Abdou Aziz Tandia, Maître Assistant, avec qui j'ai commencé l'étude sur le problème des nitrates dans la zone de Thiaroye. Qu'il trouve ici mes sincères remerciements.

- Mes remerciements vont également à Mme A. Fall, Chef du Service de Gestion et de Planification des Ressources en Eau du Ministère de l'Hydraulique qui a accepté de faire partie du jury.

Mes remerciements vont également à:

- tous mes collègues du “Arbeitsgruppe Hydrogeologie und Umweltgeologie” de L’IAAG/LMU, pour l’hospitalité dans le laboratoire d’accueil de Munich et les discussions et suggestions lors des séminaires du groupe de travail.

- mes collègues du département de Géologie de l’Université de Dakar, et plus particulièrement ceux du Groupe de recherche en Hydrogéologie pour leur grand apport à la finalisation de ce document.

- au personnel administratif et technique du département de Géologie de l’Université de Dakar, en particulier Mme Ndour, Monsieur Babacar Diop et Diakhaté pour leur contribution dans mes campagnes sur le terrain à Dakar.

- au personnel du ministère de l’hydraulique de Dakar, en particulier Monsieur Saliou Ngom et le vieux Feu Morice Diop pour m’avoir guidé sur le terrain pour une reconnaissance des ouvrages.

- que tous mes promotionnaires, notamment Fatou, Baba et Marianne trouvent ici l’expression de mes sincères remerciements pour le soutien mutuel.

Je ne saurais terminer sans remercier mon Papa, mes parents pour surtout leur soutien moral et leur affection durant mes longues années d’absence.

Que mes frères, soeurs: NDèye Astou Cissé, Pape Amadou, Mody, Yakh, Khady, Fatou, Bira, Ndiaya, NDiakhate trouvent ici l’expression de mes sincères remerciements et ma profonde gratitude.

VORWORT

Die vorliegende Dissertation ist in den Jahren 1995 bis 1999 am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Ludwig-Maximilians-Universität München und Geologisch Abteilung Universität Dakar durchgeführt worden.

Allen, die zur Realisierung dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich an dieser Stelle recht herzlich meinen Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt in erste Linie den Herren Prof. Dr. Stefan WOHNLICH und Prof. Cheikh Bécaye GAYE. Für die Vergabe des Themas sowie für fachliche Betreuung diese Arbeit bedanke ich mich ganz herzlich.

Mein persönlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr. Stefan WOHNLICH, mit denen mich die Jahre meines Forschungsaufenthaltes am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie (IAAG) der Ludwig-Maximilians-Universität München verbinden.

Besondern Dank schulde ich dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD), der mich im Rahmen seiner Förderprogramme für Hochschulbeziehungen mit einem Gaststipendium soweit unterstützt hatte, bis ich mein Promotionsvorhaben stellen konnte.

Den Herren Dr. A. FAYE, Prof. A. LY bin ich zum Dank verpflichtet.

Herrn Dr. Raphael SARR möchte ich für die Beitrag und Durchsicht dieser Arbeit danken.

Herrn Dr. Thomas RÜDE hat durch Diskussionen wesentlich dazu beigetragen. Ihnen gilt mein besonderer Dank.

Herrn Dr. Serigne FAYE möchte ich besonders für die anregenden Beiträge und die Durchsicht dieser Arbeit danken.

Für die stets freundschaftliche Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft danke ich Herrn Dipl. – geol. Albert Vogelgesang und meinen Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe Hydrogeologie und Umweltgeologie.

Frau WITT sei recht herzlicher gedankt für die freundliche Unterstützung und Hilfsbereitschaft im Jahre meines Forschungsaufenthaltes am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie (IAAG) und in Deutschland.

Frauen Rene Allen, Irene möchte ich besonders für die freundliche Unterstützung in Freiburg danken.

Zum Schluß möchte ich meinen Eltern, für die moralische Unterstützung, in den kritischen Momenten während meines Deutschlandaufenthaltes danken.

Je dédie ce travail à:

*Mon cher Père El-Hadji Cheikh CISSÉ
Ma maman Adja Thiame Diagne
Fou El-Hadji Massamba Diagne
Ndèye Astou CISSÉ*

**NAPPE LIBRE DES SABLES QUATERNAIRES
THIAROYE/BEER THIALANE
ETUDE DE LA CONTAMINATION PAR LES
NITRATES SUR LA BASE D'UN SYSTEME
D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE
(PC ARC/INFO)**

ZUSAMMENFASSUNG

Mit den vorliegenden Untersuchungen im Bereich der Cap-Vert Halbinsel, westlich Dakar Senegal (s. Abb.1), wurde in den Jahren 1996-1999 der aus quartären Sanden aufgebaute Thiaroye Grundwasserleiter untersucht. Geologisch sind die Sande Teil des Senegalesisch-Mauritanischen Sedimentationsbeckens, das eine Fläche von 500 000 km² einnimmt.

Die Spitze der Cap-Vert Halbinsel wird durch die von West nach Ost verlaufende Thiaroye-Landenge mit dem Hinterland verbunden. Diese Thiaroye-Landenge die im Norden und Süden vom Atlantischen Ozean begrenzt wird, besteht aus einer Abfolge von Sedimentgesteinen. Aufgrund verschiedener Bohrungen und geophysikalischer Messungen können in diesem Gebiet zwei stratigraphische Einheiten unterschieden werden: tertiäre Tone im Liegenden, auf die quartäre Sande folgen.

Unter den trockenen klimatischen Bedingungen Senegals, die ein sehr eingeschränktes Wasserdargebot bedingen, ist der Thiaroye-Aquifer eine wichtige Basis für die Trinkwasserversorgung der Hauptstadt Dakar, in der zwei Drittel der Bevölkerung Senegals wohnen. Frühere Arbeiten haben eine hohe grenzwertüberschreitende Nitratbelastung (400 mg/l) dieses wichtigen Grundwasservorkommens belegt (COLLINS & SALEM, 1989; GAYE et al., 1989; SONEES, 1989; FALL, 1991; TANDIA, 1997).

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur langfristigen Sicherung der Trinkwassernutzung des Thiaroye-Aquifers durch das Aufzeigen von Möglichkeiten zur Reduzierung des Nitratreintrages in das Grundwasser leisten. Dazu wird auf Basis eines Geo-Informationen-Systemes (PC ARC/INFO Version 3.4D ESRI 1990) der Einfluß unterschiedlicher Landnutzungsformen auf den Stickstoffhaushalt des Sandgrundwasserleiters untersucht.

Als Basis für die hydrogeologischen Arbeiten wurde eines hydrogeologisches Modell des Quartären Thiaroye Grundwasserleiters erstellt. Das Hydrogeologische Modell lehnt sich an die Ergebnisse dieser Untersuchung und früherer Arbeiten an. Es ist aus folgenden Informationsebenen aufgebaut:

- **Klassifizierung der Meßstellen**

Die Piezometer, Bohrungen und Privatbrunnen wurden auf der Basis des Kartenblattes „Nappe libre des sables Quaternaires Infrabasaltique-Thiaroye/Beer Thialane“ Karte des „Ministère Développement Industriel Direction Hydraulique Dakar Senegal“ lokalisiert und nach ihrer Repräsentativität klassifiziert. Die geographischen Koordinate aller Meßpunkten wurden mit einem GPS-System mit 1-5 m Genauigkeit bestimmt (s. Abb.9).

- **Digitales Geländemodell**

Das Digitale Geländemodell wurde auf der Basis der topographische Kartenblätter „DAKAR, BARGNY, KAYAR,, (I.G.N PARIS & S.G.N DAKAR, 1983) erstellt.

- **Grundwassergleichenpläne**

Auf der Grundlage von Wasserspiegelmessungen im Juni und Oktober 1997 und dem langjährigen Gleichenplan (1984-1997) herausgegeben durch das „Ministère Hydraulique-Dakar“ werden mehrere Grundwassergleichenpläne erstellt. Die Wasserspiegelmessungen am Ende

der Trockenzeit (Juni) und der Regenzeit (Oktober) erfolgten mittels eines Lichtlotes, relativ zur Pegeloberkante (POK). Problematisch sind im Untersuchungsgebiet die aus einer Datenbank zur Verfügung gestellten absoluten Daten zur POK der Meßstellen. Diese scheinen von geringer Güte zu sein, konnten aber nicht durch eigene Nivellements geprüft werden. Daher wurden unter Zuhilfenahme von topographischen Karten, Karten zum Grundwasserleiter (Basis, Mächtigkeit) und die Lage der Feuchtgebiete (Niayes) die Höhenangaben einzelner Meßstellen korrigiert.

Für das hydrogeologische Modell wurden die Daten zum Grundwasserstand mit Hilfe von geostatistische Methoden (Variogrammanalyse, lineare Krigeschätzung) bearbeitet. Hierdurch war es möglich, die Meßwerte zu regionalisieren. Verschiedene Richtungsvariogramme wurden erstellt und zeigen für die beide Stichtagsmessungen und die langjährigen mittleren Grundwasserstand eine Anpassung nach der Gauß-Modellfunktion (s. Abb. 29 bis 31). Die Grundwassergleichenpläne (s. Abb.38 bis 40) zeigen eine Veränderung der Grundwasseroberfläche zwischen Juni und Oktober. Ebenfalls dargestellt ist ein Grundwassergleichenplan für die Beobachtungszeit 1984-1997. Der mittlere Grundwassergleichenplan erreicht ein Niveau zwischen den beiden Stichtagsmessungen.

Die Darstellung zeigt eine Fließrichtung des Grundwassers von Süden nach Norden, in Richtung des Meeres. Im Westen und Osten des Gebietes deutet sich eine Grundwasserscheide in Richtung des westlichen „Nappe Infrabasaltique“ bzw der östlichen „Nappe du Littoral Nord“ an. Die größte Gefälle der Grundwasseroberfläche liegt in der Förderbrunnen „THIAROYE“ (10 000 m³/a) und „BEER THIALANE“ (8 000 m³/a).

Die Auswertung der langjährigen Grundwasserganglinien (1976-1997) zeigt eine Absenkung der Wasserstände im Süd-Osten des Grundwasserleiters von Kounon nach Mbayakh unter dem Einfluß der relativ trockenen klimatischen Bedingungen der letzten 10 Jahren. Der langjährige mittlere Jahresniederschlag beträgt 357 mm (1976-1997), die Untersuchungsperiode 1987-1997 erreicht dagegen nur 300 mm/a.

- **Grundwasserbasis:**

Die Basis des quartären Thiaroye Sandgrundwasserleiters nach HEBRARD (1966) ist in Abb.22 dargestellt. Die Isolinien der Aquifer basis zeigen eine Hochstruktur (10 m ü NN) beim Ausstrich der tertiären Tone im Süd-Osten des Grundwasserleiters im Bereich der Brunnen Pts.202 (Kounon), Pts.235 (Bambilor) und PS.8. Eine Depressionsstruktur (-70; -90 m ü NN) ist an der nördlichen Küste im Bereich der Brunnen Pts.234 und im Westen des Grundwasserleiters (Meßstelle P2-1) zu erkennen.

- **Grundwassermächtigkeitskarte nach WHO (1972)**

In den Depressionsstrukturen der Grundwasserleiterbasis finden sich höhere Grundwassermächtigkeiten (s. Abb. 23) z.B im Thiaroye Becken (> 50m) im Bereich der Förderbrunnen (F.15, F.17, F.18, F.22, F.21) und südlich des „Lac Mbeubeuss und Retba „ (20 - 60m).

- **Flurabstandskarte**

Eine Grundwasserflurabstandskarte wurde über das Residuals-Modul der Programms SURFER 6.01 berechnet. Das Programm erlaubt die Berechnung der Vertikaldifferenz zwischen dem Z-Wert eines Punktes aus einem XYZ-Data-Point-File und einem interpolierten Z-Wert eines Rasterpunktes aus einem GRID-File mittels subtraktiver Verschneidung. Die Verschneidung erfolgte auf Grundlage des GRID-Files der Grundwasseroberfläche vom Ok-

tober 1997. Der XYZ-Data-Point-File der digitalisierten Höhenlinien der topographischen Karte diente als DAT-file. Das Ergebnis der Verschneidung wird als Isolinenplan ausgegeben. Die Gesamtmächtigkeit der Grundwasserüberdeckung (s. Abb.42) zeigt insgesamt ein oberflächennahes Grundwasser im Thiaroye Aquifer.

- **Geohydraulischer Parameter**

An einer Auswahl von Grundwassermeßstellen wurden Pumpversuche zur Bestimmung der geohydraulischen Kennwerte des Grundwasserleiters durchgeführt. Zur Registrierung der Meßwerte kam ein Datenlogger (16 – Kanal – Logger 21 X, CAMPELL Scientific LTD) zum Einsatz. Mittels eines Lichtlotes wurden Kontrollmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse für die Durchlässigkeitsbeiwerte, die Transmissivität und den Speicherkoeffizienten an den ausgewählte Grundwassermeßstellen sind auf Basis der verschiedenen Methoden für einen ungespannten Grundwasserleiter (THEIS, COOPER & JACOB, BOULTON) in Tabelle 4 zusammengestellt. Der Wiederanstieg des Grundwassers wurde nicht ausgewertet. In der Tabelle 5 wurden die mittleren Werte der verschiedenen Methoden und die erzielten Ergebnisse den Werten aus dem WHO-Bericht (Etude Hydrogéologique de la Nappe des sables Quaternaires, O.M.S, 1972) gegenübergestellt. Die Werte liegen in der gleichen Größenordnung. Unterschiede ergeben sich durch die Inhomogenität des Grundwasserleiters, durch die wechselnden Mächtigkeiten der einzelnen Schichten und die fehlende Auswertung des Wiederanstieges. Auf Grund der Ergebnisse der deskriptiven Statistik (Histogrammdarstellung, Prüfung auf Normalverteilung) konnte eine Regionalisierung der Daten nicht vorgenommen werden.

- **Hydrochemische Untersuchung des Thiaroye Grundwasserleiters**

- **Basischemische Parameter:**

Die basischemischen Parameter wurden im Juni und Oktober 1997 gemessen. Die Meßergebnisse des pH-Wertes betragen 4,47 bis 7,85. Mit wenigen Ausnahmen sind die Werte im sauren Bereich.

Der gelöste Sauerstoffgehalt des Grundwassers beträgt im Mittel 5,45mg/l. Das Maximum von 8,7 mg/l stammt aus einem handgegrabenen Privatbrunnen mit einem Durchmesser von 1,10 m, dessen Wasseroberfläche offen zutage liegt.

Die Grundwassertemperatur beträgt im Mittel 29° C und ist damit nur geringfügig kühler als die mittlere Lufttemperatur (30° C). Gemeinsam mit den hohen Sauerstoffgehalten des Grundwassers spricht dies für ein offenes System.

Die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten liegen bei den meisten Proben zwischen 500 und 1000 $\mu\text{S} / \text{cm}$. Die zum Teil hohen Leitfähigkeitswerte des Grundwassers ergeben sich durch die Mischung von Grundwasser mit Meerwasser. Während der Pumpversuche wurden kontinuierlich die physikalisch- chemischen Basisparameter Temperatur, spez. elektrische Leitfähigkeit, gelöster Sauerstoff und pH-Wert gemessen und auf einem Datenlogger im Intervall von 10 Sekunden vor Ort gespeichert.

Zur Validierung der Datenlogger-Meßwerte wurden die Daten mit manuellen Messungen (pH-Meter, Oximeter, Konduktometer) überprüft. Die Abb.46 bis 48 zeigen bei den Pumpversuchen eine signifikante Veränderungen der physikalisch- chemischen Basisparameter.

- **Wasserchemie im Thiaroye Grundwasserleiter**

Zur Interpretation der Wasserchemie im Thiaroye wurde eine Unterteilung des Arbeitsgebietes aufgrund von Unterschieden in der Landnutzung im vorgenommen. In der thematischen Landnutzungskarte sind fünf verschiedene Zonen ausgeschieden, die sich durch Landnut-

zungstypen abgrenzen lassen. Dabei sind fünf verschiedene Wassergruppen mittels Stiff-Diagramm in Abb.93 zu unterscheiden:

Zone A: Das Stadtgebiet wird als Zone A (SUBURBAN) bezeichnet. Aus den Wasseranalysen ergibt sich in dieser Zone eine hohe Nitratbelastung (100-400 mg/l) des Grundwasserleiters, verursacht durch anthropogenen Nitratreintrag in das Grundwasser.

Zone B: Die Zone B stellt das Sanddünengebiet dar. Die chemische Beschaffenheit des Grundwassers in diesem Gebiet ist gekennzeichnet durch hohe Na^+ -, K^+ - und Cl^- - Gehalte. Diese hohen Konzentrationen können aus der Lösung salzhaltiger Gesteine stammen oder auch Folge einer Aufmineralisation durch Verdunstungsvorgänge sein.

Zone C: Mit der Zone C werden die Dörfer dargestellt. Das Grundwasser ist durch hohe anthropogen verursachte Nitrat- und Sulfatgehalte charakterisiert.

Zone D: Die „Niayes“ Gebiete stellen Zonen zwischen den Dünenrücken mit flachem Grundwasser dar. Hier ist die Wasserchemie durch hohe Hydrogenkarbonatgehalte charakterisiert.

Zone E: Damit sind die landwirtschaftlich genutzten Gebiete zusammengefaßt. Im Gegensatz zur Zone A und C ist diese Zone nicht durch hohe Nitratkonzentrationen belastet. Das Grundwasser weist jedoch relativ hohe Gehalt an Sulfat und Calcium auf.

Ein Vergleich der Wasserchemie der Grundwässer in Korrelation zur Landnutzung zeigt, daß die Nitratbelastung des Thiaroye Grundwasserleiters nicht von der landwirtschaftlichen Nutzung verursacht wird, sondern durch Abwasserversickerung aus Haushalten in Stadtgebieten.

- Darstellung der Nitratkonzentrationen im quartären Thiaroye Grundwasserleiter
Zur Erfassung der Nitratgehalte des Grundwassers wurden die Wasserproben von Juni und Oktober 1997 photometrisch analysiert, nachdem die Proben zuvor filtriert worden waren (0,45µm Cellulose-Nitrat-Filter, gewaschen). Die Regionalisierbarkeit der Nitratkonzentrationen wurde mit Hilfe von deskriptiven statistischen (Histogrammdarstellung, Prüfung auf Normalverteilung) und geostatistischen Methoden (Variogrammanalyse, Linear Krigeschätzung) überprüft. Über die Histogrammanalysen (s. Abb.56, 57) erfolgte die Berechnung der arithmetischen Mittel der Nitrat-Konzentrationen im Thiaroye Grundwasserleiter mit 90 mg/l (n=50) (Juni 1997) und 98 mg/l (n=50) (Oktober 1997). Die Verteilung der Meßwerte sind mit einer Schiefe von +1,60 (Juni) und +1,62 (Oktober) rechtsschief. Die Datensätze zeigen einen geringen regionalen Zusammenhang (s. Abb.58, 59) der Meßwerte im Juni und Oktober 1997. Es konnte keine Kreuzprüfung vorgenommen werden, da die Variogrammparameter zur Krigeschätzung des Isolinienplanes nicht bekannt waren. Daher wird die Nitratkonzentration im Grundwasser als punktuelle Repräsentation der Konzentrationszonen (Abb.60, 61) im Thiaroye Grundwasserleiter dargestellt.

● Klimatische Wasserbilanz

Eine klimatische Wasserbilanz des Thiaroye Aquifers wurde unter Anwendung des Geo-Information-Systems PC ARC/INFO mit Klimadaten (ASECNA/DAKAR) erstellt. Hierzu war es erforderlich, in ARC/INFO die Landnutzungstypen zu berücksichtigen, um die somit klimatische Wasserbilanz des Arbeitsgebietes mit den Komponenten Niederschlag und Evaporation aufzustellen. Für die „Niayes“ benannten Flächen zwischen den Dünenrücken, in denen Grundwasser zu Tage tritt, und die Seen wurde die PENMAN-Gleichung zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung einer freien Wasseroberfläche (MATTHESS & UBELL, 1983) verwendet. Im Bereich der Sanddünen- und Landwirtschaftsgebiete wurde die potentiellen Evaporation für die Regenzeit nach der Methoden von THORNTHWAITE & ALBRECHT (Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, Bd.4, Nr.29, 1951) berechnet. Aus der Niederschlags- und Verdunstungshöhe erfolgte die Ableitung der klimatische Wasserbilanz. Die Ergebnisse sind als Grundwasserneubildungskarte dargestellt

(s. Abb.73).

Die Erstellung des hydrogeologischen Modells des quartären Thiaroye Grundwasserleiters dient als Datenbasis für ein numerisches Grundwassermodell, und ermöglicht die Simulation der Grundwasserströmung. Die Annahmen des hydrogeologischen Modells wurden durch das mathematische Grundwassermodell verifiziert. Die Modellierung der Grundwasserströmung erfolgte unter Anwendung des Computerprogramms PROCESSING MODFLOW (PM3). Das Aquifer system wurde als ein ungespanntes und zweidimensionales Strömungsmodell definiert, sowie unter stationären (Februar 1971) und unstationären (1971-1997) Bedingungen simuliert. Die Kartendarstellung des geohydraulischen Parameters Durchlässigkeitsbeiwert k_f (Abb.79) ergibt sich aus dem stationären Strömungsmodell. Diese Ergebnisse veranschaulichen die Heterogenität der geohydraulischen Parameter aufgrund des heterogenen geologischen Aufbaus des Grundwasserleiters. Die höchsten Werte ($5 \cdot 10^{-4}$ - $10 \cdot 10^{-4}$ m/s) liegen im Nordosten des Grundwasserleiters im Bereich der Meßstelle P2.7 (Lac Retba) und in Thiaroye ($6 \cdot 10^{-4}$ m/s). Die niedrigsten Werte ($0,11 \cdot 10^{-4}$ m/s) befindet sich im Südosten des Grundwasserleiters nahe des Ausstrichs der tertiären Tone. Die berechneten und gemessenen Grundwasserhöhengleichungen des unstationären Strömungsmodells (1971-1997) (Abb.85) und die langjährigen Grundwasserganglinien an einer ausgewählten Grundwassermessstelle veranschaulichen die bis 3 m betragende Absenkung der Grundwasseroberfläche im Südosten des Grundwasserleiters. Die Wasserbilanz des stationären (Februar 1971) und instationären (1971-1997) Strömungsmodells (s. Tab.19 und 25) zeigen keine großen Unterschiede der Parameter.

Die Bestimmung des Einflusses unterschiedlicher Landnutzungsformen auf den Stickstoffhaushalt des Sandgrundwasserleiters auf Basis eines Geo-Informationen-Systemes (PC ARC/INFO Version 3.4D ESRI 1990) ist aus folgenden Informationen aufgebaut:

- **Digitale Karte zur Landnutzung**

Das Satellitenbild (SPOT XS+P) des Arbeitsgebiets wurde aus den beiden vorliegenden Bildern vom 23.12.1995 von „Dakar“ und „Lac Retba“ generiert. Zur Erstellung repräsentativer Daten wurden die Bilder im (Centre de Suivi Ecologique Dakar) mit einer räumlichen Auflösung von 20 m klassifiziert. Die topographischen (BRGM, 1983), geologischen (ELOUARD et al., 1974) und morphopedologischen (USAID/RSI, 1986) Kartenblätter „Presqu'île du Cap-Vert“ dienen als Datenbasis für die Auswertung des kombinierten Satellitenbildes. Die Daten wurden elektronisch verarbeitet und mittels Autocad.14, ARC/INFO und ARC VIEW regionalisiert. Für die Untersuchung der Nitratbelastung des Thiaroye Aquifers sind in der thematischen Landnutzungskarte des Arbeitsgebietes (s. Abb.65) die folgenden Hauptnutzungstypen ausgewählt:

Wohngebiete

Aufgrund der Bevölkerung gliedern sich die Wohngebiete in zwei Zonen, die sich deutlich voneinander unterscheiden lassen:

- **Stadtgebiete:** Das Stadtgebiet wird als „URBAN Zone“ bezeichnet. In diese Gebiet befindet sich Thiaroye, Boun, Pikine, Malika, Yeumbeul, Parcelles Assainies, Guediawaye mit mehr als 1 000 000 Einwohnern und 4 000 Einwohnern / km². In diesem Bereich liegen die Bohrbrunnen für die Wasserversorgung von Dakar. Die Überbevölkerung der Stadtgebiete verursacht die Verschlechterung der sanitären Verhältnisse und ein mangelhaftes Abwasser-

beiseitigungssystem. Hohe Nitratkonzentrationen im Grundwasser können als Folge der Abwasserversickerung aus Haushalten auftreten.

- Die Dörfliche Gebiet: Diese Zone, bezeichnet als „RURAL Zone“ erstreckt sich von Keur Massar bis Diender. Die Zone zeigt einen geringen anthropogenen Einfluss auf den Grundwasserleiter mit 700 000 Einwohnern bzw 600 Einwohnern / km². Die Wasserversorgung in diesem Gebiet ist durch die traditionellen handgegrabenen Privatbrunnen charakterisiert, die einen Durchmesser von 1,10 bis 2 m aufweisen. Die hier beobachteten hohen Nitratkonzentrationen können möglicherweise auf Einträge in die offenen Brunnen zurückgeführt werden, da vor der Probenahme keine ausreichenden Wassermengen abgepumpt werden konnte.

Straßennetz

Das Stadtgebiet wird durch ein dichtes Straßennetz gekennzeichnet, das eine Belastung des Grundwassers verursachen kann . Im Stadtgebiet befinden sich:

- Nationalstraße I: Die Hauptstadt Dakar wird durch die Nationalstraße I mit dem Hinterland verbunden.
- Hauptstraßen: Sie bilden ein dichtes Netz in der Zone Thiaroye, Pikine, Boun, Yeumbeul, Parcelles Assainies, Guediawaye, Malika, Yeumbeul. Diese Straßen werden nicht durch eine Kanalisation entwässert, um die Abwasser nach der Regenzeit abzuleiten. Dadurch wird die Belastung des Grundwasser begünstigt.
- Die unbefestigte Wege: Die Dörfer sind durch unbefestigte Wege verbunden.

Die Deponie

Die tiefergelegenen MBeubeuss Gebiete dienen als Zentraldeponie der Stadt Dakar. Die Ablagerungsbedingungen ohne ausreichende Abdichtung führt zu einer Belastung des Grundwassers. Aufgrund der geringen Anzahl an Meßstellen im Deponiebereich kann der Einfluß dieses Landnutzungstypes nicht genau spezifiziert werden.

- Eine Verschneidung der Flurabstands- mit der Landnutzungskarte im ARC/INFO (s. Abb.90) veranschaulicht folgende Zusammenhänge:

- Das Stadtgebiet ist durch einen geringen Flurabstand (< 6 m) und eine mangelhaftes Entwässerungssystem charakterisiert. Dadurch wird der anthropogene Nitratreintrag in das Grundwasser begünstigt.

- Im ländlichen Raum ist die Gesamtmächtigkeit der Grundwasserüberdeckung höher, die maximalen Werte liegen im Bereich Beer Thialane und Diender (>10-16 m). Aufgrund der offengelegten Grundwasseroberfläche durch die zahlreichen handgegrabenen Privatbrunnen kann die Grundwasserüberdeckung als Schutz vor einer möglichen Kontamination des Grundwassers jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielen.

- Das „Niayes“ Gebiet zeichnet sich durch einen geringen Flurabstand aus (<2m).

● Eine Darstellung der Bodenstruktur des Arbeitsgebiets in ARC/INFO (s. Abb.74) auf Basis des morphopedologischen Kartenblatters „Presqu'île du Cap-Vert“ (USAID/RSI, 1986) zeigt die folgenden Bodenarten:

- Für das Stadtgebiet gilt eine sandige Bodenstruktur mit einem geringen Tonmineralanteil (< 3%). Dadurch weist die Bodenart im besiedelten Bereich eine hohe hydraulische Durchlässigkeit (Durchlässigkeitsbeiwert mit 3 bis $8 \cdot 10^{-4}$ m/s) auf. Das Areal wird durch einen geringen Flurabstand (< 6 m) charakterisiert. Die vorliegenden Bedingungen führen zu einer hohen Grundwasserneubildung (50 mm/an) in der Zone der Wohngebiete und begünstigt eine Abwasserversickerung aus Haushalten oder dem Straßennetz im Stadtgebiet.

- Der ländliche Raum des Arbeitsgebiets wird von im Niederungen zusammengeschwemmten Bodenarten gekennzeichnet, die zwei Drittel der Fläche des Arbeitsgebiets einnehmen. Die Bodenstruktur enthält einen höheren Tonmineralanteil (bis 20 %). Dadurch sind die geohydraulischen Kennwerte geringer (Durchlässigkeitsbeiwert 0,2 bis $1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s). Der ländliche Raum ist durch einen ungleichmäßigen Flurabstand (bis 16 m im Diender und Beer Thialane) gekennzeichnet. Daher kann eine Verminderung der Abwasserversickerung angenommen werden. Es findet eine geringere Grundwasserneubildung (32 mm/an) statt. Im ländlichen Raum kann aufgrund der offenen Wasseroberfläche durch die handgegrabenen Privatbrunnen der Schutz des Grundwassers durch den Boden vor möglichen Kontamination nur eine untergeordnete Rolle spielen.

● Eine ARC/INFO Verschneidung der Grundwassergleichen des Grundwasserleiters mit der Landnutzungskarte (s. Abb.89) zeigt im Stadtgebiet einen Absenkungstrichter in der Grundwasseroberfläche im Bereich der Brunnen der Wasserversorgung von Dakar. Im Osten dieses Bereiches ist eine Fließrichtung des Grundwasser von Süden nach Norden mit einem Gefälle von ca. 0,4-1 % erkennbar.

Die hohen Nitratkonzentrationen im Stadtgebiet können folgendermaßen erklärt werden:

- Als Folge der Abwasserversickerung aus Haushalten und Straßen
- Durch fehlenden mikrobiologischen Abbau. Wegen der hohen Sauerstoffgehalte
- Durch geringe Verdünnung bzw. geringer Infiltration von Niederschlag
- Durch fehlende Verdünnung bzw. Nitrat Transport aufgrund geringer Fließgeschwindigkeit.

● Eine Darstellung der Nitratbelastung des Thiaroye Grundwasserleiters zusammen mit Informationen über die Landnutzungstypen (s. Abb. 93) veranschaulicht folgende Zusammenhänge:

- Eine hohe flächige Nitratbelastung des Grundwassers besteht im Bereich Thiaroye, Pikine, Guediawaye, Parcelle, Yeumbeul, Malika (100-550 mg/l). Im Vergleich zu den Stadtgebieten liegt die Nitratbelastung in den ländlichen Gebieten niedriger (50-200 mg/l), überschreitet aber auch hier die international gültigen Grenzwerte.

- Niedrige Nitratgehalte des Grundwassers liegen im Bereich der unbewohnten Zone (0-50 mg/l) vor.

Die vorliegenden Informationen über die Grundwasserqualität und die Landnutzungstypen stellen einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Nitratgehalt des Thiaroye Aquifers und der anthropogenen Nutzung her.

- Für die Untersuchung des Einflusses der unterschiedlichen Landnutzungsformen auf die Hydrochemie des ungespannten Thiaroye Aquifer Systems sind die Ergebnisse in Abb. 97 bis 101 dargestellt. Als Erklärungsversuch für die anthropogene Schadstoffbelastung des Grundwassers im besiedelten Bereich wird eine Darstellung des Milieus durch basischemische Parameter durchgeführt:

Die hohe Mineralisation des Grundwassers im urbanen und ländlichen Gebiet ist unter anderem auf die hohe Nitratbelastung des Grundwassers zurückzuführen.

Die niedrigsten pH-Werte wurden im Stadtgebiet gemessen und betragen pH 4 bis 6,9; im ländlichen Raum erreicht der pH 5 bis 7,6. Die Werte liegen damit im sauren Bereich. Der gelöste Sauerstoffgehalt des Grundwassers liegt bei 5,6 bis 8,4 mg/l im Stadtgebiet und 4,4 bis 8 mg/l im ländlichen Raum. Die Meßergebnisse zeigen für beide Bereiche mit wenigen Ausnahmen eine Sättigung mit gelöstem Sauerstoff höher als 7,56 mg/l (30°C).

Die vorliegenden hydrochemischen Bedingungen veranschaulichen, daß keine Nitratreduktion durch Denitrifikationsprozesse stattfinden kann.

- Die Ergebnisse der Untersuchungen des Einflusses unterschiedlicher Landnutzungsformen auf den Stickstoffhaushalt des Sandgrundwasserleiters werden durch eine Sensibilitätskarte für die Nitratbelastung des Thiaroye Aquifers (s. Abb. 102) aufgezeigt.

Für den gesamten Bereich gilt, daß keine ausreichender Schutz durch Deckschichten vorhanden ist, und der Aquifer daher anfällig für Nitrateinträge ist.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen veranschaulichen, daß mit der Kombination von Geo-Informationen-Systemen und hydrogeologischen Methoden eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung erreicht werden kann.

ABSTRACT

This study focused on the Thiaroye unconfined sandy aquifer which belongs hydrogeologically to the Senegalese superficial aquifer system. It encompasses an area of about 300 km² and extends from Dakar to Kayar in the Northwest. The main groundwater quality problem of the Thiaroye aquifer is the diffusive pollution of nitrogen. High nitrate contents (up to 540 mg/l) which affect the water quality in this aquifer is problematic for the utilisation of this resource for the drinking water supply of Dakar, (capital city of Senegal), in the future.

The work carried out in the study aims to assess the vulnerability of the aquifer system with regard to nitrogen contamination and the influence of the land-use on the nitrate content in the groundwater.

A Geographic Information System (PC ARC/INFO Version 3.4D ESRI 1990) was used to analyse all the data needed for this study.

The hydrogeological investigations were aimed to develop a hydrogeological model for the Thiaroye Quaternary sand aquifer. The hydrogeological model is based on the evaluation of the following input data, which were obtained both from this study and from previous works:

- Classification of production wells, dug wells and piezometers;
- Digital topographic data, based on the topographic information of Dakar, Bargny, Kayar (I.G.N Paris/S.G.N Dakar, 1983);
- Spatial distribution of the piezometric head and temporal evolution of the piezometric head during the last several years;
- Depth of water table;
- Aquifer thickness and aquifer bottom;
- Geohydraulic parameters;
- Hydrochemical data, and nitrogen contamination level;
- The Geographic Information System tool coupled with the empirical formula were used to generate a spatial distribution of the recharge (Fig. 73).

Data concerning piezometric heads, geohydraulic parameters and hydrochemical data were statistically and geostatistically analysed for spatialisation.

These data were used as input data for the groundwater water flow model.

The mathematical model was represented by an unconfined aquifer system in a steady state using initial conditions of 1971 and transient state (1971-1997), with 2D linear flow.

The aim of this mathematical model was to verify the parameters defined for the hydrogeological investigation and to predict the piezometric head evolution after the pumping in the production wells (Thiaroye area) is stopped. For this reason the transient state 13 years after stop of pumping was calculated, using mean climatic conditions of the period 1989 - 1997. This period represents relatively dry years compared of the observation period 1985 - 1989 (Fig. 82). This means that the model represents the conservative assumption of relatively low precipitation in the coming years.

The results of the calibration show:

- The heterogeneity of the aquifer system which permeability values range between 0,1 to $10 \cdot 10^{-4}$ m/s;
- The water budget shows that the aquifer system is recharged by the rainwater infiltration and the output from the system is discharge towards the sea and through evaporation in the "NIAYES" areas. The good fit of the model can be judged by comparing the calculated and observed piezometric head for 1997 (fig.85).
- Stop of pumping in the Thiaroye production wells give a maximum rise of 3 m for the piezometric heads at the area between piezometer P3.2 and the Tivaouane Peulh sector (P2-7) in the eastern part of the aquifer. Beyond this area, results show a lowering of the piezometric head due to the rainfall deficit.

To assess the vulnerability of the aquifer system by nitrogen contamination and the influence of the land-use on the nitrate content in the groundwater, a Geographic Information System was used. The analysis is based on the evaluation of the following input data:

- The land-use map (Fig.65), which was produced from a satellite image SPOT(XS+P) dated 23.12.1995. This was used to identify various sources of pollution on the surface. The results clearly indicate the existence of three sources of pollution in the Thiaroye area:

Habitation:

An urban habitation which is characterised by the agglomeration zones with a population estimated today at more than 1 000 000 habitants (population density of 4000 per km²). This area includes settlements in Thiaroye, Pikine, Boun, Malika, Yeumbeul, Keur Massar, Parcelles, Guediawaye.

A rural habitation with a less important anthropogenic pressure on the area with a population of about 700 000 habitants (population density of 600 per km²). This area includes villages and locality from Keur Massar up to Diender.

Street network

The study indicates that the city street-network have also their own pollution contribution in the aquifer on the agglomeration zone.

Landfill

The landfills for Dakar city is located in Malika (Mbeubeus), NE of Dakar seems to be also another source of pollution for the aquifer in the area.

Moreover, the Thiaroye area includes uninhabited zones covered by the sand dunes, agricultural areas and the "Niayes" (lowlands with shallow groundwater).

- The soil type and thickness of the unsaturated zone determine the leaching process of nitrates from ground level to the water table. The distribution of the water table depth show that the phreatic aquifer has a depth of less than 6 m in the urban agglomeration zones. The maximum depth is located in the Beer-Thialane and Diender areas with more than 16 m (Fig.90).

The soil types are characterised by Quaternary dunes sands with high permeability. This explains why the infiltration process is fast.

- The piezometric surface of the groundwater allows to determine the direction of the groundwater flow in aquifer.
- The extension of the contamination in the aquifer is shown by the results of hydrochemical analysis. It is the result of the water-quality analyses of representative wells and bore holes. The concentrations of nitrate detected in the Thiaroye aquifer exceed by far the drinking water standards.

The statistical analysis of the nitrate values show an irregular distribution in the aquifer. This is explained by the point sources nature of contamination which are located on the surface. The graphical illustration by Box-plots of the nitrate values (Fig.101) depending on the land-use types give high nitrate concentrations occur in the agglomeration areas. In rural areas the nitrate concentration reach 340 mg/l, in the agglomeration areas up to 540 mg/l.

Because of the generally low nitrate concentrations in the unhabitated zones, the groundwater quality is found to meet the drinking water standard. The mean values in the sand dunes areas are 26 mg/l; 12 mg/l in the Niayes zones and 4,5 mg/l in the agricultural zones, where the groundwater is protected by a thick unsaturated zone.

The assessment of the land-use influence on the nitrate contents of the aquifer based on the the Geographic Information System allowed to produce a vulnerability map of the Thiaroye aquifer (Fig.102). This map clearly demonstrates that the aquifer system is vulnerable to pollution since there is no real protective cover overlaying the aquifer.

This study demonstrated that a combined approach of the conventional hydrogeological methods and a Geographical Information System investigation helps for a better management of the water ressource.

RESUMÉ

La nappe libre des sables quaternaires de Thiaroye, objet de cette étude, appartient au système aquifère superficiel du bassin sénégalais. L'état de dégradation actuel dû à la contamination par les nitrates des eaux de cette nappe met en cause son utilisation future pour l'alimentation en eau potable de l'agglomération dakaroise. L'objectif de ce travail est de contribuer à la connaissance de cette contamination qui s'est révélée essentiellement anthropique. Un système d'information géographique (ARC/INFO) est utilisé pour l'analyse des données nécessaires à la détermination de l'influence de l'occupation des sols sur la qualité des eaux souterraines et de la vulnérabilité du système aquifère à la pollution azotée, pour une gestion des ressources hydriques.

L'étude hydrogéologique a permis de faire une bonne caractérisation du système. Cette caractérisation concerne aussi bien les données obtenues dans le cadre de ce travail que celles reprises des travaux antérieurs. Ces données sont relatives à la topographie de la zone, la piézométrie temporelle et spatiale de la nappe, la profondeur des eaux par rapport au sol, la géométrie de l'aquifère, aux paramètres hydrodynamiques de la nappe et aux données hydrochimiques.

Le bilan hydrique de la nappe obtenu à partir des formules empiriques de ALBRECHT, TURC, THORNTHWAITE, PENMAN et des données climatiques de la Presqu'île du Cap-Vert a permis de calculer les recharges. L'application du système d'information géographique a permis de définir les surfaces d'évaporation et de spatialiser les valeurs de recharge. Les résultats représentés sous forme de carte de recharge, montrent des valeurs comprises entre 32 et 50 mm/an.

Les méthodes de statistique descriptive (histogrammes, box-plot) et de géostatistique (vario-grammes et krigeage) ont permis la régionalisation des données suivantes: les charges piézométriques, les paramètres hydrodynamiques et les données hydrochimiques. Ces données sont introduites comme données d'entrée dans le modèle hydrodynamique.

Le modèle conceptuel est représenté par une nappe monocouche à écoulement bidimensionnel, soumis à un régime transitoire depuis 1971. Le modèle est d'abord calibré en régime permanent en 1971 puis en régime transitoire de 1971 à 1997. Le modèle a ensuite servi pour simuler l'arrêt des pompages dans le centre de Thiaroye. Les résultats de la calibration mettent en évidence:

- l'hétérogénéité du système avec des perméabilités variant entre 0,1 et $10 \cdot 10^{-4}$ m/s;
 - la distribution des charges piézométriques calculées en 1997 est bien représentative de l'état de référence. L'évolution des courbes piézométriques calculées et mesurées sur le terrain au niveau des points témoins, montre une concordance des fluctuations de la nappe.
- Le bilan hydrique révèle que la nappe s'alimente essentiellement par infiltration des eaux de pluie et se décharge par pompage, par écoulement vers la mer et par évaporation dans les Niayes.
- avec l'arrêt des pompages dans le centre de Thiaroye, on observe une remontée maximale de 3 m du niveau de la nappe dans le secteur au droit du piézomètre P3.2. L'influence de l'arrêt des pompages est observée jusqu'à Tivaouane Peulh au Nord-Est de Thiaroye, où les niveaux piézométriques observés sont restés relativement stables au piézomètre P2-7. Au delà de cette zone, notamment dans le Sud-Est de la nappe, on n'a aucune influence sur les ni-

veaux piézométriques, sinon on observe une baisse piézométrique qui peut être liée aux conditions climatiques imposées avec le déficit pluviométrique.

L'analyse de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les nitrates est basée sur l'évaluation et l'intégration des données suivantes:

- les sources de pollution de surface, quantifiées sur une carte d'occupation des sols. L'image satellitaire SPOT (XS+P) de la zone d'étude a été utilisée dans le SIG pour établir cette carte. Elle nous a permis de définir une zone à habitat urbain, une zone à habitat rural, les Niayes, les dunes, les zones d'activités maraîchères, un réseau routier distinct et le dépôt de Mbeubeuss.
- les propriétés intrinsèques de la zone non saturée, la typologie des sols, l'épaisseur de la zone non saturée;
- l'hydrodynamisme de la nappe, qui permet de définir les écoulements dans la zone saturée;
- une étude hydrochimique a montré l'extension de la pollution sur la nappe.

L'analyse statistique des valeurs de nitrates obtenues sur la nappe révèle une distribution spatiale très irrégulière, qu'on peut expliquer par les sources de pollution ponctuelles identifiées à la surface. La représentation graphique en Box-plot des concentrations en nitrates en fonction des types d'occupation de sols montre une forte corrélation entre l'état de contamination des eaux et la présence humaine. Les fortes valeurs en nitrates sont observées dans la zone d'agglomération pouvant atteindre 547 mg/l et dans les villages et localités avec 100 mg/l en moyenne. Les teneurs obtenues dépassent largement les normes OMS de 50 mg/l. Par contre dans les zones inhabitées, les eaux de la nappe sont de qualité meilleure avec des concentrations qui sont de 26 mg/l en moyenne dans les zones dunaires, 12 mg/l dans les Niayes, et 4,5 mg/l dans les zones d'activités maraîchères.

Les résultats de cette étude ont permis de définir une carte de vulnérabilité du système aquifère de Thiaroye à la contamination par les nitrates. Cette carte montre une zone de forte vulnérabilité caractérisée par des sources de pollution et où toutes les conditions sont favorables au lessivage des nitrates de la surface à la zone saturée, une zone de sensibilité moindre où les caractéristiques de la zone non saturée peuvent déterminer une certaine protection de la nappe et une zone de faible sensibilité avec une protection nettement meilleure.

SOMMAIRE

VORWORT	
ZUSAMMENFASSUNG	
ABSTRACT	
RESUME	
LISTE DES FIGURES	
LISTES DES TABLEAUX	
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I: SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES – PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE	
I. LA PRESQU'ÎLE DU CAP-VERT: CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE.....	
5	
1. Cadre géographique.....	5
2. Géologie.....	9
3. Hydrogéologie.....	17
4. Qualité des eaux.....	21
5. Rôle de l'aquifère dans l'alimentation en eau potable de la ville de Dakar et dans les activités maraîchères de la région.....	29
II. PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE – METHODOLOGIE ET OUTILS UTILISÉS.....	
30	
1. Problématique de l'étude.....	30
2. Méthodologie et outils utilisés.....	30
PARTIE II: ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DU SYSTÈME AQUIFÈRE DE THIAROYE: ACQUISITION TRAITEMENT DES DONNÉES-RESULTATS ET ANALYSES CRITIQUES	
I. ACQUISITION DES DONNÉES DE 'ÉTUDE.....	
48	
1. Données de terrain.....	48
2. Données chimiques au laboratoire.....	49
3. Données Géographiques.....	50
II. TRAITEMENT - INTERPRÉTATION DES DONNÉES - PRÉSENTATION DES RESULTATS ET ANALYSES CRITIQUES.....	
51	
1. Géométrie et paramètres hydrodynamiques.....	51
2. Piézométrie et bathymétrie de la nappe.....	54
3. Hydrochimie et pollution.....	78
PARTIE III: APPLICATION D'UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE POUR LA MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS ET L'ÉTUDE DE LA VULNÉRABILITÉ À LA CONTAMINATION PAR LES NITRATES	
I CARTOGRAPHIE THÉMATIQUE DANS LE SIG.....	
99	
1. Carte thématique d'occupation des sols.....	99
2. Carte de localisation des Niayes et lacs: Surface d'évaporation.....	104
3. Détermination du bilan hydrique: Elaboration d'une carte de recharge dans le SIG.....	106
4. Carte de typologie des sols.....	120
5. Cartographie thématique des données hydrogéologiques.....	122
II. MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE DU SYSTÈME AQUIFÈRE DE THIAROYE.....	
124	
1. Généralités.....	124

2. Définition du modèle conceptuel.....	125
3. Paramètres d'entrées.....	127
4. Calage en régime permanent.....	131
5. Calage en régime transitoire.....	137
6. Simulation de l'arrêt des pompages dans la zone de Thiaroye.....	152
III. DETERMINATION DE LA VULNERABILITE DU SYSTEME AQUIFERE DE THIAROYE A LA CONTAMINATION AZOTEE.....	157
1. Introduction.....	157
2. Détermination des sources de pollution de la nappe.....	157
3. Définition des conditions géologiques et hydrogéologiques.....	159
4. Typologie des sols.....	161
5. Spatialisation des valeurs de perméabilités et de recharge.....	164
6. Qualité des eaux.....	167
7. Détermination de la vulnérabilité du système aquifère de Thiaroye.....	177
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....	182
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	185
ANNEXES	186

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1: Localisation de la zone d'étude
- Fig. 2: Carte pluviométrique de Dakar et Thiès établie avec les moyennes annuelles de 1971 à 1996
- Fig. 3: Températures moyennes mensuelles à Dakar-Yoff et Thiès (1960-1990)
- Fig. 4: Direction des vents au sol dans la presqu'île du Cap-vert
- Fig. 5: Carte géologique schématique de la presqu'île du Cap-vert
- Fig. 6: Carte de localisation des formations tertiaires et quaternaires dans la presqu'île du Cap-Vert et les affleurements tertiaires du Sud de Dakar
- Fig. 7 (a): Coupe géologique Ouest-Est des formations géologiques dans l'isthme de Thiaroye
- Fig. 7 (b): Coupe géologique Nord-Sud des formations géologiques au niveau de Thiaroye/Mer
- Fig. 8: Carte hydrogéologique du Sénégal
- Fig. 9: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: Carte d'extension des sables de localisation des ouvrages et coupes hydrogéologiques
- Fig. 10: Coupes hydrogéologiques réalisées sur la nappe des sables quaternaires de Thiaroyes
- Fig. 11: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: Carte piézométrique de février 1971
- Fig. 12: Carte hydrochimique de la presqu'île du Cap-Vert
- Fig. 13: Nappe des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: Carte des résidus secs établie en octobre 1989
- Fig. 14: Dynamique de l'azote dans la zone non saturée et les eaux souterraines selon Obermann
- Fig. 15: Schéma conceptuel de la méthodologie de l'étude
- Fig. 16: Structuration de la couverture dans ARC/INFO
- Fig. 17: Définition des paramètres du variogramme
- Fig. 18: Les différents modèles de variogrammes selon RENDU (1978)
- Fig. 19: Les tolérances $\pm d$ définies sur la distance et $\pm \Delta\psi$ sur la direction pour le calcul d'un semi-variogramme
- Fig. 20: Principe de la méthode des différences finies
- Fig. 21: Image satellitaire de la zone d'étude
- Fig. 22: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: morphologie du substratum marneux
- Fig. 23: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: épaisseurs des sables aquifères
- Fig. 24: Carte topographique de la presqu'île du Cap-Vert
- Fig. 25: Rabattement observé en fonction du temps au piézomètre P2-8
- Fig. 26: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: cartes des transmissivités
- Fig. 27: Courbe de variations piézométriques interannuelles et de l'évolution des précipitations au niveau du piézomètre P2-1
- Fig. 28: Courbe de variations piézométriques interannuelles et de l'évolution des précipitations au niveau du piézomètre PS-10
- Fig. 29: Variogramme calculé à partir des données de juillet 1997 à la direction 105°
- Fig. 30: Variogramme calculé à partir des données d'octobre 1997 à la direction 105°
- Fig. 31: Variogramme calculé à partir de la piézométrie moyenne de 1984-1997 à la direction 105°
- Fig. 32: Résultat de l'analyse de validation du variogramme obtenu des mesures de juillet 1997
- Fig. 33: Résultat de l'analyse de validation du variogramme obtenu des mesures d'octobre 1997

- Fig.34: Résultat de l'analyse de validation du variogramme obtenu de la moyenne piézométrique de 1984-1997
- Fig.35: Carte de variance d'estimation des charges piézométriques de juillet 1997
- Fig.36: Carte de variances d'estimation des charges piézométriques d'octobre 1997
- Fig.37: Carte de variance d'estimation des charges piézométriques moyennes de 1984 à 1997
- Fig.38: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: carte piézométrique de juillet 1997
- Fig.39: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: carte piézométrique moyenne de juillet 1987
- Fig.40: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: carte piézométrique d'octobre 1997
- Fig.41: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: carte d'évolution piézométrique de 1971 à 1997
- Fig.42: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: carte de la profondeur de l'aquifère par rapport au sol
- Fig.43: Histogramme des conductivités électriques mesurées sur la nappe
- Fig.44: Histogramme des températures mesurées sur la nappe
- Fig.45: Histogramme des valeurs de pH mesurées sur la nappe
- Fig.46: Evolution des paramètres physico-chimiques sur la nappe durant le pompage au piézomètre P2-3 (19. 06. 1997)
- Fig.47: Evolution des paramètres physico-chimiques sur la nappe durant le pompage au piézomètre P2-5 (19. 06. 1997)
- Fig.48: Evolution des paramètres physico-chimiques sur la nappe durant le pompage au piézomètre P2-10 (19. 06. 1997)
- Fig.49: Evolution des paramètres physico-chimiques sur la nappe au piézomètre P2-2 (juin/octobre 1997)
- Fig.50: Evolution des paramètres physico-chimiques sur la nappe au piézomètre P2-5 (juin/octobre 1997)
- Fig.51: Evolution des paramètres physico-chimiques sur la nappe au piézomètre P2-7 (juin/octobre 1997)
- Fig.52: Evolution des paramètres physico-chimiques sur la nappe au piézomètre P2-9 (juin/octobre 1997)
- Fig.53: Classification des eaux de la nappe de Thiaroye sur un diagramme de Piper
- Fig.54: Evolution hydrochimique de l'aquifère au piézomètre P2-9
- Fig.55: Niveau de la contamination anthropique des eaux dans la nappe de Thiaroye
- Fig.56: Histogramme des concentrations en nitrates en juillet 1997
- Fig.57: Histogramme des concentrations en nitrates en octobre 1997
- Fig.58: Variogramme calculé sur la direction N-S avec les concentrations en nitrates de juillet 1997
- Fig.59: Variogramme calculé sur la direction N-S avec les concentrations en nitrates d'octobre 1997
- Fig.60: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: carte de contamination des eaux par les nitrates (juillet 1997)
- Fig.61: Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane: carte de contamination des eaux par les nitrates (octobre 1997)
- Fig.62: Histogramme des valeurs d'oxygène dissous mesurées sur la nappe
- Fig.63: Histogramme des concentrations en ammonium mesurées sur la nappe
- Fig.64: Histogramme des concentrations en nitrite mesurées sur la nappe
- Fig.65: Carte d'occupation des sols dans la presqu'île du Cap-Vert
- Fig.66: Carte de localisation des Niayes et lacs dans la presqu'île du Cap-Vert définie dans ARC/INFO

- Fig.67: Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après Albrecht et de la recharge à la station de DAKAR-YOFF (1984-1996)
- Fig.68: Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après Albrecht et de la recharge à la station de MBAO (1984-1996)
- Fig.69: Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après Albrecht et de la recharge à la station de PIKINE (1984-1996)
- Fig.70: Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après Albrecht et de la recharge à la station de HANN (1984-1996)
- Fig.71: Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après Albrecht et de la recharge à la station de BAMBILOR (1984-1996)
- Fig.72: Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après Albrecht et de la recharge à la station de KAYAR (1984-1996)
- Fig.73: Carte des valeurs de recharge calculées dans ARC/INFO d'après le bilan hydrique de la nappe
- Fig.74: Carte de typologie des sols dans la presqu'île du Cap-Vert
- Fig.75: Maillage et conditions aux limites de la zone du modèle
- Fig.76: Histogramme des valeurs logarithmiques des K
- Fig.77: Variogramme expérimental des valeurs de K mesurées sur le terrain suivant la direction $0^\circ (\Delta\psi \pm 30^\circ)$
- Fig.78: Distribution des valeurs de perméabilité mesurées sur l'aquifère
- Fig.79: Conductivités hydrauliques de l'aquifère d'après le calage du modèle en régime permanent
- Fig.80: Distribution des charges piézométriques mesurées et calculées en Février 1971
- Fig.81: Evolution des niveaux piézométriques de la nappe de Thiaroye au niveau de quelques points témoins
- Fig.82: Les précipitations annuelles enregistrées dans la presqu'île du Cap-Vert (1976-1997)
- Fig.83: Débits exploités sur la nappe au niveau des forages de Thiaroye et Beer Thialane (1971-1997)
- Fig.84: Carte de localisation des Niayes et lacs dans le domaine du modèle dans ARC/INFO
- Fig.85: Distribution des charges piézométriques moyennes mesurées et calculées en 1997
- Fig.86: Evolution piézométrique de la nappe de Thiaroye sur quelques points témoins (1976-1997)
- Fig.87: Carte piézométrique calculée à l'an 2010 après un arrêt des pompages dans le centre de captage de Thiaroye
- Fig.88: Evolution piézométrique de la nappe sur quelques points témoins après un arrêt des pompages dans le centre de captage de Thiaroye (1997-2010)
- Fig.89: Nappe libre des sables quaternaires de Thiaroye: Carte piézométrique moyenne de 1997 et d'occupation des sols
- Fig.90: Nappe libre des sables quaternaires de Thiaroye: Carte piézométrique de profondeur de la nappe et d'occupation des sols
- Fig.91: Carte de typologie des sols en rapport avec la profondeur de la nappe et l'occupation des sols
- Fig.92: Carte des valeurs de perméabilités et de recharge en rapport avec les types de sol
- Fig.93: Les types d'eau définis dans l'aquifère de Thiaroye
- Fig.94: Carte des teneurs en nitrates en octobre 1997 et d'occupation des sols
- Fig.95: Carte des teneurs en nitrates en octobre 1997 et de la piézométrie
- Fig.96: Carte des teneurs en nitrates en octobre 1997 et de la profondeur de la nappe par rapport au sol
- Fig.97: Conductivité électrique donnée sur la nappe en fonction de l'occupation des sols
- Fig.98: Température donnée sur la nappe en fonction de l'occupation des sols

Fig. 99: pH donnée sur la nappe en fonction de l'occupation des sols

Fig. 100: Oxygène dissous donnée sur la nappe en fonction de l'occupation des sols

Fig. 101: Teneurs en nitrates donnée sur l'aquifère en fonction de l'occupation des sols

Fig. 102: Carte de vulnérabilité des eaux à la contamination par les nitrates

LISTE DES TABLEAUX

- Tabl. 1: Humidités relatives moyennes mensuelles à Dakar-Yoff (1986-1996)**
- Tabl. 2: Les teneurs en nitrates des forages de Thiaroye de Mars 1988 à octobre 1997**
- Tabl. 3: Les différentes campagnes et mesures effectuées sur la nappe de Thiaroye**
- Tabl. 4: Valeurs de transmissivité, de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement obtenues par différentes méthodes**
- Tabl. 5: Etude comparative des résultats obtenus avec ceux de géohydraulique 1972**
- Tabl. 6: Résultats de l'analyse des variogrammes estimés à partir des charges piézométriques**
- Tabl. 7: Codification des différentes unités définies dans ARC/INFO**
- Tabl. 8: Données statistiques sur la surface (km²) des unités considérées dans ARC/INFO**
- Tabl. 9: Calcul de la moyenne mensuelle de l'Etréelle (mm) et des réserves du sol à Dakar-Yoff pour la période 1984-1996**
- Tabl. 10: Evapotranspiration moyenne annuelle calculée d'après différentes méthodes à la station de Dakar-Yoff pour la période 1984-1996**
- Tabl. 11: Evapotranspiration moyenne annuelle calculée d'après différentes méthodes à la station de Dakar-Yoff pour la période 1984-1996**
- Tabl. 12: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de Dakar-Yoff (1984-1996)**
- Tabl. 13: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de Mbao (1984-1996)**
- Tabl. 14: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de Pikine (1984-1996)**
- Tabl. 15: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de Hann (1984-1996)**
- Tabl. 16: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de Bambilor (1984-1996)**
- Tabl. 17: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de Kayar (1984-1996)**
- Tabl. 18: Données pour la caractérisation et la construction d'un modèle**
- Tabl. 19: Bilan global des débits sur la nappe (Régime permanent)**
- Tabl. 20: Bilan des débits calculés dans le bassin versant de Thiaroye (Régime permanent)**
- Tabl. 21: Localisation des prélèvements de la SONEES dans le modèle conceptuel**
- Tabl. 22: Les valeurs d'évapotranspiration calculées dans ARC/INFO**
- Tabl. 23: Les valeurs de recharge calculées dans ARC/INFO selon les stations climatiques**
- Tabl. 24: Comparaison des charges piézométriques calculées et celles moyennes de 1997 mesurées sur les points témoins**
- Tabl. 25: Bilan global des débits sur la nappe (Régime transitoire)**
- Tabl. 26: Bilan des débits calculés dans la zone de Thiaroye (Régime transitoire)**
- Tabl. 27: Bilan des débits calculés dans la zone de MBeubeuss (Régime transitoire)**
- Tabl. 28: Bilan des débits calculés dans le Sud-Est du bassin de Kounone à Golame (Régime transitoire)**
- Tabl. 29: Bilan des débits calculés dans la zone de Thiaroye (Arrêt des pompages)**
- Tabl. 30: Bilan global des débits sur la nappe (Arrêt des pompages)**
- Tabl. 31: Analyse statistique de quelques propriétés physiques et chimiques définies sur la nappe**

INTRODUCTION

Dakar, capitale du Sénégal, compte aujourd'hui près de 2 millions d'habitants, et 3/4 de cette population vit dans la banlieue. L'urbanisation spontanée et non contrôlée qui est observée depuis quelques années pose un problème environnemental majeur dans le secteur. Devant cette situation, les autorités ne peuvent plus assurer les infrastructures urbaines nécessaires devant accompagner l'accroissement démographique. Cette insuffisance, avec en particulier le défaut d'assainissement dans les nouveaux quartiers a conduit les populations, dans le secteur à rejeter directement les déchets solides et eaux usées domestiques dans la nature. Ce défaut d'assainissement combiné avec la construction anarchique des fosses sans aucune garantie des qualités septiques représentent une source de pollution majeure des eaux souterraines dans les zones d'agglomération.

Depuis 1989, des études ont montré l'état de contamination par les nitrates de la nappe des sables quaternaires de Thiaroye (Fig.1) (COLLINS & SALEM, 1989; GAYE *et al.*, 1989; SONEES, 1989; FALL, 1991; TANDIA, 1997). Dans différents secteurs de la nappe, notamment dans le bassin versant de Thiaroye et au niveau de certaines localités, de fortes concentrations en nitrates pouvant atteindre jusqu'à 500 mg/l ont été décelées.

L'état actuel de la contamination de la nappe par les nitrates fait que son utilisation pour les besoins en eau potable de la ville de Dakar, est aujourd'hui compromise. La nappe mise en exploitation depuis 1950 par puits traditionnels et puisards dans les localités mal desservies en eau courante assure une bonne partie des besoins en eau de la population locale. Vue la dégradation de la qualité des eaux sur la nappe, son utilisation privée et non contrôlée implique une menace réelle sur la santé des populations.

Ce présent travail qui rentre dans ce contexte a pour objectif principal d'étudier la pollution azotée, et la vulnérabilité de la nappe. Il vise à identifier les sources de pollution définies en zones urbaine et rurale et en zones agricoles en rapport avec l'hydrodynamisme de la nappe. Les objectifs spécifiques sont:

- de définir les caractéristiques hydrodynamiques et hydrochimiques de la nappe;
- d'élaborer dans un Système d'Information Géographique une cartographie thématique avec les données de la nappe et aussi avec les données géographiques;
- de développer un modèle hydrodynamique de la nappe;
- et enfin de coupler les informations du SIG avec les résultats de l'étude hydrogéologique pour établir la vulnérabilité du système aquifère à la contamination par les nitrates.

Cette étude qui a été élaborée à l'IAAG (Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie) de l'université de Munich avec l'aide financière du DAAD (Deutscher Akademischer Austauschdienst) s'est déroulée en 4 phases:

- une phase d'acquisition des données de base pour le modèle et le SIG. Cette phase s'est déroulée en deux étapes: une campagne de terrain où des mesures piézométriques, pompages d'essai et d'échantillonnage ont été effectués et l'étape de laboratoire où les analyses chimiques ont été effectuées sur les échantillons prélevés;
- une phase de traitement et de synthèse des données. Cette phase consiste d'abord en une exploitation des données géométriques, hydrogéologiques et hydrochimiques. Les méthodes statistiques et géostatistiques ont permis le traitement des charges piézométriques, des valeurs de perméabilité et des données chimiques. La carte d'occupation des sols est élaborée à partir des images satellitaires SPOT (XS & P) de Dakar et du lac Retba;
- une phase d'élaboration du modèle hydrodynamique avec un calage en régime permanent et transitoire et une simulation de l'arrêt des pompages à Thiaroye.

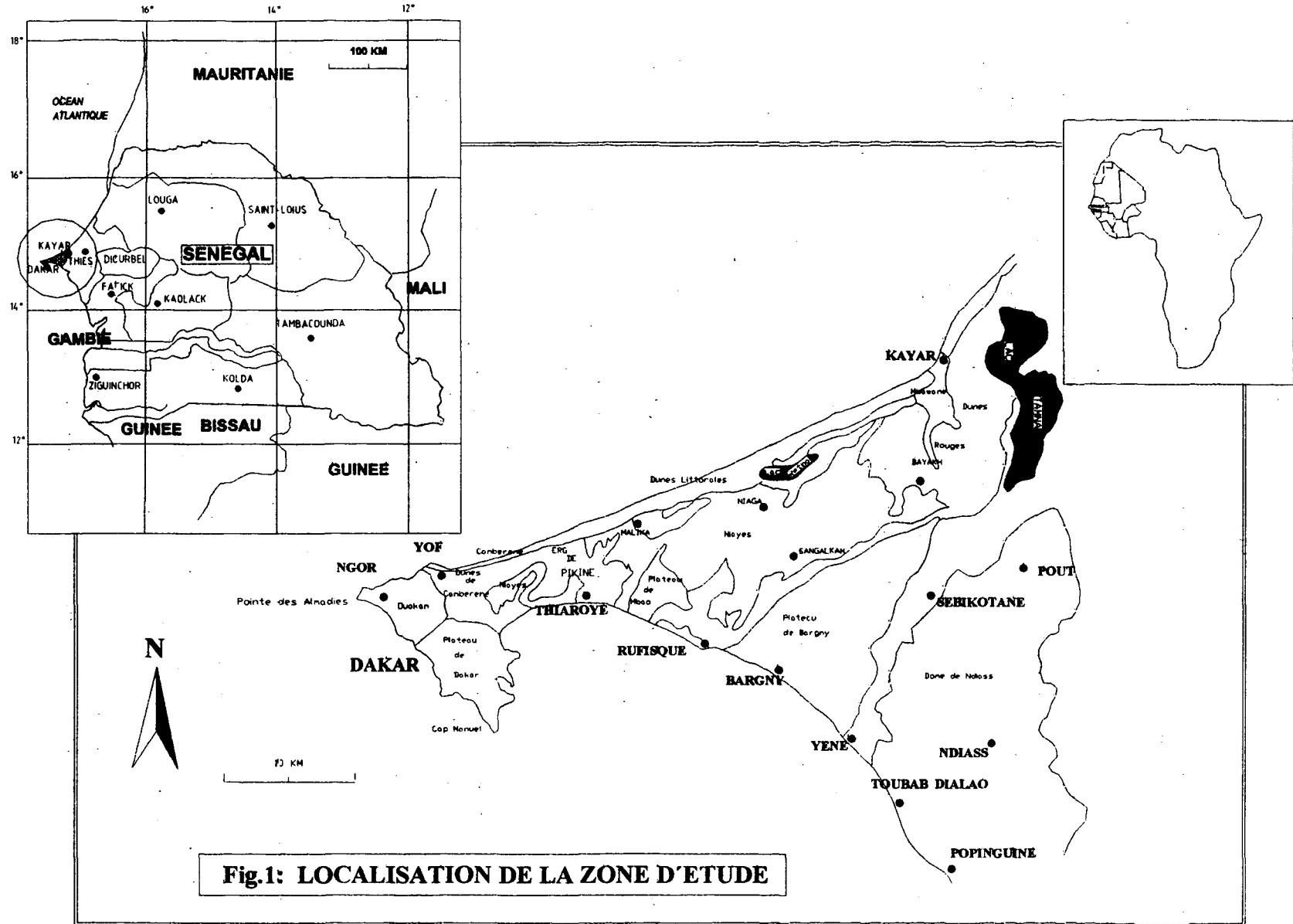


Fig.1: LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE

- et une phase d'interprétation sur la vulnérabilité de la nappe.

Le document comporte trois parties:

Partie I: Synthèse des connaissances-problématique de l'étude.

Elle est consacrée à la présentation générale de la zone d'étude. Une revue sur la climatologie, la géologie et l'hydrogéologie a été effectuée sous forme de synthèse des connaissances sur le système aquifère de Thiaroye. Elle présente également le problème de la qualité des eaux, et la pollution par les nitrates.

Dans cette partie, nous avons défini la démarche méthodologique et l'acquisition des données de l'étude. Elle a permis de faire une présentation du logiciel de SIG qui est utilisé, (**PC ARC/INFO version 3.4D ESRI 1990**).

Partie II: Etude hydrogéologique du système aquifère de Thiaroye: acquisition et traitement des données – résultats et analyse critique.

Cette partie a permis de faire une caractérisation du système aquifère de Thiaroye et une ré-actualisation de l'état de contamination de la nappe par les nitrates. Les données d'entrée du modèle (charges piézométriques, paramètres hydrodynamiques et hydrochimiques) ont été distribuées spatialement en utilisant les méthodes statistiques et géostatistiques.

Partie III: Application d'un système d'information géographique pour la modélisation des écoulements et l'étude de la vulnérabilité à la contamination par les nitrates.

Cette dernière partie comporte trois chapitres:

- une cartographie thématique dans le SIG sur les données d'occupation des sols, les données hydroclimatologiques pour l'élaboration du bilan hydrique du système aquifère, les données sur la typologie des sols et les données de l'étude hydrogéologique;
- l'élaboration d'un modèle hydrodynamique, basé sur la méthode des différences finies utilisant les logiciels **MODFLOW** (Mc DONALD & HARBAUGH, 1988) et le processeur **PM 3** (CHIANG & KINZELBACH, 1993), la présentation des résultats de la phase de calage et de simulation d'un arrêt de pompage dans la zone de Thiaroye;
- définir la vulnérabilité du système aquifère des sables quaternaires de Thiaroye à la pollution des nitrates, sur la base du Système d'Information Géographique.

PARTIE I:

SYNTHESE DES CONNAISSANCES – PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

I. LA PRESQU'ILE DU CAP-VERT: GEOGRAPHIE ET STRUCTURE GEOLOGIQUE

1. CADRE GEOGRAPHIQUE

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

Dans ce chapitre, nous allons surtout présenter la climatologie de la région, et la géographie physique.

1 hydroclimatologie

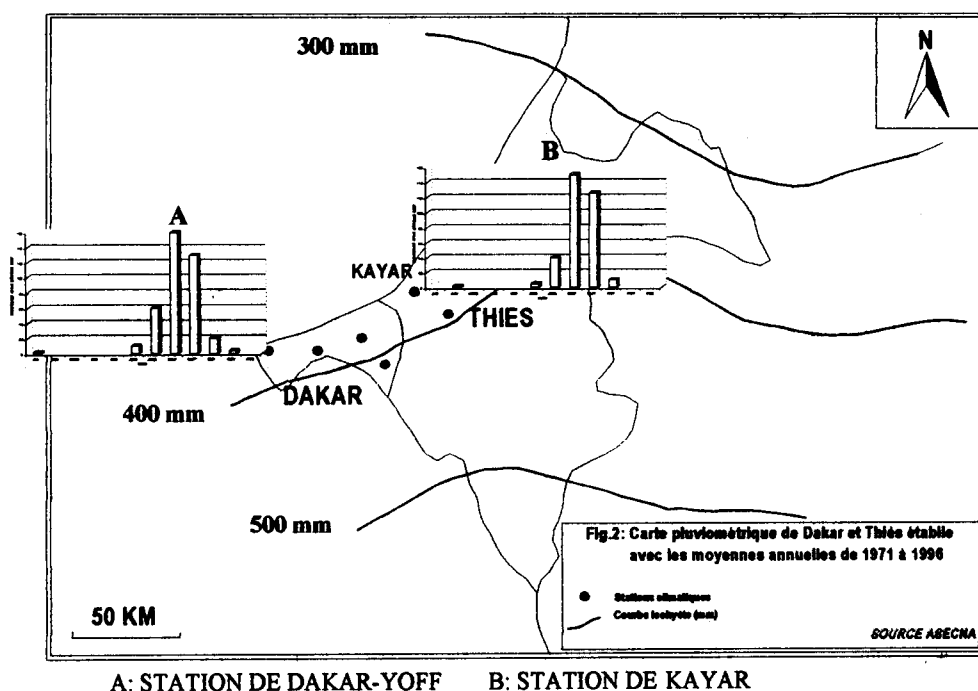
Par sa position géographique, la presqu'île du Cap-Vert d'après, LEROUX (1980) in E. GIBERT (1986) se situe dans la zone soudano-sahélienne. Elle présente un régime climatique particulier dû aux influences à la fois sahariennes et océaniques

1.1 La pluviométrie

La zone est caractérisée par une seule saison des pluies (hivernage) qui dure de juin à octobre et une longue saison sèche. La pluviométrie moyenne relevée à Dakar pour une période de 30 ans (1950 - 1979) est de 517,4 mm.

1.1.1 La distribution spatiale

La distribution spatiale de la pluviométrie à Dakar et Thiès est représentée sur la carte des isohyètes (Fig.2). Cette carte établie sur moyenne de 25 ans (1971-1996), montre un gradient de la pluviosité qui diminue du Sud (500 mm) vers le Nord (300 mm).



1.1.2 Variabilité interannuelle :

Les précipitations annuelles relevées au niveau des stations de Dakar-Yoff et Kayar (Fig.2 A et B) montrent une variabilité temporelle des pluies dans la zone. Les mois de juillet, août et septembre sont considérés comme humides avec le mois d'août plus pluvieux recevant jusqu'à 44% des pluies.

De faibles précipitations peuvent toutefois être enregistrées en dehors de cette période hivernale. Ces précipitations ou pluies de "Heug" sont faibles, irrégulières, pour participer à la recharge de la nappe.

L'évolution des précipitations annuelles sur différentes stations de la presqu'île du Cap-Vert durant ces dernières années est présentée dans le chapitre du bilan.

1.2 La température

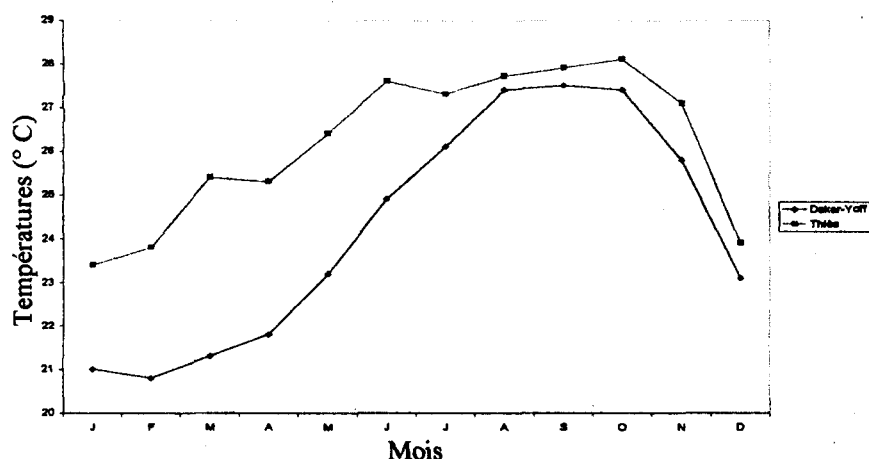


Fig.3: Températures moyennes mensuelles à Dakar-Yoff et Thiès (1961-1990)

Les températures moyennes mensuelles enregistrées (Fig.3) à Dakar-Yoff et à Thiès (70 km à l'Est de Dakar) sur la période de 1961 à 1990 (ASECNA) montrent l'influence régulatrice de la mer sur le régime thermique à Dakar. L'évolution des températures est comparable à celle des précipitations.

Les moyennes de température ainsi établies nous permettent de distinguer une saison fraîche de novembre à mai et une saison plus chaude durant l'hivernage.

1.3 L'humidité relative

Les valeurs d'humidité relative enregistrées dans la presqu'île du Cap-Vert (tableau ci-dessous) sont dans l'ensemble très élevées, elles sont comprises entre 91% et 60%.

Ces valeurs élevées sont dues à la permanence de l'alizé maritime dans la zone pendant la saison sèche.

Tableau 1: Humidités relatives moyennes mensuelles à Dakar-Yoff (1986-1996)

MOIS	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy.
H.R _M (%)	96	91	92	92	91	90	88	89	93	91	89	90	91
H.R _m (%)	68	67	65	65	66	68	68	70	73	66	60	68	60

Source ASECNA

1.4 L'évaporation

Les valeurs d'évaporation obtenues à partir des données de l'ASECNA à la station de Dakar-Yoff ont été mesurées à l'évaporomètre Piche. Les résultats montrent une moyenne annuelle de 1168 mm pour la période 1960 - 1996. Les plus fortes valeurs sont observées aux mois de janvier, février, novembre et décembre, qui ne correspondent pas aux mois les plus chauds; alors que les faibles valeurs sont enregistrées pendant l'hivernage.

1.5 Régime des vents

Les données relatives au régime des vents au sol (Fig.4) font apparaître que la presqu'île du Cap-Vert est soumise à des vents d'origine et de direction variable selon les saisons. Les vents du Nord dominant et soufflent en permanence. Mais durant la période allant de juin à octobre, en plus des vents du Nord, s'ajoutent ceux de direction Sud. Les vents du Nord sont les alizés et se subdivisent en deux classes:

1.5.1 L'alizé continental

C'est l'harmattan issu des dorsales sahariennes et maghrébines. Ce vent chaud et sec est plus important à l'intérieur du pays.

1.5.2 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-tropical.

De juin à octobre, les vents de direction Sud dominant les vents du Nord, entraînant ainsi le déplacement du front intertropical (FIT). C'est la mousson issue de l'anticyclone de Saint-Hélène qui souffle durant l'hivernage.

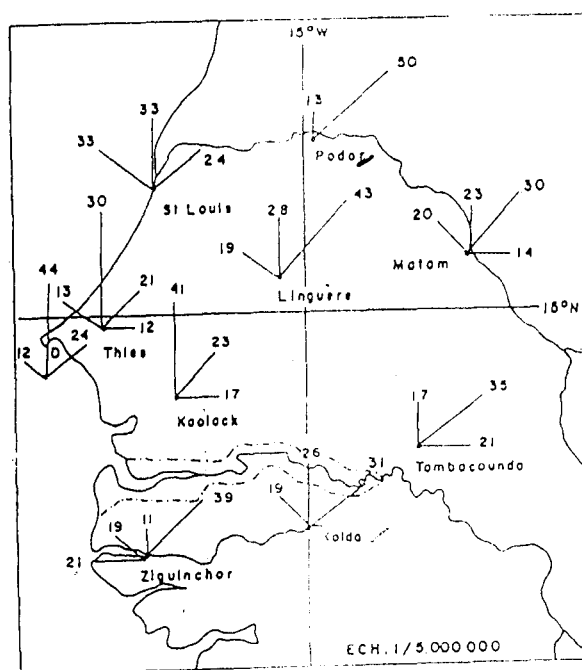


Fig.4: Direction des vents au sol dans la Presqu'île du Cap-Vert.

2. Géographie Physique

2.1 La géomorphologie

La zone d'étude est caractérisée par de longs alignements de dunes orientés NE-SW. Ce modelé sableux peu accidenté, a son point culminant (43 m) au niveau du château d'eau de Camberène (HEBRARD, 1966). On identifie trois grandes unités géomorphologiques:

2.1.1 Les régions côtières

Elles s'étendent de la côte nord ou grande côte à la petite côte sud, avec des systèmes dunaires inhabités.

2.1.2 Les "Niayes"

Ce sont des dépressions interdunaires entre les cordons sableux où la nappe phréatique affleure. Les côtes piézométriques varient entre +2 m à l'ouest de Pikine et +5 m à l'Ouest de Thiaroye (HEBRARD, 1966).

2.1.3 La région des lacs

De Thiaroye à Kayar, tout au long de la côte nord, se singularise un réseau de lacs qui sont les lacs Youi, Warouwaye, Mbeubeuss, Retba et Mbawane. Ce sont des lacs en général salés ou sursalés, qui aujourd'hui en dehors du lac Retba sont asséchés.

2.2 L'hydrographie

A part les lacs identifiés le long de la zone côtière nord, il n'y a pas de cours d'eau permanent dans la zone d'étude. On peut distinguer:

2.2.1 Les Lacs Youi , Warouwaye et Mbeubeuss

Ce sont des lacs à forme semi-circulaire et localisés dans la zone de Malika. Ils sont aujourd'hui asséchés et matérialisés par des zones de dépression. Ces lacs correspondent à divers épisodes d'anciens golfes de la mer à Arca senilis.

2.2.2 Le lac Retba

C'est un lac à eaux sursalées et de forme allongée. Il correspond à une lagune fermée, formée de remblaiements dus à la remontée de la mer. Ce remblaiement est constitué essentiellement des dépôts de sables marins littoraux.

2.2.3 Le lac Mbawane

Il est localisé dans la zone Nord-Est du système, au niveau de Kayar. Il est actuellement asséché et représenté par une zone de dépression.

2.3 La végétation

Dans la presqu'île du Cap-Vert, les seules zones à végétation restent 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 de Niayes sont formés de sables humifères noirs très riches, formés d'humus et de substances minérales. Ce qui explique la localisation dans ces unités des zones de cultures maraichères bien identifiées dans la région.

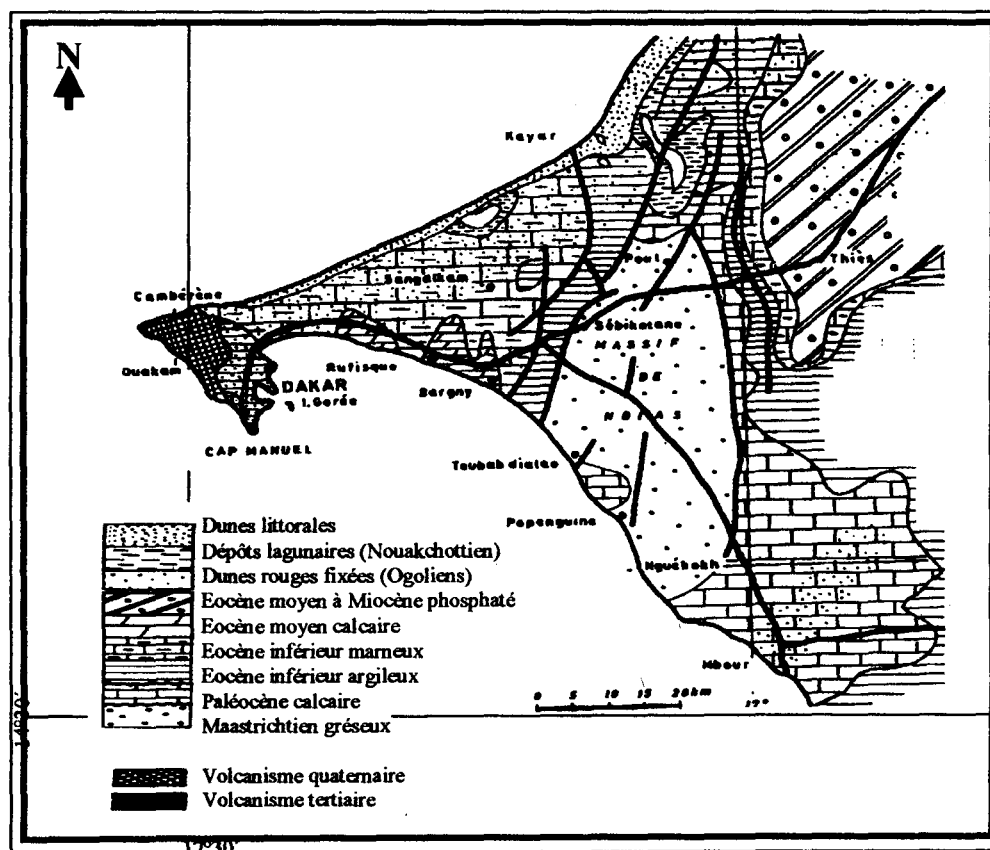
2. GEOLOGIE

1. CADRE GEOLOGIQUE

La presqu'île du Cap-Vert constitue l'extrémité occidentale du bassin sénégalo-mauritanien (Fig.5).

La stratigraphie est connue grâce aux affleurements et surtout aux forages pétroliers et d'exploitation d'eau.

Le socle anté-mésozoïque se situerait à la verticale de Dakar à une profondeur de 8 000 m. Des dépôts marins continus allant du Lias à l'Oligocène sont connus. Entre l'Eocène supérieur et le Quaternaire se produisent différentes manifestations volcaniques et une altération latéritique qui est à l'origine des cuirasses ainsi que des dépôts de sables dunaires.



(D'après ELOUARD, 1965)

Fig. 5: Carte géologique schématique de la presqu'île du Cap-Vert

Au plan structural, la partie du bassin comprise entre Thiès et Dakar a été affectée par des failles verticales (direction NE-SW à NNE-SSW) qui sont à l'origine de la formation des horsts de Ndiass et de Dakar, et du graben de Rufisque-Sangalkam où les dépôts sont subsidents (CASTELAIN *et al.*, 1965).

Un basculement général a en outre affecté ces horsts à la fin de l'Eocène. Leur partie sud s'est soulevée, exposant à l'affleurement des terrains du Crétacé terminal et du Tertiaire (entre Yène et Poponguine dans le horst de NDIass et au Sud de Dakar), alors que leur partie nord s'est enfoncée puis recouverte par un important dépôt de sable (dépression du lac Tanma dans le horst de NDIass et de Cambérène-Malika à Dakar) (BELLION, 1987).

Après cette brève description de la structure d'ensemble de la presqu'île, nous allons voir la succession lithostratigraphique qui permet de comprendre l'hydrogéologie de la zone d'étude.

2 LA SERIE STRATIGRAPHIQUE DE DAKAR

Le substratum tertiaire et surtout les formations quaternaires (Fig.6) seront décrites dans ce chapitre.

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.

2.1.1 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 à DK1 et 105 m à CV1 et reposent en discordance sur le Maastrichtien.

La formation des Madeleines date du Paléocène (CASTELAIN *et al.*, 1965)

La Formation des Limons de l'Hôpital, jadis rattachée à l'Eocène inférieur, est maintenant datée du Paléocène supérieur (SARR, 1995). Selon cet auteur, ces limons représentent un équivalent altéré et silicifié de la partie supérieure des Marnes des Madeleines.

Les limons de l'Hôpital constituent les falaises du Sud de la ville de Dakar.

2.1.2 L'Eocène inférieur (Yprésien)

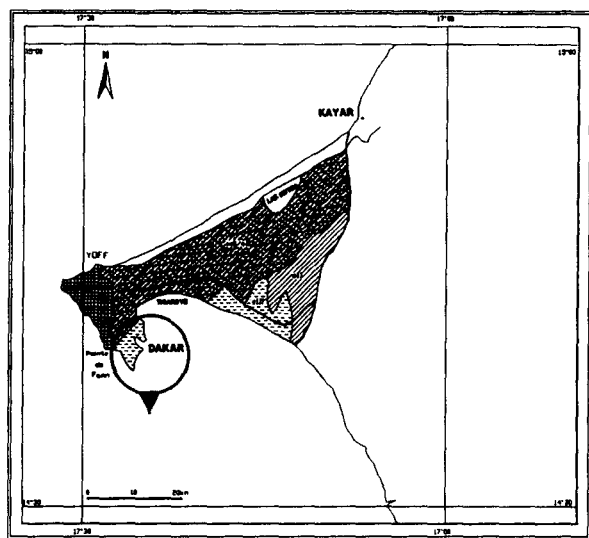
Dans les forages situés au Nord de Dakar et au forage DK1, la Formation des Madeleines est surmontée par des argiles et marnes datées de la base de l'Eocène inférieur. L'épaisseur totale de l'Yprésien étant de 105 m à DK1.

A l'affleurement, l'Eocène inférieur correspond aux Argiles de la Prison (15 m d'épaisseur) sur la Plage de Rebeuss (CASTELAIN *et al.*, 1965).

2.1.3 L'Eocène moyen

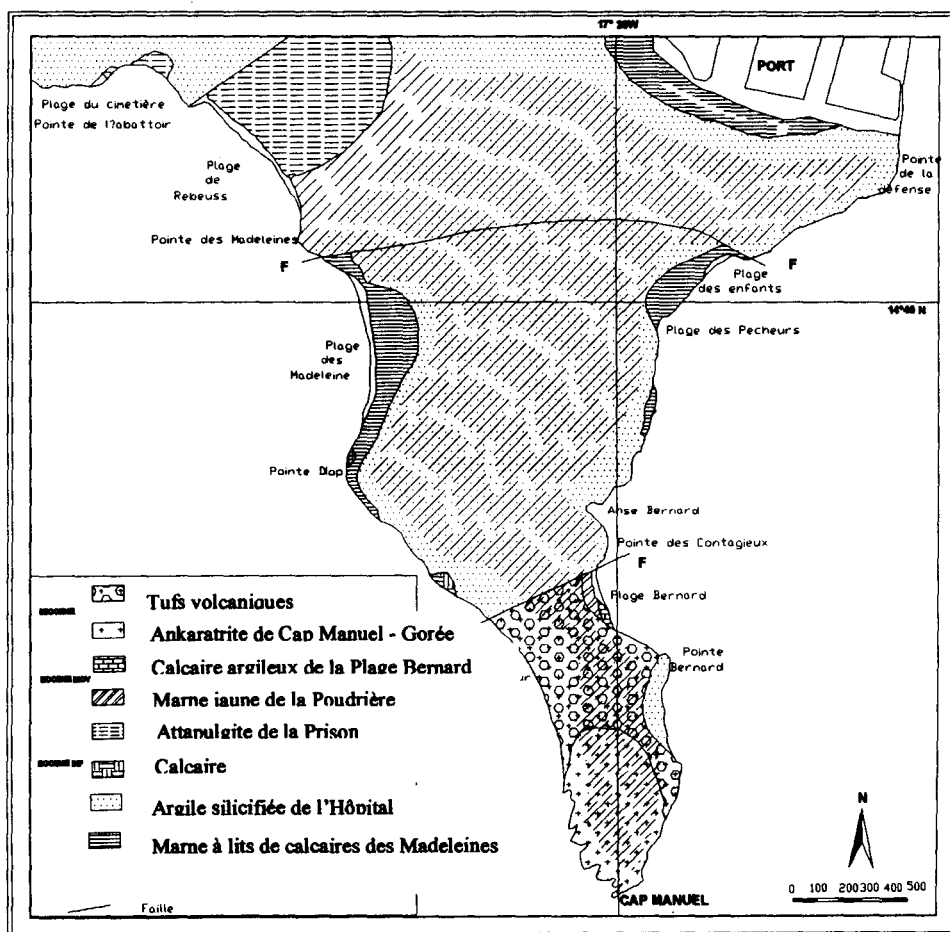
Il affleure à Dakar dans les Marnes de la Poudrière et les Calcaires argileux de la plage Bernard. Ces terrains datent de la base de l'Eocène moyen (Lutétien inférieur).

