

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
CENTRE DE THIES
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



GC.005

PROJET DE FIN D'ETUDES

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

*DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME D'INFORMATION
GEOGRAPHIQUE « RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES
DANS LA ZONE DE MBOUR-FATICK »*

Auteur : Mlle Lissa NGOM

Directeurs Internes : M. Babacar NDIAYE

M. Alassane BA

M. Seyni NDOYE

Directeur Externe : M. HANNU (ELS)

Année Académique : 2002/2003

DEDICACES

Je rends grâce à Dieu et dédie ce modeste projet :

A mon défunt père Mouhamadou NGOM ;

A ma très chère mère Rokhaya DIAGNE ;

A toute la promotion 2003 de l'ESP ;

A tous ceux qui me sont proches.

RESUME

La zone de Mbour- Fatick se situe dans le bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien et son climat est de type tropical soudanien influencé par des courants marins.

Elle recèle d'importantes réserves d'eaux souterraines exploitables pour améliorer l'approvisionnement en eau des populations. Toutefois le fort déficit pluviométrique observé dans la région depuis plus de trois décennies (3) a provoqué une baisse généralisée du niveau des nappes et occasionné des intrusions salines. La contrainte majeure dans cette zone est essentiellement la rareté de l'eau douce.

Des études géophysiques, menées dans cinq (5) villages ont montré que les nappes aquifères rencontrées se situent à des profondeurs relativement importantes mais qu'elles ne présentent aucune possibilité de salinisation.

L'étude hydrochimique effectuée sur soixante (60) puits répertoriés révèle que les types de nappes captées sont essentiellement le Continental Terminal et l'Eocène. Ces deux types de nappes présentent globalement un degré de salinisation relativement élevé suivant les zones.

Par ailleurs nous notons quelques poches de fortes teneurs en nitrates dues à une pollution ponctuelle. La quantité importante de fluor en provenance des calcaires de l'Eocène est très déterminante dans cette zone.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, de par leurs actes ou leurs conseils ont aidé à la réalisation de cette ouvrage.

En particulier, nous adressons nos plus vifs remerciements à :

- ✓ Monsieur Babacar NDIAYE, professeur à l'ESP et chef du Département Génie Civil pour avoir bien voulu encadrer ce projet ;
- ✓ Monsieur Alassane BA, professeur de Topographie à l'ESP en sa qualité de directeur interne ;
- ✓ Monsieur Seyni NDOYE, également professeur à l'ESP pour son soutien constant. ses conseils et sa disponibilité sans précédent tout au long de cette étude ;
- ✓ Monsieur Maguette NIANG, professeur à l'IST pour son appui logistique et sa disponibilité;
- ✓ Monsieur Ibrahima DEME du Département de Géologie qui nous a beaucoup aidé lors de notre apprentissage du logiciel Arcview.

Nos remerciements vont également à :

- ✓ Monsieur HANNU responsable du Projet Puits de l'Eglise Luthérienne et directeur externe du projet ;
- ✓ Monsieur Paul SENE, responsable de la brigade des puits de l'Eglise Luthérienne ;

qui n'ont ménagé aucun effort et ont fait preuve d'une parfaite collaboration tout au long de ce projet.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DE TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ANNEXES.....	viii
INTRODUCTION.....	1
I. Présentation de la zone d'étude.....	2
I.1 Contexte général.....	2
I.2 Aspects physique et hydrographique.....	8
I.2.1 Aspect physique.....	8
I.2.2 Hydrographie.....	9
I.3 Contexte géologique.....	10
I.4 Aperçu sur l'hydrogéologie du Sénégal.....	14
I.4.1 Contexte hydrogéologique de la zone d'étude.....	15
I.4.1.1 La couche aquifère du Maestrichien.....	16
I.4.1.2 La couche aquifère du Paléocène.....	16
I.4.1.3 La couche aquifère de l'Eocène.....	16
I.4.1.4 Le Continental Terminal.....	17
II. Etudes Géophysiques.....	18
II.1 La géophysique : définition et fondements.....	18
II.2 La géophysique : applications.....	18
II.3 Principe de la méthode par sondage électrique.....	19
II.3.1 Principes des résistivités.....	19
II.3.2 Le sondage électrique.....	22
II.3.3 Données expérimentales.....	25
II.3.4 Analyse des données brutes.....	25
II.3.5 Interprétation des résultats.....	26

III. Développement du « SIG ressources en eaux souterraines »	30
III.1 Les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) : définition.....	30
III.2 Le SIG Arcview.....	31
III.3 Le modèle conceptuel de données.....	33
III.4 Création des cartes.....	35
IV. Hydrochimie	35
IV.1 Campagne d'échantillonnage d'eau des puits de l'ELS.....	35
IV.1.1 Matériel utilisé.....	36
IV.1.2 Procédure de mesure.....	36
IV.2 Analyses et interprétation des résultats.....	37
IV.2.1 Les paramètres physico-chimiques.....	37
IV.2.1.1 Le potentiel hydrogène (pH).....	37
IV.2.1.2 La température.....	38
IV.2.1.3 La conductivité électrique et la minéralisation globale.....	40
IV.2.2 Les paramètres chimiques.....	44
IV.2.2.1 Le magnésium.....	44
IV.2.2.2 Les sulfates.....	46
IV.2.2.3 Les nitrates.....	48
IV.2.2.4 Le fluor.....	50
IV.2.2.5 Les chlorures.....	52
IV.2.2.6 Les bicarbonates.....	54
IV.2.2.7 Les ions calcium et sodium.....	56
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	59
BIBLIOGRAPHIE	61
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : carte de localisation de la zone d'étude.....	7
Figure 2 : Schéma du quadripôle de mesure AB MN.....	23
Figure 3 : courbe de sondage électrique de Bacombel.....	26
Figure 4 : courbe de sondage électrique de Ballabougou.....	27
Figure 5 : courbe de sondage électrique de Ngangou.....	27
Figure 6 : courbe de sondage électrique de Ngueth.....	28
Figure 7 : courbe de sondage électrique de Wendou Thiowel.....	28
Figure 8 : exemple de modèle conceptuel de données.....	34
Figure 9 : Variation du pH	39
Figure 10 : variation de la profondeur de la nappe.....	41
Figure 11 : variation de la conductivité électrique.....	42
Figure 12 : répartition de la minéralisation globale.....	43
Figure 13 : répartition des ions magnésium.....	45
Figure 14 : variation des teneurs en sulfates.....	47
Figure 15 : variation des teneurs en nitrates.....	49
Figure 16 : variation de la teneur en fluor	51
Figure 17 : variation des teneurs en chlorures.....	53
Figure 18 : répartition des ions bicarbonates.....	55
Figure 19 : variation des ions calcium.....	57
Figure 20 : variation des teneurs en sodium.....	58

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1 : Structure de la région de Thiès.....	3
Tableau 2 : Climat et pluviométrie de la région de Thiès.....	4
Tableau 3 : Répartition spatiale de la population en 1988 – Région de Fatick.....	5
Tableau 4 : répartition spatiale de la pauvreté à Fatick.....	6
Tableau 5 : Pluviométrie (mm).....	8
Tableau 6 : Valeurs empiriques des résistivités, porosités et perméabilités pour divers terrains.....	21
Tableau 7 : quelques valeurs de résistivités de roches et d'eau.....	22
Tableau 8 : Résultats des études géophysiques.....	29

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : tableaux et courbes de sondage électrique

Annexe B : Résultats des analyses chimiques

Annexe C : Tableaux sur les normes de potabilité de l'eau

INTRODUCTION

L'eau est une denrée précieuse dont la maîtrise constitue un enjeu majeur pour nos populations. Les données environnementales, sociales, techniques, économiques qui s'attachent à la gestion de cette ressource essentielle à la vie de tout être vivant devront être au premier plan de nos préoccupations. La disponibilité d'eau douce est le plus grand problème auquel est confronté l'humanité d'aujourd'hui ; les difficultés qui lui sont liées pourront se répercuter sur la vie de milliards de personnes.

Les cycles récurrents de sécheresse auxquels sont confrontés les populations sahéliennes font que l'accès à l'eau potable est devenu une contrainte majeure.

Au Sénégal, la rareté des eaux de surface et la non pérennité de ces ressources font qu'elles participent pour peu à l'alimentation en eau des populations. Cependant, les réservoirs d'eaux souterraines qui sont répandus dans pratiquement toute l'étendue du territoire assurent pour l'essentiel l'approvisionnement.

Toutefois, les nappes d'eaux souterraines sont menacées, il importe dès lors d'organiser une meilleure gestion pour mener une bonne politique de maîtrise de ces ressources.

C'est dans cette optique que nous sommes appelés à mener une étude hydrogéologique en vue de mettre en place un Système d'Information Géographique (SIG) « Ressources en eaux souterraines dans la zone de Mbour-Fatick. ». Son principal objectif est d'aider les membres du programme hydraulique de l'Eglise Luthérienne du Sénégal en leur fournissant des données hydrogéologiques fiables sur cette zone (types de nappe rencontrés, niveaux et qualité des eaux, etc.). Ces informations permettront de réduire les délais d'études et d'accélérer la prise de décision.

Le programme rentre dans le cadre des œuvres sociales de la Mission Luthérienne du Sénégal : il est financé par le gouvernement finlandais et est réalisé par l'Eglise Luthérienne du Sénégal. Il consiste à réaliser des puits neufs et à réparer des puits anciens à la demande des populations.

Dans ce présent projet, nous présenterons tout d'abord la zone d'étude dans son contexte physique, socio-économique et hydrogéologique, par la suite, nous parlerons des études géophysiques réalisées sur le terrain avant de terminer par la conception du Système d'Information Géographique proprement dite (SIG) basée sur une étude hydrochimique.

I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude (figure1) se situe à cheval entre la zone de Mbour et celle de Fatick, zone qui bénéficie des œuvres sociales de l'Eglise Luthérienne du Sénégal. Ainsi nous présenterons dans cette partie la région de Thiès en mettant un accent sur le département de Mbour et la région de Fatick.

I.1 Contexte général

Région de Thiès

Située à 70km de Dakar, la région de Thiès est limitée au nord par la région de Louga, au sud par la région de Fatick, à l'est par les régions de Diourbel et Fatick et à l'ouest par la région de Dakar et l'Océan Atlantique.

La région est peu étendue et sa population n'est pas nombreuse . C'est un important carrefour routier et ferroviaire, siège de la Société Nationale des Chemins de Fer. Sur le plan économique, Thiès tire l'essentiel de ses ressources dans l'extraction minière, la pêche, le tourisme, et dans le secteur agricole avec 15% du PNB (Produit National Brut).

La région de Thiès compte 3 départements : Thiès, Mbour et Tivaouane , 10 arrondissements, 10 communes et 31 communautés rurales dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.

Caractéristiques	Thiès	Mbour	Tivaouane
<i>Superficie</i>	1.604 km ²	1.858 Km ²	3.138 Km ²
<i>Arrondissements</i>	3 arrondissements : Notto, Keur Moussa et Thiénaba	3 arrondissements : Sésséne, Fissel, Sindia.	4 arrondissements : Méouane, Mérina Dakhar, Niakhéne, Pambal
<i>Communes</i>	3 communes : Thiès, Khombole, Pout	4 communes : Mbour, Joal-Fadiouth, Thiadiaye, Nguékokh,	3 communes : Tivaouane ; Mékhé Mboro
<i>Communautés rurales</i>	9 communautés rurales : Diender, Keur Moussa. Fandéne, Touba Toul, Thiénaba. Ngoudiane, diéyéne Sirakh, Notto. Tassette	8 communautés rurales : Sésséne, Sandiara, Nguéniéne. Fissel, Ndiagianiao, Sindia, Malicounda, Diass.	14 communautés rurales : Méouane, Taïba Ndiaye, Mérina, Dakhar, Koul, Pékessé, Niakhéne, hilmakha, bayenne, Ngandiouf, Mont- Rolland, Notto Gouye-Diama. Chérif Lô, Pire Gouréye

Tableau 1 : Structure de la région de Thiès

La région recèle par ailleurs diverses opportunités :

- Importante zone des Niayes pour le développement de l'horticulture
- Ressources halieutiques importantes (2/3 des prises de la pêche artisanale)
- Deuxième région industrielle du pays
- Importantes activités touristiques (2^{ème} région touristique)

- Equipement hospitalier de qualité et enseignement supérieur.

Thiès possède d'importantes nappes souterraines. Mais l'eau n'est pas partout de très bonne qualité ; elle varie suivant les localités.

Caractéristiques	Thiès	Mbour	Tivaouane
<i>Climat</i>	28.8°C en octobre et 21.6°C en janvier	20°C(en janvier) et 30 à 40°C (en Mai)	19°C à 35°C Insolation de 7 à 8h/jour
<i>Pluviométrie</i>	Période : juin-octobre 40 jours de pluie au Maximum	Juin à octobre 453mm de pluie en 33 jours	2 à 3 mois, allant du 15 juillet au 15 octobre

Tableau 2 : Climat et pluviométrie de la région de Thiès (Source: document de présentation de la région de Thiès - Mairie de Thiès -)

Thiès est la deuxième région après Dakar avec une population estimée à 1.176.654 habitants (en 1996) répartie sur une étendue de 6.601 Km² ; soit une densité moyenne de 178 hbts / Km². Thiès est également une région très urbanisée, avec un taux atteignant 35,4% ; ce qui la place en troisième position après Dakar et Ziguinchor. Le taux de croissance de la population est estimé à 2,7% par an. La région est caractérisée par une concentration de la population dans certaines zones rurales : les densités moyennes varient entre 62 et 137 hbts /km². On note une forte émigration à destination de la capitale Dakar.

Région de Fatick

La région de Fatick a été créée en juillet 1984 avec la partition de l'ex-région du Sine-Saloum en deux entités administratives. Elle est limitée au nord et au nord-est par les régions de Thiès, Diourbel et Louga, au Sud par la République de Gambie, à l'Ouest par l'Océan Atlantique et la région de Thiès.

C'est une région caractérisée par une population de 608.706 habitants (1998) répartie sur une superficie de 7340 km², soit une densité de 77 hbts/km² et un taux d'urbanisation assez faible de l'ordre de 11%. La population est jeune avec plus de 57% de

moins de 20 ans. Le taux de croissance de la population est estimé à 1.9% (entre 1976 et 1988).

Caractéristiques	Fatick	Foundiougne	Gossas
<i>Population (1988)</i>	207856	138816	159817
<i>Superficie (km²)</i>	2638	2922	1980
<i>Densité (hbts/km²)</i>	78.8	47.5	80.7

Tableau 3: Répartition spatiale de la population en 1988 – Région de Fatick

La population essentiellement rurale, vit surtout d'agriculture (90%) et d'élevage. Elle est riche par sa diversité ethnique, la variété de ses coutumes et traditions. Elle est constituée en majorité de sérères (55.1%), elle compte également des wolofs (29.9%), des pulars (9.2%), des socés et des bambaras.

La répartition spatiale des établissements humains fait apparaître une dominante de villages constitués de hameaux (55% de l'habitat). Les hameaux sont caractérisés par leur petite taille et leur dispersion dans l'espace villageois. Ceci est une caractéristique de l'habitat en milieu pastoral dont le milieu sérère.

Sur le plan des conditions de vie, la région occupe la deuxième place de ménages urbains les plus pauvres du Sénégal avec un taux de 24.6%. En zone rurale, le pourcentage des ménages les plus pauvres est plus élevé avec 46.7%. Le taux de pauvreté de la région est en 1992 de 51.1%.

Le tableau ci-après donne des indications sur l'incidence de la pauvreté des ménages à l'échelle de la région.

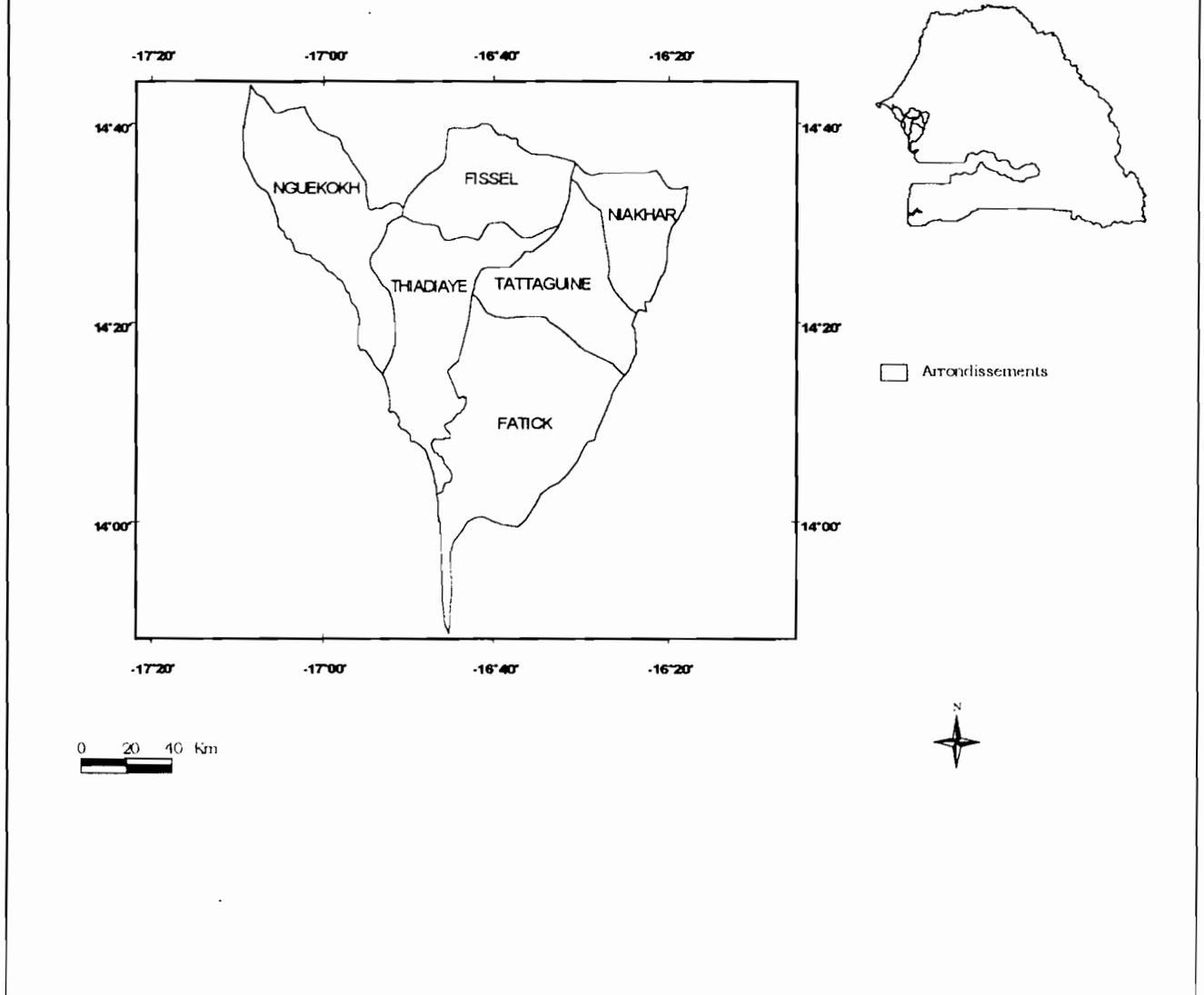
<i>Département</i>	<i>Nombre total de pauvres</i>	<i>Taux de pauvreté</i>	<i>Taux de scolarisation</i>	<i>Taux de malnutrition des enfants</i>	<i>Taux d'accès à l'eau potable</i>	<i>Taux de consultations primaires curatives</i>
<i>Fatick</i>	103.547	52.1%	41.6%	10%	21.1%	10%
<i>Foundiougne</i>	82.747	54.8%	17.27%	3.3%	11%	
<i>Gossas</i>	75.112	46.6%		5.4%	63.1%	9%

Tableau 4 : répartition spatiale de la pauvreté. (SRAT Fatick Novembre 2000)

Par ailleurs, la majeure partie des industries régionales est localisée à Kahone à proximité de la ville de Kaolack. Elle offre également diverses opportunités :

- Agriculture vivrière développée
- Potentiel halieutique important,
- Importante capacité de production de sel
- Energie solaire pour l'électrification des zones rurales

Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude



I.2. Aspects physique et hydrographique

I.2.1 Aspect physique

La zone d'étude se situe dans le bassin sédimentaire sénégal-mauritanien. Elle présente un relief relativement plat excepté le plateau de Thiès (105 mètres), le massif de Ndiass (90 mètres), la " Cuesta " (65 km² de large et 128 mètres d'altitude). Ces formes géologiques renferment beaucoup de richesses, qui sont sous exploitées (phosphate, attapulгите, etc.).

Le climat est de type tropical soudanien, influencé par les courants marins. En effet la région se situe dans une zone de transition soumise à l'influence des alizés maritimes et de l'harmattan. Notons également la présence de la mousson, vent qui souffle d'avril à octobre et qui apporte la pluie. La température varie entre 24°C au mois de janvier et 39°C au mois d'avril/mai dans la région de Fatick tandis que dans la région de Thiès, la température moyenne est de l'ordre de 32°C.

La pluviométrie varie entre 400 et 600 mm et est marquée depuis plus d'une décennie par son irrégularité. La tendance générale est à la diminution de la pluviosité et de la pluviométrie.

Station	Période	Moyennes annuelles
<i>Mbour</i>	1961-1990	557.4
<i>Fatick</i>	1961-1990	565.4

Tableau 5 : Pluviométrie(mm)

Par ailleurs, la zone présente une diversité pédologique caractéristique de la zone tropicale. On y distingue les types de sols suivants :

- les sols ferrugineux non lessivés ou sols Diors : ils sont peu profonds et bien drainés grâce à leur matériel sableux, mais leur horizon humifère est souvent érodé par le vent ou par ruissellement. Ils représentent 70% des surfaces cultivables.

- les sols calcaires et vertisols (classe des sols noirs contenant moins de 30% d'argile que l'on retrouve dans les régions chaudes à saison sèche prononcée).
- les sols ferrugineux lessivés : ils se caractérisent par des horizons bien tranchés, clairs en surface, colorés en profondeur par l'accumulation du fer sous forme de tâches, concrétions ou cuirasses.

En dehors de ces sols tropicaux, on trouve les sols mangroves, les sols halomorphes et hydromorphes des vallées .

La végétation, la zone se trouvant essentiellement dans le domaine soudanien, celui du bassin arachidier, les principaux types de formations végétales sont le parc arboré et la steppe arbustive.

Les principales cultures sont le mil, l'arachide, le sorgho, le maïs, le sunna en plus de quelques cultures maraîchères.

La progression de la salinisation des terres et l'appauvrissement des sols dû à leur surexploitation et à la pression édaphique sont les principales contraintes pédologiques.

1.2.2 Hydrographie

La configuration géologique et géomorphologique d'une part, et la répartition de la pluviométrie d'autre part, sont des facteurs importants dont dépend le réseau hydrographique du Sénégal.

L'essentiel de ce réseau national est relatif aux bassins des fleuves Sénégal et Gambie dont les eaux proviennent du massif du Fouta-Djalon en République de Guinée.

Il existe aussi quelques petits cours d'eau comme la Casamance, la Kayanga, l'Anambé, le Sine, le Saloum et des bassins côtiers dont les écoulements sont intermittents.

Par ailleurs ce réseau est complété par un certain nombre de lacs dont les plus importants sont : le lac de Guiers, les bolongs des estuaires et les mares de la région de Niayes.

Notons également l'existence de zones humides qui, le plus souvent, sont associées au réseau hydrographique dégradé.

Dans la zone d'étude et plus précisément dans la région de Fatick, nous citerons un cours d'eau important : le Sine (et ses affluents) qui comme le Saloum connaissait auparavant une activité hydrologique relativement importante. Aujourd'hui, ils sont pratiquement occupés par les eaux de mer pendant toute l'année alors qu'avant la sécheresse des années 70, la partie continentale de leurs bassins connaissait des écoulements significatifs notamment en saison de pluies.

1.3 Contexte géologique

L'étude hydrogéologique envisagée nécessite une connaissance géologique de la région d'étude. Cette dernière se situe dans la partie orientale du horst de Ndiass dont la série sédimentaire est connue, depuis longtemps, grâce aux travaux de F.TESSIER (1952), de A. MARTIN (1970), SARR, (1982) in (BA, 1999).

