UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

D.E.A. DE GEOLOGIE APPLIQUEE

MENTION: HYDROGEOLOGIE

L'AQUIFERE DES SABLES QUATERNAIRES AU NORD DE LA PRESQU'ILE DU CAP-VERT (SENEGAL): MORPHOLOGIE DEDUITE DES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES ET GEOPHYSIQUES (SONDAGES ELECTRIQUES). ANALYSE DE LA VULNERABILITE DE LA NAPPE A L'INVASION SALINE DANS LA ZONE DE PIKINE

présenté par

Raymond GOMIS

le 30 Novembre 1996 devant le jury

MM	**A. LY**	Président	(U.C.A.D. Dakar)
	M. DESCLOITRES	Rapporteur	(ORSTOM)
	C.B. GAYE	Examinateur	(U.C.A.D. Dakar)
	P. MOURGUES	Examinateur	(ORSTOM)
	A. FAYE	Examinateur	(U.C.A.D. Dakar)

DEDICACES

Je rends grâce à

DIEU LE PERE TOUT- PUISSANT

et dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon père Jean- Pierre Fara NAMPA PKEUNG GOMIS

A ma mère Maria ROUNANIMBA BASSE

A mes défunts oncles Fara SOUSSOU GOMIS
Laurent KREOUTIAYE GOMIS
Lys KTSIROUI GOMIS

A la mémoire de mes parents adoptifs :
- Lys BRONGOU GOMIS
- Diokine PANTSIME GOMIS

A mes mamans Nenette TUNKO BASSE
Solinda OUPEULY GKANIA MENDY
Marie TAPAR MENDY
Gisèle MENDY

A mon oncle Antoine DIENE et ma tante Hélène SAMB :
Je vous suis reconnaissant toute ma vie pour ce que vous avez fait pour moi. Je suis conscient que vous avez beaucoup contribué en bien dans mon éducation et ceci pendant une phase vraiment importante de mon existence. Dieu vous bénisse!

A mes chères épouses, les femmes de PBOUKA BATCHABOU particulièrement, mes très chères , Marie PATRON MENDY, Agathe SYLVA, Bonnasser MENDY et Rosette GOMIS.

A mes frères et soeurs de PBOUKA BATCHABOU
A mes amies et amis du groupe GUNEY NJAREME
Ames frères et soeurs de la maison du regretté PAPA DIOKINE
A mon ami et frère Mathurin Paul René DIATTA,
A mes amis du quartier et de l'A.S.C. NJAREME particulièrement Djibril KAMARA
A mes amis de l'ex cité universitaire Boubacar CAMARA, particulièrement Blaise Galaye MBAYE, feu Mamadou SALL, Simon NDIAYE, Adama DIAGNE et Kéba THIAM, Korka TOURE, Astou GAYE, Kiné DIA.

AVANT - PROPOS

Avant de présenter ce mémoire qui constitue avant tout un essai d'application des méthodes de travail et de recherche reçues au cours de notre formation, je voudrais remercier tous ceux qui de près ou de loin m'ont apporter leurs soutien tout au long de mes études.

Qu'il me soit permis d'exprimer ici ma reconnaissance à tous ceux qui par leur savoir, par leur attention et par leur amitié m'ont aidé dans ce travail.

Je remercie Monsieur A. LY, Maître de Conférences, chef du département de Géologie qui a accepté de présider le jury.

Je remercie Monsieur C.B. GAYE, Maître de Conférence, responsable du troisième cycle de géologie appliquée mention hydrogéologie. Les enseignements reçus m'ont permis de parfaire ma formation théorique en hydrogéologie

Je remercie Monsieur M. DESCLOITRES, Ingénieur Géophysicien à l'ORSTOM. J'ai beaucoup appris à ses côtés particulièrement la critique scientifique, l'informatique.

Je remercie Monsieur P. MOURGUES, Directeur de Recherches à l'ORSTOM de nous avoir initié à la géophysique. Par sa disponibilité et ses critiques, il a beaucoup contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie Monsieur le Dr. A. FAYE du Département de Géologie de m'avoir initié à l'informatique. Par sa clairvoyance, sa disponibilité et la qualité de ses conseils, il a contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie Monsieur le Dr. R. SARR du département de Géologie qui a accepté de corriger la partie géologique de ce travail ainsi que les coupes géologiques

Je remercie également Messieurs M. RITZ, J. VASSAL et M. DUKHAN au département de Géophysique de l'ORSTOM d'avoir mis à ma disposition toutes les conditions favorables de travail au laboratoire.

Je remercie mes collègues et aînés M. F- K. NIANG et S. DIOUF de leur disponibilité et de leur soutien constant.

Je remercie également J. TCHANI, BODIAN et B. DIOP et qui m'ont aidé dans l'acquisition de données.

Je remercie Monsieur B. DIAKHATE de la S.D.E. (ex SONEES) de sa disponibilité et de nous avoir fait bénéficier de sa compétence sur l'hydrogéologie de la presqu'île du Cap-Vert.

Je remercie également le personnel du B.I.R.H. du Ministère de l'Hydraulique pour la documentation qu'ils ont mis à notre disposition. Il s'agit principalement de: Mesdames FALL, M. CORREA et Messieurs M. SARR, M. DIATTA, NGOM, BOISSY.

Résumé

Dans la continuité du projet gestion des nappes des niayes initié par le département de géologie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, en collaboration avec le laboratoire de géophysique de l'ORSTOM, une application de la méthode géophysique électrique à l'étude de la nappe phréatique des sables quaternaires de Thiaroye à Mboro a été entreprise.

La première partie de cette étude concerne la géométrie du réservoir. L'analyse et la compilation des données de sondages géophysiques (plus de 200), associée aux données des sondages mécaniques (87 forages et 45 piézomètres), ont permis la construction de 3 cartes structurales de l'aquifère:

1. carte des isohypses du mur de l'aquifère
2. carte de l'épaisseur de la nappe
3. carte des résistivités des sables contenant de l'eau douce.

Ces cartes montrent l'intérêt de l'association de plusieurs méthodes d'étude pour caractériser la géométrie des aquifères.

L'épaisseur de l'aquifère dépend de la morphologie de son substratum: celui-ci s'enfonce du sud-est vers le nord-est en direction de l'océan entraînant ainsi une augmentation de la puissance de l'aquifère dans le même sens. Cet aquifère est rendu vulnérable par la présence du biseau salé, que ce soit en bordure de côte ou à proximité des lacs salés.

La deuxième partie de cette étude concerne un secteur particulier de cet aquifère qui semble vulnérable à l'invasion salée proche de la ville de Dakar: le secteur de Pikine-Thiaroye.

Une campagne de prospection géophysique de 15 sondages électriques et des mesures de la conductivité des eaux superficielles a été entreprise. L'interprétation, en utilisant la loi d'Archie, permet de construire la structure géoélectrique du secteur en donnant des estimations de la porosité de la nappe et en caractérisant clairement le biseau salé. Les résultats conduisent à proposer la carte des isohypses du toit du biseau salé dans ce secteur. Cette étude a permis de prouver que la réalisation d'une étude géophysique est possible en milieu urbain moyennant quelques contraintes. Associée à d'autres méthodes, la géophysique (sondages électriques) devrait être un outil important pour de futur projets d'étude des aquifères à caractère environnemental dans l'agglomération de Dakar.

Mots clefs: Sénégal, géophysique, hydrogéologie, presqu'île du Cap-Vert, aquifères, sondages électriques, invasion saline, sables quaternaires, niayes, résistivité, loi d'Archie.

SOMMAIRE

. Page

DEDICACES....I

AVANT- PROPOS....III

RESUME....IV

LISTE DES SYMBOLES....VIII

LISTE DES FIGURES....IX

LISTE DES TABLEAUX ET ANNEXES....XI

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE....4

1.1 - Morphologie....4

1.2 - Géologie....7

1.2.1 - Stratigraphie....8

1.2.2 - Paléogéographie....10

1.2.3 - Structure....11

1.2.4 - Volcanisme....12

CHAPITRE 2 : HYDROGEOLOGIE....14

2.1 - Structure de l'aquifère....14

2.2 - Paramètres hydrodynamiques....6

2.3 - Alimentation....7

2.4 - Exhaure....17

2.5 - Piézométrie....18

2.5.1 - Données piézomètriques....18

2.5.2 - Analyse de la piézométrie....19

a) Nappe des sables quaternaires....19

b) Nappe du littoral nord....23

c) Evolution de la piézométrie dans le secteur de Thiaroye....23

CHAPITRE 3 : ETUDE DE LA GEOMETRIE DE L'AQUIFERE DES SABLES QUATERNAIRES DE THIAROYE A MBORO 27

A- DONNEES DE SONDAGES MECANIQUES ET GEOPHYSIQUES 28

3.1 -Données de forages 27

3.2 - Données des études géophysiques antérieures 37

3.2.1- Secteur Ouest. (de Thiaroye à Kayar) 40

3.2.2 - Secteur Centre (Tamna et ses environs) 42

3.2.3 - Secteur Est 42

3.2.4 - L'invasion salines dans les secteurs centre et Est 45

3.3 - Etude électrique de la zone côtière de Naïlou à Diamdièk 45

3.3.1 - Description des sondages électriques 46

3.3.2 - Résultats et discussion 48

3.4 - Comparaison des échelles de résistivité des différentes études 50

B - SYNTHESE DES DONNEES DE SONDAGES MECANIQUES ET GEOPHYSIQUES: CARACTERISATION DE LA GEOMETRIE DU RESERVOIR 51

3.5 - Carte des isohypses du mur de l'aquifère 53

3.5 - Carte des épaisseurs de l'aquifère 55

3.6 - Carte des résistivités des sables à eau douce 55

CHAPITRE 4 - ETUDE PAR PROSPECTION ELECTRIQUE DE LA NAPPE DES SABLES QUATERNAIRES DANS LE SECTEUR DE PIKINE -THIAROYE 60

4.1 -Acquisition de données 62

4.1.1 - Contrainte techniques et urbaines 62

4.1.2 - Situation des sondages électriques 62

4.2 - Résultats et interprétation des mesures électriques 62

4.2.1 - Les cartes d'isorésistivités apparentes 62

4.2.2 - Les sondages électriques: types de courbes et modèles 64

4.2.3 - Coupes interprétatives géoélectriques 68

4.3 - Application de la loi d'Archie 72

4.3.1 - La loi d'Archie 72

4.3.2 - Méthode 73

4.3.3 - Porosité des sables et des argiles....74
4.3.4 - Résultats et interprétation....74
a) La côte sud....74
b) La côte nord....75
c) La grande niaye....76
d) Le secteur de Thiaroye....77
e) L'eau de la nappe....77
4.4 - Discussion des résultats....78

CONCLUSION....83

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES....86

ANNEXES....91
I - Données pluviométriques
II- Données piézométriques
III- Présentation de la méthode électrique
IV - Courbes de sondages électriques et coordonnées

LISTE DES SYMBOLES

B.I.R.H.	Bureau de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques
B.R.G.M.	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
C.G.G.	Compagnie Générale de Géophysique
C.P.G.F.	Compagnie de prospection géophysique française
O.M.S.	Organisation Mondiale de la Santé
ORSTOM	Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération
PISE	Programme d'Interprétation de Sondages Electriques
S.E.	Sondage Electrique
S.I.P.S.	Société Industrielle de Papeterie au Sénégal
S.O.N.E.E.S.	Société Nationale d'Exploitation des Eaux du Sénégal. Nom actuel : S.D.E. (Société Des Eaux)
U.C.A.D.	Université Cheikh Anta Diop

LISTE DES FIGURES

1) Situation du secteur d'étude.

2.a) Répartition mensuelle de la pluviométrie annuelle.

2.b) Variation interannuelle de la pluviométrie.

3) Esquisse géomorphologique du secteur d'étude.

4)). Coupe schématique des systèmes dunaires avec les niayes (Atlas national du Sénégal)

5) Coupe schématique du bassin sédimentaire Sénégalo-mauritanien au parallèle de Dakar (Spengler *et al*, 1966)

6) Corrélations stratigraphiques à partir de coupes de sondages profonds réalisés dans la zone d'étude

7) Les formations quaternaires de la presqu'île du Cap-Vert (Hebrard, 1966; in Martin, 1970).).

8) Le réseau de failles sub-méridiennes à N20° de la presqu'île du Cap-Vert (Bellion, 1987)

9) Localisation des principaux affleurements volcaniques de la péninsule du Cap-Vert (Crevola *et al*, 1994)

10a et 10b) Coupes hydrogéologiques schématiques de la nappe des sables quaternaires montrant la nappe salée des lagunes (Martin, 1970).

11a) Carte piézométrique de la nappe des sables quaternaires. Août 1994.

11 bis) Carte de la piézométrie inférieure à 2m. Août 1994.

12) Logs de forages et types d'aquifères des sables.

13) Piézométrie de la nappe du littoral nord limitée à notre secteur d'étude. Octobre 1989.

14) Evolution de la piézométrie de la nappe des sables quaternaires dans le secteur de Thiaroye.

15) Profils piézométriques de la nappe.

16) Carte de situation des forages et piézomètres

17) .Coupes géologiques (I, II, III, IV, V et VI).

18) Carte de localisation des études géophysiques (Tchani et Gomis, 1994).

19) Carte de synthèse des résultats de la C.G.G en 1945.

20) Coupes géoélectriques dans le secteur du lac Tanma (B.R.G.M., 1987)

21) Coupes géoélectriques dans le secteur de Mboro (B.R.G.M.,1987)

22) Coupe géoélectrique interprétative du secteur de Naïlou-Diamdièk

23) Echelle de résistivités des formations du secteur selon les différentes études.

24) Carte des isohypses du mur de l'aquifère des sables.

25) Le réseau hydrographique quaternaire (Martin, 1970).

26) Carte des épaisseurs de l'aquifère des sables quaternaires (Tchani et Gomis,1995).

27) Carte des résistivités des sables à eau douce (Tchani et Gomis,1995).

27b) Coupe hydrogéologique de la nappe de Thiaroye (Martin, 1970).

28) Situation des sondages électriques dans le secteur de Pikine-Tiaroye

29a) Carte des résistivités apparentes en AB de 60m.

29b) Carte des résistivités apparentes en AB de 200m.

30) Types de diagramme de sondage électriques (a, b c, d, et e).

31) Coupes géoélectriques Nord -- Sud (a, b, c)

32) Coupes géoélectriques Ouest- Est (a, b, c)

33) Interprétation hydrogéologique de la coupe géoélectrique 31b.

34) Carte des altitudes de la base salée de l'aquifère.

35) «Evolution» des chlorures dans la nappe (1993-1994).

36) «Evolution de la conductivité de la nappe(1993-1994).

37) Carte des isochlores de la nappe (B.R.G.M., 1967).

38) Carte des isochlores de la nappe (Gaye et al, 1986).

39) Profils piézométriques et du toit du substratum

LISTE DES TABLEAUX

1) Production des forages (en m^3/j) alimentant Dakar depuis 1926 (Bâ-Niang *et al*, 1993)

2) Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère des sables quaternaires d'après des essai de pompages (O.M.S., 1972).

3) Prélèvement des forages de la S.O.N.E.E.S en m^3 dans le secteur d'étude.

4) Répertoire des études géophysiques appliquées à l'hydrogéologie de la nappe des sables

5) Résistivités des formations de la presqu'île du Cap-Vert (Breusse, 1952).

6) Conductivités de la nappe mesurées dans les sites des sondages electriques.

7) Porosités des sables, des argiles et des vases récents selon différents auteurs.

8) Résultats de l'application de la loi d'Archie pour les sondages de la côte sud.

9) Résultats de l'application de la loi d'Archie pour les sondages de la côte nord.

10) Résultats de l'application de la loi d'Archie pour les sondages de la grande niaye.

11) Résultats de l'application de la loi d'Archie pour les sondages du secteur de Thiaroye.

12) Résistivités de l'eau de la nappe déduite de l'application de la loi d'Archie.

FIGURES EN ANNEXE

1 - Electrode ponctuelle d'envoi de courant continu.

2 -Répartition des équipotentielles et des lignes de courant à la surface d'un terrain homogène suivant tous les plans passant par AB.

3 - Différence de potentiel ΔV entre MN pour un dispositif quadripôle quelconque.

4 - La profondeur d'investigation augmente avec la distance AB.

5 - Dispositif Schlumberger.

6 - Effet des à- coup de prises sur des sondages électriques effectués avec un dispositif Wenner et un dispositif Schlumberger.

7 - Résistivimètre ABEM Terrameter SAS 5000 avec le Booster.

8 - Courbes de sondages électriques

INTRODUCTION

Petite bourgade de quelques milliers d'habitants au début du siècle, Dakar la capitale du Sénégal, n'a cessé de s'accroître et sa population est de 1.499.690 habitants en 1988 (Bâ-Niang *et al*, 1993). Cette croissance démographique s'est traduite par une augmentation rapide des besoins en eau de la ville et de l'ensemble de la presqu'île du Cap-Vert (cf. tableau 1).

En l'absence d'eau douce de surface permanente dans la région ou à proximité, la quasi-totalité des aquifères de la presqu'île sont maintenant soumises à l'exploitation et il convient de gérer au mieux les ressources en eau actuellement disponibles car leur substitution ne pourrait se faire qu'au prix d'investissements et de frais de fonctionnement très importants (construction de canalisations, forages lointains, etc...).

Une bonne gestion des ressources en eau souterraine exige une bonne connaissance des aquifères qui doit aboutir à la création de modèles de gestion. Ceci nécessite la connaissance de paramètres hydrogéologiques tels que la porosité, la conductivité hydraulique, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement, mais aussi la géométrie des réservoirs.

Ce travail qui porte sur la nappe phréatique des sables quaternaires de la presqu'île du Cap-Vert, de Pikine jusqu'à Mboro présente un double objectif :

- déterminer la géométrie et des limites de cet aquifère côtier (nature et morphologie du mur de la nappe, toit et épaisseur de la nappe) ;

- étudier par la méthode électrique un secteur qui paraît vulnérable à l'invasion saline, celui de Pikine-Tiaroye, en évaluant la résistivité des eaux de la nappe, la position du biseau salé, et la porosité des sables.

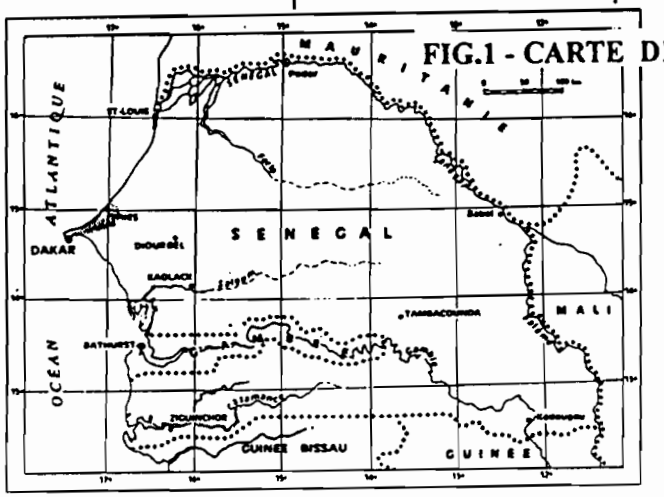
Ce secteur (col de la presqu'île) est important car il est situé entre le centre de captage de la nappe infrabasaltique et celui de Thiaroye.

Nous utiliserons à cet effet les données de sondages mécaniques (forages et piézomètres) et de sondages électriques. Ces derniers permettent de caractériser les terrains par leurs résistivités électriques, surtout les niveaux envahis d'eau salée.

La détermination de la géométrie de l'aquifère sera basée sur l'analyse et la compilation des différentes données.

Le choix de la méthode électrique est surtout déterminé par la nature du substratum de la nappe des sables qui est conducteur (marnes, argiles, eau saumâtre ou salée), ce qui crée un contraste de résistivité avec les formations sus-jacentes.

FIG.1 - CARTE DE SITUATION.



Ressources	1925 1939	1939 1946	1946 1952	1952 1959	1959 1965	1965 1967	1968	1972	1976	1981	1991
Infrabasaltique	3000	12000	24000	24000	18000	18000	18000	18000	18000	14000	21000
Sables quatern.											
Thiaroye				15000	12000	12000	12000	12000	12000	10400	10400
Berr Thialane									7000	9000	9000
Sebikotane					30000	28000	25000	25000	25000	28000	31000
Pout/Mbour						9000	17000		56315	61000	
Lac de Guiers								29000	29000	29000	40000
Littoral Nord									27000	8530	100000

Tableau 1 : Production des forages alimentant Dakar depuis 1925 (Bâ-Niang *et al*, 1993).

CHAPITRE 1

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le secteur géographique concerné par notre étude est situé à l'extrême ouest du Sénégal entre 14°45' et 15°10' de latitude nord, et 16°32' et 17°25' de longitude ouest. Il couvre la partie centrale de la presqu'île du Cap-Vert et s'étend le long de la grande côte, de Cambéréne à Mboro (fig. 1).

En raison de sa position avancée dans l'Atlantique, il y règne un climat particulier caractérisé par des précipitations de type sahélien, des températures relativement basses oscillant entre 17 et 25°C de Novembre à Mai et une température moyenne annuelle ne dépassant pas 28°C.

La répartition mensuelle de la pluviométrie annuelle aux stations de Mbao, Kayar, et Mboro (fig. 2a) est représentative du secteur qui se caractérise par :

- une partition de l'année en deux saisons, l'une pluvieuse de cinq mois (juin à octobre) avec un maximum de 155.6 mm à Kayar en août ; l'autre sèche de 7 mois ;

- l'existence en début de saison sèche, de pluies fines traduisant les incursions profondes d'air polaire dans les latitudes tropicales. Ces pluies localement appelées «heug» représentent 1 à 2% de la pluviométrie annuelle.

De 1982 à 1993, la courbe des variations annuelles de la pluviométrie montre une tendance à la diminution des précipitations (fig.2b) de l'ordre de 100 mm.

1.1 - Morphologie

Le secteur est caractérisé par un modelé général ondulé qui résulte d'un ensablement superficiel. La topographie est plate dans l'ensemble et les altitudes ne dépassent pas 150m.

En allant de l'océan à l'ouest vers l'est on distingue schématiquement (fig. 3) :

- un dôme formé par la tête de la presqu'île avec des assises volcaniques (hors zone d'étude) dont l'altitude maximale est de 105m au volcan des Mamelles ;

- une zone déprimée dunaire, de Pikine à Kayar limitée au sud par l'océan atlantique, les bas plateaux marno-calcaires de Mbao, Rufisque et Bargny ;

- une zone dépressionnaire au lac Tanma bordée par la falaise de Diender Guédj à l'ouest, et le plateau de Thiès à l'est ; cette zone se trouve au nord du massif de Ndiass (hors zone d'étude) dont l'altitude maximale est de 127m.

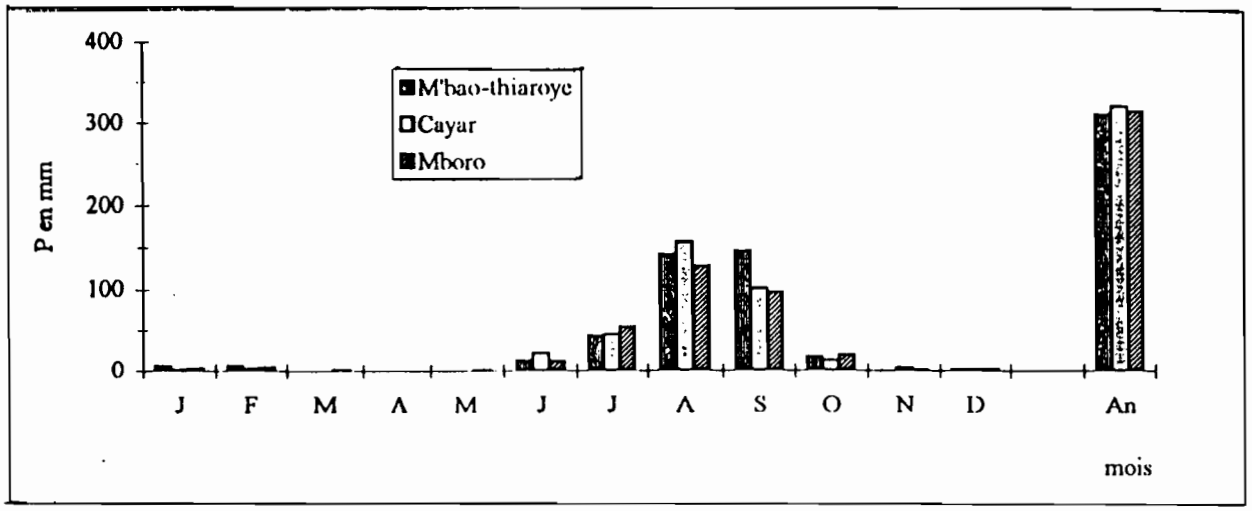


Fig. 2a: Répartition mensuelle de la pluviométrie annuelle: moyenne 1982-1993 (d'après les données de la météorologie nationale).

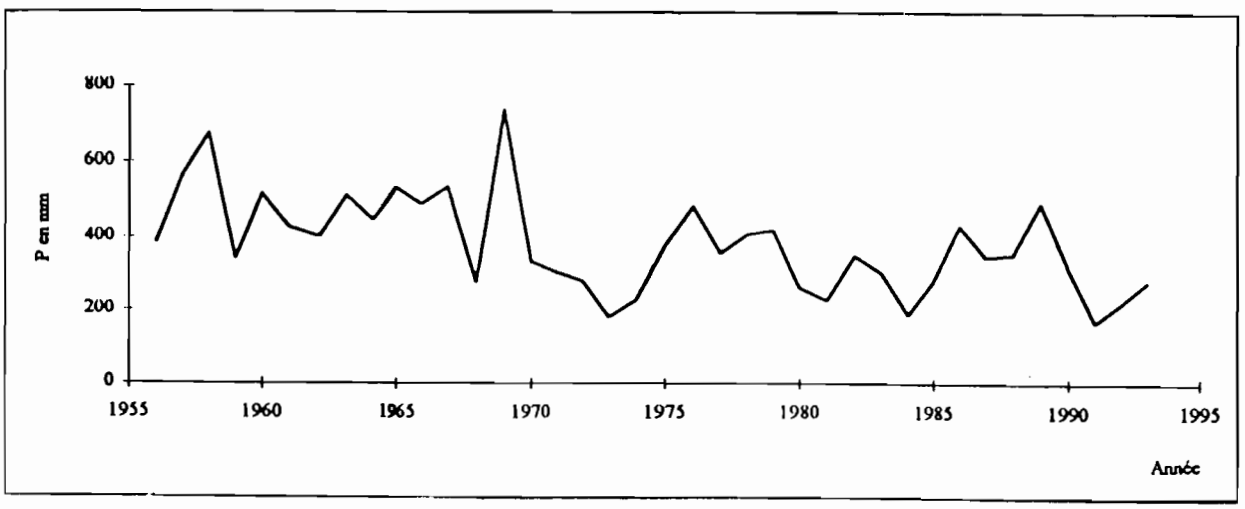
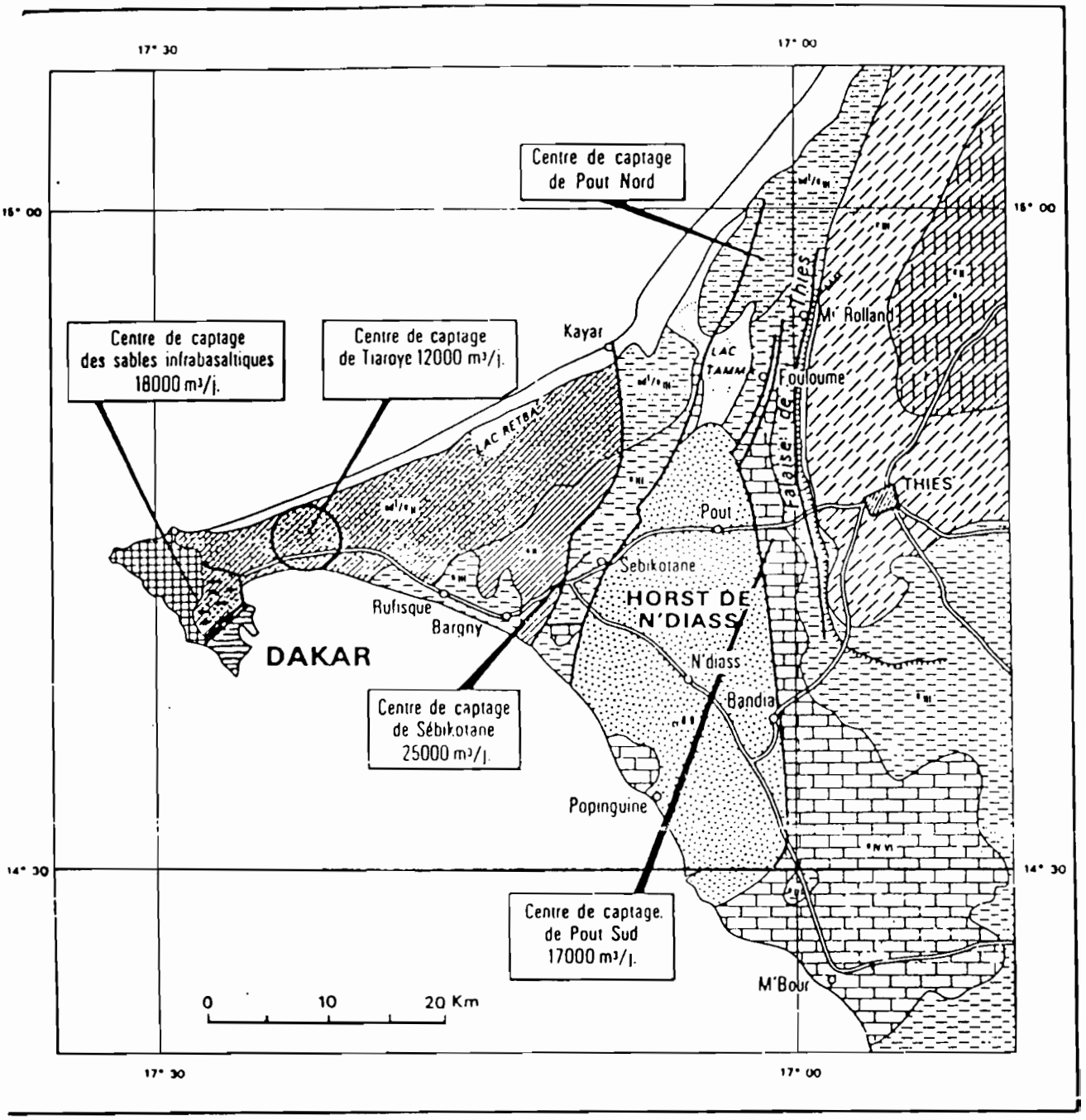


Fig. 2b: Variation interannuelle de la pluviométrie à la station de Mboro, période 1956-1993 (d'aprés les données de la météorologie nationale)



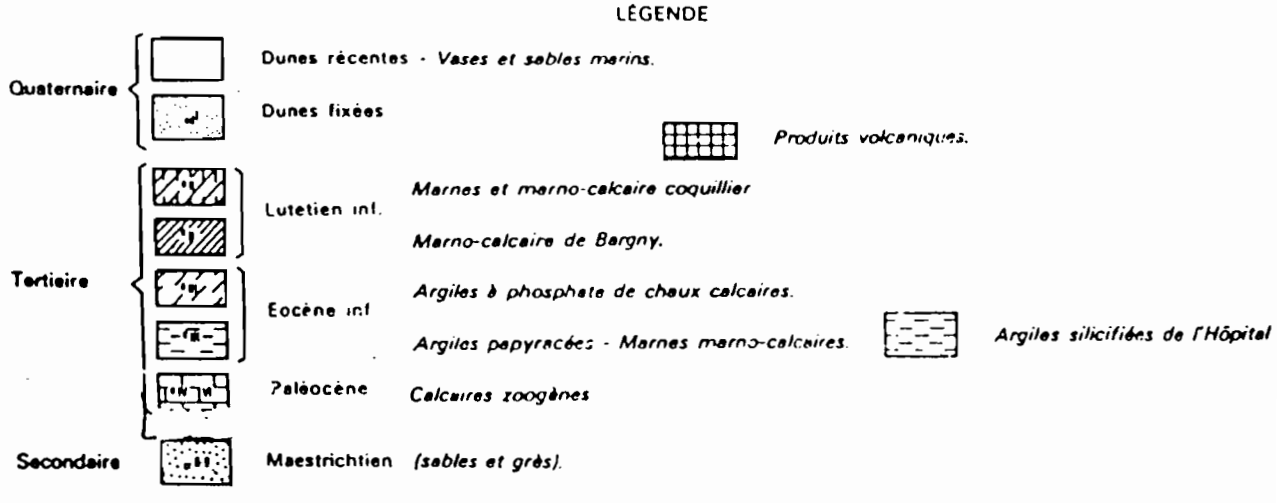


Fig. 3 - Esquisse géomorpholgogique de la presqu'île du CaP- Vert. Martin, (1970)

Dans la zone déprimée à partir du col de la presqu'île, s'étalent les sables dunaires continentaux modelés dans l'ensemble suivant une direction NE-SW. Dans les dépressions interdunaires humides autour des étangs (nappe phréatique sub-affleurante), apparaît une végétation caractéristique de paysages guinéens . Ce sont les niayes.

Au nord, la côte est formée d'un épais cordon de sables dunaires littoraux, vifs ou semi- fixés, qui jalonnent une série de niayes particulières pouvant être de véritables lacs d'eau douce après les pluies, d'eau salée ou même sursalée en saison sèche.

La figure 4 ci- après, présente une coupe schématique des systèmes dunaires avec les niayes.

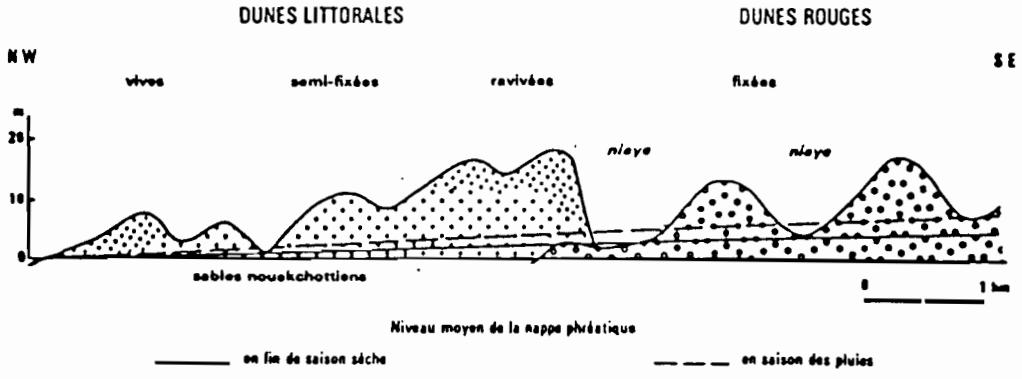


Fig. 4 Coupe des systèmes dunaires avec les niayes (Atlas national du Sénégal)

1.2- Géologie

Le secteur est contenu dans le bassin sédimentaire méso-cénozoïque sénégalo-mauritanien. Ce bassin formé consécutivement à l'ouverture de l'Atlantique central au Trias, présente une structure monoclinale à faible pendage vers l'ouest contrôlée par des failles normales délimitant des horsts et des grabens (fig. 5) : horst de Dakar, graben subsident de Rufisque, horst de Ndiass.

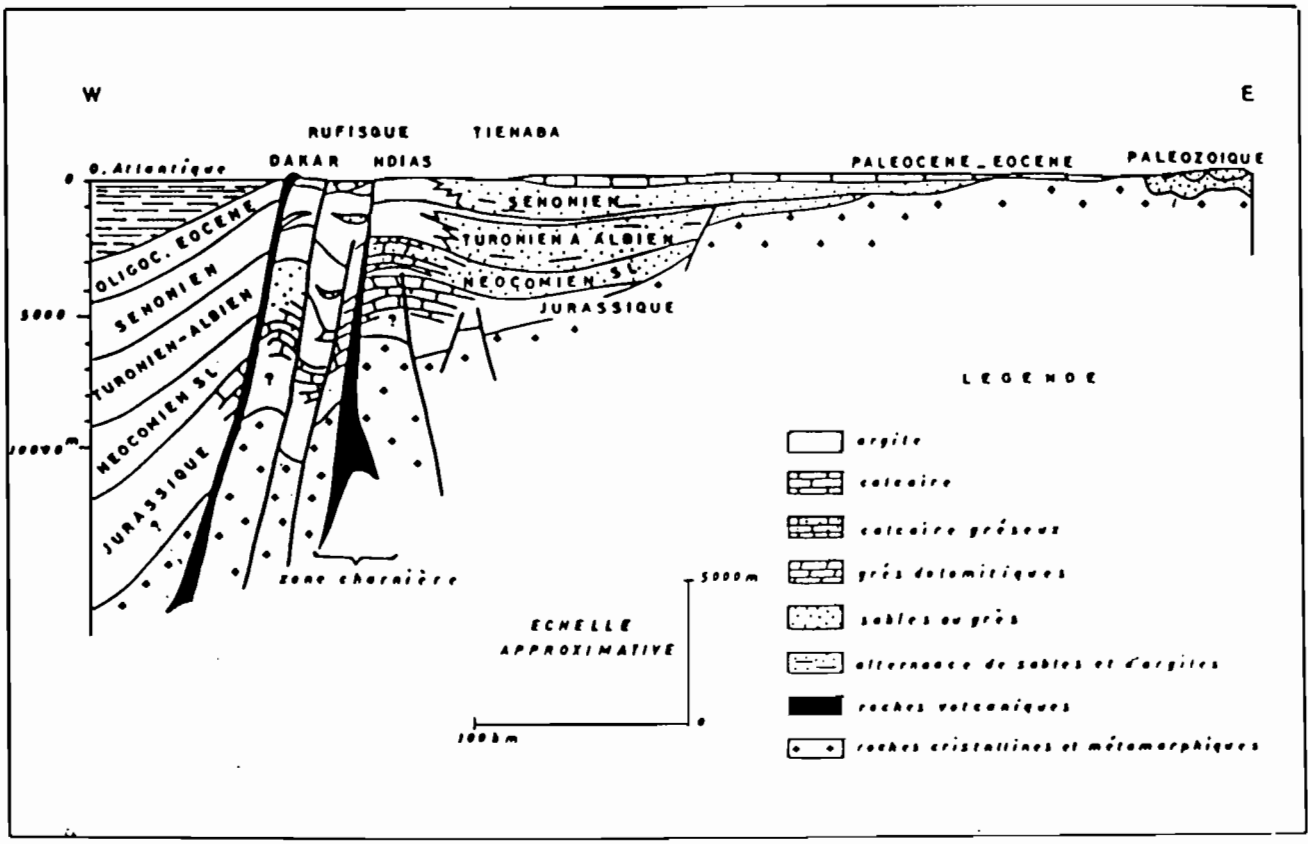


Fig. 5-Coupe schématique du bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien au parallèle de Dakar (Spengler *et al*, 1966).

1.2.1 - Stratigraphie

La stratigraphie est connue grâce à l'étude des affleurements et surtout celle des sondages pétroliers et d'exploitation d'eau (Castelain *et al*, 1965 ; Spengler *et al*, 1966 ; Sarr, 1995). L'analyse des coupes géologiques des forages Dk2, Rt1, Cr1, Rd2 et Taïba (fig. 6) permet de cerner la stratigraphie du secteur d'étude et confirme l'existence de deux domaines de sédimentation reconnus par les auteurs précédents.

**** Le domaine occidental***

Dans les sondages Dk2 et Rt1 situés à l'ouest de la presqu'île, la sédimentation est essentiellement argilo-marneuse du Maastrichtien à l'Eocène inférieur inclus. Le Lutétien marno-calcaire vient coiffer cette sédimentation. L'Eocéne supérieur est également argileux au sondage Dk2 (argiles de Yoff).

**** Le domaine oriental***

Les sondages situés à l'est (Cr1, Rd2, et Taïba) montrent par contre que :
- le Maastrichtien est sablo-gréseux ;
- le Paléocène est gréso-calcaire à la base et formé de calcaire zoogène karstifié au sommet ;
- l'Eocène inférieur à l'instar des sondages situés à l'ouest est argilo-marneux.

Le Quaternaire comprend essentiellement les formations sableuses qui unissent la péninsule au continent et se prolongent le long du littoral nord, ainsi que les coulées volcaniques des "Mamelles" à la tête de la presqu'île (sondage Dk2).

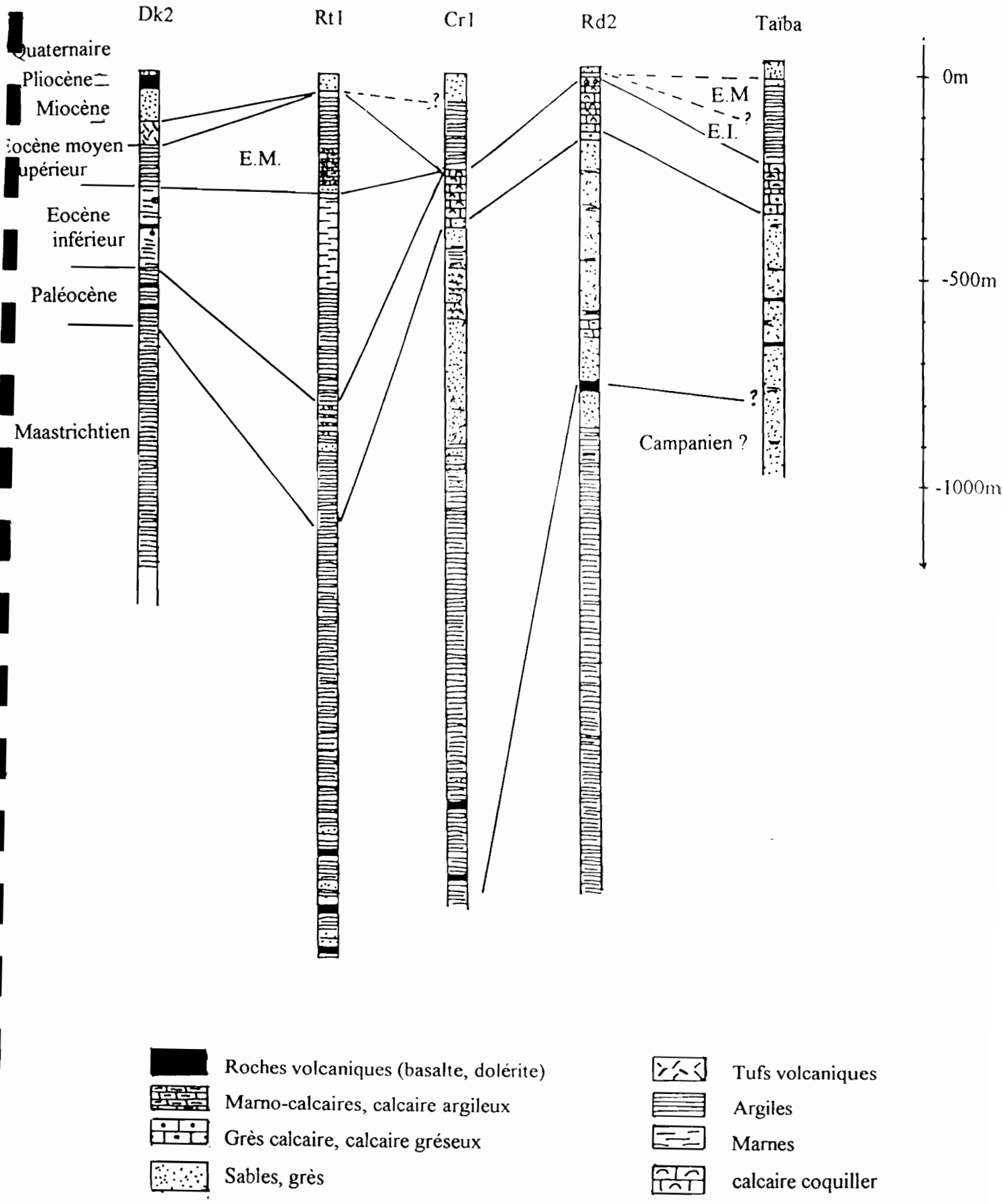


Fig. 6- Corrélations stratigraphiques à partir de coupes de sondages profonds réalisés dans la zone d'étude.

1.2.2 - Paléogéographie du Quaternaire de la presqu'ile

Le modelé superficiel du secteur d'étude est récent et résulte surtout des oscillations du niveau marin. Deux épisodes marins transgressifs du Quaternaire sont particulièrement bien représentés au Sénégal : l'Inchirien et le Nouakchottien (Hebrard, 1966 ; in Martin, 1970) (fig. 7).