Fig.6: Carte de localisation des formations tertiaires et quaternaires dans la presqu'île du Cap-Vert et les affleurements tertiaires du Sud de Dakar



(AMARTIN 1970 No.04)

- | | | | | | |
|-------------|--|----------------------|-----------|--|---|
| QUATERNAIRE | | DUNES FIXES | TERTIAIRE | | MARNE-CALCAIRE DE BARGY |
| | | PRODUITS VOLCANIQUES | | | ARGILES PAPIRACEES-MARNES MARNE-CALCAIRES |
| | | DUNES RECENTES | | | |



(BONGRAND & ELDUARD 1968)

Le sommet de l'Eocène moyen (Bartonien) est connu uniquement en forage 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 (CASTELAIN *et al.*, 1965).

2.1.4 L'Eocène supérieur

Il est représenté uniquement par la partie supérieure des argiles de Yoff connue par sondage. A cette époque la quasi-totalité du Sénégal est déjà émergée par suite du retrait de la mer amorcé dès la fin de l'Yprésien (SARR, 1995). Il ne subsiste alors que de petits golfes marins entre Dakar et la région de Tivaouane.

2.1.5 L'Oligocène

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

2.1.6 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 (CREVOLA *et al.*, 1994).

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 d'âge Pliocène à base Pléistocène (TESSIER & LAPPARTIENT, 1967; DEMOULIN, 1970). Le contact entre ces formations est bien visible à la Pointe de Fann.

2.2 Les formations du Quaternaire

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

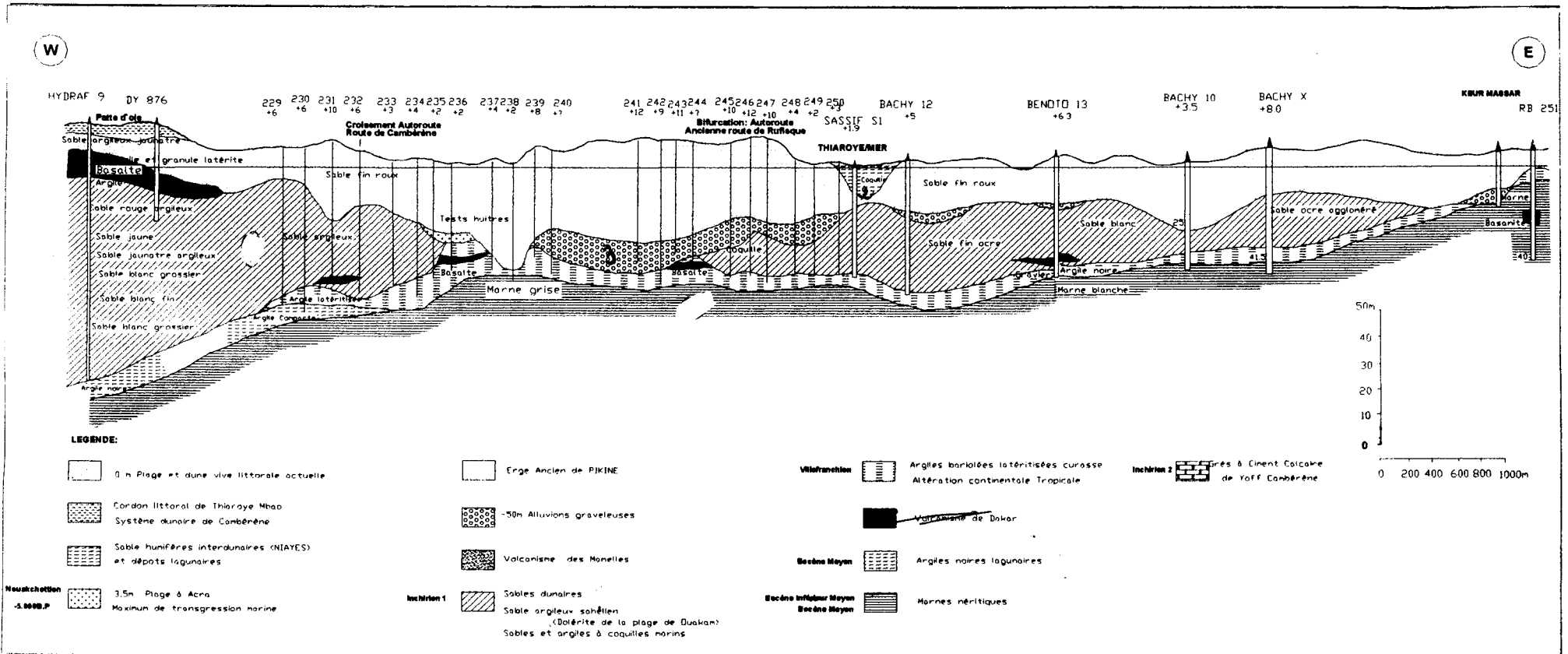
L'étude des affleurements et des forages de la presqu'île du Cap-Vert (HEBRARD, 1966; CREVOLA & GAYE, 1979; GAYE, 1980; BARUSSEAU & GAYE, 1983) permet de distinguer un Quaternaire ancien sableux marqué par le volcanisme des Mamelles, et un Quaternaire récent dominé par des pulsations climatiques et des fluctuations du niveau marin qui sont à l'origine de dépôts sableux et de plages soulevées rencontrés à Dakar (Fig.7).

2.2.1 Quaternaire Ancien

2.2.1.1 Les sables infrabasaltiques

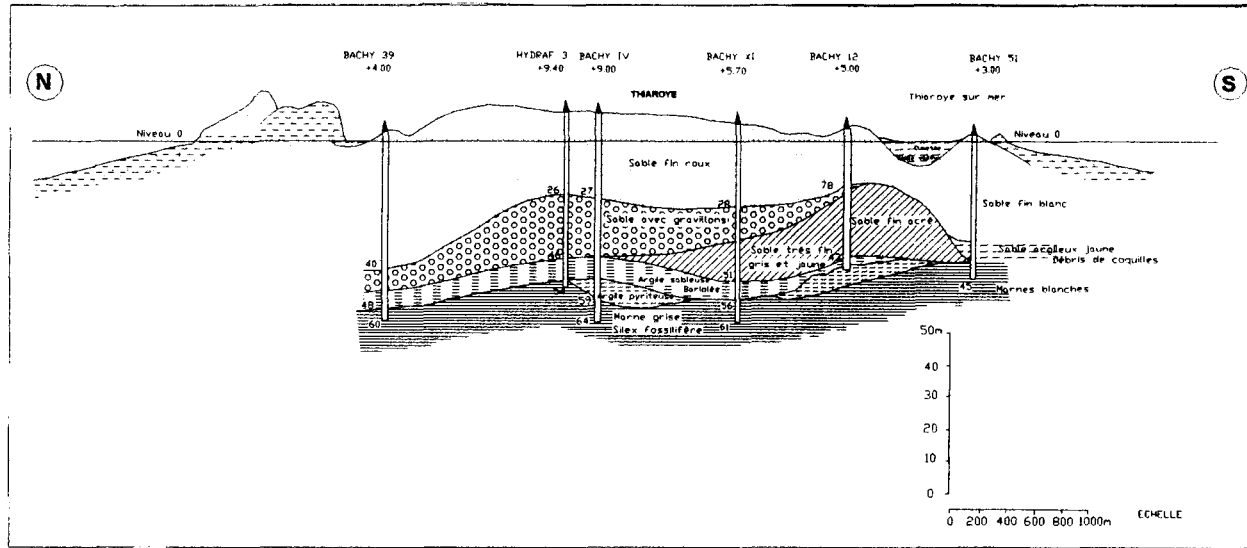
Ce sont les plus anciens dépôts quaternaires reposant sur la latérite fini-tertière.

Ils affleurent à la base des premières coulées du volcanisme des Mamelles sur le littoral entre Mermoz et Ouakam et 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.



D'après L. HEBRARD, 1966

Fig.7 (a): Coupe géologique Ouest-Est des formations géologiques dans l'isthme de Thiaroye



D'après L. HEBRARD 1966

Fig.7 (b): Coupe géologique Nord - Sud des formations géologiques au niveau de Thiaroye / Mer

2.2.1.2 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 doléritiques. 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 I.

2.2.1.3 Les grès à ciment calcaire de Yoff-Cambéréne

Ces grès calcaires se retrouvent sur le littoral de Yoff et Cambéréne 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 gastropodes.

2.2.1.4 Les alluvions graveleux

Ces alluvions sont formés 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 (-60 000 BP).

2.2.2 Quaternaire récent

2.2.2.1 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 déposée à l'Ogolien (-20 000 à -18 000 BP) au cours de la régression maximale post-inchérienne 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.

2.2.2.2 La plage soulevée à Anadara senilis

Elle correspond à un dépôt de sable vaseux riche en coquilles dont notamment Anadara senilis (LINNE), d'où son nom. Les 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 Sassif S1 a recoupé ces sables vaseux sur une épaisseur de 11 m.

Ces dépôts correspondent à l'épisode transgressif et humide du Nouakchottien (maximum situé autour de -5 500 BP) au cours duquel la mer envahit les anciens golfes des lacs Mbeu-

beuss, Malika, Retba, Youi et Pikine dans la presqu'île du Cap-Vert. Le niveau de la plage à Anadara senilis est à la côte +3,5 m à Pikine (ELOUARD, 1968).

2.2.2.3 Les sables humifères interdunaires des Niayes

Ces sables affleurent dans les dépressions interdunaires de la zone 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 de sols noirs par ruissellement des eaux dans le fond des dépressions marécageuses interdunaires depuis la période nouakchottienne (ELOUARD *et al.*, 1977).

2.2.2.4 Les "Dunes jaunes de Cambérène"

Elles s'étirent sur une bande large de un à quatre kilomètres 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 senilis 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 (-4 000 BP).

2.2.2.5 Les "Dunes blanches" littorales et des plages 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 (-3 000 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 (-2 000 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. HYDROGEOLOGIE

1. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Le bassin sédimentaire sénégalais est caractérisé par deux grands ensembles hydrogéologiques appartenant aux formations du Crétacé supérieur, du Tertiaire et du Quaternaire (Fig.8).

- Un ensemble supérieur hétérogène carbonaté ou détritique, constitué d'aquifères superficiels et semi-profonds. Il regroupe 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 d'une épaisseur moyenne de 250 m qui est contenue dans les niveaux gréseux et argilo-sableux du Sénonien ou de la base du Paléocène. Elle s'étend sur la quasi-totalité de la partie sédimentaire du Sénégal (TRAVI, 1988).

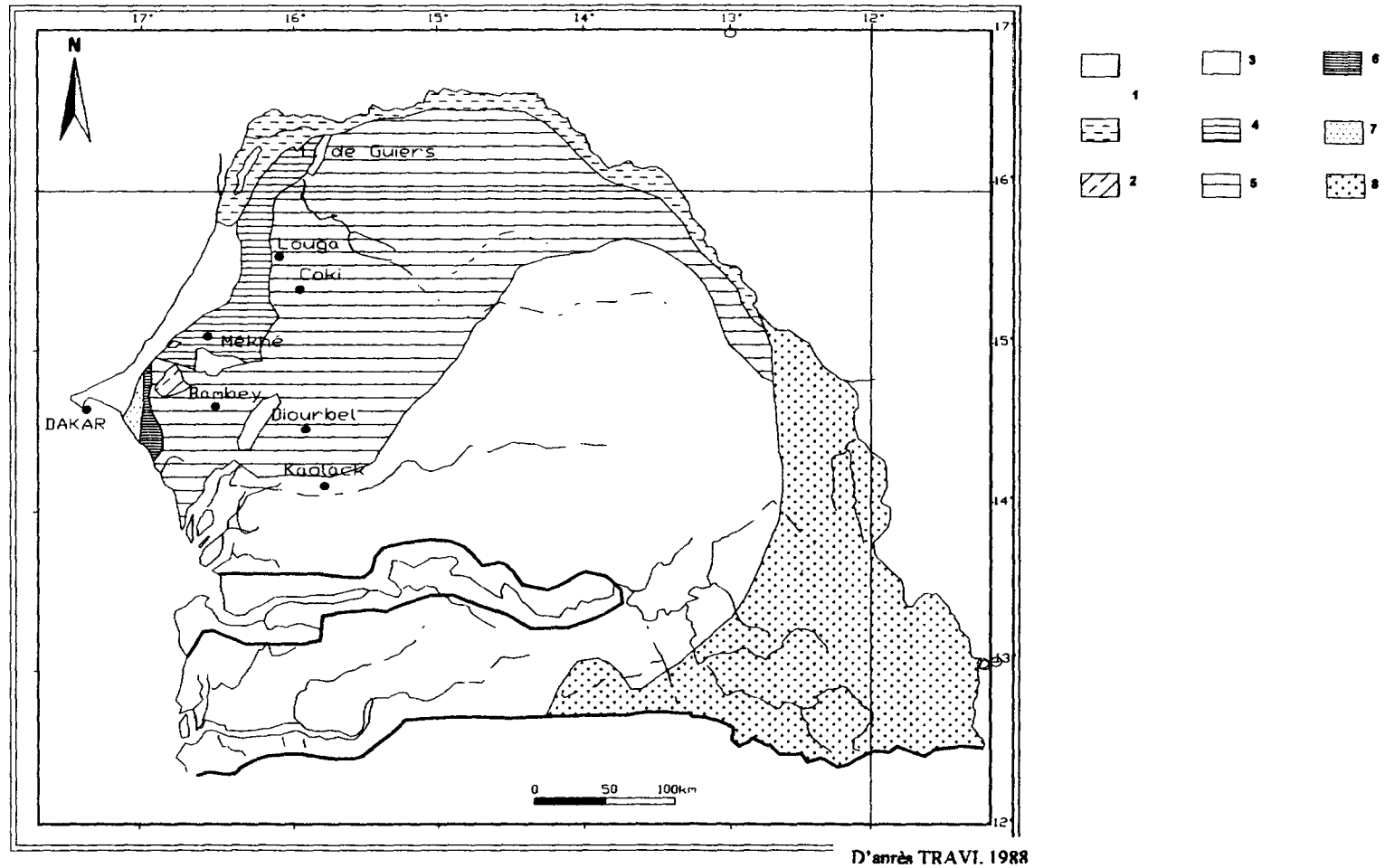
2. LOCALISATION ET STRUCTURE DU SYSTEME HYDRAULIQUE ETUDIE

La formation des sables quaternaires qu'elle soit d'origine marine ou continentale est du point de vue hydrogéologique un réservoir unique qui repose sur un substratum marneux d'origine tertiaire. L'ensemble de ce système aquifère s'étend sur tout le littoral nord sénégalais, depuis Dakar jusqu'à Saint-Louis sur une dizaine de kilomètres de largeur. Il est subdivisé en trois bassins hydrogéologiques: la nappe des sables infrabasaltiques, la nappe de Thiaroye et la nappe du littoral nord. A l'Est de Kayar, le système dunaire est interrompu momentanément par la dépression du lac Tamna, on observe également une remontée du substratum marneux. Le système hydraulique qui est ici étudié est dit "sable quaternaire de Thiaroye", il se localise entre Dakar et Kayar sur une superficie d'environ 300 km² (Fig.9).

Ce système est singularisé par la présence d'un réseau hydrographique dense, marqué par des dépressions (appelées "Niayes") où affleure la nappe.

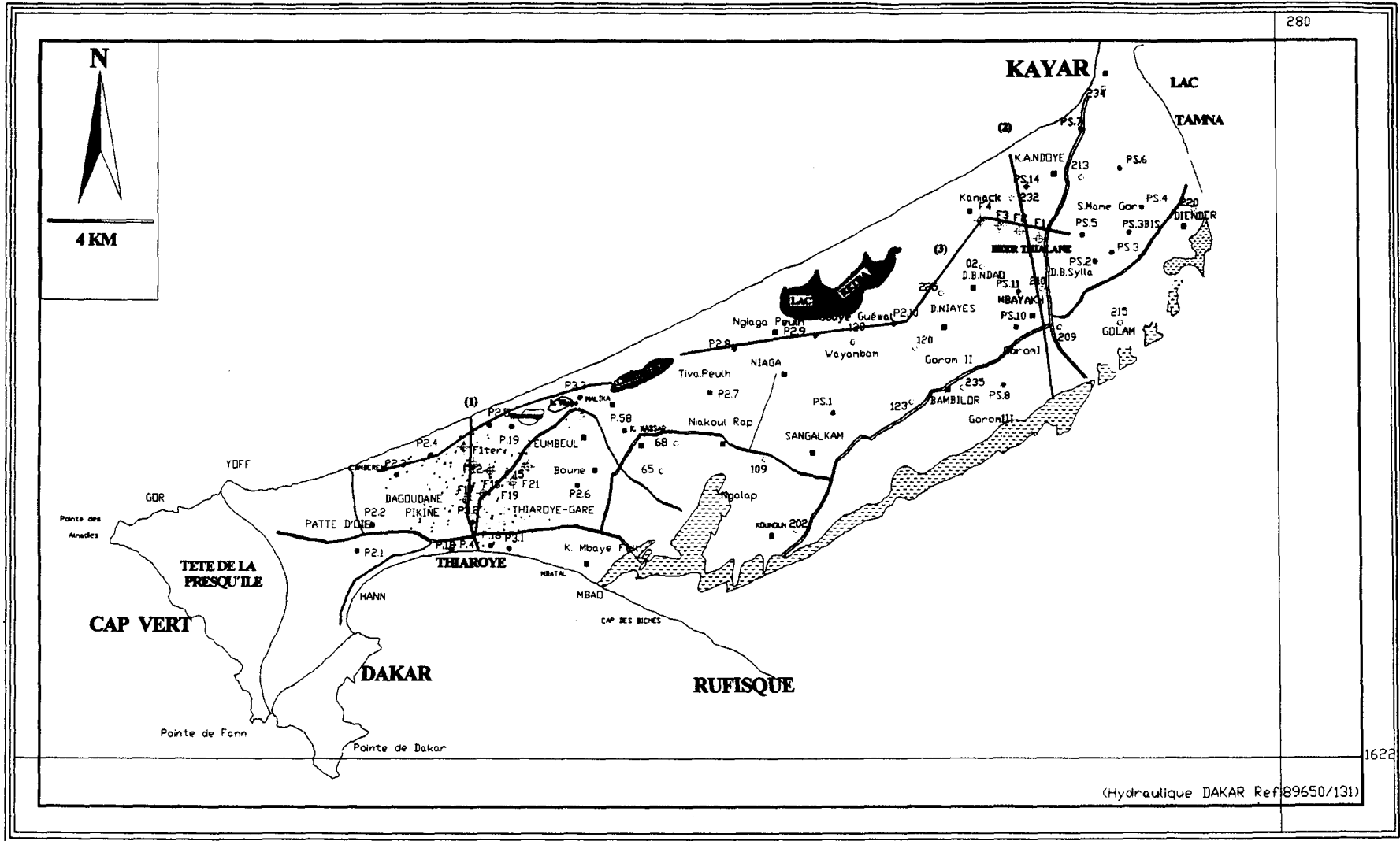
Le réservoir est limité au Sud-Ouest par une crête piézométrique qui la sépare de la nappe infrabasaltique contenue dans la tête de la presqu'île, à l'Ouest par la limite océanique, au Sud-Est par le substratum marneux tertiaire qui affleure à partir de Mbao et au Nord-Est par la dépression de Tamna qui la sépare de la nappe du littoral nord. La nappe est libre sur toute la zone littorale allant de Thiaroye à Kayar.

La surface du substratum marneux Eocène est marquée par des dépressions comblées par des dépôts sableux. Cette morphologie du substratum confère ainsi au système aquifère des variations d'épaisseurs d'un point à un autre (HEBRARD, 1966). Les formations sableuses sont de nature très différente. Les sables sont accumulés sur une grande épaisseur dans les zones de cuvette, cependant ils s'amincissent au Sud-Est avec la remontée du mur de l'aquifère. Les coupes hydrogéologiques 1, 2 et 3 montrent les variations d'épaisseur et les variations de faciès dans le bassin versant de Thiaroye et au niveau de Beer Thialane (Fig.10).



- | | |
|--|--|
| 1. Aquifères des sables littoraux et des formations alluviales | 2. Nappes phréatiques dans le recouvrement quaternaire |
| 3. Aquifère miocène (ex CT) | 4 et 5. Formations éocènes subaffleurantes (4 calcaires lutétiens) |
| 6. Calcaires paléocènes | 7. Sables maastrichtiens (horst de Ndiass) |
| 8. Socle cristallin (aquifère discontinu) | |

Fig.8: Carte hydrogéologique schématique du Sénégal



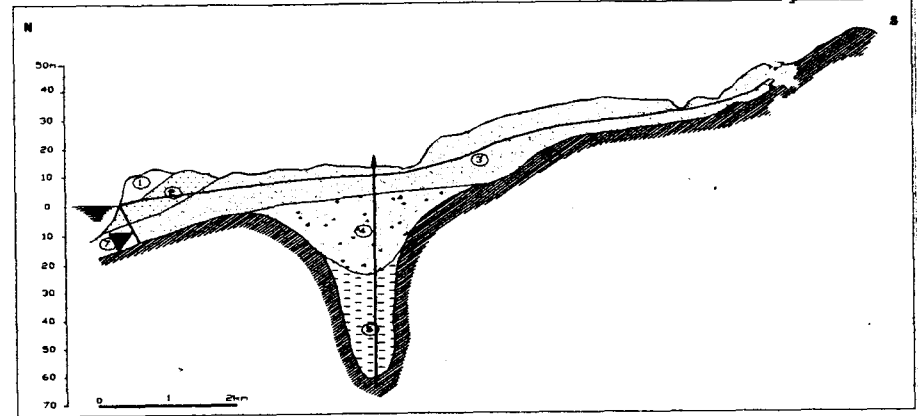
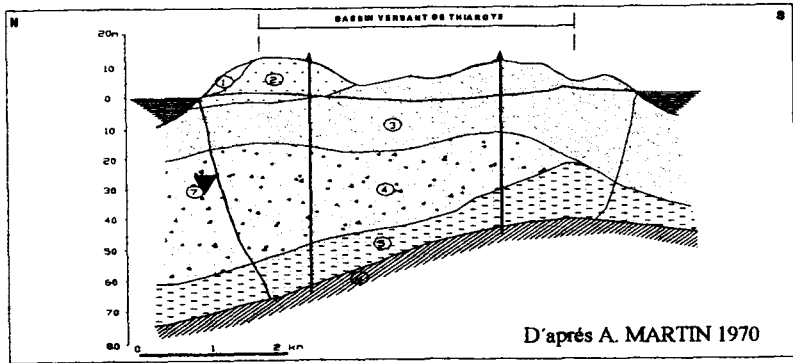
(Hydraulique DAKAR Ref 89650/131)

LEGENDE	
	Route
	Zone de Thiaryoye
	Limite sud de l'affleurement des marnes
	Localités
	Piézomètres
	Forage
	Puits villageois
	Ouvrages

**Fig. 9: NAPPE DES SABLES QUATERNAIRES
THIAROYE/BEER THIALANE**

**CARTE D'EXTENSION DES SABLES DE LOCALISATION
DES OUVRAGES ET COUPES HYDROGEOLOGIQUES**

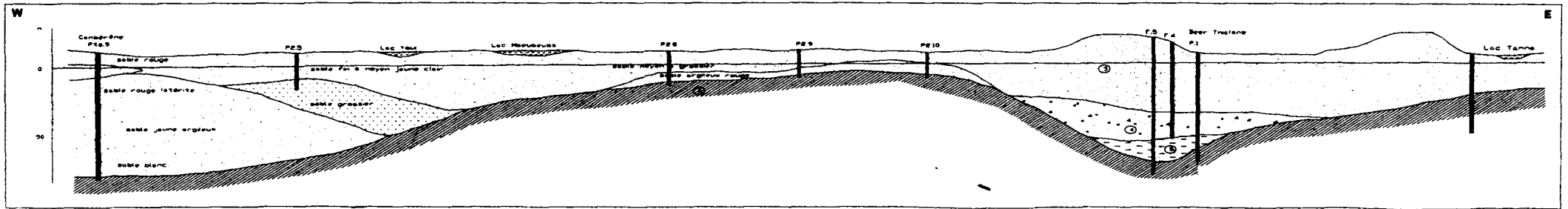
Fig. 10: Coupes hydrogéologiques réalisées sur la nappe des sables quaternaires de Thiaroye



- 1 Dunes blanches récentes
- 2 Dunes jaunes - Système Cambèrène
- 3 Dunes rouges - Ogoliens
- 4 Alluvions graveleuses
- 5 Sables Inchiriens
- 6 Substratum tertiaire imperméable
- 7 Biseau salé

Coupe 1: Coupe (N-S) du bassin de Thiaroye

Coupe 2: Coupe (N-S) de Beer Thialane



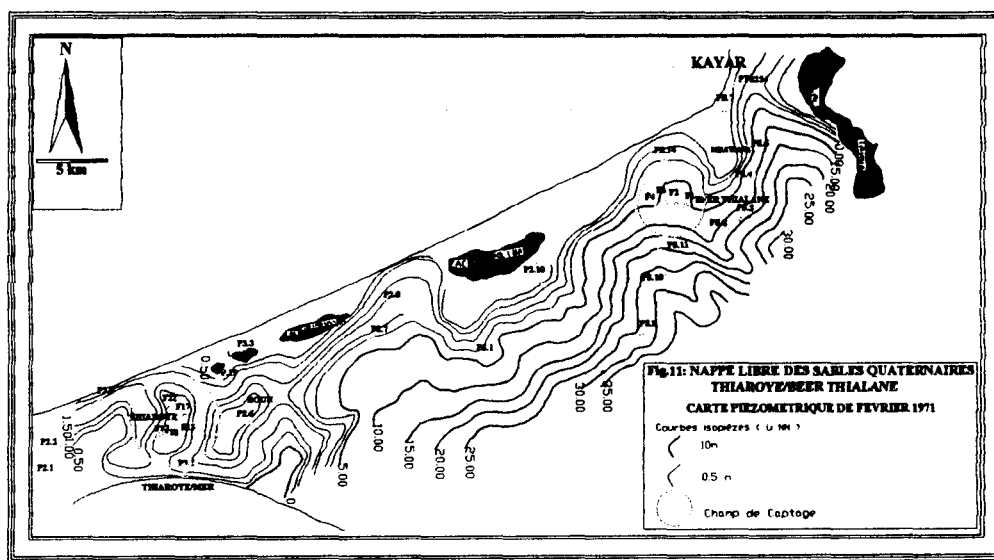
Coupe 3: Coupe hydrogéologique longitudinale

3. SCHEMA HYDRODYNAMIQUE

La nappe représente un réservoir d'eau souterraine, alimenté annuellement par infiltration directe des eaux de pluie. Ce réservoir se décharge par exploitation au niveau des puits, par évaporation pendant la saison sèche au niveau des Niayes et lacs et par écoulement vers la mer. La configuration piézométrique (Fig. 11) établie à partir de l'étude sur modèle mathématique (GEOHYDRAULIQUE, 1972), a mis en évidence les faits suivants:

- les écoulements s'effectuent 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 ($10\,000\text{ m}^3/\text{j}$), 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 ce réservoir en un système hydrodynamique indépendant.

La zone ouest est marquée par le bassin versant de Thiaroye, caractérisée par une dépression piézométrique résultant de l'exploitation. A l'Est de ce bassin, le gradient hydraulique généralement important est de l'ordre de 1 à 3%.



4. QUALITE DES EAUX

Les données disponibles concernant les paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe de Thiaroye (SONEES, 1986; DEH, 1994; TANDIA, 1997) révèlent:

- Les températures mesurées varient entre 26°C et 31°C , avec une moyenne de 30°C .
- Les valeurs de pH indiquent que les eaux sont généralement acides et oscillent entre 4 et 8.
- Les teneurs en oxygène dissous de l'aquifère varient de 2,35 à 8,1 mg/l.

- Les valeurs de conductivité sont comprises entre 130 et 3 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, les fortes minéralisations étaient observées au niveau des lacs salés et dans la zone de Thiaroye.

La carte hydrochimique de la presqu'île du Cap-Vert établie par A. MARTIN (1970) présente l'aquifère dans son ensemble avec des eaux douces et des faciès chlorurés sodiques qui prédominent. Ces faciès évoluent vers le Nord pour devenir hyperchlorurés dans les zones du lac Retba et Mbeubeuss (Fig. 12).

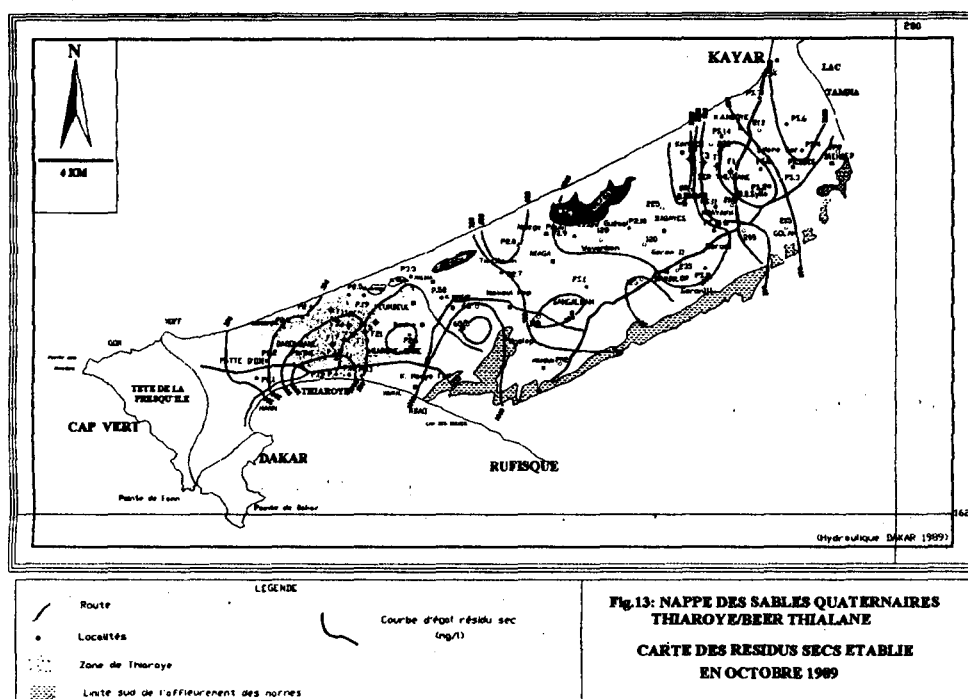
Dans la partie Sud-Est, l'aquifère présente des faciès bicarbonatés calciques.

La minéralisation obtenue à partir des mesures de résidus secs moyens varie de:

- 200 mg/l dans la zone de Thiaroye, Pikine-Dagoudane avec des faciès chlorurés sodiques. Cette faible minéralisation est également notée dans la zone de Sangalkam, Bambilor avec des faciès bicarbonatés calciques.
- 600 mg à 2 g/l dans la zone de Hann et Mbao au Sud-Ouest et au Nord-Est à Kayar. Le faciès est de type chloruré calcique et les eaux sont généralement affectées par l'intrusion saline.
- supérieur à 4 g/l dans la zone Nord au niveau des lacs et lagunes saumâtres, salés ou sur-salés. Le faciès est de type chloruré sodique.

En 1989, la carte de résidus secs (DEH, 1989) (Fig. 13), nous a permis de voir l'évolution de la minéralisation des eaux. On observe:

- une augmentation de la minéralisation dans la zone de Thiaroye, Pikine-Dagoudane englobée par la courbe 500 mg/l, alors que, dans la zone de Hann, cette minéralisation diminue. A Mbao, la minéralisation est toujours importante.
- à l'Est du lac Retba, entre Dèni Niayes et Beer Thialane, les eaux ont évolué vers une forte minéralisation. La zone est englobée par la courbe 1000 mg/l. Cette évolution est également notée dans la zone de Keur Massar.



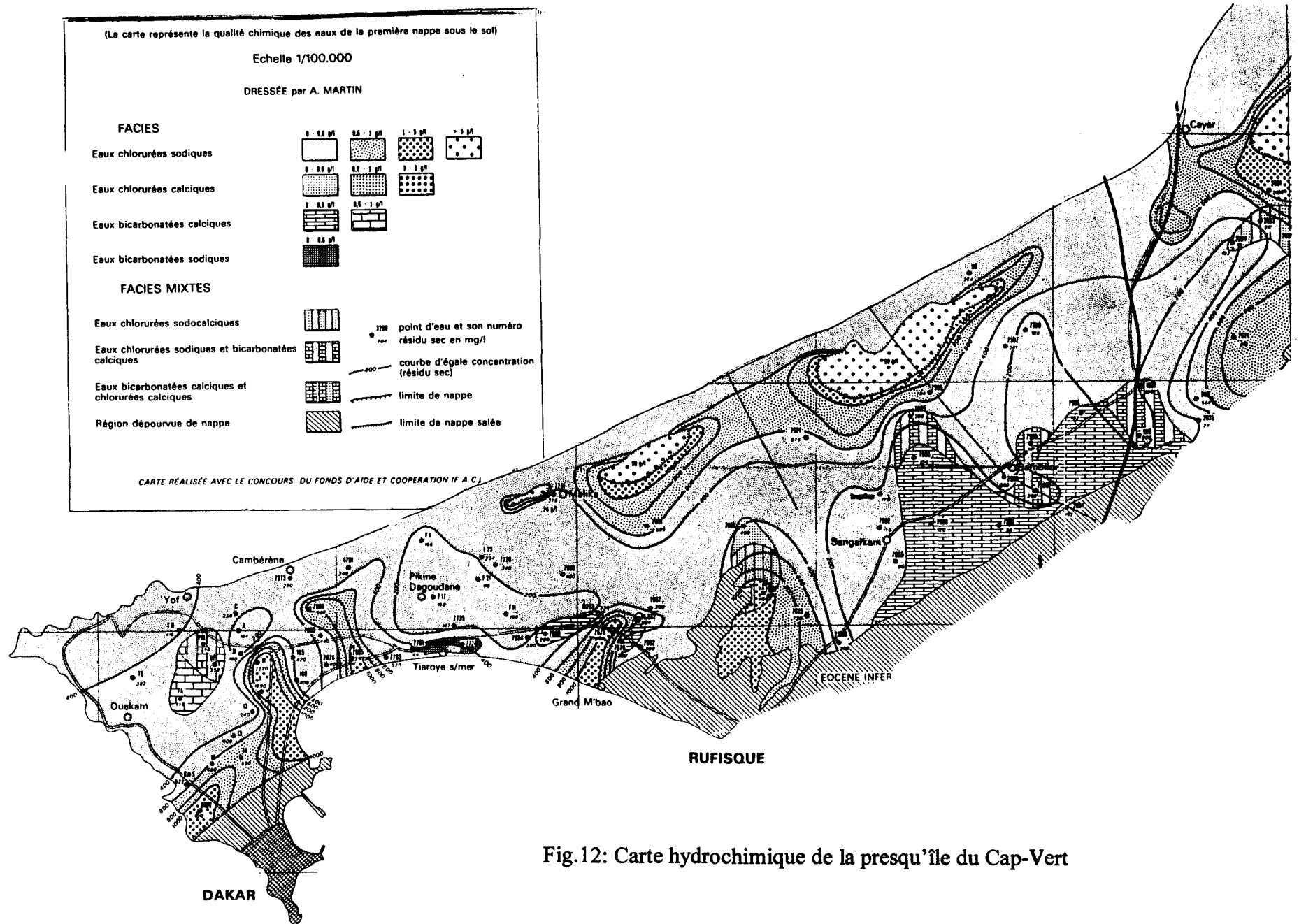


Fig.12: Carte hydrochimique de la presqu'île du Cap-Vert

4.1 Les teneurs en chlorures

La description précédente révèle une prédominance des faciès chlorurés, avec la présence du biseau salé dans certaines zones, des lacs et lagunes salés ou sursalés.

Les teneurs en chlorures, obtenues lors de cette présente étude, en octobre 1997 mettent en évidence des concentrations importantes dans le bassin de Thiaroye allant jusqu'à 293 mg/l au forage F.21 et 257 mg/l au forage F.18. Au voisinage des lacs salés de Mbeubeuss et Retba, on a également mesuré des teneurs en chlorures élevées, 230 mg/l au piezomètre P.58 et 377 mg/l au P2.9.

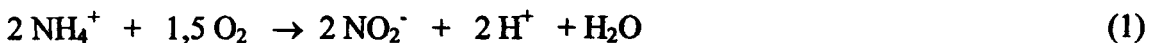
Les fortes minéralisations notées précédemment dans la zone Est du lac Retba, entre Dèni Niayes et Beer Thialane peuvent être dues aux teneurs élevées en chlorures observées, 557 mg/l et 347 mg/l aux puits pts.02 et pts.225.

On constate que dans ces secteurs la concentration en chlorure dépasse les normes O.M.S soit 200 mg/l. Selon GAYE *et al* (1989), les fortes concentrations en chlorures observées dans la zone de Thiaroye ne sont pas liées à une invasion salée, mais plutôt à la hausse des teneurs en nitrates enregistrées dans les forages de la SONEES. Il s'agirait d'un phénomène de pollution.

4.2 Les teneurs en nitrates

4.2.1 Rappel du cycle naturel de l'azote: Décomposition des nitrates dans la zone non saturée et les eaux souterraines

Les ions ammonium (NH_4^+) et nitrate (NO_3^-), sont nécessaires pour l'élaboration des substances cellulaires animales et végétales. La minéralisation de l'azote organique suite à la décomposition des protéines et acides aminés dans le sol, entraîne la libération de l'ammonium, produit essentiel du cycle naturel de l'azote. Dans un sol bien aéré, l'ion ammonium, en présence de microorganismes (*Nitrosomonas* et *Nitrobacter*), s'oxyde en nitrite (NO_2^-) (1) puis en nitrate (2) selon les réactions suivantes (SCHLEGEL, 1985):



De manière générale, l'ion nitrate très mobile ne subit pas d'adsorption (SCHEFFER & BARTELS, 1980; WALTER, 1980c; MATTHEß, 1994). Cependant et selon ces auteurs, l'ammonium est, suivant des phénomènes d'échanges de base, fixé par adsorption dans les sols argileux ou réutilisé par les plantes et microorganismes. Un bref aperçu du dynamisme de ces produits azotés est donné à la figure 14.

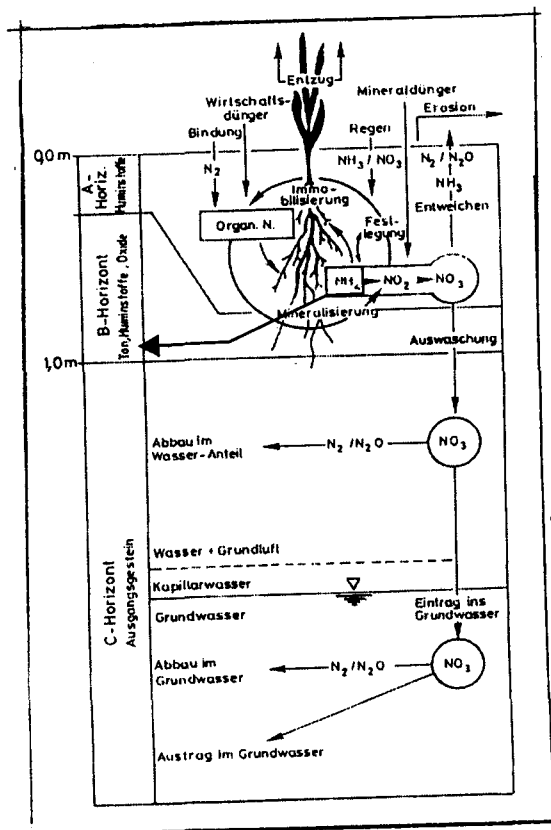


Fig.14: Dynamique de l'azote dans la zone non saturée et les eaux souterraines
Selon Obermann 1981 (in MATTHEß, 1994)

L'oxydation par les microorganismes de l'ammonium (**nitrification**) en nitrite puis nitrate est très influencée par les conditions du milieu. Le niveau optimal de nitrification est obtenu à un pH compris entre 6 et 8 et des températures de 25 à 35 °C. Dans les sols acides, la tendance est à l'accumulation de l'ion ammonium (NH_4^+), par contre en milieu alcalin, on a la formation de l'ion ammoniac (NH_3^+) (ROHMANN & SONTHEIMER, 1985).

Dans le sol et les eaux, l'ion nitrate ne précipite pas. Le seul processus tendant à faire diminuer sa concentration est le phénomène de **réduction**, qui est ainsi décrit:

A. Réduction assimilative des nitrates en ammonium (NH_4^+) puis synthèse d'acides aminés et autres molécules organiques:

C'est le seul processus de réduction des nitrates qui n'est pas catalysé par l'activité bactérienne (ROHMANN & SONTHEIMER, 1985):



B. Réduction dissimilative (Nitrammonification) en ammonium (NH_4^+) par oxydation de la matière organique:



Cette réduction des nitrates ou **nitrammonification**, est catalysée par les enzymes dans des conditions anaérobiques (FAZZOLARI & al., 1990a et c).

C. Dénitrification:

La dénitrification représente la seule réelle épuration, comparée aux deux premiers processus qui ne sont que des formes temporaires de stockage de l'azote car pouvant se réoxyder en nitrate. En effet, durant ces dernières années, on a noté qu'avec la pollution croissante des ressources naturelles en eau, plusieurs travaux se sont orientés dans ce processus pour tenter une épuration des eaux (FRICK & RICHARD, 1985; FRANK & DOTT, 1985; TUISEL et al., 1989; ROBERTSON & CHERRY, 1995).

Cette réduction bactérienne (**Dénitrifiante**) se fait de deux manières différentes (APPELO & POSTMA, 1994; MARRIOTTI, 1994; ROHMANN & SONTHEIMER, 1985; DVWK, 1988 et 1973):

- Réduction **hétérotrophe** (par exemple par oxydation du carbone organique):

Ce processus est catalysé par les bactéries organotrophes, chemiotrophes ou hétérotrophes (si elles nécessitent un apport externe pour leur exigences nutritionnelles). Dans le cas des bactéries hétérotrophes, avec du carbone organique comme substrat, la réaction s'écrit:

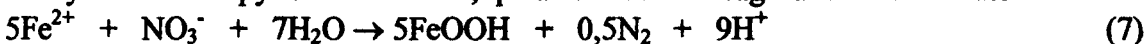


- Réduction **Autotrophe** par oxydation d'un composé minéral (par exemple la pyrite, FeS_2)

Dans ce cas les bactéries exemple le *Thiobacillus denitrificans* (SHLEGEL, 1981) sont chemiolithotrophes et sont peu représentées dans la nature. Cette oxydation est décrite selon KÖLLE *et al.* (1983) par les réactions suivantes:



L'oxydation de la pyrite libère le fer, qui à son tour va réagir avec l'ion nitrate:



Les différents processus de réduction des nitrates présentés ci-dessus sont déterminés par les conditions du milieu. Ainsi l'influence du potentiel rédox a été étudiée dans un aquifère confiné situé dans les calcaires jurassique du Lincolnshire (EDMUNDS, 1973 et 1976).

Selon cet auteur la concentration en nitrate décroît pour atteindre de très faibles valeurs dès que les teneurs en oxygène dissous passent sous la limite de détection (0,2 mg/l). Cette étape correspond à une baisse du Eh de +400 à 100 mV.

Notons qu'en dessous d'une certaine pression partielle d'oxygène dissous, il devient plus facile à ces bactéries de respirer l'oxygène de l'ion nitrate que l'oxygène moléculaire.

Les bactéries dénitrifiantes ne survivent qu'à des valeurs de pH comprises entre 6,2 et 10,2 et le niveau optimal de dénitrification est obtenu à un pH compris entre 7 et 8 et des températures de 8 à 12°C.

4.2.2 Origine des teneurs élevées en nitrates dans les eaux souterraines

Produit du cycle de l'azote, l'ion nitrate se retrouve naturellement dans les eaux souterraines. Ainsi dans les conditions naturelles, les concentrations maximales en NO_3^- -N dans les nappes, sont inférieures à 8 mg/l (ROHMANN & SONTHEIMER, 1985). Toutefois, de nos jours des teneurs en nitrates qui dépassent largement cette concentration de base (souvent signe de pollution anthropique) sont signalées dans différentes parties du monde.

En Europe et dans plusieurs pays industriellement développés, de nombreux cas ont été décrits, où les teneurs en nitrates sont proches ou dépassent les normes de potabilité des eaux fixés à 10 mg/l de $\text{NO}_3\text{-N}$ (OMS, 1993). La pollution est alors souvent la conséquence de l'excès de fertilisants utilisés pour une agriculture intensive. Du fait de l'ampleur du phénomène, beaucoup d'études spécifiques ont permis une corrélation directe de la qualité des eaux avec les activités agricoles, et proposent une meilleure gestion des ressources hydriques (FOSTER et al., 1986; CANDELA & RAMOS, 1992; WALTHER, 1995; HUANG et al., 1994; KOMOR, 1996; GUIMERA, 1998).

Dans les pays en voie de développement, la faible pression anthropique sur les aquifères ne représentait guère de réelles menaces sur la qualité des eaux. Les pollutions décrites étaient surtout liées à des sources ponctuelles autour des points d'eau. Cependant GROEN et al. (1988) décrivaient des teneurs élevées en nitrates dans le village d'un pays à tradition d'habitat groupé. Ainsi le développement spontané de l'habitat informel observé ces dernières années dans les grandes villes des pays en voie de développement constitue aujourd'hui la principale cause de pollution des aquifères. Les déchets domestiques sont directement versés dans la nature, du fait de l'inexistence de réseaux d'assainissement. Le dépôt de matières fécales sur le sol, détermine des sources de pollution de la nappe. Tel semble être le cas de l'aquifère de Thiaroye localisé à Dakar capitale du Sénégal.

Au Mochudi dans l'Est du Botswana, LAGERSTEDT (1994) signalait de fortes teneurs en nitrates dans les eaux souterraines dues au développement de la ville.

Des cas de pollution liés à ce phénomène d'extension non contrôlée d'habitat ont été décrits dans d'autres régions du monde (WETSELAAR et al., 1995; CHETTRY & SMITH, 1995; PACHECO & CABRERA, 1997).

En climat tropical humide, les changements écologiques comme la déforestation peuvent également être source des teneurs élevées en nitrates dans les eaux souterraines (FAILLAT & RAMBAUD, 1991).

Dans les régions semi-arides et arides, des études ont révélé des teneurs naturelles en nitrates élevées dans des aquifères. Dans le désert du Kalahari, HEATON (1984) montrait que les fortes concentrations en nitrates observées étaient dues au lessivage naturel de l'azote du sol. WRIGHT & EDMUNDS (1969) liaient les teneurs élevées en nitrates dans le désert du Sahara en Lybie aux dépôts et dissolution d'évaporites.

La fixation par les microorganismes de l'azote de l'air est la cause principale des fortes concentrations en nitrates observées dans les eaux souterraines à Yulara dans une région aride d'Australie centrale (BARNES et al., 1992).

Les teneurs élevées en nitrates dans les eaux souterraines décrites ci-dessus dans différentes parties du monde révèlent surtout la diversité des sources de contamination. Cependant, la pollution anthropique reste ponctuelle et très limitée, comparée aux teneurs naturelles élevées en nitrates décrites dans certains aquifères en régions arides et semi-arides.

4.2.3 Toxicité des nitrates dans les eaux

Les excès de nitrates dans les eaux ne sont pas sans danger chez les populations exposées à ces problèmes. Les sources d'ingestion de nitrates chez l'homme restent essentiellement hydriques et alimentaires. Ainsi pour les eaux destinées à la consommation humaine, des normes ont vu le jour (WHO, 1993) exprimées en mg/l d'azote lié aux nitrates ($\text{NO}_3\text{-N}$):

OMS, norme européenne	1970:	11,3 recommandé;	22,6 acceptable
OMS, norme internationale	1971:	10,2	
US, EPA	1977:	10,2	
CEE	1977 et 1980:	11,3 avec	5,6 souhaité
OMS	1980	10 soit	50 mg/l de NO ₃

Chez l'homme, le rôle des nitrates dans la méthémoglobinémie a été mis en évidence depuis 1945 avec les travaux de Comly (COMLY, 1945). Dans ce cas, la toxicité des nitrates est liée à leur réduction en nitrite par les bactéries du tube digestif. Secondairement ces nitrites vont oxyder le fer contenu dans l'hémoglobine du sang transformant ainsi le fer ferreux en fer ferrique et l'hémoglobine en méthémoglobine. Chez les nourrissons surtout, l'hémoglobine transformé en méthémoglobine est impropre au transport de l'oxygène par les globules rouges.

Par ailleurs des études ont montré une augmentation des risques de cancer de l'estomac liée à la présence de teneurs élevées en nitrates (MAGEE & BARNES, 1956; WRIGLEY et al., 1984). Les nitrates ingérés sont à nouveau réduits en nitrites qui, en milieu acide comme l'estomac, peuvent réagir avec les amines et amides pour donner des nitrosamines, composés cancérogènes. On parle dans ce cas de toxicité tertiaire des nitrates.

4.2.4 Cas de la contamination par les nitrates de la nappe de Thiaroye

La contamination par les nitrates de la nappe de Thiaroye, objet de cette étude, est un phénomène récent. Jusqu'en 1980 la nappe présentait des teneurs en nitrates relativement faibles, en dessous de la norme OMS (50 mg/l). Cette pollution due essentiellement au développement de l'habitat informel dans le secteur a été évoquée par divers auteurs (COLLINS & SALEM, 1989; GAYE et al., 1989; SONEES, 1989; FALL, 1991; TANDIA, 1997). Depuis, et suite à ces informations, des campagnes de prélèvements ont été effectuées dans la zone pour déterminer l'évolution de cette contamination.

La présente étude a permis d'évaluer l'état actuel de la contamination de l'aquifère par les nitrates. Les zones les plus affectées sont:

- La zone de captage de Thiaroye où les teneurs en nitrates varient entre 100 et 450 mg/l dépassant largement la norme OMS.
- La zone englobant les secteurs de Dène, Golam, Keur Abdou Ndoye où les concentrations peuvent atteindre 300 mg/l.

Les teneurs en nitrates dans la zone de Thiaroye entre 1988 et 1997 provenant de différentes sources, sont consignées au tableau 2.

Tableau 2: Les teneurs en nitrates des forages de Thiaroye de Mars 1988 à Octobre 1997

Laboratoire	ENSUT DAKAR	BRGM ORLEANS	DPT.GEOLOGIE DAKAR	IAAG MÜNCHEN
N° FORAGES	Mars 88 (in Collins, 89)	Juin 88 (in Collins, 89)	Juillet 97	Novembre 97
F.15	495	140	298	367
F.17	670	205	356	486
F.18	355	130	280	310
F.19	685	235	448	441
F.21	-	-	403	547
F.22	485	155	418	547

Ces résultats montrent l'état de contamination de la nappe par les nitrates. Cependant même si les teneurs en nitrates sont excessives, l'analyse du tableau révèle une nette amélioration de la qualité des eaux entre mars et juin 1988. Cette observation peut s'expliquer par le caractère ponctuel de la source de pollution.

5. ROLE DE L'AQUIFERE DANS L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE DAKAR ET DANS LES ACTIVITES MARAICHERES DE LA REGION

La nappe de Thiaroye participe pour environ 9 000 m³/j soit 7% à l'alimentation en eau potable de Dakar (Ministère Hydraulique; PNUD, 1994). Elle est exploitée par forages au niveau de deux centres de captage: le centre de captage de Thiaroye pour l'AEP de la ville de Dakar, et le centre de captage de Beer Thialane pour l'irrigation principalement et appoints temporaires pour l'AEP (SONEES, 1986).

En plus de ces ouvrages d'exploitation, la nappe est également sollicitée par puits et puisards traditionnels pour les besoins en eau des populations rurales et pour le maraîchage qui se pratique à grande échelle dans les "Niayes".

La nappe découverte en 1950 a été exploitée à un débit moyen de 15 000 m³/j jusqu'en 1959. Par suite d'une baisse critique de la piézométrie accompagnée de risque d'intrusion saline, l'exploitation fut arrêtée jusqu'en 1961.

De 1961 à 1985, l'exploitation fut réduite à un débit de 10 000 m³/j, puis depuis 1985 à un débit de 9 000 m³/j.

II. PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE - METHODOLOGIE ET OUTILS UTILISES

1. PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

Les contraintes notées sur l'aquifère des sables quaternaires de Thiaroye sont multiples, à savoir le potentiel exploitable du système sous les conditions climatiques de ces dernières années, la contamination par invasion des eaux salines et la pollution des eaux par les nitrates.

L'historique des études sur la contamination de la nappe de Thiaroye montre que la pollution est récente et est due essentiellement au développement de l'habitat informel dans le secteur. La dégradation rapide de la qualité des eaux demeure le problème principal, et condamne son usage pour l'alimentation future en eau potable de la ville de Dakar.

L'état de contamination des eaux dans le centre de captage de Thiaroye, est une contrainte réelle pour la SONEES qui adopte une solution de dilution des eaux avec d'autres ressources en eau souterraine pour ramener ces teneurs à des valeurs acceptables. Il est même envisagé un arrêt des pompages dans la zone.

Les teneurs excessives en nitrates dépassent largement les normes de potabilité de l'OMS. L'exploitation directe, privée et sans contrôle de la nappe par les populations locales qui pour satisfaire leurs besoins en eau, s'approvisionnent dans des puits traditionnels, constitue une menace réelle sur la santé des populations.

Par rapport à ces contraintes, ce présent travail vise à :

- modéliser les écoulements dans le système en vue d'une simulation de l'arrêt des pompages envisagé dans la zone de Thiaroye pour voir l'évolution piézométrique durant les prochaines années.
- étudier la pollution azotée de la nappe et évaluer sa vulnérabilité, pour une meilleure gestion des ressources hydriques. Ceci se fera par identification de l'origine de la contamination, et une étude corrélative entre les sources de pollution de surface et les fortes teneurs en nitrates observées. L'étude est élaborée sur la base d'un Système d'Information Géographique qui intègre aussi bien les données géographiques de la zone que celles de l'étude hydrogéologique qui a permis de caractériser le système aquifère étudié.

2. METHODOLOGIE ET OUTILS UTILISES

1 Méthodologie

Dans le cadre de ce travail, la démarche méthodologique proposée comporte plusieurs étapes qui sont résumées sur l'organigramme présenté à la figure 15.

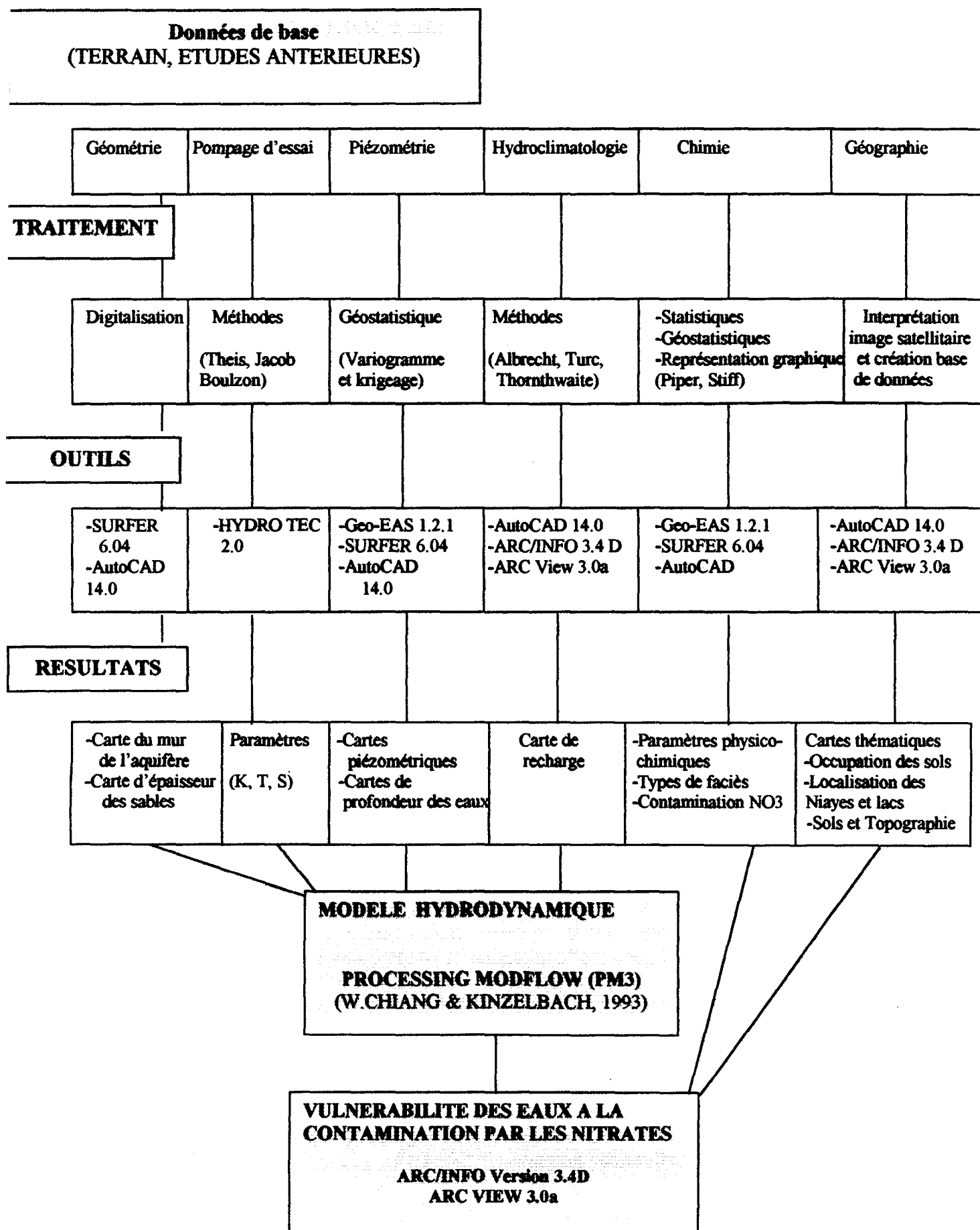


Fig.15: Schéma conceptuel de la méthodologie de l'étude

La méthodologie retenue pour conduire cette étude se présente comme suit:

A. Première étape

Elle consiste à recueillir l'ensemble des données de l'étude. Ces données qui sont relatives à la géométrie de l'aquifère, aux paramètres hydrodynamiques, la piézométrie, l'hydrochimie, l'hydroclimatologie et la géographie concernent aussi bien les informations acquises dans notre étude de terrain que celles des études antérieures.

B. Deuxième étape

Cette étape a permis un traitement des données de base. Différentes méthodes sont utilisées:

- **Les données concernant la géométrie du système aquifère**

Elles n'ont pas été traitées dans le cadre de cette étude, elles sont reprises des travaux antérieurs.

- **Les données du pompage d'essai**

L'exploitation des données a été effectuée selon les méthodes de THEIS, COOPER & JACOB et BOULTON pour déterminer les paramètres hydrodynamiques (K, T, S) sur la nappe.

- **Les données piézométriques**

Les charges piézométriques de juillet et octobre 1997 et celles moyennes de 1984 à 1997 ont été traitées. Dans le cadre de cette étude, on n'a pas pu effectuer des nivellements. Les côtes topographiques utilisées pour définir l'allure piézométrique de la nappe ont été tirées des travaux antérieurs. Certaines de ces données nous ont semblées incohérentes et sont corrigées sur la base de la carte topographique, des cartes de profondeur du substratum et de la carte de l'épaisseur des sables.

Un traitement géostatistique des données piézométriques a été effectué à l'aide des variogrammes. Il a permis de voir la distribution des grandeurs dans l'espace. Les modèles de variogramme, de même que les paramètres du variogramme (portée, palier) ont été utilisés dans le krigeage. Le krigeage a été effectué avec le programme SURFER 6.04 suivant un maillage de 700 x 700 km.

Les cartes isopièzes ainsi élaborées sont exportées en fichier DXF pour être éditées dans le logiciel AutoCAD 14.0.

- **Les données hydrochimiques**

Les méthodes de statistique descriptive (Histogramme, Box-plot) et géostatistique (variogramme, krigeage) ont été utilisées pour étudier la distribution des paramètres physico-chimiques mesurés sur les eaux de la nappe et des teneurs en nitrates obtenues. Les résultats du traitement géostatistique ont permis de donner des cartes de zonation des concentrations en nitrates obtenues en juillet et octobre 1997.

Une représentation graphique des résultats des analyses chimiques par les diagrammes de PIPER et STIFF a permis de présenter les types de faciès sur la nappe de Thiaroye et une zonation des eaux.

- **Les données géographiques**

Ces données concernent essentiellement les informations sur l'occupation des sols dans la zone de Thiaroye. Une image satellitaire traitée au CSE (Centre de Suivi Ecologique/Dakar) a

permis l'élaboration de la carte thématique d'occupation des sols qui comporte plusieurs étapes:

- Stratification du domaine d'étude: Cette première étape consiste à recueillir toutes les informations concernant l'occupation des sols sur la zone de Thiaroye. Elle permet d'abord de différencier les unités et définir les limites naturelles. Sur la base des informations acquises sur le terrain, les cartes géologiques de la presqu'île du Cap-Vert (ELOUARD et al., 1974), les cartes topographiques de DAKAR, BARGNY, KAYAR (ING Paris et SNG Dakar, 1993) et la carte morphopédologique du Sénégal (USAID/RSI, 1986), toutes les unités définies sur l'image ont été reportées sur papier calque.
- Numérisation des données: Nous avons numérisé les données avec le logiciel de dessin AutoCAD 14.0. Ces données digitales sont stockées séparément dans différentes couches:
 - Couche 1: Les zones à habitations (Zone de Thiaroye et les différentes localités)
 - Couche 2: Les niayes, les zones de maraîchage et les lacs
 - Couche 3: Les zones dunaires
 - Couche 4: Les routes et pistes
 - Couche 5: Les points (piézomètres, forages et puits villageois)

Ces informations sont lues et stockées dans le SIG sous forme de couvertures.

- Création de topologie: Cette étape a permis de revoir les erreurs de stockage des données à référence spatiale et de créer une base de données complète. L'information spatiale et descriptive est représentée en différentes couvertures, qui sont superposées selon les entités géométriques obtenues. Tous les polygones sont regroupés dans une seule couverture comprenant les Niayes, zones d'agglomération, villages, zones de maraîchage, lacs et dunes. Les arcs regroupent les routes et les pistes et forment la deuxième couverture. La troisième couverture concerne les points définis par les piézomètres, forages et puits villageois.
- Sortie des données de l'analyse dans ARC VIEW Version 3.0.

• Les données hydroclimatologiques

Elles concernent les données relatives à la précipitation, l'évaporation, l'humidité relative et la température dans la région du Cap-Vert. Les zones d'influence des différentes stations météorologiques ont été définies à l'aide de polygones de THIESSEN. Une base de données a été créée dans le SIG pour le stockage et l'analyse de l'ensemble des informations relatives à la climatologie.

Une nouvelle carte d'occupation des sols, intégrant dans sa base de données les stations météorologiques et les données climatiques a été élaborée pour le calcul de l'évapotranspiration réelle. L'ETR calculée sera fonction des unités définies dans l'occupation des sols comme les Niayes, les lacs, les dunes. Dans la base de données, on a généré les formules empiriques de ALBRECHT, THORNTHWAITE, PENMAN, TURC. Une fois ce paramètre défini, la recharge de la nappe sera donnée en fonction des précipitations et sous forme de carte.

C. Troisième étape

Le traitement de l'ensemble des données énumérées ci-dessus a permis de définir les paramètres d'entrée du modèle hydrodynamique élaboré sur le système aquifère. Le modèle

hydrodynamique est basé sur la méthode des différences finies utilisant le logiciel PROCESSING MODFLOW (PM3).

D. Quatrième étape

Les résultats du modèle mathématique sur l'hydrodynamisme de la nappe, de l'étude hydrochimique et des données géographiques sont à la base de l'étude de la vulnérabilité de la nappe à la contamination par les nitrates.

2 Outils utilisés dans l'étude

2.1 Le Système d'Information Géographique (SIG)

2.1.1 Principe des logiciels ARC/INFO et ARC/View

Dans le cadre de cette étude, le logiciel **ARC/INFO Version 3.4** (ESRI, 1990) a été utilisé pour cartographier et analyser les données spatiales obtenues. ARC/INFO est un logiciel de SIG qui analyse stocke, manipule, des grandeurs à référence spatiale soit sous forme de données vectorielles à savoir des lignes, polygones ou arcs, ou des données de type raster (ESRI, 1993). Le logiciel stocke l'information sous forme de couverture, qui représente son unité de base. La couverture est définie comme étant un simple couche représentant séparément l'information de type vectorielle (Arc, Polygone, Point, Node, Label point, Annotation) et l'information descriptive (Fig. 16).

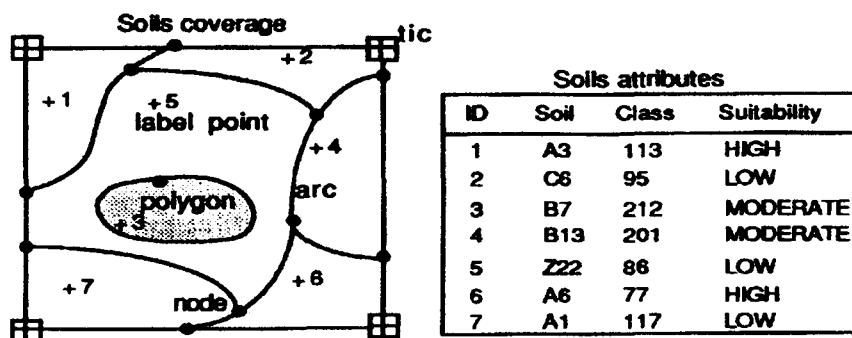


Fig.16: Structuration de la couverture dans ARC/INFO in ESRI, (1990)

Pour présenter les résultats d'analyse de ARC/INFO, c'est le logiciel **ARC VIEW Version 3.0** (ESRI, 1994) qui est utilisé. Ce logiciel de SIG ne conçoit pas de base de données, mais permet une présentation des résultats d'analyse. Ce logiciel possède une base complète de symboles graphiques ou texte pour la restitution de qualité des données définies sous forme de cartes et tableaux.

2.1.2 Objectifs

L'application du SIG dans cette étude a pour but de générer une carte thématique d'occupation des sols à partir des données de l'image satellitaire obtenue dans la zone de Thiaroye, de régionaliser les valeurs de recharge obtenues sur le bilan hydrique et enfin d'établir une carte thématique de typologie des sols. Elle permet également d'intégrer les

données hydrogéologiques dans l'analyse de la vulnérabilité du système à la contamination par les nitrates.

2.1.3 Evolution de la cartographie aux Systèmes d'Informations Géographiques

Depuis les temps très anciens, l'observation de la répartition des propriétés de certaines données de l'espace terrestre, maritime et spatiale, et leur description a été une préoccupation chez les navigateurs, arpenteurs et géographes. Ainsi la collecte et l'assemblage des données servaient surtout dans le domaine militaire et de la navigation (HODGKISS, 1981).

Au 18^e siècle, les civilisations Européennes ont connu des niveaux d'organisation telle qu'on a jugé nécessaire d'avoir une cartographie systématique des états. Avec l'apparition des premiers grands instituts européens, la cartographie était surtout orientée vers la géographie physique (BURROUGH, 1986).

Depuis le 19^e siècle et jusqu'à nos jours, cette science a connu une ère nouvelle. Les cartes topographiques utilisées dans des contextes très généraux vont laisser place aux cartes thématiques qui, pour des besoins très spécifiques, vont permettre des interprétations limitées, dans des domaines très diversifiés comme la géologie, la géomorphologie, la pédologie, l'écologie (FISHER, 1978).

Au 20^e siècle, le développement de la photographie aérienne et de la télédétection a été d'un grand apport sur la qualité et principalement sur la précision dans la reproduction des cartes thématiques. Ces cartes deviendront l'outil principal dans l'exploitation des ressources naturelles pour les besoins de l'humanité (FAO, 1976).

L'année 1960 marque le début de l'utilisation des ordinateurs en cartographie et, son influence dans cette discipline n'a pas cessé depuis. Le développement rapide des ordinateurs et de leur capacité a entraîné un développement corrélatif de la cartographie. Si bien que plusieurs réunions scientifiques internationales ont été consacrées à ce thème: les meeting de la British Cartographic Society (BCS) en 1970 et de American Congress on Surveying and Mapping (ACSM) en 1974 et 1976. L'apport de l'ordinateur en cartographie a été décrit par plusieurs auteurs dont TAYLOR (1990). Cet outil a permis une codification de l'information sur des cartes en lignes, points et polygones.

Mais le développement de la technologie et surtout l'impact de l'homme sur les ressources naturelles ont suscité de nouvelles questions auxquelles la cartographie tente de répondre, à savoir l'évolution dans le temps de ces ressources. En fait la photographie aérienne et surtout l'imagerie satellitaire, permettent de suivre l'évolution des paysages dans le temps et des phénomènes comme la désertification, l'érosion des sols ou les marées (BURROUGH, 1986).

Cette donnée nouvelle a suscité la nécessité d'être assisté en cartographie par les techniques nouvelles de l'imagerie satellitaire. Ainsi vont naître ces nouveaux outils qu'on appelle aujourd'hui les Systèmes d'Information Géographique (SIG).

2.1.4 Les domaines d'application des Systèmes d'Informations Géographiques

Le paragraphe précédent nous révélait déjà différents domaines d'application des Systèmes d'Informations Géographiques. C'est vers les années 1980 qu'il y a eu une réelle explosion

dans l'application des SIG. Selon les orientations, plusieurs définitions ont été données. Les SIG ont été désignés comme:

“ Un logiciel offrant des capacités permettant de saisir, stocker, extraire, manipuler, analyser et éditer toutes sortes de données géographiques” (ESRI, 1990).

Avec les nouvelles dimensions que connaît l'application des SIG, le National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA) a pu développer une taxonomie pour leur utilisation (OBERMEYER, 1989):

- **Les tâches:** L'inventaire, la répartition, la gestion et le développement des ressources naturelles.
- **Les domaines d'application:** environnemental, socio-économique, éducation, recherche etc..
- **Niveau de résolution:** police, gestion.
- **Cadre:** privé, public.
- **Echelle:** micro et/ou macro.

Ces cinq dimensions expliquent aujourd'hui les utilisations très particulières des Systèmes d'Information Géographique.

Dans ce contexte beaucoup de logiciels de SIG avec des caractéristiques très différentes ont été élaborés. On peut ainsi citer (IGWMC / IHE DELFT lecture by van Deursen, 1996):

- ARC/INFO: Environmental Systems Research Institute (ESRI)
- IDRISI: Idrisi.clarcku.edu
- PCRaster: frw.ruu.nl/pcraster
- GRASS: Construction Research Laboratory U.S. Army Corps of Engineers
- ERDAS: Erdas, Inc.
- ILWIS: itc.nl
- MAP (Map Analysis Package)
- Intergraph/MGE: Intergraph Corporation
- Smallworld: w3net.com/sworld/home
- MapInfo: mapinfo.com
- Atlas-GIS: stratmap.com/agis

Chacun de ces logiciels a une structure et un mode de fonctionnement spécifique, leur capacité d'analyse, de stockage et de représentation des données spatiales sont différentes également. Les logiciels de SIG ont une double fonction, car ils combinent à la fois le potentiel des logiciels de dessin (AutoCAD, Corel Draw) pour la cartographie numérique, et celui des systèmes de gestion de bases de données pour les données descriptives et géométriques (STRUCKMEIR & MARGET, 1995).

Dans le domaine hydrogéologique, l'application des SIG est focalisée sur quatre points (IGWMC / IHE DELFT Lecture by van Deursen, 1996):

- Le SIG utilisé comme base de données.
- Le SIG lié aux modèles hydrogéologiques.
- La détermination de la vulnérabilité des systèmes aquifères.
- Evaluation des bilans hydriques des systèmes aquifères.

Les techniques des SIG sont très sollicitées dans la gestion globale de l'environnement qui est souvent orientée vers la protection de la qualité des eaux (GOODCHILD et al., 1993).

Ceci justifie l'application des Systèmes d'Information Géographique dans cette étude, pour cartographier l'ensemble des données se rapportant à la zone d'étude dans l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe de Thiaroye à la pollution par les nitrates.

Dans l'étude de la vulnérabilité des aquifères, l'application d'un SIG permet d'intégrer aussi bien les données géographiques qui peuvent déterminer des sources de pollution de la nappe que celles hydrogéologiques qui caractérisent le système (BRINK & ZAADNOORDIJK, 1995; VERSTRAETEN & McGUIRE, 1996). Le SIG a permis également d'organiser et d'établir des relations entre les données spatiales et leurs attributs, et d'offrir la possibilité d'éditer sous forme de cartes et tableaux tous les résultats.

L'introduction des techniques de SIG dans l'élaboration des modèles environnementaux surtout hydrologiques, n'est à l'heure actuelle qu'à ces débuts. Le SIG sert de support à l'analyse des variables. Il permet de regrouper dans une base de données plus cohérente tous les paramètres d'entrée des modèles qui généralement sont de sources très différentes (GOODCHILD et al., 1993; TIM et al., 1996; BATELAN et al., 1996; RIBEIRO, 1996).

2.2 La statistique et la géostatistique

2.2.1 Principe

La statistique descriptive est basée sur une représentation plus expressive d'une série d'observations ou d'échantillons sous forme de diagrammes ou de tableaux. Les valeurs sont réparties en classes. Le nombre défini de classes k dépend du nombre d'observations n . Selon LANGGUTH & VOIGT (1980) le nombre de classes est donné par la relation:

$$k = \sqrt{n} \quad \text{Pour } n < 1000 \quad (8)$$

Les classes sont reportées sur des histogrammes et le nombre d'observations dans chaque classe appelé fréquence absolue f_i est représenté en ordonnée. Cette représentation graphique sous forme d'histogramme permet de voir le type de distribution de l'échantillon. Pour caractériser une distribution donnée, on définit sa moyenne arithmétique \bar{x} , sa médiane M , et son mode.

La distribution est caractérisée également par la dispersion des observations autour de leur moyenne \bar{x} . Cette dispersion est donnée par la variance, et sa racine carré qui est la déviation standard (DEVIS, 1973). La variance (σ^2 pour une population et s^2 pour des échantillons) et la déviation standard sont définis par les équations (DVWK, 1982):

$$s^2(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (9)$$

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

La valeur $s(x)$, donne le S_c (Skewness), et le S_t (Kurtosis) dans les relations (AKIN & SIEMES, 1988):

$$S_c = \frac{1}{ns^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \quad (11)$$

$$S_t = \frac{1}{ns^4} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 \quad (12)$$

Pour une distribution normale, dite également distribution de Gauss, le S_c (Skewness), et le S_t (Kurtosis) sont égales à zéro. La distribution est symétrique, et la médiane, le mode, et la moyenne arithmétique ont la même valeur. Pour le cas d'une distribution asymétrique à gauche, le S_c (Skewness) est inférieur à zéro. Si S_c est positif la distribution est dite asymétrique à droite.

La recherche de la distribution des données est très importante dans l'application des méthodes géostatistiques. Selon HAWKINS & CRESSIE (1984) et ARMSTRONG & BOUFASSA (1988), les meilleures estimations pour la régionalisation des paramètres comme la transmissivité, la perméabilité, les charges hydrauliques par la méthode d'interpolation linéaire de krigeage, sont obtenues avec la distribution normale.

La géostatistique est basée sur la théorie des variables régionalisées, définie comme la continuité dans la distribution des variables données dans l'espace à 1, 2 ou 3 dimensions et/ou dans le temps (MATHERON, 1963).

Les variables régionalisées sont divisées en deux principales catégories selon DE MARSILY (1986):

-l'hypothèse de stationnarité: qui suppose qu'il n'existe aucune orientation systématique des variables dans l'espace.

-l'hypothèse intrinsèque: elle introduit des interprétations probabilistes et suppose que les variables ont une orientation dans l'espace, que leur distribution statistique ne dépend que de la distance h entre les points, et de leur direction.

La géostatistique pose comme concept de base que chaque variable $z(x)$ est prise à partir d'une population à distribution donnée, et que cette distribution change complètement d'un point (x) à l'autre dans sa forme, sa moyenne, et sa variance (AKIN & SIEMES, 1988).

L'évaluation géostatistique de grandeurs données comporte deux étapes:

- La première étape concerne le calcul et la modélisation de la structure des variables que l'on veut estimer. Le concept de continuité est pris en compte au niveau du variogramme construit lors de cette première étape.
- La deuxième étape est l'estimation proprement dite par la méthode de krigeage. Cette étape dépend entièrement du variogramme construit lors de la première étape.

Le variogramme

Selon DEVIS (1973), le variogramme est une fonction de la covariance c'est à dire il étudie l'interdépendance entre les points de mesure. Les informations ainsi acquises sur deux points très proches sont plus dépendantes que celles données sur des points plus éloignés.

Dans l'analyse du variogramme, l'objectif est d'examiner la cohérence entre des données définies dans un espace à 2 dimensions, surtout si ces données sont régionalisables. Le semi-variogramme expérimental est défini par l'équation:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad (13)$$

$\gamma(h)$	=	Semi-variance expérimentale
z	=	La variable mesurée
x_i	=	Point de mesure de z
h	=	Distance entre les points de mesure
n	=	Nombre de couples de points (lags)

Le semi-variogramme $\gamma(h)$ ainsi donné permet d'élaborer un modèle de variogramme qui donne une courbe, définissant une fonction pour ajuster les points mesurés. La valeur de $\gamma(h)$ peut ne pas être nulle à l'origine. On parle alors d'effet de pépité (C_0) qui reflète d'une certaine manière le caractère aléatoire des variables. Le graphe peut se stabiliser autour d'une valeur limite appelée palier (C). La distance à laquelle ce palier est atteint est dite portée (a) (Fig.17). La portée représente la distance limite à partir de laquelle la variable n'est plus corrélable.

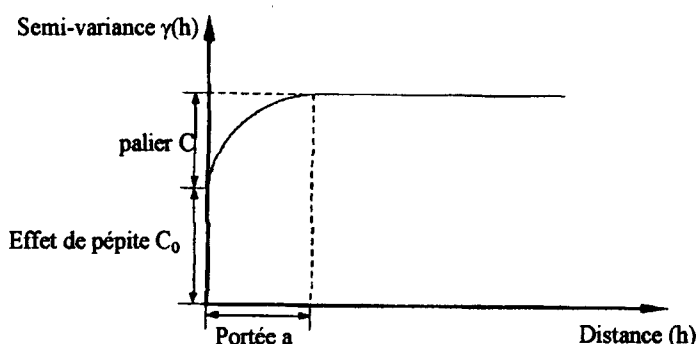


Fig.17: Définition des paramètres du variogramme

Les modèles de variogramme (Fig.18) couramment utilisés sont le modèle linéaire, le modèle sphérique, le modèle exponentiel, le modèle Gaussien et le modèle logarithmique (DEVIS, 1973; AKIN & SIEMES, 1988; KITANIDIS, 1997).

Le modèle linéaire

$$\gamma(h) = C_0 + C \cdot h \quad (14)$$

Le modèle sphérique

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) \quad \text{Avec } 0 < h \leq a \quad (15)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad \text{Avec } h > a \quad (16)$$

Le modèle exponentiel

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) \quad (17)$$

Le modèle Gaussien

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right) \quad (18)$$

Le modèle logarithmique

$$\gamma(h) = 3a \cdot \log h \quad h > 0 \quad (19)$$

$\gamma(h)$	=	Semi-variance expérimentale
h	=	Distance
C	=	Le palier
C_0	=	L'effet pépite
$C+C_0$	=	Le palier total
a	=	La portée

Ainsi sont définis deux groupes de variogrammes:

- Les modèles de variogramme où $\gamma(h)$ croît avec h : ce sont les modèles linéaires.
- Les modèles où $\gamma(h)$ croît au début avec h , puis reste constant autour d'un palier C , alors que h augmente. Ces modèles de variogramme dépendent également d'un deuxième paramètre qui est la portée a . Pour le modèle sphérique, le palier C est atteint quand h est égale à la portée a . Dans le cas du modèle exponentiel ou de Gauss, l'allure sera toujours en dessous de la fonction sphérique. La fonction n'atteint pas le palier, et tend toujours vers C quand $h \rightarrow \infty$. Selon AKIN & SIEMES (1988) pour le modèle exponentiel ou le modèle de Gauss on donne à la portée une valeur théorique pour laquelle 95% du palier est atteint. Ainsi $h = 3a$ pour le modèle exponentiel et $h = 1,73a$ pour le modèle Gaussien.

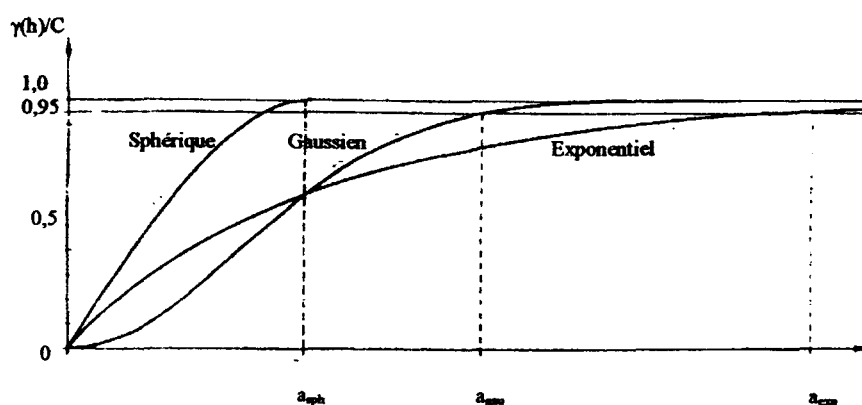


Fig. 18: Les différents modèles de variogrammes selon RENDU (1978) (in AKIN & SIEMES, 1988)

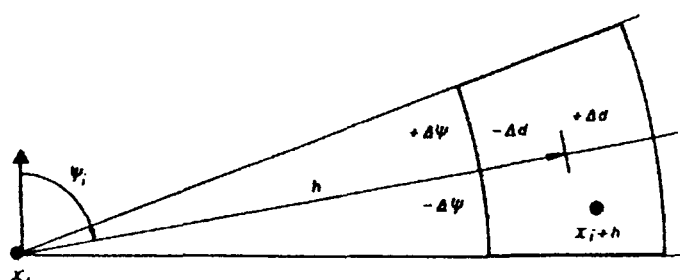


Fig. 19: Les tolérances $\pm \Delta d$ définies sur la distance et $\pm \Delta \psi$ sur la direction pour le calcul d'un semi-variogramme

Dans l'estimation du variogramme, pour définir une éventuelle anisotropie sur la distribution donnée, on considère une distance h avec une tolérance $\pm \Delta d$, et différentes directions ψ_i avec une tolérance de $\pm \Delta \psi$ (Fig.19). Dans les conditions isotropiques, les paramètres du variogrammes sont égaux quelque soit la direction considérée. Dans une anisotropie par contre, ces paramètres sont différents selon les directions.

Dans le cadre de cette étude, le logiciel **Geo-EAS** (Geostatistical Environmental Assessment Software **Version 1.2.1**) a été utilisé pour l'élaboration des histogrammes, l'estimation et l'ajustement des différents modèles de variogrammes.

2.2.2 Objectif

L'application des méthodes statistiques et géostatistiques a permis le traitement des données sur les charges hydrauliques (h), l'hydrochimie et les paramètres géohydrauliques mesurés sur la nappe. Avec la représentation des histogrammes, l'estimation et l'ajustement des variogrammes on a pu étudier les distributions spatiales des variables obtenues sur l'aquifère et minimiser les erreurs d'estimation dans la combinaison linéaire par krigeage des données traitées.

Le krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation linéaire. Il consiste à trouver la meilleure estimation des grandeurs à distribution donnée dans l'espace et/ou dans le temps, à partir de

valeurs discrètes mesurées en un certains nombre de point (KITANIDIS, 1997; DELHOMME, 1974). Comparée aux autres méthodes comme la méthode de distance inverse, la méthode des polygones ou la méthode des triangles, le krigeage présente l'avantage de pouvoir quantifier la précision de l'estimation en donnant la variance de l'erreur d'estimation (DELHOMME, 1979; ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Soit la valeur inconnue $z(x_0)$ à estimer et $z^*(x_0)$ la valeur donnée par estimation à partir de $z(x_i)$ valeur discrète mesurée, la valeur $z^*(x_0)$ sera une combinaison linéaire de $z(x_i)$ donnée par la relation:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i) \quad (20)$$

Pour une meilleure estimation on doit éviter de biaiser la valeur $z(x_0)$, en la sous estimant ou la surestimant. Ainsi la variance d'estimation doit être minimisée. Cette condition est donnée par un système linéaire d'équation à $(n+1)$ inconnues:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0) \quad (i=1, \dots, n) \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (22)$$

$$\delta_k^2 = \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \gamma(x_i, x_0) \quad (23)$$

La résolution de ce système d'équation donne λ et donc la valeur estimée $z^*(x_0)$, et l'erreur d'estimation est donnée par la variance δ_1^2 .

On a utilisé le logiciel **SURFER 6.01** for Windows (KECLER, 1994) pour le krigeage et l'élaboration des cartes d'isovaleurs.

2.3 Modélisation hydrodynamique

2.3.1 Principe mathématique des modèles

A. Equation de l'écoulement

Le déplacement d'un fluide dans un milieu poreux à trois dimensions est régi par des lois physiques, décrites par l'équation de l'écoulement. Cette équation est aux dérivées partielles et dépend des variables définies dans l'espace et dans le temps (t). L'équation admet une solution unique, si les conditions aux limites du domaine et les conditions initiales sont fixées. L'équation de l'écoulement est basée sur la loi de Darcy et le principe de conservation de masse.

La loi de Darcy est expérimentale et donne l'écoulement dans un élément de volume en milieu poreux par la relation in (FETTER,1994):

$$Q = -KA \frac{dh}{dL} \quad (24)$$

Q	=	Le volume traversant la section considérée [m ³ /s]
K	=	La perméabilité [m/s]
A	=	La section traversée [m ²]
dh	=	différence des charges hydrauliques [m]
dL	=	Longueur de l'élément de volume [m]

Dans l'élément de volume considéré, l'écoulement est donné selon le principe de conservation de masse ou de continuité qui traduit que toute l'eau qui y entre est égale à celle qui en sort et qui s'emmagasine. Il est donné par la relation:

$$\frac{\delta M}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta t} (\rho_w n dx dy dz) \quad (25)$$

δM	=	Variation de masse [kg]
δt	=	Temps [s]
ρ	=	Densité du fluide [kg m ⁻³]
n	=	Porosité
dx dy dz	=	Coordonnées définis dans les directions x, y, z

On obtient par combinaison des expressions mathématiques de ces deux lois, le système d'équations régissant les écoulements au sein de l'aquifère. Cette équation s'écrit dans le cas d'un écoulement tridimensionnel:

$$\frac{\delta}{\delta x} \cdot (kf_x \frac{\delta h}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} \cdot (kf_y \frac{\delta h}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z} \cdot (kf_z \frac{\delta h}{\delta z}) \pm Q = S_s \cdot \frac{\delta h}{\delta t} \quad (26)$$

$kf_{x, y, z}$	=	Perméabilité suivant les directions x, y, z [m/s]
h	=	Charge piézométrique [m]
Q	=	Débit d'infiltration ou de pompage [m ³ /s]
S_s	=	Coefficient d'emmagasinement spécifique [-]
t	=	Temps [s]

L'équation donne l'écoulement en cas d'anisotropie et en régime transitoire.

