

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



D.E.A DE GEOLOGIE APPLIQUEE
MENTION : HYDROGEOLOGIE

APPLICATION DE LA GEOPHYSIQUE (ELECTRIQUE ET SISMIQUE)
A L'ETUDE DE LA GEOMETRIE DU RESERVOIR DE
L'AQUIFERE DU LITTORAL NORD SENEGAL
(de Taïba à Rao)

Présenté par SAME DIOUF

Le 27 Janvier 1995 devant le jury :

MM. A.LY: PRESIDENT - Université Dakar
C.B.GAYE: RAPPORTEUR - Université Dakar
P.MOURGUES: RAPPORTEUR - O.R.S.T.O.M
A.FAYE: EXAMINATEUR - Université Dakar
M.DESCLOITRES: EXAMINATEUR - O.R.S.T.O.M

DEDICACES

JE RENDS GRACE A ALLAH, LE TOUT PUISSANT,
GLOIRE A LUI, AU SCEAU DES PROPHETES, MOHAMED
(P . S . L).

Et dédie ce modeste travail :

A mon Père et ma Mère : recevez ce travail en témoignage de ma
profonde reconnaissance de tous les sacrifices consentis.
Que DIEU vous garde aussi longtemps parmi nous.

A Serigne Saliou M'Backé.

A Serigne Cheikh Darou.

A Serigne Moustapha Khassaïd.

A Serigne Amsatou et Serigne bass.

A Mon épouse Farma et notre fille Penda.

A Mam M'Bolou, Baye Aly, Cheikh, Doudou et Fatou in memorium.

A Daba, Magatte, Fatou, Bousso F, D, NGoné D,F, Astou Diouf,D
Penda Diop, Awa Sidibé, Oumi Cala, Astou Diaw, Nar NDiaye.
Nogaye MBaye, MBéne NDiaye.

A Abdou, Ibrahima, Baye mass, Cheikh, Aziz, Tapha,
Khadim, Allah, Tanor, Pap, Mor.

A N'Déye, Daba, Awa, Fatou F, Astou, Penda,
Nar, Kassé, N'Goné, Mariémou.

A Serigne Darou, Samba, Modou Fatou, N'Dongo, Same, Ibrahima,
Moussa, Allioune, Ousmane, Mama Fall, Same, Modou, Saliou.

A Bara, Pap N'Diaye, Cheikh M'Backé et Sokhna, Mor Diouf,
Moustapha Fall, NDongo MBaye, Pap Touré.

A Sophi, Khadi, Mame Asta, Touty, Momy, Diabe, Astou Diagne.

A Yousou Babou ; Serigne Fall et N'Déye .

A Seck Ndiaye et Kiné ; Socé et Oumi ; Charly.

A M'Bayangue Diop Guédiawaye et toute sa famille.

A Kata F, Kab, Ibrahima G, Bamba, Fallou D, Mot Nogaye, Gawane,
Fallou Amar, Cheikh, Modou F Dieng, N'Diass G, N'Diassé, Pap
Niass, N'Darao, Dione, Tapha, MaDiouf N'Diaye, Talla, Serigne
Mame, Doudou N'Dour, Matar, Tapha, Mabéye, Niang, Oumar D.

A Cheikh Babou et Fatim.

A mes ami(es): Séné, N'Dione, Soy, Gallass, Tapha, Bada, NDindi
Kopa, Ass, Ouzin, Tapha S, Abdou MB, N'Diass, Oumar, Mouma,
M'Baye F, Kamou, Abda, Abou, Karim, Cheikh S, N et fall AA
Pap I Fall, et Sow, Assane, Pap N'Dir, Dangura, Pierre, Bara
Ganar, Baba, Daouda D, Modou D, Laye, Cheikh Diop, Modou N,
Yoro, Ibra, Birra, Oumar Mané, Ibou D, Diéye, Iso, Dially,
Alou, Daouda, Boucar, Abdou, Jacques, Balla, Bathe, Baye Dame,
NGaté, Collé, Fama, Saye, Kouna, Lucien, Badou, N'Dour, Mané
Marcel, Noël et camarades, Daba D, Fatou D, Marie, Codou,
NDéye C, Hadji, Asta, Samba Sow, Ba, aux voisins du 180A Hann.

A François Garick et famille.

A Tout D V F à M'Backé.

A Tous les Etudiants ressortissants de M'Backé (AM.E.R.MB).

A Tous les serviteurs du Centre Lebret notamment le Père Jean
Pierre Lessigne, Père Robert , Mr Grégoire.

Aux familles Konaté, N'Dao et Sissokho.

Au GR.E.S.TEC. notamment à Antoine Diallo, Adan Péréira, Fall.

Au SENEGAL, ma PATRIE.

A Tous ceux qui luttent contre l'injustice et l'ignorance.

Ce travail n'aurait pu arriver à son terme sans la contribution de nombreuses personnes auxquelles je voudrais exprimer ici ma grande reconnaissance.

* Mes remerciements s'adressent en premier lieu à tous les membres du jury :

- Monsieur A. LY, Chef de Département de Géologie, pour ses corrections, ses conseils quant aux coupes géologiques et pour avoir présidé ce jury.

- Monsieur P. MOURGUES, Directeur de Recherches à l'ORSTOM : son dévouement et toute son attention particulière à ma formation me font témoigner en lui beaucoup de reconnaissance et de sympathie.

- Monsieur C.B. GAYE, responsable du 3ème Cycle : les enseignements reçus m'ont permis de parfaire ma formation théorique en hydrogéologie ; par sa disponibilité permanente, il a beaucoup contribué à la mise en forme définitive de ce travail.

- Monsieur A. FAYE, par sa clairvoyance et sa disponibilité permanente il a beaucoup contribué à mon initiation à l'outil informatique.

- Monsieur M. DESCLOITRES du département de Géophysique de l'ORSTOM dont la participation à la finalisation de ce travail a été déterminante et fort appréciée.

* Tous mes remerciements vont aussi:

- à Messieurs J. VASSAL, M. RITZ, au Département de Géophysique de l'ORSTOM d'avoir mis à ma disposition toutes les conditions favorables de travail au laboratoire.

- à Monsieur HAMAT.D.M'BAYE pour avoir largement contribué à l'élaboration de ce document.

- à Monsieur MAGATTE.F K.NIANG pour sa disponibilité et son soutien constant.

- à Messieurs BODIANG, J. CHIANI, R. GOMIS et B.DIOP pour leur dévouement lors des travaux sur le terrain.

- au corps professoral et au personnel du département de géologie, notamment Elisabeth, Mr Ba.

- au personnel de l'ORSTOM-Hann.

- au personnel du service de gestion et de planification des ressources en eau (S.G.P.R.E) ministère de l'hydraulique.

- au personnel du centre de documentation du ministère de l'hydraulique.

RESUME

Dans le cadre du projet "gestion des Nappes des Niayes" initié par le Département de Géologie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar en collaboration avec l'ORSTOM et financé par le Centre de Recherche pour le Développement International (C.R.D.I), une étude a été menée entre Taïba et Rao en vue de déterminer la géométrie de l'aquifère du littoral Nord.

L'interprétation quantitative et qualitative des données géophysiques disponibles - essentiellement l'électrique et la sismique -, confrontées aux connaissances géologiques - sondages mécaniques - les plus récentes permet de préciser les limites et la nature de l'aquifère, mais aussi l'importance de l'association de plusieurs méthodes dans l'étude de la géométrie des aquifères.

Par traitement informatique, les données hydrogéologique et géophysique associées, ont permis d'établir des cartes et coupes de synthèse définissant un système aquifère des sables quaternaires à l'Ouest en continuité avec un système aquifère des calcaires lutétiens à l'Est sous-jacent à une importante formation argileuse.

Le toit du substratum marno-argileux est à une profondeur variable. Dépressionnaire à l'Ouest, elle amorce une remonté à l'Est et au Sud dans les domaines calcaires.

L'interprétation des sondages électriques met en exergue la présence d'eau salée au-dessous de l'aquifère à eau douce et dont la présence n'est pas liée à l'évolution actuelle du biseau salé qui est en pente forte à l'intérieur des terres.

MOTS CLES : *Electrique, Sismique Réfraction, Sondages Mécaniques, Littoral Nord, Niayes, Aquifères Sables Quaternaires et Calcaires Lutétiens, Biseau Salé, Substratum Marneux, Niveaux argileux, Niveau piézométrique.*

SOMMAIRE

	Pages
DEDICACES.....	I
AVANT PROPOS.....	II
RESUME.....	III
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX ET ANNEXES.....	IX
INTRODUCTION.....	1
IERE PARTIE : GEOPHYSIQUE APPLIQUEE A L'HYDROGEOLOGIE	
Chapitre 1 : Les Méthodes Géophysiques Utilisées.....	3
1.1.- L'électrique.....	3
1.1.1.- Principe des résistivités.....	3
1.1.2.- Procédé utilisé : sondages électriques.....	5
1.1.3.- Interprétation des sondages électriques.....	11
1.2.- La sismique.....	14
1.2.1.- Principe des vitesses.....	14
1.2.2.- Procédures : la sismique réfraction.....	16
1.2.3.- Interprétation des résultats en sismique réfraction.....	20
DEUXIEME PARTIE : ETUDE DU CAS DES NAPPES DE SABLES ET CALCAIRES DU LITTORAL NORD ENTRE TAIBA ET RAO	
Chapitre 1 : Présentation du secteur d'étude.....	24
1.1.- Cadre physique.....	24
1.2.- Géologie du secteur d'étude.....	24
1.3.- Hydrogéologie.....	30
Chapitre 2 : Travaux antérieurs et acquis.....	35
2.1.- Les sondages mécaniques.....	35
2.2.- Prospections géophysiques.....	39
2.2.1.- Par la Compagnie de Prospection Géophysique Française (C.P.G.F.), 1978.....	39
2.2.2.- Par Phillippe Lessage, juillet 1983 (83 GPH 060).....	41
2.2.3.- Par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.), Février 1987.....	44

Chapitre 3 : Campagne de prospection géophysique menée dans le cadre de cette étude.....	50
3.1.- Campagne de sondages électriques.....	50
3.1.1.- Plan de campagne.....	50
3-1.2.- Interprétation des sondages électriques....	50
3-1.2-1.- Secteur Nord.....	50
3-1.2-2.- Secteur Centre.....	53
3-1.2-3.- Secteur Sud.....	58
3-1.3.- Coupes interprétatives de sondages électriques.....	58
3-1.3-1.- Secteur Nord.....	60
3-1.3-2.- Secteur Centre.....	65
3-1.3-3.- Secteur Sud.....	65
3-2.- Campagne de sismique réfraction.....	67
3-2.1.- Plan de campagne.....	67
3-2.2.- Interprétation des sondages sismiques.....	67
3-2.2-1.- Secteur Nord.....	67
3-2.2-2.- Secteur Centre.....	70
3-2.2-3.- Secteur Sud.....	73
3-2.3.- Relation entre sismique, électrique, sondage mécanique et niveau piézométrique.....	77
3-2.3-1.- Secteur Nord.....	81
3-2.3-2.- Secteur Centre.....	84
3-2.3-3.- Secteur Sud.....	88
 Chapitre.4 - Analyse globale à l'aide d'un programme cartographique des paramètres.....	 91
4-1.- Présentation du logiciel SURFER.....	91
4-2.- Etablissement des fichiers paramètres.....	92
4-3.- Commentaire des cartes de synthèse.....	93
4-3.1.- Profondeur du toit du substratum marno-argileux.....	93
4-3.2.- Epaisseur des calcaires aquifère.....	98
4-3.3.- Epaisseur des argiles.....	98
4-3.4.-.Limites latérales des nappes de sables quaternaires et des calcaires lutétiens.....	98
 CONCLUSION GENERALE.....	 104
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	106
ANNEXES.....	108

LISTE DES FIGURES

- Fig.1 - Carte de situation.
- Fig.2 - Electrode ponctuelle d'envoi du courant continu.
- Fig.3 - Répartition des électrodes et des filets de courant sur le terrain et dans le sous-sol.
- Fig.4 - Schéma du quadripôle de mesure AB-MN.
- Fig.5 - Position des électrodes dans le dispositif de Schlumberger
- Fig.6 - Effet des à-coups de prise sur des sondages électriques effectués avec un dispositif Wenner et un dispositif Schlumberger
- Fig.7 - Résistivitétre, TERRAMETER SAS 300C
- Fig.8 - La profondeur d'investigation augmente avec l'augmentation de la distance AB.
- Fig.9 - Relations entre vitesses sismiques et densités. D'après gardner et al.,1974.
- Fig.10 - Relations entre vitesses sismiques et porosité totale d'alluvions saturées, non argileuses.
- Fig.11 - Vitesses sismiques dans les grandes familles de roches. D'après Grant et West., 1965.
- Fig.12 - Schéma de réalisation d'un sondage de sismique marteau.
- Fig.13 - Sismographe à incrémentation de signal utilisé pour les profils sismiques.
- Fig.14 - Ondes sismiques directes et réfractées.
- Fig.15 - Enregistrement des dromochroniques de réfraction (tx).
- Fig.16 - Nuage de points et dromochroniques.
- Fig.17 - Légende des coupes.
- Fig.18 - Coupe schématique des Niayes.
- Fig.19 - Carte tectonique photo-interprétative du Sénégal (moitié Nord du pays). D'après J. LEPRIOL., 1985
- Fig.20 - Carte des caractéristiques hydrodynamiques (rapport B.R.G.M., 1993).
- Fig.21 - Carte piézométrique des Niayes, octobre 1993 (données B.R.G.M).
- Fig.22 - Carte de localisation des sondages mécaniques (forages et piézomètres).
- Fig.23a, b, c, d - Coupes lithostratigraphiques des sondages mécaniques.
- Fig.24 - Carte de localisation des sondages électriques.
- Fig.25 - Coupe interprétative de sondages électriques entre N'Diok Sall et MPal, profil 1 (C.P.G.F., 1977).
- Fig.26 - Coupe interprétative de sondages électriques, profil 2 (C.P.G.F., 1977).
- Fig.27 - Coupe interprétation de sondages électriques, profil Mékhé-Kébémér (C.P.G.F., 1977)
- Fig.28 - Coupes interprétatives des sondages électriques profil Lompoul-MBoro par Philipès Lessage, juillet 1983.
- Fig.29 - Coupe interprétative de sondages électriques, secteur de Louga (B.R.G.M., 1987).
- Fig.30 - Coupe interprétative de sondages électriques, secteur Noto-Mboro (B.R.G.M., 1987).
- Fig.31 - Courbes de sondages électriques, secteur Nord (Diouf.S., Janvier 1994)
- Fig.32 - Courbes de sondages électriques, secteur centre (Diouf. S., Janvier 1994)

- Fig.33 - Courbes de sondages électriques, secteur côtier (Diouf. S., Janvier 1994).
- Fig.34a, b - Courbes de sondages électriques, secteur Sud (Diouf. S., Janvier 1994).
- Fig.35 - Coupe interprétative de sondages électriques, secteur côtier (Diouf. S., Janvier 1994).
- Fig.36 - Coupes interprétatives de sondages électriques, secteurs Nord et centre (Diouf. S., Janvier 1994).
- Fig.37a, b, c - Le front salé dans les couches aquifères littorales.
- Fig.38 - Coupe interprétative de sondages électriques, secteur Sud (Diouf.S., Janvier 1994).
- Fig.39 - Carte de localisation des sondages de sismique réfraction.
- Fig.40 - Hodochrones de sismique réfraction à MPal et Poulo, secteur Nord (M'Baye.D ; Diouf.S., Juin 1993)
- Fig.41 - Logs interprétatifs de sondages sismiques, secteur Nord (M'Baye.D ; Diouf.S., Juin 1993).
- Fig.42 - Coupe interprétative de sondages sismiques, secteur Nord (M'Baye.D ; Diouf.S., Juin 1993).
- Fig.43 - Hodochrones de sismique réfraction à Lompoul 2 (Khong Yoye) et Palméo, secteur centre (M'Baye.D ; Diouf., Juin 1993).
- Fig.44 - Logs interprétatifs de sondages sismiques, secteur centre (M'Baye.D ; Diouf.S., Juin 1993).
- Fig.45 - Coupes interprétatives de sondages sismiques, secteur centre (M'Baye.D ; Diouf.S., Juin 1993).
- Fig.46 - Hodochrones de sismique réfraction à Daya beer et Andall, secteur Sud (M'Baye.D ; Diouf.S., Juin 1993).
- Fig.47 - Logs interprétatifs de sondages sismiques, secteur Sud (M'Baye.D ; Diouf.S., Juin 1993).
- Fig.48 - Coupe interprétatives de sondages sismiques, secteur Sud (M'Baye.D ; Diouf.S., Juin 1993).
- Fig.49 - Coefficient de macroanisotropie pour une formation constituée d'une alternance de strates d'épaisseurs égales et de résistivités 1 et 2.
- Fig.50a, b - Relations entre sismique réfraction, sondages mécanique et électrique et la surface piézométrique, secteur Nord (Diouf.S., Juin 1994).
- Fig.51a, b, c - Relations entre sismique réfraction, sondages mécanique et électrique et la surface piézométrique, secteur centre (Diouf.S., Juin 1994).
- Fig.52 - Relations entre sismique réfraction, sondages mécanique et électrique et la surface piézométrique, secteur Sud (Diouf.S., Juin 1994).
- Fig.53 - Répartition verticale de l'humidité sous le sol.
- Fig.54 - Carte de profondeur du toit du substratum marro-argileux (Diouf.S., 1994).
- Fig.55 - Isohypses du toit du substratum marneux, mur de l'aquifère (B.R.G.M).
- Fig.56 - Logs de forages de référence.
- Fig.57 - Carte de l'épaisseur des calcaires.
- Fig.58 - Carte de l'épaisseur des argiles.
- Fig.59 - Limites d'extention latérale des aquifères.
- Fig.60 - coupe géologique Mékhé-Louga (B.R.G.M).

LISTE DES TABLEAUX

- Tab.1 - Valeurs empiriques des résistivités, porosités et perméabilités pour divers terrains (Meyer De Stradelhofen.C., 1991).
- Tab.2 - Exemple de feuille de sondage avec K précalculés.
- Tab.3 - Résistivité des eaux et des roches (Meyer De Stradelhofen.C., 1991 ; AstierJ.L., 1971).
- Tab.4 - Vitesses sismiques dans les grandes familles de roches.
- Tab.5 - Vitesses des ondes et épaisseurs des couches, secteur Nord.
- Tab.6 - Vitesses des ondes et épaisseurs des couches, secteur centre.
- Tab.7 - Vitesses des ondes et épaisseurs des couches, secteur Sud.
- Tab.8 - Normes de la quantité de chlorure et de sodium dans l'eau de boisson.
- Tab.9 - Etude comparée des données B.R.G.M et Diouf sur le toit du substratum marneux de l'aquifère.

FIGURES EN ANNEXE

ANNEXE I

- An1-1a : Abaque à deux terrains.
- An1-1b, c : Abaques auxiliaires.
- An1-2 : Programme pour le calcul de l'épaisseur des couches en sismique réfraction.
- An1-3a, b, c : Courbes de sondages électriques ,secteur Nord (B.R.G.M)
- An1-4a : Courbes de sondages électriques ,secteur Nord (Diouf).
- An1-4b : Courbes de sondages électriques ,secteur centre (Diouf).
- An1-4c : Courbes de sondages électriques ,secteur Sud (Diouf).

Annexe II

- An2-1 : Hodochrones de sismique réfraction à Rao, Rao Peul, Léona, et NDiang Diop, secteur Nord.
- An2-2 : Hodochrones de sismique réfraction à Baobab k, Kébémér, NGuer NGuer et Mérina Diégué, secteur centre.
- An2-3 : Hodochrones de sismique réfraction à Mékhé, Sine Kane (KMS), Fass Boy, Diogo, NDomor, Djing et Tivaouane, secteur Sud.

Annexe III

- An3-1, 2, ..., 8 : Coupes géologiques de synthèse (Diouf.S.,1994).

INTRODUCTION

Cette région de la grande côte qui s'étend au Nord-Est du Sénégal le long de la côte de Taïba à Rao (fig 1) a subi des déformations tectoniques ainsi que des cycles de transgressions et régressions marines récentes qui se traduisent par un réseau de failles et par des structures de plateaux calcaires et de dépressions sableuses : les Niayes. Celles-ci sont séparées de la côte par un ensemble dunaire continu.

Sur le plan hydrogéologique les nappes souterraines sus-jacentes à la nappe Maestrichtienne sont contenues dans les formations sableuses du quaternaire à l'Ouest et dans les calcaires lutétiens à l'Est.

Les eaux de pluies constituent la principale source de recharge de ces nappes.

A la suite d'un déficit cumulé de précipitation au cours des 30 dernières années accompagné d'une baisse généralisée du niveau piézométrique, on assiste à un processus de salinisation des terres et de destruction du couvert végétal provoquant ainsi un déséquilibre de l'écosystème qui se traduit par la perturbation des activités maraîchères, d'élevage et par un problème d'approvisionnement en eau des populations.

Une gestion efficace de ces aquifères passe par une connaissance de la géométrie des réservoirs. La détermination des limites géologiques et hydrogéologiques fait l'objet de cette étude.

Il faut ajouter une autre limite de nature hydrochimique déterminée par au niveau du rivage, avec un mélange eau douce, eau salée.

Pour déterminer les différents caractéristiques du réservoir qui sont principalement :

- profondeur du substratum marno-argileux,
- distribution et épaisseur des calcaires aquifères,
- distribution et épaisseur des argiles,
- extension latérale des nappes de sables et calcaires,
- limite supérieure (surface piézométrique),
- extension des invasions salées ;

* - on utilisera deux représentations de terrains qui représentent des informations significatives :

- les logs lithostratigraphiques de sondages mécaniques,
- les méthodes géophysiques (électrique et sismique) qui permettent d'identifier les paramètres liés aux structures géologiques ou à la nature des aquifères ;

* - l'interprétation sera basée sur le traitement et l'analyse globale de ces informations basés sur l'informatique par programme cartographique.

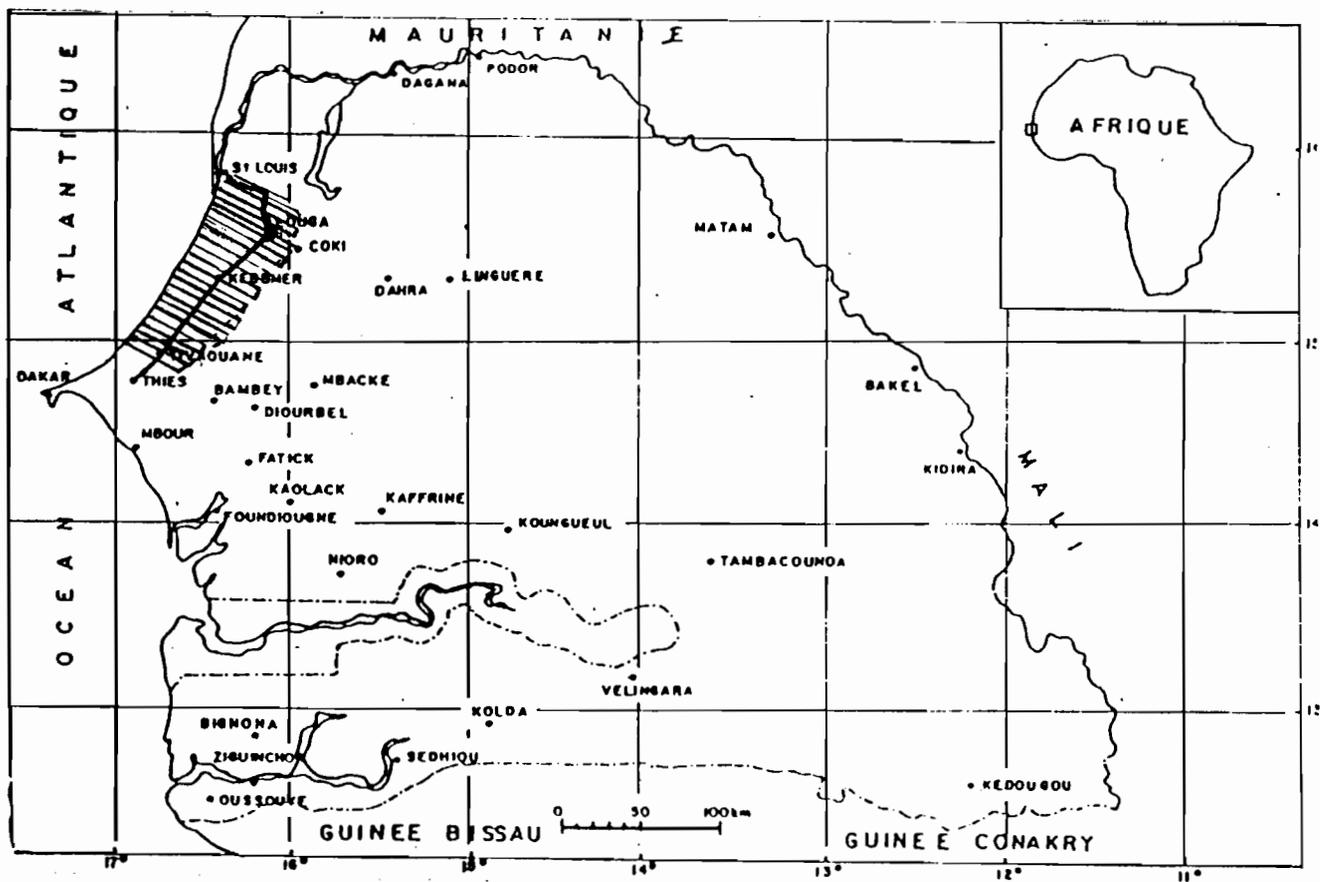


Fig.1- Carte de situation.

CHAPITRE 1 : LES METHODES GEOPHYSIQUES UTILISEES

L'étude hydrogéologique requiert non seulement l'utilisation des méthodes classiques (pluviométrie, piézométrie, lithologie, hydrodynamique etc...), mais également des méthodes d'investigation faisant appel à la géophysique.

Les méthodes géophysiques à notre disposition sont l'électrique et la sismique réfraction (marteau).

Notre objectif n'est pas d'exposer les aspects théoriques et techniques des méthodes utilisées, mais plutôt d'en dégager les applications dans l'étude des aquifères du littoral Nord.

Nous nous aiderons pour cela de la bibliographie déjà fournie dans ce domaine notamment ASTIER, (1971) ; MEYER DE STADELHOFEN, (1991).

1-1 - L'ELECTRIQUE : LA METHODE DES RESISTIVITES :

1-1.1 - Principe des résistivites

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

La conductibilité électrique, ou propriété de conduire le courant électrique est exprimée par la conductivité ou son inverse, la résistivité.

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

La résistivité des formations saturées est fonction:

- de la porosité totale communicante,
- de la quantité de sels dissous dans l'eau d'imbibition.

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

$$\rho_r = a \cdot \rho_w \cdot \phi^m / \text{Saturation}^2$$

$$F = a / \phi^m = \rho_r / \rho_w$$

F : facteur de formation
 ρ_r : résistivité de la roche
 ρ_w : résistivité de l'eau d'imbibition
 ϕ : porosité
 a : facteur proche de 1
 m : facteur proche de 2

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

Par contre si le taux d'argiles reste constant, on peut

appliquer la loi d'Archie.

$$F = 1/\phi^2 = \epsilon_r/\epsilon_w \longrightarrow \epsilon_r = \epsilon_w/\phi^2$$

Si ϵ_w diminue, ϵ_r diminue
Si ϵ_w augmente, ϵ_r augmente

En présence de sables avec ϕ_1 constante, ou en présence de calcaires avec ϕ_2 constante, la variation de la résistivité au sein d'une formation saturée ne dépend que de la quantité de sels dissous dans l'eau d'imbibition.

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

De la même manière, la loi d'Archie montre que si les alluvions ne sont pas argileuses ou si le taux d'argile est constant, elles sont d'autant plus poreuses que leur résistivité est plus basse, la résistivité de l'eau d'imbibition demeurant constante.

Les mesures de résistivité permettent donc de repérer les formations les plus poreuses ; pour que celles-ci constituent des réservoirs utilisables encore faut-il qu'elles présentent une bonne perméabilité (tab 1).

Tab 1- Valeurs empiriques des résistivités, porosités et perméabilités pour divers terrains (D'après Meyer De Stradelhofen, C. 1991)

Roches	Porosité totale %	Porosité efficace %	Perméabilité cm/s	Résistivité observée ohm.m
Graviers	45	35	$3 \cdot 10^{-4}$	200
Grav et sable	35	20	$1 \cdot 10^{-5}$	160
Sable	40	30	$6 \cdot 10^{-4}$	125
Sable silteux	32	5	$1 \cdot 10^{-9}$	60
Silt	36	3	$3 \cdot 10^{-8}$	30
Argile	47	0	$5 \cdot 10^{-10}$	10
Calcaires fissurés	-	30	-	83
Calcaires non fissurés	-	3	$1 \cdot 10^{-10}$ - $1 \cdot 10^{-12}$	2000 - 10000
Marnes consolidés	-	27	$1 \cdot 10^{-7}$ - $1 \cdot 10^{-9}$	20 - 20

Les valeurs rapportées sur le tableau 1, font apparaître une corrélation entre perméabilités, porosités efficaces et résistivités. Elles montrent ainsi que l'électrique est en

mesure de fournir des renseignements précieux non seulement sur la porosité mais également sur la perméabilité des formations.

La méthode électrique est donc bien adaptée à l'étude des aquifères du littoral Nord Sénégal.

1-1.2 - Procédé utilisé : Sondage Electrique

Dans l'étude des variations des résistivités apparentes mesurées en courant continu qui constitue la méthode des résistivités, on distingue suivant que l'on s'intéresse aux variations avec la profondeur ou aux variations latérales, deux techniques qui sont : le sondage électrique et le profil de résistivité

a - Définition du sondage électrique

Un sondage électrique consiste à établir la courbe de variation de la profondeur, de la résistivité apparente des terrains mesurée en surface à l'aide d'un dispositif à quatre électrodes.

Le sondage électrique apporte des informations quantitatives à la verticale du point de mesure. L'interprétation des sondages électriques permet d'obtenir l'épaisseur et la résistivité spécifique de chacune des couches à l'aplomb du centre du sondage.

b - Principes de base

- Si l'on envoie le courant d'intensité I par une source ponctuelle A dans un sous-sol homogène, les surfaces équipotentielles seront représentées par des sphères centrés sur la source (fig 2).

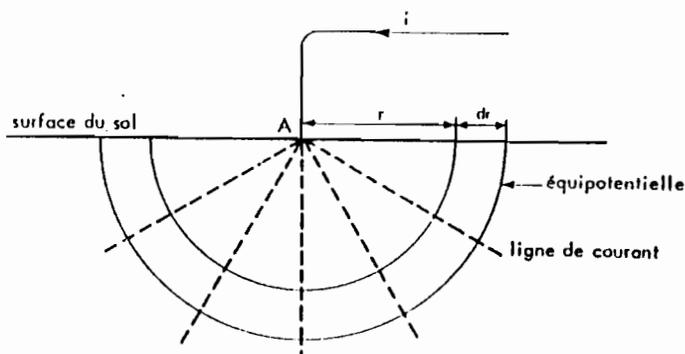


Fig.2- Electrode ponctuelle d'envoi du courant continu.

Le courant i est perpendiculaire aux équipotentielles ; \vec{i} étant la densité du courant, on peut écrire :

$$\vec{i} = dI/dS = I/S = I/4\pi r^2$$

r = distance à la source

La loi d'Ohm permet d'écrire :

$$\vec{i} = -\sigma \cdot dv/dr = -1/\rho (dv/dr)$$

$$\vec{i} = I/4\pi r^2$$

$$\text{Donc } \rho I/4\pi r^2 = -1/\rho (dv/dr)$$

σ = conductivité

ρ = résistivité

$$\text{Par intégration, on obtient : } V = \rho \cdot I/4\pi r + \text{cste}$$

- Dans le cas d'un dipôle AB, le courant injecté par l'électrode "source" A doit être récupéré par une électrode "puits" B par rapport à laquelle le potentiel en un point sera donné par la même relation que celle ci-dessus, mais de signe contraire.

Lorsque les électrodes sont situées à la surface du sol, comme c'est le cas, les surfaces équipotentiellles ne seront pas représentées par des sphères mais des demi-sphères puisque l'air est un isolant (fig.3).

Donc l'expression de la tension en un point O situé entre A et B sera de la forme :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \text{cstes} \quad \begin{array}{l} r_1 = OA \\ r_2 = OB \end{array}$$

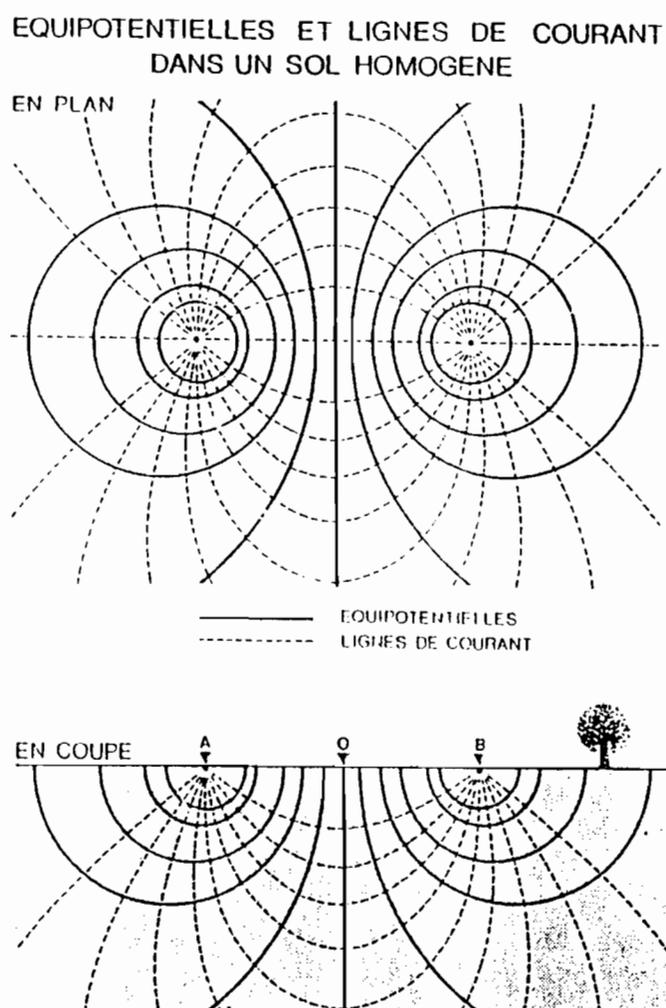


Fig.3- Répartition des filets de courant et des équipotentiellles sur le terrain et dans le sous-sol

c - Les dispositifs quadripôles

L'expression de la tension en un point O situé entre A et B est entachée de constantes. Afin de supprimer ces constantes, on fait les mesures de différence de potentiel à l'aide d'un dispositif quadripôle qui possède deux électrodes A,B d'émission du courant ainsi que deux électrodes de mesure du potentiel, M et N situées au centre du dipôle AB (fig.4).

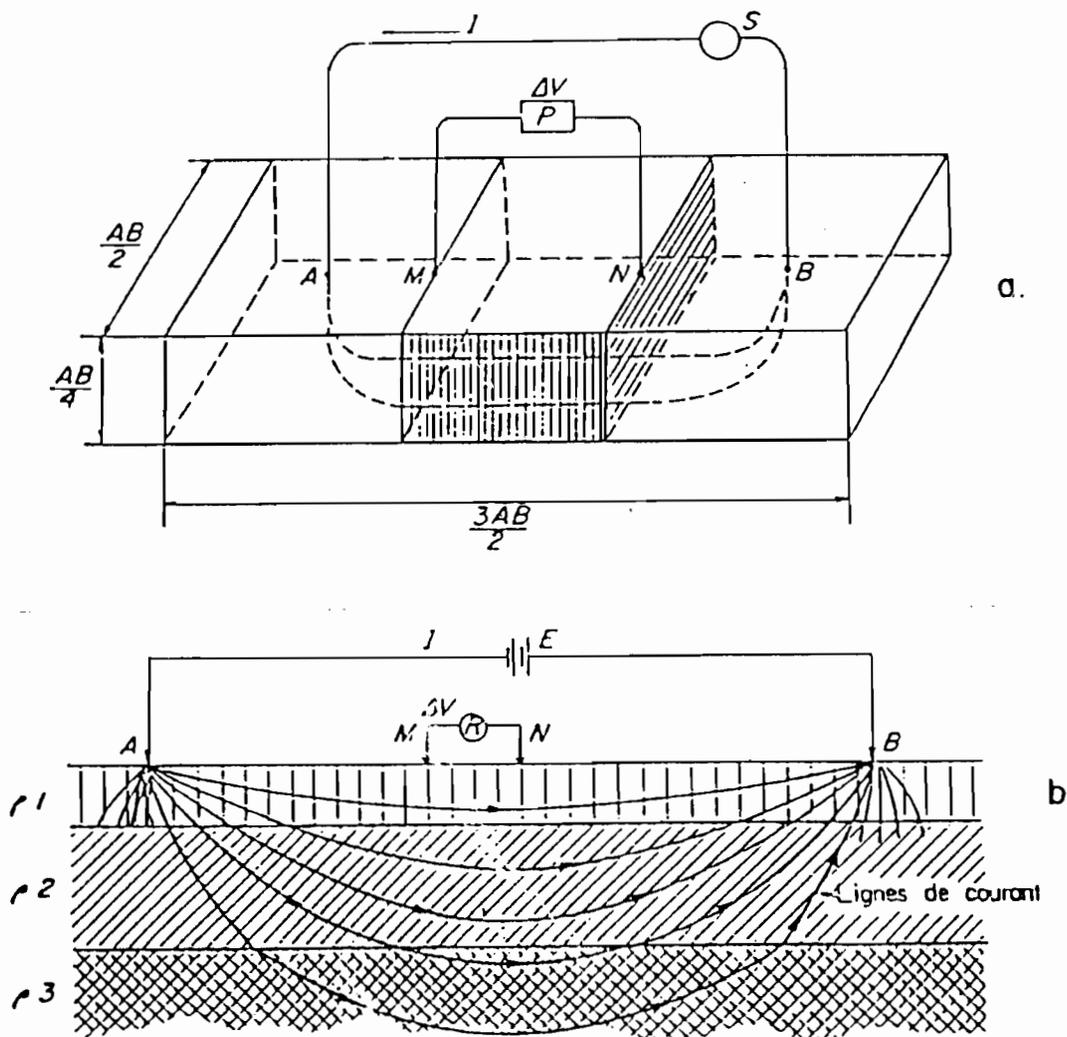


Fig.4- Schéma du quadripôle de mesure AB - MN

On aura : $\Delta V = V_M - V_N = \rho I / 2\pi (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN)$

Les dispositifs de mesure les plus employés sont ceux de Schlumberger et de Wenner. Tous les deux sont des dispositifs rectilignes et symétriques : les quatre électrodes sont alignées et les centres O de AB et MN sont confondus (fig 5).

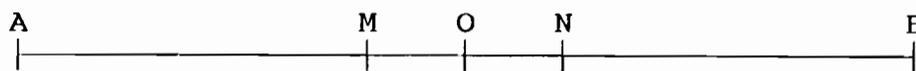


Fig.5.- Position des électrodes dans le dispositif de type Schlumberger.

Le rapport AB/MN est fixe et égal à 3 dans le dispositif de Wenner, alors qu'il est maintenu aussi grand que possible dans le dispositif Schlumberger.

Dans l'étude des aquifères du littoral Nord, le choix s'est porté sur le dispositif Schlumberger

*** - Le dispositif quadripôle de type Schlumberger**

On a employé ce dispositif pour les raisons suivantes :

- En un moment, entre deux mesures successives, on ne déplace qu'une paire d'électrodes, d'où un gain de temps,
- Les perturbations dues aux hétérogénéités locales au voisinage des électrodes MN, ou à-coup de prises, sont limitées et nettement mises en évidence si bien qu'elles peuvent être éliminées.

On voit par l'exemple (fig 6), qu'avec un dispositif Wenner, ces perturbations peuvent faire croire à la présence de terrains qui sont en réalité inexistantes.

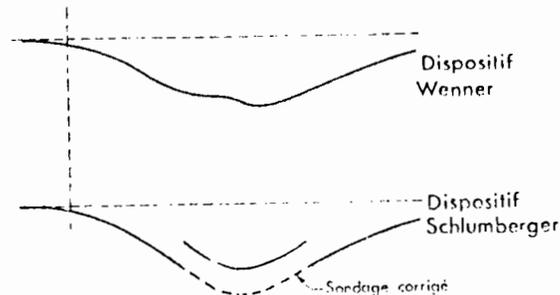


Fig.6- Effet des à-coups de prises sur des sondages électriques effectués avec un dispositif Wenner et un dispositif Schlumberger.

Dans la pratique, avec ce dispositif, on a: $4 < AB/MN < 20$; on change de longueur de ligne MN lorsque la mesure de la différence de potentiel ΔV , qui est proportionnelle à MN, devient trop faible. La valeur ΔV , donne la résistivité apparente ρ_a :

$$\rho_a = 2\pi \Delta V / I \left(\frac{1}{(MB-MA)/(MA.MB)} - \frac{(NB-NA)}{(NA.NB)} \right)$$

$$\begin{aligned} NA &= MB \\ MB - MA &= MN \\ NA - NB &= MN \\ NB - NA &= -MN \\ MA.MB &= NA.NB \end{aligned}$$

Donc la résistivité apparente devient :

$$\rho_a = 2\pi \Delta V / I (1/2MN/MA.NA)$$

$$\rho_a = \pi \Delta V / I (MA.NA/MN)$$

$$\rho_a = \pi \Delta V / I (MA.NA/MN)$$

Pour le dispositif Schlumberger, le coefficient géométrique K devient:

$$K = \pi AM \cdot AN / MN$$

$$\text{et } \rho_a = K \Delta V / I$$

Le tableau 2 donne des exemples de longueurs de AB/2 utilisées. Il fournit en outre les valeurs du facteur géométrique K pour diverses longueurs MN et AB.

On a disposé d'un résistivimètre, le Terrameter SAS 300 C (fig 7), qui permet de lire à chaque mesure la valeur de $\Delta V / I$ que l'on multiplie ensuite par K, pour obtenir la résistivité apparente.

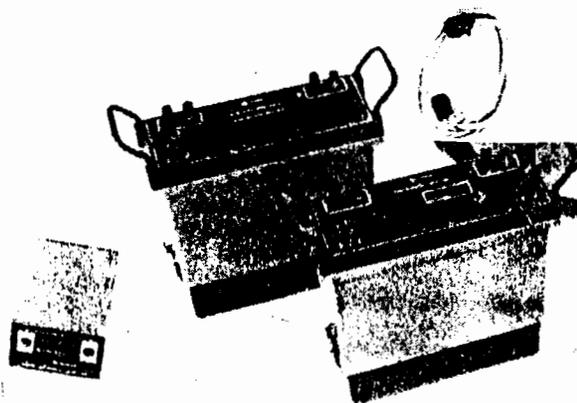


Fig.7- Résistivimètre, TERRAMETER SAS 300C

Les électrodes AB étant écartées progressivement de part et d'autre du point O, la circulation du courant entre A et B concerne un volume du sous-sol de plus en plus grand et accroît progressivement la profondeur d'investigation (p_i), qui dépend de la longueur AB (fig.8).

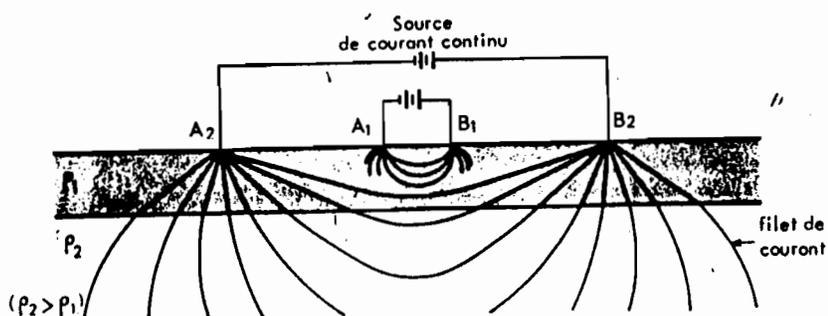


Fig.8- La profondeur d'investigation (p_i) augmente avec la distance AB

Le rapport AB/p_i - en retenant pour AB la longueur minimale permettant l'évaluation correcte de la profondeur p_i du dernier terrain - varie entre 4 et 12.

SONDAGE ELECTRIQUE - TYPE SCHLUMBERGER

MISSION:

DATE: / /

OPERATEUR:

SONDAGE:

COORD:

ALT:

AZIMUT:

E	AB/2	MN/2	K		V	I	Ps	V/I	Ro app.	obs
	m	m	$\pi *AM*AN/MN$		mV	mA	mV	ohm	ohm.m	
	1	.5		2.36						
1	2	.5		11.8						
2	3	.5		27.5						
3	4	.5		49.5						
1	5	.5		77.8						
2	7	.5	1	153	75.4					
3	10	.5	1	313	155					
	12.5	.5	1	489.8	243.7					
1	15	.5	1	706	351					
	17.5	.5	1	960.8	479.2					
2	20		1		626					
3	25	5	1	188	980					
1	30	5	1	274	1412					
2	35	5		376						
3	40	5		495						
1	50	5		778						
2	60	5		1123						
3	80	5		2002						
1	100	10	5	1554.3	3132.1					
2	125	10	5	2435.4	4898.4					
3	150	10		3516.8						
1	175	10		4792.4						
2	200	10	20	6264.3	3108.6					
3	250	10	20	9796.8	4874.8					
1	300		20	14114.3	7033.6					
2	350		20		9584.8					
3	400	50	20	4948	12528					
	450	50	20	6283	12864					

1-1.3 - Interprétation des sondages électriques

L'interprétation d'un sondage électrique n'est significative que dans le cas d'une succession de terrains tabulaires, horizontaux au sein des quels les diverses couches ne présentent pas de variations latérales de résistivité.

Naturellement dans la pratique, ces conditions ne sont jamais parfaitement réalisées, mais jusqu'à des inclinaisons inférieures à 12° par rapport à l'horizontal, la méthode reste valable.

On distingue trois étapes dans l'exploitation des résistivités apparentes fournies par le résistivimètre :

* - Dépouillement des données en utilisant les méthodes de superposition et de réduction de Hummel (1927) à l'aide d'abaques (Annexes.1-1a,b,c)

- la superposition consiste à comparer les courbes théoriques avec des courbes expérimentales qui permettent l'interprétation de terrains à deux, trois ou quatre couches.

- la réduction est une méthode d'équivalence qui permet de remplacer deux terrains par un terrain unique et ainsi interpréter de proche en proche, des courbes à n terrains.

La loi de Hummel s'énonce ainsi: l'ensemble des terrains recouvrant un substratum résistant est remplaçable par un terrain unique d'épaisseur et de conductance égales à la somme des épaisseurs et des conductances des différents terrains.

On tire de la formule suivante la résistivité ρ du terrain unique équivalent à l'ensemble des terrains :

$$e_1/\rho_1 + e_2/\rho_2 + \dots + e_n/\rho_n = (e_1 + e_2 + \dots + e_n)/\rho$$

* - Modélisation à l'aide de méthodes d'approximation successive ; nous avons utilisé une méthode de traitement par ordinateur, IN.T.S.E.S mise au point par les chercheurs de l'ORSTOM.

On décompose d'abord les sondages électriques en couches d'épaisseurs et de résistivités dont le choix est guidé par l'allure de la succession des points obtenus.

Ensuite, pour simplifier cette première décomposition, on construit en régularisant de façon automatique la courbe des résistivités apparentes en fonction de $AB/2$. Cette opération permettra d'obtenir les résistivités vraies et les épaisseurs des différentes couches intéressées par le sondage électrique.

* - La dernière phase est l'interprétation proprement dite.

Elle permet de donner une signification, dans un domaine d'application du paramètre physique qui est la résistivité.

Plusieurs techniques concourent à l'interprétation des sondages électriques (lithologie, hydrologie, hydrochimie, hydrogéologie, piézométrie etc...).

Le tableau 3 donne des exemples de valeurs de résistivités en Ohms-mètre.

Remarques:

- les grandes différences de résistivité observées au sein d'une même roche s'expliquent en partie par une saturation ou non d'eau ; par une fracturation plus ou moins intense ; par les variations de salinité des eaux connées (pour les sédiments) , par la présence d'argiles (dans les grès et les roches carbonatées),

- ces variations peuvent entraîner des confusions ; ainsi des sables et des calcaires peuvent très bien présenter des résistivités identiques.

- Comme le montre le tableau 3, la valeur absolue des résistivités ne constitue pas un critère de détermination lithologique en raison des nombreux chevauchements ou convergences possibles. Dans ce tableau, une résistivité de 80 Ohm.m peut correspondre à des eaux de source, sables et graviers, calcaires, grès argileux, cinérites et tufs volcaniques. Toutefois dans un secteur donné, les variations relatives de résistivités entre diverses couches peuvent apporter informations sans ambiguïté quand on les met en relation avec la géologie locale utilisée avec bon sens.

Tab.3- Résistivités des eaux et des roches.
D'après Astier, J.L. (1971) ; Meyer De Stadelhofen, C. (1991)

Eaux et Roches	Résistivités en Ohm.m
Eau de mer	0,1-1
Eau des nappes alluviales	10-30
Eau de sources	50-100
Sables et graviers secs	1.000-10.000
Sables et graviers + eau douce	50-500
Sables et graviers + eau salée	0,5-5
Argiles triasiques	30-50
Argiles oligocènes	10-20
Vases + eau salée	0,5-0,8
Calcaires compacts	80-6.000
Calcaires saturés en eau de mer	8,6
Calcaires saturés en eau douce	120-400
Marnes triasiques	30-50
Marnes jurassiques	30
Marnes paléocènes	3-7
Marnes + eau salée	0,5-4
Grès argileux	50-300
Grès quartzites	300-10.000
Cinérites, tufs volcaniques	20-100
Larves	300-10.000
Schistes argileux ou altérés	100-300
Schistes sains	300-3.000
Gneiss, granite altéré	100-1.000
Gneiss, granite sain	1.000-10.000

1-2.- LA SISMIQUE

1-2.1.- Principe des vitesses

La méthode sismique est fondée sur l'étude comparative des vitesses de propagation des ondes longitudinales dans les différentes formations du sous-sol. Une onde P transporte une succession de compressions et de dilatations dans la même direction que la propagation.

Tout ébranlement produit des ondes sismiques qui se propagent dans le milieu suivant les lois de l'élasticité.

Si on a une déformation élastique par traction, on peut calculer le module de rigidité.

$$u = E/2(1 + \sigma)$$

σ = coefficient de poisson
E = module de young

Si la traction est perpendiculaire à la plaque, on définit un module d'écrasement K :

$$K = E(1 - \sigma)/(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)$$

En appliquant cette notion d'élasticité aux ondes longitudinales pour lesquelles la déformation est parallèle à la propagation, on détermine la vitesse de propagation en fonction de la rigidité et de la densité de la formation considérée :

$$v = \sqrt{(\lambda + 2u)/\rho} = \sqrt{K/\rho}$$

λ = longueur d'onde = $u \cdot (2/5) \cdot E$
 ρ = densité

La vitesse de propagation est essentiellement proportionnelle à la rigidité des formations et est croissante avec la profondeur car la rigidité croît beaucoup plus vite que la densité (fig. 9).

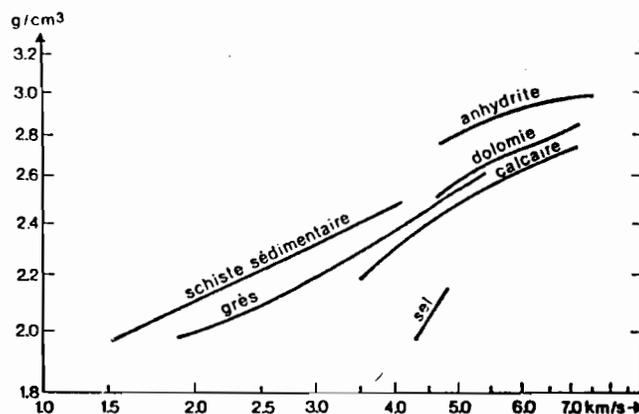


Fig.9- Relations entre vitesses sismiques et densités.
D'après Gardner et al., (1974), in Meyer, (1991).

Quand on parle de rigidité et de densité, on fait allusion à la cohésion des matériaux traversés, de leur porosité, du degré de saturation de leurs pores et dans une moindre mesure,

de leur constitution minéralogique.

La figure 10 montre que si la porosité diminue, la vitesse de propagation diminue. Ainsi les roches consolidées sont plus rapides que les roches poreuses, ou fracturées. Donc la vitesse de propagation des ondes élastiques pour un même type de roche, diminue avec le degré d'altération, de fissuration ou de fracturation ; elle augmente par contre avec la profondeur et l'âge géologique.

A fortiori, les formations meubles comme le sable auront une vitesse de propagation faible tandis que les formations rigides comme le calcaire, présenteraient des vitesses élevées.

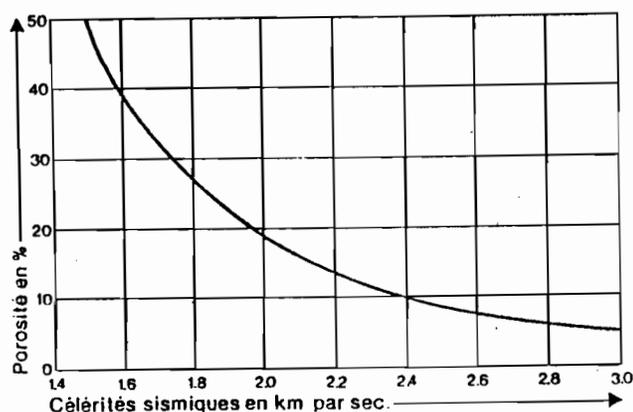


Fig.10- Relations entre vitesses sismiques et porosités (grès).
D'après Meyer De Stadelhofen, (1991).

Dans les dépôts meubles, la vitesse est plus élevée au-dessous du niveau hydrostatique, qu'au-dessus de celle-ci du fait de la différence de vitesses de propagation dans l'air et dans l'eau (tableau 4). Elle décroît si la porosité augmente. Donc la méthode sismique peut bien s'appliquer à l'étude des aquifères du littoral Nord.

La figure 11 et le tableau 4 donnent des valeurs de vitesses sismiques dans les grandes familles de roches.

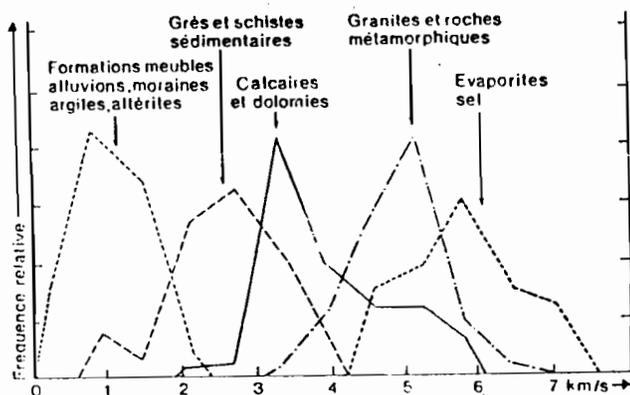


Fig.11- Vitesses sismiques dans les grandes familles de roches.
D'après Grant et West, 1965, in Meyer, (1991).

Tab 4 : Vitesse des ondes sismiques. D'après ASTIER, J.L. (1971).

Formations	Vitesses (Km/s)
Air	0,33
Eau douce	1,45
Vases	0,2-0,6
Couche superficielle meuble et sèche	0,2-0,6
Alluvions sèches	0,6-1,2
Alluvions humides	1,6-2,4
Argiles	1,1-2,5
Argiles compactées	3,9-5,5
Marnes, craie	2-3
Grès tertiaires	2,1-3,5
Laves	2,5-4
Calcaires et dolomies	3-5
Schistes, micaschistes	3-4,5
Gneiss, quartzites	3,5-5
Granite	4-6

1.2.2.- Procédé utilisée : la sismique réfraction

Il existe deux méthodes de prospection sismique ; la sismique réfraction, qui s'intéresse principalement aux ondes ayant subi le phénomène de la réfraction totale et la sismique réflexion.

La sismique réflexion est de loin, la plus utilisée dans la recherche pétrolière. Mais actuellement, en hydrogéologie, on ne fait presque jamais appel à elle et on lui préfère la sismique réfraction pour les trois raisons suivantes :

- Elle est mal adaptée aux études à petite profondeur et ne donne en général de bons résultats que pour des profondeurs supérieures à 200 m.

Cela tient au fait que les réflexions sur les contacts peu profonds arrivent aux géophones alors que les vibrations provoquées par l'onde directe et les ondes réfractées à la base

de la zone désagrégée ne sont pas encore amortie.

- Elle est beaucoup plus efficace, utilisée pour l'exécution de grands profils continus que celle de petits bouts de profils éparpillés comparables à des sondages de sismique réfraction.

- Le prix revient de l'équipe réflexion la plus légère est largement supérieur à celui des équipes réfractés utilisés en hydrogéologie.

a) Définition d'un sondage de sismique réfraction

La sismique réfraction est fondée sur l'étude comparative des vitesses de propagation des ondes totalement réfractées dans les différentes couches de terrain. L'ébranlement du sol est provoqué soit à l'aide d'explosifs à la surface du sol ou descendus dans un forage, soit par des moyens mécaniques (le choc d'un piston, un vibreur, la chute d'un marteau sur une plaque métallique).

Dans le cadre de notre étude , nous avons utilisé la technique du marteau

b) Disposition de mesure d'un sondage de sismique marteau

Les opérations sur le terrain comportent :

- la réalisation d'un dispositif sismique comprenant un point d'ébranlement,
- un récepteur ou géophone,
- la transmission ou l'enregistrement de l'instant de l'ébranlement des arrivées des ondes au récepteur à l'aide d'un sismographe à incrémentation de signal (fig. 12) et (fig. 13).

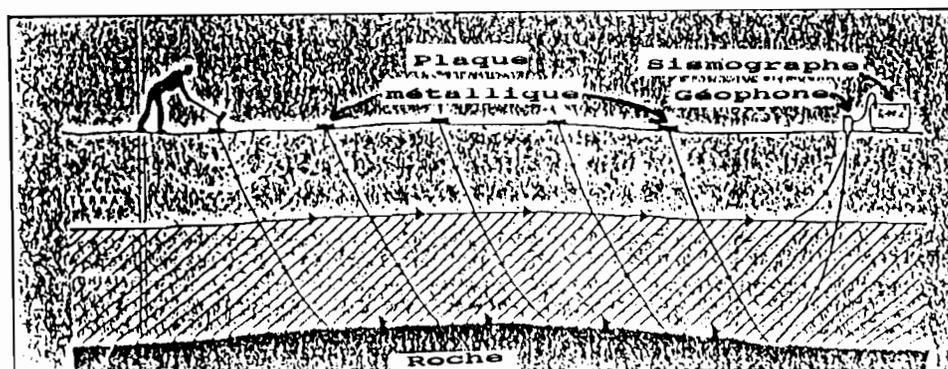


Fig.12- Schéma de réalisation d'un sondage de sismique marteau.

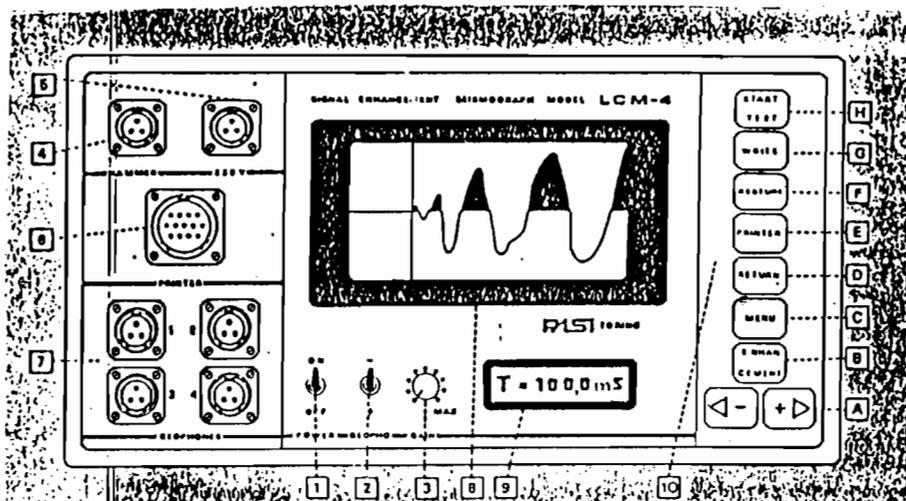


Fig.13- Sismographe à incrémentation de signal MOD.LCM-4.

1. Interrupteur d'alimentation
 2. Interrupteur de changement de polarité du géophone
 3. Potentiomètre de gain du géophone
 4. Connecteur du câble du marteau
 5. Connecteur du câble de charge (220 V)
 6. Connecteur de sortie imprimante
 7. Connecteur des géophones selectionables par touches
 8. Ecran de visualisation du signal, du curseur avec indication du canal et de la base de temps utilisée
 9. Affichage du temps et des diverses fonctions
 10. Bloc de commande
- A. Touche -/+
- de positionnement du curseur lorsque en (9): CHANNEL N.
 - d'imposition du retard - (9): DELAY
 - de selection de la base de temps écran (9): RECORD **
 - de déplacement du curseur (9): T= mS
- B. Touche de sommation du signal (ENHANCEMENT)
- C. Touche d'entrée des diverses fonctione (MENU), (9): Channel, Delay, Record
- D. Touche de retour à la fonction temps (RETURN), (9): T=
- E. Touche de commande du transfert des donnees sur imprimante PRINTER
- F. Touche de rappel des mémoires des canaux RESTORE
- G. Touche de prédisposition de l'instrument à la mesure WRITE
- H. Touche de commande d'enregistrement du bruit de fond START TEST

BASE DE TEMPS: 25 50 100 200 400 800 1600 mS
 CODE ECRAN: 1 2 3 4 5 6 7

On reporte sur un graphique (temps-distance) les valeurs obtenues (fig. 14).