Nous emprunterons à l'auteur ce passage qui décrit une paléogéographie très sommaire de la presqu'île du Cap- Vert au Quaternaire.

**** De l'Inchirien (40000 ans B.P.) à l'Ogolien (20000 ans B.P.):***

La mer recouvre la majeure partie de la presqu'île du Cap-Vert vers 35000 à 31000 ans B.P.. Il se dépose alors des sables coquillers riches en ilménite.

Ces sables seront conservés sous les coulées de basaltes au niveau de la tête de la presqu'île, et partiellement déblayés au niveau du col de la presqu'île à la régression post-inchirienne. Cette régression sous climat humide entraîne le dépôt d'alluvions graveleux à Thiaroye.

A l'Ogolien (20000 B. P.), qui correspond à l'un des maxima de la glaciation du Wûrm, la régression est maximale (-50m) et se fait sous un climat désertique. Un puissant massif dunaire de direction N-S se forme, réunit la péninsule au reste du continent.

**** Du Nouakchottien (5500 - 5000 ans B.P.) à l'Actuel***

La mer remonte (+3.5 à +5m) et occupe les dépressions interdunaires. Il se forme des lagunes le long de la côte et des coquillages (plage à Arca) se déposent.

Le retrait de la mer jusqu'à une cote voisine de l'Actuel s'accompagne d'une puissante dérive littorale qui isole les lagunes de l'océan donnant ainsi des lacs salés.

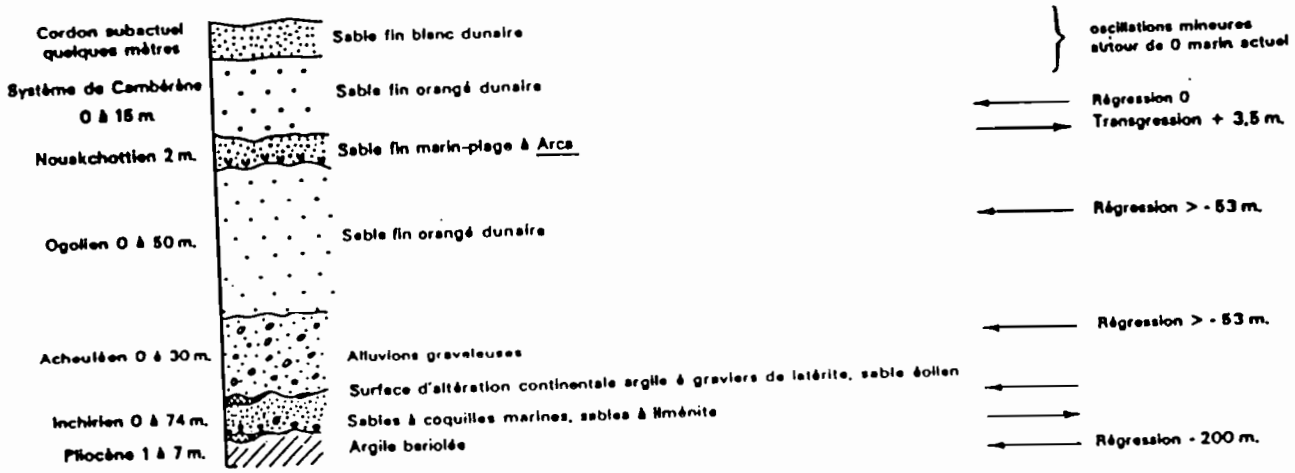


Fig. 7-Les formations quaternaires de la presqu'île du Cap-Vert (Hebrard,1966; in Martin, 1970).

1.2 3 - Structure

Au plan structural trois ensembles s'individualisent, de l'ouest vers l'est : le horst de Dakar, le graben de Rufisque et le horst de Ndiass. Ces ensembles sont délimités par des failles normales sub-méridiennes à N20° (fig.8) ; (Bellion, 1987).

Les zones hautes se seraient structurées plus ou moins tôt à partir de la fin du Maastrichtien et rejouent plusieurs fois à l'Eocène moyen-supérieur, pendant et après l'Oligocène (Bellion *et al*, 1983).

Au Crétacé terminal, la région du massif de Ndiass correspondait à une zone haute séparant un domaine oriental à sédimentation détritique, d'un domaine occidental à sédimentation pélagique (Castelain, 1965; Spengler *et al*, 1966).

La photo-interprétation et l'étude de photo-satellites (Le Priol *et al*, 1985) montrent également d'autres directions de failles : N25 à N35°E, N60 à N65°E, N125 à N130°E et N160 à N 165°E.

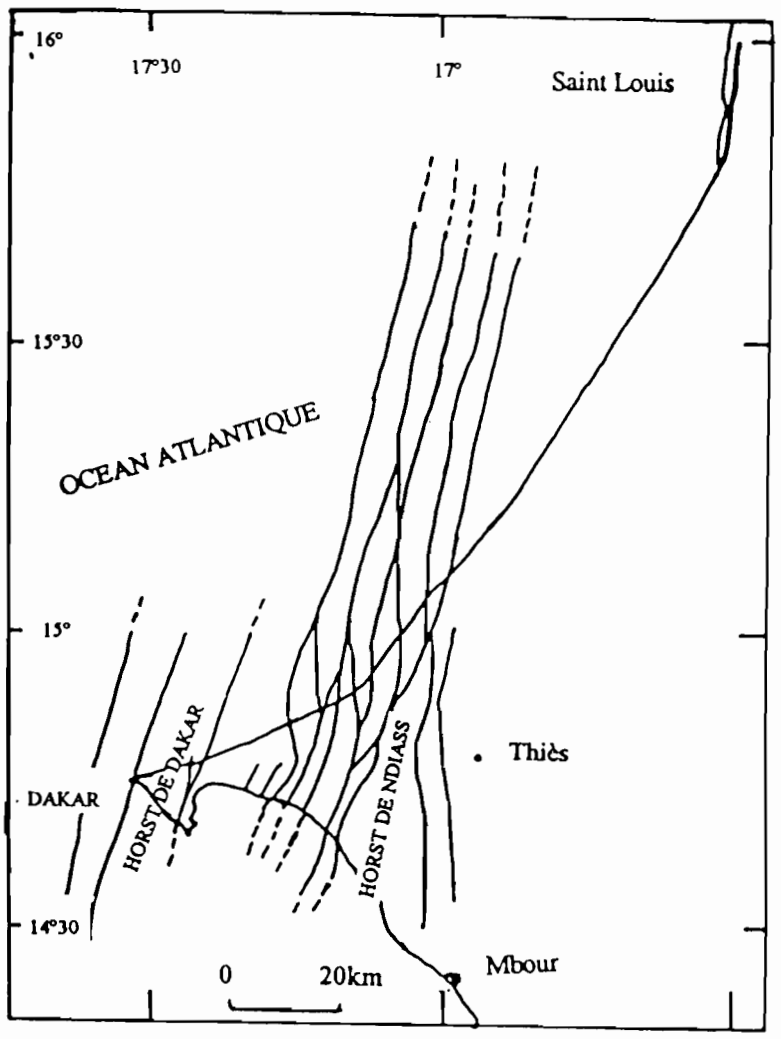


Fig.8- Le raiseau de failles sub-méridiennes à N20° de la presqu'île du Cap-Vert (Bellion,1987).

1.2.4 - Volcanisme

Notre secteur est situé dans la presqu'île du Cap-Vert qui est une province volcanique située sur la marge passive atlantique. Elle comporte un grand nombre de pointements volcaniques pour la plupart disséminés sur une centaine de kilomètres depuis la tête de la presqu'île jusqu'à l'est de Thiès (fig.9).

Sur des bases stratigraphiques, on distingue deux épisodes volcaniques : l'un Miocène (Cap Manuel, Gorée), l'autre Quaternaire (Mamelles) séparés par une phase d'altération continentale au Pliocène.

Crevola *et al,* (1994) mettent le volcanisme de la presqu'île en relation avec les divers événements tectoniques locaux.

Le début du volcanisme de la presqu'île (limite Eocène-Oligocène) est contemporain à l'émersion généralisée du bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien. L'épisode Miocène se déroule surtout au Serravalien et au Tortonien.

Le volcanisme quaternaire comprend deux phases principales d'activités : vers 1.4 Ma et 1 Ma, les dernières éruptions ayant lieu vers 0.60 à 0.70 Ma.

Les laves sont des roches basiques très sous-saturées : néphélinites et basanites pour le volcanisme tertiaire, et hawaïtes doléritiques au Quaternaire.

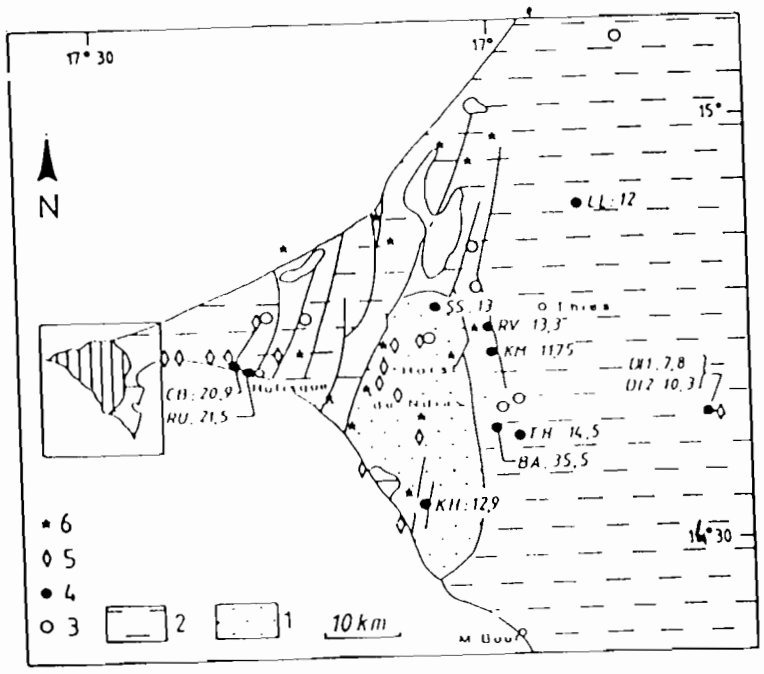


Fig. 9 - Localisation des principaux affleurements volcaniques de la péninsule du Cap-Vert (Crevola *et al*, 1994).

1: Secondaire; 2: Tertiaire; 3: Affleurement de laves non datées; 4: affleurement de laves datées; 5: Tufs; 6: Roches volcaniques rencontrées en sondage.

Conclusion

La morphologie du secteur d'étude reflète la structure géologique de la presqu'île. Les dômes de Dakar et de Ndiass se superposent aux horsts de Dakar et de Ndiass, alors que la zone déprimée dunaire correspond au graben de Rufisque. On distinguera deux provinces hydrogéologiques consécutivement aux provinces sédimentaires mises en évidences :

-une province occidentale de Pikine à l'ouest de Kayar (Graben de Rufisque), où seules les formations sableuses du quaternaire sont aquifères (Maastrichtien et Tertiaire argilo-marneux) ;

- une province orientale à l'emplacement du horst de Ndiass, où les formations, du Crétacé terminal au Quaternaire recèlent d'importants niveaux aquifères (sables et grès, calcaires karstiques, sables dunaires).

CHAPITRE II

HYDROGEOLOGIE

La nappe libre est contenue dans les formations sableuses du Quaternaire qui reposent généralement sur les formations argilo-marneuses du Tertiaire. Les sables s'étendent de la tête de la presqu'île où elles sont masquées par les coulées volcaniques des «Mamelles», jusqu'à St. Louis. Il s'agit donc d'une même formation aquifère divisée en trois réservoirs appelés, respectivement de l'ouest vers le nord-est :

- La nappe infrabasaltique de la tête de la presqu'île ;

- la nappe des sables quaternaires qui s'étend de la grande niaye de Pikine jusqu'au lac Tanma ;

- et la nappe « du littoral nord» qui s'étend au delà du lac Tanma.

L'aire géographique de notre étude englobe donc la nappe des sables quaternaires et la partie ouest de celle du littoral nord.

Dans ce chapitre nous décrirons d'abord l'aquifère à partir des données bibliographiques, ensuite nous étudierons la piézométrie.

2.1 - Structure de l'aquifère

Le toit de la nappe est représenté par la surface piézomètrique alors que son mur correspond au marno-calcaire imperméable éocène.

L'aquifère est limité au sud par l'océan Atlantique dans la région de Thiaroye et la remontée de son substratum marno-calcaire vers l'est.; et au nord par l'océan atlantique.

Les sables ont une porosité de 30 à 35% (Arnaud, 1952). Ceci en fait une bonne roche magasin mais pose en retour problème : l'absence d'une séparation étanche entre l'eau douce et l'eau de mer plus dense(1.025 fois environ).Ces deux types d'eau sont séparées par une zone de diffusion ou de mélange (biseau salé) dont la position est régie par les lois de l'hydrodynamique.

La présence des lagunes salées qui seraient des intrusions marines fossiles réduit (Martin,1970 ; Gaye *et al*, 1988) aussi les potentialités de l'aquifère : deux cas peuvent se présenter :

1)Les cordons dunaires littoraux sont séparés du cordon médian par une lagune (fig. 10a). Les cordons littoraux renferment alors une nappe individuelle dont l'écoulement se partage en deux directions : l'une vers l'océan au NNE et l'autre vers la lagune au SSE.

2) Les cordons littoraux, mobiles, peuvent localement remblayer la lagune (fig. 10b). La nappe des cordons littoraux se confond avec celle du cordon interne et il ne subsiste alors en profondeur qu'une pastille d'eau salée.

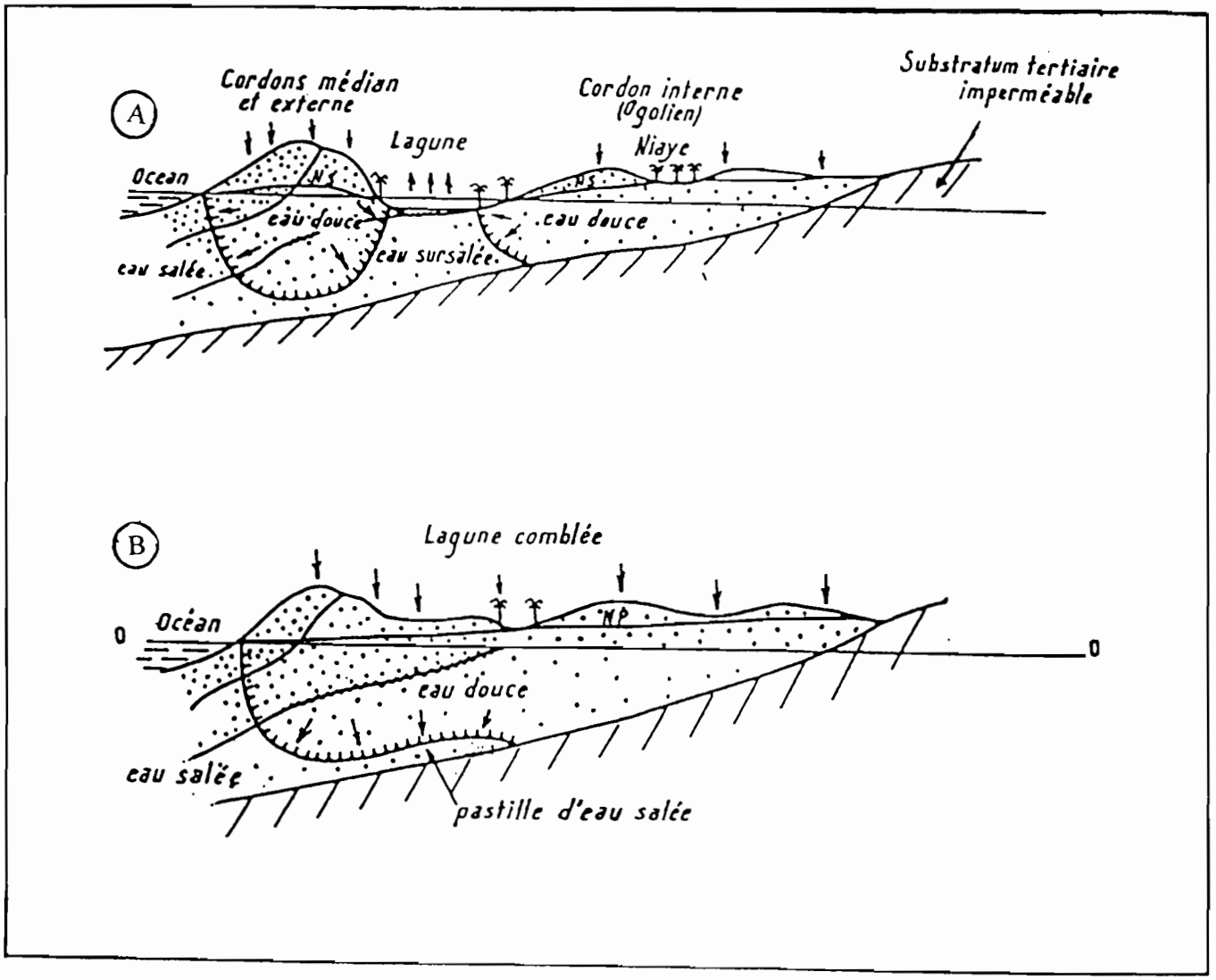


Fig.10: Coupes hydrogéologiques schématiques de la nappe des sables quaternaires montrant la nappe salée des lagunes (Martin, 1970).

2.2 - Paramètres hydrodynamiques

Des essais de pompage et des bilans hydrauliques ont permis de calculer les paramètres hydrodynamiques de la nappe des sables quaternaires. Le tableau 2 montre que la transmissivité varie entre 5.10^{-4} et $5.6.10^{-3}$ m^2/s alors que les valeurs du coefficient d'emmagasinement ne représenteraient pas l'aquifère en totalité, mais montrent plutôt que celui-ci est localement semi-captif (OMS,1972). Selon Gaye *et al*, (1990) le coefficient d'emmagasinement varie entre 0.3 et 14.9% alors que la transmissivité varie entre $1.6.10^{-3}$ et $6.75\ 10^{-3}$ m^2/s. Ces variation notées seraient liées à la différence de porosité entre les cordons dunaires et à la présence de bancs argileux d'épaisseurs variant de 1 à 2m, qui séparent la nappe en deux ou trois couches dans certains secteurs.

Lieux	Transmissivité(m/s)	Coef. emmagasin..	Debit spécf.(m^3/h/m)
Ndiar	$1.57.10^{-3}$	$3.18.10^{-3}$	1.101
Lac Mbaouane	$1.63.10^{-3}$	5.9.10-2	1.728
Gorom	$1.34.10^{-3}$	$2.72.10^{-3}$	1.062
Mbao	$2.56.10^{-3}$	$1.1.10^{-2}$	0.341
Niakoul rab (E70)	$2.1.10^{-3}$	$1.95.10^{-2}$	0.110
Bambilor	$1.8.10^{-3}$	$1.06.10^{-1}$	0.883
Mbam	$5.54.10^{-4}$	$2.22.10^{-3}$	0.856
Niakoul rab (E132)	$5.16.10^{-4}$	$1.25.10^{-2}$	0.307
Sangalkam	$2.13.10^{-3}$	$7.00.10^{-2}$	3.95
		s'= $1.12.10^{-1}$	
Keur Ndiol Bâ	$4.15.10^{-3}$	$4.5.10^{-3}$	4.8
		s'= $1.20.10^{-1}$	
Ber Tialane	$5.60.10^{-3}$	$2.2.10^{-4}$	9.85
		s'= $3.0.10^{-2}$	

Tableau 2. Paramètres hydrodynamiques de l'aquifères des sables quaternaires d'aprés des essais de pompage (O.M.S.,1972).

Quant à la nappe du littoral nord, sa perméabilité a été déterminée par méthode du slugtest. Elle varie de $1.7.10^{-7}$ à $1.96.10^{-5}$ m/s (Sarr, 1995).

2.3 - Alimentation de la nappe

Divers auteurs ont reconnu que l'eau de la nappe des sables est d'origine météorique. Selon O.M.S.,1972, il y a une parfaite corrélation entre les fluctuations de la nappe et les précipitations. Martin, 1970 et O.M.S 1972 ont évalué le taux de pluie atteignant la zone saturée de l'aquifère à 35% tandis que Therrien *et al* ,1989 trouvent un coefficient d'infiltration de 30%. Les coefficients d'infiltration ont été calculés à partir de méthodes basées sur la détermination de l'équation bilan.

2.4 - Exhaure

La nappe s'abaisse pendant la saison sèche. Ce phénomène serait lié à plusieurs facteurs :

**** Evaporation***

Selon O.M.S., 1972, l'évaporation devient négligeable lorsque la nappe est à plus de 2m de profondeur, et les seuls points où elle reste très importante se situent au voisinage des niayes et des lacs.

**** Evapotranspiration***

Elle se fait dans les niayes où il existe encore les reliques d'une végétation caractéristique de paysages guinéens, et des périmètres maraichers. La nappe y affleure pendant la saison des pluies.

**** Pertes d'eau douce à la mer***

Des sondages électriques effectués sur la plage même en 1946 ont montré que sous les eaux salées de surface, la nappe à eau douce en charge débite vers l'océan au nord (Plote, 1970). Le flux d'eau douce perdue à la mer pour une période de 17 ans varierait entre 114 et 444.10^6 m^3 (Therrien *et al*,1989).

****Exploitation de la nappe.***

Elle se fait par des forages, des puits villageois et des "céanes" (puisards) dans les niayes.

Deux centres de captage de la SONEES*. pompent l'eau de la nappe des sables quaternaires : le champ de Thiaroye qui participe à l'alimentation en eau de Dakar depuis 1950 et le champ de Beer Thialane avec cinq forages dont la production est orientée vers l'agriculture.

Les tableaux 1 et 3 qui indiquent les débits pompés depuis 1952 montre une tendance à la baisse des prélèvements dans le secteur de Thiaroye. Cette baisse serait liée à l'abandon de certains forages à cause de la contamination par l'eau salée, et par les nitrates dans la zone urbaine de Pikine-Thiaroye, et au colmatage des crépines par les bactéries ferrugineuses.

Il faut aussi noter l'existence de forages de particuliers à Sangalkam, Niague. Ces forages sont utilisés esentiellement par les exploitants agricoles.

Quant à la nappe du littoral nord, elle n'est exploitée (dans l'aire géographique de notre secteur d'étude) par des forages qu'aux environs de Mboro avec des débits spécifiques très variables (3.8 à 38m^3/h) témoignant ainsi d'une variation de la qualité du réservoir.

Années	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Thiaroye	9050	8597	8366	7498	7255	6471	6643
Beer tialane	7253	7802	8865	7418	8876	9942	11163

Tableau 3: Prélèvement des forages de la SONEES en m^3/j depuis 1989 dans le secteur d'étude. Source: SONEES.

2.5 - Piézométrie

2.5.1 - Les données piézométriques

Les données piezomètriques les plus récentes et les plus nombreuses qui ont été gracieusement mises à notre disposition par M. Ngom du B.I.R.H.* concernent :

- 40 piézomètres de la nappe des sables quaternaires au mois de Août 1994.
- et 7 piézomètres de la nappe des sables du littoral nord (dans l'aire géographique de notre étude) au mois d'octobre 1989).

En 1972 la nappe des sables quaternaires comptait beaucoup plus de piézomètres (une centaine selon O.M.S,1972) dont beaucoup ont été colmatés par la suite.

On note aussi que le suivi piézométrique n'est pas régulier : aucun suivi piézométrique n'ayant été effectué en 1992 et 1993 par le B.I.R.H. La SONEES. par contre ne suit régulièrement que 7 piézomètres situés au voisinage des champs de captages de Thiaroye et de Ber Tialane.

Par ailleurs, nous nous sommes rendus compte que certaines données piézométriques du B.I.R.H. renferment des erreurs. A titre d' exemple, la cote de la nappe pour le piézomètre P2.2 est à +23.5m alors qu'aucune carte piézométrique antérieure établie dans ce secteur ne donne une cote supérieure à 2 (Martin, 1970 ; O.M.S., 1972, Gaye *et al*, 1988).

Ces erreurs sont inhérentes à une absence de nivellement de ces ouvrages, l'altitude du piézomètre ayant été déterminée à partir de la carte I.G.N. Le relief étant mou (sable dunaire), tous les piézomètres de la nappe devraient être nivelés.

C'est ainsi que nous avons donc eu à corriger les données de l'hydrauliques pour construire la carte piézométrique de la nappe des sables quaternaires grâce au nivellement réalisé en 1992.

* **Exemple de correction** : le piézomètre P2.2.

la côte de la nappe selon le B.I.R.H.est +23.5 et l'altitude du piézomètre est à 30m., alors que le nivellement donne une altitude de 7.3m pour le piézomètre. Il suffit donc d'ôter 22,7 (c'est-à-dire 30 - 7.3) de 23.5 pour trouver la côte exacte de la nappe qui sera donc 0.8.

2.5.2 - Analyse de la piézométrie.

a) Nappe des sables quaternaires.

La carte piézométrique (fig.11a) qui a été construite avec les données corrigées de 40 piézomètres au mois de Août 1994 permet de ressortir les grandes lignes de la piézométrie. Il faut noter cependant que la nappe a peut être réagi à cette période de l'année, aux premiers effets de la précipitation. L'examen de cette carte permet de distinguer deux zones séparées par l'axe N-S que constitue la ligne Rufisque-Niakoulrab

* **A l'est**; l'écoulement est généralement de direction SE-NO en direction des lacs Retba et Mbaouane et de la côte nord. Le niveau piézométrique varie de +25 au sud-est où le substratum marneux éocène affleure, à 0 à l'approche des lacs et de l'océan.

Le resserrement des isopièzes du nord vers le sud peut s'expliquer par le plongement du toit du substratum et par un enrichissement surtout des sables en argile à l'approche de l'affleurement des marnes.

Cette dernière condition traduirait donc une diminution de la perméabilité, de l'océan vers le sud ; par contre au nord de cette rupture de pente la nappe est presque plate et légèrement au dessus de la côte zéro.

La figure 12 qui montre les coupes de quelques forages situés dans le secteur d'étude semble confirmer cette augmentation de la teneur en argile des sables à l'approche des plateaux marneux.

La figure (11.bis) de la piézométrie inférieure à la cote 2 fait apparaître une frontière entre un domaine dominé par les pentes structurales probablement à faible perméabilité d'une part, et moins épais d'une part ; et un domaine avec un niveau piézométrique très proche de zéro qui pourrait être la zone plus perméable (porosité de 30 à 35% selon Arnaud, 1952) susceptible de constituer des réserves importantes d'autre part, mais fragilisée par un contact direct avec les eaux marines.

* **A l'ouest** de la ligne Rufisque-Niakoulrab, il est difficile à partir du nombre très réduit de piézomètres (6) de caractériser la nappe. On peut toutefois noter sur la figure 11 une direction d'écoulement SE-NO. L'ouest de ce secteur (col de la presqu'île) est caractérisé par des cotes piézométriques inférieures à 1.

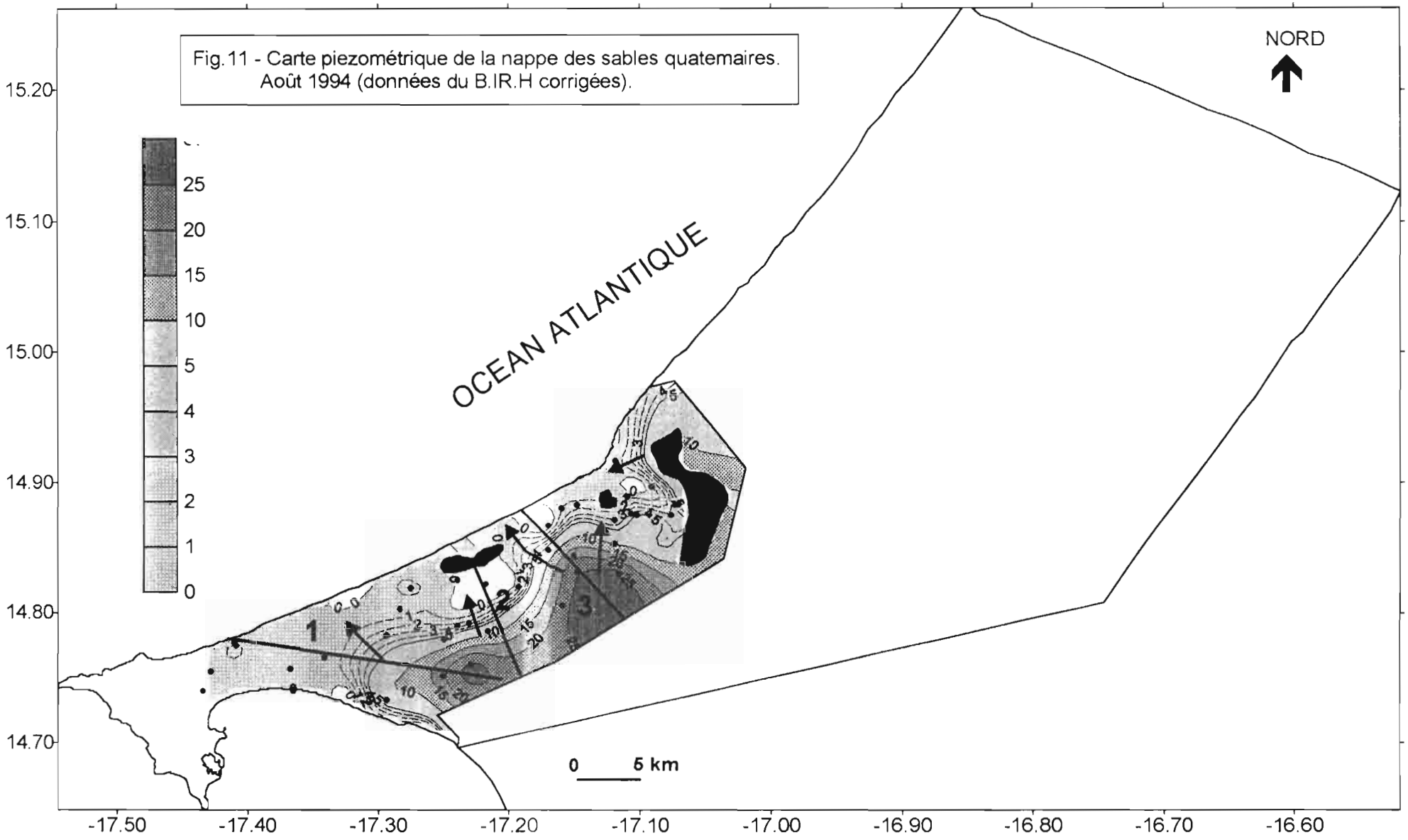
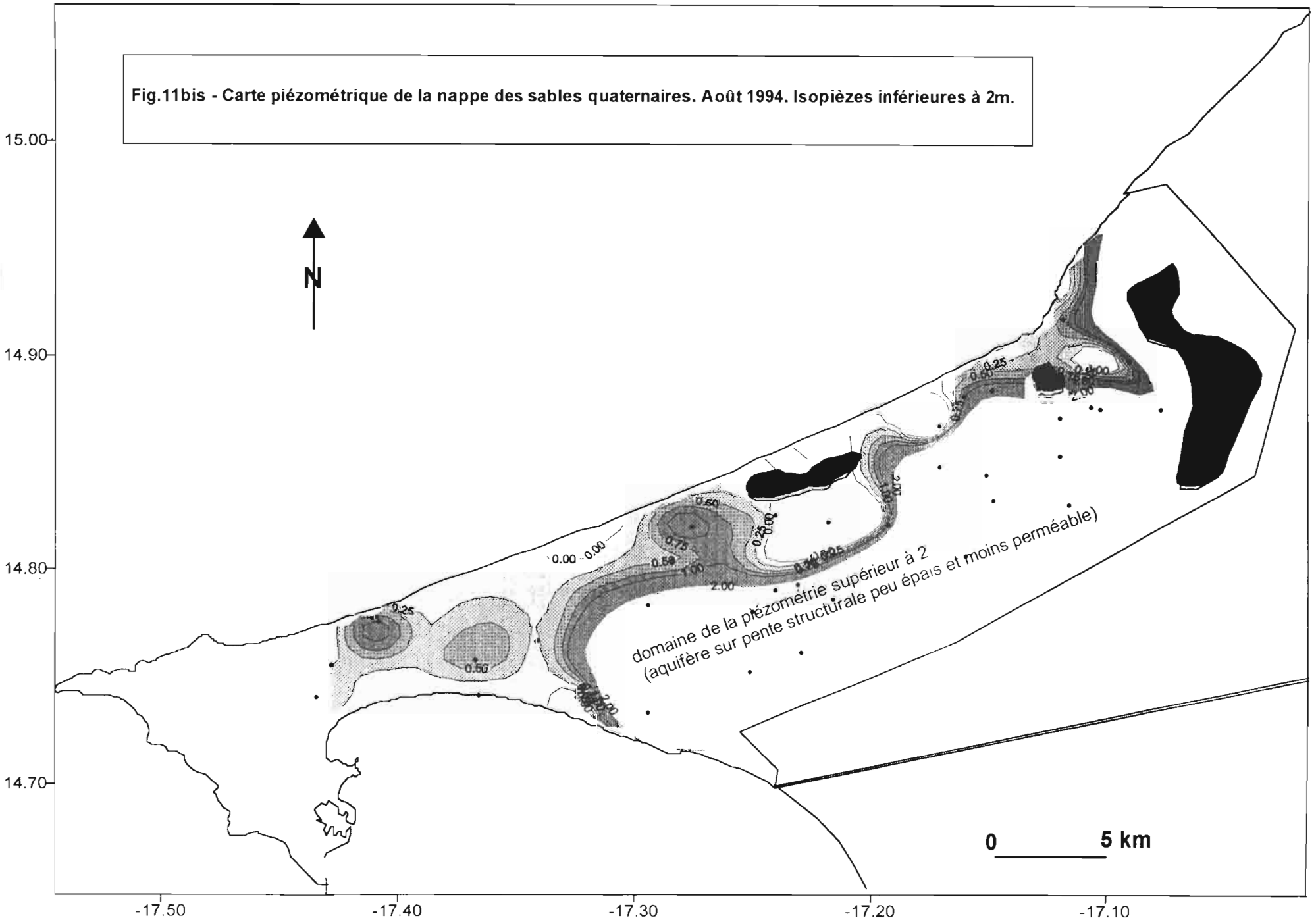


Fig.11 - Carte piezométrique de la nappe des sables quatemaires.
Août 1994 (données du B.IR.H corrigées).
NORD
OCEAN ATLANTIQUE
25
20
15
10
5
4
3
2
1
0
1
2
3
0 5 km
15.20
15.10
15.00
14.90
14.80
14.70
-17.50
-17.40
-17.30
-17.20
-17.10
-17.00
-16.90
-16.80
-16.70
-16.60

Fig.11bis - Carte piézométrique de la nappe des sables quaternaires. Août 1994. Isopièzes inférieures à 2m.



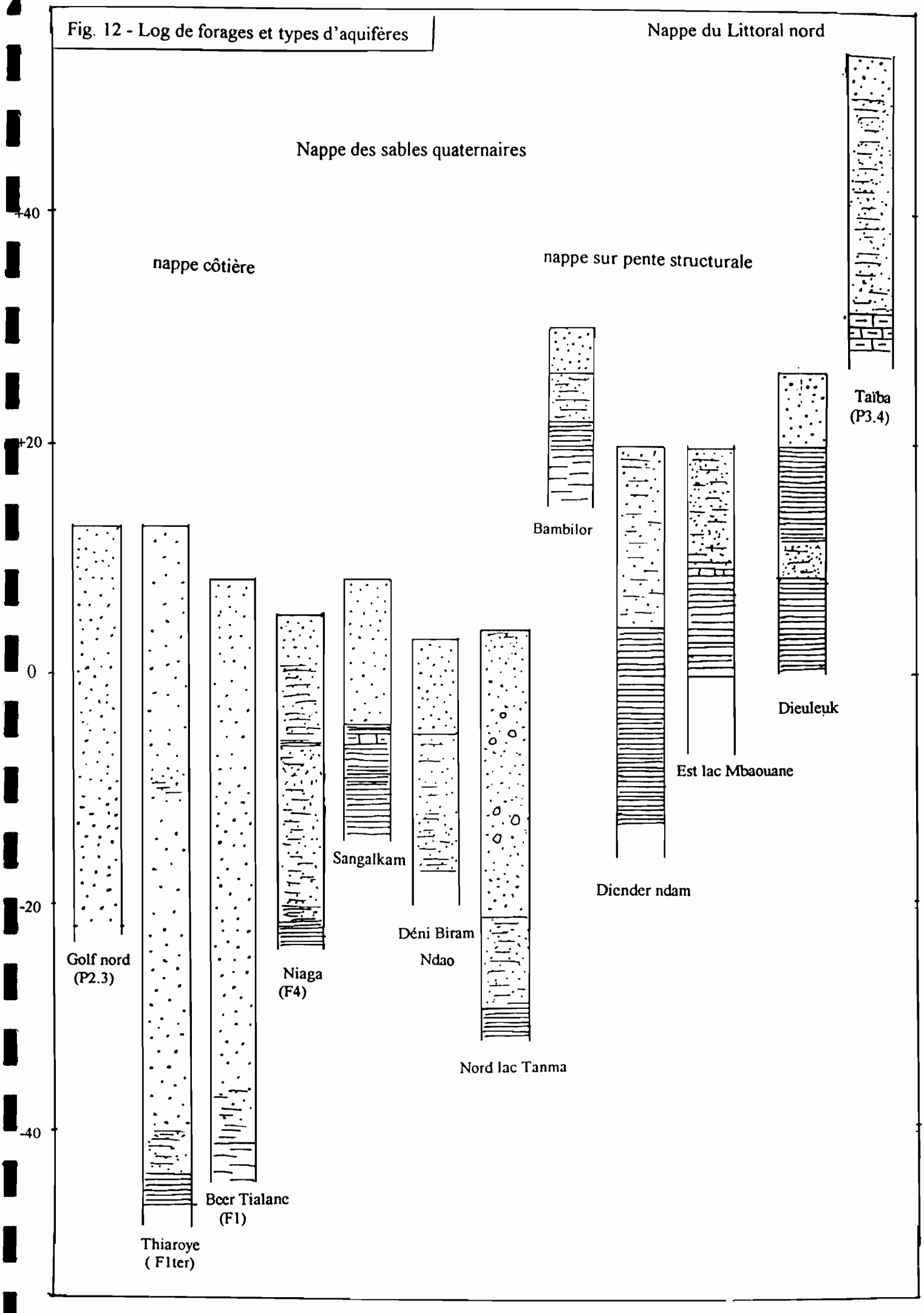


Fig. 12 - Log de forages et types d'aquifères
Nappe du Littoral nord
Nappe des sables quaternaires
+40
+20
0
-20
-40
nappe côtière
nappe sur pente structurale
Golf nord
(P2.3)
Thiaroye
(F1ter)
Beer Tialane
(F1)
Niaga
(F4)
Sangalkam
Déni Biram
Ndao
Nord lac Tanma
Bambilor
Diender ndam
Est lac Mbaouane
Dieuleuk
Taïba
(P3.4)

b) Nappe du littoral nord

La tendance des isopiézes que nous avons obtenues à partir des données de octobre 1990 (fig.13) semble être en accord avec les observations de Diouf,1995. La nappe s'écoule vers l'océan à partir du dôme piézométrique aux environs de Taïba. Dans ce secteur les sables seraient peu abondants et la nappe qui se trouve dans des couches phosphatées et/ou latéritiques serait donc peu perméable. L'espacement croissant des courbes en direction de l'océan et vers le nord indique une perméabilité croissante.

c) Evolution de la piézométrie

A titre d'exemple, nous allons étudier l'évolution de la piézométrie de la nappe dans le secteur de Thiaroye(col de la presqu'île) qui participe à l'alimentation en eau de Dakar depuis 1952 (fig.14).

En 1948 avant toute exploitation, la nappe des sables se présentait sous forme d'un dôme circonscrit à écoulement radiale (fig.14a) avec des cotes piézométriques qui varient de 6 à 2 (Martin, 1970).

En 1953, l'exploitation de la nappe a entraîné un bassin versant souterrain qui au cours des années s'est creusé et s'est agrandi. Le bassin est passé de 9.5km2 en juillet 1953 (fig14b) à 19.4km2 en juillet 1957 (fig14c) avec des cotes piézométriques qui varient de 0.79 à -3.67 au coeur de la dépression induite par les pompages.

En 1971, la carte de l'étude O.M.S.,1972 montre que l'influence des pompages se fait ressentir sur les côtes nord et sud. La côte de la nappe variant entre 0 et -2.
Cette baisse de niveau de la nappe aurait induit une progression des eaux marines à l'intérieur, ayant entraîné la contamination de certains forages notamment le forage F1ter (Bâ-Niang et al, 1993).

Les données récentes, peu abondantes et irrégulières, ne permettent pas de tracer une carte piézométrique du secteur.

