

2

30022

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



THESE

présentée par

SAME DIOUF

pour obtenir le grade de Docteur de 3^{ème} Cycle
 en Géologie Appliquée
 (Mention **HYDROGEOLOGIE**)

**HYDROGEOLOGIE EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN ET
 CRISTALLOPHYLLIEN DU SENEGAL ORIENTAL**

Application de la méthode électrique 1D et 2D à la localisation et à la caractérisation
 des aquifères du batholite de Saraya et ses environs

Soutenue le 09 Janvier 1999
 devant la Commission d'Examen composée de :

M.M GAYE	C.B.	Président	Département géologie
RITZ	M.	Rapporteur	O.R.S.T.O.M
PARISOT J.C.		Examineur	O.R.S.T.O.M
FAYE	A.	Examineur	Département géologie
NGOM	P.M.	Examineur	Département géologie
NIANG	M.F.K.	Examineur	I.S.T

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: AX 16784 Ex:



010016784

99
90/1

JE RENDS GRACE A ALLAH, LE DIGNE DE
RECONNAISSANCES,

GLOIRE A LUI, AU SCEAU DES PROPHETES,
MOHAMED (S. P. L)

Et je dédie ce modeste travail :

A CHEIKH AHMADOU BAMBA

AVANT-PROPOS

Ce mémoire n'aurait pas pu arriver à son terme sans le soutien constant de personnes que je tiens à remercier :

- L'initiateur de ce travail **Mr. le Docteur P. MOURGUES**, à l'époque Directeur de recherche et responsable du Laboratoire de Géophysique à l'ORSTOM : son dévouement et toute son attention particulière à ma formation théorique et pratique me font témoigner en lui beaucoup de reconnaissance et de sympathie. Que DIEU lui réserve encore de beaux jours devant nous.

- **Mr. le Professeur C.B. GAYE**, mon directeur de thèse, pour son soutien constant, il m'a conseillé, soutenu et encouragé tout au long de mes études hydrogéologiques au Département de géologie ; il a largement contribué à l'accomplissement de ce travail. Je lui en suis très reconnaissant. Je tiens également à le remercier d'avoir accepté la présidence du jury de cette thèse.

- **Mr le Docteur M. RITZ**, Directeur de recherche à l'ORSTOM, mon Correspondant de thèse, pour avoir parrainé ce travail avec beaucoup de disponibilité jusqu'à la fin et pour avoir mis à ma disposition tous les moyens logistiques et financiers me permettant de travailler dans de bonnes conditions. Veuillez retrouver à travers ce mémoire l'expression de mes sincères remerciements.

- **Mr le Docteur J.C. PARISOT** responsable du Département Ressources Minérales à l'ORSTOM, m'a apporté son appui et sa compétence en prenant le temps et le soin de lire et de corriger ce mémoire ; il a également accepté d'être membre du jury. Je l'en remercie vivement.

- **Mr le Docteur A. FAYE** pour ses nombreux et sages conseils prodigués depuis mes premiers pas au Département de Géologie, pour avoir accepté de faire partie du jury. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude.

- **Mr le Docteur P.M. NGOME**, m'a apporté son appui en acceptant de corriger la partie géologique de ce travail et de faire partie du jury. Ses critiques, ses remarques ainsi que ses conseils m'ont été d'une grande utilité. Veuillez trouver à travers ce document le témoignage de mes sincères remerciements.

- **Mr le Docteur M.F.K. NIANG**, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour sa précieuse collaboration de toujours. Il me fait l'honneur de juger ce travail. Veuillez accepter à travers ce mémoire l'expression de mes sincères remerciements.

- Mr J.R. DURAND, représentant de l'ORSTOM au Sénégal pour l'accueil qui m'a été réservé au laboratoire de Géophysique du centre de Hann et pour l'allocation qui m'a été octroyée.

A travers sa personne je présente mes hommages aux personnels scientifique, technique et administratif de l'ORSTOM.

- Michel DUKHAN, Joseph TCHANI, Reymond GOMIS, Cheikh Mbacké, et Birame Sow pour leur contribution efficace qu'ils m'ont apporté durant les campagnes de terrain.

J'associe à ces remerciements Serigne DIENG et Aïssata NOUMOKHO pour leur disponibilité.

- MM. Y. ALBOUY et M. DESCLOITRES à l'ORSTOM de Bondy pour leur soutien constant

Le Père MBaye DIOUF, expert-Hydrogéologue, par sa sagesse, sa disponibilité et sa rigueur scientifique, m'a guidé et m'a inculqué un véritable savoir faire en matière de forage hydraulique. Je lui en suis très reconnaissant.

- Elisabeth NDIOUR, SOW hydrochimiste et Baba SARR au Département de Géologie pour leur disponibilité et leur soutien constant.

- Mes amis de toujours, toutes les connaissances qui m'ont témoigné leur sympathie.

- J'associe à ces remerciements les représentants de l'UNICEF, du PNUD, l'ensemble du personnel administratif et technique de la direction de l'Hydraulique Hann, du service de gestion et de planification des ressources en eau pour leur collaboration et pour m'avoir permis d'utiliser l'ensemble des données des études géophysiques, de forages que j'ai réalisées dans le cadre de leurs programmes respectifs.

Messieurs Alioune DIALLO, Moustapha TOURE et l'ensemble du personnel de l'unité de forage de l'UNICEF trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour leur précieuse collaboration tant sur le terrain que pour l'utilisation des données de forage dans le cadre de cette étude.

Une part spéciale aux êtres qui me sont si chères : mon Père, ma Mère, mon Epouse, ma Fille ; mes frères et soeurs, mes cousins, toute la famille.

Dans la zone du socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental, et plus particulièrement dans le secteur du batholite de Saraya, diverses approches conjointes ont été mises en oeuvre en vue de localiser et de caractériser les aquifères, zones favorables à des captages hydrauliques.

Il s'agit de la télédétection satellitaire SPOT, de la géologie, de la géophysique (l'électrique 1D et la multiélectrode 2D), de la piézométrie et de l'hydrochimie.

Ces travaux ont permis de :

- localiser les zones de discontinuité probables du socle (linéaments). Les directions linéamentaires intéressantes pour l'implantation de forages d'eau souterraine sont retenues selon la diversité des types de linéaments (failles, zones de cisaillement),
- caractériser chaque type d'aquifère du point de vue physique (lithologie, profondeur). Ainsi deux aquifères ont été identifiés : les aquifères superficiels (colluvio-alluviales, cuirasses latéritiques, altérites argileuses, arènes granitiques) et les aquifères profonds (socle fissuré),
- caractériser les aquifères du point de vue chimique (paramètres géochimique des aquifères et paramètres physico-chimiques des eaux souterraines). Selon la composition chimique des eaux souterraines, on identifie les aquifères des schistes et des roches basiques qui renferment des eaux riches en calcium et en magnésium et les aquifères des granites, des grès micacés qui par contre renfermant des eaux riches chlorures,
- décrire la morphologie de la surface piézométrique en relation avec le contexte géologique et les zones de drainage.
- réaliser à l'aide de la géophysique un taux de réussite d'implantation de forages d'eau de 77.46% avec des débits allant de 1 à 20 m³/h,

Ces travaux ont permis aussi de montrer que tout programme de prospection d'eau en zone de socle doit impérativement associer plusieurs méthodes. Car si la géophysique identifie sur le terrain les structures hydrogéologiques liées à l'interprétation de l'image satellite ou des photos-fracturations, la connaissance des faciès géologiques du secteur étudié constitue un élément indispensable à la définition des intervalles de résistivité utilisés par la géophysique (l'électrique) pour l'identification des couches aquifères. De même la détermination du sens de l'écoulement des eaux souterraines à partir d'une carte piézométrique participe à définir sur le terrain les profils électriques afin d'éviter ultérieurement une éventuelle pollution de l'eau des forages par les nitrates.

Mots-clés : *Sénégal oriental, socle birimien cristallin, cristallophyllien, batholite de Saraya, aquifère, géologie, télédétection satellitaire SPOT, géophysique, l'électrique 1D et 2D multiélectrode, forage, piézométrie, hydrochimie.*

SOMMAIRE

SOMMAIRE

VI

	pages
DEDICACE.....	I
AVANT-PROPOS.....	III
RESUME.....	V
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX	XI

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

<i>CHAPITRE. 1 - Géographie physique.....</i>	<i>3</i>
1.1.- Situation.....	3
1.2.- Relief.....	3
1.3.- Hydrographie.....	4
1.4.- Climat et végétation naturelle.....	4
<i>CHAPITRE 2 - Géologie de la zone du socle du Sénégal oriental.....</i>	<i>9</i>
2.1.- Présentation du craton ouest-africain.....	9
2.1.1.- Présentation de la boutonnière de Kédougou-Kéniéba.....	9
A.- Les terrains birimiens.....	10
B.- Les terrains Panafricains.....	12
C.- Les cuirasses latéritiques.....	14

DEUXIEME PARTIE : HYDROGEOLOGIE DU BATHOLITE DE SARAYA ET SES ENVIRONS

<i>CHAPITRE. 1 - Les travaux antérieurs</i>	<i>16</i>
1.1.- Les méthodes utilisées.....	16
1.1.1.- Etude géologique du batholite de Saraya.....	16
1.1.2.- Télédétection satellitaire.....	17
1.1.3.- Géophysique (l'électrique).....	18

1.1.4. - Piézométrie.....	21
CHAPITRE. 2 - Les résultats des méthodes antérieures.....	22
2.1.- Description du batholite de Saraya.....	22
2.2.-Etude des fractures.....	22
2.3.- Etude pétrographique et minéralogique.....	23
2.4.- Application à la recherche d'eau souterraine.....	33

**TROISIEME PARTIE : CAMPAGNES DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE ET
HYDROGEOLOGIQUE DANS LE SECTEUR DU BATHOLITE
DE SARAYA ET SES ENVIRONS**

CHAPITRE 1 : Les méthodes utilisées	37
1.1.- La prospection géophysique	37
a - Les sondages et traînés électriques	37
b - Les dispositifs multiélectrodes -ABEM Lund Imaging System-.....	38
1.2.- Etude piézométrique du secteur de Saraya et ses environs.....	40
1.3.- Etude de la chimie des eaux des nappes du secteur de Saraya et ses environs.....	40
CHAPITRE 2 : Résultats des campagnes.....	42
2.1. - Identification des anomalies	42
2.1.1.- Fractures et zones de contact granite-roches volcano-sédimentaires.....	42
A - Secteur de Faraba.....	43
B - Secteur de Baïtilaye.....	45
a - Courbes isopièzes et variation latérale des faciès géologiques.....	46
C - Secteur de Badioula.....	48
D - Secteur de Borne.....	48
E - Secteur de Bembou.....	49
F - Secteur de Balakonko.....	49
2.2.- Caractérisation lithologique des aquifères.....	51
2.3 Caractérisation hydrochimique du système aquifère-nappe phréatique en zone de socle cristallin et cristallophyllien.....	53
2.3.1.- Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du batholite de Saraya et ses environs	53
A - Paramètres physiques.....	53

B - Concentration des principaux ions.....	54
C - Influence de la nature des aquifères sur la composition chimique des eaux souterraines	56
D - Les faciès hydrochimiques.....	62

**CHAPITRE 3 : La prospection géophysique et la recherche d'eau souterraine dans la région
du socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental.....**

3.1.- Caractérisation géoélectrique des aquifères de socle par l'exploitation des différents types de courbes de sondages électriques	66
3.1.1.- Les aquifères profonds.....	67
3.1.2.- Les aquifères superficiels.....	72
3.2.- Prospection géophysique et optimisation de la recherche d'eau souterraine en zone de socle.....	74
3.2.1.- Analyse des résultats.....	74
3.3.- Apport complémentaire de la prospection géophysique à l'analyse de l'image satellite et de la photo-aérienne.....	78

CONCLUSIONS GENERALES.....	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	85
ANNEXES.....	87

LISTE DES FIGURES
ET DES
TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 : Carte de situation.
- Fig. 2 : Recul de la pluviométrie annuelle moyenne entre 1950 et 1990 (S.I.G.R.E.S., 1994)
- Fig. 3 : Graphique d'estimation de la pluviométrie et du drainage mensuels à Kédougou et Tambacounda période 1931-1960
- Fig. 4 : Graphique d'estimation de la pluviométrie et du drainage mensuels à Bakel, Tambacounda et Kédougou période 1961-1992
- Fig. 5 : Le craton Ouest-africain (Bessoles, 1977)
- Fig. 6 : Esquisse géologique du Sénégal oriental (J.P. Bassot, 1969).
- Fig. 7 : Mode de gisement des nappes d'eau souterraine et les processus de recharge (I.W.ACO, 1989 in Koussoubé, 1996)
- Fig. 8 : Zone d'étude du massif de Saraya (Blot, 1980)
- Fig. 9 : Carte schématique du secteur ouest Khondokho emplacement de leurs principaux profils et leur profondeur (Blot, 1980).
- Fig. 10 : Carte linéamentaire de l'image SPOT MS du secteur de Saraya (Witschard, 1995)
- Fig. 11 : Mise en oeuvre du traîné électrique (a, b)
- Fig. 12 : Schéma du quadripôle de mesure
- Fig. 13 : Carte géologique du batholite de Saraya (COGEMA, 19977)
- Fig. 14 : Courbe de sondages électriques en milieu granitique et en milieu doléritique (Blot, 1980)
- Fig. 15 : Coupe schématique des puits KN 13 à KN 15 (Blot, 1980)
- Fig. 16 : Carte piézométrique des aquifères du socle (S.I.G.R.E.S., 1994)
- Fig. 17 : Localisation des secteurs étudiés
- Fig. 18 : Principe de la pseudosection (Barker, 1992 in Dahlin, 1995)
- Fig. 19 : Modèle d'interprétation 2D
- Fig. 20 : Comparaison traîné électrique et multiélectrode des résistivités apparentes à Faraba
- Fig. 21 : Comparaison des profils multiélectrodes Wenner et Schlumberger à Faraba
- Fig. 22 : Effet des à-coups de prise sur les sondages électriques effectués avec un dispositif Wenner et un dispositif Schlumberger (Astier, 1971).
- Fig. 23 : Traîné électrique à Baïtilaye
- Fig. 24 : Piézométrie locale du secteur de Saraya
- Fig. 25 : Cadre physique du massif de Saraya : réseau hydrographique et orographique (Blot, 1980)
- Fig. 26 : Profile multiélectrode Wenner à Badioula
- Fig. 27 : Profil multiélectrodes Schlumberger à « Borne »
- Fig. 28 : Profils multiélectrodes (pseudosections) en fonction des débits de forage à Bembou