La région d'étude constitue la partie occidentale la plus extrême du grand bassin sédimentaire sénégal-mauritanien. Ce qui fait que les études géologiques menées dans cette zone, font partie des études géologiques globales de ce bassin d'âge Méso-Cénozoïque.

D'une manière générale, les faciès marins (détritiques, chimiques et biochimiques), que l'on y rencontre, se sont déposés à la faveur d'une série de transgressions et de régressions marines.

Le bassin sédimentaire sénégal-mauritanien a connu une grande régression marine au crétacé. La mer a ensuite transgressé au tertiaire, transgression qui a été suivie par une régression à la fin de l'Éocène. A la suite de cette régression, des variations climatiques quaternaires ont entraîné la fluctuation des lignes de rivage le long de la côte (SARR, 1982, in BA, 1999).

Les formations sédimentaires qui composent essentiellement ce bassin sont : le Maastrichien, le Paléocène, l'Éocène, le Continental Terminal, et le Quaternaire.

✓ Le Maastrichien

A l'exception de sa limite occidentale, la zone étudiée ne présente pas de formations maastrichtiennes à l'affleurement.

Sur l'ensemble des forages hydrauliques répertoriés dans la zone, seuls quelques uns recoupent partiellement les dépôts maastrichtiens. Ces formations à faciès détritiques siliceux, couvrent l'ensemble du bassin sédimentaire. Elles reposent directement sur le socle cristallin où elles présentent de faibles épaisseurs.

Dans la région d'étude, elles sont constituées de sables blancs coquilliers avec de rares passées de lignite et d'argile noire, de grés à matrices ou à ciment en proportions variables. Au sommet de cette série on trouve des argiles et marnes. A certains endroits, ces argiles et marnes dominantes sont remplacées par des sables coquilliers d'où une variation latérale de faciès (SARR, 1982 in BA, 1999).

Ces formations maastrichtiennes sont pauvres en faune fossile. Néanmoins, on y a trouvé des coquilles peu caractéristiques de Lamellibranches, de Foraminifères et d'Ostracodes.

D'après C. Monciardini, 1966, SARR, 1982, in BA, 1999, les faciès grossiers détritiques sont dus à des apports fluviaux ou marins. La présence de mollusques indique un biotope littoral. Les bancs des argiles noires font voir un milieu de dépôt deltaïque ou lagunaire.

Quant aux argiles et marnes de la fin Maastrichienne, elles marquent la présence d'une mer franche qui continuera jusqu'au Paléocène.

Le passage d'une sédimentation détritique à une précipitation des carbonates, marque la limite entre le Maastrichien et le Paléocène. Au niveau des forages où ce passage n'est pas respecté avec poursuite des dépôts détritiques, l'absence de fossiles stratigraphiques et de données paléontologiques à la limite supérieure du Maastrichien, fait la difficulté des corrélations entre ces couches.

✓ Le Paléocène

L' époque paléocène a connu, dans la région étudiée, une transgression marine qui d'ailleurs a intéressé tout le bassin sénégalo-mauritanien. Cette venue des eaux marines y a occasionné la précipitation des roches autochtones carbonatées.

Ces carbonates organiques dominants et inorganiques déposés à la faveur des conditions physico-chimiques, sont ainsi présents dans tout le bassin.

Du point de vue affleurement, on les rencontre largement en surface dans la région au niveau du « plateau calcaire » de Mbour. Ils apparaissent aussi en surface au niveau des lits fluviaux (Balling) où la couverture sablo-argileuse et latéritique a été érodée.

Eu égard à cette absence d'affleurement, ces formations sont bien connues grâce aux nombreux ouvrages hydrauliques exécutés sur l'ensemble de la région.

Malgré ce nombre important de forages, seuls les quelques forages qui ont atteint les dépôts maastrichtiens traversent toute l'épaisseur de ces formations paléocènes.

Cette formation est essentiellement représentée par des calcaires, des marno-calcaires et des marnes. Dans l'ouest du pays, ces calcaires paléocènes ont subi le phénomène de la karstification et forment alors un excellent réservoir.

✓ L'Eocène

La transgression maritime s'est poursuivie pour atteindre son maximum à l'Yprésien. Elle a ainsi occasionné dans la zone une accumulation de sédiments à l'image du vaste bassin sénégalo-mauritanien.

Ces formations éocènes ont été érodées jusqu'à leurs termes inférieurs qui constituent les seuls témoins de cette époque. Notons que dans les secteurs où affleurent les formations paléocènes, ces dépôts éocènes ont été complètement érodés.

L'Eocène est caractérisé par des faciès marneux ou argileux devenant calcaires dans sa partie supérieure.

Suivant les étapes en présence, on distingue l'Eocène inférieur, moyen et supérieur.

▪ L'Eocène inférieur

Cette formation est représentée par une accumulation de marnes, d'argiles grises ou blanchâtres et de calcaires marneux. Dans ces dépôts, on trouve de la glauconie, du quartz, du silex sous forme de nodules et des phosphates.

La présence de ce niveau phosphaté au sommet du Paléocène a des effets sur la qualité des eaux de la nappe des calcaires paléocènes de cette région.

▪ L'Eocène moyen

Il n'est représenté, du fait de l'érosion, que par le Lutétien inférieur qui affleure au sud-est de la région étudiée et autour de Keur-Diba.

Il est formé d'une succession très fossilifère de bancs calcaires ou marneux et de lits marneux. En surface, ce calcaire, à granulométrie plus fine par rapport aux calcaires paléocènes, présente un aspect blanchâtre à jaunâtre.

L'observation microscopique montre qu'il s'agit d'une biomicrite à nombreux micro-organismes et de débris coquilliers (SARR, 1982, in BA, 1999).

▪ L'Eocène supérieur

Les formations de cet étage sont essentiellement argileux et n'ont qu'un rôle négligeable dans l'hydrogéologie du Sénégal.

✓ Le Continental Terminal

Recouvrant la presque totalité du pays, il se présente sous forme de grès argileux et d'argile sableuse jaune et rouge, d'argile bariolée, lie-de-vin et blanche. Son épaisseur varie de quelques dizaines de mètres à 150 mètres vers Tambacounda.

Sa lithologie est hétérogène et les passages de faciès nombreux. La perméabilité est souvent bonne ; voire très bonne, quand les niveaux de latérite ou de grès à canaux sont recoupés.

✓ Le Quaternaire

Cette période fut caractérisée par des variations climatiques successives entraînant des oscillations du niveau de la mer.

Les diverses formations quaternaires jouent un rôle hydrogéologique important au Sénégal, qu'il s'agisse de dépôts (limons, dunes) ou de produits de formations récentes de terrains plus anciens (latérites, produits d'altération du Sénégal Oriental).

Les dépôts sableux, très développés près des côtes atlantiques constituent un réservoir très intéressant, nous y distinguons de bas en haut :

- des dunes anciennes rouges de l'Ogolien
- une plage à *Arca senilis* du Nouakhotien
- des dunes jaunes, des dunes blanches actuelles.

I.4 Aperçu sur l'hydrogéologie du Sénégal

Au Sénégal, les eaux souterraines occupent une place importante pour la satisfaction des besoins en eau, tous usages confondus.

En effet, les ressources en eaux souterraines couvrent près de 80% des besoins satisfaits à Dakar (capitale du Sénégal) et plus de 84% des ressources exploitées pour le monde rural, les autres centres urbains et l'abreuvement du bétail. De même, la presque totalité des unités industrielles, touristiques et minières sont alimentées à partir des eaux souterraines. La plupart de ces nappes sont alimentées par le fleuve Sénégal et son défluent le lac de Guiers et pour une part peu importante par les pluies du fait du déficit pluviométrique constaté depuis plusieurs décennies. Les ressources sont localisées dans deux types d'aquifères différents :

Les aquifères dits continus qui sont associés aux formations du bassin sédimentaire et qui peuvent être subdivisés en trois systèmes :

- **le système aquifère superficiel** dit "Complexe Terminal", regroupant les formations à dominante sablo-argileuse et sableuse du Quaternaire, du "Continental terminal"

et de l'Oligo-Miocène. Les réserves sont estimées entre 50 et 75 milliards de mètres cubes. Ces couches aquifères peu profondes constituent la source majeure de la plupart des villages.

- **le système intermédiaire** regroupant les formations essentiellement calcaires, marno-calcaires et marneuses, de l'Eocène et du Paléocène, karstiques par endroits. Les réserves sont estimées à 100 milliards de mètres cubes,
- **le système aquifère profond** qui concerne uniquement l'aquifère sablo-argileux à gréseux du Maestrichtien. Les réserves sont estimées entre 300 et 500 milliards de mètres cubes.

Les aquifères de type discontinu à semi-continu, localisés dans les fissures et les altérations des formations granitiques et métamorphiques du socle, au Sénégal Oriental (Sud Est du Sénégal).

Il convient de signaler que si ces aquifères couvrent la totalité du territoire, la répartition spatiale de leur qualité et de leur quantité n'est pas toujours satisfaisante.

Les grands pôles de demande en eau sont situés dans des zones où les potentiels exploitables sans risque sont très limités compte tenu de leur position géographique (abaissement trop important du niveau des nappes sous forte exploitation, proximité d'une source de pollution, extension de l'aquifère limitée, etc.). De même, une bande de direction Nord-Sud, située sur la moitié Ouest du pays est occupée par des eaux souterraines de mauvaise qualité.

Enfin, dans la zone de socle, les aquifères renferment des quantités d'eau considérables mais leur localisation et leur mobilisation demandent des moyens particuliers (prospection géophysique, foration par marteau-fond-de-trou, etc) et de plus, les débits unitaires exploitables par forage sont souvent très faibles.

I.4.1 Contexte hydrogéologique de la zone d'étude

Les aquifères présentes dans la zone sont constituées de bas en haut : du Maestrichtien, du Paléocène, de l'Eocène et du Continental Terminal.

I.4.1.1 La couche aquifère du Maestrichien

Cette nappe est la plus profonde de tous les aquifères répertoriées. Elle couvre à l'échelle nationale une superficie de 150 000 km² et présente une profondeur variant entre 200 et 450 mètres. Sa perméabilité est en général bonne ; et l'eau à l'occasion artésienne dans la vallée du Saloum monte souvent à 40 m de la surface. Dans le cas de notre étude , elle est présente dans partout dans la région.(Rapport d'Evaluation Programme AEP-95-2000-ELS/ BUREST-02/2001)

I.4.1.2 La couche aquifère du Paléocène

Elle est sur adjacente au Maestrichtien qui l'alimente, en sus des eaux d'infiltration dans la partie orientale du bassin: elle se localise au sud de Thiès et dans la presqu'île du Cap-vert, dans les canaux karstiques des calcaires du Paléocène.

D'une superficie de 120.000 km², son épaisseur varie de 30 m à 40 m. Bien que de profondeur variable, elle affleure depuis les falaises de Thiès jusqu'à Fadiouth.

Les prélèvements sont estimés à 20 millions de mètres cube et des pertes sont constatées au niveau de la petite côte au profit de l'océan.

Selon le Rapport d'Evaluation, établi par le BUREST, sur la zone d'étude. elle est captée à des profondeurs variant entre 60 et 150 m, voire 200 m. Elle n'est aquifère que dans le département de Fatick et plus précisément dans les arrondissements de Fiméla, Tattaguine et Njakhar.

I.4.1.3 La couche aquifère de l'Eocène

Cette nappe n'est pas très productive dans la région. Elle date essentiellement de l'Yprésien et du Lutétien et présente une lithologie fortement variable sur les plans vertical et horizontal. Ces modifications latérales gênent considérablement la recherche de l'eau.

La profondeur de la nappe d'eau est variable, elle affleure par endroits dans le Sénégal Occidental et le long du fleuve Sénégal. Dans l'Ouest et le centre-ouest du Sénégal, cette séquence alimente de nombreux puits et se situe entre 20 à 60 m de la

surface. Quant à la qualité de l'eau, elle est variable, souvent fortement alcaline et parfois salée. Son origine est probablement issue de l'eau d'infiltration provenant des couches supérieures à une période de précipitations plus abondantes.

Sur la zone d'étude, elle est essentiellement captive et présente une porosité de type fissurée.

1.4.1.4 Le Continental Terminal

De vastes portions du sud et de l'est du Bassin Sédimentaire Sénégalais sont couvertes par des dépôts continentaux désignés sous le nom de « Continental Terminal ». Des travaux ont indiqué que ces sédiments datent du Mio-pliocène et qu'ils ont au moins en partie une origine marine. Ces sédiments sont en général des sables ou des sables argileux ; à cause de leur porosité et de leur perméabilité, ils absorbent la plus grande part des eaux de pluies et forment ainsi l'une des principales couches aquifères peu profondes.

Le Continental Terminal est souvent recouvert par des latérites qui forment une croûte relativement imperméable à l'eau ; celle-ci tend à encourager le ruissellement jusqu'en des zones où ces latérites ont été érodées et disséquées. Les eaux de ruissellement sont recueillies par ces vallées et pénètrent le Continental Terminal suivant des directions préférentielles qui, le plus souvent, correspondent à des failles ou à des fractures.

D'autres études montrent que le Continental Terminal couvre probablement 80.000 km² et a en moyenne 40m d'épaisseur. La qualité de l'eau est bonne et les quantités de solides dissous ne sont pas excessives.

Dans le cas de notre étude, cette aquifère s'étend sur toute la région et est essentiellement captée par les puits du programme. Comme nous l'avons signalé plus haut, elle est constituée des eaux d'infiltration des pluies qui viennent se reposer sur une eau saumâtre d'origine maritime, consécutive à la dernière invasion marine de la zone survenue au Quaternaire (Nouakchotien). (*Rapport d'Évaluation Programme AEP- 95 2000 – ELS – MLS/BUREST – 02 2001*).

II. ETUDES GEOPHYSIQUES

II.1 La géophysique : définition et fondements

La géophysique, encore appelée physique du globe est une aide précieuse complétant les informations géologiques. C'est l'une des disciplines de pointe des sciences de la terre et consiste à étudier la terre par les méthodes de la physique. Depuis seulement une trentaine d'années, elle a accompli des progrès éclatants qui ont bouleversé les concepts de la géologie et considérablement élargi ses perspectives.

La mécanique des milieux continus est l'une des bases de la géophysique. Les matériaux terrestres sont plus ou moins tous conducteurs d'électricité. La conductivité électrique dans un matériau terrestre varie en fonction du degré de saturation en eau, de la température, de la composition chimique et minéralogique, de la texture et de la porosité.

La présence de nappes d'eau ou de minerais métalliques augmente la conductivité des roches d'où l'intérêt de la géophysique dans l'hydrogéologie.

II.2 La géophysique : applications

Assurer un bon approvisionnement en eau potable aux populations rurales est l'un des objectifs majeurs que s'est fixée la mission luthérienne. A cet effet, leur programme inclut le forage de nouveaux puits dans certains villages situés dans leur zone d'intervention. Dans le cadre de notre projet, nous nous intéresserons uniquement à la zone de Mbour-Fatick. Un constat général consiste en l'abandon de nombreux puits par les populations, vu la mauvaise qualité de l'eau (souvent salée) qu'ils offrent.

Pour éviter cela mais aussi des pertes économiques aux membres du programme-puits, il conviendrait avant le forage des puits de déterminer l'interface eau douce-eau salée, les caractéristiques de l'aquifère à savoir sa profondeur son épaisseur et sa résistivité par le biais de sondage. Pour ce faire, plusieurs méthodes sont à notre disposition.

Nous pouvons citer entre autres:

- la méthode de sondage électrique

- les méthodes électromagnétiques
- la méthode gravimétrique
- les méthodes sismiques
- la méthode magnétique

Dans le cas de notre étude, nous avons exclusivement utilisé la méthode de sondage électrique en courant continu avec le dispositif Schlumberger. C'est une méthode relativement simple, peu coûteuse et qui donne des résultats fiables.

Les acquisitions de données ont été effectuées dans cinq (5) villages situés dans le département de Mbour à savoir Bacombel, Ballabougou, Wendou Thiowel, Ngangou et Ngueth.

Le sondage électrique permet dans des cas favorables de déterminer les caractéristiques de l'aquifère mais également d'obtenir une idée sur le niveau de minéralisation des eaux souterraines.

II.3 Principe de la méthode par sondage électrique

II.3.1 Principe des résistivités

La méthode de prospection électrique est basée sur l'injection de courant électrique continu dans le sol et sur l'étude de la conductibilité électrique des couches traversées.

La conductibilité électrique ou propriété de conduire le courant électrique est exprimée par la conductivité σ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ou son inverse la résistivité ρ (ohm.m).

La résistivité ou conductivité des terrains est, dans le cas des formations sédimentaires, essentiellement limitée à une conductivité électrolytique qui est due au déplacement des ions dans l'eau d'imbibition de la formation.

La résistivité des formations saturées est fonction de :

- la porosité totale communicante
- la quantité de sels dissoute dans l'eau d'imbibition

La formule d'Archie synthétise ces relations et permet dans les cas favorables, d'estimer la porosité et le taux de saturation du sous-sol.

$$\rho_r = a \cdot \frac{\rho_w \phi^m}{\text{saturation}^2} \qquad F = \frac{a}{m} = \frac{\rho_r}{\phi \rho_w}$$

Pour les roches saturées, on peut, à partir de cette formule définir le facteur de formation F.

F : facteur de formation

ρ_r : résistivité de la roche

ρ_w : résistivité de l'eau d'imbibition

ϕ : porosité

a : facteur proche de 1

m : facteur proche de 2

La saturation s'exprime en pour-cent

Il faut noter qu'une complète absence d'eau entraîne des résistivités infinies; d'autre part, l'expérience montre que la présence d'argiles fait baisser la résistivité d'une formation.

Par contre si le taux d'argiles reste constant, on peut appliquer la loi d'Archie.

$$F = \frac{1}{\phi^2} = \frac{\rho_r}{\rho_w} \quad \text{soit} \quad \rho_r = \frac{\rho_w}{\phi^2}$$

Si ρ_w diminue, ρ_r diminue

Si ρ_w augmente, ρ_r augmente

En présence de sable avec ϕ_1 constante, ou en présence de calcaires avec ϕ_2 constante, la variation de la résistivité au sein d'une formation saturée, ne dépend que de la

quantité de sels dissoute dans l'eau d'imbibition. On peut ainsi savoir dans une formation, si la salinité augmente en fonction de la profondeur.

Les valeurs reportées sur le tableau suivant font apparaître une corrélation entre perméabilité, porosité efficace et résistivité. Elles montrent ainsi que le sondage électrique est en mesure de fournir des renseignements précieux aussi bien sur la porosité que sur la perméabilité des formations.

Roches	Porosité totale %	Porosité efficace %	Perméabilité	Résistivité (ohm.m)
<i>Graviers</i>	45	35	$3 \cdot 10^{-4}$	200
<i>Graviers</i>	35	20	$1 \cdot 10^{-5}$	160
<i>Sables</i>	40	30	$6 \cdot 10^{-4}$	125
<i>Sable silteux</i>	32	5	$1 \cdot 10^{-9}$	60
<i>Silt</i>	36	3	$3 \cdot 10^{-8}$	30
<i>Argile</i>	47	0	$5 \cdot 10^{-10}$	10
<i>Calcaires fissurés</i>		30		83
<i>Calcaires non fissurés</i>		3	$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-12}$	2000- 10000
<i>Marnes consolidées</i>		27		20

Tableau 6 : Valeurs empiriques des résistivités, porosités et perméabilités pour divers terrains (Meyer de Stadelhofen, C. 1991)

Dans le tableau ci-dessous, sont consignés quelques exemples de valeurs de résistivités, exprimées en ohm.m.

	Valeurs pour les formations saturées	Valeurs les plus fréquentes proches de :
<i>Argiles</i>	5 à 10	10
<i>Sables</i>	50 à 400	60
<i>Graviers</i>	150 à 500	200

<i>Schistes cristallins</i>	100 à 10000	3000
<i>Basaltes</i>	10 à 50000	3000
<i>Granites</i>	100 à 10000	5000
<i>Calcaires et dolomies</i>	100 à 10000	2000
<i>Eau de mer</i>	< 0.2	
<i>Eaux douces de surface et de subsurface</i>	10 à 300	
<i>Eaux connées</i>	0.05 à 10	
<i>Limite de potabilité</i>	2 à 6	

Tableau 7 : quelques valeurs de résistivités (en ohm.m) de roches et d'eau (Meyer de Stadelhofen, c.1991).

Ces exemples appellent quelques remarques :

- ✓ les grandes différences entre les résistivités observées pour un même type de roche s'expliquent en partie par une saturation incomplète (pour les sables et les graviers par exemple) ; par une fracturation plus ou moins intense ; par les différentes salinités des eaux connées (pour les sédiments) ; par la présence d'argile (dans les grés et les roches carbonatés) ; par les degrés d'altération plus ou moins poussés (pour les roches plutoniques et métamorphiques).
- ✓ Ces variations peuvent entraîner des confusions ; ainsi des sables, des moraines et des grés marneux peuvent très bien présenter des résistivités identiques.
- ✓ Malgré l'importance des variations observées et les chevauchements possibles, l'étude électrique appuyée sur le bon sens géologique apporte, dans bien des cas, des informations sans ambiguïté.

II.3.2 Le sondage électrique

Il consiste à établir la courbe de variation de la résistivité apparente des terrains mesurée en surface, en fonction de la profondeur grâce à un dispositif quadripôle ABMN en surface (voir figure2).

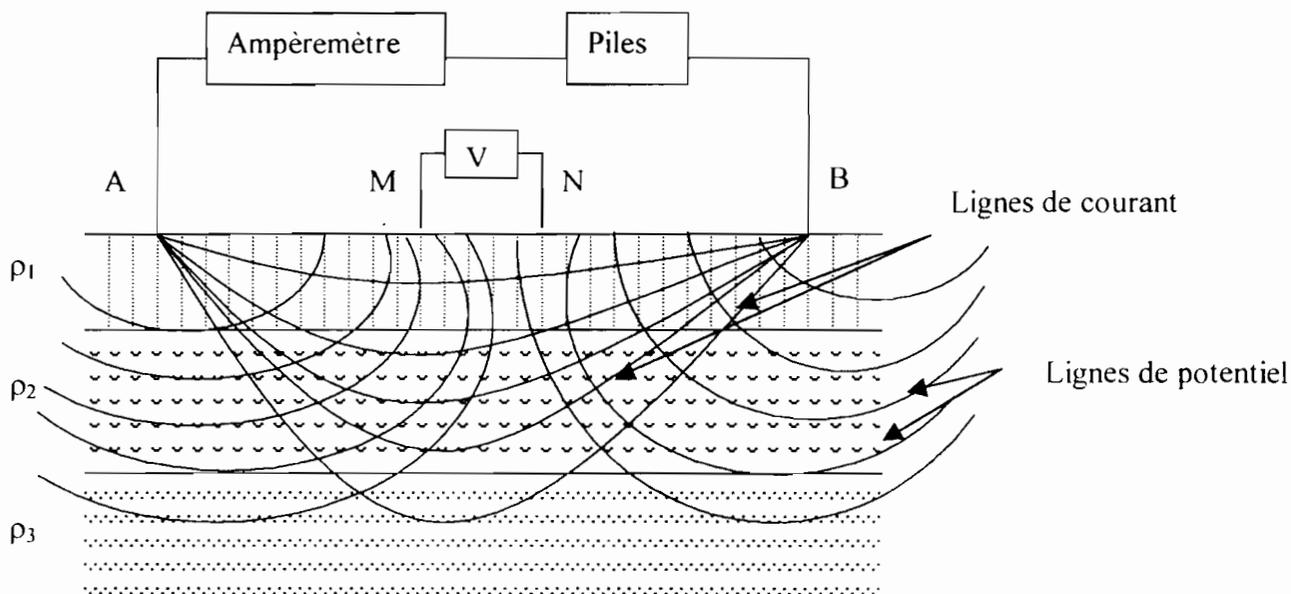


Figure 2 : Schéma du quadripôle de mesure AB MN

ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 sont les résistivités électriques des 3 couches de sols traversées

A et B représentent les électrodes d'injection de courant

M et N les électrodes de potentiel

V : voltmètre

La profondeur d'investigation augmente lorsque la distance entre les électrodes d'injection A et B augmente. Le dispositif choisi est du type Schlumberger c'est à dire de rapport AB/MN maintenu aussi grand que possible ($4 \leq AB / MN \leq 20$).