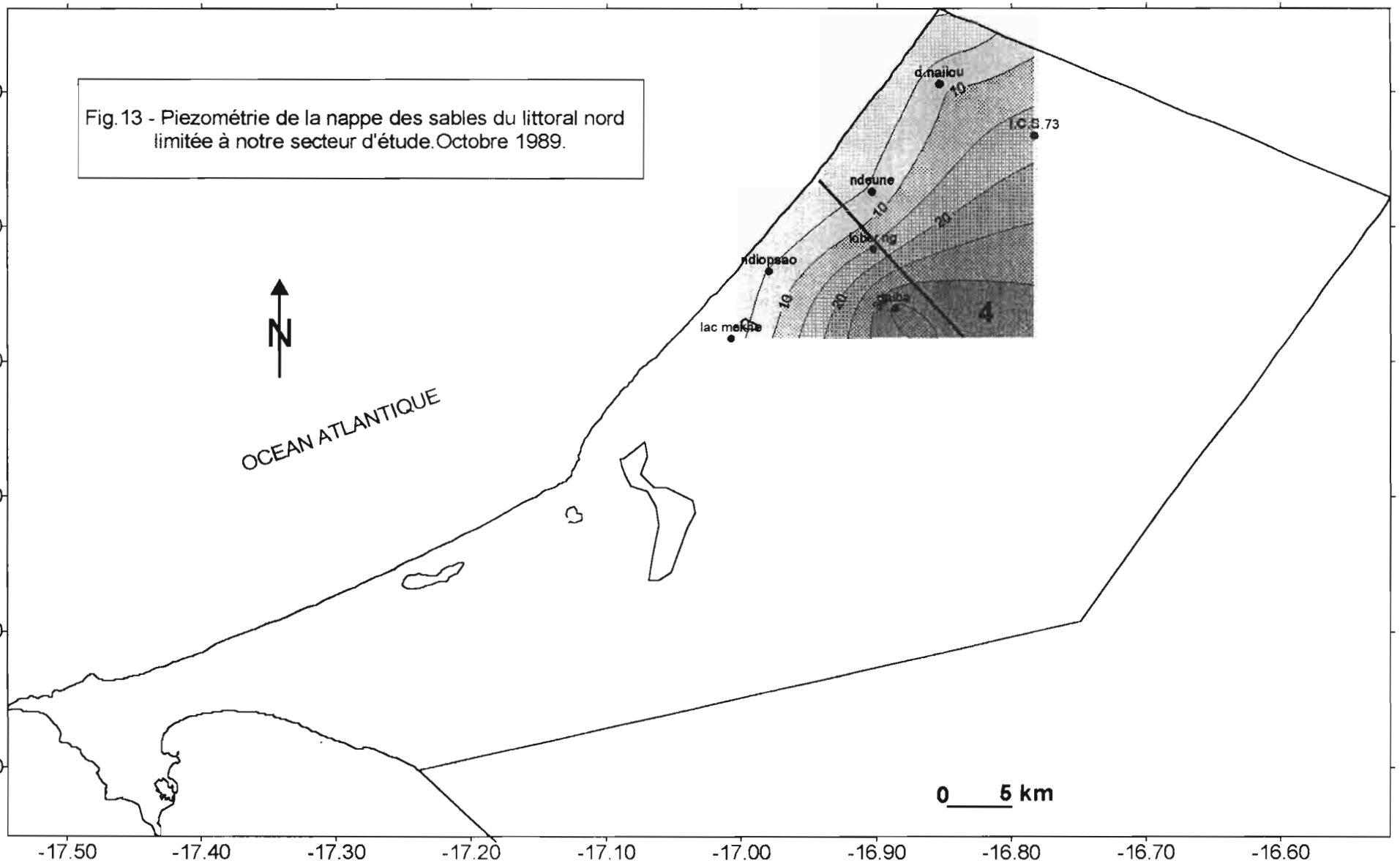
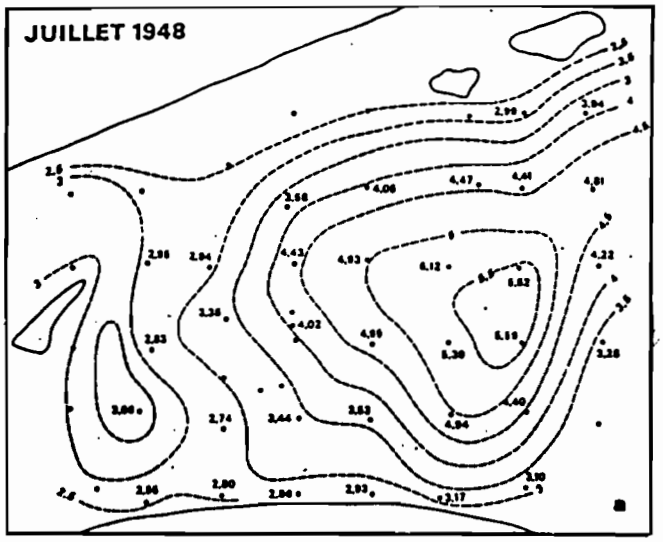
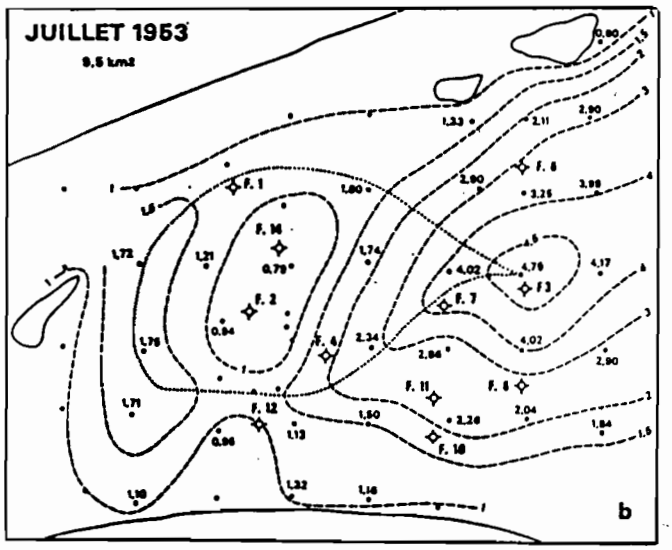
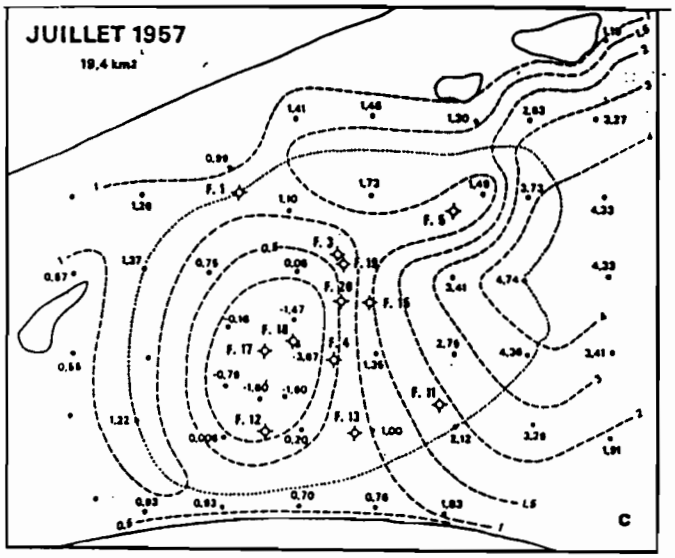


Fig.13 - Piezométrie de la nappe des sables du littoral nord limitée à notre secteur d'étude.Octobre 1989.
N
OCEAN ATLANTIQUE
ndgune
ndiopsao
lac mekhe
10
20
4
0 5 km
15.20
15.10
15.00
14.90
14.80
14.70
-17.50
-17.40
-17.30
-17.20
-17.10
-17.00
-16.90
-16.80
-16.70
-16.60







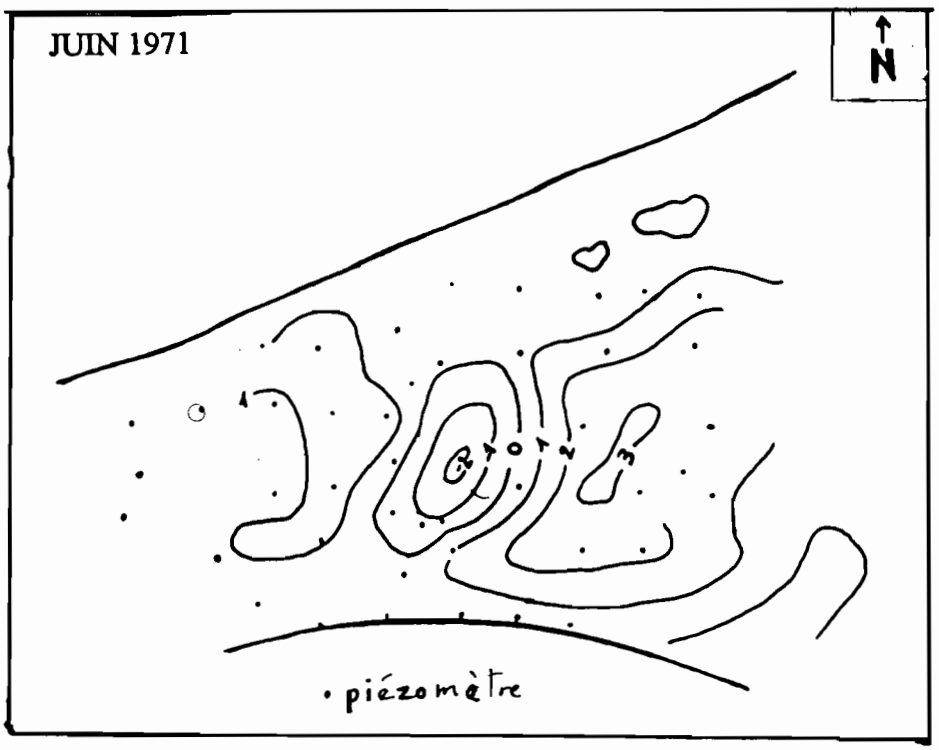


Fig.14. - Evolution de la piézométrie de la nappe des sables quaternaires dans le secteur de Thiaroye. Martin, 1970, O.M.S., 1972.

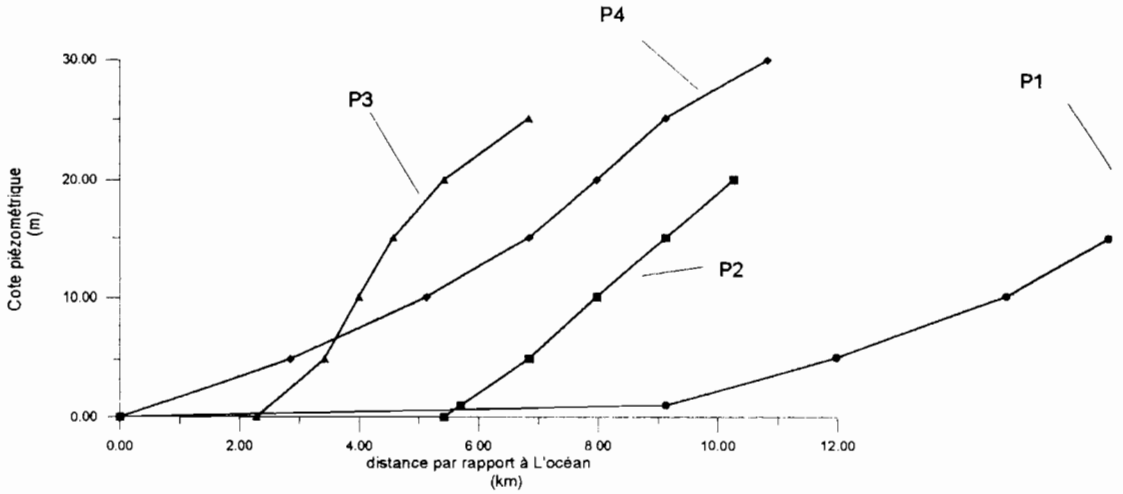


Fig. 15. Profils piézométriques de la nappe.

Conclusion

On peut distinguer dans l'aquifère des sables quaternaires: la nappe côtière de la presqu'île d'une part, et les nappes des sables et du littoral nord d'autre part.

Les cotes piézométriques supérieures à 1,5m caractérisent principalement les nappes sur pentes structurales qui sont par conséquent peu épaisse et/ou peu perméables donc à faible transmissivité. Ces cotes pourraient caractériser la partie sud de la nappe sables quaternaires, et la nappe du littoral nord dans les limites du secteur d'étude.

Tandis que les niveaux piézométriques autour de la côte zéro caractérisent essentiellement la nappe côtière à meilleur transmissivité et pourraient traduire directement les conditions hydrauliques à savoir l'apport (pluviométrie), et l'exhaure (pompage et évapotranspiration).

Ainsi la rupture des pentes (profils piézométriques) montrerait le passage entre ces deux types de nappes (fig. 15).

L'aquifère côtier, directement influencé par la pluviométrie et par l'exhaure est fragilisé par la présence de l'eau marine.

La baisse de la piézométrie constatée conjointement à une tendance à la baisse des précipitations (malgré une baisse des prélèvements), a entraîné une modification de la position du front salé (au moins dans certains secteurs) comme l'attestent les forages F5 de Beer et F1 de Thiaroye contaminés (Bâ-Niang *et al*, 1993).

Cet aquifère fragile nécessite donc une gestion rigoureuse qui implique la détermination de la géométrie du réservoir. Le prochain chapitre est consacré à la détermination de la géométrie du réservoir à partir de données de forages et de données géophysiques.

CHAPITRE 3

ETUDE DE LA GEOMETRIE DE L'AQUIFERE DES SABLES QUATERNAIRES DE THIAROYE A MBORO

Ce chapitre comprend deux sous-chapitres.

Le premier présente les données de forages, les résultats des études géophysiques antérieures ainsi que les résultats d'une prospection électrique réalisée conjointement avec S. Diouf et J. Tchani dans la zone de Noto-Mboro.

Le sous-chapitre 2 expose la géométrie du réservoir à partir d'une compilation de données de forages et de données géophysiques. Ce travail a été réalisé conjointement avec J. Tchani.

A - DONNEES DE SONDAGES MECANIQUES ET DE SONDAGES GEOPHYSIQUES

3.1 - Données de forages

87 forages (pétroliers et hydrauliques) et 45 piézométres implantés dans la zone d'étude ont été recensés (fig.16). Les données sur les coupes de ces ouvrages permettent de connaître la lithologie des terrains, entre autres l'épaisseur des sables et des argiles, et la nature du substratum géologique des sables quaternaires.

La synthèse des données de forages est illustrée par les coupes lithologiques (fig.17). Toutes ces coupes intéressent la région Nord-Est de notre secteur d'étude

C'est en effet dans ce secteur que l'aquifère des sables est moins connu et moins exploité. La carte des forages montre que du lac Tanma jusqu'à la longitude de Noto, aucun forage ne capte les sables quaternaires cependant il existe des puits villageois qui l'exploitent.

Il faut cependant noter que les corrélations entre les différentes formations sont parfois hypothétiques (forages distant de plus de 6 km). Ces coupes ne doivent être considérées surtout que pour une illustration des variations de profondeur et de nature du substratum des sables, et particulièrement pour guider l'interprétation géophysique, et le tracé des cartes qui seront proposées ultérieurement.

L'examen des coupes permet de faire les constatations suivantes :

- la discontinuité de l'aquifère à la latitude du lac Tanma (coupes VI et V) ;

- les sables reposent généralement sur les marnes imperméables à l'ouest et sur les marno-calcaires et calcaires du lutétien perméables à l'est (coupes I, II, et III) ;

- la coupe I montre une continuité entre l'aquifère des sables quaternaires (à l'ouest) et l'aquifère des calcaires du Lutéine ; Ces deux aquifères vont constituer une même nappe dans ce secteur (Diouf, 1995) ;

- L'épaisseur des sables augmente du sud vers le nord (coupe V à I). Elle varie de 0 à 40m.

La coupe V montre au niveau du forage S.E.19 que des apports météoriques vont alimenter la nappe des calcaires paléocènes plus profonde par l'intermédiaire de l'aquifère des sables.

L'épaisseur importante (50m au moins) des sables quaternaires peut s'expliquer par le comblement du lit d'un ancien cours d'eau relativement important qui a érodé les marnes yprésiennes. Sur cette coupe, l'aquifère est pratiquement réduit à cette paléo-vallée.

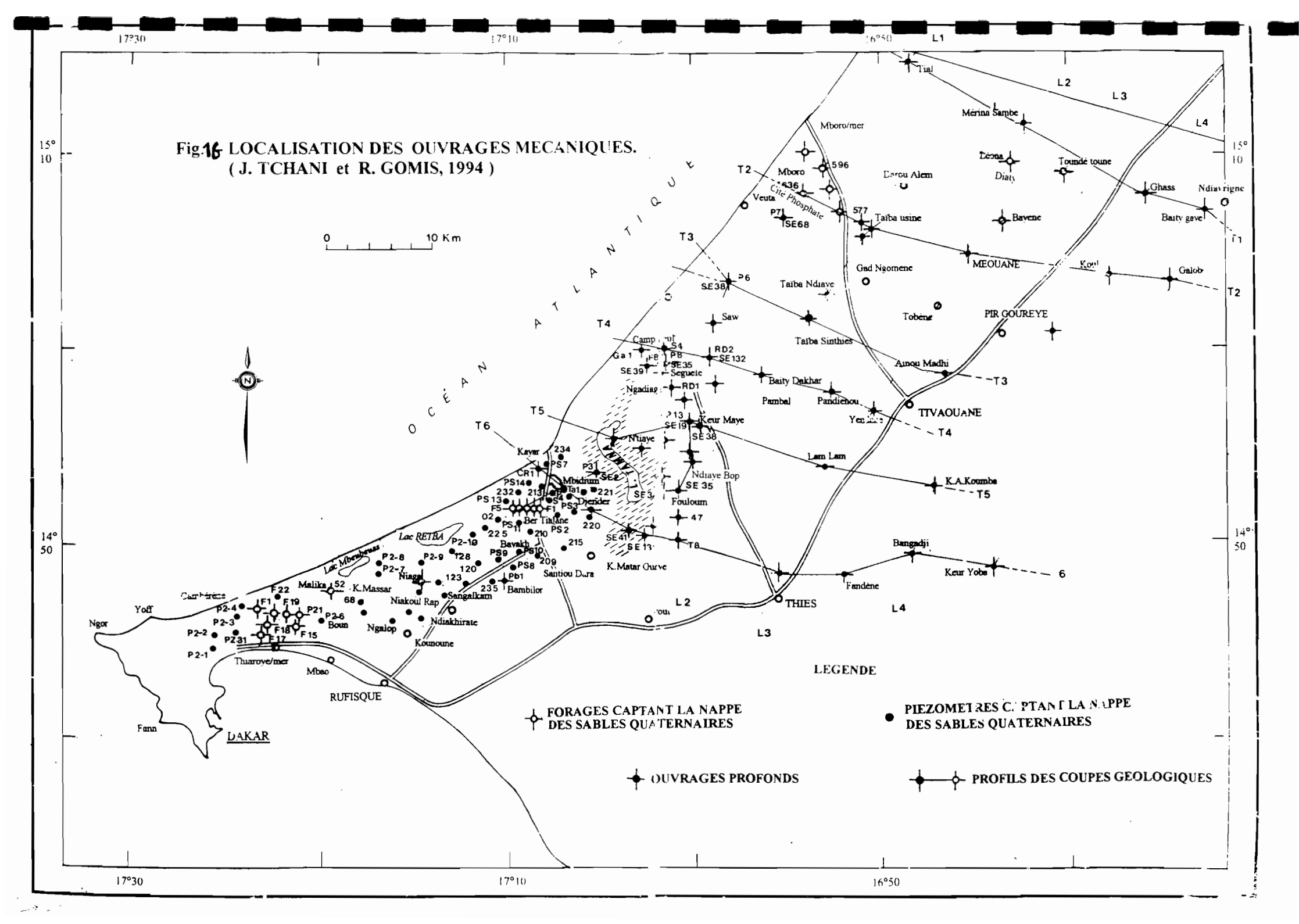


Fig.16 LOCALISATION DES OUVRAGES MECANIQUES.
(J. TCHANI et R. GOMIS, 1994)
17°30
17°10
16°50
15° 10
14° 50
0 10 Km
OCÉAN ATLANTIQUE
Tial
Mérina Sambe
Mboro/mer
Mboro
Darou Alem
Déona
Diaty
Toundé toune
Ghass
Ndiavigne
Baity gave
Veuta
Cité Phosphate
Taïba usine
Bayene
MEOUANE
Gad Ngomene
Taïba Ndiaye
Tobène
PIR GOUREYE
Galob
Saw
Taïba Sinthies
Ainou Madhi
TTVAOUANE
Baity Dakhar
Pambal
Pandiehou
Keur Maye
Ndiaye Bop
Fouloum
Lam Lam
K.A.Koumba
Ngadiag
Segueie
Camp
Kayar
Mbadrum
Dieuider
Ber Tialène
Lac RETBA
Lac Mbeubeuss
Malika
K.Massar
Niagal
Niakoul Rap
Sangalkam
Bambilor
Santiou Dara
K.Matar Ouve
Bangadji
Keur Yobe
Fandène
THIES
Yoff
Ngor
Boun
Ngalop
Ndiakhirate
Kounoune
Thiaroye/mer
Mbao
RUFISQUE
Fann
DAKAR
L1
L2
L3
L4
T1
T2
T3
T4
T5
T6
T8
LEGENDE
FORAGES CAPTANT LA NAPPE DES SABLES QUATERNAIRES
PIEZOMETRES CAPTANT LA NAPPE DES SABLES QUATERNAIRES
OUVRAGES PROFONDS
PROFILS DES COUPES GEOLOGIQUES

LEGENDE DES COUPES

Sables } Quaternaire

Latérite } Miocène à Pliocène

Marno-calcaires

Argiles

Marne

} Eocène inférieur à moyen

Calcaire coquiller

Calcaire grèseux

} Paléocène

Sables et grès argileux } Maastrichtien

COUPE I

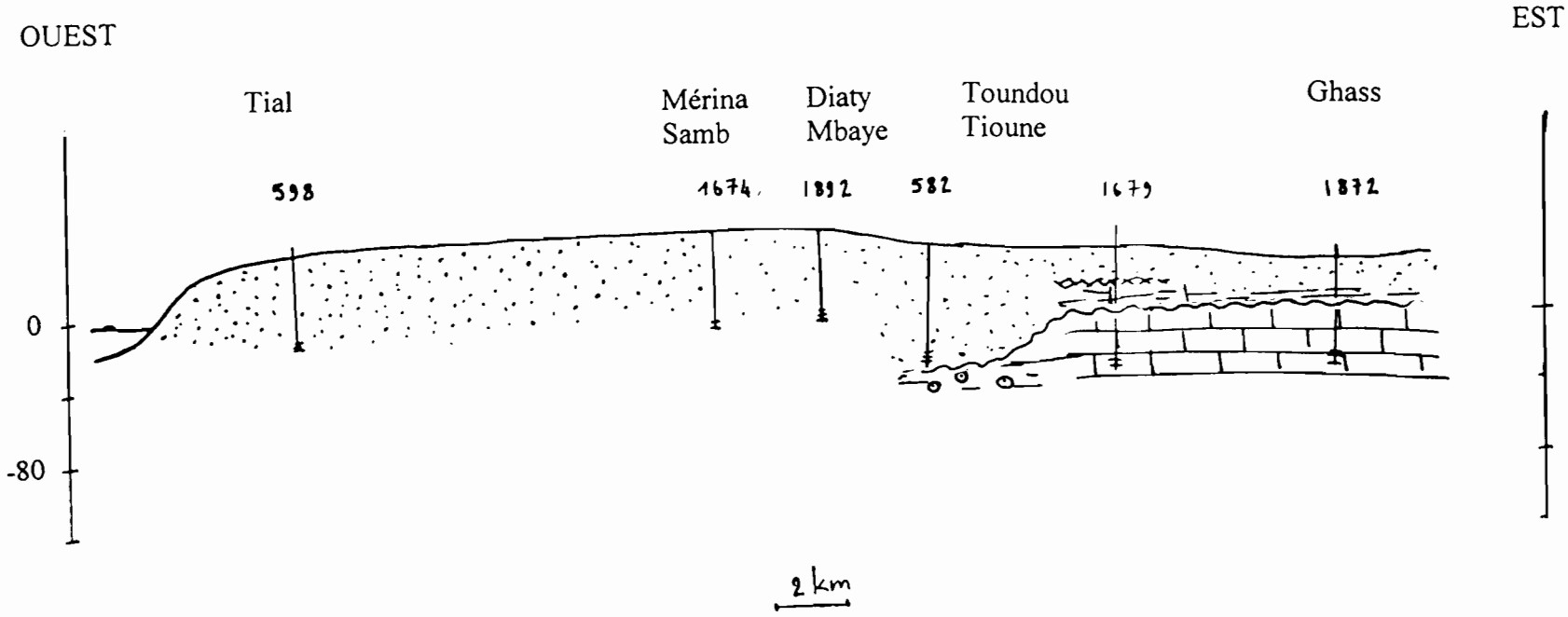


Fig. 17a - Corrélations lithologiques de Tial à Gass

COUPE II

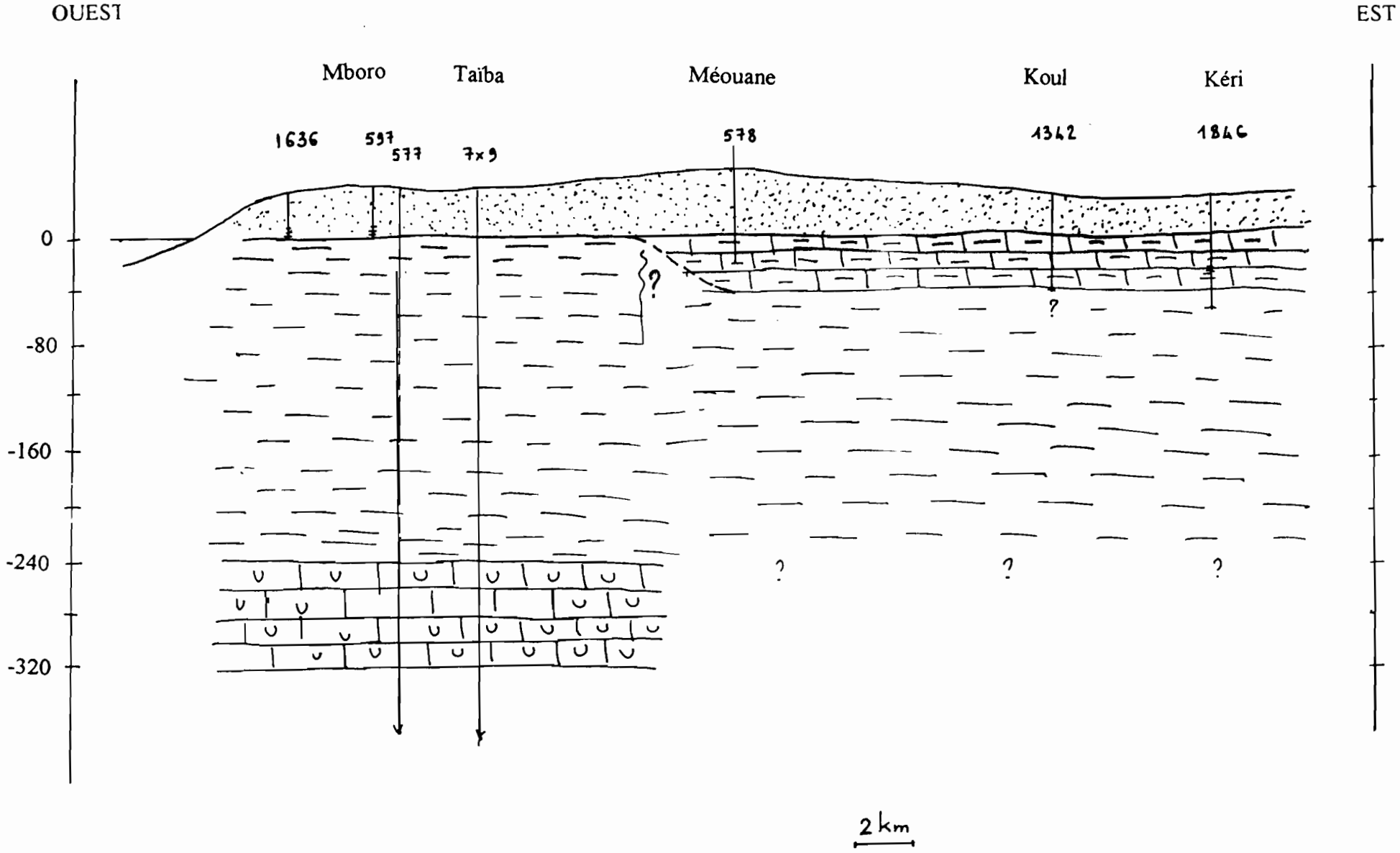


Fig. 17b - Corrélations lithologiques de Mboro à Kéri

COUPE III

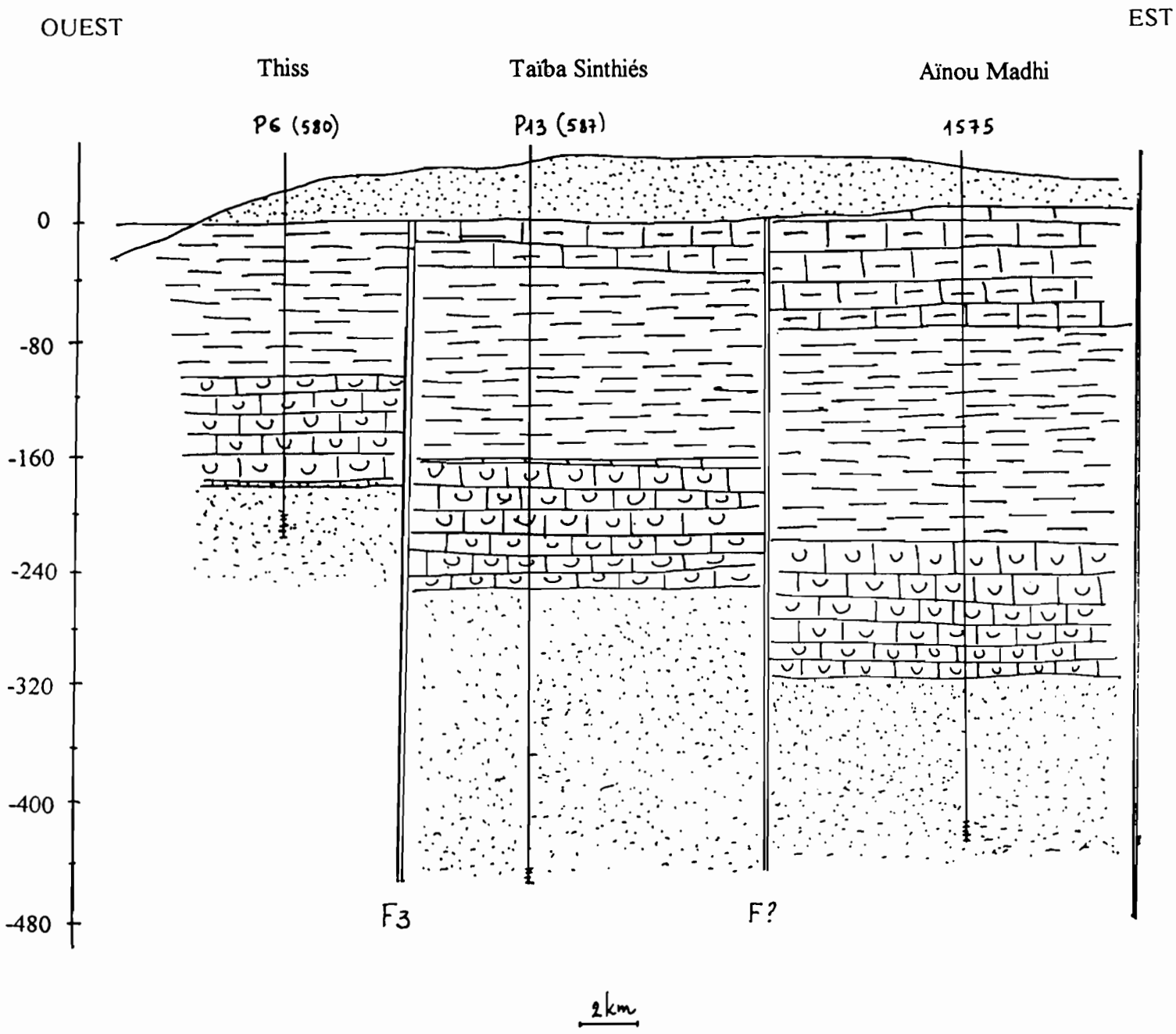


Fig.17c - Corrélations lithologiques de Thiss à Aïnou Madhi

COUPE IV

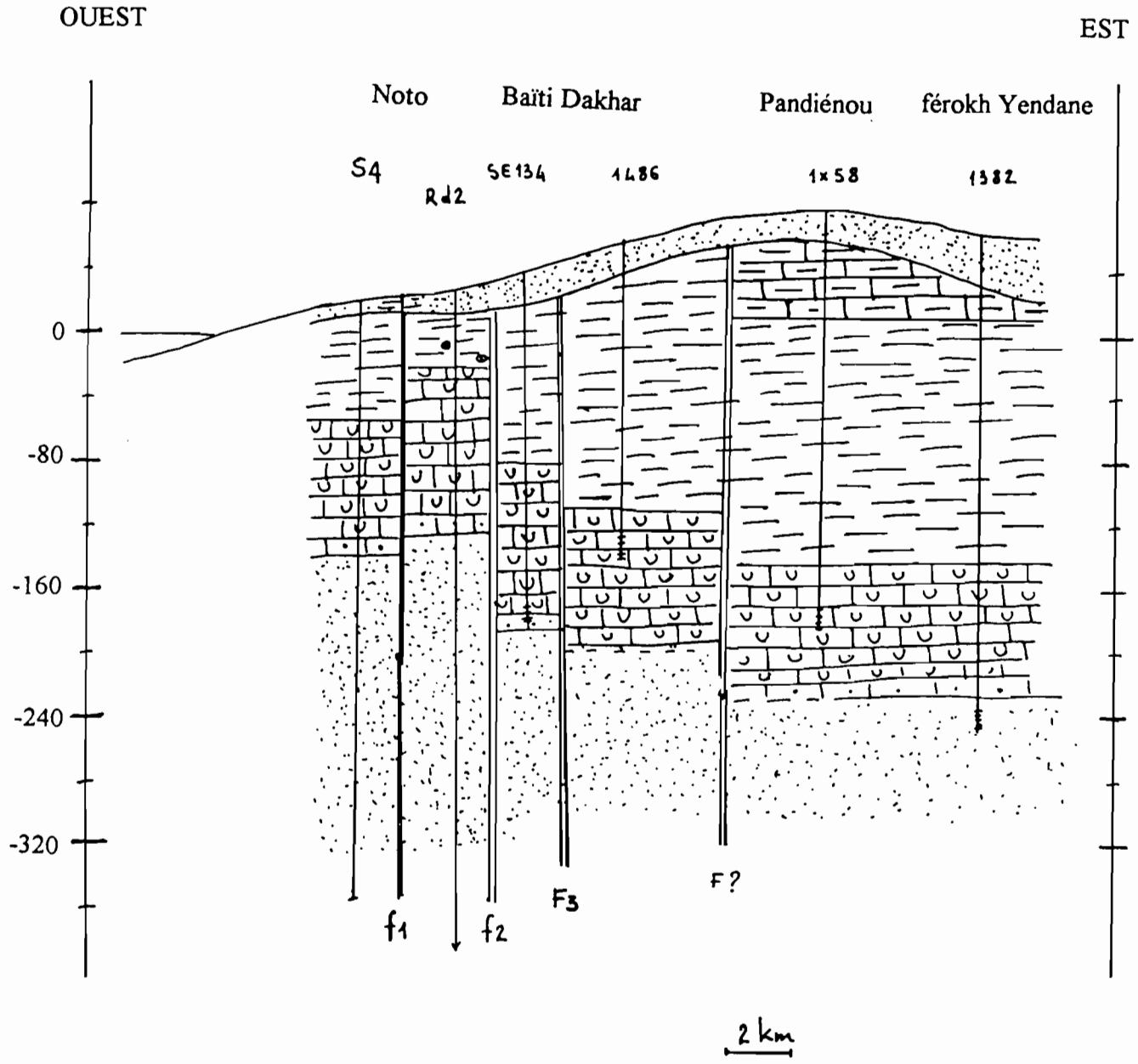


Fig. 17d - Corrélations lithologiques de Noto à Férokh Yendane

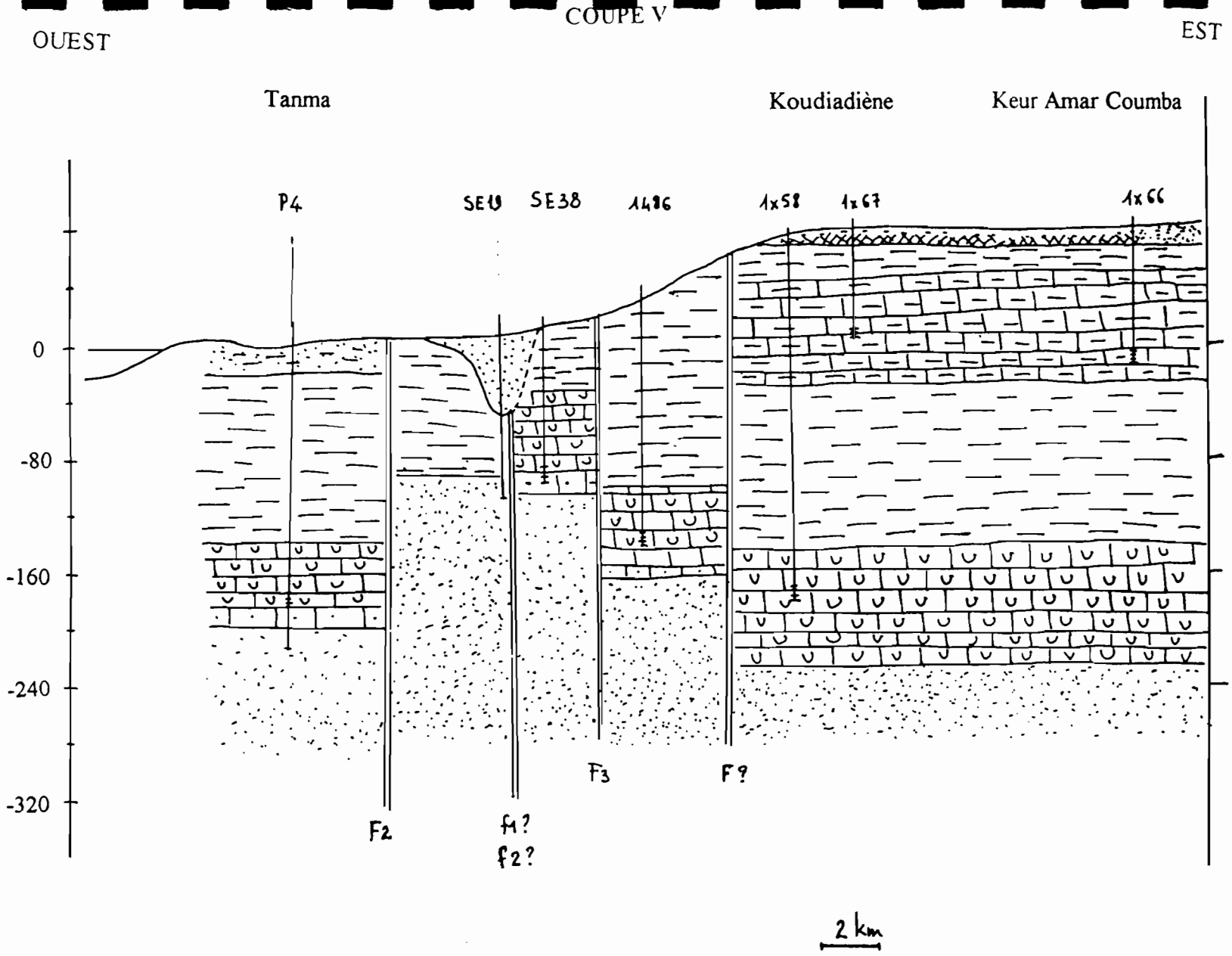


Fig. 17e - Corrélations lithologiques de Tanma à Keur Amar Coumba

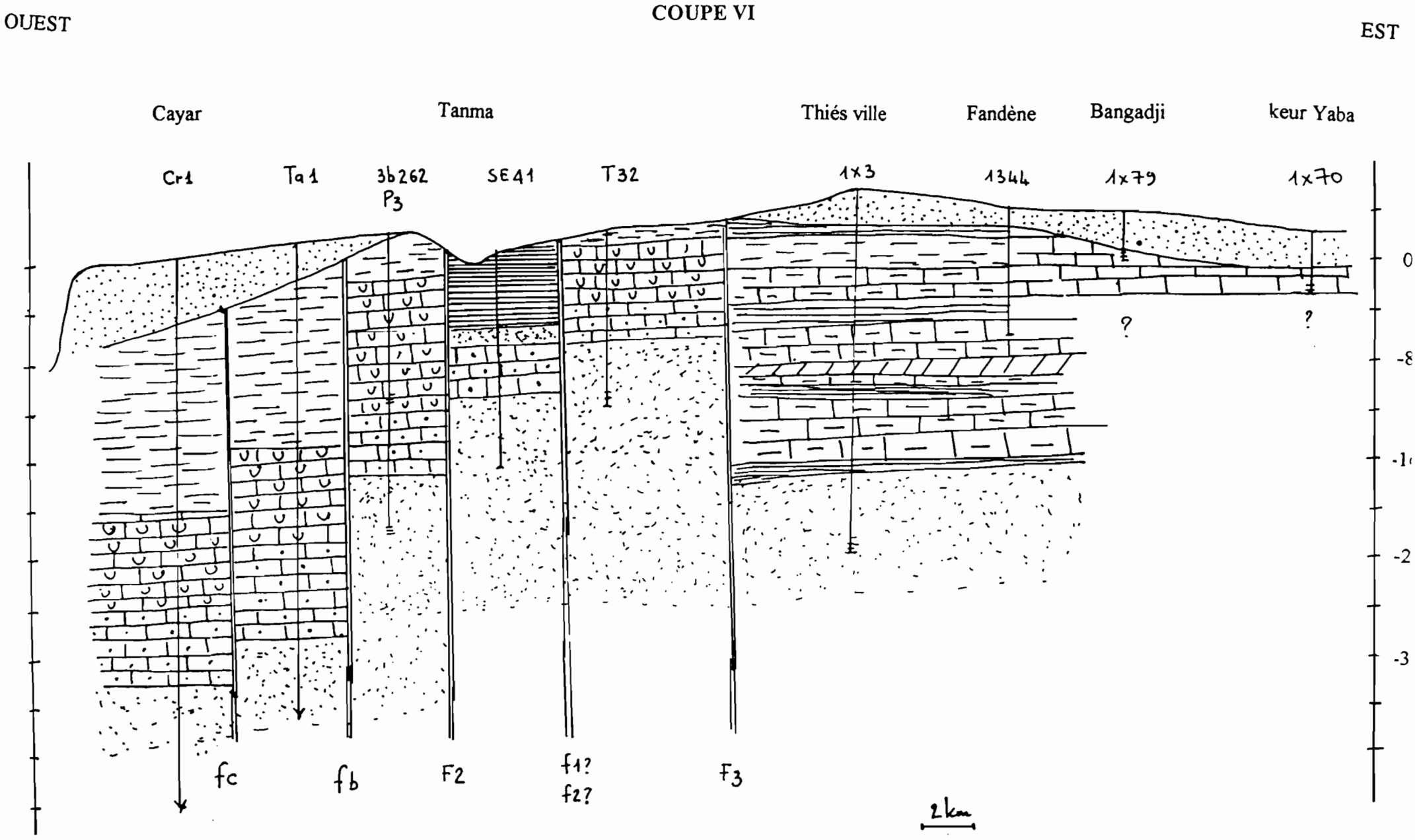


Fig. 17f - Corrélations lithologiques de Kayar à Keur Yaba.

On note donc une complexité de l'aquifère dans le secteur du horst de Ndiass.

En raison de la tectonique et de l'érosion fini-tertiaire, il existe en certains endroits une continuité hydraulique entre l'aquifère superficiel des sables quaternaires et les formations aquifères sous-jacentes.

Les formations sableuses du Quaternaire limitées à une frange littorale et au remplissage de cours de vallées fossiles, représentent un aquifère de moindre importance comparé aux calcaires paléocénes et aux sables maastrichtiens .

Les principales failles du horst qui ont été recoupées par les profils sont (coupes V, VI, et VII) :

- la faille de William Ponty-Kayar (F1)
- la faille de Sébikotane (F2).
- les failles de Fouloum et Ngomène (f1 et f2).
- la faille de la falaise de Thiès (F3).
- les failles supposées (fa, fb, et fc) à l'ouest du lac Tanma.

3.2 - Données des études géophysiques antérieures

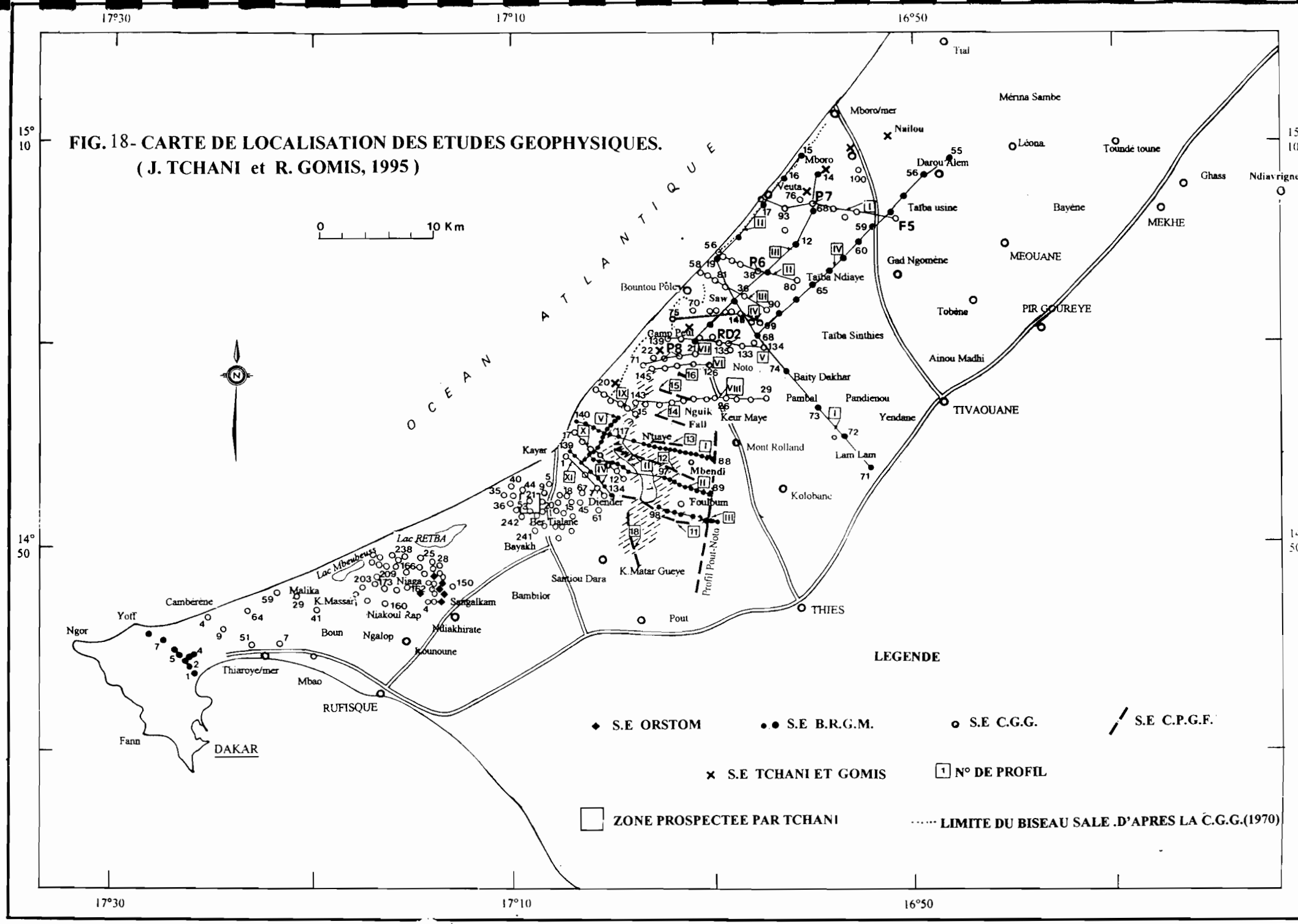
Le tableau 4 récapitule l'ensemble des études géophysiques qui ont été réalisées dans notre zone d'étude. Il en ressort que la méthode utilisée pour les besoins hydrogéologiques est celle des sondages électriques.