- Fig. 29 : Traîné électrique et multiélectrodes pseudosection à Balakonko
- Fig. 30 : Diagramme de Piper des eaux des granites, dolérites et grès
- Fig. 31 : Diagramme de Piper des eaux des schistes et syénites
- Fig. 32 : Courbe de sondages électriques en « fond de bateau »
- Fig. 33 : Courbe de sondages électriques en « cloche dans le fond de bateau »
- Fig. 34 : Courbe de sondages électriques en « cloche puis en fond de bateau »
- Fig. 35 : Courbe de sondages électriques à « une seule branche »
- Fig. 36 : Courbe de sondages électriques à « remontée traînante »
- Fig. 37 : Courbe de sondages électriques en « escalier sur la branche montante »
- Fig. 38 : Influence du passage d'un filon de quartz sur l'allure des courbes de sondages électriques en aquifère des schistes
- Fig. 39 : Profil type de l'altération des granites
- Fig. 40 : Mode de gisement des eaux souterraines dans le socle granitique en climat tropical
- Fig. 41 : Comparaison de l'épaisseur des altérites et de la profondeur du toit du substratum sain en milieu granitique et en milieu schisteux à l'aide de sondages électriques
- Fig. 42 : Courbes de sondages électriques à Coïninguel, Niangana Tiadel et Koussan
- Fig. 43 : Logs lithostratigraphiques des forages de Koussan
- Fig. 44 : Sondage électrique et log de forage à Apé Diaobé
- Fig. 45 : Prospection électrique à Bondji Waly (zone de contact schistes-dolérite filonien)
- Fig. 46 : Prospection électrique à la recherche des épontes fracturées d'un filon de dolérite dans les pélites
- Fig. 47a, b, ...,g : Etude comparative des résultats des sondages électriques et des coupes lithostratigraphiques des forages réalisés dans la région du socle

LISTE DES TABLEAUX

- Tab. 1 : Valeurs d'estimation du drainage mensuel à Tambacounda et Kédougou, période 1931 - 1960.
- Tab. 2 : Valeur d'estimation du drainage mensuel à Bakel, Tambacounda et Kédougou, période, 1961 à 1992.
- Tab. 3 : Aquifères du massif de Saraya. Composition moyenne en % des éléments majeurs d'après le faciès pétrographique et le niveau du profil d'altération.
- Tab. 4 : Résistivité des eaux et des roches. D'après Astier, J.L. (1971) ; Meyer De Stadelhofen, C. (1991)
- Tab. 5 : Description du fichier Adresse (.ADR).
- Tab. 6 : Description des fichiers (.ORG, .OHM et .DAT).
- Tab. 7 : Porosités totales des aquifères à partir de la loi d'Archie
- Tab. 8 : Composition chimique des eaux de 17 puits et forages du massif de Saraya et ses environs (en mg/l).
- Tab. 9 : Comparaison de la composition moyenne des eaux souterraines du massif de Saraya et ses environs avec celles des séries sédimentaires.
- Tab. 10 : Composition moyenne des eaux du massif de Saraya et ses environs (en mg/l).d'après le faciès Pétrographique et le niveau du profil d'altération
- Tab. 11 : Valeurs empiriques des résistivités sur diverses roches consolidées.
(Meyer De Stadelhofen, 1991)
- Tab. 12 : Etude comparative des résultats des sondages électriques et des coupes techniques de forages réalisés dans la région du socle

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Située en climat soudano-sahélien à la limite du climat soudano-guinéen, la zone de socle du Sénégal oriental est soumise à une sécheresse annuelle de plusieurs mois (de novembre à mai) malgré un module pluviométrique annuel de l'ordre de 500 mm au Nord à Bakel et 1100 mm dans le secteur de Kédougou.

Contrairement au bassin sédimentaire secondaire-tertiaire dans lequel les principaux aquifères et leur recharge sont assez bien identifiés, cette région de socle cristallin et cristallophyllien présente des aquifères discontinus limités à certains types de fracturation ou d'altération difficilement identifiables mais associés en général à des accidents tectoniques (failles, zones de cisaillement).

Dans cette province, le développement reste tributaire des ressources en eau qui sont très insuffisantes pour assurer l'alimentation en eau potable des populations, l'expansion de l'agriculture et de l'élevage, la mise en place d'une industrie d'exploitation des ressources minérales ainsi qu'une politique de santé liée à la lutte contre les maladies hydriques (diarrhéiques, bilharziose, ver de Guinée). Une réponse à cette question, voire une méthodologie appliquée non seulement à la localisation, à la détermination de la nature des aquifères mais aussi à l'implantation de forages productifs aux environs immédiats des villages, sera apportée.

La localisation et la caractérisation des aquifères dans ce contexte géologique complexe du Sénégal oriental en général et du batholite de Saraya en particulier, constitue un des thèmes de recherche du projet « CAMPUS » O.R.S.T.O.M. (Dakar) initié par le laboratoire de Géophysique de l'Institut Français de recherche scientifique pour le développement.

Pour atteindre ces objectifs, la méthode de travail consiste en une étude intensive par la mise en œuvre de plusieurs techniques (géologiques, télédétection satellitaire et aérienne, géophysique électrique 1D et multiélectrode 2D) auxquelles il faut associer une étude piézométrique, et hydrochimique.

Le présent mémoire comprend sept chapitres regroupés en trois parties.

La première partie est consacrée à l'étude du cadre physique (hydrographie, climat et végétation) et des caractères généraux de la géologie de la zone du socle du Sénégal oriental.

La seconde partie abordera les travaux hydrogéologiques antérieurs du batholite de Saraya et ses environs, dans lesquels les différentes méthodes d'investigation ainsi que leurs résultats seront exposés.

A partir des résultats de ces travaux sur le bâti cristallin et cristallophyllien du batholite de Saraya et ses environs, nous tenterons, à l'aide des méthodes électriques 1D et 2D, dans la troisième partie de confirmer l'existence des structures liées à ces linéaments et de déterminer les caractéristiques

hydrogéologiques des failles, des zones de cisaillement, des contacts géologiques et la configuration du toit du substratum résistant.

L'établissement de la carte piézométrique au secteur de Saraya permettra de décrire les caractéristiques morphologiques de la nappe en rapport avec le contexte géologique.

La corrélation géochimique des aquifères et chimie des eaux des nappes permettra par la suite d'établir les relations entre la nature et la constitution minéralogique des aquifères et la minéralisation des eaux des nappes.

Nos observations porteront ensuite sur l'étude des aquifères du socle du Sénégal oriental dans leur globalité afin d'appréhender leurs caractéristiques géoélectriques ainsi que la question traitant de la prospection géoélectrique et de l'optimisation de la recherche en eau en zone de socle.

En conclusion, nous ferons le point des enseignements à tirer relatifs à cette étude hydrogéologique des aquifères dans ce contexte de socle.

PREMIERE PARTIE :

GENERALITES

CHAPITRE 1 - GEOGRAPHIE PHYSIQUE

1.1.- Situation

La région étudiée affecte la forme d'un triangle dont les côtés sont constitués par la frontière Sénégal-guinéenne, la rivière Falémé et le fleuve Sénégal, et la limite entre les terrains anciens et le bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien (Fig. 1).

Le Sénégal oriental est couvert par les cartes au 1/200.000° de Sélibabi, Bakel, Daïafi, Tambacounda, Youkounkoun, Kédougou, Kossanto et Kéniéba).

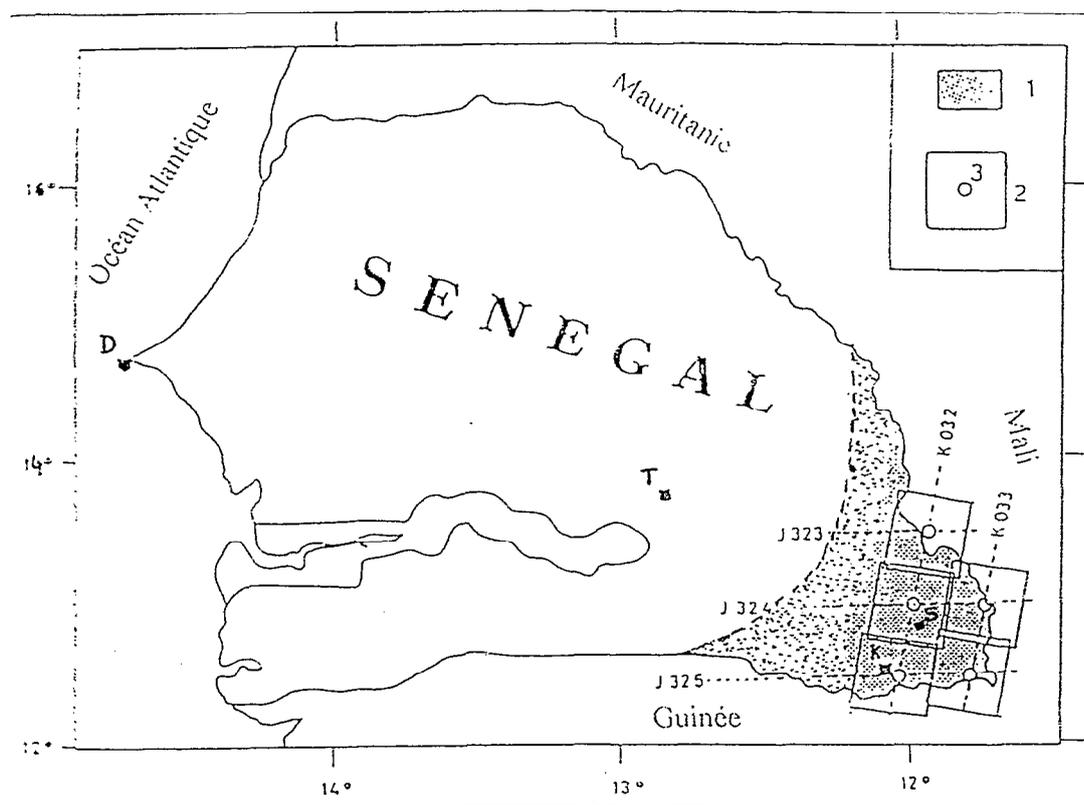


Fig. 1 : Carte de situation

1 = secteur d'étude. 2 = scène SPOT. 3 = centre des scènes. j et k sont les coordonnées du système SPOT. D = Dakar. T = Tambacounda. K = Kédougou. S = Saraya

1.2.- Le Relief

La région étudiée est formée de vastes étendues aplanies dominées localement par des buttes cuirassées. Ces surfaces sont souvent couvertes par un épais manteau latéritique, cuirassés ou non, qui masque les formations géologiques originelles.

Les seuls reliefs importants sont constitués par la chaîne des collines Bassaris, massifs de roches vertes de Mako et Bransan et les pointements doléritiques de Baraboye et Ndébou (Camus et Debuissou, 1964).

Au Sud, le rebord nord du massif du Fouta Djallon jalonne la frontière Sénégal-guinéenne.

Notons encore les reliefs de moindre importance que forment sur la feuille de Bakel les quartzites métamorphiques et les grès rouges du Boundou.

1.3.- Hydrographie

Le réseau hydrographique très développé est tributaire de trois grands cours d'eau pérennes:

- Le Sénégal
- La Falémé
- La Gambie

La plus grande partie de la région est drainée par la Gambie et la Falémé ; la ligne de partage des eaux correspond grossièrement à l'axe Bembou-Saraya. Outre ces deux grandes voies d'eau, existe un réseau très dense de marigots dont les tracés sont excessivement sinueux.

Souvent les têtes de marigots en zone cuirassée commencent à une rupture en pente abrupte par éroulement de cette cuirasse, les dénivellements pouvant atteindre une vingtaine de mètre.

1.4.- Climat et végétation

La totalité de la région étudiée se trouve comprise dans une zone de savane arbustive ou boisée. La densité des arbres, très variable du Nord au Sud, est généralement fonction des zones climatiques et de la nature des sols (par exemple les sols intensément ferrallitisés sont recouverts d'une végétation arbustive « rabougrie » et peu dense).

Le tapis herbacé, très dense et de pénétration difficile en début de saison sèche disparaît presque totalement à la fin du mois de Janvier à cause des « feux de brousse » qui ravagent l'ensemble de la région.

* Le secteur soudano-sahélien au Nord est caractérisé par deux types de groupement végétaux :

- le groupement à *Acacia seyal* sur sols argileux, comprend des arbres de grandes tailles tels les baobabs dominants, des fourrées (*Guiera senegalensis*, *Combretum glutinosum* par exemple) et des espèces épineuses comme *Balanites aegyptiaca* et *Ziziphus mauritiana*,
- le groupement à *Combretum glutinosum* peut varier d'une savane arbustive à une savane arborée.

* Le secteur soudanien au Sud est caractérisé par la savane arborée comprenant une strate moyenne composée de petits arbres et arbustes (*Lamnea acida*, *Ziziphus mauritiana*,...) et une strate herbacée qui se dessèche après l'hivernage.

Dans le secteur soudano-sahélien, l'action de l'homme aboutit à une abondance d'*Acacia albida* et d'*Adansonia digitata* tandis que dans le secteur soudanien elle aboutit à une abondance de *Butyrospermum parkii* et *Parkia biglobosa*.

Les savanes soudanaises, riches en andropogonacées, sont endommagées chaque année par les « feux de brousse ».

1.4.1- Types de climats

Le passage entre les deux zones climatiques se fait graduellement :

- au Nord, avec un climat de type sahélo-soudanien, on a une saison des pluies de Juin à Octobre, et une pluviométrie de l'ordre de 500 mm à Bakel (maximum d'intensité des pluies en Août) ;

- au Sud domine le caractère soudanien avec une saison des pluies de Mai à Octobre et une pluviosité de l'ordre de 1100 mm à Kédougou (maximum d'intensité des pluies en Août). Les pluies sont ces averses orageuses, violentes, et de faible durée, mais de forte intensité.

La température suit à peu près les mêmes variations dans les deux provinces climatiques, avec des maximums plus élevés dans le type sahélo-soudanien de l'ordre de 42°C en Avril et Mai.

L'évaporation croît du Sud vers le Nord, et l'on assiste à un tarissement plus précoce des réserves de surface dans la province sahélo-soudanienne où les cours d'eau sont à sec, sans même trace d'étendue d'eau stagnante dès le mois de Janvier.