Pour le régime permanent où la charge piézométrique ne varie pas en fonction du temps, l'équation de diffusivité est définie par l'équation de Laplace:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + Q = 0 \quad (27)$$

B. Les méthodes de résolution de l'équation d'écoulement

Résoudre l'équation des écoulements, c'est rechercher la valeur de la charge piézométrique h , inconnue à l'intérieur du système aquifère à étudier. En fonction des caractéristiques du système décrits précédemment, on a une méthode analytique ou une méthode numérique de résolution de l'équation:

Résolution numérique par la méthode des différences finies

La résolution numérique est basée sur le concept que l'équation différentielle peut être remplacée par une équation similaire pouvant être résolue par une méthode arithmétique. Cette méthode consiste en une approximation des dérivés partielles portant sur les valeurs de la variable h en un certain nombre de points choisis. L'équation est sous la forme implicite, c'est à dire les valeurs de h utilisées sont intermédiaires entre les valeurs initiales et les valeurs finales. L'idée est basée sur le découpage de l'aquifère en éléments carrés par des lignes et des colonnes (Fig.20). La valeur de h au noeud, situé à la ligne i et à la colonne j est notée $h_{i,j}$ l'inconnue h n'est plus définie en tous points (x,y) du système, mais on a une approximation de h aux noeuds du réseau.

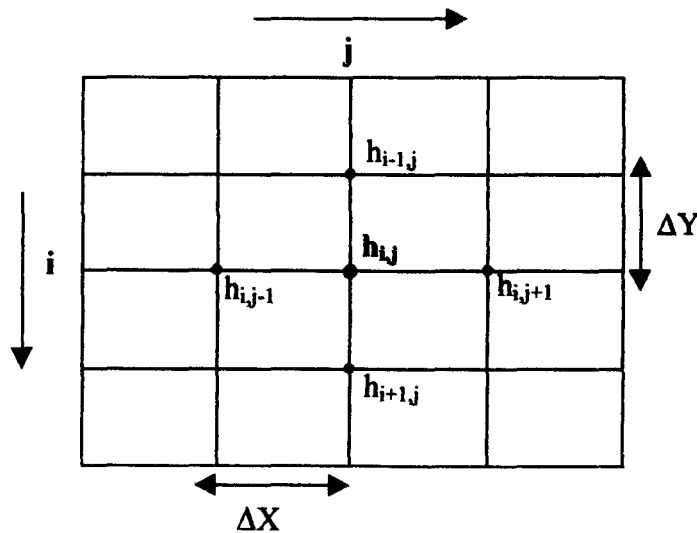


Fig. 20: Principe de la méthode des différences finies (D'après KINZELBACH, 1995)

- Cas du régime permanent

L'écoulement est discrétisé par l'équation de Laplace et on a:

$$\left(\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} \right)_{i,j} = \frac{h_{i,j+1} - 2h_{i,j} + h_{i,j-1}}{(\Delta X)^2} \quad (28)$$

$$\left(\frac{\delta^2 h}{\delta y^2}\right)_{i,j} = \frac{h_{i+1,j} - 2h_{i,j} + h_{i-1,j}}{(\Delta Y)^2} \quad (29)$$

Dans sa forme simplifiée, l'équation donne la valeur de h au noeud (i,j) par la valeur moyenne aux 4 noeuds.

- Cas du régime transitoire

L'équation de diffusivité est:

$$T \left[\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} \right] \pm Q = S_y \frac{\delta h}{\delta t} \quad (30)$$

Dans ce cas, la charge évolue avec le temps, et soit h^0 au temps $t = 0$ et h^1 à la fin du pas de temps, on a:

$$\frac{\delta h}{\delta t} = \frac{h^1_{i,j} - h^0_{i,j}}{\Delta t} \quad (31)$$

Pour résoudre les différents systèmes d'équations ainsi décrits, on dispose de deux types de méthodes que sont les méthodes directes dont les plus utilisées sont les méthodes de Gauss-Jordan, Choleski et Crout et les méthodes itératives avec IADI (Itérative Alternating Direction Implicit Procedure) et PCG (Preconditioned Conjugate Gradient Method).

C. Le programme Processing Modflow

Le programme PROCESSING MODFLOW (PM3) (W. CHIANG & W. KINZELBACH 1993) est utilisé dans le cadre de ce travail. Le logiciel PM3 est un pré- et post-processeur, qui permet l'entrée des données et la représentation graphique des résultats. Les simulations proprement dites sont effectuées par les programmes MODFLOW (McDONALD & HARBAUGH, 1988) et MODPATH (POLLOCK, 1989).

Le processing Modflow est ainsi structuré:

Le préprocesseur

Le pré-processeur permet l'entrée et la structuration des données de simulation. Le PM comporte deux preprocessors:

- le modèle conceptuel

Ce pré-processeur donne une représentation graphique grâce à trois modules:

- **PMCAD**: Permet d'élaborer la carte de la zone à modéliser ou d'importer celle-ci à

partir d'un fichier DXF-ASCII, conçu dans un autre programme (SURFER, AutoCAD, CorelDRAW).

- **Grid Editor**: est conçu pour spécifier ou pour modifier dans une maille donnée, la valeur d'un paramètre d'entrée du modèle.

- **Zone Editor**: permet une zonation des valeurs des différents paramètres du modèle.

- **Premod**

C'est le pré-processeur du programme **MODFLOW** et **MODPATH**, il comporte différents modules:

- **Premod**

Pour spécifier le régime (transitoire, permanent)

- **Grid et Properties**

Ils permettent de définir les dimensions des mailles, le type d'aquifère, les conditions aux limites, les conditions initiales et les caractéristiques du système aquifère (Porosité, K, S)

- **Packages**

Ils regroupent différents modules définis selon le type d'aquifère:

- WEL1 : Simulation des pompages ou injections

- DRN1 : L'effet de drain

- RIV1 : Les rivières

- EVT1 : L'évapotranspiration

- GHB1 : Conditions aux limites

- RCH1 : Recharge

- **Solvers**

Donne la méthode de résolution de l'équation.

- **Output**

Ce module contrôle les données de sortie, à savoir les résultats de la simulation.

Dans le processing MODFLOW, les données d'entrée sauveées en fichier binaire sont converties en fichier ASCII qui sera lu par le programme MODFLOW.

Calculs par itération

La simulation des écoulements est effectuée par le programme MODFLOW et MODPATH. Le MODFLOW est basé sur la méthode des différences finies. La résolution des équations différentielles est effectuée par différents modules utilisant la méthode par itération:

- **SIP** (Strongly Implicit Procedure)

- **SSOR** (Slice-Successive Over relaxation)

- **PCG2** (Preconditioned Conjugate Gradient 2)

Le programme MODPATH permet le calcul de la trajectoire des particules par exemple dans le cas d'un transport de contaminants.

Le postprocesseur

Le post-processeur permet une visualisation des résultats de la simulation. Pour ceci, le programme comporte les modules suivants:

- **Isoline**

Pour une représentation graphique de la piézométrie calculée sous forme de courbes isolines.

- **Water balance**

Donne le bilan des débits calculés sur l'ensemble de la nappe ou sur une zone choisie.

- Pathline

Permet de définir le trajet des particules

- Heads time

Donne sur des points choisis, l'évolution dans le temps de la piézométrie.

Les données du PM doivent être sous forme de fichier ASCII. Pour le transfert des valeurs de SURFER au PM-format, on a utilisé le programme CONVER1. Ce programme est sous MS-DOS, il édite les valeurs en tableau sous un fichier (.tab), puis en un format PM.

2.3.2 Objectif

Le modèle hydrodynamique élaboré dans le cadre de cette étude a permis de simuler:

- les écoulements sur la nappe de Thiaroye en régime permanent. La piézométrie de février 1971 est considérée comme état initial.
- l'évolution piézométrique (1971-1997) avec les conditions climatiques de ces dernières années.
- l'arrêt des pompages dans la zone de Thiaroye sur les prochaines années.

PARTIE II

**ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU SYSTEME
AQUIFERE DE THIAROYE: ACQUISITION
TRAITEMENT DES DONNEES-RESULTATS ET
ANALYSES CRITIQUES**

I. ACQUISITION DES DONNEES DE L'ETUDE

1. LES DONNEES DE TERRAIN

1.1 Le réseau de mesure

L'étude de terrain a été menée à Dakar avec une équipe du Ministère de l'Hydraulique et du groupe d'hydrogéologie du Département de Géologie (UCAD). L'étude est effectuée sur la base de la carte "Nappe des sables Quaternaires: Infrabasaltique – Thiaroye/Beer Thialane" (Fig.9). Le réseau de mesure qui s'étend de la Patte d'Oie à Kayar comprend:

- 10 FORAGES: F15, F17, F18, F19, F21, F22, F1, F2, F3, F4
- 29 PIEZOMETRES: P2.1, P2.2, P2.3, P2.4, P2.5, P2.6, P2.7, P2.8, P2.9, P2.10, P.18, P.19, P.4, P.58, P3.1, P3.2, P3.3, PS.1, PS.2, PS.3, PS.3Bis, PS.4, PS.5, PS.6, PS.7, PS.8, PS.10, PS.11, PS.14
- 17 PUIITS VILLAGEOIS: Pts.02, Pts.225, Pts.109, Pts.234, Pts.65, Pts.68, Pts.120, Pts.128, Pts.232, Pts.213, Pts.234, Pts.202, Pts.235, Pts.123, Pts.215, Pts. 209, Pts.220

Le travail de terrain s'est déroulé en trois campagnes durant la période Avril - Octobre 1997.

1.2 Types de mesures

1.2.1 La piézométrie

Tous les points ont fait l'objet de mesures de profondeur de la nappe à l'aide d'une sonde piézométrique sonore. Pratiquement, toutes les mesures ont été réalisées par rapport au tube de l'ouvrage. Les résultats sont consignés en annexe 1.

1.2.2 L'échantillonnage

Le prélèvement d'eau s'est effectué juste après les mesures de profondeur de l'eau dans l'aquifère. Pour une représentativité de l'échantillon, chaque point de mesure a fait l'objet d'un pompage pendant environ 15 à 20 minutes avant échantillonnage, c'est à dire jusqu'à une stabilisation de la conductivité électrique. Une pompe de type GRUNDFOS: BMP / MP1-230 V a été utilisée avec un débit de 0,4 l/s.

1.2.3 Mesures in-situ

• Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques (conductivité, pH, température, oxygène dissous) ont été mesurés in-situ. Durant tout le pompage, les données seront enregistrées avec une fréquence de 30 secondes sur un **DATALOGGER** (16-Kanal-Logger 21X, **CAMPELL SCIENTIFIC** Ltd) sous le programme **OBING**. Ceci permettra de voir surtout l'évolution des paramètres mesurés durant le pompage.

L'exploitation des données enregistrées est effectuée sur la base des valeurs relevées sur des appareils digitaux par des corrélations établies.

- **Titration**

Le titre alcalimétrique correspondant à la teneur en carbonates et bicarbonates a été déterminé sur le terrain, par dosage à l'acide sulfurique H_2SO_4 (0,01N) (HÖLTING, 1984).

1.2.4 Les pompages d'essai

Les pompages d'essai sont effectués sur les piézomètres P2.1, P2.3, P2.6, P2.7, P2.8, P2.9, P3.1. Les paramètres hydrodynamiques (transmissivité et perméabilité) en ces points ont été définis pour les besoins d'un modèle mathématique développé dans les chapitres qui suivent.

La durée des pompages est d'environ 8 à 16 heures selon l'ouvrage. Les pompages sont effectués à des débits qui varient de 0,64 à 2,80 m³/h. Le rabattement de la nappe en fonction du temps a été enregistré sur le **DATALOGGER**. Une sonde piézométrique sonore a permis de suivre l'évolution du niveau de la nappe. Pour éviter toute influence, les eaux pompées sont évacuées à environ 6 mètres. Les pompages sont réalisés sans piézomètres d'observation. En effet, les rabattements considérés sont donnés à partir du puits de pompage.

La détermination des coordonnées géographiques de tous les points de mesures a été également effectuée à l'aide d'un GPS (Global Positioning System).

1.3 Les différentes campagnes

Les différentes campagnes et les mesures effectuées dans l'étude de terrain sont résumées sur le tableau ci-dessous:

Tableau 3: Les différentes campagnes et mesures effectuées sur la nappe de Thiaroye

MESURES	Campagne pré-hivernale (Jun-Juillet 1997)	Campagne hivernale (Août 1997)	Campagne post-hivernale (Octobre 1997)
Piézométrie	X		X
Echantillonnage	X		X
In-situ	X	X	X
Pompage d'essai		X	

X: Mesures effectuées

2 LES DONNÉES CHIMIQUES AU LABORATOIRE

Pour définir l'état actuel de la contamination de la nappe de Thiaroye, les prélèvements effectués durant ces différentes campagnes décrites ci-dessus ont fait l'objet d'analyses chimiques. Les nitrates (NO_3^-), nitrites (NO_2^-), et ammonium (NH_4^+), de même que ions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+) ont été dosés suivant différentes méthodes d'analyse:

2.1 Les méthodes d'analyse

2.1.1 Dosage par spectrophotomètre

Les nitrates (NO_3^-), nitrites (NO_2^-), ammonium (NH_4^+) sont dosés au spectrophotomètre (HACH DR/2000). Les réactifs utilisés sont le Nitrat Ver5 pour les nitrates, le Nitri Ver3 pour les nitrites et le réactif de Nessler pour l'ammonium (HACH COMPANY, 1989).

2.1.2 Dosage par chromatographe ionique

Les teneurs en nitrate (NO_3^-), chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), sont déterminées par chromatographie ionique. Le PEAKNET™ Software a permis la saisie et l'exploitation des chromatogrammes. Les ions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+) ont été dosés par chromatographie ionique.

2.1.3 Dosage par spectrophotomètre à absorption atomique (SAA)

Les ions sodium (Na^+), potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}), et magnésium (Mg^{2+}) sont dosés par SAA.

Toutes les analyses de la campagne pré-hivernale ont été effectuées au laboratoire d'hydrochimie du département de Géologie (UCAD).

Après la campagne post-hivernale, les échantillons sont acidifiés à H_2SO_4 ($\text{pH} \cong 2$) et conservés à environ 10°C avant d'être amené à Munich. Les analyses chimiques sont effectuées au laboratoire d'hydrochimie de l'IAAG (Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie LMU). Les échantillons ont été d'abord filtrés ($0,45\mu\text{m}$ Cellulose-Nitrat-Filter).

Les erreurs calculées à partir des balances ioniques permettent de vérifier la qualité des analyses chimiques. Ainsi d'après le Deutscher Verband Für Wasserwirtschaft Und Kulturbau (DVWK, 1992) les erreurs d'analyses sur les cations et anions ont été calculées. Jusqu'à 2 mmol/l (eq) les erreurs obtenues sont majoritairement inférieures à 5% et au delà de 2 mmol/l (eq) à 2%. Ce qui est une marge acceptable pour des analyses chimiques. Les valeurs éloignées de ces limites ont été éliminées.

2.2 Les résultats

Les résultats obtenus sur les différentes méthodes d'analyses chimiques effectuées sont donnés en annexe 2.

3 LES DONNÉES GÉOGRAPHIQUES

3.1 Les données sur l'occupation des sols

Pour générer la carte thématique d'occupation des sols, on a utilisé une image satellitaire traitée au CSE (Centre de Suivi Ecologique de Dakar).

L'image utilisée est issue de deux scènes différentes datées du 23 décembre 1995, l'une centrée à Dakar, et l'autre dans la zone du "Lac Retba" (Fig.21). L'image au 1/20 000^{ème} est de type SPOT (XS+P) à haute résolution offrant ainsi une grande précision avec la combinaison de trois canaux spectraux (XS) à 20 m de résolution spatiale et un canal panchromatique (P) à 10 m de résolution (CSE, 1996).

3.2 Les données hydroclimatologiques

L'élaboration du bilan hydrique du système aquifère a nécessité la collecte des données climatiques des différentes stations météorologiques localisées dans la zone d'étude:

Dakar-Yoff	Mbao
Pikine	Bambilor
Hann	Kayar

Les données de l'ASECNA ont été utilisées, elles concernent la pluviométrie, la température, et l'humidité relative de l'air.

3.3 les données sur la nature des sols

Les données obtenues à partir de l'étude USAID/RSI (1986) sur la cartographie et la télédétection des ressources de la république du Sénégal ont été utilisées pour cartographier les types de sol du domaine d'étude.

II. TRAITEMENT – INTERPRETATION DES DONNÉES ET ANALYSES CRITIQUES

1. GEOMETRIE ET PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Les sables aquifères sont en totalité libre, mais dans certaines zones très limitées la présence de couches argileuses de 1 à 2 m d'épaisseur maintient la nappe semi-captive.

Les données concernant la géométrie utilisées dans ce travail, pour les besoins de l'élaboration d'un modèle hydrodynamique sont empruntées des travaux antérieurs.

1.1 Géométrie du système hydraulique

1.1.1 le substratum imperméable

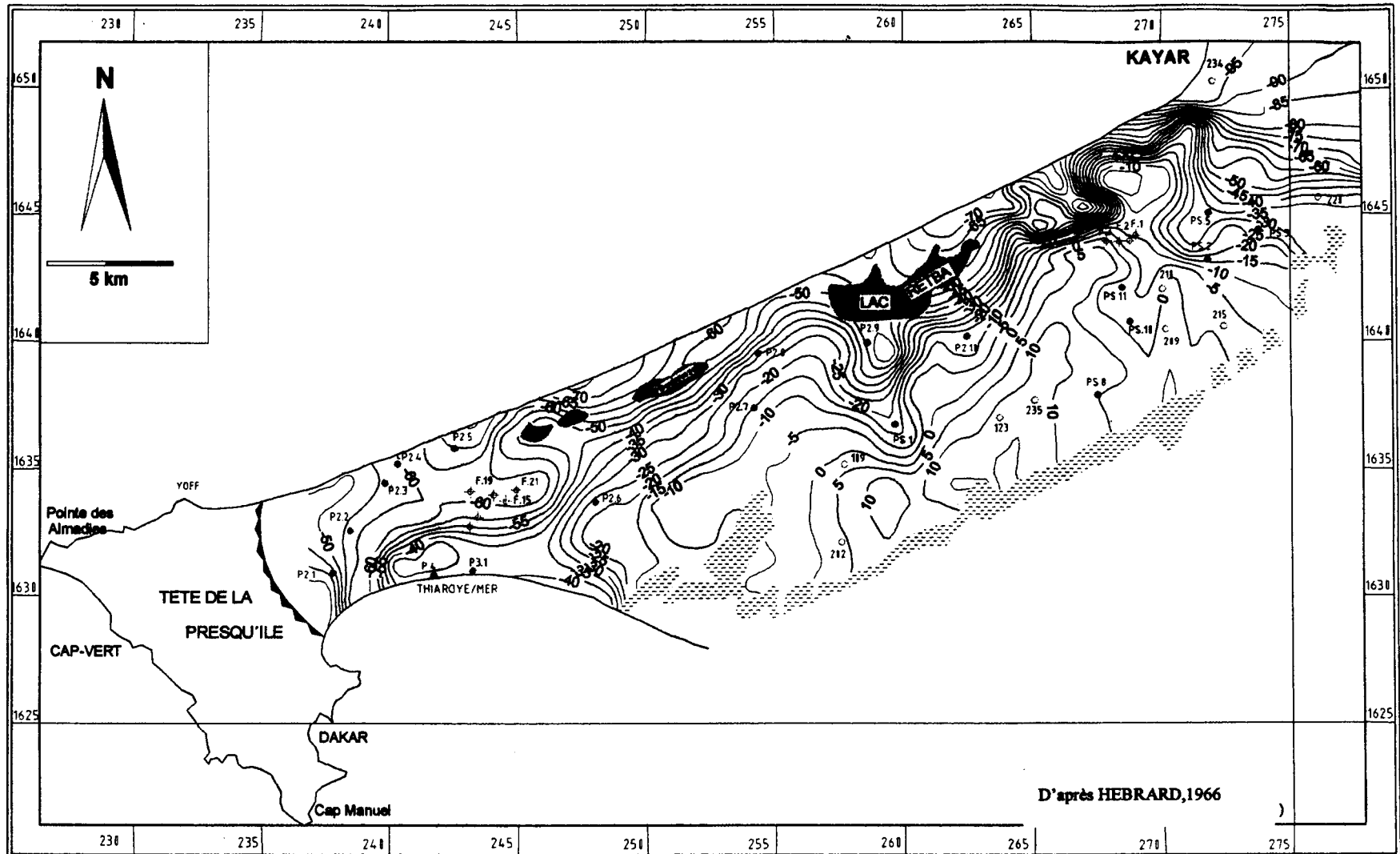
Le mur de l'aquifère est essentiellement constitué des formations marneuses de l'éocène. La morphologie du substratum (Fig.22) décrit une surface inclinée vers le Nord, partant de la côte +10 m à Mbao à la côte - 70 m sur le long du littoral nord à la côte - 90 m au niveau de la

Fig. 19: IMAGGI SATELLITARI DELLA ZONA DELL'UDE



(d'après l'intégration d'images Spot N° et P, du 23.12.1995)

CSIPANARSI/CAI



LEGENDE:

- | | | | |
|--|--------------------------------------|--|------------------|
| | Isobathe du toit des marnes en mètre | | Forage |
| | Limite Ouest de la Nappe | | Piézomètre |
| | Limite de l'affleurement des marnes | | Puits Villageois |

**Fig.22: NAPPE LIBRE DES SABLES QUATERNAIRES
THIARYE/BEER THIALANE**

MORPHOLOGIE DU SUBSTRATUM MARNEUX

Patte d'Oie à l'Ouest, et dans la zone de Kayar au Nord-Est. La côte est de - 30 m sur le long du littoral sud. La surface du substratum marneux est accidentée, elle présente des dépressions comblées par les dépôts des sables aquifères.

1.1.2 L'épaisseur des sables aquifères

Les formations sableuses au dessus du substratum sont de nature très différente et d'épaisseur variable (Fig.23). On distingue dans la zone du bassin de Thiaroye, une cuvette remplie de sable d'une épaisseur supérieure à 50 m. Ce dépôt sableux, est formé à la base de sables argileux discontinus qui reposent sur le substratum marneux.

Dans une zone centrée au Sud du lac Mbeubeuss, l'épaisseur des sables varie entre 20 et 40 m. Au niveau de Sangalkam (PS.1) dans une zone orientée Sud-Nord, l'épaisseur des sables croit pour atteindre 50 à 60 m au niveau du lac Retba. Ceci pourrait correspondre à l'emplacement d'une dépression du substratum.

1.1.3 La topographie

L'élaboration d'une carte topographique de la zone d'étude a été effectuée sur la base du fond topographique, élaboré par l'Institut Géographique National (IGN) Paris et le Service Géographique National (SGN) Dakar (Deuxième Edition: 1983). Les feuilles utilisées sont:

- DAKAR : 1/50 000
- BARGNY : 1/50 000
- KAYAR : 1/50 000

Ce fond topographique a été numérisé avec le logiciel AutoCAD 14.0 pour générer une carte topographique digitale (Fig.24). Ces données sont utilisées pour corriger les côtes topographiques obtenues au niveau de certains points de mesures dans l'élaboration des différentes cartes piézométriques.

1.2 Les paramètres hydrodynamiques

1.2.1 Détermination de la transmissivité et de perméabilité par pompage d'essai

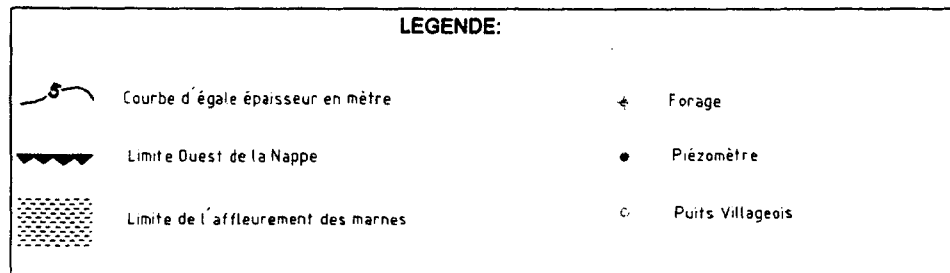
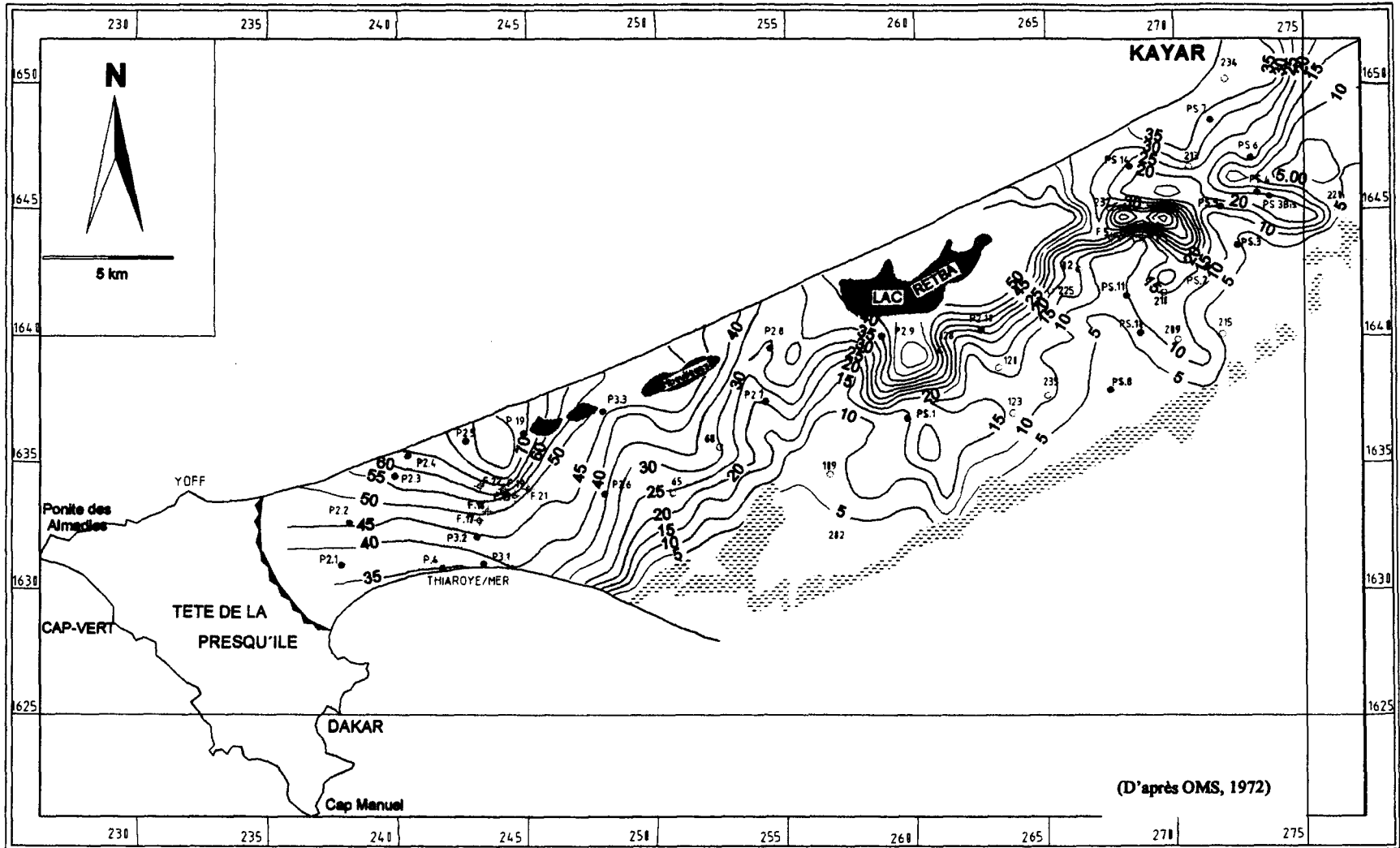
Le pompage d'essai est une méthode définie pour déterminer les caractéristiques hydrauliques des formations géologiques (KRUSEMAN & DE RIDDER, 1991). L'essai est donné par application d'une décharge sur la nappe en fonction du temps pour pouvoir évaluer quantitativement et qualitativement le système aquifère (JORDAN & WEDER, 1995).

1.2.1.1 Conditions hydrogéologiques

Les logs lithostratigraphiques de quelques piézomètres de pompage (P2-1, P2-3, P2-6, P2-7, P2-9, P3-1) révèlent une structure sableuse plus ou moins argileuse reposant sur un substratum marneux. L'épaisseur des sables mouillés varie d'un point à l'autre.

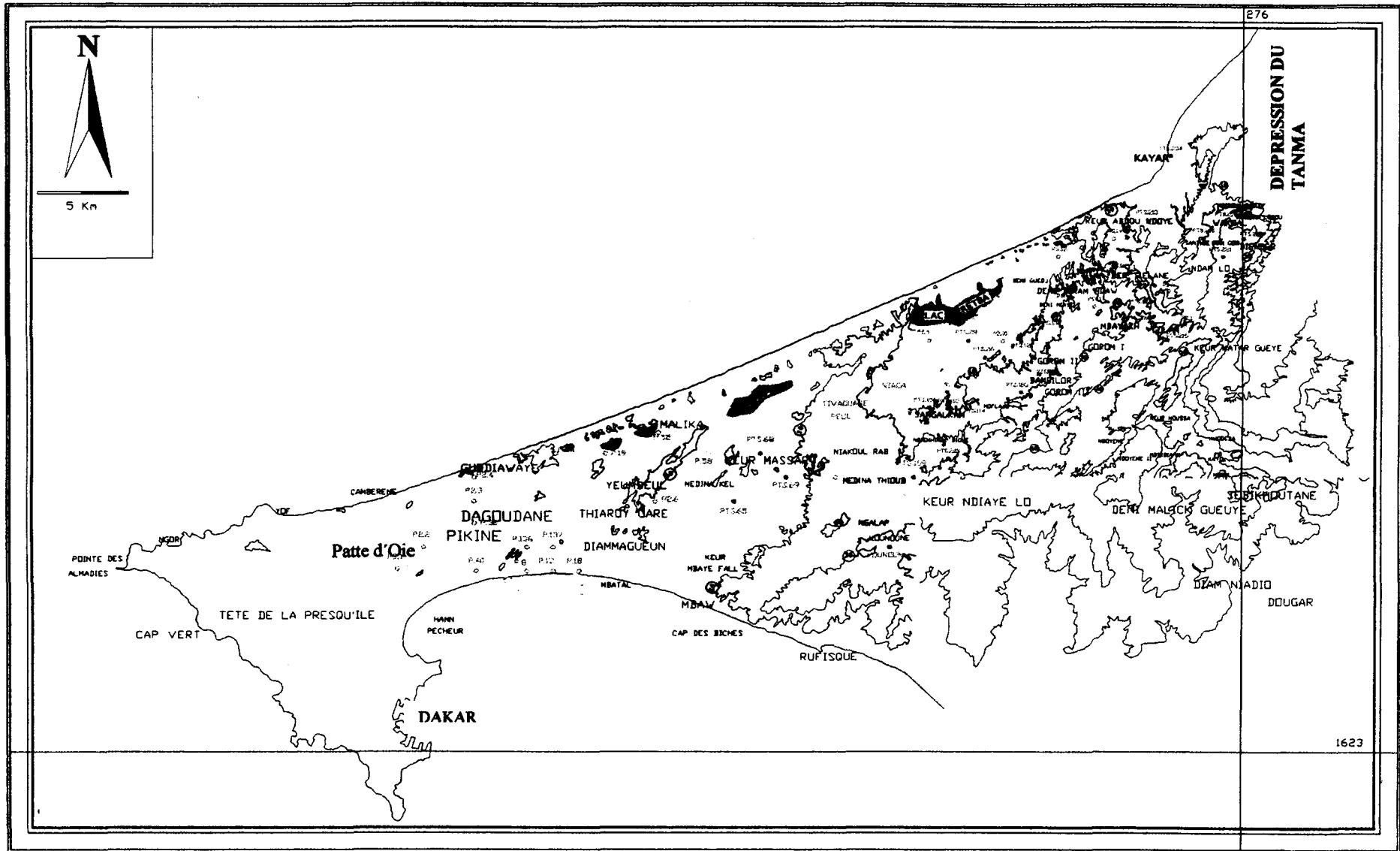
1.2.1.2 Les méthodes de traitement des données

Les données obtenues sont exploitées selon différentes méthodes avec le programme HYDRO TEC 2.0 (THOMAS RÖHRICH, 1998). Pour les différentes formules utilisées, le rayon de



**Fig.23: NAPPE LIBRE DES SABLES QUATERNAIRES
THIAROYE/BEER THIALANE**

EPAISSEUR DES SABLES AQUIFERES



LEGENDE

- Piézomètre
- Puits villageois

⎓ Courbe de niveau (m)

**Fig.24: CARTE TOPOGRAPHIQUE
DE LA PRESQU'ILE DU CAP-VERT**

l'ouvrage a été considéré pour la distance entre le puits de pompage et le piézomètre d'observation. L'interprétation des mesures obtenues ne s'est effectuée que sur la phase descendante.

La figure 25 présente la courbe du rabattement observé en fonction des débits et du temps au niveau du piézomètre P2-8. Les rabattements observés au piézomètres P2-1 et P2-3 sont donnés en annexe 3.

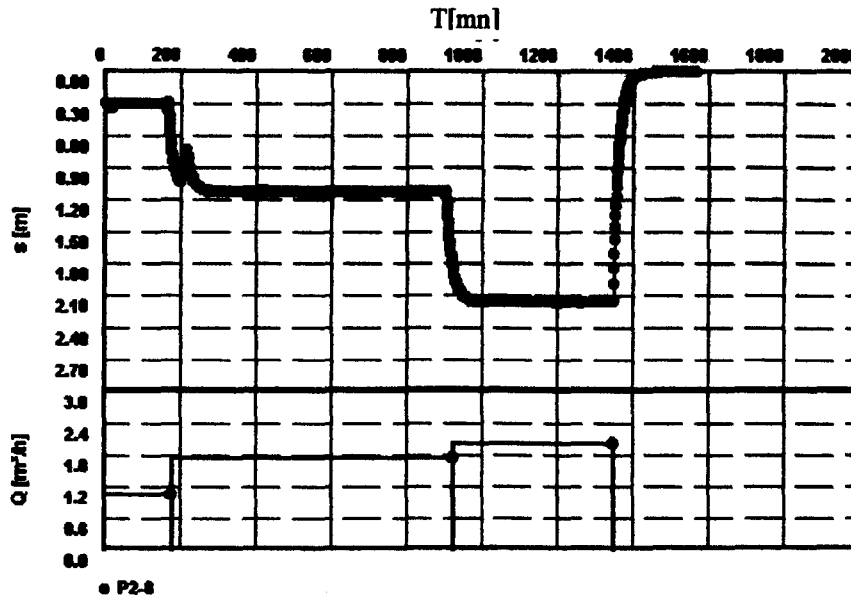


Fig.25: Rabattement observé en fonction du temps au piézomètre P2-8

A. La méthode de THEIS

Cette méthode définie par THEIS (1935) est développée pour un aquifère captif en régime transitoire. Selon l'auteur le rabattement en un point considéré est donné par l'équation (LANGGUTH & VOIGT 1980, KRUSEMAN & DE RIDDER, 1991):

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u) \quad [\text{m}] \quad (32)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4tT} \quad S = \frac{4Ttu}{r^2} \quad [-] \quad (33)$$

T	=	Transmissivité [m ² /s]
S	=	Coefficient d'emménagement [-]
s(r,t)	=	Rabattement observé à une distance r du puits de pompage [m]
Q	=	Le débit [m ³ /s]
t	=	Le temps depuis le début du pompage [s]
r	=	Distance entre le puits de pompage et le piézomètre d'observation ou le rayon du puits de pompage [m]

La méthode de THEIS est développée pour un aquifère captif, elle a été utilisée ici sur un système libre. Ainsi le rabattement obtenu a été corrigé selon la formule (ARBEITSBLATT DES MINISTERIUMS FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG, 1976):

$$s_t = s - \frac{s^2}{2H} \quad [\text{m}] \quad (34)$$

s_t	=	Le rabattement corrigé
s	=	Le rabattement observé
H	=	épaisseur de l'aquifère

B. La méthode de COOPER & JACOB

La méthode de Jacob (COOPER & JACOB, 1946) est basée sur la formule de THEIS. L'approximation logarithmique de JACOB est donnée par la relation (LANGGUTH & VOIGT 1980, KRUSEMAN & DE RIDDER, 1991):

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \cdot \lg \frac{2,25Tt}{r^2 S} \quad [\text{m}] \quad (35)$$

Si on choisit deux points t_1 et t_2 avec $\Delta \lg t = \lg t_2 - \lg t_1 = 1$ on définit ainsi le rabattement Δs sur un cycle logarithmique et la transmissivité T est donnée:

$$T = \frac{2,3Q}{4\pi \Delta s} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (36)$$

$$S = \frac{2,25Tt_0}{r^2} \quad [-] \quad (37)$$

C. La méthode de BOULTON

L'interprétation des pompages d'essai dans un aquifère libre s'est révélée plus complexe même avec une correction des rabattements. On a:

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(S_{EA}, r/B) \quad [\text{m}] \quad (38)$$

$s(r,t)$	=	Rabattement observé à une distance r du puits de pompage [m]
Q	=	Le débit [m^3/s]
S_{EA}	=	S_A, S_E
$W(S_{EA}, r/B)$	=	Fonction de BOULTON
t	=	Le temps depuis le début du pompage [s]

r = Distance entre le puits de pompage et le piézomètre d'observation ou le rayon du puits de pompage [m]

$$B = \sqrt{T(\alpha \cdot S_E)} \text{ [m]} \quad (39)$$

avec $\frac{1}{\alpha}$ qui est une constante (Indice de BOULTON).

1.2.13 Résultats obtenus

Les valeurs de transmissivité, perméabilité, coefficient d'emmagasinement obtenues sont données sur le tableau 4.

Tableau 4: Valeurs de transmissivité, de perméabilité, et de coefficient d'emmagasinement obtenues par différentes méthodes

THEIS					
LOCALITY	Q (m ³ /h)	Ep. (m)	T (m ² /s)	Kf (m/s)	S
P2-1 Patte d'Oie	1,64	18,59	4,11 10 ⁻⁵	2,21 10 ⁻⁶	2,05 10 ⁻²
P2-3 Golf Club	1,26	19,8	2,22 10 ⁻⁴	1,41 10 ⁻⁵	6,05 10 ⁻²
P2-4.HLM Guédia.	1,40	19,34	4,37 10 ⁻⁴	2,26 10 ⁻⁵	3,11 10 ⁻²
P2-5 Les filaos	1,36	17,11	5,34 10 ⁻⁴	3,12 10 ⁻⁵	7,51 10 ⁻²
P2-6 Boun	0,95	13,83	3,66 10 ⁻⁵	2,65 10 ⁻⁶	4,13 10 ⁻²
P2-7 Tivaoua. Peulh	1,18	13,94	9,31 10 ⁻⁶	6,68 10 ⁻⁷	1,05 10 ⁻²
P2-8 Tivaoua. Peulh	1,74	15,6	3,85 10 ⁻³	2,47 10 ⁻⁴	1,23 10 ⁻²
P2-9 Niaga Peulh	2,02	10,72	1,30 10 ⁻⁴	1,21 10 ⁻⁵	1,30 10 ⁻²
P2-10 Gouye Guew.	1,17	8,91	1,45 10 ⁻⁴	1,63 10 ⁻⁵	1,30 10 ⁻²
P3-1 Thiaroye/Nest.	1,87	30,96	1,46 10 ⁻⁴	4,89 10 ⁻⁶	3,30 10 ⁻²
F-3 Beer Thialane	0,58	16,41	1,56 10 ⁻⁴	9,56 10 ⁻⁶	4,44 10 ⁻²

COOPER & JACOB					
LOCALITY	Q (m ³ /h)	Ep. (m)	T (m ² /s)	Kf (m/s)	S
P2-1 Patte d'Oie	1,64	18,59	5,48 10 ⁻⁵	2,95 10 ⁻⁶	1,19 10 ⁻²
P2-3 Golf Club	1,26	19,8	4,16 10 ⁻⁴	3,38 10 ⁻⁶	1,09 10 ⁻²
P2-4.HLMGuédiaw.	1,40	19,34	2,46 10 ⁻⁴	1,27 10 ⁻⁵	1,58 10 ⁻²
P2-5 Les filaos	1,36	17,11	1,04 10 ⁻⁴	5,90 10 ⁻⁶	5,11 10 ⁻²
P2-6 Boun	0,95	13,83	5,94 10 ⁻⁵	4,29 10 ⁻⁶	2,16 10 ⁻²
P2-7Tiva.Peulh	1,18	13,94	3,83 10 ⁻⁵	2,77 10 ⁻⁶	1,01 10 ⁻³
P2-7Tiva.Peulh	1,74	15,6	4,86 10 ⁻⁵	3,11 10 ⁻⁶	4,76 10 ⁻¹
P2-9 Niaga Peulh	2,02	10,72	6,43 10 ⁻⁴	6,00 10 ⁻⁵	7,57 10 ⁻³
P2-10 Gouye Guew.	1,17	8,91	3,56 10 ⁻⁴	3,99 10 ⁻⁵	2,79 10 ⁻²
P3-1Thiaroye/Nest.	1,87	30,96	2,68 10 ⁻⁴	8,96 10 ⁻⁶	4,60 10 ⁻³
F-3 Beer Thialane	0,58	16,41	7,46 10 ⁻³	4,55 10 ⁻⁶	1,16 10 ⁻²

BOULTON

LOCALITE	Q (m ³ /h)	Ep. (m)	T (m ² /s)	Kf (m/s)	S
P2-1 Patte d'Oie	1,64	18,59	7,18 10 ⁻⁵	3,87 10 ⁻⁶	3,26 10 ⁻²
P2-3 Golf Club	1,26	19,8	2,1 10 ⁻⁴	1,63 10 ⁻⁵	6,02 10 ⁻²
P2-4.HLM Guédia.	1,40	19,34	3,04 10 ⁻⁴	1,57 10 ⁻⁵	4,90 10 ⁻²
P2-5 Les filaos	1,36	17,11	4,00 10 ⁻⁴	2,26 10 ⁻⁵	6,46 10 ⁻²
P2-6 Boun	0,95	13,83	3,28 10 ⁻⁵	2,37 10 ⁻⁶	5,17 10 ⁻²
P2-7 Tivaoua. Peulh	1,18	13,94	9,00 10 ⁻⁶	6,32 10 ⁻⁷	1,17 10 ⁻²
P2-8 Tivaoua. Peulh	1,74	15,6	2,32 10 ⁻³	1,48 10 ⁻⁴	1,21 10 ⁻¹
P2-9 Niaga Peulh	2,02	10,72	2,37 10 ⁻⁴	2,21 10 ⁻⁵	1,85 10 ⁻³
P2-10 Gouye Guew.	1,17	8,91	1,24 10 ⁻⁴	1,39 10 ⁻⁵	1,45 10 ⁻¹
P3-1 Thiaroye/Nest.	1,87	30,96	7,4 10 ⁻⁵	2,45 10 ⁻⁶	4,58 10 ⁻²
F-3 Beer Thialane	0,58	16,41	1,17 10 ⁻⁴	7,18 10 ⁻⁶	1,55 10 ⁻²

(Ep.): Epaisseur des sables mouillés

A. Les perméabilités et transmissivités

Les données de perméabilité obtenues dans le cadre de cette étude et celles de Géohydraulique (1972) sont très variables d'un point à un autre. Elles sont comprises entre $5 \cdot 10^{-6}$ et $8,5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Dans la zone de Thiaroye, les perméabilités sont inférieures à $1 \cdot 10^{-4}$ m/s et les plus fortes valeurs sont localisées dans la zone du lac Retba. Dans le Sud-Est de l'aquifère où le substratum marneux affleure, elles deviennent faibles. Sur une grande partie de l'aquifère, les valeurs sont comprises entre 1 et $5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

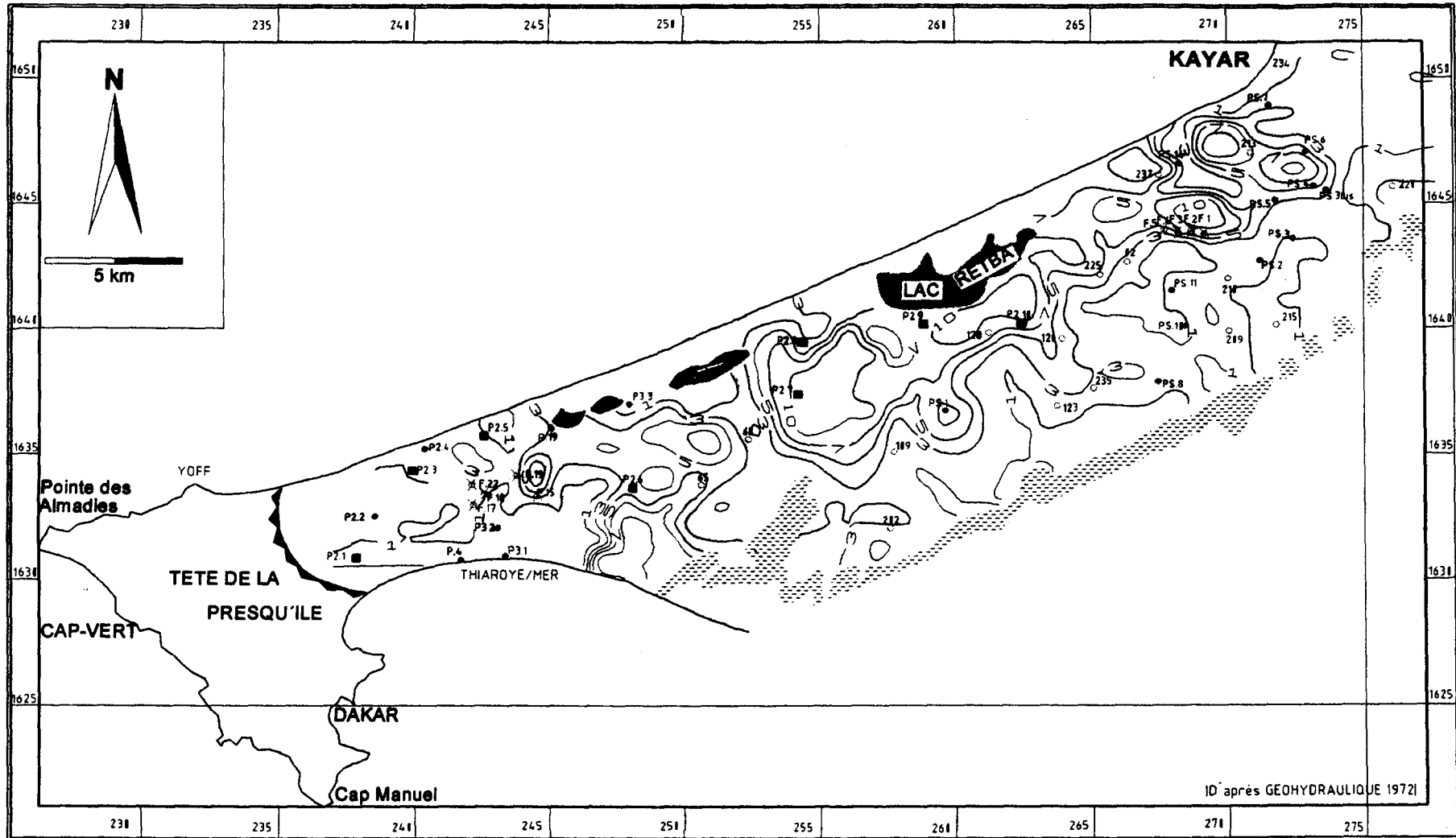
Les valeurs de transmissivité (Fig. 26), varient suivant la même grandeur entre 1 et $10 \cdot 10^{-3}$ m²/s avec les plus fortes valeurs dans la zone du lac Retba, Mbawane. Dans le Sud de l'aquifère ces valeurs sont comprises entre 1 et $3 \cdot 10^{-3}$ m²/s.

B. Les coefficients d'emmagasinement (S)

Les valeurs de S obtenues par pompage d'essai se sont révélées trop faibles. Elles sont comprises entre 1 et 6 %. Ceci peut être dû aux conditions de pompages.

1.2.2 Analyses et conclusions

Dans les différentes méthodes, les résultats obtenus présentent des valeurs de même ordre de grandeur, et on a considéré pour chaque point les valeurs moyennes de transmissivité, de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement. Ces valeurs moyennes sont comparées aux valeurs obtenues par pompage d'essai lors de l'étude (GEOHYDRAULIQUE, 1972) (tableau 5).



ID après GEOHYDRAULIQUE 19721

LEGENDE:

- | | | | |
|---|-------------------------------------|---|---|
|  | Courbe de transmissivité 10-3 m2/s |  | Points de mesure |
|  | Limite Ouest de la Nappe |  | Forage |
|  | Limite de l'affleurement des marnes |  | Piézometre |
| | |  | Puits Villageois |
| | |  | Points où sont effectués les pompages d'Essai |

Fig.26: NAPPE LIBRE DES SABLES QUATERNAIRES

THIAROYE / BEER THIALANE
CARTE DES TRANSMISSIVITES

Tableau 5: Etude comparative des résultats obtenus avec ceux de GEOHYDRAULIQUE 1972

LOCALITY	CETTE ETUDE			GEOHYDRAULIQUE 72.		
	T(10^{-4})m ² /s	Kf(10^{-4})m/s	S (%)	T(10^{-3})m ² /s	Kf(10^{-4})m/s	S (%)
P2-1 Pt. d'Oie	0,60	0,12	2	1,5	0,8	-
P2-3 Gf. Club	2,82	0,11	5	3	0,91	-
P2-4.HLM G.	3,29	0,16	3	3	0,97	1,9
P2-5 Les filao.	3,42	0,10	7	3	1,75	4,8
P2-6 Boun	0,42	0,13	3	2,9	1,85	2,1
P2-7 T. Peulh	0,1	0,11	1	4,5	1,22	1,6
P2-8 T. Peulh	0,30	1,35	6	2,83	1,79	1,5
P2-9 N. Peulh	4,36	1,33	4	6,26	6,34	2,51
P2-10 G. Gu.	3,08	2,23	3,5	6,26	7,40	2,51
P3-1 Th./Nest.	1,74	0,15	3	2,45	0,4	1,06
F-3 B. Thial.	3,57	1,01	2	6,75	3,4	1,67

La comparaison des résultats, montre que nos valeurs sont faibles par rapport à celles obtenues dans l'étude GEOHYDRAULIQUE (1972). Les différences observées peuvent s'expliquer par les ouvrages pompés qui ne sont pas les mêmes, les variations d'épaisseurs et de faciès, la différence des conditions de pompage (les débits et le temps de pompage très différents) et la mesure de la remontée de la nappe.

2. PIEZOMETRIE ET BATHYMETRIE DE LA NAPPE

2.1 Variabilité temporelle et spatiale de la piézométrie

2.1.1 Evolution piézométrique interannuelle

Les données piézométriques utilisées ont été obtenues dans le cadre du programme de suivi des nappes du Sénégal (Direction des études Hydrauliques, Ministère de l'Hydraulique Dakar/SENEGAL). Elles couvrent une chronique de 1976 à 1996. Les figures 27 et 28 montrent l'évolution temporelle de la piézométrie en rapport avec la pluviométrie au niveau des piézométrie P2.1 et PS.10 situés respectivement dans les secteurs Sud Ouest et Nord Est. Elles montrent les faits suivants:

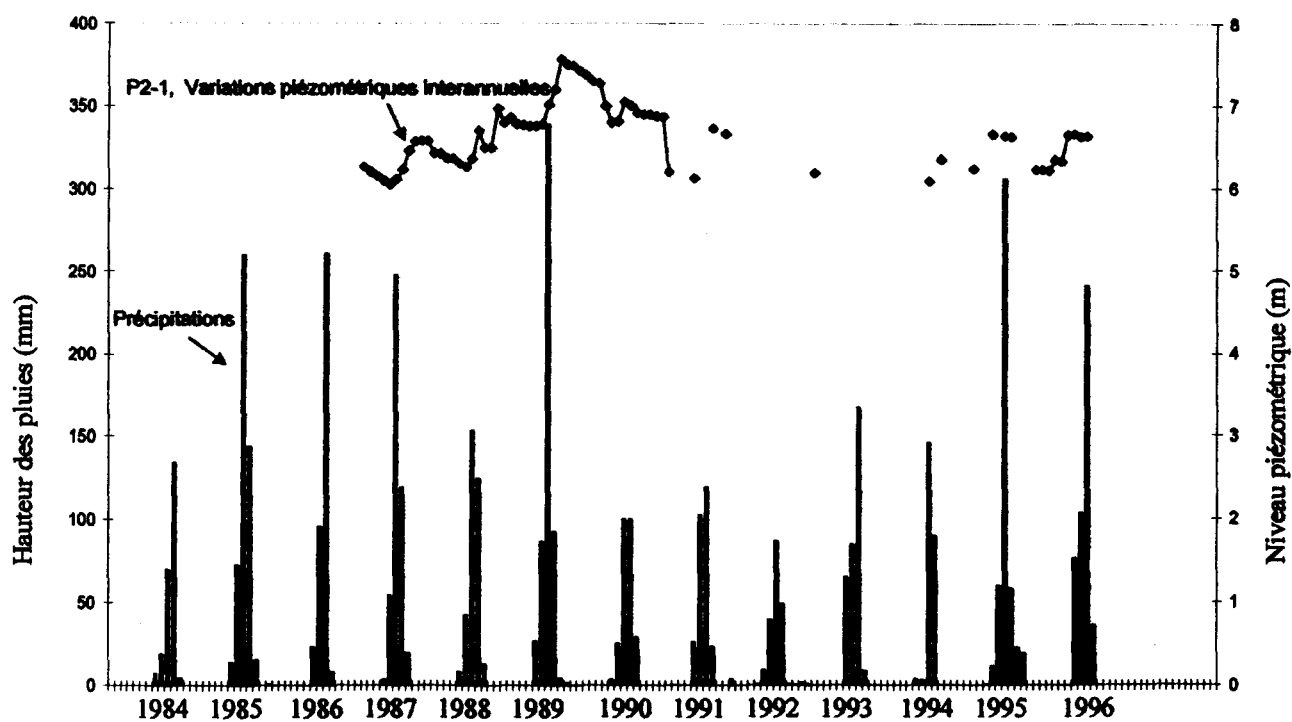


Fig.27: Courbe de variations piézométriques interannuelles et de l'évolution des précipitations au niveau du piézomètre P2-1.

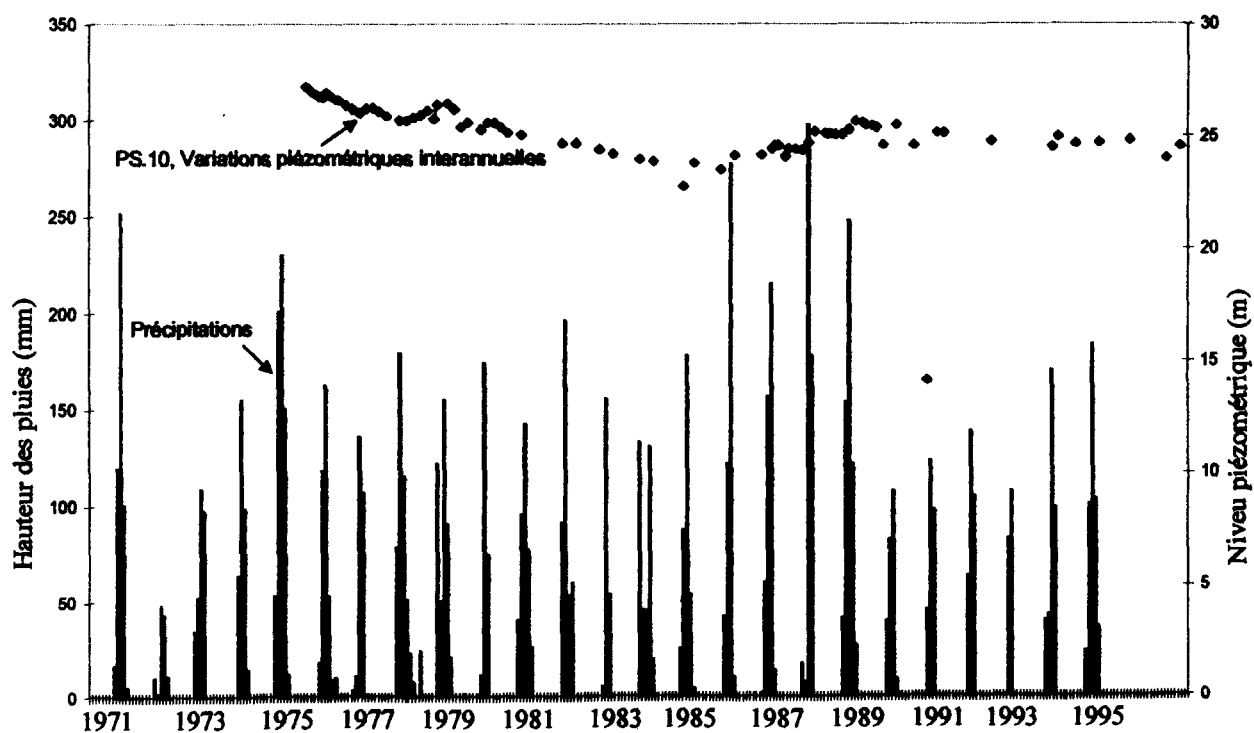


Fig.28: Courbe de variations piézométriques interannuelles et de l'évolution des précipitations au niveau du piézomètre PS-10.

- Une baisse du niveau de la nappe de 1975 à 1984
- Une remontée à partir de 1985 jusqu'en 1989
- Une baisse à la fin de l'hivernage 1989 jusqu'en 1992, et depuis le niveau de la nappe s'est stabilisé.

Au vue de cette évolution temporelle, on peut déduire que les variations piézométriques reflètent exactement celles de la pluviométrie. Les remontées du niveau de la nappe enregistrées en 1975 puis de 1985 jusqu'en 1989, correspondent à des années de forte pluviométrie. Les années de déficit pluviométrique se traduisent par une baisse du niveau de l'aquifère. Cette baisse est estimée à environ 0,40 m/an dans le secteur de Thiaroye et à 1,6 m/an dans le Nord-Est de l'aquifère.

Cette étude corrélatrice des variations piézométriques et des précipitations enregistrées dans la zone d'étude a été aussi traitée dans les travaux de A. MARTIN (1970). Elle définissait une parfaite corrélation entre ces deux paramètres et un seuil d'alimentation de la nappe par les eaux de pluie de 300 mm/an a été calculé.

2.1.2 Elaboration de cartes piézométriques du système aquifère de Thiaroye

A. Etude géostatistique: analyse des variogrammes

L'étude géostatistique concerne les données suivantes:

- piézométrie de juillet 1997
- piézométrie d'octobre 1997
- moyenne piézométrique établie de 1984 à 1997

Les niveaux piézométriques mesurés en juillet et octobre 1997 concernent un réseau de 70 points et quelques points données sur la côte où le potentiel est imposé par la mer à $h = 0$. Les variogrammes ont été estimés avec un pas de 15° sur un angle ouvert de 0° à 180° et une tolérance de 30° . Les variogrammes estimés dans différentes directions sont donnés en annexe 4.

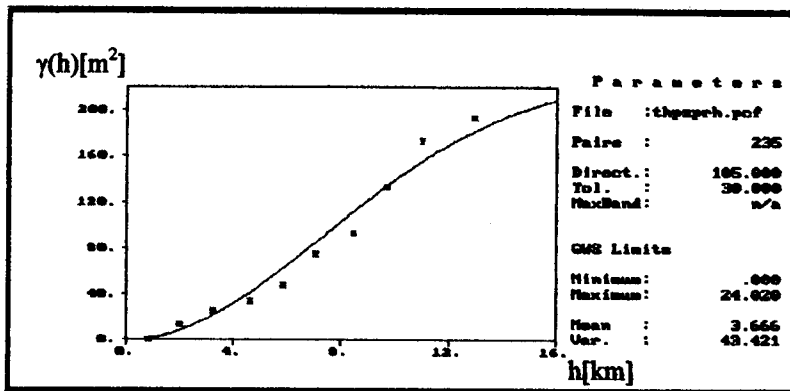


Fig.29: Variogramme calculé à partir des données de juillet 1997 à la direction 105°

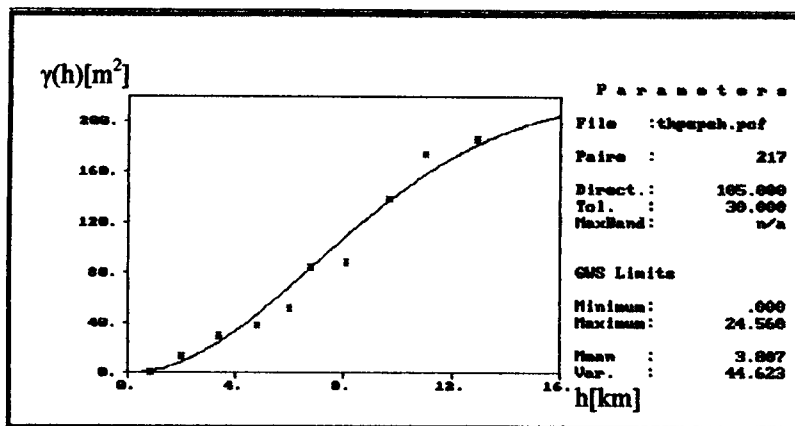


Fig.30: Variogramme calculé à partir des données d'octobre 1997 à la direction 105°

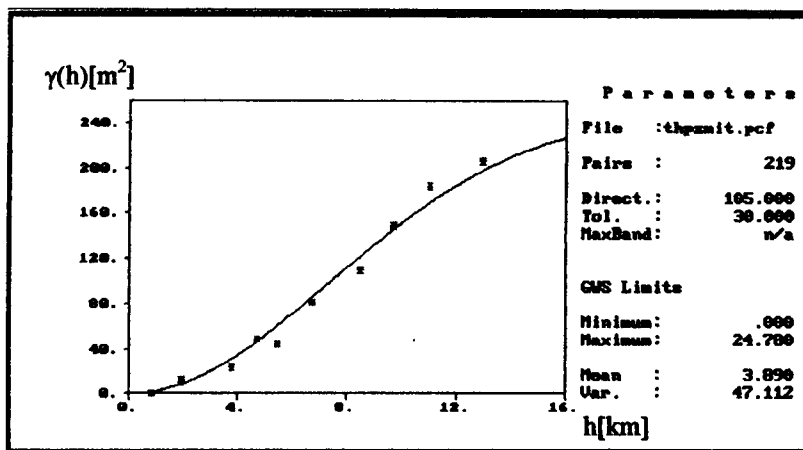


Fig.31: Variogramme calculé à partir de la piézométrie moyenne de 1984-1997 à la direction 105°

Les figures 29, 30 et 31 montrent pour les charges hydrauliques de juillet et octobre 1997 et pour la moyenne de 1984 à 1997, que les variogrammes estimés sont de type Gaussien et sans discontinuité à l'origine. Ces dernières reflètent ainsi la nature non aléatoire dans la distribution des données piézométriques.

L'analyse des variogrammes estimés dans chacun des trois cas, montre une anisotropie de la structure selon l'orientation de h . Ainsi d'après les résultats consignés sur le tableau 6, pour les charges hydrauliques de juillet 1997, l'interdépendance des mesures est obtenue sur une distance h maximale de 18 à 20 km, selon une orientation environ W-E.

Ce rayon maximal a_1 est de 18 à 22 km pour la piézométrie d'octobre sur la même direction, et de 18 à 24 km pour la piézométrie moyenne, également selon la direction W-E environ.

La distance minimale d'interdépendance donnée par le rayon a_2 est de 8 km pour les charges de juillet 1997 et celles moyennes, 6 km pour les charges d'octobre 1997. Les paliers définis varient entre 23 et 230 m² pour les mesures de juillet 1997; 22 et 220 m² pour celles d'octobre 1997 et de 22 à 250 m² pour les charges moyennes.

Les valeurs ainsi obtenues ont été utilisées dans le krigeage.

Pour les charges hydrauliques de juillet 1997, le palier C est de 126,5 m²; la portée a varie de $a_1 = 20$ km à $a_2 = 8$ km. Pour les mesures d'octobre 1997, C est de 121 m²; a varie de $a_1 = 22$ km à $a_2 = 6$ km. Le palier C est de 136 m² et a varie de $a_1 = 24$ km à $a_2 = 8$ km pour les charges hydrauliques moyennes de 1984 à 1997. Dans les trois cas de mesure l'anisotropie est définie selon une ellipse orientée suivant la direction 150°.

Tableau 6: Résultats de l'analyse des variogrammes estimés à partir des charges piézométriques.

Charges piézométriques Juillet 1997				Charges piézométriques Octobre 1997				Charges piézométriques moyennes (1984-1997)				
Direction En °	C ₀ [m ²]	C [m ²]	A [km]	Model	C ₀ [m ²]	C [m ²]	a [km]	Model	C ₀ [m ²]	C [m ²]	a [km]	Mode
0 (E-W)	0	48	12	Gauss	0	55	14	Gauss	0	63	16	Gaus
15	0	38	14	Gauss	0	43	17	Gauss	0	42	16	Gaus
30	0	25	12	Gauss	0	30	16	Gauss	0	22	9	Gaus
45	0	23	9	„	0	22	9	„	0	25	8	„
60	0	38	9	„	0	24	6	„	0	30	8	„
75	0	40	8	„	0	70	12	„	0	65	10	„
90 (N-S)	0	100	13	„	0	120	12	„	0	122	12	„
105	0	230	18	„	0	220	17	„	0	250	18	„
120	0	200	17	„	0	220	18	„	0	250	18	„
135	0	150	16	„	0	215	18	„	0	240	18	„
150	0	155	20	„	0	180	22	„	0	240	24	„
165	0	93	17	„	0	110	17	„	0	124	19	„

Validation des variogrammes et krigeage

Le module Cross Validation (X Valid) du programme Geo-EAS 1.2.1 a permis de tester la validité des modèles de variogramme et les paramètres définis. Les résultats sont donnés sous forme d'histogrammes (Fig. 32, 33 et 34) et de cartes de variance d'estimation représentées à la figure 35, 36 et 37.

Le krigeage a été effectué avec le programme SURFER 6.04 qui ne peut prendre en compte qu'une anisotropie géométrique, avec différentes valeurs de la portée a_1 et a_2 .

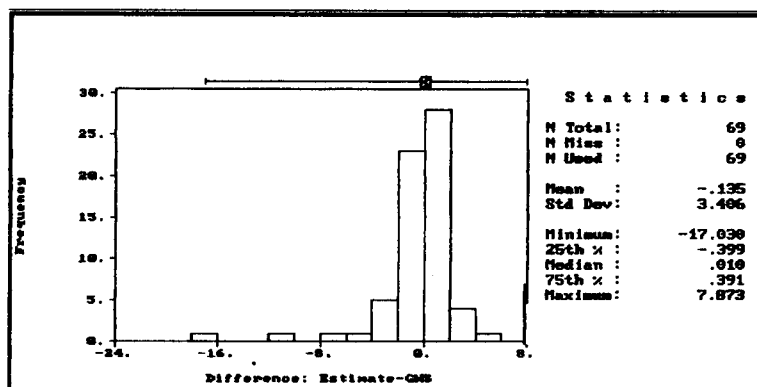


Fig.32: Résultat de l'analyse de validation du variogramme obtenu des mesures de juillet 1997

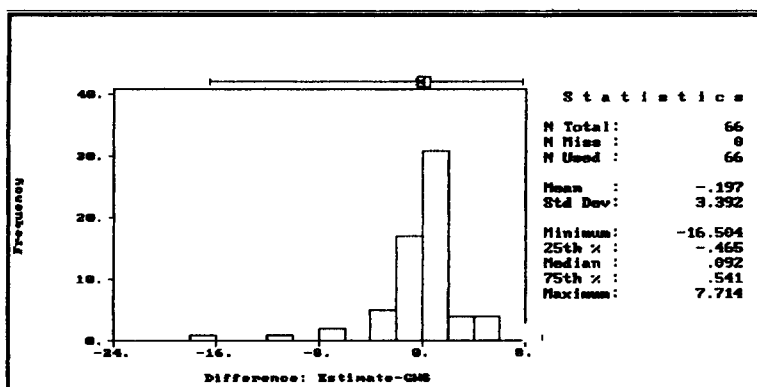


Fig.33: Résultat de l'analyse de validation du variogramme obtenu des mesures d'octobre 1997

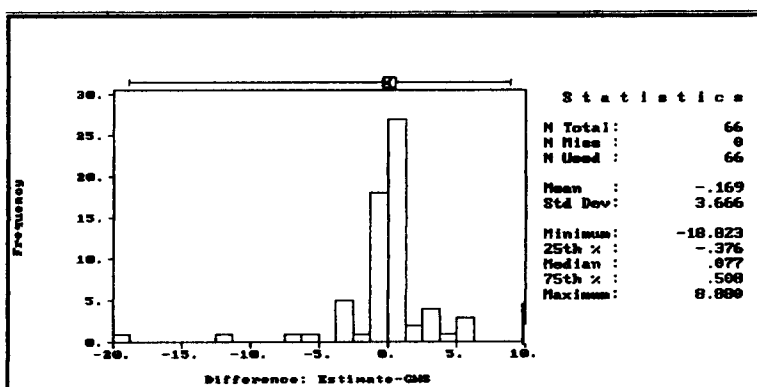


Fig.34: Résultat de l'analyse de validation du variogramme obtenu de la moyenne piézométrique de 1984-1997.

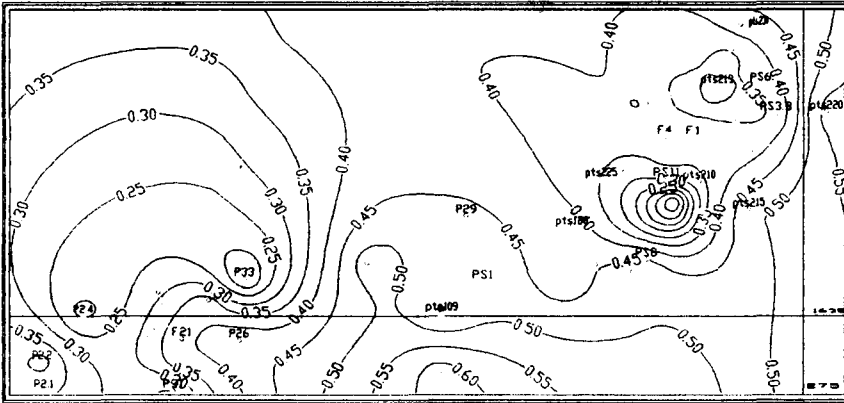


Fig.35: Carte de variance d'estimation des charges piézométriques de juillet 1997

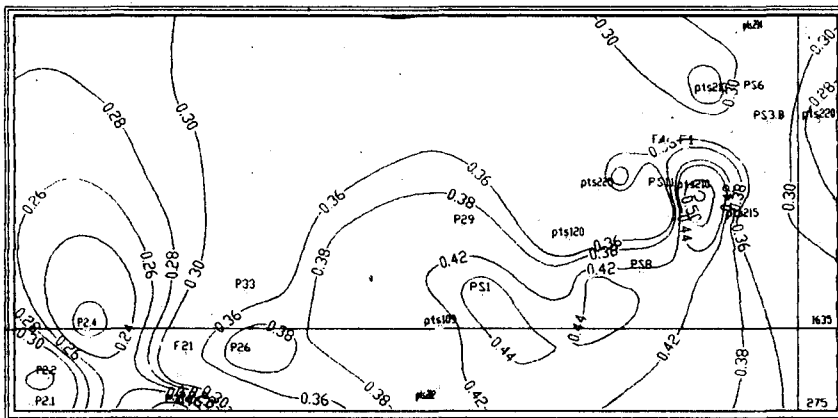


Fig. 36: Carte de variance d'estimation des charges piézométriques d'octobre 1997

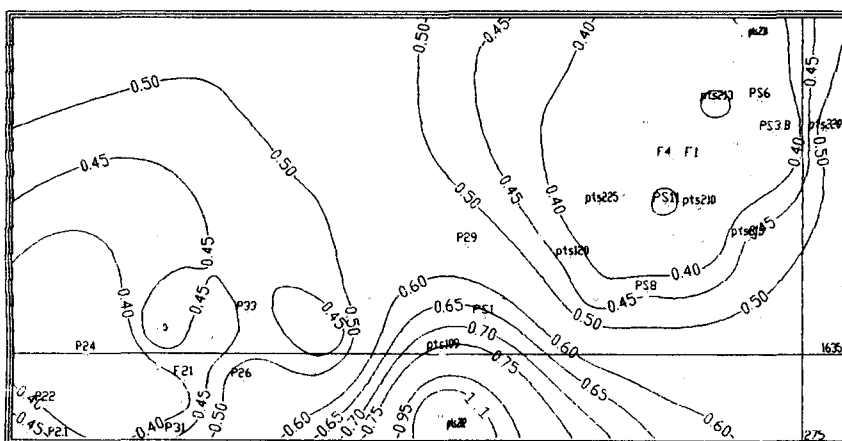


Fig. 37: Carte de variance d'estimation des charges piézométriques moyennes de 1984 à 1997

Conclusion sur l'étude géostatistique des charges piézométriques

L'étude géostatistique nous a permis d'étudier la variabilité des charges hydrauliques données sur le système aquifère. Les résultats du traitement ne révèlent pas une grande différence sur ces valeurs mesurées à différentes périodes de l'année.

Le traitement géostatistique a surtout permis de voir les erreurs d'estimation dans le krigeage des variables. L'estimation des variogrammes reflète la régularité spatiale de la distribution des charges hydrauliques sur le système aquifère. Les histogrammes donnés montrent que dans les trois cas la différence entre les valeurs estimées et celles observées est de ± 1 m pour 80% des charges considérées.

Les cartes d'erreur d'estimation présentent des valeurs relativement faibles. Les valeurs les plus élevées sont observées dans le Sud-Est de l'aquifère dans la zone de Kounone.

Elles dépassent 1 m dans ce secteur sur les données piézométriques moyennes de 84 à 97.

B. Cartes piézométriques

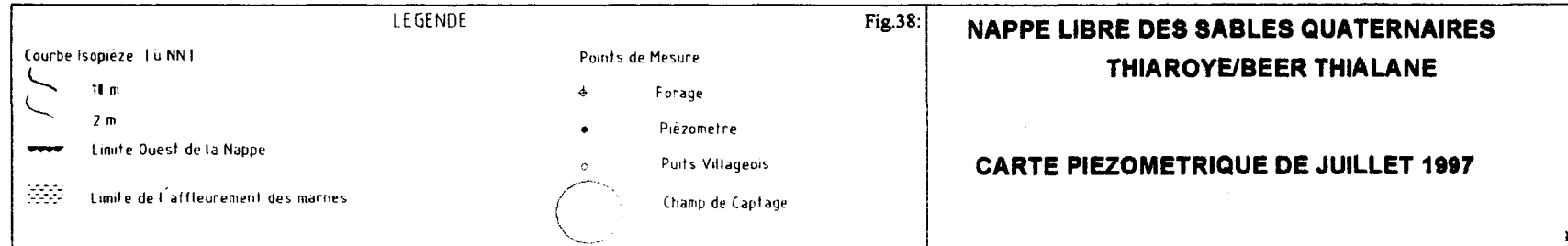
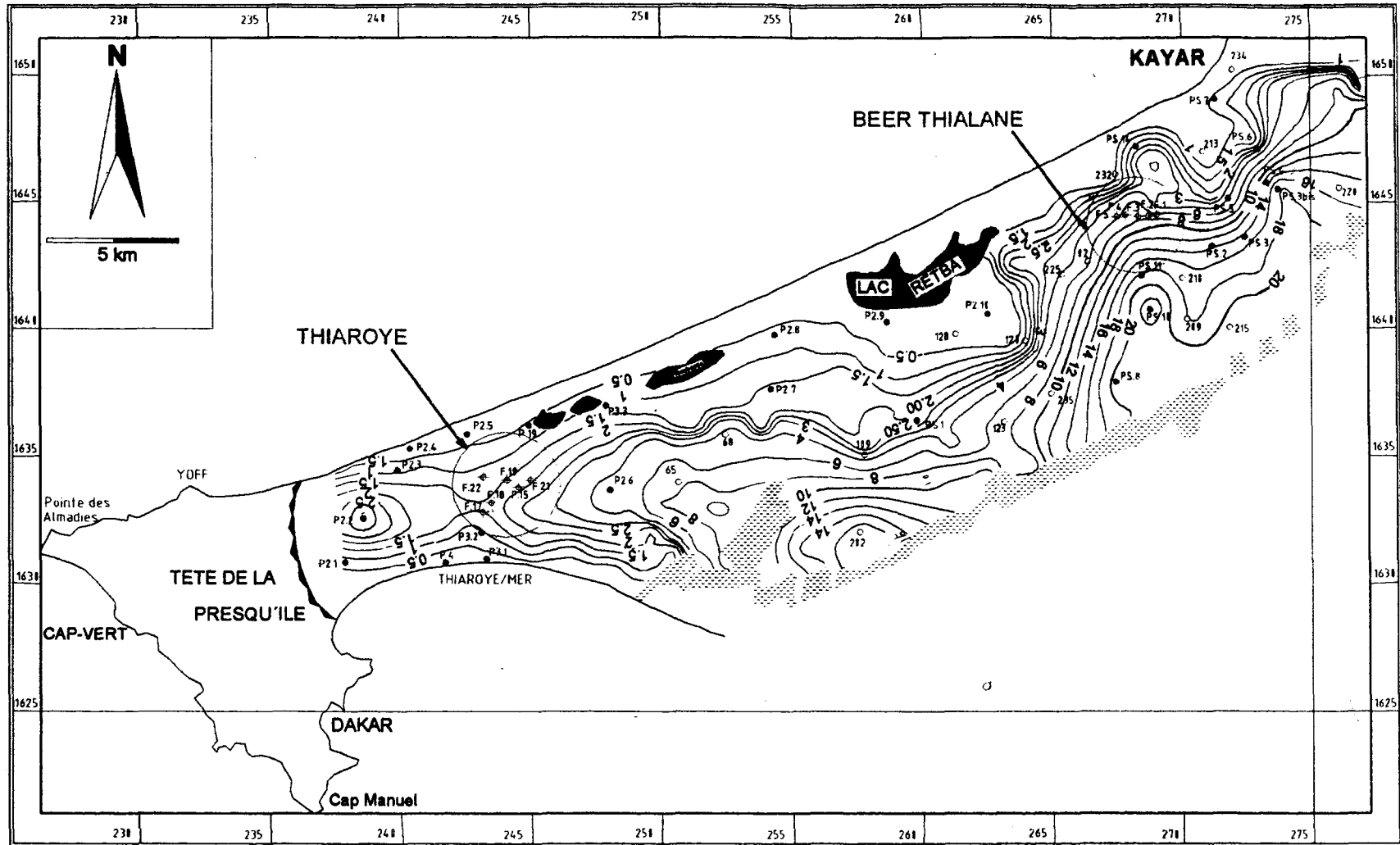
Dans cette étude, on a établi les cartes piézométriques de juillet et octobre 1997 et la carte piézométrique moyenne définie entre 1984 et 1997. Ces cartes sont consignées sur les figures 38, 39 et 40.

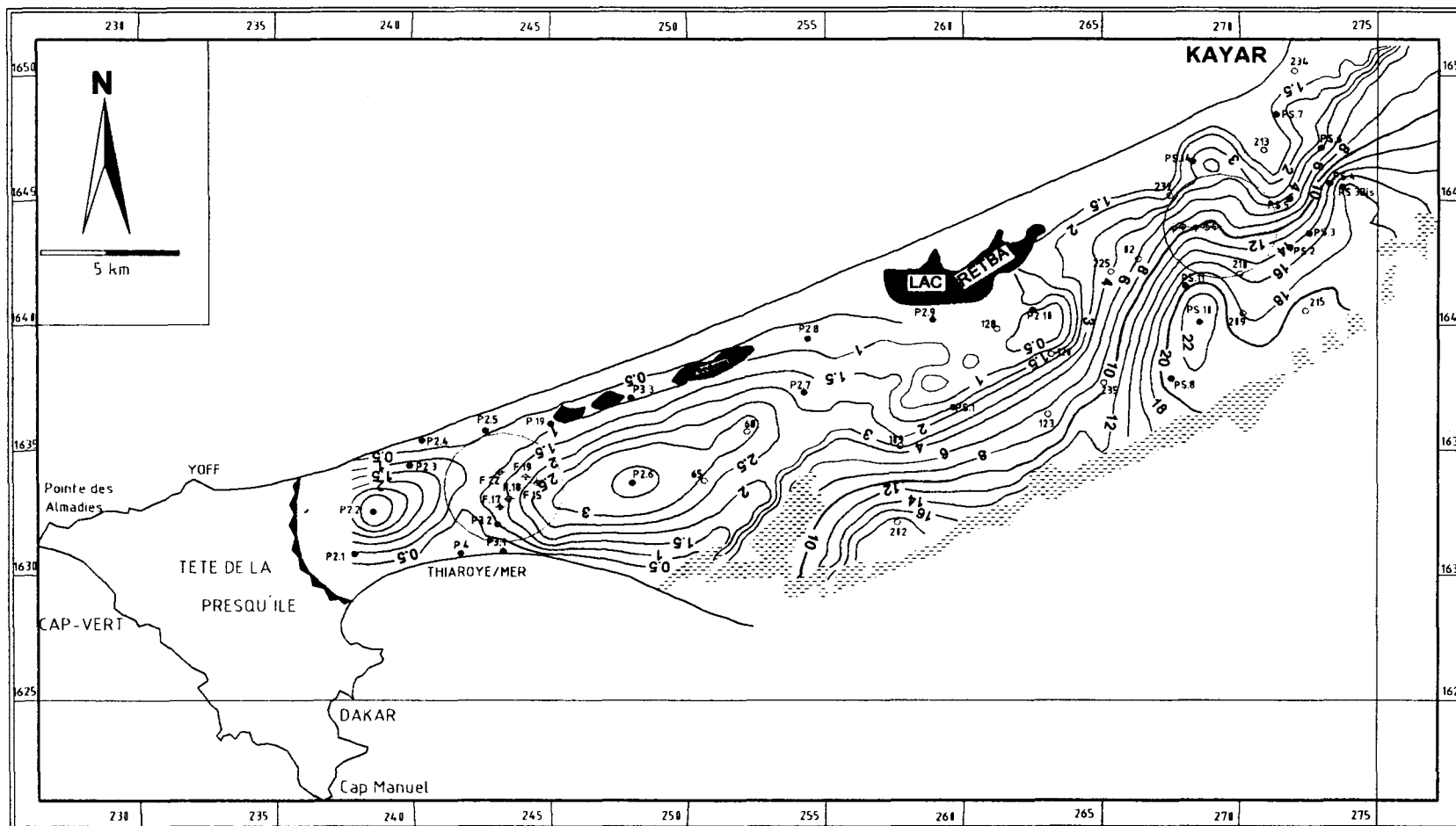
Au regard de ces trois cartes, on peut déduire les caractéristiques suivantes:

- Les écoulements dans le système aquifère s'effectuent sur une direction Sud-Est, Nord-Ouest donc vers les lacs internes et l'océan. Ce sens d'écoulement des eaux est favorisé par la morphologie du substratum de la nappe qui dans le Sud de l'aquifère accuse une remontée. Les forts gradients observés dans cette zone et qui varient de 0,4 à 1% sont liés à la nature de l'aquifère. En effet avec la présence de faciès plus ou moins argileux, les perméabilités observées dans ce secteur sont faibles par rapport au reste de l'aquifère.
- La zone côtière nord caractérisée par la présence des Niayes et des lacs est une zone de dépression où les courbes piézométriques varient entre 0,5 et 1 m.
- La présence de dômes piézométriques dans les zones suivantes:
 - dans le secteur Nord-Est, le dôme est axé entre le lac Mbawane et le lac Tamna. La côte piézométrique de ce dôme est supérieure à 15 m. A partir de la crête piézométrique, l'écoulement est divergent vers le Nord, avec un axe de drainage dirigé vers le lac Mbawane.
 - dans le sud-ouest du système, au niveau de Mbao, un dôme piézométrique est axé sur le point P2-6. L'écoulement est divergent de part et d'autre de l'axe du dôme c'est à dire vers le nord dans les Niayes de Mbeubeuss, vers le Sud dans la zone de Mbao, et vers l'ouest dans le secteur du bassin de Thiaroye.
 - au niveau du piézomètre P2-2, on trouve la présence d'un dôme d'une altitude d'environ 4 m où les eaux s'écoulent vers le bassin de Thiaroye.
- Le bassin versant de Thiaroye est représenté par une zone de dépression piézométrique centrée sur les forages de la SONES. Cette zone de dépression est encadrée par les deux dômes piézométriques, axés sur P2-2 et P2-6. La dépression piézométrique est d'une côte inférieure à 1 m. Cette morphologie est essentiellement due aux pompages effectués par la SONES.

○ Sur le reste du système, la piézométrie est relativement plane, surtout dans le secteur du lac Retba. Cette morphologie plane est surtout liée aux fortes valeurs de perméabilité dans cette zone.

La courbe piézométrique de côte 0,5 m englobant toute la côte nord du secteur d'étude révèle une vulnérabilité du système aquifère à une invasion des eaux salées provenant de l'océan.