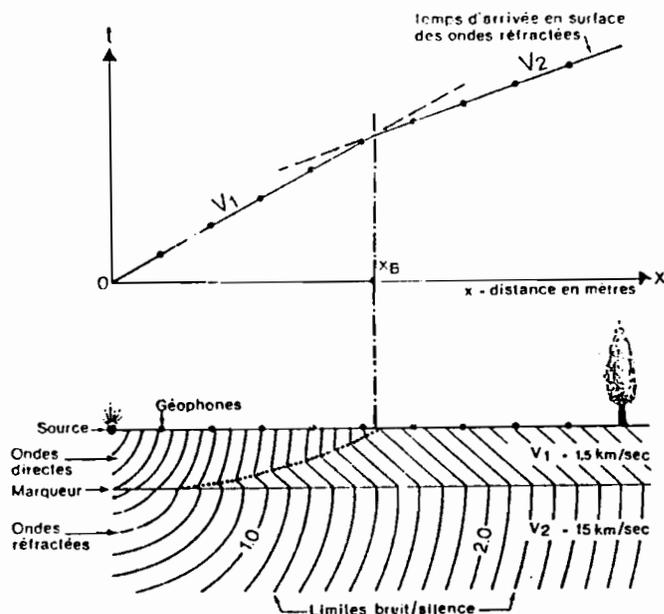


Fig.14- Ondes sismiques directes et réfractées.

En sismique réfraction, la longueur du dispositif placé en surface est généralement comprise entre trois et dix fois la profondeur à atteindre.

L'emploi de la masse présente divers avantages :

- le matériel peu coûteux, est facile à transporter,
- l'appareil permet généralement d'additionner les impulsions reçues à chaque coup, pour améliorer le rapport signal sur bruit jusqu'à l'obtention d'un signal bien lisible.

L'inconvénient de la masse, c'est qu'elle ne produit que peu d'énergie et la profondeur d'investigation reste faible. En effet au delà d'une distance (x) de 200 m, le signal devient illisible malgré la sommation des impulsions. Ce qui fait que la profondeur d'investigation, variable selon le terrain, ne dépasse que très rarement 30 m. Donc on ne peut espérer identifier le substratum avec cette méthode alors qu'on le pourrait très bien avec une plus grande énergie de tir basée sur l'emploi d'explosifs ou de soupapes.

Dans la présente étude, la sismique marteau ne nous fournit que des informations sur la nature des couches superficielles.

Ces couches sus-jacentes à l'aquifère correspondent à la zone de recharge possible. En effet, la présence d'une couverture argileuse ne favoriserait pas l'infiltration efficace des eaux de pluies.

Par contre, son absence pourra entraîner des dommages par des pertes de charge au niveau de la nappe par évapotranspiration

De même, la présence de calcaires karstiques permettra une infiltration efficace tout en réduisant l'évapotranspiration.

On voit donc que la méthode de sismique réfraction légère (marteau) est adaptée à notre étude et permet de déterminer la nature et la structure des formations aquifères.

c) Conditions pour la réalisation d'un sondage de sismique réfraction

Pour que les méthodes sismiques soient utilisables, certaines conditions doivent être remplies ; il faut en particulier que :

- la vitesse des ondes sonores dans le sous-sol soit différenciée d'une formation à l'autre ;
- le marqueur se caractérise par son pouvoir réfracteur qui dépend en particulier du contraste des vitesses entre formations adjacentes ;
- les qualités du marqueur sont elles dépendantes du contraste de vitesse. Il faut en outre que les ondes réfractées remontent vers la surface, que les couches successives du sous-sol présentent des vitesses croissantes avec la profondeur.

1.2.3.- Interprétation des résultats en sismique réfraction

Toute l'interprétation est fondée sur l'étude du graphique temps-distance, la dromochronique.

Il est indispensable d'effectuer les mesures de telle façon que toutes les informations utiles à l'interprétation apparaissent sur les dromochroniques. Il faut en particulier pouvoir déterminer (fig. 15) :

- les pentes $\Delta t / \Delta x$ des segments successifs pour en tirer les vitesses ;
- les positions XB des points de brisure ;
- la valeur des intercept-times $t_i = I$

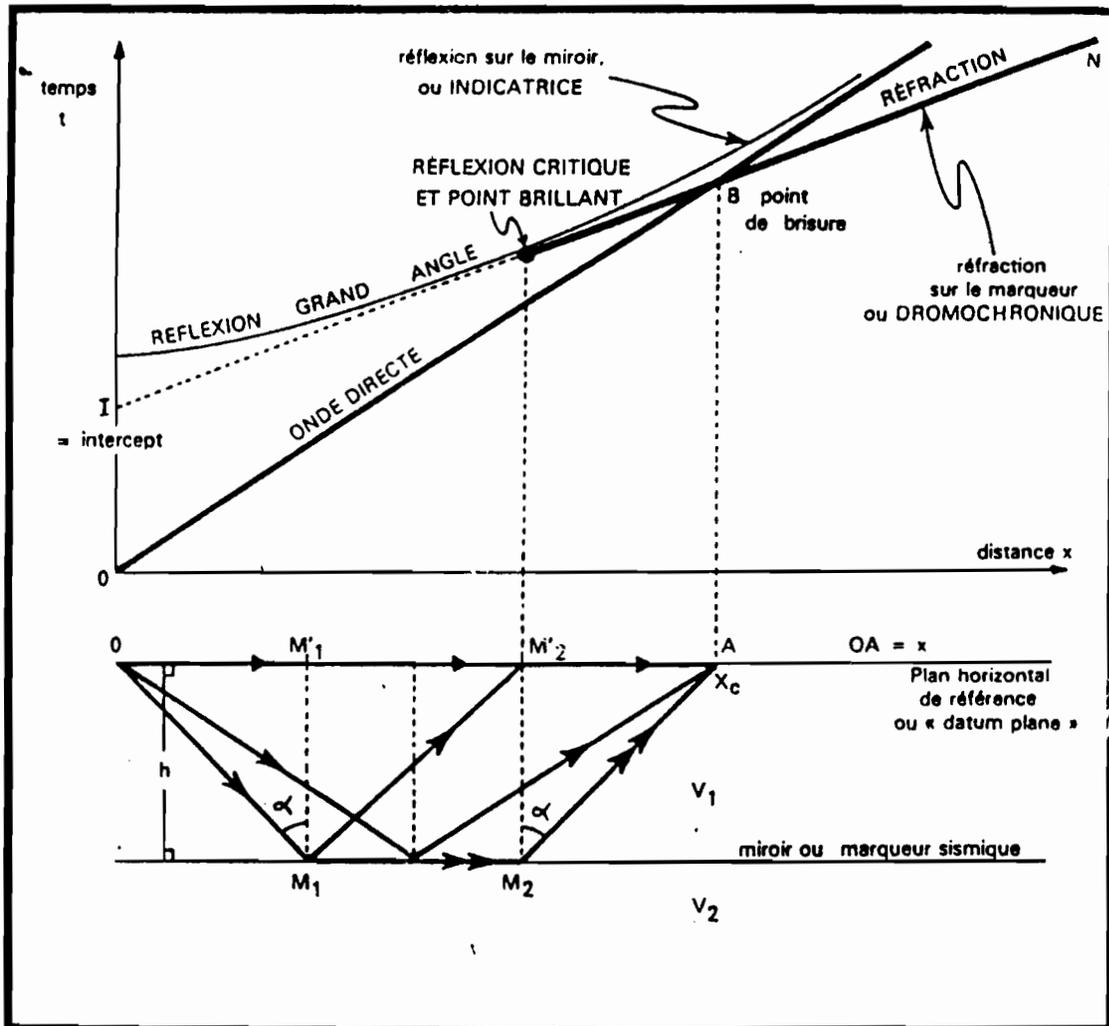


Fig.15- Enregistrement des dromochroniques de réfraction $t(x)$.

L'utilisation de l'outil informatique facilite l'interprétation des résultats. En effet, le programme informatique, courbe06 que nous avons utilisé a permis de simplifier l'interprétation en trois étapes:

* Etablissement du nuage de points temps-distance des sondages effectués.

* Traçage à la règle des différentes dromochroniques possibles dans le nuage.

En appliquant les lois optiques, il est possible d'établir et d'élaborer l'équation des temps de parcours pour en tirer les vitesses caractéristiques (V_1 , V_2 , V_3 , V_4) et les épaisseurs des terrains superposés (e_1 , e_2 , e_3).

La loi de réfraction des ondes passant d'un milieu de vitesse V_1 à un milieu de vitesse V_2 est la suivante :

$$\sin i_1/V_1 = \sin i_2/V_2$$

$$\text{Donc } \sin i_1 = V_1/V_2$$

i_1 = angle d'incidence

i_2 = angle de réfraction = 90°

L'expression du temps t écoulé entre le tir et l'arrivée du premier impetus au géophone est :

$$t = x/V_2 + 2h \cdot \cos \alpha / V_1$$

Lorsque la distance $x = OA$ est faible, la première arrivée est une onde directe superficielle d'équation $t = x/V_1$. La dromochronique $t(x)$ d'un modèle simple à deux terrains est ainsi constituée de deux droites, une droite OB de pente $1/V_1$ et une droite BN de pente $1/V_2$.

B est appelé "point de brisure" ; son abscisse x_c est la distance à partir de laquelle l'onde réfractée et l'onde superficielle directe sont enregistrées simultanément. C'est la "distance critique" : $x_c + 2h \cdot \tan \alpha$. Au-delà de la distance critique, le rayon réfracté arrive au géophone avant l'onde directe.

A l'origine des abscisses, $t = t_i = I = 2h \cos \alpha / V_1$

L'intercept time $t_i = I$ est défini par le point d'intersection du segment de la dromochronique avec l'ordonnée du temps passant par $X = 0$.

L'épaisseur de la première couche sera : $h = I \cdot V_1 / 2 \cos \alpha$

Lorsqu'on est en présence de quatre terrains, on pourra calculer les épaisseurs des trois premières couches

$$h_1 = I_1 \cdot V_1 / 2 \cos \alpha_1$$

$$h_2 = I_2 \cdot V_2 / 2 \cos \alpha_2 - h_1 \cdot V_2 \cos \alpha_1 / V_1 \cos \alpha_2$$

$$h_3 = I_2 V_2 / 2 \cos \alpha_3 - h_1 V_3 \cos \alpha_1 / V_1 \cos \alpha_3 - h_2 V_3 \cos \alpha_2 / V_2 \cos \alpha_3$$

En général, si le nombre de couches superposées est plus grand que 2, les calculs deviennent lourds et fastidieux et on peut faire appel aux petites calculatrices programmables (Annexes 1-2).

Après détermination des vitesses et épaisseurs des couches, on trace à l'aide du programme Courbe06, les dromochroniques définitives. Pour cela on introduit à l'ordinateur les coordonnées de deux points respectivement début et fin de chaque dromochronique précédemment tracée à la règle (fig 16).

* La dernière phase est l'interprétation proprement dite.

Elle permet de donner une signification, dans un domaine d'application donné du paramètre physique qu'est la vitesse de propagation de l'onde d'ébranlement.

Contrairement à l'électrique, la sismique permet de faire une nette distinction entre sables (couches superficielles meubles ou alluvions) et calcaires.

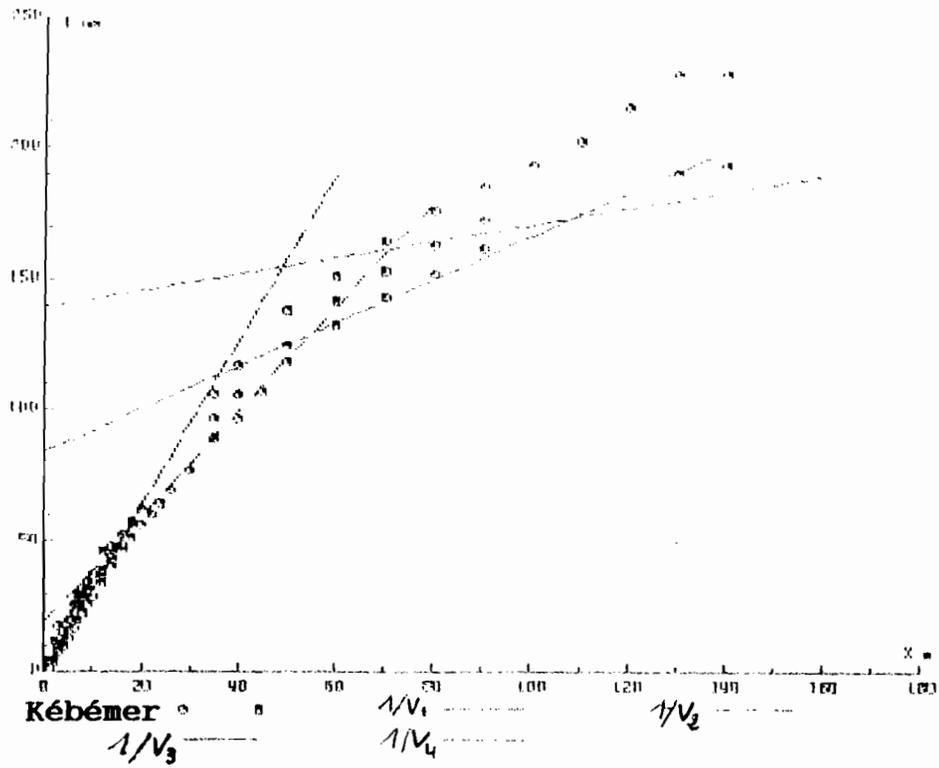


Fig.16- Nuage de points et dromochroniques (sondage Kébémér)

DEUXIEME PARTIE

**ETUDE DU CAS DES NAPPES DE SABLES ET
CALCAIRES DU LITTORAL NORD
ENTRE TAIBA ET RAO**

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU SECTEUR D'ETUDE

1.1.- Cadre physique

Le secteur géographique concerné par la présente étude s'étend au Nord-Ouest du Sénégal, le long de la grande côte entre Taïba et Rao avec une extension à l'Est de la nationale 4 (fig. 1).

- Il est caractérisé par une série de dunes stables et de dépressions interdunaires, qui s'étendent derrière la ceinture côtière plus active.

De climat sahélien, ce secteur est sous l'influence de l'alizé maritime issu de l'anticyclone des Açores chargé d'humidité.

De 300 mm de pluie en moyenne à St-Louis, la pluviométrie augmente et atteint 500 mm au sud du secteur.

- Le développement des cultures a fortement dégradé le peuplement végétal initial de la région dont il ne subsiste que des témoins limités. L'acacia raddiana peuple le Nord et le Centre. Vers le Sud, il est progressivement remplacé, puis surplanté par Acacia albida.

Les Balamites aegyptiaca et Ziziphus mauritania sont également abondants.

Deux arbres : Aphania senegalensis et Parinari macrophylla sont caractéristiques de la zone côtière.

Hors des zones cultivées s'installent des peuplements d'Andropogon gayanus.

La région considérée est essentiellement peuplée de Ouolofs sédentaires qui cultivent surtout l'arachide, le mil et les haricots.

Au Nord-Est et le long de la zone côtière, on rencontre des Peulhs qui pratiquent l'élevage bovin et l'associent aujourd'hui aux cultures maraîchères très développées dans les Niayes.

1.2.- Géologie du secteur d'étude

A l'exception du Sud et de l'Est, sur l'ensemble du secteur, le substratum est masqué par une couverture sableuse allochtone d'origine éolienne dont la mise en place date du Quaternaire moyen.

Les études des éléments fournis par les sondages mécaniques profonds présentent de bas en haut la succession suivante :

A - Stratigraphie

* Le Maestrichtien

Dans l'ensemble, cet étage est représenté par des sables siliceux azoïques très hétérogènes. Au Sud, il est argilo-sableux, grésocalcaire et marneux.

* Le Paléocène

Il est représenté par les faciès variés pour la plupart argileux ou carbonatés. Le sommet du Paléocène est marqué par un passage net aux faciès généralement azoïques (argiles feuilletées, calcaires marneux, calcaires) il devient siliceux à la base de l'Eocène inférieur.

* L'Eocène inférieur ou Yprésion

Essentiellement représenté par des roches argileuses, marneuses et calcaires.

* L'Eocène moyen ou Lutétien

Dans cette région, il constitue le dernier terme marin du bassin sédimentaire Sénégal-Mauritanien. D'Est en Ouest et selon une limite subméridienne, les assises supérieures du Lutétien présentent de bas en haut :

- une série à prédominance marneuse et argileuse ;
- une série essentiellement calcaire renfermant une importante faune de Nummulites.

Le Lutétien argileux apparaît également au Sud-Ouest dans la région de Taïba.

* L'Eocène supérieur

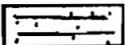
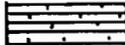
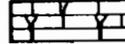
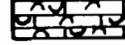
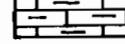
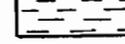
Dans la région de Taïba, la présence de remaniements et d'une faune particulière à Daucénia erneanniana Bornemann dans les dernières assises marines permet d'envisager leur appartenance à l'éocène supérieur (C. Monciardini, in BRGM, 1967 b).

* Le Continental Terminal (C.T.)

Le terme du Continental Terminal au sens strict s'applique à toutes les formations grés-argileuses continentales situées entre les assises marines de l'éocène ou les argiles qui les surmontent localement (Eocène supérieur à Oligocène) et les dépôts attribués au Quaternaire (Kilian, C.1931, in BRGM, 1967b).

Le Continental Terminal semble faire défaut dans la région de Taïba et n'a pas été identifié avec certitude dans les autres secteurs. Ce niveau est en effet peu différent des dépôts quaternaires, toujours azoïques.

Fig.17-LEGENDE DES COUPES

	Sable		Niveau hydrostatique
	Sable fin argileux		Niveau crépiné
	Latérite		Eau salée
	Argiles sableuses		
	Argiles		
	Bancs de silex		
	Calcaires karstiques		
	Calcaires coquilliers		
	Calcaires marneux		
	Marno-calcaires		
	Marnes		

* Le Quaternaire

Il semble que la partie Sud-Ouest du delta et peut être aussi la bande littorale des Niayes aient été envahies à plusieurs reprises par des transgressions marines : par contre dans les régions intérieures, la sédimentation aurait toujours gardé un caractère continental (épandages de sables et de graviers, dépôts lacustres).

Plusieurs systèmes dunaires ont été individualisés dans le temps et l'espace (fig. 18) :

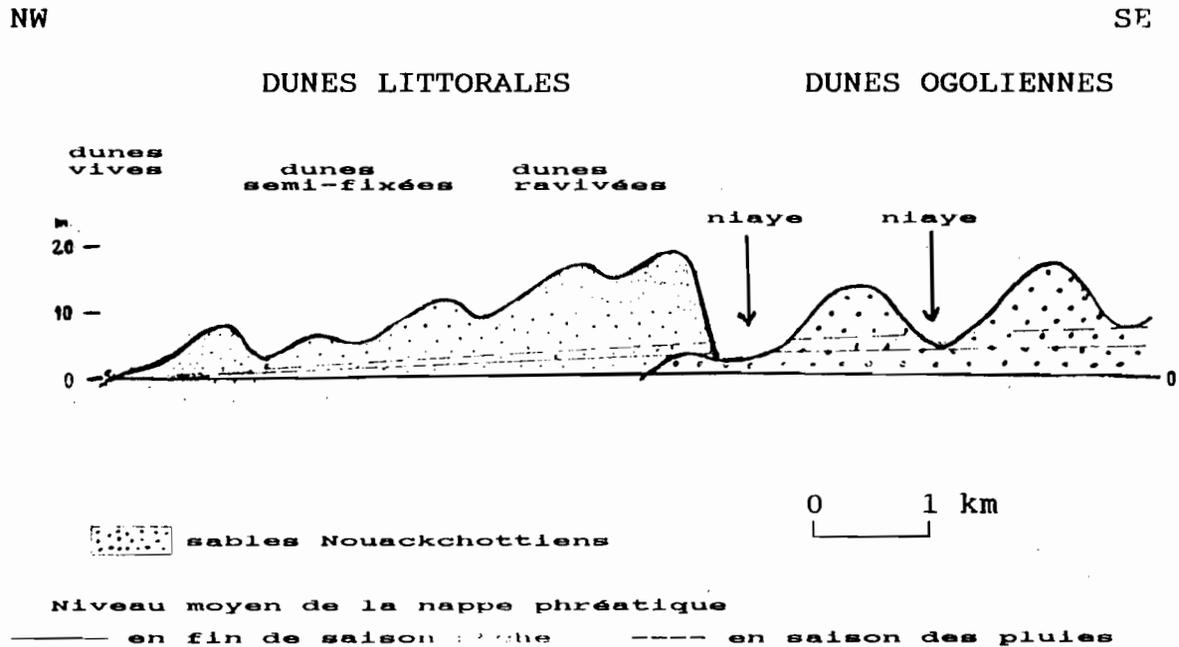


Fig.18- Coupe schématique des Niayes (BRGM, 1967 b).

- Le système dunaire interne ancien :

Ce système subsisterait dans le Ferlo, alors que dans le Cayor et le Cap Vert, son matériel a été démantelé, étalé et mélangé à des gravilliers ferrugineux.

- Le système dunaire Ogolien intermédiaire :

Appelé "dunes rouges", ce système est bien conservé à l'Ouest de la ligne Pire-Gourey - Louga et entre Louga et la limite orientale du Delta du Sénégal ; Michel, P.(1956). D'orientation NNE-SSW au Nord et devient N-S entre Mboro et Potou.

- Le système dunaire Nouakchottien

La dernière transgression marine a eu lieu au cours de l'Holocène.

- Le système dunaire post-Nouakchottien
- Le système dunaire subactuel et actuel

Essentiellement dans la zone littorale et sont d'origine éolienne ou lagunaire.

. Dunes littorales semi-fixées ou dunes jaunes :

Ces dunes ne sont que partiellement fixées par des Euphorbes et des épineux.

. Dunes ravivées :

Les alizés maritimes qui peuvent atteindre 25 km/h, ont ravivé certaines parties des dunes semi-fixées.

. Dunes vives

Elles bordent le littoral et se forment à partir de la plage, nourries par la dérive littorale.

. Les dépressions sableuses (Niayes)

Les cuvettes marécageuses s'égrènent à l'arrière des dunes littorales depuis Cambéréne jusqu'à l'extrémité du delta du fleuve Sénégal.

Elles sont inondées par des fluctuations de la nappe phréatique au cours de l'année. Certaines pénètrent loin vers l'intérieur des terres, recoupant les cordons de dunes rouges. Ces sols humifiés sont exploités pour les cultures maraîchères.

B - La Tectonique

Les travaux de Lepriol, 1985 (fig. 19) donne des linéaments où toutes les directions de l'espace sont représentées. Certains de ces linéaments se sont révélés de véritables failles.

Les directions de failles et groupes d'accidents majeurs mis en évidence sont les suivants :

a) Direction NNE-SSO

Ces failles présentent des rejets importants : les accidents "Rosso-Gnit-Sakal-Louga-Kébémér" provoquent un effondrement du compartiment ouest de l'ordre de 200 mètres.

b) Direction NE-SO

Cette famille de failles est matérialisée par le tracé du littoral entre Kayar et Mboro.

c) Direction ENE-OSO

Cette direction est l'une des plus visible. Les failles sont présentes au Sud de Louga et Kébémér.

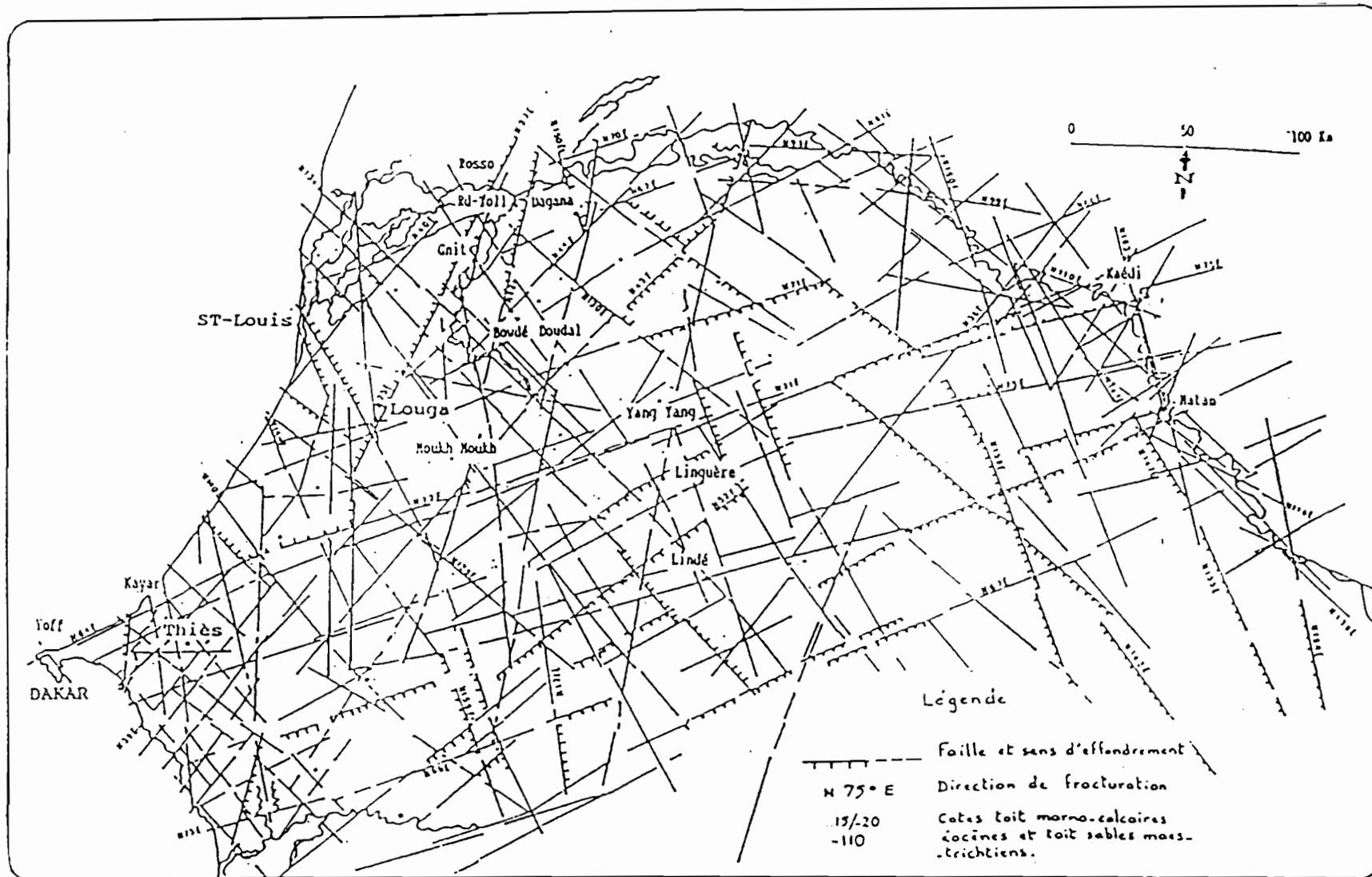


Fig.19 - Carte tectonique photo-interprétative du Sénégal (moitié Nord du pays) - [d'après J. LE PRIOL, 1985]

d) Direction SE-NO

Cette direction est fréquemment relevée par photo-satellite.

On en rencontre au Nord-Ouest de Kébémér et au Sud entre Taïba et Lompoul.

e) Direction N-S

A l'Ouest de Mekhé, Est Kébémér et Nord Louga.

Une des conséquences des jeux de failles, est l'existence d'une zone d'effondrement majeure dans les secteurs Saint Louis, Pal/Sakal, Kébémér, Ndande, Lompoul.

1.3.- Hydrogéologie

La nappe se trouve:

- dans les sables quaternaires bordant le littoral,
- dans les sables argileux du continental terminal qui se trouvent sur le prolongement vers l'Est des sables quaternaires,
- dans les calcaires lutétiens : un accident tectonique d'orientation SO-NE sépare cet aquifère des sables de celui des calcaires lutétiens karstiques.

Cette discontinuité géologique n'entrave pas la bonne communication hydrodynamique entre les deux formations.

Les calcaires sont découpés en compartiments par des accidents tectoniques orientés grossièrement Est-Ouest.

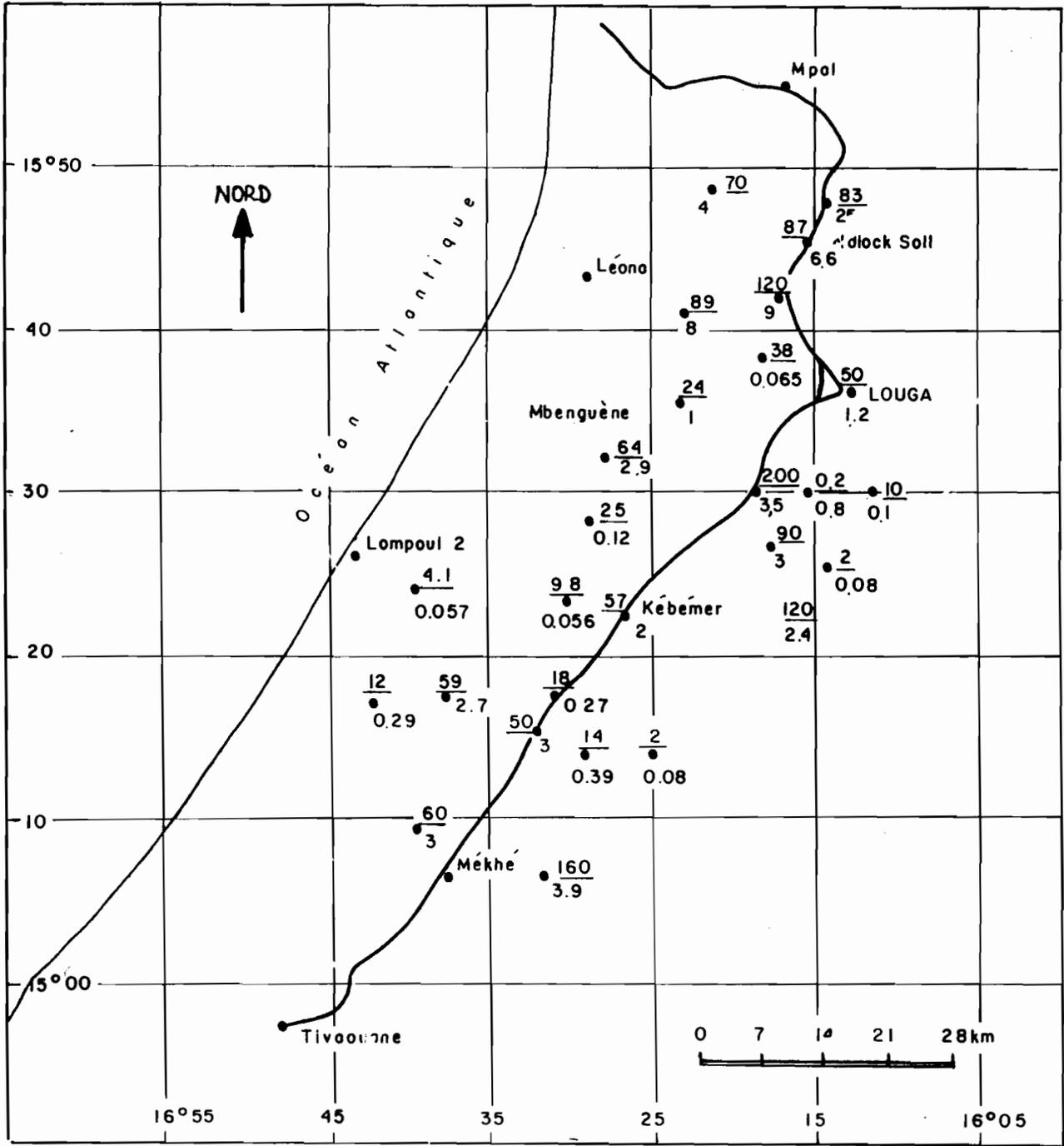
L'épaisseur de la nappe des sables croît du Sud au Nord.

Des campagnes d'essai effectués sur plusieurs forages intéressant cette formation, montrent une bonne transmissivité et une perméabilité en général croissante en direction du Nord et de part et d'autre de la ligne de partage des eaux (fig.20).

On observe aussi un coefficient d'emménagement retardé S' (phénomène d'égouttement de 4 à 10 %).

Les pompages d'essai réalisés dans les calcaires ont généralement montré une excellente perméabilité parfois supérieure à $100 \cdot 10^{-5}$ m/s attestant du caractère karstique des calcaires.

L'observation de la carte piézométrique permet de distinguer entre Taïba et Rao quatre zones où la nappe se comporte différemment selon sa transmissivité, l'allure du substratum imperméable et la perméabilité (fig. 21) :

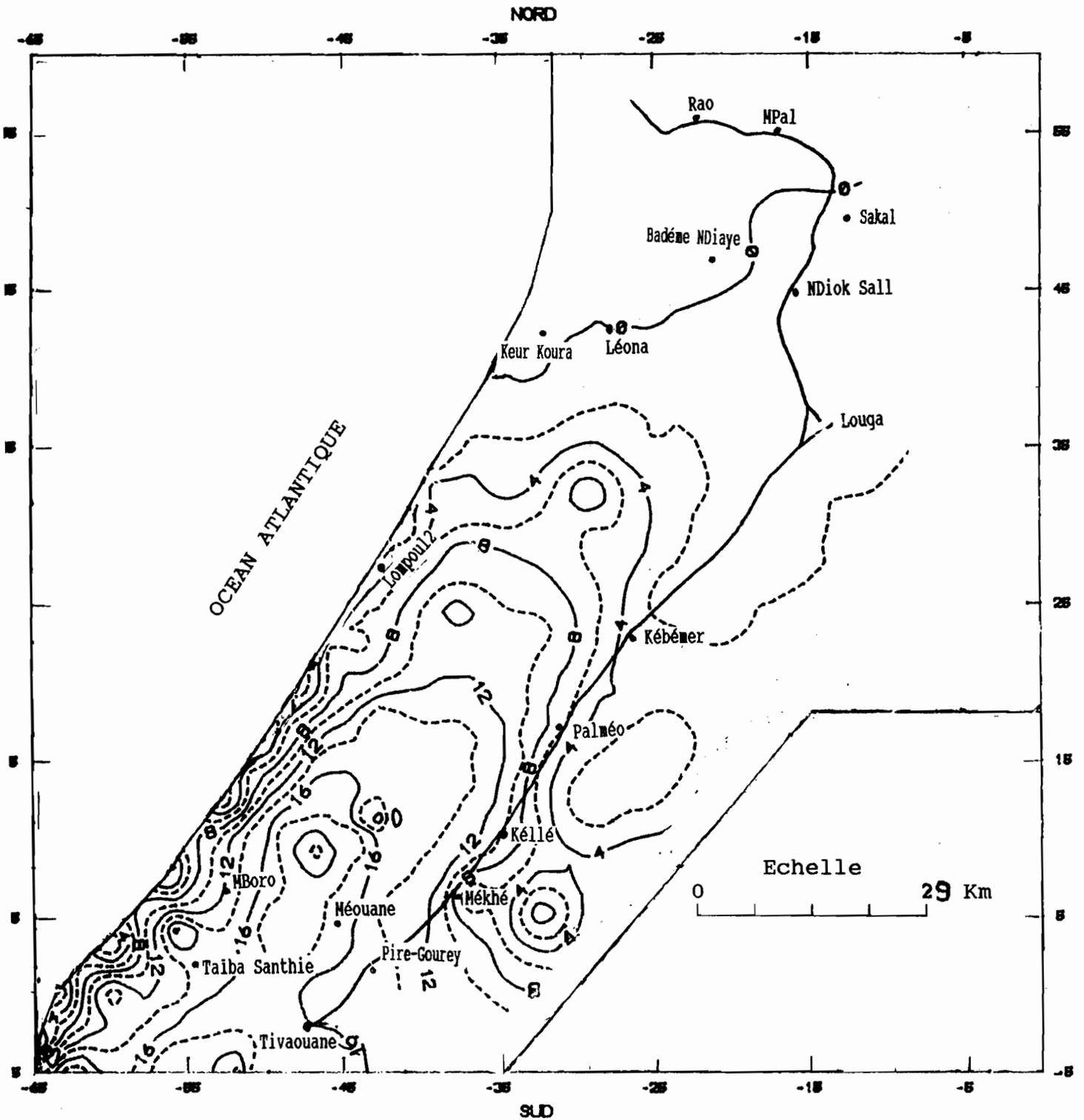


70: Permeabilité $10^{-3}m/s$

4: Transmissivité $10^{-2}m^2/s$

Fig.20- Carte des caractéristiques hydrodynamiques (rapport B.R.G.M 1993).

Fig.21-CARTE PIEZOMETRIQUE NIAYE octobre 1991 (Diouf.S, 1993)



a) Zone dorsale ou de partage des eaux

La nappe culmine au sud sur le plateau de Taïba. Les sables y sont peu abondants et la nappe se trouve dans la couche phosphatée peu perméable ou dans la laterite. Les courbes s'étalent de plus en plus en direction du Nord ; ce qui est un indice d'une perméabilité croissante.

La pente de la nappe passe de 1 à 0,3%. . Au Nord de latitude 15°35', la nappe devient pratiquement horizontale.

b) Zone occidentale ou côtière

A l'Ouest de la dorsale, les eaux s'écoulent vers l'Océan. Ce sont celles qui alimentent les Niayes.

Le long de la côte, dans les dunes jaunes ou dans les dunes récentes, existe une nappe douce dont le niveau piézométrique est parfois plus élevé par rapport à l'intérieur dans la zone d'affleurement des Niayes.

Cette nappe forme un écran à l'écoulement de l'eau des Niayes vers la mer et en même temps une barrière bloquant l'eau de mer à même profondeur proportionnelle à l'altitude du plan d'eau (principe de Ghiben Herzberg qui sera développé ultérieurement).

c) Zone orientale

On observe une zone de drainage au Nord-Est de Pire-Gourey et une autre au Nord-Est de Kellé. Plus au Nord, la pente devient très faible à nulle, ce qui concorde avec les bonnes perméabilités des calcaires karstiques à grandes nummulites établies lors des pompages d'essai.

e) Zone Nord

Au delà de 15°35' de latitude Nord, la nappe s'étale. Il y a 10 km entre les courbes (+2) et (0).

La côte du plan d'eau passe à une altitude négative à partir de l'axe Keur Koura-Léona-Badème-Sakal.

Un déficit de précipitation entraîne un déplacement progressif vers le Sud de la courbe isopiézométrique (0) favorisant ainsi la salinisation des terres. Ce phénomène se traduit par des perturbations dans les activités maraîchères d'élevage et dans l'approvisionnement en eau potable de certaines localités.

Dès lors s'impose une gestion continue de la nappe qui passe par une modélisation. La création d'un modèle demande la connaissance de certains paramètres parmi lesquels la détermination de la géométrie du réservoir.

C'est ainsi que le secteur a fait l'objectif de plusieurs travaux antérieurs et récents, dont on fera une étude détaillée dans les chapitres qui vont suivre.

CHAPITRE 2 : TRAVAUX ANTERIEURS ET ACQUIS

Les travaux antérieurs de géophysique et de sondages mécaniques associés aux résultats d'autres campagnes peuvent être rassemblés et réexploités à l'échelle régionale.

En analysant l'information fournie et en effectuant des compléments dans les zones où les lacunes sont trop importantes, on arrive à une couverture d'ensemble dont l'interprétation constitue le but principal de notre étude.

2.1.- Les sondages mécaniques

La géologie détaillée du secteur est fournie par l'interprétation des coupes lithostratigraphiques de divers ouvrages hydrauliques, forages et piézomètres réalisés dans le cadre des programmes pour l'alimentation en eau potable des populations.

Quelques 160 forages et piézomètres du secteur d'étude ont été utilisés pour la présente étude.

Deux obstacles sont cependant rencontrés:

- d'une part les ouvrages ne sont pas uniformément répartis ; ainsi, la bande large environ de 16 km et allant de Fass Boye jusqu'à Rao, de même que le secteur au Nord de Léona, sont presque dépourvus de sondages mécaniques à lithostratigraphie connue (fig. 22).

- d'autre part, même dans la zone à forte concentration de sondages mécaniques, la plupart ne sont pas assez profonds pour permettre une connaissance de la profondeur des différentes couches notamment les toits du substratum imperméable et des calcaires (fig. 23 a,b,c,d).

Sur bon nombre de forages, la lithostratigraphie des 30 premières mètres n'est pas bien spécifiée. L'analyse de l'ensemble des logs de forages permet de noter : l'importance de l'aquifère des sables Quaternaires à l'Ouest de la nationale 4 et la présence à l'Est de la nappe des calcaires karstifiés ou coquilliers du Lutétien.

Les forages situés à l'Est et au Sud montrent la présence d'importantes couches d'argiles latéritiques intercalées entre les sables Quaternaires et les calcaires Lutétiens (fig. 23d).

A l'Ouest, les sables reposent directement sur le substratum marno-argileux (fig. 23 a, b).

Le Sud Ouest du secteur d'étude est caractérisé par la disparition des calcaires Lutétiens et par la remontée en surface des argiles et des marnes de l'Yprésien (fig. 23c).

On distingue ainsi trois secteurs à lithostratigraphies différentes :

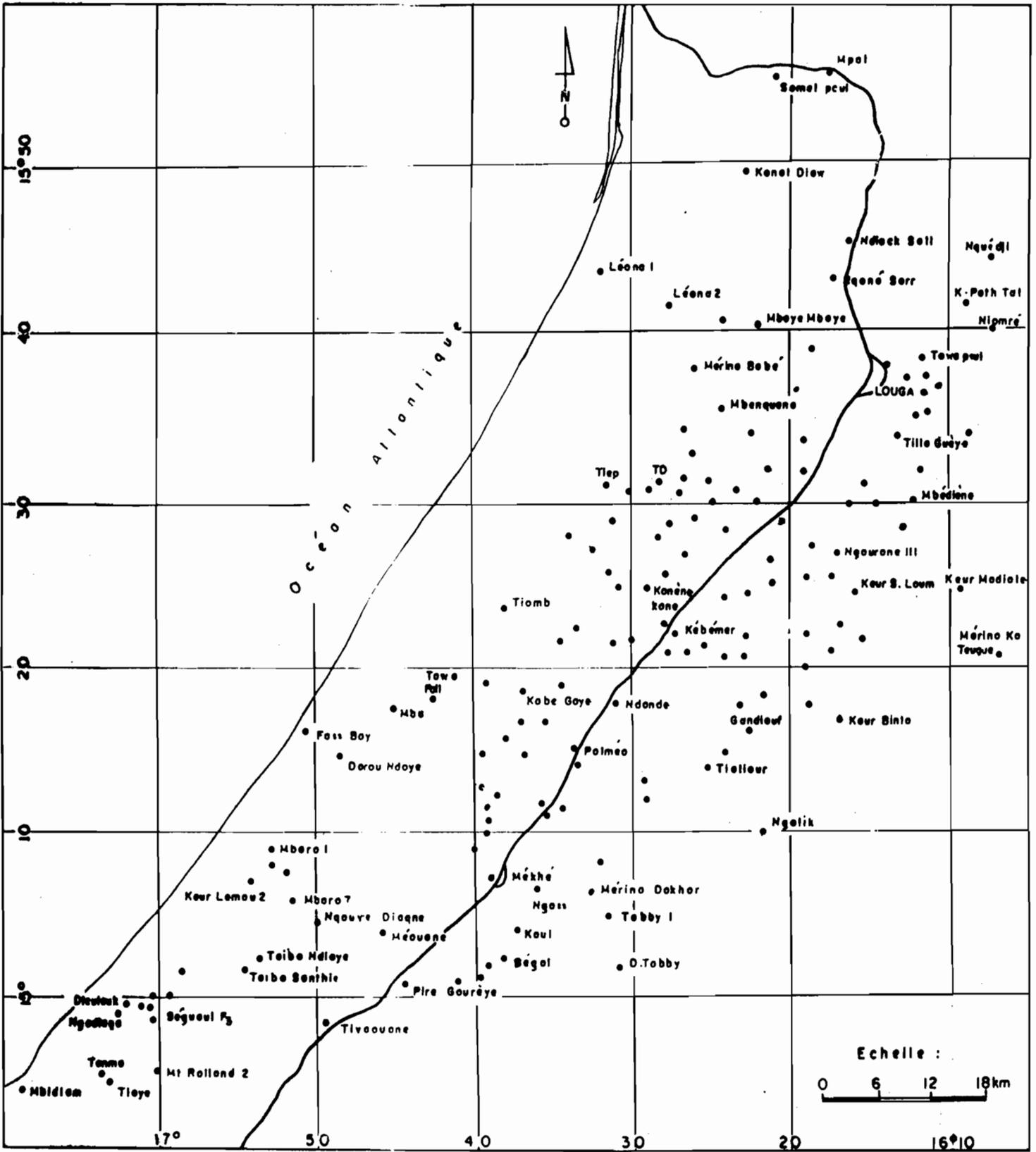


Fig.22- Carte de localisation des sondages mécaniques (forages et piézomètres) (Diouf.S, 1993).

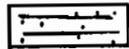
Fig.17-LEGENDE DES COUPES



Sable



Niveau hydrostatique



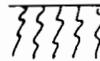
Sable fin argileux



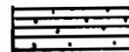
Niveau crépiné



Latérite



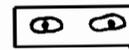
Eau salée



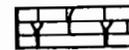
Argiles sableuses



Argiles



Boncs de silex



Calcaires karstiques



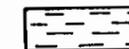
Calcaires coquilliers



Calcaires morneux



Marno-calcaires



Marnes

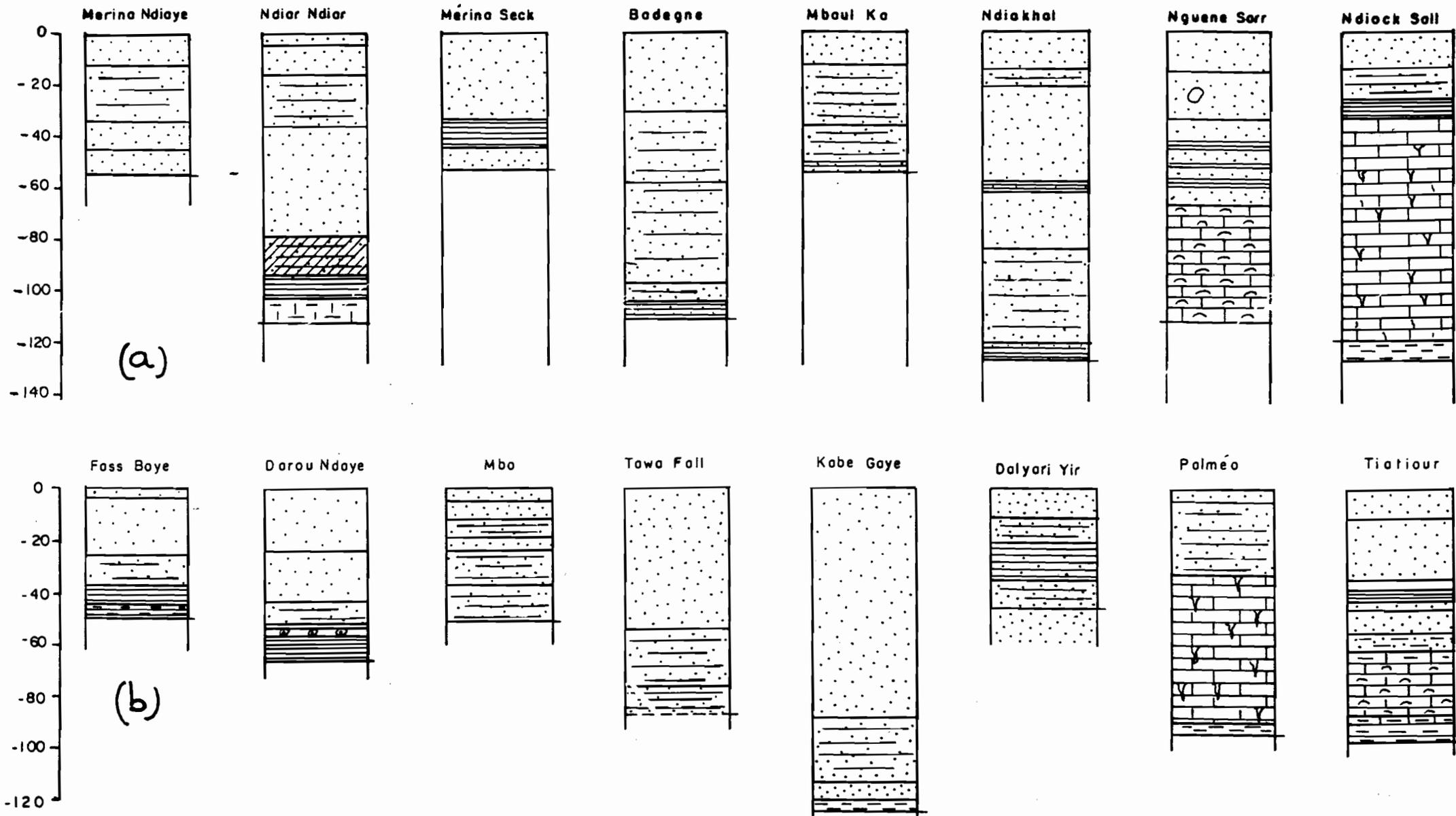


Fig.23a, b, c, d- Coupes lithostratigraphiques des sondages mécaniques.

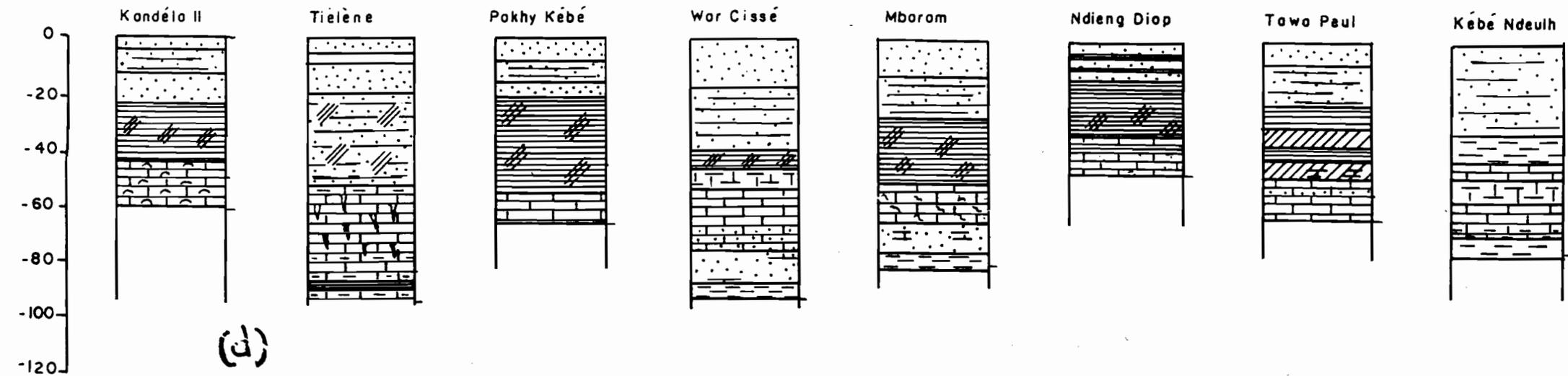
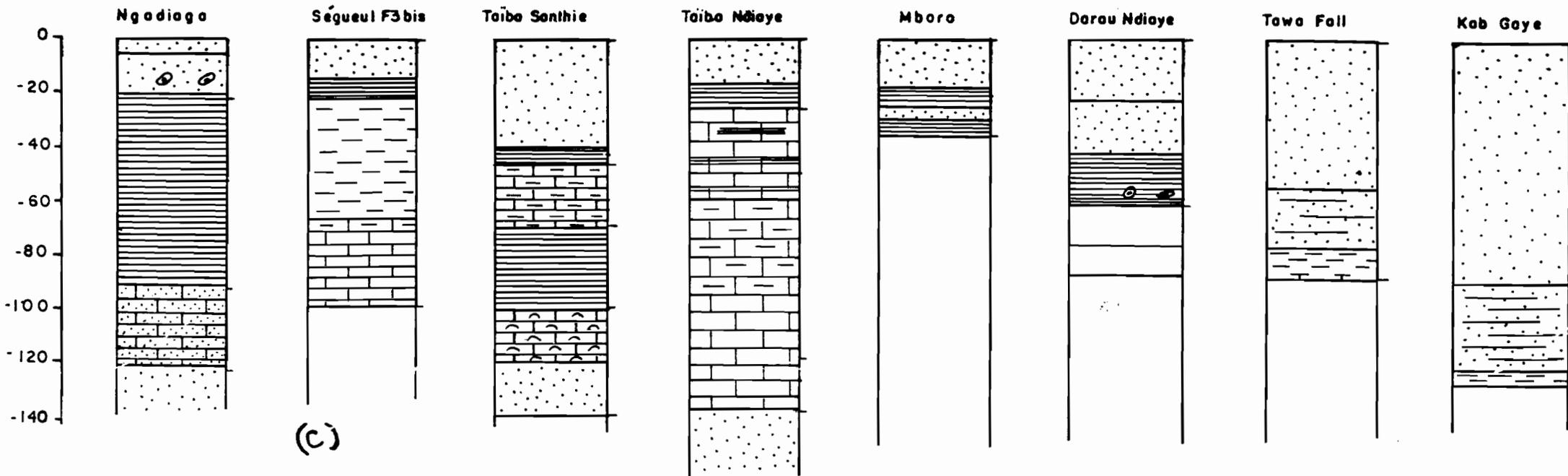


Fig.23a, b, c, d- Coupes lithostratigraphiques des sondages mécaniques.

*** Secteur Ouest (fig. 23 a, b)**

De haut en bas, on rencontre :

Q + C.T		- sables
		- sables argileux
		- argiles
Eocène		- marnes à marno-calcaires

*** Secteur Est (fig. 23 d)**

Les logs de forage montrent de haut en bas :

Q		- sables
C.T		- sables argileux
		- argiles latéritiques
Eocène		- calcaires lutétiens
		- marnes

*** Secteur Sud-Ouest (fig. 23c)**

Ce secteur se caractérise par la disparition des calcaires Lutétiens. De haut en bas on a :

Q		- sables
Eocène inférieur		- argiles
		- marnes
Paléocène		- calcaires

L'importante variation des niveaux d'une même couche comparés dans les trois secteurs, montre l'ampleur des jeux de failles affectant ces formations (fig. 19).

2.2.- Prospection géophysique

Le secteur de la grande côte a fait l'objet de différentes prospections géophysiques appliquées à l'hydrogéologie. Les études ont essentiellement utilisé la méthode de sondages électriques. Plusieurs compagnies de prospection géophysique ont réalisé à des périodes distinctes des sondages électriques dans le secteur considéré (fig. 24).

2.2.2.- Par la compagnie de Prospection Géophysique Française (C.P.G.F, 1978)

Dans le cadre de l'amélioration de l'alimentation en eau potable de la région de Dakar et de 7 centres de la région de Louga, la C.P.G.F a eu à réaliser des sondages électriques en 13 profils avec des longueurs de lignes (AB) allant de 600 à 800 m.

Ces sondages ont intéressé essentiellement :

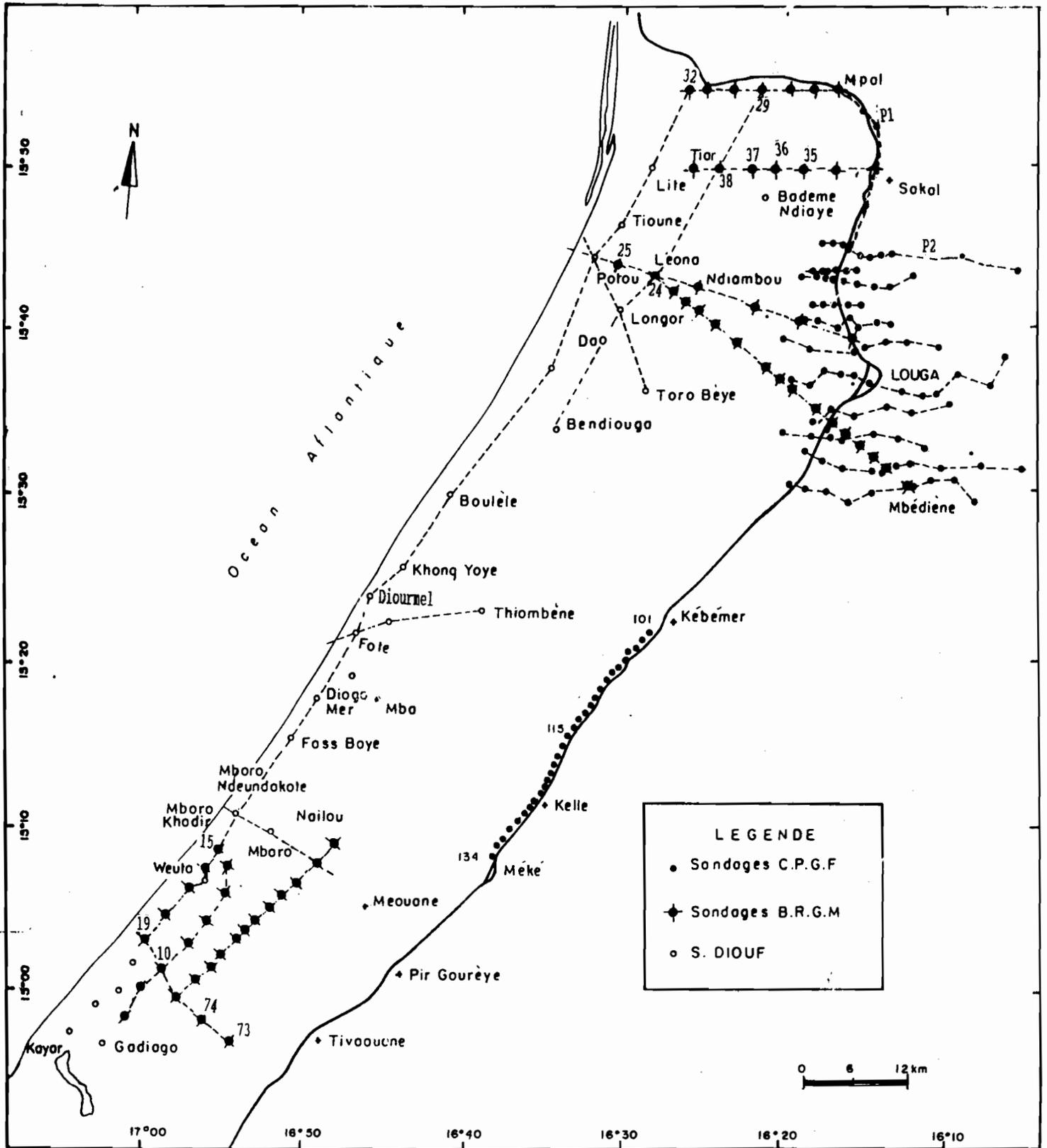


Fig.24- Carte de localisation des sondages électriques.

a) Le secteur de Louga

Ces sondages avaient pour but de localiser les niveaux calcaires Lutétiens le long de la nationale 4 et à l'Est de celle-ci sont orientés Ouest-Est à l'exception d'un seul, de direction Nord-Sud. Dans son ensemble, l'interprétation des sondages électriques indique de haut en bas :

- sable sec : > 200 ohm.m
- sable humide : 80 à 200 ohm.m
- lentilles d'argiles : 10 à 30 ohm.m
- calcaires lutétiens : 60 à 180 ohm.m
- eau salée : < 2 ohm.m
- substratum marneux : < 15 ohm.m

Les faibles résistivités représentant l'eau salée ne sont rencontrées qu'au Nord entre Sakal et Mpal à des profondeurs d'environ 15 m (fig. 25).

Ailleurs, point d'eau salée, mais un substratum marneux sous-jacent aux calcaires lutétiens et qui amorce une remontée vers l'Est (fig. 26). Les lentilles d'argiles sont présentes entre les sables du C.T et les calcaires lutétiens.

b) Le secteur Mékhé-Kébémér

Le profil Kébémér-Mékhé réalisé le long de la route avait pour objectif de déterminer la nature des couches aquifères le long de cet axe.

L'interprétation des sondages montre l'existence d'un niveau calcaire qui présente à certain endroits, des lacunes à remplissage sableux (fig. 27). Au-dessous des calcaires, une couche marneuse à marno-calcaire constitue le mur de l'aquifère. Une présence de lentilles d'argiles est observée entre les sables C.T et les calcaires Lutétiens.

2.2.3.- Par Philippe Lessage, juillet 1983 (83 GPH 060)

L'objectif de l'étude était de déterminer l'impact de l'exploitation des tourbes des Niayes sur l'équilibre hydrostatique eau douce/eau salée.

Il s'agissait donc de localiser par sondages électriques, la position et l'angle du front salé entre Mboro et Lompoul, d'une part et de déterminer l'origine marine actuelle ou non des fortes.teneurs en sel de certaines eaux de la nappe de M'Boro.