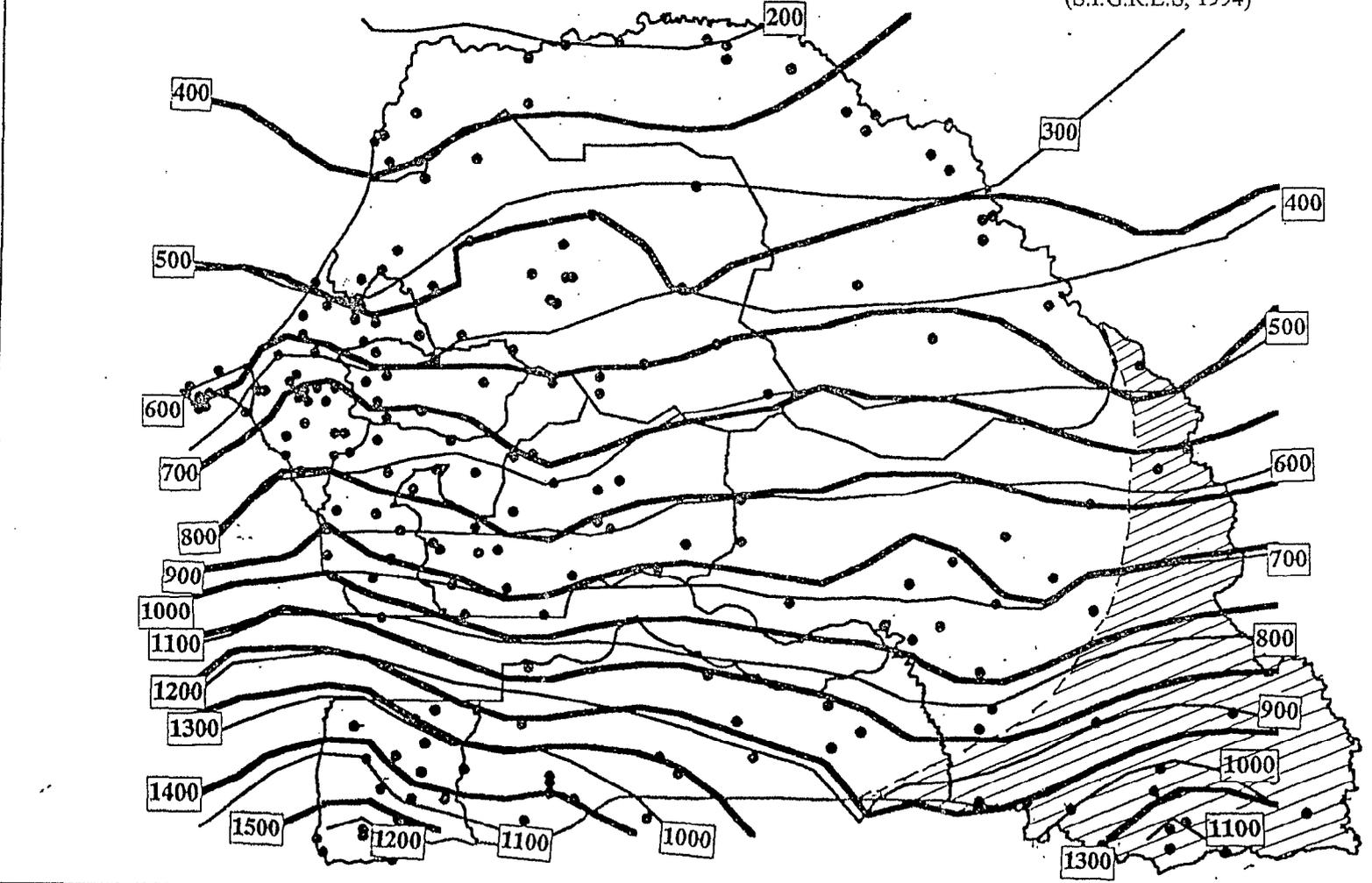
1.4.2.- Précipitation

Les moyennes pluviométriques pour les périodes 1951-1970 et 1971-1990 ont été représentées sur la figure 2 ; sur cette carte, les formations anciennes qui font l'objet de notre étude figurent en grisé.

La pluviométrie subit une décroissance du Sud au Nord, suivant des isohyètes E-W sensiblement parallèles.

Cette décroissance est aussi observable sur les tableaux 1 et 2 représentant respectivement les moyennes annuelles des hauteurs de pluies pour les périodes 1931-1960 et 1961-1992.

Fig.2: Recul de la pluviométrie annuelle moyenne entre 1950 et 1990
(S.I.G.R.E.S, 1994)



-  Zone d'étude
-  Station pluviométrique
-  Isohyète de la période sèche (71-90) en mm
-  Isohyète de la période humide (51-70) en mm

Tab. 1 : Valeurs d'estimation du drainage mensuel à Tambacounda et Kédougou, période 1931-1960 (pour Pm nous avons pris les valeurs relatives aux périodes 1931-1960 et pour E celles relatives aux périodes 1953-1958 ; l'unité des paramètres utilisés est en mm de pluie) (Camus et Debuissou, 1964).

Tambacounda

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Pm	0.1	0.6	0.1	2.2	19.2	129.3	196.2	275.4	234	66.71	2.30	0.1	926.8
E	357	341	423	419	413	228	103	62	54	85	162	281	2.928
E	215	204	254	252	247	137	61.8	36.2	32.4	51.0	91.2	168.5	1756.8
Etp	159	151	188	186	183	101	45.5	26.7	24	37.4	66	123	1290.6
Dm	-158.9	-150.4	-183.8	-183.8	-163.8	+28.3	+150.7	+248.7	+210.6	+29.3	-63.7	-122.9	-363.8

Kédougou

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	M	Année
Pm	0.2	0.4	0.5	7.4	46.6	172.6	257.9	320.1	302.0	129.1	19.7	1.5	1225.0
E	253	341	415	387	288	159	96	71	75	111	138	226	2559
E	157.9	205	249	232	173	95.5	57.6	42.6	45	66.5	82.8	135.4	1542.3
Etp	115	151.8	184	171	128	71.8	42.5	31.6	33.4	49.3	61.3	100	1140.6
Dm	-114.8	-151.4	-183.5	-163.6	-81.4	+100.8	+215.4	+288.5	+268.6	+79.8	-44.6	-98.5	+84.4

Tab. 2 : Valeurs d'estimation du drainage mensuel à Kédougou, Tambacounda et Bakel période 1961-1992 (pour Pm nous avons pris les valeurs relatives aux périodes 1961-1992 et pour E celles relatives aux périodes 1980-1989 ; l'unité des paramètres utilisés est en mm de pluie)

Kédougou

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	M	Année
Pm	0	0.2	0.2	2.7	46.8	163.4	270.2	296.5	278.1	109.1	4.4	0.3	1171.9
E	146	167	195	226	219	168	138	129	130	137	137	142	193.4
Etp	64.4	74.4	86.6	97.2	97.2	74.6	61.3	57.3	57.7	60.8	60.8	63	855.2
Dm	-54.6	-73.9	-86.4	-94.5	-50.4	+88.8	+208.9	+239.2	+220.4	+48.3	-56.4	-62.7	+316.3

Tambacounda

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	M	Année
Pm	0	1.14	0.13	3.94	17.1	102.6	181.6	220.4	168.6	56.5	1.5	0.6	754
E	183	192	220	234	225	193	152	146	152	157	152	171	2177
Etp	81.3	85.2	97.7	103.9	99.9	85.7	67.5	64.8	67.5	69.7	67.5	75.9	965.6
Dm	-81.3	-84.1	-97.6	-99.9	-82.8	+16.9	+114	+155.6	+101	-13.2	-66	-75.3	-212.6

Bakel

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	M	Année
Pm	0	0.7	0	0.3	5.1	43.9	128	169.5	111.7	28.9	1.7	0.6	490.4
E	267	313	349	338	311	258	220	188	205	196	235	236	3116
Etp	118.5	139	154.9	150.1	138.1	114.5	97.7	83.5	91	87	104.3	104.8	1383.5
Dm	-118.5	-138.3	-154.9	-149.8	-133	-70.6	+30.3	+86	+20.7	-58.1	-103	-104.8	-893.1

1.4.3.- Drainage mensuel

Le drainage mensuel, D_m , peut être défini comme étant la différence (en mm de pluie) entre la pluviométrie moyenne mensuelle P_m et l'évapotranspiration moyenne mensuelle E_{tp} .

L'évapotranspiration moyenne mensuelle est égale à l'évaporation sur nappe d'eau libre E_l , corrigée d'un coefficient C égal à 0,74.

E_l est égal à l'évaporation mesurée E d'après PICHE, multipliée par 0,6 (Camus et Debuisson, 1964).

Donc :

$$D_m = P_m - E_{tp}$$

$$E_{tp} = E_l \times C$$

$$= E \times 0,6 \times C$$

$$D_m = P_m - (E \times 0,6 \times 0,74)$$

$$D_m = P_m - 0,444E$$

On prendra pour P_m la valeur moyenne d'au moins vingt années d'observations et la valeur de E devant être calculée sur une période d'au moins cinq années.

Pour le calcul des valeurs moyennes du drainage mensuel (cf. tab. 1 et 2) nous avons pris pour P_m les valeurs relatives aux périodes 1931-1960 et 1961-1992, et pour E celles relatives aux périodes 1953-1958 et 1980-1989.

Partant des valeurs mensuelles de la pluviométrie et des valeurs estimées de l'évapotranspiration potentielle, nous pouvons en déduire le volume d'eau drainant le sol et capable de participer à un lessivage.

Les tableaux 1 et 2 et les graphiques (fig. 3 ; 4) ainsi réalisés montrent que la quantité d'eau capable de drainer est très forte mais réduite à une courte période de l'année. Ils montrent aussi que cette quantité est importante au Sud, à Tambacounda et Kédougou et faible au Nord à Bakel.

CONCLUSION

La violence des pluies par ailleurs de courte durée ainsi que la présence d'une couverture cuirassée et d'une couche d'argiles parfois épaisse située entre la surface et l'aquifère superficiel favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration.

Le régime des pluies entraîne une dégradation et un lessivage important des sols. Cette dégradation est accentuée dans le domaine sahélo-soudanien par la destruction progressive du couvert végétal (déforestation).

Les cours d'eau, débitant en abondance constituent aujourd'hui un véritable phénomène de déstabilisation des infrastructures routières et ferroviaires dans cette région.

Fig. 3 : Graphique d'estimation de la pluviométrie et du drainage mensuels à Kédougou et Tambacounda période 1931-1960

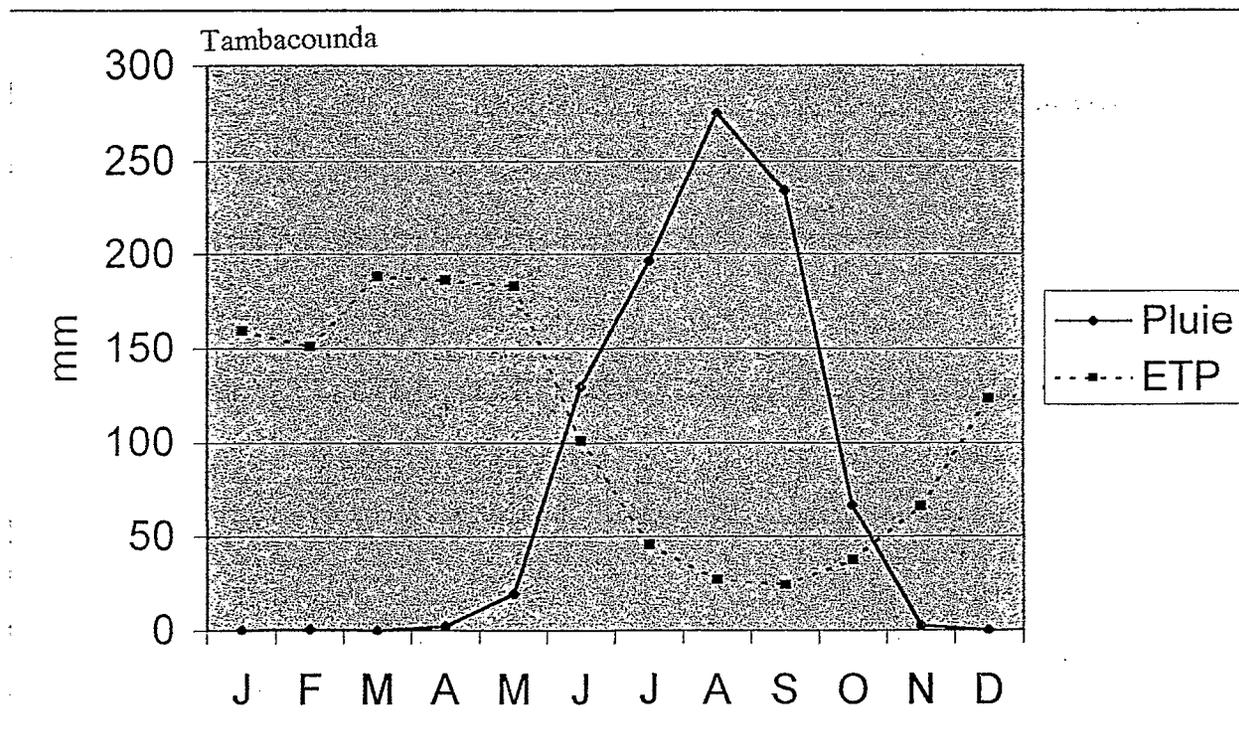
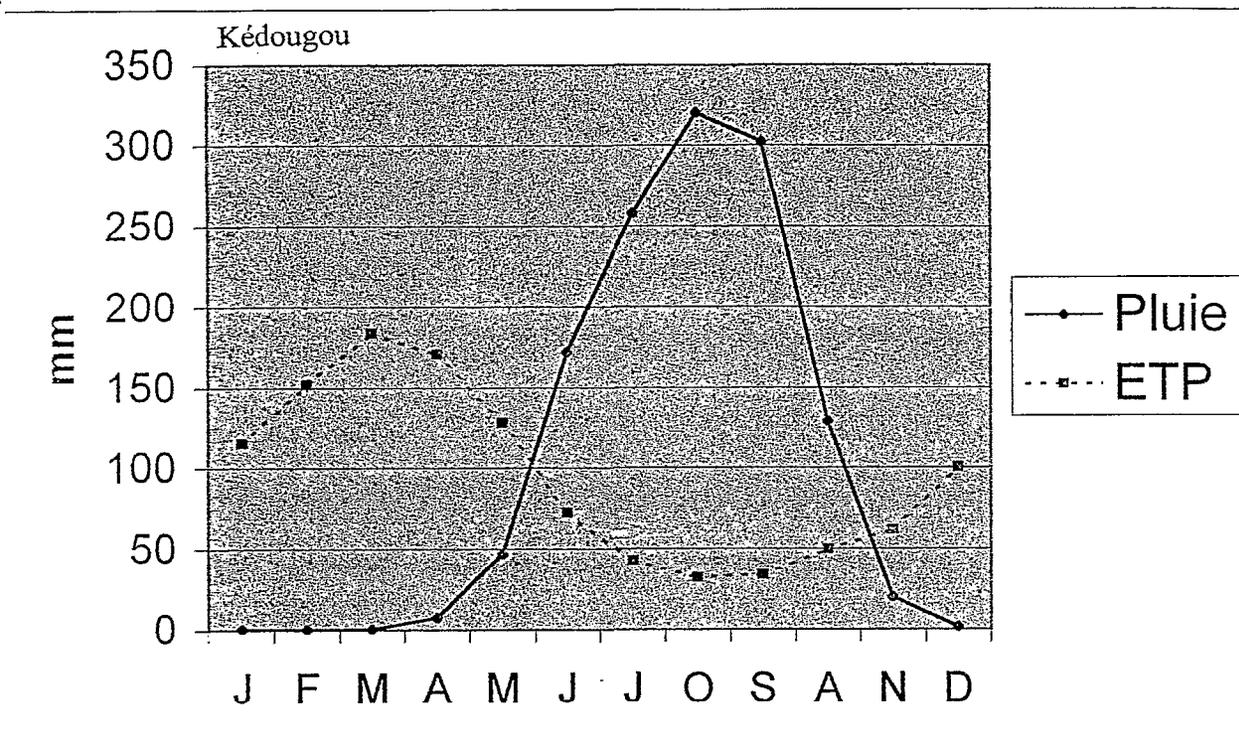
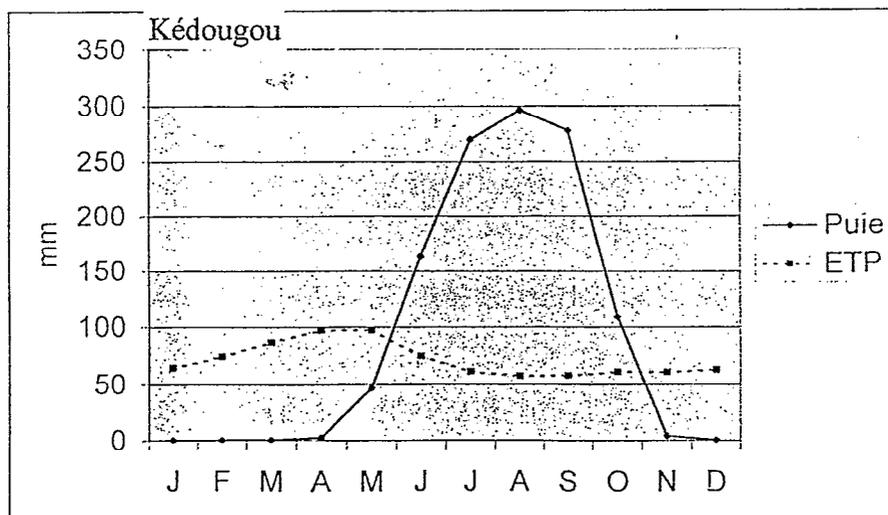
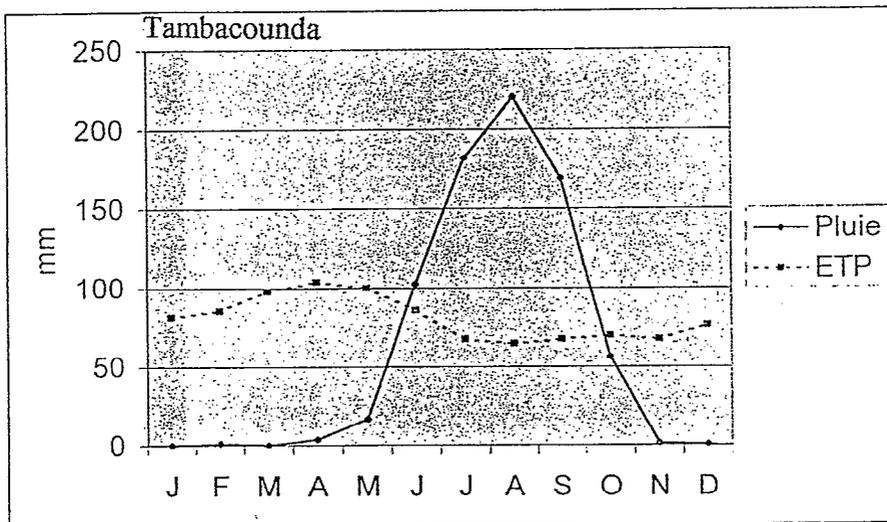
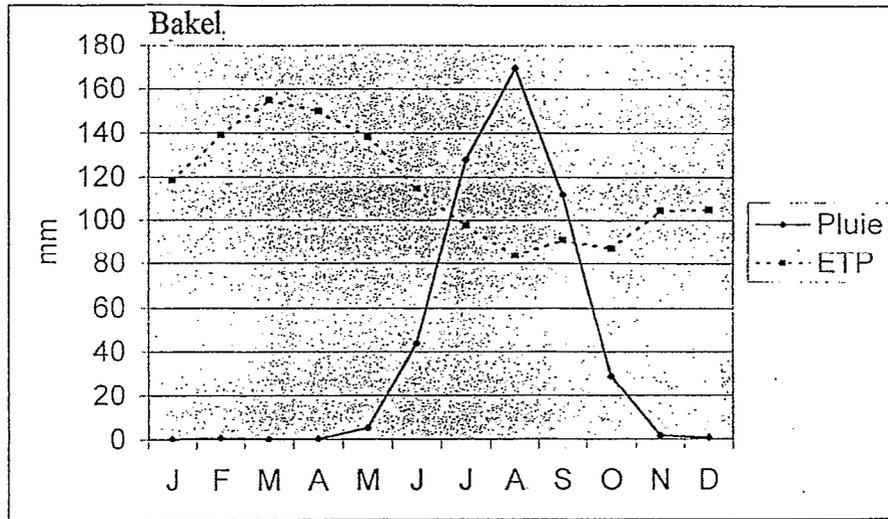