LEGENDE

Courbe Isopéize à NN	Points de Mesure
10 m	+ Forage
2 m	• Piézomètre
Limite Ouest de la Nappe	○ Puits Villageois
Limite de l'afléurement des marnes	○ Champ de Captage

Fig.39: NAPPE LIBRE DES SABLES QUATÉRIAIRES THIAROYE/BEER THIALANE

CARTE PIEZOMETRIQUE D'OCTOBRE 1997

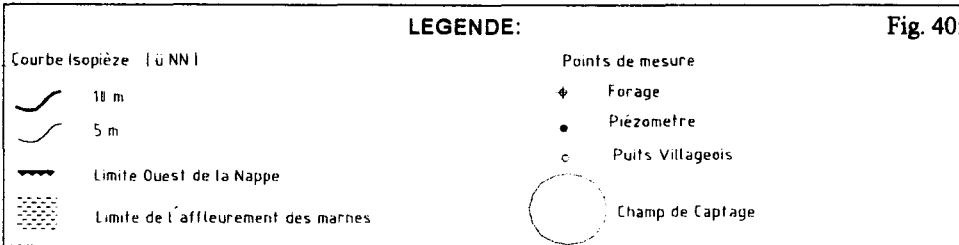
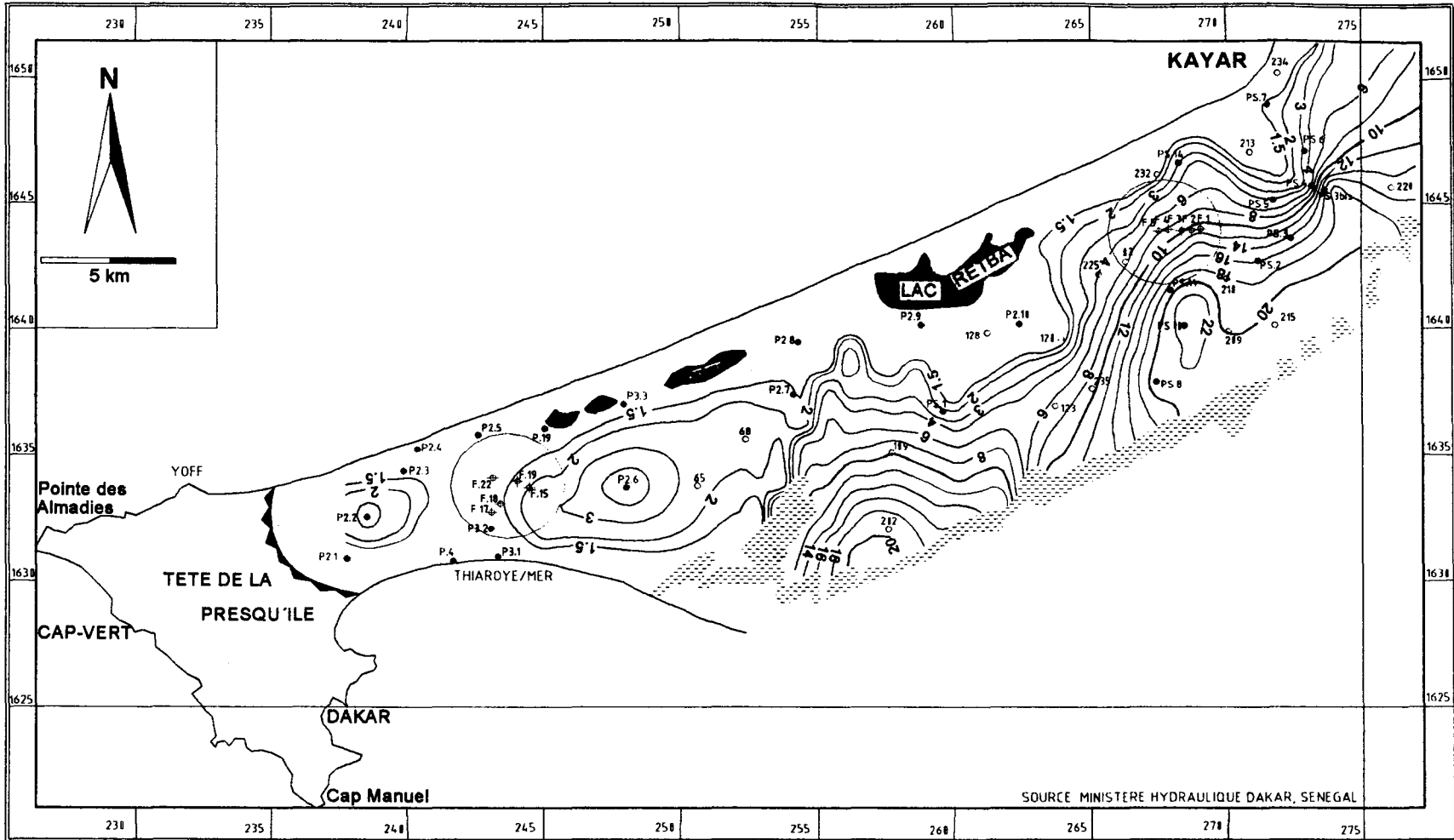


Fig. 40

**NAPPE LIBRE DES SABLES QUATERNAIRES
THIAROYE/BEER THIALANE**

**CARTE PIEZOMETRIQUE MOYENNE
DE 1987 A 1997**

2.1.3 Evolution de la piézométrie entre juillet et octobre 1997

Les cartes données sur les figures 38 et 39 ont permis d'étudier l'évolution de la piézométrie du système. La carte de juillet est élaborée en fin de saison sèche et celle d'octobre en fin de période hivernale. La morphologie de la surface piézométrique est la même dans les deux cas. Cependant, certaines fluctuations piézométriques sont observées dans les zones suivantes:

- dans une zone définie depuis la patte d'Oie à l'Ouest jusqu'à Boun dans le secteur Est qui englobe tout le bassin de Thiaroye, les zones de Cambérére, des Parcelles Assainies, Guédiawaye et Pikine, le niveau de la nappe a connu une remontée en octobre. Les côtes piézométriques passent de 3,80 à 4,70 m entre juillet et octobre au niveau du dôme axé au point P2-2, et de 4,60 à 4,76m au point P2-6. La remontée de la nappe entre juillet et octobre est de l'ordre de 0,60 m dans le secteur.
- dans la zone littorale de Cambérére à Kayar, on note une légère remontée des niveaux. L'isopièze 0,5 m est plus proche de la côte en octobre. La remontée est de l'ordre de 2 à 8 cm.

Sur tout le reste de la nappe, le niveau piézométrique est stable.

Les fluctuations observées sur la nappe entre juillet et octobre, localisées surtout dans la zone de Thiaroye, ne semblent pas être liées à une recharge saisonnière. Compte tenu des fortes minéralisations observées dans la zone (Cf chap. hydrochimie), la remontée du niveau de la nappe notée dans cette zone d'agglomération peut s'expliquer par une infiltration des eaux polluantes.

La carte établie sur la moyenne piézométrique obtenue sur 13 ans (1984-1997) (Fig.39), est considérée comme la carte de référence pour l'état piézométrique de la nappe en 1997. En effet, c'est la carte piézométrique moyenne des deux cartes établies en juillet et octobre. Cette piézométrie est considérée comme état initial dans la simulation de l'évolution de la nappe durant ces dernières années. Elle est également utilisée dans l'étude de l'évolution de la piézométrie décrite ci-dessous.

2.1.4 Evolution de la piézométrie entre 1971 et 1997

Pour étudier l'évolution de la piézométrie, on a considéré l'état stationnaire de février 1971 établie dans le cadre de l'étude de GEOHYDRAULIQUE 72 comme état piézométrique de référence. La comparaison des cartes de 1971 et 1997 (Fig.41) permet de dégager les faits suivants:

- L'allure de la surface piézométrique de février 1971 est identique à celle de 1997. Au Nord-Est de l'aquifère subsiste le dôme piézométrique axé entre Mbawane et le lac Tamna à une côte supérieure à 15 m. Au Sud-Ouest du bassin de Thiaroye on observe également la crête piézométrique entre Boun et Niakoulrab.
- Dans le secteur Sud-Est de l'aquifère sur l'axe Kounon-Golam, on observe une baisse du niveau de la nappe. De 1971 à 1997 la baisse est de 7 m au niveau du piézomètre PS-8, de 5,60 m au puits pts.235 et de 2,72 m au puits pts.202 à Kounon. La baisse est estimée à environ 0,60 m/an dans le secteur.

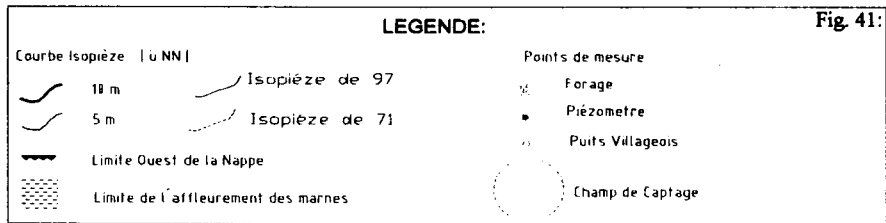
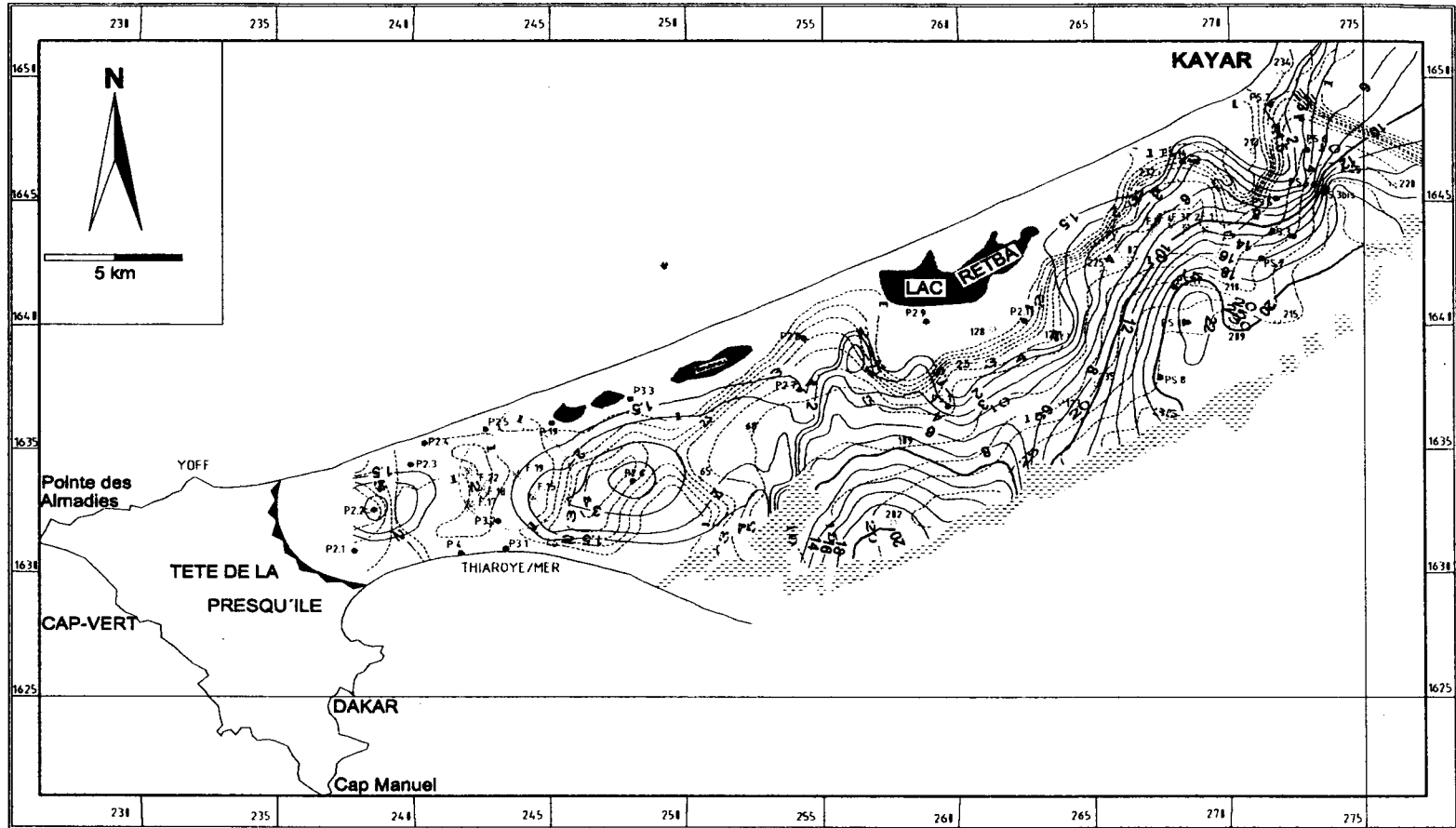


Fig. 41:

**NAPPE LIBRE DES SABLES QUATERNAIRES
THIAROYE/BEER THIALANE**

**CARTE D'EVOLUTION
PIEZOMETRIQUE DE 1971 A 1997**

Compte tenu de l'éloignement de cette zone du centre de captage de Thiaroye, qui pourrait influencer les fluctuations de la nappe, on peut conclure que cette baisse est essentiellement due aux conditions climatiques, consécutives à la baisse pluviométrique dans la région durant ces dix dernières années (Fig.28).

- Dans la zone littorale nord, englobée par l'isopièze 0,5 m en 1997 on peut dire que le niveau de la nappe est resté relativement stable, comme d'ailleurs pour tout le reste de la nappe.

2.2 Profondeur de la nappe phréatique par rapport au sol

Une carte de profondeur de la nappe par rapport au sol est très significative pour l'étude de la vulnérabilité d'un système à une contamination anthropique.

L'élaboration de cette carte est basée sur deux données:

- La carte piézométrique de 1997.
- La carte topographique de la zone d'étude digitalisée avec le programme AutoCAD 14.0.

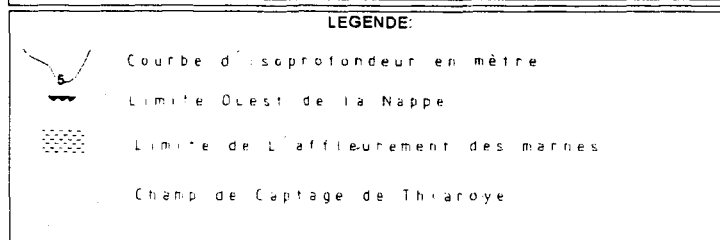
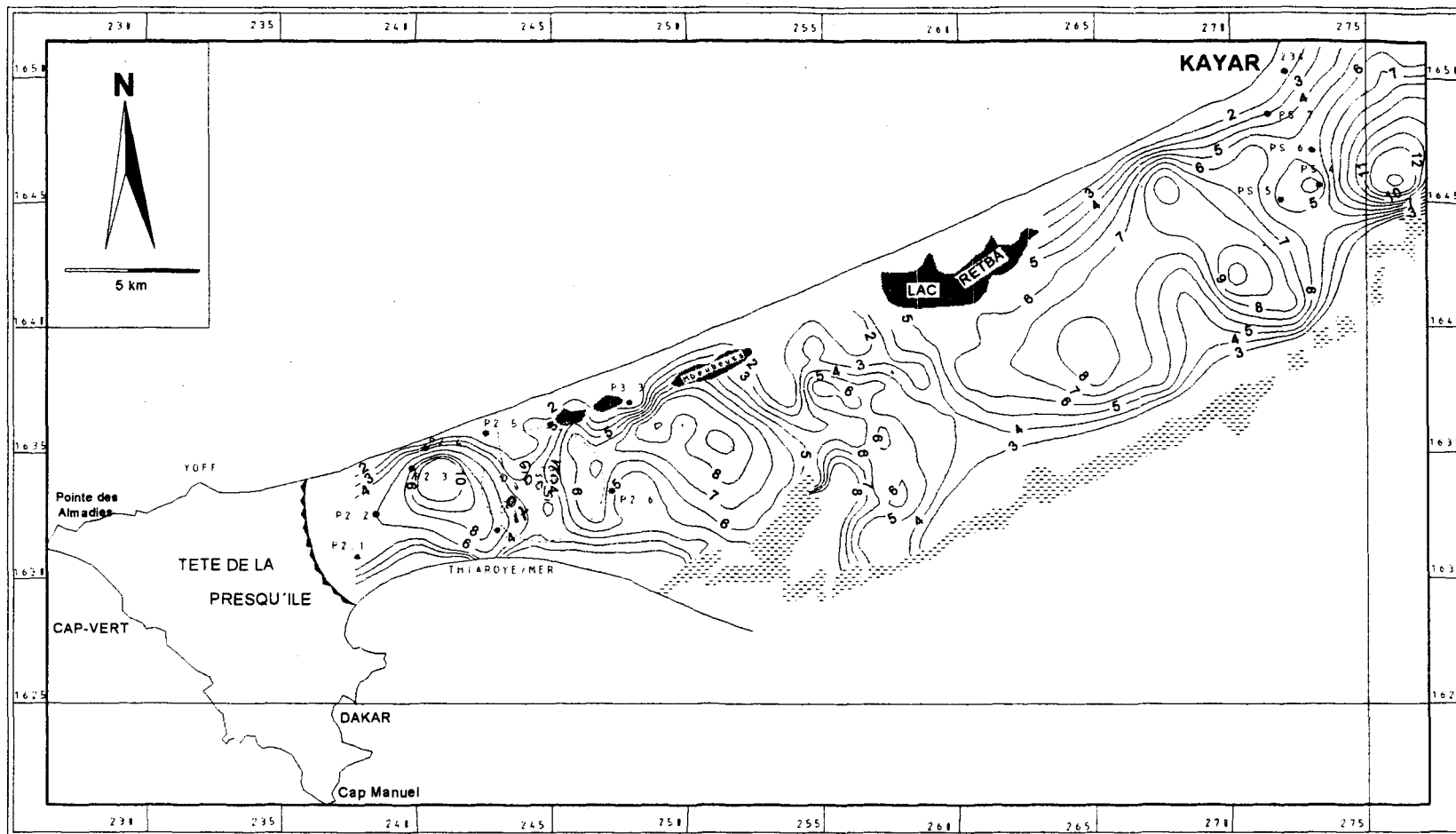
Dans le programme SURFER 6.01 avec son module RESIDUALS, on a pu calculer la profondeur de l'aquifère en chaque point défini. Pour ceci le module RESIDUALS a calculé la différence verticale entre deux valeurs de Z données d'une part par un point dans un fichier XYZ-Data-file (ici la topographie) et d'autre part, par des données de type RASTER dans un fichier GRID-file (ici la piézométrie) on a:

$$Z_{res} = Z_{dat} - Z_{grd} \quad (40)$$

Z_{res}	=	L'épaisseur totale de la zone non saturée calculée [m]
Z_{dat}	=	L'altitude d'un point par rapport au zéro I.G.N
Z_{grd}	=	Le niveau piézométrie [m ü NN]

La carte de profondeur de la nappe ainsi établie (Fig.42) permet de définir les caractéristiques suivantes:

- La nappe de Thiaroye est un système très superficiel. Les profondeurs maximales localisées dans la zone de Diender à l'Est du système et au niveau de Cambérène dans le secteur Ouest sont de l'ordre de 12 à 16 m.
- La profondeur de la nappe est relativement faible et inférieure à 2 m dans les zones de Niayes. Ces résultats confirment bien les données des travaux antérieures (HEBRARD, 1966; MARTIN, 1970) selon lesquelles les Niayes sont des zones de dépression où la nappe s'épuise par évaporation.
- Dans le bassin de Thiaroye, la nappe a une profondeur maximale de 9 m. La profondeur est estimée à 3,60 m dans la zone de Dagoudane-Pikine et 3 m au niveau de Thiaroye sur mer.



**Fig.42: NAPPE LIBRE DES SABLES QUATERNAIRES
THIAROYE/BEER THIALANE
CARTE DE LA PROFONDEUR DE L'AQUIFERE PAR RAPPORT AU SOL**

3. HYDROCHIMIE ET POLLUTION

L'étude hydrochimique élaborée dans le cadre de ce travail a pour objectif de caractériser les types de faciès rencontrés dans le milieu et ensuite de corréler la nature chimique avec l'environnement de surface qui pourrait bien déterminer la qualité des eaux dans l'aquifère.

3.1 Caractérisation physico-chimique

3.1.1 La conductivité électrique

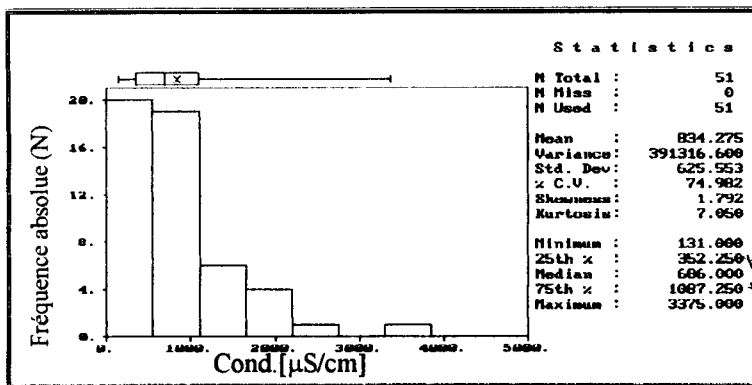


Fig.43: Histogramme des conductivités électriques mesurées sur la nappe

Les valeurs de conductivité électrique obtenues sur les eaux de la nappe sont comprises entre 131 et 3375 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 834 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les données de l'histogramme (Fig.43) montrent une distribution asymétrique à droite avec un Skewness de +1,79; une moyenne arithmétique de 834 et une médiane de 686. 50% des valeurs de conductivité mesurées sont comprises entre 352 et 1088 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 25% des valeurs varient de 1088 à 3375 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La plus forte valeur de conductivité est de 3375 $\mu\text{S}/\text{cm}$, elle est enregistrée au point P2-9 et peut être liée à la proximité du lac salé, le lac RETBA.

Ces valeurs de conductivité mettent en évidence une minéralisation variable des eaux dans le système aquifère de Thiaroye. Cette minéralisation peut provenir de diverses origines: processus géochimiques, pollution, l'environnement marin, présence de lacs salés, phénomènes d'évaporation.

3.1.2 La température

Les températures mesurées varient entre 27 et 31°C avec une moyenne de 29°C. L'histogramme des températures (Fig.44) donne une distribution normale qui traduit la régularité des valeurs obtenues avec une moyenne arithmétique de 28,75 très proche de la médiane qui est de 28,90. Les plus fortes températures sont observées dans la zone de Thiaroye, elles peuvent être liées aux pompages effectués dans la zone d'exploitation.

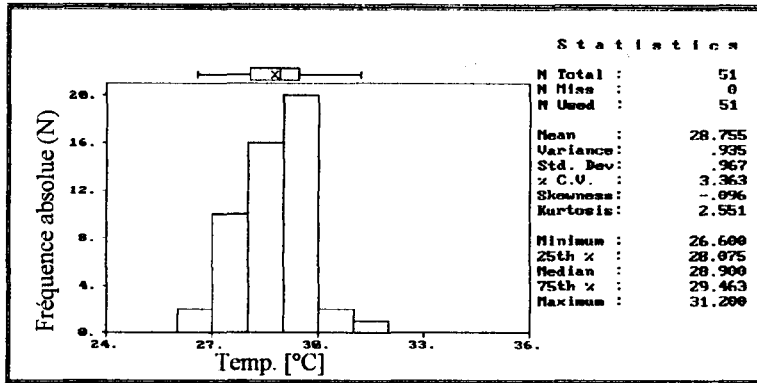


Fig.44: Histogramme des températures mesurées sur la nappe

3.1.3 pH

La fréquence de distribution des valeurs de pH est représentée sur l'histogramme donnée à la figure 45. Les valeurs de pH sont comprises entre 4,47 et 7,85 avec une moyenne de 6,36. La distribution est représentée par une faible valeur du Skewness (C) qui est de -0,58 et une moyenne arithmétique (6,36) proche de la médiane (6,62). Ceci nous permet de conclure à une distribution normale ou symétrique des valeurs de pH sur la nappe. 50% des valeurs mesurées sont comprises entre 5,70 et 7. 25% des valeurs sont inférieures à 5,70 avec de faibles valeurs (pH 4,47).

Les valeurs de pH obtenues indiquent une acidité des eaux de la nappe de Thiaroye. L'acidification des eaux peut être liée à une importante décomposition de matière organique dans le milieu qui s'oxyde pour libérer du CO₂ (APPELO & POSTMA 1994).

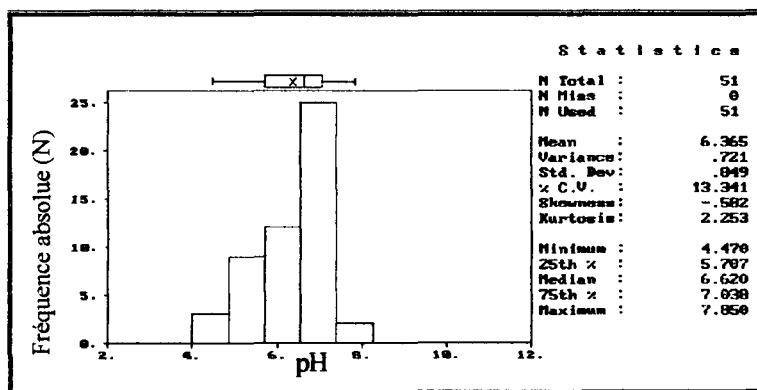


Fig.45: Histogramme des valeurs de pH mesurées sur la nappe

L'évolution des paramètres physico-chimiques a été suivie durant les pompages sur les piézomètres P2-3, P2-5, et P2-10 (Fig.46, 47, 48). Les résultats montrent des variations considérables de ces paramètres. Les variations de conductivité électrique sont les plus sensibles. Les débuts de pompage correspondent à une minéralisation faible avec des valeurs définies entre 100 à 400 μS/cm. Ces valeurs augmentent pour se stabiliser à environ 1000 μS/cm. Cette stabilisation de la conductivité nous a permis de faire un échantillonnage représentatif des eaux de la nappe.

Fig.46: Evolution des paramètres physico-chimiques sur la nappe durant le pompage au piézomètre P2.3 (19.06.1997)

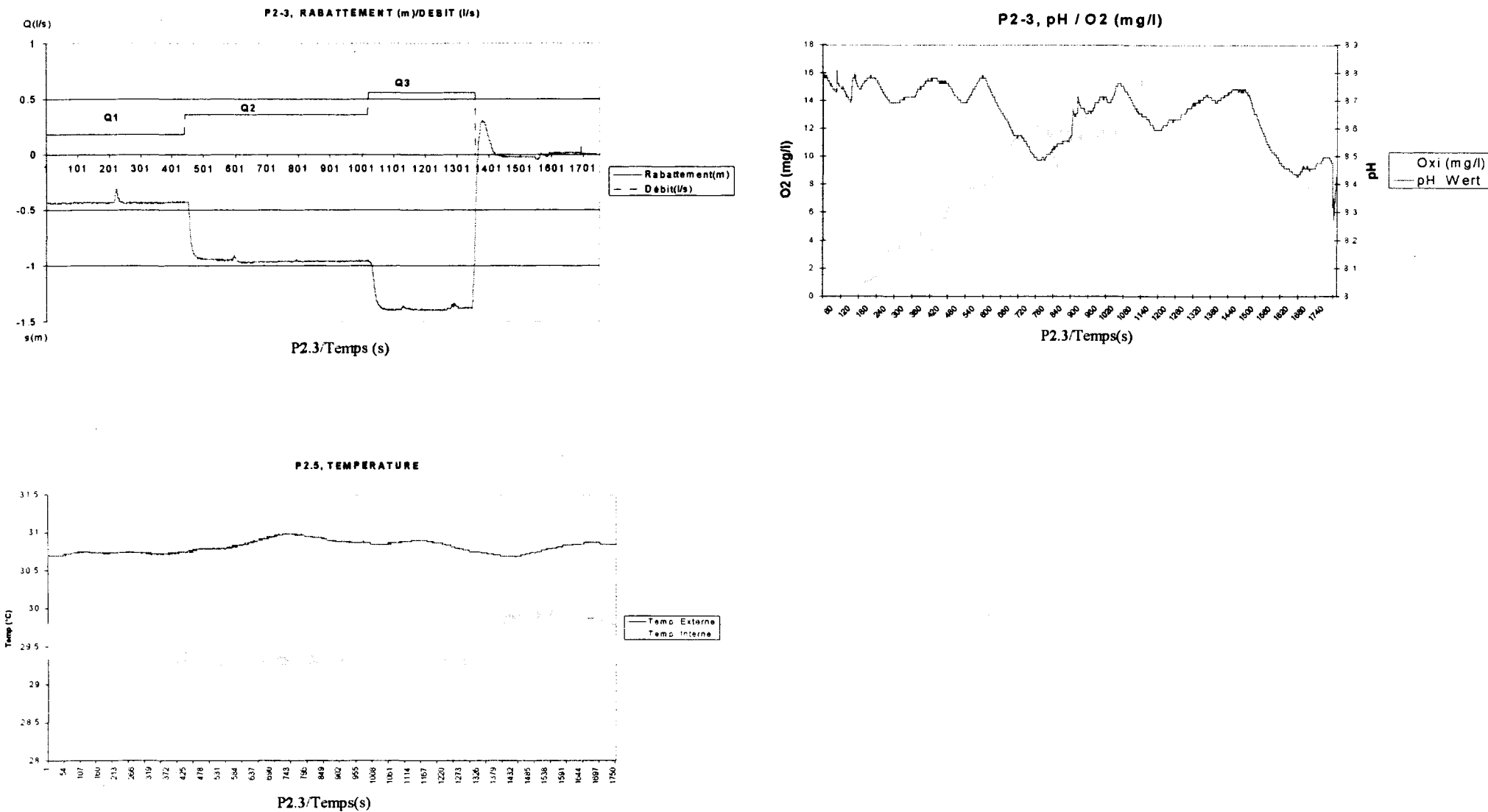


Fig.47: Evolution des paramètres physico-chimiques sur la nappe durant le pompage au piezometre P2-5 (19. 06.1997)

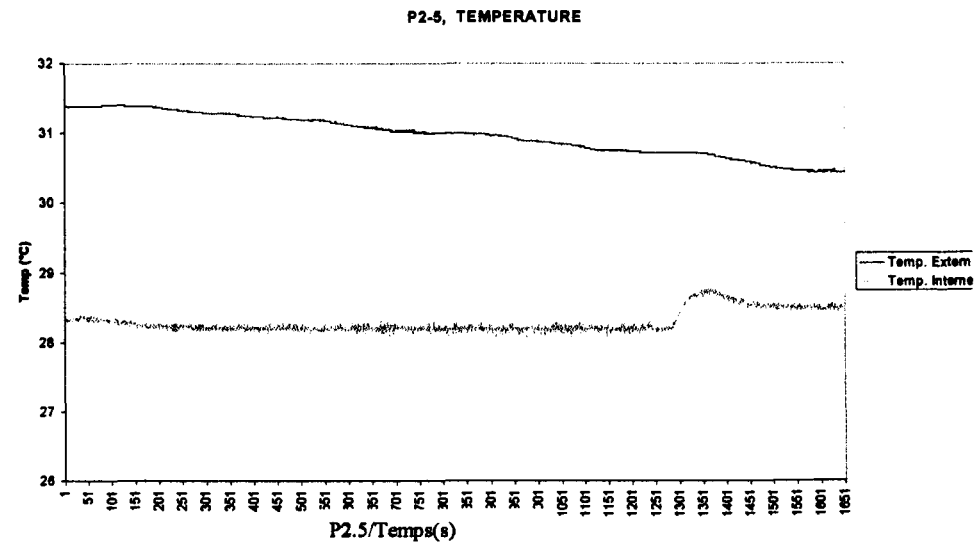
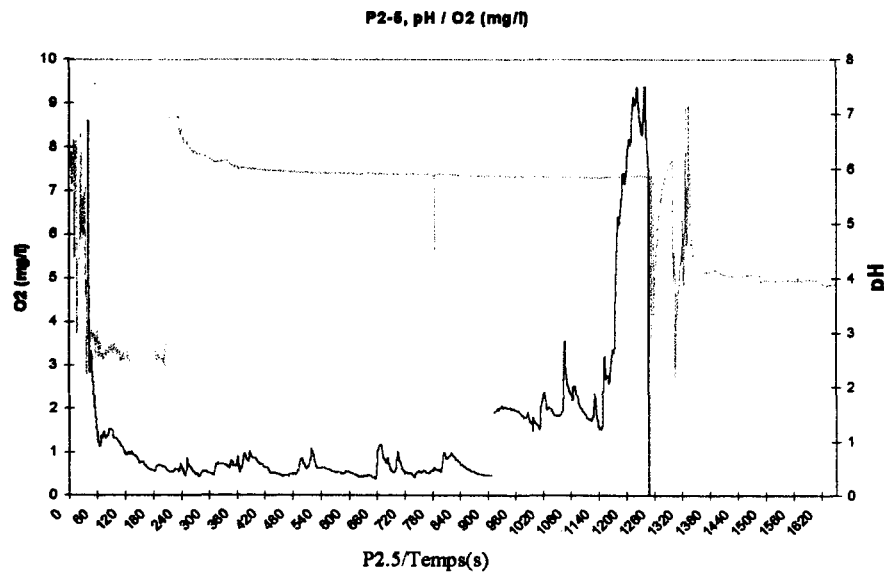
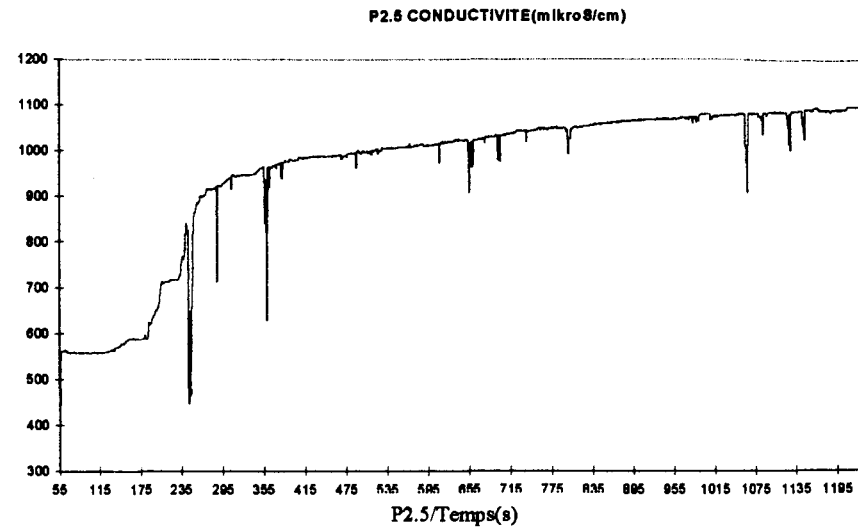
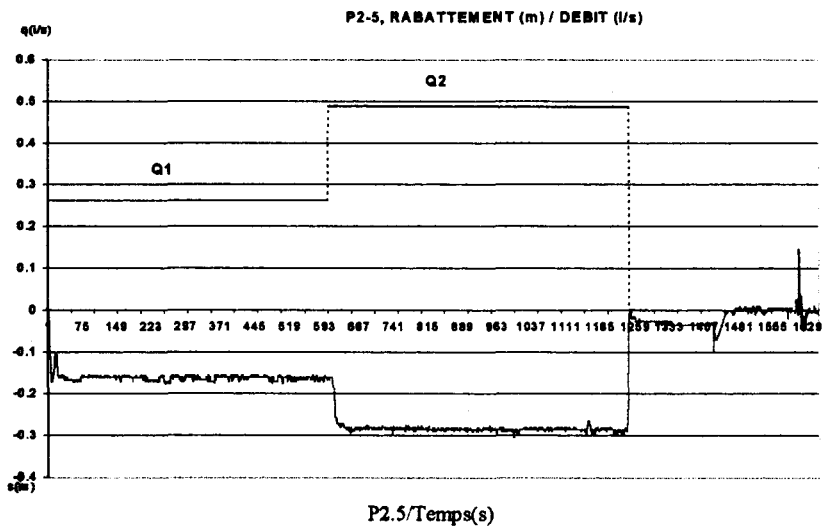
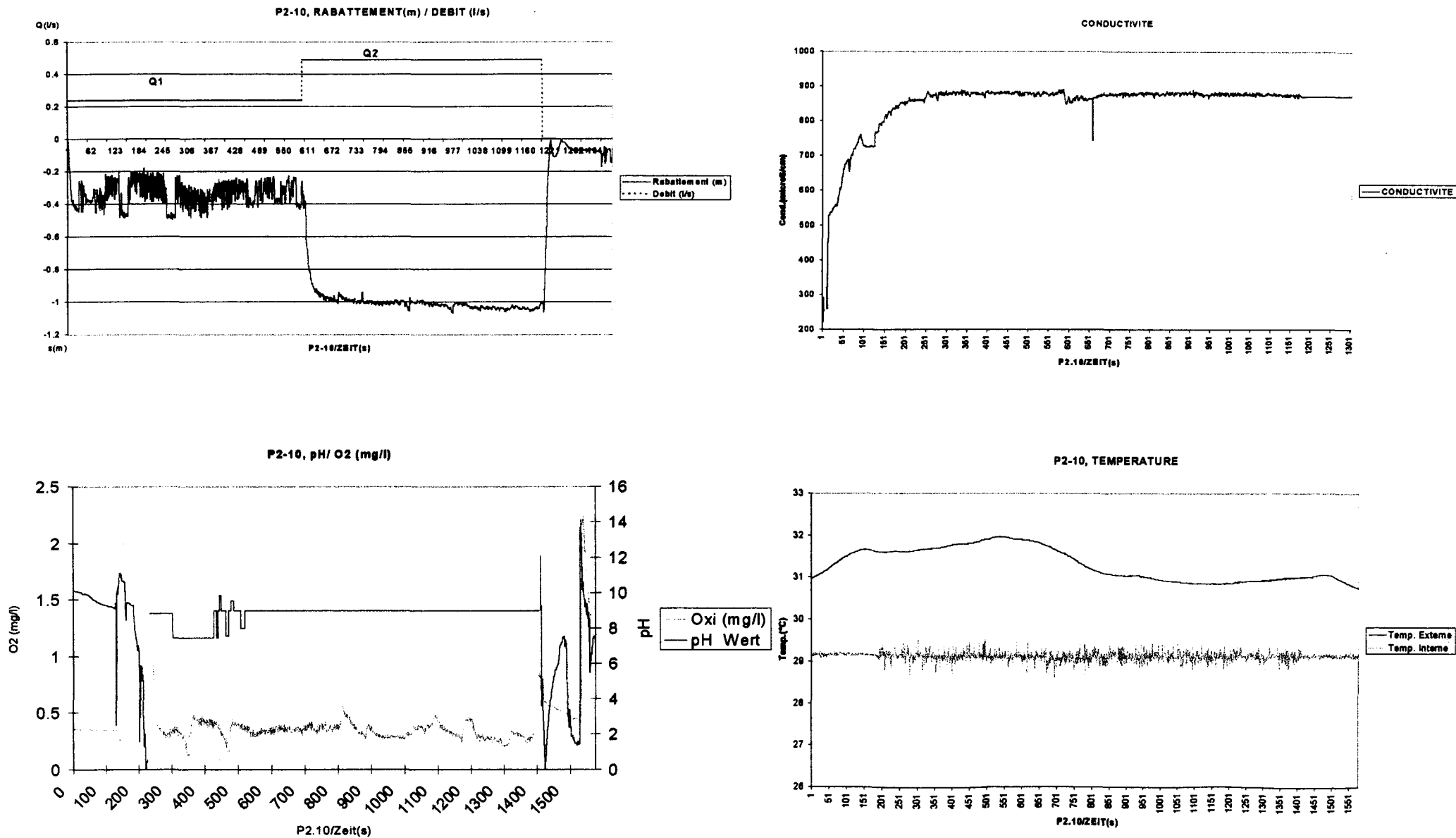


Fig.48: Evolution des paramètres physico-chimiques sur la nappe durant le pompage au piézomètre P2-10 (19. 06.1997)



L'évolution de la minéralisation des eaux du système aquifère de Thiaroye entre juin et octobre, a mis en évidence deux groupes d'ouvrages:

- Le premier groupe est essentiellement composé des ouvrages localisés dans la zone de Thiaroye, Parcelles Assainies, Guédiawaye et Pikine, qu'on a représenté par les piézomètres P2-2 et P2-5 (Fig. 49 et 50).
- Le deuxième groupe est composé des ouvrages sur le reste de l'aquifère présentant tous la même évolution de la minéralisation des eaux entre juin et octobre. Ce groupe est représenté par les piézomètres P2-7 et P2-9 donnés à la figure 51 et 52.

Au regard de ces graphes, on note que dans le premier groupe d'ouvrages, la minéralisation des eaux de la nappe est différente entre octobre et juin. Les valeurs de conductivité mesurées en octobre sont supérieures à celles de juin.

L'étude de la piézométrie, et surtout son évolution entre juin et octobre avait révélé une remontée du niveau de la nappe, localisée dans ce secteur. D'après ces résultats, on peut conclure que l'augmentation de la minéralisation observée en octobre est due à l'arrivée d'eaux usées dans le système.

Pour le deuxième groupe d'ouvrages la minéralisation des eaux est plus importante en juin qu'en octobre. La piézométrie relativement stable dans ces secteurs peut s'expliquer par une infiltration relativement faible des eaux de pluie qui pourraient diluer les eaux de la nappe. La forte minéralisation observée en juin peut être liée à la longue période de sécheresse qui favorise les phénomènes d'évaporation.

Fig.49: Evolution des paramètres physico-chimiques mesurés sur la nappe au piézomètre P2-2 (juin / octobre 1997)

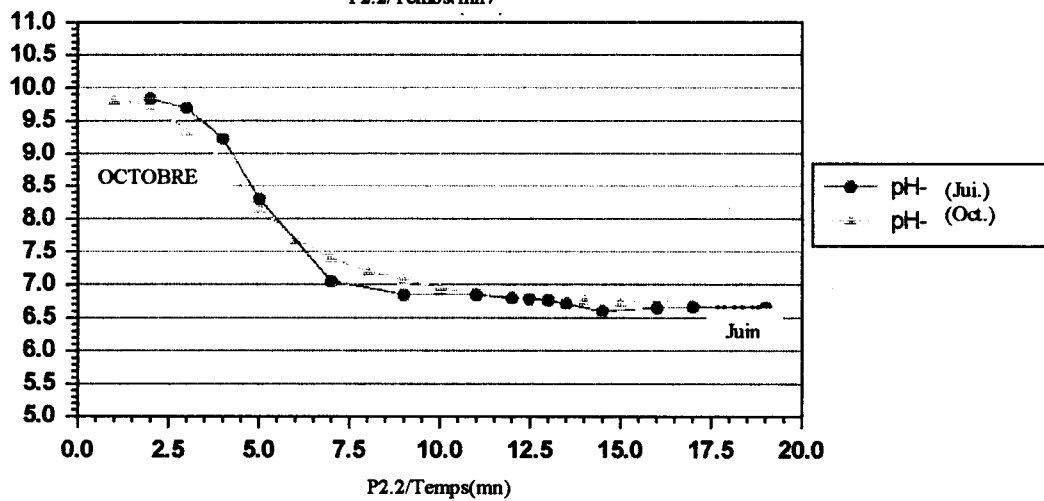
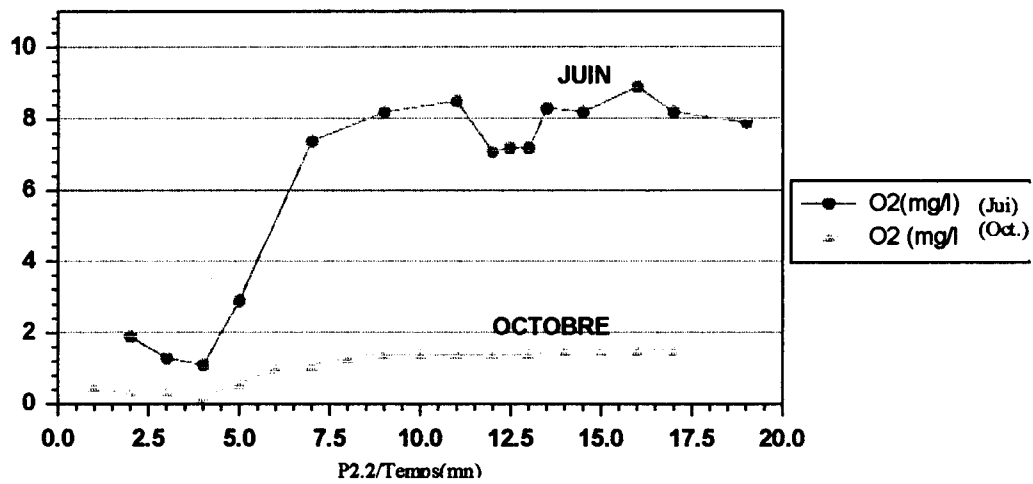
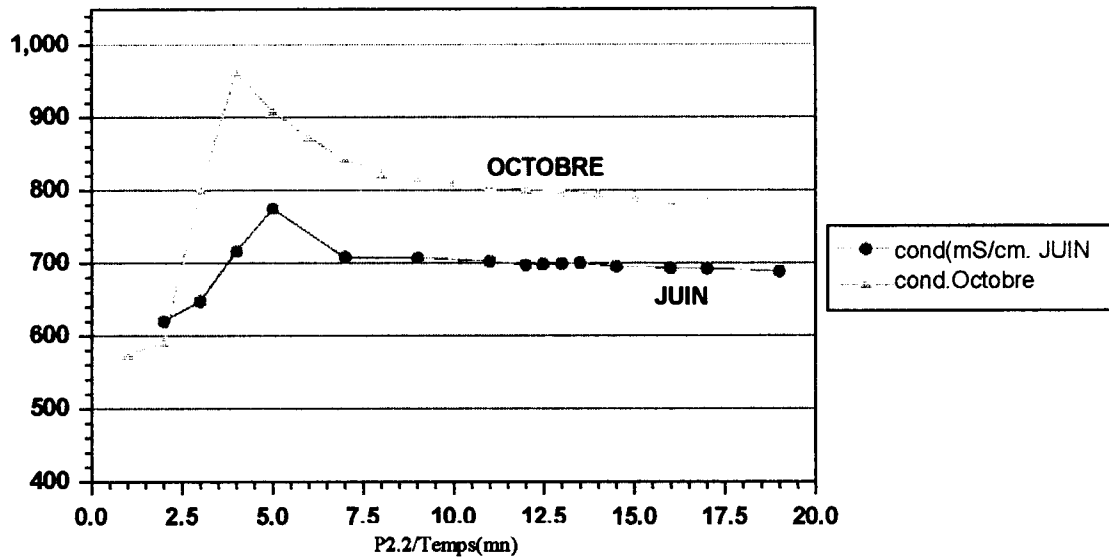


Fig.50: Evolution des paramètres physico-chimiques mesurés sur la nappe au piézomètre P2-5 (juin /octobre 1997)

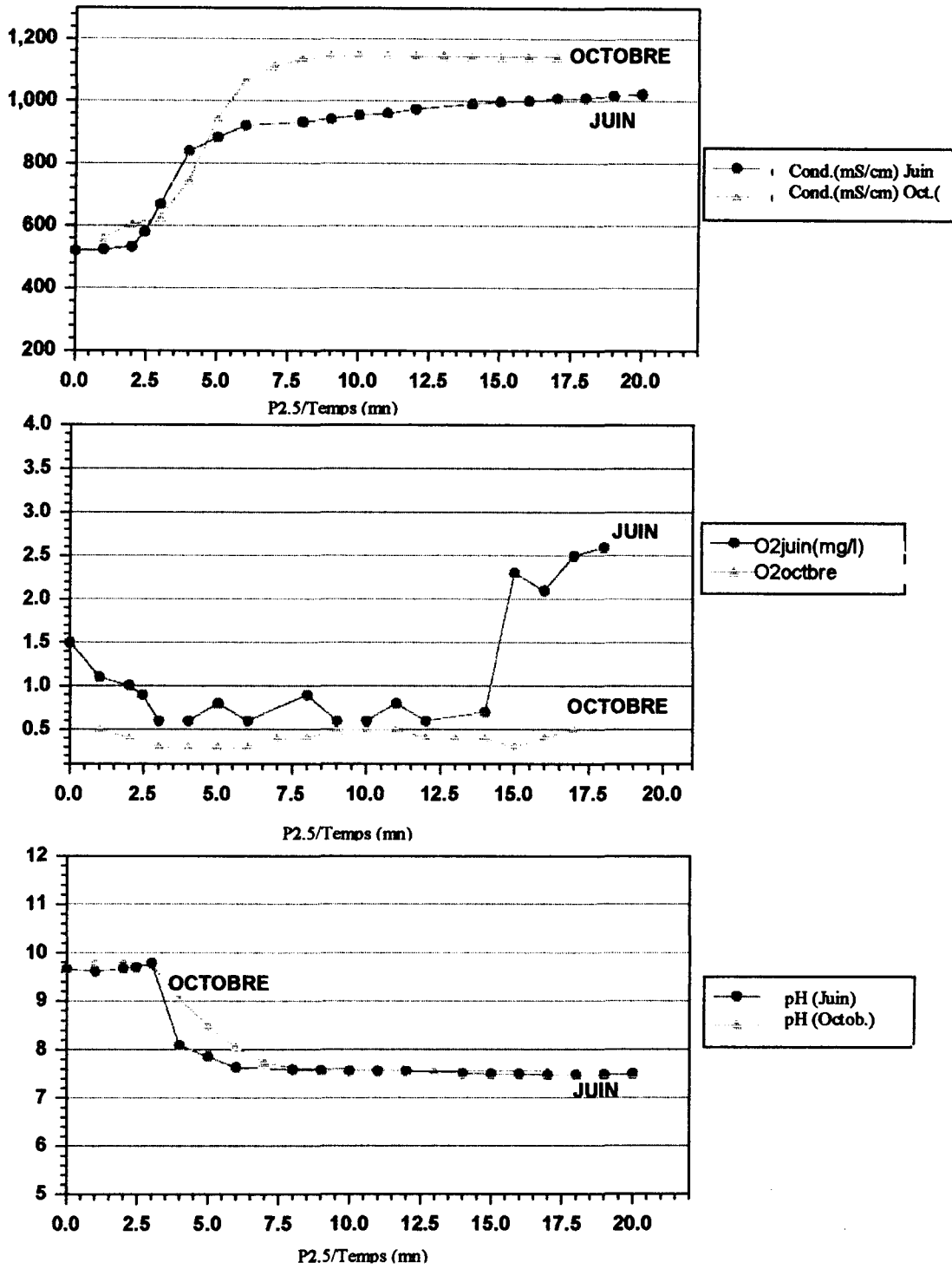


Fig.51: Evolution des paramètres physico-chimiques mesurés sur la nappe au piézomètre P2-7 (juin/octobre 1997)

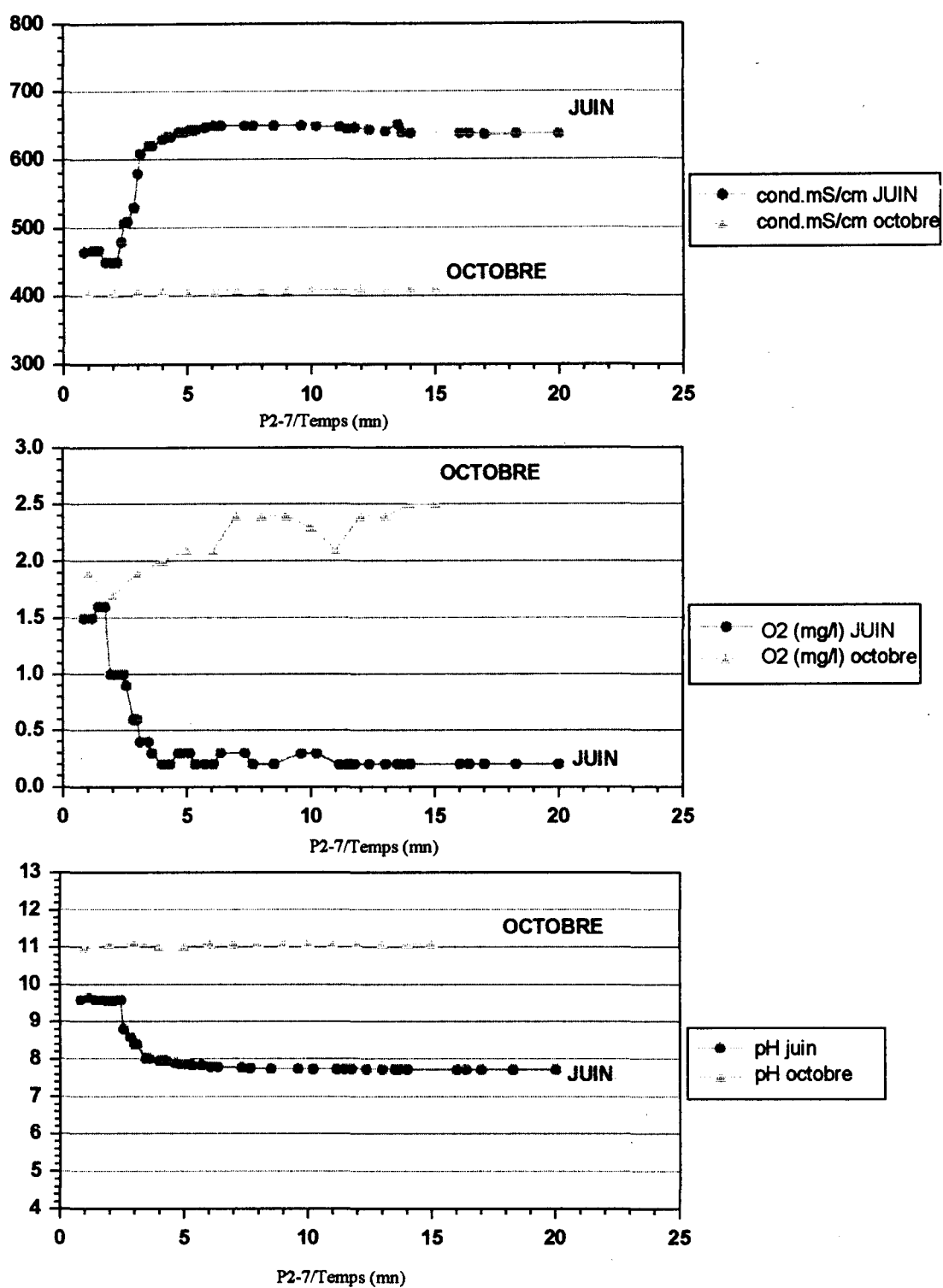
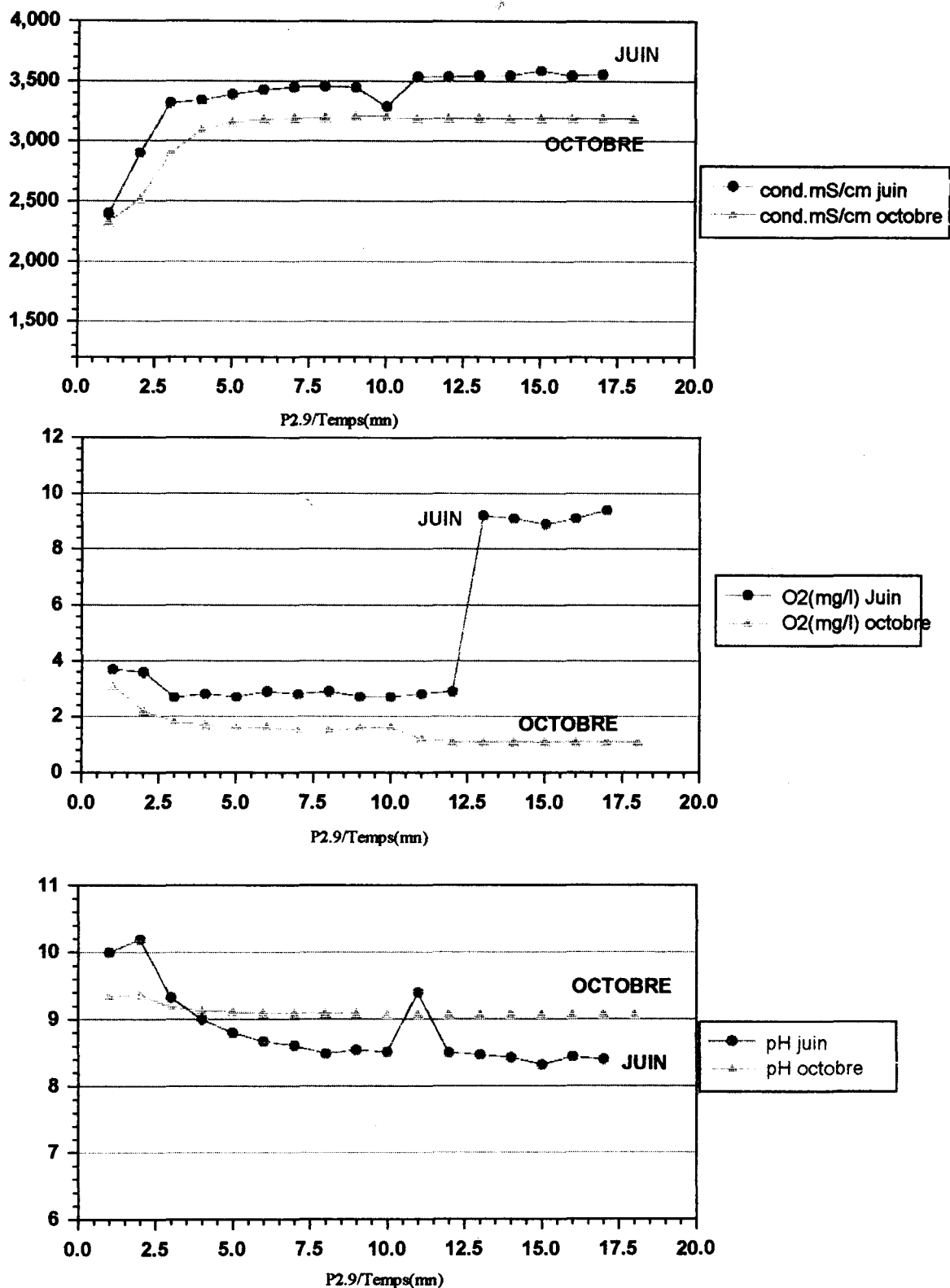


Fig.52: Evolution des paramètres physico-chimiques mesurés sur la nappe au piézomètre P2-9 (juin/octobre 1997)



3.2 La chimie des eaux

Pour une caractérisation chimique des eaux sur le système aquifère de Thiaroye, les résultats des analyses chimiques effectuées en octobre 1997 sont reportés sur le diagramme de Piper représenté à la figure 53. L'analyse du diagramme permet de tirer la conclusion suivante:

Les eaux de la nappe de Thiaroye sont caractérisées par différents types de faciès:

- Les faciès chlorurés sulfatés et calciques
- Les faciès chlorurés sodiques et potassiques
- Le triangle des cations ne présente généralement pas une prédominance de faciès. Cependant les points localisés dans les zones de Niayes (P3.3, P.19) sont décalés vers le pôle calcique. Le point F.3 dans la zone de Beer Thialane est localisé dans le pôle hyper sodique potassique.
- Le diagramme trinéaire des anions présente une prédominance de faciès chlorurés dans plus de 90% des points localisés dans la zone de Thiaroye et des faciès bicarbonatés carbonatés dans les zones de Niayes (97% des points).

La prédominance de faciès chlorurés dans les eaux peut s'expliquer par l'influence de l'environnement marin..

La présence de faciès sulfatées avec des teneurs très élevées qui varient de 300 à 700 mg/l aux points pts.65, pts.68, pts.235, pts.215, PS-8, PS.3, PS-3bis peut être liée à une contamination de la nappe par les engrais sulfatés utilisés dans ces zones où l'activité maraîchère est très développée dans le secteur des Niayes.

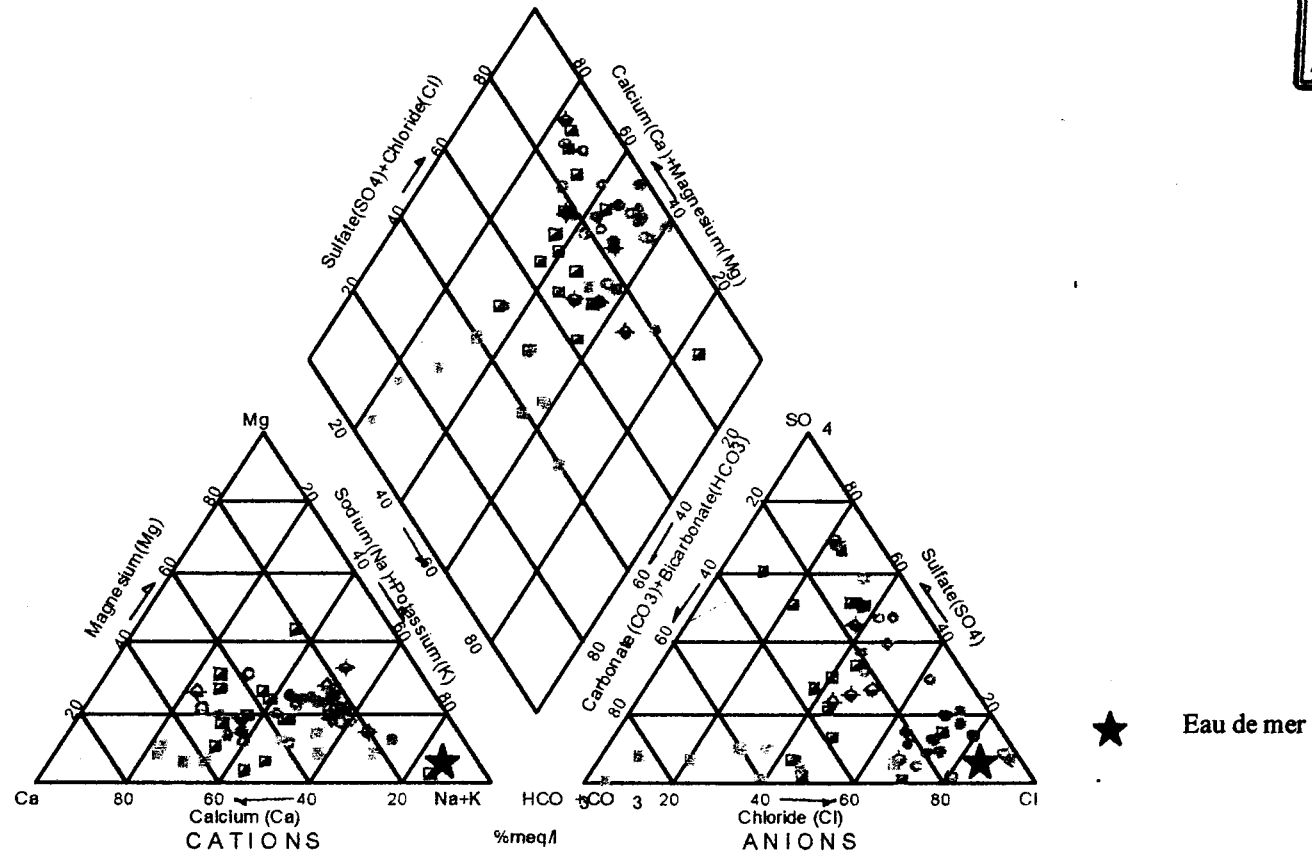
- Les faciès bicarbonatés calciques, carbonatés sodiques et potassiques.

Ces faciès caractérisent essentiellement la zone des Niayes. La présence de calcium (Ca^{2+}), et surtout de bicarbonates (HCO_3^-) et carbonates (CO_3^{2-}) en teneurs élevées dans ces zones pourrait être liée à la présence de matières organiques qui va s'oxyder pour libérer du CO_2 (FREEZE & CHERRY, 1979). Selon cet auteur ce CO_2 libéré et surtout le CO_2 atmosphérique vue l'ouverture du système dans les Niayes réagit avec l'eau, et il se forme de l'acide carbonique. En présence de calcite dans le milieu on a libération du calcium. Ce processus est caractérisé par une acidification des eaux, ce qui est observée dans les Niayes. On a les réactions suivantes:



Pour suivre l'évolution de la chimie et l'influence du lac Retba sur la qualité des eaux, une série d'échantillonnage a été effectuée sur le point P2.9 durant le pompage. Les résultats de l'analyse chimique des échantillons sont reportés sur la figure 54.

PERCENT OF TOTAL MILLIEQUIVALENT PER LITER



Abdoulaye FAYE
 Maître de Conférence
 Département Géologie

Fig. 53: Classification des eaux de la nappe de Thiaroye sur un diagramme de Piper

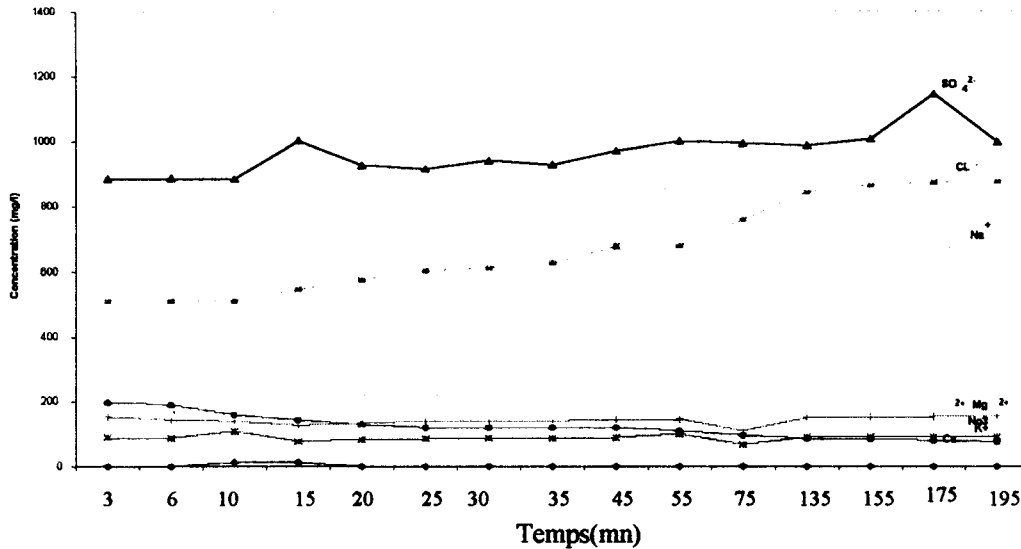


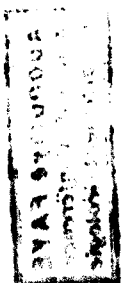
Fig. 54: Evolution hydrochimique de l'aquifère au piézomètre P2-9

Ces résultats obtenus révèlent que les fortes valeurs de conductivité observées dans le secteur du lac Retba (3375 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au point P2.9) sont liées aux teneurs élevées en SO_4^{2-} , Cl^- et Na^+ . Durant le pompage, l'évolution des eaux vers des teneurs plus élevées en Cl^- et Na^+ et une diminution des ions Ca^{2+} pourrait s'expliquer par des processus d'échanges cationiques entre eau douce et eau de mer (APPELO & POSTMA, 1994). Selon l'auteur l'ion Ca^{2+} est récupéré par l'eau de mer qui libère un ion Na^+ , et on a une eau de type NaHCO_3 selon la réaction:



3.3 Etude de la contamination du système aquifère par les nitrates

La pollution des eaux du système aquifère de Thiaroye par les nitrates a fait l'objet de plusieurs études depuis 1989. La présente étude a permis de réactualiser l'état de contamination de la nappe. Pour cela les analyses chimiques effectuées en octobre 1997 sont reportées sur le diagramme trilineaire représenté à la figure 55.



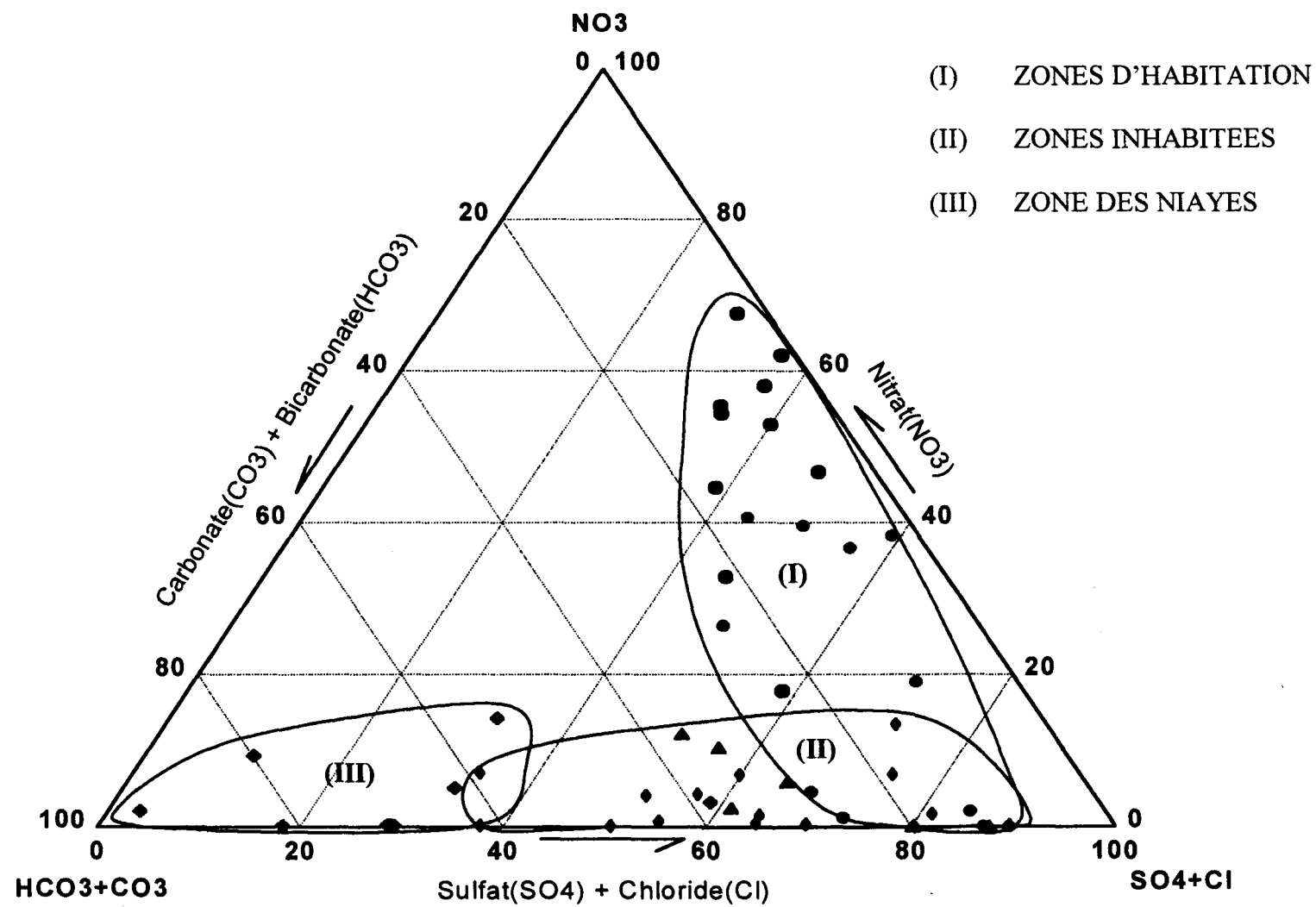


Fig.55: Niveau de la contamination anthropique des eaux dans la nappe de Thiaryoye

L'analyse du diagramme permet de dégager trois types d'eau sur le système aquifère:

- Groupe I

Il représente l'ensemble des points localisés dans la zone de Thiaroye, Pikine, Guédiawaye, Parcelles Assainies et tous les puits villageois. Dans ces secteurs plus de 80% des points échantillonnés présentent des eaux caractérisées par des teneurs élevées en nitrates voisines de 400 mg/l qui représentent plus de 60% des anions. Le niveau de contamination des eaux dans ces zones est essentiellement lié à la présence humaine avec le dépôt de matières fécales sur le sol qui forme des sources de pollution de la nappe.

- Groupe II

Dans ce groupe les eaux de la nappe sont de meilleure qualité et les teneurs en nitrates représentent moins de 15% des anions. Ces points sont localisés dans des zones généralement inhabitées.

Ce groupe est caractérisé par des eaux avec de fortes concentrations en chlorures et sulfates qui représentent sur l'ensemble des points échantillonnés plus de 50% des anions.

- Groupe III

Il est représenté par des points localisés dans les zones de Niayes. On note de faibles concentrations en nitrates qui représentent moins de 20 % des anions sur tous les points échantillonnés. Les eaux sont surtout carbonatées et bicarbonatées dans ce secteur. La prédominance d'ions (HCO_3^-) et (CO_3^{2-}) est essentiellement due aux phénomènes d'échanges avec l'atmosphère.

Pour conclure, on peut retenir que les fortes minéralisations ne sont pas seulement liées à l'environnement marin ou aux conditions climatiques qui favorisent les phénomènes d'évaporation. La contamination anthropique caractérisée par de fortes teneurs en nitrates joue un rôle prépondérant dans les secteurs urbains.

3.3.1 Etude de la contamination des eaux de la nappe par les nitrates en rapport avec les conditions du milieu

3.3.1.1 Les teneurs en nitrates

Les teneurs en nitrates obtenues en juillet et octobre 1997 sont représentées sur les histogrammes des figures 56 et 57. Les valeurs de nitrates définies sur l'aquifère en juillet 1997, varient entre 0,30 et 448 mg/l, avec une moyenne de 90 mg/l (n=50). En octobre les concentrations obtenues sont un peu plus élevées et sont comprises entre 0,10 et 547 mg/l (n=50) avec une moyenne de 98 mg/l. Dans les deux cas, les histogrammes donnent des distributions asymétriques à droite avec des valeurs de skewness (C) de +1,60 en juillet et +1,62 en octobre. Cette asymétrie est également caractérisée par l'écart important entre les moyennes arithmétiques et les médianes des histogrammes; 90 et 20,76 en juillet et 97,86 et 10,5 en octobre.

Par rapport aux normes de potabilité des eaux de boisson (WHO, 1993), 34% des points échantillonnés en juillet 1997 dépassent la limite de 50 mg/l dont 41% compris entre 50 et 200 mg/l, 18% entre 200 et 300 mg/l et 41% entre 300 et 450 mg/l.

Pour les échantillons obtenus en octobre 1997, 32% dépassent cette limite de 50 mg/l, dont 25% varient de 50 à 200 mg/l, 37% de 200 à 400 mg/l et 37% de 400 à 550 mg/l.

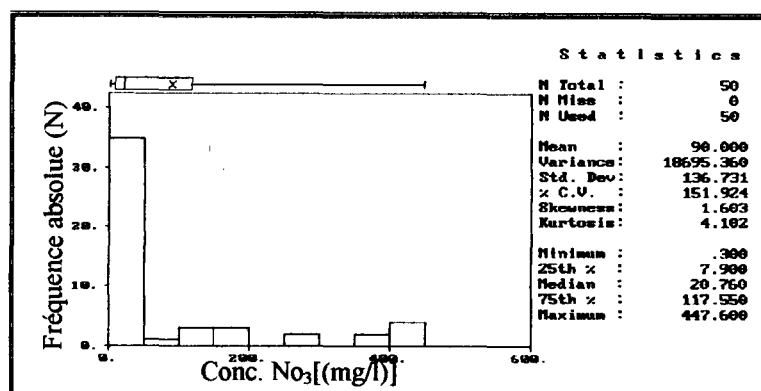


Fig.56: Histogramme des concentrations en nitrates en juillet 1997.

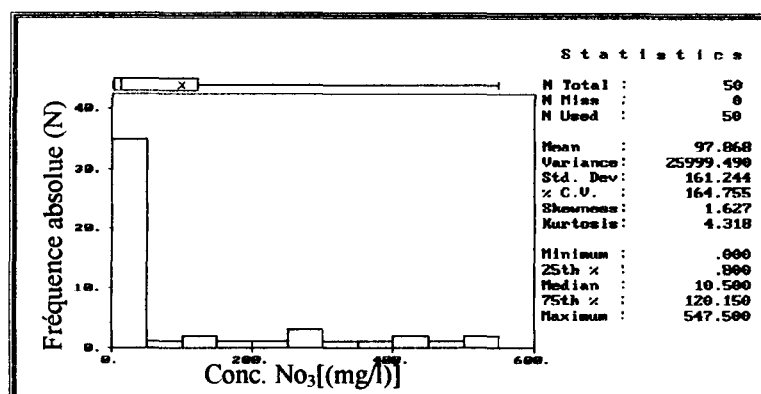


Fig.57: Histogramme des concentrations en nitrates en octobre 1997

Ces résultats obtenus reflètent une irrégularité dans la distribution spatiale des concentrations en nitrates sur la nappe. Une régionalisation des teneurs en nitrate par des courbes isovaleurs ne nous paraît pas significative, comme le montre d'ailleurs les variogrammes estimés à partir de ces valeurs et représentés sur les figures 58 et 59.

Ainsi pour représenter les valeurs des nitrates obtenues sur la nappe en juillet et octobre 1997, on a défini des cartes de zonation selon les valeurs limites (Fig.60, 61).

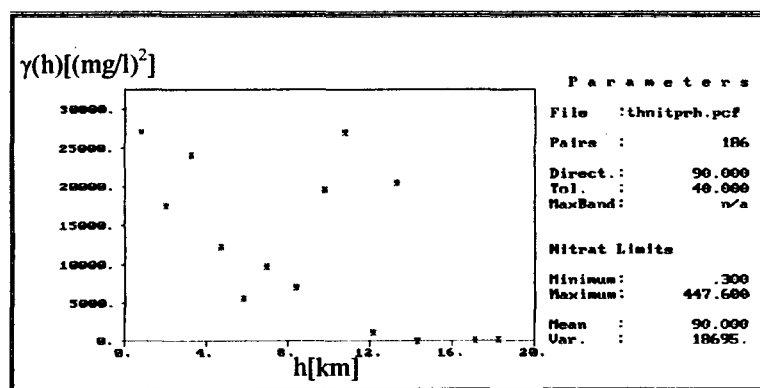


Fig.58: Variogramme calculé sur la direction N-S avec les concentrations en nitrates de juillet 1997

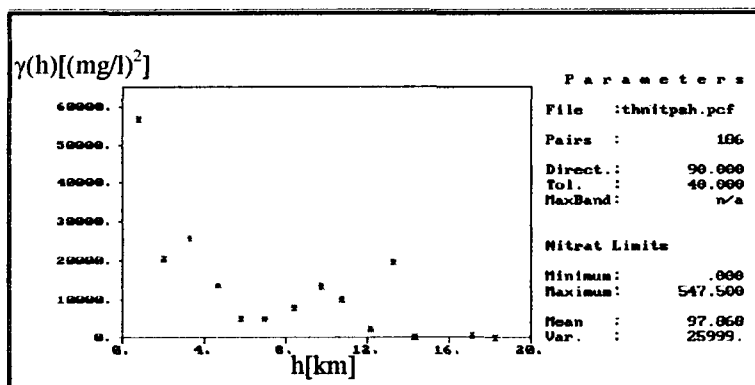


Fig.59: Variogramme calculé sur la direction N-S avec les concentrations en nitrates d'octobre 1997

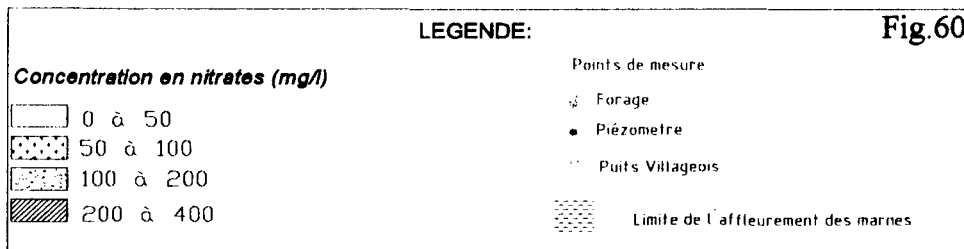
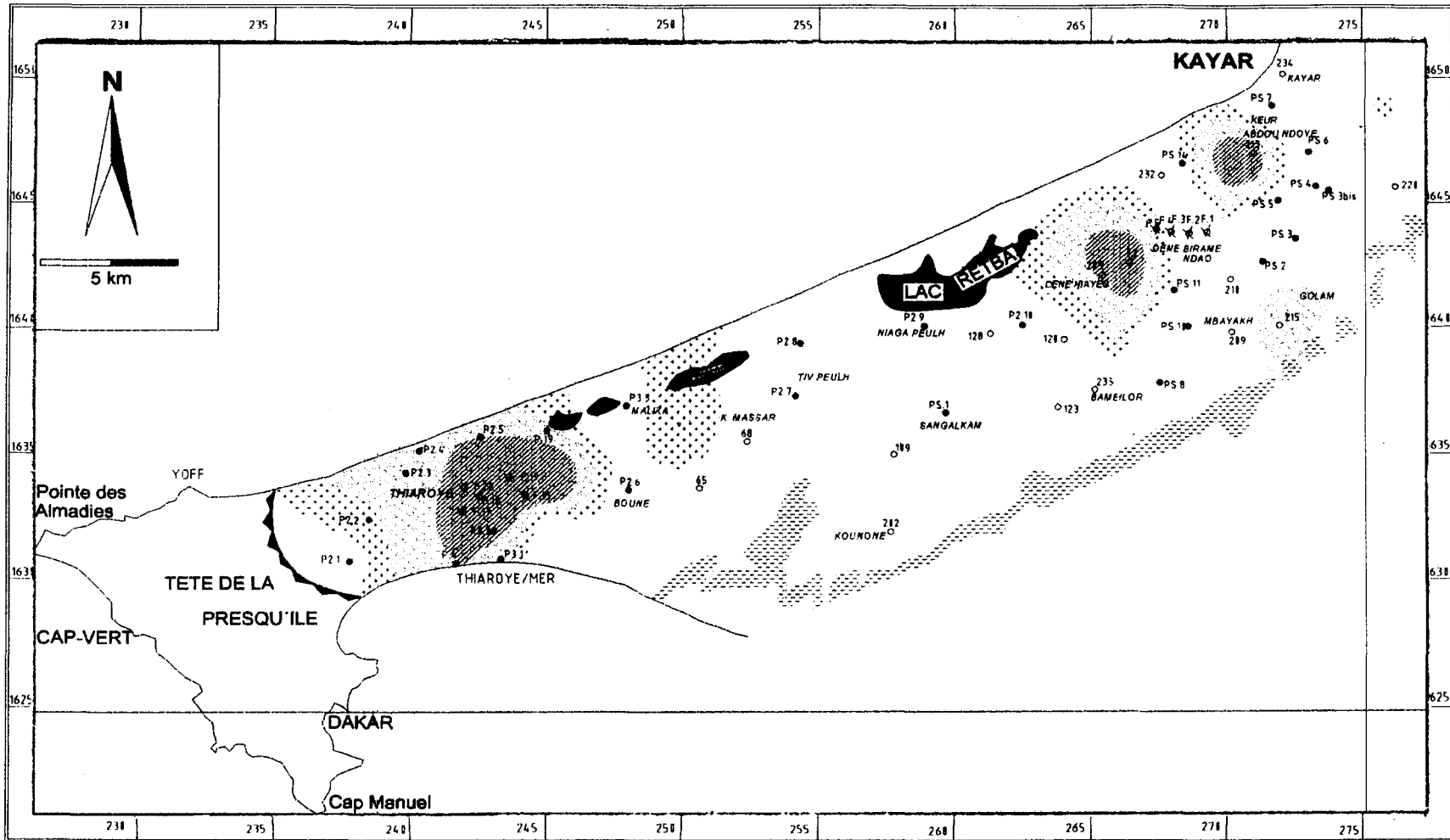
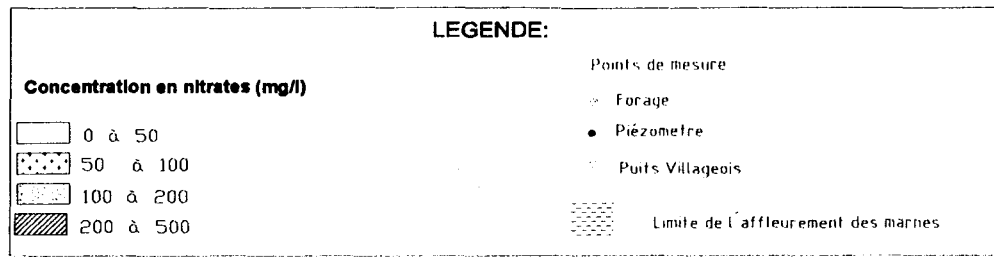
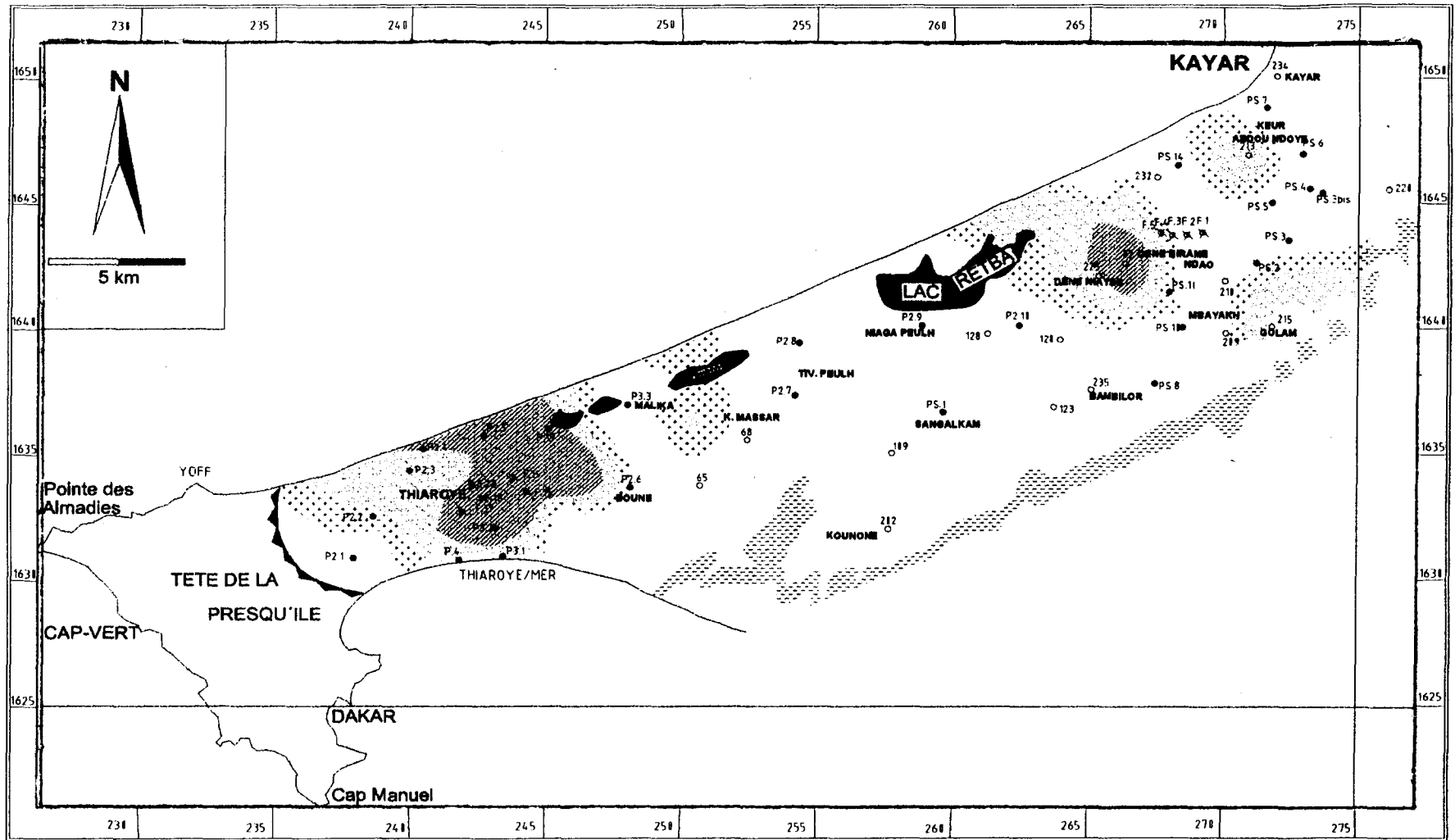


Fig.60

**NAPPE LIBRE DES SABLES QUATERNAIRES
THIAROYE/BEER THIALANE
CARTE DE CONTAMINATION DE LA NAPPE
PAR LES NITRATES
(JUILLET 1997)**



**Fig.61: NAPPE LIBRE DES SABLES QUATERNAIRES
THIAROYE/BEER THIALANE
CARTE DE CONTAMINATION DE LA NAPPE
PAR LES NITRATES
(OCTOBRE 1997)**

Dans la zone non saturée et les eaux souterraines, les teneurs en nitrates dépendent des conditions du milieu, à savoir le potentiel rédox, la teneur en oxygène dissous et le pH.

Selon SHLEGEL (1985) la réduction des nitrates par dénitrification est un processus bactérien qui peut se faire dans des milieux pauvres en oxygène. Au niveau des eaux souterraines, cette réduction correspond à des teneurs en oxygène inférieures à 5 mg/l (HÖLTING, 1992). En milieu bien oxygéné, l'ion ammonium (NH_4^+) et l'ion nitrite (NO_2^-) sont oxydés en nitrate (NO_3^-) par les bactéries (Nitrosomonas et Nitrobacter). Ce processus est surtout observé dans les eaux usées.

Dans cette étude, on n'a pas pu effectuer des mesures de potentiel redox. Les teneurs en nitrate seront alors étudiées en rapport avec les valeurs d'oxygène dissous et de pH mesurées.

3.3.1.2 pH

Dans la description des paramètres physico-chimiques, on avait donné des valeurs de pH comprises entre 4,47 et 7,85 avec une moyenne de 6,36. 25% des valeurs sont inférieures à 5,70 avec de faibles valeurs (pH 4,47). 50% des valeurs de pH mesurées sont comprises entre 5,70 et 7.

Cette caractérisation met en évidence une acidité des eaux sur la nappe de Thiaroye.

3.3.1.3 Oxygène dissous

Les valeurs d'oxygène dissous mesurées sont comprises entre 2,35 et 8,3 mg/l avec une moyenne de 5,45 mg/l. La distribution des valeurs (Fig.62) est bimodale avec un Skewness de -0,29; une moyenne arithmétique de 5,43 et une médiane de 6,25. Les valeurs maximales observées comprises entre 7 et 8,30 mg/l sont localisées dans les puits villageois, la zone de Thiaroye et les Niayes. Cette observation permet d'expliquer l'acidification dans ces zones et les fortes concentrations en ions HCO_3^- et CO_3^{2-} dans les Niayes. Ces teneurs élevées en oxygène peuvent être dues aux puits ouverts en contact avec l'atmosphère, ou à l'état superficiel de la nappe dans ces secteurs.

Les faibles valeurs d'oxygène dissous comprises entre 2,35 et 3,4 mg/l sont observées dans la partie Est du système au point PS-11. Ces valeurs sont en rapport avec la profondeur de la nappe dans cette zone qui est comprise entre 7 et 10 m.