Dans ce cas la résistivité apparente s'exprime par la formule :

$$\rho = \frac{K \cdot V}{I} \quad (\text{en ohm.m})$$

V : différence de potentiel entre M et N

I : intensité de courant injecté

K : facteur géométrique, dépend des dimensions du dispositif de mesure ($K = \frac{\pi \cdot AM \cdot AN}{MN}$)

La profondeur d'investigation est théoriquement comprise entre $AB / 2$ et $AB / 12$.

Lors de l'étude, la longueur maximum de ligne de courant tirée est de 350m, ce qui permet d'atteindre une profondeur d'investigation théorique comprise entre 30m et 87.5m. L'interprétation des sondages électriques permet d'obtenir la résistivité vraie des formations et leur épaisseur, dans le cas idéal de couches homogènes de faible pendage. Les épaisseurs sont de 30% supérieures aux épaisseurs réelles.

Initialement, un programme d'inversion est utilisée pour sortir un modèle de départ qu'il faut améliorer avec le Programme d'Interprétation des Sondages Electriques PISE 4 élaboré par l'ORSTOM et le CNRS.

Les aquifères de résistivité inférieure à 5 ohm.m sont salées, entre 5 et 10 ohm.m, l'eau est dite saumâtre et douce au delà.

Pour mener à bien cette étude, nous disposons du matériel suivant :

- 01 résistivimètre TERRAMETER SAS 300C ABEM
- 01 survolteur TERRAMETER BOOSTER SAS 2000 ABEM
- 04 accumulateurs de 12 V au Ni-Cd
- 02 rouleaux de câbles d'injection de courant AB de 700m chacun
- 02 rouleaux de câble de réception MN de 300m chacun
- 02 chargeurs de batteries ABEM
- 01 multimètre
- 14 électrodes en acier inoxydable
- 03 masses de 4kg
- 03 talking-walking

En vue de diminuer les résistances de prise, de l'eau a été utilisée systématiquement pour arroser les contacts sols-électrodes.

Il faut noter que cette méthode géophysique est simple, pas coûteuse et a beaucoup aidé les hydrogéologues dans les recherches d'eaux douces.

II.3.3 Données expérimentales

Les acquisitions de données ont été effectuées dans le département de Mbour plus précisément à Bacombel, Wendou Thiowel, Ballabougou, Ngangou et Ngueth. Pour chacune de ces localités, nous avons utilisé une feuille de sondage électrique type Schlumberger avec les facteurs géométriques K précalculés. Nous avons mesuré la résistance R en ohm puis nous avons multiplié par le coefficient géométrique pour obtenir la résistivité apparente ρ des terrains traversés. Les tableaux en annexe A représentent les données expérimentales recueillies dans chacun de ces 5 villages.

Ensuite, à l'aide d'un papier millimétré bi-logarithmique, nous effectuons manuellement une première représentation graphique des données recueillies (voir annexe A).

II.3.4 Analyse des données brutes

Les courbes $\rho_{\text{apparente}} = f(AB/2)$ ont été tracées pour chacun des cinq villages (annexe A). En faisant une comparaison, nous remarquons que les cinq courbes présentent à peu près la même forme de cloche vers la fin c'est-à-dire en profondeur. Ceci implique la présence de l'aquifère homogène des calcaires.

Pour chacune de ces courbes, le maximum obtenu au niveau de la cloche se situe aux environs de $AB/2 = 200\text{m}$.

Par ailleurs une forme particulière plus aplatie est notée pour le village de Ngueth tandis que pour les quatre autres, la chute est brutale.

Les résistivités en surface varient également d'un village à l'autre. La résistivité en surface est plus élevée pour le cas de Ngangou (2249 ohm.m) et Wendou Thiowel (276.59 ohm.m) que pour celle de Ballabougou, Bacombel, et Ngueth où les résistivités sont comprises entre 50 et 40 ohm.m. Des sols secs en surface pourraient être à l'origine de résistivité élevée en surface.

Cette phase d'analyse effectuée au terrain nous permet d'avoir une idée sur le type d'aquifère présent dans les sites étudiées. Les caractéristiques de cette aquifère ne seront connues qu'après utilisation du logiciel.

II.3.5 Interprétation des résultats

Les données expérimentales ont été modélisées grâce au logiciel PISE4 (Programme d'Interprétation des Sondages Electriques) développé par l'ORSTOM et le CNRS. Les courbes obtenues sont présentés ci-dessous.

PISE4 - Programme d'Interprétation de Sondages Electriques - LGI ORSTOM/CRG CNRS

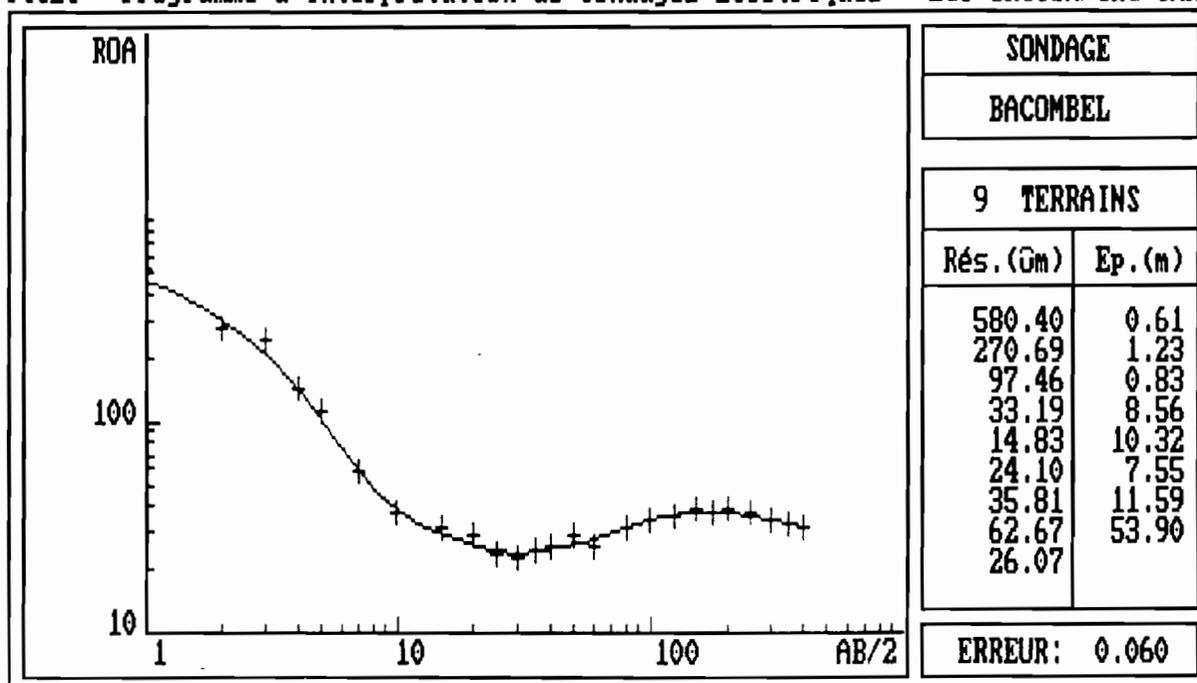


Figure 3 : Courbe de sondage électrique de Bacombel

PISE4 - Programme d'Interprétation de Sondages Électriques - LGI ORSTOM/CRG CNRS

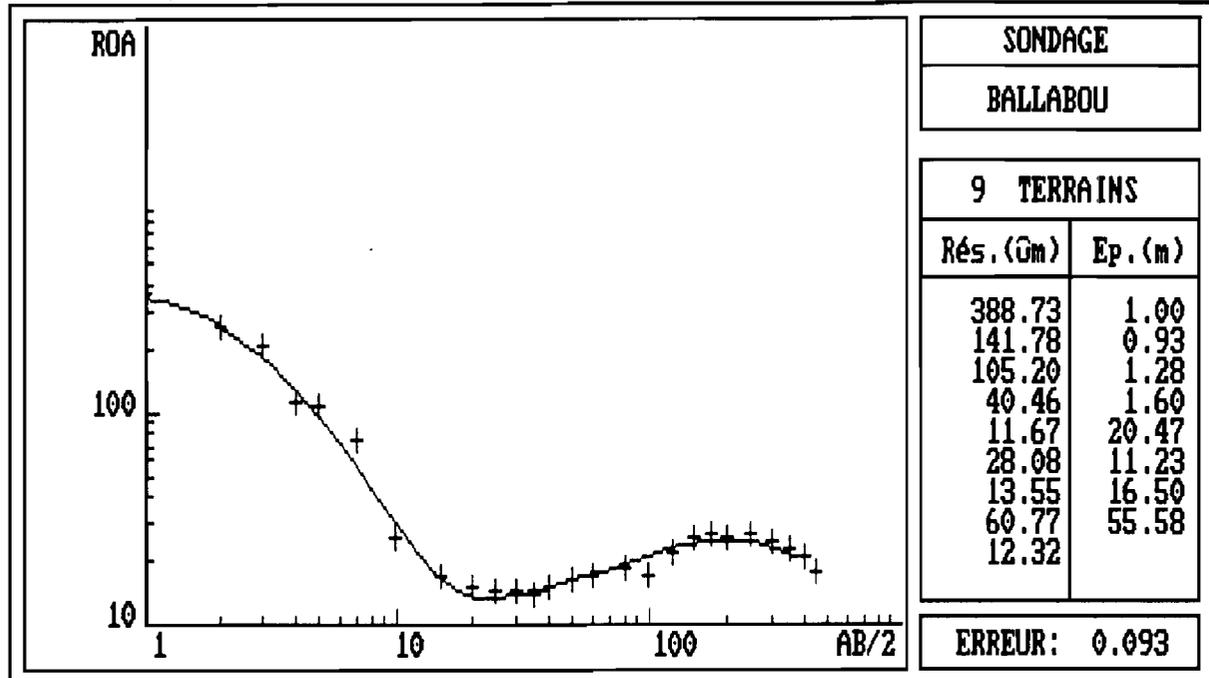


Figure 4 : Courbe de sondage électrique de Ballabougou

PISE4 - Programme d'Interprétation de Sondages Électriques - LGI ORSTOM/CRG CNRS

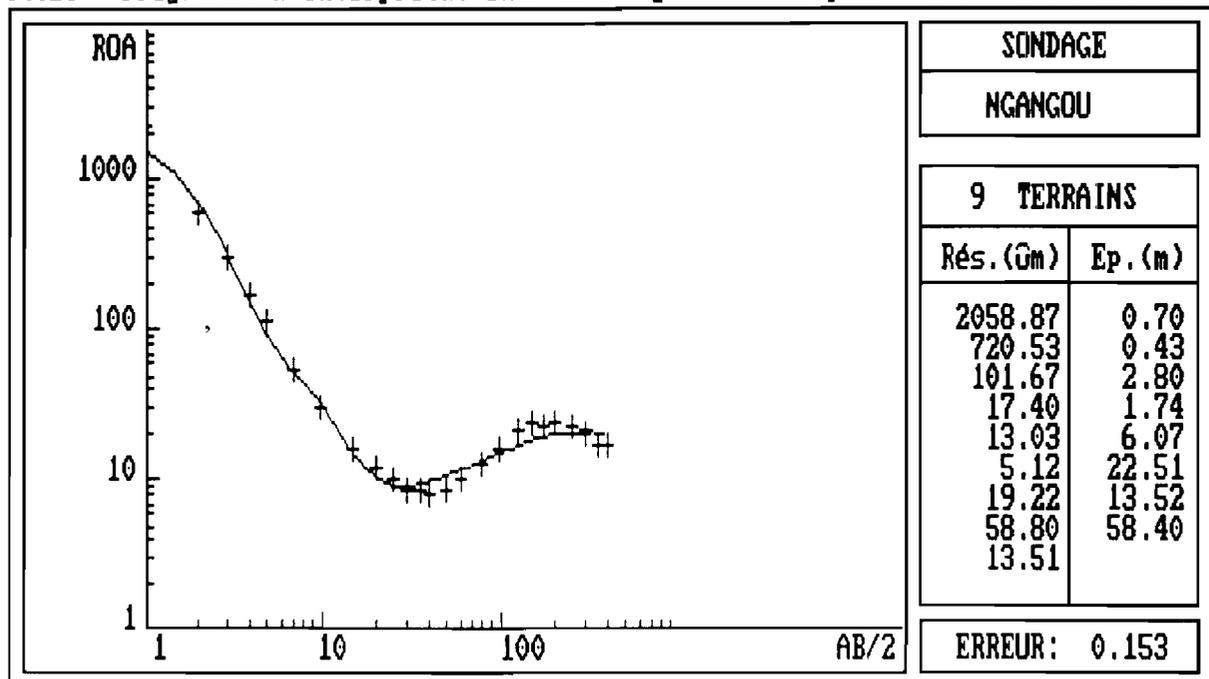


Figure 5 : Courbe de sondage électrique de Ngangou

PISE4 - Programme d'Interprétation de Sondages Électriques - LGI ORSTOM/CRG CNRS

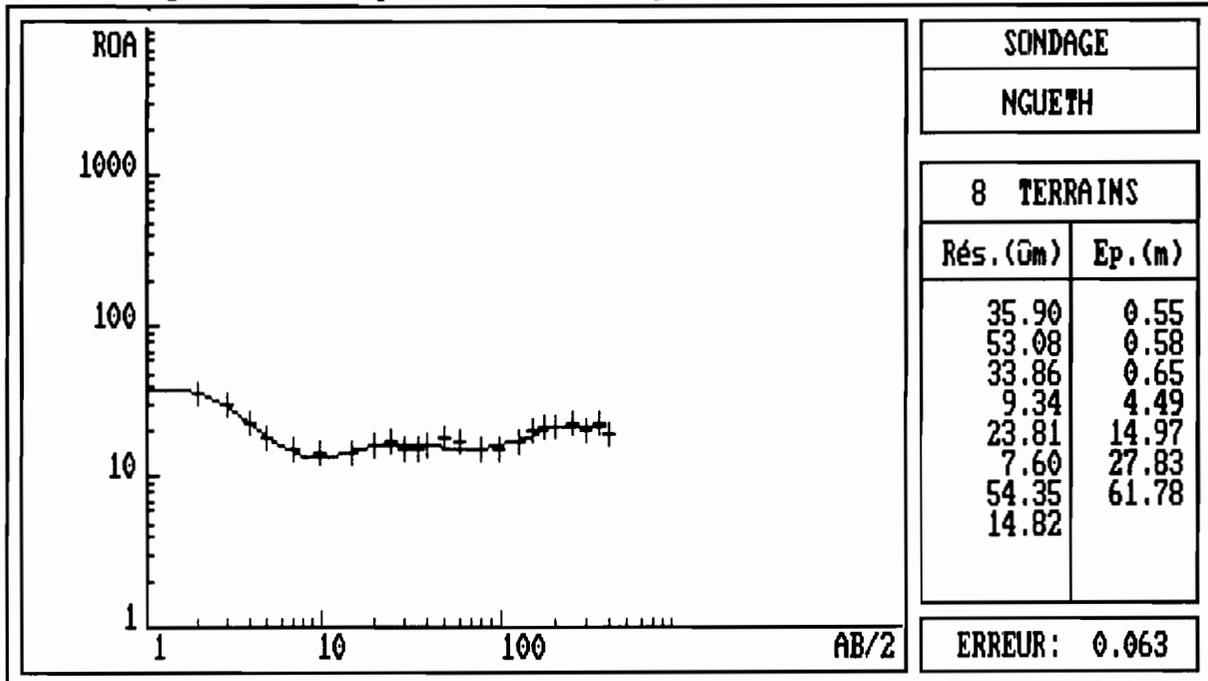


Figure 6 : Courbe de sondage électrique de Ngueth

PISE4 - Programme d'Interprétation de Sondages Électriques - LGI ORSTOM/CRG CNRS

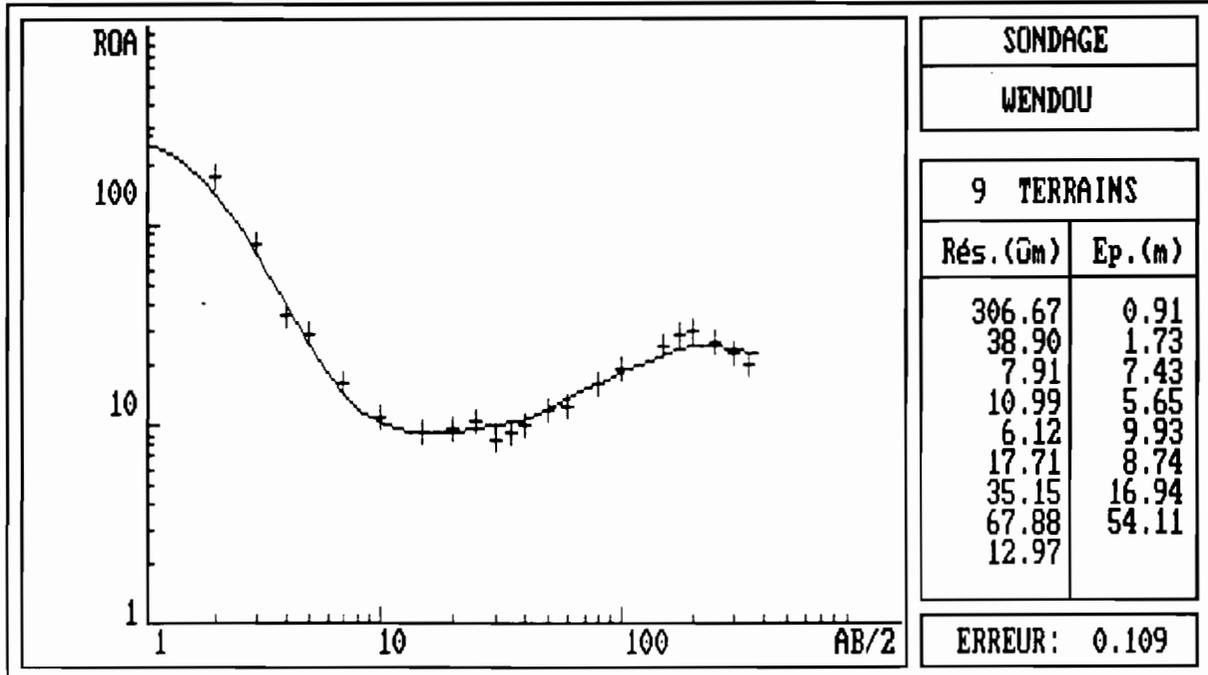


Figure 7 : Courbe de sondage électrique de Wendou Thowel

Le tableau n°8 résume les résultats obtenus en prospection électrique des aquifères au niveau des différents sites étudiés.

localités	Profondeur du toit de l'aquifère (m)	Résistivité électrique vraie (Ωm)	Plage des valeurs de profondeur (m)
Wendou Thiowel	52.4	63.5	50 – 55
Ngueth	49	54.3	46 – 51
Bacombel	40.6	62.6	39 – 43
Ballabougou	53	60.7	50 – 55
Ngangou	47.7	58.8	45 - 50

Tableau n°8 : Résultats des études géophysiques

La profondeur du toit de l'aquifère exprimée en mètres correspond à celle obtenue suite à la modélisation des données. Il en est de même de la valeur de la résistivité vraie (les données recueillies sur le terrain ne permettaient d'obtenir que la résistivité apparente). Cependant du fait de la marge d'erreur systématique de 5% propre à la méthode de prospection électrique, la dernière ligne du tableau nous fournit un encadrement de la valeur probable de la profondeur réelle ; compte non tenu du taux d'erreur de modélisation comprise ici entre 6% et 15%.

Dans l'ensemble, les valeurs de résistivité comprises entre 54 et 63 (ohm.m) montrent qu'il n'y a aucune possibilité de salinisation de cette aquifère profond.

III. Développement du "SIG ressources en eaux souterraines"

III.1 Les Systèmes d'Informations Géographiques : définition

L'ampleur des bouleversements qui caractérisent notre époque marquera sans doute l'histoire de l'humanité d'une façon aussi déterminante que la révolution industrielle. Plusieurs facteurs comme la mondialisation des communications, la globalisation des échanges économiques et la diffusion des technologies de l'information se sont conjuguées en un temps relativement court pour former une synergie de facteurs qui bouleversent toutes les dimensions de la vie sociale, politique et scientifique.

Cette accélération des rythmes économiques et sociaux pose des défis pour les aménagistes. Il convient dès lors de s'adapter à une pareille situation vue la complexité de la prise de décision, ce qui bien évidemment crée un besoin d'outils analytiques bien adaptés.

Ce contexte, allié à des progrès majeurs dans le domaine de la micro-électronique, a fait germer, puis fleurir un nouveau domaine des connaissances qui s'intéressent à l'étude des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG).

Selon Thériault, 1992 les SIG sont un ensemble de principes, de méthodes, d'instruments et de données à référence spatiale utilisés pour saisir, conserver, transformer, analyser, modéliser, simuler et cartographier les phénomènes et les processus distribués dans l'espace géographique. Les données sont analysées afin de produire l'information nécessaire pour aider les décideurs.

Ainsi, le SIG ne se résume pas seulement en une simple accumulation de données graphiques (plans topographiques numérisés ou cadastre digitalisé).

Pour une collectivité, plusieurs arguments peuvent être avancés pour montrer l'intérêt d'un SIG :

- ✓ Améliorer le service aux usagers en réduisant les délais d'étude, de prise de décision et d'obtention de documents :

- ✓ Connaître précisément le patrimoine de la collectivité pour éclairer en temps réel les choix et les décisions ;
- ✓ Croiser des informations géographiques, économiques et sociales dans un référentiel commun pour permettre des analyses et visualiser les phénomènes ;
- ✓ Editer des cartes d'aide à la décision tels que : état de la voirie, état du réseau d'assainissement, évolution des constructions individuelles des dernières années, caractéristiques des aquifères dans une zone déterminée etc... ;
- ✓ Aider le travail des techniciens et des intervenants dans la gestion et l'aménagement de l'espace ;
- ✓ Moderniser la gestion en permettant à la collectivité d'accéder aux nouvelles technologies d'informations et de communications (NTIC).

Du point de vue hydrogéologique, le SIG que nous développerons permettra d'apporter un outil d'aide à une décision rapide aux intervenants de ce secteur. En effet une bonne connaissance de la zone (caractéristiques chimiques et physico-chimiques des aquifères, le niveau et le type de nappe etc.) permettra de juger de l'intérêt d'y creuser un puits ou d'y implanter un forage.

III.2 Le SIG Arcview

Le SIG bureautique ArcView s'est depuis plusieurs années imposé comme le standard des Systèmes d'Informations Géographiques Bureautiques. Diffusé aujourd'hui à plus de 600 000 exemplaires dans le monde, il est utilisé dans une très large variété de secteurs d'activité. Développé par Environmental Systems Research Institute (ESRI), les créateurs d'ARC/INFO, ils se consacrent depuis plus de vingt ans à apporter des solutions géomatiques à tous ceux qui cherchent à résoudre des problèmes d'ordre spatial.

Outil puissant permettant de visualiser, explorer, interroger, et analyser des données géographiques, il permet de manipuler les données de manière totalement différente.

Vues

Avec ArcView, nous travaillons avec des données géographiques dans des cartes interactives appelées vues. Chaque vue possède une « table des matières » géographiques propre à ArcView, pour comprendre et contrôler facilement ce qui s'affiche.

Tables

Lorsque nous travaillons avec des données tabulaires dans des tables d'ArcView, il nous est possible de cliquer sur des entités d'une vue pour que leurs enregistrements se mettent en surbrillance dans la table, nous montrant leurs attributs. Il suffit également de sélectionner des enregistrements de la table pour que les entités qu'ils représentent se mettent en surbrillance sur la vue. Les tables d'ArcView proposent également tout un éventail de fonctions permettant d'obtenir des récapitulatives statistiques, d'effectuer des tris et de soumettre des requêtes.