Fig. 4 :: Graphique d'estimation de la pluviométrie et du drainage mensuels à Bakel, Tambacounda et Kédougou période 1961-1992



Le lessivage important des sols constitue aussi une menace sérieuse pour le développement de l'agriculture dans cette région.

L'évaporation active constitue un deuxième élément défavorable à la constitution de réserves aquifères appréciables.

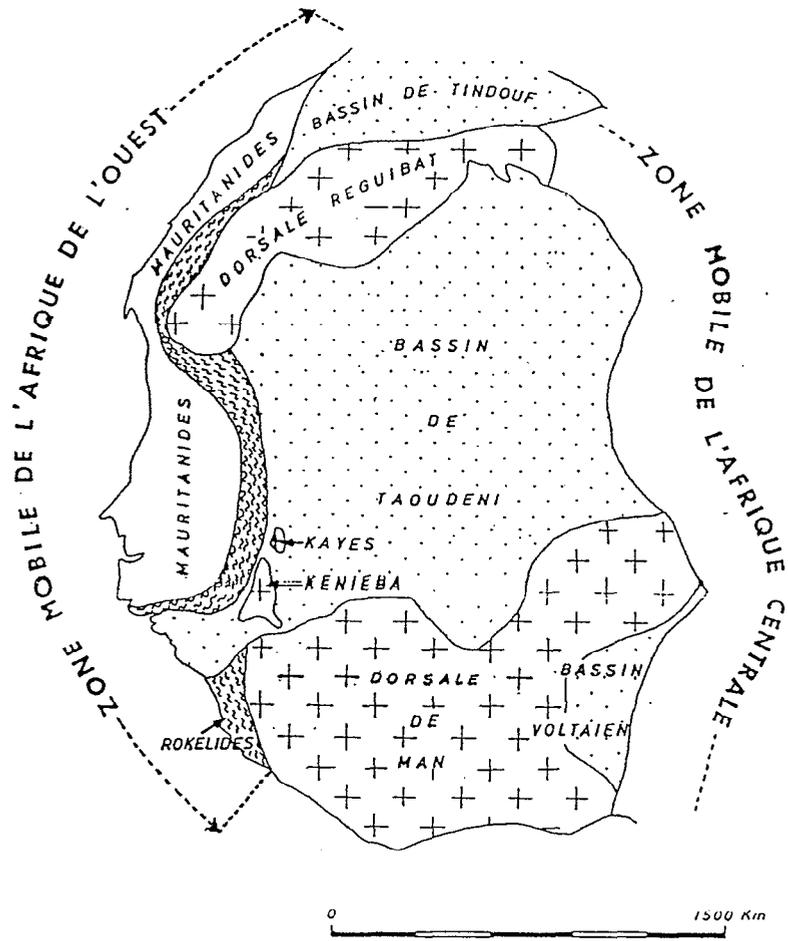


Fig. 5 : Le craton Ouest-africain (Bessoles, 1977)

CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DE LA ZONE DU SOCLE DU SENEGAL ORIENTAL

La région concernée par cette étude comprend l'ensemble de la zone de socle du Sénégal oriental en général et en particulier le secteur du massif de granite de Saraya et ses environs.

L'étude portera sur la détermination des grands ensembles structuraux, la description et la répartition des différents faciès géologiques. En effet la genèse et les caractéristiques (surtout la productivité) des aquifères en zone de socle sont très tributaires de leur degré de fissuration, de fracturation ou de leurs caractéristiques pétrographiques.

La géologie de la zone de socle a fait l'objet de nombreux travaux (Camus et Debuissou, 1964 ; Bois, 1962 ; Witschard, 1965, 1995 ; Bassot, 1966 ; Blot, 1977, 1980 ; Villeneuve, 1984 ; N'Diaye et al., 1997 ; Dia et al., 1993). Les résultats des travaux qui ont intéressé cette région, ont permis de la définir dans un contexte géologique régional et de mieux comprendre les grandes unités lithologiques.

2.1 - Présentation du craton ouest-africain

Le craton ouest-africain est limité au Nord par l'Anti-Atlas, à l'Est par la zone mobile de l'Afrique centrale et à l'Ouest par la zone mobile d'Afrique de l'Ouest (fig. 5). Il est caractérisé par une évolution polycyclique comprenant des terrains précambriens (Archéen, Protérozoïque inférieur) entourés par des formations panafricaines.

Le craton ouest-africain comprend trois unités d'âge précambrien

- la dorsale Réguibat au Nord ;
- la dorsale de Man Sud
- les boutonnières de Kédougou-Kéniéba et de Kayes ;

Ces unités sont limitées à l'Ouest et à l'Est par des zones mobiles d'âge panafricain.

Cet ensemble est en grande partie recouvert par le bassin sédimentaire d'âge paléozoïque de Taoudeni, de Tindouf et Voltaïen (Bessoles, 1977).

2.1.1 - Présentation de la Boutonnière Kédougou-Kéniéba

La boutonnière est située dans la partie occidentale du craton ouest-africain à cheval entre le Sénégal et le Mali. Elle est caractérisée par une évolution polycyclique comprenant :

- le cycle éburnéen affectant les formations birimiennes ;
- le cycle panafricain à l'Ouest marqué par la chaîne des Mauritanides

A - Les terrains Birimiens

Bassot (1966, 1987), subdivise le Birimien de la boutonnière de Kédougou-Kéniéba en deux supergroupes (fig. 6) :

- le supergroupe de Mako à dominante volcanique basique ;
- les supergroupes de Dialé-Daléma à dominante sédimentaire associés à un volcanisme calco-alcalin.

1 - Le supergroupe de Mako

Il forme une bande orientée NNE-SSW et constitue la partie Ouest du socle.

Il est représenté par d'importantes coulées de basaltes en coussins associées à des sills et des dykes de périclinoxyénites ou de gabbro.

Les coulées sont interstratifiées avec les formations pyroclastiques et sédimentaires (grauwackes, grès, pelites, quartzites, schistes et calcaires) qui sont abondantes dans la partie supérieure où elles sont associées à un volcanisme andésitique d'aspect explosif.

Cet ensemble volcano-sédimentaire est recoupé par le batholite de Badon-Kakadian et par de petits massifs tarditectoniques et atectoniques de composition granodioritique.

Le supergroupe de Mako est plissé isoclinalement, sa stratification généralement concordante avec la schistosité est caractérisée par des pendages sub verticaux ou fortement pentés vers le NW ou ENW.

2 - Les supergroupes de Dialé-Daléma

Les supergroupes de Dialé-Daléma sont constitués par une importante pile de roches sédimentaires et volcano-détritiques (quartzites, grauwackes, conglomérats) à intercalations carbonatées. Ils sont recoupés par le complexe volcano-plutonique intermédiaire à acide de la Daléma.

Les supergroupes de Dialé-Daléma sont formés :

- d'un groupe inférieur (2.000 m de puissance) qui évolue en trois pôles : quartzites, schistes, cipolins. A la fin de ce dépôt, s'est mis en place un important complexe volcano-plutonique qui renferme des laves andésitiques et des microdiorites et granodiorites.

- d'un groupe supérieur (8.000 m de puissance) où alternent des schistes, des grauwackes et des quartzites.

Cet ensemble est recoupé par le batholite de Saraya, les massifs granitiques de Boboti et de Gamaye et de Moussala.

Le groupe de Dialé est déversé vers le Sud-Est avec des plissements dissymétriques dont le plan axial présente un fort pendage vers le Nord-ouest. Le supergroupe de Mako le chevauchant à l'Ouest.

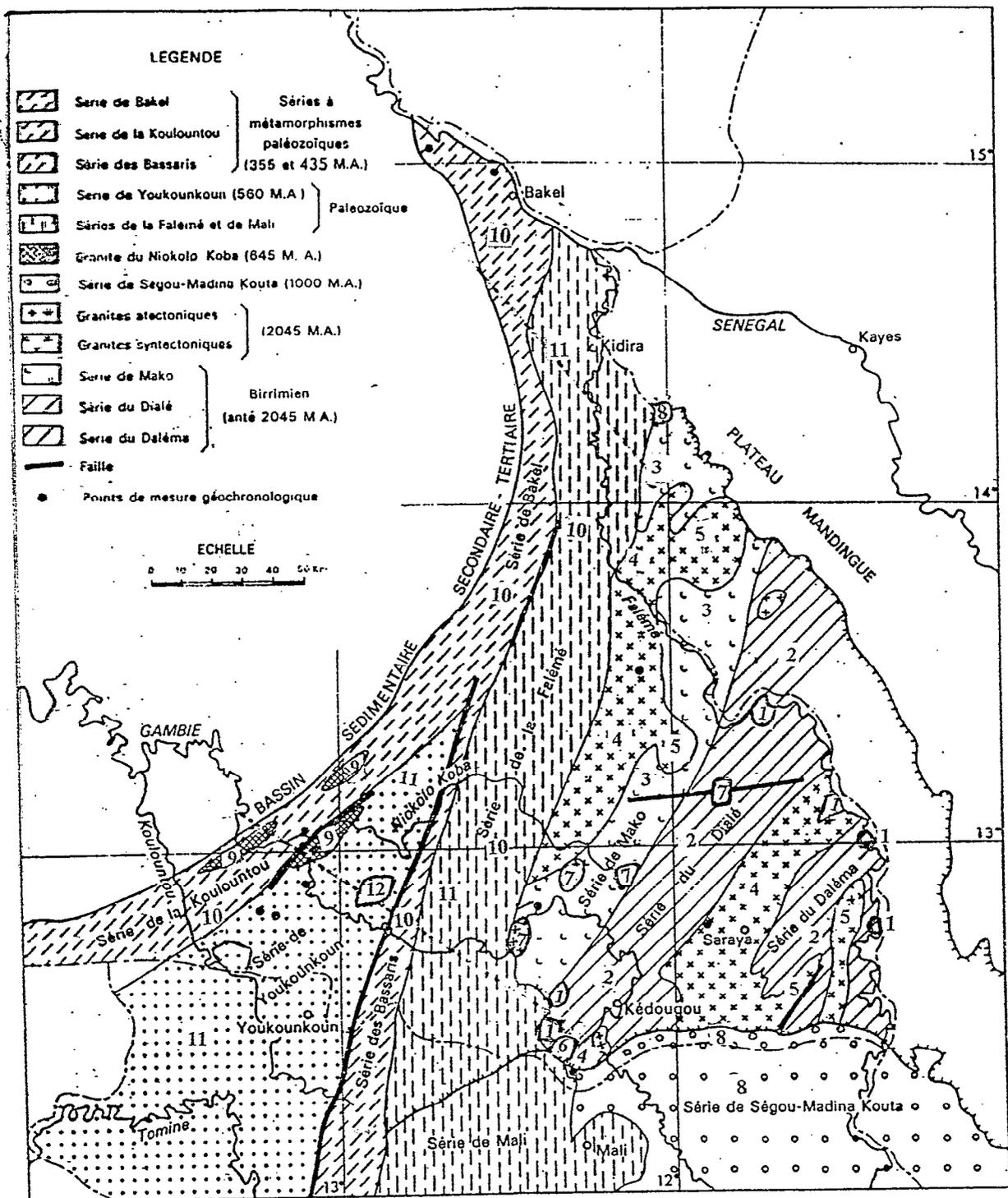


Fig. 6 : Esquisse géologique du Sénégal oriental (J.P. Bassot 1969)

- | | |
|--|---|
| 1 Cipolin | 8 Grès quartzites, pélites calcaires |
| 2 Schistes, micaschistes, quartzites, andésites microdiorites, granodiorites | 9 Granites du Niokolo Koba |
| 3 périclinoxyénites, gabbro grauwackes, grès, pélites, schistes, calcaires | 10 * Complexe volcanique de base
* Conglomérat, argilo-siliceuse, calcaire dolomie, schistes, micaschistes, quartz, phyllade |
| 4 Granite syntectonique | 11 Grès rouges |
| 5 Granites tarditectonique | 12 Grès blancs |
| 6 Granite hétérogène | |
| 7 Granite post-tectonique | |

3 - Les granitisations

Selon leurs caractères pétrographiques et structuraux, Bassot (1966) distingue trois types de granite :

- type Baoulé (concordants, syntectoniques).
- type Boboti (concordants, syn ou tarditectoniques)
- type Bondoukou (discordants et post-tectoniques)

3.1 - Granites de type Baoulé

Bassot (1966) regroupe sous ce terme les granites de Kakadian et de Saraya sous-types :

- Le batholite Kakadian :

C'est un massif allongé de plus de 120 km orienté N-S à NNE parallèlement aux formations encaissantes du supergroupe de Mako. Il a une composition hétérogène.