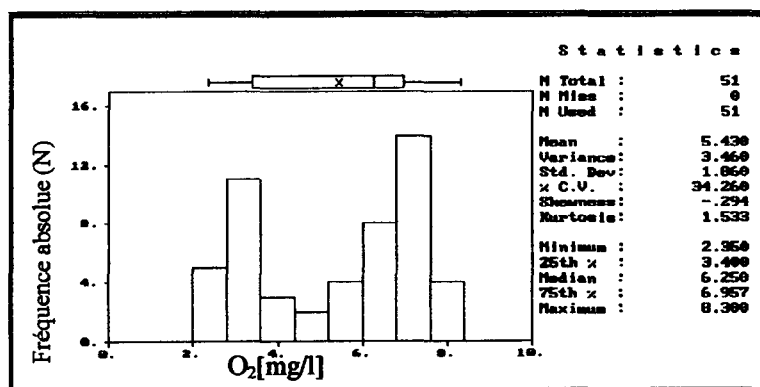


Fig.62: Histogramme des valeurs d'oxygène dissous mesurées sur la nappe

Ces résultats donnés montrent une saturation en oxygène des eaux de la nappe pour environ 70% des valeurs mesurées. Le taux de saturation est défini à 7,56 mg/l pour une température de 30°C selon DEGNER & FORSTER (1997).

On peut conclure que le niveau d'oxygénation des eaux dans la nappe de Thiaroye, au même titre que les températures mesurées qui sont très voisines des températures ambiantes montrent une ouverture du système et sa vulnérabilité à la pollution.

Les conditions du milieu ici définies par le taux d'oxygène dissous et le pH des eaux dans le milieu ne sont pas compatibles avec des processus de dénitrification qui pourraient réduire les teneurs en nitrates observées. Ces conditions permettent plutôt d'expliquer le niveau de contamination de la nappe.

3.3.2 La contamination des eaux de la nappe par l'ammonium et les nitrites

Selon TRINKWV (1990), la valeur admissible pour l'ammonium est de 0,5 mg/l et celle des nitrites est fixée à 0,1 mg/l. Pour les analyses effectuées sur la nappe en octobre données sur les histogrammes (Fig.63 et 64), on a dans les deux cas des distributions assymétriques. Pour l'ammonium avec $n=50$; 52% des valeurs mesurées dépassent la limite de 0,5 mg/l et sont comprises entre 0,5 et 2,5 mg/l.

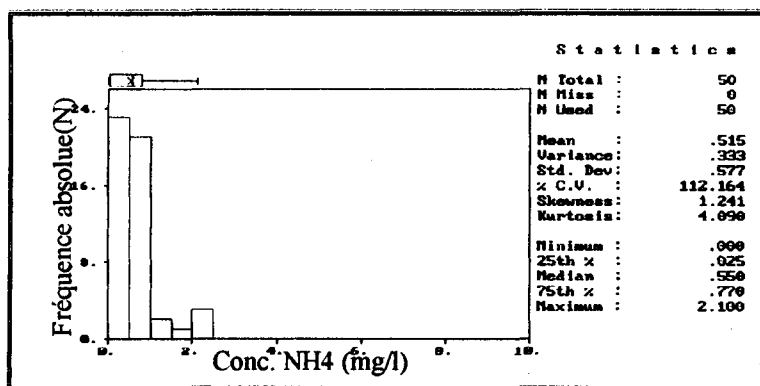


Fig.63: Histogramme des concentrations en ammonium mesurées sur la nappe.

Les concentrations en nitrites révèlent des teneurs très élevées. Pour $n=50$, on a 40% des échantillons qui dépassent la valeur admissible de 0,1 mg/l et sont comprises entre 0,1 et 0,8 mg/l. La valeur obtenue au point P-58 dépasse largement cette limite soit 1,9 mg/l (Fig.64).

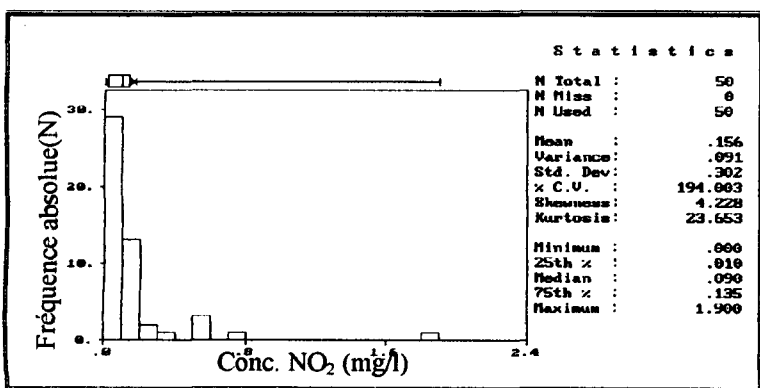


Fig.64: Histogramme des concentrations en nitrite mesurées sur la nappe.

PARTIE III

**APPLICATION D'UN SYSTEME D'INFORMATION
GEOGRAPHIQUE POUR LA MODELISATION DES
ECOULEMENTS ET L'ETUDE DE LA
VULNERABILITE A LA CONTAMINATION PAR LES
NITRATES.**

I. CARTOGRAPHIE THEMATIQUE DANS LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

Dans le cadre de cette étude, l'application d'un SIG a permis de cartographier et d'analyser l'ensemble des données spatiales obtenues sur la zone de Thiaroye. Les résultats de l'étude hydrogéologique et géographique présentés sous forme de cartes thématiques sont intégrés comme données d'entrée pour la modélisation des écoulements et la détermination de la vulnérabilité des eaux à la contamination par les nitrates.

1. CARTE THEMATIQUE D'OCCUPATION DES SOLS

La carte d'occupation des sols est obtenue à partir de l'image satellitaire SPOT (XS+P) datée du 23.12.1995. La démarche méthodologique utilisée pour l'élaboration de cette carte est donnée au chp.2.1.

1.1 Présentation des résultats

Les résultats de la cartographie sont présentés à la figure 65 et aux tableaux 7 et 8. Sur la base de cette carte thématique d'occupation des sols, a été effectuée une zonation du domaine d'étude:

- **ZONE A**

Elle représente la banlieue. C'est la zone d'agglomération, caractérisée par une habitation à forte densité. La zone A, englobe les communes et départements de Thiaroye, Pikine, les Parcelles Assinies, Guédiawaye, Yeumbeul, Malika, Boune. Selon une étude de la Direction de la Prévision et de la Statistique datée de 1988, cette agglomération a une population totale aujourd'hui proche de 1 million d'hts avec une densité estimée à 4 000 hts/km².

Dans cette étude, cette zone présente un intérêt particulier dans le sens qu'elle abrite à Thiaroye le centre de captage de la SONEES pour l'alimentation en eau de Dakar, composé des forages F.22, F.21, F.18, F.17, F.15.

- **ZONE B**

C'est l'ensemble des zones dunaires, elle comprend:

- La plage actuelle
- l'Erg de Pikine
- Le cordon dunaire littoral de Cambérène
- Les dunes vives littorales de la côte nord
- L'Erg de Keur Massar et Bambilor

Les ouvrages P2-9, P2-10, PS-10, PS-11, PS-14, et PTS.120 y sont localisés.

- **ZONE C**

Elle constitue la zone rurale, englobant les villages et communautés rurales, de Dène Birame Ndao, Dèni Niayes, Kaniack, Keur Abdou Ndoye, Bambilor, Golam, Niaga, Keur Massar, Sangalkam, Wayambam, Gorom, Niakoulrap, Kounon, Mbayakh, Kayar. Selon les données de la statistique de 1988, la population totale dans ces localités est estimée aujourd'hui à près de 700 000 hts avec une densité de 600 hts/km².

Dans cette zone, sont localisés les puits villageois Pts.02, Pts.225, Pts.232, Pts.213, Pts.234, Pts.235, Pts.215, Pts.202, Pts.209, Pts.210, Pts.123, Pts.109.

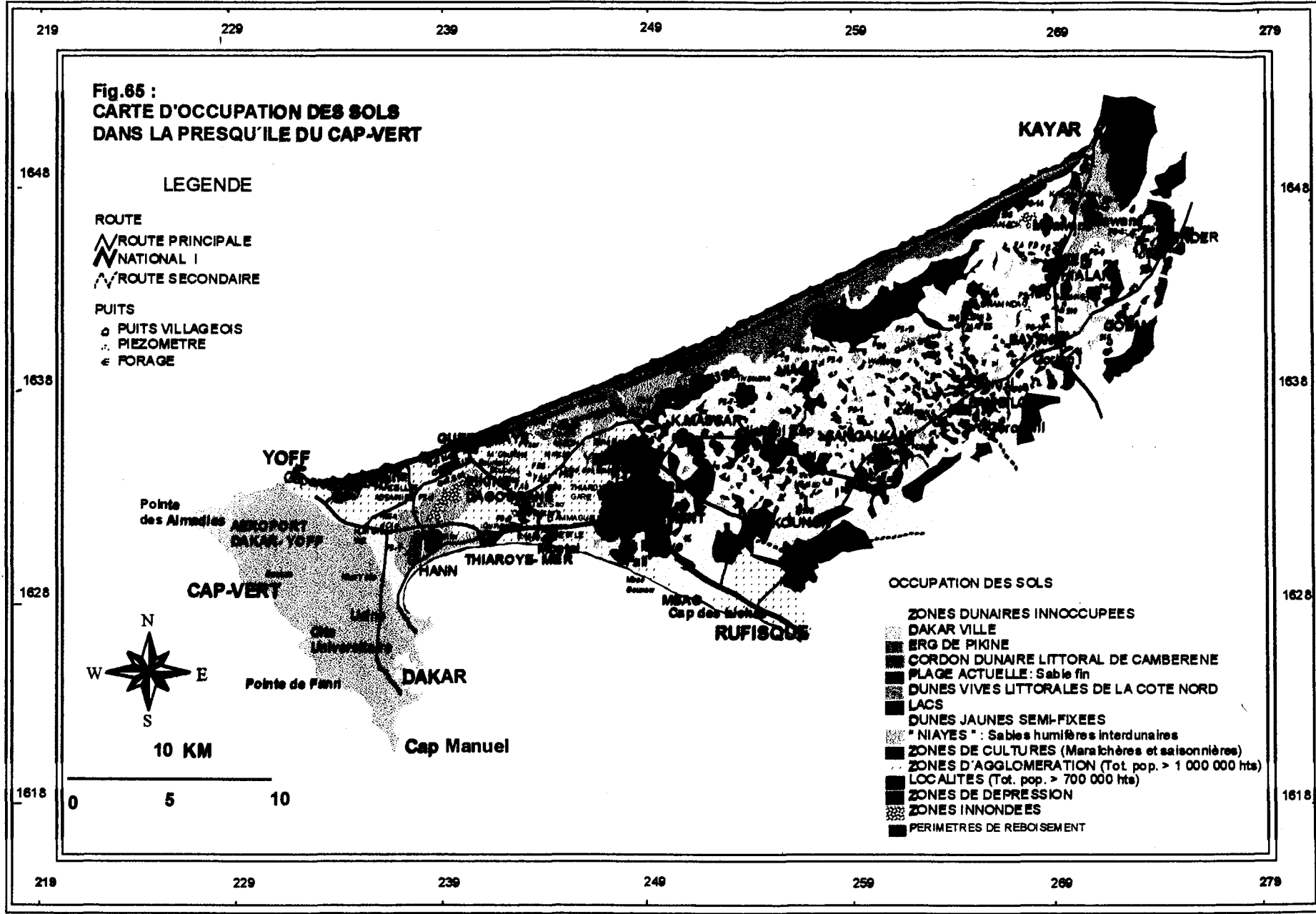


Tableau 7: Codification des différentes unités définies dans ARC/INFO

CODE	UNITES DEFINIES
1	Système dunaire de Keur Massar, Erg de Bambilor
5	Tête de la Presqu Ile
10	Erg de Pikine
20	Système de Cambérène
30	Plage actuelle
40	Dunes littorales de la cote Nord
50	Lacs Mbeubeuss, Warouwaye, Wouye, Mbawane
51	Lac Retba
60	Les dunes jaunes
100	Niayes
200	Zones de cultures
300	Zone d'agglomération (Thiaroye, Pikine, Malika, Yeumbeul, Boune)
400	Localités , Villages
500	Zone de Dépression
600	Zone maraîchère
700	Perimètres de reboisement

- **ZONE D**

Elle regroupe les Niayes, qui sont des zones de dépressions interdunaires à sables humifères riches. Sur l'image satellitaire, les Niayes sont essentiellement localisés aux alentours des zones inondables comme la mangrove de Pikine, les lacs Mbeubeuss, Warouwaye, Wouye et Mbawane.

Les piézomètres P2-1, P3-3, PS-5, PS-6, PS-7, PS-4, P-19, les puits Pts.128, et Pts.220, sont localisés dans cette zone.

- **ZONE E**

Elle regroupe les zones agricoles où les zones des cultures maraîchères et saisonnières. Elles sont surtout localisées autour des Niayes dans les zones rurales et sur les axes routiers. Cette zone abrite le centre d'exploitation de BEER THIALANE avec les forages F.1, F.2, F.3, F.4, F.5, les puits Pts.65 et Pts.68, et les piézomètres P2-8, P2-7, P3-1, P3-2, P-58, PS-1, PS.3-bis, PS-3, PS-8.

Tableau 8-: Données statistiques sur la surface (km²) des unités considérées dans ARC/INFO

CODE	NONBRES DE POLYGONES	MINIMUM	MAXIMUM	SOMME	MOYENN
1	4	0.85	0.85	184.23	50
5	1	45.3	45.3	45.3	45.3
10	3	0.87	1.17	3.01	1.003
20	2	1.21	1.85	3.07	1.53
30	2	1.99	13.46	15.42	7.73
40	4	0.18	18.38	19.15	4.78
50	4	0.13	1.45	1.58	0.39
51	1	3.10	3.10	3.10	3.10
60	1	13.04	13.04	13.04	13.04
100	49	0.03	10.01	19.97	0.60
200	235	0.001	7.27	276.86	1.17
300	5	0.69	24.34	35.46	10.91
400	23	0.01	0.5	3.45	0.15
500	4	0.08	9.73	21.54	5.38
600	3	0.3	1.57	2.81	0.93
700	20	0.11	8.00	15.8	0.79
TOTAL	361	660.71	660.71	660.71	660.71

1.2 Analyses et conclusions sur les résultats

La carte thématique d'occupation de sol ainsi élaborée à l'aide de ARC/INFO a permis une régionalisation des données à référence spatiale sur l'ensemble de la zone d'étude.

Cette carte permettra surtout de voir l'influence de l'environnement de surface sur la qualité des eaux souterraines et de déterminer la vulnérabilité du système aquifère à la pollution par les nitrates.

En effet la migration d'éléments polluants vers les eaux souterraines dépend des processus physiques, chimiques et microbiennes, mais le facteur contrôlant directement le niveau de contamination de la nappe est la source de contaminants définie à la surface. Ces sources de pollution localisées à la surface peuvent être statistiquement quantifiées à travers les variables définies dans l'occupation des sols (ECKHARD & STACKELBERG, 1995).

Mais selon KLIMAS (1995), ECKHARD & STACKELBERG (1995), RASMUSSEN (1996), TESORIERO & VOSS (1997) la corrélation entre la qualité des eaux souterraines et l'occupation des sols ne peut être statistiquement établie qu'à travers des données complémentaires définies par:

- des analyses chimiques des eaux effectuées sur des points représentatifs.
- une caractérisation hydrogéologique et géologique du système.

Sur cette base, l'étude de l'influence de l'occupation des sols sur la qualité des eaux de la nappe a été faite à partir des résultats d'une étude hydrogéologique. La caractérisation du système aquifère de Thiaroye a permis de définir la nature de l'aquifère, son allure piézométrique, la profondeur des eaux par rapport au sol, ainsi que le niveau de contamination par les nitrates. L'étude géologique révèle la nature des séries sédimentaires dans le système aquifère.

La carte thématique d'occupation des sols élaborée dans cette étude peut avoir un tout autre intérêt. En effet, les analyses statistiques effectuées dans la base de données ont permis une évaluation des surfaces des différentes unités géomorphologiques définies dans les tableaux 3 et 4, et d'étudier l'évolution des entités géographiques comme les Niayes les zones de cultures. Ces données seront comparées aux données disponibles sur les mêmes unités dans les travaux antérieurs:

- La zone des Niayes: Elle est définie essentiellement autour des zones inondables et d'après l'analyse statistique elle occupe une superficie de 20 km² alors qu'en 1969 sur des photos aériennes, cette zone était estimée à 29,26 km². Ceci révèle un rétrécissement de la zone par rapport à ces résultats antérieurs (GEOHYDRAULIQUE, 1972).
- Les zones de cultures: Elles sont surtout axées sur le réseau routier Keur Massar, Sangalkam, Mbayakh, Kayar. Selon nos résultats elles couvrent une superficie de 276 km², alors qu'elles étaient estimées à 200 km² d'après une enquête sur l'exploitation de la nappe à usage agricole ou à l'alimentation en eau des populations locales (GEOHYDRAULIQUE, 1972). Ce qui correspond à une extension des surfaces de cultures par rapport à nos résultats.

Mais nous émettons des réserves sur ces comparaisons, compte tenue des méthodologies utilisées, qui sont très différentes.

2. CARTE DE LOCALISATION DES NIAYES ET LACS: SURFACES D'EVAPORATION DE LA NAPPE

La carte d'occupation des sols définie précédemment a permis de cartographier le réseau hydrographique de surface dans la zone de Thiaroye et d'identifier les Niayes. Ces deux unités géomorphologiques sont intégrées comme étant des surfaces d'évaporation de la nappe pour la modélisation des écoulements.

Les résultats obtenus sont consignés sur la figure 66. On peut distinguer:

2.1 Les Lacs

- Les lacs Youi, Warouwaye et Mbeubeuss

Ce sont les lacs asséchés localisés dans la zone de Malika, qui sont actuellement matérialisés par des zones de dépressions. D'après l'analyse statistique des éléments cartographiés dans le système d'information géographique, ces lacs occupent environ une superficie de 1,58 km² y compris le lac Mbawane. Le lac Mbeubeuss asséchés sert aujourd'hui de dépotoir pour l'agglomération dakaraise.

- Le lac Retba

D'après l'analyse statistique dans le SIG, il couvre une superficie actuelle d'environ 3,17 km² (voisine de 2,9 km²), surface donnée d'après une étude sur le lac qui a utilisé la même méthodologie (Fall, 1995). C'est un lac à eaux sursalées, qui présente un intérêt économique certain par l'exploitation du sel. L'état de salinité des eaux atténue l'évaporation de la nappe dans cette zone.

- Le lac Mbawane

Il est localisé dans la zone nord-est du système, au niveau de Kayar. Il est actuellement asséché et est représenté par une zone de dépression.

2.2 Les zones de "Niayes"

Ce sont des dépressions interdunaires où la nappe phréatique est affleurente à subaffleurente. Les Niayes représentent des zones à intérêt économique par les cultures maraîchères très développées dans la région.

3 DETERMINATION DU BILAN HYDRIQUE: ELABORATION DE LA CARTE DE RECHARGE DANS LE SIG

L'objectif de ce chapitre est de déterminer d'abord le bilan hydrique du système aquifère et d'utiliser le SIG pour l'élaboration de la carte de recharge en vue d'une spatialisation des valeurs obtenues sur la nappe. Cette carte thématique de recharge est intégrée comme donnée d'entrée dans le modèle hydrodynamique.

Selon HÖLTING (1989) le bilan hydrique est défini par les paramètres donnés dans l'équation:

$$N = V + A_o + A_u \quad (45)$$

N	=	précipitation
V	=	évapotranspiration réelle
A _o	=	ruissellement
A _u	=	infiltration + eau stockée dans le sol

Le ruissellement est ici négligeable, 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 phréatique.

On a considéré pour le calcul de l'évapotranspiration les unités géomorphologiques différenciées sur la carte définie précédemment dans le calcul de la recharge.

3.1 Exploitation des données et présentation des résultats du bilan

3.1.1 Calcul de l'évapotranspiration réelle

Selon ALBRECHT

Selon ALBRECHT (1951), la relation entre la précipitation (N), l'évapotranspiration potentielle (ET_{pot}), l'évapotranspiration réelle (ET_{reell}) est définie par cette double équation:

$$ET_{reell(n)} = \frac{N_n + \frac{\sum W_{(n-1)}}{\sum W_{Max}} \cdot ET_{pot(n)} \cdot g}{1 + \frac{\sum W_{Max} - \sum W_{(n-1)}}{C \cdot ET_{pot(n)}}} \quad (46a)$$

$$\sum W_{(n)} = N_{(n)} + \sum W_{(n-1)} - ET_{reell(n)} \quad (46b)$$

où:

n et (n-1): indices du mois considéré et du mois précédent

ET_{reell}: évapotranspiration moyenne mensuelle calculée (mm)

N: moyenne mensuelle des précipitations (mm)

ET_{pot} : moyenne mensuelle de l'évapotranspiration potentielle (mm)

$\Sigma w_{(n)}$ et $\Sigma w_{(n-1)}$: Les réserves du sol pouvant être extraites par le système racinaire des végétaux. Cette réserve est comprise entre deux seuils: la capacité au champ et le point de flétrissement

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

g et c définissent des constantes, qui dépendent de la couverture végétale du sol, $g = 0,5$ pour un sol couvert ($g = 0,37$ pour un sol nu et $c = 1,36$).

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

- a) Si $N > ET_{pot}$ alors $ET_{reell} = ET_{pot}$. On a un excédent agricole.
- b) Si $N < ET_{pot}$ alors ET_{reell} sera calculée d'après la formule (46a), et sa valeur doit être inférieure à celle de ET_{pot} . On a un déficit agricole.
- c) Pour chaque mois considéré on définit également les réserves utiles du sol Σw par la formule (46b), avec: $\Sigma w \leq 100$. Ce calcul doit démarrer à un mois où les réserves du sol sont plus ou moins bien estimées. Ainsi d'après l'auteur:
 - $\Sigma w = 0$ après une longue période de sécheresse.
 - $\Sigma w = \Sigma w_{max} = 100$ mm après une période de pluies efficaces.

Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, nous avons considéré l'évapotranspiration potentielle de THORNTHWAITE. Les données climatiques dont nous disposons ne sont pas suffisantes pour définir l' ET_{pot} de ALBRECHT. Les calculs commencent au mois d'avril avec $\Sigma w_{(avril)} = 0$ mm et $g = 0,37$.

Les résultats de l'estimation de l'évapotranspiration réelle, à la station de Dakar-Yoff sont donnés au tableau 9.

Tableau 9: Calcul de la moyenne mensuelle de l'ET_{réelle} (mm) et des réserves du sol à DAKAR-YOFF pour la période 1984-1996

MOIS	AN	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	Moy. Ann.
AVR	ETR ΣW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MAI	ETR ΣW	- 0.00	- 0.00	- 0.00	- 0.00	- 0.00	- 0.00	- 0.00	- 0.00	0.43 0.17	0.6 0.34	0.12 0.02	0.52 0.18	- 0.00	0.12 0.05
JUIN	ETR ΣW	5.96 1.74	10.53 3.37	- 0.00	2.63 0.77	6.29 2.10	20.5 5.6	2.65 0.75	0.002 0.003	6.94 2.33	0.01 0.002	2.72 0.88	7.10 2.78	0.02 0.01	5.41 1.56
JUIL	ETR ΣW	16.20 4.34	60.42 22.51	18.35 5.15	43.13 11.44	37.22 7.78	76.99 14.81	21.31 4.84	20.46 5.74	32.97 8.56	50.01 15.29	3.14 0.64	48.30 12.29	59.6 16.10	37.54 9.96
AOUT	ETR ΣW	59.42 14.84	236.1 84.42	79.12 21.12	209.4 49.29	134.2 26.24	250.7 67.93	82.28 100	85.47 22.47	76.46 18.70	79.6 19.39	110.1 33.12	250.2 60.74	93.6 19.13	132.1 3 41.33
SEPT	ETR ΣW	120.5 27.84	139.4 61.52	228.6 53.03	111.7 10.79	120.4 10.99	88.11 70.02	10.98 100	116.2 23.07	57.01 10.59	152.7 33.12	88.9 16.58	55.5 1.09	202.1 47.4	136.8 7 35.84
OCT	ETR ΣW	29.39 2.95	13.42 3.60	60.58 2.16	29.93 5.26	25.80 0.59	72.38 2.04	4.31 23.3	41.49 4.88	10.16 1.23	40.73 1.39	15.48 1.10	15.98 5.01	79.74 3.16	36.21 2.89
NOV	ETR ΣW	1.55 1.4	2.66 0.94	2.1 0.1	4.37 0.80	0.51 0.18	2.57 0.57	3.75 0.56	3.97 0.9	1.21 0.32	0.84 0.65	0.90 0.20	4.94 0.07	2.55 0.61	2.53 0.56
DEC	ETR ΣW	0.93 0.47	0.98 0.46	0.60 0.02	1.57 0.03	0.21 0.07	0.48 0.09	1.023 0.034	0.74 0.16	1.12 0.40	0.34 0.24	0.15 0.05	10.43 4.74	0.43 0.18	1.50 0.53
JANV	ETR ΣW	- -	0.16 0.01	- -	0.022 0.0	0.003 0.011	0.34 0.80	0.012 0.034	0.25 0.002	2.70 1.31	0.67 0.34	0.10 0.02	3.02 2.17	- -	0.72 0.46
FEV	ETR ΣW	- -	- -	- -	- -	- -	0.002 0.00	0.001 0.001	- -	0.23 0.02	0.18 0.003	- -	- -	- -	0.01 0.46
MAR	ETR ΣW	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- 0.002	- -

Selon TURC

La méthode TURC définit l'évapotranspiration moyenne annuelle par la relation suivante in BROCHET & GERBIER (1968):

$$ET_{reell} = \frac{N}{\left[0,9 + \left(\frac{N}{I_t}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (47)$$

$ET_{re\ell}$ = évapotranspiration moyenne annuelle (mm)
 N = précipitations annuelles (mm)
 I_t = $300 + 25.t + 0,05.t^3$

Les valeurs obtenues par cette méthode de calcul, sont comparées à celles données par la méthode de ALBRECHT à la station de Dakar Yoff. Les résultats sont donnés sur le tableau ci-dessous:

Tableau 10: Evapotranspiration moyenne annuelle calculée d'après différentes méthodes à la station de Dakar Yoff pour la période 1984-1996

ANNEE	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	Moy.
METHODE														
$ET_{re\ell}$ (A)	233	460	389	402	324	511	240	267	189	324	221	392	438	338.2
$ET_{re\ell}$ (T)	246	505	399	451	371	561	283	281	190	370	251	485	451	373

$ET_{re\ell}$ (A): L'évapotranspiration réelle calculée d'après ALBRECHT.

$ET_{re\ell}$ (T): L'évapotranspiration réelle calculée d'après TURC.

Dans le SIG, l'évapotranspiration réelle donnée par la méthode de ALBRECHT n'est considérée qu'au niveau des sols à couvert végétal ou nus. Ainsi, sur les surfaces d'eau libre comme le lac Retba, Mbeubeuss, Mbawane, c'est la méthode de PENMAN qui est utilisée.

Selon PENMAN

Cette méthode est définie par l'équation in BROCHET & GERBIER (1968) ci-dessous:

$$E = \frac{1}{L} \cdot \frac{Rn \cdot \frac{F_T}{\gamma}}{1 + \frac{F_T}{\gamma}} + E_a \cdot \frac{1}{1 + \frac{F_T}{\gamma}} \quad (48)$$

E = Evaporation de PENMAN (mm/j)
 L = Chaleur latente d'évaporation = 59 cal/cm² pour 1mm d'eau équivalente
 Rn = Rayonnement net (J/cm².j)
 E_a = Pouvoir évaporant de l'air
 γ = Constante psychrométrique 0,65 mbar/K

Rn est donné par la formule de BRUNT

$$Rn = Iga(1-a)(0,18 + 0,62 \frac{h}{H}) - \sigma T^4 (0,56 - 0,08\sqrt{e})(0,10 + 0,90 \frac{h}{H}) \quad (49)$$

a	=	albédo de la surface évaporante
I _{ga}	=	Radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère (cal/cm ²)
h	=	Durée réelle d'insolation
H	=	Durée maximale possible d'insolation
T	=	(273.2+t) Température de l'air sous abri en Kelvin
t	=	Temperature moyenne de l'air en °C
σ	=	Constante de STEPHAN – BOLTZMAN : 1,19 10 ⁻⁷ cal/cm ² /jour/°K
e	=	Tension de la vapeur d'eau mesurée sous abri (mbar)
E _a	=	(e _w -e).φ(v)
e _w	=	Tension maximale de la vapeur d'eau pour la température T (mbar)
φ(v)	=	0,26 (1+0,4V)
V	=	Vitesse moyenne du vent mesurée à 10 m au dessus de la surface évaporante

e_w ; e : sont définis par les relations:

$$e_w = 6,1078 \cdot e^{\frac{17,08085 \cdot t}{234,175 + t}} \quad e = \frac{H \cdot e_w}{100} \quad (50)$$

H	=	Humidité relative de l'air
t	=	Température de l'air (°C)

Pour le calcul de l'évaporation au niveau du lac Retba, pour cause de salinité des eaux, la valeur e_w est multipliée par 0,98 et la valeur obtenue pour le lac Retba est 2,60 mm/j. Pour les Niayes et les lacs, on a une valeur de 3,28 mm/j.

3.1.2 Calcul de l'évapotranspiration potentielle

Selon THORNTHWAITE

Selon THORNTHWAITE in BROCHET & GERBIER (1968) l'évapotranspiration potentielle mensuelle est donnée la relation:

$$ET_{pot} = 1,6 \frac{(10t)^a}{I} \cdot F(\lambda) \quad (51)$$

t	=	moyenne mensuelle de la température (°C)
a	=	fonction de l'Indice I
F(λ)	=	terme correctif fonction de la durée théorique d'insolation.

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49 \quad (52)$$

$$I = \sum_1^{12} i \quad i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

Selon SCHENDEL

Selon SCHENDEL in HÖLTING (1989) l'évapotranspiration potentielle mensuelle est donnée par la relation:

$$ET_{pot} = \frac{T}{H} \cdot 480 \quad (53)$$

T = moyenne mensuelle de la température
H = moyenne mensuelle de l'humidité relative

Les résultats de l'évapotranspiration potentielle calculée par ces deux méthodes pour la station de Dakar-Yoff sont présentés au tableau 11.

Tableau 11: Evapotranspiration moyenne annuelle calculée d'après différentes méthodes à la station de Dakar-Yoff pour la période 1984-1996

ANNEE	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	Moy.
METHODE														
ET _{pot} (TH)	2519	2384	2210	2613	2886	2929	2906	2481	2381	2490	2474	2585	2568	2228.6
ET _{pot} (SC)	1862	1806	1813	1902	2085	2090	2095	1828	1827	1895	1878	1993	1910	1930.4

ET_{pot} (TH): L'évapotranspiration potentielle calculée d'après THORTHNWAITE

ET_{pot} (SCH): L'évapotranspiration potentielle calculée d'après SCHENDEL

3.1.3 Estimation du bilan hydrique

Les valeurs d'évapotranspiration réelle calculées ont permis d'estimer à partir de la précipitation donnée dans les différentes stations considérées la recharge de la nappe. Les résultats obtenus dans les stations climatiques de Dakar-Yoff, Hann, Pikine, Mbao, Mbambilor, Kayar sont donnés dans les tableaux et diagrammes ci-dessous:

Fig 67: Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après ALBRECHT et de la recharge à la station de DAKAR-YOFF (1984-1996)

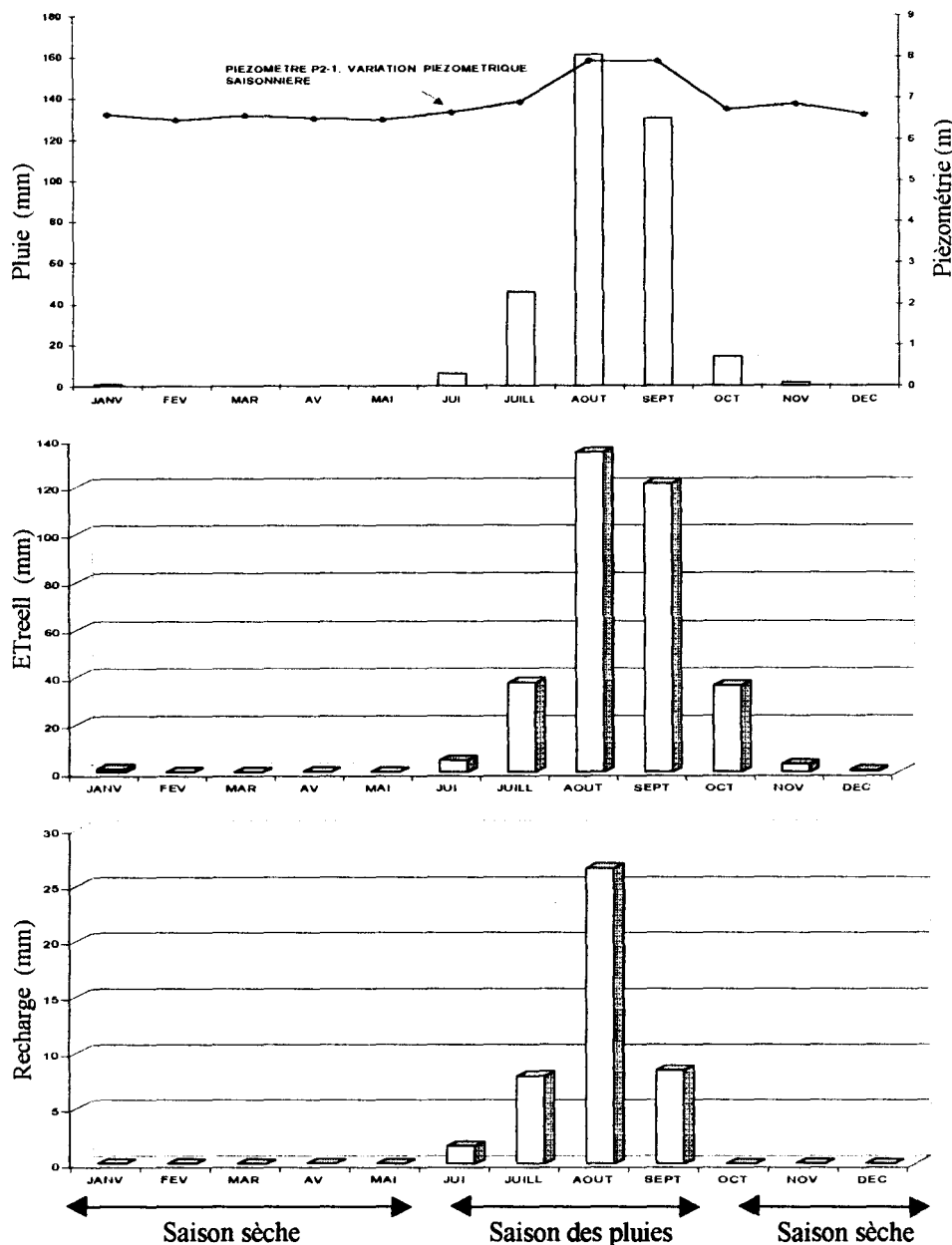


Tableau 12: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de DAKAR-YOFF (1984-1996)

METH	JANV	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOU	SEPT	OCT	NOV	DEC	Som.
N(mm)	1.23	0.03	0.0	0.0	0.10	6.09	45.44	160.8	130.3	14.23	1.58	0.13	360.03
ETreell (A)	1.29	0.0	0.0	0.0	0.07	5.02	37.54	134.3	121.1	36.20	3.22	0.65	338.21
$\sum W$ (mm)	0.46	0.48	0.02	0.00	0.05	1.56	79.96	89.49	30.89	12.89	0.56	0.53	216.89
Rech. (mm)					0.03	1.59	7.90	26.50	10.40	-	-	-	46.67

Fig.68 Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après ALBRECHT et de la recharge à la station de MBAO (1984-1996)

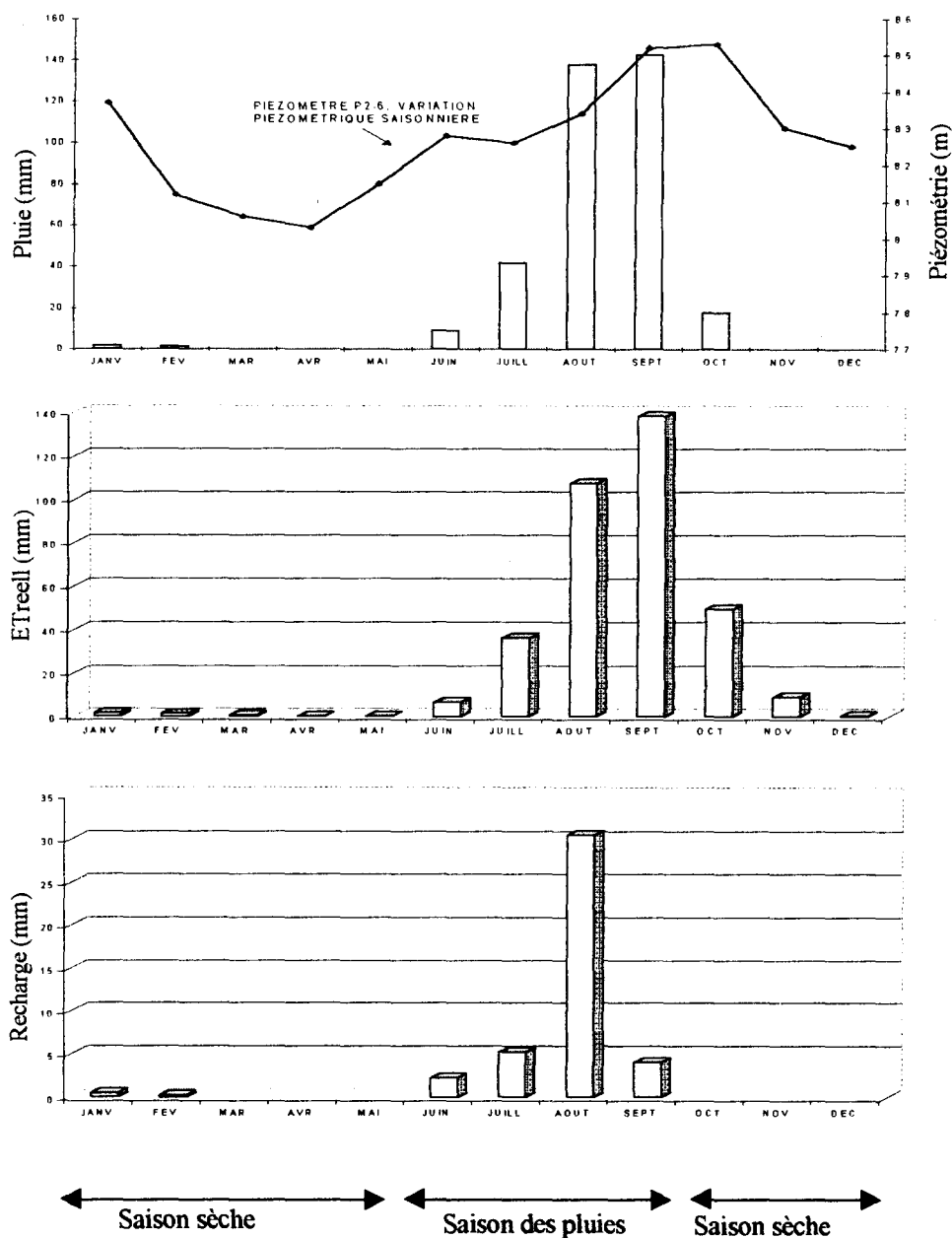


Tableau 13: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de MBAO (1984-1996)

METH	JANV	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOU	SEPT	OCT	NOV	DEC	Somme
Etpot (THOR)	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)	1.75	1.46	0.0	0.0	0.0	8.96	41.5	137.6	142.3	17.6	0.0	0.0	351.39
Etreell (A)	1.3	1.22	0.48	0	0	6.73	36.31	107.2	138.4	49.6	9.1	0.18	351.07
w_r (mm)	0.45	0.70	0.10	0.0	0.0	1.2	6.39	36.27	40.26	9.4	0.26	0.08	195.11
Rech. (mm)	0.45	0.24	0.0	0.0	0.0	2.23	5.19	30.48	4	0.0	0.0	0.0	42.59

Fig.69: Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après ALBRECHT et de la recharge à la station de PIKINE (1984-1996)

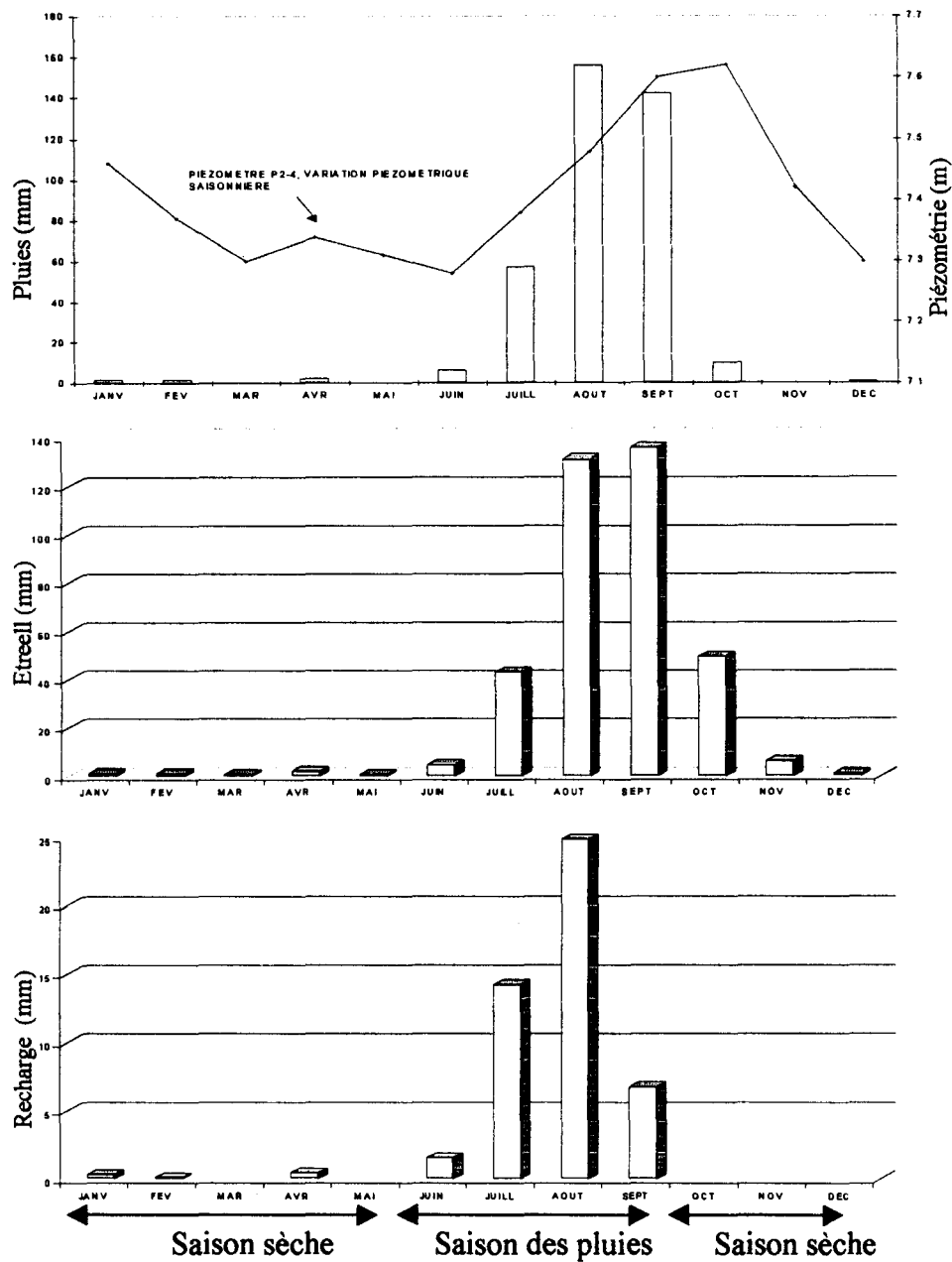


Tableau 14: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de PIKINE (1984-1996)

METH	JANV	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOU	SEPT	OCT	NOV	DEC	Somme
Etpot (THOR)	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	0.0	6.2	57.12	155.8	152.3	9.85	0.02	0.45	377.85
Etreel (A)	1.18	1.22	0.56	1.79	0.58	4.66	42.9	130.9	135.5	49.32	6.11	0.81	375.6
\bar{r} (mm)	0.61	0.72	0.25	0.10	0.0	0.5	14.61	59.50	66.23	16.76	0.67	0.31	195.25
Rech. (mm)	0.3	0.11		0.42		1.56	14.22	24.89	6.73				49.57

Fig. 70: Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après ALBRECHT et de la recharge à la station de HANN (1984-1996)

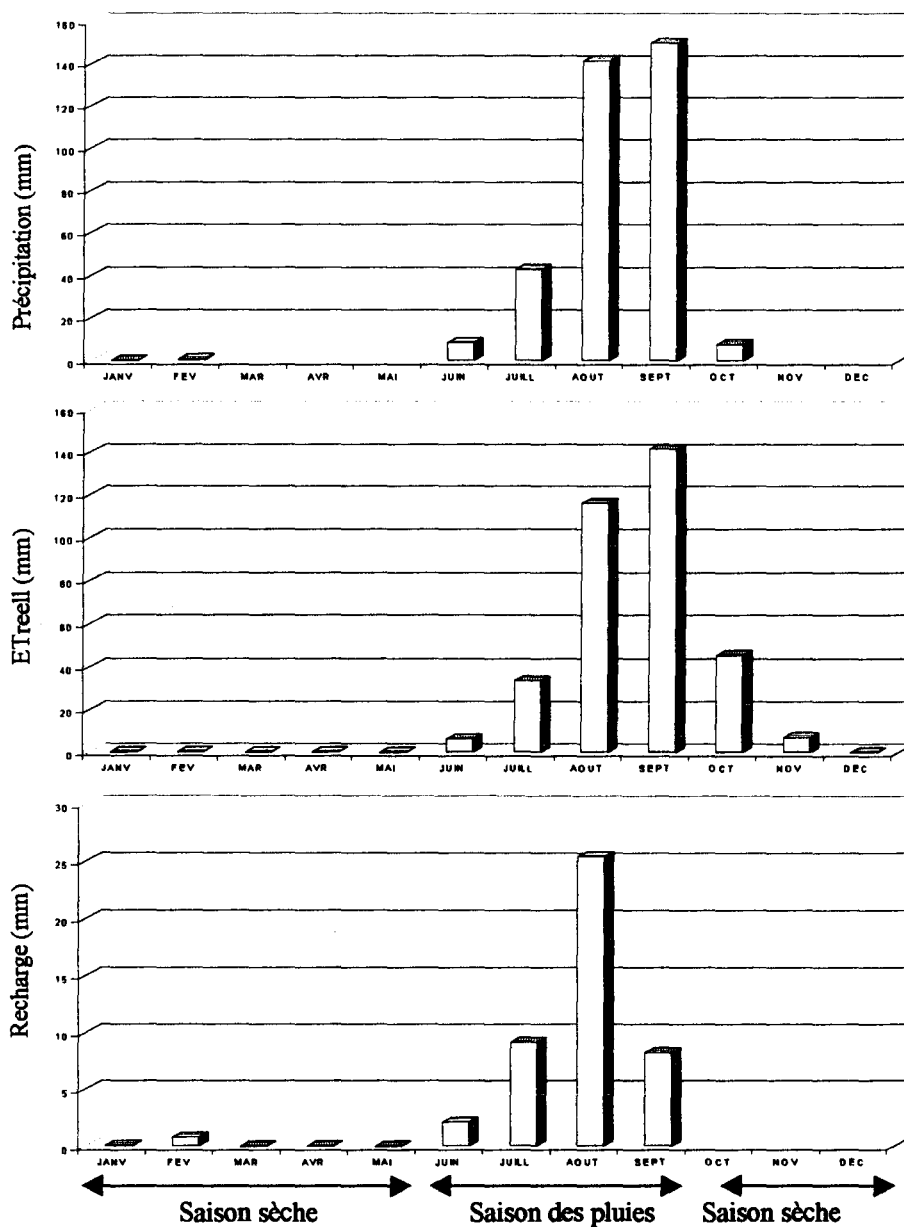


Tableau 15: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de HANN (1984-1996)

METH.	JANV	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOU	SEPT	OCT	NOV	DEC	Som.
Etpot (THOR)	161.1	154.4	191.5	198.6	230.5	222.1	213.7	205.9	206.3	210.9	235.3	198.3	2228.6
N(mm)	0.21	0.8	0.00	0.0	0.0	8.56	42.89	141.4	149.8	7.91	0.0	0.0	351.65
ETreell (A)	0.077	0.0	0.0	0.0	0.0	6.43	33.76	116.4	141.5	45.56	7.21	0.36	351.02
$\sum W$ (mm)	0.002	0.0	0.0	0.0	0.0	2.13	11.26	76.71	84.95	7.30	0.5	0.14	183.19
Rech. (mm)	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.13	9.13	25.00	8.34	0.0	0.0	0.0	44.76

Fig.71: Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après ALBRECHT et de la recharge à la station de BAMBILOR (1984-1996)

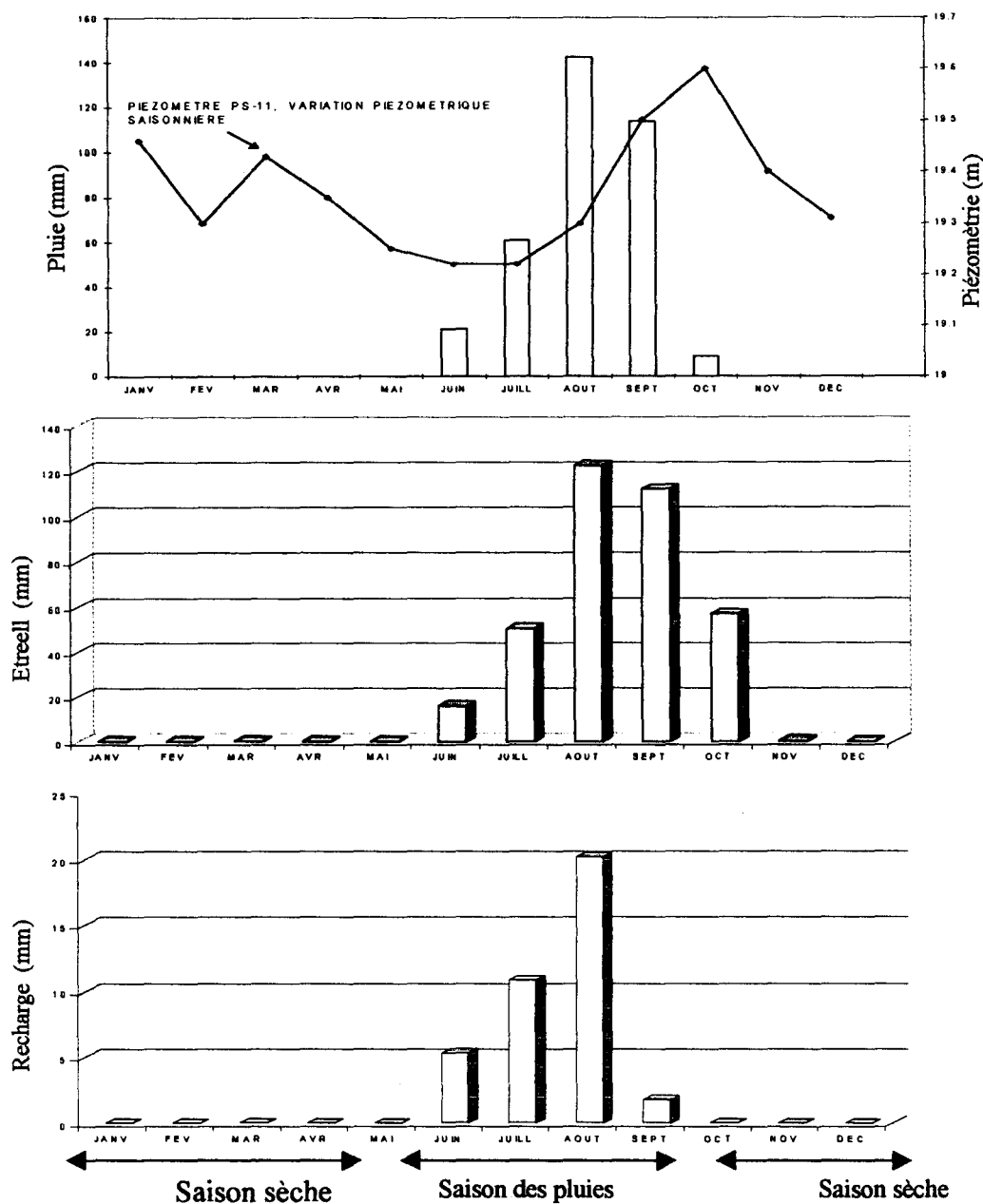


Tableau 16: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de BAMBILOR (1984-1996)

METH	JANV	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOÛ	SEPT	OCT	NOV	DEC	Somme
Etpot (THOR)	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	0.0	0.0	0.0	21.2	61.03	142.4	113.5	8.75	0.0	0.0	346.88
Etreel (A)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.91	50.22	122.2	111.7	56.5	0.23	0.0	356.84
$\sum W$ (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.29	24.1	93.59	80.02	0.0	0.0	0.0	206.67
Rech. (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.29	10.81	20.16	1.76	0.0	0.0	0.0	38.02

Fig. 72: Moyenne mensuelle de la précipitation, de la piézométrie, de l'évapotranspiration réelle d'après ALBRECHT et de la recharge à la station de KAYAR (1984-1996)

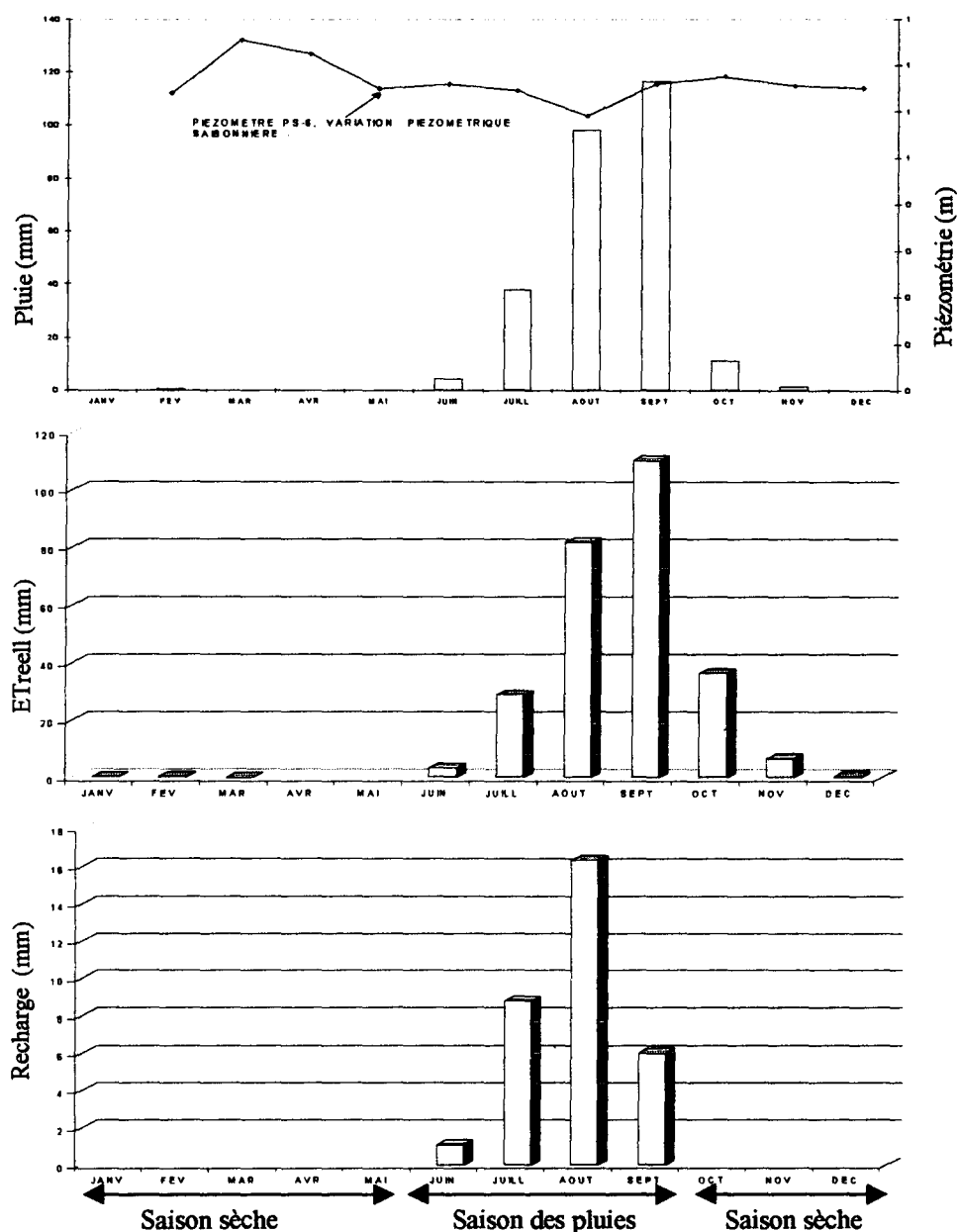


Tableau 17: Estimation des termes du bilan de la nappe à la station de KAYAR (1984-1996)

METH.	JANV	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUILL	AOU	SEPT	OCT	NOV	DEC	Somme
Etpot (THOR)	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	0.6	0.0	0.0	0.0	4.45	37.66	98.1	116.4	11.32	1.55	0.0	270.03
E _{Treel} (A)	0.14	0.4	0.01	0.0	0.0	3.34	28.88	81.75	110.3	36.4	6.7	0.67	268.62
Rech. (mm)	0.0	0.02	0.0	0.0	0.0	1.01	19.79	76.14	82.16	6.04	0.93	0.26	188.45
Rech. (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.11	8.78	16.35	6.02	0.0	0.0	0.0	32.26

3.2 Spatialisation des valeurs de recharge dans le SIG

L'utilisation du système d'information géographique a permis une régionalisation des valeurs de recharge sur l'ensemble du domaine d'étude. Les résultats sont donnés sous forme de carte (Fig. 73) et les valeurs seront introduites comme donnée d'entrée du modèle hydrodynamique. La répartition spatiale des valeurs de recharge s'est effectuée en fonction de la localisation des stations météorologiques et de leur domaine d'influence. La recharge est estimée en fonction des précipitations enregistrées et de l'évapotranspiration donnée selon la méthode de ALBRECHT. Elle montre un gradient d'infiltration qui diminue de Pikine (50 mm/an) à Kayar (32 mm/an). La recharge moyenne de 39 mm/an est une valeur moyenne donnée sur les stations de Mbao, Bambilor et Kayar qui sont à cheval sur cette zone.

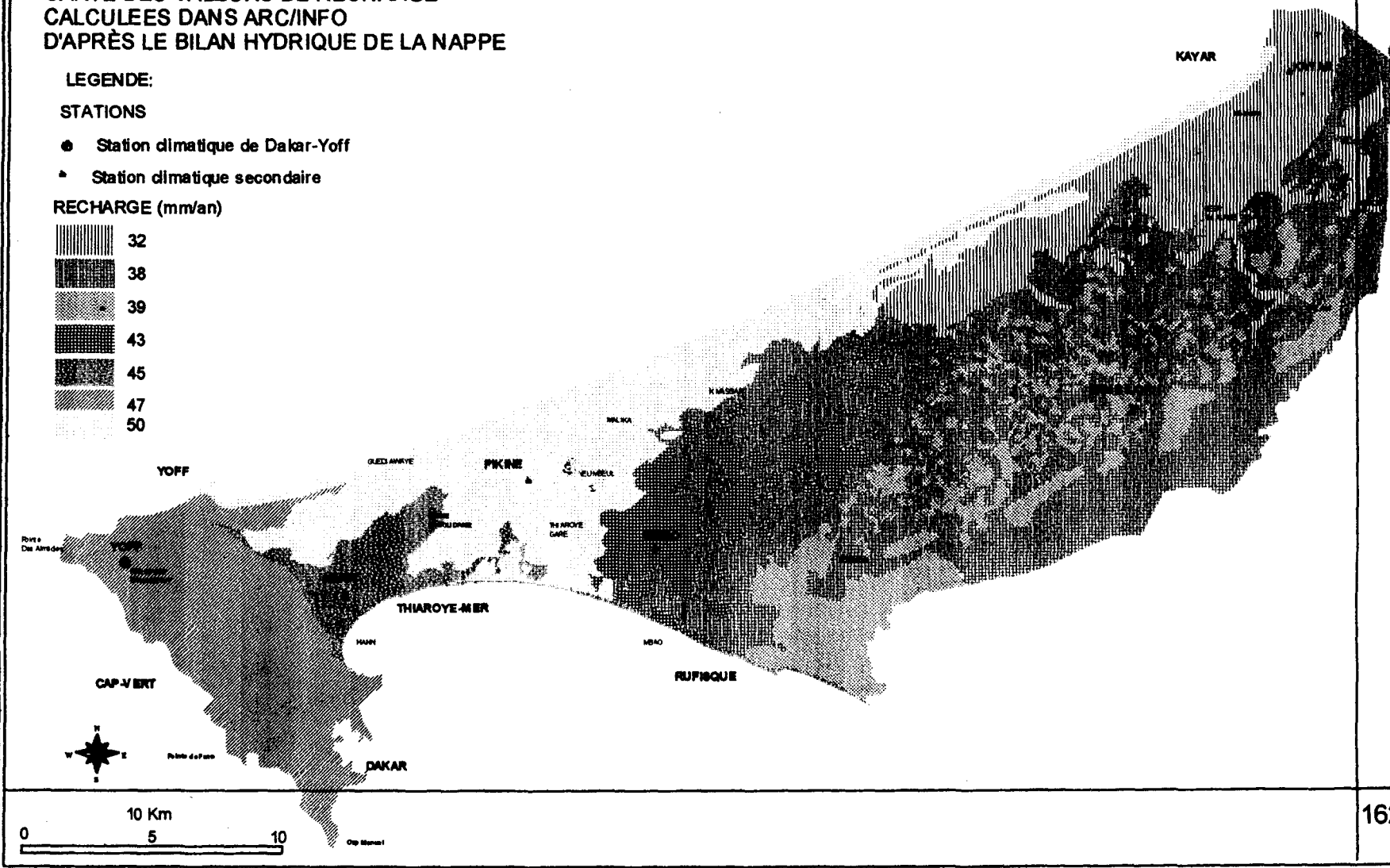
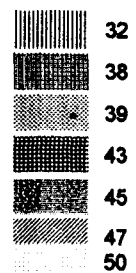
FIG.73:
CARTE DES VALEURS DE RECHARGE
CALCULEES DANS ARC/INFO
D'APRES LE BILAN HYDRIQUE DE LA NAPPE

LEGENDE:

STATIONS

- Station climatique de Dakar-Yoff
- ▲ Station climatique secondaire

RECHARGE (mm/an)



3.3 Conclusions sur les paramètres du bilan

L'analyse de l'évolution des niveaux piézométriques en rapport avec les précipitations dans les différentes stations, montre des variations saisonnières de la piézométrie.

La remontée de la nappe pendant la période hivernale (juillet à octobre) permet de conclure à une alimentation directe par les eaux de pluie, après une reprise évaporatoire et stockage au niveau des sols. Les réserves utiles du sol données par la méthode de ALBRECHT sont maximales (Tableaux 7 à 12) durant cette période. Ainsi au niveau des zones dunaires et les zones de cultures définies dans le SIG, l'évapotranspiration n'est considérée que pendant les trois mois d'hivernage. Cependant dans les zones de Niayes et lacs qui sont des surfaces d'eau libre l'évapotranspiration est appliquée durant toute l'année.

Le tableau 6 présente l'ET réelle obtenue à partir de deux méthodes différentes, à savoir la méthode de ALBRECHT et celle de TURC. L'ET réelle calculée par la méthode de TURC est plus importante. Cependant les valeurs obtenues par la méthode de ALBRECHT sont proches de celles de TURC, méthode qui est souvent utilisée dans la zone étudiée. On peut conclure que cette méthode développée par ALBRECHT (1951) pour le calcul de l'ETreell, et testée dans différentes conditions climatiques peut être appliquée dans le contexte d'un climat semi-aride. Mais il faut tenir compte que dans nos calculs l'évapotranspiration potentielle définie par ALBRECHT n'a pas été considérée.

La carte de la recharge moyenne donnée sur une période de 13 ans (1984-1996) (Fig.28), ne donne pas une grande variation dans les valeurs estimées, qui varient de 32 à 50 mm/an. La recharge déterminée en fonction de la précipitation est maximale dans la zone de Pikine, alors qu'elle diminue en allant vers Kayar dans le Nord-Est.

4. CARTE DE TYPOLOGIE DES SOLS

Les types de sols définis dans la presqu'île du Cap-Vert ont été générés dans le SIG sur la base des données de l'USAID/RSI (1986). Les résultats obtenus sont consignés à la figure 74. On note que les sols sont essentiellement sableux avec des formations sableuses littorales, formées des sols des cordons, terrasses, vallées et dunes du littoral. On distingue:

4.1 Les sols ferrugineux tropicaux

Ce sont des sols faiblement lessivés, localisés dans la zone d'agglomération de Thiaroye, de la Patte d'Oie jusqu'à Boun et dans le secteur Nord-Est du système à Mbayakh, Beer Thialane, Golam et Diender. Ces sols sont sableux à grains de quartz entourés d'une pellicule d'oxyde de fer ce qui leur confère généralement une coloration rouge. La texture des sols montre un faible taux d'argile inférieur à 3%.

4.2 Les sols des zones interdunaires

Ils recouvrent près des 2/3 de la zone d'étude. Nous avons différencié dans ces types de sols:

- Les Niayes dans la zone de Pikine, et au niveau de Mbawane. Ces sols de

couleur noirâtre sont riches, formés d'humus et d'accumulation de substances minérales. Ce qui explique le voisinage des zones de maraîchage dans ces zones. Leur texture montre des taux d'argile proches de 8% à 10%.

- Les ergs récents de Keur Massar, Sangalkam et Bambilor qui sont des formations argilo-sableuses sans végétation dites également "Tan". Ces sols sont formés de sables vaseux et présentent des taux d'argile très variables qui peuvent atteindre jusqu'à 25%.

4.3 Les dunes littorales

On distingue:

- Les dunes littorales vives et la plage actuelle, qui s'étirent de Yoff à Kayar. Ce sont des sols minéraux formés de quartz et coquilles calcaires. Ces formations présentent une texture essentiellement sableuse avec des sables quartzeux fins.
- Les dunes jaunes relativement fixées sont retrouvées dans le Nord Est de la zone d'étude et sont également de texture sableuse.
- Les dépôts lagunaires qui sont des sols halomorphes localisés dans la zone du lac Retba et Malika.

4.4 Les sols sur matériaux argileux

Ces sols sont localisés dans le secteur sud-est de la nappe. Ils sont de nature très différente. On distingue les sols hydromorphes vertiques, les sols meubles argilo-sableux ou sable limoneux et les sols à mull calcique moins argileux.

Les types de sols décrits dans la zone d'étude reflètent l'histoire géomorphologique et climatique de la presqu'île du Cap-Vert. La texture donne des sols essentiellement sableux avec de faibles taux d'argile.

5. CARTOGRAPHIE THEMATIQUE DES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES









L'étude hydrogéologique de la nappe des sables Quaternaires de Thiaroye, élaborée dans la deuxième partie de ce travail a permis une caractérisation du système aquifère. Les données acquises relatives à l'hydrodynamisme de la nappe, la profondeur des eaux par rapport au sol, l'extension de la pollution par les nitrates, et les paramètres hydrodynamiques ont été intégrées dans le SIG. La cartographie thématique de ces données combinées à celle des données géographiques a permis de générer certains paramètres d'entrée du modèle hydrodynamique et l'analyse dans le SIG de la vulnérabilité de la nappe de Thiaroye à la contamination par les nitrates.

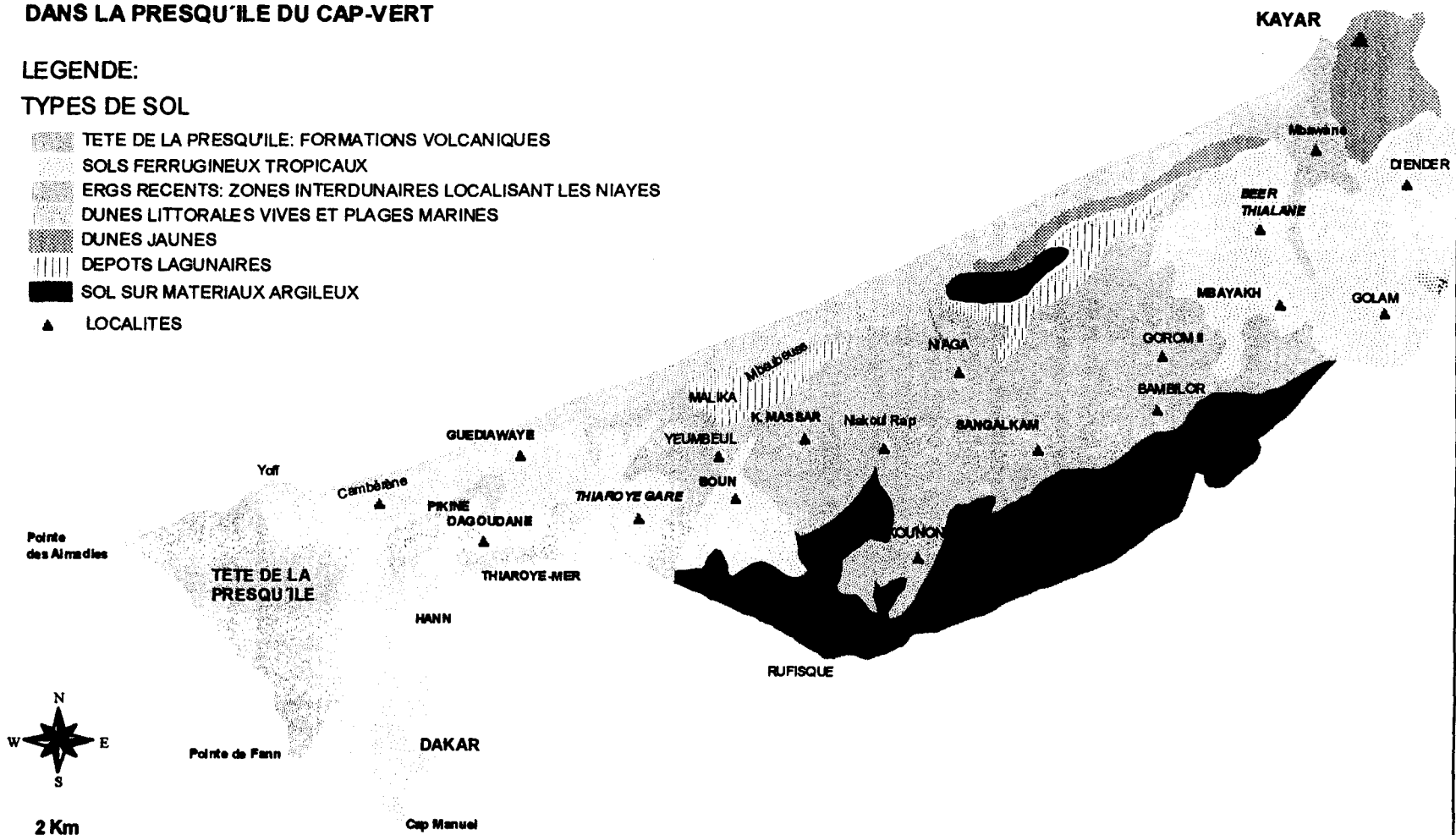
5.1 Carte piézométrique

La carte piézométrique qui représente l'état stationnaire de la nappe en 1997 (Fig.40) a été intégrée comme donnée d'entrée pour le calage du modèle et pour l'étude de la vulnérabilité.

FIG. 74:
CARTE DE TYPOLOGIE DES SOLS
DANS LA PRESQU'ILE DU CAP-VERT

LEGENDE:
TYPES DE SOL

-  TETE DE LA PRESQU'ILE: FORMATIONS VOLCANIQUES
-  SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX
-  ERGS RECENTS: ZONES INTERDUNAIRES LOCALISANT LES NIAYES
-  DUNES LITTORALES VIVES ET PLAGES MARINES
-  DUNES JAUNES
-  DEPOTS LAGUNAIRES
-  SOL SUR MATERIAUX ARGILEUX
-  LOCALITES



5.2 Carte de profondeur des eaux par rapport au sol

La carte de profondeur de la nappe phréatique (Fig.42) est considérée comme donnée d'entrée dans le SIG pour la détermination de la vulnérabilité de la nappe à la contamination par les nitrates.

5.3 Carte d'extension de la pollution

L'étude hydrochimique et de la pollution des eaux sur la nappe de Thiaroye a permis une réactualisation du niveau de contamination de la nappe par les nitrates. La carte de zonation des valeurs de nitrates obtenues sur la nappe en octobre 1997 (Fig.61) a été intégrée dans le SIG dans l'étude de vulnérabilité des eaux à la contamination par les nitrates.

5.4 Carte de perméabilité

Les valeurs ponctuelles de perméabilité de la nappe obtenues par pompages d'essai effectués dans le cadre de cette étude et dans les études antérieures ont été introduites comme données d'entrée du modèle hydrodynamique. Ces valeurs ponctuelles régionalisées dans le programme SURFER et introduites dans le PM 3 sous forme de tableau numérique seront fortement ajustées lors des différentes phases de calage du modèle. Les résultats obtenues seront introduites dans le SIG pour l'étude de la vulnérabilité de la nappe.

II. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DU SYSTEME AQUIFERE DES SABLES QUATERNAIRES DE THIAROYE

1. GENERALITES

Un modèle hydrogéologique, est donné comme une représentation conceptuelle d'un système comportant simultanément:

- une représentation de la structure (géométrie, constitution, propriétés);
- une représentation de son comportement hydrodynamique et hydrochimique.

Il repose sur une phase fondamentale dite de caractérisation qui permet une reconnaissance détaillée du système en vue d'aboutir à un modèle susceptible de représenter au mieux ces comportements les plus caractéristiques. La caractérisation consiste à rassembler le maximum de données de source et nature très différentes nécessitant des études hydrogéologiques et géologiques (WOHNLICH & al., 1995).

Les données fondamentales recueillies pour la définition du modèle hydrogéologique sont résumés au tableau ci-dessous (BONNET, 1982):

Tableau 18: Données pour la caractérisation et la construction d'un modèle

DONNEES	Structure	Paramètres structuraux	Typologie du système	Condi-tions aux limites	Etat et his-torique
Topographie (Relief, végétation)	B			B	
Hydrographie	C			C	
Géologie	Cartographie		A	B	
	Sondages	B	A	B	
	Géophysique	B	A	A	
Hydrodynamique	Pompage d'essai		C	B	
	Piézométrie (carte)		A	C	C
	Piézométrie (limni-gramme)		B	A	C
Hydrochimie	Qualité des eaux	C		C	C
Climatologie (Précipitations, évapo-ration)				C	
Hydrologie (rivière, source)	Limnimétrie (niveaux)			C	
	Hydrométrie (débits)			B	C
Données de Projets	Prélèvements Q		A	C	
	Infiltrations		A	A	C
	Modification conditions aux limites		A	B	C

A: Utile B: Très utile C: Indispensable

La recherche et la collecte de données est la première étape de l'élaboration du modèle et elle est orientée selon les objectifs définis. L'étape secondaire consisterait à voir la fiabilité des informations ainsi définies, et leur cohérence dans le système. La qualité des données recueillies dépend surtout de leur distribution spatiale, des méthodes de traitement utilisées, des erreurs dans la collecte ou de leur accessibilité.

2. DEFINITION DU MODELE CONCEPTUEL

2.1 Caractérisation du système

Pour résoudre l'équation d'écoulement qui régit les écoulements souterrains, on procède d'abord à une caractérisation du domaine qui consiste à définir les paramètres suivants:

- la géométrie du système: Altitude du toit, mur de l'aquifère donnée par la géologie et épaisseur de l'aquifère.
- les paramètres hydrodynamiques: perméabilité, porosité, coefficient d'emmagasinement et transmissivité.
- les échanges avec l'extérieur: Les débits de pompages et Pertes par les limites.
- un état de référence: étude de la piézométrie régionale.
- les conditions aux limites:

L'élaboration d'un modèle d'écoulement, nécessite la définition des limites du domaine. On distingue:

- Les limites à potentiel imposé:

Elles correspondent aux limites de premier ordre, ou la conditions de **DIRICHLET**.

Ce sont des limites perméables par lesquelles le système reçoit ou émet un débit permettant de maintenir la charge constante au niveau de la limite. Les limites de 1^{er} ordre les plus caractéristiques sont définies par des limites de rencontre entre un domaine aquifère souterrain et un milieu aquatique comme la mer, lac ou rivière où les charges piézométriques sont relativement constantes dans le temps.

- Les limites à flux imposé:

Elles sont les limites de deuxième ordre ou conditions de **NEUMANN**. On distingue:

1) Les limites à flux imposé non nul: Dans ces conditions, un débit déterminé est susceptible de traverser la limite. Ces limites sont plus difficiles à définir, elles peuvent correspondre à un potentiel variable. Ce flux entrant et ou sortant est surtout proportionnel à la différence de charges entre le système et le milieu extérieur (McDONALD & HARBAUGH, 1988).

2) Les limites à flux nul: C'est le cas d'une limite étanche, l'imperméabilité ne permet pas d'échanges avec le milieu extérieur.

- Les limites mixtes de potentiel et de flux

Ce sont les limites de troisième ordre ou conditions de **CAUCHY** ou **DE FOURIER**

Les limites mixtes de potentiel et de flux se produisent lorsque le potentiel et ses dérivés normales sont simultanément décrites sur la limite.

2.2.3 Le modèle conceptuel

Suite aux données relatives à la géométrie du réservoir, aux charges hydrauliques, aux paramètres hydrodynamiques et aux conditions aux limites, le système aquifère de Thiaroye est simulé en nappe libre, monocouche à écoulement bidimensionnel. Les simulations sont définies en régime permanent (1971) et en régime transitoire (1971 à 1997). L'équation d'écoulement est résolue par la méthode numérique des différences finies. L'équation est donnée pour un écoulement horizontal en nappe libre:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k_x \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k_y \frac{\delta h}{\delta y} \right) \pm Q = S(x, y) \frac{\delta h}{\delta t} \quad (54)$$

2.2.4 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont données par la piézométrie régionale et la structure du réservoir. Elles sont ainsi définies:

- 1) Limites à flux nul:
 - Au Sud-Est de la nappe correspondant au soulèvement du substratum marneux.
 - A l'Est du lac Mbawane et à l'Ouest de Thiaroye ces limites correspondent à des limites hydrogéologiques au niveau des dômes piézométriques stables.
- 2) Limites à potentiel zéro imposé: Cette limite est définie sur toutes les mailles bordant la ligne océanique.

2.3 Discrétisation

La zone d'étude s'étend sur une superficie d'environ 300 km². Pour la discrétisation, le domaine a été découpé suivant un maillage irrégulier. On a essayé de définir le maximum de mailles à l'intérieur du système, pour avoir un modèle représentatif et avec plus de précision sur les écoulements. La discrétisation est effectuée selon des mailles carrées de 1 km de côté sur presque la totalité du réservoir et des mailles rectangulaires de 1000 sur 500 m de côté au niveau du col de la presqu'île du Cap-Vert. Le réseau comporte 474 mailles actives dont 120 définissent les limites du système. La discrétisation et les conditions aux limites sont illustrées sur la figure 75.

Les données acquises aussi bien sur le terrain que sur les travaux antérieurs ont permis de générer tous les paramètres d'entrée du modèle.

3 LES PARAMETRES D'ENTREE

3.1 Géométrie de l'aquifère

La côte du mur de l'aquifère n'a pas fait l'objet d'une étude géostatistique. Les valeurs d'altitude du substratum marneux introduites sont données d'après la carte de la figure 22 (Hébrard, 1966). On observe des variations de côtes, partant de +10 m au sud-est où affleure le

○ Détermination du régime d'écoulement. On distingue:

- Le régime permanent:

C'est une période pendant laquelle les oscillations piézométriques sont négligeables.

- Le régime transitoire:

Durant cette période, on note des variations piézométriques sensibles.

2.2 Modèle conceptuel et conditions aux limites

La caractérisation du système aquifère développée dans l'étude hydrogéologique a permis de définir une base de données pour la conception de ce modèle hydrodynamique. Nous résumons ci-dessous les points essentiels pour la conceptualisation du modèle.

2.2.1 Géologie et hydrogéologie

Les principales unités stratigraphiques du système aquifère de Thiaroye sont les suivantes:

- Les sables aquifères sont formés de dépôts appartenant au Quaternaire ancien sableux et surtout au Quaternaire récent.
- Les formations quaternaires reposent sur un substratum marneux datant de l'éocène, qui affleure au Sud-Est à partir de Mbao.
- De rares formations argileuses maintiennent par endroit la nappe semi-captive, d'où des variations considérables des valeurs de perméabilités d'un point à l'autre.

2.2.2 Piézométrie

L'étude de la variabilité temporelle de la piézométrie a permis d'évaluer l'évolution du niveau de la nappe dans le temps. L'analyse des courbes de variations interannuelles de la piézométrie données sur les figures 27 et 28 montre sur les années hydrologiques considérées, une baisse du niveau de la nappe de 1975 à 1984, une remontée de 1985 à 1989, puis une piézométrie relativement stable depuis 1989. Le choix des régimes pour la simulation des écoulements dans le système aquifère est basé sur cette variation piézométrique observée dans différents secteurs de la nappe.

Les cartes piézométriques établies en février 1971 (GEOHYDRAULIQUE, 1972) et celle moyenne de 1997 ont servi d'état de référence pour les simulations. L'allure piézométrique donnée dans les deux cas, montre que les écoulements s'effectuent du Sud-Est vers le Nord-Ouest, c'est à dire vers l'océan qui constitue l'exutoire naturel du réservoir.

La piézométrie régionale de la nappe donnée sur les cartes (Fig. 38, 39 et 40) a permis de définir les conditions aux limites, notamment au Sud-Ouest et au Nord-Est du système. La présence de dômes piézométriques stables à l'Ouest du bassin de Thiaroye (P2-2) et au Nord-Est du lac Mbawane a permis d'isoler le système hydraulique de Thiaroye des deux systèmes définis par la nappe infrabasaltique contenu dans la tête de la Presqu'île et la nappe des sables quaternaires du littoral nord.

La remontée du substratum marneux au Nord-Est marque également cette rupture.

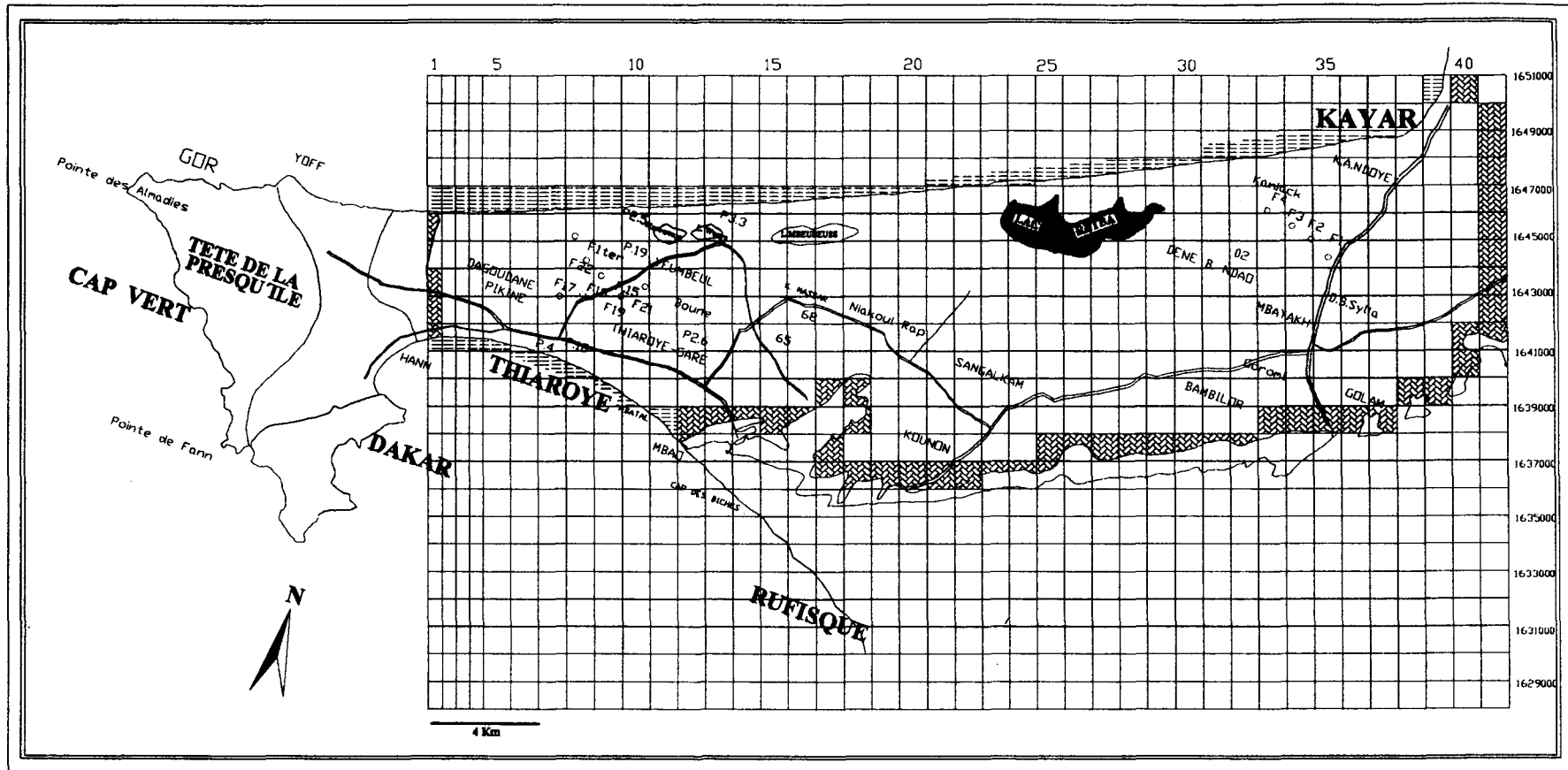




Fig.75: Maillage et conditions aux limites de la zone du modèle

LEGENDE:

 Maille à potentiel zéro imposé

 Maille à flux nul

 Forages d'exploitation

substratum à -70 m le long de la côte nord et -90 m au niveau de la Patte d'Oie à l'Ouest et au Nord dans le secteur de Kayar.

3.2 Les conditions aux limites

Les conditions aux limites sont représentées au Sud-Est, à l'Ouest et au Nord-Est de l'aquifère par un potentiel à flux nul. Sur toutes les mailles définies sur la ligne océanique, on a un potentiel zéro imposé.

3.3 Les coefficients de perméabilité

Les perméabilités initiales introduites correspondent aux valeurs déterminées par essai de pompage dans le cadre de cette étude et à des valeurs tirées de la littérature (GEOHYDRAULIQUE, 1972). Ainsi on a pu définir sur le système aquifère 25 valeurs de K dans différents secteurs.

Etude géostatistique des valeurs de perméabilité

Le traitement géostatistique de ces quelques valeurs de perméabilité a permis d'étudier leur distribution sur l'ensemble de l'aquifère. L'histogramme établi par la transformation logarithmique des valeurs de K mesurées est donné à la figure 76.

La transformation logarithmique des données de type $y_i = \ln(x_i)$ ou $y_i = \ln(x_i + \beta)$ avec x_i qui représente la valeur de perméabilité et β qui est une constante (AKIN & SIEMES, 1988), donne une meilleure structuration des valeurs sur le domaine d'étude.