Les sondages électriques ont été effectués le long des 10

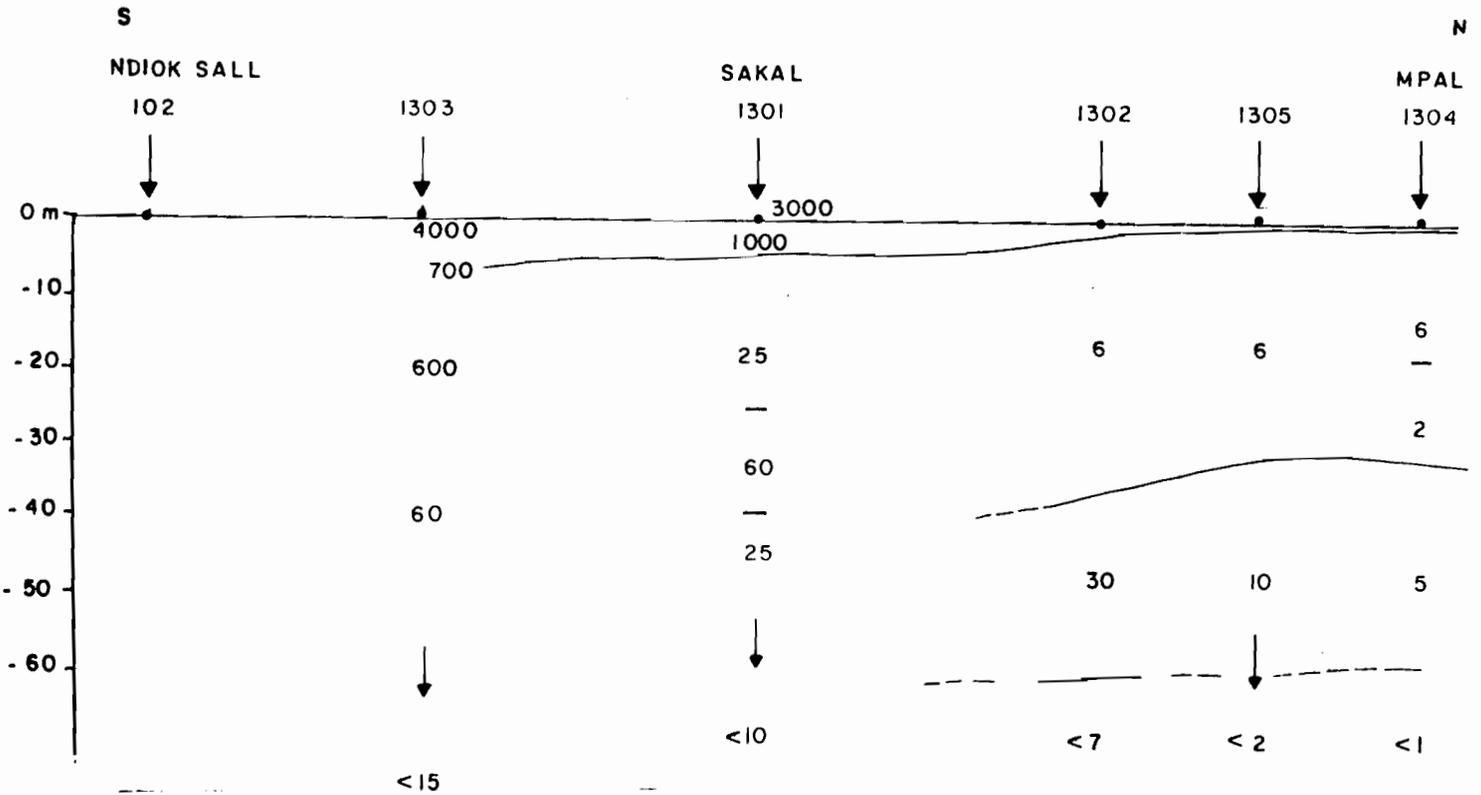


Fig.25- Coupe interprétative de sondages électriques entre N'Diok Sall et MPal, profil 1 (C.P.G.F, 1977).

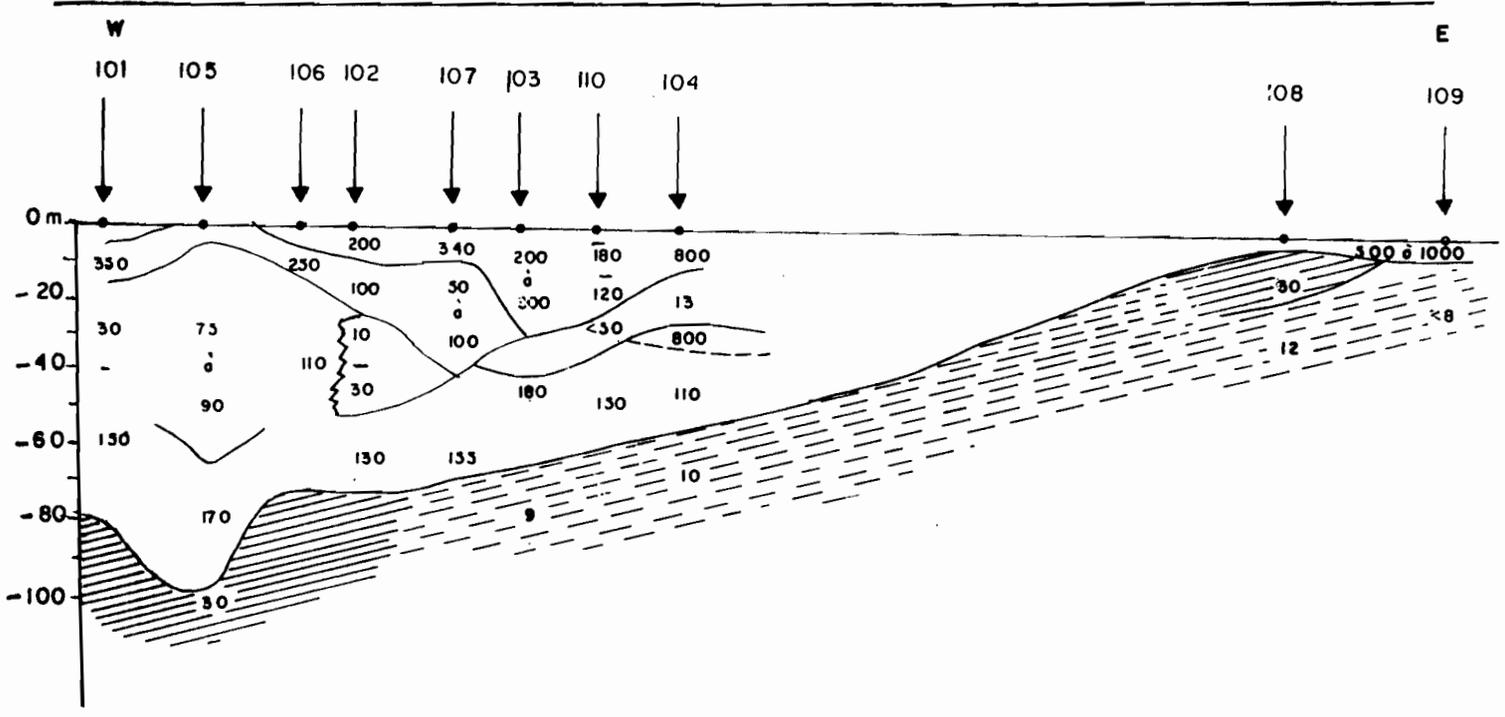


Fig.26- Coupe interprétative de sondages électriques, profil 2 (C.P.G.F, 1977).

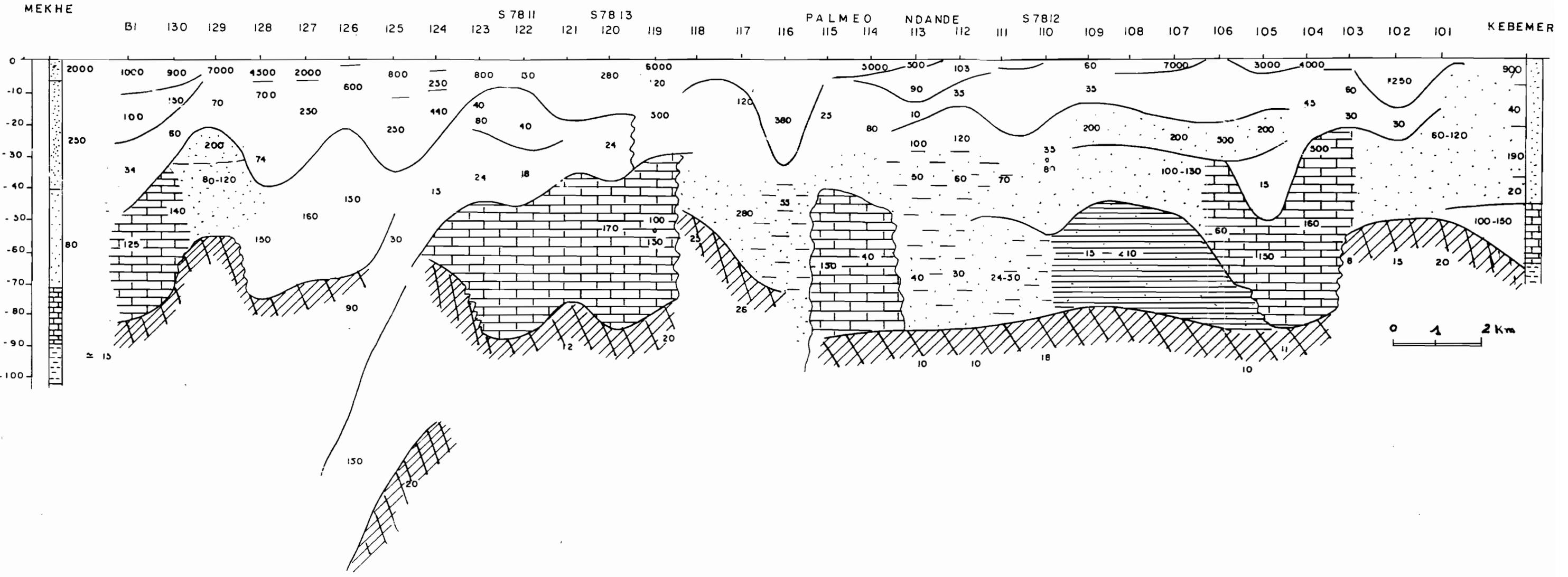


Fig.27 - Coupe interprétation de sondages électriques, profil Mékhé-Kébémér (C.P.G.F., 1977)

lignes de coupe, dont 7 étaient alignées quasiment en angle droit du rivage avec une séparation maximale d'électrodes (AB) de 200 à 400 m.

A l'exception de la coupe M'Boro P1 où l'eau salée a été détectée sous une fine nappe d'eau douce à 150 m à l'intérieur des terres, au niveau toutes les coupes, le front salé était limité à une bande côtière de 100 mètres de large et dans certains cas plus étroite (fig. 28).

Le front salé s'étendait donc à 150-250 mètres à l'intérieur des terres dans cette région.

Des sondages effectués plus en avant vers l'Est ont révélé quelques zones isolées de nappes très minces d'eau saumâtre au-dessus des nappes à eau douce dans les Niayes.

Ce phénomène signale la présence de salinités locales très élevées n'ayant aucun lien avec le front salé et interprété comme étant dues à des incursions géologiques récentes de la mer à la surface.

L'angle actuel du front salé est très raide, ce qui signifie qu'il est peu sensible aux faibles changements piézométriques.

2.2.4.- Par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) Février 1987

Dans le cadre du projet "Etude des ressources en eaux souterraines du Sénégal, le B.R.G.M. a eu à réaliser une campagne de sondages électriques dans le but de mieux localiser d'éventuels biseaux salés d'une part et d'autre part d'implanter au mieux des sondages mécaniques de reconnaissance

Huit (8) profils dont 4 dans le secteur de Louga et 4 autres dans le secteur Noto-Mboro, ont été réalisés avec des longueurs de séparation d'électrodes (AB) de 800 à 1000 mètres.

a) Secteur de Louga

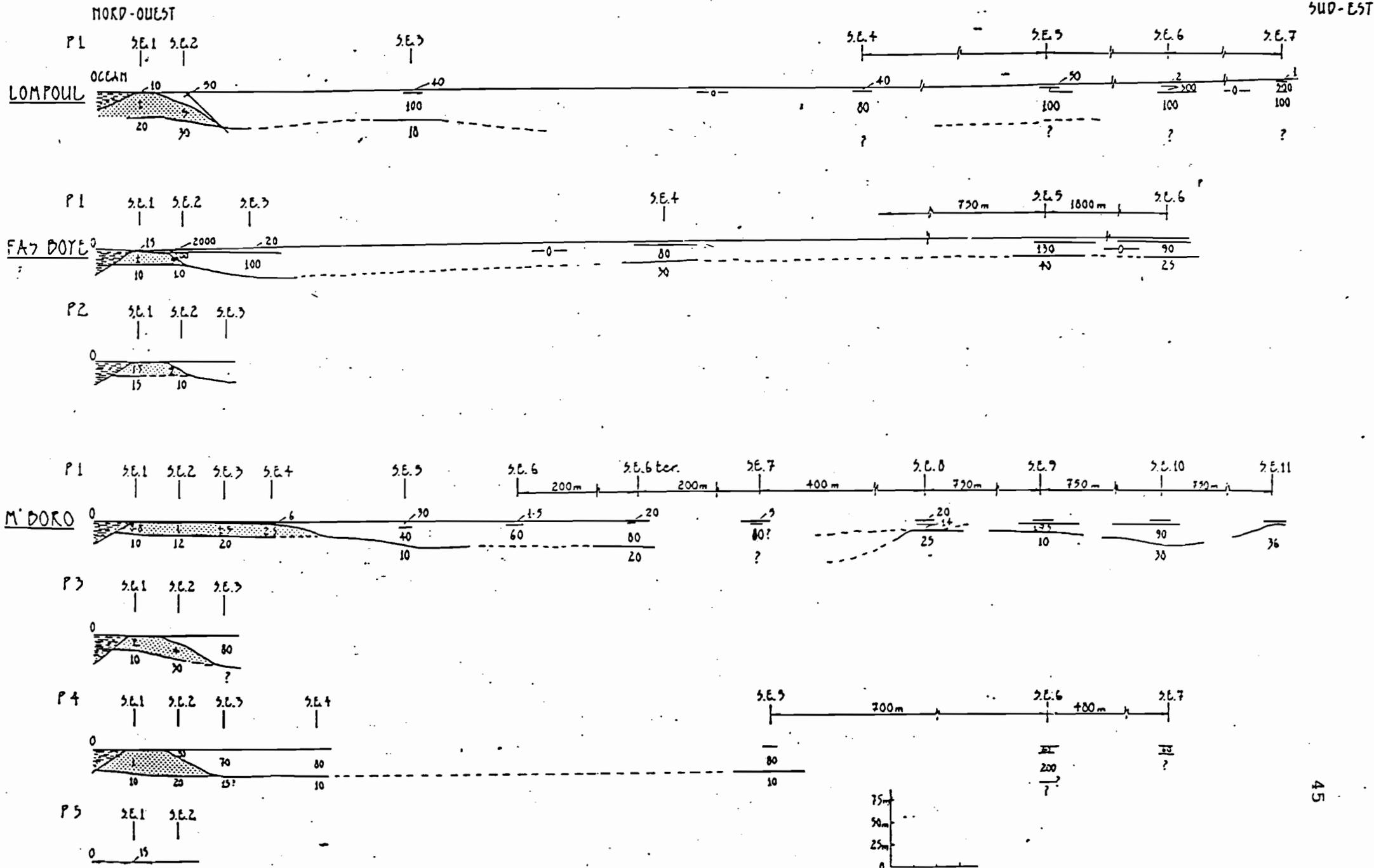
Les sondages électriques effectués dans ce secteur sont disposés suivant 4 profils de direction Est-Ouest (fig. 24).

Les résultats obtenus sont présentés en 4 coupes interprétatives représentant les divers horizons électriques (fig. 29).

L'examen des coupes interprétatives, montre de haut en bas:

- sables secs quaternaires : > 200 ohm.m
- sables aquifères quaternaires : 80 à 200 ohm.m
- formations argilo-sableuses : < 40-80 ohm.m.

Fig.28- Coupes interprétatives des sondages électriques, profil Lompoul-MBoro par Philippe Lessage (juillet 1983).



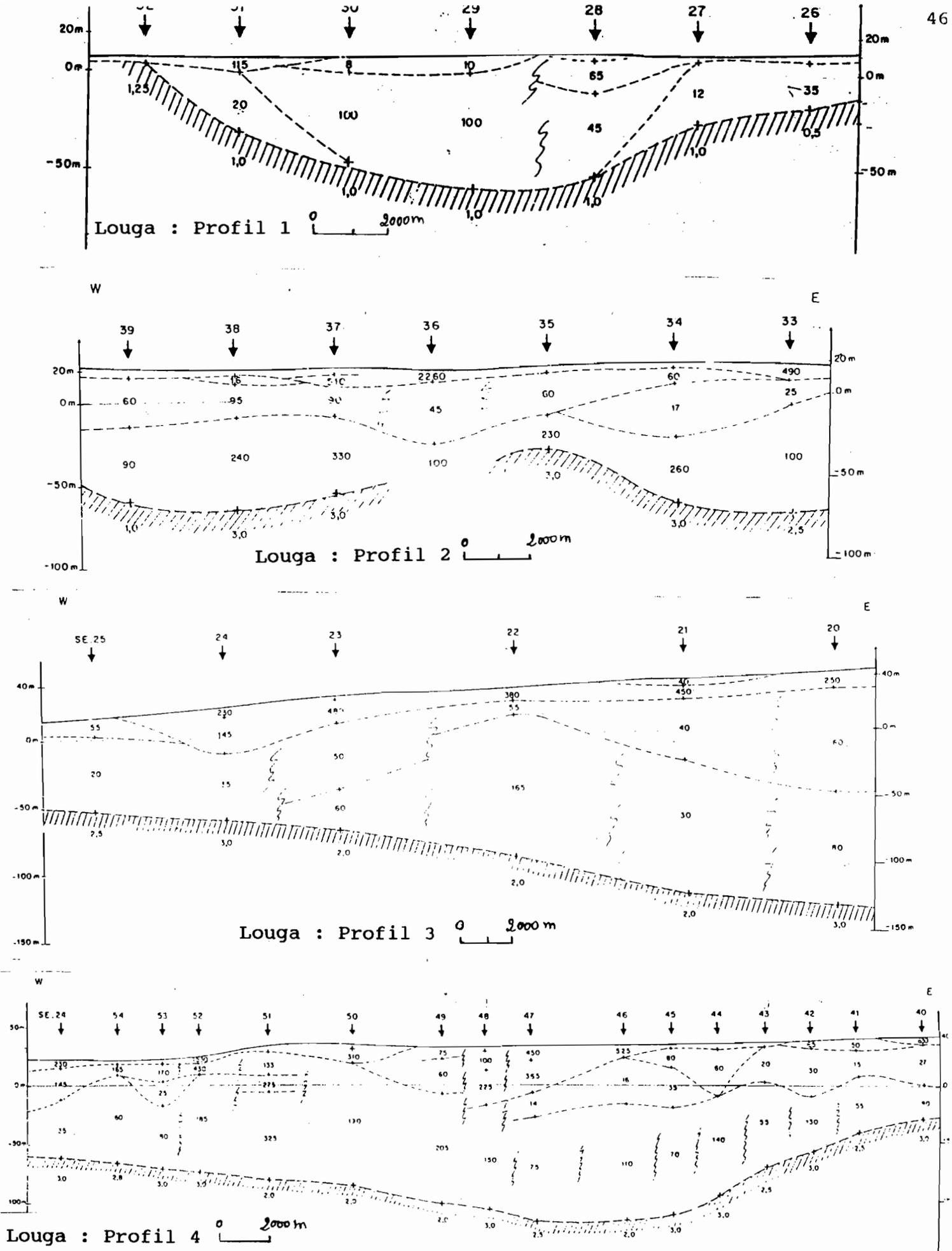


Fig.29- Coupe interprétative de sondages électriques, secteur de Louga (B.R.G.M, 1987).

- un niveau très conducteur : 1 à 3 ohm.m. Il s'agit sans aucune doute d'invasion d'eau salée en profondeur dans les formations géologiques du secondaire et de la base du tertiaire. Par ailleurs, la côte de son toit s'enfonce de plus en plus vers le sud.

Le sondage 36 du profil 2 révèle une zone où le niveau salé n'a été pas atteint. L'observation de la courbe de sondage montre, contrairement aux autres, une phase de remontée des résistivités apparentes à mesure que la distance AB/2 augmente (Annexes 1-3a, b, c, d). Ce sont d'ailleurs les résultats de ces sondages qui ont guidé l'implantation du forage positif de Konal Diaw en juin 1987 : Profondeur 83 m, niveau crépiné 56 à 75 m, niveau statique 13 m/sol, taux NaCl 43,9 mg/l.

b) Secteur Noto-Mboro

Les sondages réalisés dans ce secteur sont disposés suivant trois profils parallèles à la côte et d'un profil perpendiculaire au littoral. Les résultats sont présentés sous forme de coupes interprétatives (fig. 30).

* - Sur le profil 1, cinq horizons électriques ont été définis:

- en surface, un marqueur électrique très résistant (plus de 1000 ohm.m), caractéristique des sables éoliens secs ;

- un niveau de 200-300 ohm.m localisé sur les SE.71, 72, 73, indice probable d'une petite nappe d'eau douce

- un horizon plus épais de plus de 30-50 m avec une résistance moyenne de 35 ohm.m qui représente des niveaux argileux ;

- une couche de 10 ohm.m (SE.10, 19, 68 et 74) correspondant à des marnes reposant sur un niveau calcaire de 50 ohm.m de résistivité.

Conclusion

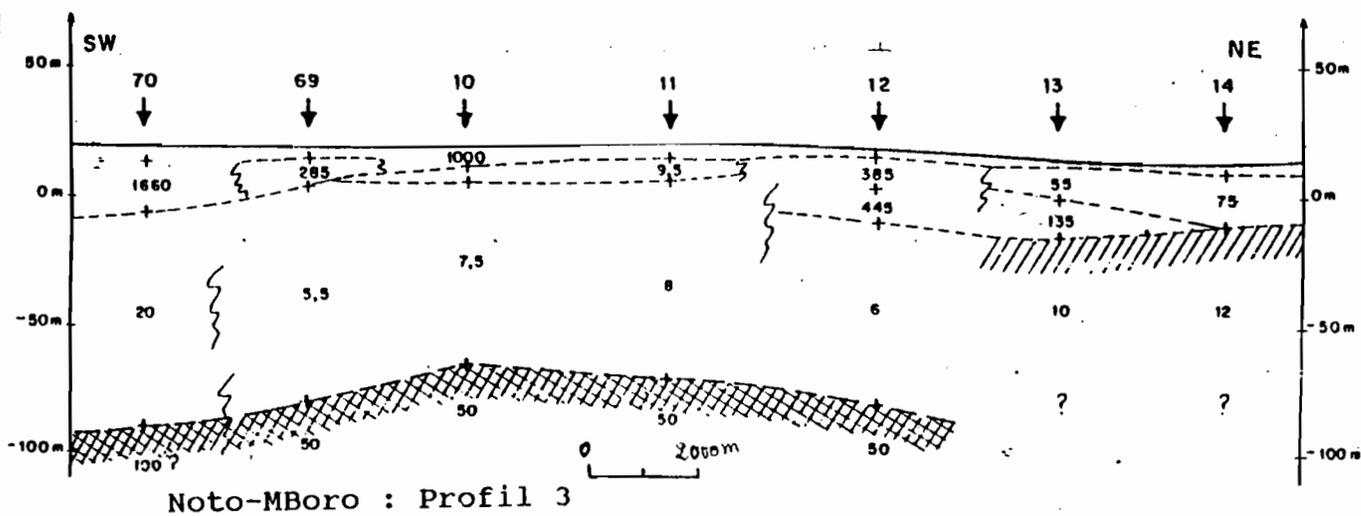
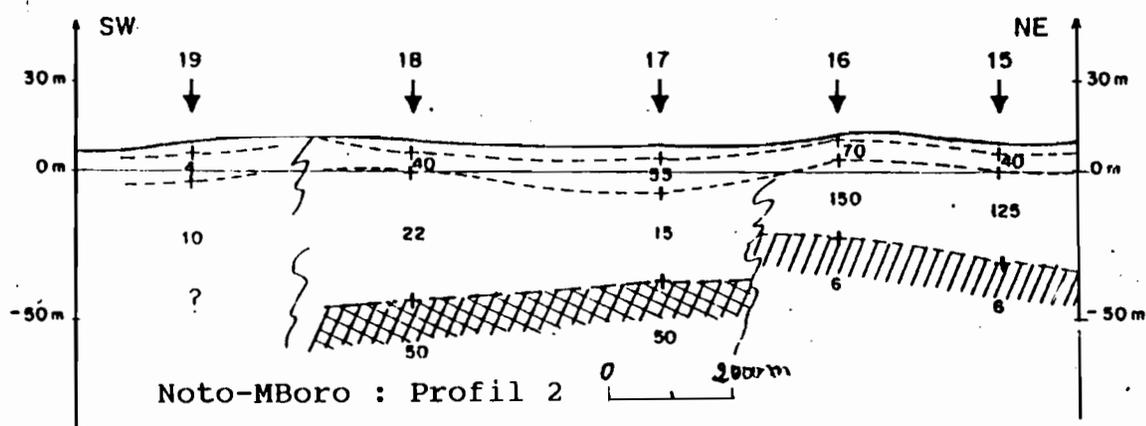
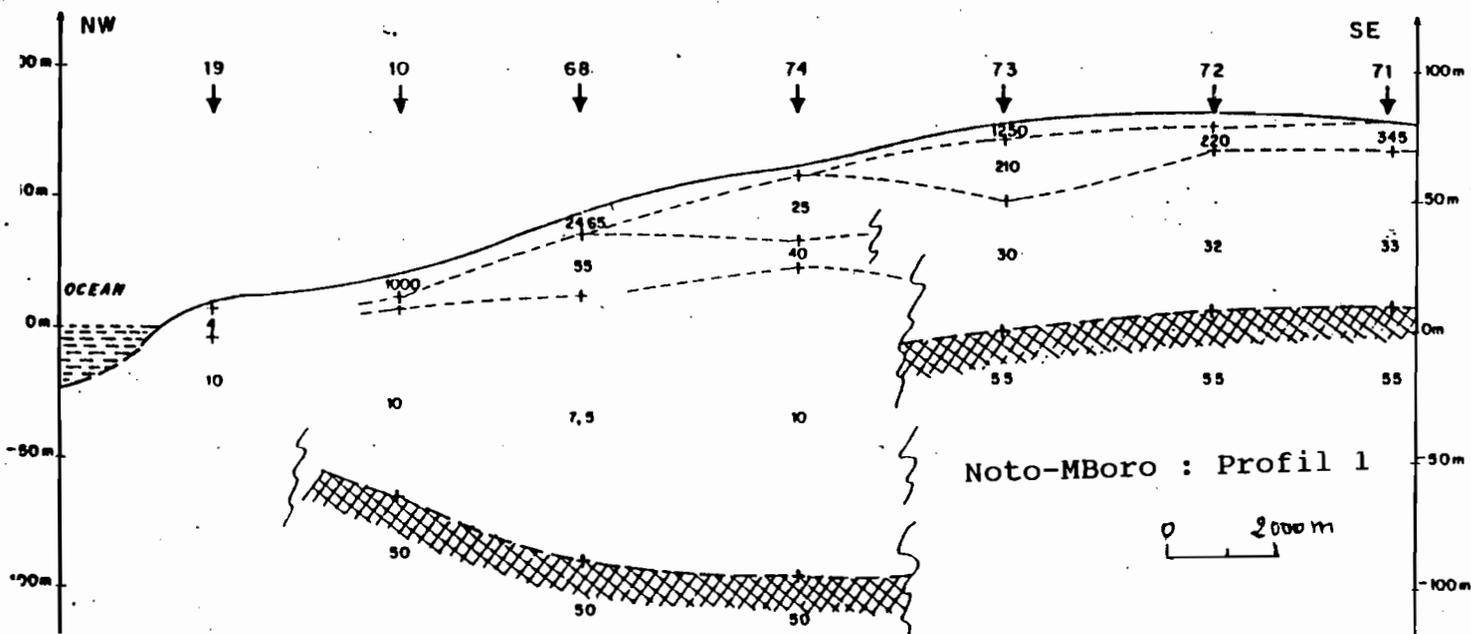
Les sondages mécaniques ont permis dans l'ensemble du secteur d'étude à l'exception d'une bande côtière allant de Fass Boye à Rao au Nord, de connaître la profondeur et la nature du substratum de la nappe ainsi que celles de certaines couches sus-jacentes.

Les études géophysiques réalisées ont permis de faire certains constats:

- L'étude menée par Philippe Lessage entre Lompoul et Mboro a été réalisée avec des longueurs de séparation des électrodes AB faibles. Les profondeurs d'investigation atteintes dépassent rarement 35 m. Ce phénomène empêche donc d'obtenir des informations sur le substratum de l'aquifère, sur la nature des couches sus-jacentes.

Selon la théorie de Ghyben et Herzberg, le front salé évolue en pente en direction du continent. Les faibles

Fig.30- Coupe interprétative de sondages électriques, secteur Noto-Mboro (B.R.G.M,1987).



profondeurs d'investigations peuvent permettre de détecter le biseau salé à proximité du rivage mais non, quand on progresse vers l'intérieur les terres.

- L'étude réalisée par le B.R.G.M. n'a intéressé cette bande littorale qu'au niveau de sa partie nord entre Potou et Rao.

Cette étude permet de suivre l'évolution en profondeur de l'invasion salée, elle donne également des informations sur la nature des couches sus-jacentes. Contrairement au secteur de Louga, à Mboro l'électrique n'a pas mis en exergue la présence de niveaux salés en profondeur mais a bien spécifié la succession des couches.

Si les travaux antérieurs ont fournis des informations précieuses sur une bonne partie du secteur étudié, elles n'ont pas permis de déterminer la profondeur du substratum, la nature des couches sus-jacentes ainsi que l'évolution du biseau salé en ce qui concerne le côtier allant de Fass Boye à Rao au Nord.

Ainsi une campagne géophysique de complément d'informations devenait impérative. Deux techniques ont été utilisées : l'électrique et la sismique réfraction.

CHAPITRE 3 - CAMPAGNE DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE

3.1.- Campagne de sondages électriques

3.1.1.- Plan de campagne

Les sondages ont été répartis d'une part en continuité avec les sondages réalisés par le B.R.G.M. le long de la côte, d'autre part suivant des positions plus avancées dans le continent (fig. 24).

Les objectifs visés étaient les suivants :

- obtenir le maximum de renseignements possibles sur la profondeur du toit du substratum et sur la nature des couches sus-jacentes dans les secteurs Centre-Ouest et Nord ;

- obtenir des renseignements sur l'évolution actuelle des invasions salées le long de la côte et à l'intérieur des terres.

La campagne s'est déroulée juste après la saison des pluies en deux missions :

- la première mission effectuée en fin octobre 1993 a concerné le secteur Nord et une partie du secteur central,

- la deuxième mission qui a intéressé le centre-Sud et le Sud et s'est déroulée en janvier 1994.

3.1.2.- Interprétation des sondages électriques

Les sondages ont été réalisés avec des longueurs de réparation des électrodes AB de 700 à 800 mètres.

Les bas-fond étaient particulièrement visés pour la réalisation des sondages en vue de gagner en profondeur en éliminant au maximum les sables secs de surface.

La mesure de la profondeur du niveau de l'eau dans les puits les plus proches du sondage a toujours été effectuée

Pour mieux appréhender les problèmes posés, trois secteurs d'étude ont été individualisés : les secteurs Nord, Centre et Sud.

3.1.3-1.- Secteur Nord

Cinq (5) sondages électriques en continuité avec ceux du B.R.G.M. ont été réalisés dans ce secteur (fig. 24).

Les courbes de ces sondages électriques sont fournies dans l'annexe 1-4a, et la fig.31 donnant seulement deux exemples pris à Tioune et N'Diambou.

* S.E. LITE

On distingue :

- un niveau très conducteur en surface de 3 à 6 ohm.m avec une épaisseur de 22 m correspondant à des sables fins à eau salée. D'ailleurs, des cristaux de sels très fins sont visibles par endroit ;

- des niveaux plus profonds avec des résistivités de 52 ohm.m. qui représentent des sables à eau douce entre deux niveaux à eau salée ;

- des sables à eau très salée (1 ohm.m) à 56 m de profondeur.

* S.E TIOUNE

La courbe de sondage est ondulée. On distingue un ensemble de couches de très faibles résistivités dans les 14 premiers mètres, une couche résistance (138 ohm.m) et une dernière très conductrice (1 ohm.m) à 24 m de profondeur.

Les couches superficielles seraient ici la continuité des niveaux salés rencontrés au sondage de LITE. Une tranche de sables à eau douce de 10 m d'épaisseur s'intercale entre le niveau superficiel et la nappe salée (fig. 31).

* S.E POTOU 1

- En surface, des sables dunaires suivis d'un niveau argileux qui repose sur des sables aquifères à eau douce de faible épaisseur (6 m) avec une résistivité de 80 ohm.m.

- On rencontre l'aquifère salé (0,3 ohm.m) à 16 m de profondeur (An1-4a).

* S.E BADEM 1

Le sondage se situe plus à l'Est, dans le centre du secteur.

La géophysique montre effectivement une première couche résistante représentant des sables secs (630 ohm.m) avec une épaisseur de 9 m ; ensuite, une couche de 332 ohm.m (50 m d'épaisseur) qui correspondrait à des sables aquifères à eau douce ; la dernière couche très conductrice (2 ohm.m) représenterait l'aquifère salé (An1-4a).

* S.E NDIAMBOU 1

En surface, on rencontre les sables argileux (42 à 66 ohm.m) épais de 14 m. Ensuite les sables à eau douce (139 ohm.m) suivis des sables argileux aquifères. La dernière couche très conductrice (2,2 ohm.m) est rencontrée à 100 m de profondeur et correspond à une nappe à eau salée (fig. 31).

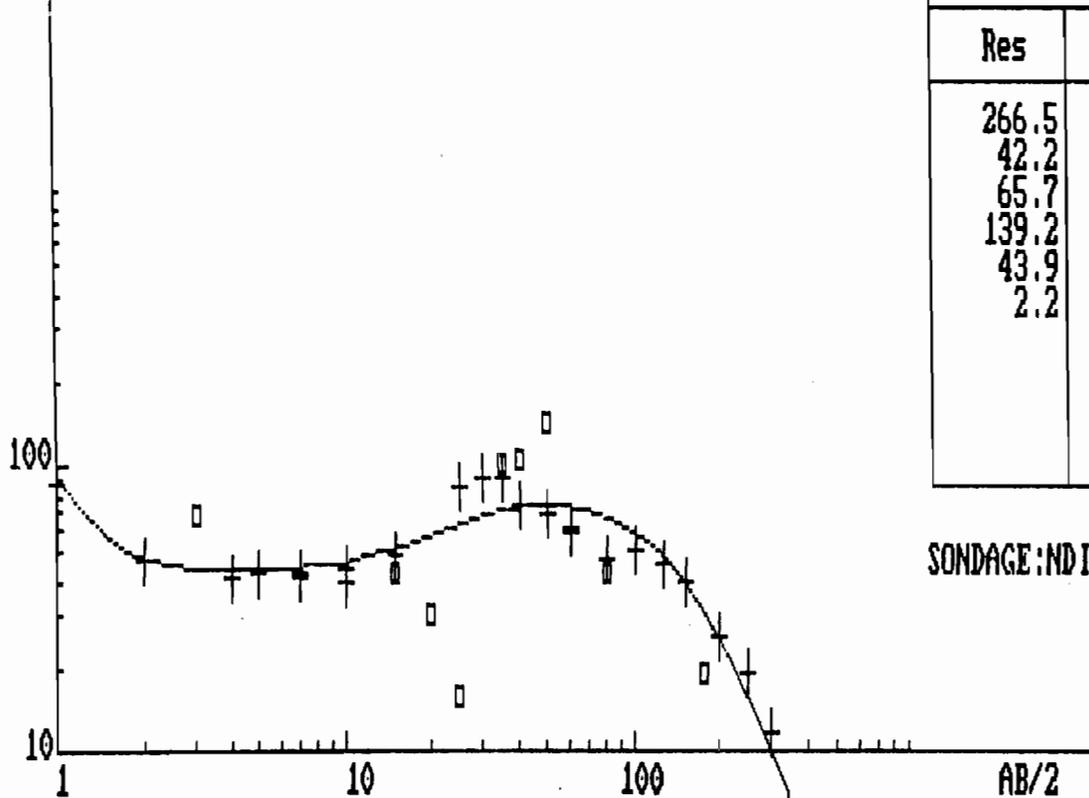
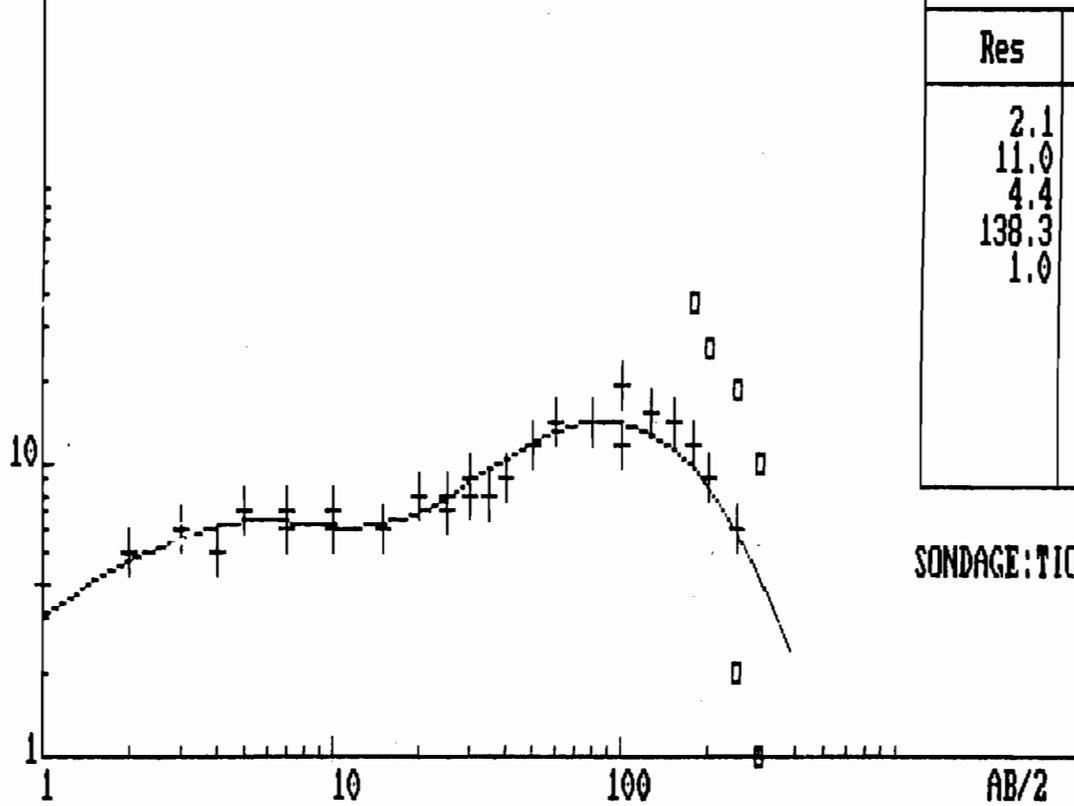


Fig.31- Courbes de sondages électriques, secteur Nord (Diouf.S, Janvier 1993)

Conclusion

La corrélation entre la courbe expérimentale et la courbe modélisée est bonne dans l'ensemble.

La tendance à la décroissance des points (3 à 0.3 Ohm.m) pour les grandes longueurs de lignes AB atteste de la présence sur l'ensemble du secteur de l'effet de l'invasion saline au niveau des sables Quaternaires.

3.1.3-2.- Secteur centre

Onze (11) sondages ont été effectués dans la partie centrale et le long de la côte en particulier. Il s'agit des sondages:

. Bendiouga 1, Thiambène (Fig. 32) ; Longor 1, Dao 1, Toro beye 1, Longor 1, Khonq Yoye, 2N-E Fote (Annexel-4b),

. 4N-E Fote, Bouléle 1 (fig.33).

* Dans la partie centrale du secteur, tous les sondages à l'exception de celui de Thiambène, montrent de haut en bas la succession suivante:

- une première couche résistante de sables secs suivie de niveaux argileux (10 à 14 ohm.m) ou sables argileux (46 à 62 ohm.m),

- des sables à eau douce (80 à 202 ohm.m) d'épaisseur variable pouvant atteindre 89 m à Bendiouga 1,

- une dernière couche, très conductrice (2 à 3 ohm.m) est atteinte à des profondeurs supérieures à 80 m, et qui correspond à un niveau salé.

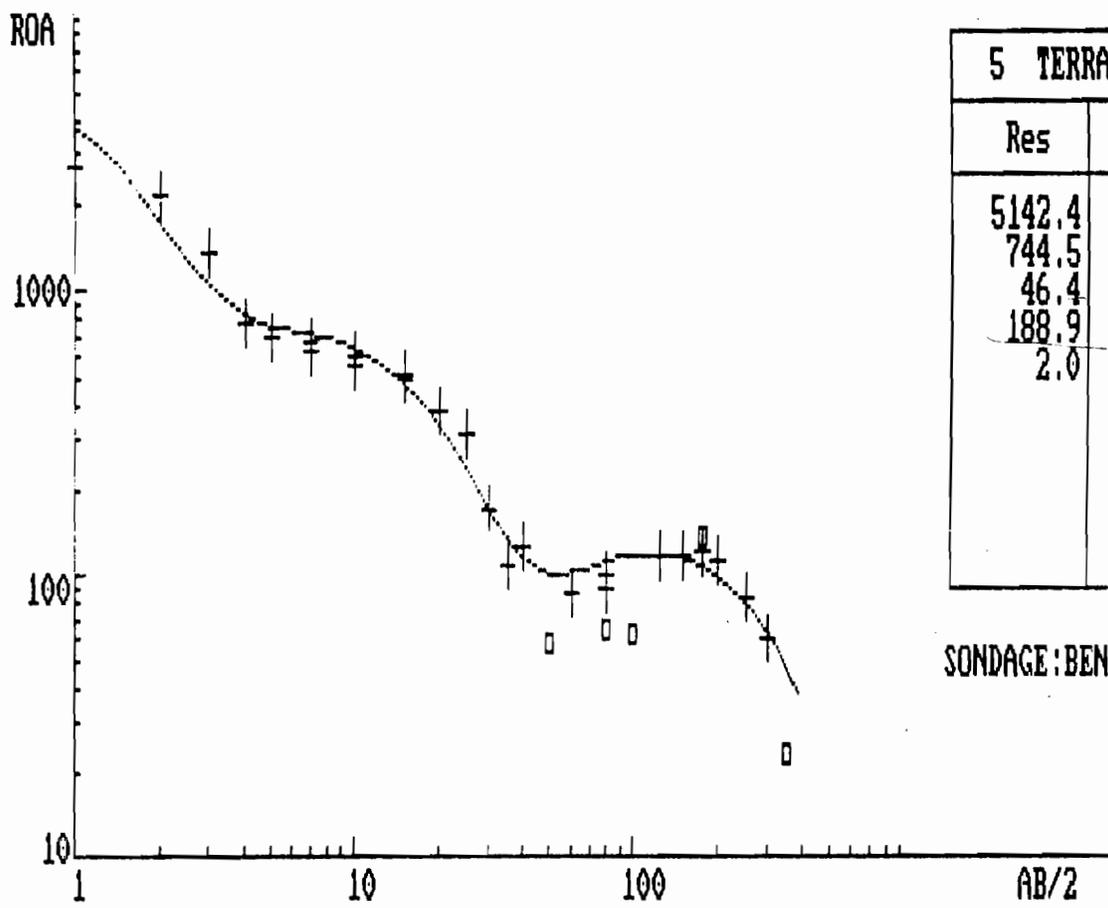
A Thiambène, les niveaux argileux superficiels disparaissent et jusqu'à 100 m de profondeur, l'électrique n'a pas détecté des niveaux salés.

* Les sondages côtiers réalisés à Fôte et environs, à Khonq Yoye, Diourmel et Boulel, montrent (fig. 33), (An1-4c) :

- en surface des sables secs très résistants et de faible épaisseur,

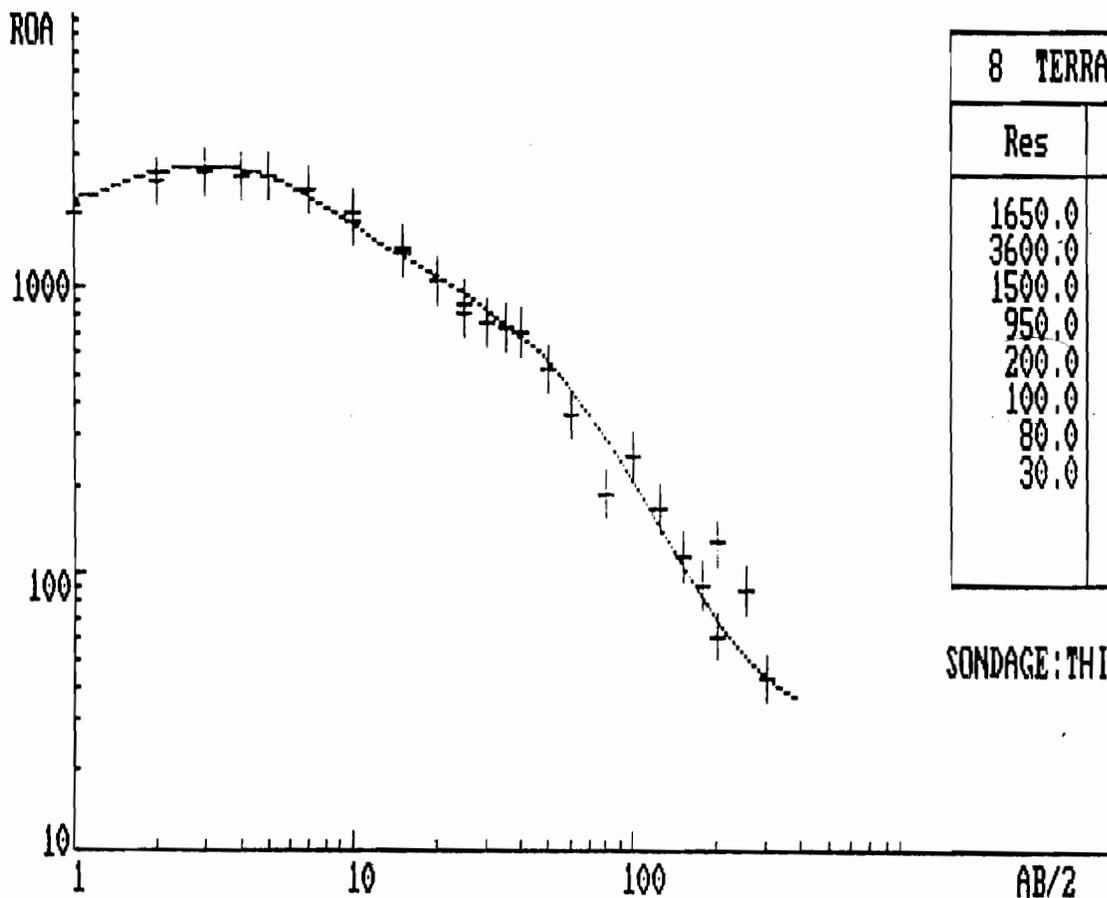
- un niveau d'argiles ou de sables argileux (10 à 53 ohm.m) de faible épaisseur sauf au sondage 2 km N-E Fote où elle atteint 23 m.

- des sables aquifères (88 à 196 ohm.m) très épais (76 à 109 m) reposant sur des sables à eau salée (2 à 3 ohm.m) dont le toit est assez profond (82 à 130 m) malgré la proximité du rivage.



5 TERRAINS	
Res	Ep
5142.4	0.7
744.5	9.4
46.4	16.0
188.9	89.2
2.0	

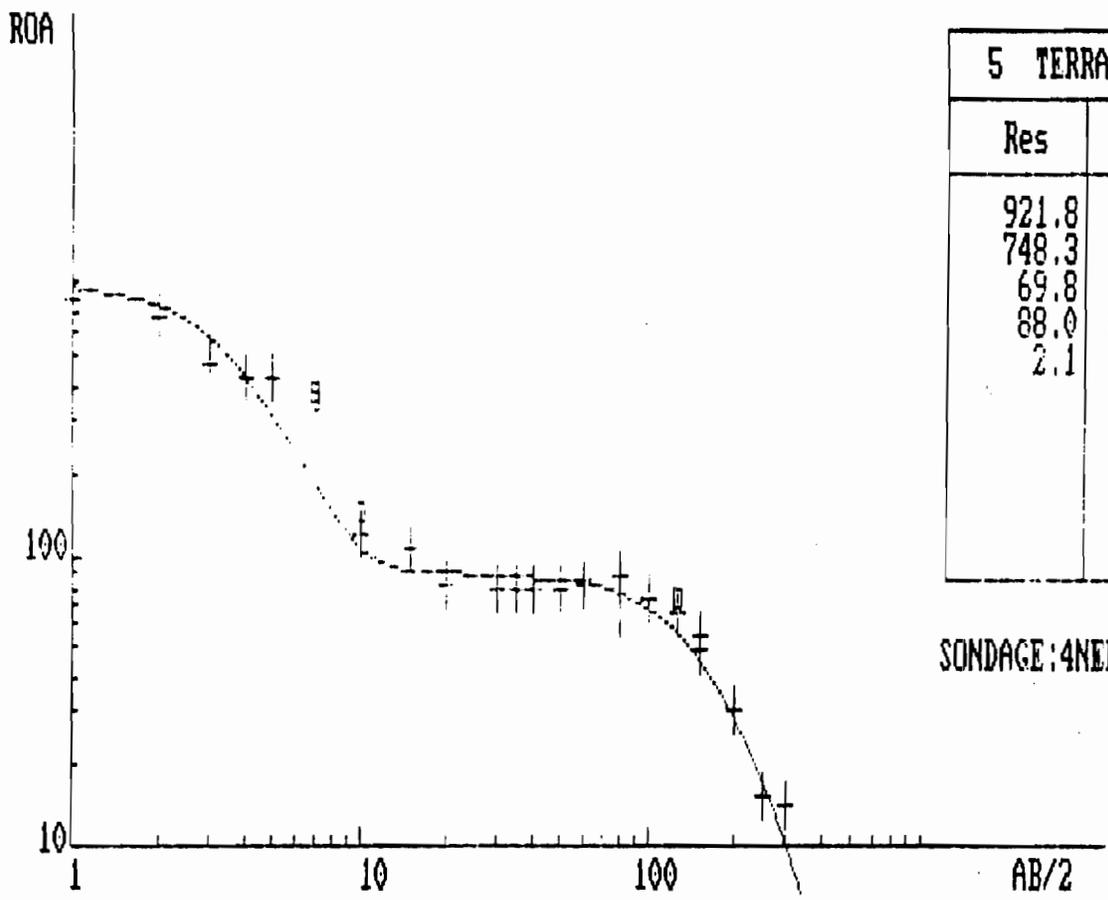
SONDAGE : BENDIOU1



8 TERRAINS	
Res	Ep
1650.0	0.5
3600.0	2.0
1500.0	3.5
950.0	20.0
200.0	40.0
100.0	24.0
80.0	10.0
30.0	

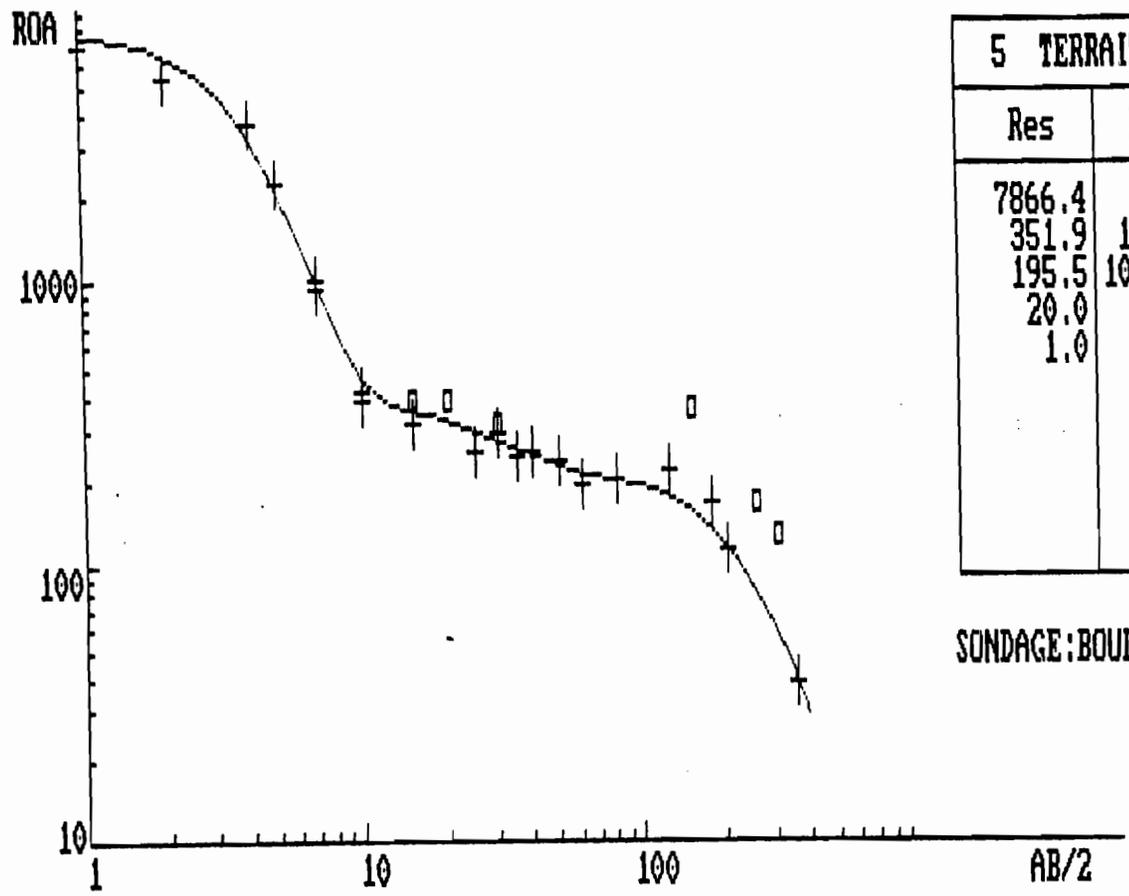
SONDAGE : THIAMBEN

Fig.32- Courbes de sondages électriques, secteur centre (Diouf. S, Janvier 1993).



5 TERRAINS	
Res	Ep
921.8	0.9
748.3	1.3
69.8	1.6
88.0	80.0
2.1	

SONDAGE: 4NEFOTE



5 TERRAINS	
Res	Ep
7866.4	1.9
351.9	12.6
195.5	109.2
20.0	5.0
1.0	

SONDAGE: BOULEL1

Fig.33- Courbes de sondages électriques, secteur côtier (Diouf. S, Janvier 1993).

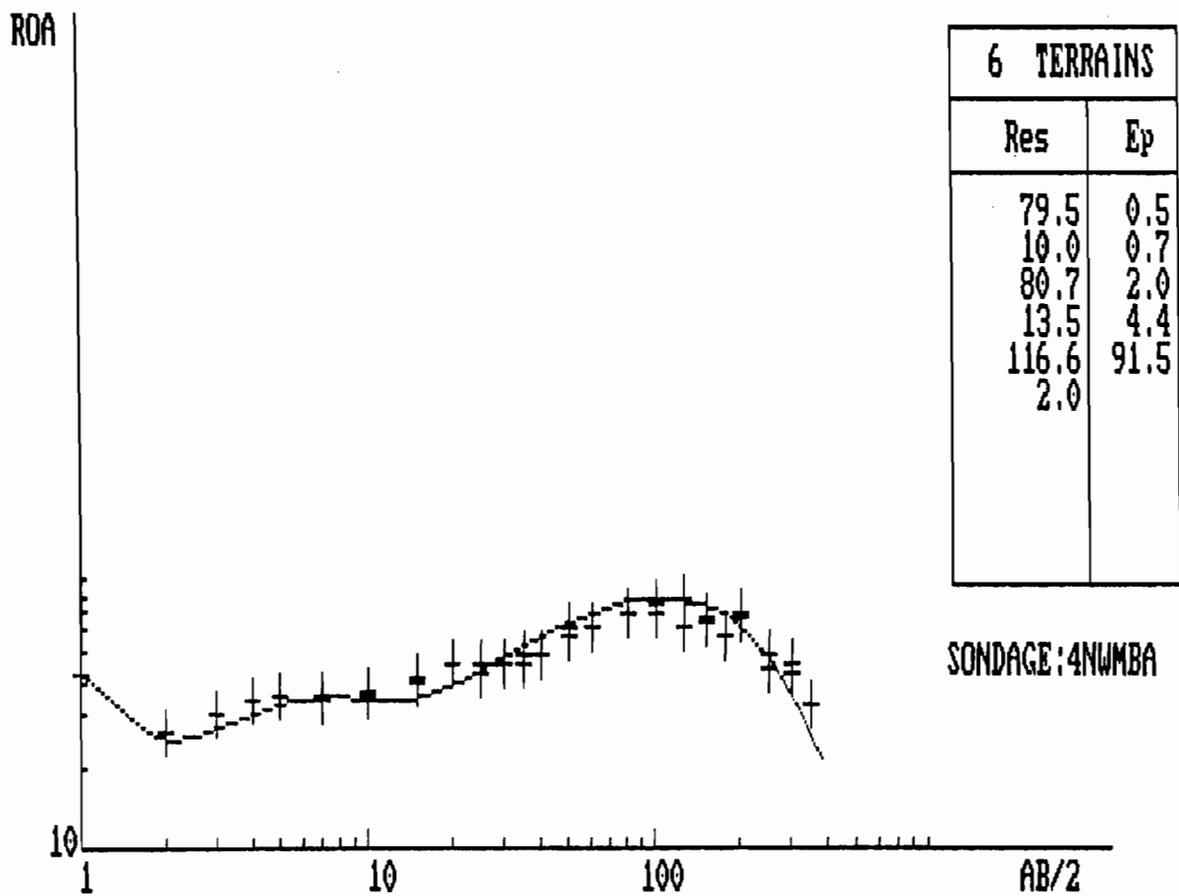
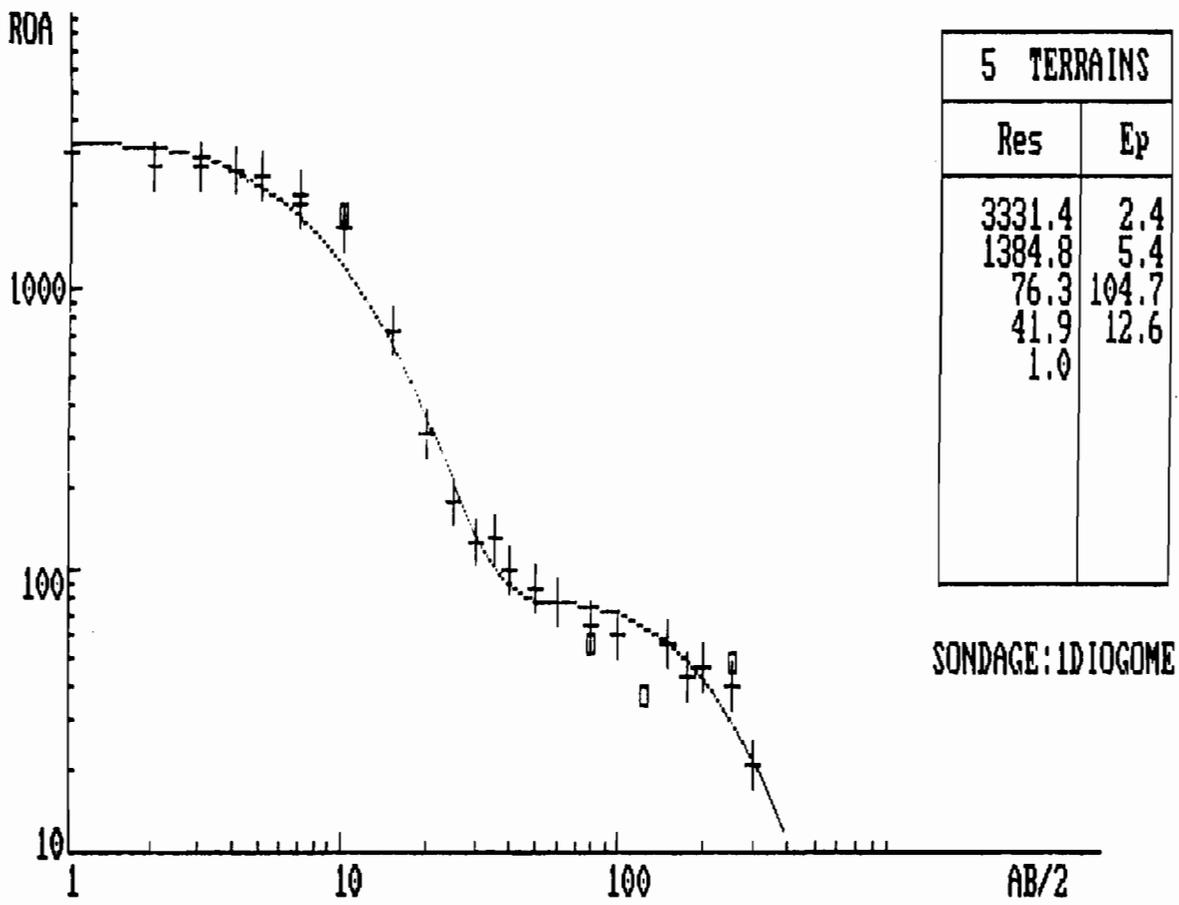


Fig.34a- Courbes de sondages électriques, secteur Sud

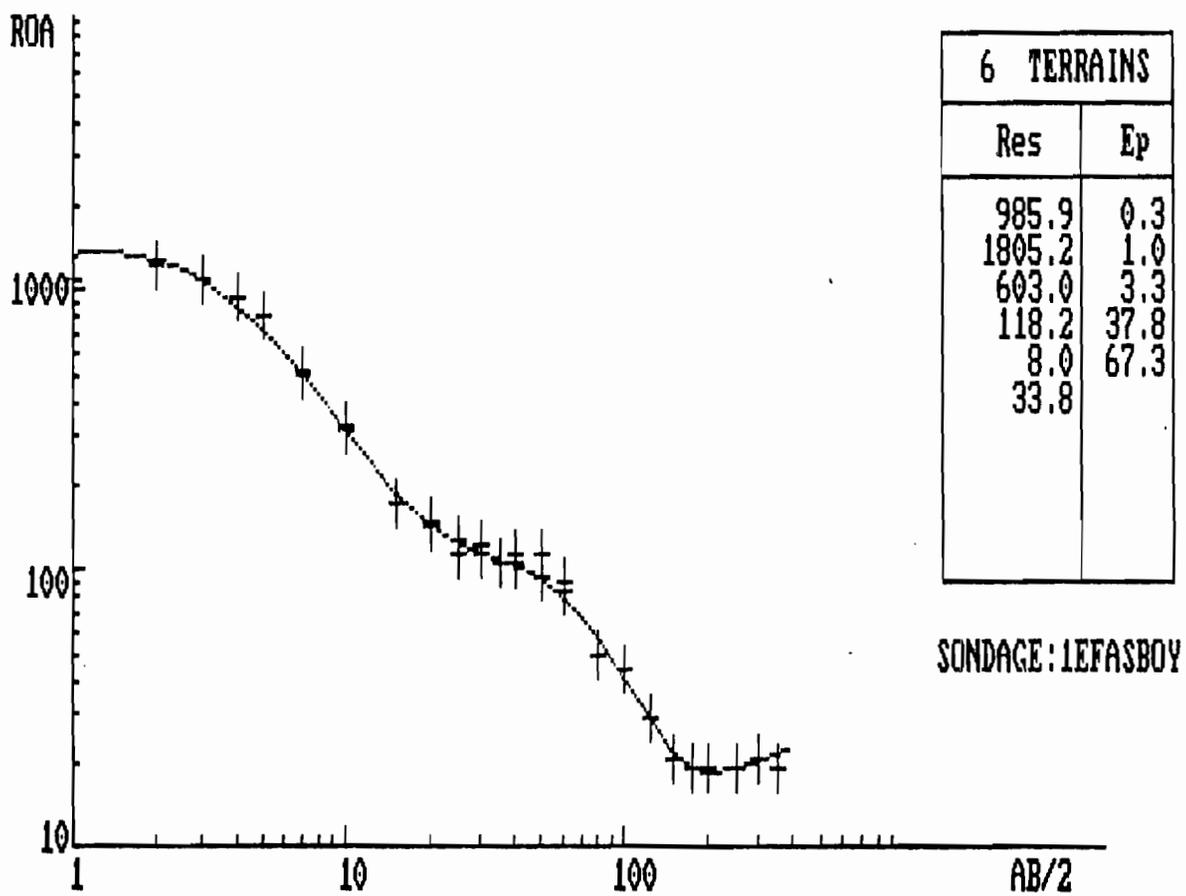
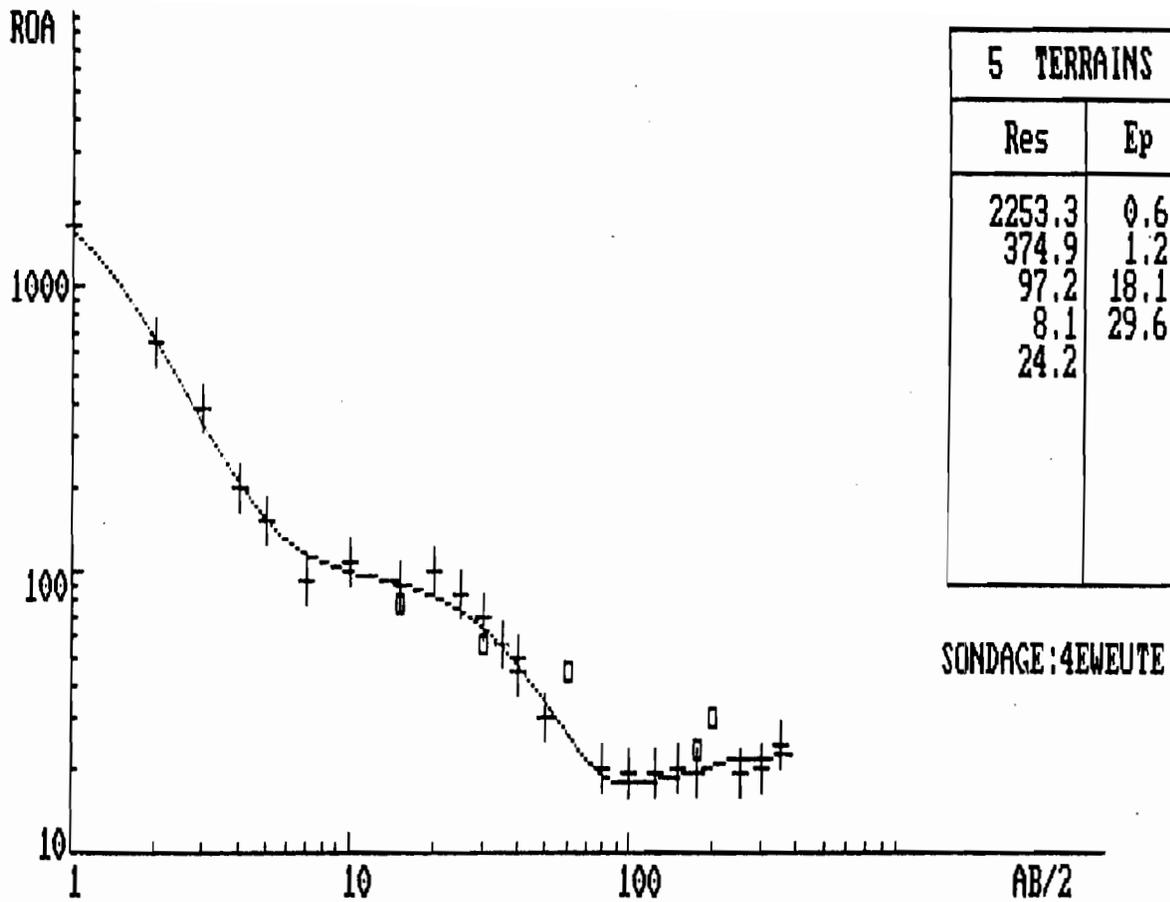


Fig.34b- Courbes de sondages électriques, secteur Sud

Conclusion

Bonne corrélation entre courbes expérimentales et courbes modélisées.