Les sondages électriques permettent de caractériser les terrains par leurs résistivités. Cette méthode a été utilisée essentiellement pour caractériser les niveaux salés de l'aquifère, et dans une moindre mesure pour estimer l'épaisseur des sables à eau douce.

Au total, 532 sondages électriques au moins, ont été réalisés dans le secteur : ce qui devrait constituer une quantité importante de données pour la connaissance de l'aquifère.

ANNEES	AUTEURS	STATISTIQUES	OBJECTIFS	EXPRESSION DES RESULTATS
1944 1945	CGG	274 SE en AB de 400 à 600m	étudier la nappe d'eau douce des sables quaternaires entre Dakar et Kayar délimiter l'invasion salée	carte de synthése: limite du biseau salé au mur de l'aquifére, isobathes du toit des marnes, zones à eau douce, zones argileuses et/ou saumâtres.
1965	CGG	19 SE	étude du biseau salé à Malika	coupe interpretative
1964 1967	CGG	? trainés électriques	étudier le mouvement du front salé au cours de pompages.	?
1970	CGG	76 SE	préciser le tracé des vallées fossiles de Sangalkam, Beer et Niague (forages d'exploitation) étude de la niaye de Mboro	cartes des résistances transversales et des épaisseurs des sables coupe électrique
1970	ORSTOM	SE	étude de Sangalkam	
1987	BRGM	9 SE en AB max de 300m	étudier la pénétration du biseau salé dans la presqu'île	Coupe électrique interpretative
1962	CGG	85 SE	délimiter les zones salées sur le pourtour du lac Tanma	_
1978	CPGF	trainés électriques	étudier la minéralisation de la nappe de remplissage du lac Tanma. Approche de la structure des calcaires dans la zone	cartes des résistivités apparentes en AB 6m et en AB 30m.
1987	BRGM	69 SE en 5 profils	identifier les zones aquiféres à Kayar-Tanma et Mboro-Taïba.	coupes géoélectriques interppretatives.

Tableau 4 - Répertoire des études géophysiques appliquées à l'hydrogéologie de la nappe des sables


17°30
17°10
16°50
15° 10
14° 50
FIG. 18- CARTE DE LOCALISATION DES ETUDES GEOPHYSIQUES.
(J. TCHANI et R. GOMIS, 1995)
0
10 Km
OCEAN ATLANTIQUE
N
Ttal
Mérina Sambe
Mboro/mer
Nailou
Léona
Toundé toune
Ghass
Ndiavrigne
Mboro
Veuta
P7
Darou Alem
Taïba usine
F5
Bayène
MEKHE
MEOUANE
Gad Ngoméne
R6
Taïba Ndiaye
Bountou Pôle
Saw
Tobène
PIR GOUREYE
Camp Peul
RD2
P8
Taïba Sinthies
Ainou Madhi
Noto
Baity Dakhar
Pambal
Pandienou
Yendane
TIVAOUANE
Nguik
Fall
Keur Maye
Mont Rolland
Lam Lam
Kayar
N'tiaye
Mbendi
Foulbum
Kolobane
Diender
Ber Tialane
Bayakh
Lac RETBA
Lac Mbeubeuss
Malika
K.Massari
Niaga
Sangalkam
Niakoul Rap
Bambilor
Santiou Dara
K.Matar Gueye
Profil Pout-Noto
Pout
THIES
Camberene
Yoff
Ngor
Boun
Ngalop
Mdiakhirate
Kounoune
Thiaroye/mer
Mbao
RUFISQUE
Fann
DAKAR
LEGENDE
S.E ORSTOM
S.E B.R.G.M.
S.E C.G.G.
S.E C.P.G.F.
S.E TCHANI ET GOMIS
N° DE PROFIL
ZONE PROSPECTEE PAR TCHANI
LIMITE DU BISEAU SALE .D'APRES LA C.G.G.(1970)

La méthode électrique est présentée dans l'annexe 1 avec l'exposé des principes, du matériel et de la mise en oeuvre des sondages électriques.

Les roches et les terrains en place sont différenciés par leur résistivité électrique. Celle-ci est essentiellement liée à la quantité et à la minéralisation de l'eau contenue dans ces terrains, et à la lithologie des terrains. A titre d'exemple, le tableau 5 montre que la résistivité des sables varie de 0,4 à 8000 ohm.m selon que les sables sont secs ou imbibés d'eau salée.

Formation	Résistivité (ohm.m)
sables secs	300 à 8000
sables à eau douce	50 à 150
sables argileux	25 à 50
sables à eau salée	0.4 à 1.3
marnes	2 à 10

Tableau 5: Résistivités des formations de la presqu'île (Breusse, 1952).

L'objectif du sondage électrique étant d'obtenir une coupe des terrains en terme de profondeur et de résistivité en ohm.m, les données géophysiques vont permettre de faire des corrélations dans les zones dépourvues de forages, et de repérer les niveaux salés dans la nappe des sables.

La figure n°18 indique la localisation des sondages électriques des différentes études. Nous allons d'abord présenter les principaux résultats de la géophysique par secteur.

3.2.1 - Secteur Ouest (de Thiaroye à Kayar)

Les données de la C.G.G en 1945 et en 1970 combinées avec celles de l'ORSTOM ont aboutit aux résultats suivants.

* Morphologie du substratum des sables aquifères

Le toit du substratum est entaillé par des vallées(ex: Sangalkam) et des cuvettes lacustres (ex: Thiaroye). Il s'agit d'une ancienne topographie d'érosion aujourd'hui couverte de dunes.

* Epaisseur des sables à eau douce

* Limite de l'invasion salée au mur de l'aquifère.

Elle a été tracée par rapport aux sondages électriques qui ont montré la présence de sables à eau salée sous les sables à eau douce. Elle forme une bande étroite le long du littoral et autour des lacs salés du nord.

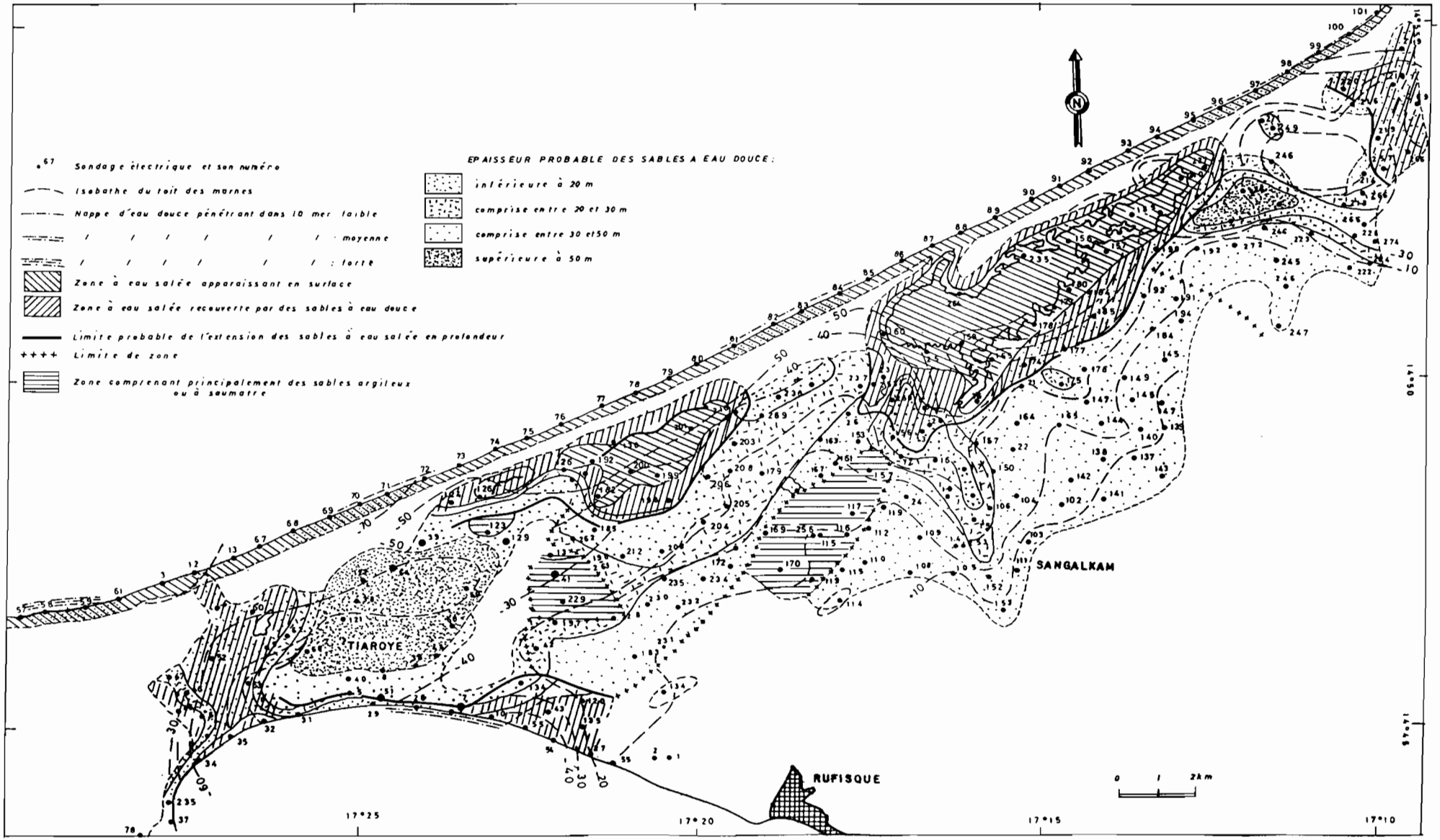
* Deux zones où la résistivité de l'aquifère est basse (moins de 50 ohm.m) à l'Est de Malika et à Niakoulrab. Ces zones peuvent correspondre en fait à des roches volcaniques très altérées (Elouard *et al*, 1976).

La figure 19 représente une synthèse des résultats de la CGG en 1945 (Breusse,1952).

Des études électriques postérieures (C.G.G., 1970) ont précisé les contours des vallées (CGG, 1970) fossiles mais n'ont pas été en mesure de suivre leurs cours jusqu'à la mer pour les principales raisons suivantes:

FIG. 19- CARTE DES RESULTATS DE LA PROSPECTION ELECTRIQUE
DE LA PRESQU'ILE DU CAP-VERT

D'APRES LA C.G.G 1952



- la présence de la dune littorale haute qui rend les mesures très difficiles (très résistant et épais) ;

- à l'approche de l'océan ou des lacs, la nappe d'eau douce est une lentille d'eau douce qui repose sur de l'eau salée. Les sondages de la C.G.G en 1965 à Malika (Mathiez *et al*, 1966) illustrent bien ce phénomène.

Les forages qui ont été réalisés à la suite des sondages ont montré que la nappe douce repose sur des eaux salées, alors que le substratum conducteur pouvait être assimilé aux marnes et argiles (10 ohm.m).

Ce résultat confirme en fait qu'en électrique, l'interface eau douce- eau salée est très souvent primordiale par rapport à l'interface lithologique

3.2.2 - Secteur centre (Tanma et ses environs)

Les coupes électriques et interprétatives du B.R.G.M. (1987) montrent l'existence des sables aquifères au nord et au nord-est du lac Tanma (cordon dunaire littoral), et au niveau des vallées fossiles, de Keur Maye (résistivité de 50 à 150 ohm.m) et de la faille de Ngoméne, encaissées dans les formations yprésiennes (fig. 20).

Ailleurs au sud, les formations quaternaires sont représentées par des sables argileux ou argiles sableuses (résistivités de 9 à 20 ohm.m).

Au niveau du cordon littoral l'aquifère est épais de 25m environ et repose sur des niveaux saumâtres ou salés (résistivité inférieures à 5ohm.m).

A Keur Maye son épaisseur dépasse 50m et il semble reposer sur les grès du maastrichtien tandis que sur la faille de Ngoméne il est épais d'une trentaine de mètres et repose sur les calcaires du paléocéne.

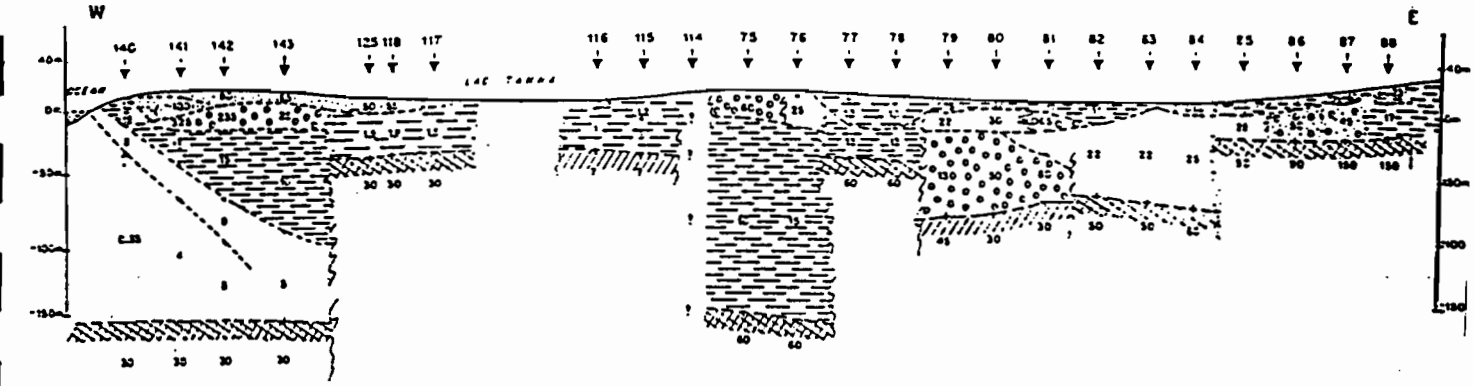
Les variations de profondeur (décalages) du substratum résistant (paléocéne ou maastrichtien ou faciès résistant de l'yprésien) décelées sur les coupes électriques coïncident généralement avec le tracé des failles Nord-Sud du horst de Ndiass.

3.2.3 - Secteur Est (Mboro-Taïba)

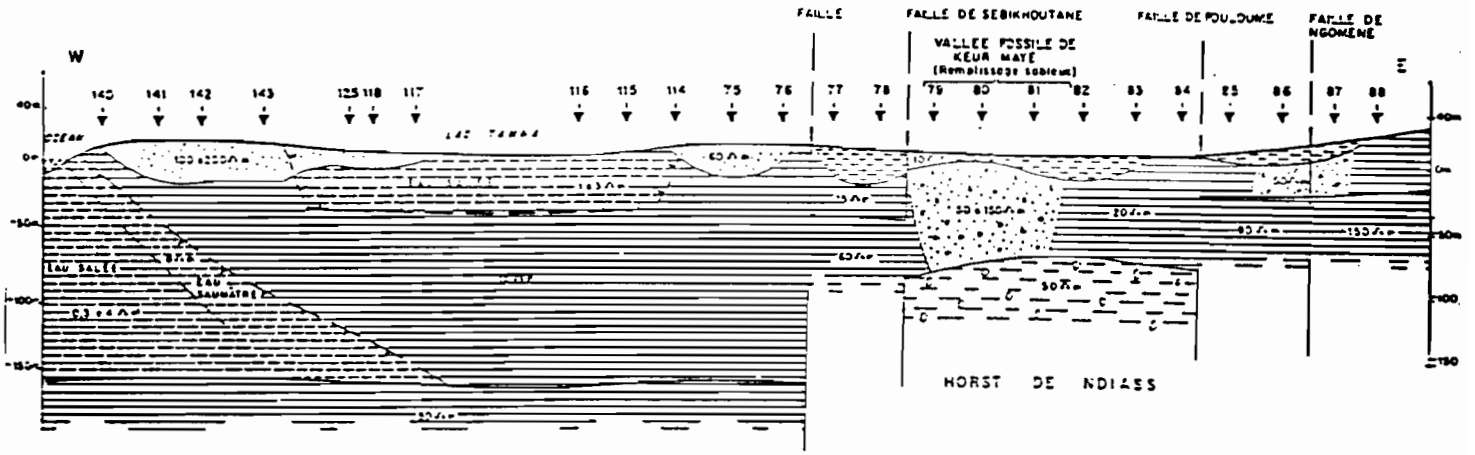
les sondages électriques de la C.G.G (1970) et du B.R.G.M. (1987) montrent généralement la succession suivante des terrains de haut en bas:

horizons électriques	résistivités en ohm.m
sables secs	1000
sables aquifères	100 à 250
marnes du Lutéine moyen ou inférieur	10 à 30
substratum résistant	50

Les sables aquifères du quaternaire s'épaississent d'ouest en est: leur épaisseur varie de 10m à 30 et 35m sur les profils 1 et 2 du B.R.G.M., (1987) (fig. 21).



COUPE INTERPRETATIVE
(D'APRES LES SONDAGES ELECTRIQUES)



INTERPRETATION GEOLOGIQUE

ECHELLE HORIZONTALE 0 500 1000m

SE31 — Sondage électrique et son numéro

100 — Résistivité des différents niveaux électriques

\+ — Profondeur des différents niveaux électriques

Substratum conducteur

Substratum resistant

< à 5 ohm. m. — horizon salée

5 à 20 ohm. m. — horizon saumâtre

20 à 50 ohm. m — horizon intermédioire

> à 50 ohm. m — horizon favorable

140 — Sondage électrique et son numéro

15Ω m — Résistivité des différents niveaux électriques en Ω m

Argiles de dégradation des attapulgites

Sable dunaire

Remplissage sableux de vallée fossile

QUATERNAIRE

Marnes-argile — EOCENE INFERIEUR

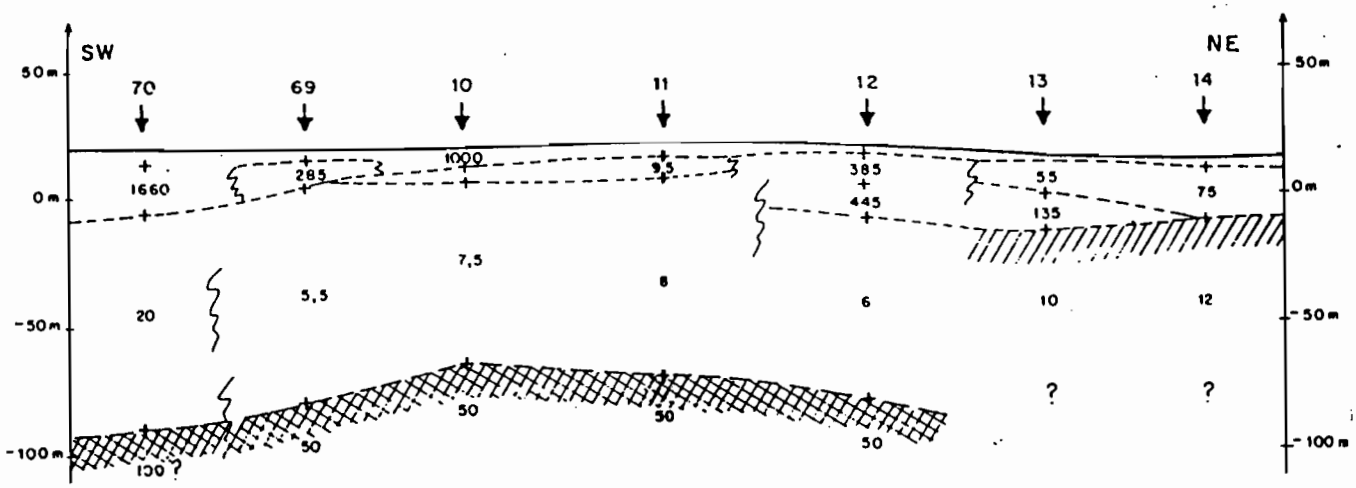
Calcaire — PALEOCENE

Grés argileux (Série Cap rouge — MAESTRICHTIEN

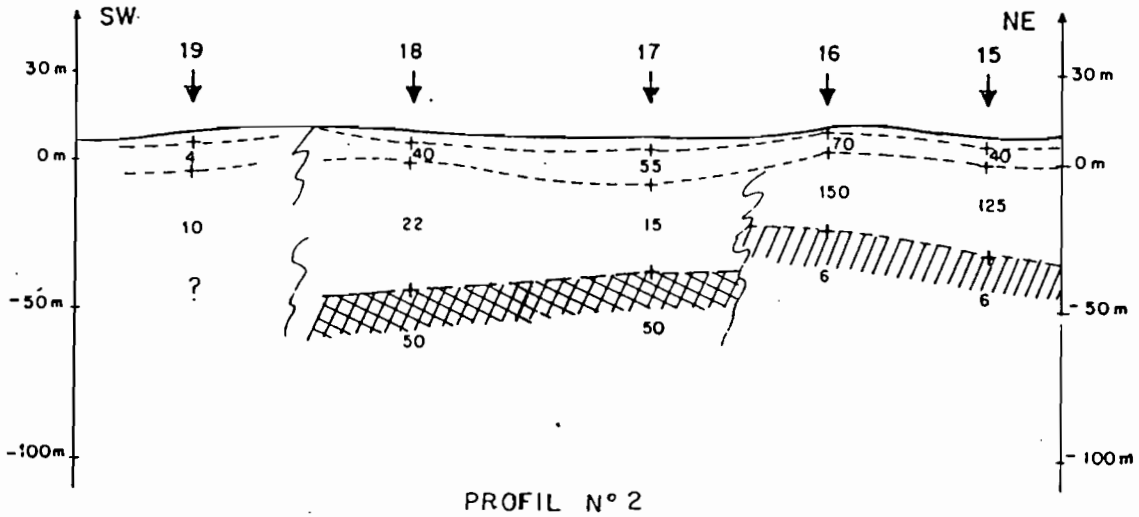
Faille

Limite d'invasion salée en profondeur

Fig. 20. Coupes géoélectriques dans le secteur du lac Tanma (B.R.G.M., 1987)



PROFIL N°3



PROFIL N° 2

SE 31 — Sondage électrique et son numéro

100 — Résistivité des différents niveaux électriques

\+ — Profondeur des différents niveaux électriques

Substratum conducteur

Substratum resistant

Echelle horizontale 0 2000 m.

Fig. 21. Coupes géoélectriques dans le secteur de Mboro (B.R.G.M.,1987)

3.2.4 - L'invasion saline dans les secteurs Centre et Est

La figure 18 montre également la "limite de l'invasion salée" (au mur de l'aquifère des sables) selon la C.G.G. en 1970. La zone contaminée forme une bande étroite le long de la côte avec des incursions dans les sites suivants :

- Bountou Polé situé au nord du lac de Mékhé
- Keur Laye, dépression interdunaire en relation avec le lac Tanma.
- Dyam Diek, situé au nord du lac Tanma
- à l'aplomb du lac Tanma.

A proximité de l'océan, l'invasion salée n'intéresse apparemment que les sables quaternaires, Les coupes électriques C.G.G/70 ne montrant de salure profonde qu'au niveau des sites suivants:

- Nord de Kayar
- Entre Diamdieuk et la faille de Sébikotane.

Dans ces sites les calcaires paléocénes ont une eau minéralisée (forages P4 et P8b avec des résidus secs de 1 à 1.5g/l (C.G.G., 1970).

Par contre les différentes études géophysiques du lac Tanma ont montré que la salure du lac s'étend en profondeur de 70 à 80m. L'invasion salée n'épouse pas les contours du lac : elle les déborde au nord-est et au sud-est.

Cependant les terrains sont dessalés loin vers l'intérieur du lac à partir de la région de Thiaye- Keur Maye où débouchent les vallées fossiles.

Les travaux géophysiques de Toguyeni, (1986) ont montré dans cette zone, l'accroissement progressif des résistivités vers l'est et la pente vers l'est des terrains de plus faible résistivité. Ce qui suggère selon l'auteur l'existence d'un coin salé ancien progressivement lessivé par l'écoulement produits par les sources situés à l'est.

La zone salée profonde du lac semble aussi être en relation avec le canyon fossile de Kayar.

3.3 - Etude électrique dans la zone côtière de Naïlou à Diamdiek

Les mesures qui ont été effectuées en janvier 1994 dans le cadre de ce mémoire ont consisté en la réalisation de 9 sondages électriques en AB de 700 à 800m, distants de 4 km au maximum de la côte. Les sondages électriques sont disposés en continuité avec le profil II du B.R.G.M., (1987) dans la zone de Noto-Mboro (fig.18).

L'objectif de cette prospection était de:

- déterminer l'épaisseur des sables aquifères dans cette zone ;
- déterminer la profondeur et la nature du substratum de l'aquifère des sables ;

- Avoir des renseignements sur l'évolution du front salé, par rapport au tracé de la C.G.G en 1970. Les secteurs signalés par la C.G.G. ont été principalement ciblés au cours de cette campagne.

Disposer les sondages en profils perpendiculaires à la côte aurait demandé beaucoup plus de moyens tandis que les traînés électriques, bien que rapides ne permettent pas d'obtenir des renseignements quantitatifs.

Les sondages qui sont distants de 6 km (cf. fig.18) devraient surtout mettre en évidence les variations électriques à grande échelle et un repérage non exhaustif des unités électriques. Les courbes de sondages sont présentées en Annexe IV-a.

3.3.1 - Description des sondages.

** Sondage de Diamdiek (DDIEK)*

Il a été implanté dans une dépression marécageuse, lagunaire au nord-est du lac Tanma. Son interprétation montre des horizons superficiels très conducteurs (1 à 10 ohm.m) qui indiquent que nous sommes dans endroit salé et/ou argileux.

** Sondage de Gadiaga (GD)*

A partir d'une distance AB/2 égale à 20m, les mesures sont difficiles et on note une dispersion typique qui suggère la présence d'un niveau très résistant.

Nous avons interprété deux tendances qui se sont dégagées de la courbe de mesure. Leur interprétation donne :

- des niveaux très résistants en surface avec des résistivité de 2300 à 1700 ohm.m qui caractérisent les sables secs, épais de 5m ;

- un résistant intermédiaire (200 ohm.m) épais de 23m qui peut correspondre à la nappe des sables du littoral nord, le céane le plus proche du sondage montre la profondeur de l'eau à 7m ;
- un substratum conducteur qui peut être de 30 ohm.m (modèle A) ou de 10 ohm.m (modèle B).

** Sondage de «Keur Laye»*

Ce sondage est implanté dans la localité de Gouye Laye, au nord-ouest de Noto. Le modèle retenu est le suivant :

- en surface, un horizon de 150 ohm.m épais de 3.5m qui correspond à des sables argileux superficiels ;

- un horizon de 40 ohm.m épais de 10m qui devrait correspondre à la nappe des sables relativement saumâtre et/ou argileuse ;

- un horizon conducteur épais de 46m, sans doute les marnes du Tertiaire ;

- un substratum résistant de 100 ohm.m qui devrait correspondre aux calcaires paléocène ou à un faciès résistant de l'Eocène.

** Sondage de Bontou Polé- Gouye laye (BPKL)*

Il est situé 4 km à l'Est du sondage de Gouyelaye. Ce sondage n'est interprétable que pour une longueur de ligne AB/2 de 80m. Le modèle retenu est le suivant :

- un horizon résistant de 1950 ohm.m et épais de 1m ;

- un horizon de 260 ohm.m épais de 2.5m qui peut correspondre à l'aquifère des sables ;

- un horizon conducteur de 38 ohm.m épais de 7m ;

- un substratum résistant de 950 ohm.m. Ce substratum très résistant et relativement épais a limité notre investigation.

** Sondage de Bountou Polé*

Il est distant de 2.5 km environ de la mer. Son interprétation permet de distinguer ;

- des horizons résistants de (5500 à 1100 ohm.m) en surface, correspondant aux sables dunaires secs épais de 4m ;

-un résistant intermédiaire de 200 ohm.m qui devrait correspondre à l'aquifère des sables quaternaires épaisse de 24m ;

- et un substratum conducteur de 20 ohm.m ;

** Sondage de Veuta*

Ce sondage situé dans la même localité que le forage P7 représente un forage d'étalonnage. L'interprétation de ce sondage est basée sur la coupe du forage. On distingue :

- des horizons de résistivité supérieure à 400 ohm.m en surface, qui correspondent au sables secs ;

- un horizon de 100 ohm.m épais de 16m, sans doute l'aquifère des sables du littoral nord ;

- un horizon conducteur (15 ohm.m) épais de 200m correspond aux marnes éocènes ;

- et un substratum résistant de 100 ohm.m qui correspond aux calcaires paléocènes.

** Sondage de Ndeune*

Distant de 1 km de la mer, il est situé entre les sondages SE15 et SE16 du profil II du B.R.G.M.(1987). Le résultat de l'interprétation est le suivant :

-2 horizons superficiels très résistants (10500 et 2700 ohm.m),épais de 6.5m ;

- un résistant intermédiaire (200 ohm.m)épais de 25m, sans doute la nappe des sables du littoral nord ;

- et un substratum conducteur de 12 ohm.m.

** Sondage de Mboro Khondio*

Les forages de Mboro situent la profondeur du substratum marno- calcaire à 30m. L'interprétation du sondage est le suivant :

- un horizon de 380 ohm.m qui peut correspondre à des sables mouillés en surface ;

- deux horizons probablement aquifères de résistivité 78 et 180 ohm.m ;

- un substratum conducteur de 28 ohm.m à une profondeur de 27m.

** Sondage de Naïlou*

Le sondage est situé à 3 km ouest de ladite localité. Le modèle retenu est le suivant :

- Un horizon conducteur en surface (7 ohm.m) qui peut correspondre à des argiles ou à une nappe saumâtre superficielle épaisse 1.5m ;

- Un horizon de 98 ohm.m épais de 38m, sans doute la nappe des sables du littoral nord relativement épaisse ;

- Et un substratum conducteur de 28 ohm.m.

3.3.2 - Résultats et discussions

La coupe interprétative du profil Naïlou- Diamdiek (fig.21) montre 4 horizons électriques. La corrélation avec les coupes des forages recoupés par la coupe géoélectrique devrait permettre d'identifier des niveaux repères.

Les sondages étant distants de 6m, la corrélation devrait ressortir les grandes tendances bien que des erreurs de corrélation puissent exister. On distingue :

un horizon très résistant de 1000 ohm.m ou plus en surface, caractéristique des sables éoliens secs. Son épaisseur sur le profil varie de 1 à 7m ;

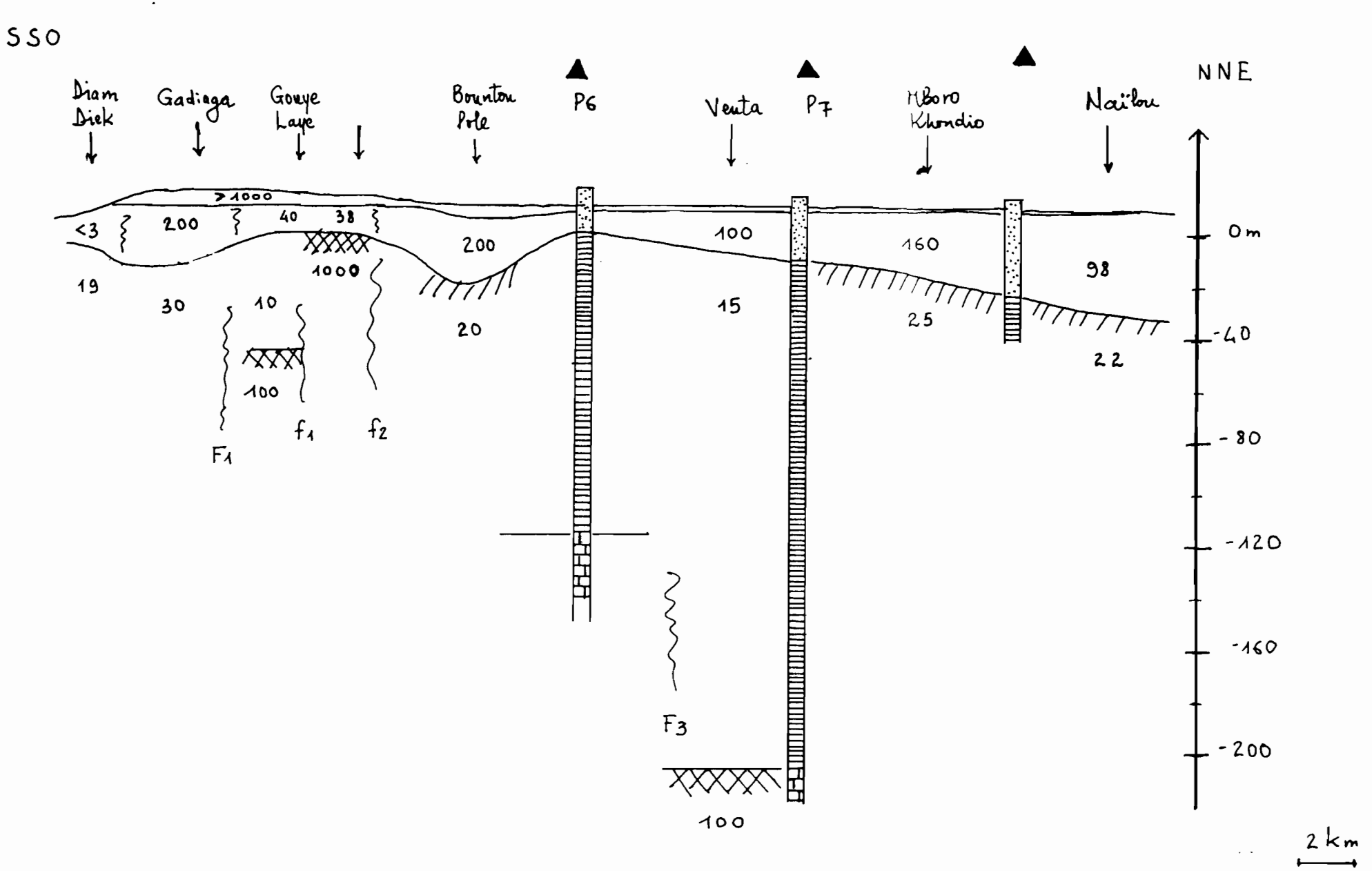


Fig. 22. Coupe géoélectrique interprétative du secteur de Naïlou-Diamdièk

un horizon de résistivité 100 à 200 ohm.m caractéristique de l'aquifère des sables. Il s'agit, sans doute, de la nappe du littoral nord dont l'épaisseur varie ici de 10 à 38m ;

sa résistivité tomberait à 40 ohm.m dans le secteur de Gouye laye témoignant ainsi d'une minéralisation et/ou un enrichissement en argile ;

Un substratum conducteur (10 à 30 ohm.m) qui devrait correspondre aux formations marneuses de l'éocène.

Et un substratum résistant (100 ohm) mis en évidence au niveau des sondages Keur Laye qui passe à 1000 ohm.m au sondage BPKL. Cet horizon résistant peut correspondre aux calcaires paléocénes qui ne sont pas très profond dans ce secteur (50m selon forages S4 et RD2).

Concernant l'invasion saline, seul le sondage de Diamdiek a mis en évidence sans aucun doute la présence d'horizons salés superficiels (moins de 3ohm.m).

La corrélation entre le substratum conducteur et le substratum marneux éocéne, et l'absence d'un substratum de résistivité inférieur à 3 ohm.m sont des arguments en faveur de l'absence de sables à eau salée sous l'aquifère, mais n'exclut pas la présence de niveau saumâtres au mur de l'aquifère.

C'est dans le secteur de Mboro que l'on note une plus grande épaisseur de l'aquifère (30m au moins). Dans cette localité, les sondages de notre étude ont donné une résistivité de 20 ohm.m pour le substratum conducteur. La position du substratum se corrèle bien avec le toit des marnes.

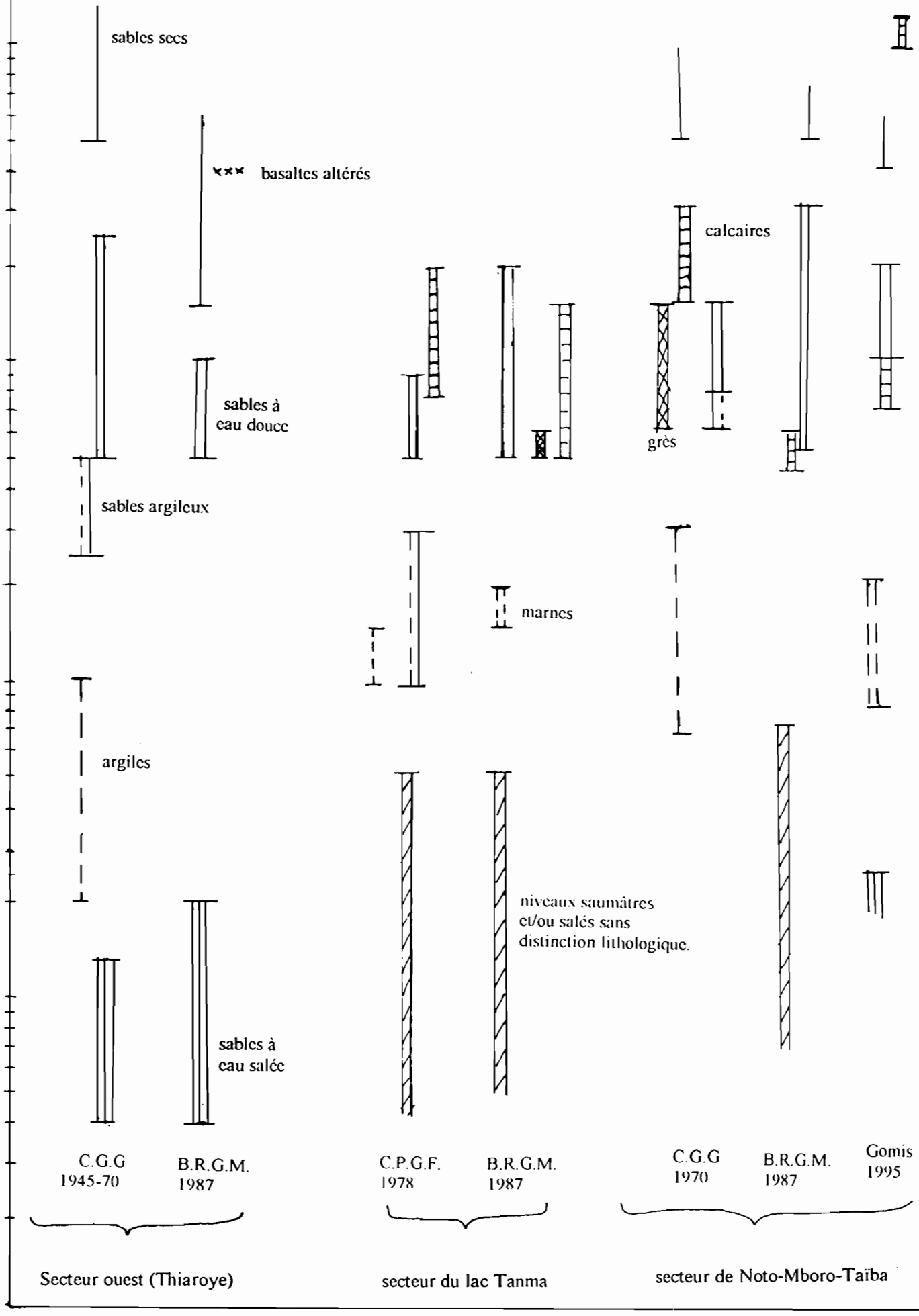
L'interprétation des sondages 13, 14, 15, 16 et 19 du B.R.G.M. (1987) dans ce secteur a montré par contre la présence d'un substratum conducteur (6 à 12 ohm.m) qui a été attribué au biseau salé en profondeur.

Les travaux récents de Diouf (1995) par contre ne notent pas la présence du biseau salé, mais une remontée progressive des marnes.

3.4 Comparaison des données des différentes études

Le graphique de la figure 23 illustre les échelles de résistivités adoptées par les différentes études géophysiques entreprises dans notre secteur d'étude. On constate que ces études réalisées à des époques différentes ont donné des échelles de résistivités similaires pour les différentes formations. Cette constatation nous autorise à faire une compilation de ces données.

Fig 23 - Echelles de résistivités des formations d'après les différentes études dans le secteur.



B- SYNTHESE DES DONNEES DE FORAGES ET DE SONDAGES GEOPHYSIQUES: CARACTERISATION DE LA GEOMETRIE DU RESERVOIR

L'association des données de sondages mécaniques (forages et de sondages électriques) permet de mieux couvrir la zone d'étude.

Si les niveaux salés sont bien caractérisés par l'électrique, ils ne sont pas toujours identifiés comme tel par les sondages mécaniques. Par ailleurs le niveau piézométrique n'est parfois signalé ni par l'une, ni par l'autre des deux méthodes. Il est donc nécessaire d'extrapoler avec les données piezométriques dans les zones de forages et de sondages électriques.

On peut ainsi avoir pour des sites de coordonnées géographiques X et Y données, des données telles que :

* ***la profondeur du substratum marneux argileux des sables aquifères***.

Elle sera déduite des coupes lithologiques des sondages mécaniques mais aussi des données des sondages électriques dans les zones dépourvues de forages. Nous considérerons que le substratum géoélectrique de résistivité supérieure ou égale à 10 hm.m correspond au substratum des sables aquifères bien que cette résistivité puisse correspondre à des eaux saumâtres.

* ***l'altitude des points***

On peut l'obtenir à partir de la carte topographique IGN* lorsque le rapport de l'ouvrage ne donne pas sa côte. Nous avons utilisé les cartes au 1/50000 : ce qui limite la précision des cotes.

* ***le niveau piézométrique*** à partir des données piézométriques.

* ***la profondeur du substratum salé,***

* ***les résistivités de l'aquifère des sables et de son substratum***, grâces aux données des sondages électriques.

Ces données peuvent être traitées par le logiciel Surfer. Ce logiciel (Golden software) permet de tracer des cartes d'isovaleurs à partir de points de mesure irrégulièrement répartis dans l'espace. Sa section de calcul offre différentes méthodes d'interpolation pour le calcul des isocontours. La courbe d'isovaleur obtenue peut varier en fonction de la méthode d'interpolation choisie.

Nous avons utilisé la méthode du krigeage qui est théoriquement la meilleure. Elle utilise une technique géostatistique pour calculer une autocorrélation entre les données des points et produit une variance minimale.

3.5 - Carte des isohypses du mur de l'aquifère (fig.24)

Elle a été tracée à partir d'un fichier contenant 426 points de données.

Elle montre que le toit du substratum s'enfonce généralement en direction de l'océan au nord (les courbes isohypses décroissent du sud vers le nord). A cette allure se superposent des cuvettes et des chenaux qui semblent se jeter en direction de l'océan ou des lacs salés du nord (courbes isohypses perpendiculaires à l'océan). On peut distinguer deux zones séparés par le méridien du lac Tanma.

**** Zone Ouest*** :

La côte du substratum varie de +10 au sud pour atteindre la côte de -50 à -60 à l'approche de l'océan. Dans ce secteur, le substratum est en général à une altitude négative.

Les dépressions du toit du toit du substratum sont :
la cuvette de Thiaroye (A) ;

la vallée de Sangalkam (B) ;

la dépression de Niague (c) ;

la cuvette de Beer (D) ;

et la dépression (fosse) de Kayar (E).