Il est composé de plusieurs massifs dioritiques, granodioritiques présentant une foliation de même orientation que la structure régionale (Dioh, 1986 ; Dia, 1988).

- Le batholite de Saraya :

C'est un massif allongé d'une centaine de km le long d'une direction Nord-Est. Il s'agit d'un syénogranite à biotite, muscovite à enclaves sédimentaire contrairement au premier précité qui ne contient que des enclaves magmatiques. Le syénogranite comprend un faciès à biotite riche en muscovite qui occupe le centre et le Nord du massif et le faciès à biotite pauvre en muscovite qui occupe toute la partie sud-Ouest du massif. Il imprime un métamorphisme de contact très net avec l'encaissant sédimentaire (N'Diaye et al., 1997).

Le batholite de Saraya fera l'objet d'une étude pétrographique détaillée dans la deuxième partie du mémoire.

3.2 - Granites de type Boboti

C'est un massif allongé Nord-Sud formé en réalité d'une multitude de petits massifs alignés le long du même axe que le volcanisme calco-alcalin de la Daléma. Il a une composition granodioritique renfermant des clinopyroxènes. Les contacts avec l'encaissant sont nets, avec un métamorphisme thermique bien développé dans les roches sédimentaires encaissantes.

3.3 - Granites de type Bondoukou

Se sont des intrusions circonscrites de faibles dimensions. Ils sont non déformés et recourent l'encaissant à « l'emporte pièce ». Leur composition est hétérogène et de nature granodioritique. Ils auraient été accompagnés de gabbros comagmatiques (N'Gom 1985).

La structure des terrains birimiens est modelée par une tectonique transcurrente marquée par des couloirs de cisaillement à mouvement sénestre, ils sont orientés NNE à NE et d'extension régionale (Milesi et al., 1986).

B - Les terrains Panafricains

Les terrains birimiens au Sénégal sont bordés à l'Ouest par une bande subméridienne qui constitue du Sud marocain à la Guinée, la chaîne mixte des Mauritanides. Au Sénégal la chaîne des Mauritanides (Bassarides) est d'âge panafricain. Elle se partage en deux branches dans les parties sud : une branche Ouest qui s'ennoye sous les formations sédimentaires de Bové et une autre branche orientale qui est représentée par les Rokérides (Bassot, 1966 ; Villeneuve, 1984).

Ces formations post-birimiennes du Sénégal oriental peuvent être subdivisées en trois séries d'âge différent :

- série infracambrienne : Ségou-Madina-Kouta ;
- séries Cambriennes : Falémé, Mali, Youkounkoun et leur équivalent métamorphique ;
- séries post-cambriennes : représentées par des grès blancs sus-jacents au Gothlandien daté au dévonien en Guinée et en Mauritanie

1 - La série infracambrienne de Ségou-Madina-Kouta

Il s'agit d'un ensemble de grès et de pélites plus ou moins calcareuses surmontées par des tillites. Cette suite de plus de 200 m de puissance débute par des conglomérats à tendance brèche surmontés par des calcaires oolithiques et de grès quartzeux à glauconie qui sont interstratifiés avec des pélites plus ou moins calcareuses. Sa structure est monoclinale avec des pendages inférieurs à 10° et elle est discordante sur le socle birimien.

2 - Les séries Cambriennes

a - La série du Mali

Elle débute par des tillites surmontées successivement par des calcaires dolomitiques, des jaspes et des pélites épaisses contenant des horizons de grès ou de grauwackes avec parfois des conglomérats.

Cette série n'a subi aucun plissement important à l'exception de sa partie occidentale où elle est plissée.

b - La série de la Falémé

Elle a été définie dans la région de Kidira. Elle comprend un ensemble volcanique acide, basique très épais surmonté par des tillites, des dolomies calcaires, des pélites, des cinérites, des

grauwackes et des jaspes sous-jacents à des grès feldspathiques rouges. Ces terrains non métamorphisés et d'aspect monoclinale ont une structure synclinale deversée vers l'Est. Les grès rouges occupent le coeur du synclinal.

c - La série des bassaris

Elle est constituée par un ensemble de roches épimétamorphiques orienté NNE à l'Ouest de la série de la Falémé. Elle est composée de schistes sériciteux, de quartzophyllades et de schistes à chlorite et à actinote issus d'anciennes roches volcaniques basiques. Ces schistes peuvent renfermer des minéraux grauwackes, jaspoïdes ou quartzitiques. Le métamorphisme caractéristique laissant présager une tectonique très complexe. Les schistes à chlorite et actinote pourraient représenter le complexe volcano-sédimentaire de la série de la Falémé métamorphisée.

d - La série de Youkounkoun

Elle comprend de la base au sommet un ensemble volcano-acide surmonté par des pélites et des argilites et recouvertes par des grès. Cette série de plus de 3000 m de puissance a une structure synclinale oblitérée par la grande faille qui la sépare de la série des Bassaris.

e - La série de Koulountou

Elle est formée par des roches légèrement métamorphisées comprenant des schistes sériciteux, roches dérivant d'un volcanisme acide et de panneaux de granites plus ou moins étirés.

Elle semble être l'équivalent métamorphique de la série de Youkounkoun. Les granites sont interprétés comme de lambeaux de socle remonté en faveur de différents plissements qui ont affecté la série.

La série de Bakel

Elle constitue le prolongement vers le nord des séries de Koulountou et des Bassaris. La partie orientale de la série est à faciès sériciteux qui passe progressivement à la série de la Falémé et la partie occidentale est caractérisées par des faciès à muscovite. Cette série semble être l'équivalent métamorphique de la série de la Falémé.

Après la mise en place de ces différentes formations géologiques, les climats ont subi d'importantes fluctuations dans leur répartition et leur caractéristique. Ces changements climatiques sont à l'origine d'une importante altération physico-chimique des roches en climat humide et chaud au cours de laquelle se sont formés d'épais manteaux latéritiques.

C - Les cuirasses latéritiques

Au cours de l'altération physico-chimique des roches en climat humide et chaud, l'eau provoque une hydrolyse totale de la part des minéraux primaires, suivie d'une néoformation plus ou moins importante d'argiles et d'oxy-hydroxydes de fer. Il en résulte la formation d'un manteau d'altération latéritique.

Ces formations latéritiques recouvrent presque toute la partie méridionale de la chaîne panafricaine des Bassarides au Sud du 14^{ème} parallèle.

L'alternance de périodes climatiques sèches et humides a engendré la formation de reliefs subtabulaires emboîtés, qu'entaille plus ou moins profondément le réseau hydrographique.

Géomorphologiquement, on distingue :

- le haut glacis (haute terrasse) qui est du Quaternaire ancien et moyen
- le moyen glacis (moyenne terrasse), Quaternaire ancien et moyen
- le bas glacis (basse terrasse) qui est du Quaternaire moyen ;
- le glacis inférieur et le glacis supérieur qui sont du Quaternaire récent à actuel caractérisés par les 1^{er} et 2^{ème} remblais.

Le cuirassement joue un rôle important dans la géomorphologie. La résistance plus grande à l'érosion mécanique et chimique, par rapport aux manteaux d'altération non protégés, imprime un caractère « karstique » au paysage : les niveaux cuirassés donnent naissance à des formes tabulaires, des buttes-témoins, des plateaux et des plaines « structurales » ; le dessin irrégulier des cours d'eau est directement tributaire de ce type de modelé. Les mécanismes d'érosion mécanique et chimique créent en outre des falaises abruptes, des dolines et chemins d'eaux souterraines ainsi que des captures.

Selon l'importance de leur surface initiale ou des processus d'érosion ultérieurs, les haut et moyen glacis occupent de vastes plateaux ou au contraire de petites buttes-témoins, d'importance hectométrique le plus souvent. La surface topographique superficielle est toujours ondulée, avec une pente générale, en direction du marigot le plus proche.

Le bas glacis et les lits mineurs et majeurs des cours d'eaux, fonctionnels actuellement, ne présentent pas de marques de cuirassement notable. Des ferruginisations et des indurations locales ne dépassent que très rarement le stade de la carapace ferrugineuse (friable à la main ou au piochon). Le démantèlement actuel des descuirasses libère sur les pentes aval une nappe de gravillons ferrugineux.

Dans les profils d'altération latéritiques P. MICHEL (1960) distingue de haut en bas :

- cuirasse très dure et compacte contenant des gravillons de quartz ; sa puissance est variable : 2 cm à 3 m ;

- la carapace, moins dure, moins compacte, à texture lamellaire et alvéolaire ; elle est fréquemment limitée : 5 à 10 m ;

- la croûte, qui représente un début d'induration, s'effrite facilement ; la structure de la roche mère est conservée : 8 à 15 m.

Conclusion

Bien que le Sénégal Oriental se présente actuellement comme une région d'apparence plate et monotone, l'étude de ces formations géologiques montre qu'il a été autrefois le théâtre de plissements nombreux et puissants.

Ces différents mouvements tectoniques associés aux phénomènes d'érosion et métamorphiques, ont donné naissance à des séries et des massifs caractérisés par une hétérogénéité des faciès accompagnée par un réseau intense de fracturations.

Ces différents événements vont conférer à cette région des caractéristiques hydrogéologiques particulières :

- nappes discontinues et peu étendues ;
- aquifères peu profonds comparés à ceux du bassin sédimentaire ;
- productivité des aquifères tributaire de leur degré de fissuration, de fracturation ou de leurs caractéristiques pétrographiques.

Le substratum rocheux du socle ancien du Sénégal Oriental a subi de nombreuses phases de déformations à la fin de sa mise en place et après sa consolidation. Les observations de terrain ont montré que ces manifestations tectoniques ont été accompagnées par des injections de filons tardifs (pegmatites, dolérites, quartz), de couloirs de cisaillement aussi bien dans les massifs granitiques que dans les roches encaissantes (volcaniques et volcano-sédimentaires). Ce contexte tectonique offre des conditions hydrogéologiques favorables à l'existence d'aquifères à même d'emmagasiner et de drainer les eaux souterraines.

Deux types de formations³ aquifères se distinguent nettement dans ce contexte de socle cristallin (fig. 7) :

- les nappes superficielles contenues d'une part dans les nappes colluvio-alluviales perchées et d'autre part dans les altérites argileuses ou sableuses,
- les nappes profondes de la zone fissurée ou faillée du substratum cristallin ou cristallophyllien.

Mais la localisation des aquifères nécessite l'emploi de méthodes appropriées. Il faut à cet effet souligner combien la télédétection et la géophysique, l'électrique en particulier peuvent

apporter une contribution particulièrement précieuse pour la localisation précise des zones d'altération, des failles, des dysharmonies, qui sont autant de zones favorables à la présence d'eau dans les terrains anciens.

Le développement de méthodes de prospection appropriées étant nécessaire pour augmenter les chances de succès des puits et des forages d'eau, nous consacrerons la seconde et la troisième partie du mémoire à l'étude des approches méthodologiques susceptibles de localiser les aquifères productifs, mais aussi de caractériser les différents aquifères de socle du Sénégal Oriental en général et du batholite de Saraya et ses environs en particulier.

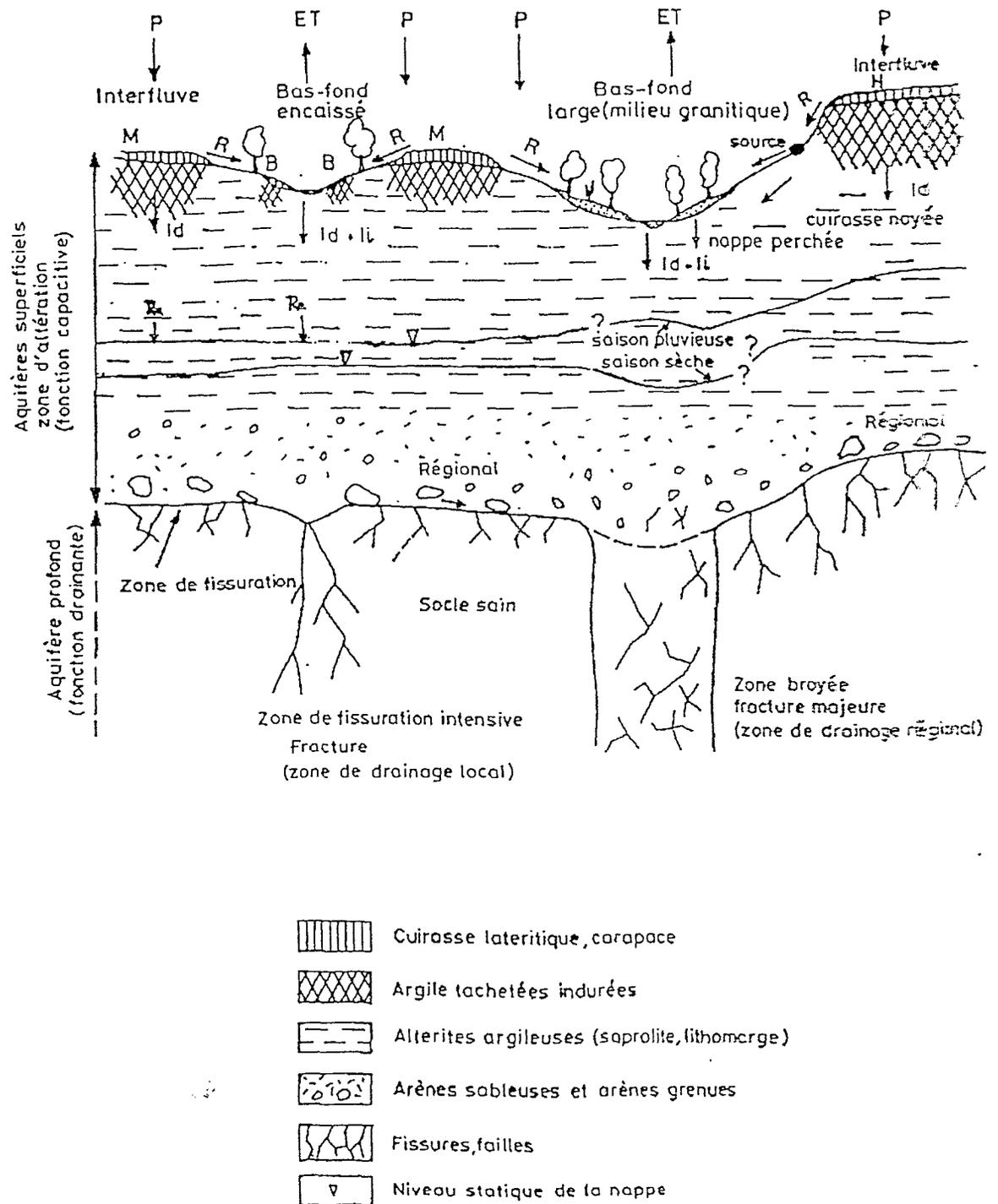


Fig. 7 Mode de gisement des nappes d'eau souterraine et les processus de recharge (I.W.A.CO, 1989 in Koussoubé, 1996)

P : pluie ; ET : évapotranspiration ; R : ruissellement ; Id : infiltration directe ; Ii : infiltration indirecte ; Re : recharge

DEUXIEME PARTIE :

HYDROGEOLOGIE DU BATHOLITE DE
SARAYA ET SES ENVIRONS

CHAPITRE 1 : LES TRAVAUX ANTERIEURS

La recherche sur les ressources en eaux souterraines des milieux discontinus du socle, s'est développée ces dernières décennies par l'utilisation de la géologie, des images satellites, des photos aériennes, de la piézométrie et de l'hydrochimie. Mais l'amélioration des taux de succès des forages d'eau à rendement élevé, doit passer impérativement par l'utilisation efficace de méthodes de prospection.