La très grande profondeur du toit de la nappe salée, malgré la proximité de la côte maritime, montre une absence d'invasion marine récente par le biais du biseau salé dans ce secteur.

L'ensemble des sondages, montre la présence d'une importante nappe d'eau douce dans le secteur.

3.1.3-3.- Secteur sud

Douze (12) sondages ont été effectués le long de la côte d'une part en continuité avec les sondages B.R.G.M. et d'autre part dans la même zone étudiée par Philippe Lessage (fig. 34a et b).

L'analyse des sondages fait ressortir deux parties :

- le Nord du secteur matérialisé par les sondages, 1 Diogo.me et 4N-E M'Ba, où l'on rencontre les mêmes terrains que dans le secteur précédemment étudié, avec une importante nappe d'eau douce surmontant un niveau salé à une profondeur de plus de 100 m.

- le Sud où l'on observe les mêmes couches que précédemment, à l'exception des sables à eau salée qui sont relayés ici par un niveau plus résistant (7 à 12 ohm.m) correspondant aux marnes paléocènes très épaisses (30 à 75 m). Ces marnes reposent sur une couche de résistivité plus élevée (24 à 45 ohm.m) identifiée à des calcaires paléocènes (fig. 35).

Conclusion

On observe une bonne corrélation entre courbes expérimentales et courbes modélisées.

La tendance à la décroissance des résistivités avec la profondeur observée aux sondages réalisés au Nord, au centre et même au sud (Diogo et 4N-E M'Ba) pour les grandes longueurs de ligne AB, s'estompe entre Fass Boy et Weuta. Dans cette zone on observe une phase ascendante dans l'ensemble des courbes de sondages qui illustre l'apparition des calcaires paléocènes sous les épaisses couches marneuses de la même période.

3.1.4.- Les coupes interprétatives de sondages électriques

Dans ce paragraphe, on essayera de lier les résultats de la géophysique à l'hydrogéologie locale ; les coupes de sondages électriques, vont permettre de corréler les différents niveaux repères du toit du substratum ou du toit des invasions salées des aquifères des sables quaternaires.

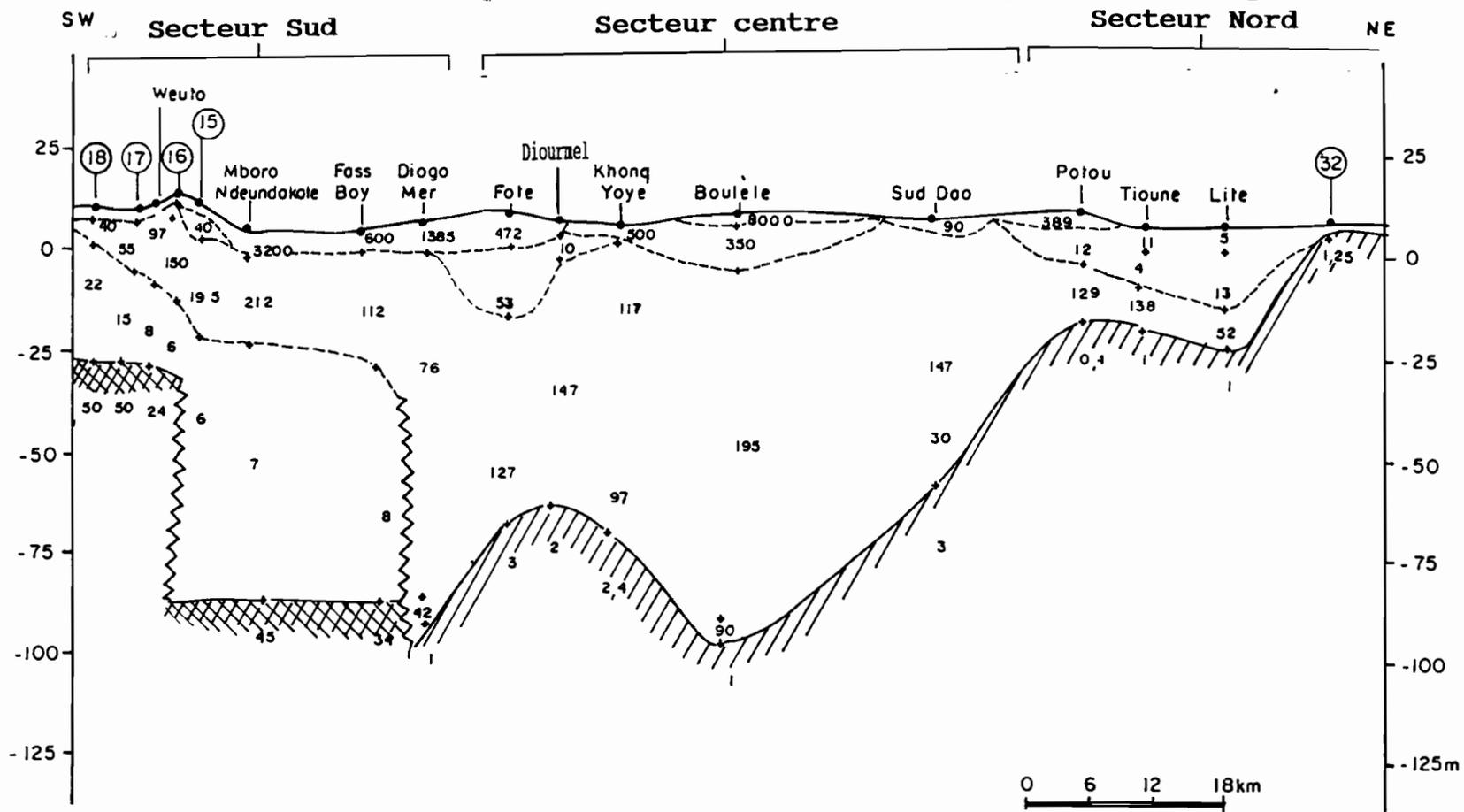


Fig.35- Coupe interprétative de sondages électriques, secteur côtier (Diouf. S, Janvier 1993).

3.1.4-1.- Secteur Nord

La coupe interprétative (fig. 35) montre des niveaux superficiels très conducteurs au-dessus de l'aquifère à eau douce qui surmonte sur la nappe salée de faible profondeur.

En effet, la zone des Niayes au Nord de Potou fait partie du delta du fleuve Sénégal. L'eau de mer durant la saison sèche pénètre au moins jusqu'à 200 m en amont dans le fleuve.

Lors de la crue, une partie de cette eau salée va être refoulée dans les nombreux défluent du delta, s'y évaporer et laisser des dépôts de cristaux de sels visibles par endroit.

Du nord au Sud, on note un enfoncement progressif du toit de la nappe salée qui passe de 5 m à plus 83 m de profondeur au sud de Potou (fig 36 profil 2)

Le profil de résistivité (fig. 35), confirme cette tendance. De la côte vers l'intérieur des terres, les coupes électriques (fig. 36 profil 3 et 4) montrent une évolution du front salé en pente forte qui s'amorce rapidement avant de prendre une position subhorizontale. Cette position du front est difficilement explicable par les théories sur le biseau salé (Ghyben, 1888 et Herzberg, 1901 ; Hubbert, 1940).

Concept théorique de la surface de séparation eau douce/eau salée (BORD NA MONA, 1983)

Lorsqu'une couche aquifère rencontre la mer, l'eau douce de la couche aquifère est en continuité hydraulique avec l'eau de mer. La mer étant un peu plus dense que l'eau souterraine (environ 1,025 comparé à 1,000), les deux eaux tendent à garder leurs identités et la surface qui les sépare est appelée front salé.

En pratique, cette surface de séparation sera une zone de diffusion ou de mélange qui peut varier en épaisseur de quelques mètres à plus de 100 mètres selon divers facteurs comme par exemple des variations de marée, l'impact du pompage de l'eau souterraine et les fluctuations saisonnières du niveau de l'eau.

Dans les conditions naturelles, ce front salé restera relativement statique à part quelques légers mouvements causés par les marées, les changements de saisons ou les mouvements à long terme du niveau de l'eau. La position du front peut être modifiée cependant de façon considérable par l'extraction d'eau souterraine de la région côtière aquifère.

A l'état naturel, une couche aquifère côtière décharge de l'eau dans la mer près du niveau de la mer qui marque le sommet du front (fig. 37a).

A partir du niveau de la mer, le front descend en pente vers l'intérieur des terres en venant couper le toit du substratum en un point M (fig. 37c). C'est ainsi qu'une lame d'eau de mer plus dense est sous l'eau douce au-dessous de la

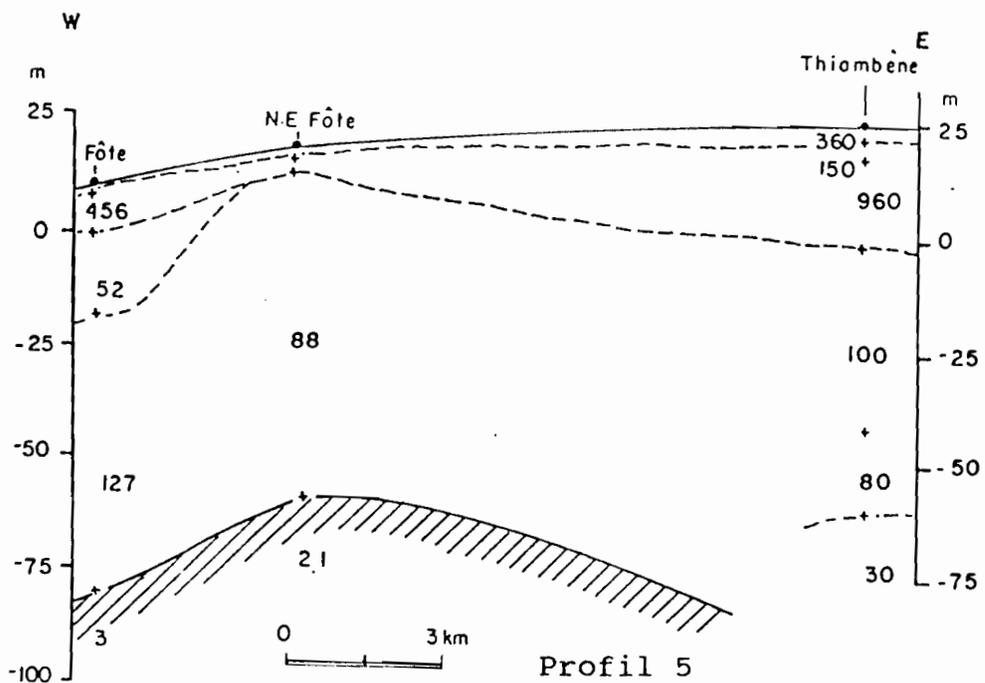
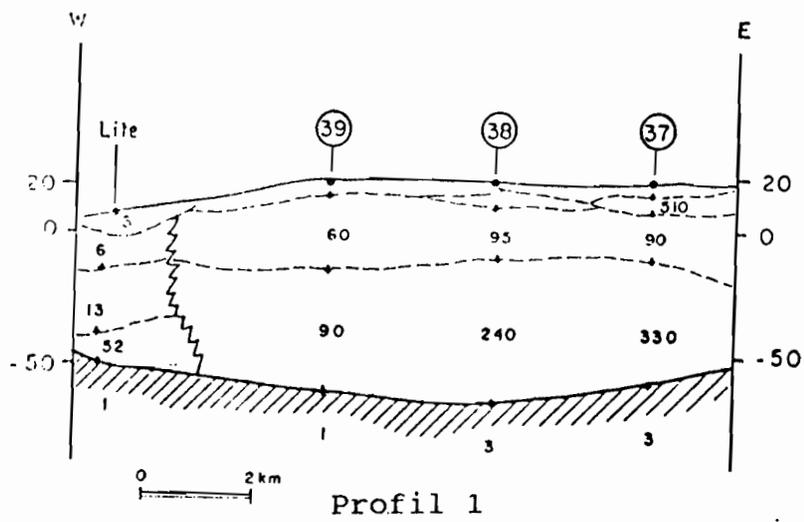


Fig.36- Coupes interprétatives de sondages électriques, secteurs Nord et centre (Diouf. S, Janvier 1993).

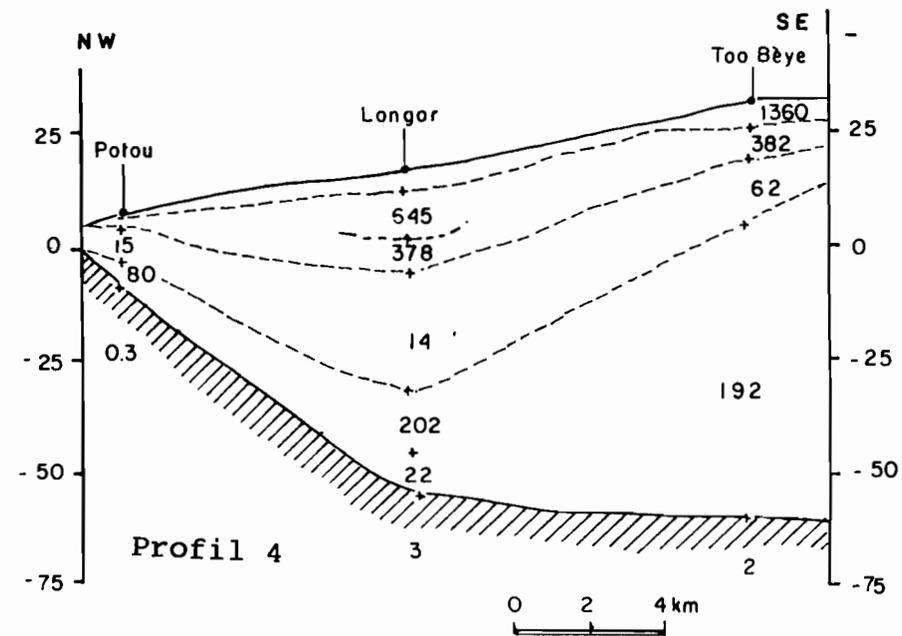
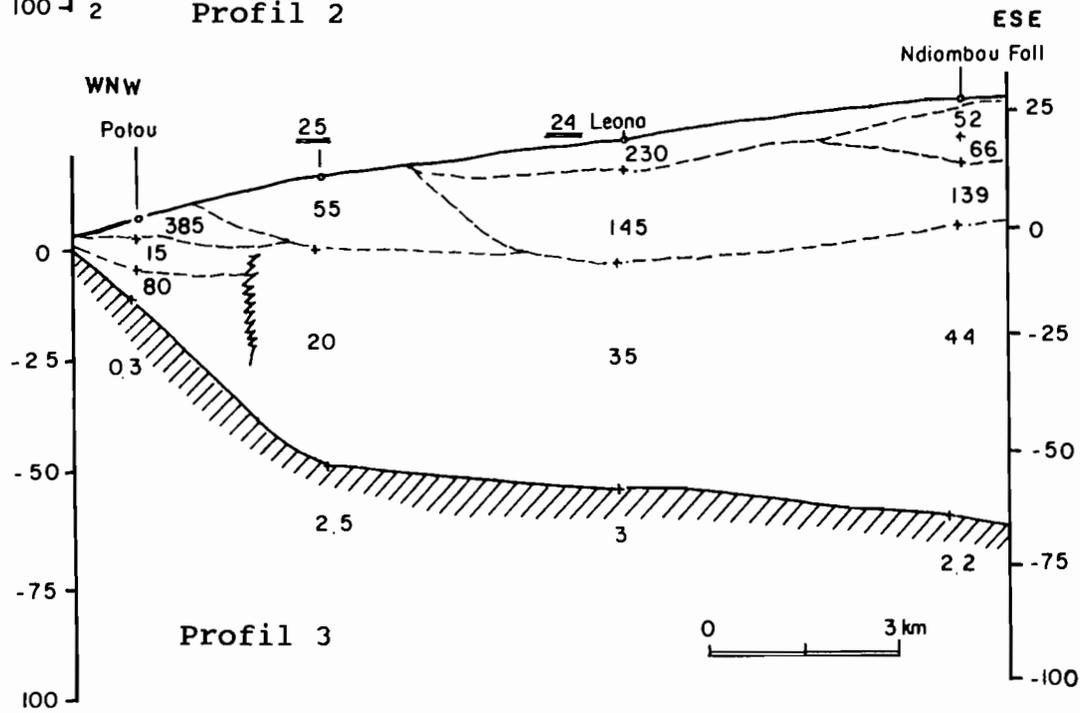
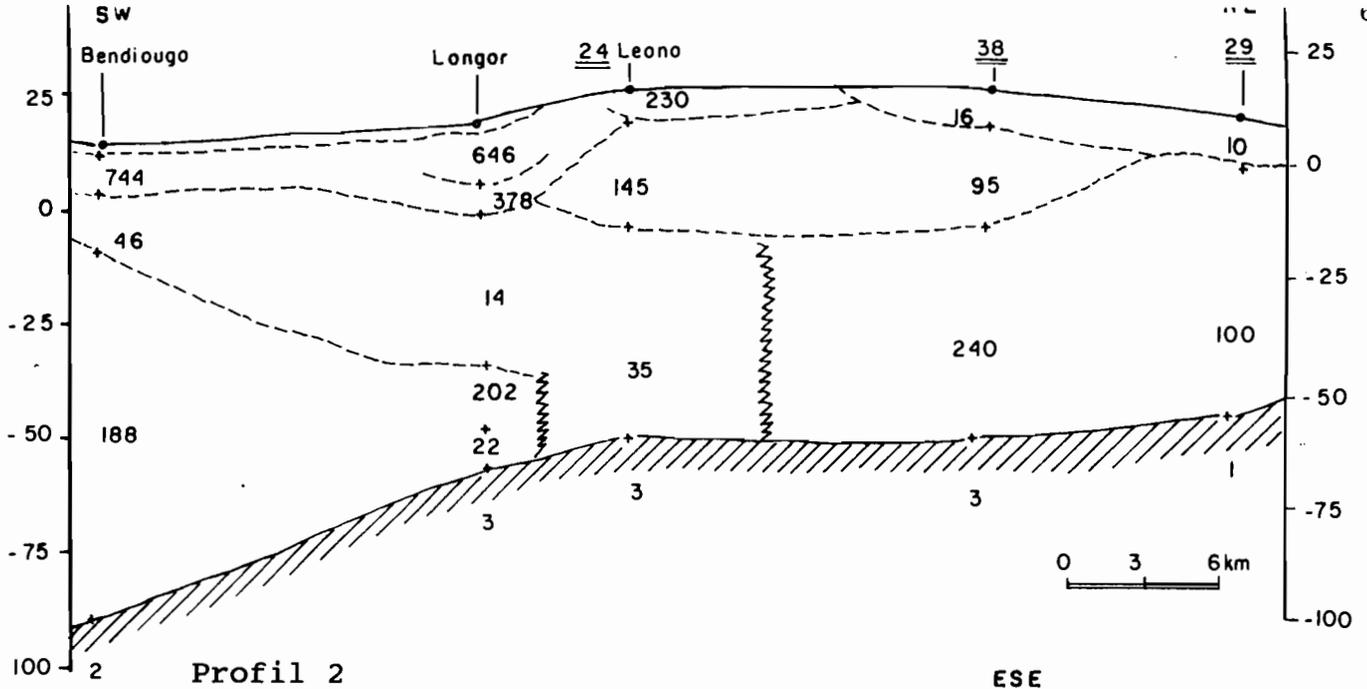
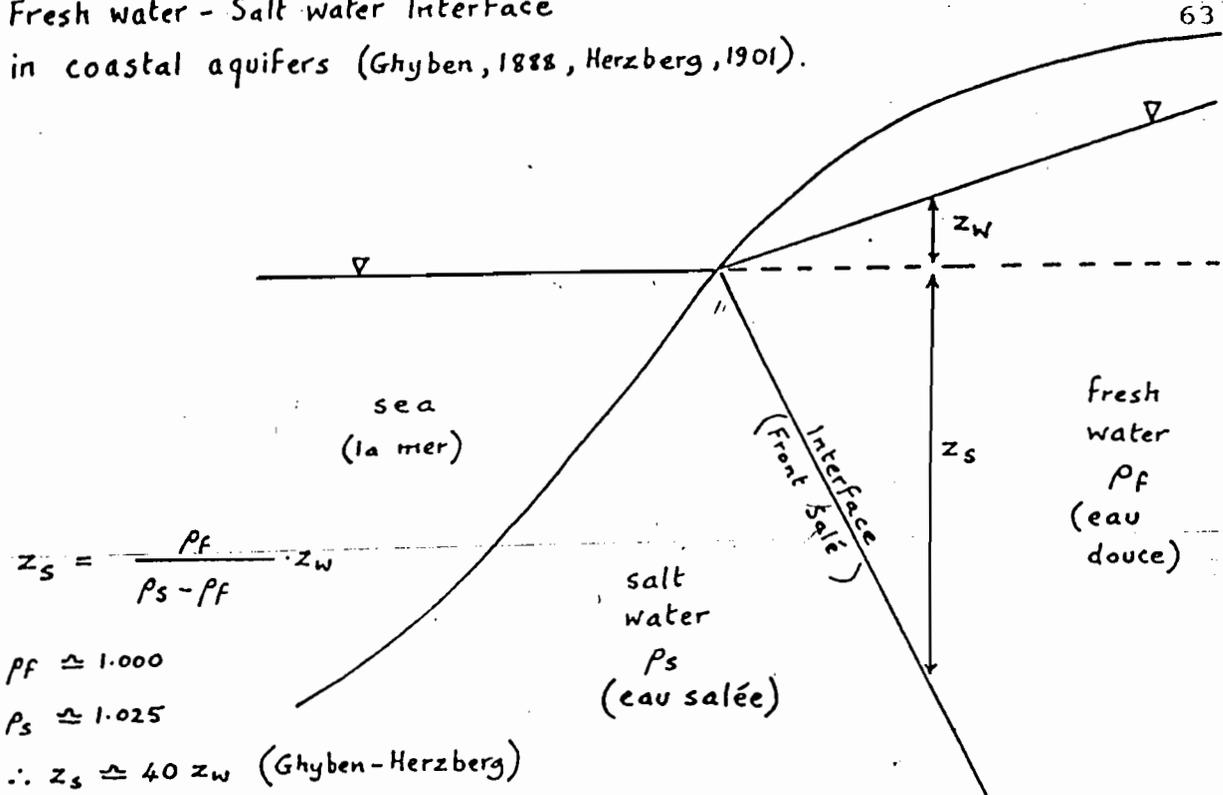


Fig.36- Coupes interprétatives de sondages électriques, secteurs Nord et centre (Diouf. S, Janvier 1994).

(a) Fresh water - Salt water Interface in coastal aquifers (Ghyben, 1888, Herzberg, 1901).



(b) Fresh water - Salt water Interface in coastal aquifers (Hubbert, 1940).

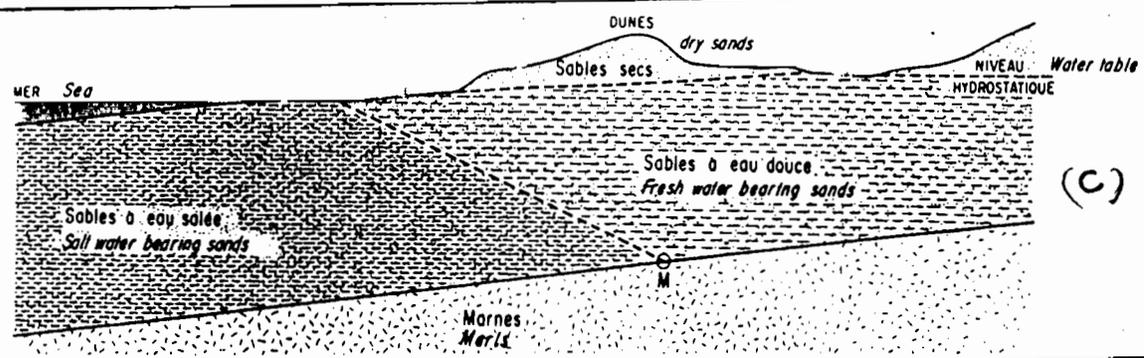
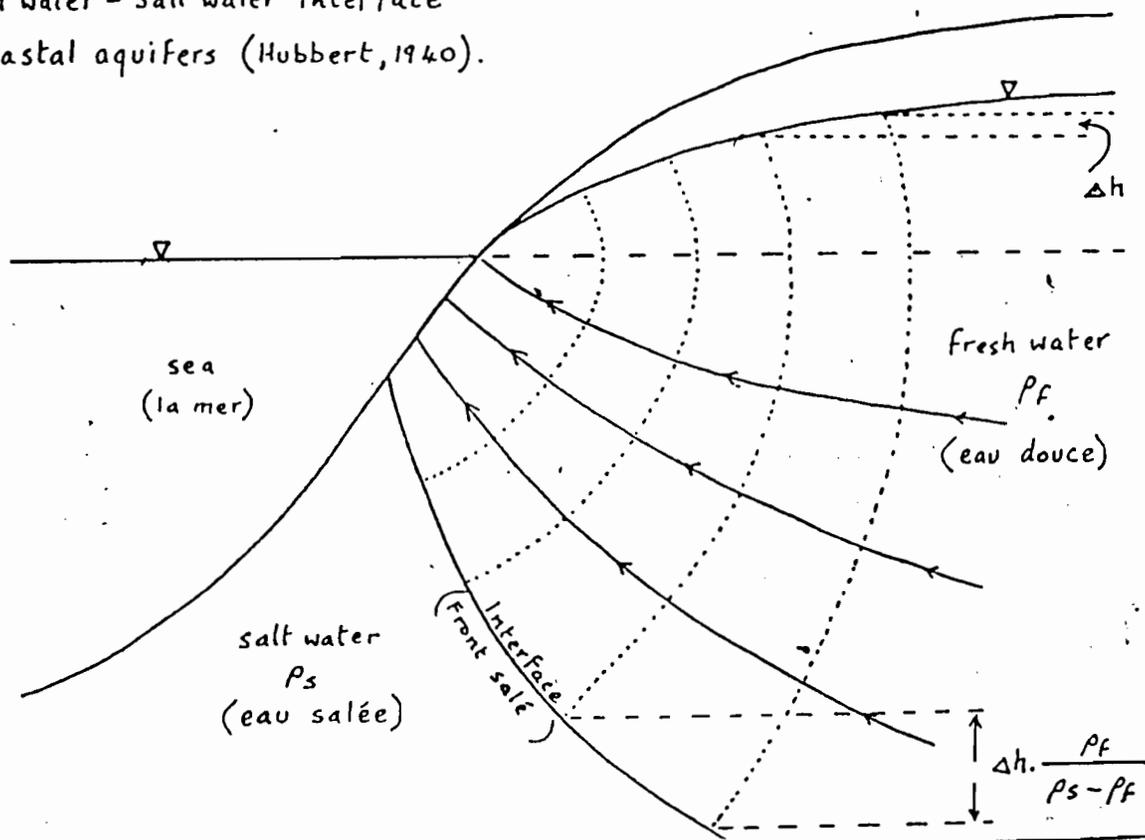


Fig.37a, b, c- Le front salé dans les couches aquifères littorales.

bande côtière. La forme de ce front a été étudiée :

A l'état naturel, une couche aquifère côtière décharge de l'eau dans la mer près du niveau de la mer qui marque le sommet du front (fig. 37a).

A partir du niveau de la mer, le front descend en pente vers l'intérieur des terres en venant couper le toit du substratum en un point M (fig. 37c). C'est ainsi qu'une lame d'eau de mer plus dense est sous l'eau douce au-dessous de la bande côtière. La forme de ce front a été étudiée :

a - Ghyben et Herzberg, travaillant séparément ont pu établir une équation donnant la profondeur du biseau sur la base des densités relatives de l'eau douce et de l'eau salée.

$$Zs = (f/s - f) \cdot Zw$$

f = densité de l'eau douce

s = densité de l'eau de mer

Zs = profondeur du front salé (au-dessous du géoïde)

Zw = niveau statique de l'eau (au-dessus du géoïde)

Si l'on utilise les valeurs de $s = 1,025$ et $f = 1,000$, l'équation devient : $Zs = 40 \cdot Zw$

Cette relation de Ghyben-Herzberg signifie en fait 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 au-dessus de la mer au même endroit.

b - Lors de travaux plus récents, Hubbert (1940) et d'autres ont montré que la relation Ghyben-Herzberg présente des faiblesses.

c - Todd (1980) indique qu'"on peut montrer que lorsque le flot d'eau souterraine est presque horizontal, la relation de Ghyben-Herzberg donne des résultats satisfaisantes. C'est seulement près de la bande côtière, lorsque les éléments de flot vertical deviennent plus prononcés que d'importantes erreurs se produisent dans la position de la surface de séparation".

d - Pour Freeze et Cherry (1979) "dans la plupart des situations réelles, la relation Ghyben-Herzberg sous estime la profondeur de la surface de séparation de l'eau salée".

e - Dans un récent exposé, Kashef, 1983 compare la solution Ghyben-Herzberg à quelques solutions mathématiques rigoureuses au problème de l'interface eau douce/eau salée et en déduit "qu'il a été vérifié que la solution Ghyben-Herzberg est en soi valable et que les différences entre ses résultats et ceux des solutions exactes sont moindres que les différences résultant de petites erreurs faites à l'enregistrement des niveaux de l'eau sur place...".

Pour pouvoir considérer la solution Ghyben-Herzberg comme approximativement valable pour des problèmes d'ordre pratique,

il faudrait enregistrer les niveaux d'eau dans une série de puits d'observation pour déterminer la position de la surface libre".

La présence à l'intérieur des terres d'une eau salée à surface subhorizontale et dont la mise en place ne suit pas la relation $Z_s = 40.Z_w$, n'est pas donc le seul fait du biseau salé.

3.1.4-2.- Secteur centre

Dans sa partie centrale, la coupe interprétative des sondages côtiers (fig. 35) indique un toit assez profond de la nappe à eau salée (83 à 125 m). L'importance de cette profondeur montre que le toit du substratum serait également aussi profond vers le littoral.

Ces résultats géophysiques concordent parfaitement avec les affirmations de R. Degallier (1960) ; C. Monciardini (1965) qui ont mis en évidence une fosse subsidente établie entre Kellé et Léona ouverte vers l'océan représentant l'extrémité sud orientale d'une dépression synclinale subsidente vers le large.

Selon ces auteurs, le toit du Lutétien se situerait à plus de 70 m de profondeur en son centre dans la zone littorale.

A l'Est du secteur, on note une importante nappe d'eau douce avec 188 Ohm.m à Bendiouga, 202 Ohm.m à Toro Bèye, et 100 Ohm.m à Thiambène (fig. 36, profils 2, 4, 5).

Les résistivités de 35 à 20 Ohm.m rencontrées sondages aux SE 24 et SE 25 (profil 3) représentent des niveaux calcaires marneux localisés dans la zone de Léona.

Le profil 4 montre à partir de Toro Bèye une couche de sables argileux 62 Ohm.m qui relayée vers l'Ouest par des argiles (14 Ohm.m).

3.1.4-3.- Secteur sud

De Fass Boye au sondage (18)B.R.G.M, au sud de Weuta, l'électrique révèle à faible profondeur sous des sables, la présence des marnes surmontant les calcaires marneux paléocènes (fig. 35), (fig. 38).

Au niveau de ce secteur, l'électrique ne note pas la présence d'invasions salées, mais l'existence de discontinuités au sein des couches calcaires ainsi qu'une remontée progressive en surface des marnes à mesure que l'on va vers le sud. Ces discontinuités des calcaires peuvent être l'effet de failles qui sont fréquentes dans le secteur (fig. 19).

Conclusion

Selon la théorie de Ghyben-Herzberg, la présence des eaux salées au-dessous de l'aquifère à eau douce ne s'explique pas

par le seul fait du biseau salé. Il semble que la partie sud-ouest du delta et peut être aussi la bande littorale des Niayes aient été envahies à plusieurs reprises par des transgressions marines.

En effet à l'Inchirien (20.000 ans) et au Nouakchottien (7000 à 4200 ans), la partie sud-ouest du delta du Sénégal et la zone littorale entre les dépressions des Niayes et la plage actuelle, ont été occupées par la mer (fig. 18).

De même lors de la dernière transgression marine au cours du Nouakchottien, la mer a envahi à Mboro une petite vallée qui entaillait perpendiculairement les cordons des dunes Ogoliennes (P. Michel, 1956).

En bordure des Niayes de Lompoul, on peut observer dans les creux des dunes littorales des affleurements de sables blancs, fins recouverts par un sol brun compact contenant des tessons de poteries (J. Vogt, 1966 in B.R.G.M, 1967).

Donc l'existence d'une pollution saline non liée à l'activité actuelle du biseau salé s'explique par les reliques d'eau de mer témoignant des transgressions récentes de la mer à l'intérieur des terres.

Ces transgressions expliquent aussi la présence dans les Niayes de zones isolées à très minces nappes d'eau saumâtre au-dessus de l'aquifère à eau douce.

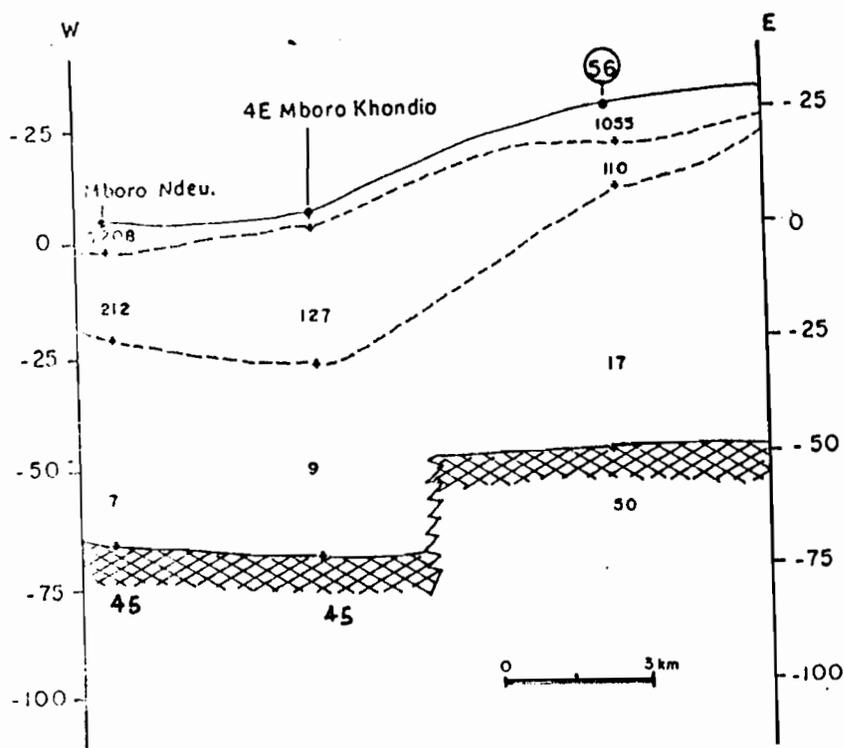


Fig.38- Coupe interprétative de sondages électriques, secteur Sud (Diouf.S, Janvier 1993).

3.2.- Campagne de sismique réfraction

3.2.1.- Plan de campagne

Les sondages de sismique réfraction réalisés dans trois secteurs (fig. 39), avaient pour objectifs :

- déterminer la nature des couches superficielles situées au dessus de l'aquifère,
- différencier les sables et les calcaires qui sont difficilement dissociables par les méthodes des résistivités dans les secteurs où les calcaires sont subaffleurants ;
- voir l'influence de la surface piézométrique sur la vitesse des ondes sismiques.

La campagne s'est déroulée en deux missions précédées d'une période de reconnaissance.

La première mission, en Avril 1993, était consacrée avec la période de reconnaissance à la prospection des secteurs Nord et Centre entre Palméo et Rao.

La deuxième, en juin 1993, intéressait le secteur sud couvrant la zone Diogo-Tivaouane-Mékhé.

3.2.2.- Interprétation des sondages de sismique réfraction

3.2.2-1.- Secteur Nord

Six (6) sondages sismiques ont été réalisés dans ce secteur avec des distances géophone-source (x) dépassant rarement 100 m.

Les sondages au voisinage des forages de NDiang Diop Léona et MPal (fig. 41) ont permis de déterminer des vitesses caractéristiques de l'onde sismique :

- sables : 0,25 à 0,6 m/ms
- sables argileux : 0,6 à 1,4 m/ms
- argiles ou argiles sableuses : 1,4 à 2,3 m/ms
- calcaires : > 2,3 m/ms

Dans une récente étude, Tamsir Ndiaye (1992) a identifié les latérites avec des vitesses de l'onde sismique de 0,51 à 0,80 m/ms.

A l'exception du sondage Léona (fig. 41), la sismique a révélé dans l'ensemble, une structure à trois terrains comprenant (Tabl. 5):

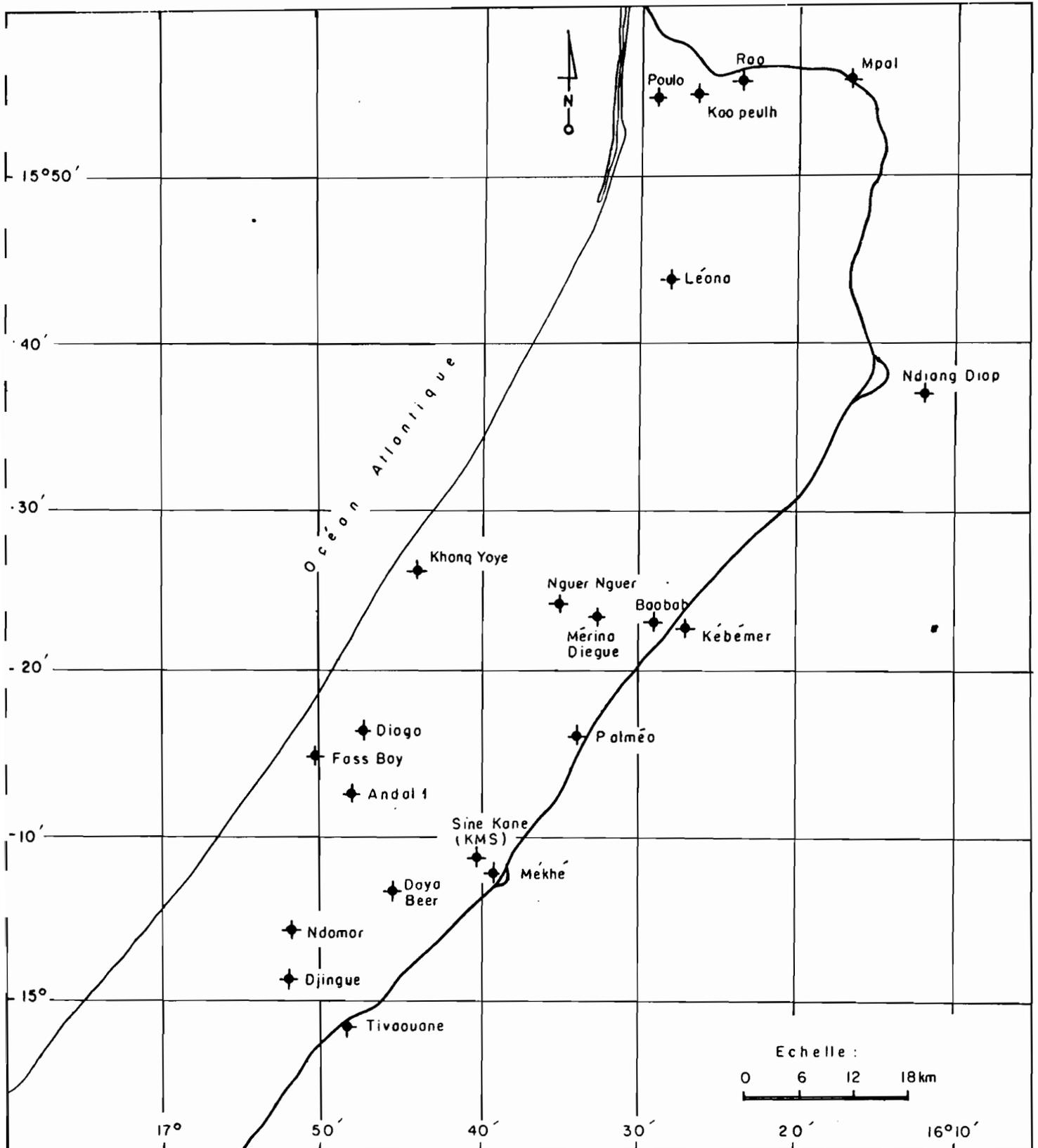


Fig.39-Carte de localisation des sondages de sismique réfraction. ♦.

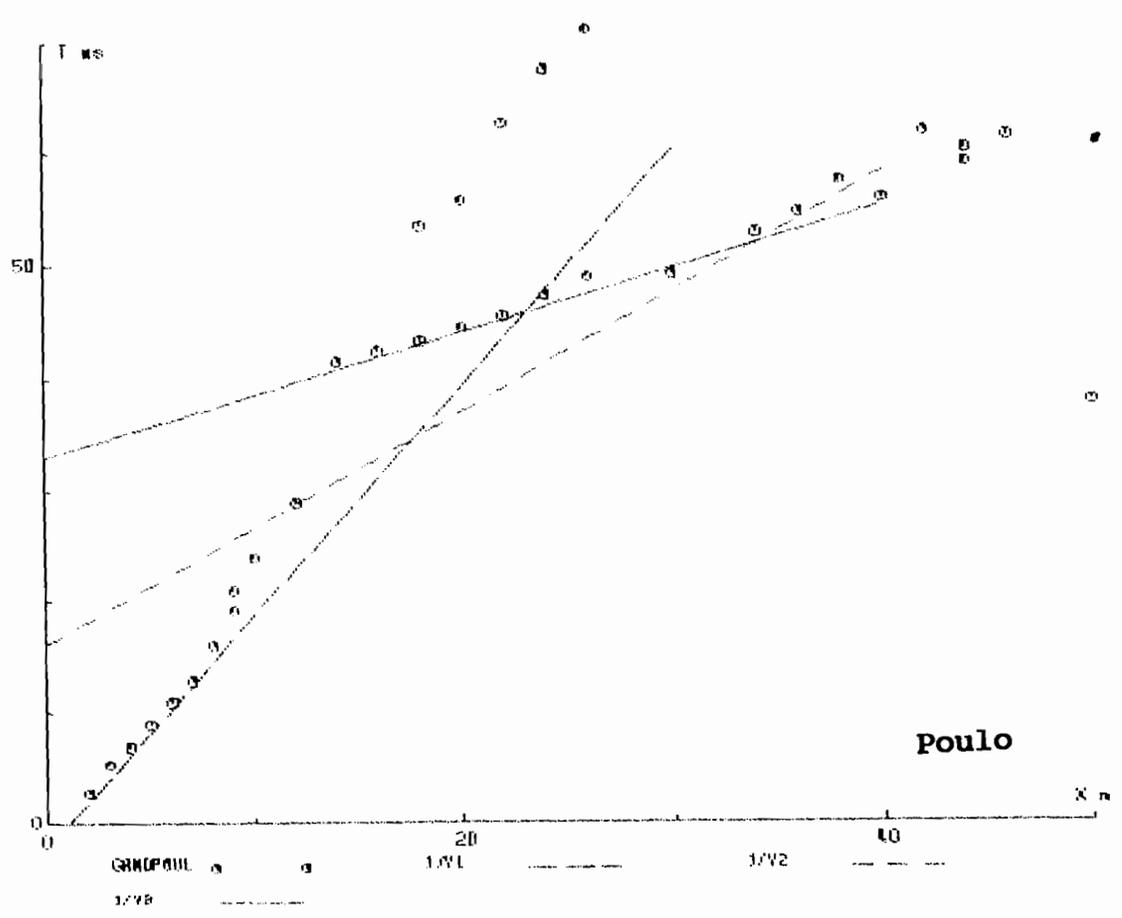
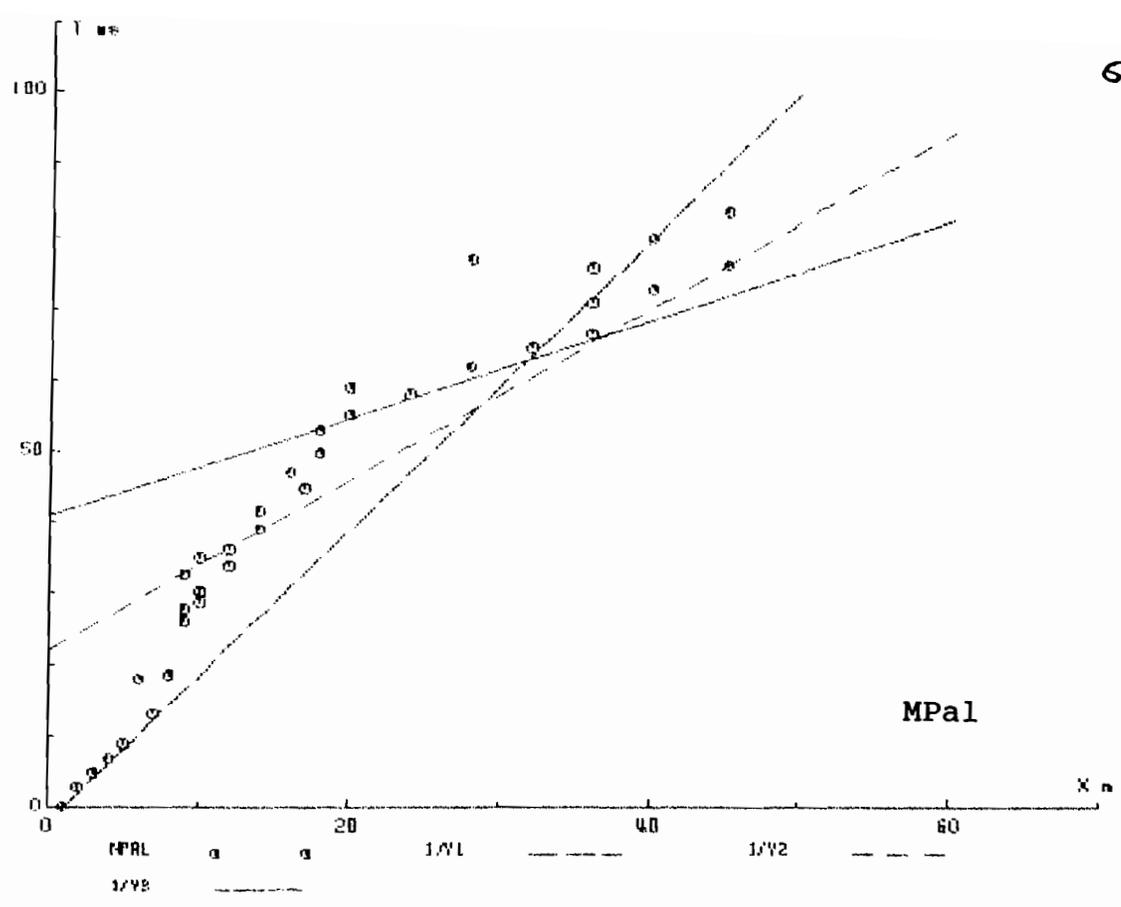
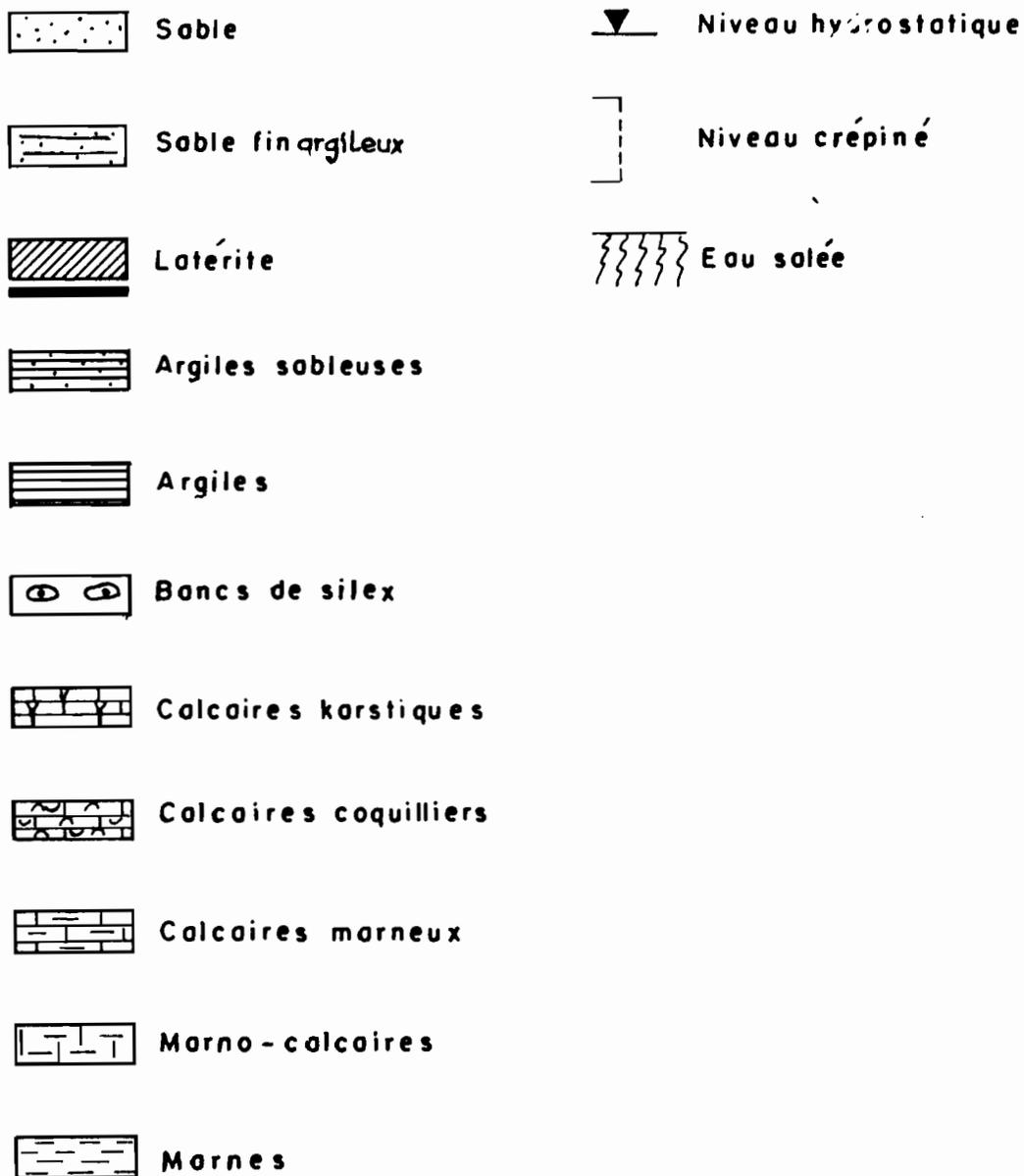


Fig.40- Hodochrones de sismique réfraction à MPal et Poulo, secteur Nord (M'Baye.D ; Diouf.S, Juin 1992)

Fig.17-LEGENDE DES COUPES



- les sables de surface (0,32 à 0,49 m/ms) avec une épaisseur maximale, 7,4 m ;

- les sables argileux dont l'épaisseur varie entre 12 et 18 m ;

- les argiles sableuses.

Dans la localité de Léona, les vitesses d'onde de 2,9 m/ms à 41 m sous la surface, sont identifiées aux calcaires.

Malgré la faiblesse des profondeurs d'investigation, la sismique marteau permet de faire une nette distinction entre les différentes couches et en particulier entre les sables et les calcaires qui dans certaines situations, ne sont pas différenciés par la méthode des résistivités.

**Tab.5 : Vitesses des ondes et épaisseurs des couches :
Secteur de Louga.**

	Poulo	Rao Peulh	Rao	MPal	NDiang Diop	Léona
V1 (m/ms)	0,49	0,32	0,34	0,49	0,49	0,42
V2	0,69	1,1	1,2	1,4	0,94	1,1
V3	0,77	1,3	1,97	1,4	1,5	1,6
V4						2,9
I1 (ms)	16,46	14,7	17,6	23,8	15,8	9,7
I2	34,1	24,7	30,5	43,2	32,6	32,6
I3						61,7
h1 (m)	5,76	2,46	3,1	7,4	4,5	2,2
h2	12,41	10,11	9,5	7,4	9,2	17,1
h3						21,6
h totale	18,17	13,54	12,6	14,7	13,7	41

Sur la coupe (fig. 42), la sismique précise bien la nature des terrains en révélant les moindres changements lithologiques. Les résultats montrent que la partie supérieure de l'aquifère est constituée de sables et de sables argileux.

3.2.2-2.- Secteur Centre

Les six sondages sismiques entre Palméo et Khong Yoye en passant par Kébémér, atteignent des profondeurs (tab.6) plus importantes par rapport à celles du Nord. En effet, le signal

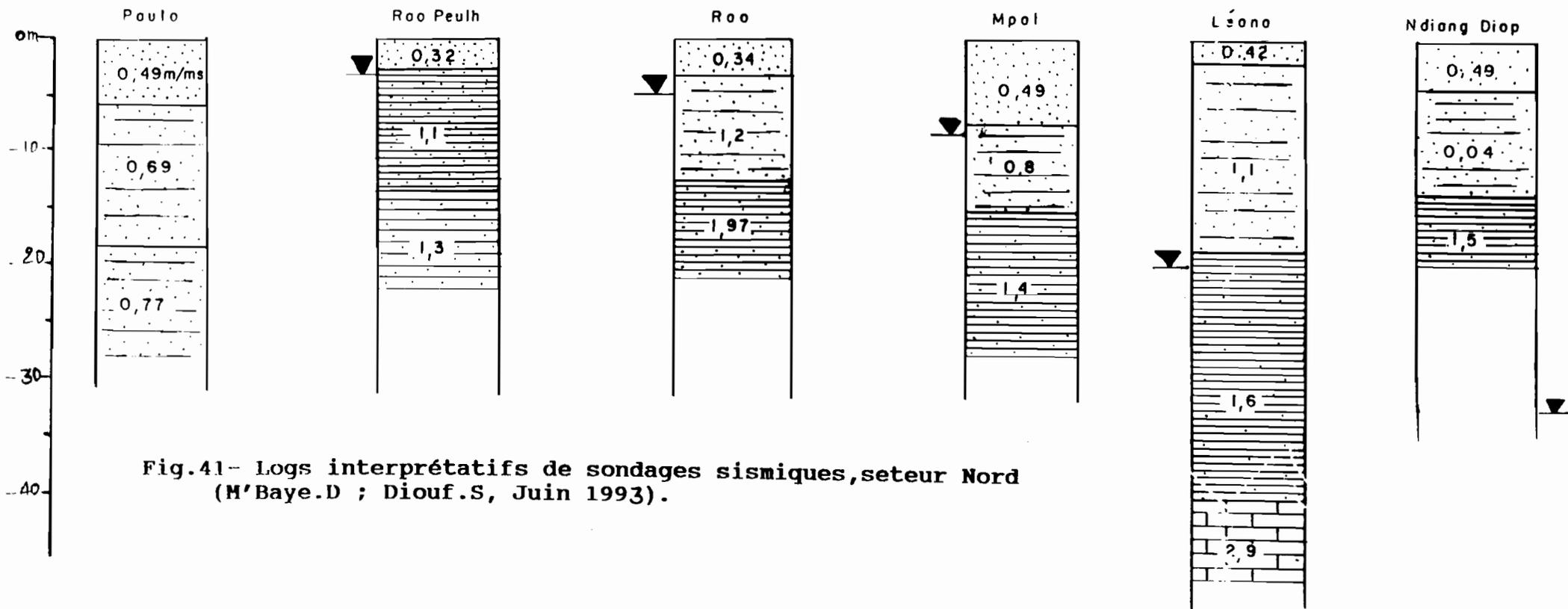


Fig.41- Logs interprétatifs de sondages sismiques, seteur Nord (M'Baye.D ; Diouf.S, Juin 1993).