Zone Est:

La côte du substratum varie de +60 aux environ de Lam Lam (au sud) à -20 vers l'océan. Dans ce secteur l'altitude du substratum est généralement positive et les dépressions que l'on note n'atteignent guère la côte -30. Il s'agit de:

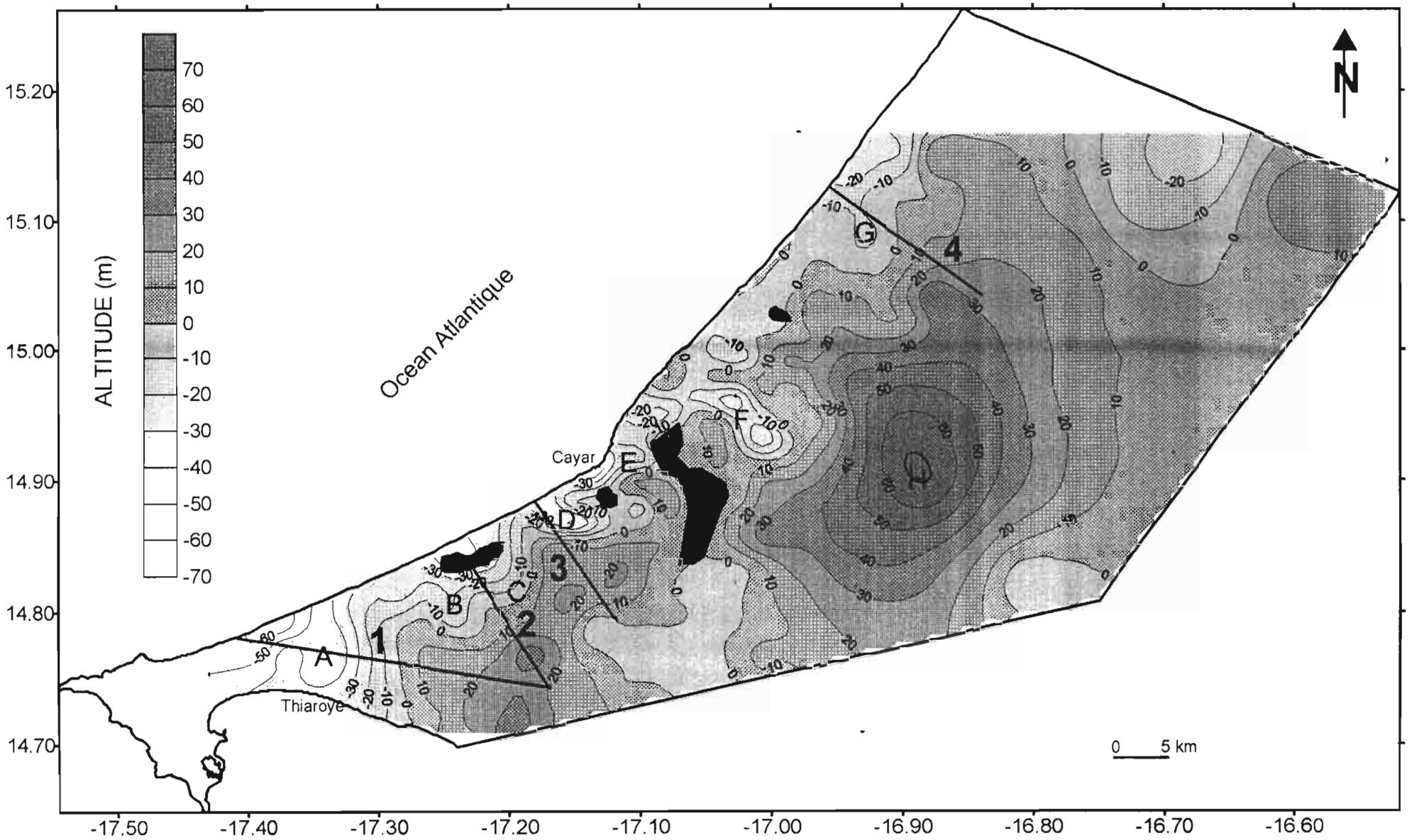
- la dépression (F) ouverte en direction de l'océan traduit les "vallées fossiles de Keur Maye et de la faille de Ngomène" ;

Elle est ici unique et ne semble pas déboucher au lac Tanma contrairement au schéma proposé par MARTIN (1970) (fig.25).Ce qui peut s'expliquer par l'absence de données suffisantes : les eaux du secteur du lac étant très minéralisées, tout ce secteur forme une zone conductrice (souvent sans distinction des interfaces lithologiques).

- la dépression de Mboro (G) ;

- La grande structure au sud-est du lac (H) avec des cotes positives illustre le plateau marneux de Thiès qui bordent la rive est du lac. Elle est conforme avec les données des coupes géologiques IV et V. Dans ce secteur les marnes affleurent.

Fig.24: Carte des isohypses du mur de l'aquifère



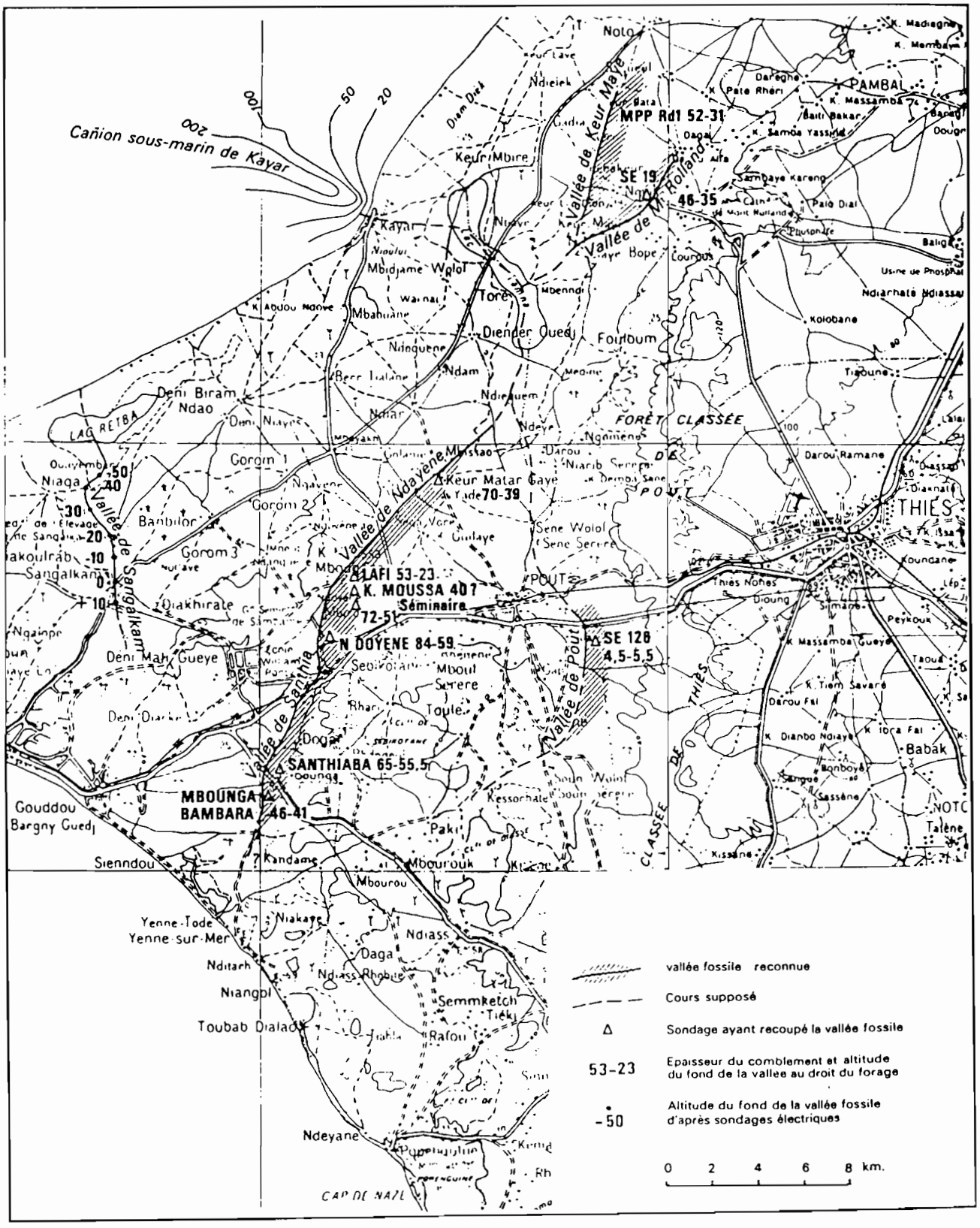


Fig. 25 Le réseau hydrographique quaternaire (Martin, 1970).

3.6 - Carte des épaisseurs de l'aquifère des sables (fig.26)

Cette carte qui a été faite à partir d'un fichier de 300 points de mesure montre que l'épaisseur de la nappe varie de 10 à plus de 34m selon les secteurs.

En la superposant à celle des isohypses du substratum, on constate que l'épaisseur de la nappe est en relation avec la morphologie du toit du substratum.

.

Dans la secteur ouest (de Thiaroye à Kayar) où l'aquifère des sables quaternaires est plus important, l'allure des isopaches plus ou moins parallèles à la côte montre que l'aquifère s'épaissit en direction de l'océan.

Donc la décroissance des isopièzes du sud vers le nord (+20 à 0) s'explique par la remontée du substratum imperméable marneux éocène.

Dans le secteur de Tanma- Noto, à la faveur de la remontée du substratum marneux la nappe est réduite au cordon dunaire externe et à la zone des vallées fossiles (Keur Maye et Ngoméne). Son épaisseur varie de 14 à 22m environ.

Dans le secteur de Mboro, les isopaches sont relativement perpendiculaires à la côte et s'accroissent vers le nord et le nord-est. L'épaisseur des sables ne dépasse pas 30m.

3.7- Carte des résistivités des sables à eau douce (fig.27)

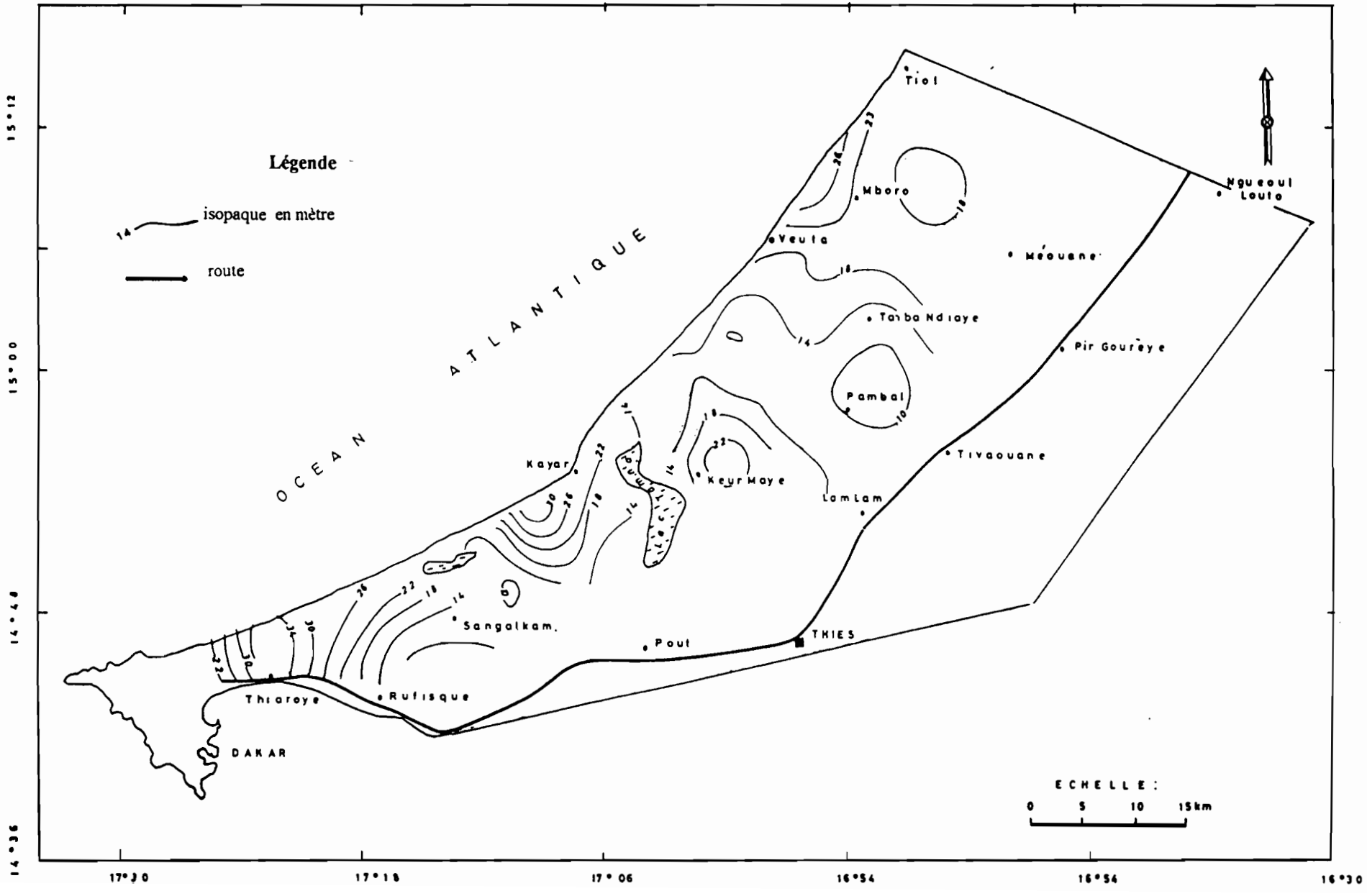
La résistivité de l'aquifère est directement liée à la minéralisation mais aussi à la teneur des sables en argile. Une augmentation de la résistivité de l'aquifère indique une bonne qualité de l'eau et/ou une diminution de sa teneur en argile : donc une bonne perméabilité.

Selon la C.G.G.(1970), une résistivité des sables quaternaires supérieure ou égale à 80 ohm.m peut indiquer une eau de 16 ohm.m donc contenant 0.3g de Nacl par litre: valeur acceptable pour une eau potable.

La carte des isorésistivités montre que la résistivité des sables aquifères est en général supérieur à 80 ohm.m sauf à l'approche des lacs Retba et Tanma. Ceci peut être le résultat d'une pollution par la nappe salée de ces lagunes. Les coupes de forages montrent aussi un enrichissement des sables en argile à l'approche des lagunes.

Il faut être prudent cependant dans la lecture de cette carte car les données datent de 1945 à 1995. Entre temps, il est bien possible que la qualité de la nappe ait changé dans certains secteurs. Des études chimiques récentes (Gaye et al 1986) ont trouvé que la nappe est très minéralisée dans certains secteurs.

Fig. 26- Carte des épaisseurs de l'aquifère des sables quaternaires, de Thiaroye à Tial, (J. Tchani, et R. Gomis, 1995).



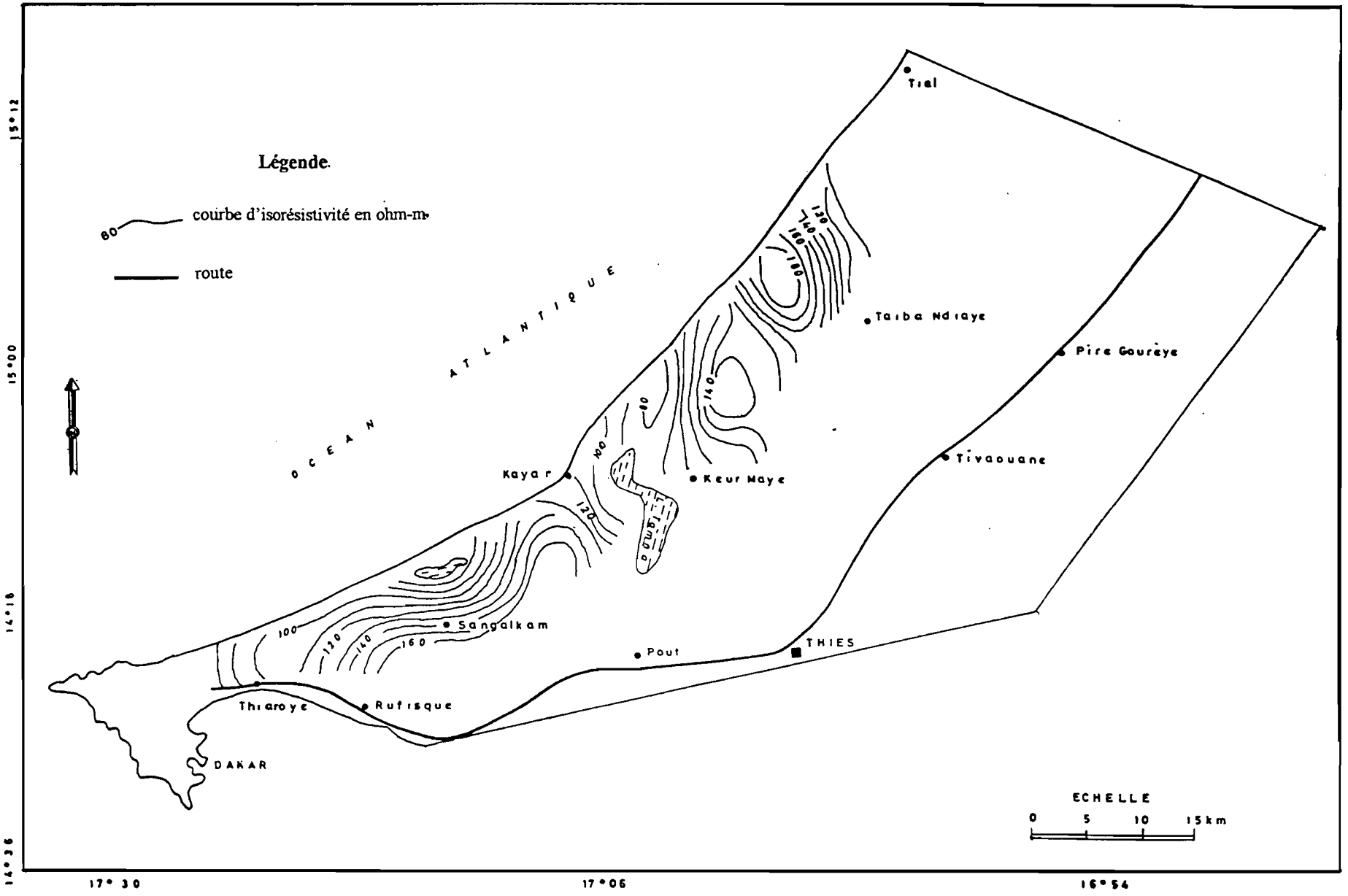


Fig. 27 - Carte des résistivités des sables à eau douce, de Thiaroye à Tial (J. Tchani et R. Gomis, 1995).

Conclusion

L'épaisseur de l'aquifère superficielle des sables quaternaires dépend de la morphologie de son substratum imperméable. Cette morphologie du substratum est en relation avec la tectonique régionale et l'érosion fini- tetiaire.

Au niveau du grabben de Rufisque (de Thiaroye à Kayar) en effet, le substratum plonge du sud vers le nord et l'aquifère plus est épais: alors que au niveau des horsts de Dakar et de Ndiass , la remontée du substratum marneux imperméable rend l'aquifère presque inexistant.

Le toit des marnes du Tertiaire présente des dépressions, véritables vallées qui ont été par la suite comblées par les sables quaternaires.

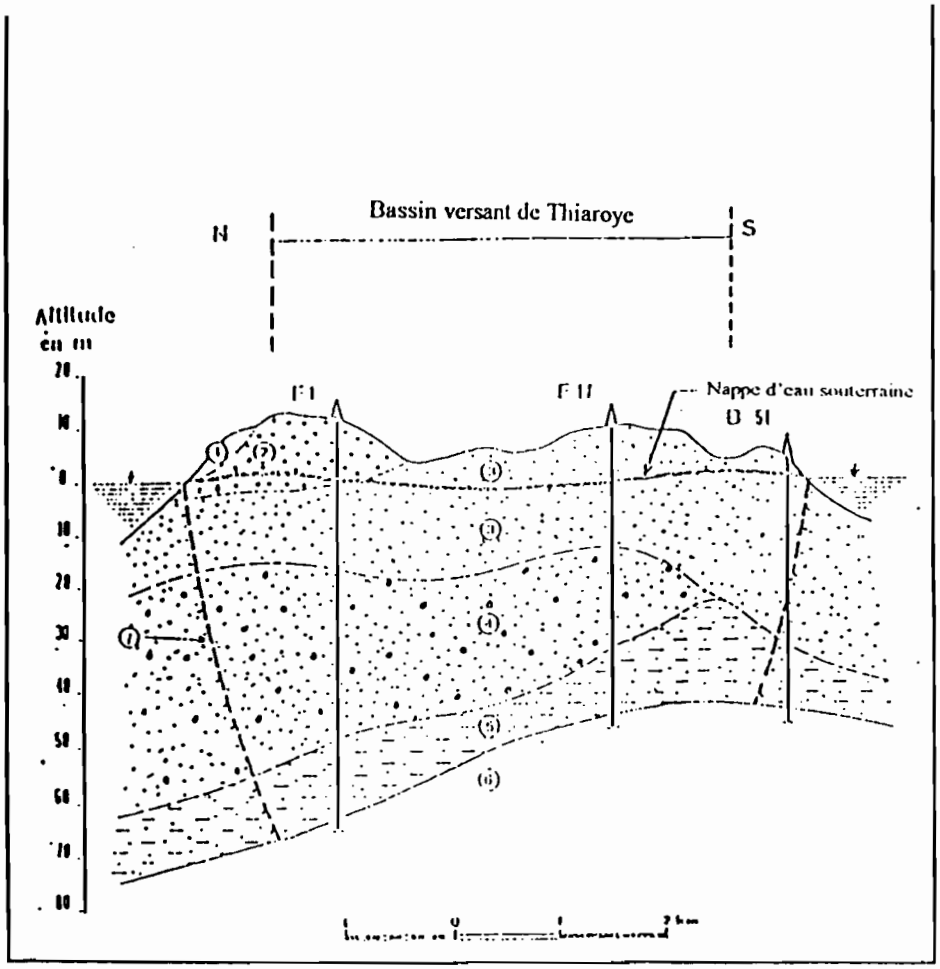
Ces paléo-vallées, zones de captages potentielles, qui communiquent avec la mer et/ou les lagunes salées du nord ont le désavantage d'être des couloirs favorisant la contamination de la nappe :. le cas de Beer Tialane (Tchani, 1996) est un exemple. Et ceci d'autant plus que la nappe est plate (dans sa partie la plus épaisse et la plus perméable) avec une cote piézométrique voisine de zéro.

La baisse de la résistivité de l'aquifère à l'approche des lacs salés et de la mer semble le confirmer.

Une carte de la résistivité du substratum de l'aquifère nous aurait permis de mieux illustrer ce phénomène. Nous n'avons malheureusement pas pu l'établir, faute de données suffisantes dans le secteur ouest (de Thiaroye à Kayar).

Le secteur de Thiaroye est le plus frappant car la nappe est limitée au nord et au sud par l'océan et les cotes piézométriques varie de +0.5 à -2 au niveau des forages (cf. Fig.14). La coupe hydrogéologique (fig.27) montre que la majeur partie de l'aquifère se trouve sous le niveau de la mer, et que la nappe est en contact direct avec ma mer au nord et sud.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude électrique de ce secteur.



Légende

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

Fig.27b - Coupe hydrogéologique de la nappe de Thiaroye (Martin, 1970).

CHAPITRE 4

ETUDE PAR PROSPECTION ELECTRIQUE DE LA NAPPE DES SABLES QUATERNAIRES DANS LE SECTEUR DE PIKINE- THIAROYE

A la suite de l'analyse et de la compilation des données de forages et de celles obtenues par la géophysique, réalisées sur une zone relativement vaste, et présentées dans le chapitre précédent, plusieurs secteurs sensibles de la nappe des sables quaternaires se dégagent.

Nous avons choisi d'étudier l'un d'entre eux, proche de Dakar : le secteur de Pikine-Thiaroye. Ce secteur est considéré comme sensible car :

- il participe à l'alimentation en eau des populations de l'agglomération de Dakar, dans certains quartiers populaires (Guinaw rail, Yeumbeul,etc...) il existe des populations qui s'alimentent par des puits traditionnels tandis que l'eau de la nappe est utilisée pour le maraîchage dans les niayes ;

- c'est un secteur proche des côtes - à la longitude de Cambérène, la presqu'île est une bande large de 5km limitée au nord et au sud par l'océan Atlantique - ce qui pose le problème du biseau salé au niveau des deux côtes ;.

- l'aquifère est recouvert en surface par des sites industriels (zone franche industrielle), et des quartiers se sont développés (Pikine, Thiaroye, Guédiawaye, etc...) ;

- la nappe est libre et sub-affleurante au niveau de la grande niaye, ce qui fait qu'elle est exposée à la pollution directe ;

- ce secteur se situe à la jonction de deux «systèmes aquifères»: la nappe infrabasaltique et la nappe de Thiaroye.

Le but de cette étude géophysique est multiple. Il s'agit:

- d'évaluer la possibilité de mettre en oeuvre des sondages électriques en milieu quasi-urbain, et ce à faible coût ;

- de dresser les caractéristiques géoélectriques des différents terrains et de les illustrer sous forme de coupes et de cartes.

- de confronter les résultats obtenus à celles d'études antérieures.

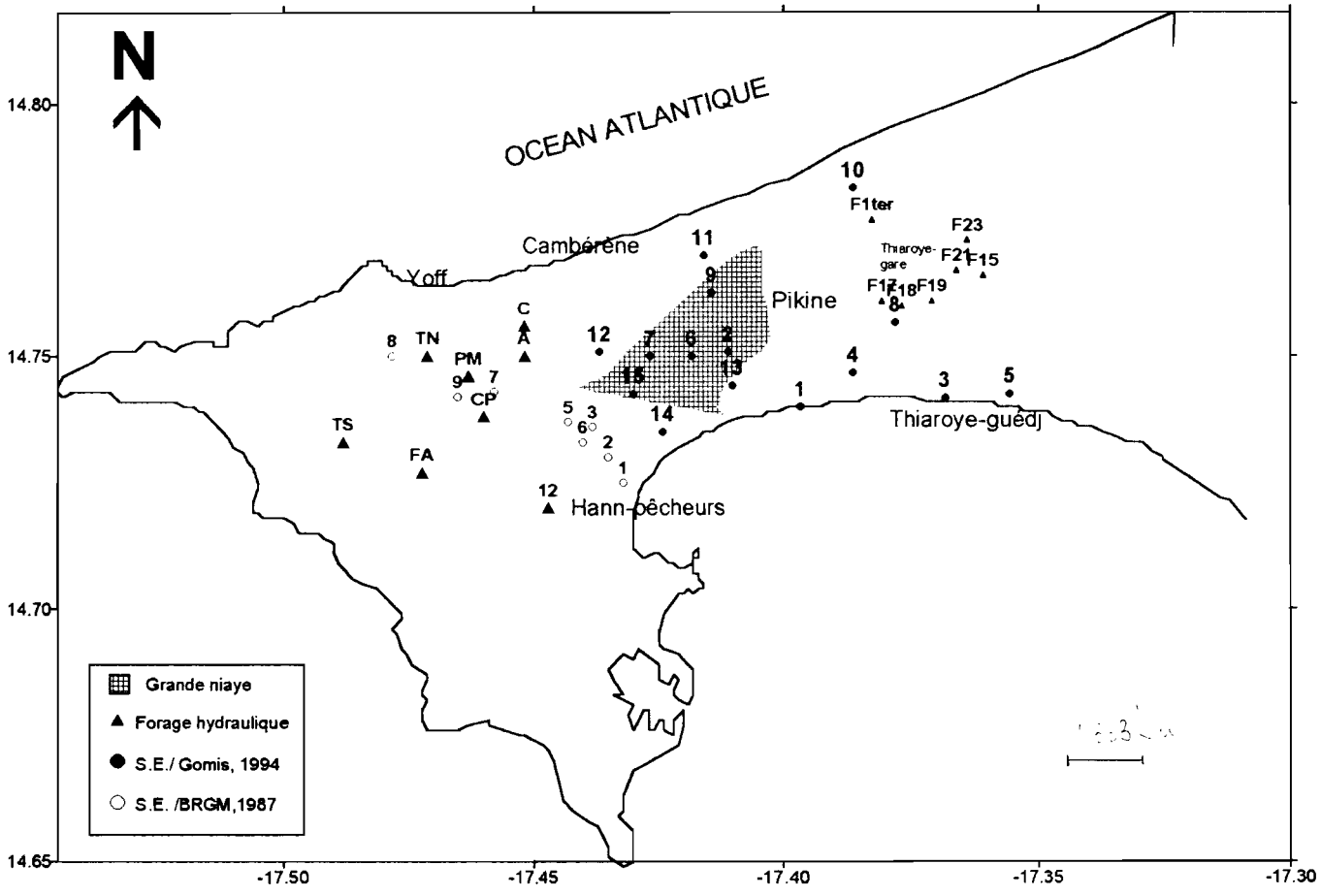


Fig.28 - Situation des sondages électriques dans le secteur de Pikine-Tiaroye.

4.1 - Acquisition de données

4.1.1 - Contraintes techniques et urbaines

La réalisation de sondages électriques fiables en zone urbaine n'est pas facile. En plus du manque d'espace pour avoir des longueurs de ligne AB suffisantes, beaucoup de paramètres peuvent altérer les mesures au delà des contraintes techniques habituelles. On peut citer les conduites, les décharges et les fosses enterrées.

Les conduites métalliques enterrées peuvent perturber profondément les sondages lorsqu'elles ne sont pas isolées.

Avec une ligne AB perpendiculaire à la conduite, seule la mesure pour laquelle A ou B tombe à sa proximité est faussée. Mais si la ligne AB est parallèle à la conduite, la perturbation (diminution de la résistivité apparente) augmente au fur et à mesure que cette ligne est allongée, et bien que sérieusement faussée, le sondage a une allure régulière.

La perturbation est en générale négligeable si la distance à la conduite est supérieure à AB/2 (Astier, 1971).

Les réseaux d'adduction d'eau de la SONEES* ont été le principal obstacle à la réalisation de mesures sur des sites initialement prévus au cours de la mission de reconnaissance. Non seulement ils pouvaient fausser les mesures mais on risquait d'y planter les électrodes.

4.1.2 - Situation des sondages électriques

15 sondages électriques ont été réalisés au terme de la campagne qui s'est déroulée en décembre 1994. Les sondages 1, 2 ,3 et 10 sont situés dans la nappe de Thiaroye alors que le reste est implanté dans la niaye de Pikine-Dagoudane (fig. 28).

Cette dernière zone sépare la nappe infrabasaltique à l'ouest et la nappe de Thiaroye à l'est : toutes sont dans les sables du Quaternaire qui reposent sur les marnes et argiles de Eéocène.

4.2 - Résultats et interprétation des mesures électriques

4.2.1 - Les cartes d'isorésistivités apparentes.

Elles illustrent les résultats bruts avant l'interprétation. Nous avons imposé une contrainte 1 ohm.m au niveau du littoral.

La carte en AB/2= 30m (fig. 29a) est influencée par les terrains superficiels (profondeur de 3m au moins) alors que celle en AB/2=100m (fig. 29b) atteint des profondeurs d'investigations plus importantes (10m au moins) et est influencée par tous les terrains superficiels. Toutes deux montrent :

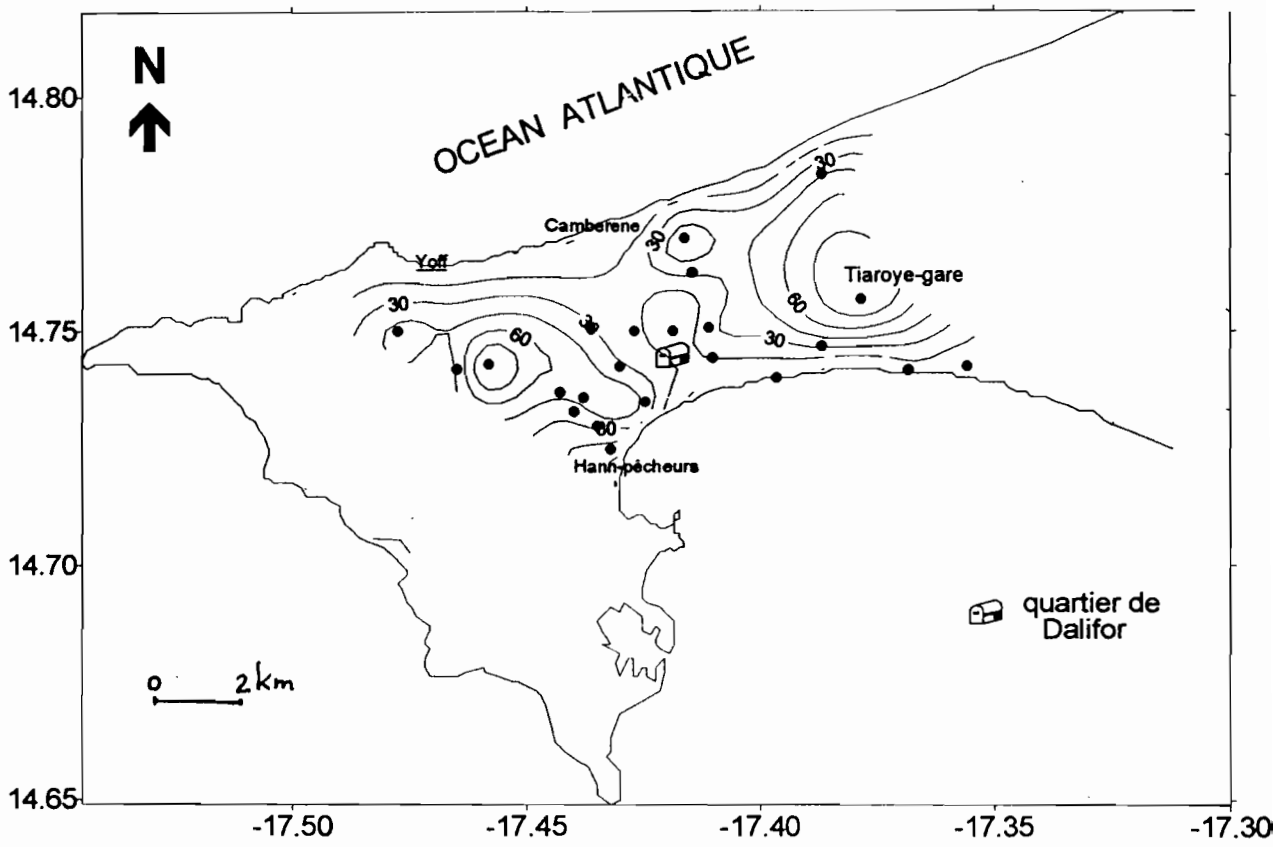


Fig.29a - Carte des résistivités apparentes en AB de 60m.

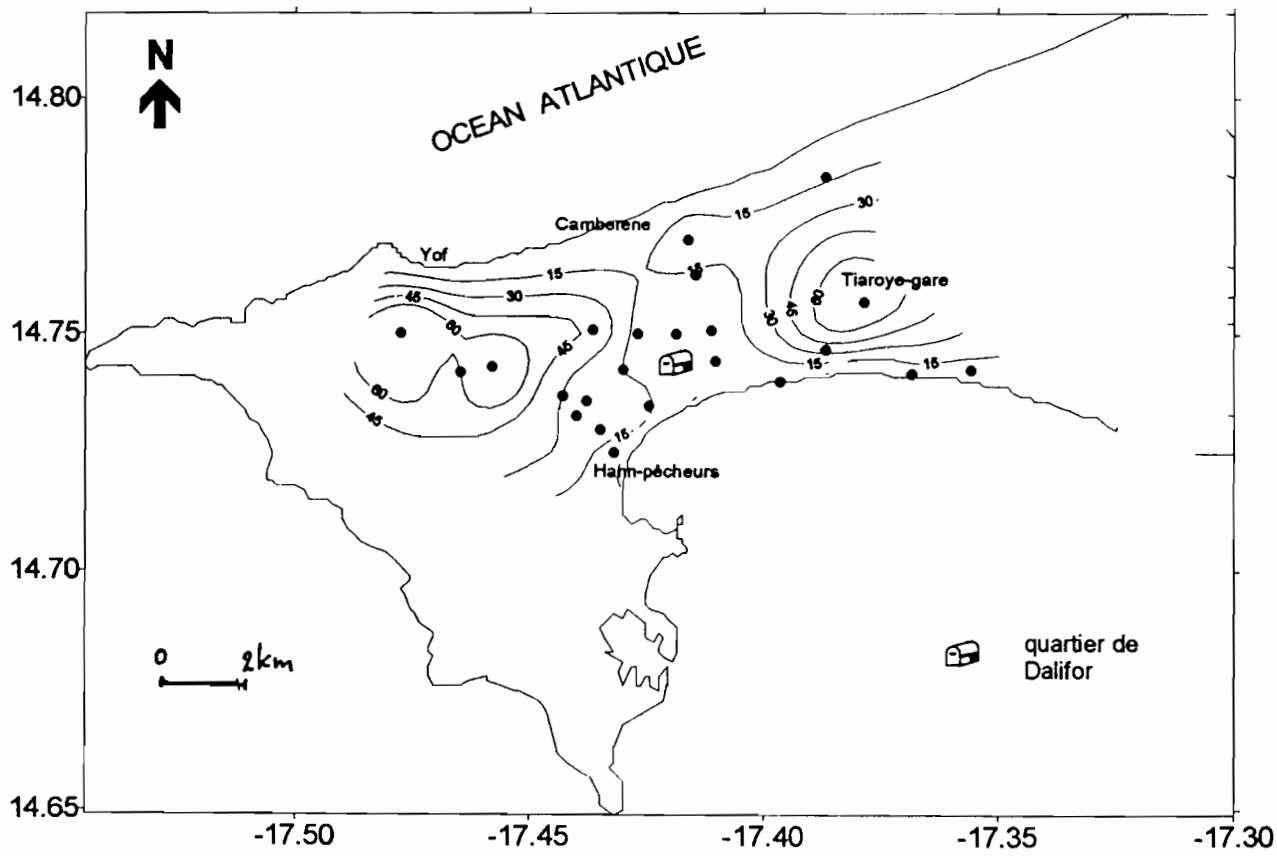


Fig.29b - Carte des résistivités apparentes en AB de 200m.

- une zone conductrice centrée sur les sondages SE6, SE2, SE7 et SE13 qui correspond à la grande niaye de Pikine ;

- une augmentation des résistivités de la grande niaye vers l'est à la faveur de la nappe d'eau douce de Tiaroye et vers l'ouest à la faveur de la nappe d'eau douce infrabasaltique ;

- une diminution des résistivités à l'approche de l'océan.

4.2.2 - Les sondages électriques: types de courbes et modèles.

Les courbes de sondages obtenues peuvent être regroupées en cinq types principaux qui découlent en général de la nature du terrain de surface (fig. 30).

Type 1

Sur les sables secs du cordon dunaire externe qui sont résistants par rapport aux formations sous-jacentes, on obtient un "escalier descendant" (fig.30a). L'interprétation du sondage SE11 donne :

- des terrains très résistants en surface (500 à 2500 ohm.m) ;
- Un résistant intermédiaire (60 ohm.m) épais de 60 m ;
- et un substratum très conducteur de 1 ohm.m.

La connaissance de la profondeur du toit de la nappe (piézomètre ou céane) est une donnée importante dans l'interprétation de ce type de sondage qui peut poser des problèmes de suppression. Elle permet de connaître l'épaisseur des sables secs.

Type 2

Sur les dunes internes (Ogolien) les courbes de sondage montrent la présence d'un conducteur entre le résistant de surface et le résistant intermédiaire (fig. 30b). Le modèle retenu pour le sondage SE8 est le suivant :

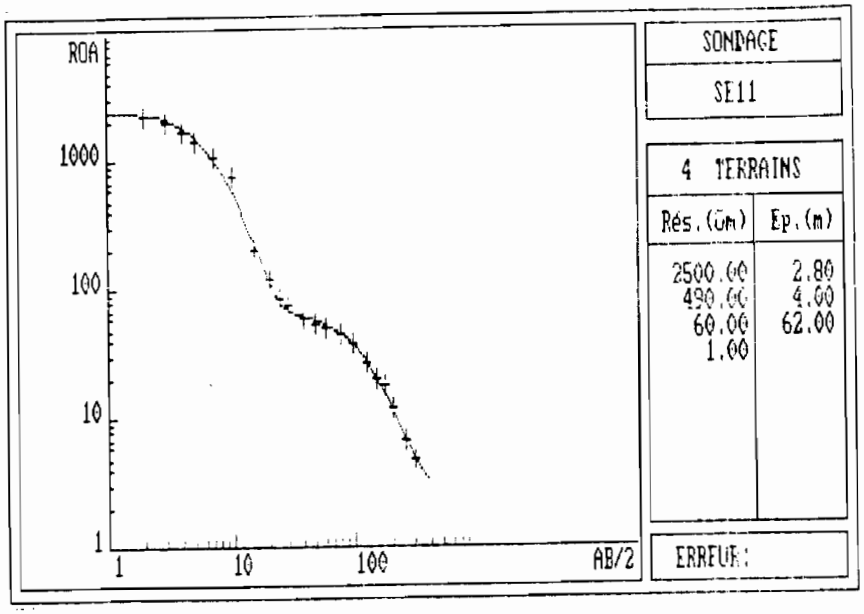
- un résistant de 2700 ohm.m épais de 1.6 m. en surface ;
- un conducteur de 16 ohm.m épais de 1.8 m ;
- un terrain de 600 ohm.m épais de 3 m ;
- un résistant intermédiaire de 180 ohm.m épais de 36 m ;
- et un substratum conducteur de 18 ohm.m ;

Type 3

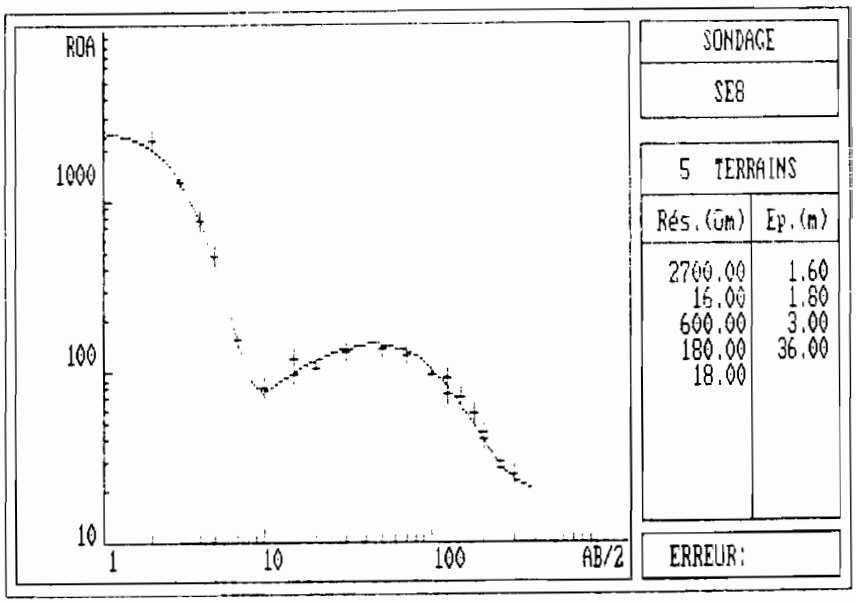
A la périphérie des niayes où le sol généralement argileux ou tourbeux est conducteur par rapport aux sables aquifères sous-jacents, on obtient une "courbe en cloche" (fig. 30c). Le modèle retenu pour le sondage SE7 est le suivant :

- un horizon de 10 ohm.m en surface, épais de 2 m ;
- un horizon de 35 ohm.m épais de 12m ;

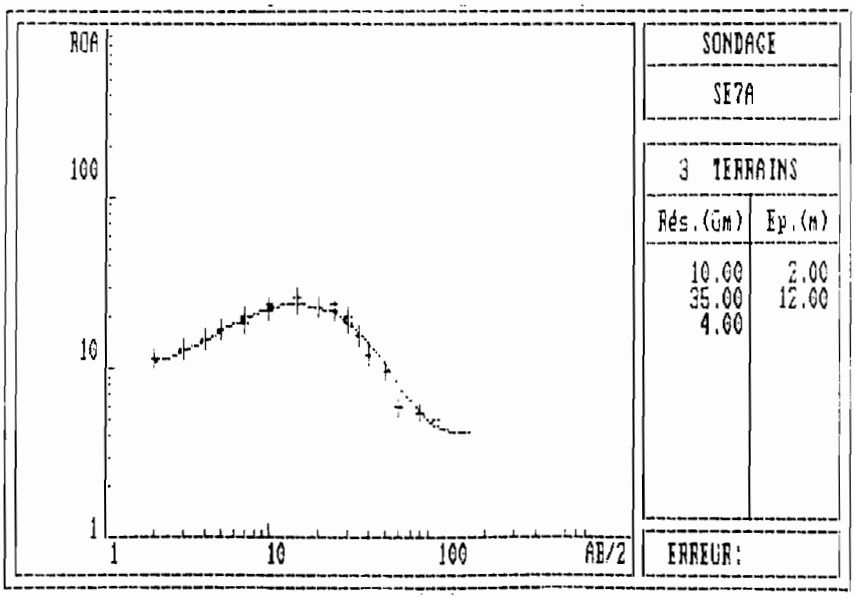
F ig. 30 - Type de diagrammes de sondages électriques.