Diagrammes

Les diagrammes d'ArcView constituent une option de visualisation de graphiques et de données puissantes, totalement intégrée dans l'environnement d'ArcView. Il suffit tout simplement de cliquer sur les entités d'une vue pour les ajouter au diagramme. ArcView nous permet de travailler simultanément avec des diagrammes, des représentations géographiques et tabulaires de nos données.

Mises en page

Les mises en page d'ArcView nous permettent de créer des cartes, en organisant les divers éléments graphiques sur l'écran selon l'utilisateur. Les mises en page sont intelligentes car elles disposent d'une liaison active aux données qu'elles représentent.

Scripts

Les scripts d'ArcView sont des macros écrites dans Avenue, le langage de programmation et l'environnement de développement d'ArcView. Avec Avenue, nous pouvons personnaliser presque tout aspect d'ArcView, depuis l'ajout d'un nouveau bouton pour exécuter un script que nous rédigeons, jusqu'à la création d'une application entièrement personnalisée que nous distribuons.

Projets

Toutes les composantes de notre session ArcView à savoir les vues, tables, diagrammes, mises en page et scripts sont stockés dans un fichier appelé projet. La fenêtre du projet d'ArcView nous montre le contenu de notre projet et facilite la gestion de tout notre travail.

III.3 Le modèle conceptuel de données

Le modèle conceptuel des données (MCD) a pour but d'écrire de façon formelle les données qui seront utilisées par le système d'information. C'est un formalisme permettant de décrire les données intervenant dans un SI et les liens existant entre ces informations de façon claire, simple, complète et sans ambiguïté. Les formalismes utilisés se situent délibérément en dehors de considérations techniques de stockage informatique des données. En effet, il faut distinguer la formalisation des données mémorisées dans la base de donnée d'information (aspect statique) et celle des traitements réalisés par le processeur d'information (aspect dynamique).

La formalisation du MCD requiert certains concepts de base :

- **Entité** : une entité est la représentation d'un élément matériel ou immatériel ayant un rôle dans le système que l'on désire décrire. Dans notre système par exemple, puits et villages sont des entités.
- **Relation** : une relation (appelée aussi parfois association) représente les liens sémantiques qui peuvent exister entre plusieurs entités.
- **Propriété** : une propriété est une rubrique attribut d'une entité ou d'une relation.
- **Type** : un type est un ensemble d'éléments ayant les mêmes caractéristiques.
- **Occurrence** : une occurrence est un élément particulier appartenant à cette ensemble.
- **Entité type** : c'est une classe d'entités particulières ayant des propriétés analogues.
- **Occurrence d'entité type** : une entité type est une entité particulière appartenant à ce type.
- **Relation-type** : c'est une association entre plusieurs entités-types qui participent à cette relation.

- **Totalité / partialité** : une relation mettant en jeu les entités X et Y est dite :

Totale si aucune occurrence de X et aucune de Y ne peuvent exister sans participer à une occurrence de la relation.

Partielle si certaines occurrences de X ou certaines occurrences de Y peuvent n'être impliquées dans aucune occurrence de la relation.

- **Cardinalités** : la cardinalité minimum d'une relation est le nombre minimum de fois où chaque occurrence d'une entité-type participe à la relation-type. La cardinalité maximum d'une relation est le nombre maximum de fois où chaque occurrence d'une entité-type peut participer à la relation-type.

La figure ci-après représente un exemple de modèle conceptuel de données.

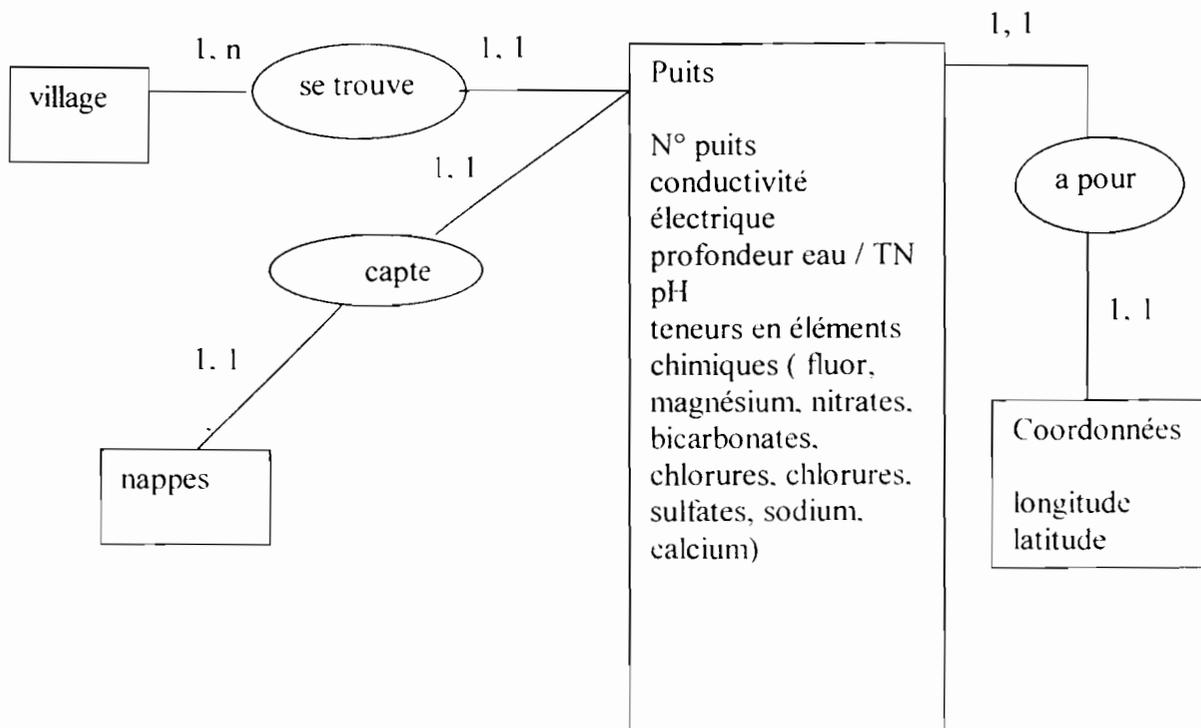


Figure 8 : Exemple de MCD

III.4 Création des cartes

Les données utilisées sont essentiellement la liste des différents puits échantillonnés ainsi que les résultats des analyses chimiques joints en annexe C.

Le procédé de création des cartes s'est effectué comme suit :

Les données que nous avons utilisées se présentaient sous forme de fichier Windows (Excel). Nous avons procédé à leur changement sous l'extension texte (Txt.) afin de pouvoir les utiliser lors de la création des tables correspondantes sous ArcView.

La carte des arrondissements étant déjà disponible, nous avons directement fait appel à cette vue à laquelle nous avons ajouté comme thème les puits définis par leurs coordonnées en longitude et latitude.

Puisque nous avons utilisé des coordonnées en degrés décimaux, le choix du système de projection est devenu facultatif.

Suite aux différentes requêtes effectuées sur les cartes, nous avons procédé à leur mise en page. Ce qui nous a permis d'obtenir les cartes présentées dans la partie IV relative à l'hydrochimie.

IV. HYDROCHIMIE

IV.1 Campagne d'échantillonnage d'eau des puits de l'ELS

Cette campagne s'est fixée comme principal objectif l'étude de la qualité de l'eau des puits construits par l'ELS dans la zone de Mbour et environs. Pour se faire, nous avons procédé à un échantillonnage d'eau des différents puits répertoriés qui sont au nombre de 60. Il s'est déroulé en deux jours (11 et 12 mai 2003). Ainsi au niveau de chacun des 60 puits, certains paramètres ont été mesurés in situ tandis que d'autres ont fait l'objet d'analyses chimiques au laboratoire. Les résultats obtenus nous permettront de concevoir notre SIG et mener une interprétation plus poussée avec l'utilisation d'ArcView.

IV.1.1 Matériel utilisé

Pour mener à bien cette étude, le matériel suivant a été utilisé :

- ✓ 1 conductivimètre à température intégrée
- ✓ 1 pHmètre avec thermomètre intégrée
- ✓ 1 sonde de niveau d'eau
- ✓ 1 GPS
- ✓ 60 bouteilles
- ✓ 1 bouteille d'eau distillée et une pissette pour le rinçage des électrodes

IV.1.2 Procédure de mesure

Au niveau de chaque puits la même procédure a été suivie. Elle s'est faite en 3 temps :

- ✓ *mesure du pH, de la conductivité et de la température de l'eau*

A l'aide d'un seau, nous prélevons dans le puits à échantillonner une quantité d'eau suffisante pour remplir la bouteille à analyser au laboratoire et effectuer les mesures de pH, conductivité et température in-situ. La bouteille est au préalable rincée 3 à 4 fois avec cette même eau. Par la suite, nous y inscrivons le nom du village. Le reste de l'eau servira à effectuer les analyses in-situ. Notons qu'afin d'éviter la contamination entre les eaux des différents puits échantillonnés, les électrodes sont soigneusement nettoyées avec de l'eau distillée au début et à la fin de chaque essai.

- ✓ *Mesure des coordonnées*

Elle s'est effectuée à l'aide du GPS (Global Position System). Placé près du puits, cet appareil nous fournit ses coordonnées à savoir la latitude, et la longitude.

- ✓ *Mesure de la profondeur de l'eau par rapport à la margelle*

Elle s'est faite à l'aide d'une sonde. C'est un rouleau gradué en mètre comportant 2 fils. Chacun d'eux étant relié à une borne de la batterie et terminé par une électrode. Initialement, le circuit est maintenu ouvert. La mesure s'effectue comme suit : la sonde est déroulée puis descendue dans le puits. Une fois que les électrodes se mettent en contact avec l'eau, le circuit est fermé et matérialisé par un signal sonore. Nous prenons dès lors la profondeur de l'eau par rapport à la margelle. Une fois cette étape terminée, nous mesurons la hauteur de la margelle par rapport au terrain naturel.

✓ . Observations

Une fois les différentes mesures effectuées, nous notons quelques observations sur l'état du puits, la salubrité des alentours, le type de végétation présent dans la zone. Toutes ces observations combinées aux résultats des analyses chimiques seront d'un grand apport pour l'interprétation.

IV.2 Analyses et interprétation des résultats

L'eau destinée à la consommation humaine doit respecter un certain nombre de paramètres qui définissent sa potabilité. Des normes de potabilité des eaux de boisson ont donc été définies. Dans le cadre de ce projet, nous nous baserons sur les normes préconisées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) où à défaut par l'Institut Sénégalaise de Normalisation (ISN) (annexe D). Parmi ces paramètres nous pouvons citer :

- les paramètres organoleptiques tels que la coloration, l'odeur, la saveur.
- les paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle de l'eau
- les paramètres concernant les substances indésirables
- les paramètres microbiologiques etc .

Notre étude portera essentiellement sur les paramètres physico-chimiques et sur les éléments chimiques.

Pour chacun de ces paramètres mesurés au laboratoire ou in-situ (annexe B), nous avons établi des cartes qui nous permettront de mener à bien l'interprétation des résultats des analyses. Nous effectuerons également des comparaisons entre les teneurs obtenues et les normes préconisées par l'OMS et l'ISN. Les tableaux des normes sont joints en annexe C.

IV.2.1 Les paramètres physico-chimiques

IV.2.1.1 Le potentiel hydrogène (pH)

C'est une échelle logarithmique qui varie de 0 à 14 et qui traduit l'acidité ou l'alcalinité d'une solution, la neutralité étant à $\text{pH}=7$. La carte du pH (Fig.9) indique deux classes de valeurs : $\text{pH}<7$ (acide) et $\text{pH}>7$ (alcalin). En se référant à la carte de profondeur (Fig.10), nous remarquons que les puits de profondeur faible ($p<15\text{m}$) présentent un pH acide. C'est le cas de puits de Tattaguine Escalé, Khondiogne, Podome, Carrière, Sessen, Ngoyé Dispensaire, Ngoyé Centre, Bacobof, Ngueth etc... Tandis que

ceux qui ont une profondeur relativement importante variant entre 20 et 50 m présentent un pH alcalin.

Ces remarques nous montrent que dans cette zone, essentiellement 2 types de nappe sont captés :

- la nappe superficielle du Continental Terminal (CT) pour les puits à faible profondeur.
- la nappe de l'Eocène pour les puits plus profonds

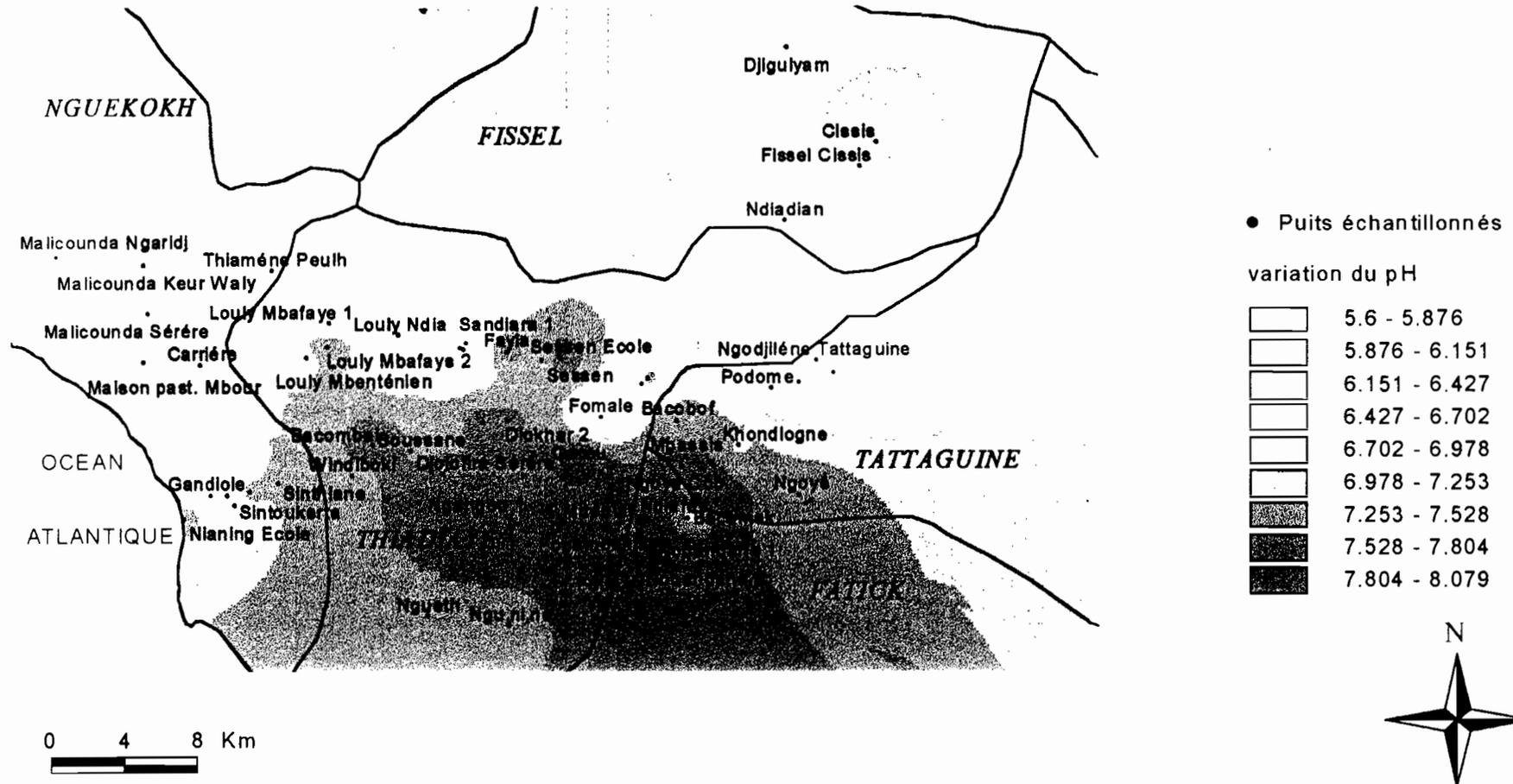
Par ailleurs, les observations faites sur le terrain renforcent ces remarques. En effet aux alentours des puits à faible profondeur, nous notons la présence de sable argileux, caractéristique de la nappe du CT alors que du calcaire de l'Eocène est extrait des puits de profondeur plus importante.

Dans le cas des eaux de consommation, les normes de l'ISN recommandent un maximum de pH entre **6.5** et **8.5**. Ainsi, à part les puits de Malicounda Ngaridj (pH = 5.6), Sandiara 3, Ngodjiléne Tattaguine, Tattaguine Escale, Fomale, tous les autres puits respectent les normes préconisées.

IV.2.1.2 La température

Les valeurs de température mesurées in-situ varient globalement entre 26°C et 30°C. Elles sont donc comparables à la température ambiante, ce qui montre que le système est ouvert par rapport aux influences superficielles (pollution, apports pluviométriques etc.).

Figure 9: Variation du pH



IV.2.1.3 La conductivité électrique et la minéralisation globale

L'eau de pluie est légèrement acide du fait de sa teneur en CO₂ dissous. Au cours de son infiltration dans le sol et le sous-sol, elle se charge en ions et acquiert des propriétés physiques et chimiques qui caractérisent l'eau de la nappe qu'elle forme.

Les eaux souterraines sont plus ou moins minéralisées en fonction :

- de la nature des roches traversées et des minéraux rencontrés au cours de l'infiltration ;
- du temps de contact de l'eau avec les minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau dans le sous-sol ;
- du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration.

Ainsi voit-on l'importance des minéraux solubles des roches et de la perméabilité de l'aquifère dans la minéralisation de l'eau.

La propriété de l'eau à conduire le courant électrique, caractérisée par la conductivité électrique, est reliée à la concentration totale des substances ionisées. En outre, la minéralisation globale représente l'ensemble des ions (cations + anions) présents dans une solution. La conductivité d'une eau reflète assez fidèlement sa minéralisation d'où la forte ressemblance entre la carte de conductivité électrique (Fig.11) et celle de minéralisation globale (Fig.12).

L'ISN préconise des valeurs de 1000 à 2000 mg/l pour la minéralisation globale. A part quelques poches fortement minéralisées où se situent les puits de Thiamène Peulh (6652.6mg/l), Djiguiyam (6669.52mg/l) et les puits de Nianning Ecole, Ndiadian, Podome et Ndiafé où la teneur en minéraux varie entre 2500 et 3424mg/l , tous les autres puits respectent les normes fixées. Ces différences notées sur la minéralisation montrent une différence sur la lithologie des terrains traversés. En effet comme nous l'avons dit plus haut, la nature des roches influe beaucoup sur le degré de minéralisation des aquifères.

Figure 10: variation de la profondeur de la nappe

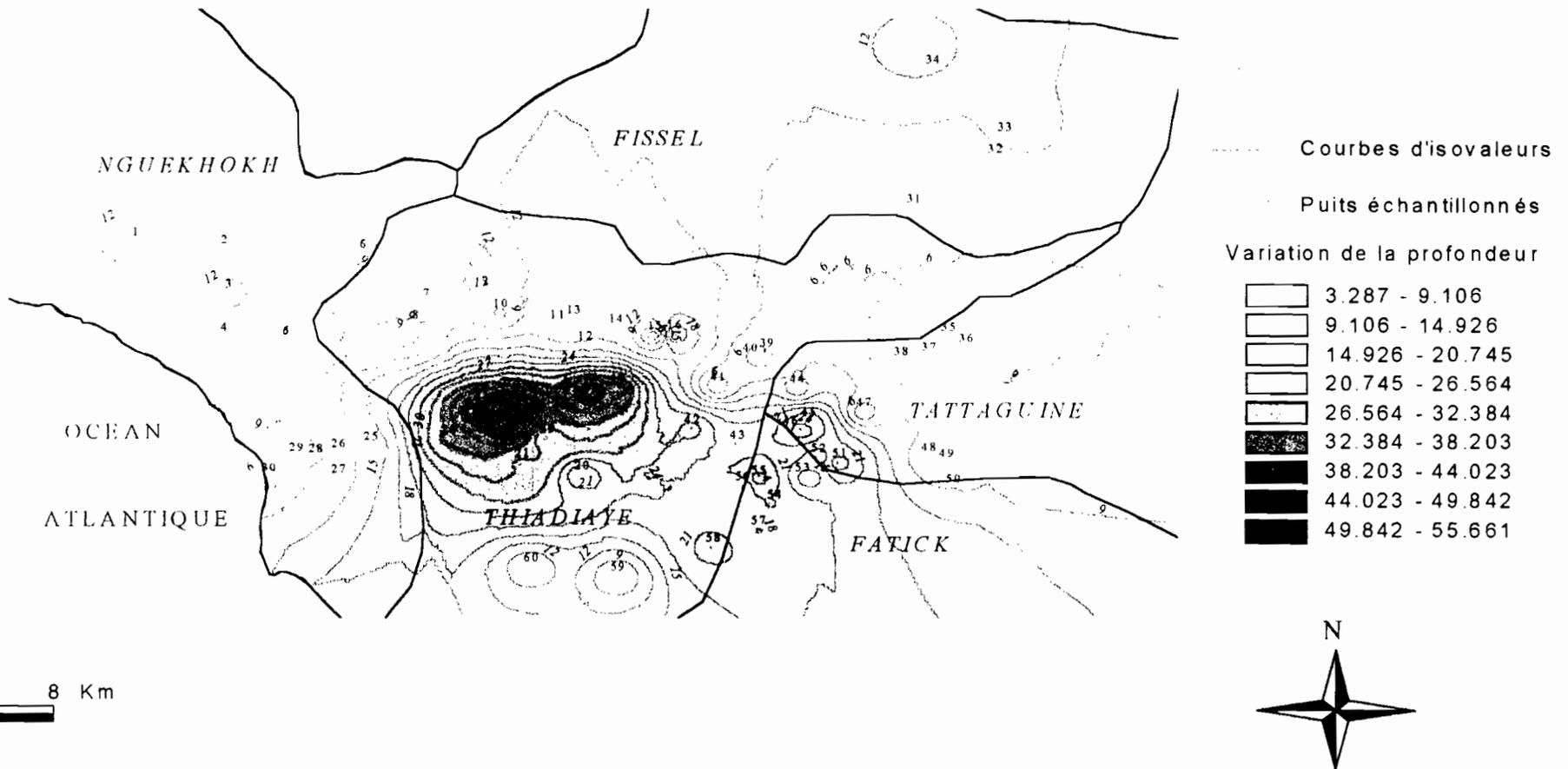


Figure 11: variation de la conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