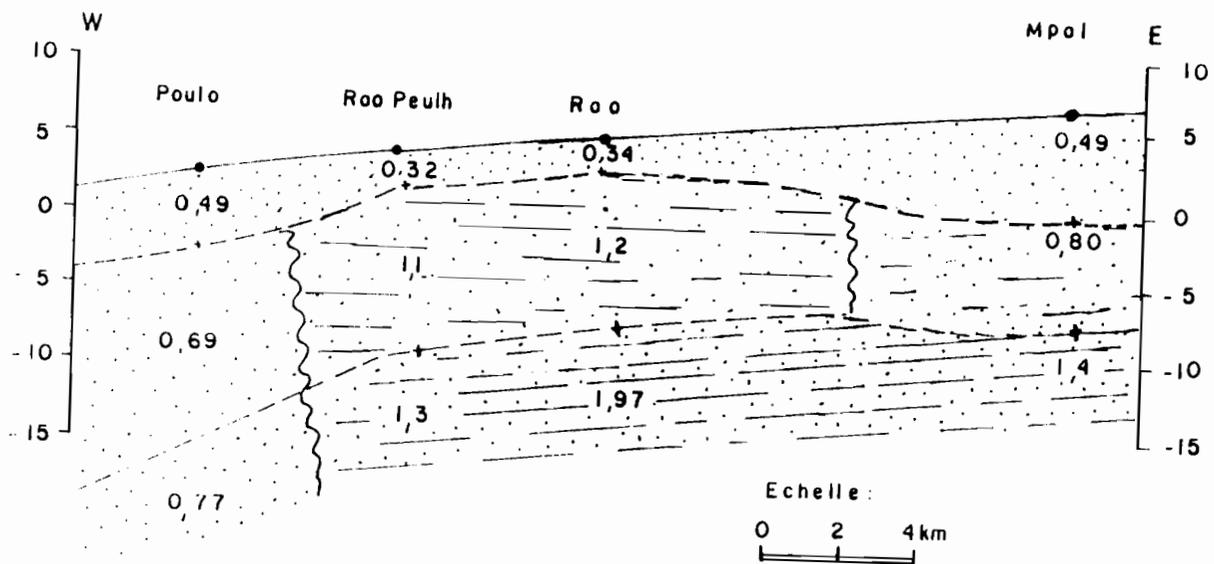


Fig.42- Coupe interprétative de sondages sismiques, secteur Nord (M'Baye.D ; Diouf.S, Juin 1992).

sismique reste lisible jusqu'à des distances (x) égales à 190m, le milieu étant plus favorable à la propagation des ondes sismiques.

La sismique montre à l'Ouest de Kéméber (Baobab, Mérina Diègue, Nguer Nguer) (fig. 44) une importante couche de sables très argileux ou d'argiles sableuses, surmontant l'aquifère.

Au sondage de Palméo, la sismique a mis en évidence la surface de contact sables/calcaires Lutétiens située à 32 m.

**Tab.6 : Vitesse des ondes et épaisseurs des couches :
secteur Centre.**

	kébémer F2	Kébémer baobabs	Mérina Diègue	NGuer NGuer	Khong Yoye	Palméol
V1(m/ms)	0,3	0,35	0,59	0,37	0,35	0,66
V2	0,45	0,58	0,87	0,82	0,94	0,9
V3	0,64	1,24	2,6	1,2	2,26	3,1
V4	0,8	1,83				
I1(ms)	19,1	10,1	15,4	10	11,5	7,9
I2	83,8	59,33	96,3	45,8	30,5	71,4
I3	139,6	91				
h1(m)	3,8	2,21	6,23	2,1	2,2	3,8
h2	19,4	15,9	34,9	19,6	9,5	28,3
h3	23,84	23,9				
h totale	47	42	41,1	21,7	11,7	32,1

3.2.2-.3.- Secteur Sud

Neuf sondages sismiques ont été réalisés dans le secteur avec des distances (x) entre 100 et 200 m (fig. 46).

A trois terrains (tabl. 7) les logs interprétatifs des sondages de ce secteur (fig. 47) montrent pour la majorité des points une séquence avec: recouvrement sableux, sables argileux et argiles sableuses. A Andal 1 par contre on n'a que deux terrains.

Ces données sont synthétisées sur la coupe interprétative de la fig. 48 qui met en évidence le passage de faciès Est-Ouest.

A Andal 1 et à Daya Beer, la sismique révèle un marqueur avec une vitesse de l'onde de 3 m/ms à une profondeur de 13,8 et 40,7 m respectivement.

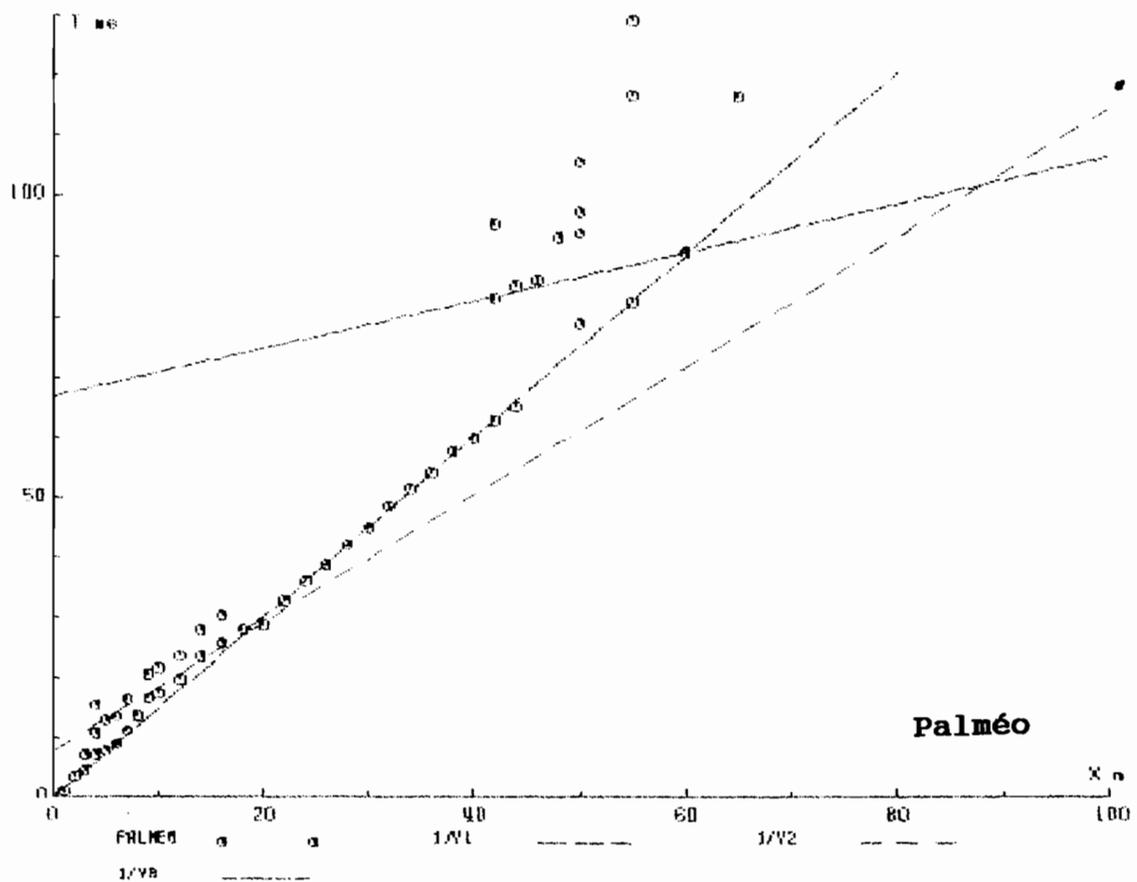
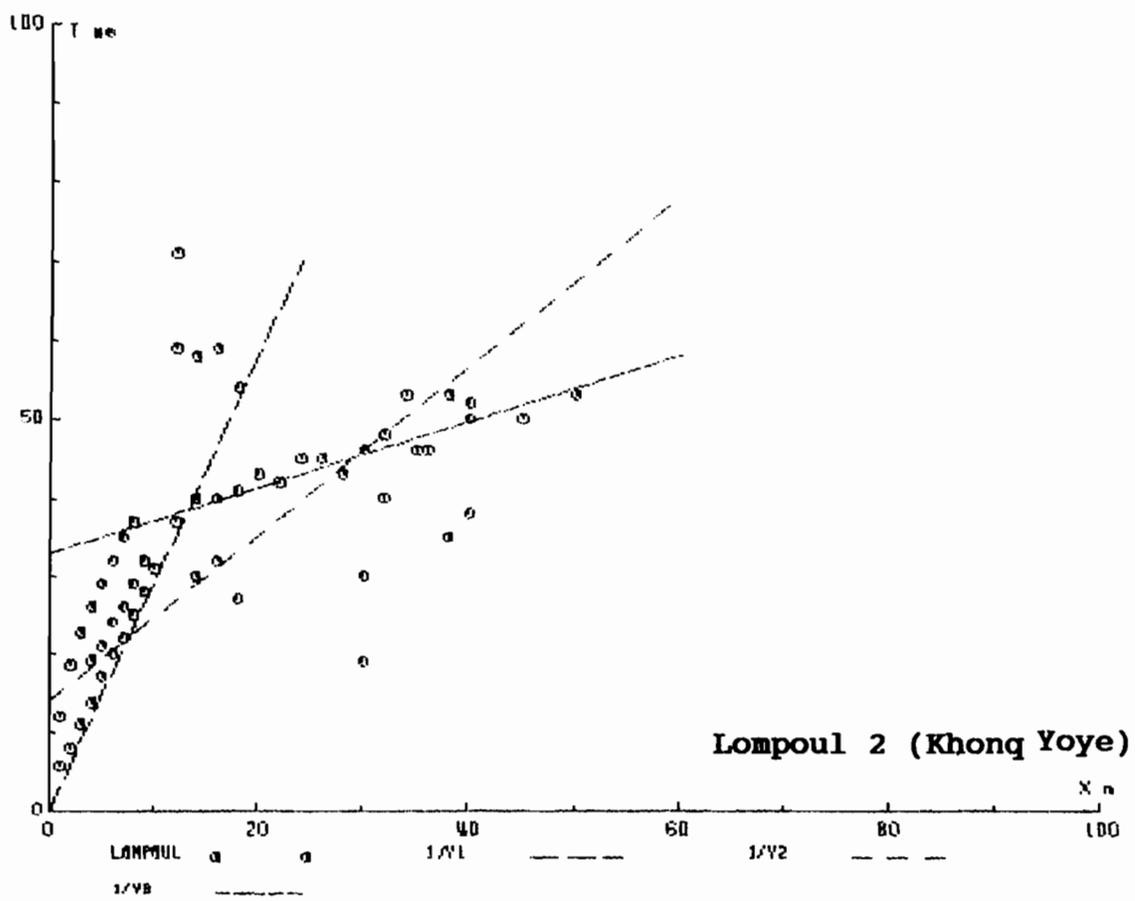


Fig.43- Hodochrones de sismique réfraction à Lompoul 2 (Khong Yoye) et Palméo, secteur centre (M'Baye.D ; Diouf.S, Juin 1992).

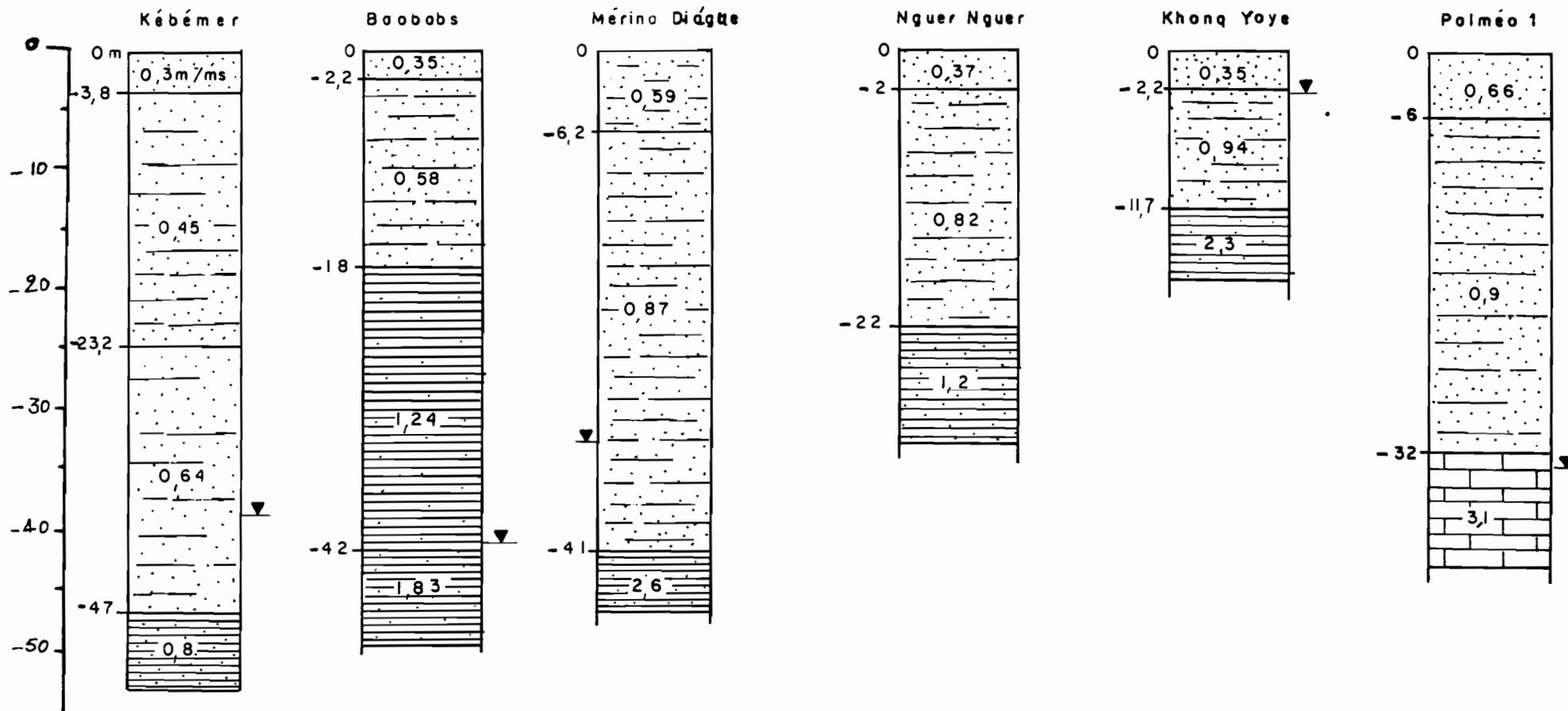


Fig.44- Logs interprétatifs de sondages sismiques, secteur centre (M'Baye.D ; Diouf.S, Juin 1993).

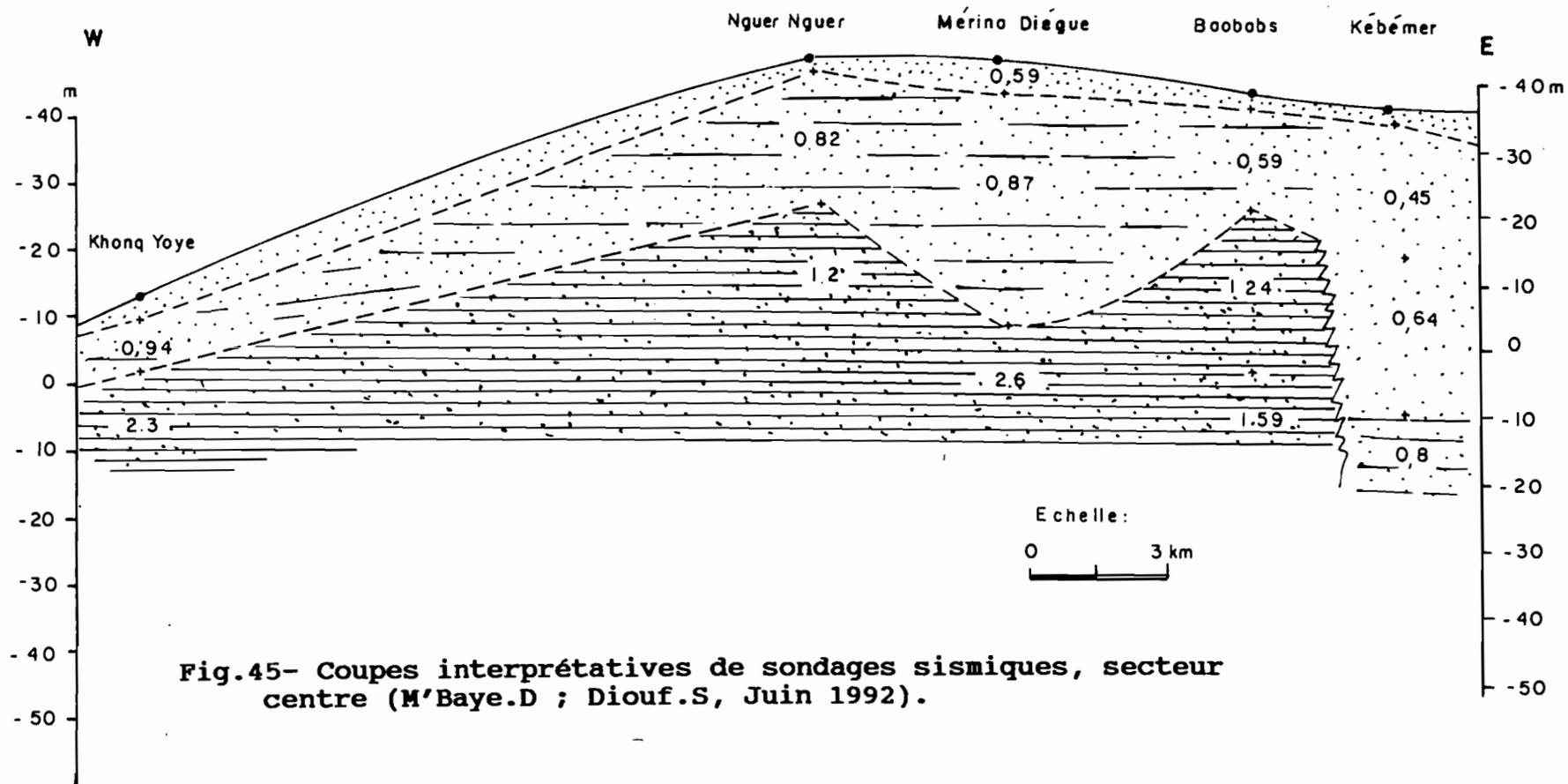


Fig.45- Coupes interprétatives de sondages sismiques, secteur centre (M'Baye.D ; Diouf.S, Juin 1992).

A Andal, le marqueur serait probablement des argiles compactes si l'on sait que la géologie locale place les calcaires à des profondeurs plus grandes.

A Daya Beer, le marqueur correspond exactement aux calcaires qui apparaissent dans cette zone de Méouane d'abord par chicottes avant de s'afficher en direction du sud vers Taïba.

Tab.7 : Vitesses des ondes et épaisseurs des couches : secteur Sud.

	Diogo	Fass Boy	Andal 1	Daya Beer	Tiva ouane	Mékhé	Sine Kane	Ndomor	Djingué
V1	0,34	0,25	0,51	0,58	0,4	0,44	0,41	0,34	0,38
V2	1,33	1,54	1,8	1,42	0,7	0,63	0,68	1,33	0,86
V3	1,84		3	3,03	2,4	1	0,86	1,84	
V4(m/ms)						1,7	2,25		
I1	26,4	9,41	21,2	49	18,9	10,1	17,6	26,46	30
I2	31,75		29	84	70,6	30,8	32,6	31,75	53,5
I3(ms)						70,1	77		
h1	4,64	1,2	5,62	15,57	4,6	3,1	4,5	4,64	6,4
h2	4,74		8,2	25,1	17,5	7,36	7,4	4,74	10,1
h3(m)						21,5	16		
ht	9,38	1,2	13,8	40,7	22,1	31,9	28	13,2	16,5

3.2.3.- Relation entre sismique réfraction, sondages mécanique, électrique et surface piézométrique

Dans cette partie on tentera, par l'analyse de cas types, de noter le caractère enrichissant d'une prospection pluriparamétrique.

Notons ainsi que quand on interprète des sondages électriques, on suppose que chaque couche est isotrope, ce qui n'est généralement pas le cas. Comme on a $h_{\text{électr}} = \lambda h_{\text{vrai}}$ et le coefficient de macroanisotropie $\lambda > 1$, les résultats trouvés pour h (épaisseur de chaque couche) sont trop grands. En pratique, on de la valeur de λ dans la comparaison des résultats d'un sondage électrique et d'un sondage mécanique.(fig. 49).

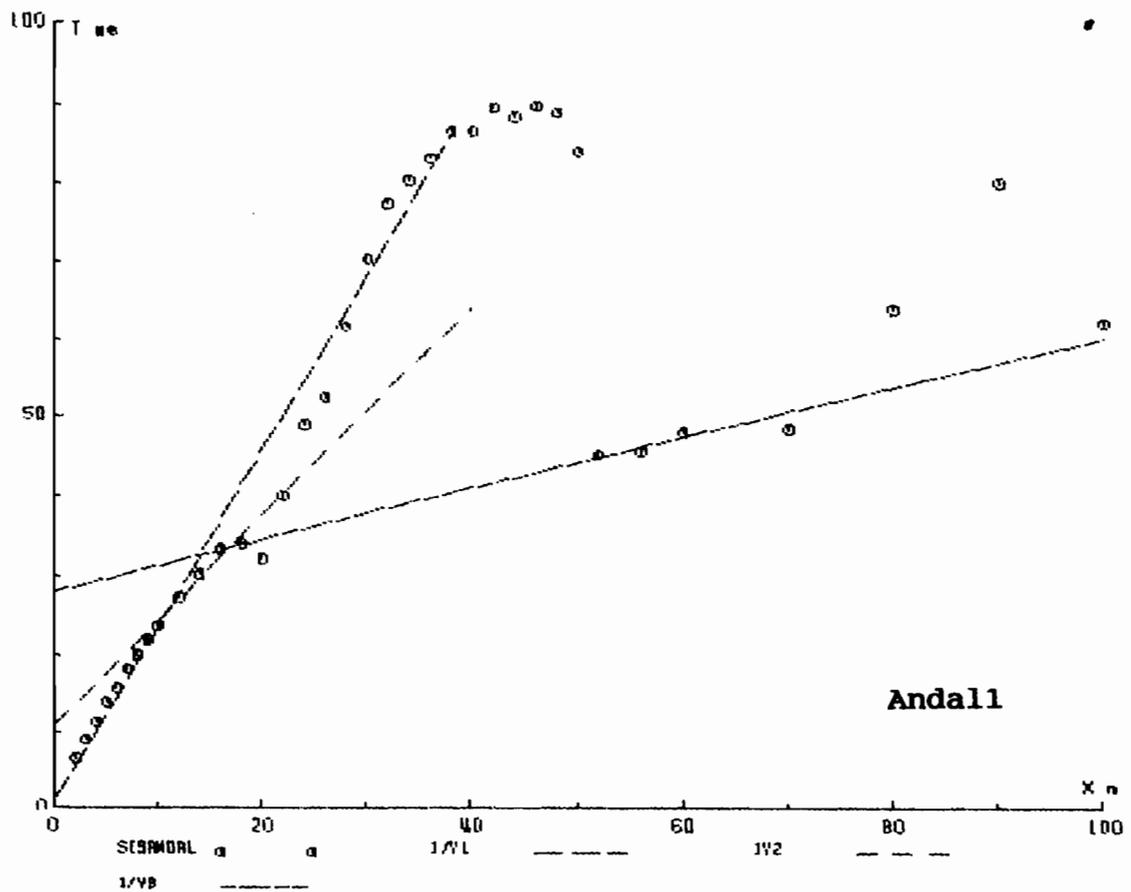
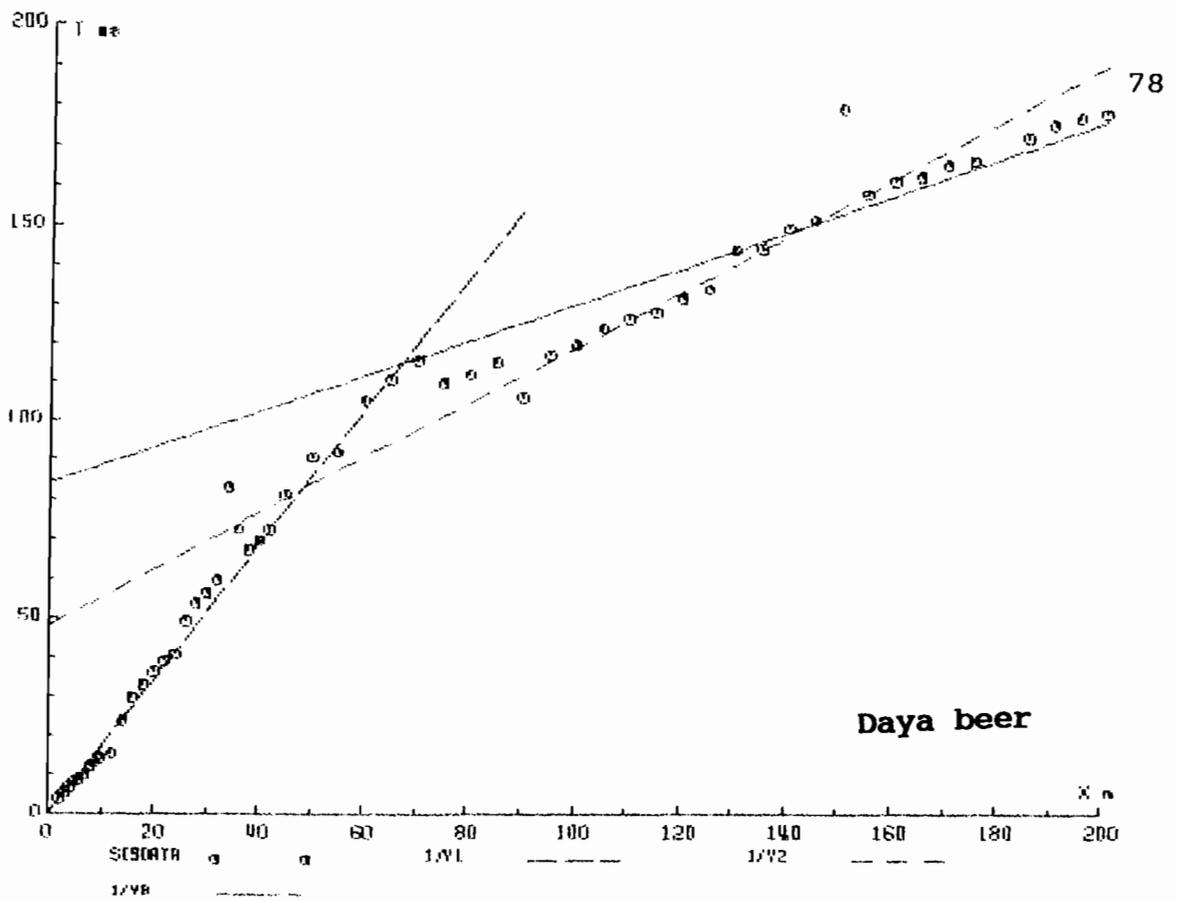


Fig.46-Hodochrones de sismique réfraction à Daya beer et Andall, secteur Sud (M'Baye.D ; Diouf.S, Juin 1992).

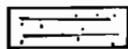
Fig.17-LEGENDE DES COUPES



Sable



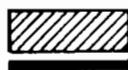
Niveau hydrostatique



Sable fin argileux



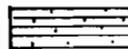
Niveau crépiné



Latérite



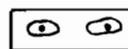
Eau salée



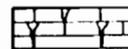
Argiles sableuses



Argiles



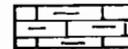
Bancs de silex



Calcaires karstiques



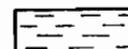
Calcaires coquilliers



Calcaires marneux



Marno-calcaires



Marnes

SISMIQUE SUD

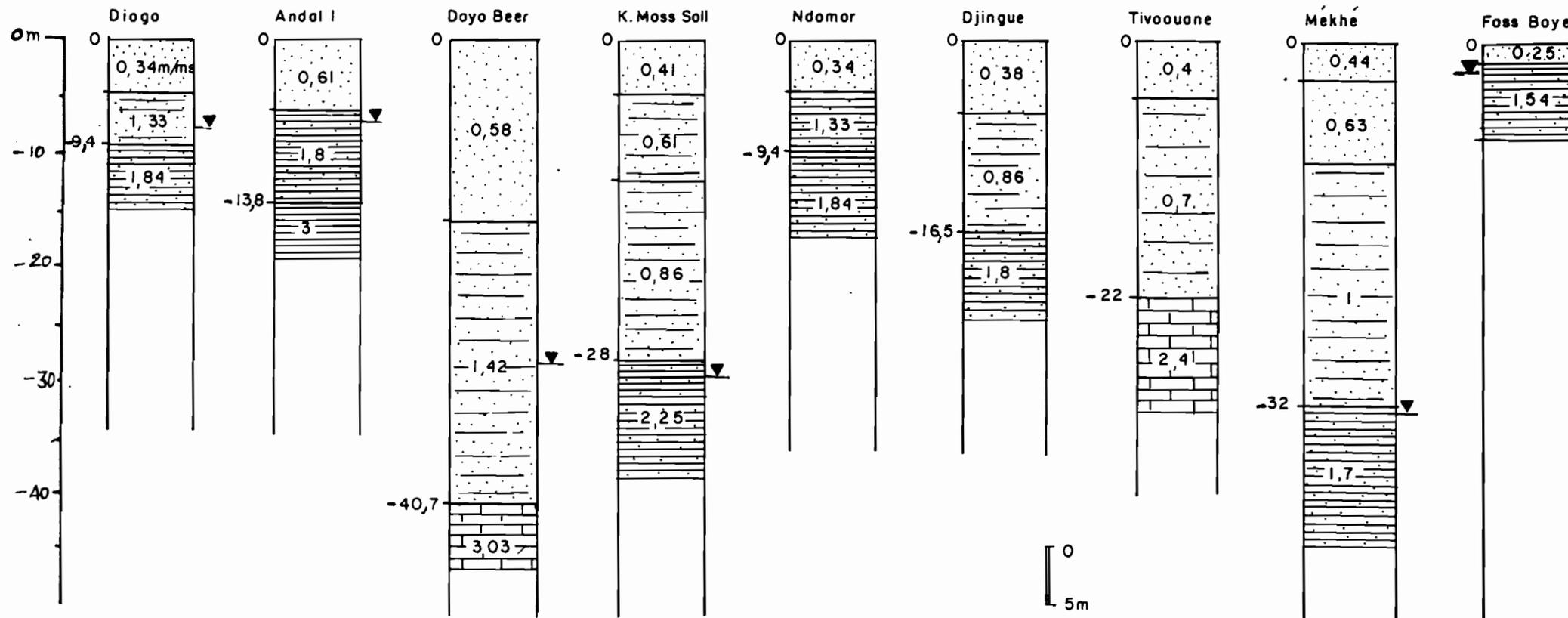


Fig.47- Logs interprétatifs de sondages sismiques ,secteur Sud (M'Baye.D ; Diouf.S, Juin 1993).

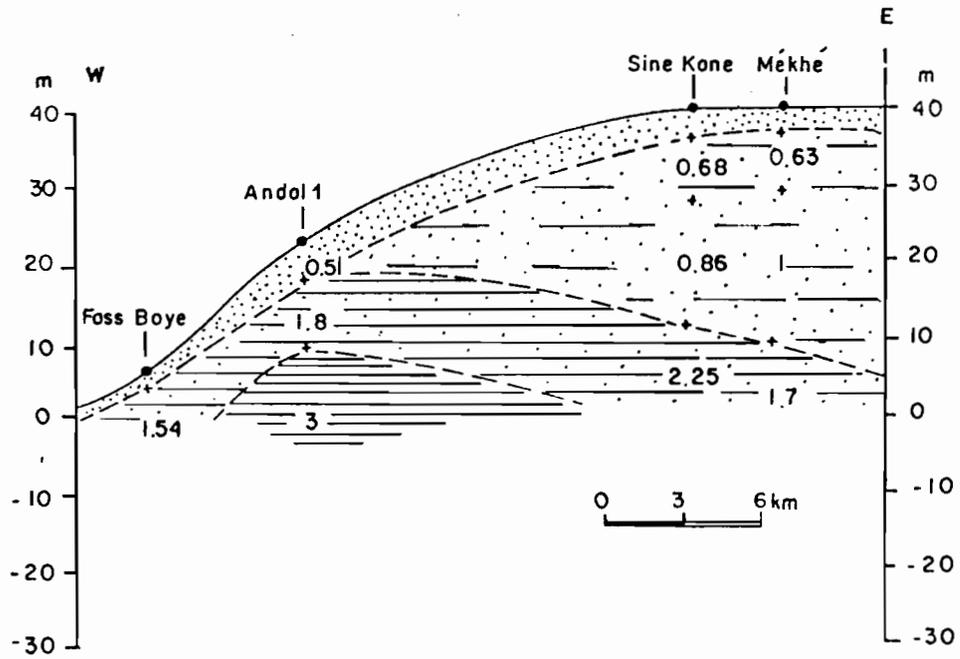


Fig.48- Coupe interprétatives de sondages sismiques, secteur Sud (M'Baye.D ; Diouf.S, Juin 1992).

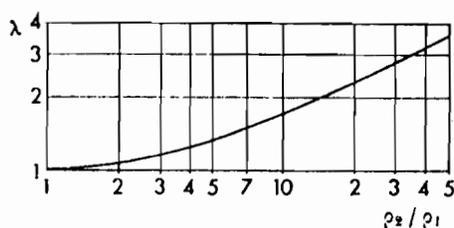


Fig. 49 - Coefficient de macroanisotropie pour une formation constituée d'une alternance de strates d'épaisseurs égales et de résistivités ρ_1 et ρ_2 , Astier (1971).

On voit que λ est supérieur à 1.5 dès que ρ_2/ρ_1 est plus grand que 7.

3.2.3-1.- Secteur Nord

1 - MPal

Le forage abandonné de MPal, réalisé en 1982 donne un taux de NaCl égale à 7645,1 mg/l.

Le sondage électrique effectué en 1987 révèle une nappe salée à partir de 28 m de profondeur.

Donc une étude géophysique préalable permettrait d'économiser les sommes non négligeables consacrées à la réalisation de ce forage profond (558 m). Le log du forage indique de 0 à 40 m des sables fins argileux, des argilo-sableux sans donner de détails sur les épaisseurs successives.

Bien que n'ayant pas atteint des profondeurs importantes, la sismique permet d'indiquer l'évolution hydrique (fig. 50 a).

2 - Ndiang Diop

Outre les mêmes niveaux identifiés des argiles, la sismique différencie les sables de surfaces par rapport aux sables argileux en profondeur.

3 - Léona

Le forage pétrolier de Léona 2 réalisé en 1960, indique le toit des calcaires à 52 m sous le sol. La sismique et l'électrique montrent respectivement les calcaires à 41 et 36 m.

La différence observée peut s'expliquer par la distance séparant les sites des sondages géophysique et mécanique. En effet, le forage se situe à Rayet à 5200 m au Sud Ouest de Léona. La sismique donne aussi des détails sur la couche de sable indiquée par le forage en précisant les limites, hydrogéologiques.

4 - N'diock Sall

L'électrique indique le même toit de calcaires que le sondage mécanique. Mais le sondage de la C.P.G.F. donne des

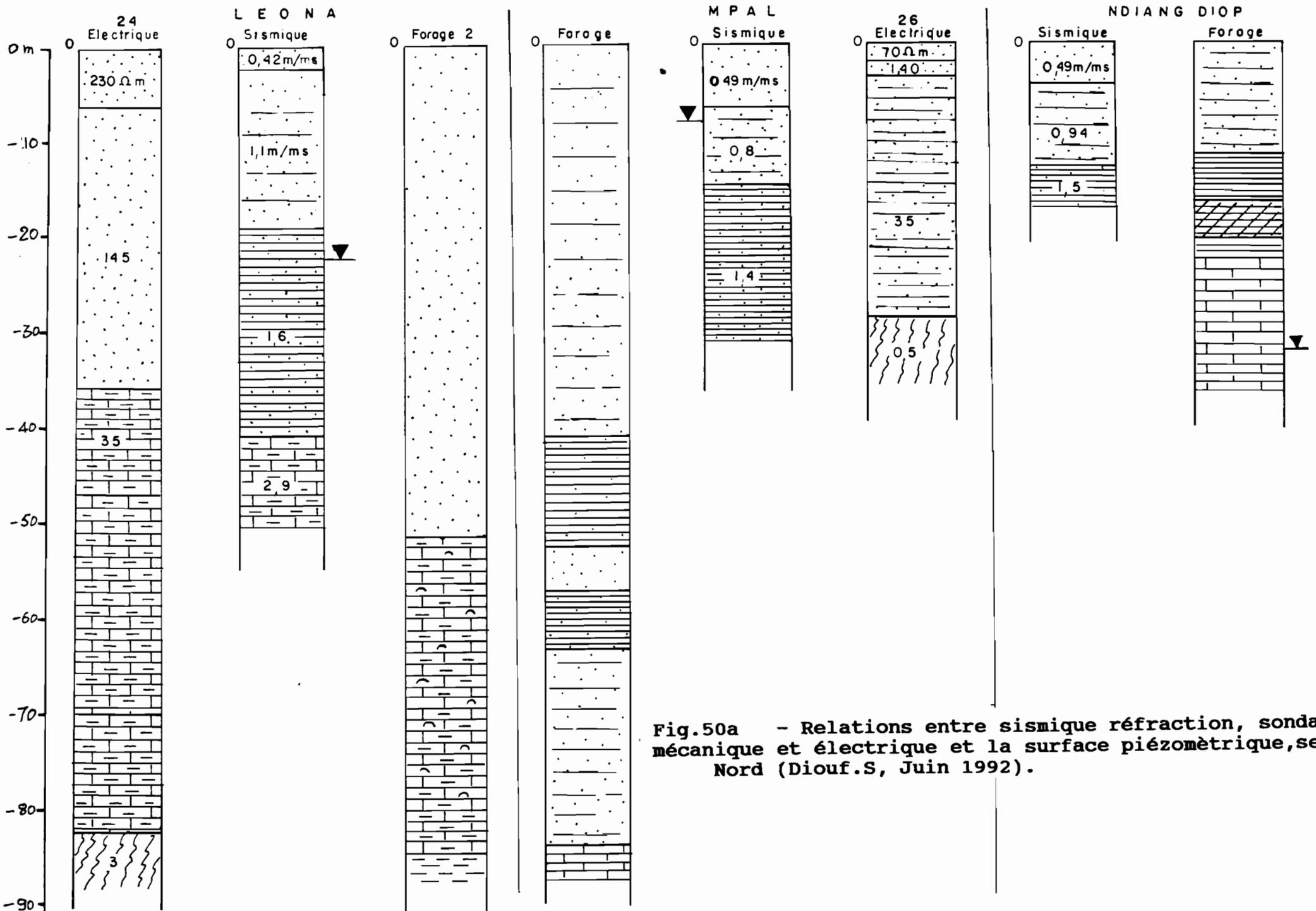


Fig.50a - Relations entre sismique réfraction, sondages mécanique et électrique et la surface piézométrique, secteur Nord (Diouf.S, Juin 1992).

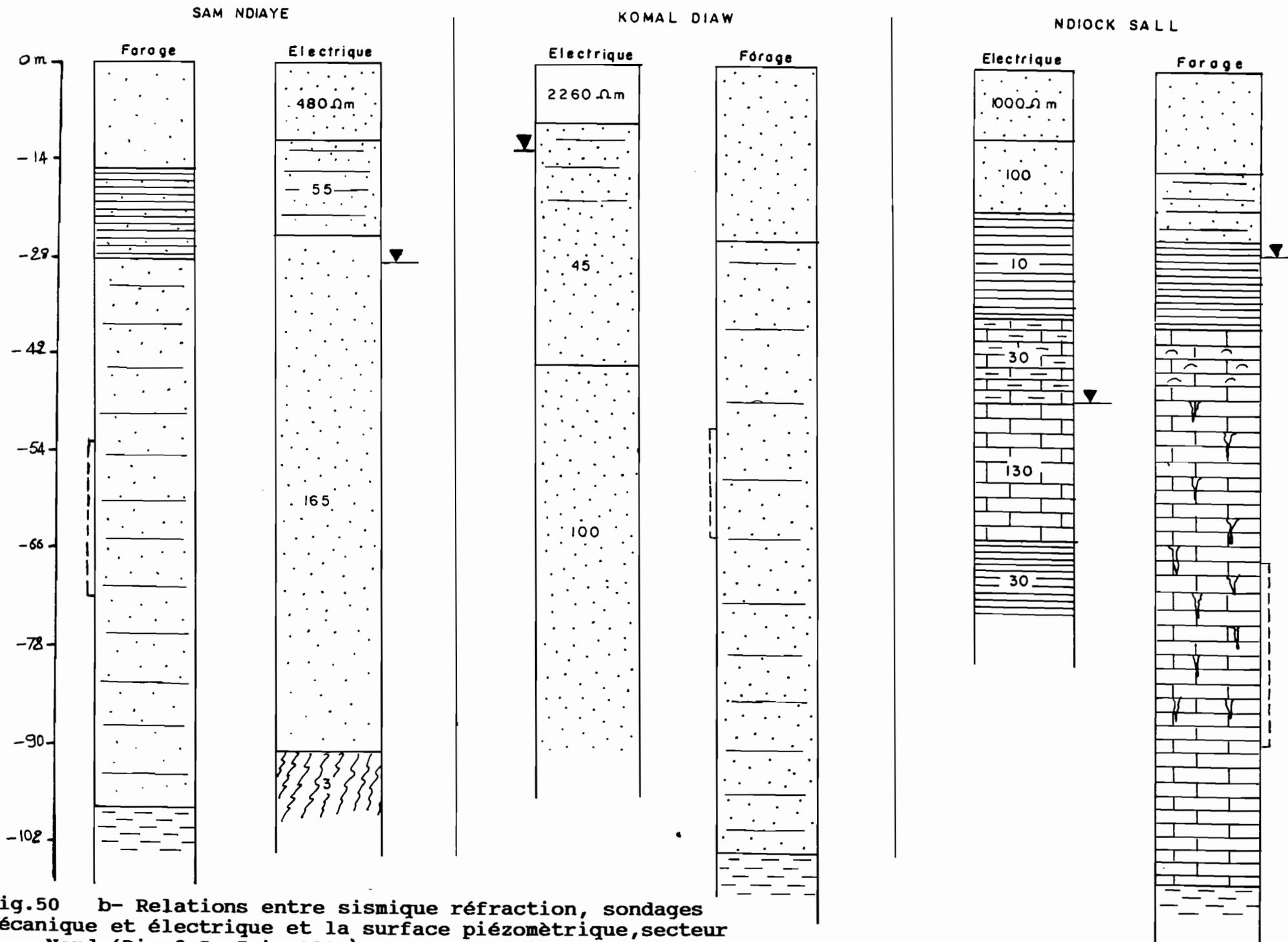


Fig.50 b- Relations entre sismique réfraction, sondages mécaniques et électriques et la surface piézométrique, secteur Nord (Diouf, S. Juin 1997).

niveaux argileux à 70 m alors que le forage montre la base des calcaires à 120 m de profondeur. Ce niveau argileux ne s'explique pas, car cet important forage qui alimente presque tout le secteur nord est crépiné de 75 à 104 m (fig. 50 b). La C.P.G.F. s'est seulement référé sur le piézomètre datant de 1974 et dont la foration atteint un maximum de 69 m de profondeur.

5 - Kamal Diaw

Le forage test de Kamal Diaw (NaCl = 43,9 mg/l) réalisé après l'exécution de la prospection électrique favorable du B.R.G.M (fig. 50 b), montre une fois de plus, l'importance de l'électrique dans la recherche de zones favorables pour l'implantation de forages. En effet de part et d'autre du sondage électrique effectué à Kamal Diaw (annexel-3b), on rencontre deux zones où les niveaux salés sont rencontrés entre 50 et 75 m de profondeur (annexel-3a, c).

Remarque: le tableau suivant (Tabl. 8) donne les normes de la quantité de chlorure et de sodium dans l'eau de boisson.

Référence	Normes					
	internationales		C.E.E		France	
Paramètre	Niveau		Niveau		Niveau	
	Adm	Accept	Adm	Accept	Adm	Accept
Sodium	-	-	100	<20	100	<200
Chlorure	250 mg/l	-	200	5	600	250

6 - Sam Ndiaye

Après l'échec des forages de Léona et Mbaye Mbaye, la géophysique réalisée en 1987 a permis de localiser un site favorable entre Sam Ndiaye et Léona (sondages 22 et 23 du B.R.G.M.). L'eau salée se situerait à 95 m avec une résistivité de 3 Ohm.m et le forage est crépiné entre 53 et 73 m.

3.2.3-2.- Secteur Centre

1 - Mbédiène

Le log du forage confirme les résultats du sondage B.R.G.M. réalisé au préalable. L'électrique indique en plus, la présence de niveau salé à partir de 77 m de profondeur. La différence observée au niveau de l'épaisseur des sables de surface peut être imputée aux sites d'implantation des sondages. En effet, tandis que le foreur cherche un site en altitude pour son forage, le géophysicien choisit un bas-fond pour réduire au mieux l'épaisseur des sables secs de surface.

Quant au sondage C.P.G.F, il présente des différences non

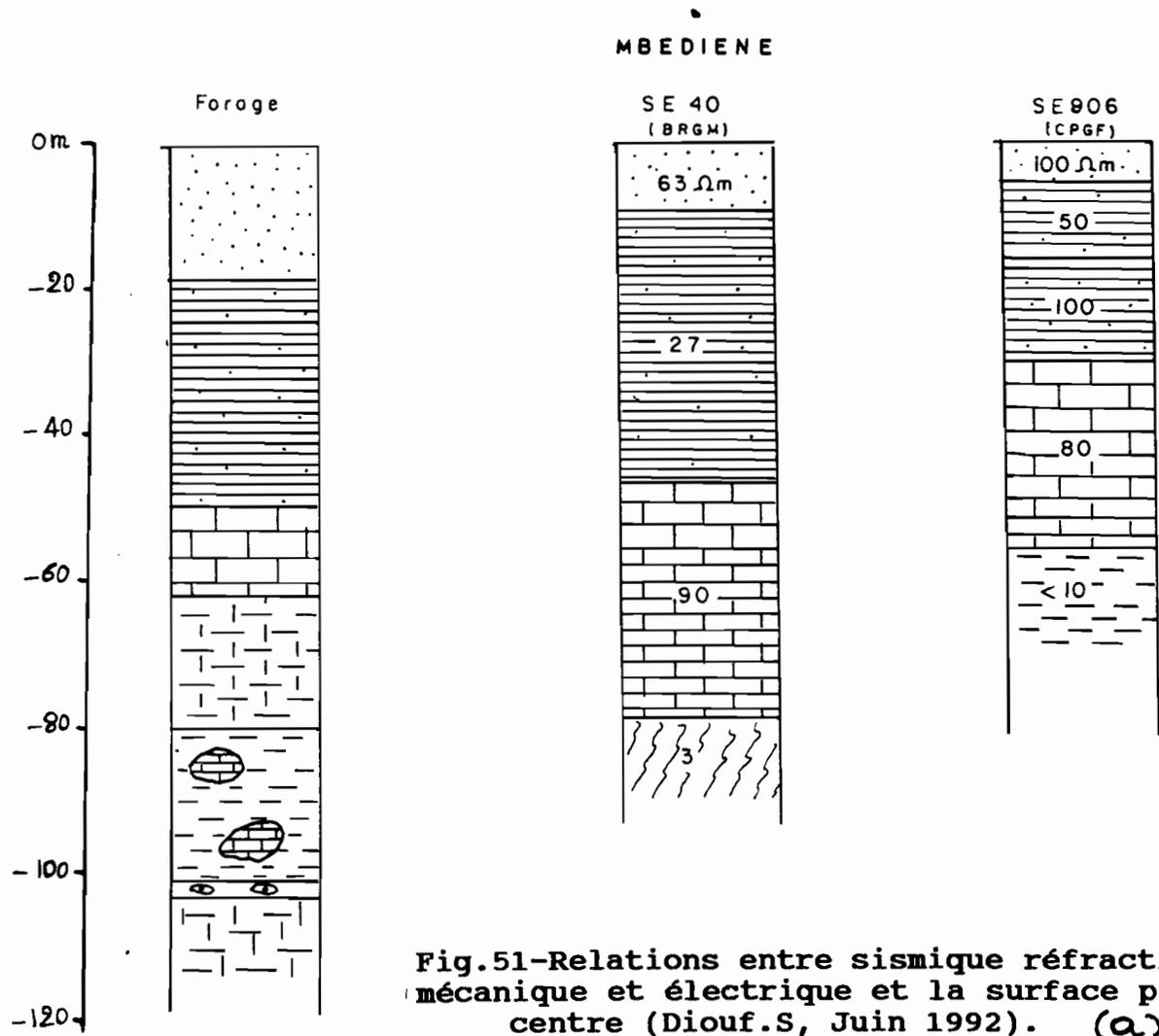


Fig.51-Relations entre sismique réfraction, sondages mécanique et électrique et la surface piézométrique, secteur centre (Diouf.S, Juin 1992). (a.)

MERINA DIEGUE

NGUER NGUER

KHONQ YOYE

PALME O 1

CPGF 115
Electrique

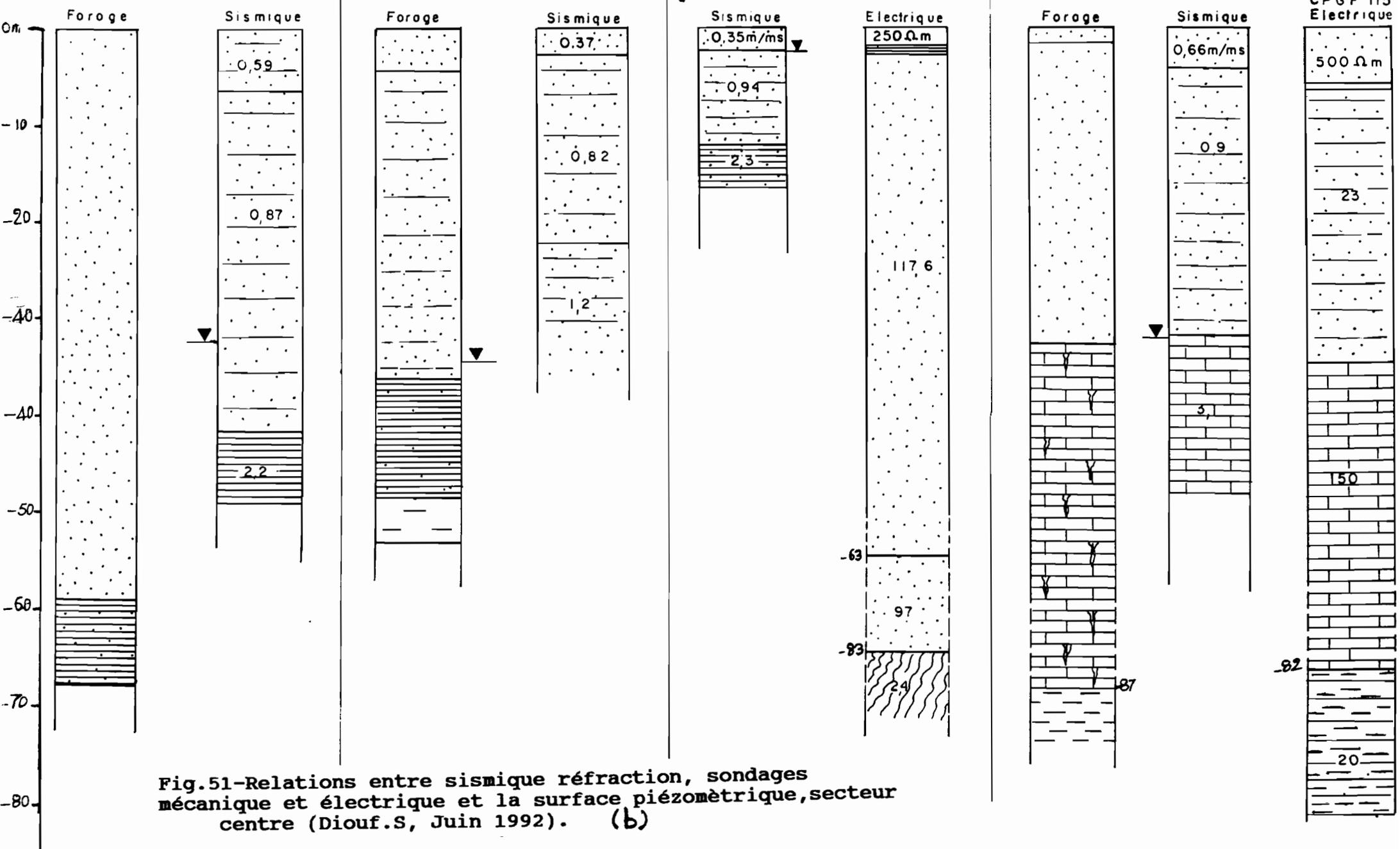


Fig.51-Relations entre sismique réfraction, sondages mécanique et électrique et la surface piézométrique, secteur centre (Diouf.S, Juin 1992). (b)

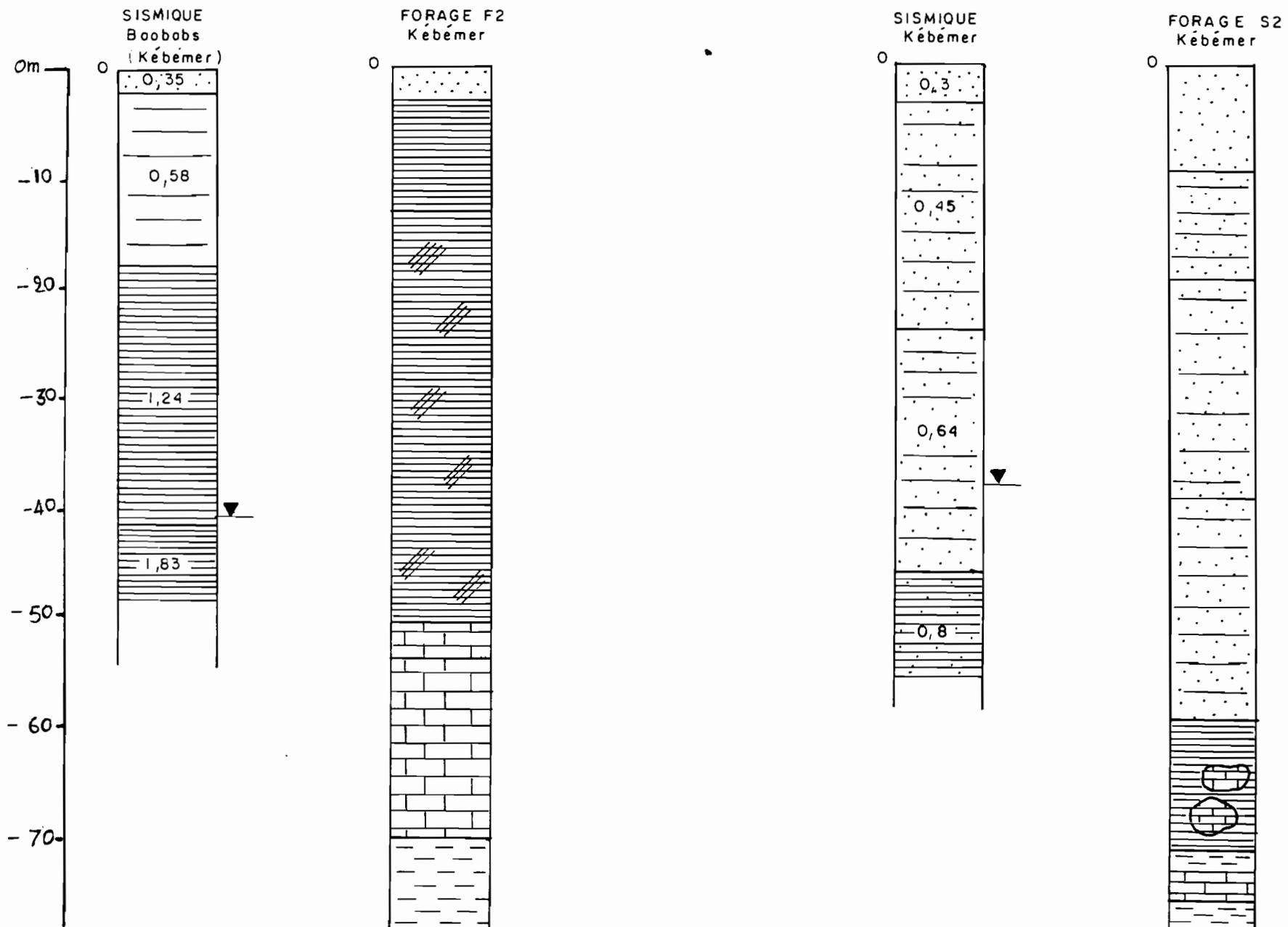


Fig.51-Relations entre sismique réfraction, sondages mécaniques et électriques et la surface piézométrique, secteur centre (Diouf.S, Juin 1992). (c)

négligeables par rapport aux sondages mécanique et électrique du B.R.G.M. (fig. 51 a).

2 - Kébémér

Les deux sondages sismiques réalisés à Kébémér notent chacun une bonne corrélation avec le sondage mécanique le plus proche (fig. 51 b).

3 - Palméo 1

Dans cette localité, les résultats géophysiques confirment avec le toit des calcaires l'importance de ces méthodes dans l'identification des différents niveaux du sous-sol (fig. 51 c).

4 - Mérina Diègue

La sismique va plus loin que le sondage mécanique en donnant des détails sur les faibles variations lithologiques du recouvrement sablo-argileux.

Les résultats de la sismique à Nguer Nguer et Khong Yoye soulignent les qualités de cette méthode dans l'identification des niveaux humides et des niveaux piézométriques.

La sismique et l'électrique réalisées Khong Yoye présentent des différences qui peuvent être dues aux variations latérales de terrains rencontrés dans cette grande dépression marécageuse.

3.2.3-3.- Secteur Sud

Les résultats géophysiques à Mékhé, Fass Boy et Tivaouane (fig. 52) confirment encore l'intérêt des méthodes géophysiques pour le choix des sites et pour la détermination des coupes prévisionnelles des forages. En effet à Mékhé et à Fass Boy le niveau phréatique est identifié par la sismique et également par l'électrique. A Fass Boy le niveau calcaire est également bien identifié.

Conclusion

L'étude des relations entre sondages mécaniques et études géophysiques montrent que si la sismique marteau permet de donner les détails lithologiques des couches superficielles et sans ambiguïté, la surface de contact sables/calcaires, l'électrique, explore des niveaux plus profonds en l'occurrence le substratum marno-argileux, et le toit de la nappe salée.

L'électrique parvient aussi à détecter les minces lames d'eau saumâtre perchées au-dessus de la nappe d'eau douce que l'on rencontre dans certains secteurs des Niayes comme à l'Est de MBoro (fig. 28) et au Nord de Potou (fig. 35).

Les sondages sismiques effectués à Khong Yoye, Palméo 1, Kébémér, Léona, Mpal, Fass Boye et Mékhé, ont permis de constater que la vitesse de propagation de l'onde sismique

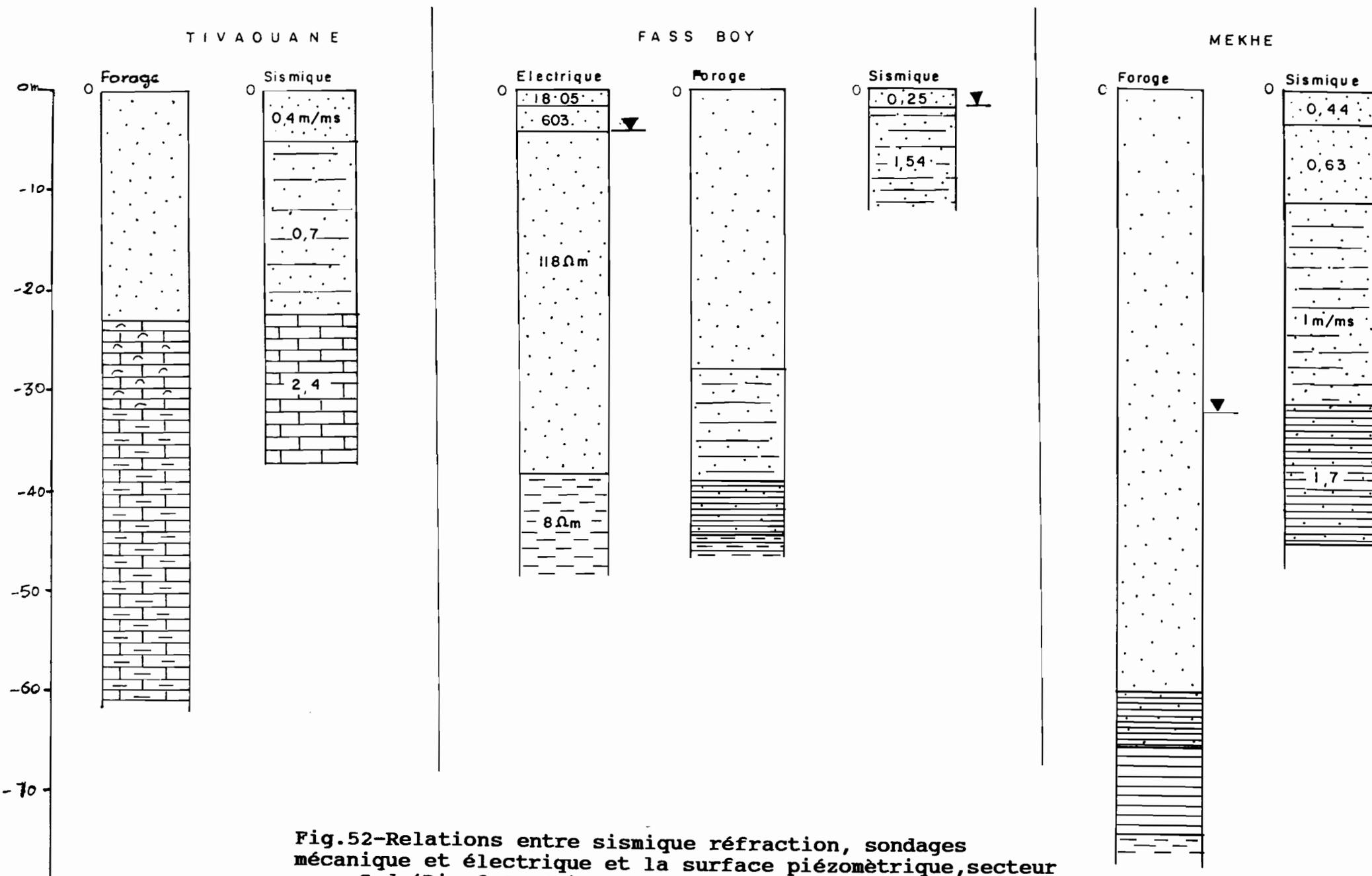


Fig.52-Relations entre sismique réfraction, sondages mécanique et électrique et la surface piézométrique, secteur Sud (Diouf.S, Juin 1994).

augmente dès son entrée dans la frange capillaire, c'est-à-dire l'espace humide situé entre la zone de transition et la zone saturée (fig. 53). Ce phénomène résultant de l'accroissement de la vitesse de propagation de 0.33 à 1.4 km/s entre l'air et l'eau.