Sondage SE11
Diagramme type 1



Sondage SE8
Diagramme type 2



Sondage SE 7
Diagramme type3

- et un substratum conducteur de 4 ohm.m.

Type 4

Dans les fonds des niayes (zones topographiques basses) les terrains de surface sont très salés à cause de l'évaporation de la nappe superficielle et des eaux de ruissellement (lessivage).

Le fort contraste de résistivité entre les terrains de surface très conducteurs et les terrains sous-jacents se manifeste sur la courbe de sondage par une brusque remontée avec une pente de l'ordre de 45°.

Le sondage SE6 (fig. 30d) est un cas particulier car l'épaisseur des terrains très conducteurs (1 à 2 ohm.m) de surface est relativement importante et de ce fait les terrains en dessous se comportent comme un horizon infiniment résistant. La C.G.G. en 1945 avait déjà mis en évidence ce type de sondage dans les dépressions salés.

Type 5

Le sondage SE12 (fig. 30e) a mis en évidence un substratum résistant (remontée finale de la courbe) qui peut correspondre à des basaltes altérés ou à des grès coquillers des plages anciennes.

Les autres sondages avec leurs modèles sont en annexe IV.

L'interprétation des sondages a montré la présence de différents horizons électriques que nous avons identifiés comme suit :

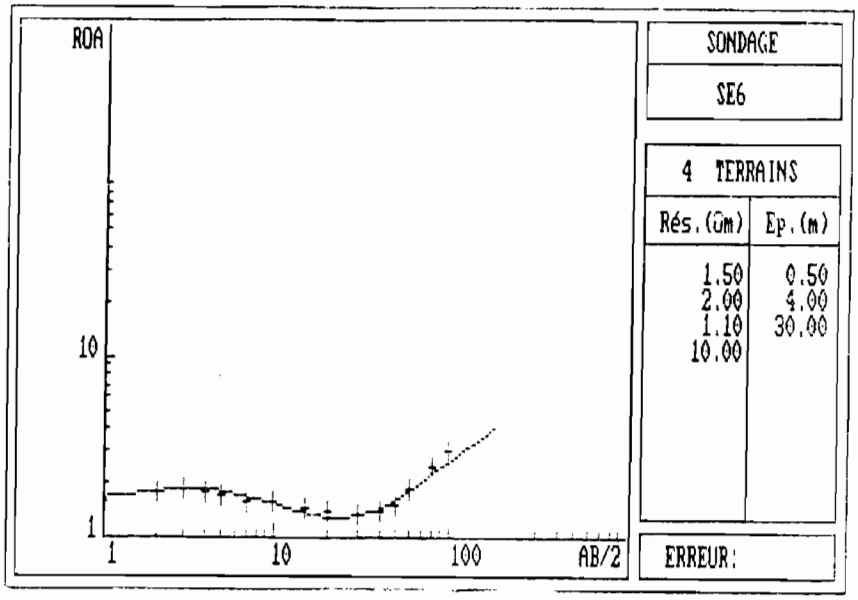
- sables secs avec des résistivités supérieures à 200 ohm.m ;

- nappe saumâtre superficielle et/ou argile des niayes dont la résitivité varie de 10 à 25 ohm.m et peut atteindre 1 ohm.m quand elle est salée comme au coeur de la grande niaye (SE6) ;

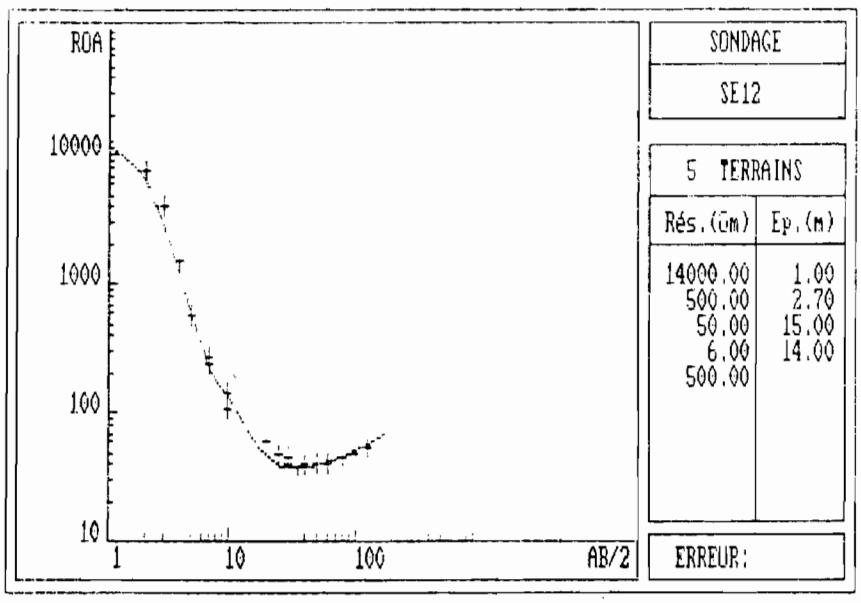
- sables à eau douce dont la résistivité varie de 35 à 180 ohm.m, ce qui montre que la qualité de l'eau de la nappe et/ou du matériel sableux varient d'un secteur à l'autre ;

- substratum conducteur (résistivité de 1 à 13 ohm.m) qui devrait correspondre à des formations salées quand la résistivité est inférieure à 2 ohm.m, ou bien à des formations saumâtres ou des marnes et argiles lorsque la résistivité varie de 3 à10 ohm.m. Toutefois cette limite entre 2 et 3 ne peut être considérée comme franche. Dans ce cas, le géophysicien ne peut trancher entre telle ou telle hypothèse qu'en s'appuyant sur des sondages d'étalonnage.

Fig. 30 bis - Types de diagrammes de sondages électriques (suite)



Sondage SE6
Diagramme type 4



Sondage SE 12
Diagramme type 5

4.2.3 - Coupes géoélectriques interprétatives

Elles vont permettre d'apprécier les variations latérales et verticales des différents horizons électriques de l'aquifère des sables et d'identifier le substratum conducteur.

Nous avons ainsi représenté sur les coupes géoélectriques, les données de forages et piézomètres, et la côte du substratum marneux à l'aplomb des sondages électriques d'après les résultats des études antérieures (cartes du substratum tertiaire des sables .Martin, 1972, O.M.S., 1972).

* Les coupes 31a, 31b, 32a et 32b traversent la grande niaye.

On note sur ces coupes :

- une augmentation de la résistivité de l'aquifère à partir d'une zone conductrice centrée sur les sondages SE15, SE6 et SE9 ; cette zone qui est saumâtre et/ou argileuse (salée au sondage SE6) peut correspondre à un ancien coin salé.

Le sondage SE15 a été réalisé à proximité d'un lac dont la conductivité est de 10 mS/cm alors que La conductivité de la nappe mesurée dans un céane distant de 5 m environ de ce lac est de 0.86 mS/cm.

- Un approfondissement du substratum très conducteur (1 à 4 ohm.m) et par conséquent salé, de l'ouest vers l'est. Il se situe à la côte -35 au moins.

La figure 33 est une interprétation de la coupe électrique 31b. On distingue la nappe du cordon littoral qui est une lentille d'eau douce reposant sur de l'eau salée et une nappe interne sablo-argileuse et/ou saumâtre, séparée par une zone plus conductrice qui peut être une relique de lagune.

* La coupe électrique (31c) localisée dans la nappe dite de Thiaroye montre la présence d'un horizon conducteur (résistivité de 10 ohm.m environ) qui peut correspondre à une lentille d'argile.

Cette lentille épaisse de 2 à 3 m pourrait constituer une petite barrière de protection contre la pollution. Au sondage SE4, situé à proximité de l'usine S.I.P.S. et d'une décharge, la résistivité de cette lentille en surface est 2.5 ohm.m témoignant ainsi d'une minéralisation de l'eau.

Cette coupe montre aussi une croissance des résistivités de l'aquifère et de son substratum, de l'océan vers le continent. Elles passent respectivement de 70 à 180 ohm.m et de 2 à 18 ohm.m.

On retrouve l'horizon conducteur sur la coupe électrique III-b située au sud, bien que la coupe du forage F17 ne l'ait pas spécifié.

Il semble que le substratum conducteur n'est salé qu'au niveau du sondage SE1 qui est le plus proche de l'océan. Ailleurs il serait saumâtre (11 ohm.m) et remonte même au sondage SE5. Dans ce secteur de Thiaroye sur mer les études antérieures (OMS, 72 ; Gaye *et al*, 1988.) ont signalé une progression des eaux salées marines dans le continent.

Fig.31 - Coupes géoélectriques Nord- Sud (a,b,c)

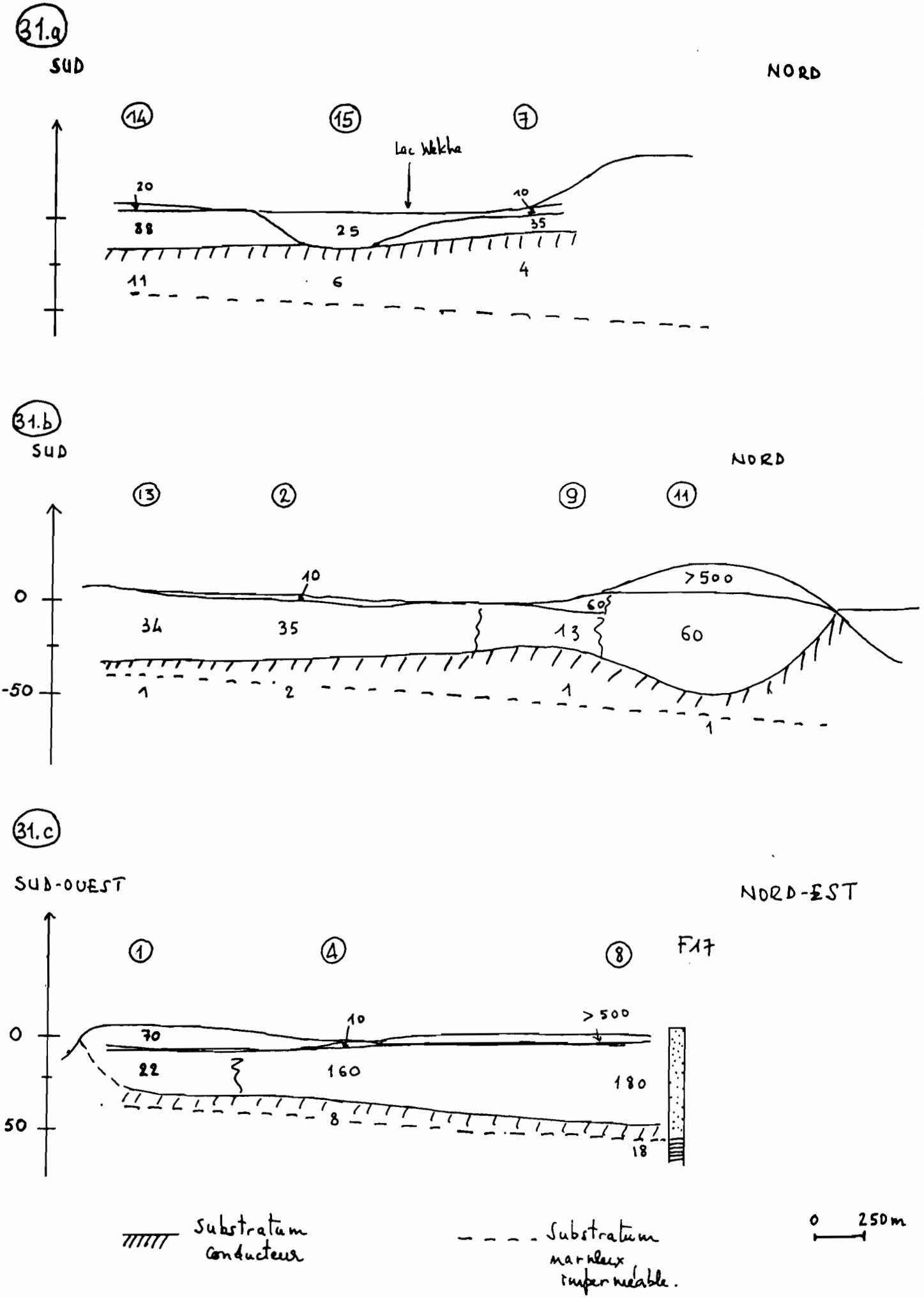
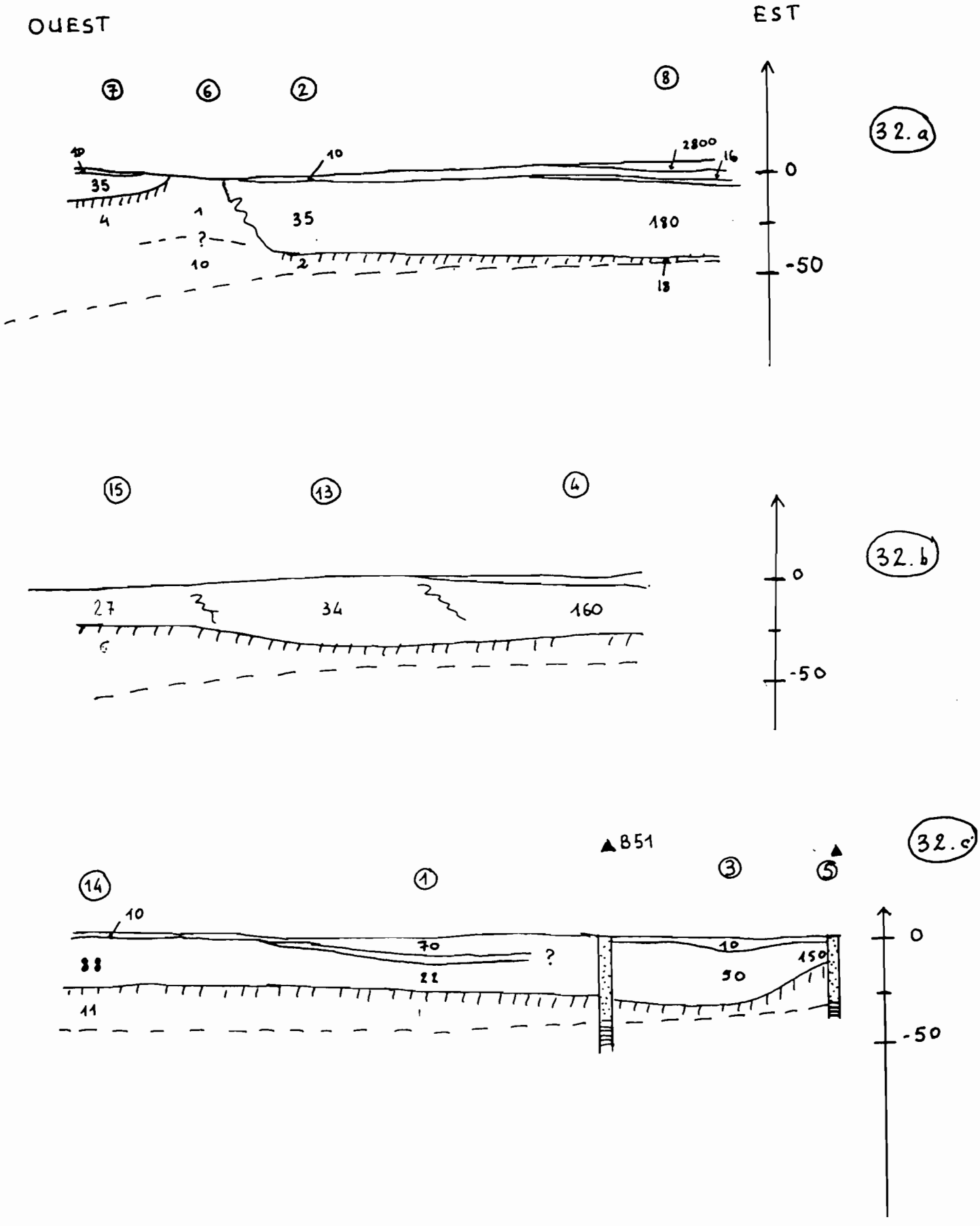


Fig.32) - Coupes géoélectriques Ouest- Est (a,b,c)



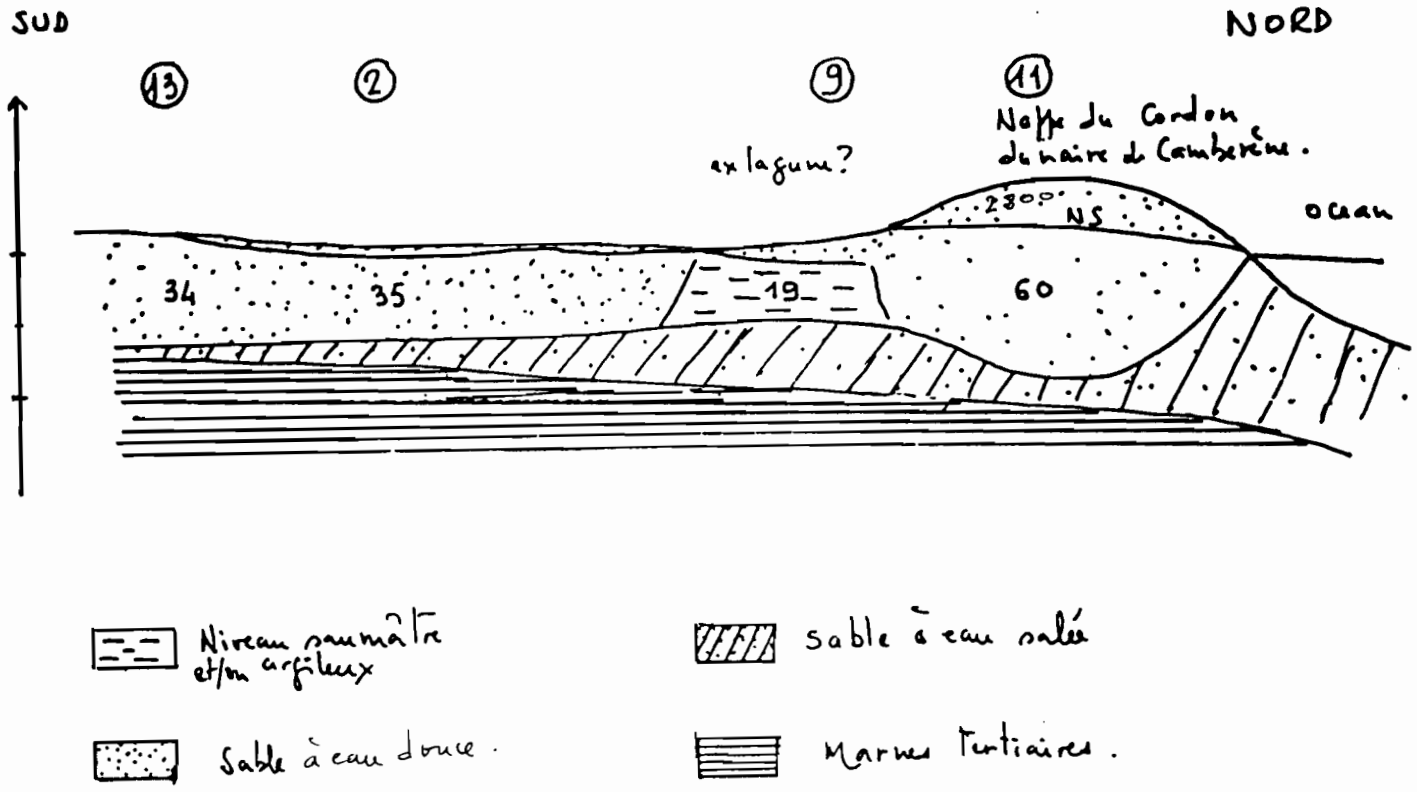


Fig.33 - Interprétation hydrogéologique de la coupe géoélectrique 31b.

Remarque :

L'interprétation des sondages électriques pose parfois des cas d'équivalences. Ces équivalences font varier la résistivité ou l'épaisseur des horizons dans certaines limites (cf. Annexe 3), mais ne changent pas la géométrie du système, ou plûtot l'allure générale des coupes géoélectriques.

4.3 - Application de la loi d'Archie.

4.3.1 - La loi d'Archie

La formule d'Archie montre que la résistivité d'un sable non argileux est fonction entre autres de la résistivité de l'eau contenue dans ses pores, et de sa porosité. Elle est valable aussi quand le taux d'argile reste constant dans une roche donnée.

$$\rho_r = a.\frac{\rho_w.\Phi^{-m}}{s^2} \qquad (1)$$

$$F = \frac{a}{\Phi^m} = \frac{\rho_r}{\rho_w} \qquad (2)$$

F est le facteur de formation.

ρ_r est la résistivité de la roche.

ρ_w est la résistivité de l'eau d'imbibition.

Φ est la porosité.

a est un facteur proche de 1.

m est le coefficient de cimentation ou coefficient de distribution des vides. Pour les formations meubles, $m=1.3$

La saturation (s) s'exprime en pour-cent.

Pour des sables saturées en eau, la relation (2) devient:

$$F = \frac{1}{\Phi^{1.3}} = \frac{\rho_r}{\rho_w} \qquad (3)$$

On peut connaître ρ_r grâce aux sondages électriques. Quant aux paramètres restant (ρ_w, et ϕ), la connaissance d'un seul nous permettra de déduire l'autre. La mesure de la conductivité de l'eau dans les céanes (nappes superficielles) ou les piézomètres nous permettra de déduire la résistivité de l'eau (ρ_w).

Le tableau 6 donne les conductivités de la nappe dans les sites des sondages.

n° S.E	3	4	5	11 (P2.3)	13	14	15
σ (mS/cm)	9.2	6.79	1.1	0.43	1.49	1.92	0.86

Tableau 6 : Conductivités de l'eau de la nappe dans les sites des sondages électriques

4.3.2 - Méthode

On déduit la résistivité de l'eau (ρ_w) de la nappe superficielle à partir de la conductivité de l'eau du céane. La résistivité de la formation (ρ_r) étant donnée par les sondages électriques, on peut ainsi déterminer la porosité (Φ) de la formation grâce à la formule suivante qui découle de la formule (3).

$$\Phi = \left(\frac{\rho_w}{\rho_r}\right)^{\frac{1}{1.3}} \quad (4)$$

Connaissant la porosité, on peut alors calculer la résistivité de l'eau des différents horizons aquifères en appliquant la formule:

$$\rho_w = \rho_r \cdot \Phi^{1.3} \quad (5)$$

Exemple de calcul : cas du sondage S.E.13

Le modèle retenu pour ce sondage consiste en trois horizons électriques:

- un horizon superficiel de 0.9 ohm.m épais de 0.7 m.
- un horizon intermédiaire de 34 ohm.m épais de 35 m.
- et un substratum conducteur de résistivité 1 ohm.m.

La conductivité de l'eau (σ_w) du céane est de 1.79 mS/cm., soit :

$$\rho_w = \frac{1}{\sigma_w} = \frac{1}{1{,}79.10^{-1}} = 5.58 ohm.m$$

En appliquant la formule (4) on trouve la porosité des sables ;

$$\Phi = \left(\frac{5.58}{34}\right)^{\frac{1}{1.3}} = 0.249 \cong 0.25$$

En appliquant la formule (5) on détermine la résistivité de l'eau contenue dans le substratum conducteur (1 ohm.m)

$$\rho_w = 1 \times 0.25^{1.3} = 0.164 ohm.m$$

4.3.3 - La porosité des sables et des argiles

La porosité totale est constituée par l'ensemble des vides contenus dans la roche. Elle est mesurée en pour cent du volume total de la roche (Shoeller, 1955).Le tableau 7 montre les valeurs de la porosité des sables et des argiles selon différents auteurs.

AUTEURS	SABLES (en %)	ARGILES (%)	VASES
Schoeller, (1955)	20 - 41.5	44 - 50	80 - 90
Meyer,(1991)	32 - 40	36 - 47	-
Castany (1963)	26 - 47.	44 - 50	80 - 90

Tableau 7 : Porosités des sables, des argiles, et des vases récentes selon différents auteurs.

Il en ressort que la porosité des sables varie de 20 à 47% alors que celle des argiles est comprise entre 44 et 50%. Les valeurs de porosités comprises entre 44 et 47% peuvent donc caractériser aussi bien des sables, des sables-argileux ou des argiles.

Selon Meyer cette zone de chevauchement serait plus large puisque des porosités de 36% peuvent caractériser les argiles.

Par ailleurs, La porosité totale des formations meubles ne peut dépasser théoriquement 47.6 % (grains sphériques calibrés à arrangement cubique). Cette porosité limite correspond à un facteur de formation $F=2.6$. Quand $F<2.5$, la présence d'argile est quasi-certaine (Astier, 1971, Meyer, 1991).

Un sable ayant un facteur de formation F égal à 2.5 est équivalent à un sable de porosité $\Phi=0.494$. Nous pouvons donc prendre comme valeur-limite de la porosité des sables et des argiles 49%.

Nous allons utiliser la loi d'Archie pour tenter de définir l'aquifère à partir des valeurs de résistivités obtenues par les sondages électriques. Il est important de noter qu'il s'agit ici de la porosité totale des formations et non de la porosité efficace. Les argiles ont une porosité totale élevée (50%) alors que leur porosité efficace est nulle.

L'application de la loi d'Archie suppose que le taux d'argile reste constant dans les horizons électriques considérés.

4.3.4 - Résultats et interprétations

a) La côte sud (SE 14, SE 1, SE 13 et SE 5)

Le tableau 8 ci-dessous, donne pour chaque sondage la résistivité de l'eau contenue dans le substratum conducteur et sa cote, ainsi que la porosité de l'aquifère.

sondage	14	1	3	5
côte de ρ_w de base	-20.7	-29	-28.1	-9.4
ρ_w de base (ohm.m)	2.8	2.6	1.2	4.9
porosité	0.35	0.19	0.18	0.39

Tableau 8. Résultats des sondages de la côte sud.

Les sondages électriques de la côte sud sont tous situés à 500 m au plus de la mer. L'analyse du tableau montre que les résistivités de l'eau les plus basses (substratum conducteur) sont comprises entre 1.2 et 4.9 ohm.m, donc supérieures à celle de l'eau de mer (1 ohm.m).

Il ne s'agit probablement pas du biseau salé au sens strict (eau de mer) mais d'une eau un peu saumâtre qui pourrait correspondre à un mélange eau douce- eau de mer.

Les valeurs de porosité semblent indiquer la présence d'un sable non argileux (Φ<<<49%).

L'absence du biseau salé *ss* (eau de mer) dans un aquifère sableux à une cote voisine de -30 et à 500 m de l'océan ne peut s'expliquer que par la présence d'une charge hydraulique minimale qu'on peut calculer en appliquant la loi de Ghyben-Herzberg.

Cette loi stipule que la profondeur du front salé au dessous du niveau de la mer à un point donné sera 40 fois la hauteur du niveau de l'eau douce au dessus du niveau de la mer.

$Z_s = 40.Z_f$ (loi de Ghyben- Herzberg)

Z_f étant la charge hydraulique et Z_s la côte du biseau salé.

$$Z_f = \frac{Z_S}{40} = \frac{30}{40} = 0.75$$

Le niveau piézométrique au voisinage des sondages SE1 et SE3 serait donc voisin de 0.75 m.

b) La côte nord (SE 12, SE 9, SE 10, SE 11)

Les sondages SE10 et SE11 sont les plus proches de la mer alors que SE9 et SE12 sont situés en bordure nord de la grande niaye. Les résultats que le tableau 9 indique permettent de faire les constats suivants:

sondage	12	9	10	11
côte de ρ_w de base	-12.7	-18	-43	-57.8
ρ_w de base (ohm.m)	2.79	0.46	0.66	0.39
porosité	0.55	0.55	0.42	0.48

Tableau 9. Résultats des sondages de la côte nord

A l'exception du sondage SE12, les résistivités de l'eau de base sont inférieures à 1 ohm.m. Il pourrait donc s'agir de l'eau de mer donc image d'un coin salé.

Par ailleurs les fortes valeurs de porosités notées aux sondages SE10 et SE11 indiquent plutôt qu'on est en présence d'un milieu sableux très poreux : le log du piézomètre P2.3 (cf. Fig. 12) très proche du sondage SE11 confirme la présence de sables non argileux.

Il s'agirait donc sur les dunes de Cambérène - Guédiawaye (SE11 et SE10) d'un aquifère sableux ouvert sur la mer et protégé par une charge hydraulique de 1 à 1.4

Les sondages SE12 et SE9 situés plus au sud apparaissent différents par la nature du faciès qui serait plus argileux.

c)La grande niaye

sondage	7	15	2	13
côte de ρ_w de base	-13	-17.7	-30.5	-30.7
ρ_w de base (ohm.m)	0.64	2.7	0.31	0.16
porosité	0.24	0.55	0.24	0.25

Tableau 10. Résultats des sondages de la grande niaye

Le tableau 10 montre que l'eau de base correspondrait à l'eau de mer à l'exception du sondage SE15 qui correspondrait plutôt à de l'eau saumâtre.

Concernant la porosité, seul le sondage SE15 indique la présence d'argile dans le sous-sol alors que le reste détermine des sables.

L'argile de la grande niaye serait donc très superficielle et l'ensemble serait bien connecté à la nappe des sables.

Le niveau de base (substratum conducteur) pour les sondage SE7, SE2, et SE13 pourrait donc bien correspondre à un biseau salé. La cote piézométrique serait alors inférieure à 1m au sud, et voisine de 1 à 1.5m au nord de la grande niaye.

On remarque que s'il existe au SE15, une nappe saumâtre superficielle (ρ_w= 5.6 ohm.m) comme pour les sondages SE7, SE2, SE13, on trouverait une porosité de 0.31 et une résistivité de l'eau de base de 1.35 ohm.m. Ceci atténue la particularité de SE15 mais la conserve et se rapproche de SE9 pour la porosité de 0.55 (les résistivités de l'eau de base diffèrent).

Toutefois SE15 et SE12 qui sont proches peuvent aussi indiquer un milieu homogène plus argileux intermédiaire entre la niaye et le secteur de la nappe infrabasaltique.

Les cotes piézométriques dans la grande niaye seraient pour les sondages électriques 9, 7, 15 et 14 (dans l'hypothèse d'un biseau salé) de l'ordre de 0.40 m et pour les sondages 2, 13, 1, et 3 de l'ordre de 0.70 m. Alors qu'au nord de la niaye elle serait voisine de 1 à 1.5 m.

Les dunes du nord ont donc un effet protecteur grâce à la charge hydraulique (1 à 1.5) qui refoule le biseau salé en profondeur (45 à 50 m). Tandis qu'au niveau de la niaye qui est une zone topographique basse avec des cotes piézométriques faibles (0.40 pour les sondages 12,15,7), l'eau de mer serait à une côte voisine de -16 m.

Mais cet ensemble apparaît régulé puisque la charge hydraulique serait de 0.7 aux sondages du sud de la niaye (SE2, et SE13) et à la côte sud stabilisant le biseau salé à une cote voisine de -30.

d) Le secteur de Thiaroye

sondage	1	4	8	3
côte de ρ_w de base	-29	-24	-36	-28
ρ_w de base (ohm.m)	2.64	1.15	2.59	1.88
porosité	0.19	0.22	0.22	0.18

Tableau 11. Résultats des sondages du secteur de Thiaroye

Le tableau 11 montre que dans aucun cas on trouve des valeurs de résistivités très basses (1 ohm.m) des eaux de base contrairement à la côte nord. On ne peut donc pas parler ici d'un coin d'eau de mer mais d'un niveau d'eau saumâtre (mélange).

On peut aussi noter que les profondeurs correspondant à ce niveau sont constantes et autour de 30 m comme pour le sud de la grande niaye aux sondages SE2 et SE13.

Donc si on admet tout de même qu'il s'agit d'une forte influence de l'eau de mer, on voit que tout ce secteur est stable, stabilisé probablement autour de la côte du système régulateur évaporateur-réservoir de la grande niaye.

Les valeurs de la porosité de 0.18 à 0.22 semblent indiquer qu'il s'agit d'un matériel sableux, donc on serait toujours en présence de la nappe des sables. Les coupes de forages situés dans le secteur permettraient de conclure avec certitude.

e) L'eau de la nappe

On peut se demander s'il y a plusieurs nappes ou une seule. Les caractéristiques de l'eau de la nappe peuvent être une indication.

En effet l'eau qui circule dans les roches très perméables à granulométrie grossière est généralement beaucoup moins chargée en ions (donc plus résistante) que celle qui sature les formations les plus fines et les moins perméables.

N° sondage	Eau de la nappe (ohm.m)	Eau superficielle (ohm.m)
1	7.8	1.44
2	5.6	5.6
3	5.4	1.08
4	23	1.445
5	52.3	9.01
6	très faible	
7	5.6	5.6
8	26	1.445
9	6	6
10	23.2	
11	23.2	
12	23.2	
13	5.6	5.58
14	23	5.2
15	11.63	11.63

Tableau 12. Résistivités de l'eau de la nappe déduite de l'application de la loi d'Archie

Le tableau 12 qui synthétise la résistivité de l'eau de la nappe dans les différents sites permet de distinguer deux types d'eau.

D'une part, une eau plus résistante de l'ordre de 23 ohm.m (sondage 4, 5, 8, 10, et 14) qui devrait correspondre à une eau qui circule bien. Elle est caractéristique de zones aquifères les plus ouvertes (c'est à dire perméables) où la nappe circule bien et est tout à fait libre donc liée aux sables.

Pour ces sondages les valeurs trouvées pour la porosité sont respectivement (0.22,.0.39 ,0.22, 0.42, 0.48, 0.35. Donc les valeurs de porosité pour les sondages 10, 12 ,et 14 traduisent effectivement des sables non argileuses, de grande porosité mais très perméables.

D'autre part, une eau de résistivité plus basse de l'ordre de 5 à 10 ohm.m qui peut faire croire à une eau qui circule peu et reste confinée dans un milieu moins perméable (plus ou moins argileux).

Cependant les valeurs de porosités des sables dans ces endroits à l'exception des sondages 15,12, et 9, sont elles aussi caractéristiques d'un milieu non argileux (0.22).

Toutefois le fait que cette eau de résistivité plus basse soit circonscrite à la grande niaye est un argument en faveur de la concentration de l'eau de la nappe par évaporation dans la niaye.

Par ailleurs quand on trace la profondeur de la base salée (fig. 34), on peut représenter grossièrement le biseau salé. Donc les cotes piézométriques auraient la même allure mais en cotes positives proportionnelles. On voit que la niaye introduit une dépression piézométrique significative.

4.4 -Discussion des résultats

Les graphiques des figures 35 et 36 montrent qu'il existe une certaine corrélation entre la teneur en chlorures et la conductivité de la nappe. Les données concernent les piézomètres p2.1, p2.2, p2.3 et p2.4 aux mois d'avril et proviennent de la SONEES.

La conductivité et la teneur en chlorures évoluant dans le même sens, on devrait s'attendre à ce qu'une étude des chlorures et une étude électrique de la nappe aboutissent à des résultats analogues.

La carte des isochlores de la nappe en 1967 (fig 37) montre que l'eau de la nappe est faiblement chlorurée autour de la grande niaye et passe rapidement à des teneurs de 100 à 500 mg/l au niveau de la niaye.

Les points d'eau existants au niveau de la niaye sont des céanes; donc ces valeurs ne caractérisent que la nappe saumâtre superficielle de la niaye.

Cette carte rappelle celles des résistivités apparentes de l'aquifère (fig. 29) qui ont montré ce secteur comme étant une zone conductrice. L'application de la loi d'Archie a montré que l'eau de la nappe est plus conductrice (5.6 ohm.m) dans ce secteur et par conséquent saumâtre.

Fig.34 - CARTE DES ISOHYPSES DU BISEAU SALE D'APRES LES INTERPRETATIONS GEOPHYSIQUES (LOI D'ARCHIE).

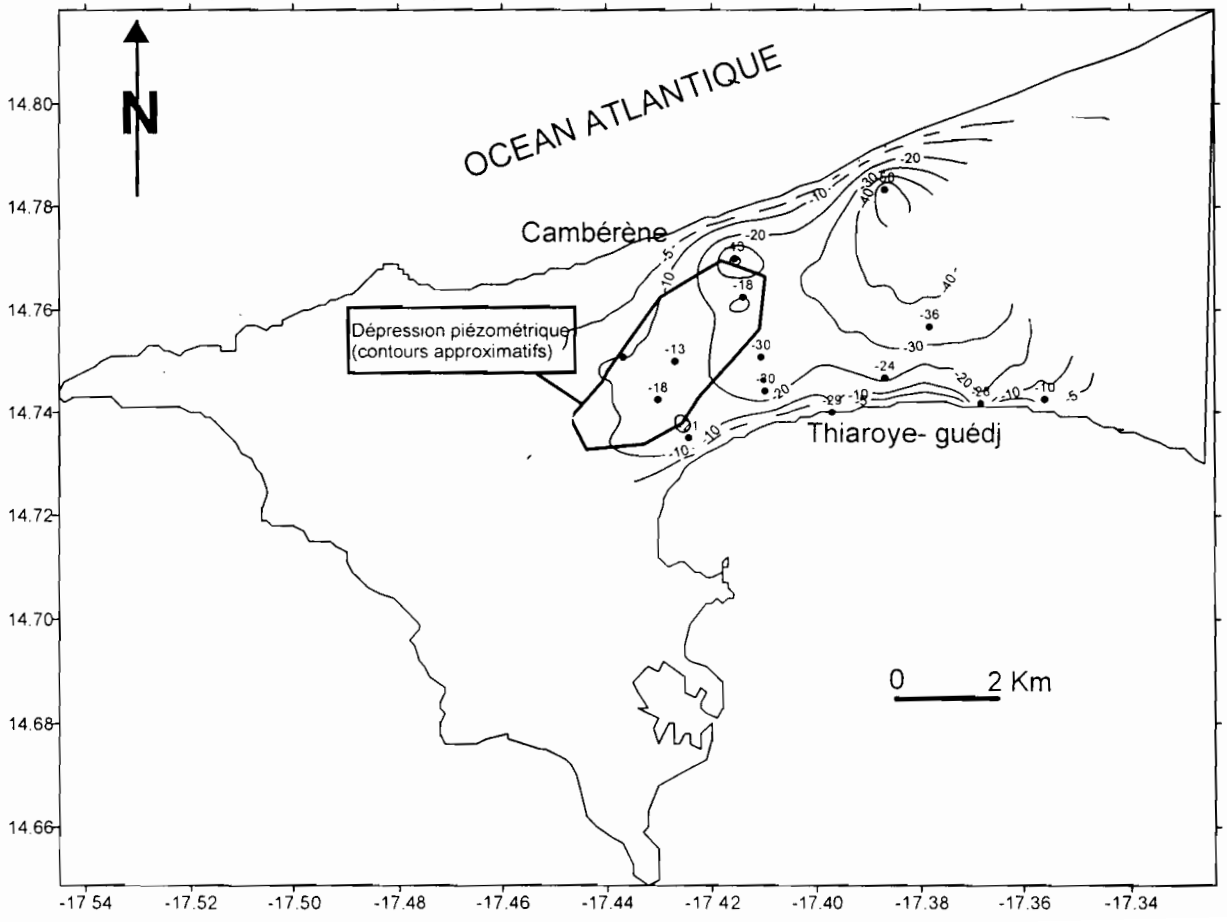


Fig.35 - EVOLUTION DES CHLORURES (1993- 1995)

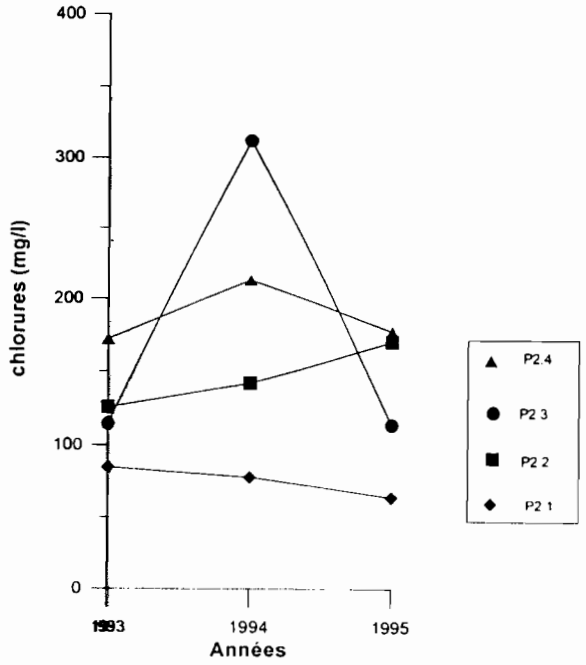
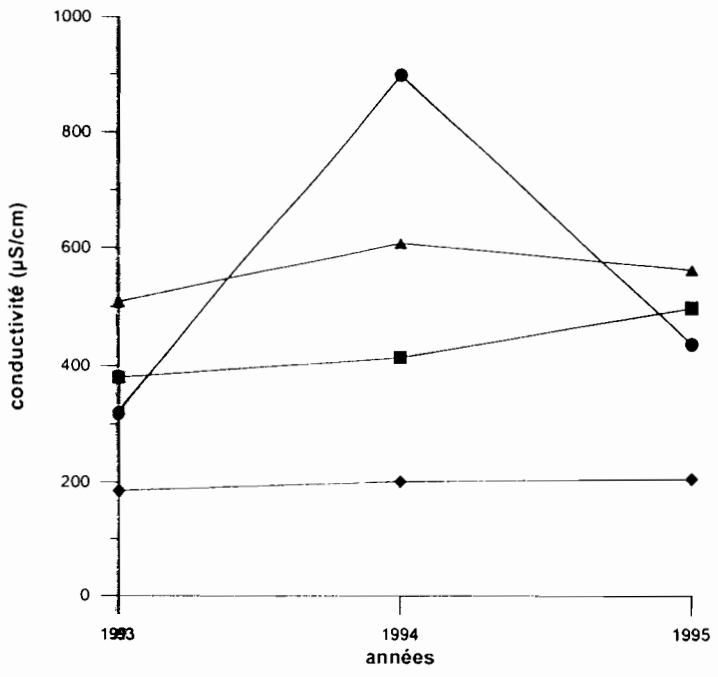


Fig.36 - EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE (1993- 1995)



La carte des chlorures de la nappe en 1988 (fig 38) montre une croissance des isochlores sur le littoral sud (de part et d'autre du village de Thiaroye sur mer). On note également sur les cartes d'isorésitivités apparentes un resserrement des isorésistivités avec une décroissance.

La coupe électrique de la figure 32c a aussi montré une remontée du substratum conducteur au sondage SE5.

L'étude électrique du B.R.G.M.(1987) à l'ouest du secteur d'étude a montré aussi la présence d'un substratum conducteur qui a été interprété comme étant le biseau salé à une côte voisine de -30 m dans le secteur de Hann. Ce qui est en accord avec nos résultats puisque à la périphérie de la grande niaye, nous avons trouvé que la côte du substratum conducteur est de -30m.

Conclusion

Les cartes d'isorésistivités apparentes ont montré à l'instar des études chimiques (chlorures) que l'eau de la nappe est plus minéralisée au niveau de la grande niaye.

L'interprétation des sondages électriques a précisé la zone conductrice (axe SE6, SE15, SE9) qui va jusqu'à une profondeur de 20 m au moins.

La loi d'Archie nous a permis d'interpréter le substratum conducteur comme étant le biseau salé.

Ce dernier serait à une cote de l'ordre de :

-50 à -60 m au niveau des dunes du Nord,

-20 m au niveau côte Sud,

-30 m en bordure de la Grande Niaye

La grande niaye par contre induit une dépression piézométrique qui se traduit par une remontée du biseau salé dont la cote a été estimée à -16m.