La technique qui s'est révélée efficace, consiste à appliquer les méthodes intensives dans de petites zones circonscrites (Albouy et al., 1970 ; Camerlo et al., 1977 ; Engalenc, 1978 ; Bernardi et al., 1983).

C'est ainsi que sur l'ensemble de la région du socle et plus particulièrement dans le batholite de Saraya et ses environs, des études antérieures (géologiques, de télédétection et géophysiques) avaient été menées afin de déterminer les différents faciès géologiques et de mettre en évidence des structures géologiques susceptibles de constituer des aquifères potentiels exploitables.

Nous avons par la suite entrepris des campagnes de prospection géophysiques (sondages, traînées électriques et profils multiélectrodes), piézométriques et hydrochimiques dans le but de localiser sur le terrain les structures révélées et de donner les caractéristiques des différents aquifères nous permettant de définir des *systèmes aquifère-nappes* en zone de socle cristallin et cristallophyllien.

1.1. - Les méthodes utilisées

1.1.1. - Etude géologique du batholite de Saraya

Ce massif de granite de plus de 85 km de long pour une largeur moyenne de 20 km de direction générale N.NE-S.SW, a fait l'objet de travaux géologiques et miniers (Bassot, 1966 ; Witchard, 1965, 1995 ; Blot, 1977, 1980 ; rapport COGEMA, 1977 ; N'Diaye et al., 1997), et par les potentialités métallogéniques qui lui sont associées telles que l'or, l'uranium et le fer,

L'étude géologique détaillée du massif par BLOT (1980), relative à la pétrographie et à la géochimie des aquifères a été réalisée par méthodes géophysiques (sondages et traînées électriques) et dans une moindre mesure par puits et affleurements. Mais l'essentiel des résultats a été acquis dans un périmètre restreint à 1 km à l'ouest de Kondokho, avec 33 puits et fosses et une tranchée sur une cinquantaine d'hectares. L'emplacement de ces travaux est précisé sur les figures 8 et 9.

Fig. 8 : Zone d'étude du massif de Saraya (Blot, 1980)

- 1) trainés électriques 2) n° des puits 3) études détaillées par trainés et sondages électriques 4) études détaillées par puits et méthodes géophysiques

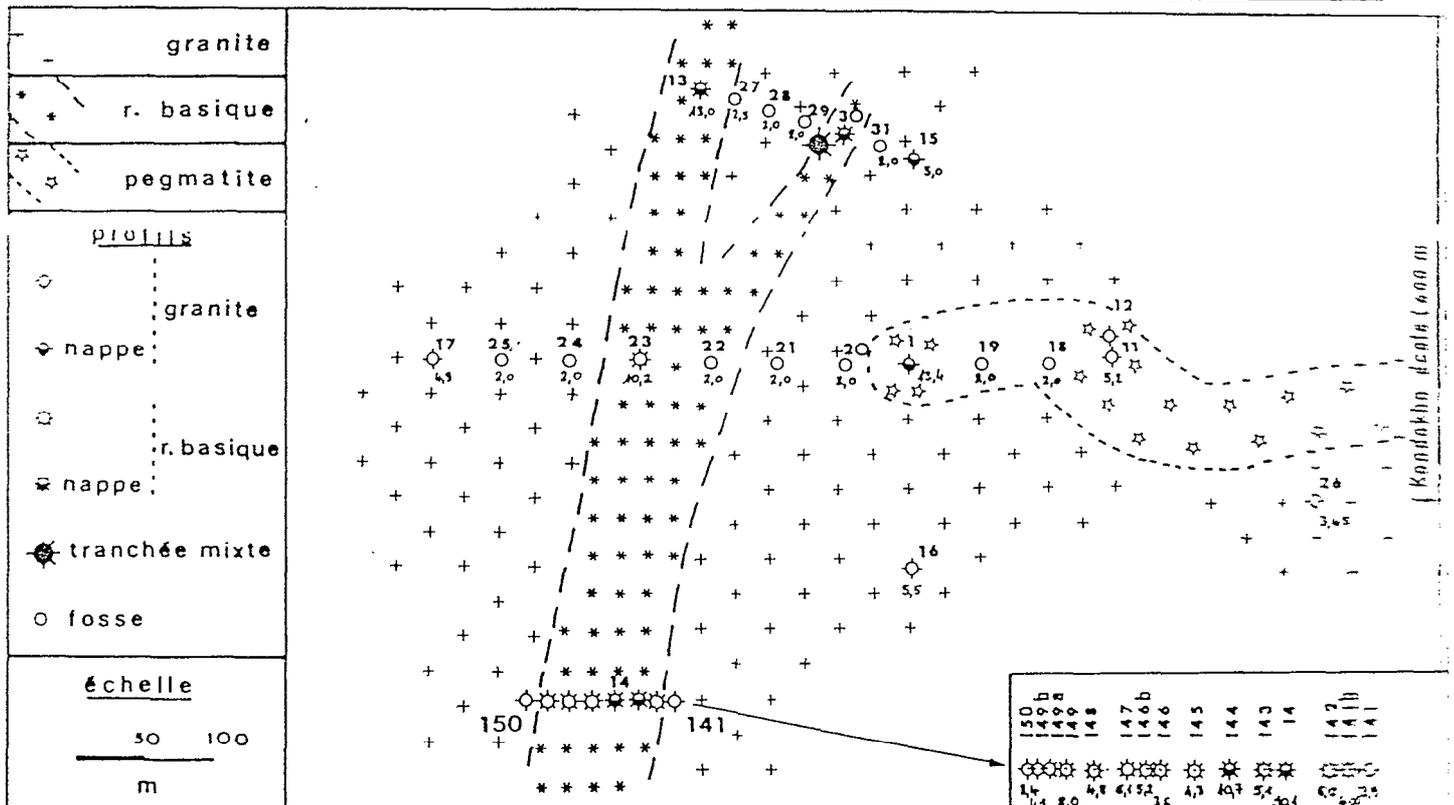
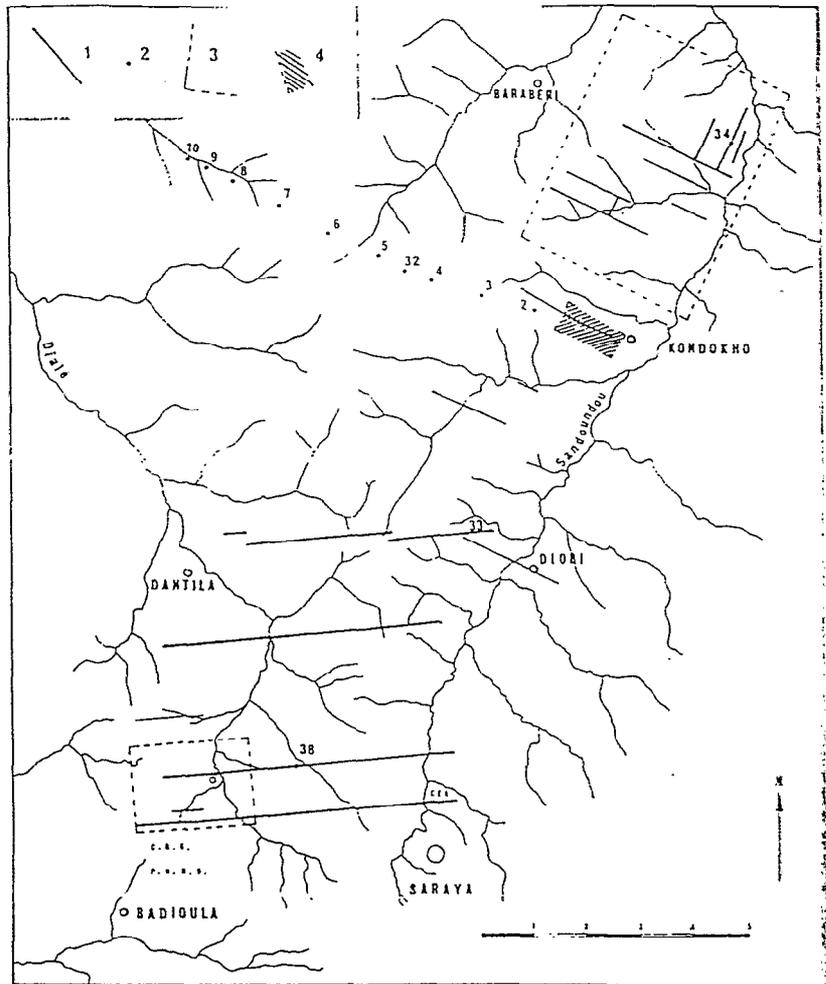


Fig. 9 : Carte schématique du secteur ouest Khondokho
Emplacement de leurs principaux profils et leur profondeur (Blot, 1980).

Les puits et fosses ont été implantés sur les roches du massif (granite et pegmatite) et sur les roches basiques des dykes (dolérite et gabbro). En outre, une tranchée profonde d'une dizaine de mètres recoupe le contact entre un dyke et granite encaissant.

Les matériaux prélevés dans tous les profils et sur les affleurements ont fait l'objet de nombreuses analyses et mesures effectuées de façon à comparer la constitution de la zone superficielle à celle des roches sous-jacentes, aussi bien suivant une approche qualitative que quantitative :

- étude de la densité des minéraux pour préciser l'importance des destructions minérales et évaluer le stock disponible à l'exportation en solution ;
- étude géochimique et minéralogique des profils, afin d'établir les résultats des transformations de la surface autant au niveau des minéraux et éléments principaux qu'au niveau des minéraux et éléments secondaires ;
- étude géochimique des nappes phréatiques, afin de définir leur spécificité chimique.

1.1.2. - La Télédétection satellitaire

Le support de télédétection utilisé est un ensemble d'images satellites SPOT MS (extrait de 5 scènes K 032 / J 323-324-325 (920515) et K 033/J 324-325 (920414) du 11-03 au 30-04-95) aux échelles du 1/100.000 et du 1/50.000°. Les caractéristiques de l'enregistrement de ces scènes sont les suivantes :

- 1) rouge (infrarouge réfléchi) = bande 0,79 à 0,89 μm ,
- 2) bleu = bande 0,50 à 0,50 μm ,
- 3) vert = bande 0,61 à 0,68 μm .

Ces trois bandes sont utilisées pour le traitement de l'image comprenant diverses transformations destinées à améliorer la dynamique de l'image. L'enregistrement comprend 3812 bandes de 2991 pixels. Le pixel au sol est de 20 mètres ce qui signifie qu'en pratique, l'unité de mesure au sol est un carré d'environ vingt mètres de côté.

Le traitement de l'image permet :

- de différencier les formations géologiques, permettant ainsi de marquer les contacts géologiques ;
- de mettre en évidence les structures reconnues comme importantes en prospection hydrogéologique (linéaments, intrusions) ;
- de rechercher les contrastes correspondant à différents types de végétation de façon à aboutir à une image reflétant certaines caractéristiques de la nappe phréatique en profondeur.

* Le tracé des linéaments

Les linéaments sont des révélateurs indirects de discontinuités naturelles du socle, qui peuvent être observés sur les photographies aériennes ou sur images satellites.

Sur ces supports, seront tracés des linéaments en s'appuyant sur les alignements des arbres, sur la rectitude des bras de cours d'eau, l'allure en bayonnette, le grisé des photos et les contours morphostructuraux rectilignes.

Sur le terrain, les linéaments sont associés à des failles, à des contacts géologiques, à des filons, à des zones de cisaillement, à des alignements d'indices biologiques ou à des discontinuités géomorphologiques (alignement de termitières ou de certaines espèces végétales, variations minéralogiques dans les cuirasses ou les sols).

Le traitement de l'image des scènes SPOT a mis en évidence en particulier dans le secteur de Saraya (fig. 10) (Witschard, 1995) une grande quantité de structures quasi-linéaires représentant probablement des systèmes de failles majeures, souvent inconnus auparavant.

Ces images ont relativement bien marqué les contacts des différents granites avec le complexe volcano-sédimentaire birimien encaissant. Le contact le plus précis est celui du granite de Saraya.

Les images résultant du traitement sont utilisées pour l'interprétation géologique et hydrogéologique.

En effet, la carte géologique peut, dans certains cas, être tracée avec une grande précision à l'aide des images satellites traitées spécialement. C'est surtout le cas pour certains contacts granite-encaissant. C'est toutefois dans le domaine de la géologie structurale, que la méthode a donné ses meilleurs résultats.

1.1.3. - La géophysique (l'électrique)

Les travaux de BLOT ont couverts 100 km² du batholite de Saraya principalement par traînées et sondages électriques, mais l'essentiel des résultats a été acquis dans un périmètre à l'Ouest de Kondokhon.

1.1.3.1. - Principe des résistivités :

Le dispositif électrique (méthode des résistivités) est basé sur l'injection de courant alternatif artificiel d'intensité (I) dans le sous-sol et sur l'étude de la conductibilité électrique qui est exprimée par la conductivité (σ) ou son inverse, la résistivité (ρ) des couches traversées.

La conductibilité du sous-sol dépend essentiellement de la quantité et de la qualité des eaux contenues dans les roches. A ces deux facteurs principaux on peut ajouter la « tortuosité » qui exprime le mode de communication entre les pores.