Donc la sismique peut souvent mieux que l'électrique, renseigner dans certains cas sur la surface piézométrique locale.

Cette étude permet de voir le caractère enrichissant d'une étude pluriparamétrique, associant l'électrique à la sismique réfraction.

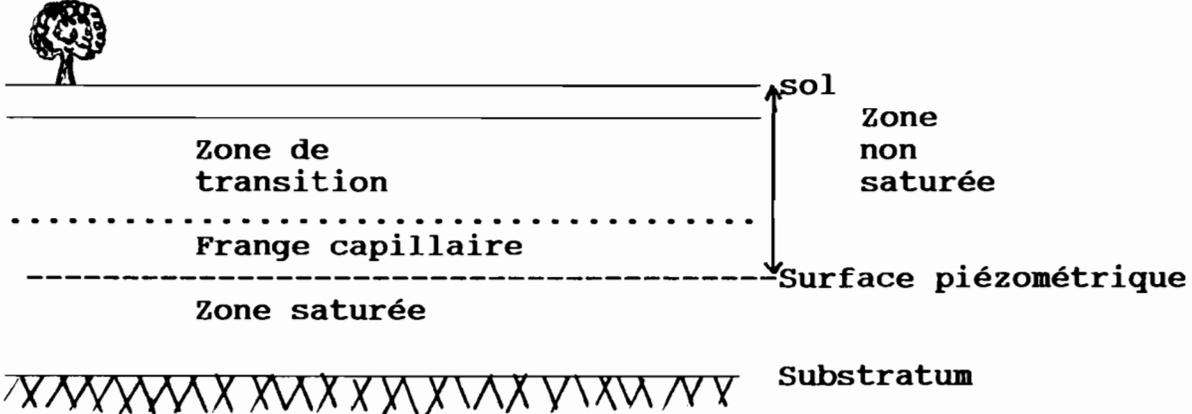


Fig. 53 - Zonation verticale de l'humidité sous le sol

Ces méthodes peu coûteuses comparées aux sondages mécaniques, constituent aujourd'hui des éléments efficaces pour la localisation et la détermination de la structure des aquifères en général et celle du littoral nord en particulier.

CHAPITRE 4 - ANALYSE GLOBALE PAR UN PROGRAMME CARTOGRAPHIQUE DES PARAMETRES

Les données obtenues ont fait l'objet de traitement informatique notamment cartographique. C'est le logiciel Surfer qui a été utilisé

4.1.- Présentation du logiciel Surfer

Le logiciel "Surfer" crée des graphiques à deux et trois dimensions. Il est constitué de 5 programmes de base :

1 - GRID

Le programme Grid crée une grille régulière à partir de données irrégulièrement réparties dans l'espace.

Le fichier d'entrée : fichier ASCII de données (XYZ) créé à partir d'un tableur (Multiplan, Supercalc) ou sous Surfer (fichier.DAT).

Le fichier de sortie : fichier GRD utilisé par les programmes Topo et Surf en entrée.

2 - TOPO

Le programme Topo crée une carte d'isovaleurs en 2 dimensions.

Le fichier d'entrée : fichier.GRD.

Le fichier de sortie : fichier.PLT utilisé par les programme View et Plot en entrée.

3 - SURF

Le programme Surf crée une surface en 3 dimensions.

Le fichier d'entrée : fichier.GRD.

3 - VIEW

Le programme View permet de visualiser sur l'écran le fichier.PLT.

Le fichier d'entrée : fichier.PLT.

5 - PLOT

Le programme Plot permet d'effectuer les sorties sur imprimante et table traçante. Il crée un fichier.OPT à partir du fichier.PLT pour l'adapter au type de traceur ou d'imprimante choisi.

Le fichier d'entrée : fichier.PLT.

Le fichier de sortie : fichier.OPT.

Surfer, logiciel de chez Golden Software, permet de réaliser des graphiques en deux et trois dimensions.

Des cartes d'isovaleurs, de répartition et les bloc-diagrammes correspondants peuvent être réalisés à partir de points de mesure irrégulièrement répartis dans l'espace.

Avec les coordonnées des points (XYZ), le module GRID crée une grille régulière qui sert de canevas à l'élaboration de graphiques sous les modules TOPO et SURF.

Il offre la possibilité de choisir la méthode d'interpolation la mieux adaptée au mode de répartition des points afin d'obtenir la représentation la plus proche possible de la réalité. Le graphe peut être visualisé sur l'écran à tout moment. On peut agrandir et diminuer l'échelle des graphes, lisser des surfaces, effectuer des rotations de bloc - diagramme, choisir les graduations sur les axes, annoter des graphes, choisir vos polices de caractères. Il est également possible de réaliser des zooms sur certaines parties du graphe avec le module VIEW. Enfin, on peut calculer le volume compris entre deux surfaces.

Surfer accepte des fichiers sous la forme XYZ de format ASCII ou de format 123 de Lotus. Les données peuvent également être rentrées sous Surfer dans sa feuille de calcul. Il crée des fichiers en format binaire et ASCII facilement exportables vers d'autres logiciels graphiques.

4.2.- Etablissement des fichiers paramètres

Etape importante et délicate, car la moindre erreur sur les coordonnées géographiques d'un point ou sur la valeur du paramètre étudié, conduit à l'élaboration d'une carte avec des courbes d'isovaleurs non conformes à la réalité du terrain.

On commence toujours par la création d'un fichier général qui s'établit comme suit :

N° sondage	X	Y	Z	Toit substr	Base calc	Toit calc	Toit argil	Base argil	Niveau statique
1									
2									
3									

On fait à partir de là des sous-fichiers à trois colonnes comprenant X, Y et le paramètre étudié.

Il faut noter la difficulté rencontrée sur le choix de la profondeur du toit de tel ou tel paramètre comme c'est le cas du substratum de la nappe. En effet dans la plupart des

secteurs d'étude, le substratum est marneux ou marno calcaires; mais au Nord-Est, on rencontre des forages crépinés au niveau des marno-calcaires (Kébé Ndeuthe, Léguet, Ndate Fall et Koul au Sud-Est de Mékhé).

Cette difficulté est aussi rencontrée pour l'établissement des cartes du toit et de la base des argiles et des calcaires lutétiens. Contrairement au substratum marneux que l'on rencontre partout au-dessous des aquifères, les calcaires et les argiles sont seulement présents à l'Est et au Sud. En outre, les argiles sont par endroit sous forme lenticulaire et discontinues.

Ces phénomènes font qu'il est très délicat de tracer des cartes du toit et base des argiles et des calcaires, car par itération, le programme créera des cartes d'isovaleurs dans l'ensemble du secteur, sans tenir compte des sites où ces formations sont absentes.

On ne peut donc dans l'élaboration des fichiers ignorer ces points ni leur donner des valeurs arbitraires de correction.

Ces constats ont donc conduit au choix de l'élaboration des cartes de l'épaisseur des argiles et des calcaires à la place de celles du toit et de la base de ces formations.

4.3.- Commentaire des cartes de synthèse

4.3.1.- Profondeur du toit du substratum marno-argileux

Le toit du substratum de la nappe se situe à des profondeurs variables (fig. 54). Il s'enfonce globalement et progressivement du Sud vers le Nord. A l'Ouest de Louga on a la dépression de Mbénguène - Ndiambou et. à l'Ouest de Kébémer, le fossé de Toundou - Ndiar Ndiar.

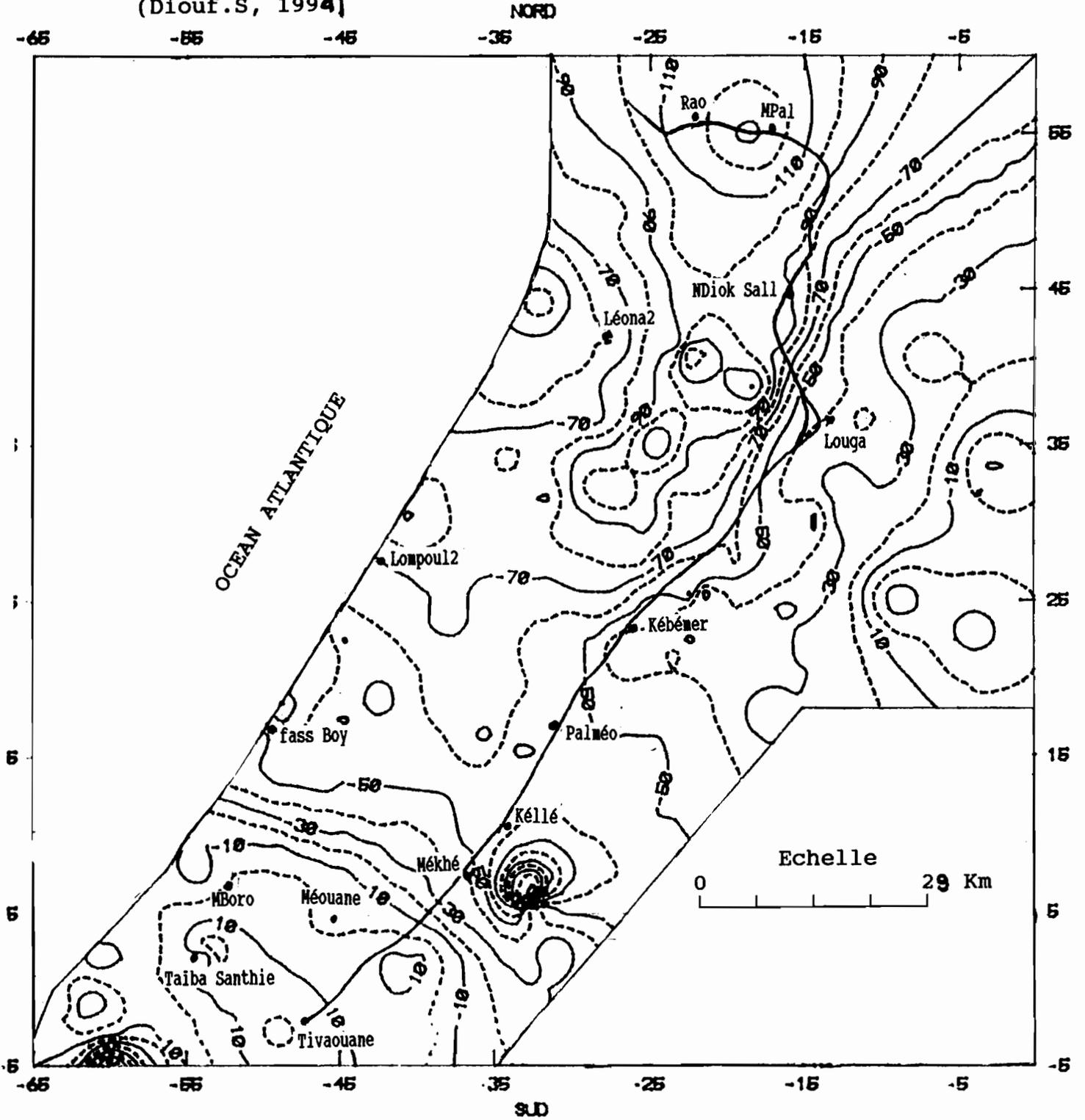
Plus au Sud, on observe une remontée en surface du substratum qui atteint des valeurs au dessus du niveau de la mer avant de replonger à l'extrême Sud-Ouest.

Dans le domaine des plateaux calcaires à l'Est, il amorce une remontée progressive devenant ainsi subaffleurant à l'Est de Louga.

Sur le prolongement Sud de la dépression Ndande-Ndougou, on observe un important effondrement du toit du substratum, maximal à Mérina Dakhar.

Cet effondrement coïncide avec la présence de deux accidents tectoniques entre Koul et Mérina Dakhar d'une part,

g.54- CARTE PROFONDEUR DU TOIT DU SUBSTRATUM MARNO-ARGILEUX
(Diouf.S, 1994)



et entre Mérina Dakhar et Mékhé d'autre part (J. Le Priol, 1985).

Faisant la comparaison avec la carte du toit du substratum marneux publiée par le B.R.G.M. en 1993 (fig. 55), on observe des similitudes, mais aussi nombre de points de discordance que l'on essayera d'élucider en prenant comme référence les coupes techniques de quelques sondages mécaniques à lithostratigraphie connue (tab. 9) et (fig. 56).

Tabl. 9 - Etude comparée des données B.R.G.M. et Diouf sur la profondeur du toit du substratum marneux (mur de l'aquifère).

Localité	X	Y	Z	Niveau	Toit /mer	
					substr (Diouf)	substr (BRGM)
				crépiné		
Mpal	1618,8	1555,0	10m	maestri	-133 m	>-40
Léona 2	1627,7	1541,7	25	55 à 84	-59	-30
Ndiakhal	1618,3	1538,6	33	69 à 75	-117	-75
Mérinadak	1632,8	1506,4	32	105à185	-152	-25
Sémelpeul	1621,0	1550,	10	98 à 108	-120	-40

* - **Au Nord**, la carte B.R.G.M. indique une tendance à la remontée du toit du substratum avec des valeurs de -40 à -30 M. Les forages de Semel Peulh et Mpal (fig. 56) montrent des niveaux aquifères jusqu'à 130 et 143 m même s'il s'agit d'une nappe salée. Ce secteur constitue le prolongement Nord de la dépression de Mbenguène.

- **A Léona 2**, le forage est crépiné au niveau des calcaires marneux à grandes nummulites entre 55 et 85 m de profondeur. Ceci écarte toute idée de considérer les calcaires marneux à grandes nummulites comme étant mur de l'aquifère.

- **Le forage de Ndiakhal**, montre jusqu'à 121 m des sables argileux en surface suivis des argiles sableuses provenant de formations démantelées de l'éocène sus-jacentes aux marnes mur de l'aquifère situés à 150 m en bas.

Donc au lieu d'un substratum à -75 m, il se situerait à -117 m au-dessous du géoïde.

- **A l'Est de Mékhé**, le forage de Mérina Dakhar est crépiné au niveau des calcaires fossilifères entre 105 et 184 m.

La carte B.R.G.M. situe le substratum à environ -25 m au-dessous du géoïde. Dans ce cas, si l'on tient compte de l'altitude, on aura la profondeur du mur par rapport au sol à : $32 \text{ m} - (-25 \text{ m}) = 57 \text{ m/sol}$.

Ainsi selon le B.R.G.M., le substratum se situerait en

ISOHYPSES DU TOIT
DU SUBSTRATUM MARNEUX
(MUR DE L'AQUIFERE)

LEGENDE

-50 Courbe isohypse et sa valeur en m

0 5 10 15 20 Km

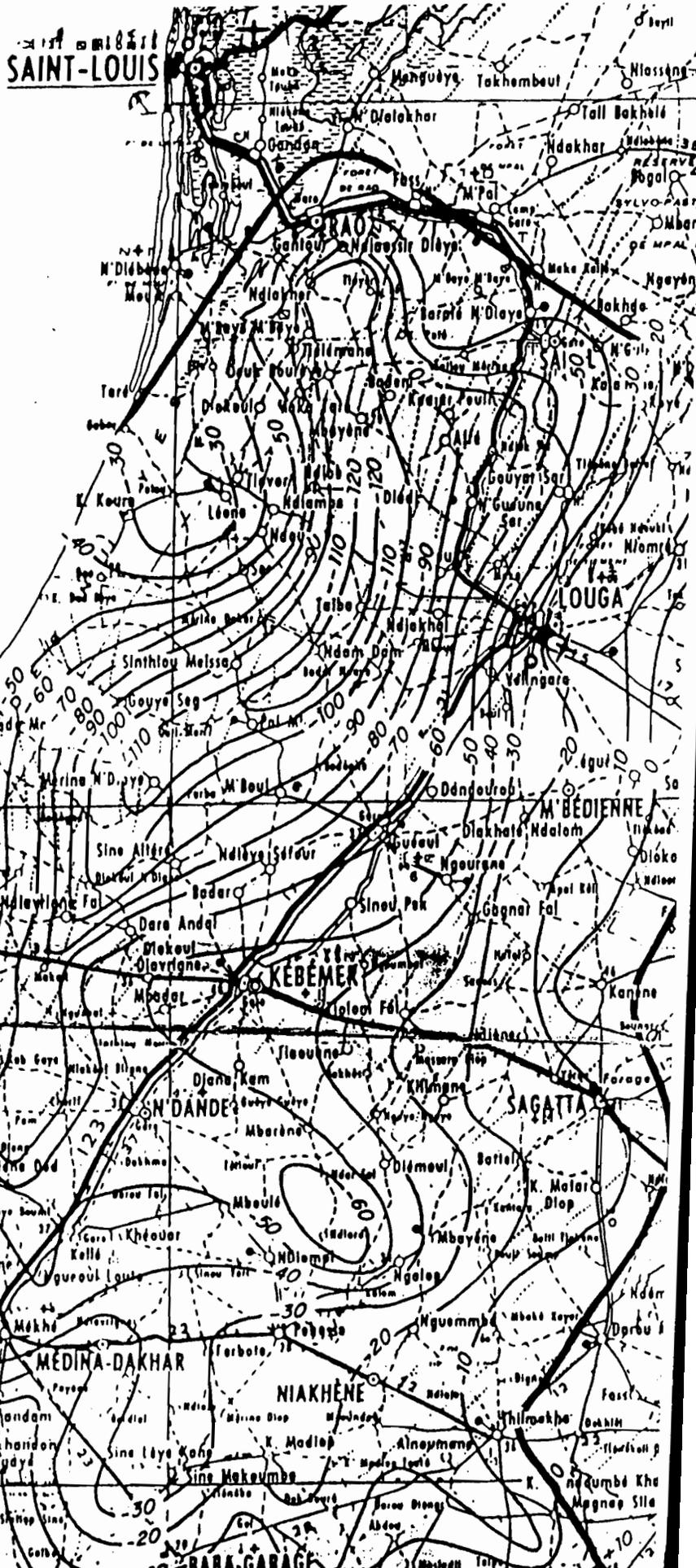


Fig.55- Isohypses du toit du substratum marneux, mur de l'aquifère (B.R.G.M).

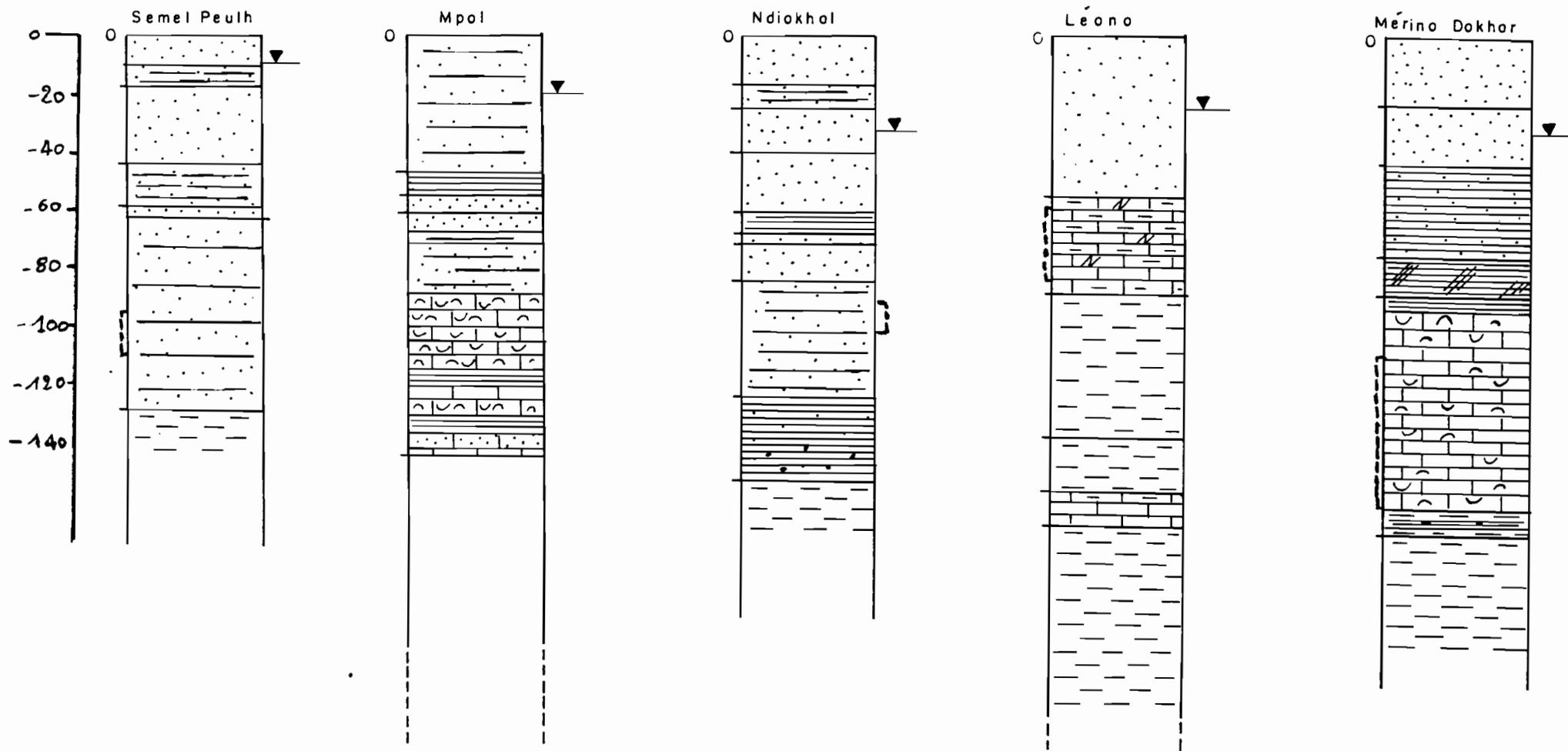


Fig.56- Logs de forages de référence.

plein dans les argiles sableuses. Cette couche ne peut pas être identifiée à un substratum, car constitue le niveau argileux intercalaire entre les sables quaternaires et les calcaires lutétiens aquifères.

- La carte du B.R.G.M. ne met pas en exergue l'existence d'une fosse subsidente établie entre Kellé et Léona ouverte vers l'océan représentant l'extrémité Sud orientale d'une dépression synclinale subsidente vers le large (R. Degallier, 1960 ; C. Monciardini, 1965 in B.R.G.M, 1967).

4.3.2.- Epaisseur des calcaires aquifères

On constate l'absence de calcaires aquifères dans le secteur centre et sur une bonne partie du Sud (fig. 57).

La nationale 4 représente par endroit, une zone de contact entre calcaires Lutétiens karstiques et sables quaternaires.

A Léona, l'épaisseur non négligeable des calcaires serait liée à la remontée de cette couche sous l'influence du dôme localisé dans cette zone.

Bien que épais, les calcaires à Mpal sont rencontrés sous un important recouvrement sableux de 84 m de puissance.

Au Sud, les niveaux calcaires paléocènes sont marneux et sous-jacents à une importante couche argileuse ou marneuse.

4.3.3.- Epaisseur des argiles

D'importantes couches d'argiles sont surtout présentes à l'Est et au Sud-Ouest. A l'Est, ces argiles sont intercalaires entre les sables quaternaires et les calcaires lutétiens karstiques ou coquillés (fig. 58).

La présence des argiles à l'Est aura pour conséquences :

- une réalimentation directe difficile de l'aquifère des calcaires par les eaux de pluies,
- une protection naturelle de l'aquifère contre la pollution et contre les pertes de charge par évapotranspiration.

Au Sud-Ouest, elles sont localisées entre les sables quaternaires et les calcaires marneux du paléocène.

Le secteur centre est caractérisé par la présence discontinue de lentilles d'argiles sableuses qui n'entravent pas la continuité hydrogéologique au sein de l'aquifère des sables.

4.3.4.- Limites latérales, nappes de sables quaternaires et calcaires lutétiens

Le long de la nationale 4, l'isopaque 15 m des calcaires

Fig.57- CARTE DE L'ÉPAISSEUR DES CALCAIRES (Diouf.S, 1994)

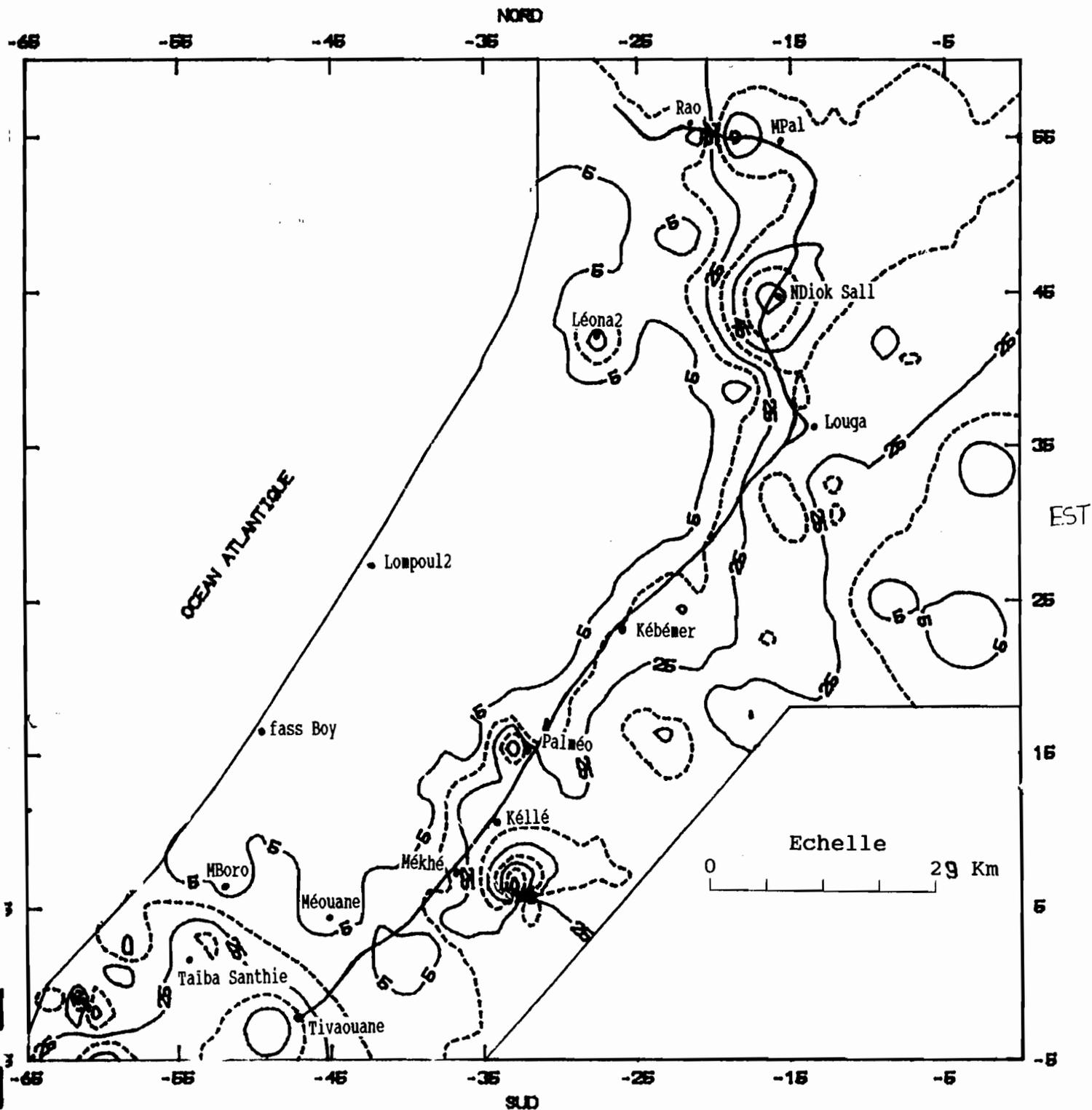
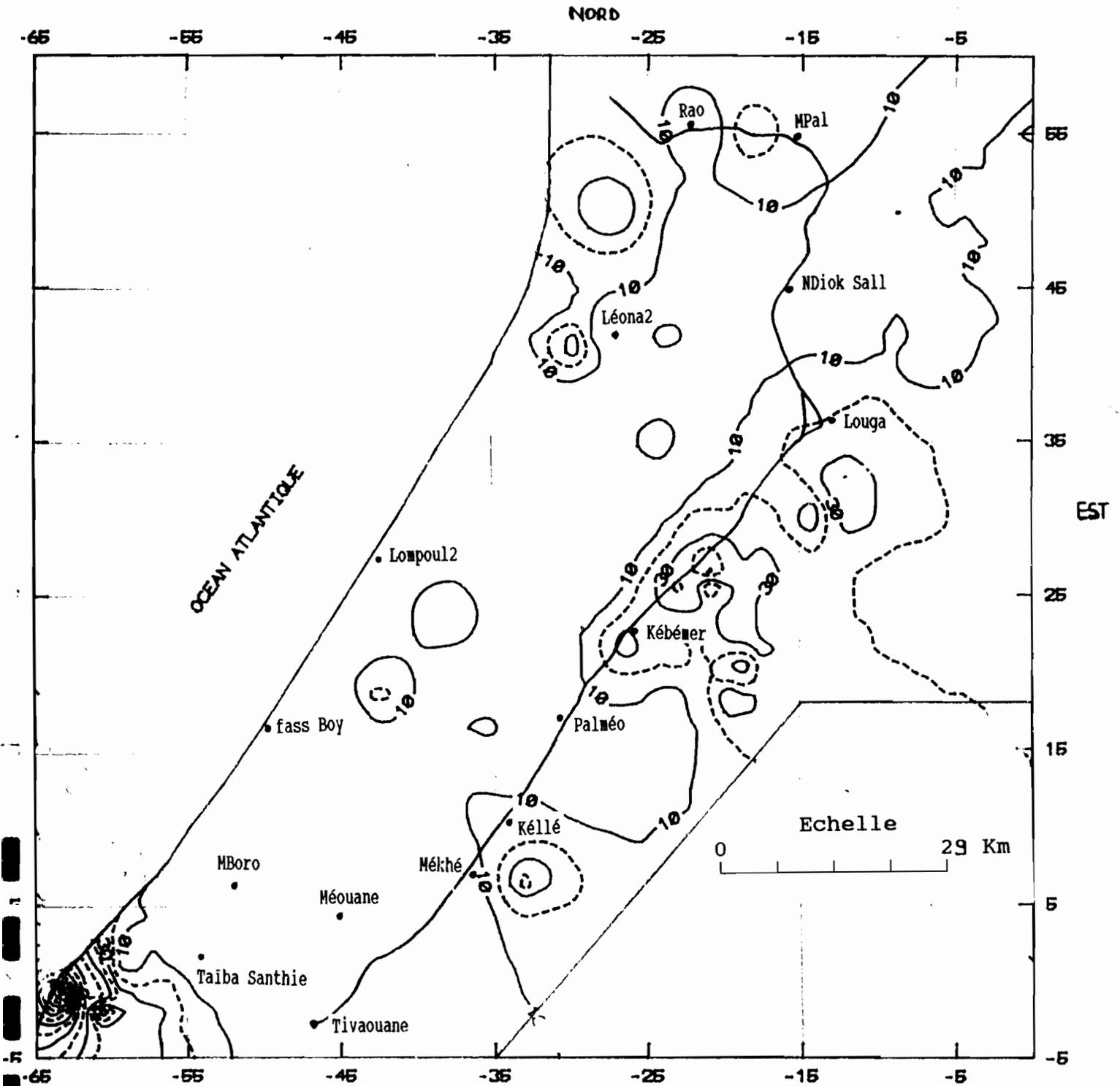


Fig. 58- CARTE DE L'ÉPAISSEUR DES ARGILES (Diouf.S, 1994)



représente la limite entre la nappe des sables quaternaires à l'Ouest et des calcaires lutétiens à l'Est (fig. 59). Sur cette ^{et} axe, deux incursions sableuses sont observées au niveau de N'dande et Guéoul. Ces incursions sont mises en exergue sur la coupe B.R.G.M. qui a néanmoins surestimé l'épaisseur des calcaires (fig. 60).

Ces incursions seraient le résultat d'un phénomène de dissolution chimique des calcaires au cours des transgressions et régressions marines postérieures à leur mise en place.

Au Sud de Mékhé, les marno-calcaires font leur apparition et se prolongent dans la zone de Taïba Ndiaye et Tivaouane.

A l'Est de Louga, la zone de remontée des marno-calcaires et marnes, constitue la limite orientale de la nappe des calcaires lutétiens. Au delà de cette limite, la presque totalité des forages rencontrés ont leurs crépines installées au niveau des sables maestrichtiens entre 250 à 350 m de profondeur.

Associées aux logs de forages le long de profils définis, les cartes permettent d'établir des coupes géologiques dans diverses directions, (annexes 3) montrant ainsi la structure générale des différentes formations.

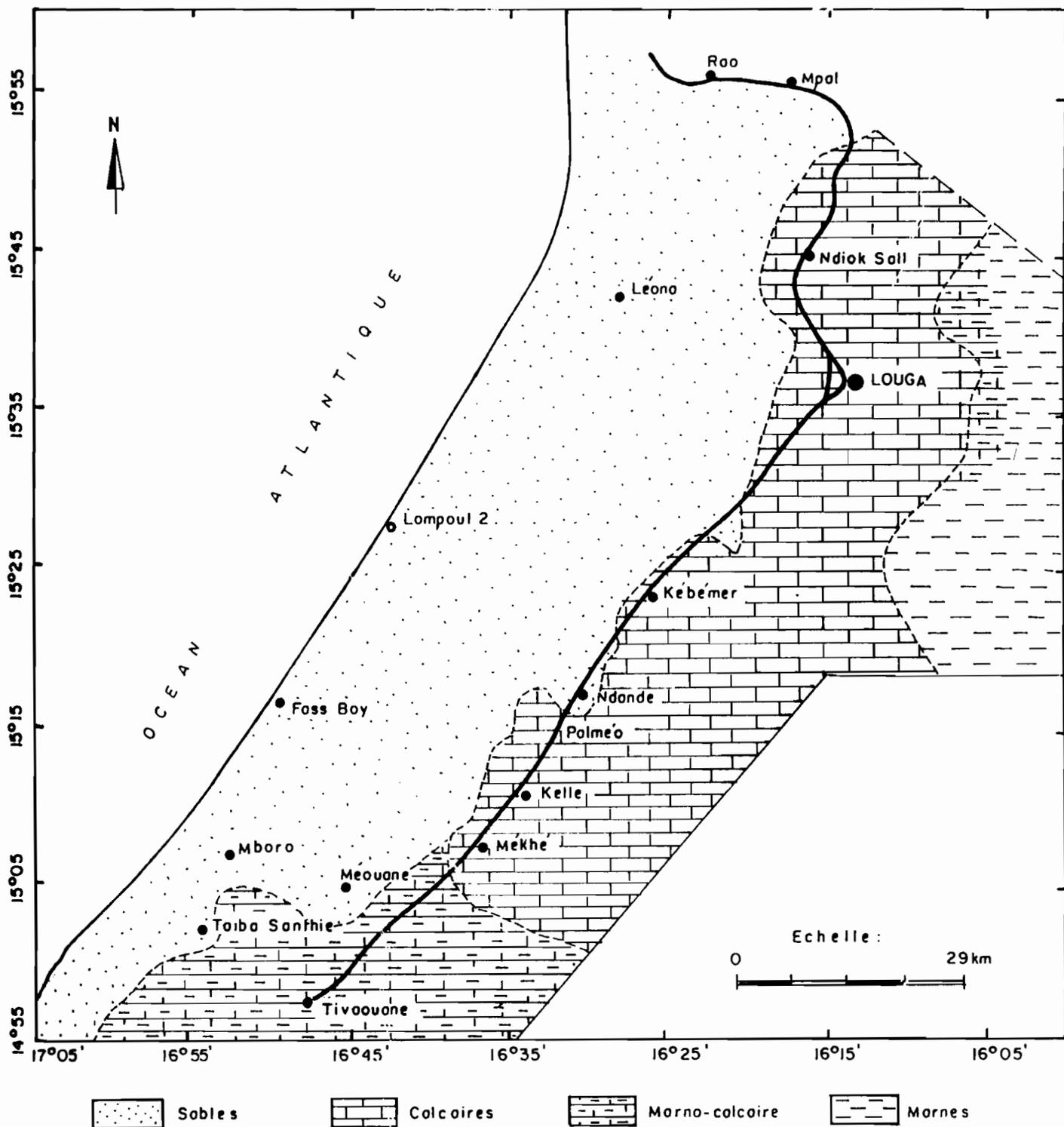


Fig.59- Limites d'extention latérale des aquifères (Diouf.S, 1994).

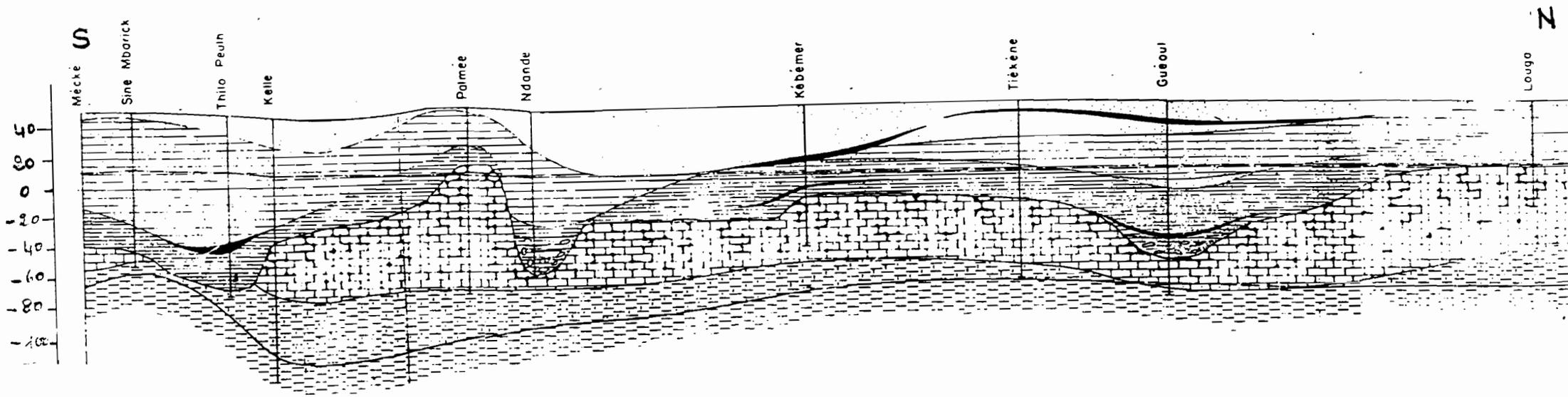


Fig.60- coupe géologique Mékhé-Louga (B.R.G.M).

CONCLUSION GENERALE

Les sondages électrique et sismique effectués dans la région de la grande côte, montrent de haut en bas les formations suivantes :

- sables,
- argiles,
- calcaires,
- marnes.

La présence de nappes salées est le plus souvent signalée.

L'épaisseur des assises est variable selon les secteurs.

Ainsi une puissante série de sables quaternaires occupe le centre et le nord, tandis que l'Est et le Sud sont marqués par d'importants bancs calcaires surmontés respectivement par d'épaisses couches argileuses et marneuses.

La méthode de prospection électrique a pu atteindre les résultats attendus sur l'étude de la géométrie du réservoir des aquifères du littoral Nord.

* Sur le plan géologique, l'Électrique a déterminé la nature et l'épaisseur des couches dans des secteurs dépourvus de sondages mécaniques. L'électrique met en évidence :

- la remontée du substratum marneux dans le secteur de Mboro-Taïba,

- des lacunes ainsi que des discontinuités au niveau des formations calcaires,

- un enfoncement du substratum dans certains secteurs côtiers, confirmant ainsi l'existence d'une fosse subsidente mise en évidence par R. Degallier, 1960 ; C. Monciardini, 1965.

* Sur le plan hydrogéologique, l'Électrique a montré l'existence de nappes salées rencontrées en particulier à de faibles profondeurs au nord.

Par l'importance de l'épaisseur de l'aquifère des sables à proximité de la côte, l'électrique montre que la présence des eaux salées en profondeur dans le secteur d'étude, n'est pas due à l'évolution actuelle du biseau salé.

On peut aussi par méthode électrique, mettre en évidence des zones isolées de nappes très minces d'eau saumâtre au-dessus de nappes d'eau douce.

Mais vue l'étendue des invasions salées, une couverture d'ensemble de la zone par prospection électrique permettrait d'établir :

- une carte du toit de la nappe salée, qui est dans ce cas plus significative que la carte du toit du substratum marno-argileux ;

- une carte des résistivités apparentes de la nappe pour une profondeur donnée .

- une carte des résistivités transversales pour délimiter les zones favorables à contenir de l'eau douce.

Les sondages de sismique marteau, malgré les faibles profondeurs d'investigation, permettent de délimiter de façon précise les niveaux des formations sableuses, argileuses et de mettre en évidence le toit des calcaires. Lorsque l'énergie est suffisante, la sismique permet également une bonne identification du niveau phréatique.

L'étude comparative des méthodes indirecte et mécanique, confirme la grande fiabilité de la géophysique qui permet à moindre coût d'obtenir des données qualitative et quantitative sur le réservoir des aquifères.

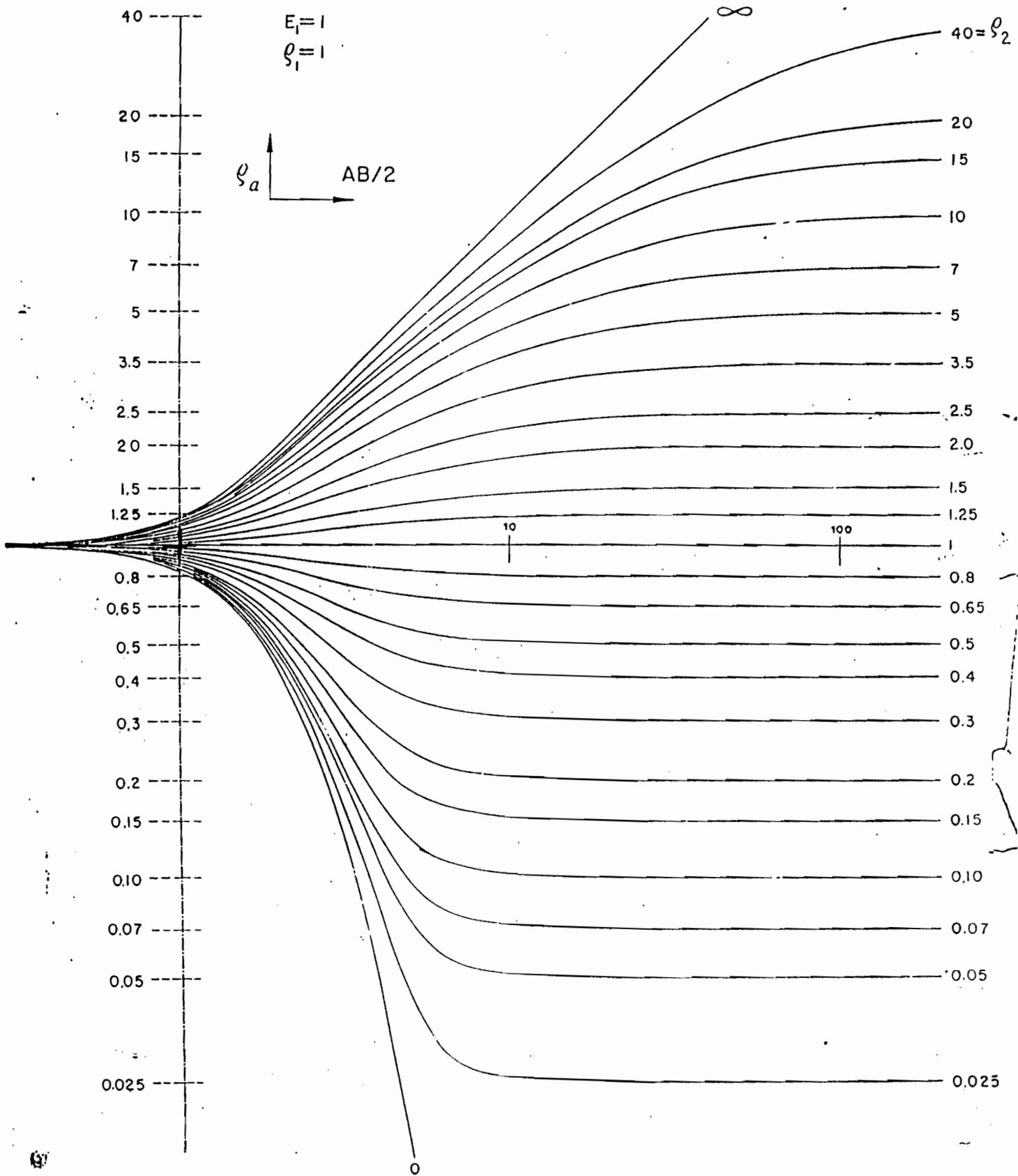
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTIER, J.L., (1971) - Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. *Masson et Cie, paris, 1971. 277 p.*
- BORD NA MONA., (1983) - Rapport du chantier pilote à Touba Ndiaye. Dublin. Compagnie des Tourbières du Sénégal.
- B.R.G.M., (1962) - Carte géologique du Sénégal. Echelle 1/500.000° - 4 feuilles. *Service des Mines et de la Géologie, Dakar. 36 p.*
- B.R.G.M., (1967 b) - Notice explicative de la carte géologique de Louga. 1/200.000°. *Service des Mines et de la géologie, Dakar. 30 p.*
- B.R.G.M., (Juin 1987) - Etude des ressources en eau souterraine du Sénégal. *Rapport campagne de prospection géophysique. 70 p + annexes.*
- B.R.G.M., (1992) - Réévaluation de la ressource en eau du littoral Nord. Synthèse des données. Modification hydrodynamique et simulations prévisionnelles. *Service sol et sous-sol. 54 p + annexes.*
- C.P.G.F., (1977) - Etude de l'amélioration en eau de 7 centres de l'intérieur. *Etude Géophysique. 20 p.*
- C.P.G.F., (1977) - Renforcement de l'alimentation en eau potable de la région de Dakar. Méouane - Sakal. *Etude Géophysique. Projet PNUD - OMS - SEN 77/04.*
- C.P.G.F., (Février-Mars 1978) - Amélioration de l'alimentation en eau potable de Dakar. *Etude Géophysique de la région du Lac Tanma. Rapport projet PNUD - OMS - SEN 77/11. 13p.*
- DEGALLIER, R., (1956) - Hydrogéologie de la feuille de Louga au 1/200.000°. *Rapport inédit. Arch. Serv. Géol. et Prosp. Minière AOF, Dakar.*
- DEGALLIER, R., (1959) - Questions actuelles d'hydrogéologie en Afrique occidentale et méthodes d'études. *Rapport B.R.G.M. 61 p.*
- DEGALLIER, R., (1962) - Hydrogéologie du Ferlo septentrional. *Mém B.R.G.M., n°19. 44 p.*
- DIALLO, M., (1989) - Le Sénégal géographie physique, humaine économique. *Etude régionale. EDICEF.*
- DIENG, Babacar., (1987) - paléohydrologie et hydrogéologie quantitatives du bassin sédimentaire sénégalais. Essai d'explication des anomalies piézométriques observées. *Thèse. 3e cycle. Ecole normale supérieure des mines de Paris, 172 p.*
- FALL, M., (1986) - Environnements sédimentaires quaternaires et

- actuels des tourbières de la grande côte du Sénégal. *Thèse 3e cycle UCAD, 182 p.*
- GAYE, C.B., (1990) - Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évaporatoire par les aquifères libres sous climat semi aride. Nord Sénégal. *Thèse Doctorat d'Etat UCAD, 245 p + annexes.*
- HAMEH, P.M., (1965) - Géologie du gisement. Compagnie Sénégalaise des Phosphates de Taïba. *Rapp ined., Paris.*
- HUOT, G., MATHIEZ J.P., (1966) - Prospection Géophysique et recherche d'eaux souterraines. Exemple d'application en Afrique Occidentale, 154 p.
- KOUSSOUBE, Y., (1992) - Application de la géophysique (électrique) à l'étude des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal. Nord-Guers, Dagana, Bas-Ferlo. *Mem.D.E.A., Fac. Sc. Dept. Geol, UCAD- Dakar, 75 p.*
- LE PRIOL, J et DIENG, B., (1985) - Synthèse hydrographique du Sénégal 1984 - Direction des études hydrauliques N° 01/85/MH/DEH. 77 p.
- MEYER DE STADELHOFEN, C., (1991) - Application de la Géophysique aux recherches d'eau. *Lavoisier Paris, 183 p.*
- MICHEL, P., (1956) - Rapport préliminaire sur la géologie, la morphologie, l'hydrologie et la pédologie de la région des Niayes, de Cayar à l'embouchure du Sénégal. *Bull. M.A.S., n° 56, (2 fax.) Saint Louis. 38 p.*
- NDIAYE, T., (1991) - Mise en oeuvre de Méthodes géophysiques pour la prospection de graveleux latéritiques. *Mém. Ingénieur, Fac. Sci. IST, UCAD - Dakar, 102 p.*
- O.M.S., (1974) - Etudes des ressources en eau souterraine du littoral Nord entre Cayar et Saint-Louis. *Projet Sénégal PIP. 01, 70 pp + annexes.*
- PUTALLAZ, J., (1962) - Hydrogéologie de la région des Niayes. *Rapp. inéd. B.R.G.M. Dak. 62-A-12 (2 fax.), 37 p.*
- TESSIER, F., (1954) - Notice explicative de la feuille de Thiès - Ouest au 1/200.000°. *D.F.M.G. A.O.F, (inedit). 86p.*
- TESSIER, F., (1950-1952) - Contribution à la stratigraphie et à la paléontologie de la partie Ouest du Sénégal (Crétacé et Tertiaire). *Thèse Aix-Marseille - Bull Dir. Mines A.O.F, n°14 (t1), 269 p.*
- TOGUEYENI, O., (1986) - Essai de prospection par sondages électriques appliquée à l'étude d'aquifères du Sénégal soumis à des invasions marines actuelles ou récentes (Ferlo, Tanma, Nianing). *Mém. Ingénieur, Fac. Sc. IST, UCAD - Dakar, 65 p.*

ANNEXE I

- An1-1a : Abaque à deux terrains.
- An1-1b, c : Abaques auxiliaires.
- An1-2 : Programme pour le calcul de l'épaisseur des couches en sismique réfraction.
- An1-3a, b, c : Courbes de sondages électriques ,secteur Nord (B.R.G.H)
- An1-4a : Courbes de sondages électriques ,secteur Nord (Diouf).
- An1-4b : Courbes de sondages électriques ,secteur centre (Diouf).
- An1-4c : Courbes de sondages électriques ,secteur Sud (Diouf).



Anl-1a : Abaque à deux terrains.

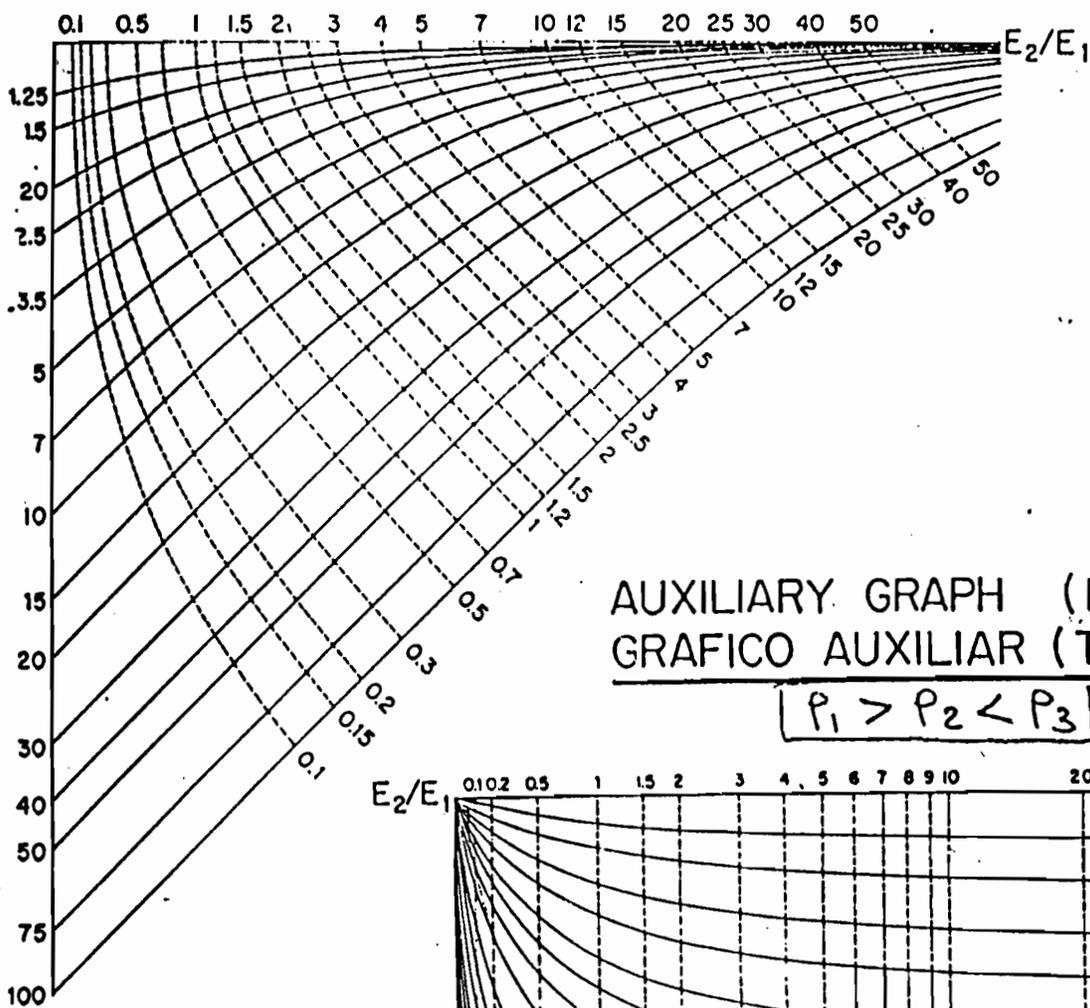
ORELLANA-MOONEY
 MASTER CURVES FOR V.E.S.
 CURVAS PATRON PARA SEV.