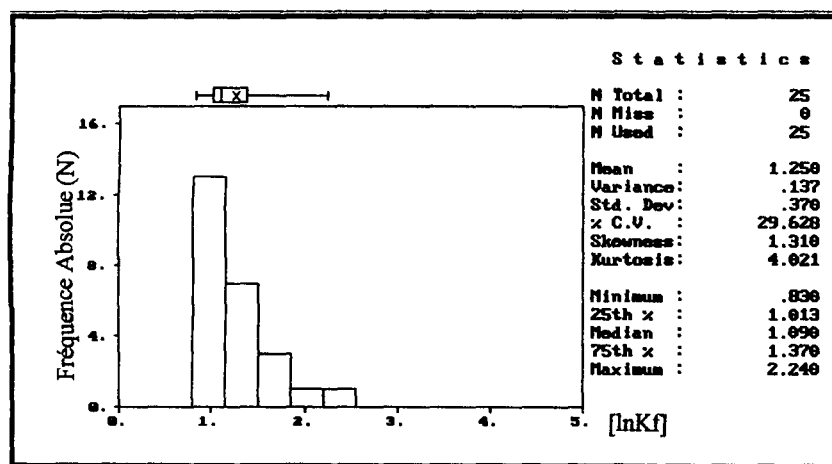


Fig.76: Histogramme des valeurs logarithmiques des K

La distribution normale correspondante peut être calculée à partir de la moyenne y et de la variance s^2 . L'analyse du variogramme (Fig.77) obtenu à partir des valeurs de K mesurées sur le terrain selon une orientation de 0° ($\Delta\Psi \pm 30^\circ$) montre une irrégularité dans leur distribution spatiale.

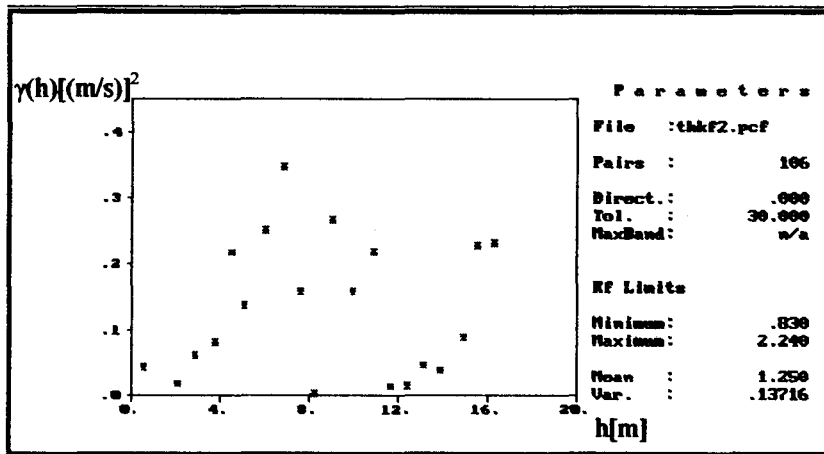


Fig.77: Variogramme expérimental des valeurs de K mesurées sur le terrain suivant l'orientation 0° ($\Delta\Psi \pm 30^\circ$)

Les variogrammes obtenus sur les valeurs de perméabilité mesurées sur le terrain montre une irrégularité dans leur distribution spatiale. Ce qui peut s'expliquer par l'hétérogénéité du terrain avec la présence de faciès argileux maintenant par endroit la nappe semi-captive. Les valeurs de K peuvent varier de l'ordre 0,5 à $12 \cdot 10^{-4}$ m/s. D'après ces observations les perméabilités initiales introduites ne sont pas données sur une carte d'isovaleurs, mais sont représentées sur la figure 78 par les valeurs ponctuelles obtenues dans les pompes d'essai.

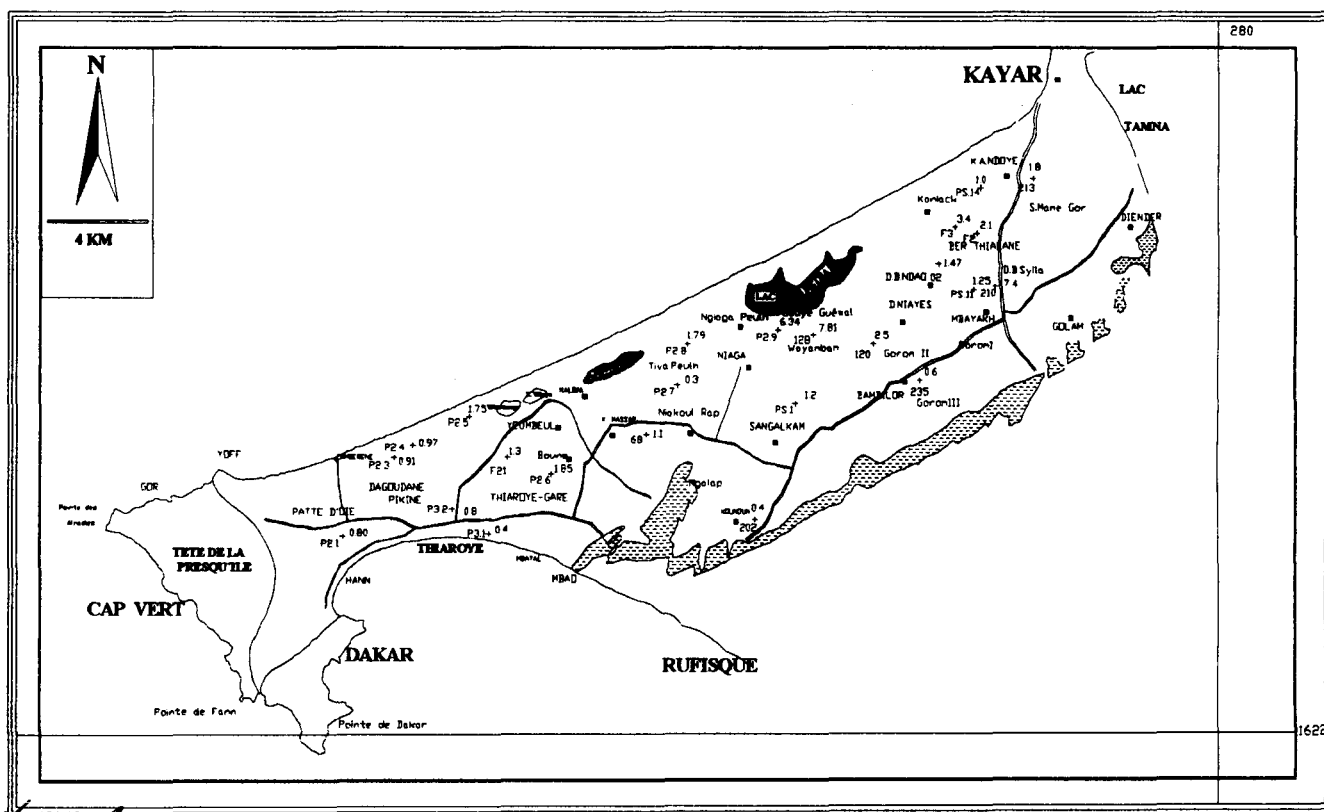


Fig. 78: Distribution des valeurs de perméabilité mesurées sur l'aquifère

- LEGENDE
- \bullet 0,90 Points de mesure et la valeur de Kf (10^{-4} m/s)
 - \bullet P21
 - Route
 - Localités
 - ▨ Limite sud de l'affleurement des nappes

Lors des phases de calage, ces valeurs de perméabilité initialement introduites seront ajustées jusqu'à ce que les isopièzes calculées soient proches de celles tracées à partir des mesures faites sur le terrain.

3.4 La piézométrie

Les charges piézométriques obtenues sur la nappe en février 1971 (Fig.11) sont introduites comme état initial pour le calage en régime permanent et celles de 1997 (Fig.40) sont considérées comme état de référence dans la simulation de l'évolution de la nappe de 1971 à 1997.

3.5 La recharge

La recharge est le paramètre qui présente le plus d'incertitude comparé aux autres données d'entrée du modèle. La valeur de recharge calculée à partir du bilan de TURC sur une période de 30 ans (BRGM-GEOHYDRAULIQUE, 1986) est de 85 mm/an. Durant le calage, cette valeur initiale introduite a été corrigée jusqu'à ce que les isopièzes calculées soient le plus proches possible de celles données par les mesures sur le terrain. Cette valeur a été distribuée sur l'ensemble des mailles du système comme donnée d'entrée.

Les valeurs de recharge obtenues dans le calcul du bilan hydrique (1984-1997) et spatialisées sur la nappe avec l'application du SIG ont été introduites comme données d'entrée dans le calage en régime transitoire.

4. CALAGE EN REGIME PERMANENT

4.1 Piézométrie de février 1971 : Etat initial stable

Le régime permanent a été calibré avec les données piézométriques de février 1971. La piézométrie est donnée sur un réseau de mesures plus élargi, qui s'étend depuis Thiaroye jusqu'au delà du lac Retba au niveau de Diender. L'état stationnaire de février 1971 est représentatif d'un état piézométrique de référence.

4.2 Phase de calage du modèle

Le calage en régime permanent a nécessité de nombreux passages, pour pouvoir déterminer sur chaque maille définie dans le système des paramètres d'entrées plus ou moins correctes. Ces paramètres sont proches des conditions réelles pour restituer des charges piézométriques représentatives de l'état de référence. Les données concernant les paramètres hydrodynamiques, les échanges de débits avec le milieu extérieur (infiltration/évaporation) ont été très difficiles à estimer. L'ajustement a porté essentiellement sur ces deux données.

4.2.1 Les coefficients de perméabilité

Les valeurs de perméabilité initialement introduites ont été beaucoup modifiées durant le calage du modèle en régime permanent. Pour la démarche utilisée, on a imposé sur chaque point de pompage, la valeur de perméabilité qui est connue et en fonction de cette valeur donnée on définit une zone d'influence où les perméabilités attribuées seront dans le même ordre de grandeur.

Dans le secteur Ouest du bassin de Thiaroye les perméabilités initiales observées étaient surestimées avec des valeurs comprises entre 7,77 et 15,55 m/j (0,9 à 1,8. 10^{-4} m/s). Ceci ne permettait pas de restituer le dôme piézométrique axé sur le point P2-2 qui est la limite imperméable définie dans le secteur Ouest de la nappe. Cette observation restait valable dans le Nord-Est de la nappe à l'Est du lac Mbawane où les perméabilités étaient également surestimées. Ainsi sur les flancs de ces dômes les perméabilités ont dû être ramenées à des valeurs comprises entre 0,1 et 6 m/j (0,11. 10^{-5} et 0,6. 10^{-4} m/s).

Dans le Sud de la nappe où affleure le substratum marneux, les coefficients de perméabilité sont ramenés également à cet ordre de grandeur.

Les perméabilités obtenues sur la nappe après calibration sont données sur la figure 79.

Au vue de cette carte, les valeurs sont comprises entre 0,1 et 8,64 m/j (0,11. 10^{-5} et 1. 10^{-4} m/s) dans les secteurs Ouest et est du bassin de Thiaroye, dans la zone Sud-Est de la nappe et dans la zone Nord-Est du lac Mbawane. Les perméabilités obtenues sont nettement meilleures dans les centres de captage de Thiaroye et Beer Thialane, et sur un demi-cercle partant du Nord-Ouest (P2-8) au Nord-Est au niveau de Kaniack (Pts.232). Cette zone englobe les secteurs de Niaga et Dène. Les valeurs obtenues varient entre 8,64 et 44 m/j (1 et 6. 10^{-4} m/s). La zone du lac Retba est représentée par les plus fortes perméabilités, comprises entre 44 et 86 m/j (6 et 10. 10^{-4} m/s).

La répartition des coefficients de perméabilité ainsi obtenue après calibration, est en accord avec les résultats de l'étude de GEOHYDRAULIQUE (1972). Elle met en évidence une forte hétérogénéité des terrains dans le système hydraulique de Thiaroye avec des perméabilités comprises entre 0,8 et 10. 10^{-4} m/s.

4.2.2 Les valeurs de recharge par les eaux de pluie

Sur le système aquifère de Thiaroye, seule la part des eaux de pluie destinée à la recharge est considéré comme paramètre d'entrée du bilan de la nappe. Nous avons introduit une valeur initiale de recharge uniforme de 85 mm/an.

Dans le bassin versant de Thiaroye cette valeur de recharge estimée à 85 mm/an, a dû être corrigée de moins de 15% pour arriver à une piézométrie représentative dans la zone. C'est la zone où l'infiltration n'a pas été surestimée.

Dans le reste de la nappe, et selon les secteurs considérés les recharges ont été largement surestimées, et les premiers résultats de calage du modèle ont donné des charges hydrauliques qui étaient de 15 m au moins supérieures aux valeurs mesurées sur le terrain. Ainsi on a diminué considérablement les valeurs, qui sont de l'ordre de 55 mm/an dans le sud-est du système, 36 mm/an dans le secteur Ouest de Thiaroye, et varient entre 0 et 12 mm/an sur le reste de la nappe.

La recharge estimée à 85 mm/an nous paraît plus ou moins correcte dans la zone de Thiaroye où on a retenu une valeur d'infiltration de 73 mm/an après calibration. Ce qui n'a pas été le cas dans les autres secteurs de la nappe, où la recharge initiale a été considérablement diminuée.

La valeur de pluie efficace estimée à 173 mm/an d'après les précipitations enregistrées dans la presque île du Cap-Vert (550 mm), diminuée du seuil d'alimentation (377 mm) selon A. MARTIN (1970) est excessive pour la région.

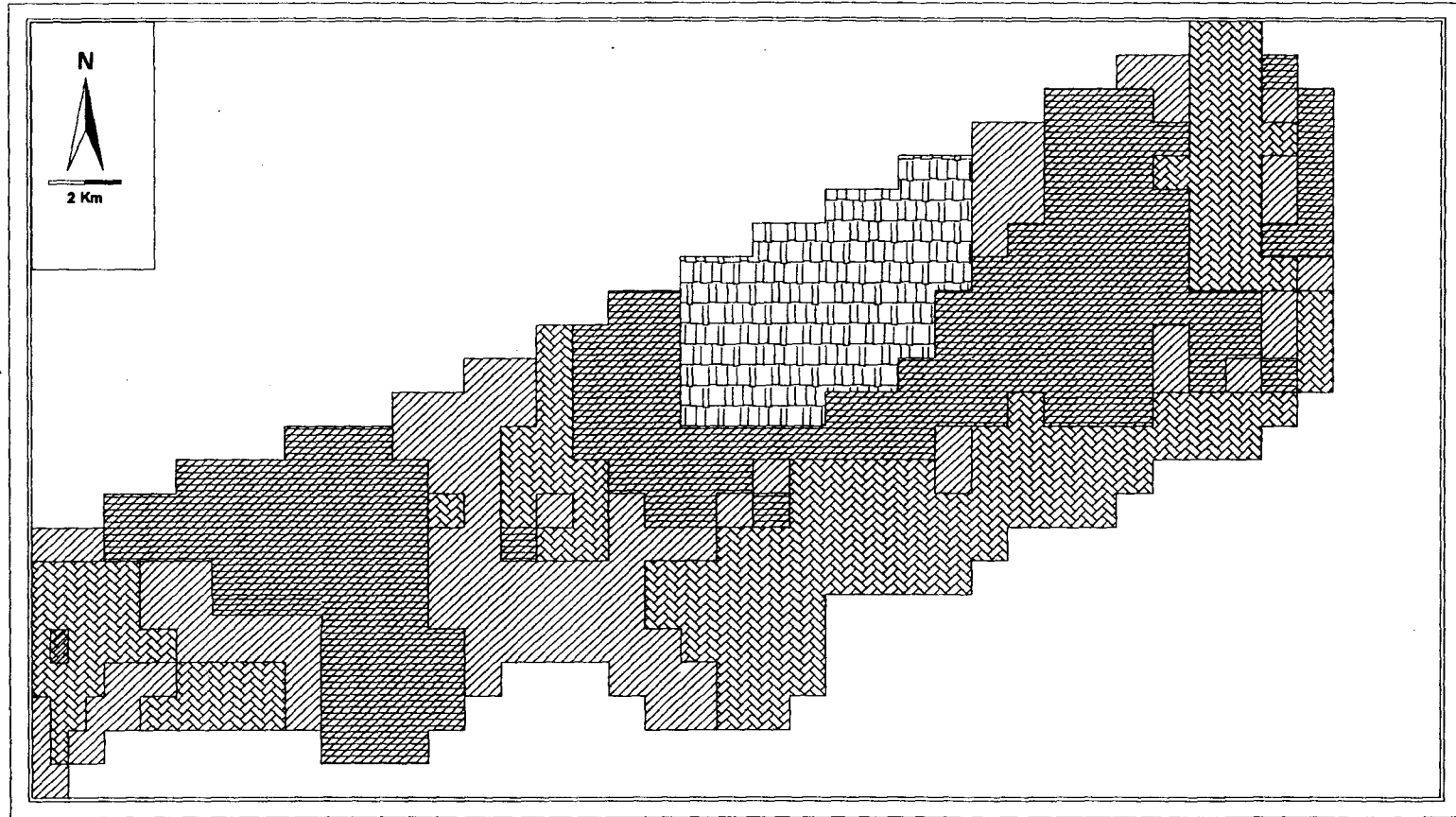


Fig.79: Conductivités hydrauliques de l'aquifère résultant de la calibration du modèle

LEGENDE:

Perméabilités (m/jour)



0,11 à 5,18



5,18 à 8,64



8,64 à 43,2



43,2 à 86,4

4.2.3 Les conditions aux limites

La crête piézométrique définie dans le secteur Est de Mbawane a permis d'établir une limite imperméable dans cette zone. Après les simulations cette limite isole du système aquifère de Thiaroye le points Pts.220 de Diender. Ainsi on a corrigé la limite initialement donnée dans ce secteur.

4.3 Résultats et validation du modèle

L'analyse de la répartition des charges piézométriques obtenues au terme du calage, de même que les différents paramètres du bilan montre que les résultats sont satisfaisants et que le modèle est tout à fait représentatif.

4.3.1 Comparaison de la piézométrie mesurée et celle calculée

La carte piézométrique calculée, comparée à la piézométrie mesurée sur le terrain est donnée sur la figure 80. La surface piézométrique de la nappe est assez bien reconstituée par la piézométrie calculée, et la superposition est tout à fait satisfaisante.

Néanmoins, le décalage entre la piézométrie de référence et celle calculée est assez important dans les secteurs de Kaniack au piézomètre PS.14 et Mbayakh au points PS.10. Les niveaux piézométriques calculés dans ces deux zones sont inférieurs à ceux mesurés. Dans ces secteurs, les perméabilités ont été surestimées, et la réduction des valeurs pour relever les niveaux piézométriques n'a pas été très poursuivie pour ne pas trop diversifier les paramètres initialement introduits.

4.3.2 Le bilan hydrique

Le calcul du bilan a permis de définir l'hydrodynamisme de la nappe et de quantifier les flux sortant et entrant dans le système. Le programme PROCESSING MODFLOW, nous a permis de définir non seulement le bilan global de la nappe après calage, mais également d'avoir sur des zones choisies le bilan des débits. Les tableaux 19 et 20 donnent respectivement le bilan global et le bilan de la zone de Thiaroye.

Le bilan global montre un équilibre parfait des débits et que l'alimentation de la nappe est due principalement aux débits pluviaux.

Le bilan donné dans le bassin de Thiaroye montre que les débits verticaux (débit pompé, débit infiltré, débit emmagasiné et évaporé) estimés à 75% du débit total sont beaucoup plus importants que les débits horizontaux qui représentent 25% (tableau 20) et regroupent également plusieurs termes dont l'écoulement vers la mer.



Fig. 80: Distribution des charges piézométriques mesurées et calculées en Février 1971

LEGENDE:



-  Charges mesurées
-  Charges calculées

Tableau 19: Bilan global des débits sur la nappe

TERMES DU BILAN	DEBIT (m ³ /j)		
	ENTREES	SORTIES	SORT.-ENTR
Emmagasinement	0	0	0
Apport aux limites	0	28 278	-28 278
Forages, puits	0	15 735	-15 735
Recharge	44 014	0	-44 014
Total	44 014	44 013	1

Tableau 20: Bilan des débits calculés dans le bassin versant de Thiaroye

TERMES DU BILAN	DEBIT (m ³ /j)		
	ENTREES	SORTIES	SORT.-ENTR
Emmagasinement	0	0	0
Apport aux limites	0	6 782	-6 782
Echanges Horizontales	1 592	436	1 155
Echanges (UPPER)	0	0	0
Echanges (LOWER)	0	0	0
Forages, puits	0	10 235	-10 235
Recharge	15 861	0	15 861
Total	17 454	17 454	-0,15

4.3.3 Conclusion

Les conclusions concernant les débits d'échange de la nappe et la répartition spatiale des paramètres hydrodynamiques du système hydraulique peuvent se résumer comme suit:

- Les valeurs de perméabilité obtenues sont comprises entre 0,1 et 10. 10⁻⁴ m/s elles mettent en évidence l'hétérogénéité du système déjà révélée dans les travaux antérieurs. Les plus fortes valeurs de K sont observées dans la zone du lac Retba et sont comprises entre 5 et 10. 10⁻⁴ m/s. Dans la zone de pompage de Thiaroye, on a également de bonnes perméabilités estimées entre 1 et 6.10⁻⁴ m/s. De part et d'autre du bassin versant de Thiaroye, dans les secteurs Sud-Est du système et est du lac Mbawane, les perméabilités sont faibles et varient de 0,1 à 1. 10⁻⁴ m/s.
- La valeur de recharge fixée à 85 mm/an (BRGM-GEOHYDRAULIQUE, 1986) dans la zone de Thiaroye est proche de la valeur obtenue après calibration qui est de 73 mm/an. Dans le reste de l'aquifère et selon les secteurs considérés, le taux d'infiltration est très variable pouvant s'annuler même dans certaines zones.
- Le bilan des débits obtenu dans la zone de Thiaroye montre d'importantes pertes vers l'océan qui sont estimées à 6 782 m³/j.

- Le bilan global sur la nappe donne des pertes aux limites estimées à 28 278 m³/j, ce qui révèle un important potentiel du réservoir encore exploitable.

La simulation de la nappe en régime transitoire (1971-1997) permettra de voir l'évolution de la piézométrie sur la nappe soumise aux conditions climatiques de ces dernières années et aux prélèvements de la SONEES.

5. CALAGE EN REGIME TRANSITOIRE

5.1 Historique piézométrique

Pour simuler les écoulements de la nappe en régime transitoire, nous avons choisi un certain nombre de points témoins dans différents secteurs du système pour voir effectivement l'évolution temporelle de la piézométrie en rapport avec les précipitations annuelles enregistrées dans la presqu'île. L'analyse des courbes d'évolution piézométrique (Fig.81 et 82), montre une baisse des niveaux depuis 1976 jusqu'en 1984, suivie d'une remontée jusqu'à la fin de l'hivernage 1989 puis une stabilisation des niveaux de la nappe.

Cette variation temporelle de la piézométrie est en corrélation avec les hauteurs de précipitation enregistrées dans la zone. En effet La baisse piézométrique observée dans différents secteurs depuis 1976 jusqu'en 1984 correspond à des années de déficit pluviométrique. Les hauteurs de pluie enregistrées durant cette période sont inférieures à la moyenne pluviométrique estimée à 357 mm/an. Les précipitations enregistrées entre 1985 et 1989 sont supérieures à cette moyenne définie. Ce qui correspond à des années d'excédant pluviométrique, qui se traduisent par une remontée du niveau de la nappe.

Cependant on peut remarquer qu'à partir de 1990 malgré le déficit pluviométrique, les niveaux piézométriques donnés sur les points témoins sont relativement stables. Seul le secteur Sud-Est accuse une légère baisse de la piézométrie.

Concernant les données piézométriques disponibles sur la nappe, c'est à partir de 1987 qu'on a les relevés piézométriques les plus complets.

Ainsi à défaut de données piézométriques représentatives de l'état de la nappe durant ces années, nous avons choisi pour les simulations en régime transitoire, l'état piézométrique moyenne de 1997 comme état de référence. La période de calibration de l'évolution de la nappe est définie sur ces 26 dernières années (1971 à 1997). La piézométrie de référence (Fig. 39) reflète les variations du niveau de la nappe, tant en période d'étiage qu'en période de crue.

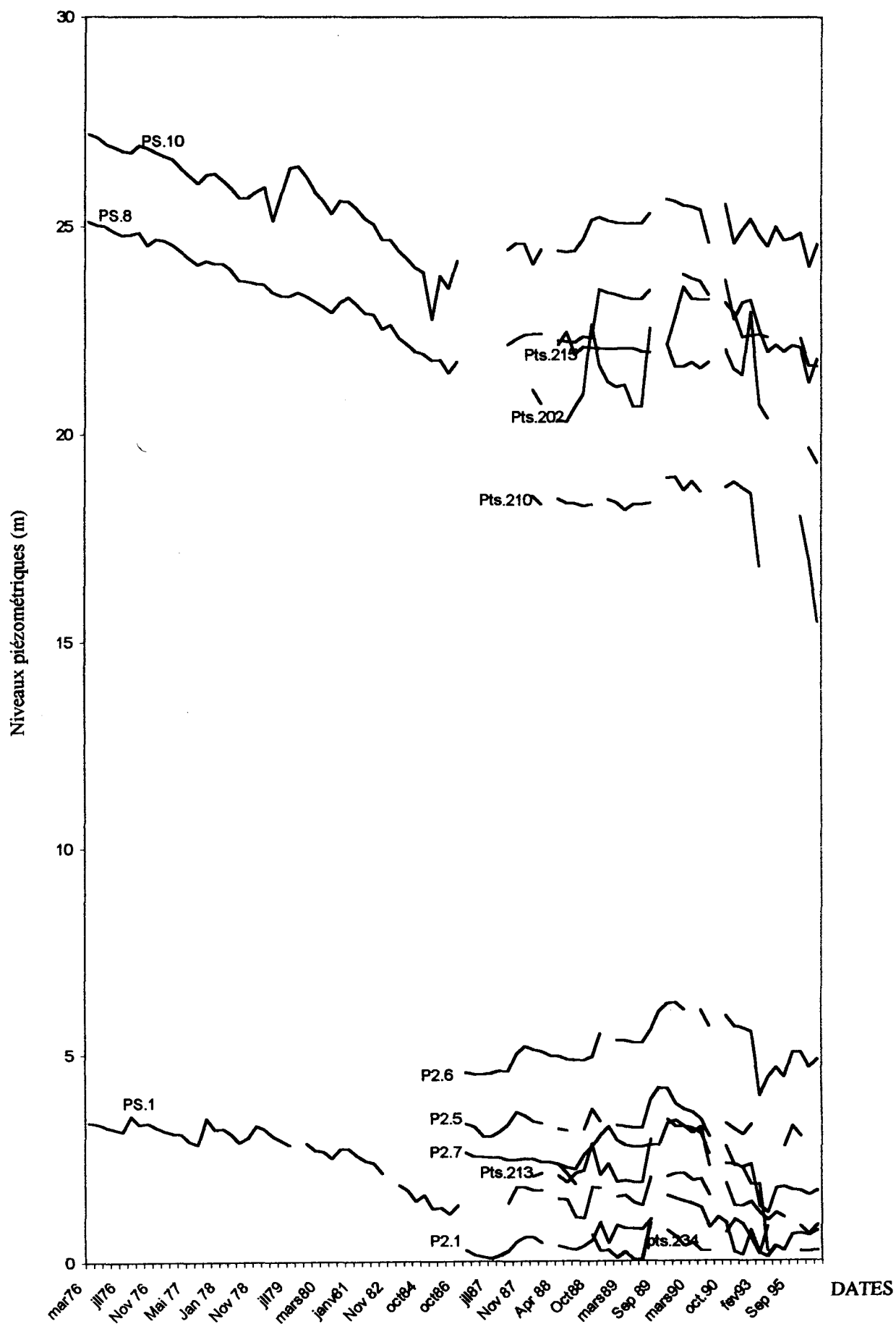


Fig.81: Evolution des niveaux piézométriques de la nappe de Thiaroye au niveau de quelques points témoins (1976-1997)

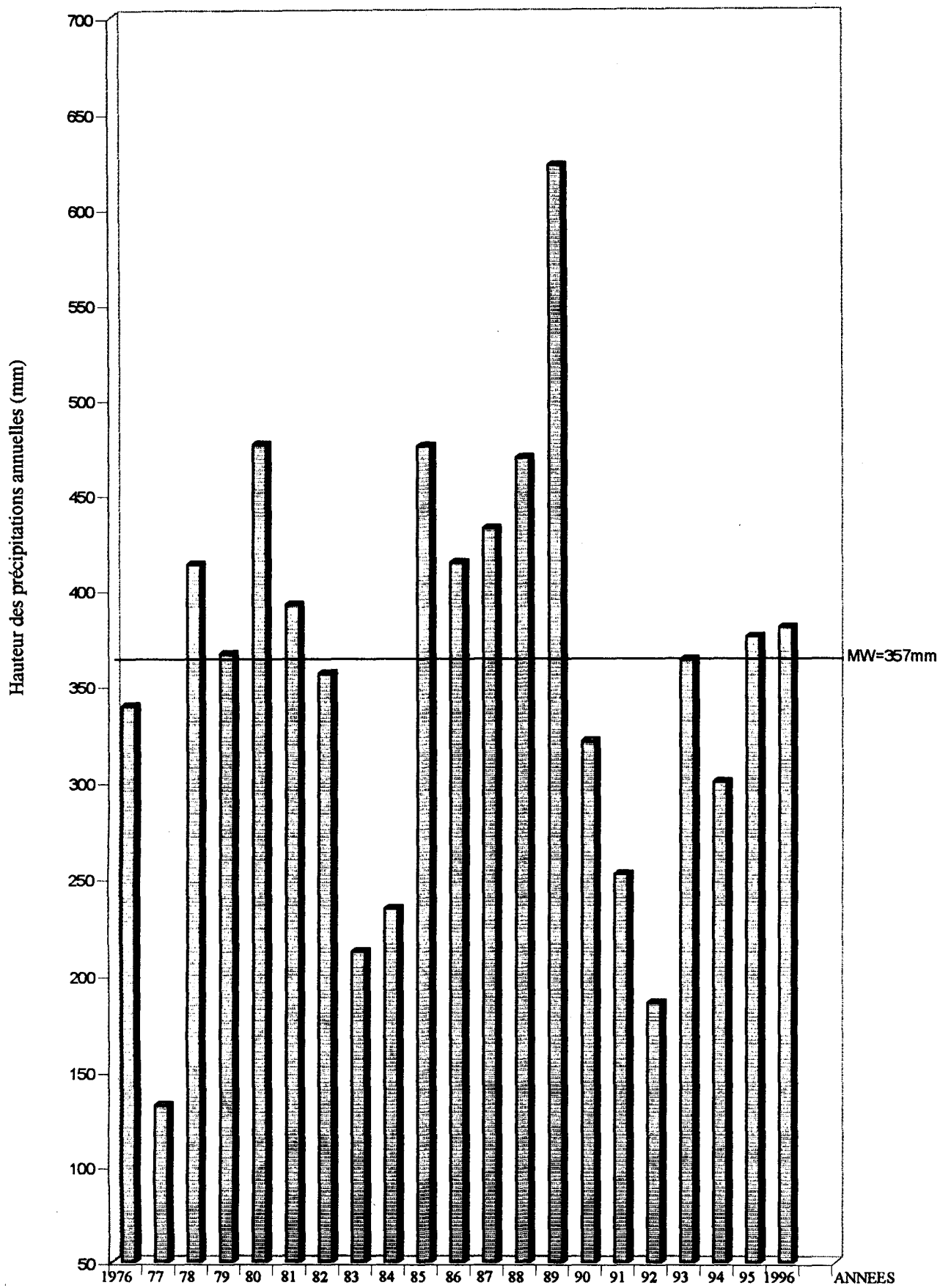


Fig.82: Les précipitations annuelles enregistrées dans la Presqu'île du Cap-Vert (1976-1996)

5.2 Utilisation du Système d'Information Géographique pour générer certains paramètres d'entrée du modèle

L'application du système d'information géographique dans cette étude a permis d'actualiser un certain nombre de données d'entrée du modèle. Celles ci concernent les prélèvements sur la nappe et le bilan hydrique.

5.2.1 Les prélèvements sur la nappe

Les prélèvements sur la nappe durant la période de calibration ont été regroupés en deux catégories:

Les prélèvements de la SONEES

Ces prélèvements sont localisés dans les centres de captage de Thiaroye et de Beer Thialane. L'évolution des débits pompés sur la nappe pour l'AEP de Dakar est donnée à la figure 83. Elle montre que les débits d'exploitation sont restés relativement constants avec une moyenne de 10 000 m³/j pour Thiaroye et 7 000 m³/j pour Beer Thialane. Les débits de pompages du centre de Beer Thialane avant 1981 sont peu connus.

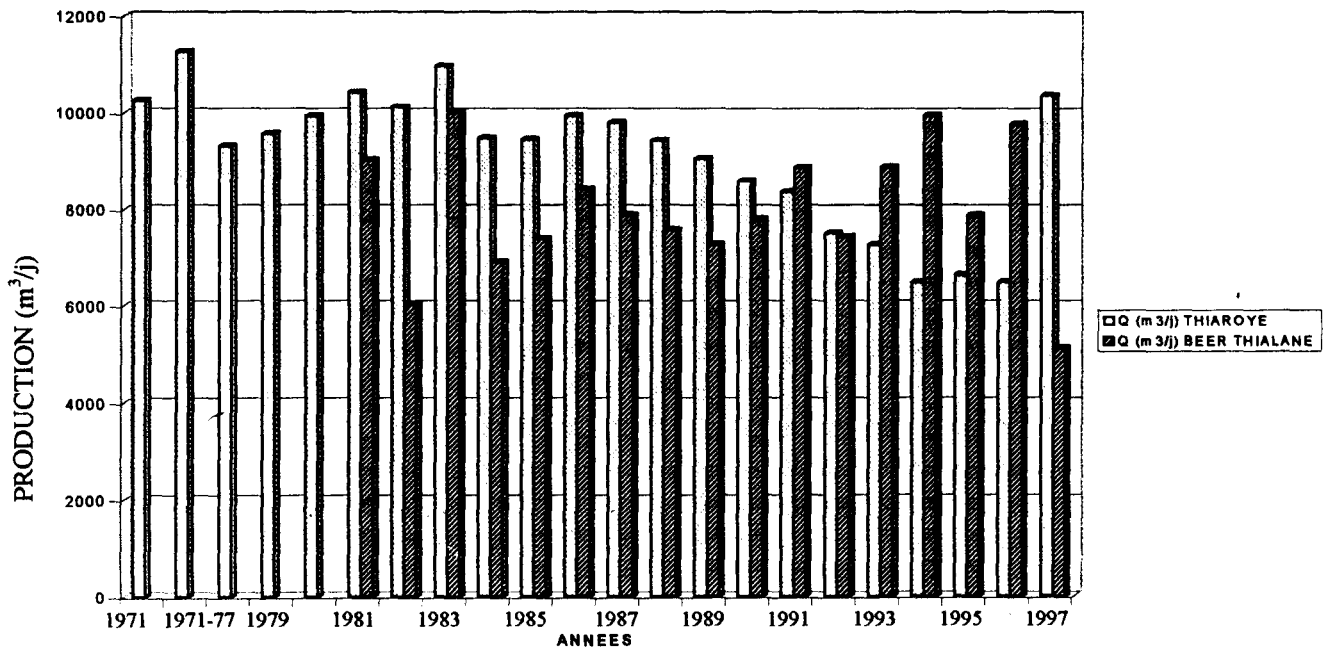


Fig.83: Débits exploités sur la nappe au niveau des forages de THIAROYE et BEER THIALANE (1971-1997)

D'après ces observations, on peut dire que le tarissement de la nappe observé au niveau des points témoins entre 1976 et 1984 est essentiellement dû au déficit pluviométrique, plutôt qu'à une exploitation intense des ressources.

Dans le modèle conceptuel, les prélèvements de la SONEES sont localisés au niveau des mailles donnés sur le tableau ci-dessous:

Tableau.21: Localisation des prélèvements de la SONEES dans le modèle conceptuel

MAILLE [C, R]	THIAROYE	BEER THIALANE
[8, 17]	F21, F15	
[7, 17]	F19	
[6, 18]	F22	
[6, 19]	F17, F18	
[36, 5]		F1
[35, 5]		F2, F3
[34, 5]		F4, F5

Vue la taille des mailles considérée (1x1 km), nous avons une superposition des forages dans quatre mailles.

Les prélèvements pour l'agriculture et pour les besoins villageois

La présence des Niayes dans la région favorise une activité maraîchère à grande échelle dans la zone d'étude. Cette pratique agricole de même que les besoins humains, expliquent l'exploitation accrue de la nappe par les ouvrages traditionnels tel que les puits et céanes. L'estimation des débits prélevés dans ces ouvrages est très difficile, du fait qu'ils ne sont généralement pas tous recensés de même que l'extension des périmètres de maraîchage observée durant ces dernières années est mal connue. Selon les résultats des travaux antérieurs (GEOHYDRAULIQUE, 1972; GLADIMA, 1992; FAYE, 1995) nous avons chiffré ces prélèvements à environ $120 \text{ m}^3/\text{j}/\text{km}^2$. Avec l'aide du système d'information géographique, on a pu localiser ces prélèvements dans les zones rurales, c'est à dire au niveau des mailles correspondant aux localités définies (Voir Carte d'occupation des sols).

5.2.2 L'évapotranspiration

Le calcul du bilan hydrique de la nappe dans le SIG avait permis d'estimer les valeurs d'évapotranspiration au niveau des Niayes et des lacs (Fig.66). L'évapotranspiration a été calculée selon les données climatiques des stations de Dakar-Yoff, Hann, Pikine, Mbao, Bambilor et Kayar, par les méthodes empiriques de PENMAN et ALBRECHT (Cf. Chp.III. I. 3). Les Niayes qui occupent une superficie d'environ 20 km^2 selon les données du SIG sont localisés sur différentes mailles du modèle (Fig. 84). Les valeurs d'évapotranspiration moyennes journalières calculées sur les lacs et les Niayes sont données sur le tableau ci-dessous:

Tableau 22: Les valeurs d'évapotranspiration calculées dans ARC/INFO

SURFACE D'EVAPORATION	EVAPOTRANSPIRATION (mm/j)
Lac Retba	2,60
Niayes et Lacs	3,28

Ces valeurs sont introduites comme données d'entrée du modèle au niveau des mailles qui correspondent à des lacs ou des Niayes. La valeur appliquée est proportionnelle à la surface

qu'occupe la Niaye ou le lac sur la maille donnée. L'évapotranspiration estimée à 3,28 mm/j (1197,2 mm/an) sur les Niayes, selon la méthode de ALBRECHT est dans l'ordre de grandeur des valeurs données par la méthode de TURC comprises entre 1 700 et 2 200 mm/an d'après OMS (1972).

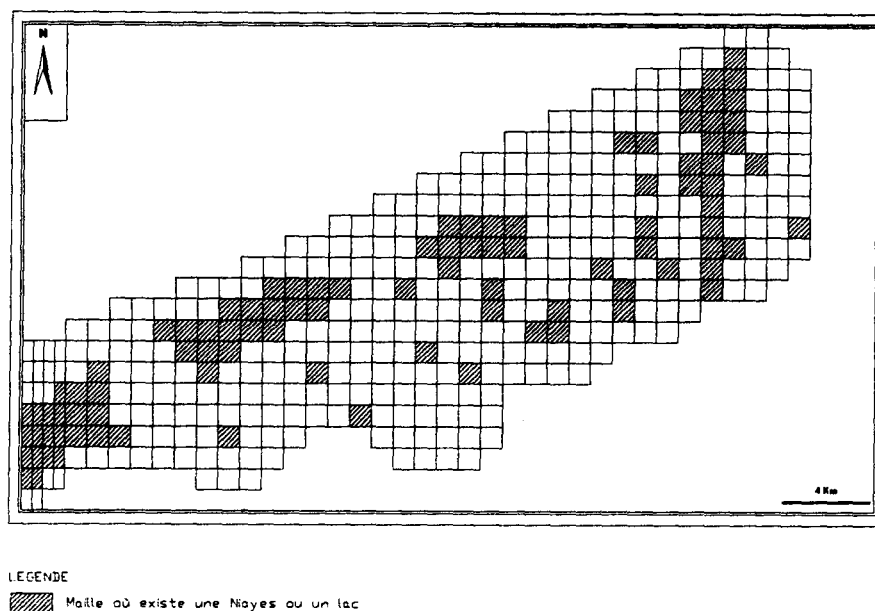


Fig.84: Carte de localisation des Niayes et lacs dans le domaine du modèle dans ARC/INFO

5.2.3 La recharge

L'approche du SIG a permis d'estimer les valeurs de recharge par les méthodes empiriques, mais également de régionaliser les données obtenues. Ainsi on a défini une répartition spatiale des valeurs d'infiltration en fonction des précipitations enregistrées sur les différentes stations météorologiques localisées sur la zone (Cf. Fig.73). Le tableau 20 donne les valeurs d'infiltration obtenues:

Tableau 23: Les valeurs de recharge calculées dans ARC/INFO selon les stations climatiques

STATION CLIMATIQUE	RECHARGE (mm/an)
Dakar-Yoff	47
Hann	45
Pikine	50
Mbao	43
Bambilor	38
Kayar	32
Moyenne	39

Les recharges estimées sur la nappe sont comprises entre 50 et 32 mm/an de Dakar-Yoff à Kayar et sont introduites comme données d'entrée du modèle. Sur les mailles où sont localisées les Niayes et les lacs, on a considéré que cette recharge s'annule.

En dehors de ces données réactualisées dans le SIG, les paramètres d'entrée du modèle pour le calage en régime transitoire, restent identiques à ceux donnés pour le calage en régime permanent. Mais le calage en régime transitoire a nécessité l'entrée d'éléments nouveaux dans la conceptualisation du modèle et qui sont les valeurs de coefficient d'emmagasinement et la discrétisation du temps:

5.3 Les coefficients d'emmagasinement

L'exploitation des essais de pompage en régime d'écoulement permanent ou transitoire, permet de définir en plus des valeurs de transmissivité un deuxième paramètre qui est le coefficient d'emmagasinement. Ce paramètre varie selon le cas d'un aquifère captif ou libre. D'après HÖLTING (1992), le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de $5,1 \cdot 10^{-5}$ à $5,1 \cdot 10^{-3}$ pour un aquifère captif et de $1,1$ à $4,1 \cdot 10^{-1}$ pour une nappe libre.

D'après ces valeurs, les données obtenues par essai de pompage dans l'étude de GEOHYDRAULIQUE (1972) et dans cette étude, comprises entre 1 et 7% se sont révélées trop faibles. Ainsi pour le calage du modèle, nous avons repris la valeur moyenne de 20% donnée sur la nappe à partir d'un bilan hydrique sur deux périodes différentes, c'est à dire en saison des pluies et en saison sèche. Cette valeur est uniformément appliquée sur l'ensemble des mailles.

5.4 La discrétisation du temps

La simulation des prélèvements sur la nappe est définie sur ces 26 dernières années (1971-1997). La discrétisation du temps dans le programme MODFLOW est donnée par les relations (McDONALD & HARBAUGH, 1988):

$$Delt(1) = \frac{PERLEN * (1 - TSMULT)}{1 - TSMULT * NSTP} \quad (55)$$

$$Delt(m+1) = TSMULT * Delt(m) \quad (56)$$

Delt(1)	=	Le pas de temps initial
PERLEN	=	La période d'excitation
TSMULT	=	Facteur multiplicateur
NSTP	=	Nombre de pas de temps
Delt(m)	=	Le pas de temps m donné par le programme

Le facteur multiplicateur (TSMULT) permet d'augmenter le pas de temps durant la période d'excitation. Cette constante est de 1,41 selon de MARSILY (1986). Pour le temps de simulation donné sur 26 ans (9490 jours), on a fixé le pas de temps initial à 2 jours et le nombre de pas de temps est de 50.

5.5 Phase d'ajustement du modèle

Pour le calage du modèle en régime transitoire, les perméabilités obtenues au dernier calage du régime permanent données sur la figure 79 sont reconduites, et ont été très peu modifiées suivant certains secteurs. Les coefficients d'emmagasinement n'ont pratiquement pas été ajustés. Ainsi l'ajustement en régime transitoire s'est fait essentiellement avec les valeurs de recharge initialement introduites, et qui selon les techniques du SIG étaient réparties sur l'ensemble du domaine. Progressivement on a du modifier les valeurs d'infiltration pour avoir une piézométrie calculée la plus proche possible de celle mesurée sur le terrain.

Les valeurs d'infiltration initialement imposées dans la zone de Thiaroye et dans l'Ouest de ce bassin, ont été largement sous-estimées. Ainsi durant le calage, ces valeurs seront augmentées de l'ordre de 60 à 70 %.

C'est également le cas dans les secteurs Est et Ouest du lac Mbawane, où pour restituer les dômes piézométriques les faibles valeurs de recharge données dans la station de Kayar (32 mm/an) et initialement introduites ont été fortement augmentées de l'ordre de 100 à 150%. Dans le Sud-Est du système de Kounon à Golam, les recharges données dans les stations moyenne (39 mm/an) et de Bambilor (38 mm/an) sont diminuées de plus de 50% pour pouvoir ressortir la baisse piézométrique notée dans le secteur durant la période de simulation en régime transitoire.

5.6 Les résultats du calage

5.6.1 Validation des résultats du modèle

La validation des résultats du calage du modèle en régime transitoire est basée sur les points suivants:

- Comparaison des cartes de contours piézométriques mesurés et calculés.
- Comparaison des courbes d'évolution piézométrique mesurées et calculées durant la période de simulation au niveau des points témoins.
- L'écart obtenu sur les charges piézométriques observées et calculées sur les 18 points témoins.
- L'analyse statistique des erreurs de calibration.

La figure 85 montre la répartition des charges piézométriques moyennes de 1997 mesurées et calculées après l'ajustement. La superposition des deux cartes est tout à fait parfaite. La carte piézométrique restituée par le modèle reproduit de façon correcte celle qui a été mesurée sur le terrain.

Les dômes piézométriques à l'Ouest du bassin de Thiaroye centré au point P2-2 et au Nord-Est du lac Mbawane ont été fidèlement reproduits. Ces dômes correspondent à des zones d'infiltration privilégiée. Les dépressions piézométriques centrées sur les lacs Retba et Mbawane, où la nappe s'épuise par évaporation et dans les zones d'exploitation sont convenablement reproduites.

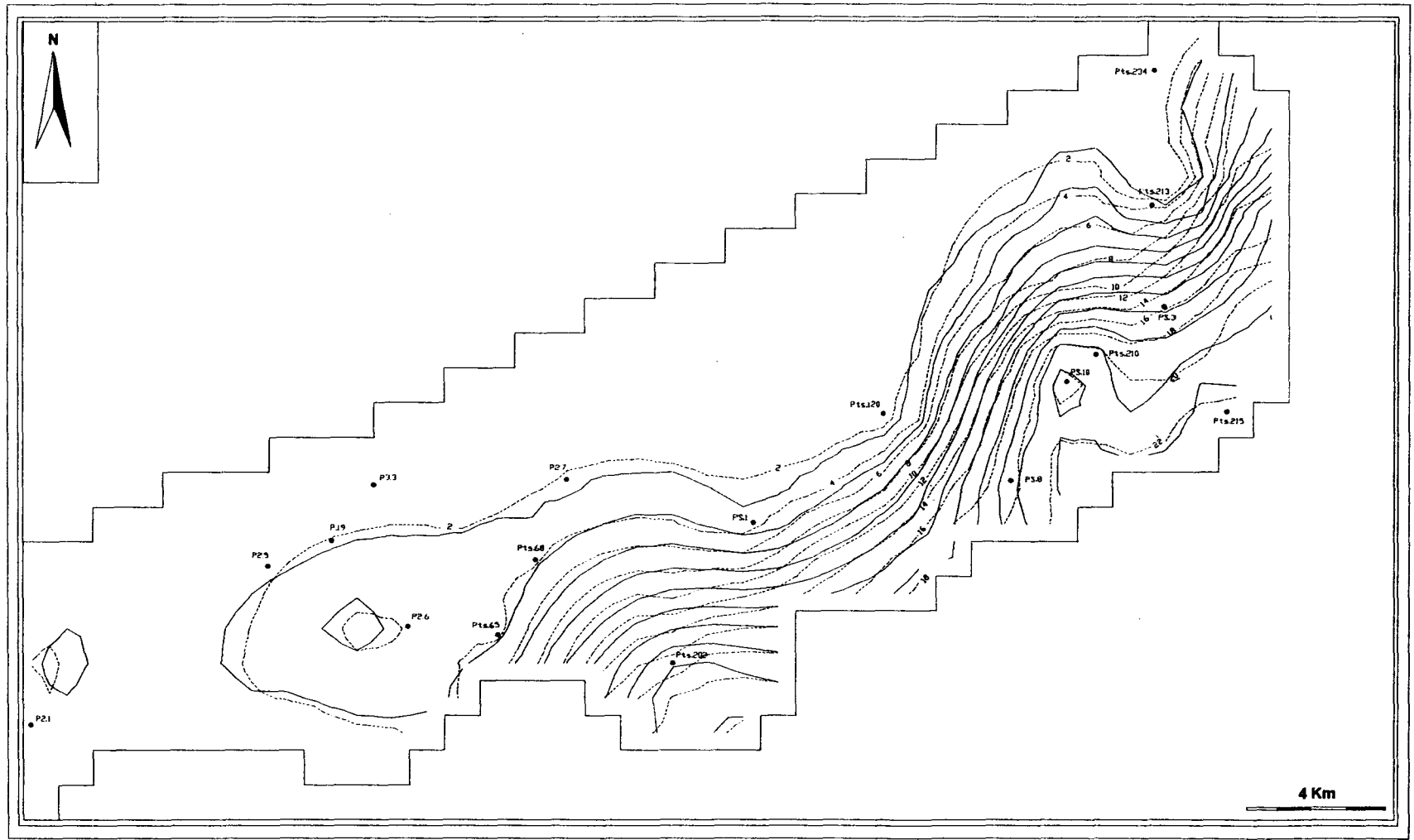





Fig.85: Distribution des charges piézométriques moyennes mesurées et calculées en 1997

LEGENDE:

-  Charges piézométriques calculées
-  Charges piézométriques mesurées
-  Points témoins

Cependant le décalage observé dans le secteur Nord-Est du système sur le dôme piézométrique peut être lié à la condition aux limites imposée dans cette zone. Pour le calage on avait fixé une limite à flux nul dans la zone.

En plus de l'état stationnaire de la nappe défini en 1997, les résultats du modèle ont permis d'établir les courbes d'évolution piézométrique sur des points témoins (Fig 86). Les résultats obtenus montrent une parfaite concordance des fluctuations piézométriques avec celles obtenues sur le terrain. Les remontées du niveau de la nappe correspondant à des années d'excédant pluviométrique ont été correctement restituées de même que le tarissement de la nappe durant les années de déficit pluviométrique.

Sur le tableau 24 nous avons représenté les erreurs de calage observées sur les points témoins choisis dans le domaine du modèle. C'est la différence entre les charges mesurées sur le terrain et celles calculées après ajustement. Seul le point témoin pts.202 localisé dans le secteur de Kounone donne une erreur supérieure à 1m (+1,10 m). Ces résultats peuvent être liés aux erreurs de krigeage des charges piézométriques, observées dans cette zone, qui étaient légèrement supérieures à celles données sur le reste de la nappe.

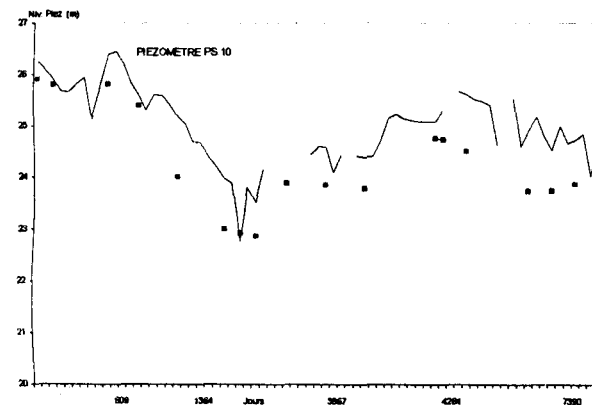
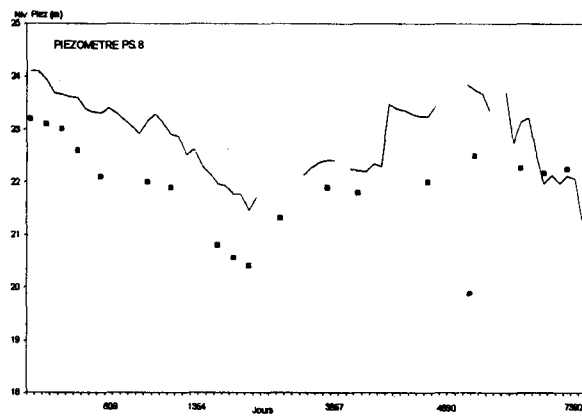
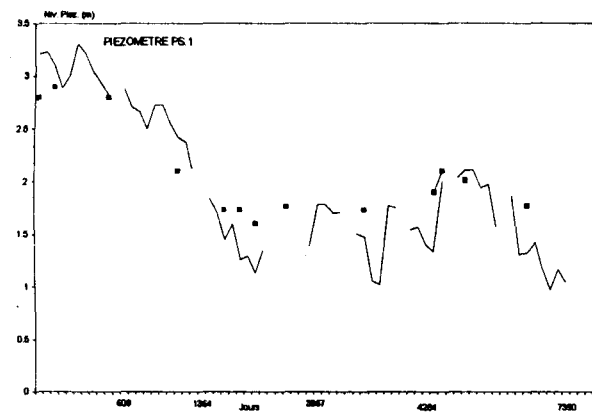
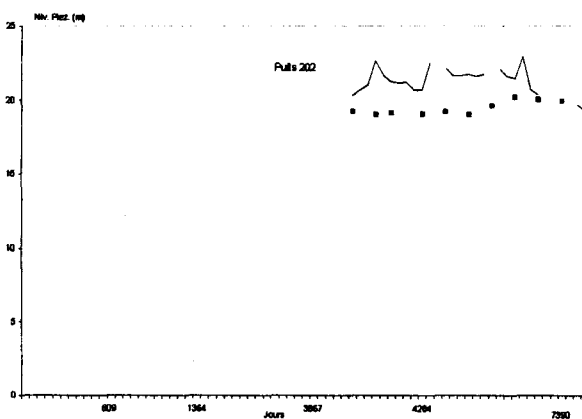
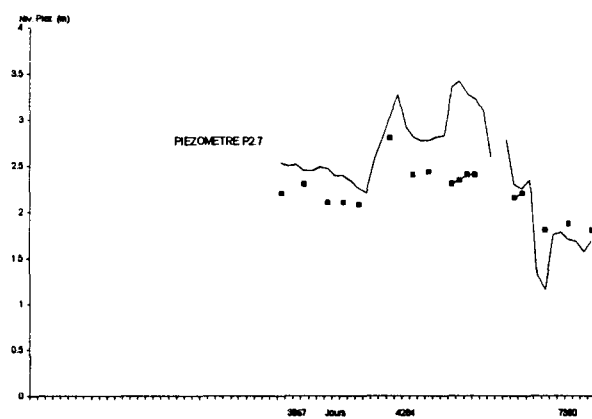
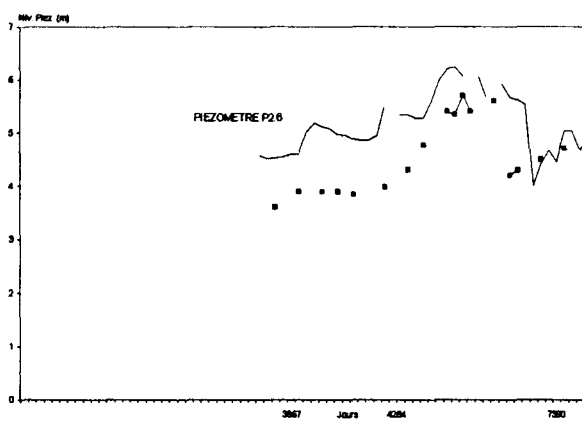
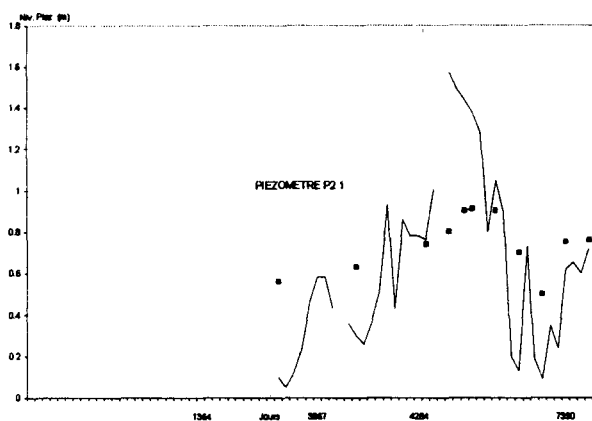
Tableau 24: Comparaison des charges piézométriques calculées et celles moyennes de 1997 mesurées sur les points témoins

Points Témoins	Maille Colon.-Rang.[X-Y]	Charges Mesur.(m)	Charges Calcu.(m)	Occupation des sols	Erreurs de calage
Pts.234	[35-2]	1,10	1,05	Z.Villageo.(ZoneC)	+0,05
Pts.213	[34-6]	3,00	3,80	Niayes(Zone D)	-0,80
PS.3	[35-9]	16,4	16,41	Z.agricole.(Zone E)	-0,01
PS.10	[32-11]	23,00	22,76	Dune(Zone B)	+0,24
Pts.210	[33-10]	20,40	20,29	Z.Villageo.(ZoneC)	+0,11
Pts.215	[37-12]	23,00	22,84	Z.Villageo.(ZoneC)	+0,16
Pts.120	[27-12]	0,80	1,34	Z.dunaire(Zone B)	-0,54
PS.8	[31-14]	20,80	20,36	Z.agricole.(Zone E)	+0,44
PS.1	[23-15]	2,80	2,95	Z.agricole.(Zone E)	-0,15
Pts.202	[21-19]	17,8	16,70	Z.villageo.(ZoneC)	+1,10
P2-7	[18-14]	1,70	2,28	Z.agricole.(Zone E)	-0,57
P2-6	[12-18]	4,70	4,39	Agglomér.(ZoneA)	+0,30
Pts.65	[16-18]	3,30	3,37	Z.agricole.(Zone E)	-0,07
Pts.68	[17-16]	3,60	3,59	Z.agricole.(Zone E)	+0,01
P2-5	[9-16]	1,20	1,40	Agglomér.(ZoneA)	-0,20
P.19	[11-16]	1,60	1,76	Niayes(Zone D)	-0,16
P3-3	[12-15]	1,52	1,81	Niayes(Zone D)	-0,29
P2-1	[1-21]	0,30	0,76	Niayes(Zone D)	-0,46

La carte d'occupation des sols (Fig. 64) a permis de caractériser chaque point témoin défini dans le domaine du modèle par un type d'environnement donné (tableau 21).

L'analyse des erreurs de calibration nous montre qu'à part le point Pts.120, localisé dans une zone dunaire tous les points témoins à charges surestimées [erreur (-)] sont localisés dans des zones de Niayes ou agricoles. En effet le point P2-5 est dans le voisinage des Niayes.

Fig. 86: Evolution piézométrique de la nappe de Thiaroye sur quelques points témoins (1976-1997)



— Courbes piézométriques mesurées sur le terrain
 ■ ■ Courbes piézométriques obtenues sur le modèle

Ces résultats nous laissent dire que l'épuisement de la nappe par évaporation au niveau des Niayes et lac a été sous-estimée et que la valeur de 3,28 mm/j donnée dans le SIG est en réalité beaucoup plus importante.

Au niveau de Sangalkam (PS1), Tivaouane Peulh (P2-7) et des points PS-3 et Pts.65 qui sont des zones agricoles, le résultat des calages montre un niveau élevé des charges, ce qui peut être dû à une sous-estimation des prélèvements sur la nappe pour les besoins agricoles et humains. Dans la zone dunaire (Pts. 120), la surestimation des charges peut s'expliquer soit par l'influence du lac Retba qui est une zone d'évaporation et qu'on devrait prendre en compte, ou à une surestimation des recharges. La limite imperméable imposée dans le Sud-Ouest peut également expliquer l'erreur assez importante (-0,46m) au niveau du point P2-1.

Le résultat des calages montre également que le niveau de la nappe reste bas dans certaines zones par rapport à la piézométrie observée sur le terrain. C'est le cas du points Pts.202 à Kounone où l'erreur de calage est maximale (+1,10m). Ceci nous amène à affirmer que dans cette zone les valeurs d'infiltration données dans le SIG et définies à partir de la station moyenne sont largement sous-estimées. En effet la station de Kayar où on a la plus faible recharge n'a pas d'influence sur ce secteur. Contrairement au point PS.8, qui est plus proche de la zone de Kayar et que les mêmes valeurs de recharges imposées créent un décalage piézométrique moins important (+0,44m). On peut dire que la zone d'influence de la station climatique moyenne donnée dans le Système d'Information Géographique peut être beaucoup plus réduite.

Dans la zone d'agglomération où est localisé le piézomètre P2.6, malgré les valeurs de recharges maximales imposées le niveau de la nappe reste encore bas, avec un décalage de +0,30 m. Cette observation peut s'expliquer par la localisation dans le secteur d'un dôme piézométrique où les eaux s'écoulent vers le bassin de Thiaroye et vers le Sud.

Les erreurs de calage sont réduites au minimum sur le reste des points témoins, choisis dans différents secteurs. Ces données obtenues sur les erreurs de calage, peuvent déterminer la fiabilité des résultats de la calibration.

La validation des résultats de simulation en régime transitoire est également basée sur l'analyse des paramètres donnés dans l'étude statistique des erreurs de calibration. Ces paramètres sont définis par l'erreur moyenne donnée sur les points témoins (ME) et le coefficient de corrélation entre les charges mesurées et calculées (R^2) (GOMBOSO & al., 1997):

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - \hat{h}_i) \quad (57)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \hat{h}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h}_i)^2} \quad (58)$$

- N = Le nombre de mailles, sans les mailles définies sur les limites.
 \bar{h}_i = Charge mesurée sur chaque maille
 h_i = Charge calculée sur chaque maille
 \bar{h} = Moyenne des charges mesurées

L'erreur moyenne obtenue sur les charges calculées est de -0,01 m et le coefficient R^2 est de 0,98. Ces valeurs déterminent également la représentativité des résultats du calage.

5.6.2 Bilan hydrique

Le programme PM3 nous a permis d'établir le bilan global des débits obtenus en fin de calage, mais également le bilan sur des zones sélectionnées. Le bilan global de la nappe se présente comme suit:

Tableau 25: Bilan global des débits sur la nappe

TERME DU BILAN	DEBIT (m ³ /j)		
	ENTREES	SORTIES	ENT - SORT
Emmagasinement	1 253	6 021	-4 688
Apport aux limites	117	23 700	-23 582
Forages, puits	0	20 083	-20 083
Recharge	48 348	0	48 348
Total	49 719	49 805	-85,72

Les débits prélevés sur la nappe regroupent les prélèvements au niveau des forages, mais également au niveau des puits villageois. L'examen des termes du bilan montre que les pertes aux limites océaniques (exutoire naturel du réservoir) sont très importantes et évaluées à 23 700 m³/j. Le déficit observé sur les débits sortant et entrant dans le système (86 m³/j) est très faible, pour entraîner une baisse significative de la piézométrie. Ce qui pourrait expliquer l'évolution piézométrique, observée de 1976 à 1997 avec les niveaux de la nappe qui sont relativement stables ou même en remontée dans certains secteurs. Comparé au bilan global du régime permanent le total des débits sortant passe de 44 013 à 49 805 m³/j, ce qui montre que l'évolution des débits n'est pas très significative.

Les zones de Thiaroye, Mbeubeuss et le secteur Sud-Est depuis Kounone jusqu'à Golam ont été choisis pour calculer le bilan des débits. Les termes du bilan sont consignés sur les différents tableaux présentés ci-dessous:

Tableau. 26: Bilan des débits calculés dans la zone deThiaroye

TERMES DU BILAN	DEBIT (m ³ /j)		
	ENTREES	SORTIES	ENT - SORT.
Emmagasinement	250	70	180
Apport aux limites	117	9 481	-9 363
Echanges Horizontales	1 096	385	711
Echanges (UPPER)	0	0	0
Echanges (LOWER)	0	0	0
Forages, puits	0	8 405	-8 405
Recharge	16 877	0	-16 877
Total	18 342	18 342	0,15

Tableau 27: Bilan des débits calculés dans la zone de Mbeubeuss

TERMES DU BILAN	DEBIT (m ³ /j)		
	ENTREES	SORTIES	ENT - SORT
Emmagasinement	0	94	-94
Apport aux limites	0	0	0
Echanges Horizontales	881	942	-61
Echanges (UPPER)	0	0	0
Echanges (LOWER)	0	0	0
Forages, puits	0	0	0
ET(NIAYES)	0	1 400	-1 400
Recharge	155	0	+155
Total	1 036	2 436	-1 400

Tableau 28: Bilan des débits calculés dans le Sud-Est du système de KOUNONE à GOLAM

TERMES DU BILAN	DEBIT (m ³ /j)		
	ENTREES	SORTIES	ENT - SORT
Emmagasinement	45	3,760	-3 715
Apport aux limites	0	0	0
Echanges Horizontales	116	2 938	-2 822
Echanges (UPPER)	0	0	0
Echanges (LOWER)	0	0	0
Forages, puits	0	711	-711
Recharge	7 249	0	7 249
Total	7 410	7 410	-0,15

Si l'on considère les résultats obtenus sur le bilan des débits dans la zone de Thiaroye, on voit que les recharges dans cette zone sont estimées à $16\,877\text{ m}^3/\text{j}$ soit 35% de la recharge totale pour restituer une piézométrie représentative de l'état de référence. Ceci nous permet de conclure que l'essentiel de la recharge sur la nappe des sables quaternaires de Thiaroye s'effectue dans ce secteur.

Dans la zone de Mbeubeuss, l'analyse des débits montre que le bilan de la nappe est régi essentiellement par l'évapotranspiration dans cette zone de Niayes. Cette perte est estimée à environ $1\,400\text{ m}^3/\text{j}$ soit 70 % du débit total.

L'analyse des paramètres du bilan donnés sur la zone Sud-Est de Kounone à Golam nous donne un équilibre parfait des débits entrant et sortant, ce qui n'est pas conforme avec la baisse de la nappe observée dans ce secteur. Cette observation nous laisse dire que dans cette zone à forte activité agricole (Cf. Carte d'occupation des sols), les prélèvements sur la nappe estimés à $120\text{ m}^3/\text{km}^2/\text{j}$ sont sous-estimés.

5.7 Conclusion sur le régime transitoire

La simulation de l'évolution de la nappe au cours des 26 dernières années (1971-1997) nous a permis de restituer une piézométrie tout à fait représentative de l'état de référence, et la superposition des cartes piézométriques calculées et mesurées de 1997 est satisfaisante. Les courbes d'évolution piézométrique sur les points témoins donnent des fluctuations bien concordantes avec celles observées sur le terrain. Les erreurs de calage observées sur ces points témoins sont très réduites.

Les termes du bilan donnés dans le secteur de Thiaroye montrent une importante recharge dans la zone soit 35% de la recharge totale.

Le bilan global des débits calculés sur la nappe, révèle que les pertes aux limites correspondant aux écoulements vers la mer sont importantes et sont de même ordre de grandeur que les débits soutirés pour l'alimentation en eau potable de la ville de Dakar et pour les besoins ruraux. Le déficit de l'ordre de $86\text{ m}^3/\text{j}$ sur le bilan est très faible et ne devrait pas engendrer une baisse significative du niveau de la nappe. Les résultats du calage obtenus dans certains secteurs notamment ruraux montrent les difficultés d'estimer les débits prélevés sur la nappe pour les besoins humains et agricoles. Les termes du bilan n'ont pas beaucoup évolué comparés au régime permanent. Ceci peut expliquer le niveau de la nappe qui est resté relativement stable durant cette période.

Le calage du modèle en régime transitoire a permis d'introduire un paramètre d'entrée généré dans le SIG qui est la recharge. Les valeurs obtenues sont régionalisées sur l'ensemble du domaine du modèle. Les résultats du calage sur la distribution des charges calculées, comparés à ceux du régime permanent montrent que le traitement des données dans le Système d'Information Géographique permet une reproduction beaucoup plus correcte du schéma de fonctionnement du système aquifère. Ce schéma fonctionnel de la nappe est caractérisé par des dômes piézométriques qui sont des zones de recharge et des dépressions piézométriques dans les zones de captage et au niveau des Niayes et lacs où la nappe s'épuise par évaporation.

6. SIMULATION DE L'ARRÊT DES POMPAGES DANS LA ZONE DE THIAROYE

6.1 Définition du problème

Les résultats obtenus sur le calage du modèle en régime transitoire ont donné l'état stationnaire de la nappe de Thiaroye en 1997 et l'évolution piézométrique sur des points témoins choisis dans différents secteurs.

Lors des études antérieures sur modèle mathématique, il s'était posé un certain nombre de questions concernant les potentialités de la nappe, les risques de contamination par intrusion d'eau de mer, et les conséquences d'un arrêt de pompage dans la zone d'exploitation de Thiaroye.

Par rapport à l'état de contamination de la nappe par les nitrates, révélé par les résultats de cette présente étude et qui met en cause son utilisation future dans l'alimentation en eau potable de la ville de Dakar, nous reprenons essentiellement dans ce chapitre le problème déjà posé. Il s'agit de simuler un arrêt des pompages durant les prochaines années dans le centre de captage de Thiaroye.

6.2 Le cas d'exploitation envisagé

Le bilan des débits obtenu dans le calage du modèle en régime permanent et transitoire montre le schéma hydrodynamique du système aquifère. Les résultats du régime transitoire montrent une perte considérable vers la mer estimée à 23 700 m³/j et que l'alimentation de la nappe est essentiellement assurée par les eaux de pluie après reprise évaporatoire. Ainsi dans le cas d'exploitation envisagé nous imposons comme conditions climatiques futures celles qui sont observées actuellement, avec une pluviométrie déficitaire inférieure à la moyenne donnée au cours de ces dernières années estimée à 357 mm/an. Les Niayes et les lacs localisés dans le domaine du modèle sont toujours considérés comme des zones d'évaporation. Selon ces conditions définies, nous allons simuler l'arrêt des pompages jusqu'en 2010.

6.3 Les résultats des simulations

Les résultats obtenus sur 13 ans d'arrêt de pompage (1997-2010) sont donnés sur la carte piézométrique de la figure 87 et les courbes d'évolution piézométrique sur des points témoins choisis dans différents secteurs (Fig.88).

L'évolution de la piézométrie observée sur les différents points témoins reflète bien l'état stationnaire de la nappe obtenu à la fin des simulations. On observe des rabattements et des remontées du niveau de la nappe selon les secteurs considérés.

Pour étudier l'évolution de la nappe dans le secteur de Thiaroye, on a considéré les piézomètres P2-1, P2-2, P3-2, P2-5 localisés dans la zone. Les courbes d'évolution piézométriques obtenues sur ces points mettent en évidence les faits suivants:

- Au niveau du piézomètre P3-2 à l'endroit des forages d'exploitation, l'arrêt des pompages entraîne une remontée du niveau de la nappe de l'ordre de 2 à 3 m. Ceci nous fait dire qu'il existe des risques d'inondation si l'on considère que dans le bassin de Thiaroye la profondeur de la nappe par rapport au sol est inférieure à 5 m.

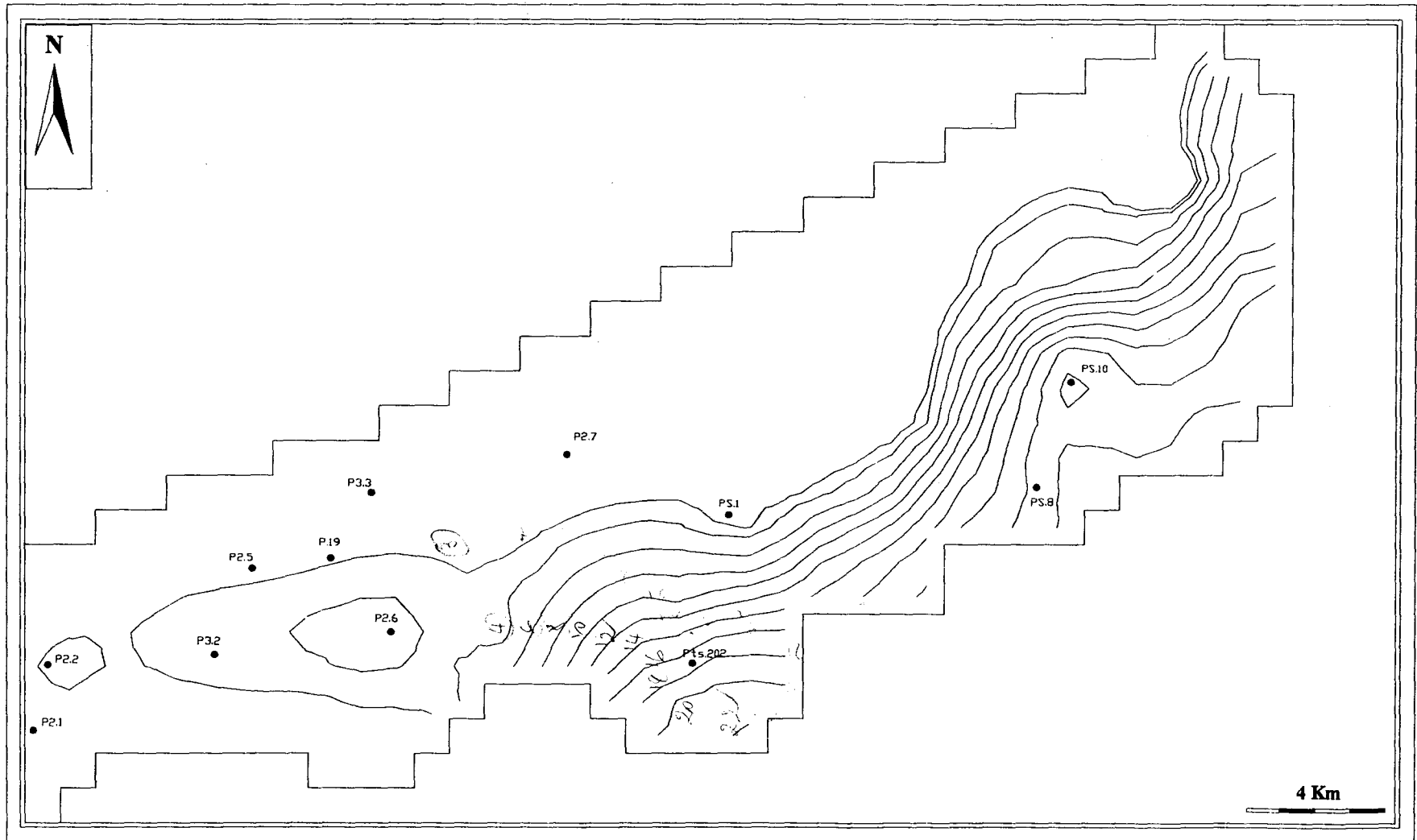
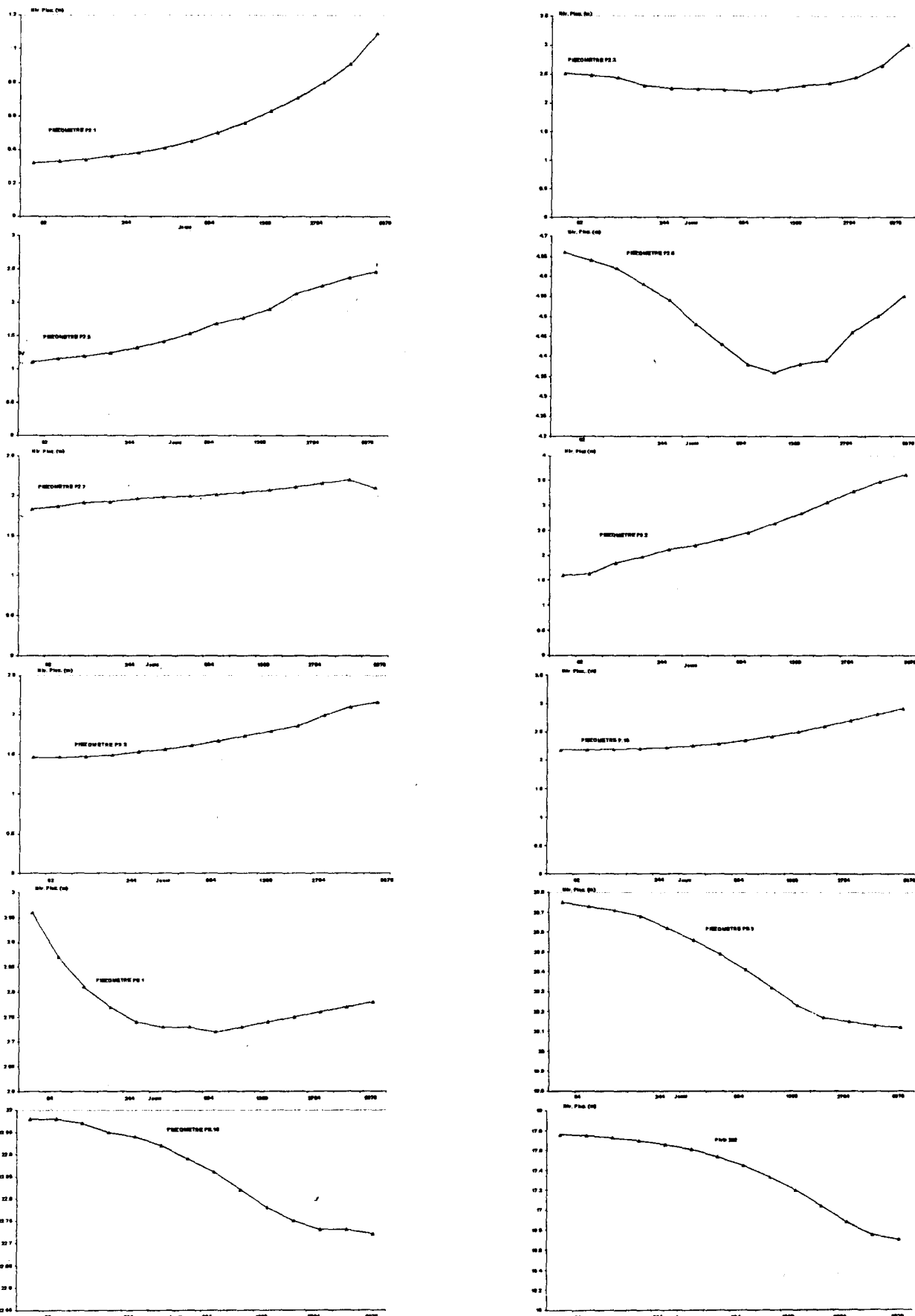


Fig.87: Carte piézométrique calculée à l'an 2010 après un arrêt des pompages dans le centre de captage de Thiaroye.

- Charges piézométriques calculées
- Points témoins

Fig. 88: Evolution piézométrique de la nappe sur quelques points témoins après l'arrêt des pompages dans le centre de captage de Thiaroye (1997-2010)



- L'arrêt des pompages dans la zone de Thiaroye est ressenti au Sud-Ouest jusqu'à la Patte d'Oie sur le piézomètre P2-1, où la remontée de la nappe est d'environ 1 m. Au Nord-Est dans les Niayes de Malika, l'évolution piézométrique observée montre une remontée des niveaux d'environ 1,5 m au piézomètre P2-5; 0,80 m au point P.19 et 0,60 m au point P3-3.
- La courbe piézométrique obtenue sur le point P2-2 fait apparaître un affaissement du dôme piézométrique centré dans ce secteur. Cette observation est également valable pour la crête piézométrique centrée au point P2-6 à Boun, où le rabattement de la nappe est beaucoup plus importante. Ce dôme piézométrique tend à se déplacer dans la zone de Thiaroye.
- L'arrêt des pompages est moins sensible dans la zone de Tivaouane Peulh au piézomètre P2-7. L'évolution de la piézométrie obtenue sur ce point montre que la nappe est relativement stable dans ce secteur.
- L'arrêt des pompages n'a aucune influence sur l'évolution de la piézométrie sur tous les piézomètres situés au delà de cette zone dans le secteur Sud-Est de la nappe. Sinon les conditions climatiques actuelles imposées avec un déficit pluviométrique ont entraîné une baisse de la nappe. Les rabattements observés varient de 0,20 m à Sangalkam à 1,5 m dans le secteur de Kounone.

Le bilan des débits obtenus dans la zone de Thiaroye et le débit global de la nappe sont donnés sur les tableaux ci-dessous:

Tableau 29: Bilan des débits calculés dans la zone de Thiaroye

TERMES DU BILAN	DEBIT (m ³ /j)		
	ENTREES	SORTIES	ENT - SORT
Emmagasinement	0	1 139	-1 139
Apport aux limites	0	9 177	-9 177
Echanges Horizontales	1 200	6 790	-5 590
Echanges (UPPER)	0	0	0
Echanges (LOWER)	0	0	0
Forages, puits	0	0	0
Recharge	16 303	0	16 303
Total	17 503	17 106	397

Tableau 30: Bilan global des débits sur la nappe

TERMES DU BILAN	DEBIT (m ³ /j)		
	ENTREES	SORTIES	ENT - SORT
Emmagasinement	889	7 611	-6 722
Apport aux limites	0	30 560	-30 560
Forages, puits	0	11 678	-11 678
Recharge	49 120	0	49 120
Total	50 009	49 849	-160

Le bilan des débits obtenus dans la zone de Thiaroye montre un léger excédent estimé à $397 \text{ m}^3/\text{j}$. Ceci peut expliquer la remontée du niveau de la nappe observée dans la zone. Cependant, les échanges horizontales font voir des pertes importantes du bassin de Thiaroye vers le secteur Est du système, dues à la limite imperméable imposée dans la zone Ouest. Ces débits ont beaucoup évolué de 1997 à 2010 et passent de 385 à $6\,790 \text{ m}^3/\text{j}$. Cette observation explique l'affaissement du dôme piézométrique centré sur le point P2-6. La limite imperméable imposée dans notre calage dans la zone Ouest de Thiaroye pourrait avoir tendance à surestimer la remontée du niveau de la nappe à Thiaroye.

Le bilan global des débits obtenu sur la nappe montre une importante perte vers la mer qui passe de $23\,700 \text{ m}^3/\text{j}$ en 1997 à $30\,560 \text{ m}^3/\text{j}$ en 2010 avec l'arrêt des pompages à Thiaroye et les apports aux limites s'annulent.

Le léger déficit de l'ordre de $160 \text{ m}^3/\text{j}$ devrait pas créer une baisse si importante estimée à $1,5 \text{ m}$ dans le secteur de Kounone au point Pts. 202.

6.4 Conclusion sur les simulations de l'arrêt des pompages dans la zone de Thiaroye

A partir des résultats obtenus on peut conclure que l'arrêt total des pompages dans le centre de captage de Thiaroye avec les conditions climatiques actuelles provoque une remontée de la nappe dans un secteur défini de la Patte d'Oie au Sud-Ouest jusqu'à Tivaouane Peulh à l'Est du bassin de Thiaroye. La remontée des niveaux peut atteindre 3 m maximum à l'endroit des forages de Thiaroye. Compte tenu de la profondeur de la nappe qui est inférieure à 5 m dans ce secteur, une remontée des niveaux piézométriques risque d'inonder toute la zone. On observera également une extension des Niayes de Malika, où la remontée est estimée à $1,5 \text{ m}$ maximum. S'il fallait arrêter complètement l'exploitation des forages dans la zone de Thiaroye, nous conseillons d'augmenter les débits d'exhaure des forages F.1 et F.2 dans le centre de Beer Thialane vue la perte considérable vers cette zone estimée à $6\,700 \text{ m}^3/\text{j}$ (Tableau 26). Ce qui correspond aux écoulements du bassin versant de Thiaroye vers le secteur Est de la nappe.

Au delà du piezomètre P2-7 à Tivaouane Peulh dans l'Est du système, l'arrêt des pompages dans la zone de Thiaroye n'a aucune influence sur l'évolution des niveaux piézométriques. On observe plutôt un rabattement de la nappe dû aux conditions climatiques imposées avec une pluviométrie déficitaire.

III. DETERMINATION DE LA VULNERABILITE DU SYSTEME AQUIFERE DE THIAROYE A LA CONTAMINATION PAR LES NITRATES SUR LA BASE D'UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION

Outre leur application dans l'élaboration des modèles hydrogéologiques, les techniques des Systèmes d'Informations Géographiques sont particulièrement sollicitées dans la gestion environnementale globale pour définir des schémas de protection des eaux souterraines. L'application des SIG permet d'élaborer une cartographie thématique qui intègre tous les éléments déterminants, pour établir la vulnérabilité des systèmes aquifères à la pollution. D'après FOSTER (1985), in ROBINS & al., (1994) ce concept de vulnérabilité est défini selon:

- a). Le degré d'inaccessibilité de la zone saturée au sens hydraulique, à la pénétration verticale de polluants provenant de la surface.
- b). La capacité d'atténuation du polluant par les unités stratigraphiques recouvrant la zone saturée, par des processus physico-chimiques de rétention.

Cette définition sera d'ailleurs reprise plus tard par FOSTER & HIRATA (1988), ADAMS & FOSTER (1992), NRA (1992) qui prendront en compte non seulement les propriétés intrinsèques de la zone non saturée, mais également les conditions hydrogéologiques et les risques de pollution à partir de la surface liés à l'activité-humaine.

Nous avons développé dans le chapitre (III. D) une cartographie thématique relative aux différentes données obtenues sur la zone de Thiaroye. Cette cartographie concerne d'abord les données géographiques définies surtout par la carte d'occupation des sols obtenue à partir de l'image satellitaire SPOT (XS + P) datée du 23.12. 1995 et la carte de typologie des sols. Les données hydrogéologiques de cette étude relatives à la piézométrie, à la profondeur des eaux par rapport au sol, aux taux d'infiltration, aux valeurs de perméabilité et à l'extension de la pollution par les nitrates sur la nappe sont également cartographiées.

Ces informations sont introduites dans le SIG, et vont permettre l'analyse de la vulnérabilité des eaux à la contamination par les nitrates et d'élaborer la carte de sensibilité de la nappe à cette contamination.

2. DETERMINATION DES SOURCES DE POLLUTION DE LA NAPPE

La carte d'occupation des sols (Fig.65) nous a permis de définir les différentes unités, qui sont susceptibles d'être des sources de pollution de la nappe selon la méthode proposée par KLIMA (1995 et 1996), TESORIERO & VOSS (1997).

L'étude de la contamination des eaux par les nitrates de la nappe de Thiaroye développée au chapitre (II. 3.3) avait montré que le niveau de pollution des eaux était lié à la pression anthropique sur celle-ci (Fig.55). Cette observation explique pourquoi dans la détermination des sources de pollution sur la base de la carte d'occupation des sols, nous avons différencié une zone d'habitation avec deux types d'habitat urbain et rural, un réseau routier et le dépotoir de Mbeubeuss.

2.1 Les zones d'habitation

Pour caractériser l'habitation dans la zone de Thiaroye, on a défini:

2.1.1 Une zone d'agglomération

Elle est caractérisée par la zone urbaine, et compte aujourd'hui une population estimée à plus de 1 000 000 d'hts avec une forte densité d'environ 4 000 hts/km². La zone d'agglomération englobe les secteurs de Thiaroye, Pikine, Guédiawaye, Parcelles, Malika, Boun, Keur Massar, Yeumbeul. L'habitat "informel" s'est considérablement développé dans ce secteur au cours des dernières années. L'urbanisation rapide a pour conséquence un manque d'assainissement du secteur, avec une construction anarchique des fosses septiques. Le manque de réseaux de canalisation d'eaux usées conduit les populations à verser directement sur le sol ses eaux usées domestiques. Cette zone d'agglomération est également très mal desservie en terme d'adduction d'eau, ce qui entraîne une utilisation considérable des eaux de puits dans ce secteur.

2.1.2 Les villages et communautés rurales

Ces zones d'habitation caractérisent la zone rurale. La pression anthropique sur la nappe y est moins importante comparée à la zone urbaine. La population dans ce secteur est aujourd'hui estimée à près de 700 000 hts avec une densité d'environ 600 hts/km². Cette zone est marquée par une activité maraîchère très développée liée à la présence des Niayes. L'alimentation en eau des populations rurales, pour les besoins agricoles et humains est assurée en grande partie par les puits villageois.

2.2 Le réseau routier

Ce réseau est également très distinct dans les deux secteurs.