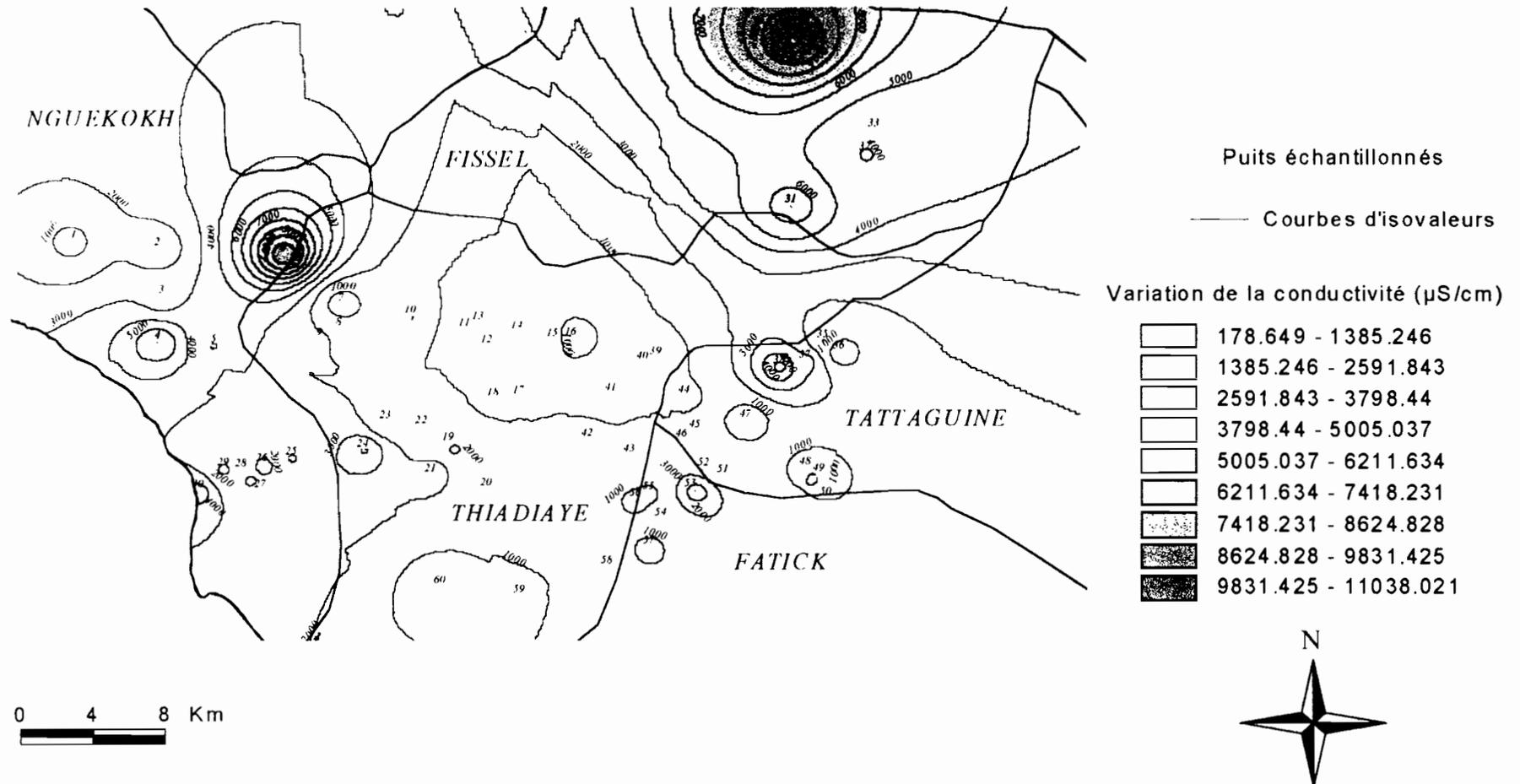
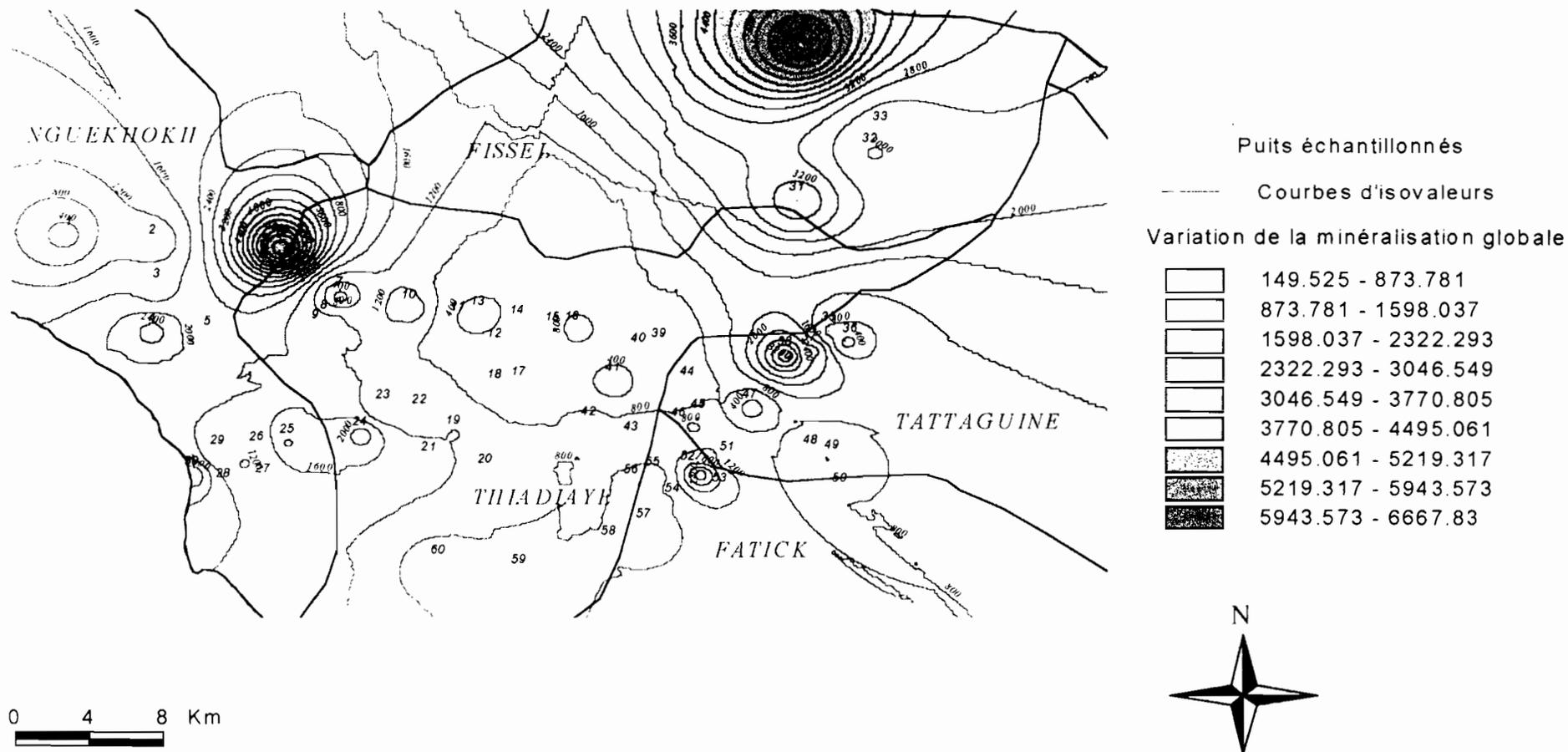


Figure 12: répartition de la minéralisation globale



IV.2.2 Les paramètres chimiques

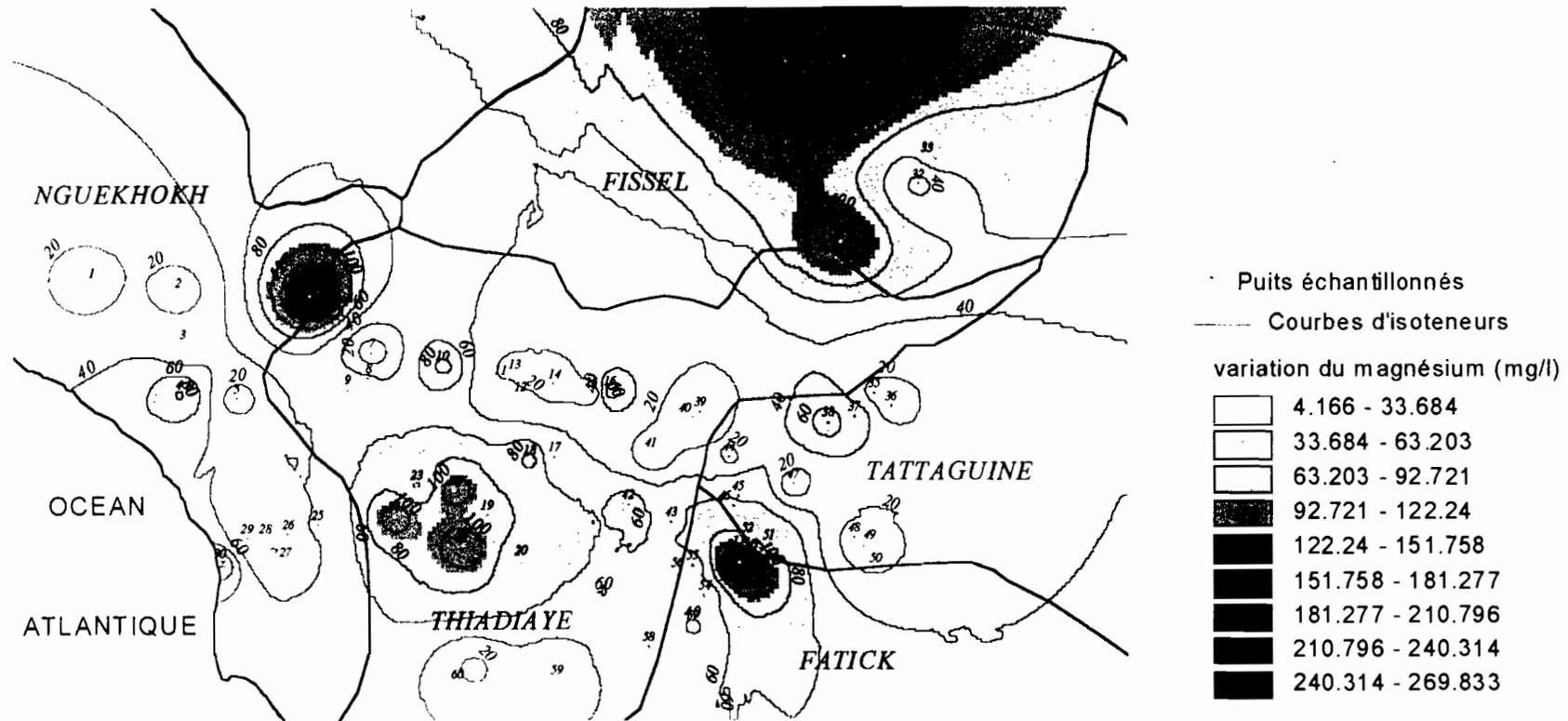
Les analyses chimiques ont été faites au niveau du laboratoire d'hydrochimie du Département de Géologie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Elles ont essentiellement porté sur les ions majeurs (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) et les ions mineurs (F^- et Br^-).

IV.2.2.1 Le magnésium

Certaines études indiquent qu'à partir de la concentration de 100 mg/l pour des sujets sensibles, le magnésium donne un goût désagréable à l'eau. S'ils ne provoquent pas d'effets toxiques, les sels de magnésium ont un effet laxatif à partir de 500 mg/l. Cette action diminue rapidement avec l'accoutumance. L'interprétation du rôle du magnésium doit se faire en liaison avec les sulfates. Dans les zones arides, il est arrivé que les populations consomment couramment sans problèmes majeurs des eaux contenant 200mg/l de magnésium avec des teneurs élevées en sulfates.

En tenant compte du maximum admissible fixé par l'ISN qui est de l'ordre de 150mg/l, nous remarquons sur la carte du Mg (Fig.13) que les eaux des puits échantillonnées ne présentent pas une forte teneur en magnésium, sauf dans les villages de Thiaméne Peulh (169.68mg/l) et de Ndiaté (225.38mg/l).

Figure 13 : répartition de la teneur en magnésium (mg/l)



0 4 8 Km

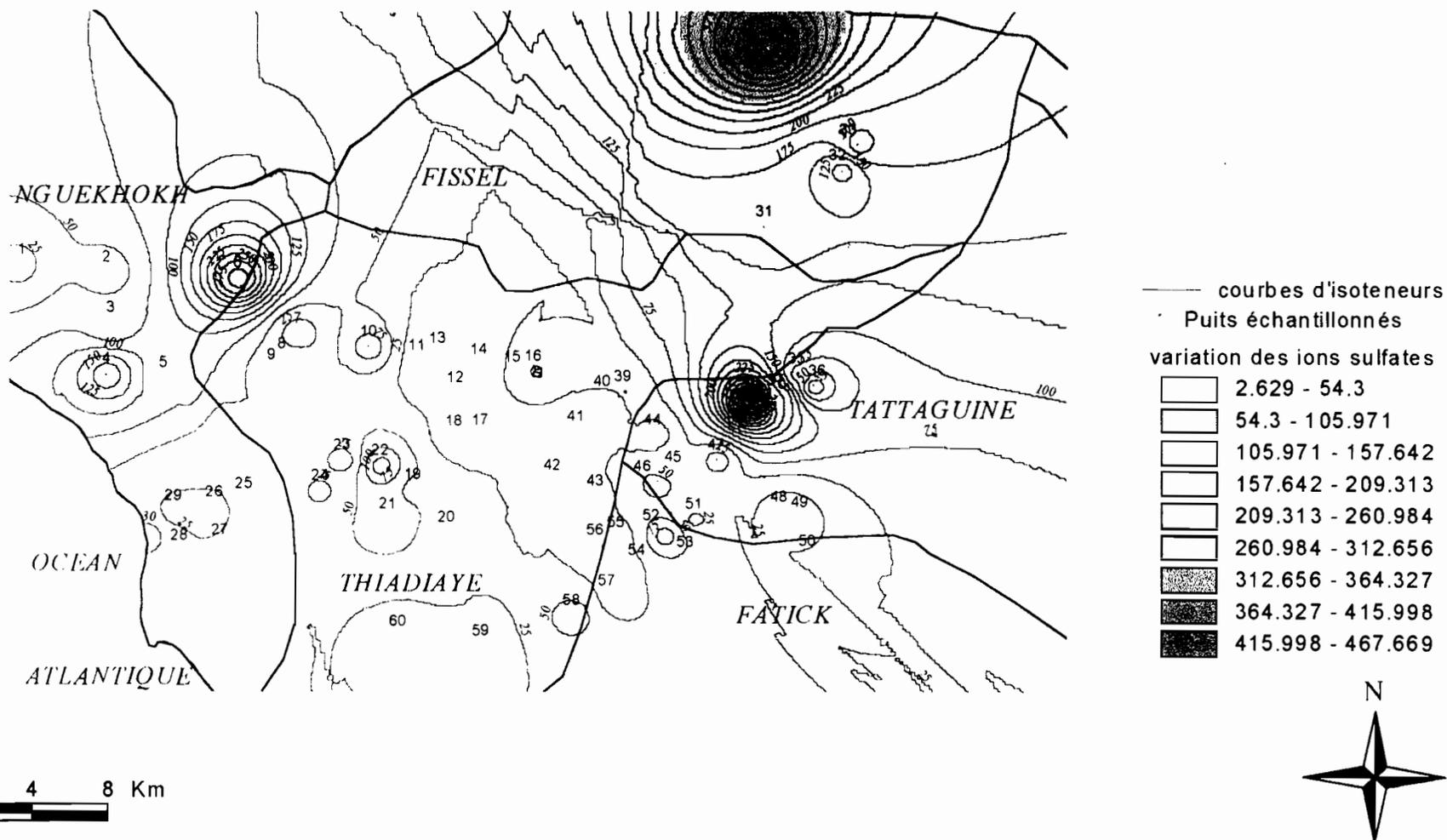


IV.2.2.2 Les sulfates

Les sulfates contenus dans les eaux souterraines sont fournis par la dissolution du gypse. Le gypse est un sulfate de calcium hydraté qui est faiblement soluble (7 g/l dans les conditions normales). Les sulfates se trouvent naturellement dans les eaux, à des concentrations très variables. Pour des concentrations supérieures à 500 mg/l, les sulfates peuvent avoir un effet purgatif et entraîner une déshydratation et une irritation gastrique. La teneur en sulfates des eaux doit être reliée aux éléments alcalins et alcalino-terreux de la minéralisation. Suivant ceux-ci et selon l'intolérance des consommateurs, il est susceptible d'en résulter des troubles gastro-intestinaux en particulier chez l'enfant. Toutefois l'action laxative plus importante en présence de magnésium s'estompe rapidement avec l'accoutumance. L'OMS préconise une valeur de 250mg/l pour les eaux de consommation alors que le maximum recommandé par l'ISN est de 200mg/l. En se référant aux normes de l'OMS, seuls les puits de Podome, Djiguiyam, Thiaméne Peulh, Ndiadian, Maison Pastorale Mbour donnent une valeur supérieure à la norme fixée.

Notons que sur la carte (Fig.14), les zones à forte teneur en sulfates correspondent à de fortes teneurs en magnésium. (Fig.13)

Figure 14 : variation des teneurs en sulfates (mg/l)



IV.2.2.3 Les nitrates

Les nitrates jouent un rôle important comme engrais dans la mesure où ils constituent le principal aliment azoté des plantes, dont ils favorisent la croissance. La décomposition des matières organiques animales ou végétales renferment des teneurs importantes en nitrates. Dès lors l'utilisation d'engrais riches en nitrates sont à l'origine des fortes concentrations des eaux en ces éléments. En effet l'eau de pluie en s'infiltrant dans le sol et le sous-sol se charge en ions NO_3 qui polluent l'aquifère.

Le danger que représentent les nitrates réside dans leur réduction en nitrites.

En effet, ce phénomène qui se manifeste au niveau de la bouche et de l'estomac conduit à la transformation de l'hémoglobine du sang en méthémoglobine, laquelle est inapte au transport de l'oxygène.

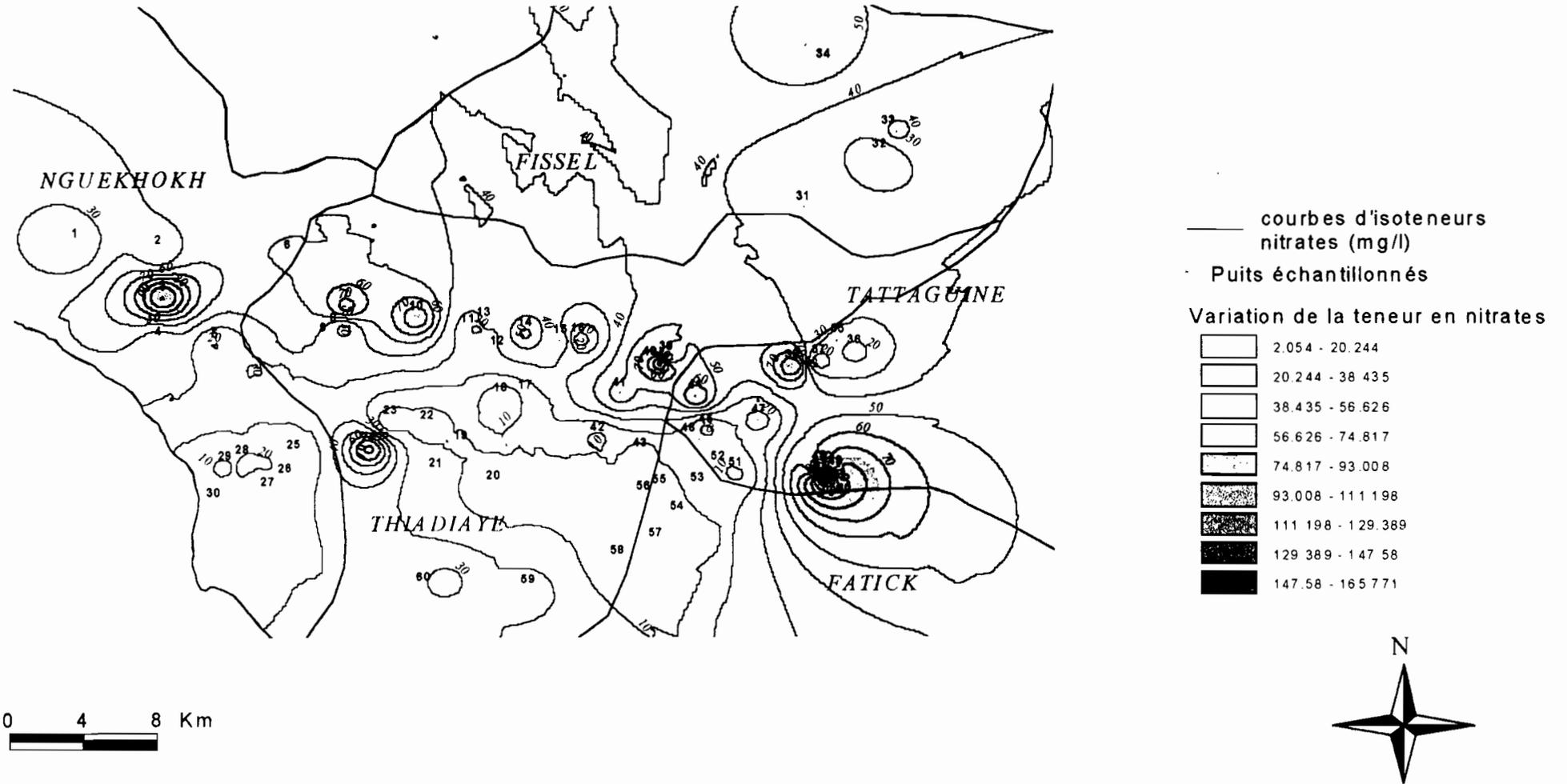
Il en résulte une maladie particulièrement grave chez les nourrissons : la méthémoglobinémie.

Les normes de l'OMS indiquent une valeur de l'ordre de 50 mg/l à respecter pour les eaux de consommation.

La carte de répartition des teneurs en nitrates (Fig.15) ne suit pas celle de la minéralisation globale. On remarque des poches de teneur élevée en nitrates dépassant largement les normes. C'est le cas des puits de Malicounda sérère, Ngoyé Dispensaire, Thiadiaye Ecole-Eglise, Podome, Windioki, Louly Mbafaye I, Louly Ndia.

Les observations faites autour de ces puits révèlent une présence d'excréments d'animaux, d'abreuvoir pour le bétail. Ces éléments peuvent être à l'origine d'une pollution ponctuelle de la nappe, pollution qui pourrait s'étendre par diffusion. Ainsi les captages à proximité de la zone polluée et en aval pourront à long-terme en être affectés.

Figure 15 : variation des teneurs en nitrates (mg/l)



IV.2.2.4 Le fluor

Ce paramètre fera l'objet d'une étude particulière car les affections provoquées par son excès dans l'eau figurent parmi les plus fréquentes sur cette zone.

Si à faibles doses, le fluor est un élément protecteur de l'émail des dents, à fortes doses, il entraîne des lésions dentaires osseuses, et peut même présenter une toxicité aiguë.

- **La fluorose dentaire**

Elle se définit comme étant une hypo-minéralisation de l'émail dentaire qui se caractérise par la présence de tâches blanches, opaques et ternes sur l'émail dentaire qui peut être strié, moucheté ou prendre une coloration jaune où marron foncé. Dans les cas plus graves, on peut observer des fosses isolées et des zones plus étendues d'hypoplasie (confluence de fosses) de l'émail entraînant ainsi une disparition de la morphologie normale.

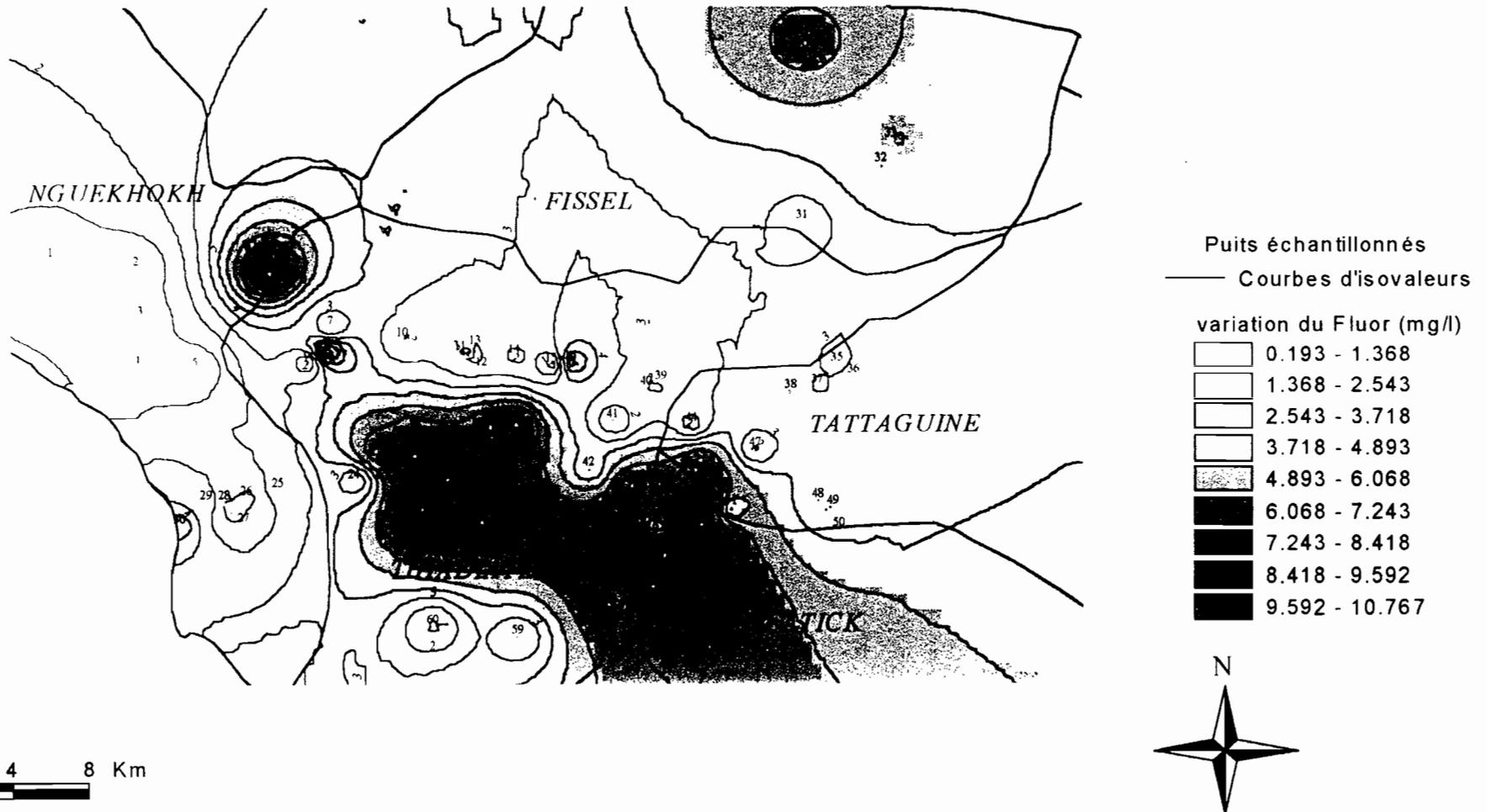
La sévérité et la distribution dépendent de la concentration du fluor. Généralement, elle ne concerne que les enfants consommant quotidiennement une eau contenant plus de 2 mg/l de fluor pendant les six premières années de leur vie.