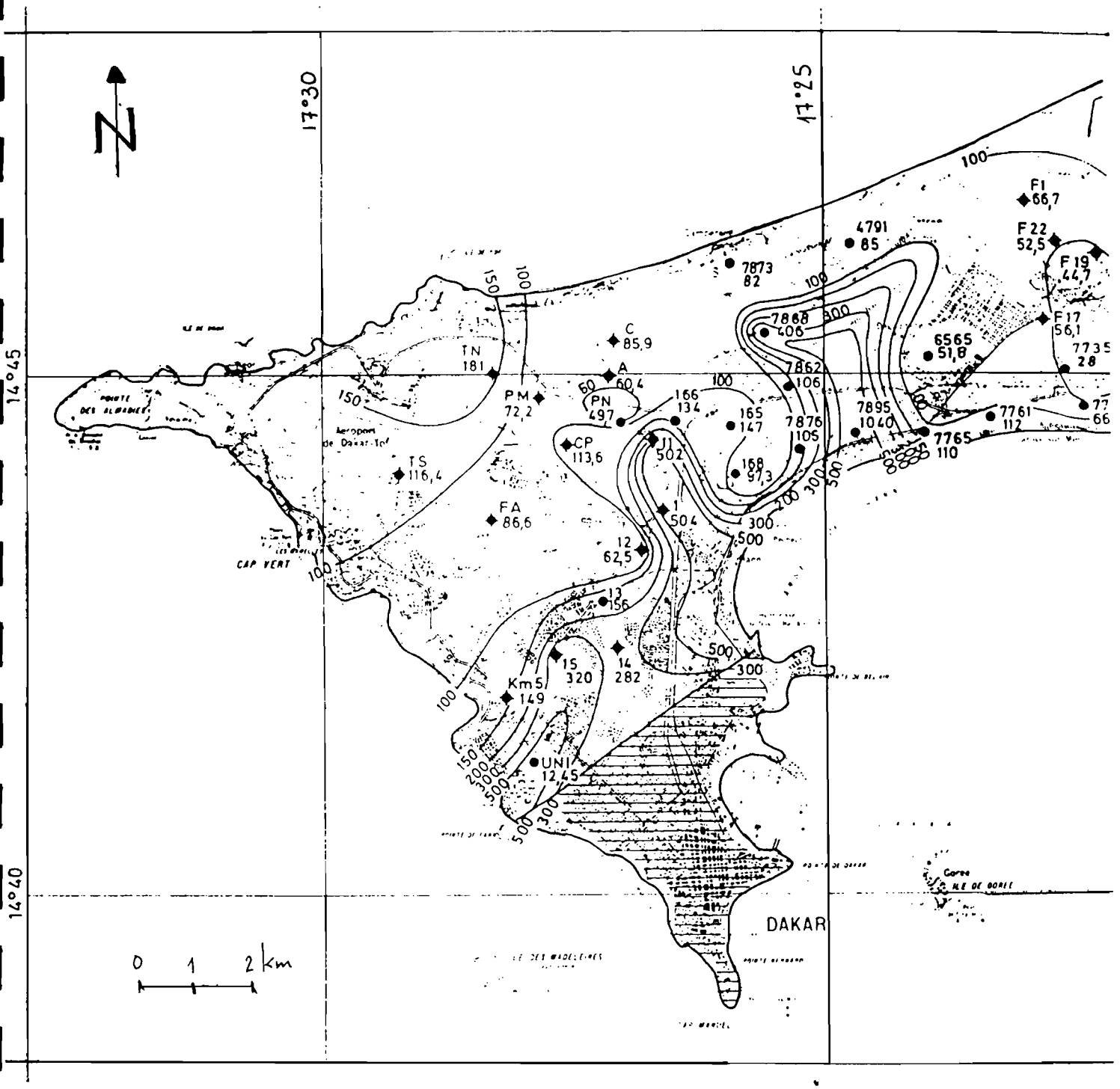


Fig.37 - Carte des isochlores de la nappe (B.R.G.M., 1967).

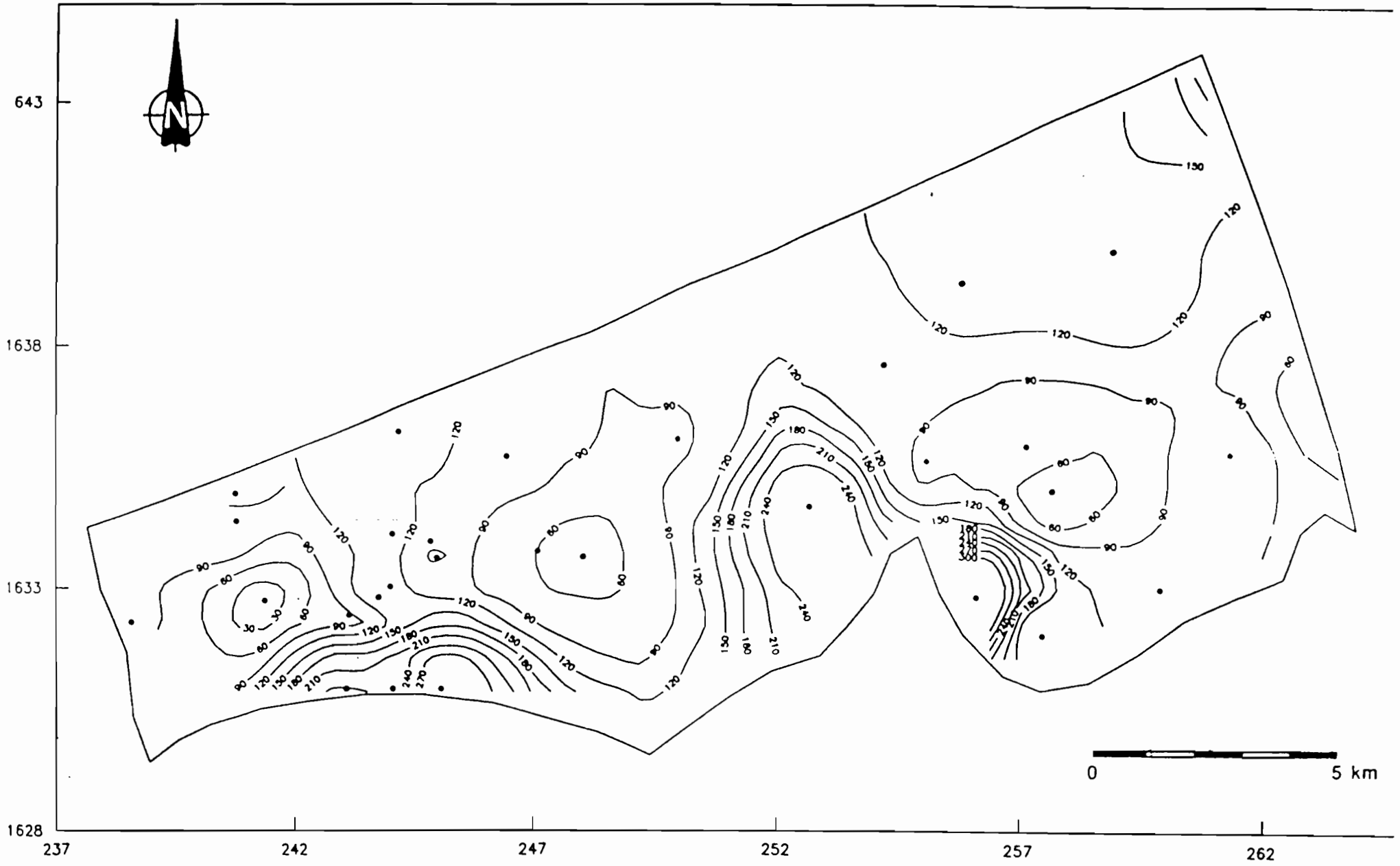


Fig.38 - Carte des isochlores de la nappe (Gaye et al, 1986).

CONCLUSION

Grâce au contraste de résistivité existant entre les sables secs, les sables à eau douce, et les sables à eau salée, la méthode électrique est bien adaptée à l'étude de la géométrie de la nappe des sables quaternaires. Cependant, les difficultés d'interprétation liées aux principes d'équivalence et de suppression montrent qu'une étude électrique fiable doit absolument se caler sur des données de sondages mécaniques (forages et de piézomètres) carottés de préférence.

L'analyse et la compilation des données de forages, de piézomètres et de sondages électriques a permis dans le premier volet de cette étude exposé au chapitre 3, de construire les cartes caractéristiques de l'aquifère et d'étudier la géométrie du réservoir. Sans reprendre intégralement les différentes conclusions de ce chapitre, les points suivants méritent d'être soulignés:

L'épaisseur de l'aquifère dépend de la morphologie du substratum des sables. C'est dans les dépressions du toit du substratum que l'aquifère est plus épais (Thiaroye, Sangalkam, Niague, Beer Tialane) mais ces dépressions sont en communication avec les lacs du nord ou avec l'océan.

L'établissement d'une carte de la résistivité du mur de l'aquifère aurait sans doute permis d'illustrer des couloirs d'intrusion marines dans la nappe.

L'examen de la carte piézométrique et celle des isohypses du mur de l'aquifère permet de confirmer que les cotes piézométriques supérieures à 1.5 caractérisent essentiellement les zones de faible épaisseur de la nappe (remontée du substratum). Alors que les zones où la cote piézométrique est voisine de zéro caractérisent ces zones dépressionnaires du toit du substratum (la nappe côtière). La figure 39 qui montre les profils piézométriques et celles correspondant au toit du substratum met en évidence ce phénomène. Elle permet de calculer la pente piézométrique de la nappe des sables quaternaires sur pente structurale qui est de l'ordre de $5.\ 10^{-3}$. On trouve d'ailleurs une pente piézométrique du même ordre ($4,\ 7.10^{-3}$) pour la nappe du littoral nord (profil P4).

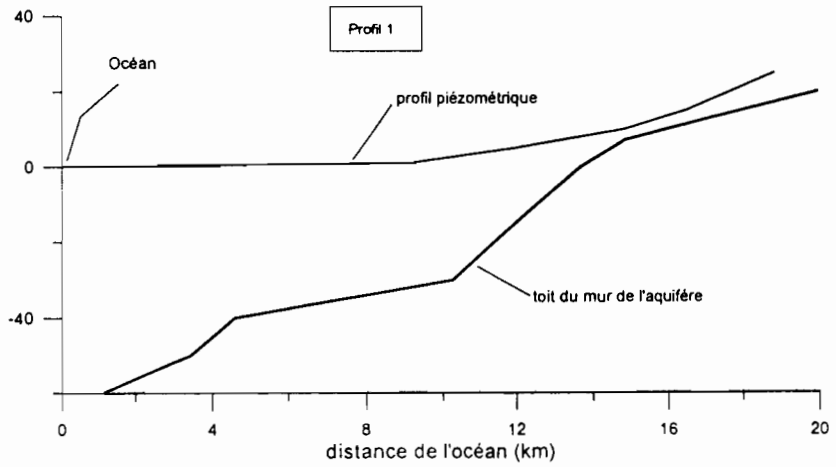
De manière à compléter et améliorer l'étude de cette nappe des sables quaternaires, on pourrait associer à la méthode électrique:

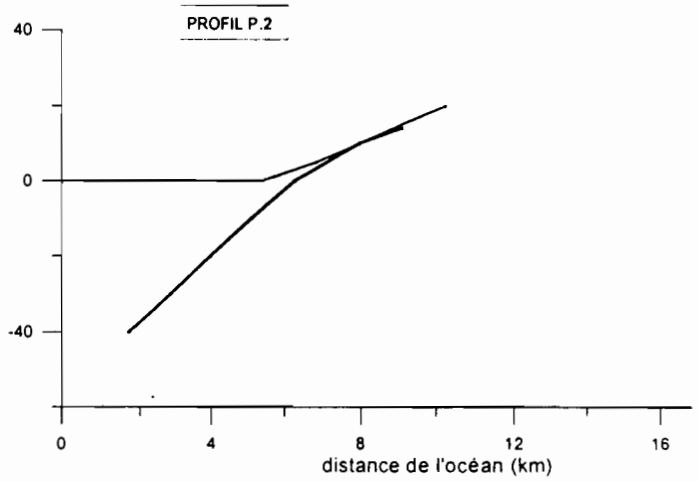
- La méthode sismique dans les zones dépourvues de piézomètres car elle met bien en évidence la surface piézométrique.(Diouf, 1995)

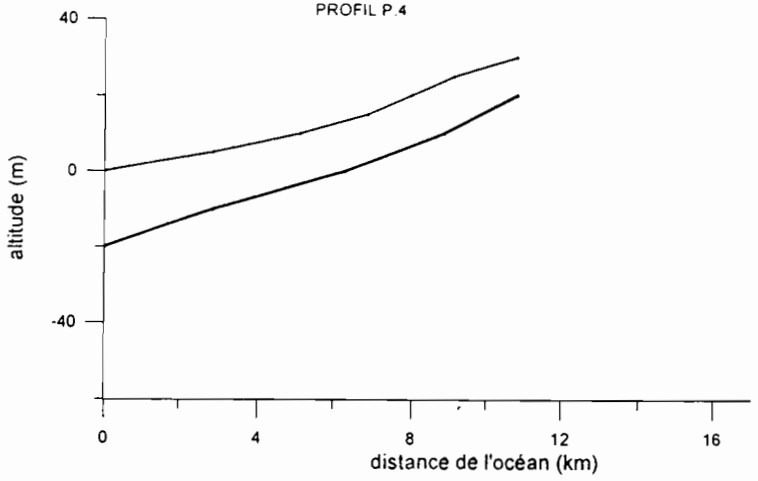
- La méthode TDEM qui utilise la résistivité mais présente l'avantage d'être plus rapide.

- Le multiélectrode qui permet de faire des études par panneaux. Cette méthode est particulièrement avantageuse car elle permet d'analyser les variations de résistivités en 2 dimensions, si elles sont soupçonnées.

Concernant le deuxième volet de cette étude, exposé dans le chapitre 4, il focalise notre attention sur l'étude de la vulnérabilité à l'invasion salée de la nappe sur un secteur clef au Sénégal: celui de Pikine. Notre étude, préliminaire il est vrai, s'attache à décrire grâce à des sondages électriques certaines caractéristiques de l'aquifère. On peut résumer les principaux résultats de la manière suivante.







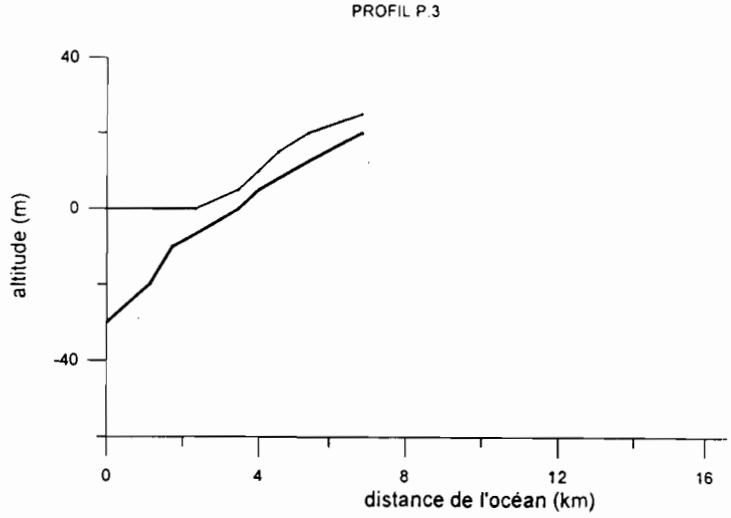


Fig.39 - Profils piézométriques et du toit du substratum

Les coupes géoélectriques ont permis de distinguer les variations d'altitude du substratum conducteur, et la nappe saumâtre superficielle dans les niayes.

L'utilisation de la loi d'Archie grâce à la mesure de la conductivité des eaux superficielles (céanes, piézomètres) a permis d'interpréter le substratum conducteur comme étant le biseau salé.

Elle a permis en outre de montrer le rôle protecteur de la nappe des dunes du nord qui introduit une charge hydraulique de l'ordre de 1.5, la présence d'une dépression piézométrique significative introduite par la grande niaye, et .une charge hydraulique de l'ordre de 0.5 sur la côte sud.

Cette étude montre que la réalisation de sondages électriques en zone urbaine à Dakar bien que difficile, est possible.

Enfin, nous conclurons en rappelant que la géophysique et particulièrement la méthode des sondages électriques constitue un outil qu'il est difficile d'utiliser sans connaissances issues des autres disciplines, mais qu'elle peut contribuer de façon significative aux projets d'étude sur l'environnement, particulièrement dans le domaine des nappes d'eau souterraine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARNAUD G. (1952) - Note sur l'hydrogéologie de la région de Dakar. *Bull. Dir. Mines Afr. occ. fr.*, Dakar, n° 10, p.61-74, 2pl. h.t

ASTIER J.L (1971) - Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. *Masson et Cie*, Paris, 277 p.

BA-NIANG F., DIAKHATE B., DIONE M. (1993) - Deux problèmes de la région dakaroise: la surexploitation des nappes et l'évacuation des eaux usées. In DIAW A. T. *et al* , 1993.

BELLION Y J.-.C (1987) - Histoire géodynamique post paléozoïque de l'afrique de l'ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudéni, Iulmmeden Tchad): le bassin sénégalo-mauritanien. p. 1-70. Thèse.

BELLION Y.J.-C., GUIRAUD R., SARR R., (1983) - Le bassin sédimentaire sénégalais: essai d'interprétation géodynamique. *Labo. des Sc. de la Terre Univ. St- Jérôme*, Aix-Marseille, 1983, série A, n° 15.

BREUSSE J. (1952) - La prospection électrique appliquée aux recherches hydrologiques dans la presqu'île du Cap- Vert, Sénégal. *Bull. Dir. Mines Afr. occ. fr.*, Dakar, n° 10, p.83-91, 1pl., 4 fig.

B.R.G.M.(1987) - Etude des ressources en eau souterraine du Sénégal. Rapport campagne de prospection géophysique. 27p. 47 fig.+ annexes.

B.R.G.M.(1988) - Etude des ressources en eau souterraine du Sénégal. Rapport exécution des piézomètres.

CASTANY G. (1963) - Traité pratique des eaux suterraines. DUNOD, Paris, 657 p.

CASTELAIN J., JARDINE S., MONCIARDINI C. (1965) - Excursions géologiques à travers le Sénégal occidental d'après des travaux et des documents de la Société Africaine des Pétroles (S.A.P.). Colloque intern. de Micropaléontologie (Dakar 6-11 mai 1963). *Mem. B.R.G.M.*, n°32, p.357-365, 4 coupes, 1 tabl., 2 cartes.

C.G.G (1956) - Prospection électrique dans la presqu'île du Cap-Vert: Sangalkam, Niakoul Niaga, Beer Tialane, Niayes. *O.M.S.* 11p.

C.G.G (1970) - Prospection électrique dans la presqu'île du Cap-Vert: Avril- juillet 1970. *O.M.S.* 44p., 7pl., 13fig.

C.P.G.F. (1978) - Amélioration de l'alimentation en eau potable de Dakar. Etude géophysique de la région du lac Tamna. Rapp. projet P.N.U.D - O.M.S.- SEN 77/011. 25p.

CREVOLA G., GAYE C.B. (1979) - Interprétation géologique des coupes de six sondages réalisés au niveau de la tête de la presqu'île du Cap-Vert. *Départ. géol. Fac. Sci. Rapp.* n° 1 nouv. série (Dakar), juin, 16p., 1fig.

CREVOLA G., CANTAGREL J.-M., MOREAU C. (1994) - Le volcanisme cénozoïque de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal): cadre chronologique et géodynamique. *Bull.Soc. géol. France*, t. 165, n° 5, pp. 437-446.

DIAW A.T., BA A., DIOUF P.S., LAKE L.A., MBOW M.A., NDIAYE P., THIAM M.D. (1993) - Gestion des ressources côtières et littorales du Sénégal. U.I.C.N., I.S.R.A., I.F.A.N.. *Acte de l'atelier de Gorée du 27-29 juillet 1992.* 486 p.

DIOUF S. (1995) - Application de la géophysique (sismique et électrique) à l'étude de la géométrie du réservoir de l'aquifère du littoral nord Sénégal (de Taïba à Rao). *Mem. D.E.A., Depart. Géol., Fac. Sci., UCAD.* Dakar, 105p.

DUPRAT A., (1982) - Géophysique générale: Géophysique appliquée à la recherche d'eau. *C.G.G. technical series* n° 523-82-08. 28p.

ELOUARD P. (1980) Géomorphologie structurale, lithologique et climatique de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal); In Notes africaines n°167.

FALL M., (1981) Contribution à l'étude hydrogéologiques des calcaires paléocènes de Pout et du lac Tanma. *Mem. D.E.A., Depart. Géol., Fac. Sci., UCAD.* Dakar, 50 p

GARNIER J.M. (1978) - Evolution géochimique d'un milieu confiné: le lac Retba (Cap- Vert), Sénégal. ORSTOM. 14p.

GAYE C.B. (1979) - Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe infrabasaltique du Cap- Vert. *Départ. géol. Fac. Sci. UCAD. Dakar,. Rapp.* n° 1 nouv. série (Dakar), juin, 19p., 12fig., 3 tabl.

GAYE C.B., FAYE A., GELINAS P.J., THERRIEN P.(1988) - Analyse de l'intrusion saline dans les aquifères de la presqu'île du Cap-Vert. Analyse du processus deminéralisation et de dégradation de la qualité de l'eau dans les nappes infrabasaltique et dessables quaternaires. Projet CRDI 3-p-86- 1014. UCAD, CRDI, Univers. LAVAL, Quebec. 28p. 5 annexes 51fig.

GUIRAUD R., BELLION Y.J-C. (1979). Etude lithostratigraphique des sondages et forages OMS réalisés dans le secteur Lac Tanma-Fouloum-Pout. *Départ. géol. Fac. Sci. Rapp.* n° 1 nouv. série, Dakar. 6p. juin, 6p.,3fig.

HEBRARD L. (1966) - Les formations tertiaires et quaternaires de l'isthme de la presqu'île du Cap-Vert (feuille Thiaroye, Sénégal). R*app.Lab. Géol. Fac. Sci.*,n°16. 75p.

HEBRARD L., ELOUARD P. (1976) - Notice explicative de la carte géologique de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal). 7 feuilles. *Départ. géol. Fac. Sci UCAD*; Dakar.

LE SAGE Ph. (1983) - Etude géphysique par sondage électrique à Mboro, Fass Boye et Lompoul. *B.R.G.M.*

MARTIN A. (1970) - Les nappes de la presqu'île du Cap- Vert (République du Sénégal). Leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar. *Publi. B.R.G.M./F.A.C.* 56p. 30fig. ,hors texte: carte hydrogéologique de la presqu'île (1/50000) en 3 feuilles, carte hydrochimique de la presqu'île au 100000 en 1 feuille.

MARTIN A. (1970): Etude géochimique des eaux souterraines de l'Afrique de l'ouestpresqu'île du Cap-Vert (Sénégal). Rapport B.R.G.M./F.A.C.

MATHIEZ J.P., HUOT G. (1966) - Prospection géphysique et recherche d'eaux souterrainex: exemple d'application en Afrique occidentale.

MELKA J., FOHLEN D. (1989) - Synthèse des récentes campagnes de prospection géophysique, *Rapport B.R.G.M.*

OMS (1972) - Etude sur modèle mathématique du système aquifère de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal). Rapport final.

MEYER DE STADELHOFEN C. 19991) - Application de la géophysique aux recherches d'eau. *Lavoisier* Paris,173p.

MOUSSU H., DEBUISSON J. (1966) - Etude expérimentale d'un équilibre eau douce - eau salée sur le rivage de Malika près de Dakar (Sénégal).

PLOTE H. (1970) - Utilisation de méthodes hydrogéologiques avancées à Dakar (Sénégal). 134p. *B.R.G.M.*

SARR B. (1995) - Determination de la perméabilité des des aquifères par la méthode du slug test. Application à la nappe du littoral nord. *Mem. D.E.A., Depart. Géol., Fac. Sci., UCAD.* Dakar, p.

SARR R. (1995) - Etude biostratigraphique et paléoenvironnementale des séries d'âge Crétacé terminal à Eocène moyen du Sénégal occidental. Systématique et migration des ostracodes.Thèse Doctorat d'Etat, *Depart. Géol., Fac. Sci., UCAD.* Dakar, 329pp et annexes.

SHOELLER H. (1955) - Hydrogéologie par Schoëller. *Institut francais du pétrole. E.N.S.* 202 p.

SPENGLER A. (de), CASTELAIN J., CAUVIN J., LEROY M. (1964) - Le bassin secondaire - tertiaire, du Sénégal. *Ass. Serv. géol. afr.*, Symposium Bassins sédim. Littoral afr., 1ère partie: Littoral atlant. (Paris), 1966, p. 80-94, 3fig.

TANDIA A.A., GAYE C.B., NDIAYE B., FALL M. (1990) - Atelier nappes salées. Livret du guide de l'excursion. (projet 3-P-86-1014). 21p. *Départ. géol. Fac. Sci UCAD*; Dakar.

THERRIEN P., GELINAS P. (1989) - Bilan hydrologique de l'aquifère infrabasaltique et des sables quaternaires. Rapp. CGL-XX juillet 1989.19p., 7 annexes ; *inédit.*

TOGUYENI O., (1986) - Essai de prospection par sondages électriques appliqués à l'étude d'aquifères du Sénégal soumis à des invasions marines.actuelles ou récentes (Ferlo, Tanma, Nianing). Mém. Ingénieur. *Départ. géol. Fac. Sci CAD*; Dakar.

TCHANI J., (1996) - L'aquifère des sables quaternaires au nord de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal) : morphologie déduite des données hydrogéologiques etgéophysiques (sondages électriques). Etude d'un cas d'invasion saline.

VAN OVERMEEREN (1988) - Aquifer bounderies explored by geoelectrical measurements in the coastal plain of Yemen: a case of equivalence. *Geophysics, vol. 54,* n° 1 january 1989) P.38-48, 14fig. 1 tabl.

ANNEXE 1

Données pluviométriques

	M'bao-thiaroye	Cayar	Mboro
1956			385.5
1957			566.1
1958			676
1959			341.6
1960			518.3
1961			427.8
1962			401.7
1963			514.1
1964			448.5
1965			534.3
1966			491
1967			537
1968			277.4
1969			738.2
1970	206.5		333.6
1971	385.2		305
1972	180.7		280.5
1973	292.9		180.3
1974	373.5		228.2
1975	696.6	634.4	377.5
1976	371.1	382.8	484.9
1977	325	484.9	357.1
1978	358.1	310.7	408.6
1979	337.3	408.6	419.9
1980	372.6	449.7	262.9
1981	370.7	274.4	226.7
1982	353	339.6	351.5
1983	209.9	259.7	304.3
1984	222.6	94.5	188.7
1985	452.9	246.4	284.3
1986	240.1	255.5	434.9
1987	436.9	473.9	348.1
1988	451.8	348.6	355.9
1989	481.8	517	495.2
1990	307.1	695.2	317.5
1991	283.1	307.4	167.3
1992	283.7	107.5	220.6
1993	294.8	198.5	279.6

pluviométrie de CAYAR

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1982	2.9					40.2	52	143.9	103.2	0.3		
1983							63.1	143	41.5	12.1		
1984								73.1	21.4			
1985						15	32.6	95.1	103.7			
1986						22.1	34.1	114.1	84.9	0.3		
1987	0.1	1.2					30.1	100.5	309.1	34.2		
1988						2.9	51.3	98.1	168.2	28.1		
1989		3.3				30.5	0.8	379.3	99	1.3	3.8	2.3
1990						31.5	142.5	418.1	89.1	14		
1991							75	111	121.4			
1992						13.5	8	50.5	35.5			
1993		5					15.5	141	37			
moy.	1.5	3.2				22.2	45.9	155.6	101.2	12.9	3.8	2.3

pluviométrie de M'BORO

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1982	6.3				0.5	20.4	80.6	136.4	93.9	14.2		
1983					1.1	1	91.4	122.2	36.5	52.1		
1984						24.4	31.8	39.3	67.7	25.5		
1985						24.2	23.5	111.5	122.6	2.5		
1986						24.2	5.3	59	256.9	86		3.5
1987						0.5	50.5	95.1	191.2	10.8		
1988						1.5	17.3	226.7	110	0.4		
1989						27.9	106.1	322.2	38.3	0.7		
1990						0.5	44.4	150.7	103.9	16.6	1	
1991						0.4	38.9	68.9	45.4	13.7		
1992		5.4	1		1.3		26.8	120.4	46.2	15.4		4.1
1993	0.5	3.1	0.2				144.8	80.1	45.8	4.6		0.5
moy.	3.4	4.3	0.6		1.0	12.5	55.1	127.7	96.5	20.2	1.0	2.7

pluviométrie de M'BAO - THIAROYE

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1982												
1983						10.8	0.2	131.4	69.5			
1984						5.9	38.2	51.4	123.7	4.1		
1985						15.2	62.8	204.9	160.7	9.3		
1986		1.6							232.4	6.1		
1987						0.9	80.3	103	222.9	22.8		
1988		11.6				19.1	5.9	165.4	214.9	34.9		
1989						22.9	117.7	341.2	130.5			
1990	14.6						5	101.7	155.1	30.7		
1991	1.1					17.5	18	108.9	107.1	30.6		
1992	4						45	98.8	54	0.7		1.2
1993							63.7	105.4	125.8			
moy.	6.6	6.6				13.2	43.7	141.2	145.1	17.4		1.2

ANNEXE II

Données piézométriques

Ouvrages	Longitude en d°	Latitude en d°	côte piézométrique
p2.4	17.41	14.777	2.025
p2.2	17.428	14.755	0.2
p2.1	17.434	14.74	0.8
p2.3	17.409	14.775	1.2p2.6
p2.6	17.341	14.766	0.4
p3.2	17.368	14.757	2.92
p114	17.216	14.786	7.44
s1p1	17.231	14.792	1.86
pt104	17.24	14.79	2.95
pt203	17.229	14761	28.06
pt202	17.251	14.752	20.63
pt235	17.294	14.733	10.3
pt202	17.251	14.752	20.63
pt235	17.294	14.733	10.3
ps8	17.16	14.806	22.98
ps10	17.148	14.832	25.7
ps11	17.151	14.844	19.79
pt215	17.116	14.83	27.93
ps2	17.12	14.853	9.03
ps3	17.103	14.875	13.44
ps5	17.12	14.871	1.77
ps4	17.107	14.876	4.95
ps6	17.11	14.889	1.7
pt220	17.077	14.875	17.38
pt221	17.091	14.897	12.7
pt213	17.129	14.888	0.74
pt234	17.119	14.917	1.23
ps14	17.149	14.883	1.18
pt232	17.161	14.88	1.65
ps13	17.171	14.867	-0.89
p02	17.171	14.848	5.97
pt120	17.193	14.82	0.21
pt128	17.218	14.822	-2.82
p2.9	17.24	14.825	0.46
pt109	17.25	14.78	0.6
p2.7	17.284	14.803	0.22
p2.8	17.276	14.819	2.045
pt68	17.294	14.783	2.4
p3.1	17.366	14.741	1.65

ANNEXE III

Présentation de la méthode électrique

PRESENTATION DE LA METHODE ELECTRIQUE

La prospection électrique consiste à étudier les propriétés électriques du sous-sol au moyen de mesures effectuées à la surface. De toutes les méthodes géophysiques, c'est celle des résistivités qui est la plus utilisée en hydrogéologie. Cette partie n'a pas la prétention d'exposer tous les aspects théoriques de la méthode: il s'agit plutôt d'en donner quelques principes de base et un aperçu pratique. Nous utiliserons la bibliographie déjà fournie dans ce domaine notamment Astier, 1971 ; Meyer De Stadelhofen, 1991 ; Telford *et al*, 1976 ; Mathiez et Huot, 1966.

1- PRINCIPE DE LA RESISTIVITE DES ROCHES

En l'absence des sulfures métalliques et du graphite toutes les roches conduisent le courant électrique grâce à l'eau plus ou moins chargée de sels, présente dans leurs pores ou fissures ou absorbée. Les paramètres qui expriment la conductibilité électrique sont la conductivité ou son inverse, la résistivité. La résistivité est définie comme étant la résistance d'un cylindre de longueur et de section égales à l'unité.

$$\rho = R \cdot \frac{s}{l}$$

ρ: résistivité
R: résistance en ohm.m
s: section en m^2
l: longueur en m

La résistivité s'exprime donc en ohm.m.

La résistivité d'une roche à conductibilité électrolytique, particulièrement les sables, va dépendre essentiellement de la quantité et de la résistivité propre de l'eau d'imbibition (qui elle même dépend de sa salinité), et de sa teneur en argile. A ces facteurs principaux on peut ajouter la tortuosité qui exprime le mode de communication entre les pores.

La formule d'Archie synthétise ces relations et permet dans le cas d'un sable non argileux d'estimer la porosité et le taux de saturation du sous-sol.

$$\rho_r = a \cdot \frac{\rho_w \cdot \Phi^{-m}}{s^2}$$

$$F = \frac{a}{\Phi^m} = \frac{\rho_r}{\rho_w}$$

F est le facteur de formation.

ρ_r est la résistivité de la roche.
ρ_w est la résistivité de l'eau d'imbibition.
Φ est la porosité.
a est un facteur proche de 1.
m est le coefficient de cimentation ou coefficient de distribution des vides.
La saturation (s) s'exprime en pour-cent.

Une absence complète d'eau entraîne des résistivités infinies alors que la présence d'argile fait baisser la résistivité des sables.

Les valeurs reportées sur le tableau 1 font apparaître une certaine corrélation entre perméabilité, porosité efficace et résistivité. On voit donc l'utilité de ce paramètre pour étudier la qualité des aquifères en zone côtière, en l'occurrence la nappe des sables quaternaires de la presqu'île du Cap-Vert..

Roches meubles	Porosité totale en %	Porosité efficace en %	Perméabilité en %	Résistivité observée en Ω.m
Gravier	45	35	3.10^{-1}	200
Gravier et sable	35	20	1.10^{-5}	160
Sable	40	30	6.10^{-4}	125
Sable silteux	32	5	1.10^{-9}	60
Silt	36	3	3.10^{-8}	30
Argile	47	0	5.10^{-10}	10

Tableau 1- Valeurs empiriques des résistivités, porosités et perméabilités pour divers terrains meubles. Meyer, 1991.

2- PRINCIPE DE LA MESURE

2.1- Formules de base

Si dans un terrain homogène de résistivité ρ, on envoie par une électrode ponctuelle A un courant continu d'intensité I, il s'écoule radialement et les lignes équipotentielles sont des hémisphères concentriques (fig 1).

En appliquant la loi d'ohm au demi- espace séparant deux équipotentielles entre lesquelles existe une tension dV on a:

$$-dV = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \cdot I$$

soit en intégrant :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi \cdot r}$$

Si l'électrode de retour B est à une distance finie de A, le potentiel d'un point M est donné par la formule suivante:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB}\right)$$

La répartition des équipotentielles et des lignes de courant à la surface du sol (et suivant tous les plans passant par AB) est donnée par la figure 2. On constate que la profondeur de pénétration des lignes de courant augmente des électrodes vers le centre et que dans la zone située au centre de AB, les équipotentielles sont pratiquement des droites perpendiculaires à AB.

2 .2 - **Dispositif de mesure: le quadripôle AMNB**

Soit un quadripôle AMNB quelconque (fig. 3). Par les électrodes A et B on envoie un courant d'intensité I dans le sol et on mesure la différence de potentiel
$\Delta V = V_M - V_N$ qui en résulte. En appliquant la formule (1) il vient pour un terrain homogène et isotrope:

$$\Delta V = \frac{1}{2\pi}\left[\left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB}\right) - \left(\frac{1}{NA} - \frac{1}{NB}\right)\right]\rho I$$

De cette formule on peut tirer la résistivité rho du terrain.

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \qquad \text{avec } K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB}\right) - \left(\frac{1}{NA} - \frac{1}{NB}\right)}$$

Le facteur k qui ne dépend que de la position relative des quatre électrodes (ABMN) est appelé facteur géométrique.

Si le terrain est électriquement homogène, on mesure la résistivité vraie (spécifique) du terrain. Mais si le terrain comporte plusieurs couches de résistivité différente (ρ_1 , ρ_2,... ρ_n) , les équipotentielles et les filets de courant sont déformées et la valeur de résistivité mesurée est une valeur moyenne qu'on appelle la résistivité apparente (ρ_a).

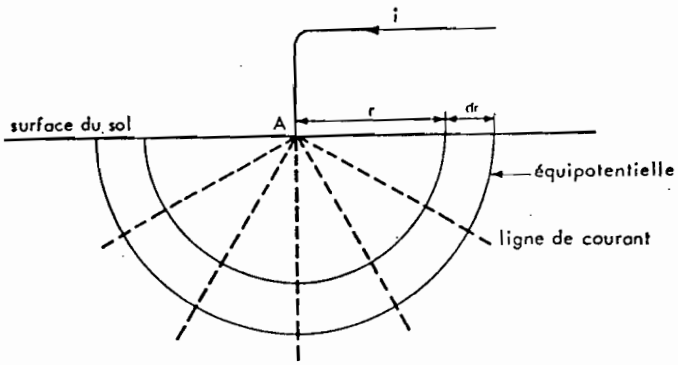


Fig. 1 - Electrode ponctuelle d'envoi de courant continu

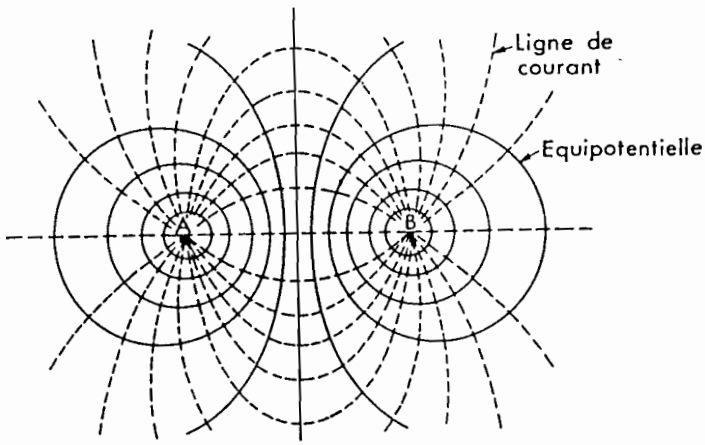


Fig. 2 -Répartition des équipotentielles et des lignes de courant à la surface d'un terrain homogène suivant tous les plans passant par AB.

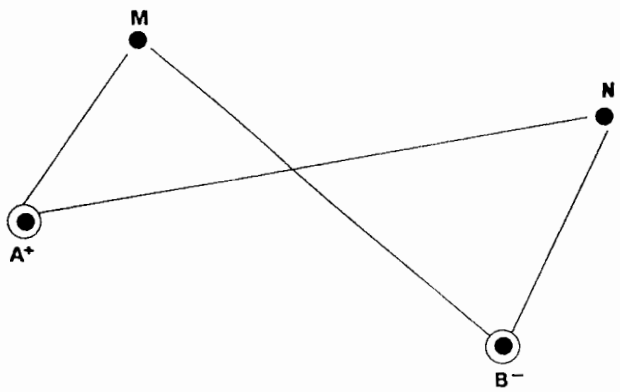


Fig.3 - Différence de potentiel ΔV entre MN pour un dispositif quadripôle quelconque.

C 'est l'étude des variations de cette résistivité apparente en courant continu qui constitue la méthode des résistivités. Elle comprend deux techniques qui sont les sondages électriques et les profils de résistivité.

3- LE SONDAGE ELECTRIQUE: MISE EN OEUVRE ET INTERPRETATION

Le sondage électrique permet d'obtenir suivant la verticale une coupe du sous-sol en terme de profondeur et de résistivité. L'opération du sondage consiste à agrandir progressivement la longueur AB du quadripôle de façon à obtenir une profondeur d'investigation croissante (fig. 4). Il n'existe cependant pas une relation simple entre la profondeur d'investigation et la longueur AB. Elle est au mieux égale à AB/4 mais peut tomber à AB/12 quand le substratum est très conducteur. C'est le cas des sables aquifères de la presqu'île qui reposent sur un substratum marneux argileux tertiaire ou sous des formations salées.

Les dispositifs les plus utilisés sont ceux de Schlumberger et de Wenner. Ces deux types de dispositifs sont rectilignes et symétriques par rapport au centre O du dispositif. Dans le dispositif de Wenner le rapport de AB/MN est maintenu à 3 pour toutes les mesures. Alors que ce rapport est maintenu aussi grand que possible (en général 4< AB/MN< 20) dans la méthode schlumberger (fig. 5) On change aussi la longueur MN lorsque la mesure de la ddp ΔV qui est proportionnelle à MN devient trop difficile.

Dans le cadre de ce mémoire nous avons utilisé la méthode Schlumberger qui présente les avantages suivants:

- Un gain de temps puisqu'on ne déplace que deux électrodes le plus souvent ;
- Les perturbations dues aux hétérogénéités locales au voisinage des électrodes MN, ou à-coup de prise sont limitées et mises en évidence si bien qu'elles peuvent être éliminées. La figure 6 extraite de Astier, 1971 montre qu'avec un dispositif de Wenner, ces perturbations peuvent faire croire à la présence de terrains qui n'existent pas en réalité.

Avec le dispositif schlumberger l'expression de K est la suivante:

$$K = 2\pi \cdot \frac{1}{\frac{MB - MA}{MA \cdot MB} - \frac{NA - NB}{NA \cdot NB}}$$

$$MB - MA = MN \quad \text{et} \quad NB - NA = MN$$

$$MA \cdot MB = NA \cdot NB$$

$$MA = \left(\frac{AB}{2}\right) - \left(\frac{MN}{2}\right) \qquad \text{et} \qquad MB = \left(\frac{AB}{2}\right) + \left(\frac{MN}{2}\right)$$

$$MB \cdot MA = \left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{MN}{2}\right)^2 \approx \frac{AB^2}{4} \qquad \text{car} \qquad MN<<<AB$$

$$K = 2\pi \cdot \frac{1}{\frac{2MN}{\left(\frac{AB}{2}\right)^2}} \qquad \text{donc} \qquad K = \frac{\pi}{4}\left(\frac{AB^2}{MN}\right)$$

Procédure de mesure.

On effectue une mesure pour un premier espacement de AB. Ensuite on écarte symétriquement les électrodes AB autour du centre O et on effectue la mesure suivante. Pour chaque valeur de AB et MN du quadripôle, le résistivimètre *Terrameter ABEM* (fig. 7) donne la valeur du rapport V/I. Connaissant la valeur K on déduit celle de la résistivité apparente en appliquant la formule $\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$. Lorsque la ligne AB atteint en général 200m ou bien en présence de terrains très conducteurs (salés) ou très résistants en surface, on connecte le résistivimètre au SAS Booster (fig. 6) qui permet d'injecter jusqu'à 500 mA.

Le document objectif soumis à l'interprétation est la courbe de sondage $\rho_a = f(AB/2)$ en échelle logarithmique.

INTERPRETATION

L'interprétation d'un sondage électrique en 1-D n'est significative que dans le cas où un certain nombre de conditions sont réunies:

- Homogénéité du sous-sol ou stratification électrique sub-horizontale des terrains sous-jacents,

- Plans de séparation réguliers entre les couches.

Ces conditions sont peu restrictives dans la presqu'île (roches sédimentaires) et peuvent s'appliquer au moins, aux environs immédiats de sondages.

Le principe de l'interprétation consiste à trouver ou à calculer une courbe modèle superposable à la courbe de terrain. On évalue en général à 5% la précision que l'on obtient sur la les mesures de la résistivité apparente et de l'interprétation. Cette détermination se fait :

- soit par sélection dans un catalogue de courbes
- soit à l'aide d'abaques. On utilise en général l'abaque deux terrains et les quatre abaques auxiliaires. Cette méthode utilise le principe de réduction qui consiste à remplacer deux horizons électriques homogènes par une seule fictive et électriquement équivalente.

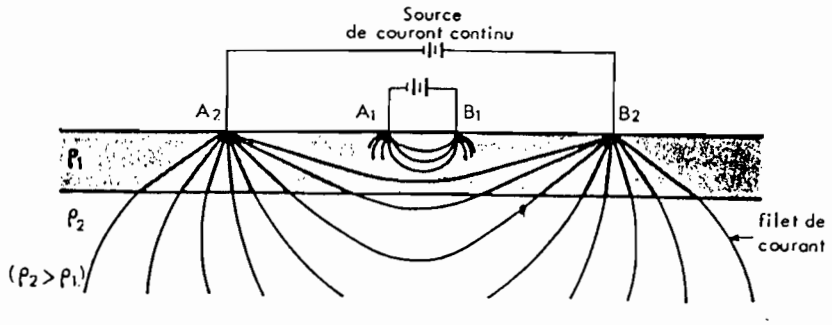


Fig.4 - La profondeur d'investigation augmente avec la distance AB.

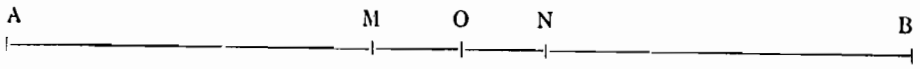


Fig.5 - Dispositif Schlumberger.