Dans la zone rurale on a un axe routier principal reliant Keur Massar à Ndékhirat et Kounone-Mbayakh-Kayar puis Mbayakh-Djender. La représentation dans le SIG des données d'occupation des sols dans la zone de Thiaroye montre que c'est autour de cet axe que se développent principalement les activités maraîchères. A ce réseau principal, s'ajoutent les pistes ou routes secondaires qui relient les différents villages d'une part et les localités à la route principale, d'autre part.

Dans la zone d'agglomération urbaine le réseau est beaucoup plus dense, notamment avec la route Nationale I, reliant Dakar à l'intérieur du pays. On a surtout noté un réseau très dense dans les secteurs de Thiaroye, Pikine, Guédiawaye, Parcelles, Yeumbeul, Malika et Boune.

2.3 Le dépotoir de MBeubeuss

Il est localisé dans la zone de dépression du lac Mbeubeuss et représente le dépotoir de l'agglomération dakaroise. Seul le piézomètre P3-3 est localisé dans cette zone, ce qui fait qu'on ne dispose pas d'assez d'informations sur la nappe dans ce secteur. Ainsi, on ne peut pas établir une étude corrélative fiable entre la qualité des eaux souterraines et cette unité d'occupation des sols. Cette zone n'a pas été considérée dans l'étude de la vulnérabilité du système aquifère à la contamination par les nitrates.

Ces trois différentes unités d'occupation des sols identifiées dans la zone d'étude peuvent définir les sources de contamination des eaux souterraines dans le secteur. Le manque d'assainissement dans la zone d'agglomération urbaine conduisant le dépôt de matières fécales sur le sol par les populations détermine des sources de pollution de la nappe. Le réseau routier dans ce secteur n'est également pas doté de système de canalisation suffisant qui pourrait évacuer les eaux usées du réseau après les pluies.

3. DEFINITION DES CONDITIONS GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

3.1 Les conditions géologiques

La synthèse géologique donnée dans la première partie du texte, décrit les séries sédimentaires quaternaires contenant les sables aquifères de Thiaroye. Le système aquifère est libre sur toute sa surface et constitué de dépôts essentiellement sableux qui reposent sur un substratum marneux éocène. Les dépôts sableux sont de nature très différente. On distingue des sables gréseux, des alluvions graveleuses et par endroit de rares formations argileuses ne dépassant pas 1 m. Les sols présentent de bonnes perméabilités ce qui peut faciliter l'infiltration des eaux de surface.

3.2 Conditions hydrogéologiques

3.2.1 L'hydrodynamisme

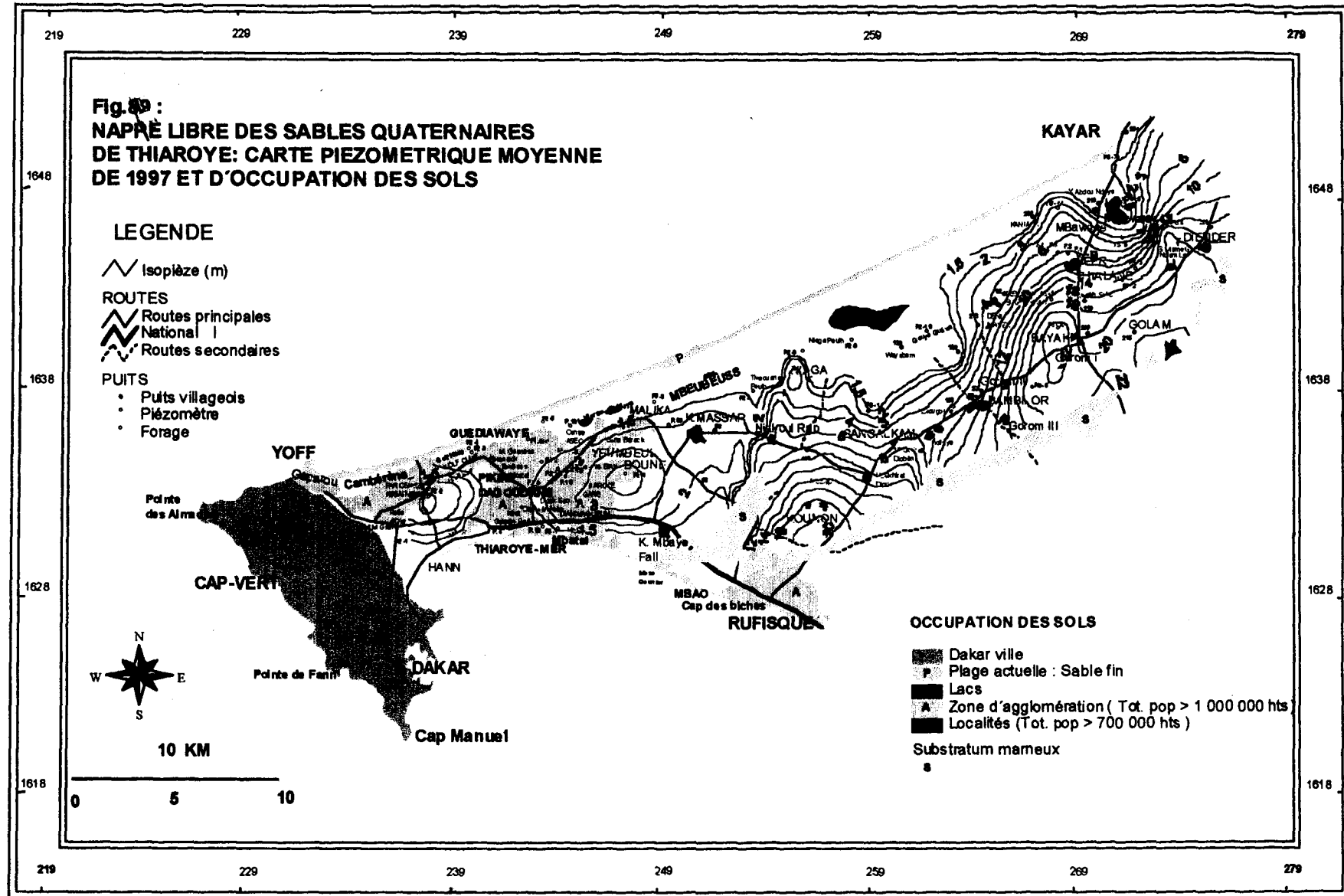
La carte piézométrique du système aquifère, qui représente l'état stationnaire de la nappe en 1997 a été intégrée dans le SIG. La figure 89 donne la piézométrie de la nappe en rapport avec les types d'occupation de sols. La zone d'agglomération correspondant au bassin versant de Thiaroye est marquée par une dépression piézométrique. Cette zone de dépression est encadrée par des dômes piézométriques centrés aux points P2-6 à Boun et P2-2 au niveau des Parcelles Assainies.

Dans l'Est du bassin de Thiaroye et au Nord-Est du système aquifère, la surface piézométrique est plane dans les secteurs du lac Retba, et les localités de Sangalkam à Dèni Biram Ndaw.

Seul le Sud-Est de la nappe avec la remontée du substratum marneux, présente de forts gradients hydrauliques qui varient de 0,4 à 1%. Ceci est lié à la structure de la nappe avec une présence de faciès argileux. Par rapport à l'occupation des sols, l'hydrodynamisme de la nappe dans ce secteur correspond à l'axe routier reliant Kounone à Mbayakh-Kayar et Mbayakh-Djender. Les écoulements s'effectuent du Sud vers le Nord.

Au Nord-Est du système, le dôme piézométrique isolant le système hydraulique de Thiaroye au système aquifère du littoral nord correspond aux localités de Diender et Kayar.

Il ressort de ce schéma hydrodynamique de la nappe de Thiaroye que dans les zones caractérisées par des sources de pollution englobant la zone d'agglomération de Thiaroye et les localités dans les secteurs de Keur Massar à Dèni Birame Ndao, la nappe est relativement plane. Les gradients hydrauliques calculés sont faibles et varient de 0,01 à 0,06%.



3.2.2 La profondeur des eaux par rapport au sol

L'épaisseur de la zone non saturée est donnée par la carte de profondeur de la nappe phréatique par rapport au sol. La superposition sur cette carte des informations relatives à l'occupation des sols (Fig.90) permet de faire les observations suivantes:

-Dans la zone d'agglomération urbaine, la profondeur de la nappe est généralement inférieure à 6 mètres. Elle est estimée à 3,68 m dans la zone de Pikine Dagoudane, 3,30 m à Thiaroye sur mer, 6,01 à Yeumbeul et Boun, 5,67m au point P2-4.

-Dans les zones rurales, les profondeurs maximales sont observées dans le secteur de Diender à Beer Thialane où elles varient de 8 à plus de 15,60 mètres.

En conséquence le système aquifère de Thiaroye est une nappe relativement superficielle en zone urbaine où le système d'assainissement est précaire. Ce facteur augmente les risques de pollution de la nappe.

4. TYPOLOGIE DES SOLS

Les résultats obtenus sur la cartographie de la typologie des sols dans la presqu'île du Cap-Vert ont été présentés sur la figure 74. Les sols présentent des textures essentiellement sableuses avec des formations sableuses littorales, des sols des cordons, et dunes du littoral. La typologie des sols en rapport avec l'occupation des sols et l'épaisseur de la zone non saturée est donnée à la figure 91. On distingue:

4.1 Les sols ferrugineux tropicaux

Ce sont ces types de sols qui caractérisent la zone d'agglomération de Thiaroye, Dagoudane Pikine de la Patte d'Oie à Boun et les localités situées au Nord-Est du système à Mbayakh, Beer Thialane, Golam et Diender. Ces sols de texture sableuse présentent des taux d'argile inférieurs à 3 %. Les informations relatives à l'épaisseur de la zone non saturée montrent que ces sols ne dépassent pas 6 m dans ce secteur. La profondeur des eaux est estimée à 3,68 m dans la zone de Dagoudane Pikine, 3,38 m à Thiaroye sur mer et 6,01 à Boun.

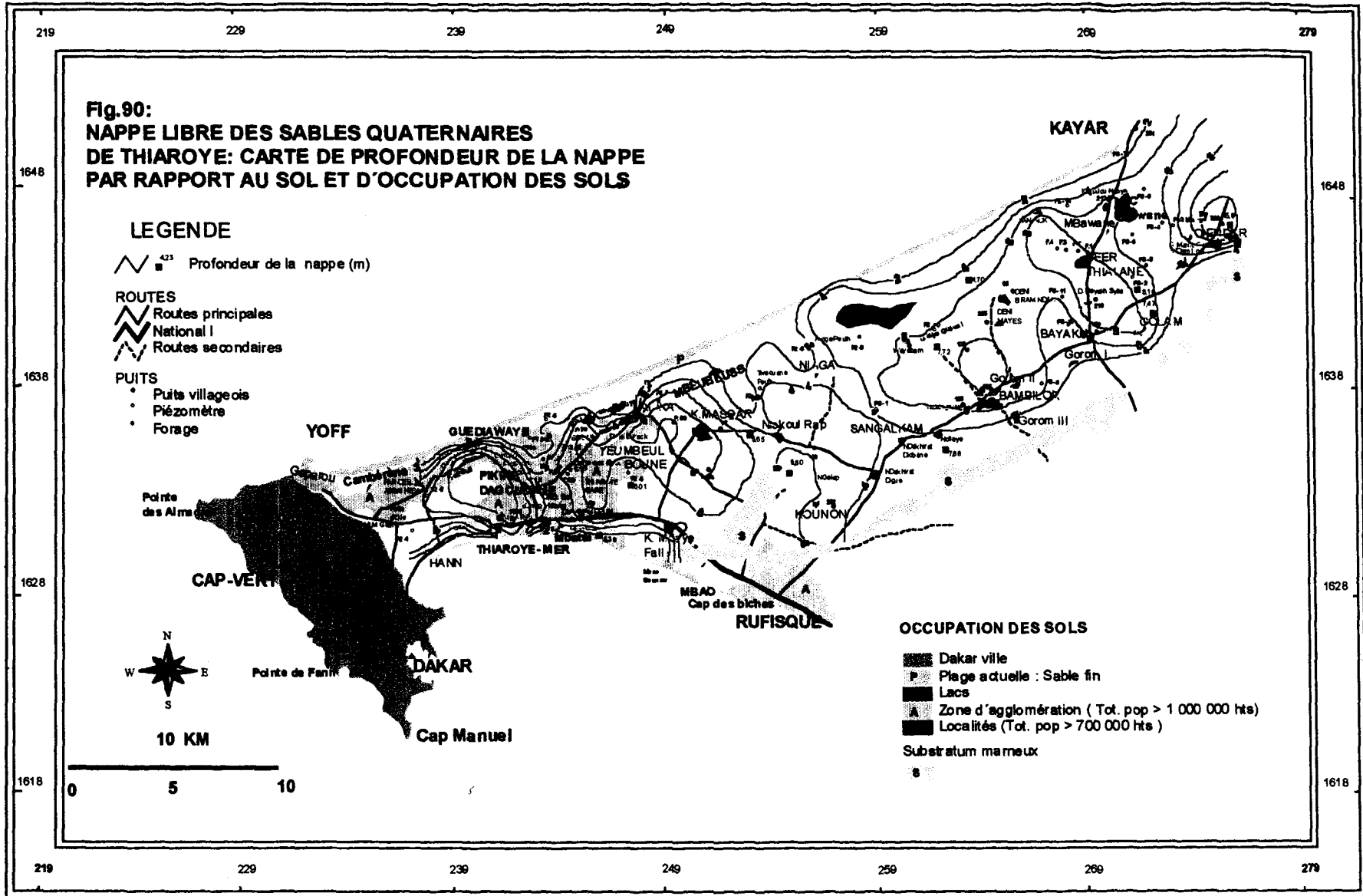
L'épaisseur des sols ferrugineux tropicaux dans la zone Nord-Est de la nappe à Beer Thialane, Golam et Diender est assez importante et estimée à 15,60 m à Diender.

Ces résultats obtenus montrent que dans la zone d'agglomération les informations relatives aux types de sol et à l'épaisseur de la zone non saturée donnent des facteurs qui pourraient faciliter l'infiltration des eaux polluantes de surface dans cette zone d'habitation déterminée par des sources de pollution de la nappe.

Dans les localités situées au Nord-Est du système, l'épaisseur des sols ferrugineux tropicaux estimée à plus de 15 m pourrait être un facteur limitant l'infiltration des eaux polluantes de surface.

4.2 Les dunes littorales

Ce sont des sols minéraux qui présentent une texture essentiellement sableuse avec des sables quartzueux fins. Ils sont formés de grain de quartz et de coquilles calcaires. Ces sols caractérisent la plage de Yoff à Kayar, le Nord-Est du système à Kaniack et la zone du lac Tanma, les dépôts du lac Retba et de Mbeubeuss à Malika.



**FIG.91:
CARTE DE TYPOLOGIE DES SOLS EN RAPPORT
AVEC LA PROFONDEUR DE LA NAPPE
ET L'OCCUPATION DES SOLS**

LEGENDE :

OCCUPATION DES SOLS

▭ A LIMITE DE LA ZONE D'AGGLOMERATION

▭ LOCALITES

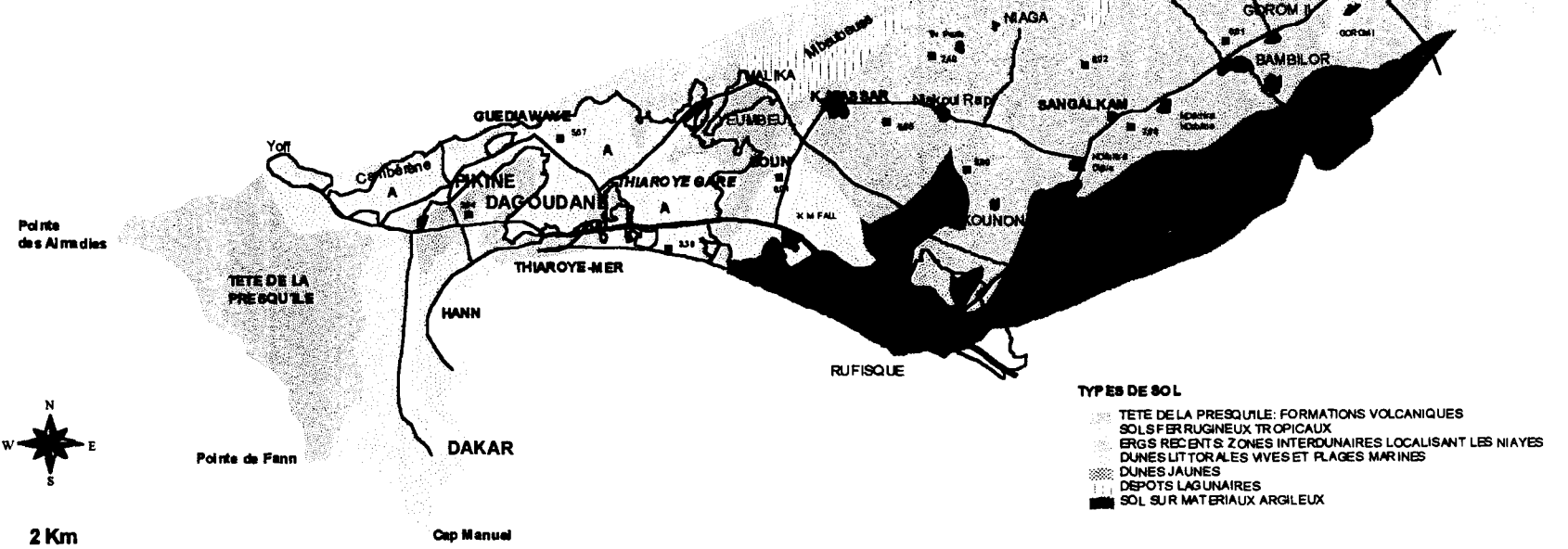
ROUTES

▬ ROUTE PRINCIPALE

▬ NATIONAL

▬ ROUTE SECONDAIRE

■ 470 PROFONDEUR DE LA NAPPE (m)



TYPES DE SOL

- ▨ TETE DE LA PRESQU'ILE: FORMATIONS VOLCANIQUES
- ▨ SOLS FER RUGINEUX TROPICAUX
- ▨ ERGS RECENTS ZONES INTERDUNAIRES LOCALISANT LES NIAYES
- ▨ DUNES LITTORALES VIVES ET PLAGES MARINES
- ▨ DUNES JAUNES
- ▨ DEPOTS LAGUNAIRE
- ▨ SOL SUR MATERIAUX ARGILEUX

En rapport avec l'occupation des sols, ces types de sols caractérisent les zones dunaires qui sont inhabitées. Ceci confère à l'aquifère une faible vulnérabilité à la contamination anthropique même si la texture sableuse des sols et les faibles épaisseurs de la zone non saturée dans ces secteurs sont des facteurs qui favorisent l'infiltration des eaux polluantes de surface.

4.3 Les sols des zones interdunaires

Ils recouvrent l'ensemble des localités au Nord-Est de Thiaroye, englobant Keur Massar, Niakoul Rap, Kounone, Sangalkam, Bambilor et Gorom. Les sols des zones interdunaires sont formés des "Tan" mais également des sols des Niayes dans la zone de Malika, Pikine et Mbawane.

Ces types de sols sont de texture argilo-sableuse. Ces sables vaseux présentent des taux d'argile importants qui peuvent atteindre jusqu'à 25 %.

L'épaisseur de la zone non saturée est plus importante dans ces secteurs. Elle varie de 7 m dans les secteurs de Bambilor, Gorom à 9 m dans la zone de Kounone.

4.4 Les sols sur matériaux argileux

Ces sols sont localisés dans le secteur Sud-Est de la nappe. Ils sont de nature très différentes. Ils correspondent à la remontée du substratum marneux.

Les sols des zones interdunaires recouvrent en majorité les villages et localités où la nappe est également fortement contaminée. Ces sols caractérisés par les Niayes ou les ergs récents présentent des taux d'argile relativement importants qui peuvent atteindre 30%. Les données relatives à l'épaisseur de ces formations montrent qu'elles sont importantes, comprises entre 7 et 8 m. Ces informations sur la texture et l'épaisseur des sols dans la zone non saturée dans ces secteurs d'habitation ne permettent pas d'expliquer le niveau élevé de contamination des eaux souterraines et révèle une faible vulnérabilité de la nappe à la contamination anthropique. La sensibilité des eaux souterraines à une contamination est ici plutôt liée à l'ouverture du système due à la nature des ouvrages qui sont essentiellement des puits villageois, puisards ou céanes à ciel ouvert.

La texture des sols et leur faible épaisseur données dans la zone d'agglomération de Thiaroye caractérisée par un assainissement précaire et déterminant les sources de pollution de surface avec le dépôt de matières fécales sur le sol, montrent une facilité d'infiltration des contaminants. En conséquence le système aquifère présente une forte sensibilité à la pollution anthropique dans ce secteur. Par rapport à ces mêmes informations et aux sources de pollution identifiées sur la nappe, on peut conclure que la sensibilité est moindre dans les localités et villages et faible dans les zones dunaires.

5. SPATIALISATION DES VALEURS DE PERMEABILITE ET DE RECHARGE

5.1 Les perméabilités

Les résultats du traitement géostatistique des valeurs de perméabilité obtenues sur la nappe de Thiaroye, par pompage d'essai n'ont pas permis une régionalisation des variables sur l'ensemble de la zone d'étude. Pour intégrer les perméabilités dans l'étude de la vulnérabilité du système aquifère à la contamination par les nitrates, on a repris les résultats du modèle pour les valeurs de K (Fig 79). Ces perméabilités obtenues après le calage en régime perma-

ment et transitoire ont été intégrés dans le SIG pour l'étude de la vulnérabilité. Ceci met en évidence (Fig.92).

- De bonnes perméabilités dans la zone de Thiaroye, Niaga, et Beer Thialane qui varient de 1 à $7 \cdot 10^{-4}$ m/s. Ces valeurs de perméabilité caractérisent des zones d'habitation qui définissent les sources de pollution de la nappe. Dans ces zones les meilleures perméabilités estimées à $7 \cdot 10^{-4}$ m/s correspondent aux sols ferrugineux tropicaux dans la zone d'agglomération et à Beer Thialane.
- Les plus fortes valeurs de perméabilités obtenues sont localisées dans le secteur du lac Retba et comprises entre 7 et $11 \cdot 10^{-4}$ m/s. Elles correspondent aux sols des dépôts lagunaires.
- De faibles valeurs de perméabilités comprises entre $0,11 \cdot 10^{-5}$ et $1 \cdot 10^{-4}$ m/s sont localisées dans les zones de Niayes de Pikine, Malika et Mbawane et au Sud-Est du système aquifère. Ces faibles valeurs de perméabilité correspondent aux sols des zones interdunaires des Niayes ou aux sols sur matériaux argileux.

5.2 Les recharges

Les valeurs de recharge considérées dans le SIG pour l'analyse de la vulnérabilité des eaux à la contamination par les nitrates sont celles du calage en régime transitoire. Ces valeurs spatialisées selon les précipitations enregistrées dans les différentes stations météorologiques de la presqu'île du Cap-Vert sont fortement corrigées pour restituer une piézométrie correcte proche de celle mesurée sur le terrain et surtout des erreurs de calage très réduites pouvant atteindre 0,02 m. On distingue (Fig.92):

- Les plus fortes valeurs comprises entre 73 et 80 mm/an sont localisées dans le bassin de Thiaroye à l'Ouest du lac Mbawane. Ces valeurs correspondent aux sols ferrugineux tropicaux qui présentent de bonnes perméabilités estimées à $7 \cdot 10^{-4}$ m/s et aux sols des dunes littorales.
- Dans le Sud-Est du système englobant Kounone, Sangalkam et Bambilor, on a de faibles valeurs de recharge comprises entre 2 et 12 mm/an. Ces valeurs correspondent aux sols interdunaires ou aux sols sur matériaux argileux qui présentent de faibles valeurs de perméabilité comprises entre $0,11 \cdot 10^{-5}$ et $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Par rapport à ces informations relatives aux valeurs de K et des recharges, on peut distinguer dans l'étude de la vulnérabilité des eaux à la contamination par les nitrates une zone de très forte sensibilité dans la zone d'agglomération de Thiaroye. Cette zone est caractérisée par de bonnes perméabilités et des valeurs de recharges élevées. Ces facteurs facilitent l'infiltration des eaux polluées de surface.

Les zones dunaires englobant les secteurs du lac Retba et l'Ouest du lac Mbawane, caractérisées par de fortes perméabilités et des taux recharges élevés, présentent une sensibilité moyenne à la contamination anthropique.

Les faibles valeurs de recharge et de perméabilité obtenues dans le Sud-Est de la nappe dans la zone de Kounone, Sangalkam et Bambilor, déterminent une faible sensibilité à la contamination dans ces secteurs.

**FIG.92:
CARTE DES VALEURS DE PERMEABILITE
ET DE RECHARGE EN RAPPORT
AVEC LES TYPES DE SOL**

LEGENDE:

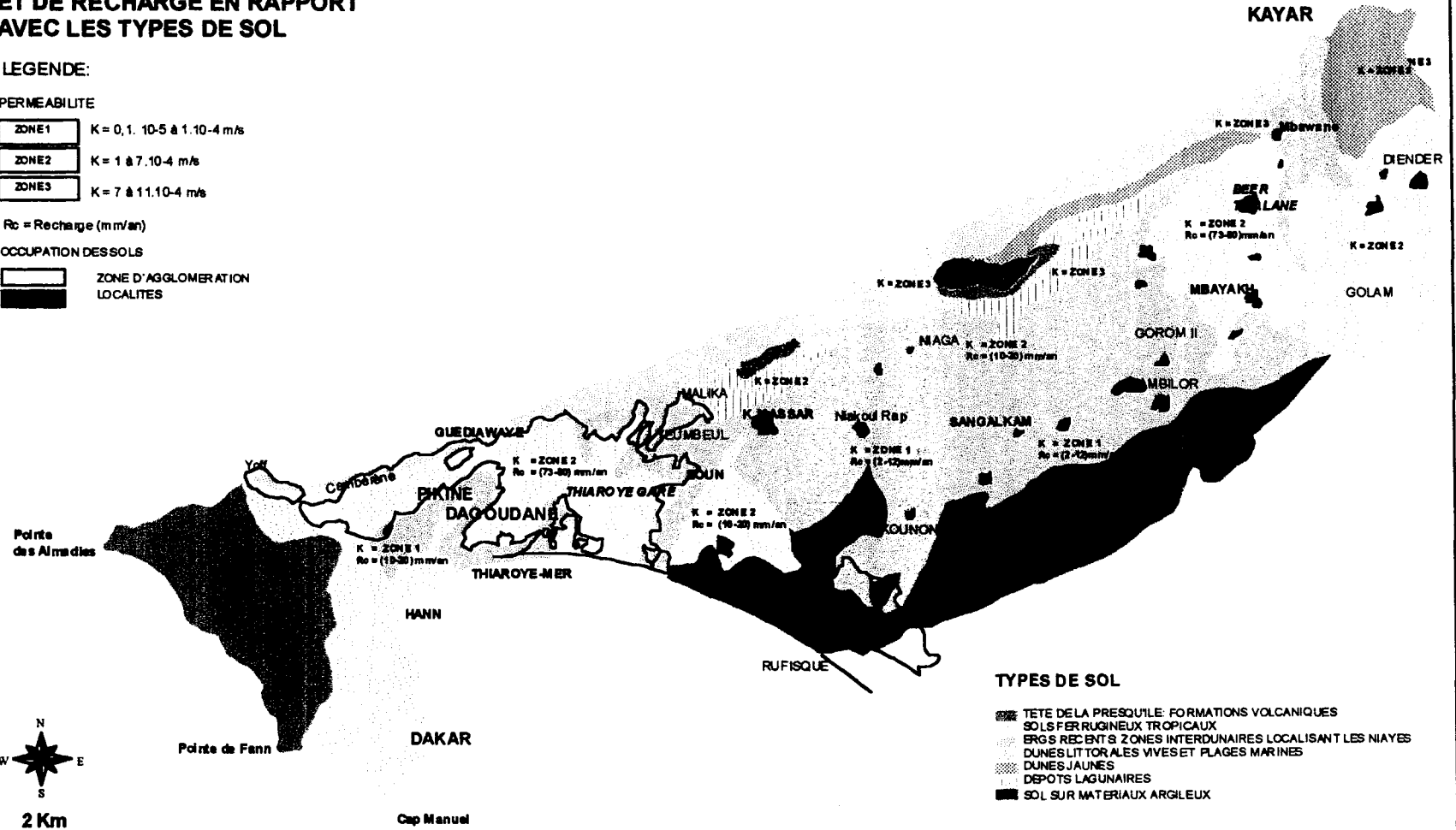
PERMEABILITE

ZONE1	K = 0,1 - 10-5 à 1.10-4 m/s
ZONE2	K = 1 à 7.10-4 m/s
ZONE3	K = 7 à 11.10-4 m/s

Rc = Recharge (mm/an)

OCCUPATION DES SOLS

	ZONE D'AGGLOMERATION
	LOCALITES



TYPES DE SOL

- TETE DE LA PRESQU'ILE: FORMATIONS VOLCANIQUES
- SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX
- ERGS RECENTS ZONES INTERDUNAIRES LOCALISANT LES NIAYES
- DUNES LITTORALES VIVES ET PLAGES MARINES
- DUNES JAUNES
- DEPOTS LAGUNAIRES
- SOL SUR MATERIAUX ARGILEUX



6. LA QUALITE DES EAUX

Pour l'étude de la qualité des eaux dans le système de Thiaroye, des prélèvements et analyses chimiques ont été effectués en juillet et octobre 1997 sur un réseau de points couvrant l'ensemble de la nappe et représentatif des différents types d'occupation de sols. Seule la zone de Mbeubeuss avec le dépotoir de l'agglomération dakaroise n'a pas donné suffisamment d'informations permettant une étude correlative de la qualité des eaux aux types d'occupation de sols définis. Les paramètres physico-chimiques ont été déterminés in-situ.

L'étude hydrochimique a permis une classification des eaux de la nappe et de déterminer l'état actuel de contamination par les nitrates.

6.1 Caractérisation chimique des eaux de la nappe par rapport à l'environnement

L'élaboration de la carte thématique d'occupation des sols donnée à la figure 65 a permis une zonation du domaine d'étude en fonction de l'environnement de surface. Pour étudier la chimie des eaux en fonction de cette zonation, les résultats des analyses chimiques ont été reportés sur des diagrammes de Stiff donnés à la figure 93. On distingue différents groupes d'eaux dans la zone de Thiaroye:

- **ZONE A**

Elle caractérise les eaux de la nappe dans la zone d'agglomération. La représentation graphique de ces eaux montre qu'elles sont fortement contaminées par les nitrates, avec des teneurs comprises entre 150 et 450 mg/l. Ceci met en évidence la contamination anthropique des eaux de la nappe. Cette zone est également caractérisée par la présence de faciès chlorurés.

- **ZONE B**

La qualité des eaux de la zone dunaire est caractérisée par les faciès chlorurées sodiques et potassiques.

- **ZONE C**

Elle correspond au puits villageois. Cette zone est caractérisée par des teneurs élevées en Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} et NO_3^- . On note également dans ce secteur une contamination anthropique très élevée.

- **ZONE D**

Le diagramme de Stiff donne dans ces zones de Niayes des eaux avec de fortes teneurs en Ca^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} .

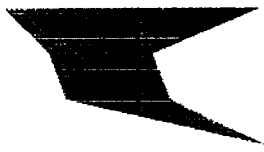
- **ZONE E**

Les résultats des analyses chimiques dans les zones de cultures définies par les activités maraîchères révèlent des eaux sulfatées et calciques. Les fortes teneurs en sulfates dans ces zones peuvent être dues à une contamination par les engrais utilisés dans l'agriculture.

Les très faibles concentrations en nitrates observées, comparées aux zones A et C, laissent penser que dans la nappe de Thiaroye la contamination des eaux par les nitrates est essentiellement anthropique.

Ces résultats confirment les types de faciès observés dans la nappe de Thiaroye et donnés sur le diagramme de Piper (Fig. 53).

Fig. 98: Les types d'eau définis dans l'aquifère de Thiaroye



ZONE A



ZONE B



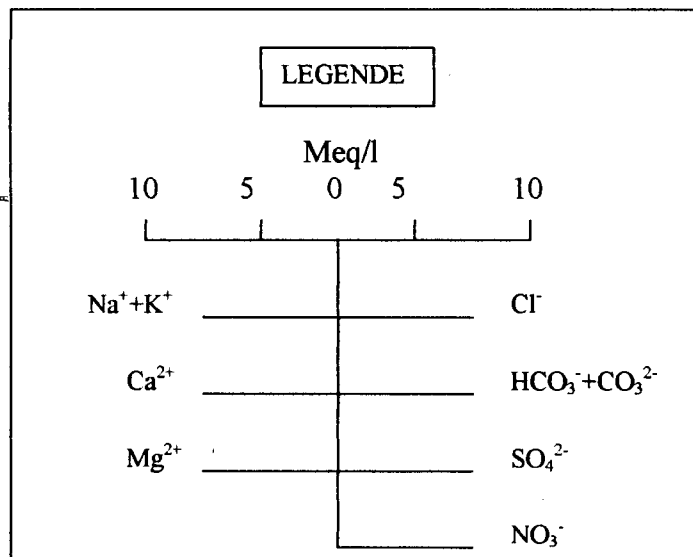
ZONE C



ZONE D



ZONE E



6.2 Analyse statistique

L'analyse statistique des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, température, oxygène dissous) et des concentrations en nitrates (tableau 31) montre une grande variabilité de leur distribution spatiale sur l'aquifère aussi bien en juillet qu'en octobre. Sur ce tableau sont représentées les valeurs de la médiane et de la moyenne arithmétique qui caractérisent cette distribution.

Tableau 31: Analyse statistique de quelques propriétés physiques et chimiques définies sur la nappe en juillet et octobre 1997.

Paramètres		Frequ.	Min	Max	Moyen	Median	Variance	St. Dev
PH	Juil.	50	4,42	7,76	6,31	6,35	0,7	0,83
	Oct.	51	4,15	7,88	6,45	6,39	0,85	0,92
Cond. [μS/cm]	Juil.	50	122	3560	854	674	442810	665
	Oct.	51	139	3190	833	646	376893	613
Temp [°C]	Juil.	51	26,60	31,20	28,85	28,90	0,93	0,96
	Oct.	50	27,20	31,36	28,95	28,80	1,07	1,03
O₂ [mg/l]	Juil.	50	1,1	6,10	3,63	3,75	1,64	1,28
	Oct.	50	2,35	8,34	5,41	5,74	3,03	1,73
NO₃ [mg/l]	Juil.	51	0,30	447,6	90	20,76	18695	136,73
	Oct.	50	0,10	547,5	98	10,50	25999	161,24

Ces résultats montrent pratiquement la même distribution en juillet et octobre. Ils indiquent que les valeurs de température et de pH ont une distribution normale sur la nappe, avec des moyennes arithmétiques qui sont proches des médianes dans les deux cas. Par contre pour les autres paramètres, les conductivités électriques, les teneurs en oxygène dissous et les concentrations en nitrates, la distribution des valeurs est très irrégulière, les médianes étant très différentes des moyennes arithmétiques.

Le caractère de cette distribution est également défini par l'estimation des variances qui caractérisent la distribution autour de la moyenne. Pour les paramètres telles que la conductivité électrique et les teneurs en nitrates, les variances sont très élevées, ce qui montre le caractère aléatoire de leur répartition sur la nappe.

La distribution irrégulière de ces propriétés physiques et chimiques définies sur la nappe en juillet et octobre, donnée par la description statistique semble être liée aux sources de pollution ponctuelles, en rapport avec les types d'occupation de sol.

6.3 Les concentrations en nitrates

La carte de la figure 94 montre la distribution des teneurs en nitrates de la nappe de Thiaroye en relation avec les différents types d'occupation de sol. Elle permet de faire les observations suivantes:

1) Une extension de la pollution nitratée dans les zones d'agglomération urbaine de Pikine, Thiaroye, Guédiawaye, Parcelle, Keur Massar et Malika. La pollution est généralisée dans le secteur. Les concentrations en nitrates obtenues sont comprises entre 100 et 550 mg/l et dépassent largement les normes de potabilité définies à 50 mg/l (WHO, 1993). Le secteur des forages de Thiaroye est la zone la plus atteinte, elle présente les teneurs maximales, pouvant atteindre jusqu'à 550 mg/l.

2) La présence de fortes concentrations est également observée dans le secteur rural au niveau de certaines localités. Dans ces zones, les teneurs obtenues sont comprises entre 50 et 200 mg/l. Au niveau de Dène Biram Ndaw les concentrations dépassent cette limite et atteignent 550 mg/l.

3) Les teneurs en nitrates sont faibles dans les secteurs inhabités. Elles sont en dessous des normes de potabilité et comprises entre 0 et 50 mg/l.

Ces observations montrent une forte corrélation entre la pollution des eaux de la nappe de Thiaroye par les nitrates et l'occupation humaine.

6.4 Etude de l'hydrodynamisme de la nappe en rapport avec les concentrations en nitrates

Après cette description corrélatrice des teneurs en nitrates sur la nappe et la présence humaine, nous avons intégré dans le SIG l'état piézométrique stationnaire de la nappe qui explique l'écoulement souterrain en rapport avec les teneurs en nitrates (Fig.95).

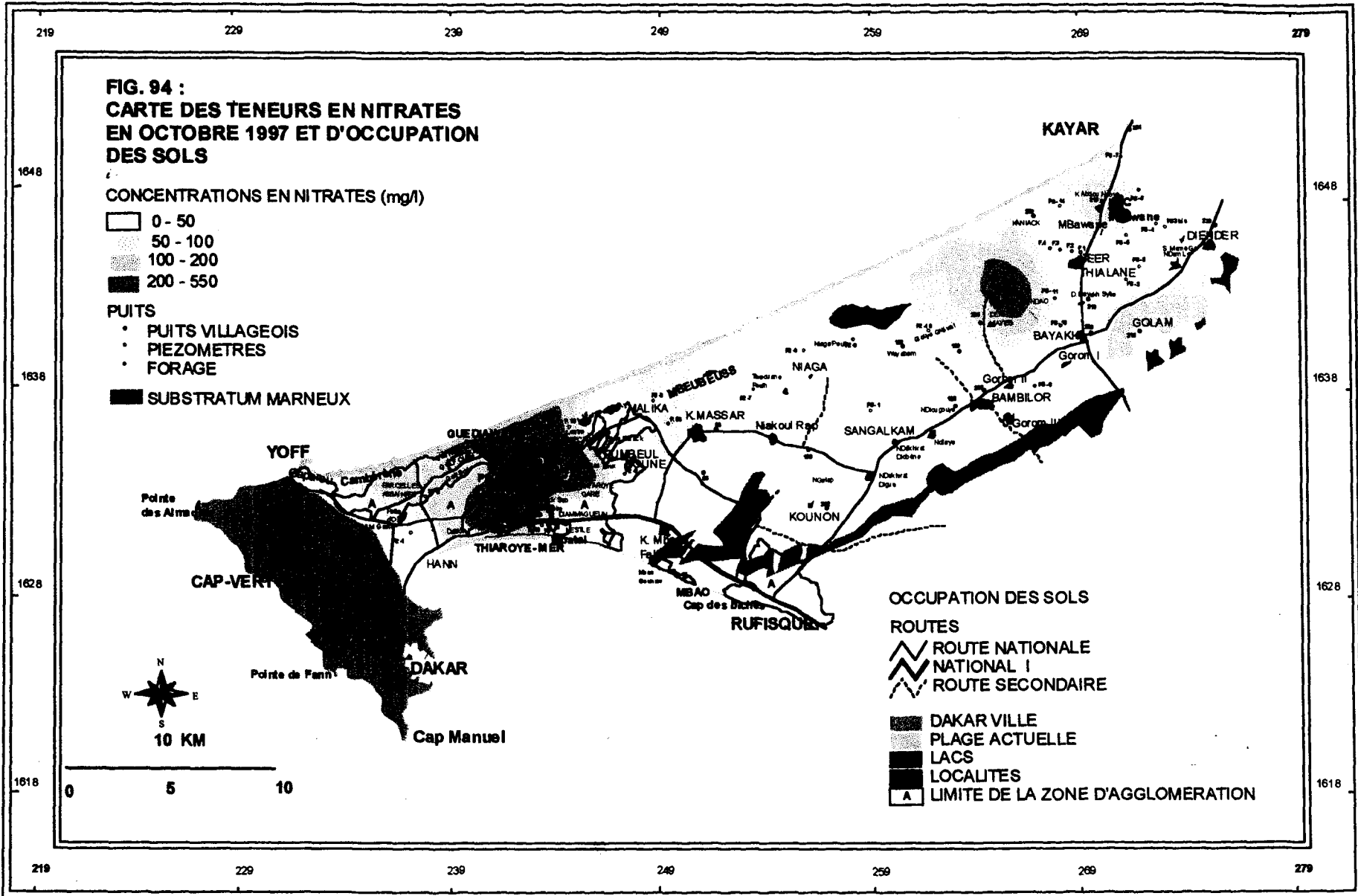
Cette figure montre que les fortes concentrations correspondent à des zones où la nappe est relativement plane. La zone d'agglomération avec les teneurs excessives en nitrates est définie par une dépression piézométrique dont le gradient hydraulique est estimé à 0,06 %.

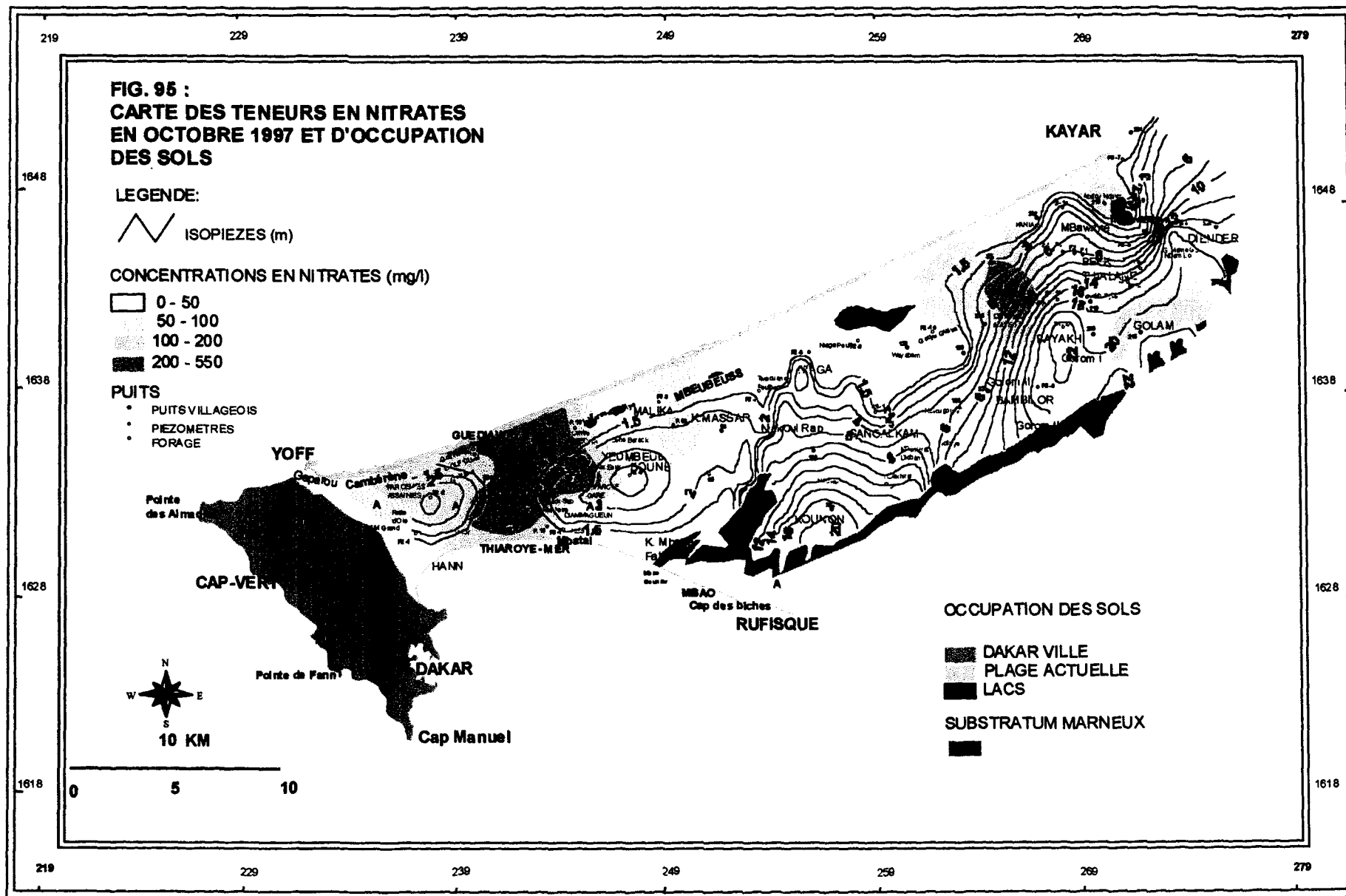
Au niveau des puits villageois qui présentent également de fortes concentrations en nitrates, le pompage n'a pas été possible lors de l'échantillonnage. Ce qui aurait pu permettre d'éviter le prélèvement sur la nappe d'eau stagnante fortement polluée.

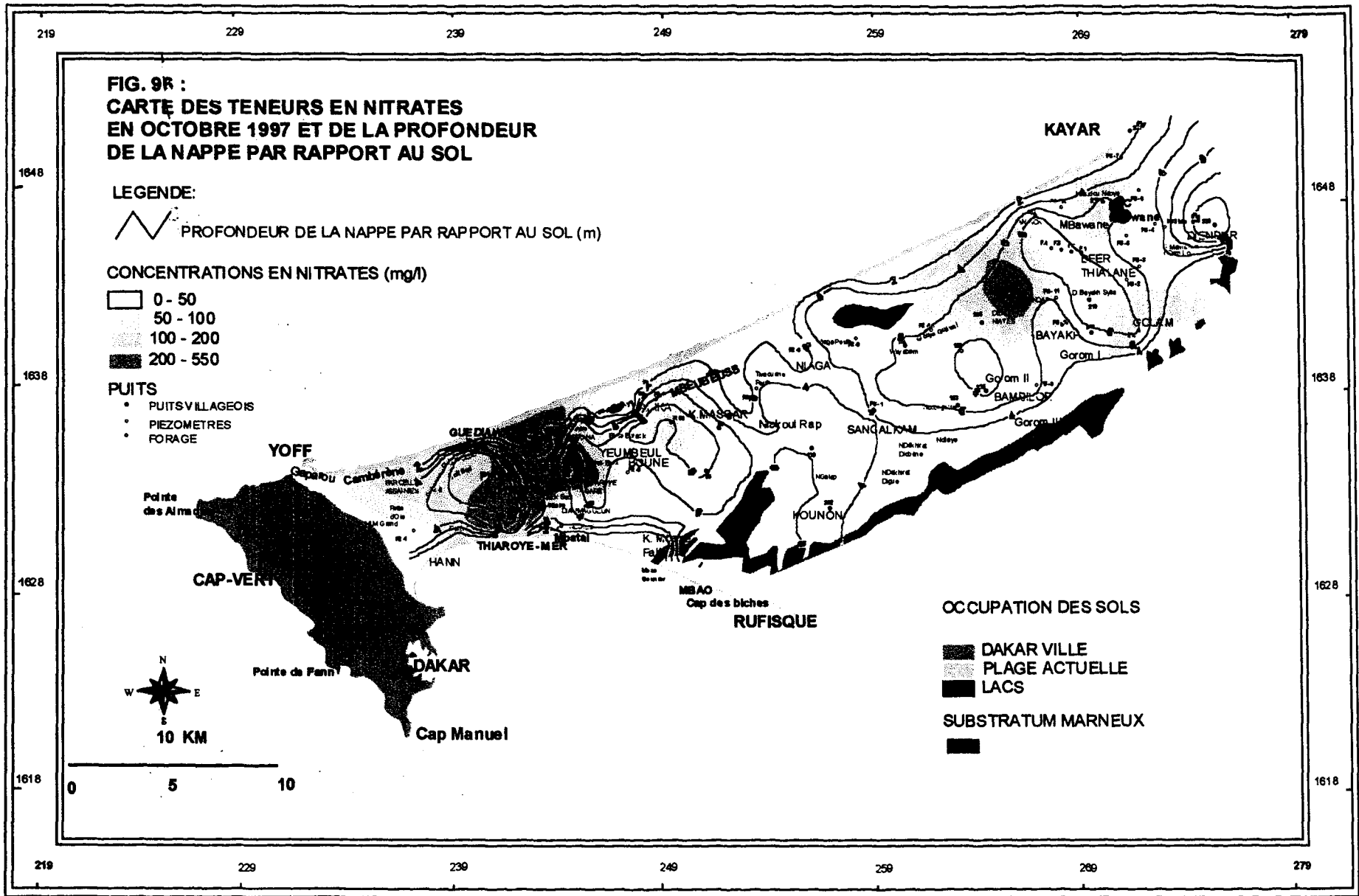
Par conséquent, l'hydrodynamisme ainsi décrite, peut favoriser les fortes teneurs en nitrates observées, avec l'absence de dilution par processus de diffusivité et dispersion dans le transport de contaminants. Ces processus selon KINZELBACH (1992) sont régis par la vitesse et la direction des écoulements dans la zone saturée.

Cependant avec l'extension de la pollution qui est très localisée dans les zones d'habitation définies, on ne peut pas dire que ces processus ont un rôle déterminant. Sinon l'état de contamination de la nappe est plutôt lié à la source de pollution de surface.

Les concentrations en nitrates obtenues sur l'aquifère, en rapport avec les informations relatives à l'épaisseur de la zone non saturée (Fig.96) montrent que ces teneurs excessives correspondent aux zones de faible profondeur de la nappe ne dépassant pas 6 m dans la zone











**FIG. 96 :
CARTE DES TENEURS EN NITRATES
EN OCTOBRE 1997 ET DE LA PROFONDEUR
DE LA NAPPE PAR RAPPORT AU SOL**

LEGENDE:

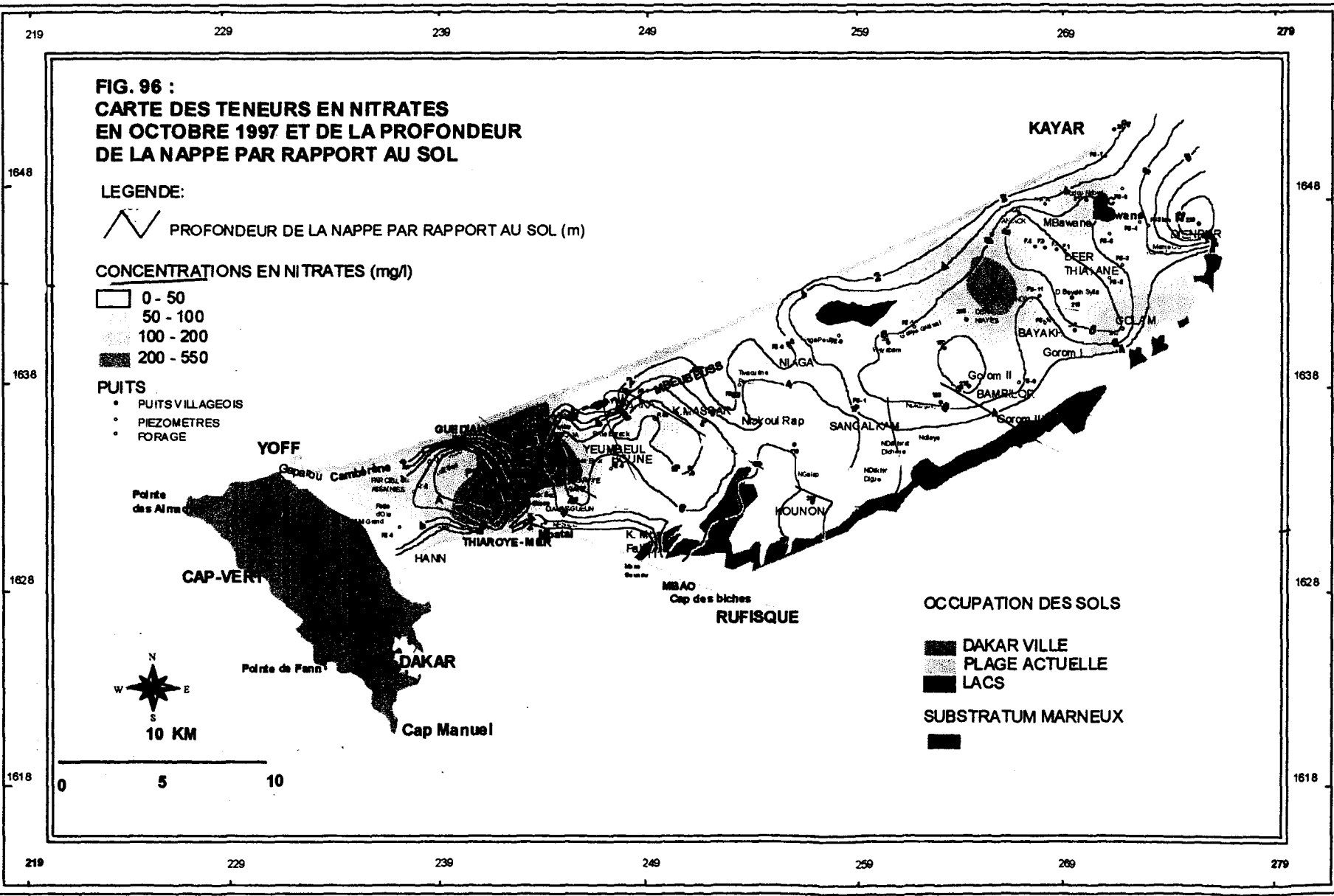
 PROFONDEUR DE LA NAPPE PAR RAPPORT AU SOL (m)

CONCENTRATIONS EN NITRATES (mg/l)

 0 - 50
 50 - 100
 100 - 200
 200 - 550

PUITS

- PUIITS VILLAGEOIS
- PIEZOMETRES
- FORAGE



10 KM

0 5 10

219 229 239 249 259 269 279

1648
1638
1628
1618

1648
1638
1628
1618

d'agglomération urbaine et estimée à 3,58 m dans le secteur de Dagoudane Pikine et Thiaroye. La typologie des sols est caractérisée par les sols ferrugineux tropicaux à fortes perméabilités. Dans l'étude de la vulnérabilité des eaux de la nappe de Thiaroye, ces caractéristiques déterminent une forte sensibilité de la zone d'agglomération à la contamination par les nitrates.

6.5 Etude de l'influence de l'occupation des sols sur la qualité des eaux

L'étude corrélatrice de la qualité des eaux avec les différents types d'occupation de sol est donnée sur les box-plots illustrés sur les figures 97 à 101.

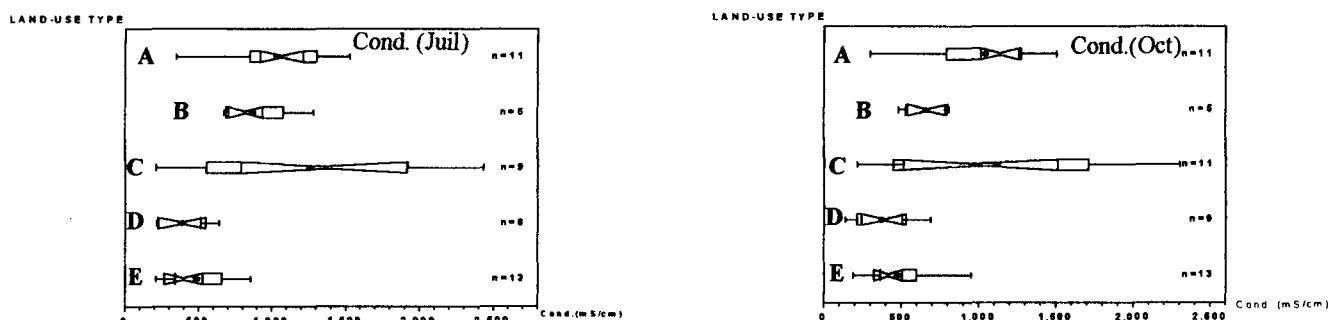


Fig.97. Conductivité électrique mesurée sur la nappe en fonction de l'occupation des sols

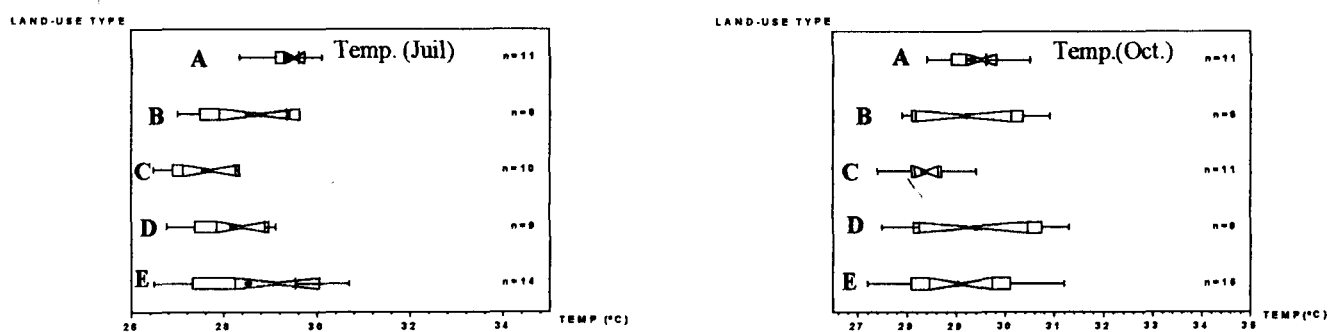


Fig.98: Température mesurée sur la nappe en fonction de l'occupation des sols

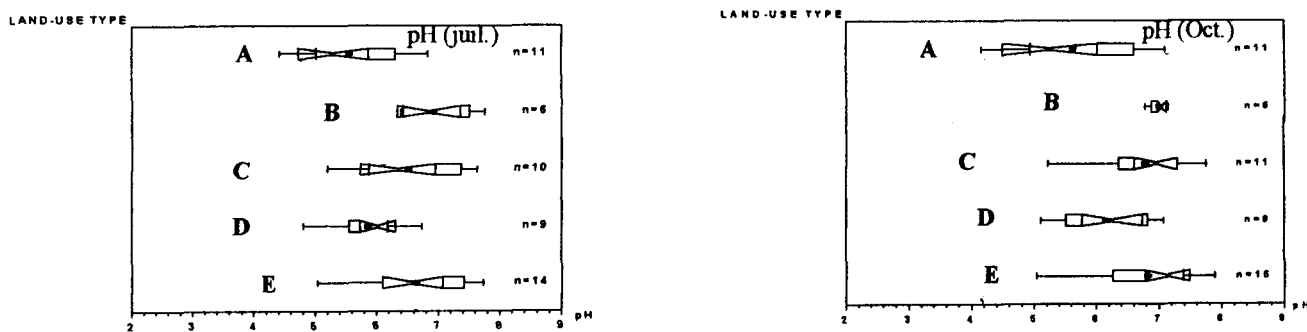


Fig.99: pH mesurée sur la nappe en fonction de l'occupation des sols

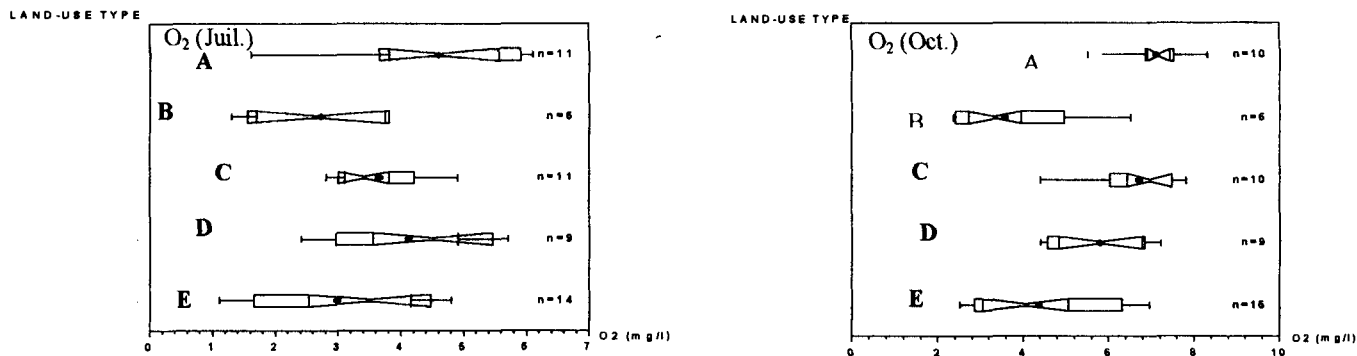


Fig.100: Oxygène dissous mesuré sur la nappe en fonction de l'occupation des sols

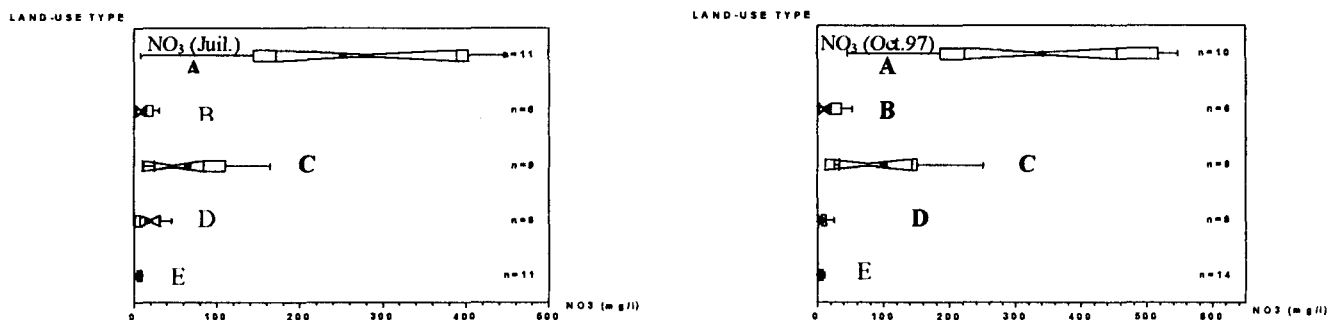
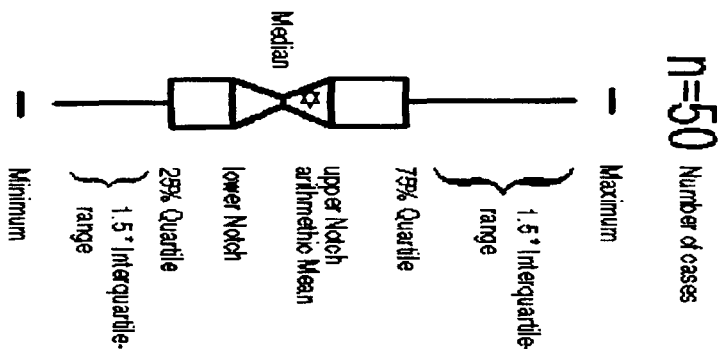


Fig.101: Teneur en nitrates donnée sur la nappe en fonction de l'occupation des sols

- A: Zone d'agglomération
- B: Zones dunaires
- C: Villages
- D: Niayes
- E: Zone agricoles

La statistique descriptive permet une représentation graphique, plus expressive d'observations ou d'échantillons sous forme de Box-plot, dont les termes sont ainsi définis:



Médiane: 50% des valeurs sont inférieures à la médiane
 Arithmétique Mean: Moyenne arithmétique

25% Quartile:	(Lower hinge): 25% des valeurs sont inférieures au quartile inférieur
75% Quartile:	(Upper hinge): 25% des valeurs sont supérieures au quartile supérieur et 50% des valeurs sont comprises entre le Quart.inf et le Quart. Sup.
Minimum:	La plus faible valeur
Maximum:	La plus grande valeur
(Lower Notch):	Médiane - $1.57 * (\text{Upper h.} - \text{lower h.})/\sqrt{n}$
(Upper Notch):	Médiane + $1.57 * (\text{Upper h.} - \text{lower h.})/\sqrt{n}$ (Avec n = Nombre d'observations)

Les box-plots des concentrations en nitrates en fonction des types d'occupation de sol (Fig.101), mettent en évidence l'état de contamination de la nappe dans les zones urbaines (agglomération) et les villages par rapport aux zones inhabitées que sont les Niayes, dunes et les zones agricoles. Les données statistiques des box-plot montrent que dans la zone urbaine, les concentrations en nitrates de juillet sont comprises entre 20 et 447 mg/l avec une moyenne de 252 mg/l. 50% des valeurs sont comprises entre 145 et 403 mg/l, seul le quart des observations est inférieur à 145 mg/l. On observe cette même tendance pour les données d'octobre avec des concentrations en nitrates plus élevées et comprises entre 45,4 et 547,5 mg/l. La moitié des valeurs obtenues se situe entre 186 et 517 mg/l. 25 % des valeurs est inférieur à 186 mg/l.

Pour la zone rurale représentée ici par les villages, les teneurs en nitrates sont comprises entre 12 et 165 mg/l avec une moyenne de 65 mg/l. 50% des valeurs varient entre 25 et 110 mg/l et seul le quart est inférieur à 65 mg/l (juillet). Les concentrations en nitrates d'octobre varient entre 25 et 250 mg/l avec une moyenne de 100 mg/l. 50% des valeurs sont définies entre 33 et 150 mg/l.

Ces données révèlent l'état de dégradation des eaux souterraines dans les zones d'habitation définies par l'agglomération urbaine et les villages. Les teneurs en nitrates sont excessives et dépassent largement la valeur limite de 50 mg/l. Dans ces deux secteurs d'habitation, les concentrations en nitrates observées en octobre sont supérieures à celles de juillet. On note une dégradation rapide de la qualité des eaux avec une augmentation des teneurs en nitrates de 100 mg/l entre juillet et octobre pour la zone d'agglomération et 85 mg/l pour les villages.

Cependant dans les zones inhabitées les teneurs en nitrates sont en général faibles et inférieures à la norme. Elles sont comprises entre 2 et 50 mg/l (Dunes), 1 et 25 mg/l (Niayes) et 0,1 et 9,1 mg/l (Zones agricoles).

Ces résultats permettent de conclure que la contamination de la nappe de Thiaroye est essentiellement anthropique et que les faibles teneurs en nitrates observées dans les zones agricoles montrent que cette contamination n'est pas liée à une application de fertilisants.

Pour tenter d'expliquer les fortes concentrations en nitrates observées sur l'aquifère de Thiaroye, les conditions du milieu sont également définies par rapport aux types d'occupation de sol. Ainsi sur les figures 97 à 100, sont données les box-plot des valeurs de conductivité électrique, de la température, du pH et d'oxygène dissous. D'après les données statistiques on observe une forte minéralisation des eaux dans les zones urbaines et les villages, ce qui est liée à l'état de contamination des eaux dans ces secteurs. Les fortes teneurs en nitrates correspondent également aux plus faibles valeurs de pH, comprises entre 4,42 et 6,8 pour les zones

urbaines 5,2 et 6,8 pour les villages (juillet) et 4 et 6,9 pour la zone urbaine 5 et 7,6 pour les villages (octobre). Ceci montre une acidité des eaux dans ces secteurs. Les teneurs en oxygène dissous donnent des valeurs comprises entre 3,6 et 6,1 mg/l pour la zone urbaine et 3,4 et 7,1 mg/l pour les villages (juillet). 5,6 et 8,4 mg/l pour la zone urbaine et 4,4 et 8 mg/l pour les villages (octobre). Ces données révèlent que dans les zones à forte contamination, les eaux sont également bien oxygénées avec des teneurs proches ou supérieures à 7,56 mg/l qui selon DEGNER & LEIBL (1997) est le taux de saturation des eaux en oxygène à une température de 30° C.

Les conditions du milieu ainsi données dans les zones d'habitation montrent que les processus de dénitrification même s'ils existent sont négligeables dans ces secteurs. Ce qui reste à être confirmé par des études microbiologiques. L'absence de phénomènes de réduction par dénitrification pourraient expliquer les teneurs excessives en nitrates observées.

7. DETERMINATION DE LA VULNERABILITE DU SYSTEME AQUIFERE DE THIAROYE

L'un des objectifs de ce travail est de définir la vulnérabilité des eaux de la nappe de Thiaroye à la contamination par les nitrates, dans cette zone de Thiaroye caractérisée par un assainissement précaire et une urbanisation spontanée et non contrôlée.

Pour définir la vulnérabilité du système aquifère de Thiaroye, l'application du Système d'Information Géographique a permis l'analyse des données de base. La cartographie thématique développée dans l'étude intègre les informations nécessaires ainsi définies:

- Les sources de pollutions, qui sont quantifiées sur la carte d'occupation des sols.
- La surface piézométrique qui a permis de définir l'hydrodynamisme de la nappe en rapport avec les teneurs en nitrates mesurées.
- La profondeur de la nappe par rapport au sol.
- Les conductivités hydrauliques et les valeurs de recharge des résultats du modèle hydrodynamiques
- La typologie des sols dans la zone non saturée.
- La qualité des eaux pour déterminer l'état de contamination de la nappe et l'extension de la pollution sur la nappe.

La zone urbaine définie sur la nappe est caractérisée par une forte densité de population estimée à environ 4 000 hts/km². Elle englobe l'agglomération de Thiaroye, Pikine, Boun, Malika, Yeumbeul, Parcelle et Guédiawaye. L'urbanisation rapide de la zone explique surtout le manque d'assainissement du secteur, avec la construction des fosses d'aisance septiques sans aucun contrôle et l'inexistence de réseaux d'eaux usées, ce qui amène les populations à verser directement sur le sol les eaux usées domestiques. Dans les conditions d'habitat ainsi définies, la zone d'agglomération comme les villages forment de véritables sources ponctuelles de contamination de la nappe.

Le réseau routier très dense également identifié dans ce secteur et caractérisé par l'absence de canalisation pour l'évacuation des eaux usées après les pluies. Ce qui augmente les risques de pollution de la nappe.

L'étude des types de sols dans la presqu'île du Cap-Vert, révèle des formations sableuses, formées essentiellement des cordons dunaires dans la zone d'étude. La zone d'agglomération est caractérisée par les sols ferrugineux tropicaux avec de forts taux de recharge estimés à 78 mm/an.

Les informations relatives à la profondeur de la nappe par rapport au sol montrent que les eaux du système aquifère de Thiaroye sont relativement superficielles. Dans la zone d'agglomération fortement polluée par les nitrates, on note que l'épaisseur de la zone non saturée ne dépasse pas 6 m et est estimée à 3,58 m dans la zone de Thiaroye, Pikine.

La synthèse de ces différentes informations relatives aux propriétés intrinsèques de la zone non saturée et aux conditions hydrogéologiques du système a permis d'établir la carte de la vulnérabilité des eaux à la contamination par les nitrates (Fig. 102).

Cette carte montre différentes zones de sensibilité à la contamination de la nappe:

1) Une zone de forte vulnérabilité englobant toute la zone d'agglomération de Thiaroye, Pikine, Guédiawaye, Parcelles Assainies, Cambérène et Boune, le secteur de Beer Thialane et Mbayakh et les zones dunaires dans le Nord-Est du système. Dans ces secteurs toutes les conditions relatives à la zone non saturée sont favorables à un lessivage des nitrates depuis la surface jusqu'à la zone saturée de l'aquifère.

2) Une zone de sensibilité moyenne définie dans les localités de Yeumbeul, Keur Massar, Sangalkam, Bambilor et Gorom. Ces zones d'habitation présentent certes une sensibilité à la contamination anthropique, mais les propriétés de la zone non saturées peuvent définir une protection de la nappe. L'état de contamination des eaux est plutôt liée à l'ouverture du système dans les puits villageois.

3) Une zone de faible sensibilité à la contamination donc mieux protégée à la pollution par les nitrates. Cette zone est localisée dans le Sud-Est du système. Les propriétés des sols dans ces secteurs et leur épaisseur déterminent une bonne protection de la nappe.

**FIG.102 :
CARTE DE VULNERABILITE DES EAUX
A LA CONTAMINATION PAR LES NITRATES**

LEGENDE:

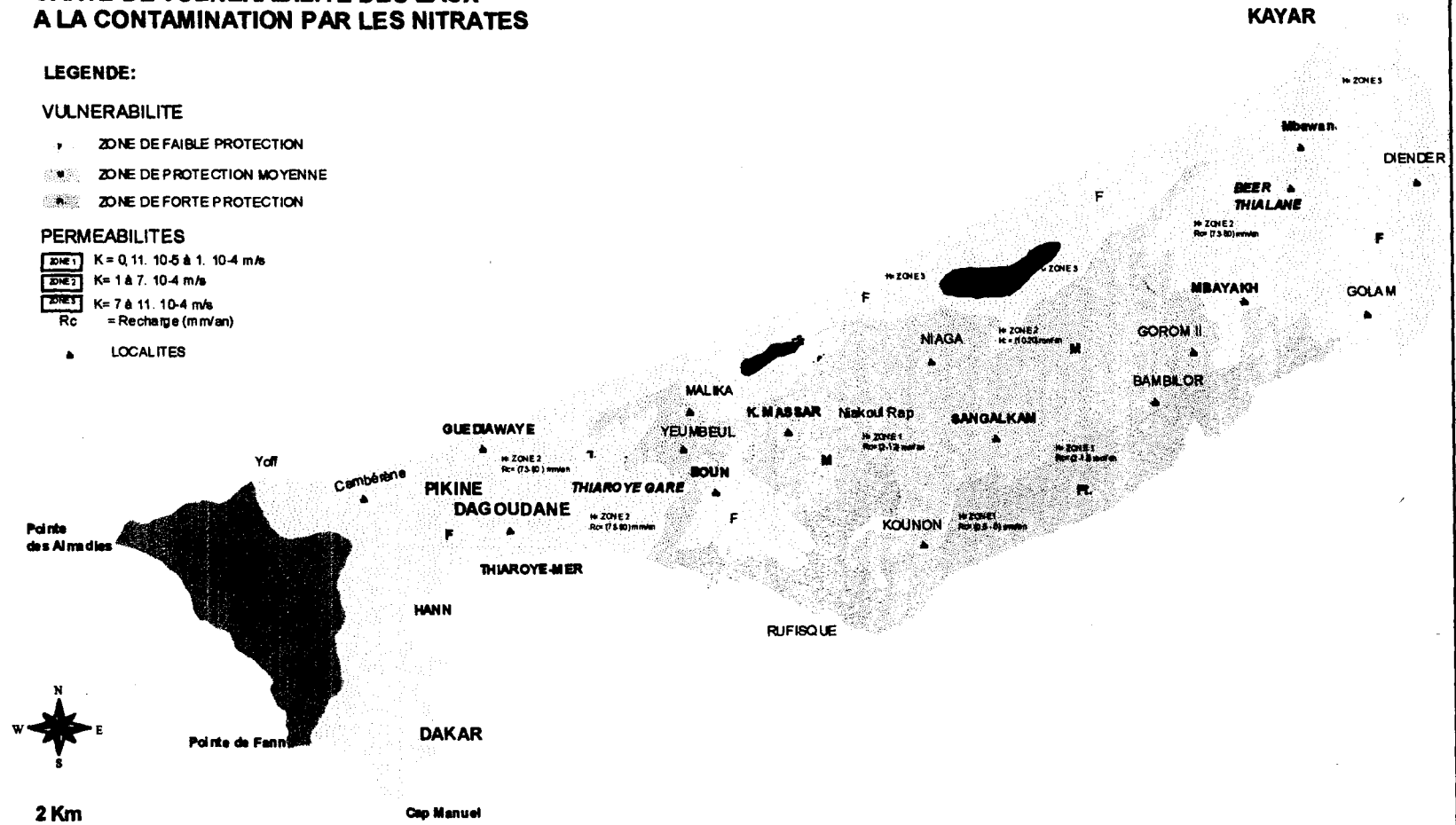
VULNERABILITE

- ◻ ZONE DE FAIBLE PROTECTION
- ◻ ZONE DE PROTECTION MOYENNE
- ◻ ZONE DE FORTE PROTECTION

PERMEABILITES

- ◻ ZONE 1 K = 0,11. 10⁻⁵ à 1. 10⁻⁴ m/s
- ◻ ZONE 2 K = 1 à 7. 10⁻⁴ m/s
- ◻ ZONE 3 K = 7 à 11. 10⁻⁴ m/s
- Rc = Recharge (mm/an)

▲ LOCALITES



Conclusion

La vulnérabilité du système aquifère de Thiaroye à la contamination des nitrates a été définie sur la base d'un Système d'Information Géographique. L'étude hydrochimique révèle l'état de contamination de la nappe, qui est essentiellement définie dans les secteurs urbains et les villages. La carte d'occupation des sols a permis de mettre en évidence les différentes sources de pollution sur la nappe qui sont anthropiques. Ainsi a été identifiée une zone d'habitation avec deux types d'habitat. Un habitat urbain caractérisé par une agglomération à forte densité estimée à 4 000 hts/km² et un habitat rural défini dans les villages et communautés rurales, où la pression sur la nappe est moins importante avec une densité de la population estimée à environ 600 hts/km². A ces deux types d'habitat, s'oppose une zone qui est pratiquement inhabitée avec les Niayes, les espaces dunaires et les domaines des cultures maraîchères.

L'habitat dans la zone d'agglomération est surtout caractérisé par le manque d'assainissement du secteur et l'inexistence de réseaux d'évacuation des eaux usées. La zone d'agglomération est également définie par un réseau routier très dense avec un système d'évacuation précaire. Ceci détermine de véritables sources de pollution de la nappe. Les teneurs en nitrates données dans cette zone sont excessives par rapport à la norme de potabilité des eaux fixée à 50 mg/l, elles varient de 52,1 à 547,5 mg/l avec une moyenne de 341 mg/l.

Cette tendance est également observée dans les villages où les concentrations en nitrates des eaux souterraines sont de 100 mg/l en moyenne.

Ces résultats obtenus comparés aux faibles teneurs en nitrates observées dans les domaines des cultures maraîchères où les eaux sont de qualité meilleure, permettent de dire que la pollution dans le système aquifère de Thiaroye est essentiellement domestique et n'est pas liée à l'application de fertilisants.

L'extension de la pollution a été également étudiée en fonction des conditions du milieu, ce qui nous a permis de définir les teneurs en oxygène dissous et le pH dans ces zones fortement polluées. Les résultats montrent que dans la zone d'agglomération comme dans les villages, les eaux souterraines sont caractérisées en général par un milieu acide avec des valeurs de pH comprises entre 4 et 7 et des teneurs élevées en oxygène dissous variant entre 4 et 8,5 mg/l. Ces conditions définies dans ces deux secteurs montrent que les phénomènes de réduction des nitrates, par des processus de dénitrification sont négligeables dans ces zones. Ces processus bactériens, seule réellement capables d'épurer les nitrates sont selon HÖLTING (1989) favorables à des pressions d'oxygène inférieures à 5 mg/l donc en milieu réduit et avec des valeurs de pH comprises entre 7 et 8 (ROHMANN & SONTHEIMER, 1985).

Les paramètres intégrés dans le SIG pour l'analyse de la vulnérabilité des eaux à la contamination par les nitrates, sont relatives aux propriétés de la zone non saturée, aux conditions hydrogéologiques du système aquifère. Ainsi sont pris en compte dans l'analyse, la profondeur des eaux de la nappe par rapport au sol, la typologie des sols dans la zone non saturée, l'hydrodynamisme de la nappe, l'extension de la pollution sur la nappe et les différentes sources de pollution de surface.

Les résultats de l'analyse ont permis d'élaborer une carte de vulnérabilité des eaux de Thiaroye à la contamination par les nitrates pour la gestion des ressources hydriques. Cette carte présente une zone de forte sensibilité où toutes les conditions sont favorables au lessivage des nitrates depuis la surface jusqu'à la zone saturée. Elle englobe la zone d'agglomération, les zones dunaires du littoral nord et le secteur de Beer Thialane et Mayakh. Une zone de sensibilité moyenne dans certaines localités où la typologie des sols et leur épaisseur dans la zone non saturée peuvent assurer une protection moyenne de la nappe. Une zone de faible sensibilité dans le Sud-Est du système où les propriétés intrinsèques de la zone non saturée et

l'hydrodynamisme des eaux souterraines avec un gradient hydraulique plus important et qui varie de 0,4 à 1% peuvent assurer une meilleure protection de la nappe à la contamination par les nitrates.

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

Le présent travail a d'abord permis de faire une synthèse des informations disponibles sur la nappe de Thiaroye. Une étude hydrogéologique a été entreprise pour caractériser le système hydraulique. Elle concerne aussi bien les données disponibles que celles obtenues dans le cadre de ce travail. L'étude hydrogéologique est basée sur les informations suivantes:

- la géométrie du système aquifère;
- élaboration des cartes bathymétriques et piézométriques à partir des mesures de terrain de juillet et octobre 1997 et du suivi piézométrique de la nappe de 1984 à 1997. Les méthodes géostatistiques d'analyse de variogrammes et de krigeage ont permis l'étude de la répartition spatiale des charges piézométriques mesurées.
- détermination des paramètres hydrodynamiques par pompage d'essai;
- étude hydrochimique et de la pollution de la nappe. Elle a permis une caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe, de mettre en évidence les faciès chimiques obtenus dans la zone de Thiaroye et de réactualiser l'état de dégradation des eaux. Les méthodes de la statistique descriptive avec la représentation par les histogrammes et box-plot des teneurs en nitrates montrent une irrégularité dans leur distribution spatiale. Ce qui n'a pas permis une représentation en courbes d'isovaleurs des valeurs de nitrates. Les concentrations obtenues sont très élevées et peuvent atteindre jusqu'à 547 mg/l, dépassant largement la valeur standard définie à 50 mg/l pour les eaux potables.

L'application d'un Système d'Information Géographique a permis de développer une cartographie thématique qui intègre les données géographiques dans la presqu'île du Cap-Vert et hydrogéologiques de cette étude. Ces informations ont servi comme paramètres d'entrée du modèle hydrodynamique et de l'analyse de la vulnérabilité du système aquifère à la contamination par les nitrates. Les données géographiques concernent:

- l'occupation des sols obtenue de l'image satellite de la zone de Thiaroye datée du 23.12.1995 et qui a permis d'identifier les différentes sources de pollution sur la nappe.
- l'hydroclimatologie de la presqu'île du Cap-Vert pour établir le bilan hydrique de la nappe. Les résultats obtenus sont représentés sous forme de carte des surfaces d'évaporation que sont les Niayes et lacs localisés dans la zone, et une carte de recharge qui donne des valeurs comprises entre 50 et 32 mm/an.
- la typologie des sols, pour l'étude des paramètres qui caractérisent le lessivage des nitrates de la surface à la zone saturée du système aquifère.

L'un des objectifs de cette étude est de développer un modèle hydrodynamique du système aquifère de Thiaroye pour simuler l'arrêt des pompages sur les prochaines années. Cet arrêt des pompages est surtout envisagé face à cette contrainte qui est l'état de dégradation des eaux de la nappe. Le modèle mathématique est défini dans un système monocouche à écoulement bidimensionnel en régime permanent avec comme état de référence, l'état piézométrique de février 1971 et en régime transitoire pour la simulation de l'évolution de la piézométrie durant ces 26 dernières années (1971-1997).

Le calage du modèle en régime permanent a nécessité plusieurs passages. Les résultats obtenus sur cette phase relatifs aux valeurs de perméabilité montrent une hétérogénéité du système aquifère, avec des valeurs qui sont très variables et comprises entre 0,1 et $10 \cdot 10^{-4}$ m/s.

La carte de recharge générée dans le SIG a été utilisée comme paramètre d'entrée du modèle en régime transitoire. L'ajustement des données d'entrée sur cette phase de calage est porté

essentiellement sur les valeurs de recharge. Les résultats obtenus montrent que l'état piézométrique de référence est correctement restitué et que les erreurs de calage sont très réduites. Les courbes d'évolution piézométrique au niveau des points témoins reflètent une concordance des fluctuations piézométriques calculées et mesurées. Le bilan hydrique montre d'importantes pertes vers la mer qui forme l'exutoire naturel du système et que la nappe s'épuise par évaporation au niveau des Niayes et lacs et soutirage sur les forages d'exploitation. Le système aquifère est essentiellement alimenté par les eaux de pluie. Les débits obtenus sur le calage en régime transitoire, comparés à ceux du régime permanent **montrent que les termes du bilan n'ont pas beaucoup évolué**. Les débits sortant passent de $44\ 014\ \text{m}^3/\text{j}$ en 1971 à $49\ 805\ \text{m}^3/\text{j}$ en 1997 et ceux entrant de $44\ 014$ à $49\ 719\ \text{m}^3/\text{j}$. Le régime transitoire montre un déficit de $86\ \text{m}^3/\text{j}$ entre les débits entrant et sortant, ce qui est trop faible pour entraîner une baisse significative du niveau de la nappe. Ce résultat permet d'expliquer l'état stationnaire, où la remontée de la piézométrie, actuellement observée dans différents secteurs. Ceci révèle les potentialités du système encore exploitable.

La simulation de l'arrêt total des pompages dans le centre de Thiaroye (1997-2010) avec les conditions climatiques actuelles caractérisées par une pluviométrie déficitaire montre une remontée du niveau de la nappe dans le secteur. Cette remontée est maximale au droit du piézomètre P3-2 et est estimée à 3 m. La faible profondeur de la nappe dans le secteur ($< 6\ \text{m}$) montre que l'arrêt des pompages pourrait entraîner des risques d'inondation dans toute la zone. L'effet de l'arrêt total des pompages dans le centre de Thiaroye est observé jusque dans le secteur de Tivaouane Peuhl au Nord-Est de Thiaroye au piézomètre P2-7, où la courbe d'évolution piézométrique observée durant la période de simulation est relativement stable. Au delà de cette zone l'arrêt des pompages n'a aucune influence. Cependant, on observe un rabattement des niveaux piézométriques dû aux conditions climatiques actuelles imposées. Le bilan des débits obtenu dans la zone de Thiaroye montre des échanges horizontales considérables entre le bassin de Thiaroye et le secteur Est du système, avec des pertes estimées à environ 20% du débit total. Cette observation permet de dire que s'il fallait arrêter complètement les pompages de Thiaroye, nous conseillons d'augmenter les débits d'exhaure dans le centre de Beer Thialane, ce qui pourrait augmenter le flux sortant du bassin de Thiaroye et réduire la remontée du niveau de la nappe dans ce secteur.

La détermination de la vulnérabilité du système aquifère de Thiaroye a permis d'intégrer les résultats du modèle et les données géographiques, pour élaborer une carte de sensibilité des eaux à la contamination par les nitrates pour une gestion des ressources hydriques. Les résultats de l'analyse des données dans le SIG, permettent de voir une forte corrélation entre la pollution des eaux par les nitrates et l'occupation humaine. La carte de vulnérabilité à la contamination anthropique permet de distinguer des zones à sensibilité différente avec:

- une zone de forte vulnérabilité qui englobe la zone d'agglomération, les zones dunaires du littoral nord et les secteurs de Beer Thialane et Mayakh, où les facteurs relatifs aux propriétés intrinsèques de la zone non saturée et à l'hydrodynamisme des eaux souterraines sont favorables au lessivage des nitrates depuis la surface jusqu'à la zone saturée.
- une zone de sensibilité moyenne localisée dans certaines localités comme Yeumbeul, Keur Massar, Niakoul Rap, Sangalkam, Bambilor, où la typologie des sols et leur épaisseur dans la zone non saturée peuvent assurer une protection moyenne de la nappe.
- une zone de faible sensibilité dans le sud-est du système où les propriétés intrinsèques de la zone non saturée et les gradients hydrauliques observés sont plus importants et varient de 0,4 à 1%. ~~Ces conditions~~ peuvent assurer une meilleure protection des eaux.

On peut conclure au terme de cette étude que la contamination des eaux par les nitrates de la nappe de Thiaroye est due aux facteurs suivants:

- facilité d'infiltration des contaminants dans la zone d'agglomération urbaine caractérisée par un assainissement précaire;
- l'absence de réduction microbienne des nitrates dans les eaux avec les teneurs élevées en oxygène dissous élevées, liées à l'ouverture du système;
- les faibles infiltrations des eaux de pluie dues aux déficits pluviométriques notés dans la presque île du Cap-Vert ces dernières années, et qui pourraient favoriser la dilution des concentrations en nitrates sur la nappe;
- le faible hydrodynamisme observé qui réduit la dilution des concentrations en nitrates par processus de diffusivité et dispersion, qui sont régis par la direction et la vitesse des écoulements dans la zone saturée.