La formule d'Archie synthétise ces relations et permet dans les cas favorables (en supposant que le taux d'argile reste constant dans une roche donnée) de définir la porosité totale \emptyset :

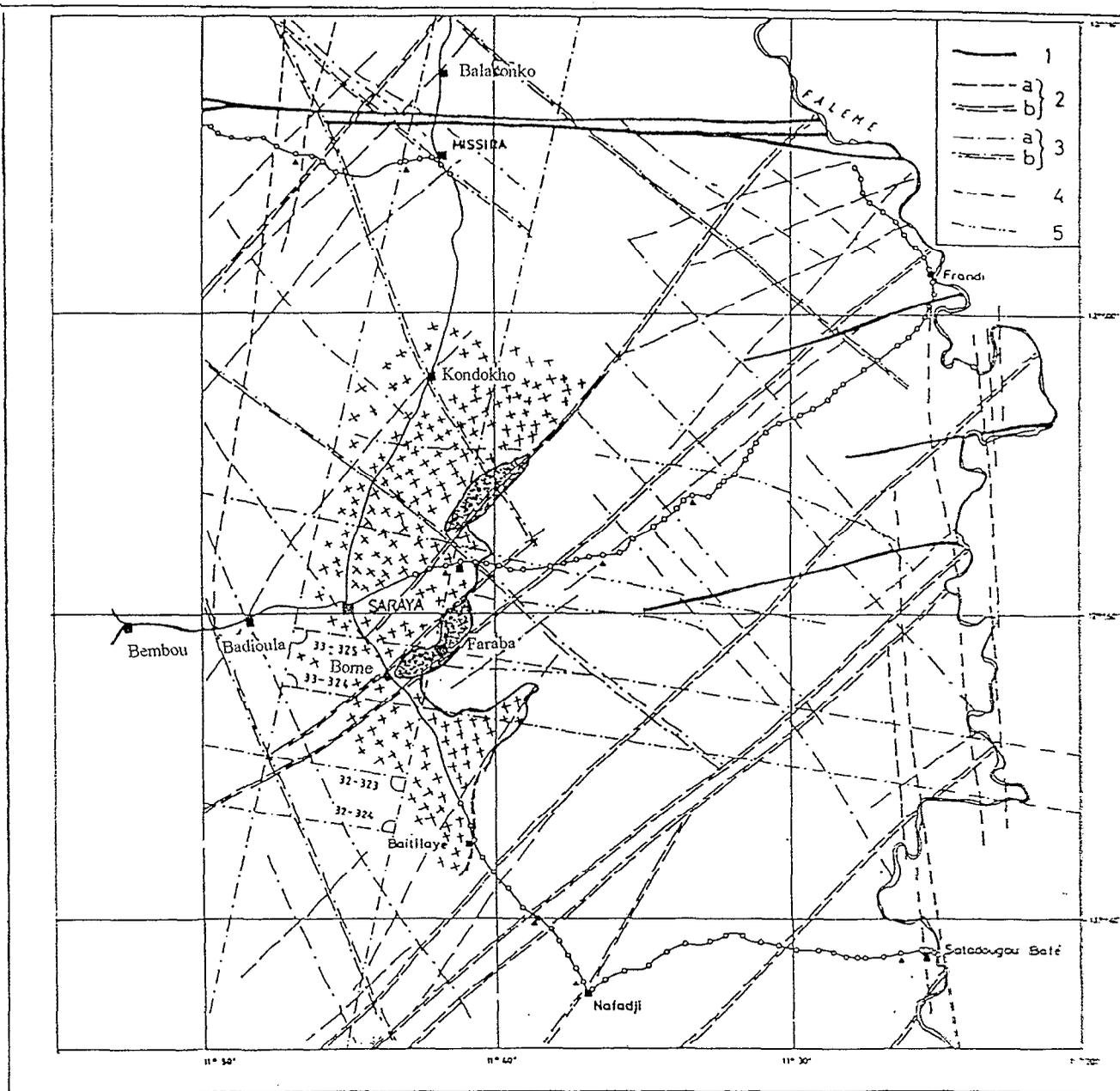


Fig. 10 : Carte linéamentaire de l'image SPOT MS du secteur de Saraya (Witschard,1995)

2 - 5 = structures linéaires ; 1 = diabase (dolérite)



Zone à potentiel aquifère



Granite

Profils multiélectrodes

$$\rho_r = \frac{\rho_w}{\phi^m \cdot S^2}$$

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

F est le facteur de formation,

ρ_r est la résistivité de la roche,

ρ_w est la résistivité de l'eau d'inhibition,

ϕ est la porosité totale

S est le taux de saturation de la roche

a est un facteur proche de 1

m est le coefficient de distribution des vides

Pour les roches saturées, on peut, à partir de cette formule, définir la porosité totale et le facteur de formation.

Notons que la présence d'argile peut faire baisser la résistivité d'une formation géologique.

1.1.3.2. - Les dispositifs de mesure :

L'injection du courant continu (I) dans le sol à l'aide d'électrodes en acier A et B, et la mesure de la différence de potentiel (ΔV) entre les électrodes réceptrices M et N, permet de déterminer la résistivité apparente du terrain (ρ_a) :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

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

K : coefficient géométrique

Les dispositifs utilisés sont :

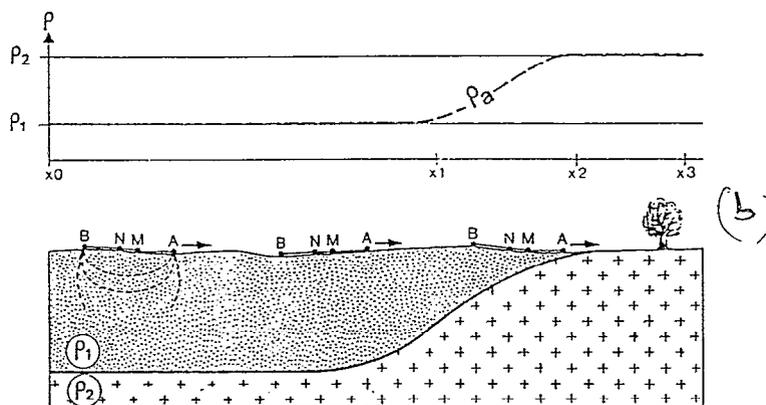
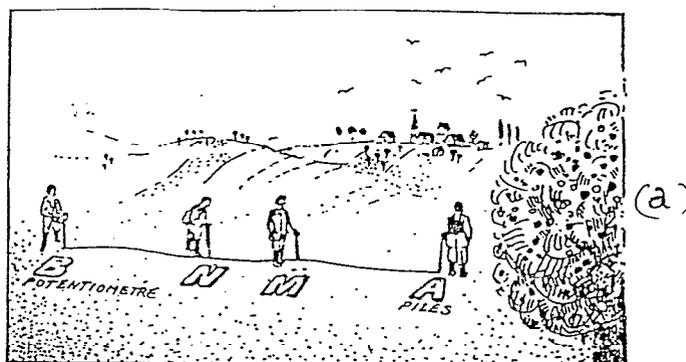
- le traîné électrique pour l'investigation latérale (positionnement des anomalies résistives et conductrices;

- le sondage électrique vertical pour l'investigation en profondeur

a. - Le traîné électrique

Le traîné est conçu de façon à faire porter l'investigation sur une tranche de sous-sol d'épaisseur plus ou moins constante.

En déplaçant sur le terrain un dispositif de traîné de dimensions fixes on obtient un profil des résistivités apparentes (fig. 11).



— Résistivités apparentes et résistivités vraies.

Fig. 11 : Mise en oeuvre du traîné électrique

b. - Le sondage électrique

Un sondage électrique consiste à établir la courbe de variation de la résistivité apparente des terrains mesurées en surface, en fonction de la profondeur, grâce à un quadripôle AMNB. La profondeur d'investigation augmente lorsque la distance entre les électrodes d'injection A et B augmente. La figure 12 illustre la distribution du champ électrique. La profondeur d'investigation est fonction de la nature des terrains traversés et est comprise entre $AB/4$ et $AB/12$.

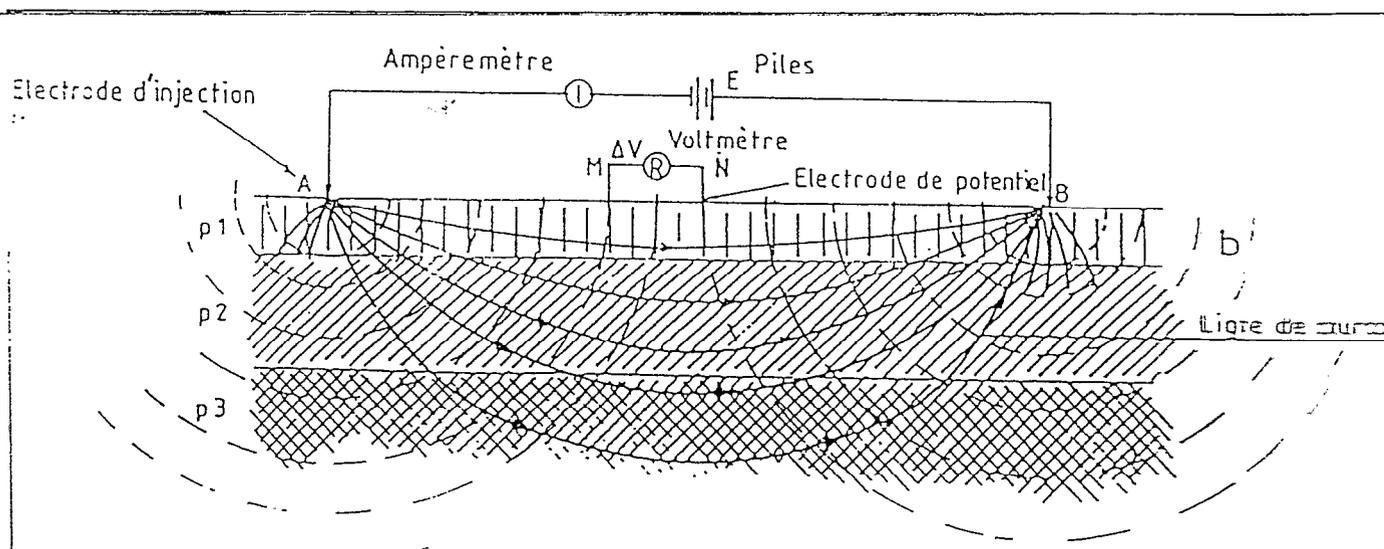


Fig. 12 : Schéma du quadripôle de mesure

L'interprétation des sondages électriques à l'aide d'abaques a permis d'obtenir la résistivité vraie des formations ainsi que leurs épaisseurs.

1.1.4.- La piézométrie

L'observation périodique du niveau de la nappe dans les différents ouvrages de captage ou dans des piézomètres permet de rendre compte de la morphologie de la surface piézométrique dans cette région du socle afin de déterminer les axes de drainage, les zones d'alimentation et la ligne de partage des eaux.

Bien que les caractéristiques hydrogéologiques des formations du socle soient celles d'un milieu très hétérogène et discontinu, avec des types de gisements très variables, il s'est révélé intéressant à partir de 146 forages ayant atteint ces formations de construire une carte de la surface piézométrique comme s'il s'agissait d'une nappe continue (S.I.G.R.E.S., 1994).

Au niveau de la piézométrie, on peut en effet considérer que d'une part malgré la grande variabilité de leurs caractéristiques hydrodynamiques, les différents niveaux aquifères communiquent entre eux, certes plus ou moins bien et qu'une surface piézométrique commune peut donc être représentée (S.I.G.R.E.S., 1994).

CHAPITRE 2 : LES RESULTATS DES TRAVAUX ANTERIEURS

2.1.. - Description du batholite de Saraya

Ce massif de granite est concordant avec le birimien encaissant des supergroupes de Dialé-Dzéléma (fig. 13). Il disparaît sous les grès précambriens de la série Ségou-Madina Kouta, alors qu'au Nord il s'énnoie dans la série birimienne du Dialé. Les roches encaissantes sont des schistes pelitiques, grauwackeux, interstratifiés avec des niveaux carbonatés. Leur contact avec l'encaissant est marqué par un métamorphisme thermique qui atteint les faciès à grenat, staurotide, sillimanite.

La mise en place du massif de Saraya s'est faite dans une zone anticlinale, elle a un caractère intrusif concordant, à contact net.

Les contacts des différents granites avec le complexe volcano-sédimentaire Birimien sont relativement bien marqués sur l'image satellite. Un contact précis observé sur l'image satellite est celui du granite à l'Est de Saraya (cf. fig. 10) et qui peut être utilisé pour établir les limites du batholite.

2.2.-Etude des fractures

Un volcanisme postérieur à la mise en place du massif a été reconnu. Ces venues volcaniques sont mises en relation avec la tectonique cassante qui a affecté la région. Ce volcanisme s'exprime en dolérites liées à des failles subméridiennes, en gabbros et gabbrodiabases qui sont liés à des failles E-W ou ESE-WNW.

Deux principaux types de structures ont été reconnus sur les images satellites :

* Type 1 : Filons de dolérite ou gabbro :

Un certain nombre de structures linéaires ont été reconnues comme filons de roche basique probables (1). Ils ont tous une orientation E-W à ESE-WNW et se trouvent principalement au Nord du secteur de Saraya.

* Type 2 : Structures linéaires

Le traitement de l'image des scènes SPOT a mis en évidence une grande quantité de structures quasi-linéaires pouvant représenter des systèmes de failles majeures, souvent inconnus auparavant dans cette région.