- **La fluorose osseuse**

C'est une atteinte du squelette liée à une intoxication chronique au fluor. La source peut être hydrotellurique, alimentaire, professionnelle ou médicamenteuse. Les ingestions à doses excessives et surtout prolongées sont susceptibles d'entraîner à la longue des lésions osseuses, voire articulaires. Les altérations osseuses sont d'évolution lente. Ce n'est qu'après 2 ans au moins d'exposition pour des concentrations hydriques au-dessus de 3 mg/l. Il n'y a cependant pas de corrélation entre la concentration du fluor dans l'eau de boisson et la sévérité des lésions rencontrées. Cela fait suspecter l'intervention d'autres facteurs tels que la malnutrition.

L'OMS recommande une valeur maximale de 1.5 mg/l. Nous remarquons que seuls 13 puits sur les 60 étudiés ont une teneur en fluor respectant la norme fixée. Ceci apparaît nettement sur la carte de répartition des teneurs en fluor (Fig.16). Cette teneur excessive en fluor peut être liée à la nature de la roche réservoir, caractérisée par la présence de marne et attapulgites qui reposent sur un niveau de calcaire argileux à silice, phosphate et glauconie.

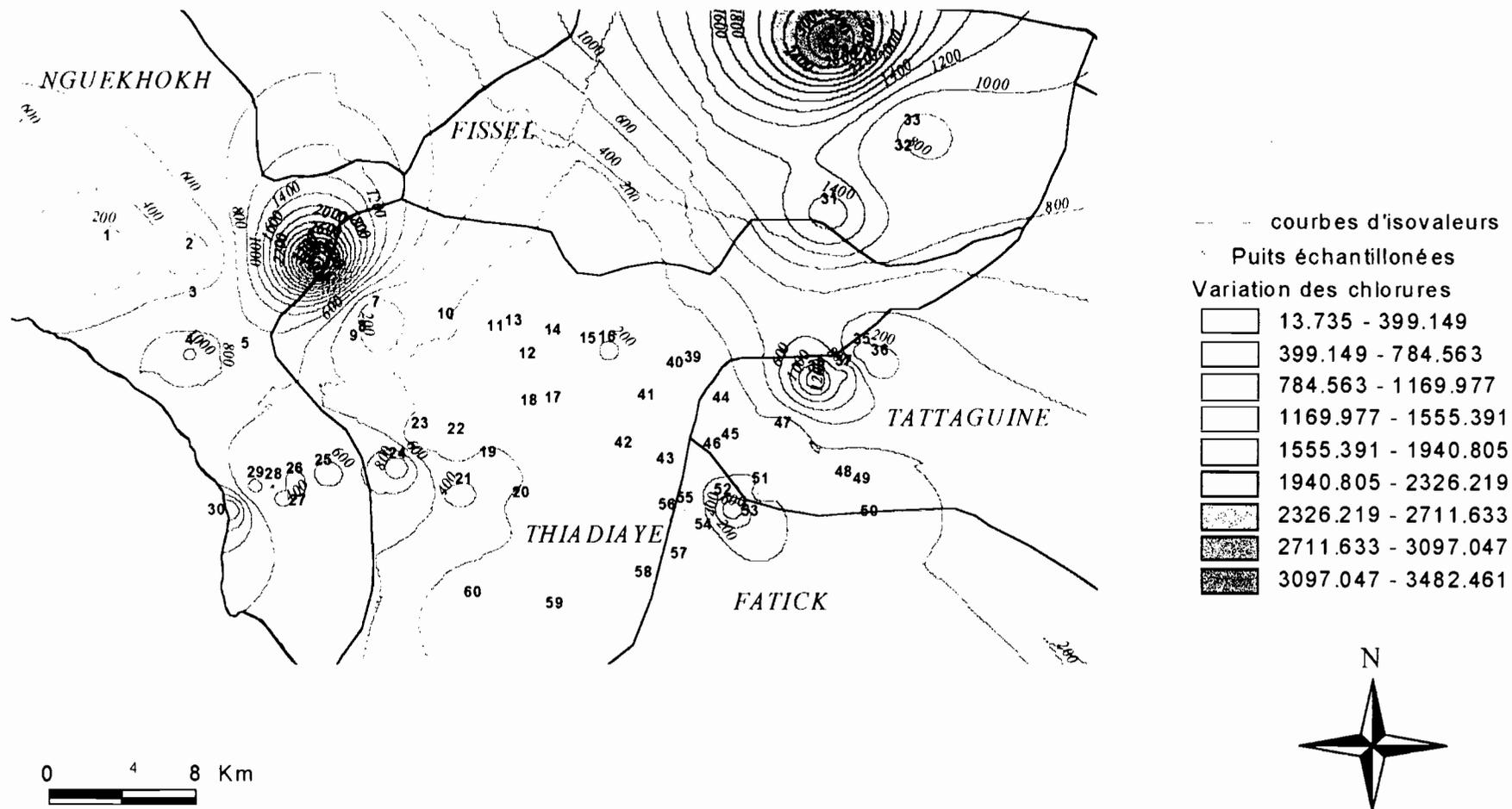
Figure 16 : variation de la teneur en fluor (mg/l)



IV.2.2.5 Les chlorures

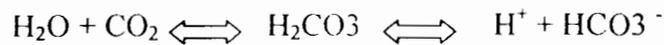
Le chlore est le 20^{ième} élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Il n'existe pas sous forme libre, mais à l'état de chlorures. Dans l'eau on le trouve sous forme de chlorure de sodium et chlorure de calcium. Le chlorure de sodium, le "sel de cuisine", est l'un des corps qui nous est le plus familier . Nous croyons ainsi les connaître et lorsqu'on nous parle de pollution, nous n'y pensons pas. Pourtant l'ion Cl⁻ est un polluant de l'eau s'il y est présent à fortes doses. Le chlorure de sodium est responsable de certains problèmes rénaux, du cancer du col de l'utérus mais, le plus connu est l'hypertension artérielle. L'OMS recommande une teneur en chlorures maximale de 250 mg/l. La carte de répartition des teneurs en chlorures (Fig.17) présentent des poches de fortes teneurs en chlorures. C'est le cas à Thiaméne Peulh, Podome, Djiguiyam. Globalement 18 sur les 60 puits échantillonnés ne respectent pas la norme. La nappe dans ces zones est fortement salée. Cette présence de chlorures dans l'eau de boisson peut être attribuée à des sources naturelles ou à la pollution pouvant provenir d'intrusions salines.

Figure 17 : Variation des teneurs en chlorures (mg/l)



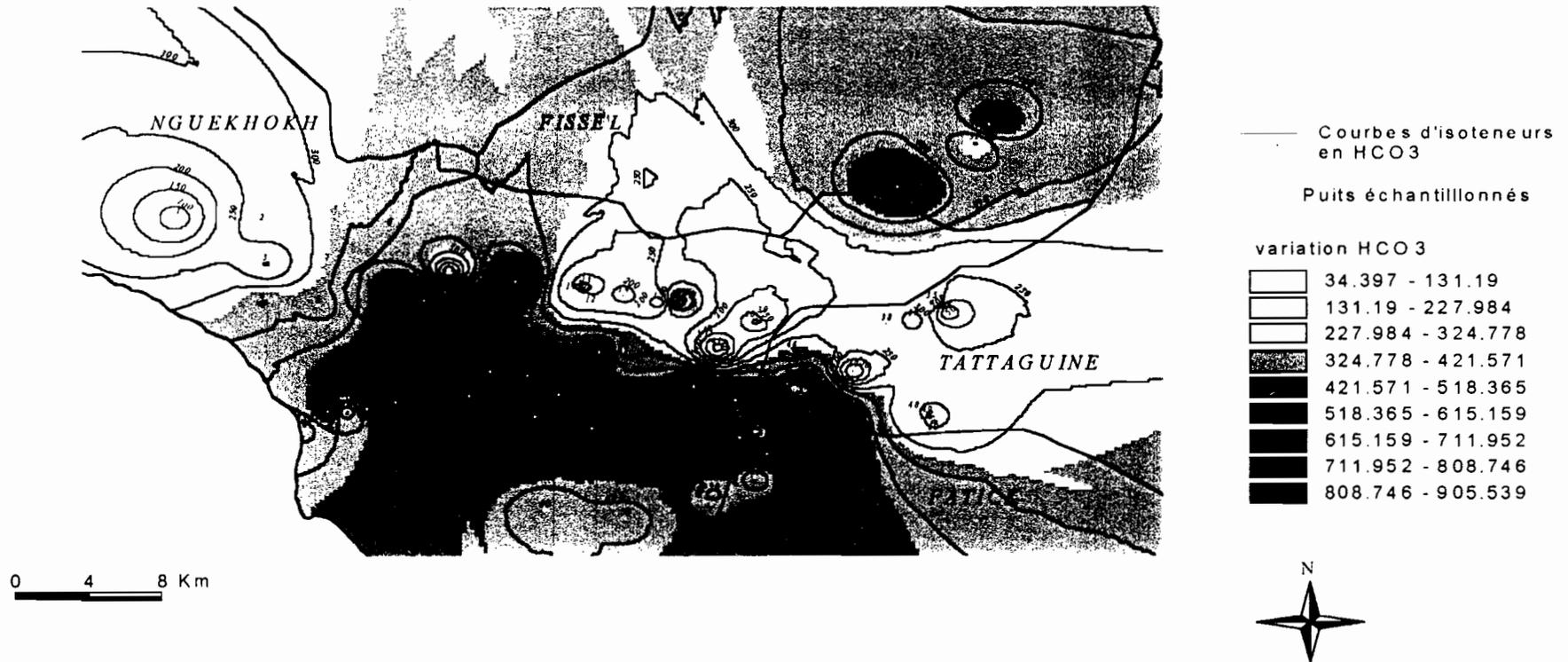
IV.2.2.6 Les bicarbonates

L'évolution des teneurs en HCO_3^- (Fig.18) ne suit pas celle de la minéralisation globale (Fig.12).Ce qui soutend une origine autre que celle de la roche réservoir. Les fortes teneurs de bicarbonates sont rencontrées dans les puits de faibles profondeur. C'est le cas à Louly Ndia (p = 9.63), Louly Mbafaye 2 (p = 9.57m), Louly Mbenténien (p = 7.70m), Fouambéniar (p = 19.8m), Ndiagé (p = 13.45m) avec respectivement des teneurs en bicarbonates de 640.5 mg/l, 686,25 mg/l, 640.5 mg/l, 915 mg/l et 442.25 mg/l. Ces fortes teneurs en bicarbonates pourraient être dues à la dissolution du CO_2 biogénique et atmosphérique. En effet, l'ouverture du système aux influences superficielles (puits peu profonds) favorise un apport illimité de CO_2 . Ce dernier réagit avec les eaux de la nappe et donne de l'acide carbonique qui à son tour se dissocie pour donner des bicarbonates suivant la réaction :



Ce phénomène combiné à l'influence des calcaires et marno-calcaires de la roche réservoir pourrait aussi expliquer les concentrations élevées en bicarbonates observées dans les eaux de la nappe.

Figure 18 : Répartition des teneurs en bicarbonates (mg/l)



IV.2.2.7 Les ions calcium et sodium

Pour chacun de ces 2 types d'ions, nous avons dressé les cartes de répartition des teneurs de l'eau en ces éléments : (carte Ca^{2+} : Fig.19, carte Na^+ : Fig.20). D'après les normes, la valeur admissible pour le sodium est de 150 mg/l, pour le calcium, elle est de 100 mg/l. Nous remarquons que les puits riches en sodium sont ceux qui présentaient une teneur riche en chlorures, ce qui est tout à fait logique.

Figure 19: variation des ions calcium (mg/l)

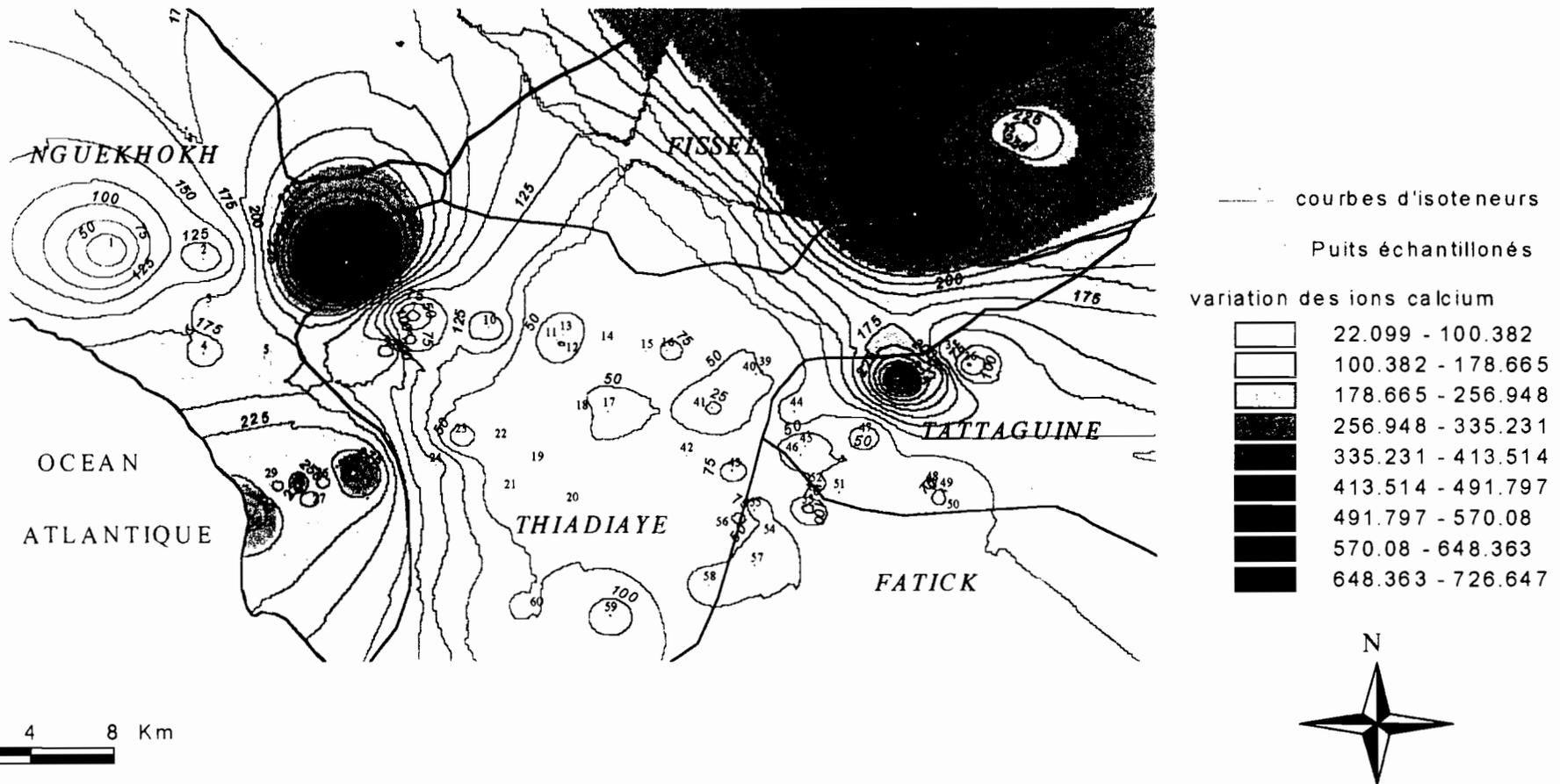
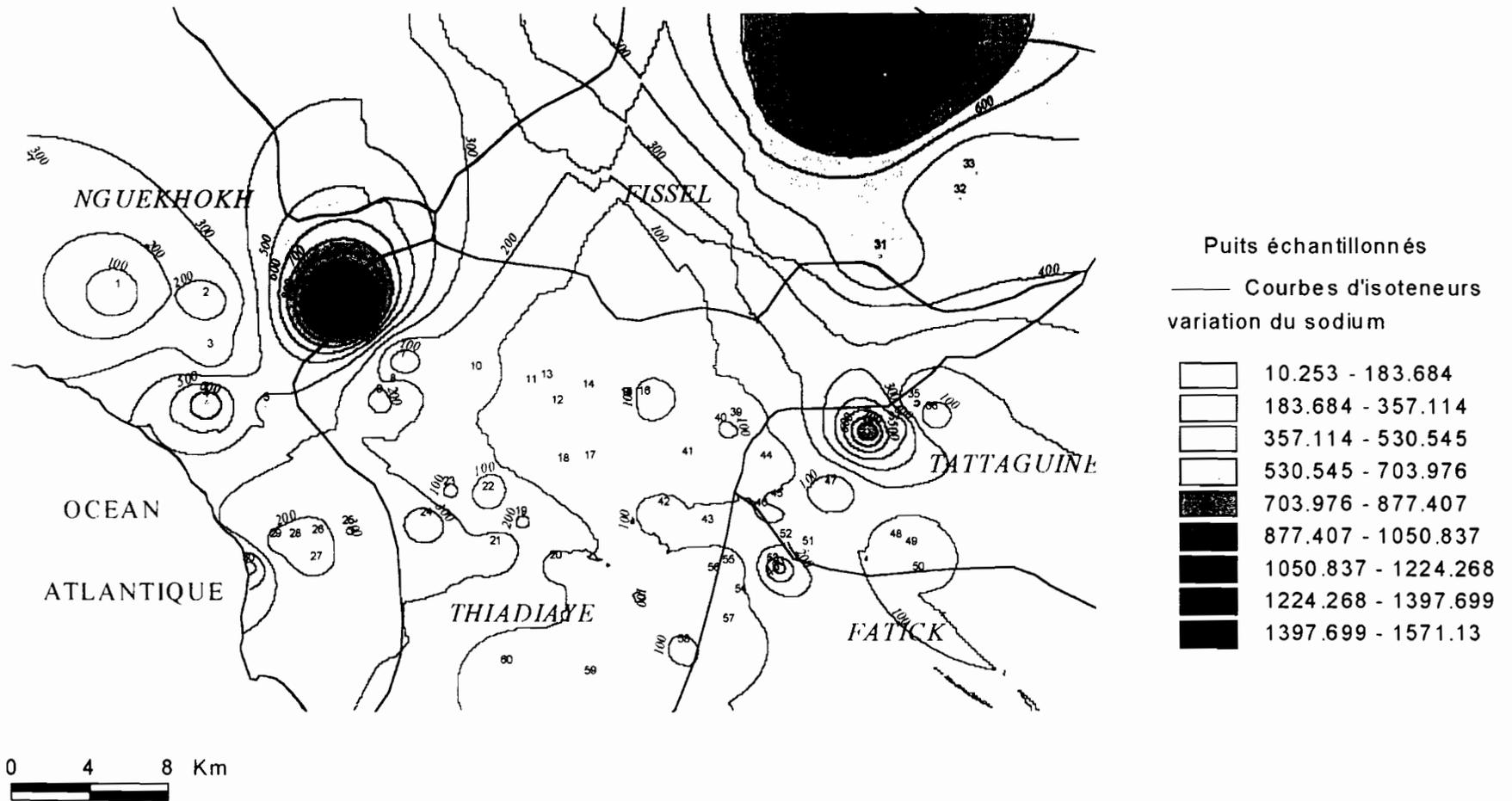


Figure20 : variation des teneurs en sodium (mg/l)



CONCLUSION

Au terme de cette étude hydrogéologique menée dans la zone de Mbour-Fatick, nous pouvons insister sur l'intérêt d'utiliser la méthode géophysique avant la creusée des puits.

En effet, ces études préalables ont permis de définir les caractéristiques de l'aquifère rencontrée (type, niveau de l'eau par rapport au terrain naturel, degré de minéralisation etc.)

Par ailleurs le Système d'Information Géographique que nous avons développé pourra servir à mieux orienter les membres du programme hydraulique de l'Eglise Luthérienne du Sénégal lors de la creusée d'un puits où l'implantation d'un forage dans cette zone.

Les cartes obtenues suite à l'étude hydrochimique renseignent sur les endroits où la nappe ne respecte pas les normes de potabilité de l'eau. A la suite des résultats des analyses chimiques, le plus grand problème constaté dans la zone est la teneur excessive des eaux en fluor (atteignant parfois + de 10mg/l dans certaines localités).

Globalement, il n'existe pas vraisemblablement un puits qui respecte toutes les normes de potabilité.

Ainsi pour aider les planificateurs et apporter des solutions à l'ensemble des problèmes causés par l'alimentation en eau des populations villageoises, il serait alors souhaitable de mettre en pratique les recommandations ci-dessous :

1. Inciter les populations à se regrouper en villages assez importants, ce qui permettrait d'assurer l'alimentation en eau par le biais de forages profonds dotés de réseaux d'adduction performants. Ces forages pourraient capter le maestrichien et obtenir une eau de qualité moins fluorée. Nous invitons vivement les membres du programme puits à réorienter leurs activités en ce sens ;
2. Effectuer des essais de perméabilité (Slug Test) en vue de connaître le débit d'exploitation des nappes phréatiques mais aussi des levés topographiques pour le nivellement des puits et des piézomètres ;

3. Veiller à l'entretien des puits en implantant des périmètres de protection. Ceci contribuerait à éviter la pollution de la nappe ;
4. Toujours utiliser la méthode géophysique par sondage électrique en vue de détecter avant la creusée des puits l'interface eau douce-eau salée. Ceci permettrait d'éviter des pertes économiques aux membres du programme puits vue l'abandon de nombreux puits offrant une eau de mauvaise qualité (souvent salée) ;
5. Exploiter le Système d'Information Géographique (SIG) avant toute intervention dans la zone.

BIBLIOGRAPHIE ET REFERENCES

1. BA M. I. (199) : Contribution à l'étude hydrogéologique du système aquifère de la région de Mbour (Sénégal) : géométrie et paramètres hydrodynamiques. Mémoire de D.E.A. Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques UCAD, 68 pages.
2. MEHER DE STADELHOFEN C. (1991) : Application de la géophysique aux recherches d'eau, Document Lavoisier, 173 pages.
3. MLS/BUREST (2001), Evaluation Programme AEP-95-200-ELS, Rapport, 43 pages .
4. NDIAYE A. (2002) - Développement d'un SIG « Ressources en eaux souterraines dans la zone de Mbour-Fatick », Projet de fin d'études. Ecole Supérieure Polytechnique – Thiès, 74 pages.
5. THERIAULT M. (1996), Systèmes d'Information Géographiques Concepts fondamentaux. Notes et documents de cours numéro 12, 2^{ème} édition.