Cette étude montre que l'application des Systèmes d'Informations Géographiques avec les méthodes hydrogéologiques classiques peuvent aider à définir une gestion environnementale globale et surtout des ressources hydriques.

Le schéma défini sur la contamination par les nitrates de la nappe de Thiaroye, révèle que seul un assainissement de la zone d'agglomération pourrait aider à corriger les fortes concentrations en nitrates actuellement observées dans le secteur. Cette zone d'agglomération urbaine est également très mal desservie en terme d'adduction d'eau courante. Ceci entraîne une utilisation privée considérable et non contrôlée de la nappe par les puits traditionnels. Cette utilisation avec l'état de dégradation des eaux avec des teneurs qui dépassent largement les normes internationales de potabilité pose un problème de santé publique. Il faut surtout redouter d'autres pollutions anthropiques, telle que bactériologiques qui pourraient aggraver la situation. D'où la nécessité d'éliminer cette nappe dans l'alimentation en eau potable de la ville de Dakar.

Dans les localités en général où l'exploitation de la nappe se fait essentiellement par les puits et céanes à ciel ouvert et où la sensibilité à la contamination est moyenne, on peut définir des périmètres de protection autour des puits pour éviter la pollution de la nappe.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBRECHT, F. (1951) – Monatskarte des Niederschlages im Indischen und Stillen Ozean – Monatskarte der Verdunstung und des Wasserhaushaltes des Indischen und Stillen Ozean. – Ber. des dt. Wetterdienstes in der US-Zone, BD.4, N°29. pp20-39.
- ARMSTRONG, M., BOUFASSA, A. (1988) – Comparing the robustness of ordinary kriging and lognormal kriging: Outlier resistance. *Mathematical Geology*, 20 (4):447-457.
- AKIN, H., SIEMES, H. (1988) – Praktische Geostatistik. -Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften. 304pp.
- ADAMS, B., FOSTER, S.S.D. (1992) – Land surface zoning for groundwater protection. *J. Inst. Water Environmental Management*. 6. pp.213-312.
- APPELO, C.A.J., POSTMA, D. (1994) – Geochemistry, groundwater and pollution. A. A. Balkema ed., Rotterdam, 536p.
- BONGRAND, M.O., ELOUARD, P. (1968) – Nature pétrographique de la formation de l'Hôpital de Dakar. *Ann. Fac Sc. Dakar* n°.22 p.17.
- BROCHET, P., GERBIER, N. (1968) – L'évapotranspiration. -Aspect Agrométéorologique Evaluation Pratique de L'évapotranspiration Potentielle. Monographie de la Météor. Nation N°65. 68p.
- BONNET, M. (1982) – Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. Thèse Doctorat d'Etat en Science, Institut National Polytechnique de Lorraine – NANCY, 438p.
- BARUSSEAU, J.P., GAYE C.B. (1983) - Sur l'origine et l'âge des sables situés sous les formations du volcanisme Quaternaire de la presqu'île du Cap-Vert (SENEGAL) ("Sables infrabasaltique"). *Bulletin de Liaison ASEQUA* n°.7-71, p.43-51.
- BURROUGH, P.A. (1986) – Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford University Press. 192pp.
- BELLION, Y.J.C. (1987) – Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudéni, Tullemden, Tchad). Thèse Science, Univ. d'Avignon et des pays du Vaucluse, 296p.
- BARNES, C.J., JACOBSON SMITH GD (1992) – The origin of high-nitrate ground waters in the Australian arid zone. *Jour. Hydro.* Vol.137. pp.181-197.
- BRINK, C., ZAADNOORDIJK, W.J. (1995) – Evaluation of Ground-Water Contamination from Nonpoint Sources: A Case Study. *Groundwater*. Vol.33, N°3. pp.356-365.
- BARTH, C. - (1996) – Hydrogeologische Untersuchungen des Hauptgrundwasserstockwerkes im Bereich der Kartenblättes 7940 Obing. – Unveröffentlichte Diplomarbeit an der LMU München: 65 S.

- BATELAAN, O., WANG, Z.M., DE SMEDT, F. (1996) – An adaptive GIS toolbox for hydrological modelling. *HydroGIS 96: Proceedings of the Vienna Conference*, April 1996. IAHS Publ. N°235, 1996.pp4-8.
- BANTON, O., BANGOY, L.M. (1997) – Hydrogéologie – Multiscience environnementale des eaux souterraines. Presse de l'université du Québec/AUPELF. 460p.
- COMLY, H.(1945) – Cyanosis in infants caused by nitrates in well water *JAMA*, 129, 112-16.
- CASTELAIN, J., JARDINE, S., MONCIARDINI, C. (1965) – Excursions géologiques dans le Sénégal occidental d'après des travaux et des documents de la société Africaine des pétroles (S.A.P). Colloque intern. Micropaléontologique (Dakar 6-11 Mai, 1963). Mem. BRGM n° 32, 357-365.
- CREVOLA, G., GAYE, C.B. (1979) – Interprétation géologique de six sondages réalisés au niveau de la tête de la presqu'île du Cap-Vert. Rapt. Dept. Geol. Fac Sc. Univ. Dakar. Nlle Série, n° 1, 16p.
- COLLIN, J.J. & SALEM, G. (1989) – Pollution des eaux souterraines par les nitrates dans les banlieues non assainies des pays en développement. Le cas de Pikine (SENEGAL). Note tech. N°089/27/BRGM SNG/3E.
- CANDELA, L., RAMOS, C., (1992) – Nutrient losses from agriculture in Spain. In: Nutrient losses from agriculture. EURAGRI Workshop, ed. P.Costigan, 111-123. The Hague, Hollande: EURAGRI.
- CREVOLA, G., CANTAGREL, J.M., MOREAU, C. (1994) – Le volcanisme cénozoïque de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal), cadre chronologique et géodynamique. *Bull. Soc. Géol. France*, 165 (5): p.437-446.
- CHEETRI, M., SMITH, D.G. (1995) – Nitrate pollution in groundwater in selected districts of Nepal. *Hydrogeol. Journ.* Vol.3, N°1.pp.71-76.
- CSE. (1996) – Utilisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution. Rapt. Technique. 67p.
- CISSE, S., WOHNLICH, S., GAYE, C.B., FAYE, A. (1998) – Study of the land-use influences on the nitrate contents in the Thiaroye aquifer (Dakar, Senegal). *Goundwater Quality 1998: remediation and Protection – Posters-*. TGA, C36, 1998 Mike Herbert & K. (Eds). 146p.
- DEMOULIN, P. (1970) – Etude géomorphologique du massif de Niass. (Introduction à l'étude géomorphologique du Sénégal occidental). Thèse 3^e cycle Dpt. Géogr. Fac. Lett. Dakar 228p
- DAVIS, J.C. (1973) – *Statistics and Data Analysis in Geology*. NewYork (John Wiley & Sons). 550pp.

- DELHOMME, J.P. (1974) – La cartographie d'une grandeur physique à partir de données de différentes qualités. Extrait des Mémoires de l'AIH – Tome X.-1 pages 185 à 194.
- DELHOMME, J.P. (1979) – Spatial Variability and Uncertainty in Groundwater Flow Parameters: A Geostatistical Approach. Wat. res. Research Vol.15. n°2.
- DVWK, Deutsch Verband für Wasserwirtschaft u. Kulturbau (Hrsg.) (1982) – Auswertung hydrochemischer Daten. DVWK-Schr., 54: 193 S., Hamburg-Berlin (Parey).
- DVWK, (Hrsg.) (1985) – Bodennutzung und Nitrataustrag. DVWK-Schr., 73: 225 S., Hamburg-Berlin (Parey).
- DE MARSILY, G. (1986) – Quantitative hydrogeology. – Groundwater hydrology for engineers. Academic press, INC. New York, 440p.
- DVWK, (Hrsg.) (1988) – Bedeutung biologischer Vorgänge für die Beschaffenheit des Grundwassers. DVWK-Schr., 80: 322 S., Hamburg-Berlin (Parey).
- DVWK, (Hrsg.) (1990b) – Methodensammlung zur Auswertung und Darstellung von Grundwasserbeschaffenheitsdaten. DVWK-Schr., 89: 216 S., Hamburg-Berlin (Parey).
- DVWK, (Hrsg.) (1992) – Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben. DVWK-Fachauschuß Grundwasserchemie, DVWK-Regeln, 128: 36 S., Hamburg-Berlin (Parey).
- DEH., (1994) – Suivi piézométrique et chimique des nappes de Dakar et de Thiès. Rapt. Service de gestion et planification des ressources en eau 10p.
- DEH., (1996) – Surveillance des nappes du Sénégal. Log. SURNAP.
- DEURSEN, W. (1996) – Groundwater and GIS. IGWMC/IHE Delft/Netherland. Course June 1996: European Training Course. Groundwater Monitoring Network Design and Information System.
- DEGNER, R., FORSTER, S. (1997) – Einführung in die Gelöstsauerstoff-Meßtechnik. Oxi-Fibel. WTW.77p
- EDMUNDS, W. M. (1973) – Trace element variations across an oxidation-reduction barrier in a limestone aquifer-In: E. Ingerson (Ed). Proc. Symp. on Hydrogeochemistry and Biogeochemistry, Tokyo, 1970. Clarke, Washington D.C., 1. pp.500-520.
- EDMUNDS, W. M. (1976) – Groundwater geochemistry – controls and process – In: Groundwater Quality, Measurement, Prediction and Protection. Water Research Center, Medmenham, pp. 115-147.
- ELOUARD, P., FAURE, H., HEBRARD, L. (1977) – Variations du niveau de la mer au cours des 15 000 dernières années autour de la presqu'île du Cap-Vert Dakar – Sénégal. Bulletin de liaison ASEQUA n° 50 p.29-49.

- ESRI. (1990) – Understanding GIS. The ARC/INFO Method. Environmental Systems Research Institute INC. 550pp.
- ESRI, (1993) – Schulung. – Kursunterlagen. ESRI Gesellschaft für Systemforschung und Umweltplanung mbH. 121p.
- ECKHARDT, A.V.D., STACKELBERG, E. P. (1995) – Relation of Ground-Water Quality to Land Use on Long Island, New York. *Groundwater*. Vol.33, N°6. pp.1019-1033.
- EDMUNDS, W. M., GAYE, C.B. (1997) – Naturally High Nitrate Concentration in Groundwaters from the Sahel. *Journal of Environmental Quality* Volume 26, n°5. ASA, CSSA, SSSA 677 South Segoe Rd., Madison, WI 53711 USA.
- FAO. (1976) – A framework for land evaluation. *Soil, Bulletin*. N°32.FAO Rome and intern. Institution for land Reclamation and Improvement, Publication N°22.
- FISHER, H.T. (1978) – Thematic cartography – What it is and what is different about it. *Harvard papers in theoretical cartography*. Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis, Harvard.
- FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. – (1979) *Groundwater*. Prentice Hall, Inc., New Jersey, 604p.
- FRICK, B.R., RICHARD, Y. – (1985) Experience with Biological Denitrification in a full Scale Drinking Water Treatment Plant. *Vom Wasser*, 64: 144-154.
- FRANK, C., DOTT, W. – (1985) Nitratentfernung aus dem Trinkwasser mit Hilfe Biologischer Denitrification. *Vom Wasser*, 65: 288-295.
- FOSTER, S.S.D., BRIDGE, L.R., GEAKE, A.K., LAWRENCE, A.R., PARKER, J.M. (1986) The groundwater nitrate problem. Hydrogeological report 86/2. Keyworth, U.K: British Geological Survey.
- FOSTER, S.D.D., HIRATA, R.C.A. (1988) – Groundwater pollution risk assessment- a methodology using available data. WHO-PAHO-CEPIS Technical Report (CEPIS, Lima-Peru), 73pp.
- FAZZOLARI, E., MARIOTTI, A., GERMON, J.C. (1990a) – Nitrate reduction to ammonia: a dissimilatory process in *Enterobacter amnigenus*. *Can. J. Microb.*, 36 p779-786.
- FAZZOLARI, E., MARIOTTI, A., GERMON, J.C. (1990b) – Dissimilatory ammonia production vs. denitrification in vitro and in inoculated soil samples. *Can. J. Microb.*, 36 p786-793.
- FAILLAT, J.P., RAMBAUD, A. (1991) – Deforestation and leaching of nitrogen as nitrates into underground water in intertropical zones: The example of Côte d'Ivoire. *Environ. Geol. Water Sci*. Vol.17.pp133-140.
- FALL, C. (1991) – Pollution azotée de la nappe phréatique de Thiaroye: Causes et proposition de solutions. *Mém. DEA, ISE/FST/UCAD/ Dakar, Sénégal*.
- FETTER, C.W. (1994) – *Applied Hydrogeology*. Third Edition. New Jersey 07458. 687p.

- FAYE, S. (1995) – Modélisation hydrodynamique des nappes du littoral Nord entre Cayar et St. Louis. Impact des futurs prélèvements envisagés dans le cadre de l'approvisionnement en eau de Dakar et de ses environs. Thèse Doctorat 3e Cycle Fac Sc. Dakar, 167p.
- GEOHYDRAULIQUE. (1971) – Elaboration des modèles de la nappe des sables quaternaires Nappe libre et nappe infrabasaltique. Géoh.336. Rapport préliminaire N°1. 100p.
- GEOHYDRAULIQUE. (1972) – Etude sur modèle mathématique du système aquifère de la presqu'île du Cap-Vert. Géoh.386. Additif au rapport préliminaire N°1. 18p.
- GEOHYDRAULIQUE. (1972) – Etude sur modèle mathématique du système aquifère de la presqu'île du Cap-Vert. Géoh.388. Rapport final 65p.
- GAYE, C.B. (1980) – Etude hydrogéologique et isotopique de la nappe aquifère infrabasaltique de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal). Thèse Doctorat 3e Cycle Fac Sc. Dakar, 105p.
- GIBERT, E. (1986) – Composition isotopique des précipitations à Dakar. Relation avec la météorologie en Afrique Occidentale. Recherche de l'origine des pluies. Mémoire expérimentale. Univ. Paris-Sud. Labo d'hydrologie et de géochimie isotopique, 96p.
- GROEN, J., SCHUCHMANN, J.B., GEIRNAERT, W. (1988) – The occurrence of high nitrate concentration in groundwater in villages in northwestern Burkina Fasso. Journ. Afric. Earth Sci. Vol.7. pp999-1009.
- GAYE, C.B., FAYE, A., GELINAS, P.J., THERRIEN, P. (1989) – Analyse de l'intrusion saline dans les aquifères dans les aquifères de la presqu'île du Cap-Vert. „ Analyse des processus de minéralisation et de dégradation de la qualité de l'eau dans les nappes infrabasaltiques et des sables quaternaires„. Rapt. GGL-89-CRDI-08 CREGI, Univ. Laval et UCAD.
- GOODCHILD, M.F., PARKS, B.O., STEYAERT, L.T. (1993) – Environmental Modling with GIS. Oxford University Press, New York. 488pp.
- GUIMERA, J. (1998) – Anomalously High Nitrate Concentrations in Groundwater. Groundwater Vol.36 N°2. pp275-283.
- GOMBOSSO, J., GHASSEMI, F., APPLEYARD, S.J. (1997) – Dryland Salinity in the North Stirling Land Conservation District, Western Australia: Simulation and Management Options. Hydrogeol. Journ. Vol.5, N°1.
- HEBRARD, L. (1966) – Les formations tertiaires et quaternaires de l'Isthme de la presqu'île du Cap-Vert (Feuille THIAROYE, SENEGAL). Rapt. Lab. Géol.Fac. Sc. Dakar n°.16, 75p.
- HEBRARD, L. (1968) – Contribution à l'étude géologique des formations quaternaires de la bordure de la sebkha Ndrancha près de Nouakchott (Mauritanie). Rap. Labo.Géol. Fac Sc.Dakar, n° 27.

- HODGKISS, A.G. (1981) – Understanding maps. Dawson, Folkestone, UK.
- HAWKINS, D.N., CRESSIE, N. (1984) – Robust kriging – A proposal. *Mathematical Geology*, 16 (1):3-18.
- HEATON, T.H.E. (1984) – Sources of the nitrate in phreatic groundwater in the western Kalahari. *Journ. Hydrol.* 67..pp249-259.
- HOLTING, B.(1989) – Hydrogeologie. Auflage.3, 396 S., Stuttgart (Enke).
- HÖLTING, B.(1992) – Hydrogeologie. Auflage.4, 415 S., Stuttgart (Enke).
- HYDRAULIQUE – PNUD: (1994) – Bilan-diagnostique des ressources en eau du Sénégal. Projet MH/PNUD/DADSG-SEN/87/006. 190p.
- HUANG, W.Y., URI, N.D., HANSEN, L. (1994) – Assessing a farmers's decision concerning the application timing of nitrogen fertilizer. *Environ. Geol.*24.pp.43-56.
- ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, R.M. (1989) – Applied Geostatistics. New York (Oxford Univ. Press).
- JORDAN, H.P., WEDER, H.J. (1995) – Hydrogeologie. Grundlagen und Methoden. – Stuttgart (Enke).
- KÖLLE, W., WERNER, P., STREBEL, O., BÖTTCHER, J. (1983) – Denitrification in einem reduzierenden Grundwasserleiter. *Vom Wasser*, 61 p125-147.
- KINZELBACH, W. (1986) – Groundwater Modelling. Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo (Elsevier). 333 S., 112 Abb., 7 Tab.
- KÜMMEL, R. & PAPP, S. (1990) – Umweltchemie,2. Aufl. Leipzig. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 200p.
- KRUSEMAN, G.P., DE RIDDER, N.A. (1991) – Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. Second. Edition, Wageningen (International Inst. For Land Reclamation and Improvment).377p.
- KINZELBACH, W., RAUSCH, R. (1995) – Grundwassermodellierung: Eine Einführung mit Übungen. Bornträger.Berlin-Stuttgart. 283p.
- KINZELBACH, W. (1992) – Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. 2. Auflage. München (Oldenbourg).
- KLIMAS A.A. (1995) – Impacts of urbanisation and protection of water resources in the Vilnius district, Lithuania. *Hydrog. Journ.* Vol.3, N°1. pp.24-35.
- KOMOR, C.S., MAGNER, A. (1996) – Nitrate in groundwater and water sources used by riparian trees in an agricultural watershed: A chemical and isotopic investigation in southern Minnesota. *Water res*, Vol. 32, N° 4, pp.1029-1050.

- KLIMAS, A.A. (1996) – Methodology for mapping shallow groundwater quality in urban areas: A case study from Lithuania. *Environ. Geol.* **27**, p320-323.
- KITANIDIS, P.K. (1997) – Introduction to Geostatistics. – Applications in Hydrogeology. Cambridge University Press. 250p.
- LAGERSTEDT, E., JACKS, G., SEFE., F. (1994) – Nitrate in groundwater and N-circulation in eastern Botswana. *Environ. Geol.* **23**.pp60-64.
- MAGEE, P.N., BARNES, J.M. (1956) – *Br. J. Cancer.* **10**.pp.114.
- MATHERON, G. (1963) – Principles of Geostatistics. –*Economic Geology*, **58**: 1246-1266.
- MARTIN, A. (1970) – Les nappes de la presqu'île du Cap-Vert (République du Sénégal). Leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar. Thèse de 3e Cycle. Doc. BRGM, 1970.
- MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG. (1977) – Pumpversuche in Porengrundwasserleitern. Arbeitsblatt. 2. unveränderte Auflage 119 S.
- McDONALD, M.G., HARBAUGH. (1988) – A modular three dimensional finite difference groundwater flow model. Techniques of water resources investigations of the U.S.G.S. Book **6**, Modelling techniques.
- MINISTERE DU DEVELOPPEMENT RURAL ET DE L'HYDRAULIQUE. (1992) – Répertoire des forages d'eau du Sénégal.
- MARIOTTI, A. (1994) – Dénitrification in situ dans les eaux souterraines, processus naturels ou provoqués: une revue. *Hydrogéologie*, N°3: 43-68.
- MATHESS, G. (1994) – Die Beschaffenheit des Grundwassers . Lehrbuch der Hydrogeologie **3**. Auflage 499 S., Berlin (Gebrüder Borntraeger).
- NRA (1992) – Policy and practice for the protection of groundwater (Bristol: National Rivers Authority).
- OMS. (1972) – Approvisionnement en eau et assainissements de Dakar et ses environs. Etude des eaux souterraines. Projet Sénégal 3201 (Ex 22). Note de synthèse. 50p.
- OMS. (1972) – Etude hydrogéologique de la nappe des sables quaternaires. Compte rendu des receptions techniques. 80p.
- OBERMEYER, N. (1989) – A systematic approach to the taxonomy of geographic information use. Proceedings, GIS/LIS '89, Falls Church, VA: ASPRS/ACSM, Vol.2,pp.421-429.
- PACHECO, A., CABRERA, A. (1997) – Groundwater contamination by nitrates in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Hydrogeo. Journ.* Vol.5, N°2.p.47-53.

- ROHMANN, U., SONTHEIMER, H. (1985) – Nitrat im Grundwasser – Ursachen, Bedeutung, Lösungsweg, DVGW – Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe
- ROBINS, N., ADAMS, B., FOSTER, S., PALMER, R. (1994) – Groundwater vulnerability mapping: the British perspective. *Hydrogeologie*, N°4. pp-35-41.
- RIBEIRO, C.T. (1996) – Impact of land use on water resources: integrating HSPF and a raster-vector GIS. *HydroGIS 96: Proceedings of the Vienna Conference, April 1996*. IAHS Publ. N°235, 1996.pp349-357.
- RASMUSSEN, P. (1996) – Monitoring shallow groundwater quality in agricultural watersheds in Danmark. *Environ. Geol.*:27.pp.309-319.
- SPENGLER (de), A., CASTELAIN, J., CAUVIN, J. LEROY, M. (1965) – Le bassin secondaire-tertiaire du Sénégal. P80-92
- SCHLEGEL, H.G. (1981) – *Allgemeine Mikrobiologie*. 5. Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1981.
- SCHEFFER, B. u. BARTELS, R., (1980) – Stickstoffaustrag aus gedränten Sandboden. *Kalibriefe (Büntehof)*, 15, (2), 123-128.
- SCHLEGEL, H.G. (1985) – *Allgemeine Mikrobiologie*. 6. Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1985.
- SONEES., (1986) – Renforcement de l'approvisionnement en eau de la région de Dakar (1986-1991) phase intérimaire. Rapport définitif, tome 1, 305p.
- SONEES., (1989) – Note sur la teneur en nitrates des eaux de la nappe de Thiaroye et des environs. Labor. d'analyse SONEES, Dakar Sénégal, pp.8.
- SARR, R. (1995) – Etude biostratigraphique et paléoenvironnementale des séries d'âge Crétacé terminal à Eocène moyen du Sénégal occidental. *Systématique et migration des ostracodes*. Thèse Doctorat d'Etat ès-Sciences, Univ. C.A. Dakar, 335p.
- STRUCKMEIER, W.F., MARGAT, J. (1995) – *Hydrogeological Maps. – A Guide and a Standard Legend*. IAH. Vol.17. Series Editorial Board. Heise (Verlag).
- SONEES, (1997) – Production mensuelle pour AEP Dakar. Rapt. DT-Département planification et études Dakar-Sénégal.
- TESSIER, F., LAPARTIENT, J. (1967) – Observations sur la latérite récente des environs de Dakar (République Sénégal). Extrait *Bull. Soc. Géol. France*, 7e série t.IX. p.455 à 466.
- TRAVI, Y. (1988) – Hydrogéochimie et hydrogéologie des aquifères fluorés du bassin du Sénégal. Origine et conditions de transport du fluor dans les eaux souterraines. Thèse Sciences. Univ. de Paris Sud (Orsay). 190p.

- TAYLOR, D.R.F. (1990) – Geographic Information Systems. The Microcomputer and Modern Cartography. Pergamon Press. 251pp.
- TRINKWV. (1990) – Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe. – TRINKWV vom 5. Dez. 1990.
- TIM, U.S., JAIN, D., LIAO, H.H. (1996) – Interactive Modeling of Ground-water Vulnerability Within a Geographic Information System Environment. Groundwater. Vol.34, N°4. pp.618-627.
- TANDIA, A.A. (1997) – Origin, processus and migration of nitrates compounds in the Dakar region aquifers (Senegal): First results of the contribution of the isotopes techniques. Rpp. Cont. Rech. AIEA. 1997 N°7279/R1/RB.
- TESORIERO, A.J., VOSS, F.D. (1997) – Predicting the Probability of Elevated Nitrate Concentrations in the Puget Sound Basin: Implications for Aquifer Susceptibility and Vulnerability. Groundwater. Vol.35, N°6. pp.1029-1039.
- VOIGT, R., LANGGUTH, H.R. (1980) – Hydrogeologische Methoden. Berlin (Verlag). 485pp.
- VERSTRAETEN, I.M., McGUIRE, V.L., (1996) – Use of 2D and 3D GIS in well selection and interpretation of nitrate data, central Nebraska, USA. HydroGIS 96: Proceedings of the Vienna Conference, April 1996. IAHS Publ. N°235, 1996. pp.585-591.
- WRIGHT, E.P., EDMUNDS, W.M. (1969) – Distribution and origin of nitrate in the groundwater. Hydrogeological Studies in Central Cyrenaica, Kingdom of Libya. Report to the Libyan government. British Geological Survey, Keyworth, UK.
- WRIGLEY, P.F., TIMOTHY, A.R., (1984) – Cancer of the Stomach. Clinics in oncology. Vol.3, N°2. pp 244-247.
- WETSELAAR, R., FOX, J.J., SMITH, G.D., RUMALI, M., MOERMANTO, R.J., AHMED, I. (1993) – Groundwater nitrate in East Java, Indonesia: Australian Geology Survey Organisation Journal of Geology and Geophysics, Vol.14, pp.273-277.
- WORLD HEALTH ORGANISATION. (1993) – Guidelines for drinking water quality. WHO, Geneva.
- WOHNLICH, S. (1995) – Definition hydrogeologische Modelle. Tagungsband des Workshops hydrogeologische Modelle als Grundlage für numerische Grundwassermodelle, 9.-10.11.1995, Gunzenhausen.

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS	
VORWORT	
ZUSAMMENFASSUNG	
ABSTRACT	
RESUME	
LISTE DES FIGURES	
LISTES DES TABLEAUX	
INTRODUCTION.....	1

PARTIE I: SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES – PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE

I. LA PRESQU'ÎLE DU CAP-VERT: GEOGRAPHIE ET STRUCTURE GEOLOGIQUE.....	5
1. Cadre géographique.....	5
1. Hydroclimatologie.....	5
1.1 Pluviométrie.....	5
1.1.1 Distribution spatiale.....	5
1.1.2 Variabilité interannuelle.....	6
1.2 Température.....	6
1.3 Humidité relative.....	6
1.4 Evaporation.....	7
1.5 Régime des vents.....	7
2. Géographie physique.....	8
2.1 Géomorphologie.....	8
2.2 Hydrographie.....	8
2.3 Végétation.....	8
2. Géologie.....	9
1. Cadre Géologique.....	9
2. Série stratigraphique de Dakar.....	10
2.1 Les formations tertiaires.....	10
2.1.1 Le Paléocène.....	10
2.1.2 L'Eocène Inférieur (Yprésien).....	10
2.1.3 L'Eocène Moyen.....	10
2.1.4 L'Eocène Supérieur.....	12
2.1.5 L'Oligocène.....	12
2.1.6 Le Miocène et le Pliocène.....	12
2.2 Les formations Quaternaires.....	12
2.2.1 Quaternaire Ancien.....	12
2.2.2 Quaternaire Récent.....	15

3. Hydrogéologie.....	17
1. Contexte hydrogéologique.....	17
2. Localisation et structure du système hydraulique.....	17
3. Schéma hydrodynamique.....	21
4. Qualité des eaux.....	21
4.1 Teneurs en chlorures.....	24
4.2 Teneurs en nitrates.....	24
4.2.1 Rappels du Cycle naturel de l'azote: Décomposition des nitrates dans la zone non saturée et les eaux souterraines.....	24
4.2.2 Origine des teneurs élevées en nitrates dans les eaux souterraines.....	26
4.2.3 Toxicité des nitrates dans les eaux.....	27
4.2.4 Cas de la contamination par les nitrates de la nappe de Thiaroye.....	28
5. Rôle de l'aquifère dans l'alimentation en eau potable de la ville de Dakar et dans les activités maraîchères de la région.....	29

II. PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE-METHODOLOGIE ET OUTILS UTILISES.....30

1. Problématique de l'étude.....30

2. Méthodologie et outils utilisés.....30

1. Méthodologie.....30

2. Outils utilisés dans l'étude.....34

2.1 Système d'Information Géographique.....34

2.1.1 Principe des logiciels ARC/INFO et ARC/VIEW.....34

2.1.2 Objectifs.....34

2.1.3 Evolution de la cartographie au SIG.....35

2.1.4 Les domaines d'application des SIG.....35

2.2 Statistique et Géostatistique.....37

2.2.1 Principe.....37

2.2.2 Objectif.....38

2.3 Modélisation hydrodynamique.....42

2.3.1 Principe mathématique des modèles.....42

2.3.2 Objectifs.....47

PARTIE II: ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU SYSTEME AQUIFERE DE THIAROYE: ACQUISITION TRAITEMENT DES DONNEES-RESULTATS ET ANALYSES CRITIQUES

I. ACQUISITION DES DONNEES DE L'ETUDE.....48

1. Données de terrain.....48

1.1. Réseau de mesure.....48

1.2 Types de mesures.....48

1.2.1 Piézométrie.....48

1.2.2 Echantillonnage.....48

1.2.3 Mesures in-situ.....	48
1.2.4 Pompage d'essai.....	49
1.3 Les différentes campagnes.....	49
2. Données chimiques au laboratoire.....	49
2.1 Méthodes d'analyse.....	50
2.1.1 Dosage par spectrophotomètre.....	50
2.1.2 Dosage par chromatographe ionique.....	50
2.1.3 Dosage par spectrophotomètre à absorption atomique.....	50
2.2 Résultats.....	50
3. Données Géographiques.....	51
3.1 Données sur l'occupation des sols.....	51
3.2 Données hydroclimatologiques.....	51
3.3 Données sur la typologie des sols.....	51
III. TRAITEMENT - INTERPRETATION DES DONNEES	
-PRESENTATION DES RESULTATS ET ANALYSES CRITIQUES.....	51
1. Géométrie et paramètres hydrodynamiques.....	51
1.1 Géométrie du système hydraulique.....	51
1.1.1 Substratum imperméable.....	51
1.1.2 Epaisseur des sables aquifères.....	54
1.1.3 Topographie.....	54
1.2 Paramètres hydrodynamiques.....	54
1.2.1 Détermination de la transmissivité et de la perméabilité par pompage d'essai.....	54
1.2.2 Analyse et conclusion.....	60
2. Piézométrie et bathymétrie de la nappe.....	62
2.1 Variabilité temporelle et spatiale de la piézométrie.....	62
2.1.1 Evolution piézométrique interannuelle.....	62
2.1.2 Elaboration de cartes piézométriques du système.....	64
2.1.3 Evolution de la piézométrie entre Juillet et Octobre 1997.....	74
2.1.4 Evolution de la piézométrie entre 1971 et 1997.....	74
2.2 Profondeur de la nappe phréatique par rapport au sol.....	76
3. Hydrochimie et pollution.....	78
3.1 Caractérisation physico-chimique.....	78
3.1.1 Conductivité électrique.....	78
3.1.2 Température.....	78
3.1.3 pH.....	79
3.2 La chimie des eaux.....	88
3.3 Etude la contamination du système aquifère par les nitrates.....	90
3.3.1 Etat de contamination des eaux de la nappe par les nitrates en rapport avec les conditions du milieu.....	92
3.3.2 La contamination des eaux de la nappe par l'ammonium et les nitrites.....	98

PARTIE III: APPLICATION D'UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE POUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS

ET L'ETUDE DE LA VULNERABILITE A LA CONTAMINATION PAR LES NITRATES

I. CARTOGRAPHIE THEMATIQUE DANS LE SIG.....	99
1. Carte thématique d'occupation des sols.....	99
1.1 Présentation des résultats.....	99
1.2 Analyses et conclusions sur les résultats.....	103
2. Carte de localisation des Niayes et lacs: Surface d'évaporation	
2.1 Les lacs.....	104
2.2 Les zones de Niayes.....	104
3. Détermination du bilan hydrique: Elaboration d'une carte de recharge dans le SIG.....	106
3.1 Exploitation des données et présentation des résultats du bilan.....	106
3.1.1 Calcul de l'évapotranspiration réelle.....	106
3.1.2 Calcul de l'évapotranspiration potentielle.....	110
3.1.3 Estimation du bilan hydrique.....	111
3.2 Spatialisation des valeurs de recharge dans le SIG.....	118
3.3 Conclusion sur les paramètres du bilan.....	120
4. Carte de typologie des sols.....	120
4.1 Les sols ferrugineux tropicaux.....	120
4.2 Les sols des zones interdunaires.....	120
4.3 Les dunes littorales.....	122
4.4 Les sols sur matériaux argileux.....	122
5. Cartographie thématique des données hydrogéologiques.....	122
5.1 Carte piézométrique.....	122
5.2 Carte de profondeur des eaux par rapport au sol.....	122
5.3 Carte d'extension de la pollution.....	123
5.4 Carte de perméabilité.....	123
II. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DU SYSTEME AQUIFERE DE THIAROYE.....	124
1. Généralités.....	124
2. Définition du modèle conceptuel.....	125
2.1 Caractérisation du système.....	125
2.2 Le modèle conceptuel et les conditions aux limites.....	126
2.2.1 Géologie et hydrogéologie.....	126
2.2.2 Piézométrie.....	126
2.2.3 Spécification du modèle.....	127
2.3 Discrétisation.....	127

3. Paramètres d'entrées	127
3.1 Géométrie de l'aquifère.....	127
3.2 Conditions aux limites.....	129
3.3 Coefficients de perméabilité.....	129
3.4 Piézométrie.....	131
3.5 Recharge.....	131
4. Calage en régime permanent	131
4.1 Piézométrie de février 1971: Etat initial stable.....	131
4.2 Phase de calage du modèle.....	131
4.2.1 Les coefficients de perméabilité.....	131
4.2.2 Les valeurs de recharge par les eaux de pluie.....	132
4.2.3 Les conditions aux limites.....	134
4.3 Résultats et validation du modèle.....	134
4.3.1 Comparaison de la piézométrie mesurée et celle calculée.....	134
4.3.2 Le bilan hydrique.....	134
4.3.3 Conclusions.....	136
5 Calage en régime transitoire	137
5.1 Historique piézométrique.....	137
5.2 Utilisation du SIG pour générer certains paramètres du modèle.....	140
5.2.1 Les prélèvements sur la nappe.....	140
5.2.2 L'évapotranspiration.....	141
5.2.3 La recharge.....	142
5.3 Les coefficients d'emmagasinement.....	143
5.4 La discrétisation du temps.....	143
5.5 Phase d'ajustement du modèle.....	144
5.6 Les résultats du calage.....	144
5.6.1 Validation des résultats du modèle.....	144
5.6.2 Le bilan hydrique.....	149
5.7 Conclusions sur le régime transitoire.....	151
6 Simulation de l'arrêt des pompages dans la zone de Thiaroye	152
6.1 Définition du problème.....	152
6.2 Cas d'exploitation envisagé.....	152
6.3 Résultats des imulations.....	152
III. DETERMINATION DE LA VULNERABILITE DU SYSTEME AQUIFERE DE THIAROYE A LA CONTAMINATION AZOTEE	157
1. Introduction	157
2. Détermination des sources de pollution de la nappe	157
2.1 Zones d'habitation.....	158
2.1.1 Zone d'agglomération.....	158
2.1.2 Villages et communautés rurales.....	158
2.2 Réseau routier.....	158
2.3 Dépotoir de Mbeubeuss.....	158

3. Définition des conditions géologiques et hydrogéologiques.....	159
3.1 Conditions Géologiques.....	159
3.2 Conditions hydrogéologiques.....	159
3.2.1 Hydrodynamisme.....	159
3.2.2 Profondeur des eaux par rapport au sol.....	161
4. Typologie des sols.....	161
4.1 Sols ferrugineux tropicaux.....	161
4.2 Dunes littorales.....	161
4.3 Sols des vallées interdunaires.....	164
4.4 Sols sur matériaux argileux.....	164
5. Spatialisation des valeurs de perméabilités et de recharge.....	164
5.1 Perméabilités.....	164
5.2 Recharges.....	165
6. Qualité des eaux.....	167
6.1 Caractérisation chimique des eaux rapport à l'environnement.....	167
6.2 Analyse statistique.....	169
6.3 Concentrations en nitrates définies sur la nappe de Thiaroye.....	170
6.4 Etude de l'hydrodynamisme de la nappe en rapport avec les concentrations en nitrates.....	170
6.5 Etude de l'influence de l'occupation des sols sur la qualité des eaux.....	174
7. Détermination de la vulnérabilité du système aquifère de Thiaroye.....	177
CONCLUSION.....	180
CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS.....	182

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

Ann.1: Piézométrie mesurée en Juin-Juillet 1997

OUVRAGE	LOCALITE	TYPE	COORDONNEES (m)				PIEZOMETRIE (m)	
			X	Y	Z (C. margelle) DONNEE CORRIGEE	N.S (C. margelle)	N.P	
P2.1	Patte d'Oie	Piézoètre	237860	1630880	13,00	7,41	6,41	1,33
P2.2	Crois. Cambèrène	Piézoètre	238560	1632570	30,00	16,22	12,12	4,10
P2.3	Golf Club	Piézoètre	240650	1634650	15,00	16,20	15,20	1,00
P2.4	HLMGuédiawaye	Piézoètre	240540	1634970	13,00	5,71	5,61	0,1
P2.5	Les Filaos	Piézoètre	244110	1636200	18,40	11,30	10,90	0,40
P2.6	Boune	Piézoètre	248000	1633700	15,00	11,74	7,07	4,67
P2.7	Tivaouane Peulh	Piézoètre	254120	1637720	21,00	12,15	10,58	1,57
P2.8	Tivaouane Peulh	Piézoètre	255050	1639500	21,00	12,1	11,05	1,0
P2.9	Niaga Peulh	Piézoètre	258870	1640160	5,00	-	5,38	0,38
P2.10	Gouye Guéwel	Piézoètre	262460	1640560	5,00	-	4,70	0,30
P3.1	Thiar/M. Nestl.	Piézoètre	244830	1631080	4,50	-	3,54	0,96
P3.2	Camp Militaire	Piézoètre	245030	1632680	5,52	-	4,33	1,19
P3.3	Lac Malika	Piézoètre	248240	1636890	3,43	-	2,32	1,11
P.4	Thiaroye/mer	Piézoètre	242290	1630870	4,30	-	-	-
P.58	Malika	Piézoètre	250090	1636100	5,78	5,0	5,19	0,59
P.19	Warouwaye	Piézoètre	246530	1635800	3,80	-	3,73	0,07
P.18	Thiaroye/mer	Piézoètre	245220	1630930	4,17	-	-	-
PS.1*	Toll M.Sarr	Piézoètre	259670	1636740	9,00	9,50	7,43	2,07
PS.2	Sangalkam	Piézoètre	271790	1643140	14,46	-	-	-
PS.3*	Santhe Mame Gor	Piézoètre	272450	1643600	19,60	-	5,13	14,47
PS.3 BIS	Ndam Lo	Piézoètre	273690	1645520	19,27	-	0,86	18,56
PS.4	Santhe Mame Gor	Piézoètre	273220	1645680	9,73	-	4,68	5,05
PS.5	Mbawane	Piézoètre	271810	1645110	5,87	-	3,42	2,45
PS.6	W. Santhe M.G	Piézoètre	272960	1647070	5,13	-	3,35	1,78
PS.7	Rte. Kayar	Piézoètre	271600	1648920	29,21	11,88	10,21	1,67
PS.8	Gorom II	Piézoètre	267490	1637900	28,85	-	7,62	21,23
PS.10	Gorom I	Piézoètre	268740	1640770	29,46	-	5,44	24,02
PS.11	Gorom I	Piézoètre	268460	1642100	25,09	-	6,20	18,89
PS.14	W. Keur A.NDoye	Piézoètre	268740	1646520	6,26	-	2,65	3,61
PTS.68 *	Keur Massar	Puits Villag.	252330	1635830	10,00	-	5,06	4,94
PTS.65 *	Keur Matar Ba	Puits Villag.	251710	1633780	7,00	-	1,1	5,90
PTS.225 *	Deni Niayes	Puits Villag.	265320	1642100	11,50	-	7,39	4,11
PTS.02	Deni.B.NDao	Puits Villag.	266310	1642610	13,35	-	8,68	4,67
PTS.120	Mar.Wayamba	Puits Villag.	263920	1639560	7,79	-	7,59	0,20
PTS.128	Wayambame	Puits Villag.	261230	1639800	5,11	-	-	-
PTS.232	Kaniack	Puits Villag.	267480	164607	11,12	-	10,35	0,77
PTS.213	K. Ab. Ndoye	Puits Villag.	270870	1646960	7,64	-	7,43	0,21
PTS.234	Kayar(Ecole Prim)	Puits Villag.	272000	1650180	2,63	-	2,00	0,63
PTS.210	Darou Bayakh.Syll	Puits Villag.	270010	1641990	28,30	-	11,35	16,95
PTS.202	Kounone	Puits Villag.	257590	1632060	24,63	-	4,97	19,66
PTS.109	Santiane	Puits Villag.	257710	1635100	14,50	-	12,08	2,42
PTS.235 *	Bambilor	Puits Villag.	265060	1637640	17,50	-	8,01	9,49
PTS.123	Ndiougouye	Puits Villag.	263710	1636950	15,80	-	8,34	7,46
PTS.215	Golam	Puits Villag.	272390	1640520	35,60	-	8,95	26,65
PTS.209 *	Croisement yakh	Puits Villag.	270120	1640420	32,00	-	12,86	19,14
PTS.220 *	Djender	Puits Villag.	276090	1645590	33,00	-	15,82	17,18
F.22	Thiaroye	Forage	244000	1634320	19,00	-		
F.17	Thiaroye	Forage	243420	1632940	5,00	-		
F.21	Thiaroye	Forage	245250	1633780	8,00	-		
F.15	Thiaroye	Forage	245160	1633570	8,00	-		
F.18	Thiaroye	Forage	243720	1633090	5,00	-		
F.19	Thiaroye	Forage	244770	1633970	12,00	-		
F.1	Beer Tialane	Forage	269700	1644270	10,00	-		
F.2	Beer Tialane	Forage	269230	1644340	10,00	-		

F.3	Beer Tialane	Forage	268690	1644400	9,50	-		
F.4	Beer Tialane	Forage	268360	1644310	9,00	-		

* Niveau statique et Topographie par rapport au sol

Piézométrie mesurée en Octobre 1997

OUVRAGE	LOCALITE	TYPE	COORDONNEES (m)				PIEZOMETRIE (m)	
			X	Y	Z (C. margelle)	N.S (C. margelle)	N.P	
			DONNEE CORRIGEE					
P2.1	Patte d'Oie	Piézomètre	237860	1630880	13,00	7,41	5,80	1,51
P2.2	Crois. Cambèrène	Piézomètre	238560	1632570	30,00	16,22	12,12	4,90
P2.3	Golf Club	Piézomètre	240650	1634650	15,00	16,20	15,00	1,00
P2.4	HLMGuédiawaye	Piézomètre	240540	1634970	13,00	5,71	5,46	0,25
P2.5	Les Filaos	Piézomètre	244110	1636200	18,40	11,30	10,66	0,64
P2.6	Boune	Piézomètre	248000	1633700	15,00	11,74	6,98	4,76
P2.7	Tivaouane Peulh	Piézomètre	254120	1637720	21,00	12,15	10,46	1,69
P2.8	Tivaouane Peulh	Piézomètre	255050	1639500	21,00	12,1	11,2	0,90
P2.9	Niaga Peulh	Piézomètre	258870	1640160	5,00	-	4,72	0,28
P2.10	Gouye Guéwel	Piézomètre	262460	1640560	5,00	-	4,70	0,30
P3.1	Thiar/M. Nestl.	Piézomètre	244830	1631080	4,50	-	2,80	1,70
P3.2	Camp Militaire	Piézomètre	245030	1632680	5,52	-	2,41	3,11
P3.3	Lac Malika	Piézomètre	248240	1636890	3,43	-	2,30	1,13
P.4	Thiaroye/mer	Piézomètre	242290	1630870	4,30	-	-	-
P.58	Malika	Piézomètre	250090	1636100	5,78	5,0	-	-
P.19	Warouwaye	Piézomètre	246530	1635800	3,80	-	2,36	1,44
P.18	Thiaroye/mer	Piézomètre	245220	1630930	4,17	-	-	-
PS.1*	Toll M.Sarr	Piézomètre	259670	1636740	9,00	9,50	8,14	1,36
PS.2	Sangalkam	Piézomètre	271790	1643140	14,46	-	-	-
PS.3*	Santhe Mame Gor	Piézomètre	272450	1643600	19,60	-	5,50	14,10
PS.3 BIS	Ndam Lo	Piézomètre	273690	1645520	19,27	-	1,27	18,00
PS.4	Santhe Mame Gor	Piézomètre	273220	1645680	9,73	-	4,83	4,90
PS.5	Mbawane	Piézomètre	271810	1645110	5,87	-	3,86	2,01
PS.6	W. Santhe M.G	Piézomètre	272960	1647070	5,13	-	1,67	3,46
PS.7	Rte. Kayar	Piézomètre	271600	1648920	29,21	11,88	9,72	1,61
PS.8	Gorom II	Piézomètre	267490	1637900	28,85	-	7,65	21,20
PS.10	Gorom I	Piézomètre	268740	1640770	29,46	-	6,36	23,1
PS.11	Gorom I	Piézomètre	268460	1642100	25,09	-	6,20	18,89
PS.14	W. Keur A.NDoye	Piézomètre	268740	1646520	6,26	-	3,15	3,11
PTS.68 *	Keur Massar	Puits Villag.	252330	1635830	10,00	-	6,82	3,18
PTS.65 *	Keur Matar Ba	Puits Villag.	251710	1633780	7,00	-	4,91	2,09
PTS.225 *	Deni Niayes	Puits Villag.	265320	1642100	11,50	-	7,50	4,00
PTS.02	Deni.B.NDao	Puits Villag.	266310	1642610	13,35	-	7,42	3,93
PTS.120	Mar.Wayamba	Puits Villag.	263920	1639560	7,79	-	7,67	0,12
PTS.128	Wayambame	Puits Villag.	261230	1639800	5,11	-	-	-
PTS.232	Kaniack	Puits Villag.	267480	164607	11,12	-	10,43	0,69
PTS.213	K. Ab. Ndoye	Puits Villag.	270870	1646960	7,64	-	7,40	0,24
PTS.234	Kayar(Ecole Prim)	Puits Villag.	272000	1650180	2,63	-	1,77	0,86
PTS.210	Darou Bayakh.Syll	Puits Villag.	270010	1641990	28,30	-	13,34	15,46
PTS.202	Kounone	Puits Villag.	257590	1632060	24,63	-	5,34	19,29
PTS.109	Santiane	Puits Villag.	257710	1635100	14,50	-	12,08	2,42
PTS.235 *	Bambilor	Puits Villag.	265060	1637640	17,50	-	8,37	9,13
PTS.123	Ndiougouye	Puits Villag.	263710	1636950	15,80	-	-	-
PTS.215	Golam	Puits Villag.	272390	1640520	35,60	-	13,98	21,62
PTS.209 *	Croisem. Bayakh	Puits Villag.	270120	1640420	32,00	-	15,19	16,81
PTS.220 *	Djender	Puits Villag.	276090	1645590	33,00	-	18,08	14,92
F.22	Thiaroye	Forage	244000	1634320	19,00	-		
F.17	Thiaroye	Forage	243420	1632940	5,00	-		
F.21	Thiaroye	Forage	245250	1633780	8,00	-		
F.15	Thiaroye	Forage	245160	1633570	8,00	-		
F.18	Thiaroye	Forage	243720	1633090	5,00	-		

F.19	Thiaroye	Forage	244770	1633970	12,00	-		
F.1	Beer Tialane	Forage	269700	1644270	10,00	-		
F.2	Beer Tialane	Forage	269230	1644340	10,00	-		
F.3	Beer Tialane	Forage	268690	1644400	9,50	-		
F.4	Beer Tialane	Forage	268360	1644310	9,00	-		

Piézométrie moyenne de 1987 à 1997

OUVRAGE	LOCALITE	TYPE	COORDONNEES (m)				PIEZOMETRIE (m)	
			X	Y	Z (C. margelle)		N.S	N.P
					DONNEE	CORRIGEE	(C. margelle)	
P2.1	Patte d'Oie	Piézomètre	237860	1630880	13,00	7,41	6,40	1,01
P2.2	Crois. Cambèrène	Piézomètre	238560	1632570	30,00	16,22	12,33	3,89
P2.3	Golf Club	Piézomètre	240650	1634650	15,00	16,20	15,00	1,20
P2.4	HLMGuédiawaye	Piézomètre	240540	1634970	13,00	5,71	4,59	1,12
P2.5	Les Filaos	Piézomètre	244110	1636200	18,40	11,30	10,66	0,64
P2.6	Boune	Piézomètre	248000	1633700	15,00	11,74	9,90	5,01
P2.7	Tivaouane Peulh	Piézomètre	254120	1637720	21,00	12,15	-	-
P2.8	Tivaouane Peulh	Piézomètre	255050	1639500	21,00	12,1	11,2	0,90
P2.9	Niaga Peulh	Piézomètre	258870	1640160	5,00	-	-	-
P2.10	Gouye Guéwel	Piézomètre	262460	1640560	5,00	-	4,75	0,25
P3.1	Thiar/M: Nestl.	Piézomètre	244830	1631080	4,50	-	-	-
P3.2	Camp Militaire	Piézomètre	245030	1632680	5,52	-	-	-
P3.3	Lac Malika	Piézomètre	248240	1636890	3,43	-	-	-
P.4	Thiaroye/mer	Piézomètre	242290	1630870	4,30	-	-	-
P.58	Malika	Piézomètre	250090	1636100	5,78	5,0	-	-
P.19	Warouwaye	Piézomètre	246530	1635800	3,80	-	-	-
P.18	Thiaroye/mer	Piézomètre	245220	1630930	4,17	-	-	-
PS.1*	Toll M.Sarr	Piézomètre	259670	1636740	9,00	9,50	7,82	1,68
PS.2	Sangalkam	Piézomètre	271790	1643140	14,46	-	-	-
PS.3*	Santhe Mame Gor	Piézomètre	272450	1643600	19,60	-	4,80	14,80
PS.3 BIS	Ndam Lo	Piézomètre	273690	1645520	19,27	-	0,70	18,57
PS.4	Santhe Mame Gor	Piézomètre	273220	1645680	9,73	-	4,99	4,74
PS.5	Mbawane	Piézomètre	271810	1645110	5,87	-	2,69	3,18
PS.6	W. Santhe M.G	Piézomètre	272960	1647070	5,13	-	1,83	3,30
PS.7	Rte. Kayar	Piézomètre	271600	1648920	29,21	11,88	7,48	3,85
PS.8	Gorom II	Piézomètre	267490	1637900	28,85	-	7,34	21,55
PS.10	Gorom I	Piézomètre	268740	1640770	29,46	-	4,68	24,78
PS.11	Gorom I	Piézomètre	268460	1642100	25,09	-	6,20	18,89
PS.14	W. Keur A.NDoye	Piézomètre	268740	1646520	6,26	-	2,16	4,10
PTS.68*	Keur Massar	Puits Villag.	252330	1635830	10,00	-	-	-
PTS.65*	Keur Matar Ba	Puits Villag.	251710	1633780	7,00	-	-	-
PTS.225*	Deni Niayes	Puits Villag.	265320	1642100	11,50	-	7,30	4,20
PTS.02	Deni.B.NDao	Puits Villag.	266310	1642610	13,35	-	8,22	5,13
PTS.120	Mar.Wayamba	Puits Villag.	263920	1639560	7,79	-	7,36	0,44
PTS.128	Wayambame	Puits Villag.	261230	1639800	5,11	-	-	-
PTS.232	Kaniack	Puits Villag.	267480	164607	11,12	-	10,39	0,73
PTS.213	K. Ab. Ndoye	Puits Villag.	270870	1646960	7,64	-	7,42	0,22
PTS.234	Kayar(Ecole Prim)	Puits Villag.	272000	1650180	2,63	-	1,81	0,82
PTS.210	Darou Bayakh.Syll	Puits Villag.	270010	1641990	28,30	-	10,2	18,1
PTS.202	Kounone	Puits Villag.	257590	1632060	24,63	-	4,35	20,28
PTS.109	Santiane	Puits Villag.	257710	1635100	14,50	-	-	-
PTS.235*	Bambilor	Puits Villag.	265060	1637640	17,50	-	8,20	9,30
PTS.123	Ndiougouye	Puits Villag.	263710	1636950	15,80	-	-	-
PTS.215	Golam	Puits Villag.	272390	1640520	35,60	-	13,50	22,10
PTS.209*	Croisem. Bayakh	Puits Villag.	270120	1640420	32,00	-	17,15	14,85
PTS.220*	Djender	Puits Villag.	276090	1645590	33,00	-	18,15	14,85
F.22	Thiaroye	Forage	244000	1634320	19,00	-		
F.17	Thiaroye	Forage	243420	1632940	5,00	-		
F.21	Thiaroye	Forage	245250	1633780	8,00	-		

F.15	Thiaroye	Forage	245160	1633570	8,00	-		
F.18	Thiaroye	Forage	243720	1633090	5,00	-		
F.19	Thiaroye	Forage	244770	1633970	12,00	-		
F.1	Beer Tialane	Forage	269700	1644270	10,00	-		
F.2	Beer Tialane	Forage	269230	1644340	10,00	-		
F.3	Beer Tialane	Forage	268690	1644400	9,50	-		
F.4	Beer Tialane	Forage	268360	1644310	9,00	-		

* Niveau statique et Topographie par rapport au sol

Ann.2: Analyses chimiques de Juillet 1997

OUVRAGE	T	pH	O ₂	Cond.	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
ZONE A	[°C]		[mg/l]	µS/cm	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
P2.2	29,5	5,67	6,9	689	0,06	0,230	89,35
P2.3	29,7	6,30	6,1	852	0,07	0,340	158
P2.4	30,1	6,18	5,3	1068	0,03	0,110	165,4
P2.5	28,33	6,50	6,1	1023	0,01	0,018	145
P2.6	29,1	6,83	1,6	349	0,02	0,026	9
P.18	-	-	-	-	-	-	-
P.4	-	-	-	-	-	-	-
F.22	29,2	4,42	5,90	1530	1,23	0,010	418
F.21	29,6	4,80	5,50	1304	2,30	0,010	403
F.15	29,5	5,07	4,90	1074	2,07	0,020	298,4
F.17	29,19	5,30	3,9	932	2,45	0,010	356
F.18	29,57	5,08	4,6	1095	1,58	0,016	280
F.19	29,18	5,02	6,80	1465	3,12	0,020	447,6
ZONE B							
P2.9	28,70	6,40	3,80	3560	0,90	0,020	7,76
P2.10	29,40	6,77	2,30	821	0,05	0,190	23
PS.10	27,97	7,76	2,80	1285	0,32	1,080	41,17
PS.11	29,31	7,25	2,12	705	2,05	0,030	9
PS.14	28,82	6,92	2,50	674	1,27	0,030	5,02
PTS.120	27	6,45	3,80	867	0,38	0,020	2
ZONE C							
PTS.02	28,33	5,70	6,90	2450	0,06	1,017	425,4
PTS.225	27,46	5,20	3,4	1640	2,61	0,160	120
PTS.232	28	6,29	4,4	326	0,05	0,070	37
PTS.213	28,33	6,05	6,78	1353	2,47	0,130	398,6
PTS.234	28,17	7,63	3,45	2110	0,12	0,020	12,03
PTS.235	26,95	7,27	3,67	1710	0,07	0,050	11
PTS.215	26,48	6,40	3,89	470	0,05	0,330	164,4
PTS.202	26,84	6,22	5,56	639	0,38	0,050	20,13
PTS.209	27,35	7,48	-	751	0,09	0,090	8,75
PTS.210	28,12	6,92	4,9	209	0,15	0,050	37,54
PTS.123	-	-	-	-	0,07	0,110	-
PTS.109	-	-	-	-	-	-	-
ZONE D							
P2.1	29,11	6,19	6,7	122	2,32	0,016	20,15
P3.3	28,40	5,6	4,2	218	3,14	0,040	21,37
PS.5	28,74	4,80	5,5	226	0,33	0,006	0,3
PS.6	28,30	5,6	3,80	504	0,07	0,010	1,5
PS.7	28,69	6,08	4,9	515	2,37	0,070	2,5
PTS.128	27,07	6,01	4,7	508	0,02	0,200	25,31
PS.4	29,02	6,73	4,4	210	0,39	0,020	8
PTS.220	26,76	6,15	6,3	272	0,55	0,180	37
P.19	27,62	5,5	7,2	641	0,01	0,020	45,42
ZONE E							
P2.8	29,3	6,51	1,8	370	0,11	0,010	7,62
P2.7	29,1	7,73	2,56	637	0,46	0,640	30
P3.1	29,5	6,67	4,3	674	0,42	0,020	7,8
P3.2	27,34	6,05	4,1	339	0,00	0,010	8

P.58	26,49	5,03	4,7	1840	0,37	0,220	115,1
PS.1	29,60	6,14	2,5	346	0,14	0,009	4
PS.3	27,76	7,29	3,5	213	0,09	0,030	29,2
PS.3bis	27,37	7,54	2,6	396	0,43	0,030	2,5
PS.8	29,22	6,58	1,1	856	1,35	0,003	2,5
PTS.65	27,32	6,20	3,6	987	0,05	0,170	5,2
PTS.68	26,60	5,74	3,5	850	0,10	0,068	9,26
F.1	-	-	-	-	-	-	-
F.2	30,7	7,02	4,8	340	2,69	0,020	8
F.3	29,8	7,7	1,8	640	3,22	0,050	8
F.4	29,2	6,57	4,2	397	2,12	0,100	8,21

OUVRAGE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Hco ₃ ⁻ CO ₃ ²⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	e
ZONE A	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[%]
P2.2	56,2	0,18	25,3	10,01	10,2	30	87	-0,03
P2.3	89	7	23,61	19,19	69,66	29	88,01	0,00
P2.4	88,2	3	39,37	15,6	49,04	20,2	121,3	-0,02
P2.5	76,5	1,8	66,5	14,3	80,2	40,01	112	0,03
P2.6	21,51	3	37	5,43	70,5	28	54	0,01
P.18	-	-	-	-	-	-	-	-
P.4	-	-	-	-	-	-	-	-
F.22	178,4	33,22	137	30,48	49	119,3	251,4	0,05
F.21	162,2	26,26	125	52,06	50,4	93	240,2	0,12
F.15	138,5	20,36	102,5	43,3	64,06	101,4	201,4	0,10
F.17	167,5	23	108	49	67,11	115,1	262,5	0,04
F.18	161,4	20	102	41,5	63,5	98,5	230,2	0,12
F.19	151,2	20	101,5	43,2	53	93	230,3	-0,05
ZONE B								
P2.9	260	78	102,6	102,4	323,4	688	219	0,03
P2.10	71	3,16	76,08	16	165	104,2	109	0,00
PS.10	114,4	6,46	66,44	38	220	134,4	172,3	-0,03
PS.11	78	6	30	14	98	78	100	0,00
PS.14	45,46	3	12,03	6	35,6	7,9	85,6	-0,03
PTS.120	43,27	4	98	25,1	59,7	280,2	83,27	-0,03
ZONE C								
PTS.02	266,5	41,14	173,4	65,35	85,42	122,2	584	-0,02
PTS.225	120,4	17,4	89,3	30,42	75,3	200	217,5	-0,07
PTS.232	42,25	6	15,01	8	31	10,15	76,43	-0,02
PTS.213	129	49	58,56	44,37	37	99,5	123	0,06
PTS.234	180,7	72	122,4	32,26	156,1	492,5	221	-0,04
PTS.235	127	32	193	48,14	274	546,5	132	0,01
PTS.215	59	9	82,3	29,41	73,22	64,01	134	0,04
PTS.202	60	8,03	49	14,54	75,5	110,4	98,7	-0,03
PTS.209	54,37	3,21	62,1	31	276	49,03	107,1	-0,08
PTS.210	17	3	16,34	6	20,61	6,37	40	-0,04
PTS.123	-	-	-	-	-	-	-	-
PTS.109	-	-	-	-	-	-	-	-
ZONE D								
P2.1	14	2,39	12,5	2	33,55	12,46	13,31	-0,04
P3.3	21	3,46	17,24	3,21	66,71	6,25	36,36	-0,03
PS.5	6	6,45	2,14	0,87	17,4	2	9,2	0,02

PS.6	11	8	14	3	82	6,1	5,1	-0,01
PS.7	25,5	3,22	40	4	110	5	59	-0,03
PTS.128	19	6	73	6	214	22,15	29,5	-0,02
PS.4	35,5	8	31,43	7,48	24,4	60,3	79	-0,02
PTS.220	17,27	8	43	7,42	74	39,33	33	0,04
P.19	68	5,45	28,23	17,34	43	60,3	112	0,01
ZONE E								
P2.8	36,38	4,11	28	8	79	1,8	78,22	0,02
P2.7	40,05	8,08	56,47	14,01	59,4	114	73,28	0,00
P3.1	65	4,41	51	4,41	177	20,15	76,03	0,04
P3.2	20,42	2,28	29	2,23	68,2	2,8	48	-0,03
P.58	115,1	6,42	196,3	59	128,1	522	172	0,01
PS.1	31	2	13	7	88	14,5	30,5	-0,02
PS.3	16,32	2	15,4	6	24,4	14,14	30	0,01
PS.3bis	27,44	1,6	32,09	9,43	67,11	85,46	28	-0,03
PS.8	34	6,04	22,1	29,5	33	98,3	88	0,01
PTS.65	65,2	3	65,4	0,36	45,3	141	79	0,03
PTS.68	33	5	100	25	64,5	219,3	108,3	-0,03
F.1	-	-	-	-	-	-	-	-
F.2	39,5	3	17,3	10	73,22	41,3	37	-0,07
F.3	44,37	23,4	10,15	5	73,22	41,3	42,41	-0,07
F.4	105,6	45,6	53,37	8,21	105,6	45,6	53,37	-0,12

Analyses chimiques au piézomètre P2-9 durant les pompages d'essai (Août 1997)

Temps (mn)	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	e
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[%]
3	457,17	90,00	220,00	154,00	995,52	509,90	-0,01
6	471,46	89,00	209,10	143,42	951,68	510,00	-0,11
10	459,00	109,00	126,00	140,00	985,22	512,00	-0,11
15	446,50	78,04	124,49	128,19	1003,35	546,44	-0,06
20	493,38	83,00	124,00	134,00	986,57	575,30	-0,02
25	517,46	86,31	124,04	140,00	975,06	603,01	-0,01
30	539,00	88,00	121,00	140,07	971,05	612,00	0,05
35	541,28	87,00	121,43	140,35	998,25	626,19	0,01
45	550,21	89,20	122,20	145,12	971,04	677,78	-0,10
55	581,00	100,00	123,03	142,56	901,00	687,02	-0,01
75	451,00	67,41	110,00	110,17	984,00	761,19	0,08
135	640,11	90,00	109,49	150,37	987,00	845,00	0,13
155	657,37	90,05	98,49	151,29	986,61	867,09	-0,10
175	669,00	91,13	98,12	154,00	1003,06	869,90	-0,01
195	676,00	91,31	98,00	155,09	998,00	876,12	0,08

Analyses chimiques d'Octobre 1997

OUVRAGE	T	pH	O ₂	Cond.	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
ZONE A	[°C]		[mg/l]	µS/cm	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
P2.2	29,5	5,75	7,4	790	0,00	0,170	117
P2.3	28,4	6,80	5,5	508	0,01	0,010	45,4
P2.4	29,3	6,59	7,25	1135	0,00	0,100	298,2
P2.5	28,4	6,54	6,88	1142	0,01	0,280	254,5
P2.6	30,5	7,10	3,55	298	0,00	0,010	0
P.18	-	-	-	-	-	-	-
P.4	-	-	-	-	-	-	-
F.22	29,6	4,94	6,90	1505	2,26	0,013	547,4
F.21	29,7	4,15	6,80	1276	2,60	0,010	547,5
F.15	29,5	5,25	7,20	1107	1,89	0,023	367
F.17	28,9	5,08	8,30	1144	3,10	0,039	486,2
F.18	29,00	4,62	4,62	1112	1,08	0,020	310,5
F.19	29,6	5,00	7,10	1406	2,52	0,730	440,8
ZONE B							
P2.9	27,90	7,08	3,35	3190	0,00	0,085	0,2
P2.10	29,00	6,77	2,45	758	0,00	0,750	18,4
PS.10	29,8	6,96	3,40	578	0,43	0,300	52,1
PS.11	30,9	7,01	2,35	666	0,00	0,090	6,6
PS.14	29,3	7,15	3,30	483	1,35	0,016	13,2
PTS.120	28,3	7,06	6,5	807,0	0,63	0,016	0,2
ZONE C							
PTS.02	28,4	6,94	7,65	2300	0,56	0,140	408,1
PTS.225	27,6	5,21	7,8	1683	2,48	0,000	154,1
PTS.232	28,2	6,61	4,4	362	0,05	0,090	45,2
PTS.213	28,5	6,05	6,95	1359	2,38	0,590	211
PTS.234	29,4	6,88	6,7	1766	0,05	0,006	26,3
PTS.235	28,2	6,99	6,95	1707	0,12	0,560	0,6
PTS.215	27,4	7,30	5,8	977	0,11	0,030	250,9
PTS.202	28,7	7,12	6,25	646	0,05	0,033	14,2
PTS.209	28,6	6,34	7,15	734	0,02	0,013	4,9
PTS.210	28,8	7,28	7,3	214	0,00	0,560	40,1
PTS.123	28,1	7,74	7,74	513	0,05	0,049	0,00
PTS.109	-	-	-	-	-	-	-
ZONE D							
P2.1	29,3	6,24	7,1	139	0,00	0,006	3
P3.3	28,1	5,21	5,6	232	0,00	0,00	18
PS.5	30,9	5,10	4,4	209	0,4	0,010	0,1
PS.6	30,6	5,80	4,7	216	0,00	0,000	0,1
PS.7	30,1	6,25	6,55	459	1,75	0,020	0,6
PTS.128	27,5	6,04	5,8	519	0,05	0,180	25
PS.4	31,3	6,06	4,4	487	0,00	0,000	0,22
PTS.220	28,4	6,72	6,3	386	0,05	0,000	4,3
P.19	28,4	5,89	7,2	686	0,00	0,040	7,3
ZONE E							
P2.8	29,1	7,2	2,6	411	0,01	0,003	6,7
P2.7	31,2	7,10	2,85	412	0,00	0,010	0,1
P3.1	28,7	6,58	4,8	612	0,00	0,190	0,4
P3.2	29	6,25	6,3	366	0,00	0,190	11

P.58	28,1	5,47	6,95	1850	0,09	1,910	123,3
PS.1	29,4	7,13	2,5	354	0,00	0,003	0,1
PS.3	27,3	7,67	3,3	374	0,02	0,420	10
PS.3bis	27,2	7,55	4,55	470	0,03	0,003	3,1
PS.8	30,4	7,38	2,5	950	2,14	0,046	0,9
PTS.65	28,00	5,03	6,95	1504	2,25	0,000	0,7
PTS.68	28,30	5,86	6,5	578	0,00	0,120	6,8
F.1	30,1	7,88	3,6	188	0,27	0,023	4
F.2	29,4	7,15	4,05	344	1,93	0,006	1
F.3	29,2	6,80	3,5	675	2,10	0,120	9,1
F.4	29,1	7,20	4,35	401	1,07	0,016	1,00

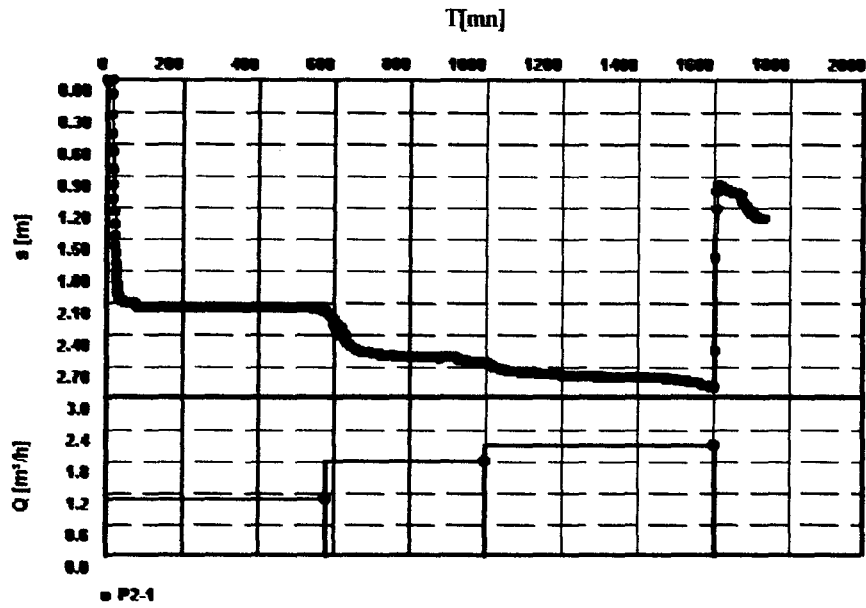
OUVRAGE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Hco ₃ ⁻ CO ₃ ²⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	e
ZONE A	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[%]
P2.2	92,5	4,66	31,44	18,5	76,5	30,3	131,3	-0,03
P2.3	90	6	18,06	8,5	59,5	21,3	127	-0,01
P2.4	110	4,8	52,7	27,5	61	27	161,1	-0,11
P2.5	88	3,11	99	18,5	94,5	52,6	167,2	-0,11
P2.6	18,5	2,56	25,3	4,16	79,3	8,9	40,5	-0,06
P.18								
P.4								
F.22	176,3	24,3	83,4	45,2	24,4	65,9	171,7	0,05
F.21	183,1	29,2	100,6	53,8	12,2	28,7	292,8	0,01
F.15	124,1	17,7	76	37	48,8	76	201	-0,10
F.17	189,1	19	73,3	50	42,7	72,7	235,6	-0,01
F.18	175	20	72,2	43,8	36,6	60,6	256,5	0,08
F.19	165	23,7	115	54,7	85,4	51,5	217,2	0,13
ZONE B								
P2.9	364	85	111,4	139,6	293	813	377	0,08
P2.10	53	3,08	61	15	91,5	85,3	119,3	-0,04
PS.10	100	14,20	42,30	32	164,7	91,5	127,6	0,04
PS.11	71	4,60	30	13	97,6	69,8	94,5	-0,01
PS.14	35	4,33	20	4,4	42,7	8,9	62,2	-0,14
PTS.120	48	4,50	101,70	31	61	353,2	80,6	-0,08
ZONE C								
PTS.02	296	23,6	100,8	48	27,45	72,1	556,8	-0,08
PTS.225	195	23,8	141,4	25,15	79,3	224,7	347,1	0,00
PTS.232	41,5	8,4	17,6	9,5	42,7	7,3	75,4	-0,01
PTS.213	132,2	45,4	56,7	30	42,7	226,2	94	0,06
PTS.234	188,7	74,3	250,7	36,6	173,8	698,5	394,6	-0,13
PTS.235	157,4	29,7	248	59	146,4	800	192,1	0,01
PTS.215	66,5	14,6	133,5	33	67,1	167,2	147,6	-0,01
PTS.202	58	5,3	46,8	15	85,4	105	106,6	-0,10
PTS.209	59,5	3,2	65,2	32,5	106,7	161,4	136,9	-0,05
PTS.210	18,02	2,43	11,77	5,07	15,25	1,6	41,5	-0,14
PTS.123	81	1,7	30,4	13	24,4	126	84,6	0,12
PTS.109								
ZONE D								
P2.1	18,8	1,23	10	1,55	36,6	5,2	14	-0,02
P3.3	21,7	3,24	17,2	3,16	67,04	4,5	36	-0,03
PS.5	7,85	12	4	0,95	37	4,9	10	-0,07
PS.6	12,1	11	35,2	2,05	67,1	4,9	10	-0,03

PS.7	28,5	4,85	48,2	3,25	170,8	4,6	63,7	-0,10
PTS.128	24	5	72,22	5,4	213,5	16,2	12,8	0,12
PTS.220	15,65	5,87	50,25	4,8	194	1	5,4	0,08
PS.4	34	31	26,16	7,25	134	16,8	38,5	0,13
P.19	61,5	6,03	24,7	17,5	85,4	14,3	117,6	0,07
ZONE E								
P2.8	35,4	3,17	25	7,8	61	2,18	87,5	-0,03
P2.7	32,25	5,51	48	9,75	45	124,7	58,8	-0,05
P3.1	57,5	2,83	51,23	4,25	155,5	17,1	77	0,07
P3.2	23,2	2,82	35	4	91,5	3,3	50	0,00
P.58	127,5	11,8	198	70,5	134,2	426	230	0,09
PS.1	36,5	1,6	13,2	7,5	50,4	13,9	37,6	0,05
PS.3	24,5	5,08	22,51	8,8	49	78,5	9,6	0,06
PS.3bis	27,5	12	36,09	9,8	73,2	105,8	32,6	-0,06
PS.8	54,4	4,76	30	37,5	97,7	115,2	110,8	-0,01
PTS.65	60	10,26	100,2	43	54,9	394,6	80,8	0,00
PTS.68	73	20,1	88	3,7	70,2	222,8	110,2	-0,08
F.1	21,25	4	16,6	5	42,7	19,8	30,8	0,10
F.2	23	2	21,3	9	61	37,3	38,2	-0,01
F.3	49,5	23	8,1	1	24,4	21,1	78,3	0,01
F.4	45	8,4	20,5	9,5	79,3	64,1	82,8	-0,11

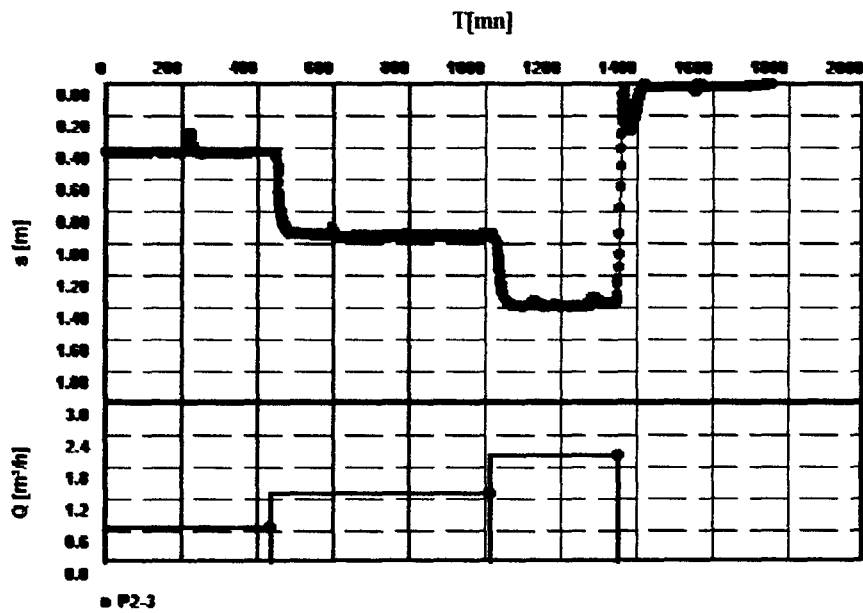
e Erreur d'analyses:
$$e[\%] = \frac{\sum Cation(c, eq^+) - \sum Anion(c, eq^-)}{0,5 \cdot \sum Cation(c, eq^+) + \sum Anion(c, eq^-)} \cdot 100$$

c(eq) Concentration en mmol/l(eq)

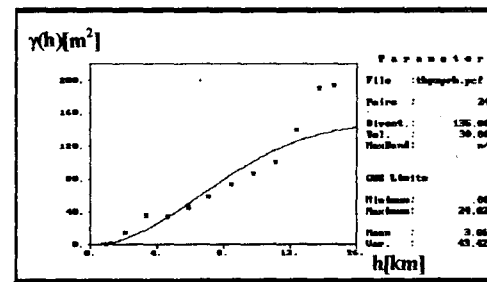
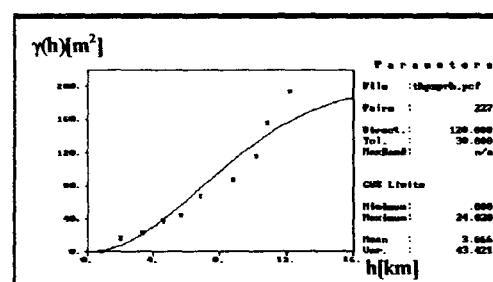
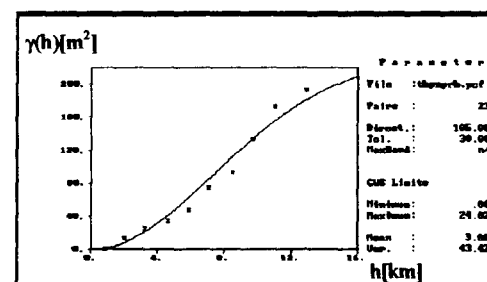
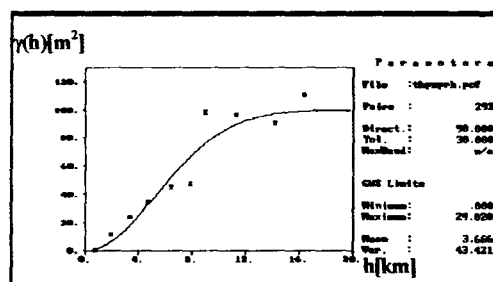
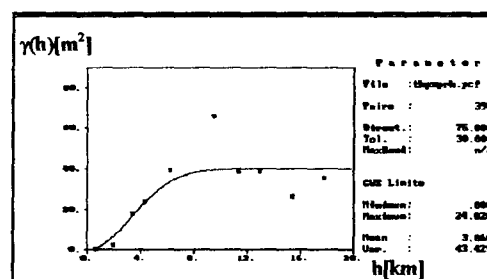
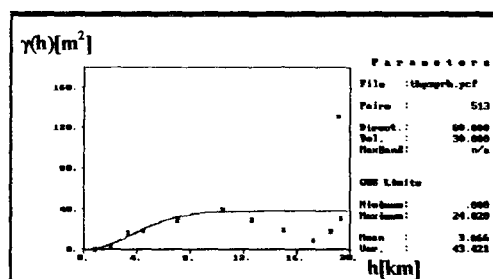
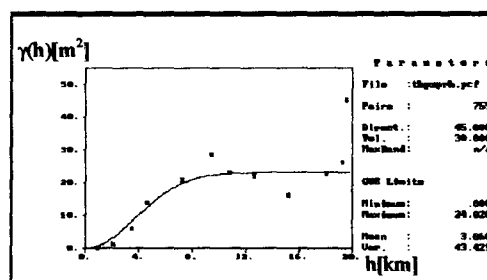
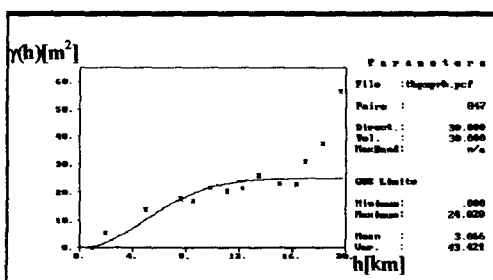
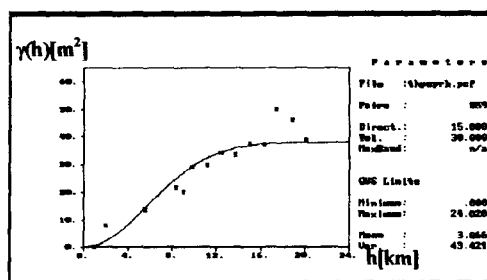
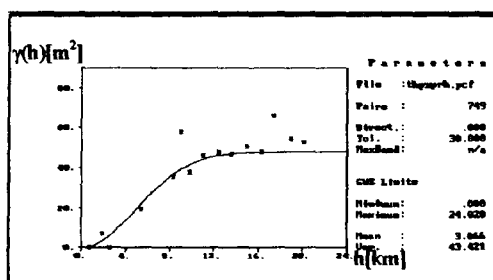
Ann. 3: Rabattement en fonction du temps au piézomètre P2-1

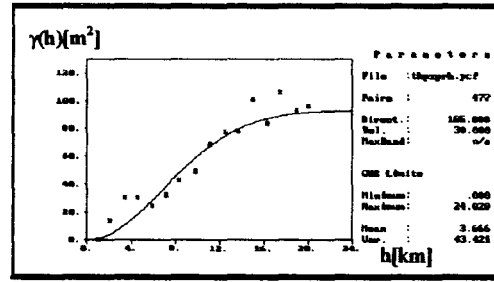
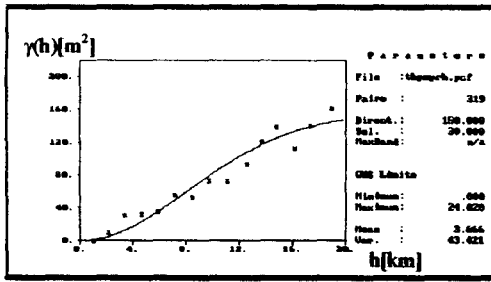


Rabattement en fonction du temps au piézomètre P2-3

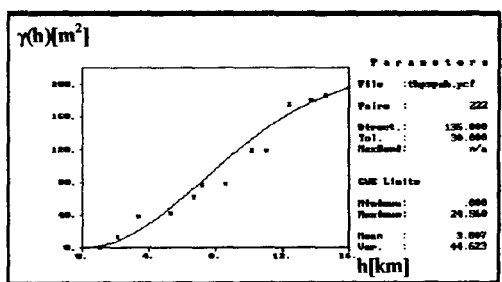
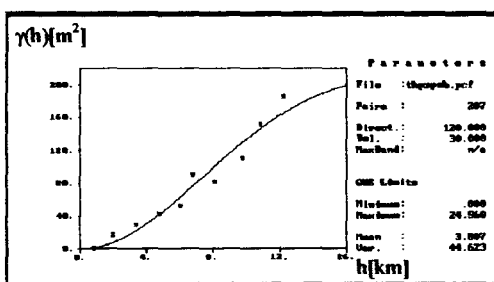
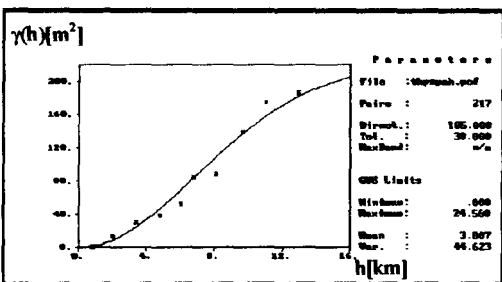
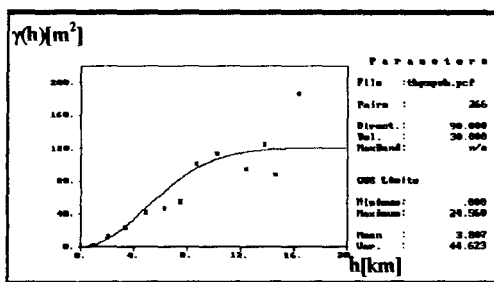
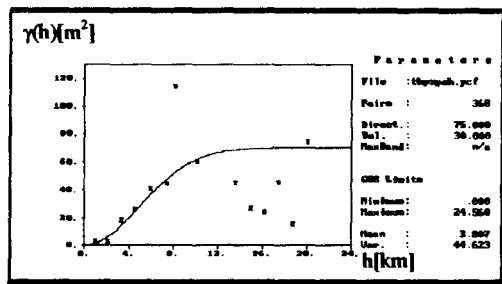
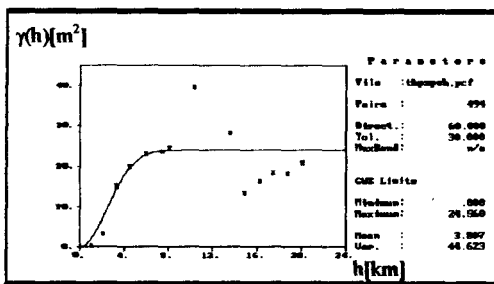
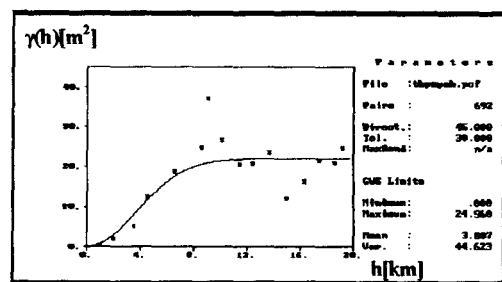
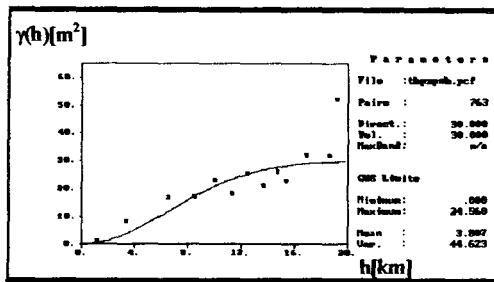
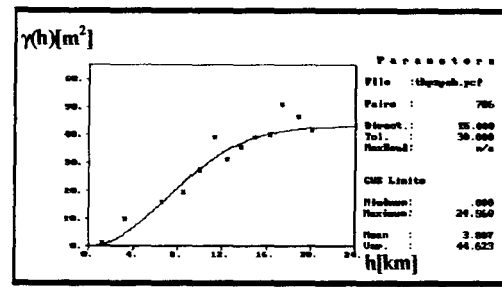
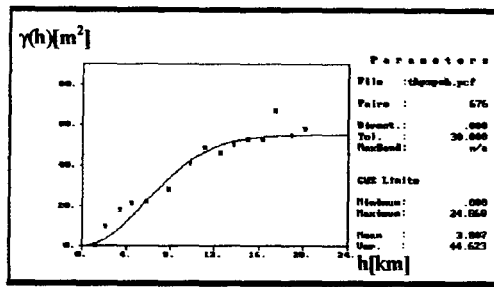


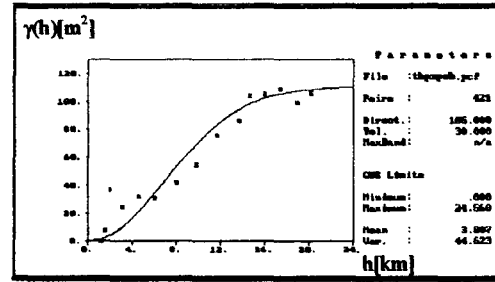
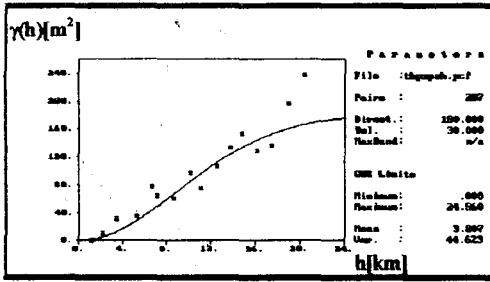
Ann.4: Variogrammes estimés dans différentes directions pour les charges piézométriques de Juin-Juillet 1997

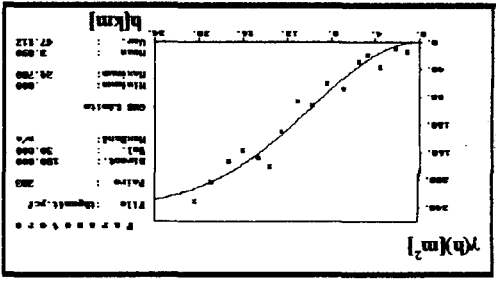
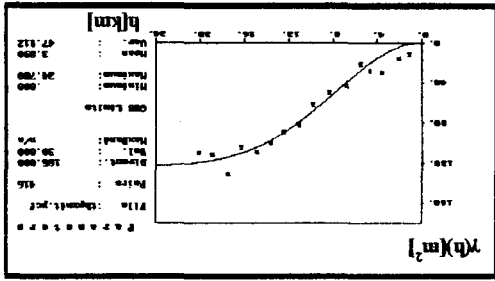




Variogrammes estimés dans différentes directions pour les charges piézométriques de d'octobre







Variogrammes estimés dans différentes directions pour les charges piézométriques moyennes de 1984 à 1997