TWO - LAYER CURVES - CURVAS DE DOS CAPAS

AUXILIARY GRAPH (A-TYPE)
 GRAFICO AUXILIAR (TIPO-A)

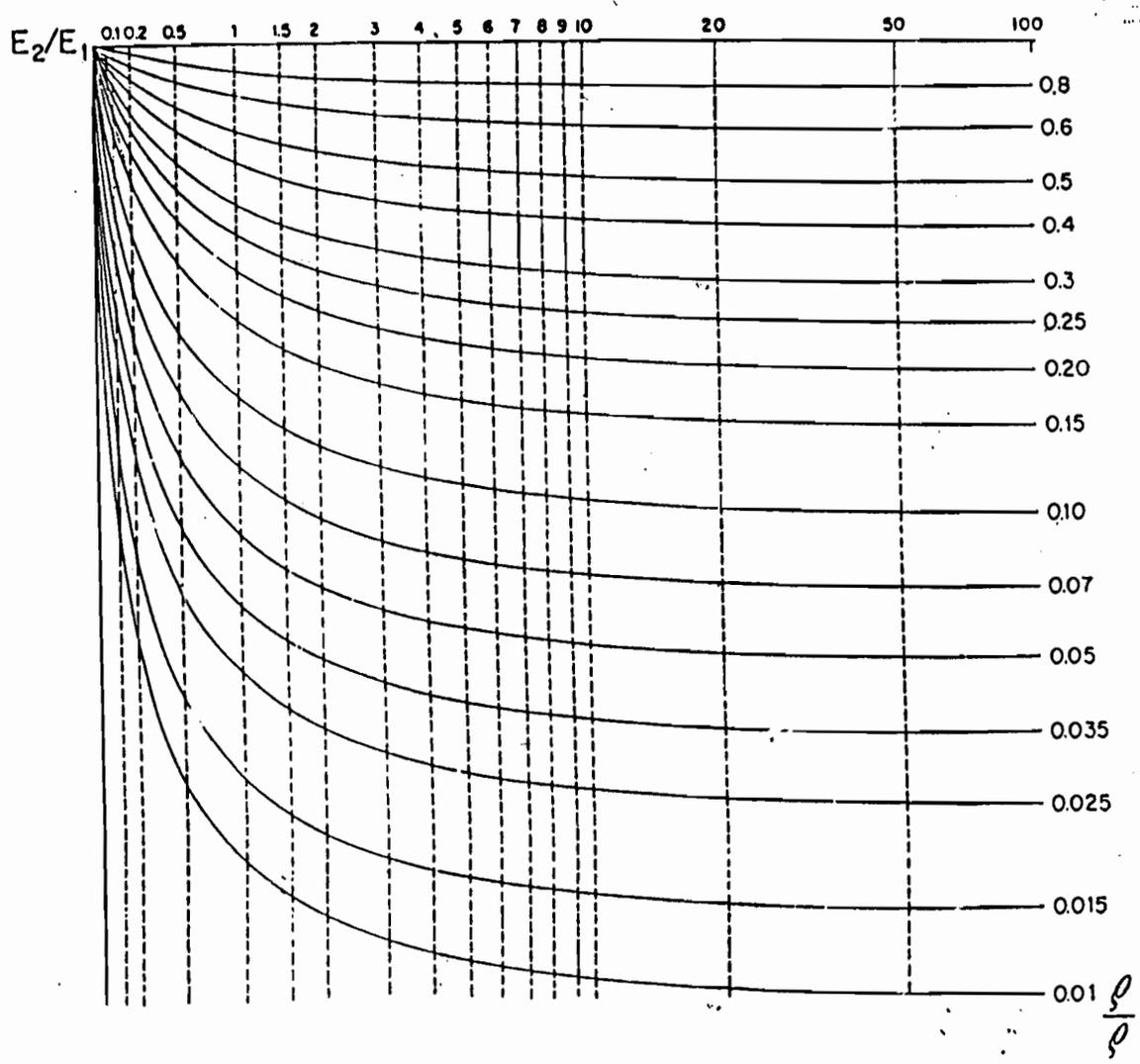
$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

SHEET-B
 LAMINA-B



AUXILIARY GRAPH (H-TYPE)
 GRAFICO AUXILIAR (TIPO-H)

$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$

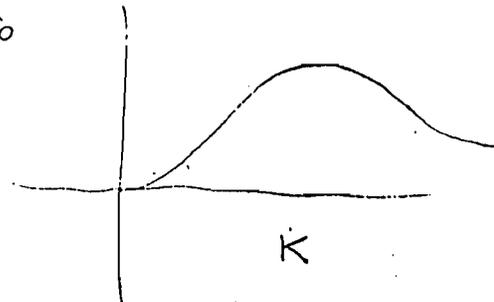
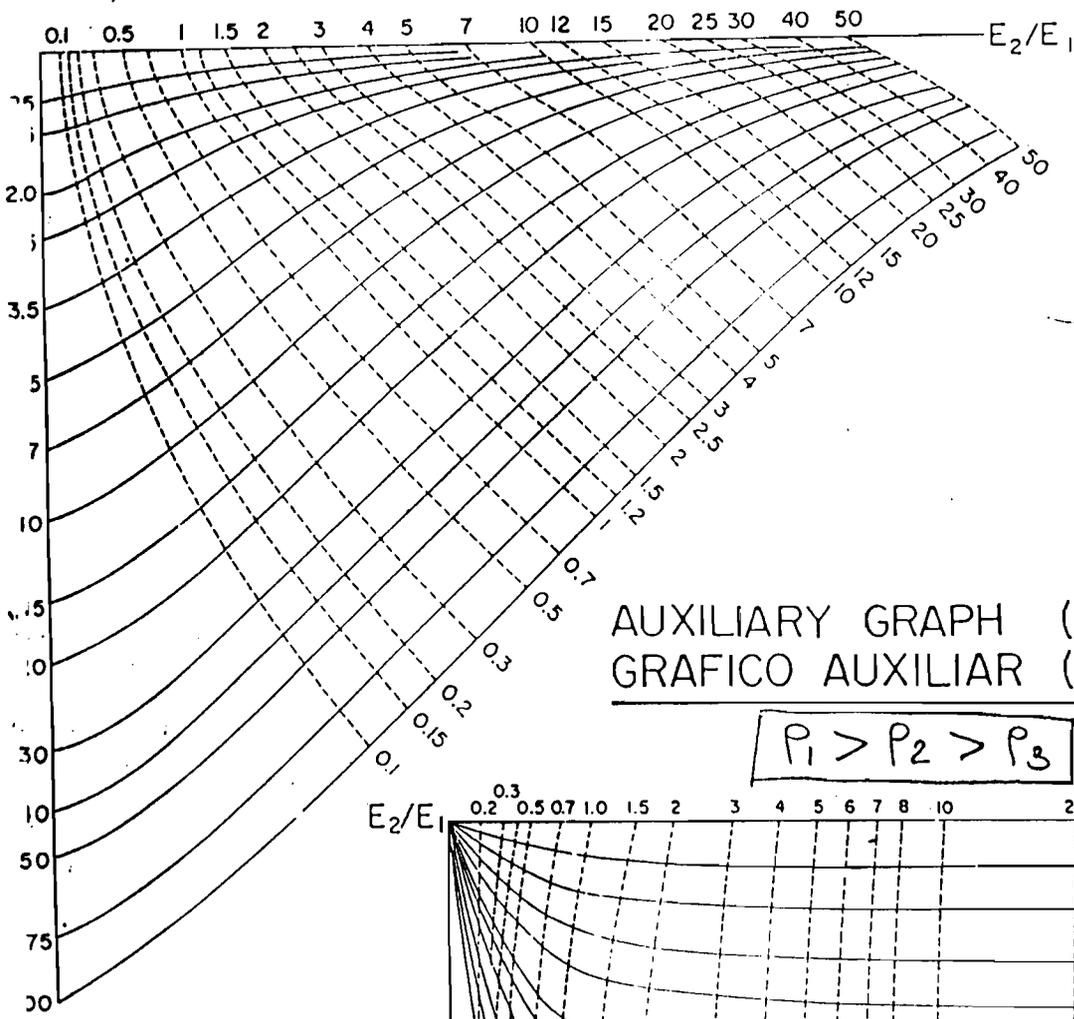


(b)

AUXILIARY GRAPH (K-TYPE)
 GRAFICO AUXILIAR (TIPO-K)

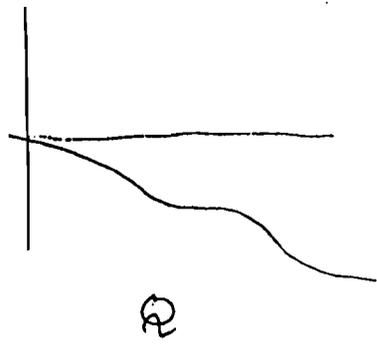
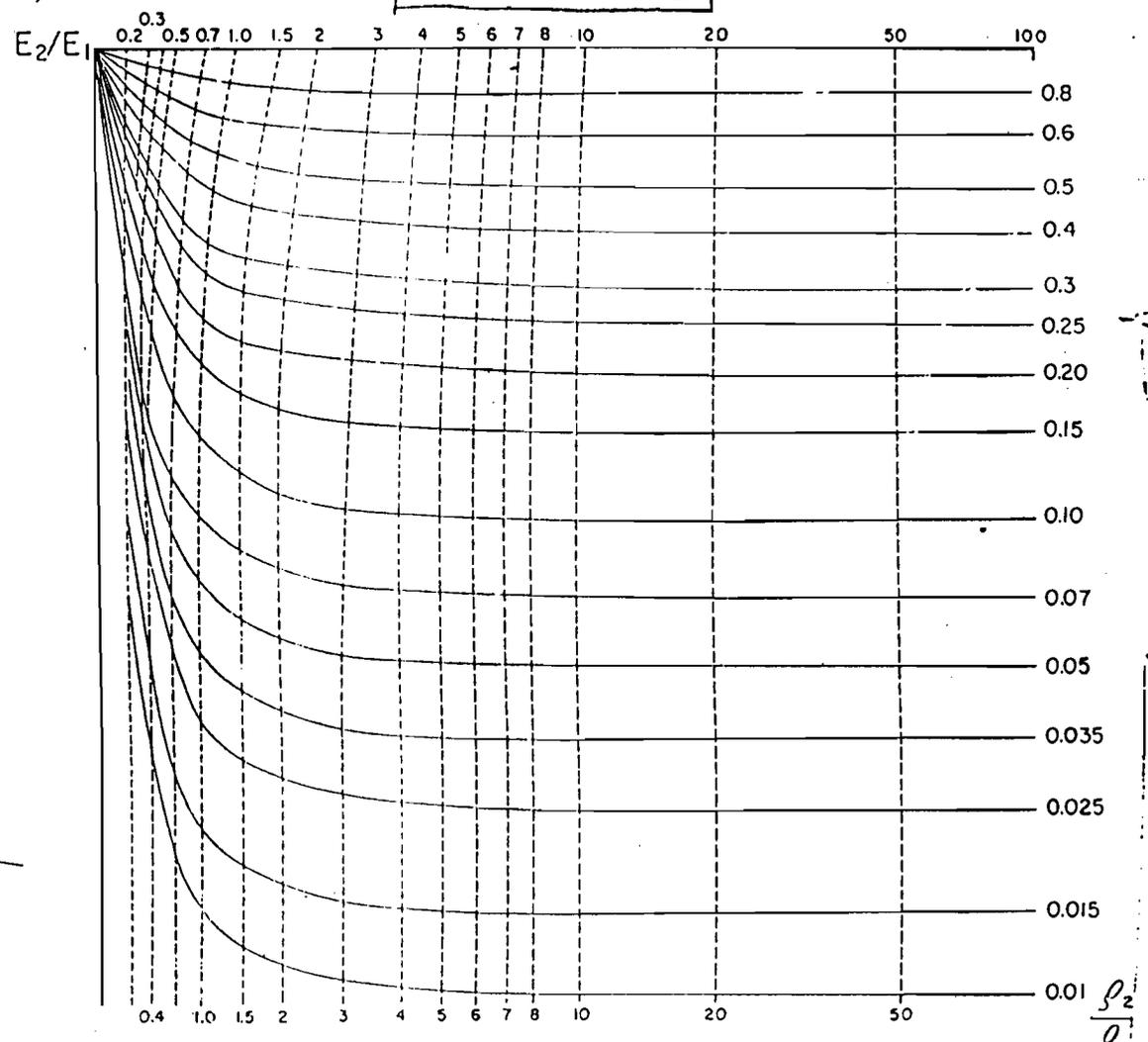
$$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$$

SHEET - A
 LAMINA - A



AUXILIARY GRAPH (Q-TYPE)
 GRAFICO AUXILIAR (TIPO-Q)

$$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$$

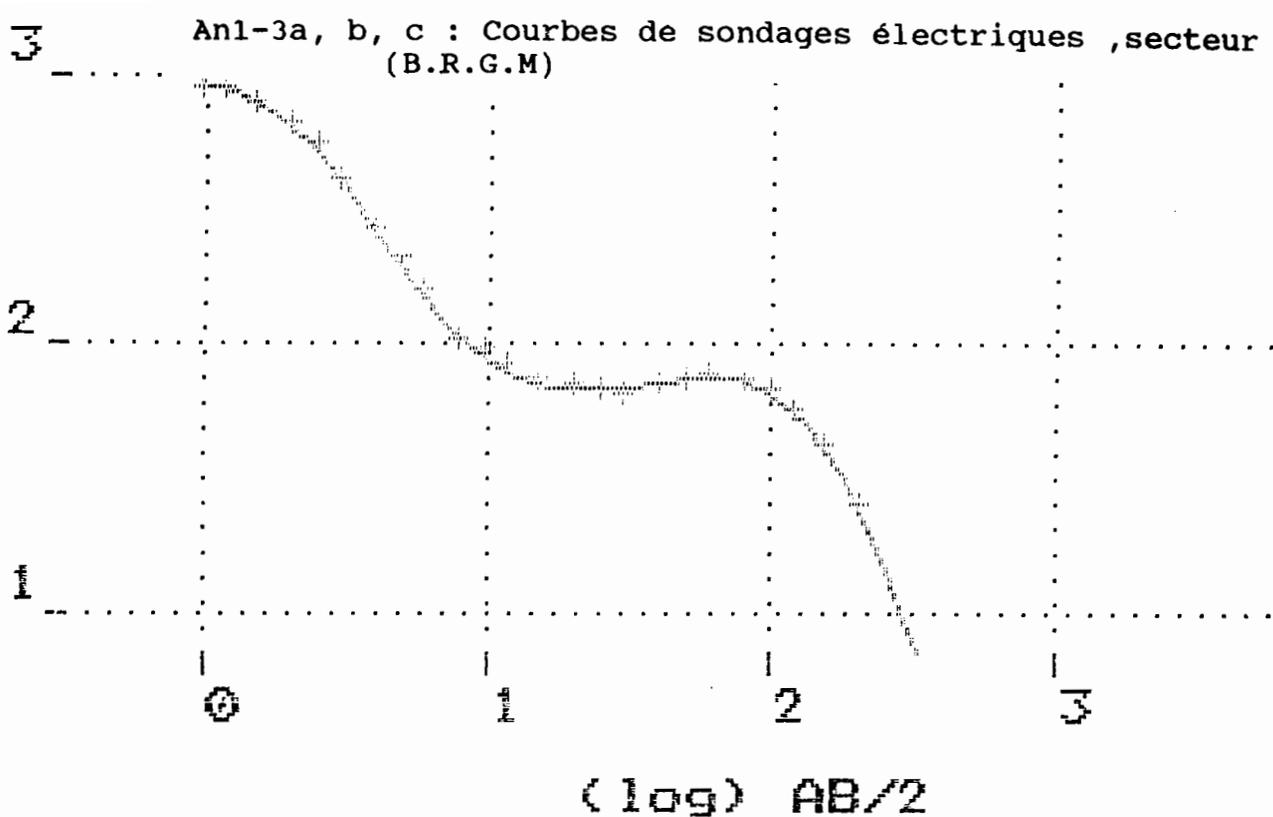


(c)

FLBLB	-	CSH	
STO8	RCL6	RCL7	
RCL1	RCL.4	+	
STO.1	*	RCL.4	
RCL4	-	:	
STO.2	RCL.5	GRTN	I1 = 2H1COS /V1
:	:	FLBL1	
GBS1	GRTN	STO.6	
STO.3	*FLBLA	G1/SIN	V1 STO1
RCL2	STO7	COS	V2 STO2
STO.1	RCL1	S'TO0	V3 STO3
RCL4	STO.1	RCL.6	V4 STO4
STO.2	RCL3	:	H1 STO5
:	STO.2	1/X	H2 STO6
GBS1	:	RCL.2	I2 A----> H2
STO.4	GBS1	:	I3 B----> H3
RCL3	STO.3	CHS	
STO.1	RCL2	RCL0	(MODE USER)
RCL4	STO.1	RCL.1	
STO.2	RCL3	*	
:	STO.2	1/X	
GBS1	:	+	
STO.5	GBS1	2	
RCL8	STO.4	*	
RCL5	RCL.3	GRTN	
RCL.3	RCL5		
*	*		

**ANNEXE 1-2 PROGRAMME UTILISE POUR LE CALCUL DE L'EPAISSEUR
DES COUCHES EN SISMIQUE REFRACTION**

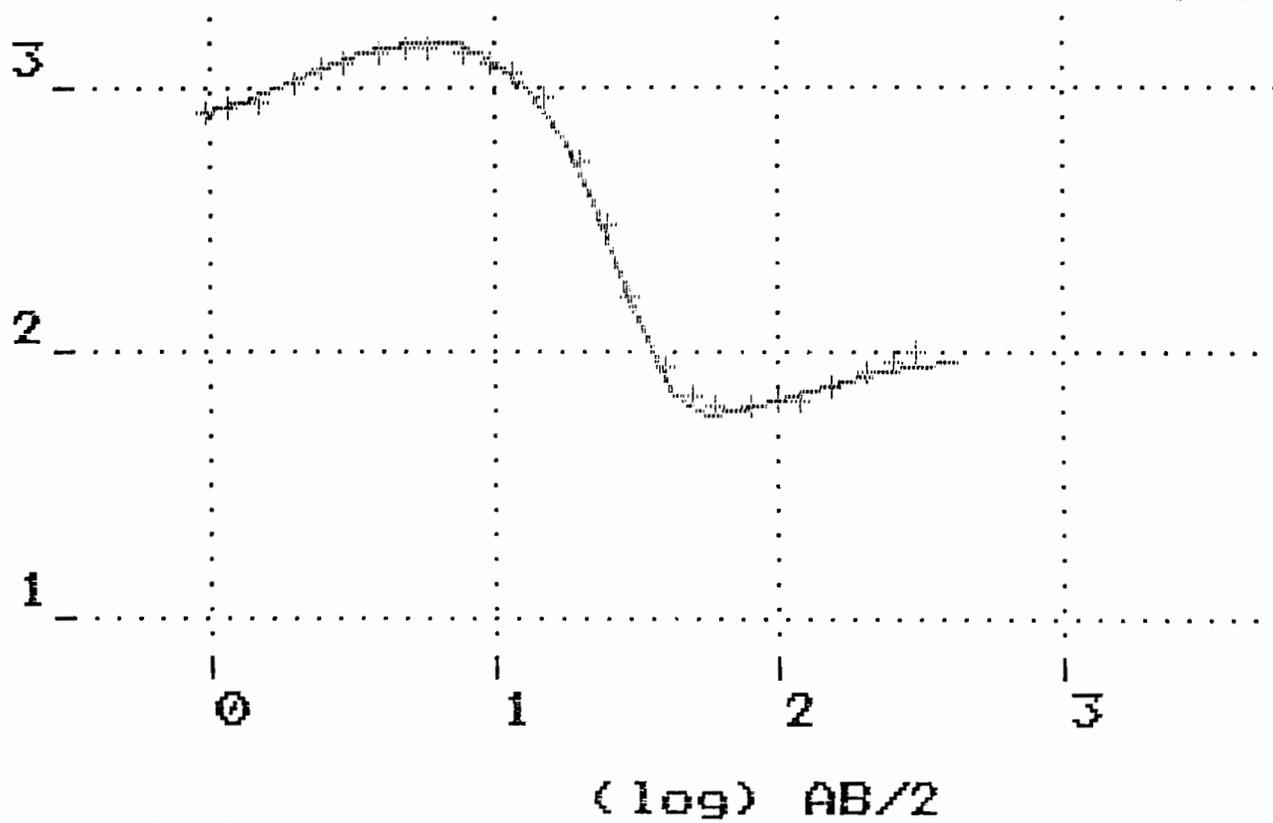
An1-3a, b, c : Courbes de sondages électriques ,secteur Nor
(B.R.G.M)



BID-GRH SECTEUR LOUSA Profil:2
sondage #5 : SE.35

(a)

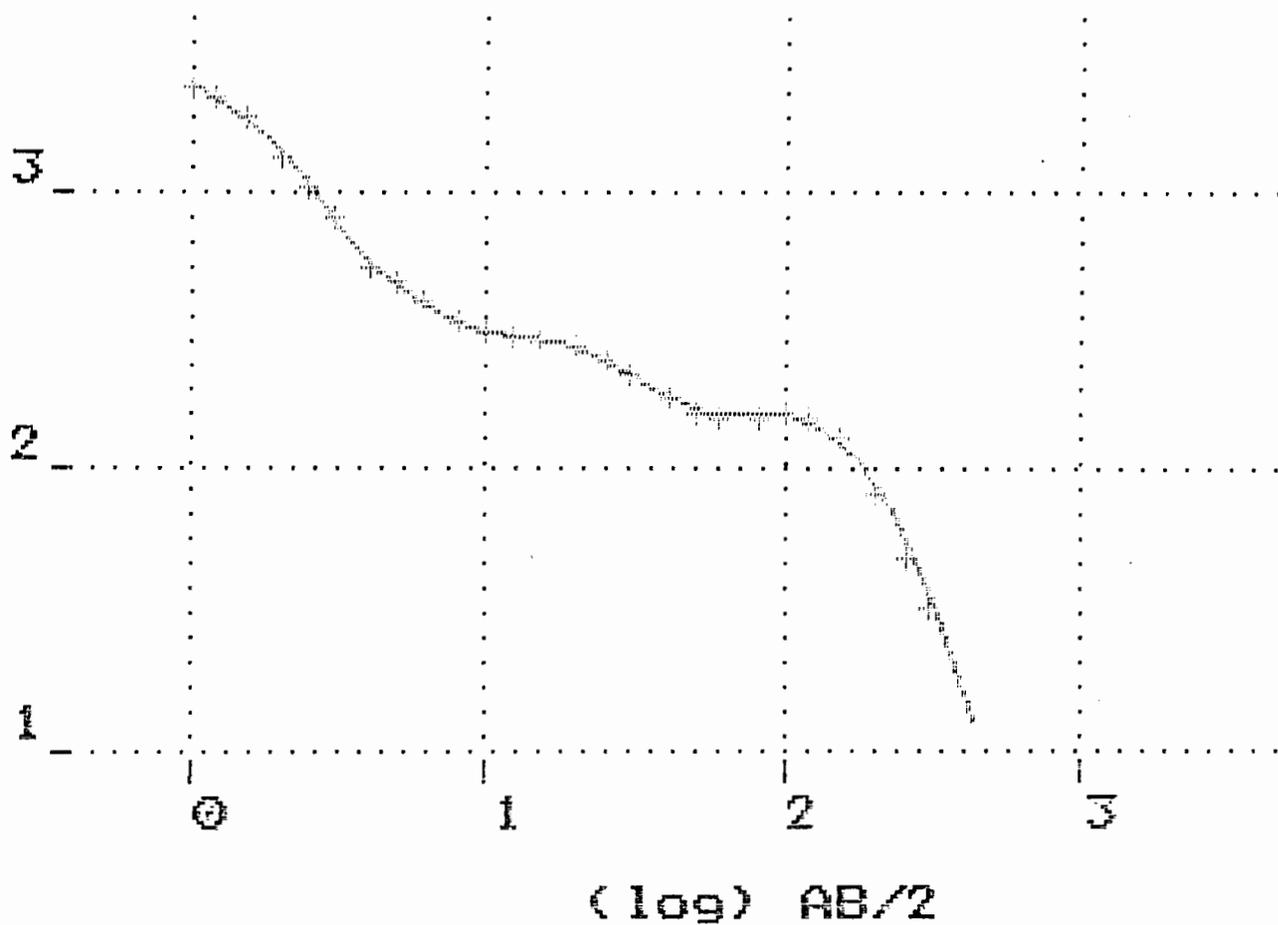
n	Epaisseur	Profondeur	Resistivite	Prof.pole
1	1.25	0.	1000.	0.
2	2.75	1.25	45.	-1.25
3	26.	4.	50.	-2.94
4	20.	30.	230.	100.37
5	∞	50.	3.	-72.94



BID-GRH SECTEUR LOUSA Profil:2
sondage #4 : SE.36

(b)

n	Epaisseur	Profondeur	Resistivite	Prof.pole
1	1.05	0.	750.	0.
2	4.95	1.05	2260.	2.98
3	39.	6.	45.	-7.54
4	∞	45.	100.	77.35

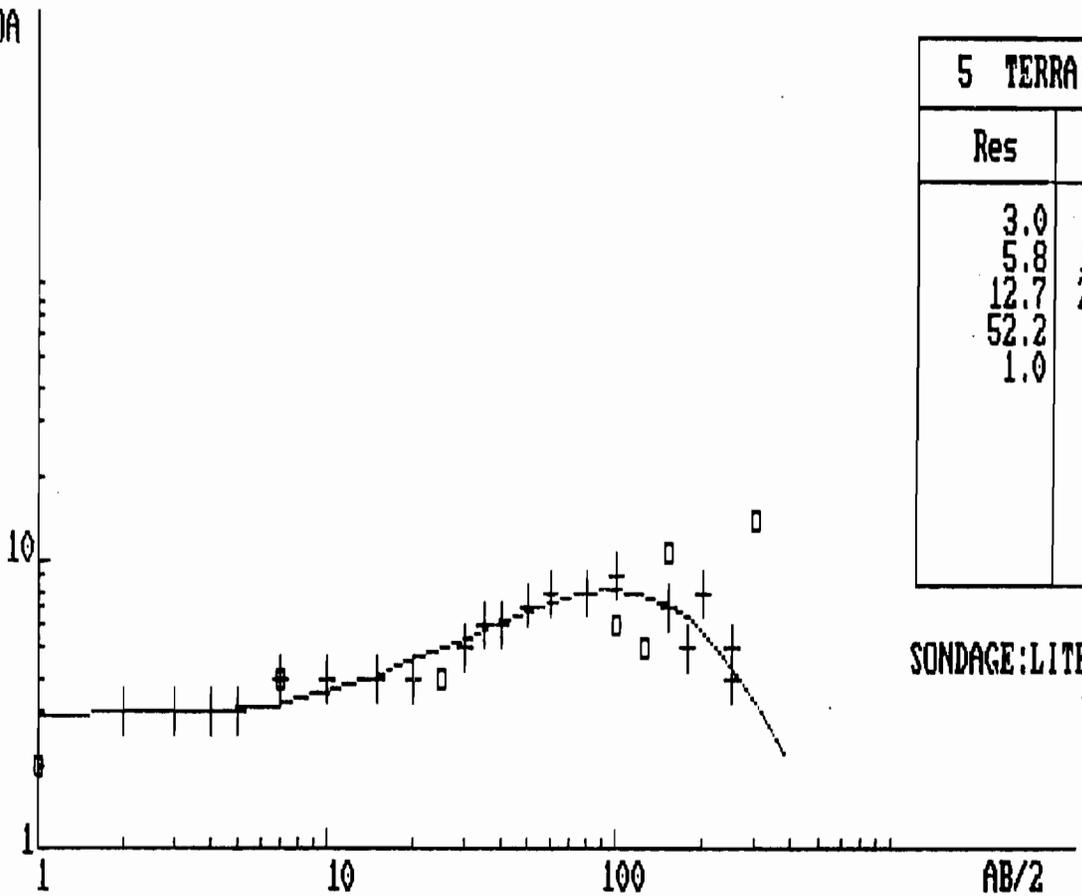


BID-GEH SECTEUR LOUÏSE Prof.11.11.
 sondage #13 : SE.37

(C)

n	Epaisseur	Profondeur	Resistivite	Prof.pole
1	0.85	0.	2900.	0.
2	2.65	0.85	510.	-0.84
3	1.	3.5	90.	-2.88
4	6.5	4.5	515.	7.91
5	13.	11.	90.	-12.53
6	45.	34.	330.	75.27
7	∞	75.	3.	-99.93

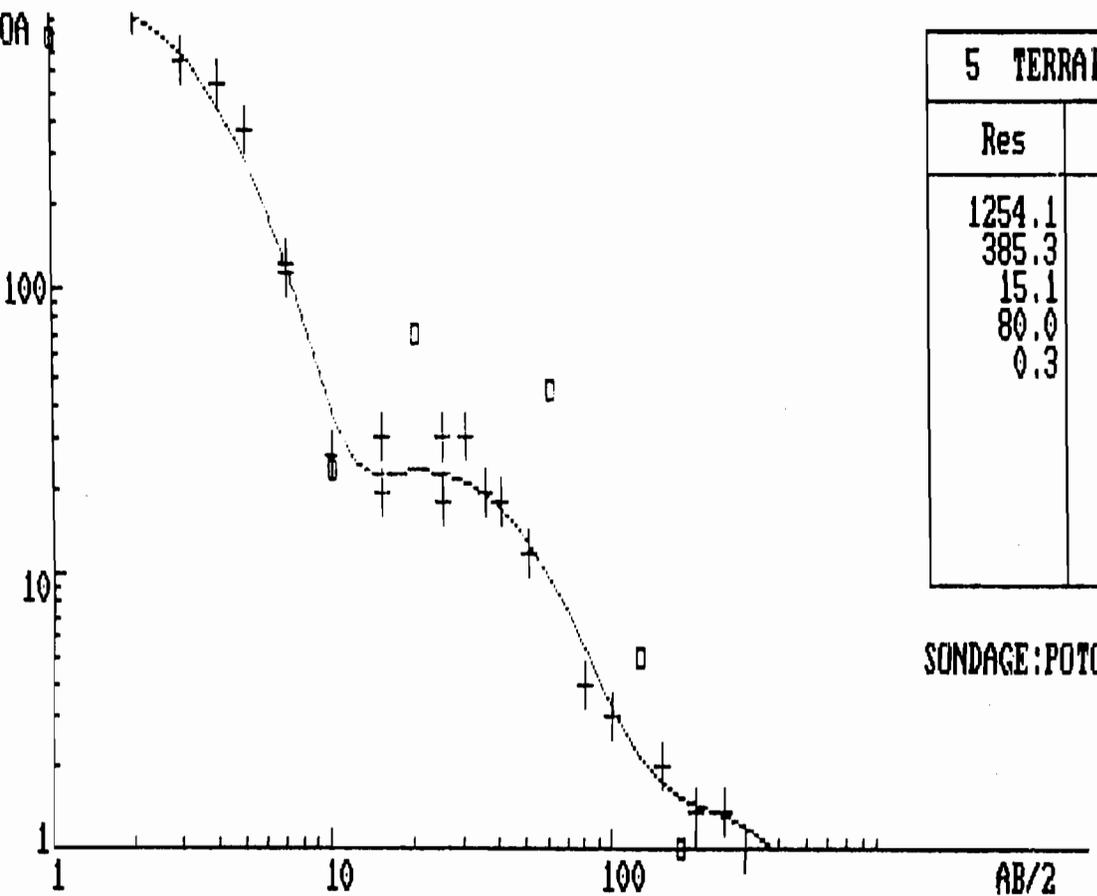
ROA



5 TERRAINS	
Res	Ep
3.0	6.1
5.8	15.7
12.7	24.7
52.2	9.5
1.0	

SONDAGE:LITE

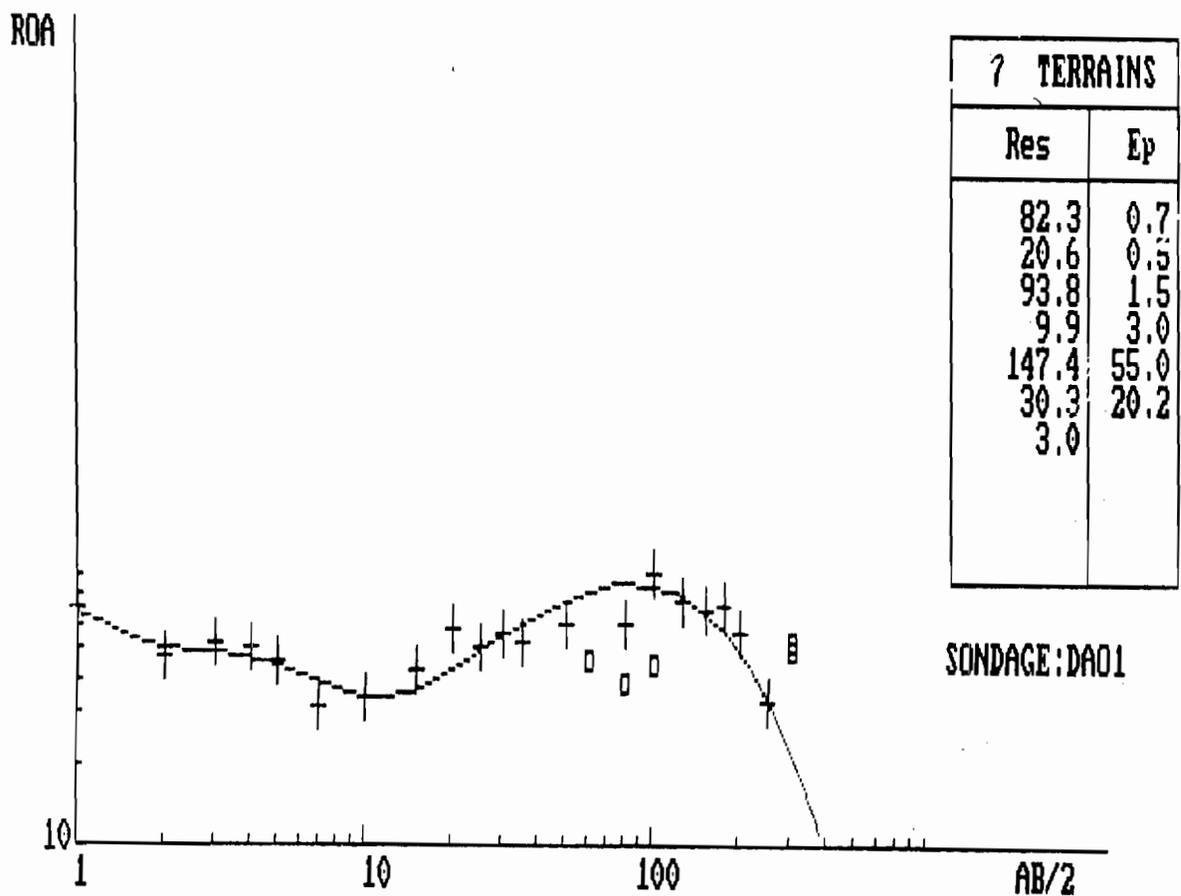
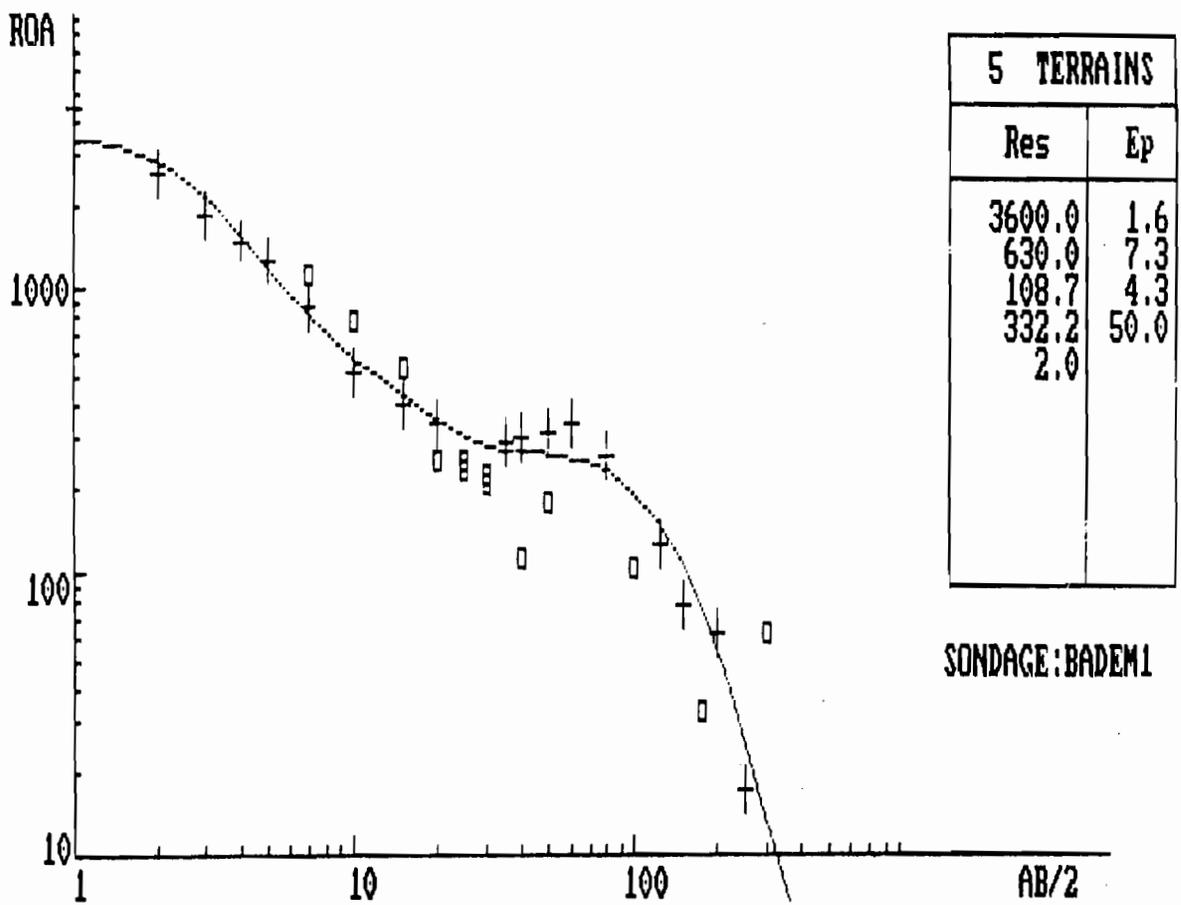
ROA



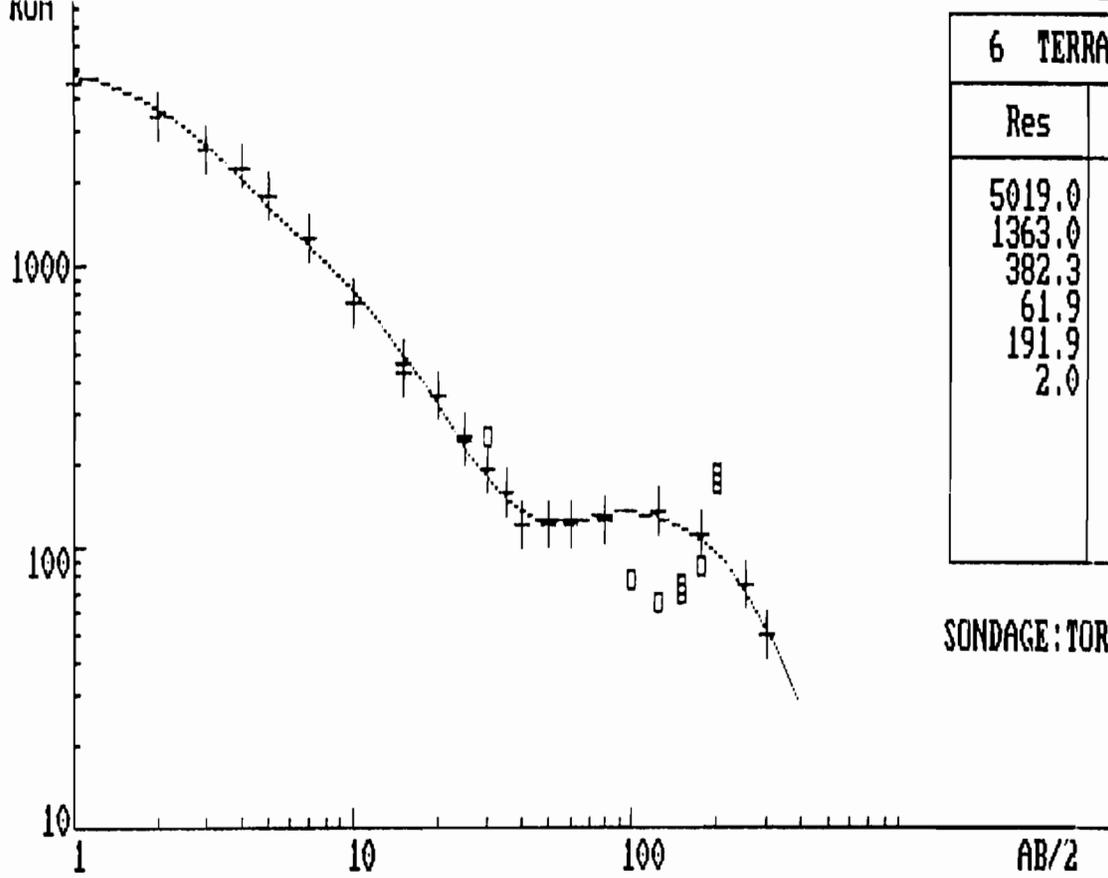
5 TERRAINS	
Res	Ep
1254.1	1.4
385.3	1.5
15.1	7.4
80.0	6.0
0.3	

SONDAGE:POTOU1

An1-4a : Courbes de sondages électriques ,secteur Nord (Diouf).

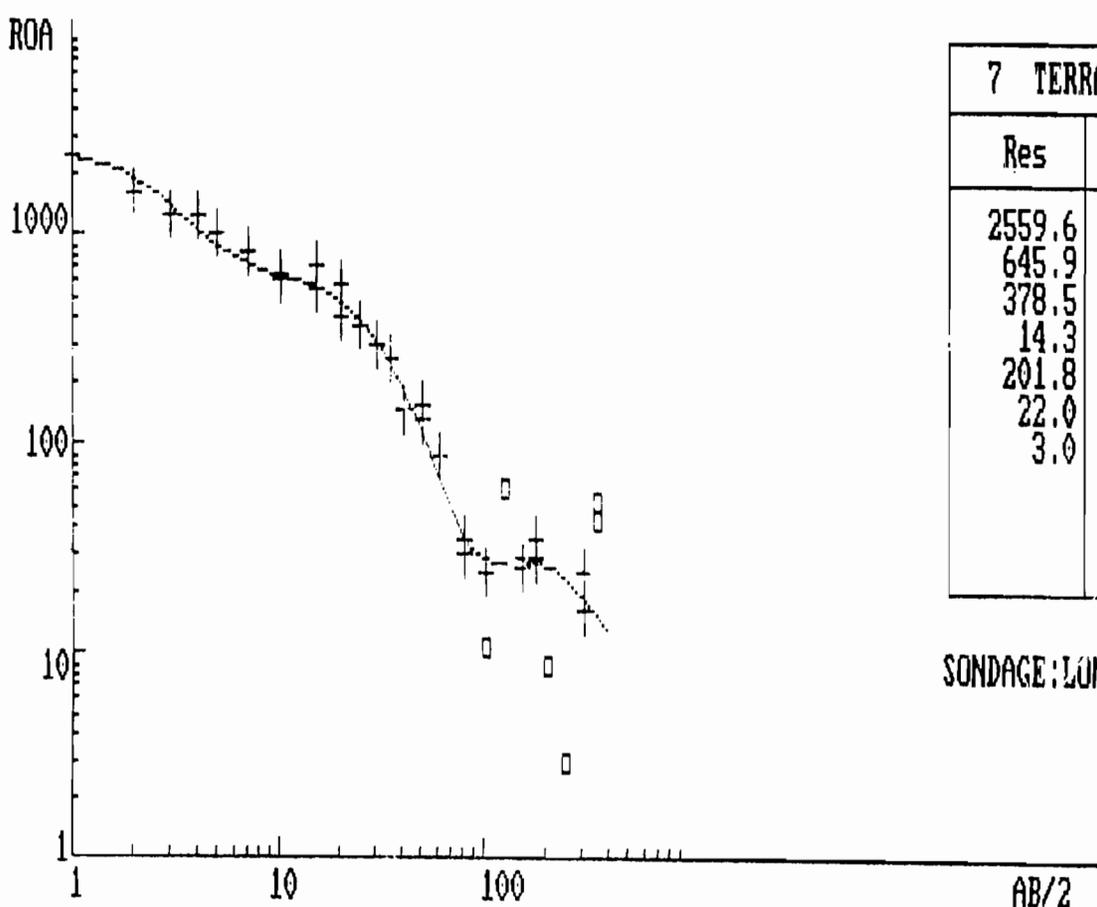


An1-4a : Courbes de sondages électriques ,secteur Nord (Diouf).



6 TERRAINS	
Res	Ep
5019.0	1.2
1363.0	3.9
382.3	8.5
61.9	13.7
191.9	82.2
2.0	

SONDAGE : TOROBEY 1

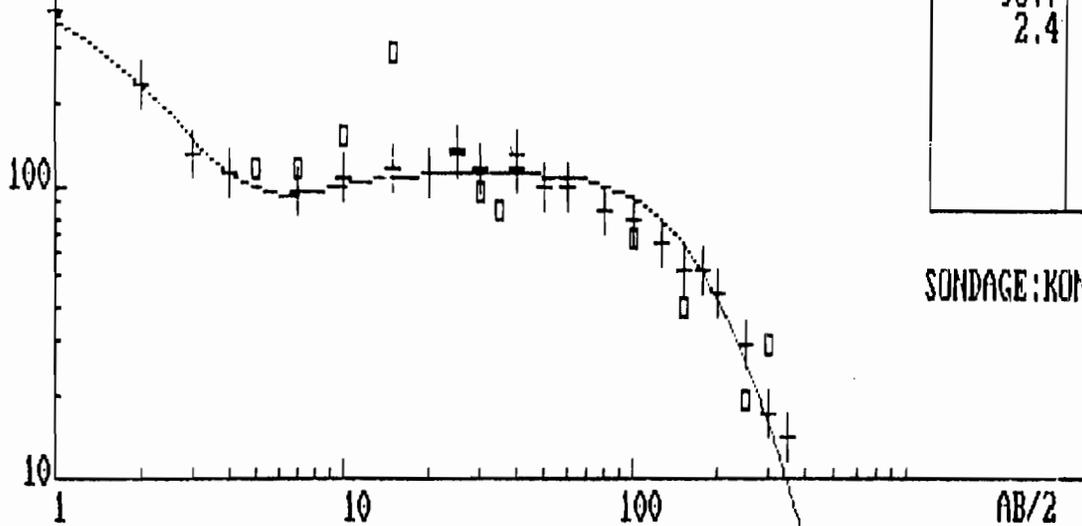


7 TERRAINS	
Res	Ep
2559.6	1.3
645.9	11.3
378.5	6.9
14.3	37.7
201.8	16.1
22.0	10.0
3.0	

SONDAGE : LUNGOR 1

An1-4b : Courbes de sondages électriques ,secteur centre (Diouf).

ROA



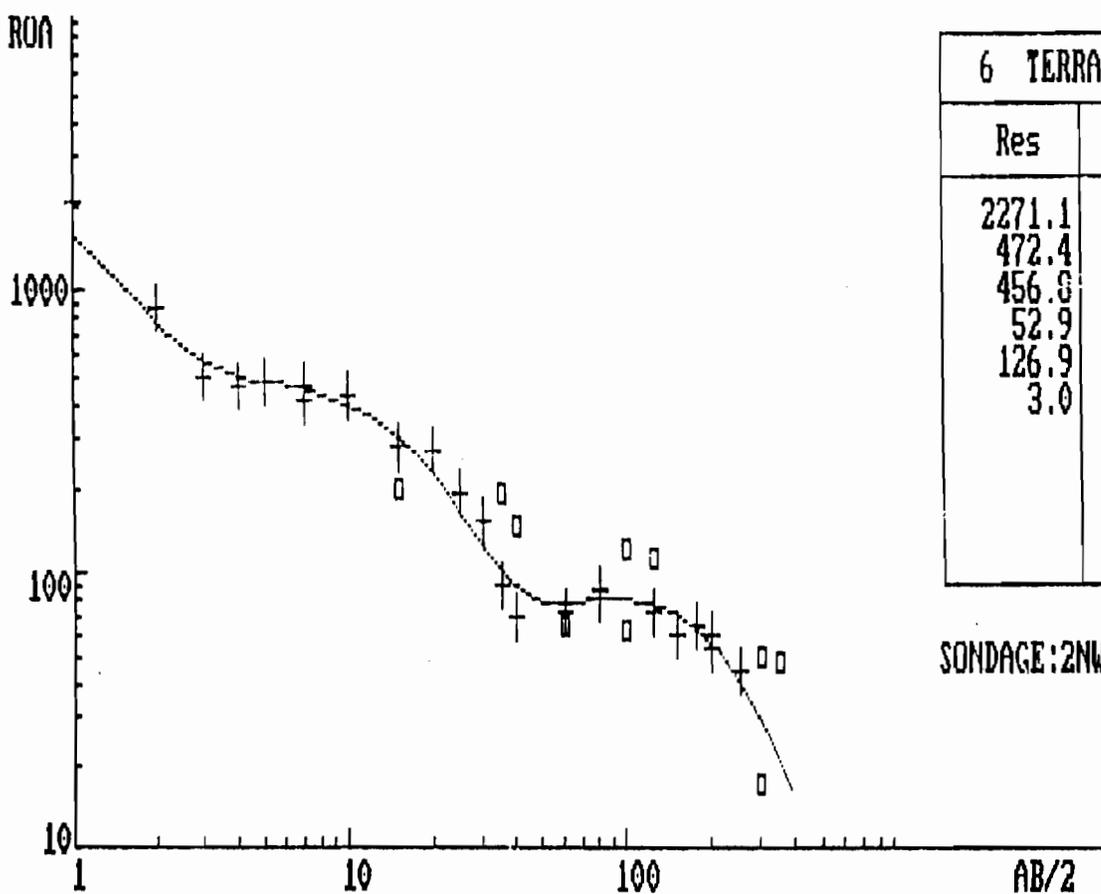
6 TERRAINS

Res Ep

505.6	0.5
248.9	1.0
30.0	0.7
117.6	67.0
96.7	21.8
2.4	

SONDAGE: KONYOYI

ROA



6 TERRAINS

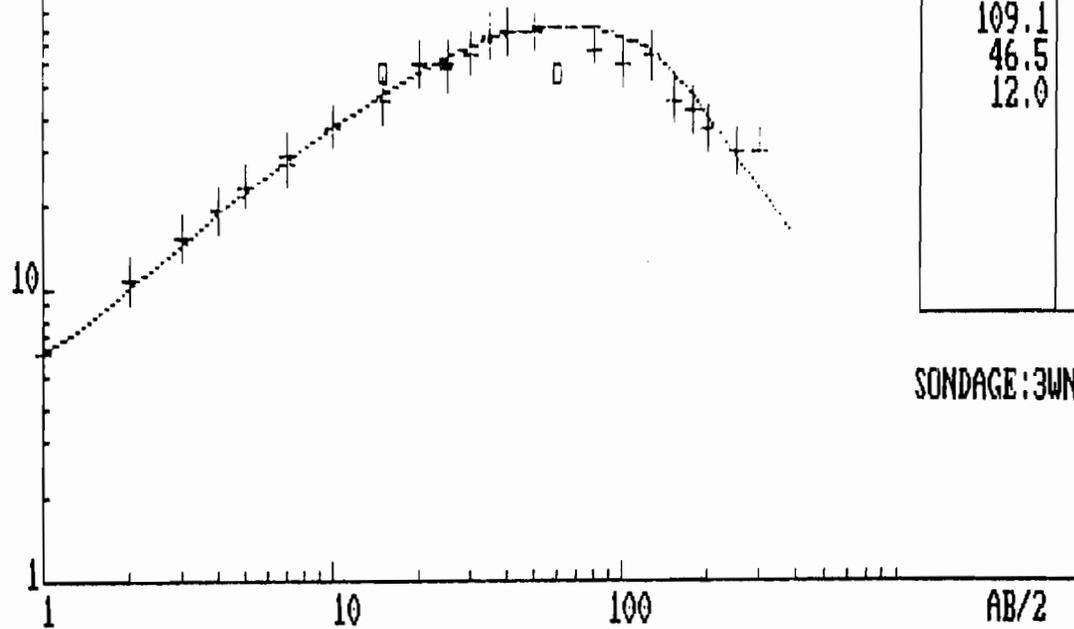
Res Ep

2271.1	0.6
472.4	3.2
456.0	6.1
52.9	23.4
126.9	67.3
3.0	

SONDAGE: 2NWFOTE

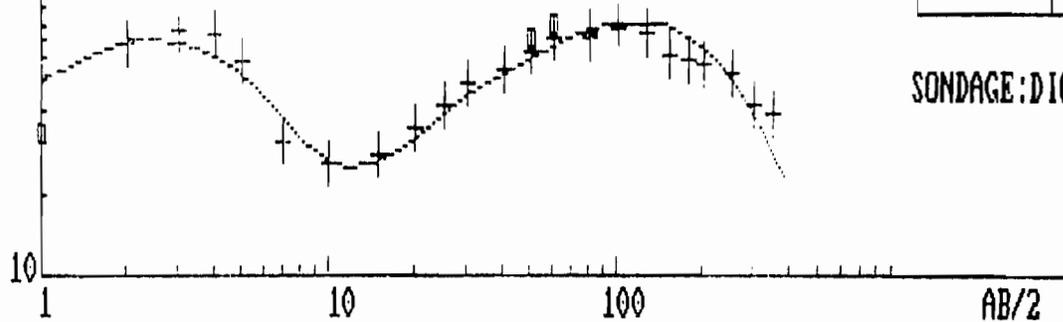
An1-4b : Courbes de sondages électriques ,secteur centre
(Diouf).

ROA



5 TERRAINS	
Res	Ep
4.2	0.7
38.4	1.2
109.1	60.0
46.5	8.0
12.0	

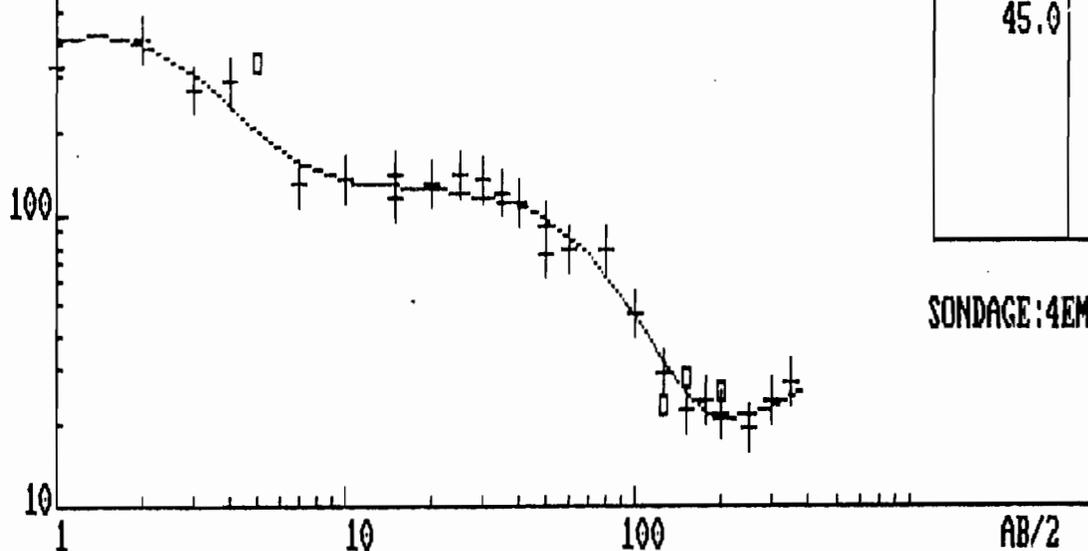
ROA



5 TERRAINS	
Res	Ep
33.0	0.5
280.0	0.6
10.4	5.2
147.5	75.9
2.0	

An1-4c : Courbes de sondages électriques ,secteur Sud (Diouf).

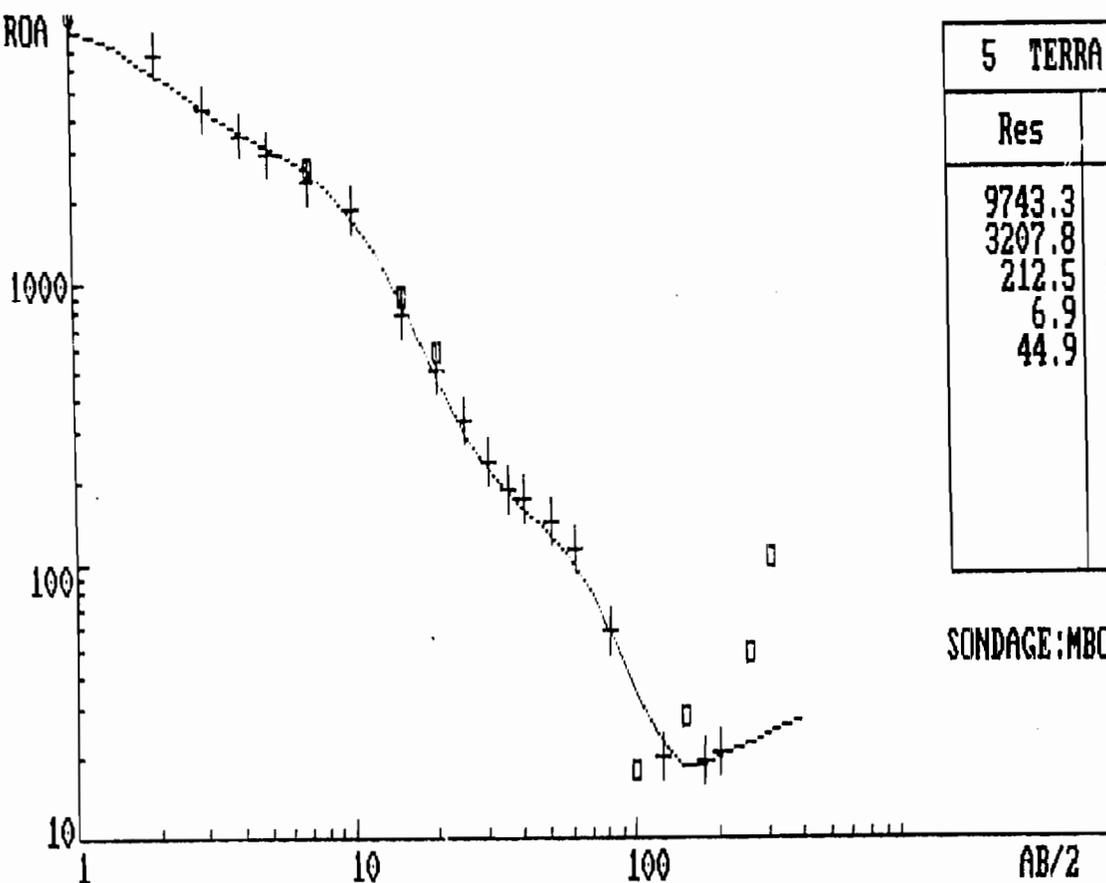
ROA



5 TERRAINS

Res	Ep
287.0	0.3
589.3	0.9
127.3	40.2
9.0	72.0
45.0	

ROA



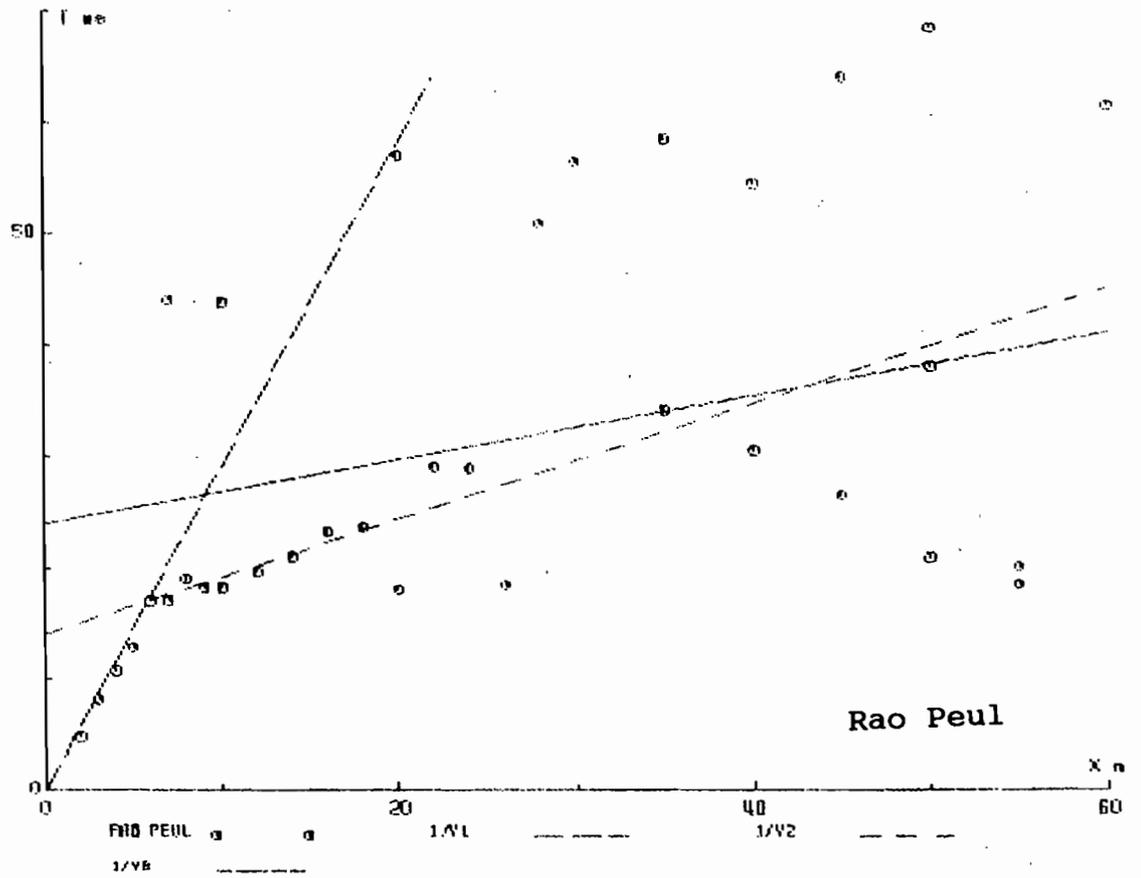
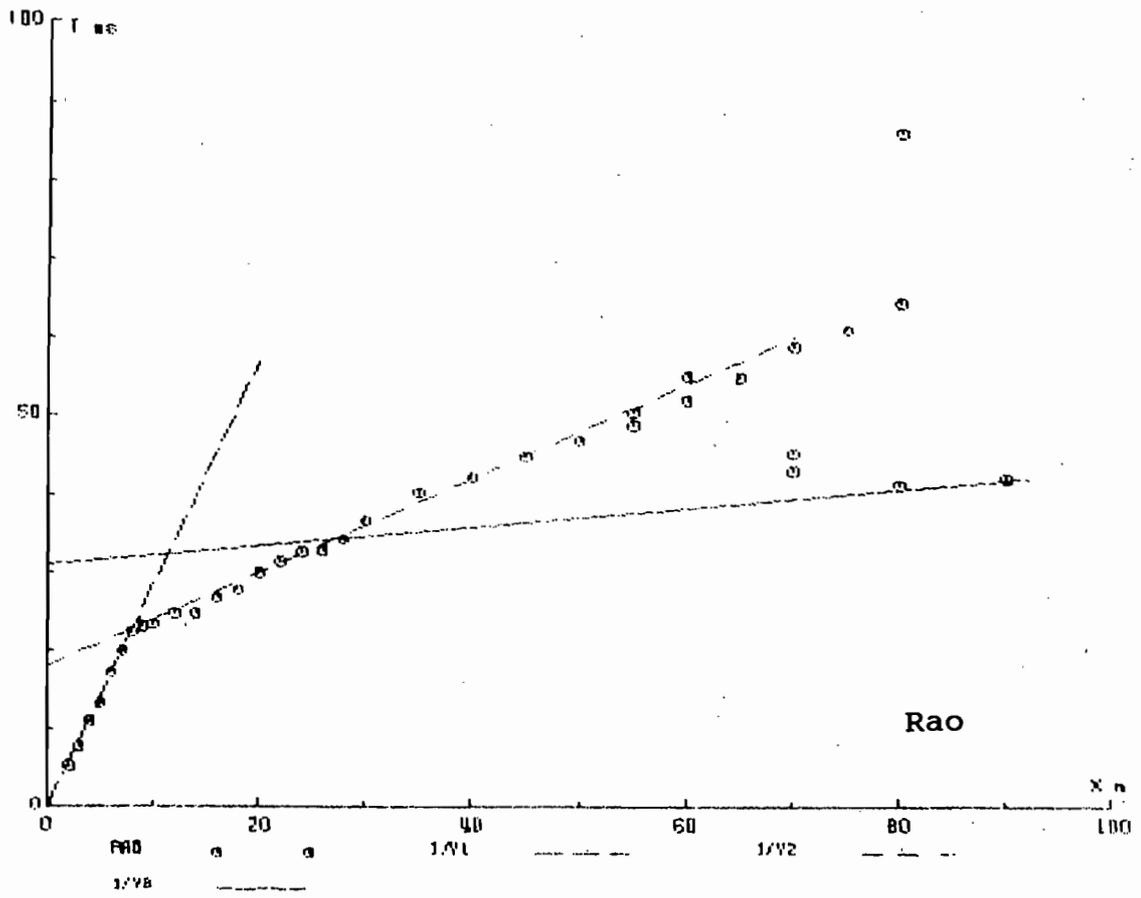
5 TERRAINS

Res	Ep
9743.3	0.8
3207.8	5.0
212.5	26.4
6.9	75.8
44.9	

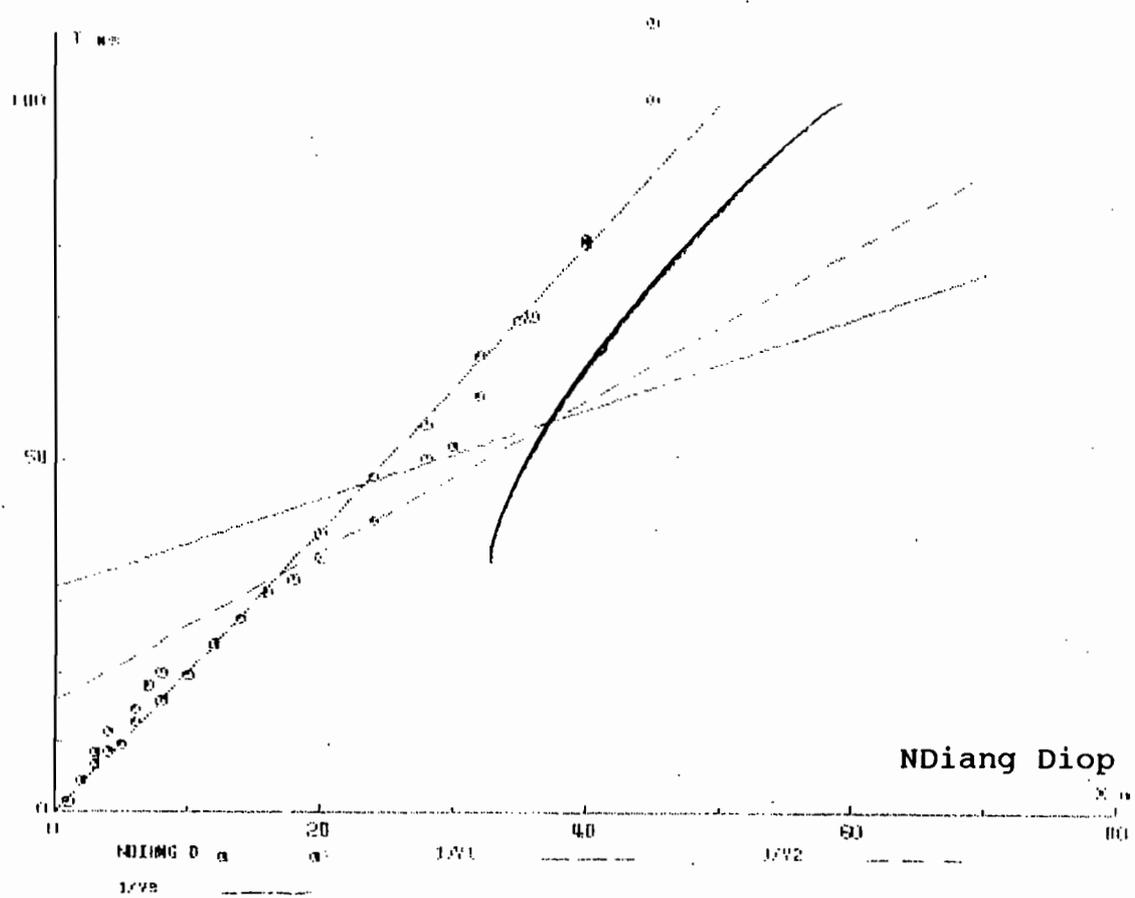
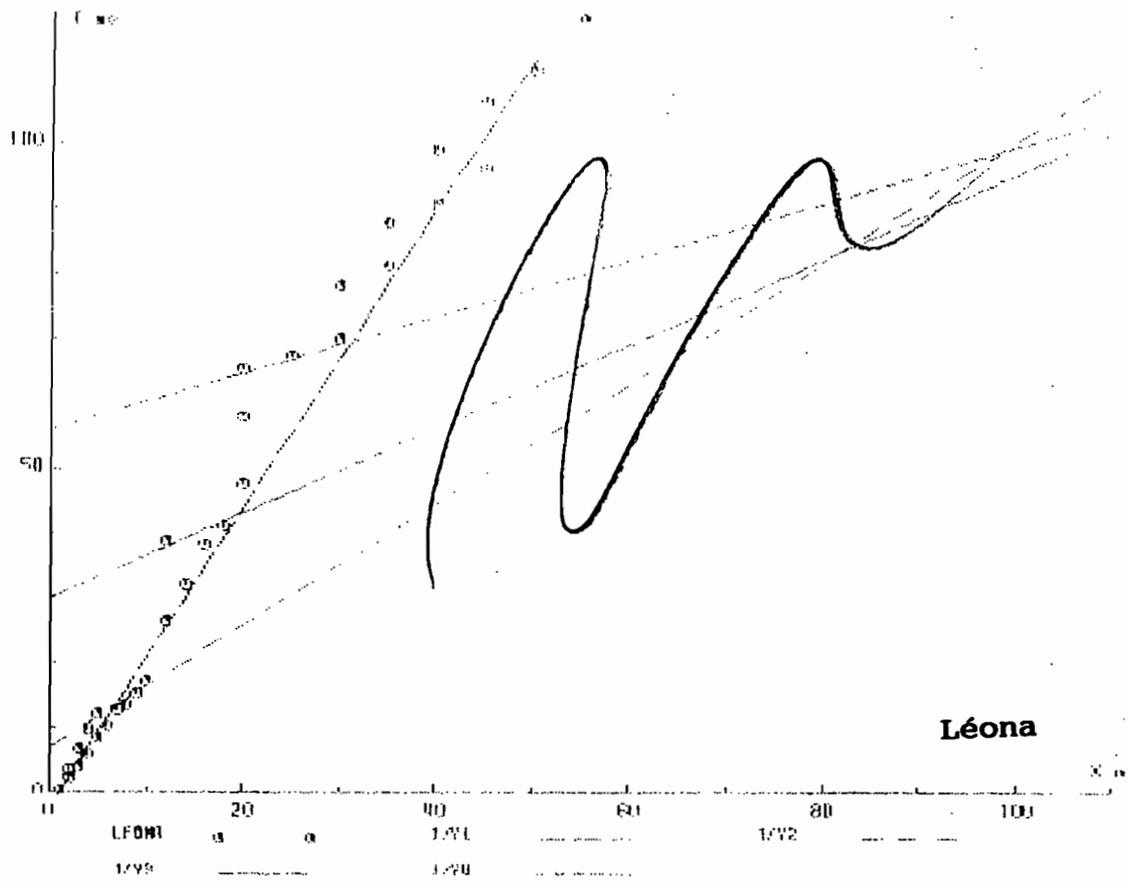
An1-4c : Courbes de sondages électriques ,secteur Sud (Diouf).