Annexe A

Tableaux et courbes de sondage électrique

SONDAGE ELECTRIQUE TYPE SCHLUMBERGER

Mission: ELS

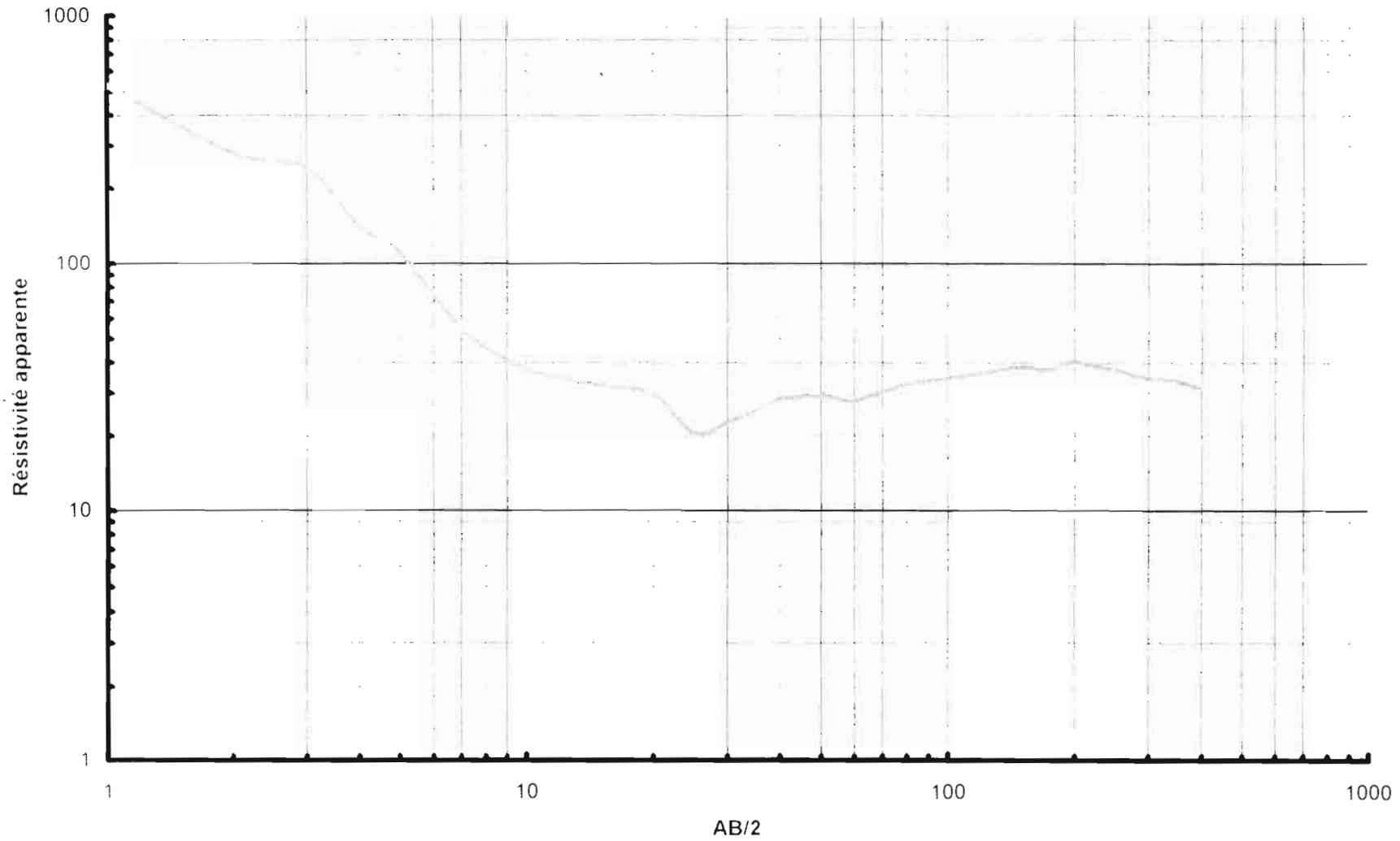
Sondage: Bacombel

Date: 29/01/03

Azimut: N165°

AB/2(m)	MN/2(m)		K		V/I(ohm)		ρ apparente	
1	0.5		2.36		224.00		528.64	
2	0.5		11.8		23.60		278.48	
3	0.5		27.5		8.77		241.18	
4	0.5		49.5		2.88		142.56	
5	0.5		77.8		1.4330		111.49	
7	0.5	1	153	75.4	0.3590	0.8130	54.93	61.30
10	0.5	1	313	155	0.3890	0.2440	121.76	37.82
15	0.5	1	706	351	0.2110	0.0915	148.97	32.12
20	0.5	1		626		0.0473	0.00	29.61
25	0.5	1	188	980	0.1095	0.0594	20.59	58.21
30	0.5	1	274	1412	0.0826		22.63	
35	0.5		376		0.0671		25.23	
40	0.5		495		0.0567		28.07	
50	0.5		778		0.0375		29.18	
60	0.5		1123		0.0248		27.85	
80	0.5		2002		0.0162		32.43	
100	10	5	1554.3	3132.1	0.0222	0.0116	34.51	36.33
125	10	5	2435.4	4898.4	0.0150		36.53	
150	10		3516.8		0.0109		38.33	
175	10		4792.4		0.0078		37.43	
200	10	20	6264.3	3108.6	0.0064	0.0119	40.03	36.84
250	10	20	9796.8	4874.8		0.0076		37.24
300		20	1414.3	7033.6		0.0049		34.46
350		20		9584.8		0.0035		33.55
400	50	20	4948	12528		0.0025		31.32
450	50	20	6283	12864				
500	50		7775					

Coube de sondage Bacombel



SONDAGE ELECTRIQUE TYPE SCHLUMBERGER

Mission: ELS

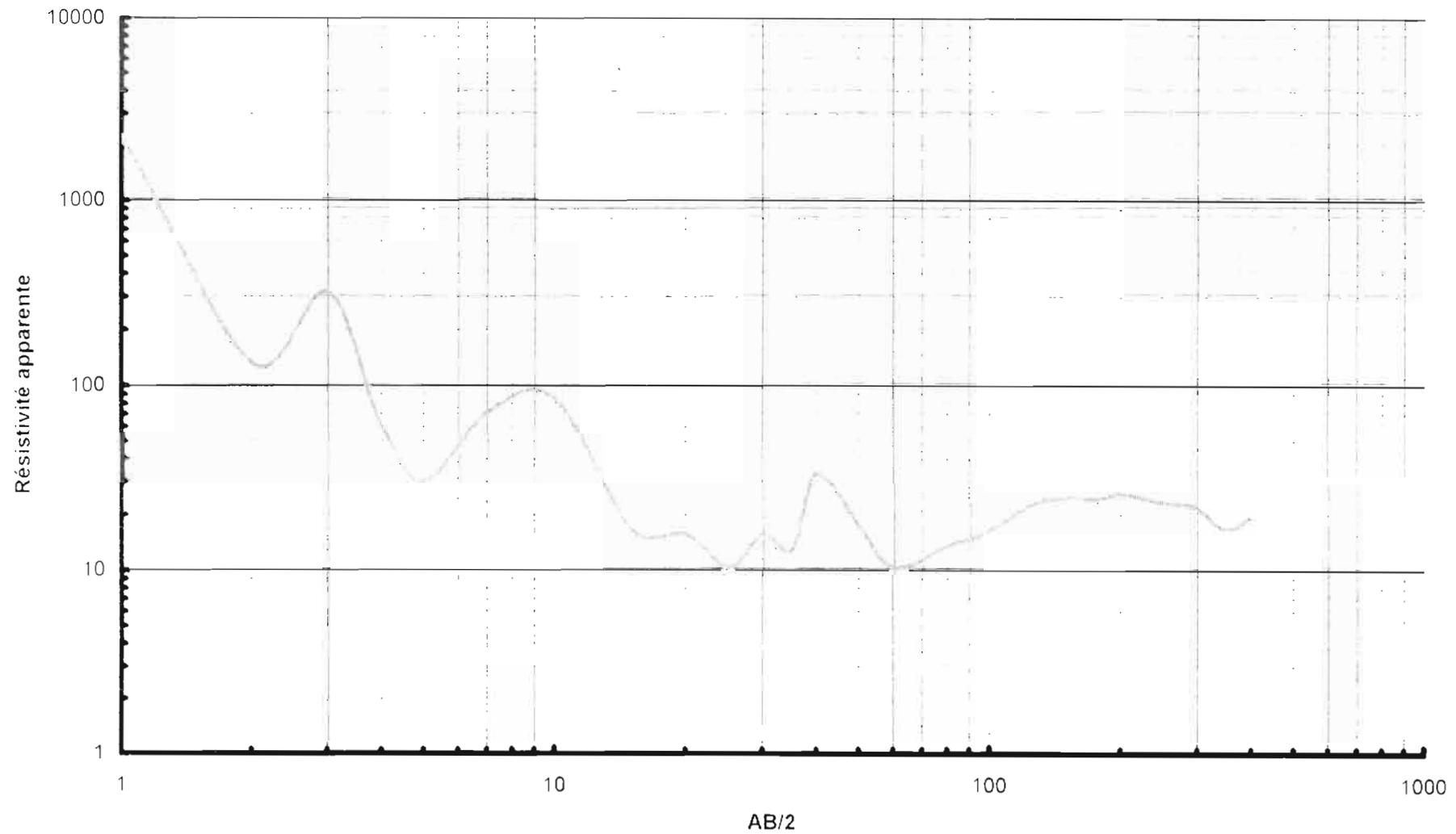
Sondage: Ngangou

Date: 30/01/03

Azimut: N17°

AB/2(m)	MN/2(m)		K		V/I(ohm)		ρ apparente	
1	0.5		2.36		953.00		2 249.08	
2	0.5		11.8		11.19		132.04	
3	0.5		27.5		11.43		314.33	
4	0.5		49.5		1.21		59.90	
5	0.5		77.8		0.3800		29.56	
7	0.5	1	153	75.4	0.4620	0.4590	70.69	34.61
10	0.5	1	313	155	0.2680	0.2750	83.88	42.63
15	0.5	1	706	351	0.0230	0.0245	16.24	8.60
20	0.5	1		626		0.0245		15.34
25	0.5	1	188	980	0.0538	0.0920	10.11	90.16
30	0.5	1	274	1412	0.0556		15.23	
35	0.5		376		0.0336		12.63	
40	0.5		495		0.0658		32.57	
50	0.5		778		0.0216		16.80	
60	0.5		1123		0.0090		10.11	
80	0.5		2002		0.0066		13.21	
100	10	5	1554.3	3132.1	0.0102	0.0058	15.85	18.17
125	10	5	2435.4	4898.4	0.0091		22.16	
150	10		3516.8		0.0068		23.91	
175	10		4792.4		0.0049		23.48	
200	10	20	6264.3	3108.6	0.0040	0.0070	25.06	21.76
250	10	20	9796.8	4874.8		0.0046		22.42
300		20	1414.3	7033.6		0.0030		21.17
350		20		9584.8		0.0017		16.10
400	50	20	4948	12528		0.0015		18.67
450	50	20	6283	12864				
500	50		7775					

Courbe de sondage Ngangou



SONDAGE ELECTRIQUE TYPE SCHLUMBERGER

Mission: ELS

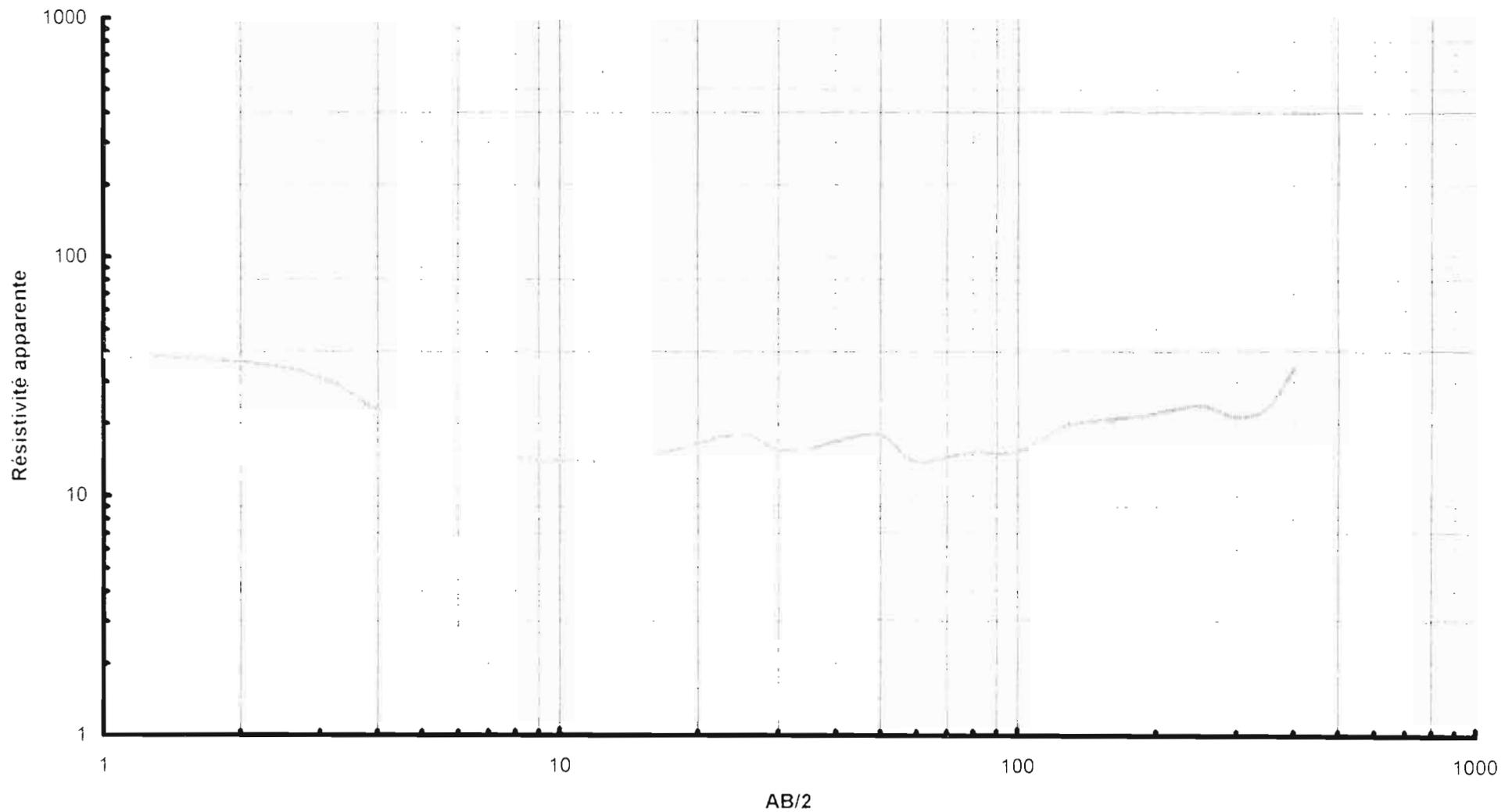
Sondage: Ngueth

Date: 30/01/03

Azimut: N 5°

AB/2(m)	MN/2(m)		K		V/I(ohm)		ρ apparente	
1	0.5		2.36		16.4000		38.70	
2	0.5		11.8		3.0600		36.11	
3	0.5		27.5		1.1280		31.02	
4	0.5		49.5		0.4580		22.67	
5	0.5		77.8		0.2400		18.67	
7	0.5	1	153	75.4	0.0979	0.2160	14.98	16.29
10	0.5	1	313	155	0.0441	0.0950	13.80	14.73
15	0.5	1	706	351	0.0203	0.0430	14.33	15.09
20	0.5	1		626		0.0262		16.40
25	0.5	1	188	980	0.0951	0.0180	17.88	17.64
30	0.5	1	274	1412	0.0564		15.45	
35	0.5		376		0.0414		15.57	
40	0.5		495		0.0338		16.73	
50	0.5		778		0.0230		17.89	
60	0.5		1123		0.0122		13.70	
80	0.5		2002		0.0075		15.02	
100	10	5	1554.3	3132.1	0.0097	0.0065	15.08	20.36
125	10	5	2435.4	4898.4	0.0078	0.0033	19.00	16.16
150	10	5	3516.8	7057.1	0.0058	0.0028	20.40	19.76
175	10		4792.4		0.0044		21.09	
200	10	20	6264.3	3108.6	0.0035	0.0089	21.93	27.67
250	10	20	9796.8	4874.8	0.0024	0.0051	23.51	24.86
300		20	14114.3	7033.6	0.0015		21.17	
350		20	19216.8	9584.8	0.0012	0.0031	23.06	29.71
400	50	20	4948	12528		0.0027		33.83
450	50	20	6283	12864				
500	50		7775					

courbe de sondage Ngueth



SONDAGE ELECTRIQUE TYPE SCHLUMBERGER

Mission: ELS

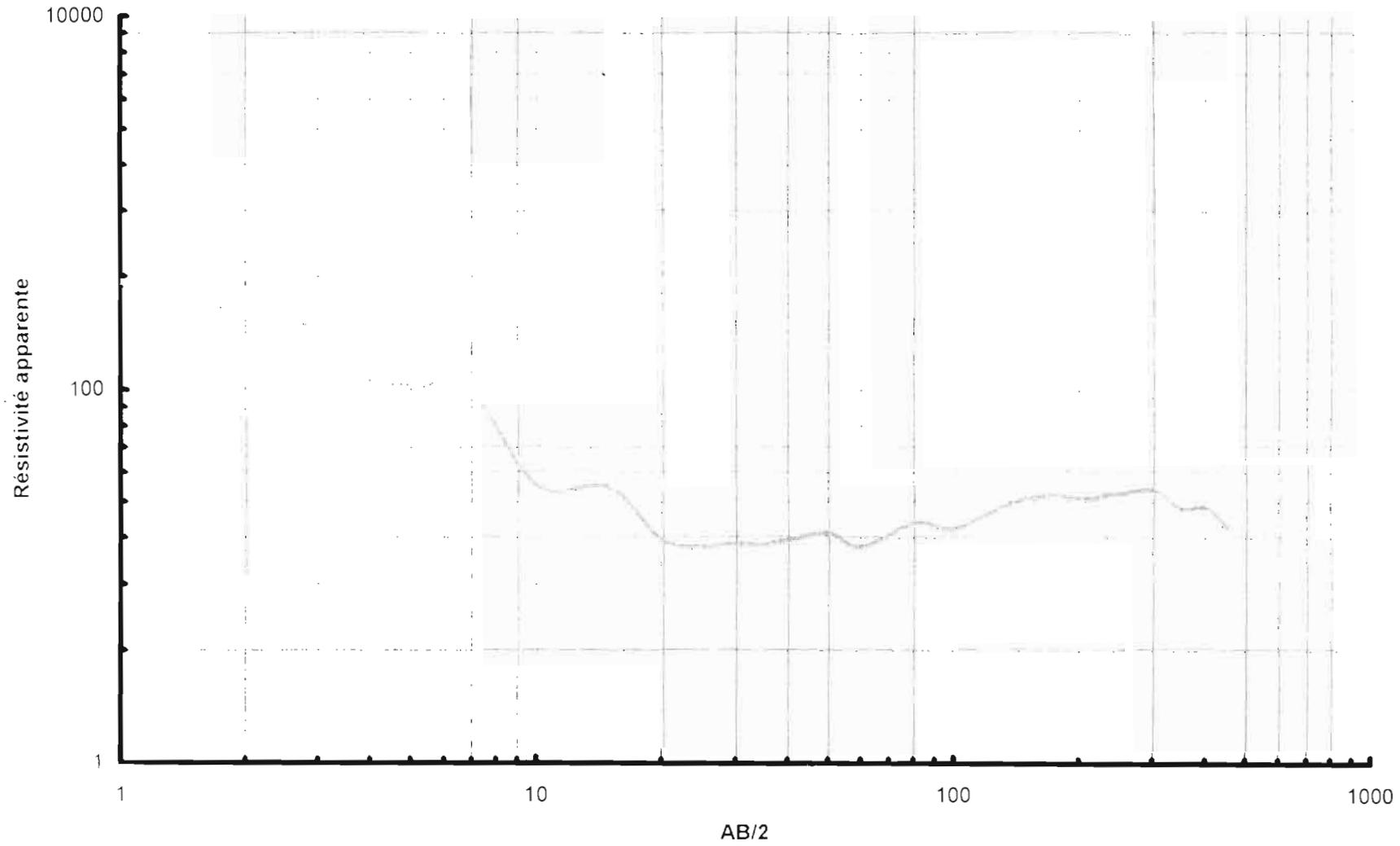
Sondage: Ballabougou

Date: 29/01/03

Azimut: N 5°

AB/2(m)	MN/2(m)		K		V/I(ohm)		ρ apparente	
1	0.5		2.36		158.20		373.35	
2	0.5		11.8		21.10		248.98	
3	0.5		27.5		7.42		204.05	
4	0.5		49.5		2.28		112.86	
5	0.5		77.8		1.3480		104.87	
7	0.5	1	153	75.4	0.6130	0.3710	93.79	27.97
10	0.5	1	313	155	0.0966	0.1260	30.24	19.53
15	0.5	1	706	351	0.0417	0.0477	29.44	16.74
20	0.5	1		626		0.0245		15.34
25	0.5	1	188	980	0.0755	0.0153	14.19	14.99
30	0.5	1	274	1412	0.0535		14.66	
35	0.5		376		0.0385		14.48	
40	0.5		495		0.0309		15.30	
50	0.5		778		0.0215		16.73	
60	0.5		1123		0.0125		14.04	
80	0.5		2002		0.0094		18.82	
100	10	5	1554.3	3132.1	0.0113	0.0058	17.56	18.17
125	10	5	2435.4	4898.4	0.0091		22.16	
150	10		3516.8		0.0073		25.67	
175	10		4792.4		0.0056		26.84	
200	10	20	6264.3	3108.6	0.0041		25.68	
250	10	20	9796.8	4874.8	0.0028	0.0058	27.43	28.32
300		20	1414.3	7033.6		0.0041		28.49
350		20		9584.8		0.0024		22.62
400	50	20	4948	12528		0.0018		22.80
450	50	20	6283	12864		0.0014		18.01
500	50		7775					