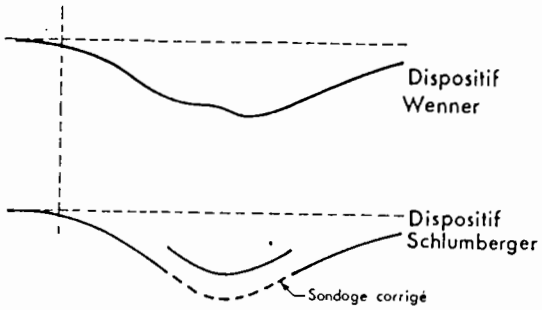


Fig.6 - Effet des à- coup de prises sur des sondages électriques effectués avec un dispositif Wenner et un dispositif Schlumberger.

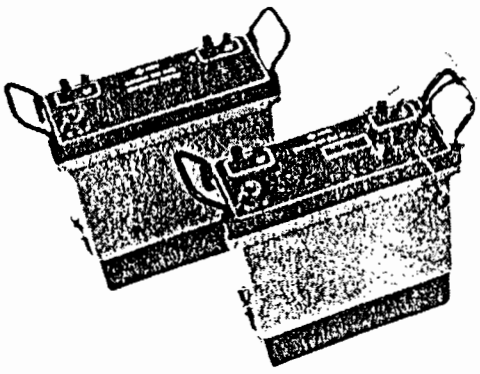


Fig.7 - Résistivimètre ABEM Terrameter SAS 5000 avec le Booster.

- soit par programme de calcul informatique. Nous avons utilisé le logiciel PISE4 de TABBAGH et GABBALDA (1994).

LIMITE DE L'INTERPRETATION

Une courbe de terrain peut être satisfaite par plusieurs modèles. Ceci est lié essentiellement aux principes d'équivalence et de suppression.

1) Le principe d'équivalence

En sondage électrique, une couche intervient principalement par sa conductance longitudinale (C) si elle est conductrice par rapport aux couches encaissantes, par sa résistance transversale (R) si elle est résistante par rapport à ces couches.

$C = \frac{h}{\rho}$ et $R = h.\rho$; h étant l'épaisseur de la couche et ρ sa résistivité.

d'où $h = \sqrt{R.C}$ et $\rho = \sqrt{\frac{R}{C}}$

En d'autres termes, dans certaines limites la courbe de sondage ne dépendant plus de h et de ρ séparément mais de leur produit ou de leur quotient, le sondage électrique ne détermine plus de valeurs uniques pour h_n et ρ_n.

Exemple 1: le sondage S.E.13 peut être interprété entre autre, par les modèles suivants:

modèle A		modèle B		modèle C	
Résist.	épais.	Résist.	épais.	Résist.	épais.
0.72	0.65	0.33	0.3	0.33	0.3
60	20	143	7.96	299	3.9
1		1.3		1.3	

La résistance transversale de l'horizon intermédiaire (deuxième niveau) est respectivement égale à 1200, 1132 et à 1166 ohm. Il appartient à l'interprétateur de choisir le modèle qui se rapproche le plus de la réalité du terrain.

En utilisant l'équivalence Dar Zarrouk (Meyer, 1991) on peut calculer une couche électriquement équivalente (ρ_f, h_f) aux deux premiers niveaux.

$$R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n = \sum_{i=1}^{m} h_i . \rho_i$$

$$C = C_1 + C_2 + \ldots + C_n = \sum_{i=1}^{m} \frac{h_i}{\rho_i}$$

En appliquant les formules précédentes on trouve:

* Pour le modèle A: $R = R_1 + R_2 = (0.72 \times 0.65) + (60 \times 20) = 1200 ohm$

$$C = C_1 + C_2 = \left(\frac{0.65}{0.72}\right) + \left(\frac{20}{60}\right) = 1.235 ohm^{-1}$$

$$h_f = \sqrt{R.C} = \sqrt{1200 \times 1.235} = 38.5m$$

$$\rho_f = \sqrt{\frac{1200}{1.235}} = 31.2 ohm.m$$

Les deux premiers niveaux sont équivalents à:

modèle A		modèle B		modèle C	
Résist.	épais.	Résist.	épais.	Résist.	épais.
31.1	38.5	34.4	33.1	35.6	32.8
1.3		1.3		1.3	

Exemple 2: Le modèle retenu pour le sondage SE12 est le suivant:

Résistivités	épaisseurs
17000	1
500	2.5
53	15
12	29
500	

Si on remplace le quatrième niveau par un horizon de 6 ohm.m épais de 14.5, la courbe de ce dernier modèle est pratiquement identique à la première. Le quatrième niveau étant conducteur par rapport aux encaissants, c'est la conductance longitudinale qui prédomine. On a:

$$C_4 = \frac{29}{12} = \frac{14.5}{6} = 2.4 ohm^{-1}$$

2) Le principe de suppression

Il concerne les couches profondes et/ou les couches minces dont la résistivité est intermédiaire ou voisine par rapport aux encaissants. Ces couches n'affectent que très faiblement voire pas du tout la courbe de sondage obtenue sur le terrain.

Exemple: Les deux modèles suivant peuvent interpréter le sondage SE11.

modèle A (6 terrains)		**modèle B** (3 terrains)	
Résistivité (ohm.m)	Epaisseur (m)	Résistivité (ohm.m)	Epaisseur (m)
2600	2	2500	2.8
1500	2	500	60
27	4.3	1	
19	1.2		
64	55		
1			

Le modèle A contrairement au modèle B laisse supposer la présence de couches conductrices peu épaisses (27 ohm.m et 19 ohm.m , 4.3 et 1.2m).

Conclusion

Le principe d'équivalence est très important dans l'interprétation des diagrammes à trois terrains (cas de la presqu'île) car si on ne connaît pas h_2 ou ρ_2 par exemple au moyen d'un sondage effectué au droit d'un forage connu (sondage d'étalonnage) on se borne souvent à une interprétation qualitative en étudiant les déformations successives des diagrammes de sondages électriques. Le modèle proposé doit tenir compte de toutes les informations disponibles. Dans le cas de la presqu'île du Cap-Vert, nous avons les différents horizons électriques suivants:

sables secs	très résistant
sables à eau douce	résistant
sables à eau saumâtre et argiles	conducteur
sables à eau salée ou argiles salées	très conducteur

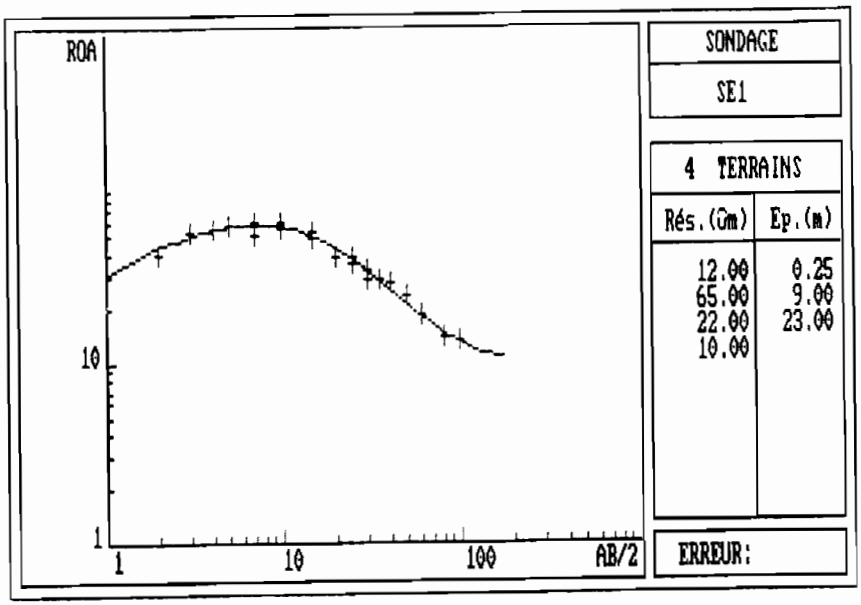
Une démarche que nous avons utilisée consiste à:

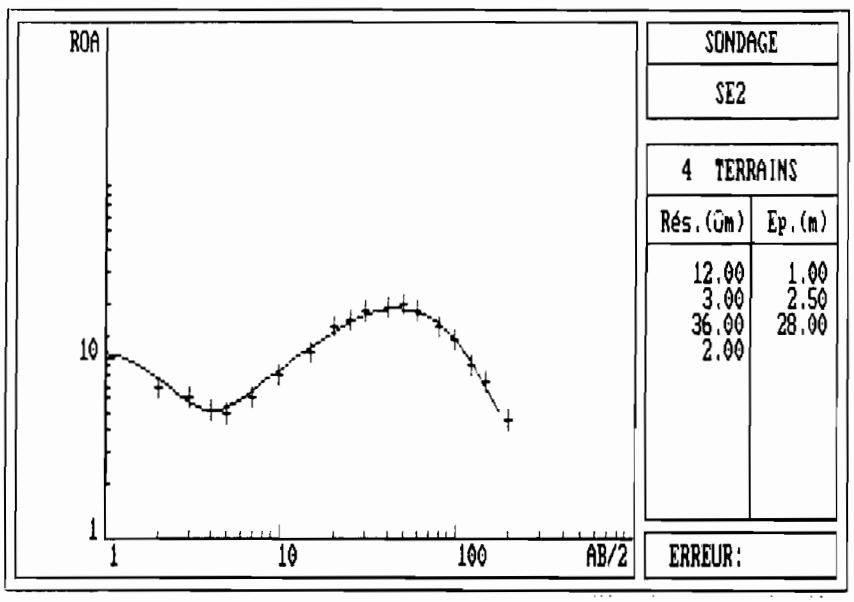
- faire un sondage d'étalonnage (SE 8)
- implanter les sondages de préférence dans les dépressions interdunaires où la nappe est sub-affleurante.
- relever le niveau de la nappe au niveau des céanes et des piézomètres.
- tenir compte des coupes de forages et sondages réalisés dans la zone, à défaut relever la profondeur du substratum marneux argileux d'après les études antérieures (Martin, 1970 ; O.M.S., 1972).

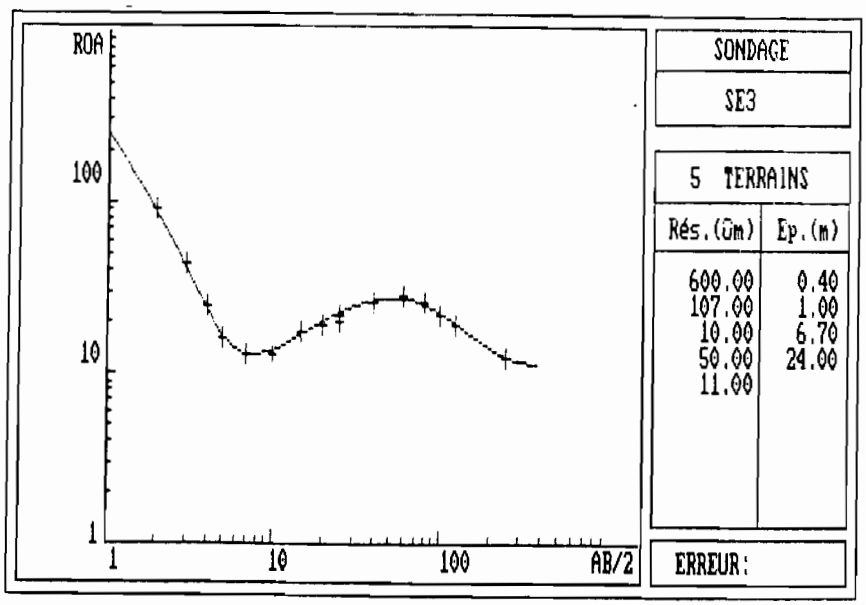
ANNEXE IV

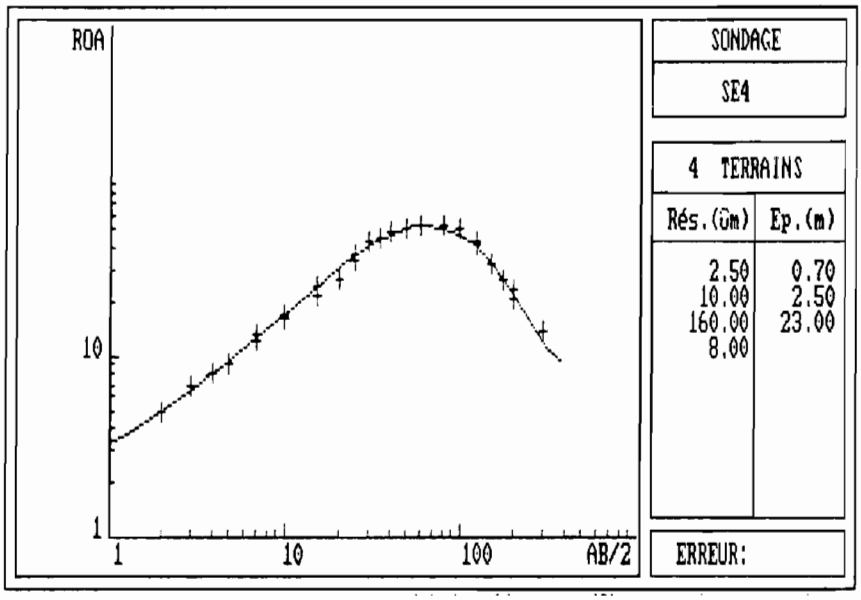
Coordonnées et courbes de sondages électriques

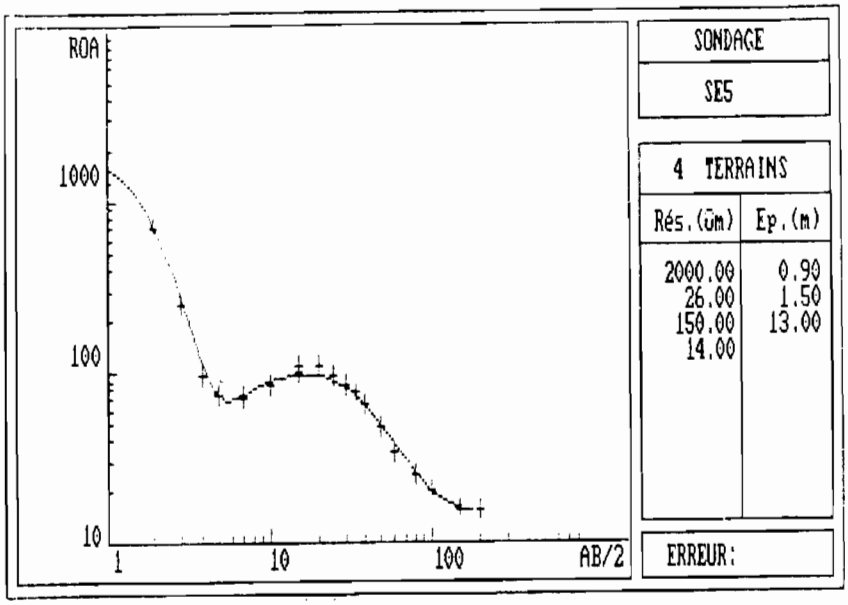
N° sondage	longitudes ouest	latitudes	altitudes
1	17°23'43"	14°44'24"	2
2	17°24'35"	14°45'16"	1
3	17°22'06"	14°44'30"	4
4	17°23'12"	14°44'48"	2
5	17°21'21"	14°44'32"	3
6	17°25'06"	14°45'00"	1
7	17°25'36"	14°45'00"	1
8	17°22'47"	14°45'22"	6
9	17°24'43"	14°45'45"	5
10	17°23'13"	14°47'03"	17
11	17°25'00"	14°46'14"	15
12	17°26'12"	14°45'03"	10
13	17°24'38"	14°44'39"	5
14	17°25'28"	14°44'43"	4
15	17°25'16"	14°44'25"	1

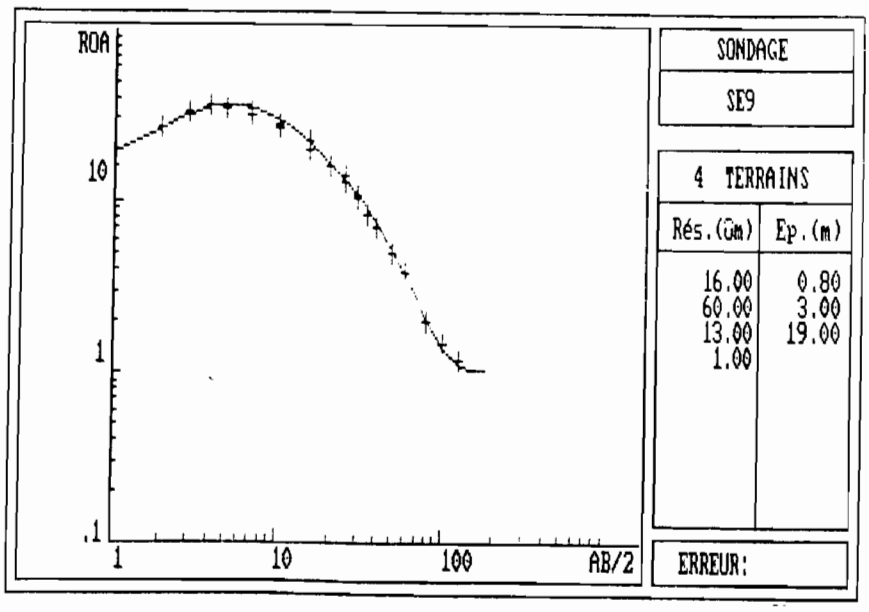

ROA
10
1
1
10
100
AB/2
SONDAGE
SE1
4 TERRAINS
Rés.(Ωm)
Ep.(m)
12.00
65.00
22.00
10.00
0.25
9.00
23.00
ERREUR:

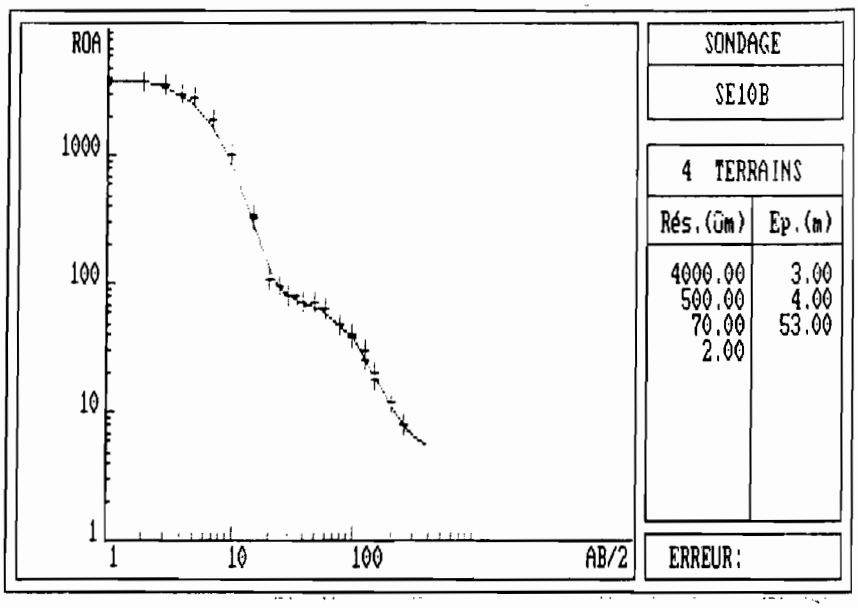

ROA
10
1
1
10
100
AB/2
SONDAGE
SE2
4 TERRAINS
Rés.(Ωm)
Ep.(m)
12.00
3.00
36.00
2.00
1.00
2.50
28.00
ERREUR:


ROA
100
10
1
1
10
100
AB/2
SONDAGE
SE3
5 TERRAINS
Rés.(Ωm)
Ep.(m)
600.00
107.00
10.00
50.00
11.00
0.40
1.00
6.70
24.00
ERREUR:


ROA
10
1
1
10
100
AB/2
SONDAGE
SE4
4 TERRAINS
Rés.(Ωm) Ep.(m)
2.50 0.70
10.00 2.50
160.00 23.00
8.00
ERREUR:


ROA
1000
100
10
1
10
100
AB/2
SONDAGE
SE5
4 TERRAINS
Rés.(Ωm) Ep.(m)
2000.00 0.90
26.00 1.50
150.00 13.00
14.00
ERREUR:


ROA
10
1
.1
1
10
100
AB/2
SONDAGE
SE9
4 TERRAINS
Rés.(Ωm) Ep.(m)
16.00 0.80
60.00 3.00
13.00 19.00
1.00
ERREUR:



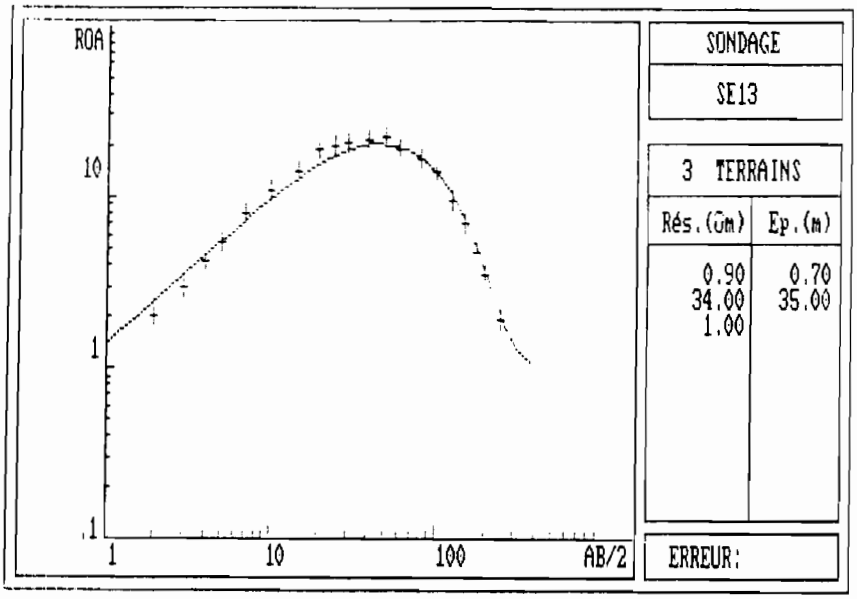
SONDAGE

SE10B

4 TERRAINS

Rés.(Ωm)	Ep.(m)
4000.00	3.00
500.00	4.00
70.00	53.00
2.00	

ERREUR:



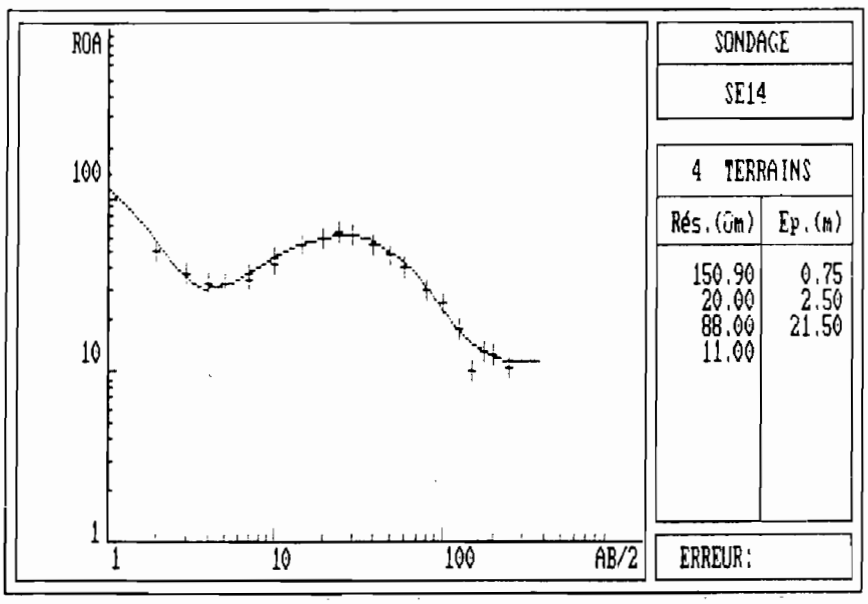
SONDAGE

SE13

3 TERRAINS

Rés.(Ωm)	Ep.(m)
0.90	0.70
34.00	35.00
1.00	

ERREUR:



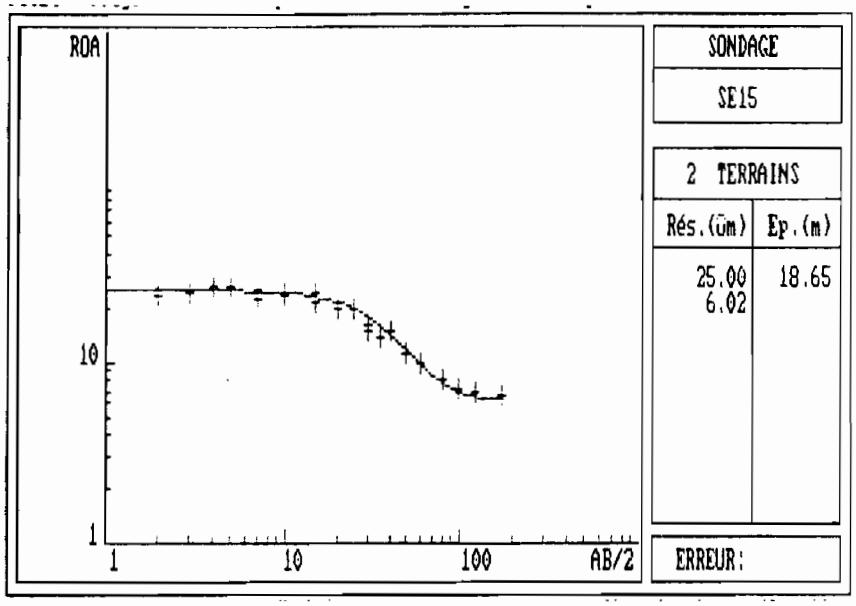
SONDAGE

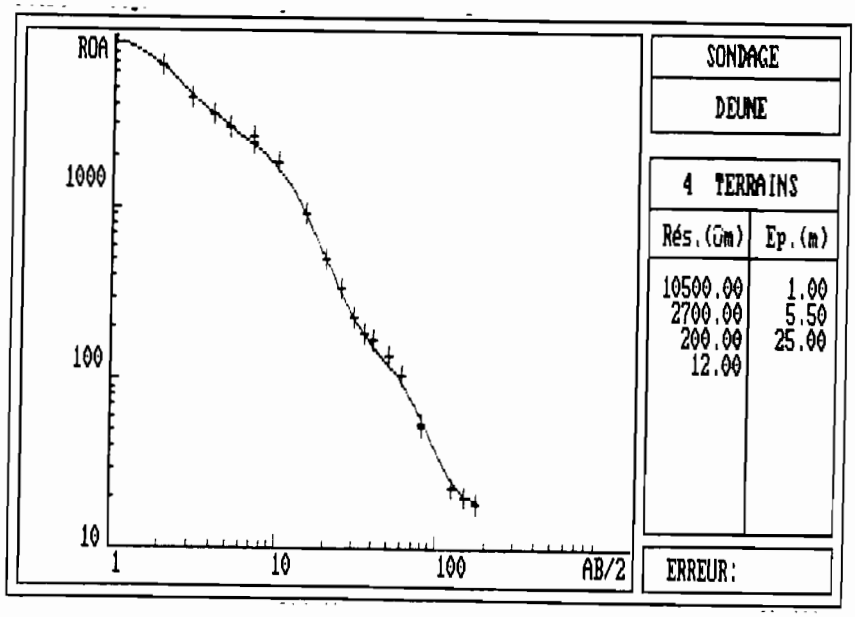
SE14

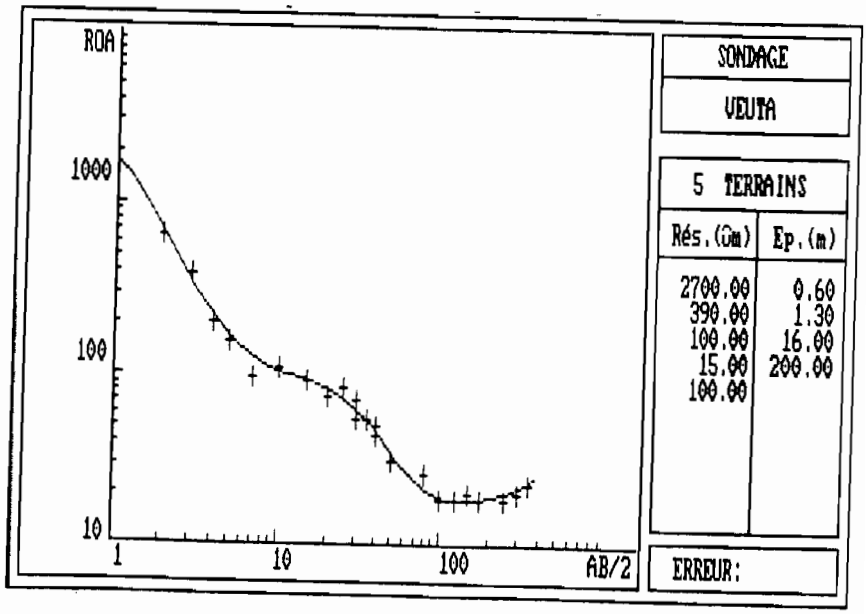
4 TERRAINS

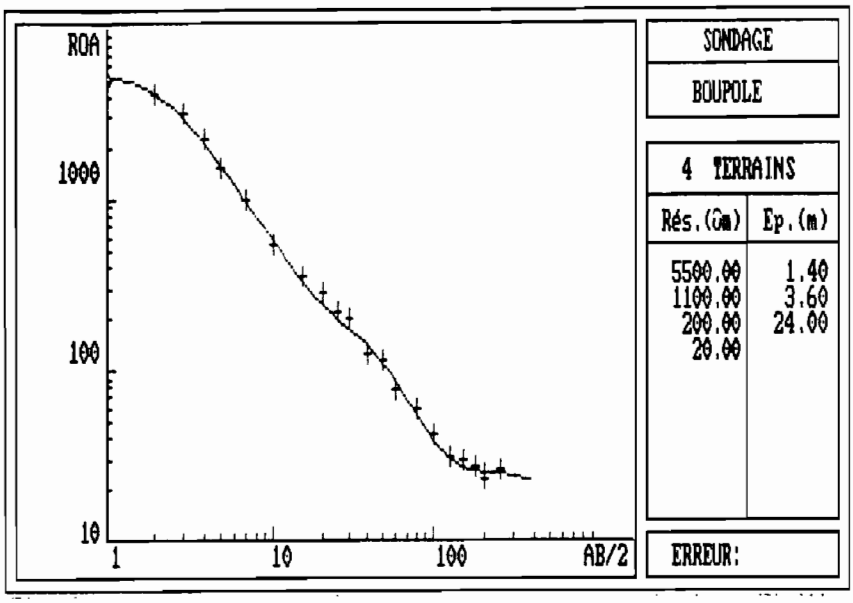
Rés.(Ωm)	Ep.(m)
150.90	0.75
20.00	2.50
88.00	21.50
11.00	

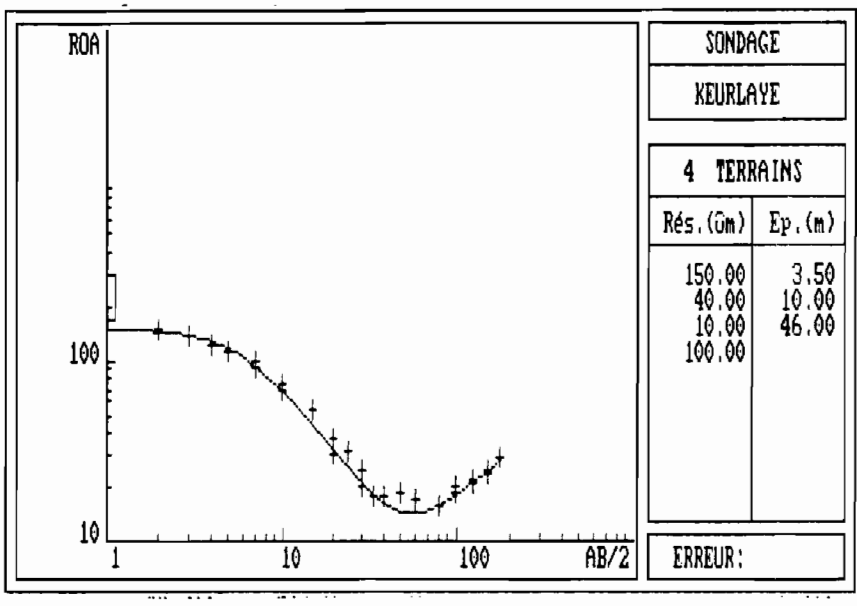
ERREUR:

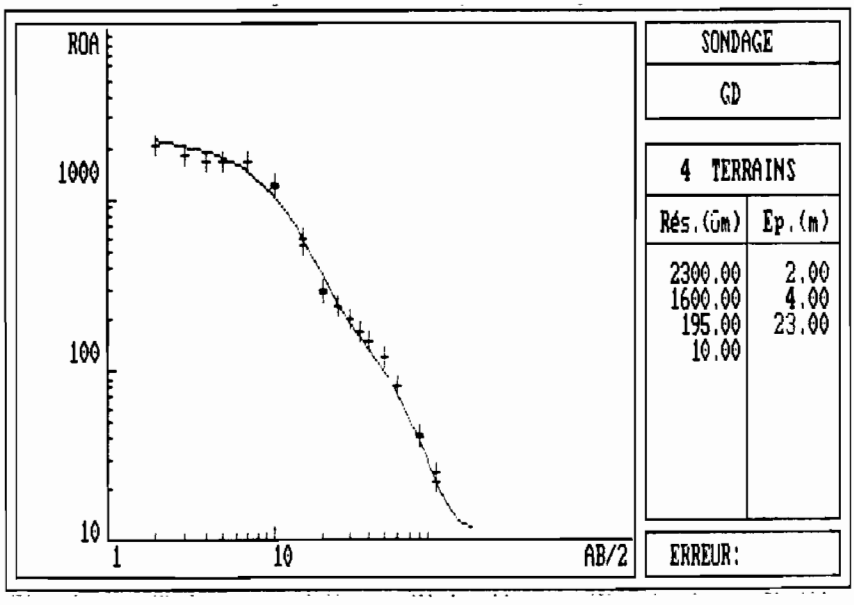

ROA
10
1
1
10
100
AB/2
SONDAGE
SE15
2 TERRAINS
Rés.(Ωm)
Ep.(m)
25.00
6.02
18.65
ERREUR:

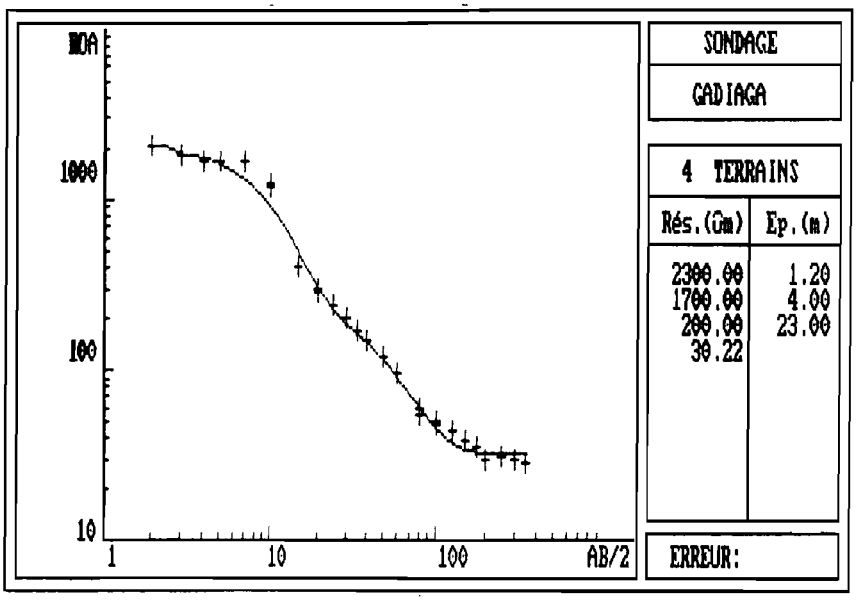

ROA
1000
100
10
1
10
100
AB/2
SONDAGE
DEUNE
4 TERRAINS
Rés.(Ωm)
Ep.(m)
10500.00
2700.00
200.00
12.00
1.00
5.50
25.00
ERREUR:

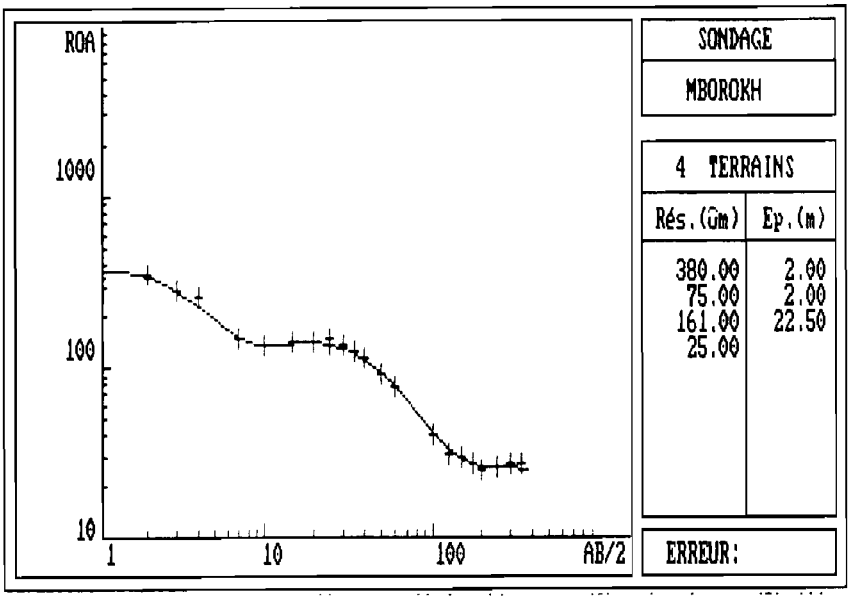

ROA
1000
100
10
1
10
100
AB/2
SONDAGE
VEUTA
5 TERRAINS
Rés.(Ωm)
Ep.(m)
2700.00
390.00
100.00
15.00
100.00
0.60
1.30
16.00
200.00
ERREUR:

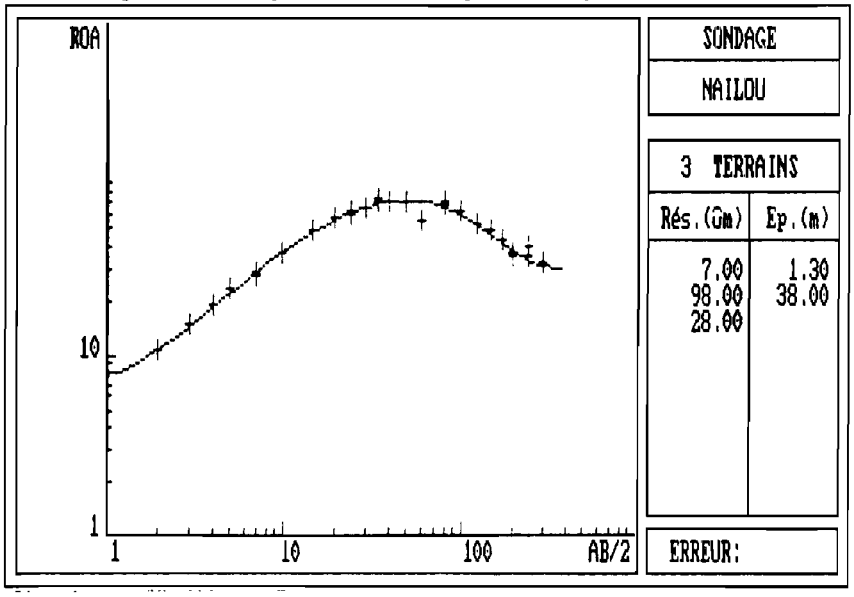

ROA
1000
100
10
1
10
100
AB/2
SONDAGE
BOUPOLE
4 TERRAINS
Rés.(Ωm) Ep.(m)
5500.00 1.40
1100.00 3.60
200.00 24.00
20.00
ERREUR:

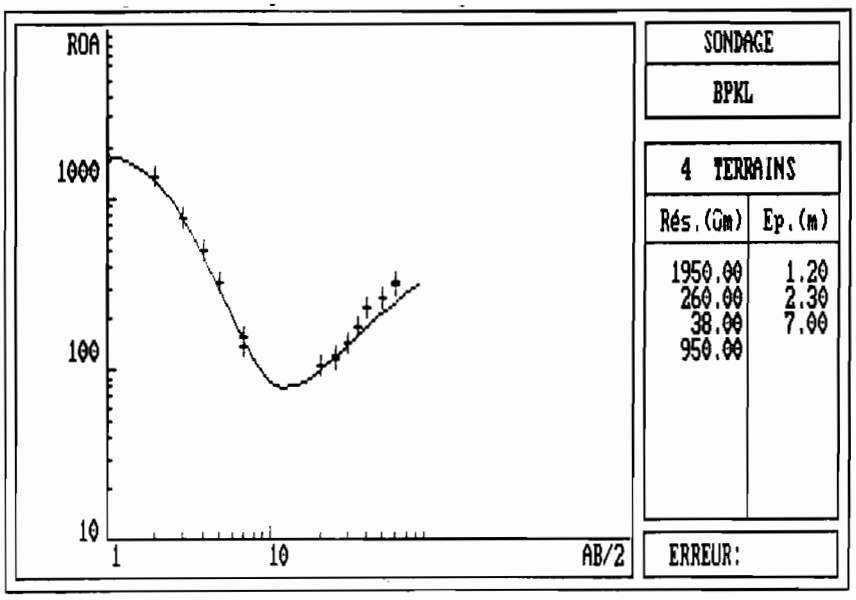

ROA
100
10
1
10
100
AB/2
SONDAGE
KEURLAYE
4 TERRAINS
Rés.(Ωm) Ep.(m)
150.00 3.50
40.00 10.00
10.00 46.00
100.00
ERREUR:

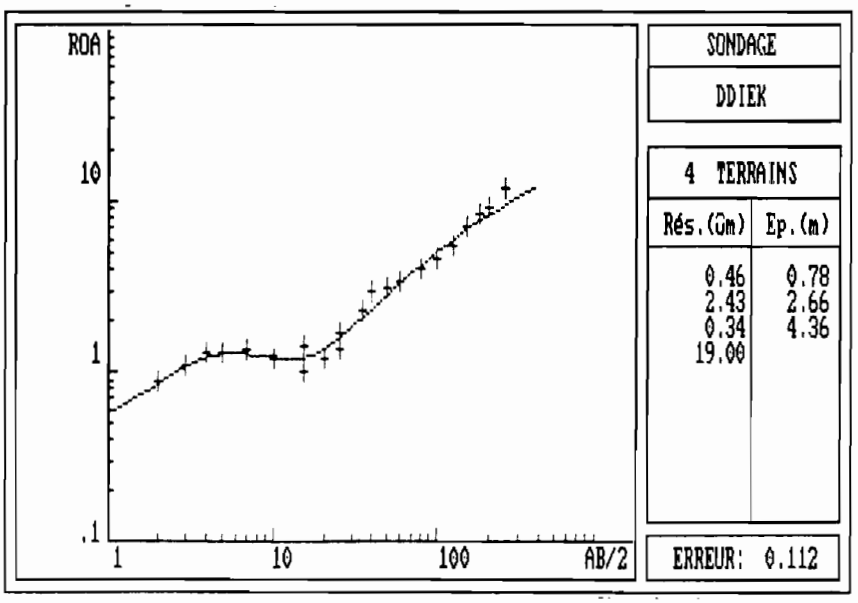

ROA
1000
100
10
1
10
AB/2
SONDAGE
GD
4 TERRAINS
Rés.(Ωm) Ep.(m)
2300.00 2.00
1600.00 4.00
195.00 23.00
10.00
ERREUR:


ROA
1000
100
10
1
10
100
AB/2
SONDAGE
GADIAGA
4 TERRAINS
Rés.(Ωm)
Ep.(m)
2300.00
1700.00
200.00
30.22
1.20
4.00
23.00
ERREUR:


ROA
1000
100
10
1
10
100
AB/2
SONDAGE
MBOROKH
4 TERRAINS
Rés.(Ωm)
Ep.(m)
380.00
75.00
161.00
25.00
2.00
2.00
22.50
ERREUR:


ROA
10
1
1
10
100
AB/2
SONDAGE
NAILOU
3 TERRAINS
Rés.(Ωm)
Ep.(m)
7.00
98.00
28.00
1.30
38.00
ERREUR:


ROA
1000
100
10
1
10
AB/2
SONDAGE
BPKL
4 TERRAINS
Rés.(Ωm) Ep.(m)
1950.00 1.20
260.00 2.30
38.00 7.00
950.00
ERREUR:


ROA
10
1
.1
1
10
100
AB/2
SONDAGE
DDIEK
4 TERRAINS
Rés.(Ωm) Ep.(m)
0.46 0.78
2.43 2.66
0.34 4.36
19.00
ERREUR: 0.112