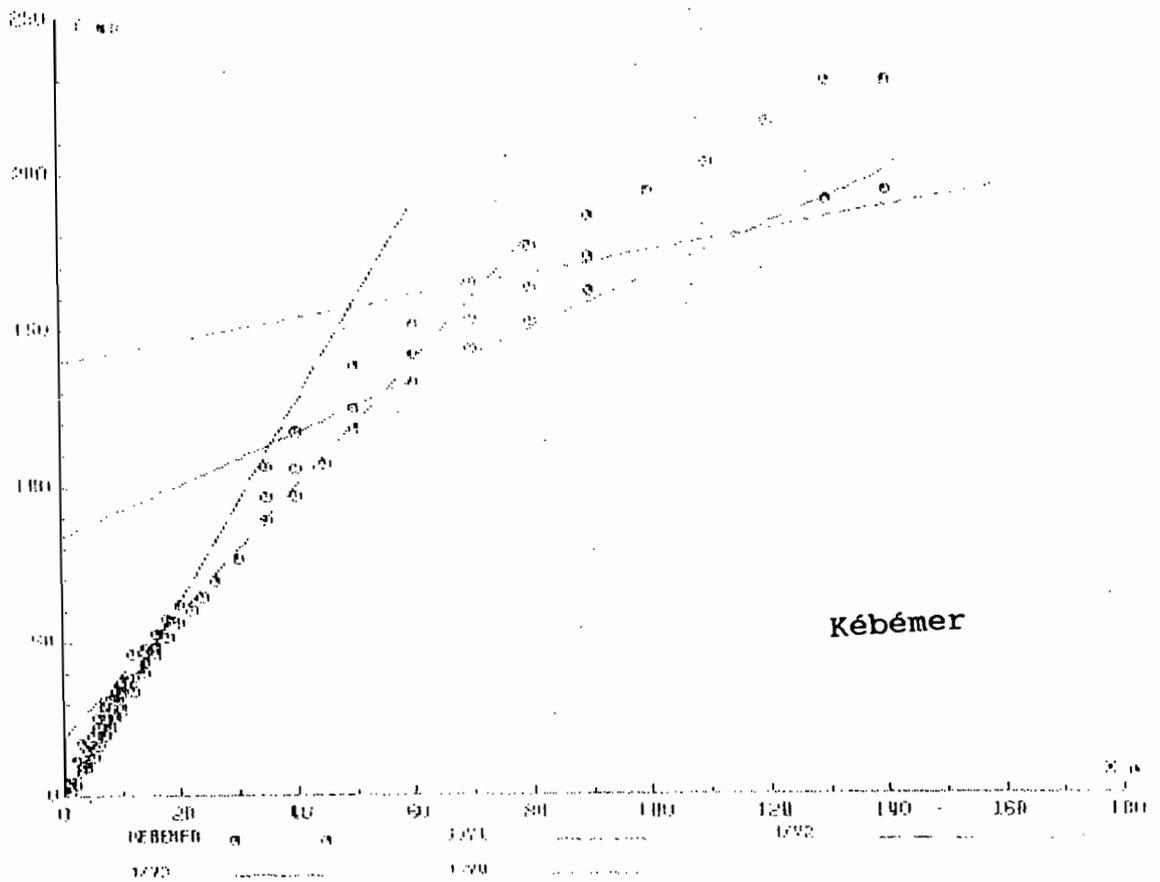
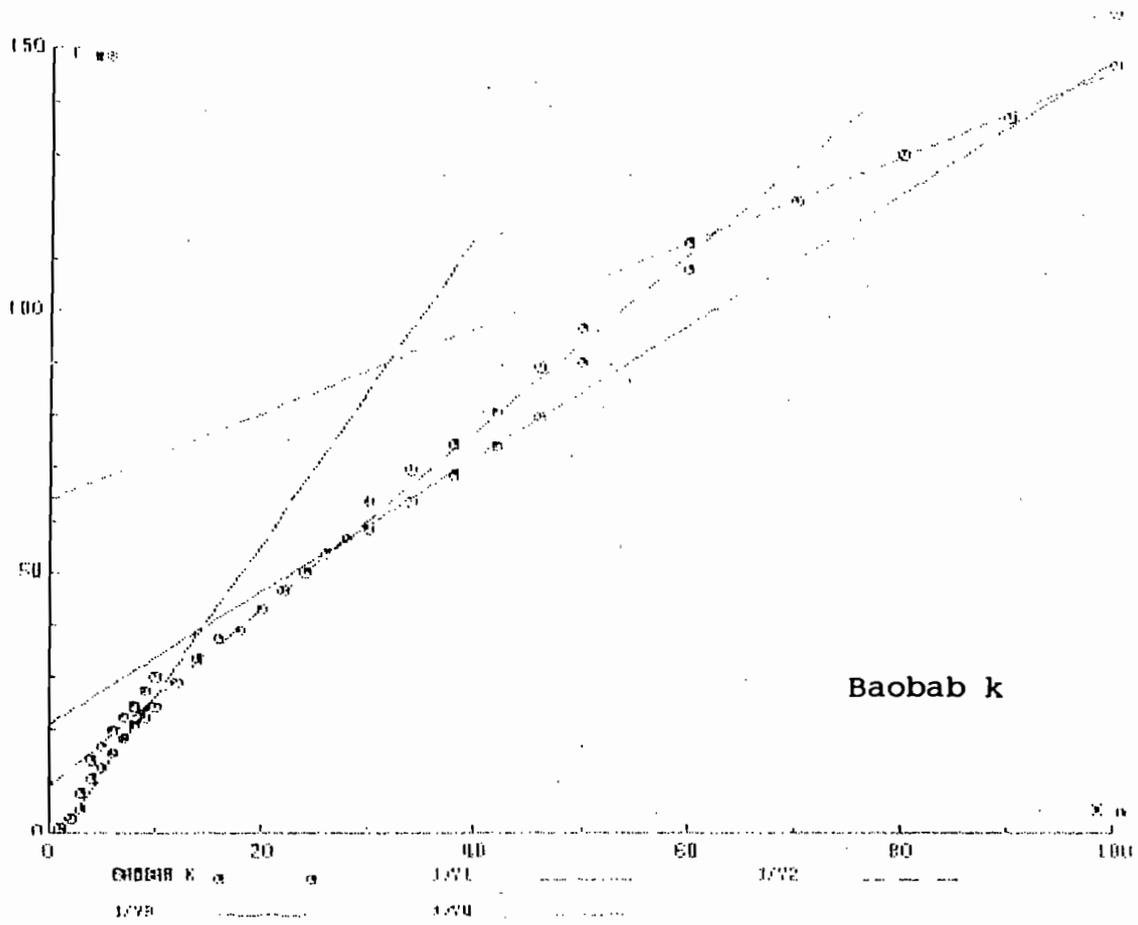
Annexe II

- An2-1 : Hodochrones de sismique réfraction à Rao, Rao Peul, MPal, et NDiang Diop, secteur Nord.
- An2-2 : Hodochrones de sismique réfraction à Baobab k, Kébémér, NGuer NGuer et Mérina Diéque, secteur centre.
- An2-3 : Hodochrones de sismique réfraction à Mékhé, Sine Kane (KMS), Fass Boy, Diogo, NDomor, Djing et Tivaouane, secteur Sud.

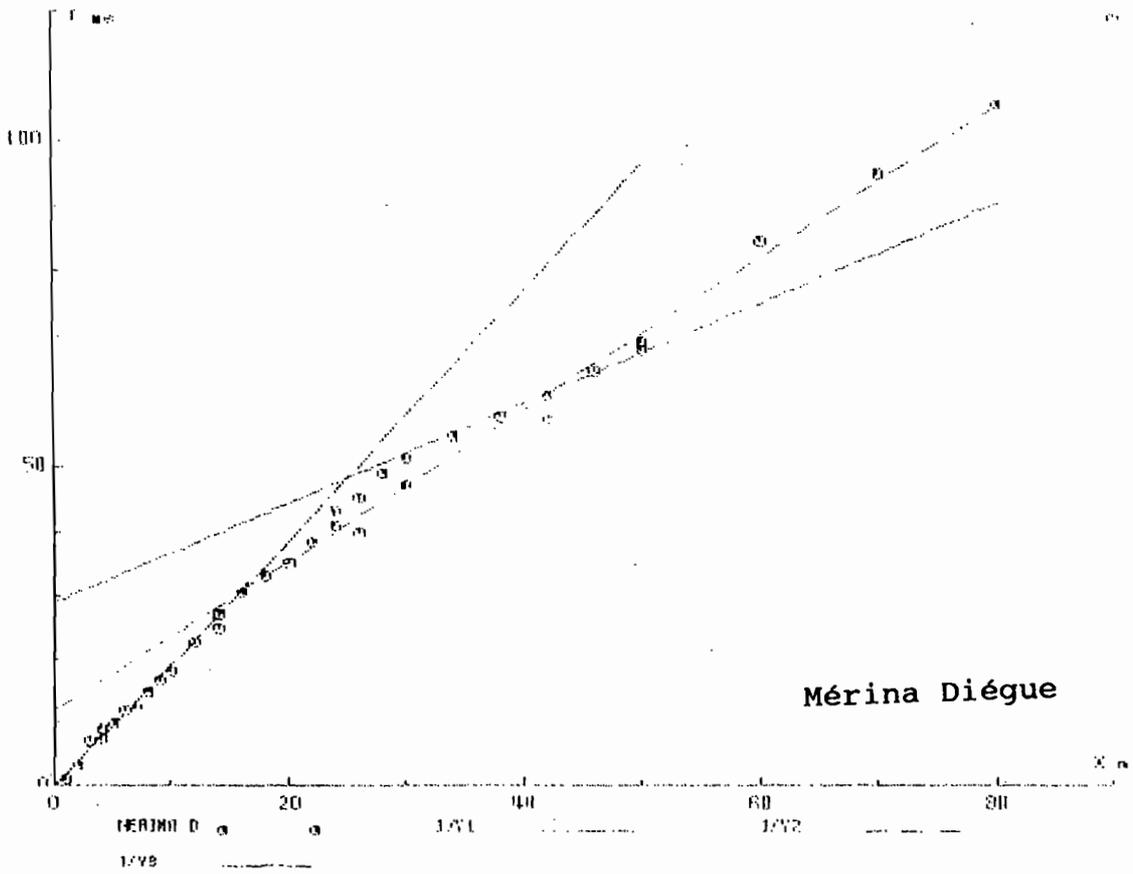
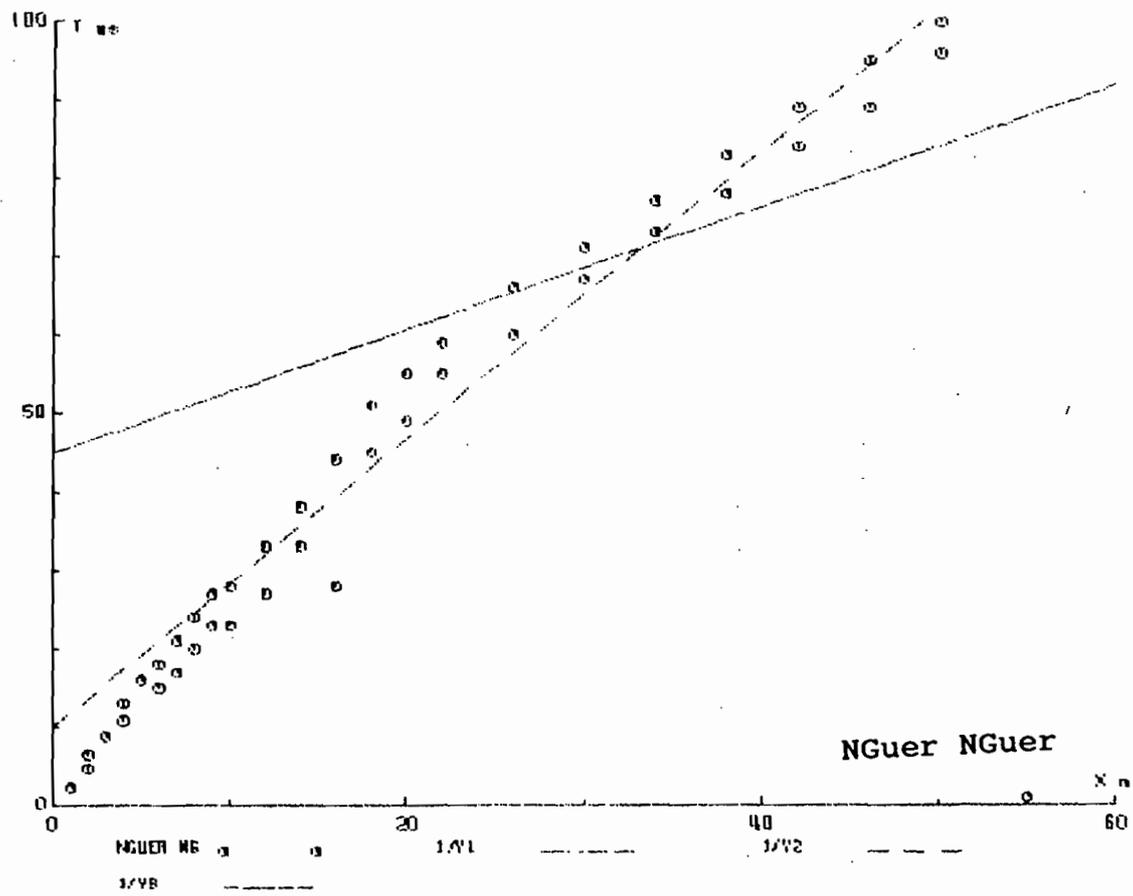


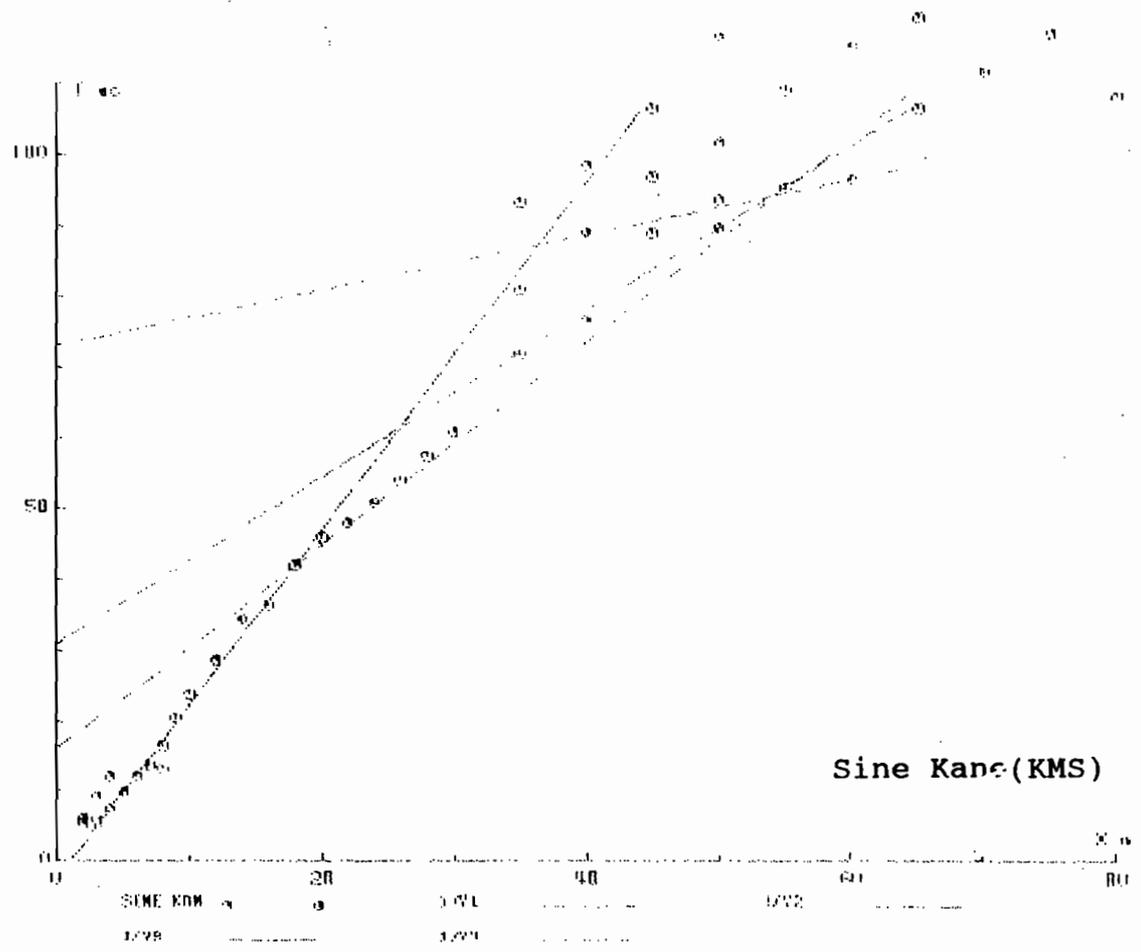
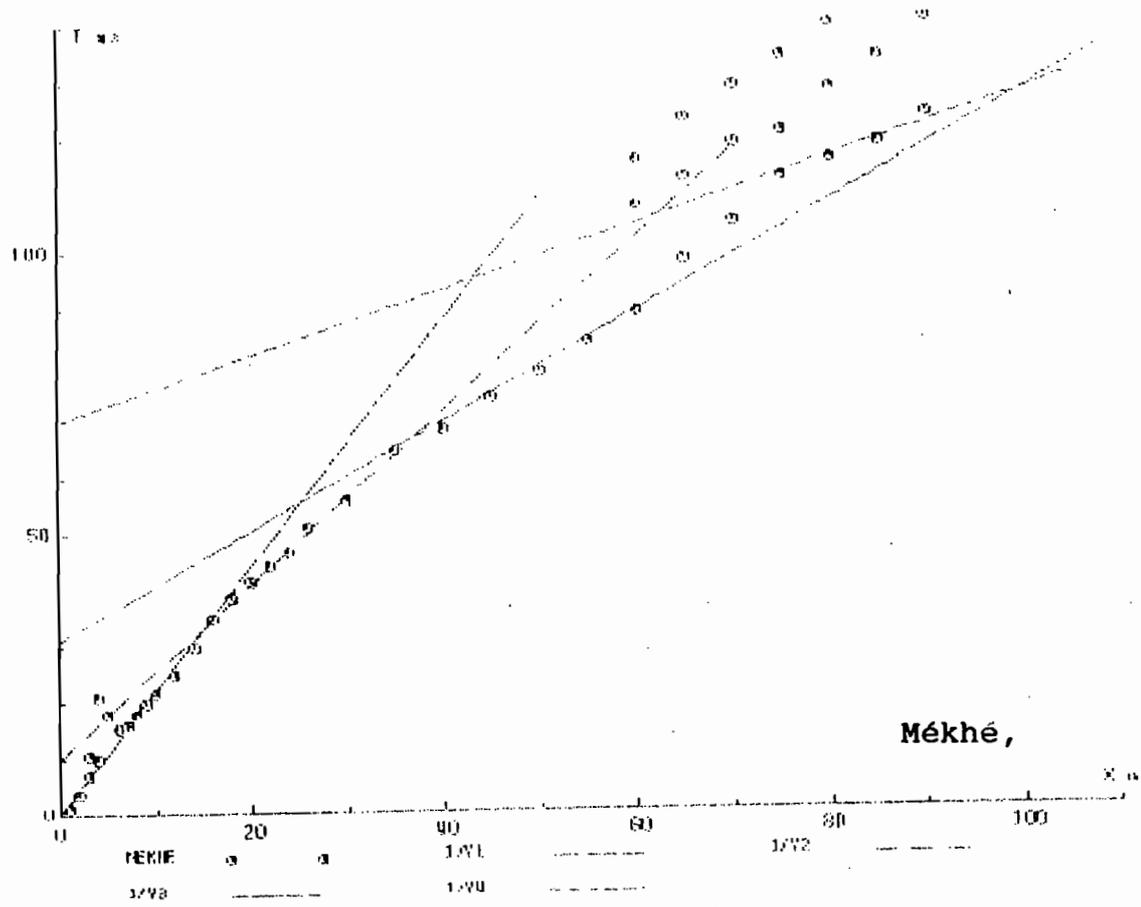
An2-1 : Hodochrones de sismique réfraction à Rao, Rao Peul, Léona, et NDiang Diop, secteur Nord.



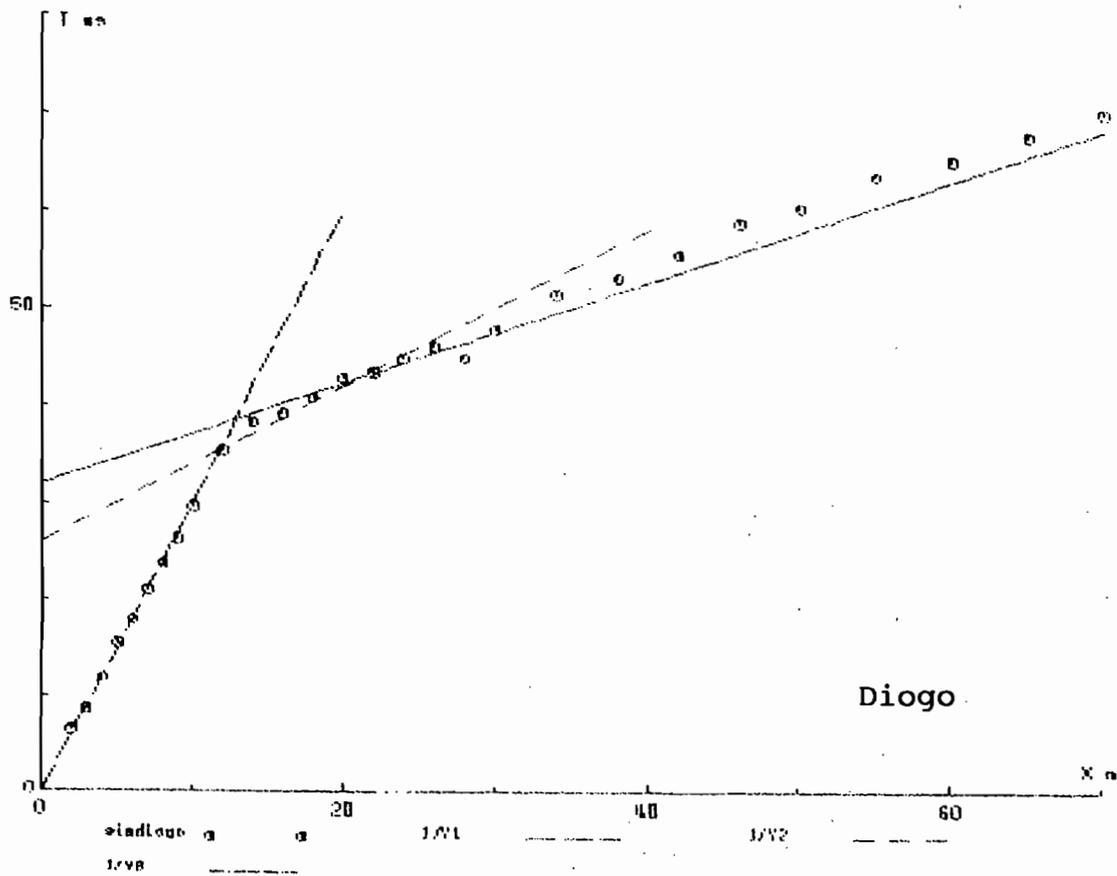
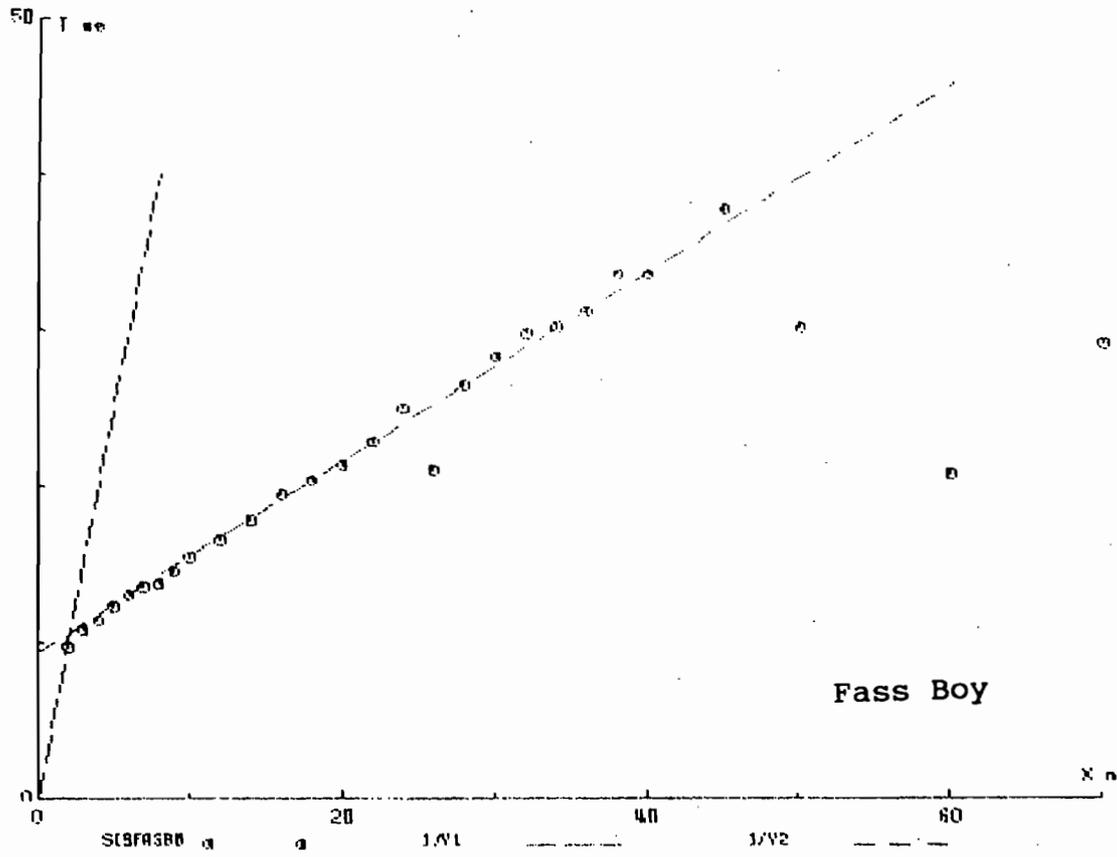


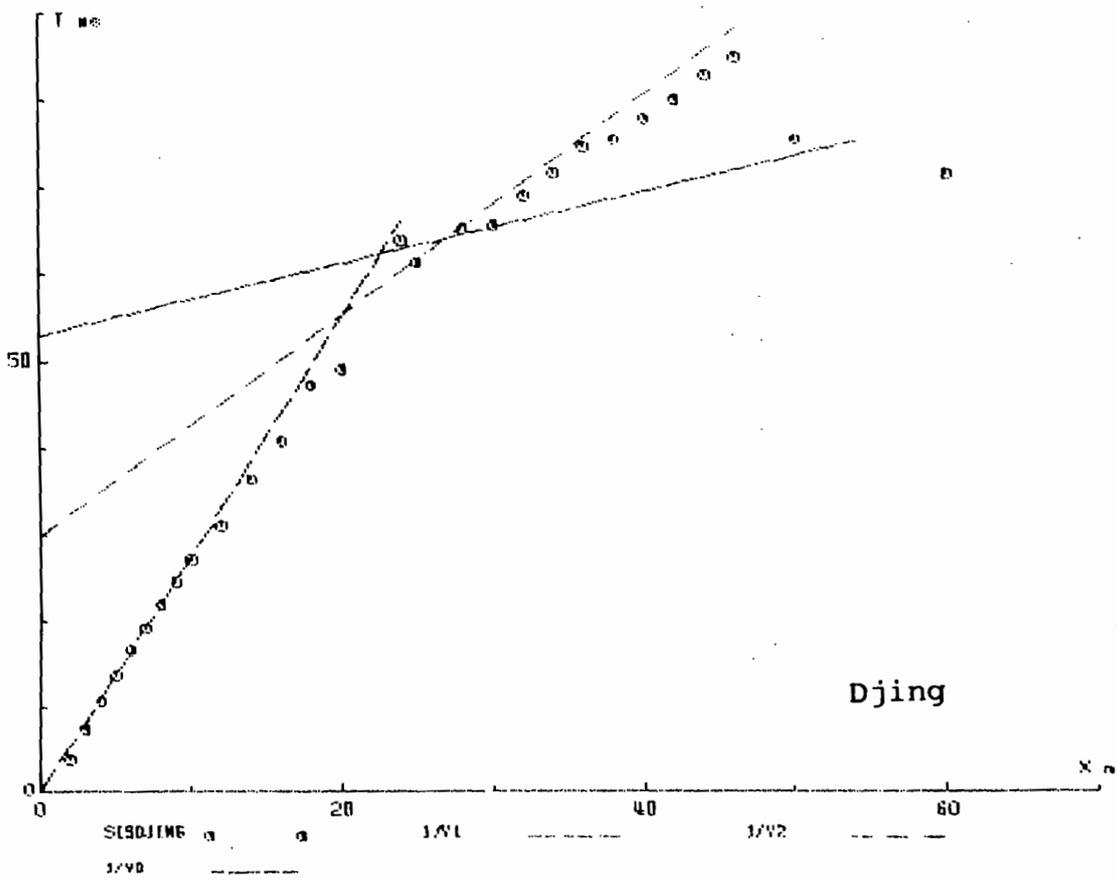
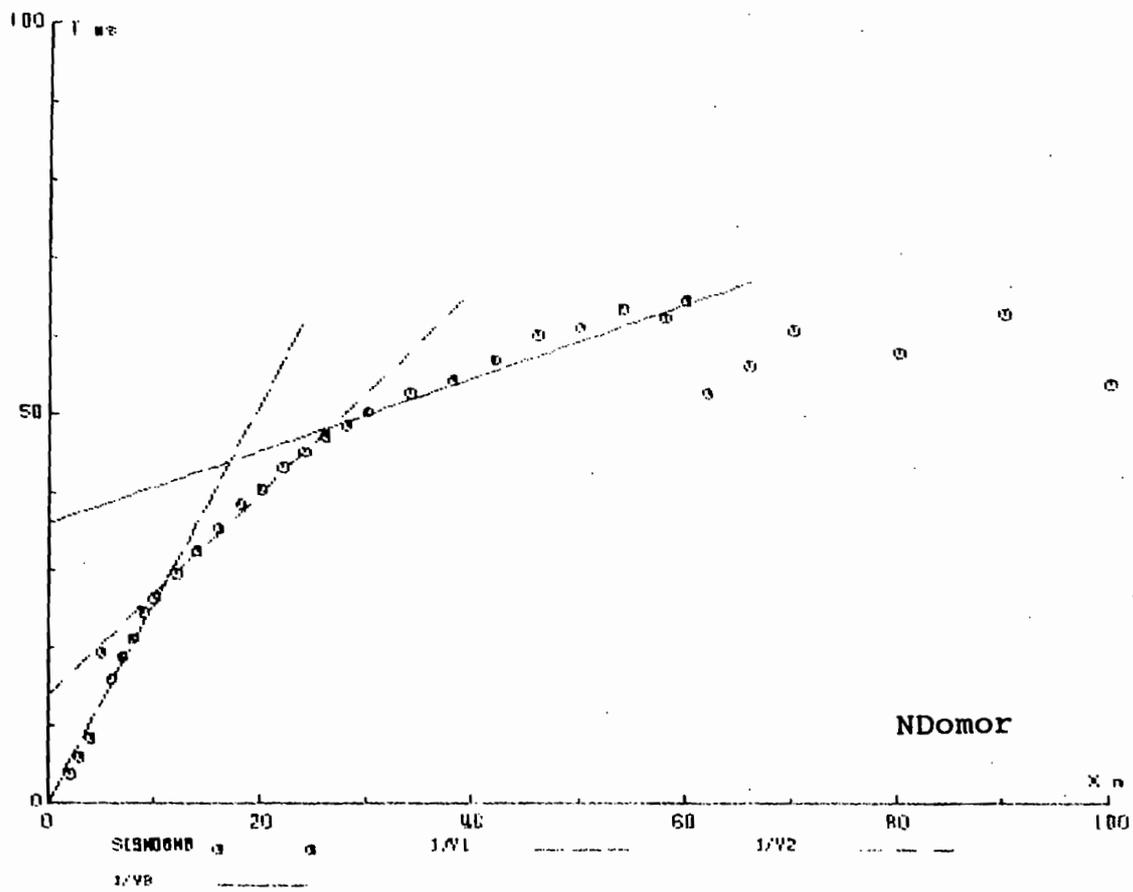
An2-2 : Hodochrones de sismique réfraction à Baobab k, Kébémér, NGuér NGuér et Mérina Diégué, secteur centre.

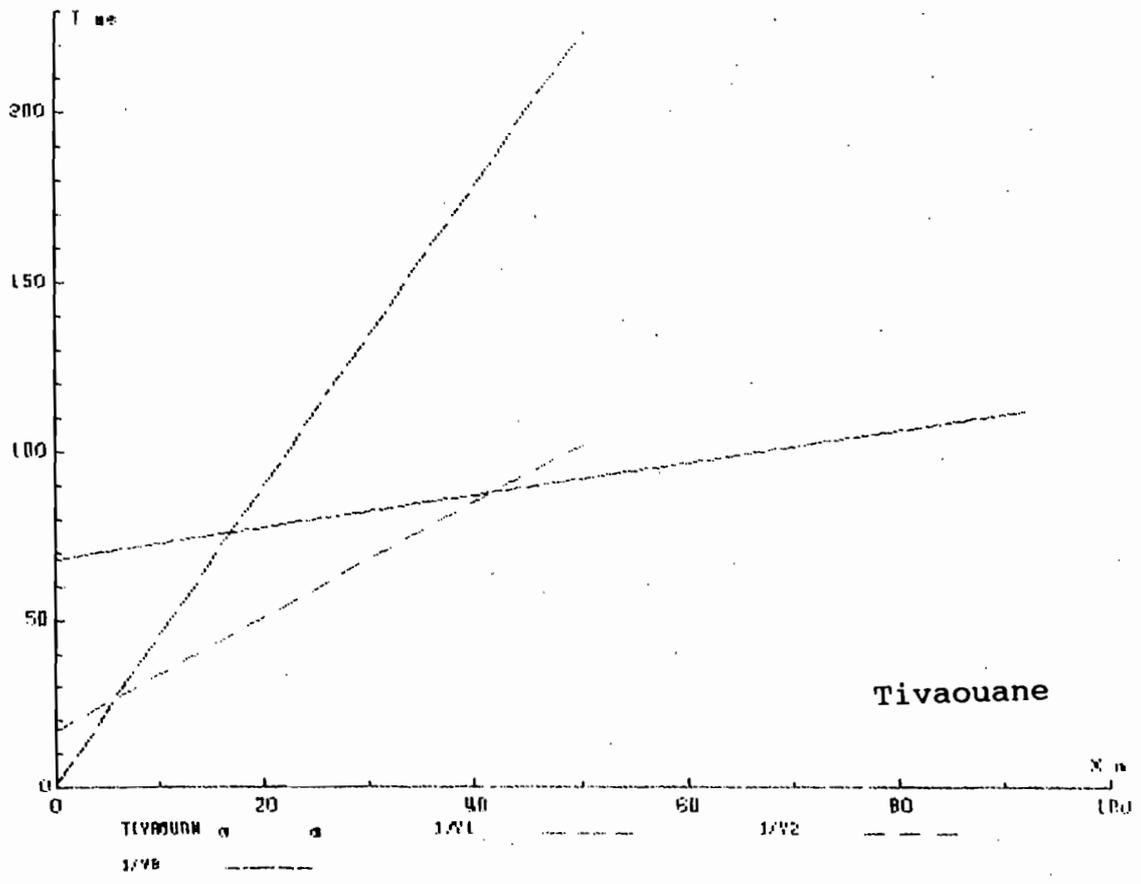




An2-3 : Hodochrones de sismique réfraction à Mékhé, Sine Kane (KMS), Fass Boy, Diogo, NDomor, Djing et Tivaouane, secteur Sud.







TIYADUNH

1/YB

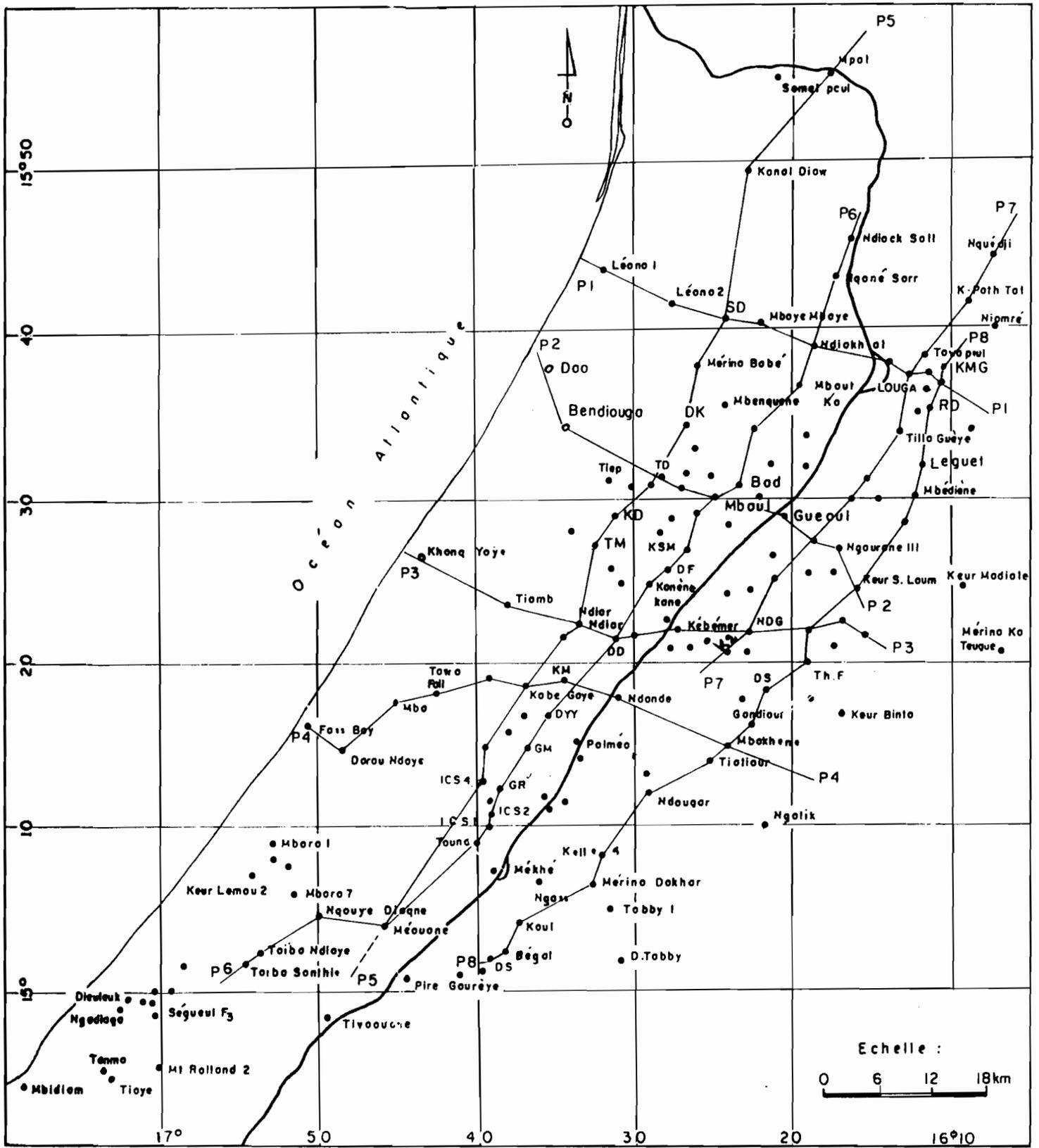
1/Y1

1/Y2

Tivaouane

Annexe III

An3-1, 2, ..., 8 : Coupes géologiques de synthèse
(Diouf.S.,1994).

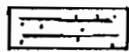


An3 : localisation des coupes géologiques de synthèse (Diouf.S.,1994).

LEGENDE DES COUPES



Sable



Sable fin argileux



Laterite



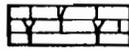
Argiles sableuses



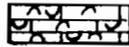
Argiles



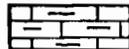
Bancs de silex



Calcaires karstiques



Calcaires coquilliers



Calcaires marneux



Marno-calcaires



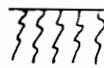
Marnes



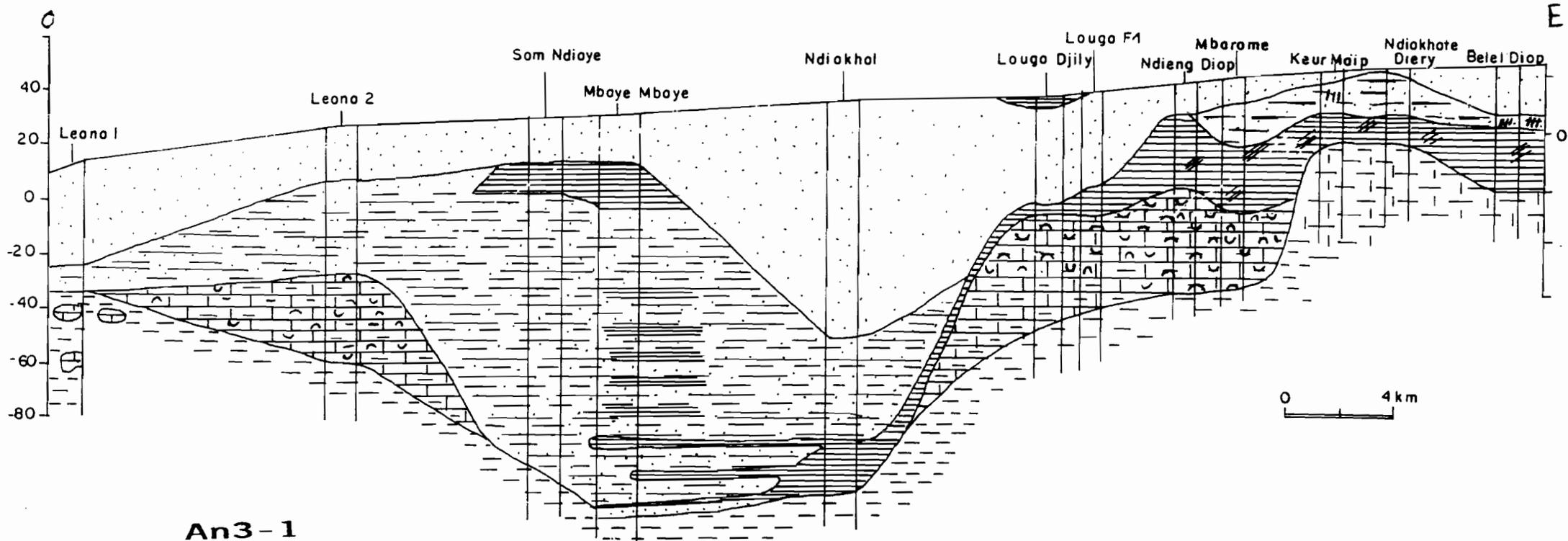
Niveau hydrostatique

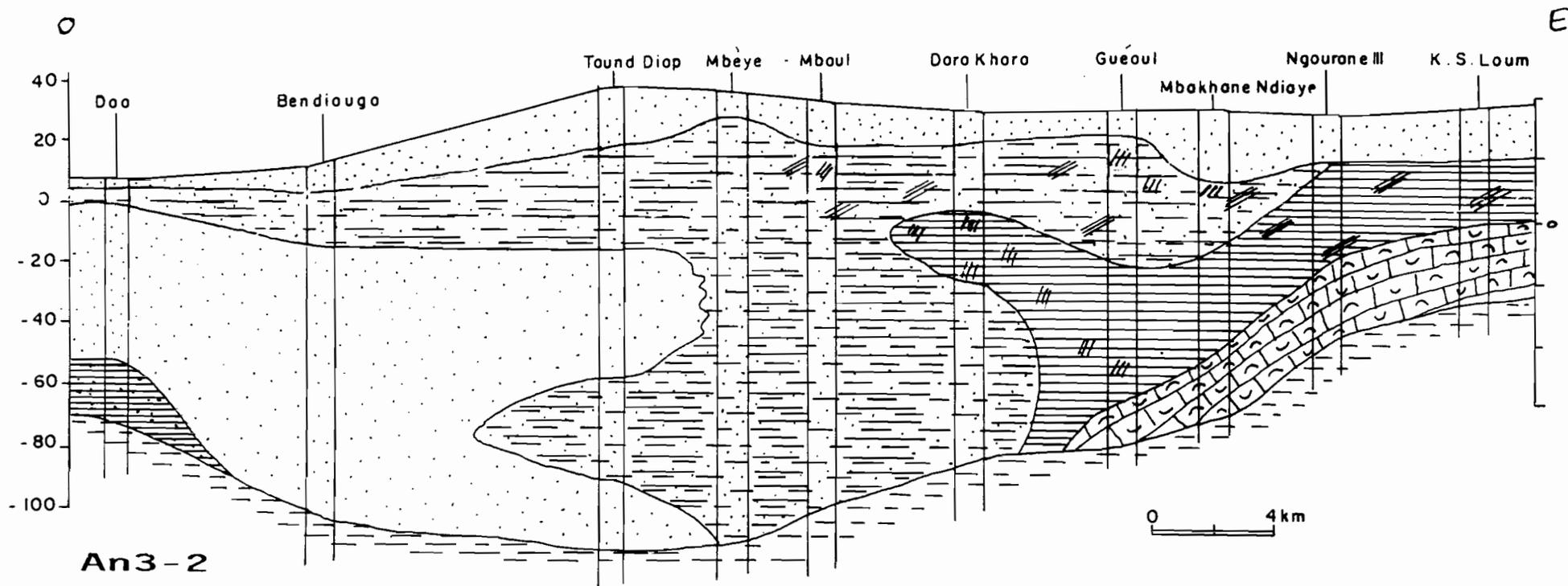


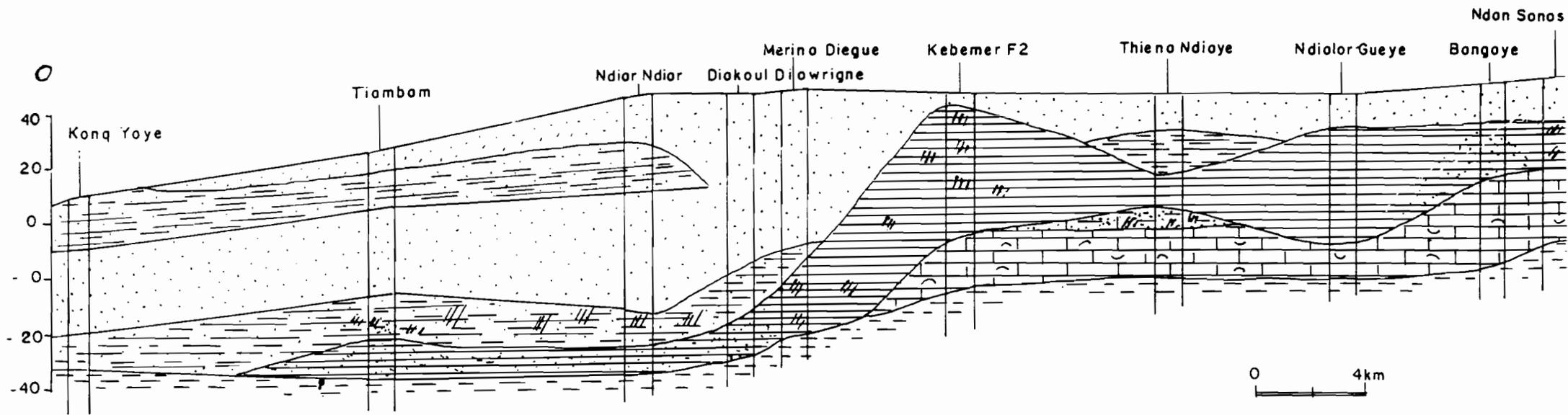
Niveau crépiné



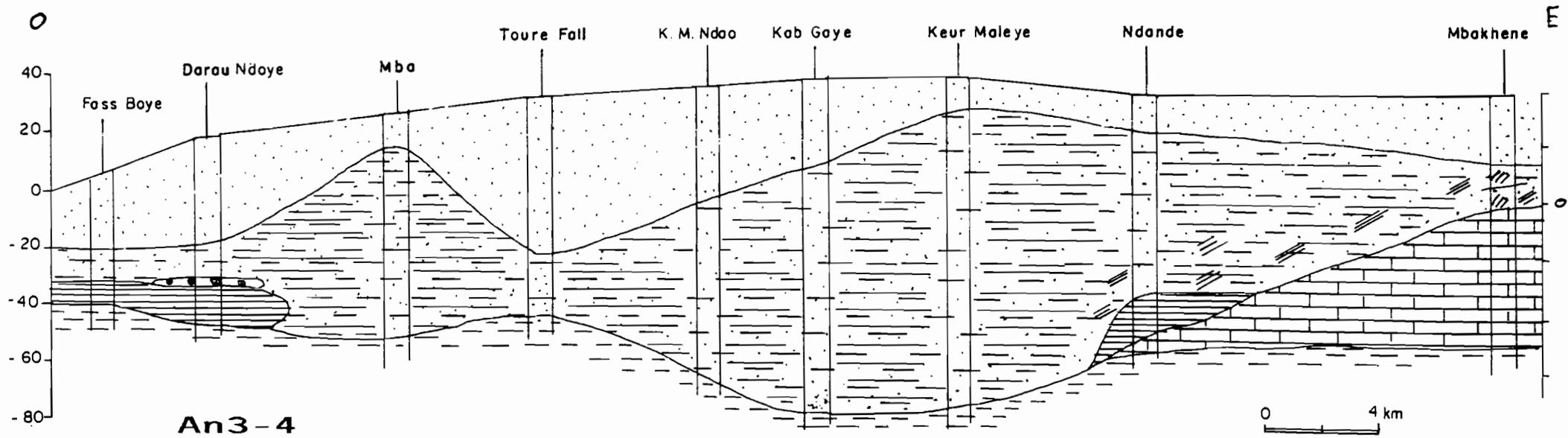
Eau salée

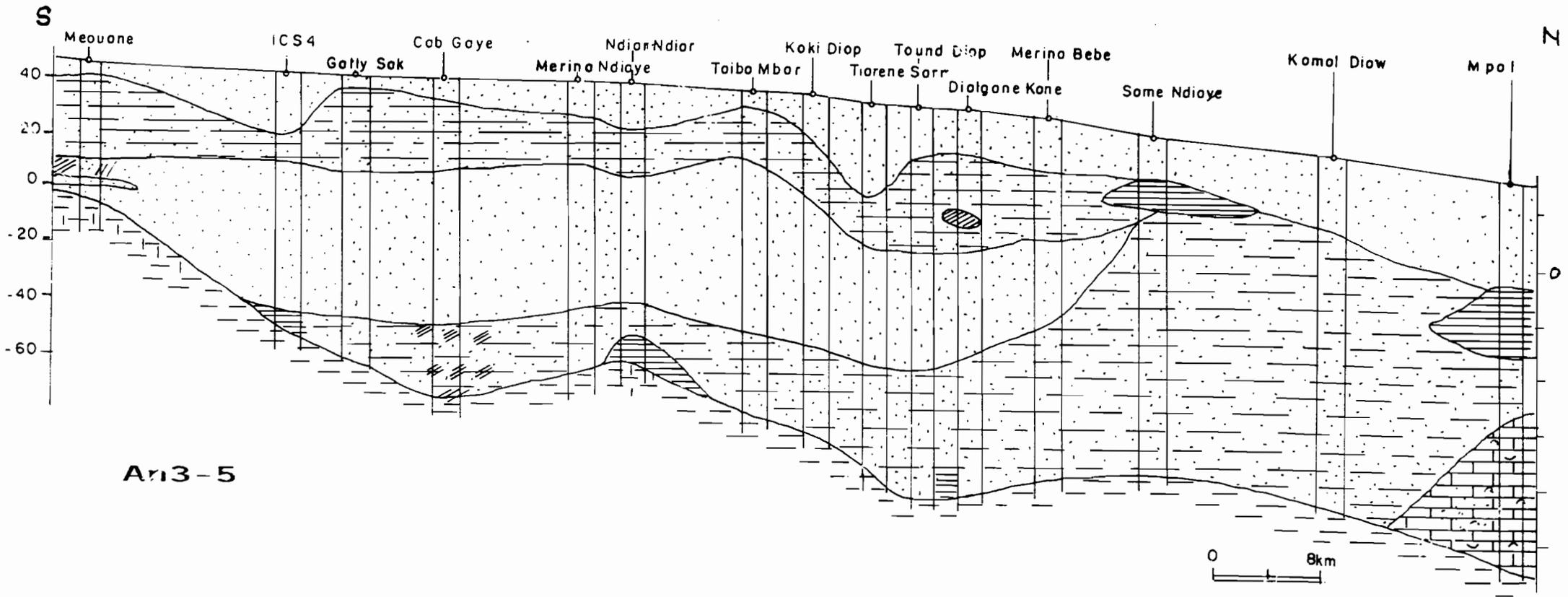




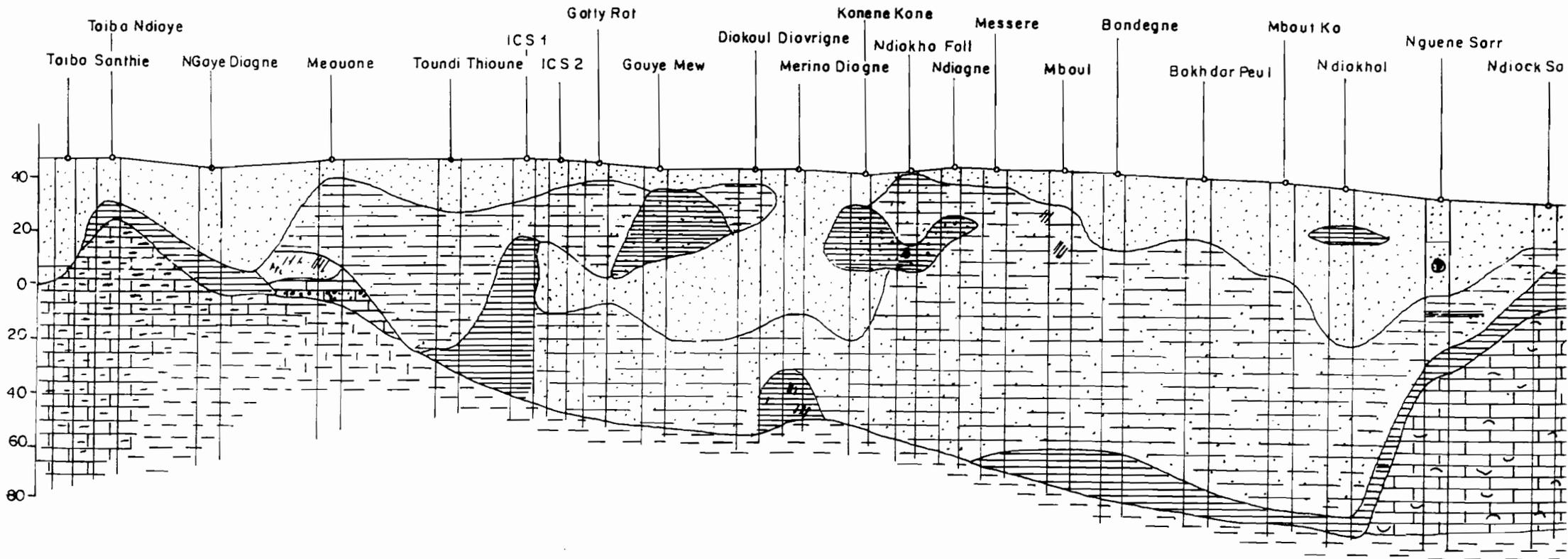


An3-3



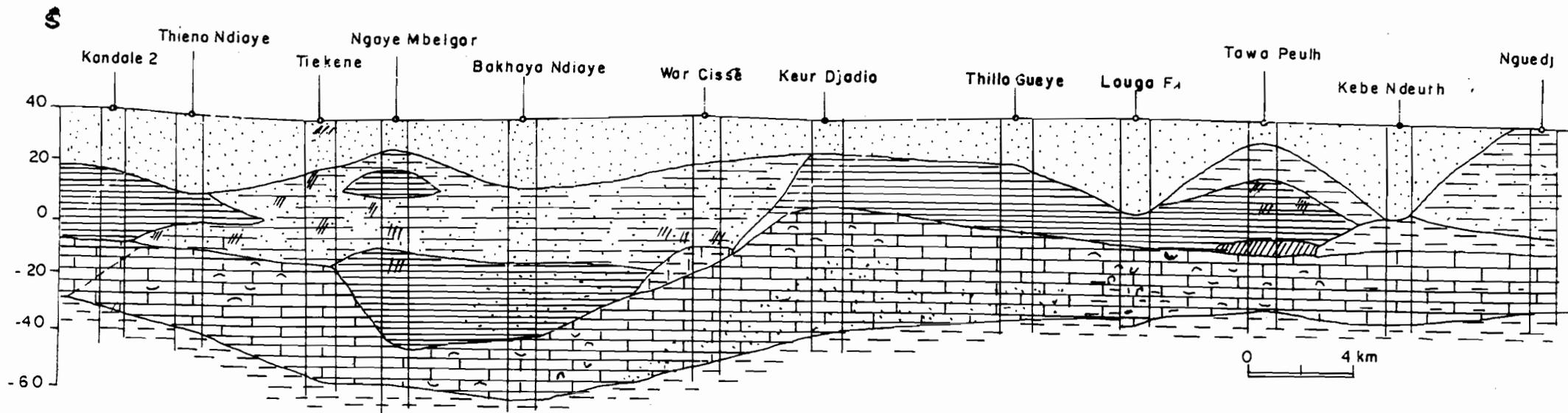


S



An3-6





An3-7

S