Courbe de sondage Ballabougou



SONDAGE ELECTRIQUE TYPE SCHLUMBERGER

Mission: ELS

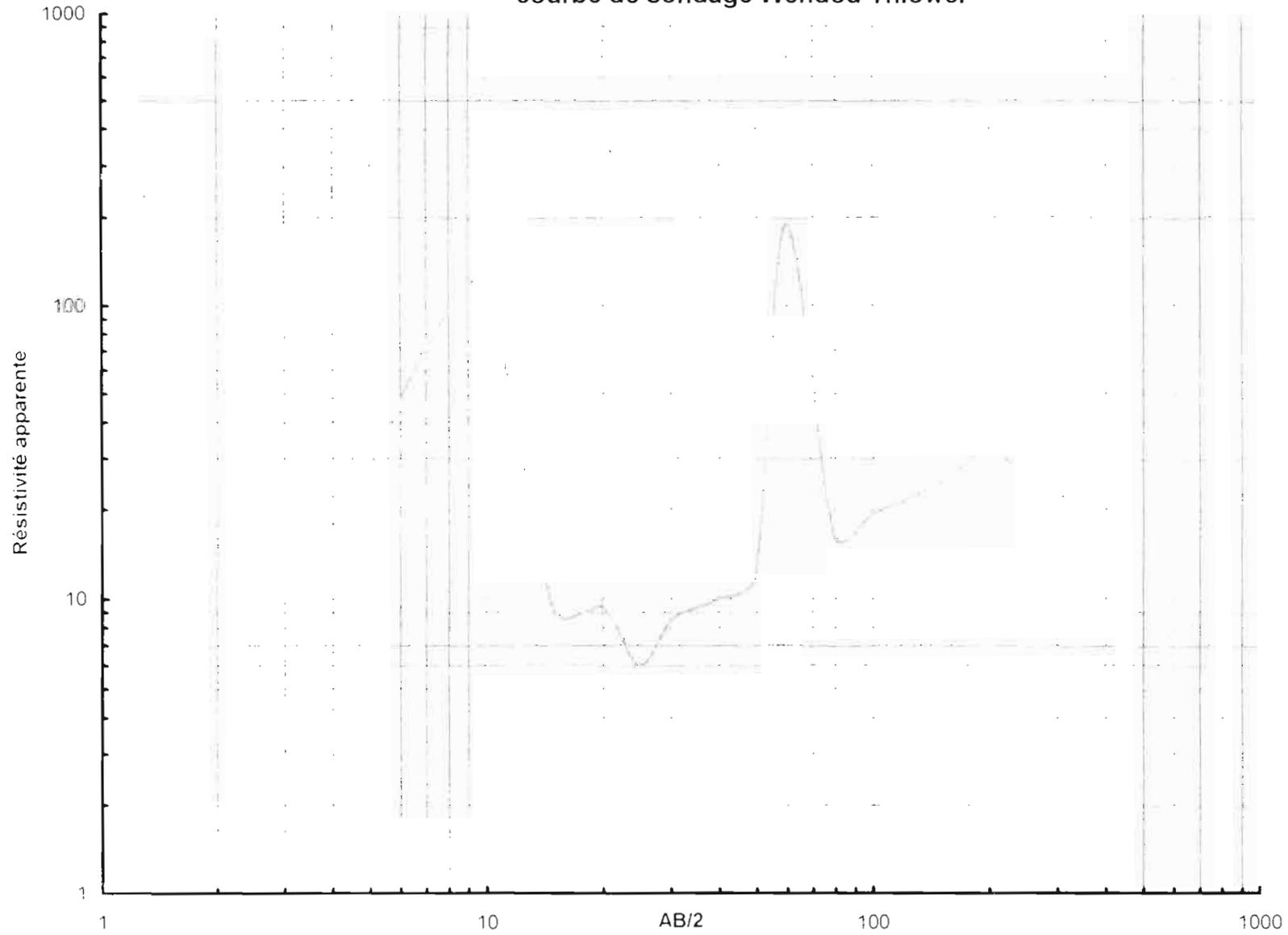
Sondage: Wendou Thiowel

Date: 30/01/03

Azimut: N170°

AB/2(m)	MN/2(m)		K		V/I(ohm)		ρ apparente	
1	0.5		2.36		117.200		276.59	
2	0.5		11.8		14.480		170.86	
3	0.5		27.5		2.950		81.13	
4	0.5		49.5		0.709		35.10	
5	0.5		77.8		0.362		28.16	
7	0.5	1	153	75.4	0.469	0.831	71.76	62.66
10	0.5	1	313	155	0.354	0.075	110.80	11.55
15	0.5	1	706	351	0.013	0.031	9.25	10.85
20	0.5	1		626		0.015		9.45
25	0.5	1	188	980	0.032	0.011	6.02	10.39
30	0.5	1	274	1412	0.031		8.41	
35	0.5		376		0.025		9.36	
40	0.5		495		0.020		10.00	
50	0.5		778		0.015		11.98	
60	0.5		1123		0.170		190.91	
80	0.5		2002		0.008		16.22	
100	10	5	1554.3	3132.1	0.013		19.43	
125	10	5	2435.4	4898.4	0.009		21.92	
150	10		3516.8		0.007		24.97	
175	10		4792.4		0.006		28.75	
200	10	20	6264.3	3108.6	0.006	0.007	34.45	20.52
250	10	20	9796.8	4874.8		0.005		25.84
300		20	14114.3	7033.6		0.003		22.51
350		20	19216.8	9584.8		0.002		20.13
400	50	20	4948	12528				
450	50	20	6283	12864				
500	50		7775					

courbe de sondage Wendou Thiowel



Annexe B

Résultats des analyses chimiques

**CAMPAGNE D'ECHANTILLONAGE D'EAU AU NIVEAU DES PUIITS DE L'ELS
DANS LA ZONE DE MBOUR ET ENVIRONS**

Date: 11 mai 2003

Localités	Longitude (°)	Latitude (°)	eau/margelle (m)	margelle (m)	Température (° C)	pH	Heure	Conductivité (µs/cm)
Malicounda Ngaridj	-16.992	14.485	13.33	0.83	26.50	5.6	08:54	793
Malicounda Keur Waly	-16.950	14.480	11.00	0.85	27.00	6.99	09:29	1285
Malicounda Sérère	-16.948	14.454	13.60	0.79	27.20	6.8	09:51	2550
Maison Pastorale Mbour	-16.950	14.428	12.21	0.80	28.10	7.15	10:12	5900
Carrière	-16.922	14.426	6.69	0.80	26.80	7.02	10:28	2990
Thiamène Peulh	-16.887	14.478	9.67	0.82	27.80	6.76	10:53	10720
Louly Mbaface 1	-16.859	14.449	12.13	0.88	28.80	6.7	11:28	323
Louly Mbaface 2	-16.860	14.436	9.57	0.68	29.60	7.54	11:50	1439
Louly Mbenténien	-16.870	14.430	7.70	0.81	28.80	7.21	11:58	2200
Louly Ndia	-16.826	14.442	9.63	0.98	31.80	7.02	12:18	2010
Sandiara 1	-16.796	14.435	13.80	0.91	29.90	6.8	12:41	496
Sandiara 2	-16.794	14.434	13.30	0.74	29.20	6.76	12:50	471
Sandiara 3	-16.793	14.438	13.30	0.80	30.00	6.27	13:00	348
Fayla	-16.774	14.433	14.14	0.86	29.50	7.74	13:13	589
Sessen	-16.756	14.429	5.15	0.84	28.80	7.3	13:25	637
Sessen Ecole	-16.747	14.430	21.76	0.62	28.10	7.86	13:39	1465
Diokhar 2	-16.773	14.397	37.87	0.87	29.80	7.59	14:09	952
Ndiouck Acod	-16.785	14.396	44.00	0.77	30.30	7.66	14:24	827
Djolofira Sérère	-16.804	14.368	28.43	0.84	29.80	7.56	14:42	2030
Ngangou 1	-16.789	14.346	19.60	0.87	29.20	7.59	14:59	1079
Ballabougou Thioinéka	-16.816	14.353	30.73	0.95	30.50	7.61	15:18	2280
Soussane	-16.820	14.380	56.63	0.83	31.50	7.52	15:33	1170
Bacombel	-16.838	14.383	41.22	0.92	29.80	7.8	15:51	1125
Windiboki	-16.849	14.367	34.10	0.78	29.20	7.43	16:05	4050
Sinthiane	-16.884	14.363	14.38	0.88	28.40	7.3	16:26	3040
Gagnabougou	-16.898	14.359	12.32	0.92	28.10	7.31	16:39	1746
Sintoukerta	-16.905	14.351	11.27	0.78	28.00	7.23	16:46	1848
Gandiole Eglise	-16.909	14.356	8.70	0.81	28.90	7.08	16:56	2970
Gandiole	-16.917	14.357	7.20	0.70	26.60	6.68	17:11	1839
Nianing Ecole	-16.930	14.344	5.80	0.78	26.70	7.35	17:32	4420

**CAMPAGNE D'ECHANTILLONAGE D'EAU AU NIVEAU DES PUIITS DE L'ELS
DANS LA ZONE DE MBOUR ET ENVIRONS**

Date: 12 mai 2003

Localités	Longitude (°)	Latitude (°)	Profondeur eau/margelle (m)	Hauteur margelle (m)	Température ° C	pH	Heure	Conductivité (µs/cm)
Ndiadian	-16.639	14.504	8.18	0.90	26.90	6.63	09:05	6450
Fissel Cissis	-16.602	14.534	8.02	0.80	27.00	6.95	09:20	3960
Cissis	-16.595	14.547	11.15	0.88	28.00	7.14	09:34	4570
Djiguiyam	-16.637	14.598	14.00	0.91	27.40	6.97	10:00	11040
Ngodjiléne Tattaguine	-16.624	14.429	5.46	0.94	28.60	6.11	10:43	1215
Tattaguine Escale	-16.616	14.422	4.49	1.21	27.50	6.07	10:53	388
Tattaguine Mbambara	-16.632	14.417	4.50	0.80	28.30	6.64	11:03	3310
Podome	-16.645	14.414	4.57	1.02	28.30	6.81	11:15	5250
Thiadiaye (ELS)	-16.705	14.419	7.02	0.87	30.40	7.42	11:45	626
Thiadiaye (école- église)	-16.708	14.416	5.36	1.08	29.10	6.5	12:09	806
Fomale	-16.728	14.399	5.10	0.95	28.80	6.23	12:27	192
Gorou	-16.739	14.373	25.52	0.83	28.40	8.08	12:42	1442
Ngoya Cob	-16.719	14.364	21.29	0.83	28.90	7.59	12:57	1400
Bacobof	-16.691	14.397	8.63	1.05	29.60	7.34	13:14	812
Mbassis	-16.687	14.377	24.31	0.93	24.31	7.53	13:25	1221
Mbassis Mbind Laamin	-16.689	14.373	27.39	0.82	30.30	7.82	13:36	1102
Khondiogne	-16.662	14.383	5.19	0.83	28.40	7.22	13:53	274
Ngoyé	-16.632	14.357	8.72	1.07	28.80	7.25	14:09	743
Ngoyé Centre	-16.626	14.353	8.19	0.92	29.10	7.45	14:20	414
Ngoyé Dispensaire	-16.628	14.352	9.10	0.66	29.90	7.36	14:33	1313
Bacamak	-16.673	14.353	23.34	0.83	28.80	7.78	14:55	1471
Sasse Pobane	-16.683	14.356	17.29	0.85	28.70	7.76	15:24	1774
Ndiafé	-16.686	14.344	13.45	0.88	28.30	7.2	15:35	3710
Nobandane 1	-16.703	14.328	21.93	0.85	30.50	7.87	15:53	1150
Mbéniar	-16.709	14.343	26.25	0.78	29.30	7.87	16:04	863
Fouambéniar	-16.716	14.339	19.81	0.86	28.70	7.46	16:13	838
Nobandane 2	-16.709	14.313	18.81	0.89	29.00	7.69	16:38	845
Foua	-16.730	14.303	23.17	0.88	28.10	7.68	16:56	1161
Nguéniéne	-16.773	14.286	7.28	0.87	27.90	7.39	17:18	937
Ngueth	-16.812	14.291	10.62	0.75	27.20	7.48	17:37	178

Tableau des résultats des analyses chimiques (mg/L)

N°	Localités	Longitude (°)	Latitude		HCO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
			(°)	(°)						
1	Malicounda Ngaridj	-16.992	14.485	82.35	0.32	76.9		21.55	18.24	
2	Malicounda Keur Waly	-16.950	14.480	259.25	0.28	236.08	0.86	32.01	36.73	
3	Malicounda Sérère	-16.948	14.454	198.25	0.38	629.76	3.24	100.54	53.13	
4	Maison Pastorale Mbour	-16.950	14.428	350.75	0.38	1013.45	11.38	34.06	165.45	
5	Carrière	-16.922	14.426	335.5	0.18	730.4	4.57	19.74	90.56	
6	Thiamène Peulh	-16.887	14.478	350.75	10.91	3486.01	11.64	50.33	289.07	
7	Louly Mbafaye 1	-16.859	14.449	103.7	1.78	23.77		73.88	6.19	
8	Louly Mbafaye 2	-16.860	14.436	686.25	8.49	104.19		27.41	33.17	
9	Louly Mbenténien	-16.870	14.430	640.5	1.07	336.85	1.12		36.48	
10	Louly Ndia	-16.826	14.442	640.5	1.95	236.06		77.29	88.69	
11	Sandiara 1	-16.796	14.435	228.75	4.19	18.89		7.61	5.68	
12	Sandiara 2	-16.794	14.434	237.9	0.29	22.67		32.15	5.29	
13	Sandiara 3	-16.793	14.438	106.75	1.89	31.91		38.16	2.48	
14	Fayla	-16.774	14.433	183	1.79	50.33		52.11	12.51	
15	Sessen	-16.756	14.429	168.25	0.46	86.5		37.29	26.25	
16	Sessen Ecole	-16.747	14.430	442.25	6.49	248.91	0.87	3.77	53.84	
17	Diokhar 2	-16.773	14.397	332.45	8.95	28.93			7.68	
18	Ndiouck Acod	-16.785	14.396	533.75	8.4	25.86		2.61	12.41	
19	Djolofira Sérère	-16.804	14.368	549	9.52	251.87	0.89	9.75	44.71	
20	Ngangou 1	-16.789	14.346	427	7.6	171.6		2.02	36.93	
21	Ballabougou Thioineka	-16.816	14.353	497.15	9.41	455.18	1.25	10.55	74.09	
22	Soussane	-16.820	14.380	549	10.06	46.58		2.43	113.21	
23	Bacombel	-16.838	14.383	549	7.62	71.25		1.88	15.25	
24	Windiboki	-16.849	14.367	472.75	2.15	927.64	5.46	72.44	21.49	
25	Sinthiane	-16.884	14.363	640.5	2.47	675.42	2.21	10.24	35.68	
26	Gagnabougou	-16.898	14.359	503.25	0.74	275.07	0.98	20.84	19.28	
27	Sintoukerta	-16.905	14.351	381.25	0.61	330.79	1.16	13.61	22.49	
28	Gandiole Eglise	-16.909	14.356	289.75	0.87	613.02	3.1	29.15	22.62	
29	Gandiole	-16.917	14.357	506	2.9	334.35	0.97	4.6	16.26	
30	Nianing Ecole	-16.930	14.344	320.25	4.69	1367.05	3.52		60.66	

31	Ndiadian	-16.639	14.504	533.75	2.63	1493.93	9.96	37.03	162.85
32	Fissel Cissis	-16.602	14.534	298.9	4.78	810.01	3.05	20.52	117.2
33	Cissis	-16.595	14.547	469.7	5.02	707.56	3.39	41.62	208.03
34	Djiguiyam	-16.637	14.598	393.45	6.39	3212.86	9.63	59.44	467.72
35	Ngodjiléne Tattaguine	-16.624	14.429	301.95	2.85	132.17			67.38
36	Tattaguine Escale	-16.616	14.422	112.85	3.21	54.8		17.06	8.23
37	Tattaguine Mbambara	-16.632	14.417	320.25	2.89	825.49	3.35	14.1	176.32
38	Podome	-16.645	14.414	283.65	4.02	1382.04	4.32	79.72	439.43
39	Thiadiaye (ELS)	-16.705	14.419	192.15	2.04	28.85		29.55	52.69
40	Thiadiaye (école- église)	-16.708	14.416	76.25	1.89	192.35		97.76	7.01
41	Fomale	-16.728	14.399	33.55	1.09	16.58		54.2	4.06
42	Gorou	-16.739	14.373	594.75	3.28	112.18		8.29	13.03
43	Ngoya Cob	-16.719	14.364	640.5	7.56	111.84		5.28	17.64
44	Bacobof	-16.691	14.397	326.35	1.45	57.62		68.87	8.97
45	Mbassis	-16.687	14.377	536.8	6.46	95.06		6.46	25.73
46	Mbassis Mbind Laamin	-16.689	14.373	350.75	8.01	125.72		15.58	74.2
47	Khondiogne	-16.662	14.383	106.75	1.86	22.62		15.93	12.39
48	Ngoyé	-16.632	14.357	259.25	3.58	51.83		22.35	8.14
49	Ngoyé Centre	-16.626	14.353	167.75	3.97	9.33		41.32	12.19
50	Ngoyé Dispensaire	-16.628	14.352	311.1	3.11	100.58		200.14	14.3
51	Bacamak	-16.673	14.353	512.4	3.97	161.16		7.83	20.39
52	Sasse Pobane	-16.683	14.356	610	8.6	222.61	1.72	10.44	46.4
53	Ndiafé	-16.686	14.344	915	9.16	796.33	3.12	19.95	91.01
54	Nobandane 1	-16.703	14.328	497.15	9.46	52.56		5	18.06
55	Mbéniar	-16.709	14.343	381.25	4.96	27.64		5.77	10.76
56	Fouambéniar	-16.716	14.339	442.25	9.59	24.79		5.17	7.12
57	Nobandane 2	-16.709	14.313	366	8.76	27.19		5.43	12.23
58	Foua	-16.730	14.303	396.5	6.36	118.74		6.28	62.97
59	Nguéniéne	-16.773	14.286	387.3	2.09	53.92		24.35	8.39
60	Ngueth	-16.812	14.291	350.75	0.89	42.6		32.01	7.07

N°	Localités	Longitude (°)	Latitude		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	min glob
			(°)	(°)					
1	Malicounda Ngaridj	-16.992	14.485	44.53	2.65	12.25	33.77	292.56	
2	Malicounda Keur Waly	-16.950	14.480	147.72	10.03	10.25	112.06	845.27	
3	Malicounda Sérère	-16.948	14.454	249.8	10.84	25.97	177.57	1449.48	
4	Maison Pastorale Mbour	-16.950	14.428	661.23	21.95	80.99	170.06	2509.7	
5	Carrière	-16.922	14.426	393.72	3.76	12.53	183.55	1774.51	
6	Thiamène Peulh	-16.887	14.478	1571.83	20.16	169.63	692.29	6652.62	
7	Louly Mbafaye 1	-16.859	14.449	24.27	5.38	5.98	41.64	286.59	
8	Louly Mbafaye 2	-16.860	14.436	241.15	12.36	40.9	68.09	1222.01	
9	Louly Mbenténien	-16.870	14.430	182.32	8.13	52.13	212.31	1470.91	
10	Louly Ndia	-16.826	14.442	172.72	4.41	84.49	143.34	1449.45	
11	Sandiarra 1	-16.796	14.435	18.29	1.11	20.85	29.53	334.9	
12	Sandiarra 2	-16.794	14.434	22.23	1.39	24.06	57.92	403.9	
13	Sandiarra 3	-16.793	14.438	19.91	2.04	5.82	37.1	246.06	
14	Fayla	-16.774	14.433	35.27	1.72	6.83	75.25	418.81	
15	Sessen	-16.756	14.429	51.79	1.47	5.83	53.91	431.75	
16	Sessen Ecole	-16.747	14.430	162.13	7.4	70.62	84.66	1080.94	
17	Diokhar 2	-16.773	14.397	31.05	1.86	41.92	36.11	488.95	
18	Ndiouck Acod	-16.785	14.396	53.1	2.7	84.77	54.13	777.73	
19	Djolofira Sérère	-16.804	14.368	206.71	5.58	82.62	50.71	1211.36	
20	Ngangou 1	-16.789	14.346	80.62	2.72	65.07	69.71	863.27	
21	Ballabougou Thioineka	-16.816	14.353	253.44	7.51	116.48	58.01	1483.07	
22	Soussane	-16.820	14.380	64.82	7.29	110.58	68.89	972.86	
23	Bacombel	-16.838	14.383	89.07	3.41	58.93	35.36	831.77	
24	Windiboki	-16.849	14.367	383.13	13.47	110.86	129.42	2138.81	
25	Sinthiane	-16.884	14.363	304.4	4.75	43.71	314.01	2033.39	
26	Gagnabougou	-16.898	14.359	136.63	3.88	23.28	218.79	1202.74	
27	Sintoukerta	-16.905	14.351	160.25	3.52	19.37	208.7	1141.75	
28	Gandiole Eglise	-16.909	14.356	184.93	6.85	20.48	287.74	1458.51	
29	Gandiole	-16.917	14.357	171.61	3.87	21.26	218.6	1280.42	
30	Nianing Ecole	-16.930	14.344	524.72	9.03	97.75	306.16	2693.83	
31	Ndiadian	-16.639	14.504	581.71	13.79	118.31	527.75	3481.71	
32	Fissel Cissis	-16.602	14.534	405.25	8.91	35.74	272.45	1976.81	
33	Cissis	-16.595	14.547	431.56	15.44	66.93	209.47	2158.72	

34	Djiguiyam	-16.637	14.598	1501	22.42	269.87	726.98	6669.76
35	Ngodjiène Tattaguine	-16.624	14.429	95.53	4.28	14.74	103.87	722.77
36	Tattaguine Escale	-16.616	14.422	28.84	3.07	8.5	48.51	285.07
37	Tattaguine Mbambara	-16.632	14.417	469.7	7.91	51.6	227.71	2099.32
38	Podome	-16.645	14.414	796.81	7.95	73.17	353.47	3424.58
39	Thiadiaye (E.L.S)	-16.705	14.419	34.92	2.89	5.28	60.66	409.03
40	Thiadiaye (école- église)	-16.708	14.416	134.93	1.75	6.84	26.72	545.5
41	Fomale	-16.728	14.399	10.19	2.8	4.15	21.93	148.55
42	Gorou	-16.739	14.373	128.28	1.88	69.72	64.4	995.81
43	Ngoya Cob	-16.719	14.364	108.63	2.92	56.98	82.31	1033.66
44	Bacobof	-16.691	14.397	30.33	1.64	16.3	96.69	608.22
45	Mbassis	-16.687	14.377	118.96	4.33	58.96	29.36	882.12
46	Mbassis Mbind Laamin	-16.689	14.373	70.53	2.81	62.23	45.72	755.55
47	Khondiogne	-16.662	14.383	16.81	1.53	5.23	34.65	217.77
48	Ngoyé	-16.632	14.357	51.89	4.85	14	39.65	455.54
49	Ngoyé Centre	-16.626	14.353	16.55	6.45	8.44	46.54	312.54
50	Ngoyé Dispensaire	-16.628	14.352	96.73	1.75	11.44	102.95	842.1
51	Bacamak	-16.673	14.353	143.47	4.24	72.29	56.96	982.71
52	Sasse Pobane	-16.683	14.356	200.86	8.35	72.65	44.71	1226.34
53	Nciaté	-16.686	14.344	436.56	11.64	235.38	106.89	2625.04
54	Nobandane 1	-16.703	14.328	96.61	1.98	44.26	27.25	752.33
55	Mbeniar	-16.709	14.343	46.82	2.71	53.41	34.96	568.28
56	Fouambéniar	-16.716	14.339	39.17	2.91	41.72	81.97	654.69
57	Nobandane 2	-16.709	14.313	31.56	2.52	37.2	45	535.89
58	Foua	-16.730	14.303	105.21	5.72	48.54	43.85	794.17
59	Nguéniène	-16.773	14.286	46.14	2.33	20.4	109.93	654.85
60	Ngueh	-16.812	14.291	41.17	2.65	16.62	73.35	567.11

Annexe C

Tableaux sur les normes de potabilité de l'eau

Facteurs toxiques

Paramètre	Unité	Maximum recommandé ISN	Maximum admissible ISN	Valeurs indicatives OMS	Valeurs proposées
<i>Fluorures</i>	F(mg/l)	0.6	0.8	1.5	2
<i>Mercurure</i>	Hg (mg/l)	-	0.001	0.001	0.001
<i>Plomb</i>	Pb (mg/l)	-	0.05	0.01	0.01
<i>Sélénium</i>	Se (mg/l)	-	0.01	0.01	0.01

Facteurs indésirables

Paramètre	Unité	Maximum recommandé ISN	Maximum admissible ISN	Valeurs indicatives OMS	Valeurs proposées
<i>Fer</i>	Fe (mg/l)	-	0.3	0.3	0.3
<i>Manganèse</i>	Mn (mg/l)	-	0.1	0.5	0.5
<i>Zinc</i>	Zn (mg/l)	-	5	3	3

Facteurs toxiques

Paramètre	Unité	Maximum recommandé ISN	Maximum admissible ISN	Valeurs indicatives OMS	Valeurs proposées
<i>Fluorures</i>	F(mg/l)	0.6	0.8	1.5	2
<i>Mercuré</i>	Hg (mg/l)	-	0.001	0.001	0.001
<i>Plomb</i>	Pb (mg/l)	-	0.05	0.01	0.01
<i>Sélénium</i>	Se (mg/l)	-	0.01	0.01	0.01

Facteurs indésirables

Paramètre	Unité	Maximum recommandé ISN	Maximum admissible ISN	Valeurs indicatives OMS	Valeurs proposées
<i>Fer</i>	Fe (mg/l)	-	0.3	0.3	0.3
<i>Manganése</i>	Mn (mg/l)	-	0.1	0.5	0.5
<i>Zinc</i>	Zn (mg/l)	-	5	3	3