Ces structures ont été classées d'après leur importance (largeur/extension) en différentes catégories (zones de cisaillement de 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} ordre et failles principales ou secondaires. Ils sont les suivants :

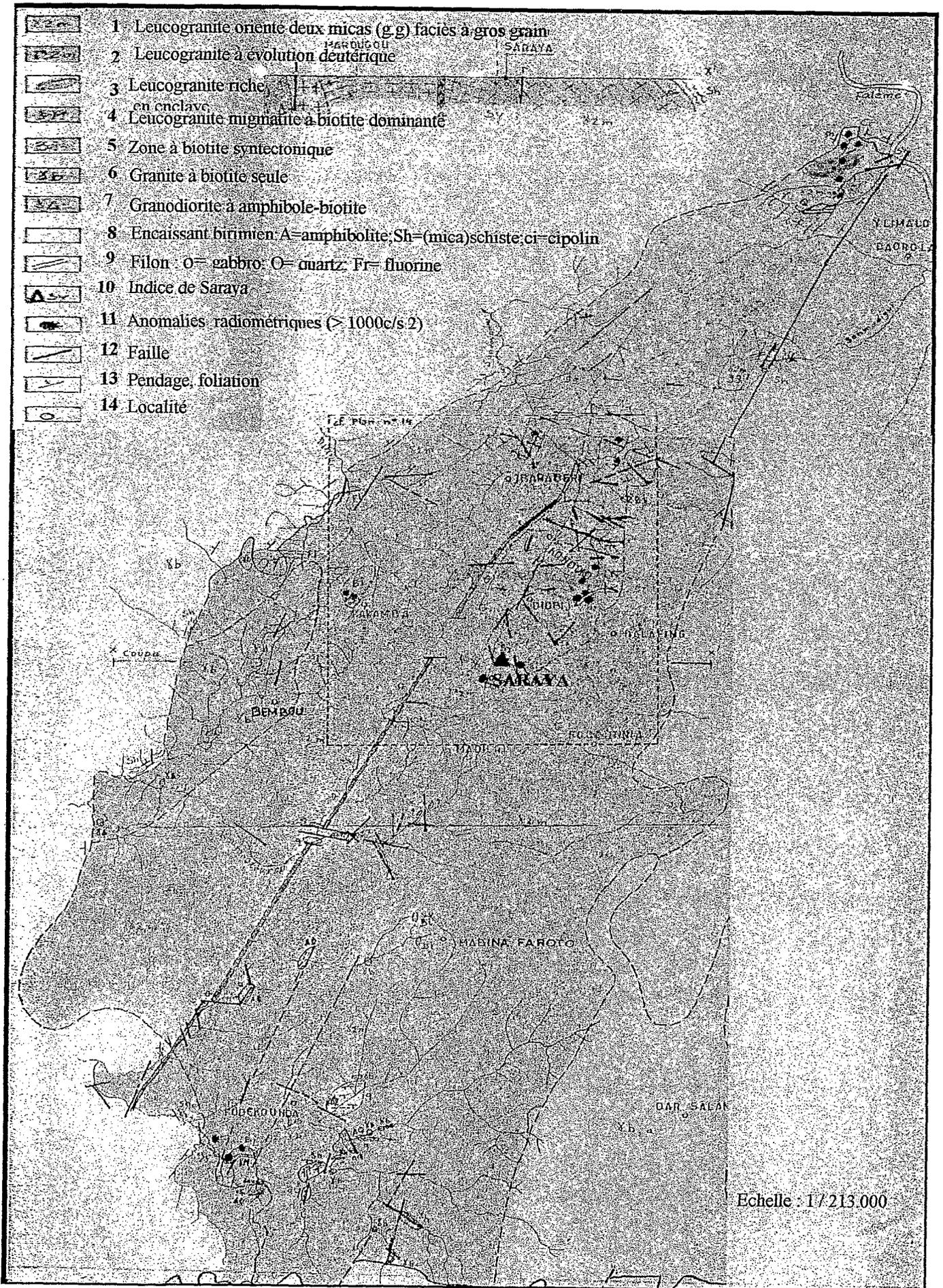


Figure 13 : Carte géologique du batholite de Saraya (COGEMA, 1977)

Numéro	Type de structure
2a (NE - SO)	fractures principales (shear zones)
2b (NE - SO)	fractures secondaires
3a (NO - SE à NNO - SSE)	fractures principales (shear zones)
3b (NO - SE à NNO - SSE)	fractures secondaires
4 (NE - SO)	failles
5 (ENE - OSO)	failles

2.3. - Etudes pétrographique et minéralogique

Le massif de Saraya est hétérogène dans sa composition avec plusieurs faciès :

Les travaux récents sur le granite de Saraya ont permis de mettre en évidence un granite composite associant deux faciès (N'Diaye et Al., 1993) :

a) un faciès à biotite et muscovite (avec % muscovite > % biotite) qui occupe le centre et le Nord (Saraya-Linguékphoto).;

b) un faciès à biotite (à faible % de muscovite) qui occupe la partie Sud du massif (Madina Faroto-Fodékunda) et l'Ouest de Bambou où l'on rencontre quelques enclaves d'amphiboles.

Les deux faciès renferment : du quartz xénomorphe, du plagioclase (10 à 15% An) automorphe, du microcline xénomorphe, de la muscovite et de la biotite intimement liées. Les minéraux accessoires sont formés d'apatite, de tourmaline et de zircon.

A - Présentation du profil général de Kondokho

Schématiquement, tous les profils (cf. fig. 9) s'inscrivent dans une répartition identique de niveaux ou d'horizons entre la roche et la surface du sol, avec la possibilité d'observer des puissances variables et des lacunes de certains horizons.

Les principales unités, aux traits bien définis, sont d'abord les altérites qui apparaissent comme des roches transformées, surmontées d'un horizon riche en oxydes et hydroxydes de fer, surmonté lui-même de sols très riches en quartz.

Par l'interprétation des sondages électriques réalisés dans le cadre de son étude, BLOT (1980) en utilisant des abaques, fait intervenir une succession de 3 terrains correspondant à des profondeurs d'investigation beaucoup plus importantes :

- le 1^{er} terrain résistant, comprend les sols et horizons ferrugineux,
- le 2^{ème} terrain conducteur intermédiaire correspond aux altérites
- le 3^{ème} terrain correspond aux roches résistantes et profondes (roches non altérées).

Deux groupes de courbes se distinguent nettement parmi l'ensemble des sondages électriques (fig. 14) réalisés suivant qu'il s'agit de sondages sur roches granitiques ou de sondages sur roches basiques :

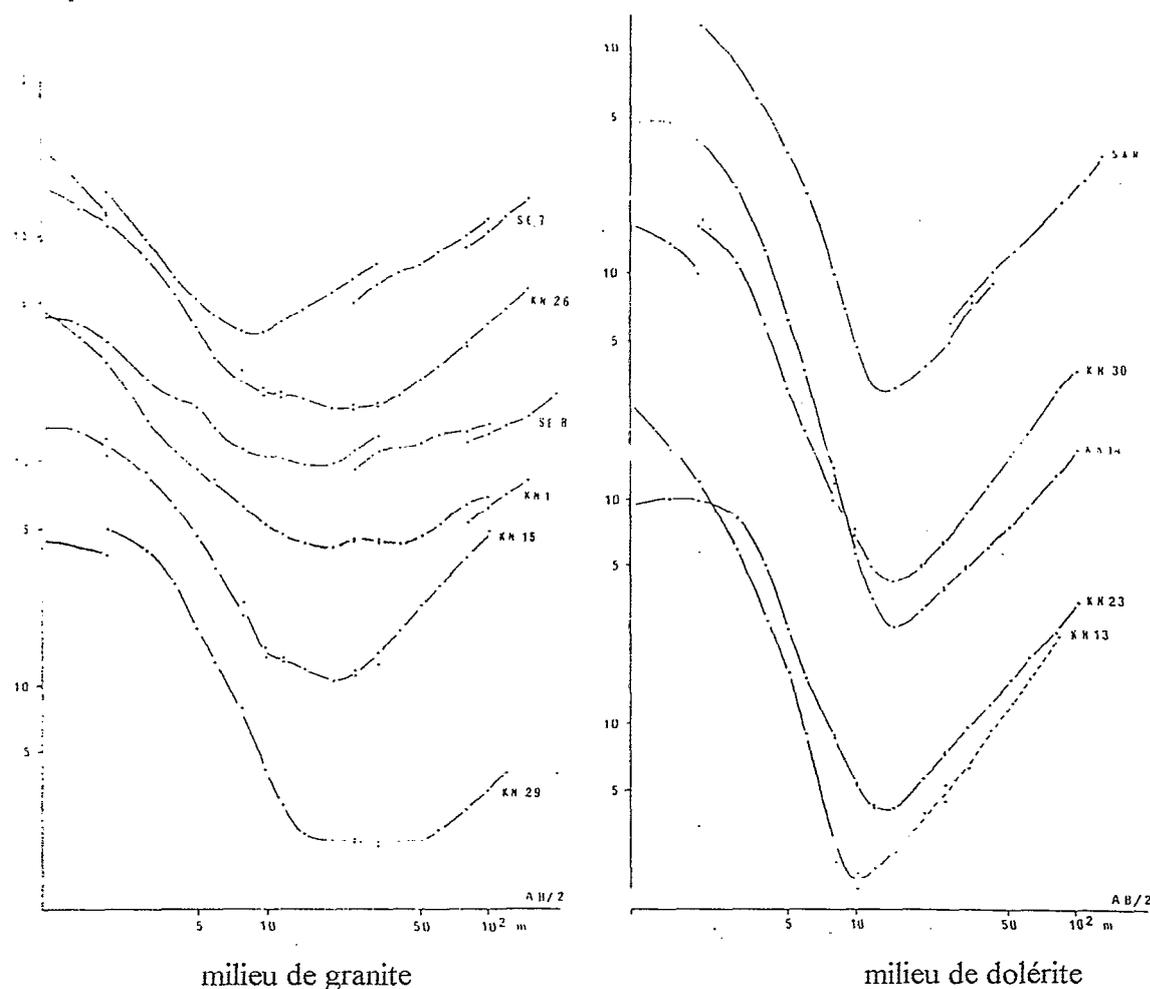


Fig. 14 : Courbes de sondages électriques en milieu de granite et de dolérite (Blot, 1980)

- les premiers ont une forme « en fond de bateau » aplati correspondant à un 2^{ème} terrain épais et de résistivité relativement élevée (supérieur à 70 ohm.m);

- les seconds ont une forme « en fond de bateau » assez aiguë avec un 2^{ème} terrain relativement peu épais et de résistivité très faible (comprises entre 15 et 30 ohm.m).

Ceci montre qu'aux altérites basiques correspondent une argilification importante, une porosité bien développée, une hydratation importante, qui en milieu saturé favorise le passage du courant électrique.

Aux altérites granitiques correspondent une argilification limitée, une porosité, réduite, une hydratation faible, un squelette quartzo-feldspatique important, qui gêne le passage du courant électrique même en milieu saturé.

La coupe schématique établie à partir de plusieurs puits tant sur le granite que sur la dolérite, montre dans la succession des trois unités principales, des subdivisions privilégiant une ou plusieurs caractéristiques liées à la nature et à l'organisation des matériaux (fig. 15).

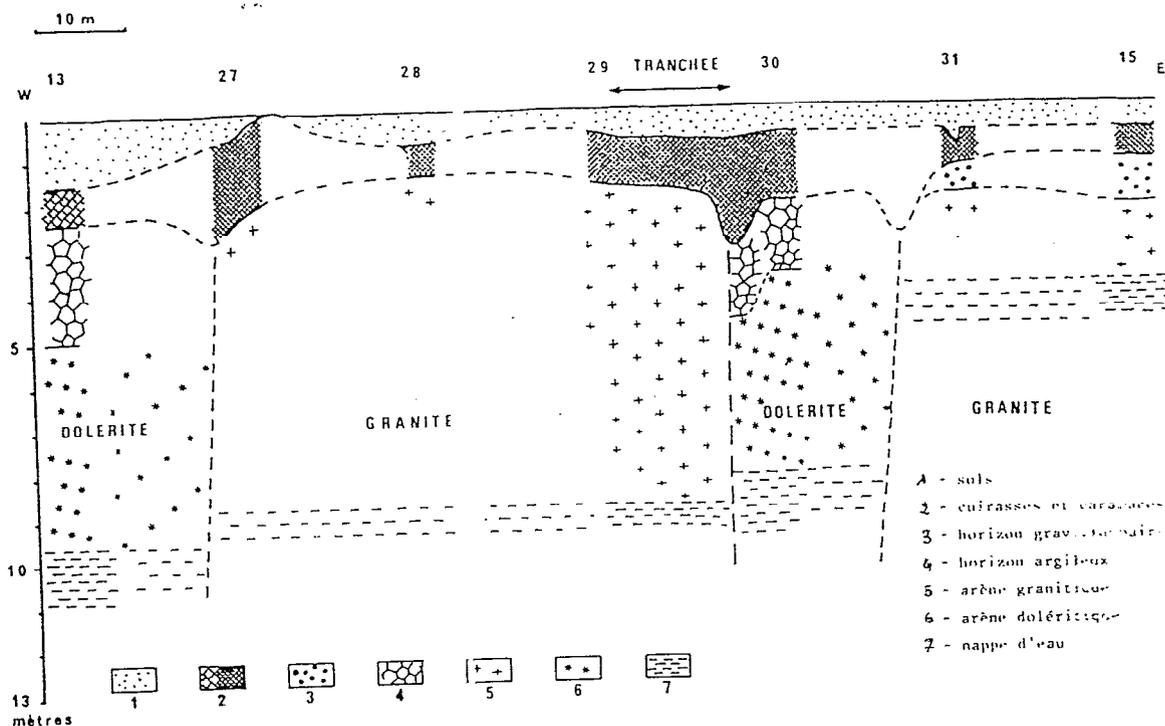


Fig. 15 : Coupe schématique des puits KN 13 à KN 15 (Blot, 1980)

a - Le sol

En commençant par le sommet du profil, la coupe permet de distinguer un sol défini par la succession de trois horizons principaux :

- horizon sableux humifère ;
- horizon sableux faiblement argileux ;
- horizon sableux faiblement argileux à nodules ou concrétions ferrugineux.

Il s'agit d'un sol ferrugineux tropical lessivé, bien représenté sur l'ensemble du massif de Saraya (Chauvel, in Blot, 1980), avec une épaisseur moyenne de 0,5 à 0,8 m et des extrêmes allant de 0 à près de 2 m.

Par rapport à l'ensemble du profil, le fait marquant de ce niveau est constitué par l'abondance de grains de quartz.

b - L'horizon ferrugineux

La deuxième unité est caractérisée par l'abondance des hydroxydes et oxydes de fer, formant un horizon induré, dense, tranchant sur l'ensemble du profil par sa couleur rouge-brun-rouille, sa cohésion et sa dureté. Suivant le comportement physique, on peut distinguer une cuirasse plus dure d'une carapace sous-jacente moins résistante. Cette succession de deux horizons ferrugineux n'est pas systématique, l'un ou même les deux peuvent être tronqués.

Ce niveau ferrugineux a une puissance moyenne de 0,5 à 1,0 m avec des extrêmes de 0 à 2,5m.

Par rapport à l'ensemble du profil, le fait déterminant est représenté par l'abondance des oxyhydroxydes de fer provoquant une induration du matériau.

c - Les altérites

Les altérites forment un ensemble présentant plus une succession graduelle que des horizons bien individualisés. Toutefois on peut distinguer d'une part les argiles vers le sommet et d'autre part les arènes vers la base du profil.

- Les argiles sont définies par l'importance des minéraux silicatés argileux dans le matériau, imposant à ce matériau les propriétés dues à leur nature et à leur position dominante.

La partie supérieure des argiles contient des nodules ou concrétions ferrugineux. La partie inférieure est dépourvue de nodules.

L'ensemble de l'horizon argileux est caractérisé par des couleurs contrastées par des tâches ou traînées donnant un aspect tacheté ou bariolé avec des teintes grises, rouges, rouilles, gris-vert, ocres.

- L'arène est l'unité où l'on passe progressivement de l'argile à minéraux primaires dispersés à la roche par suite d'une diminution graduelle de l'argilification d'ensemble, puis des diaclases.

La morphologie et la structure de la roche guide cet horizon.

La puissance des altérites est très variable et importante. Estimée par les puits et les sondages électriques, cette puissance varie probablement entre 5 et 50 m, avec un optimum entre 15 et 30 m.

Les principaux profils présentant une coupe complète de tous les horizons, sont ceux développés sur les roches basiques. Le plus souvent les profils sur roche granitique ne permettent pas de distinguer un horizon d'arène argileuse d'un horizon d'argile.

B - Caractérisation minéralogique et géochimique des niveaux d'altération

Les deux principaux types de roche du massif sont bien contrastés par leur composition chimique et minéralogique qui seront précisées puis comparées.

a - Compositions chimiques et minéralogiques des roches granitiques et doléritiques

La composition moyenne des granites du secteur de Kondokho, comme dans la plupart du massif granitique de Saraya a été perturbée par l'« intrusion » de roches magmatiques basiques à la

l'effet d'accidents tectoniques cassants. Ces venues doléritiques donnent ainsi l'occasion de faire la comparaison minéralogique et géochimique avec les granites (tableau 3). On observe :

- une diminution des teneurs en silice, en sodium et en potassium des dolérites ;
- une augmentation des teneurs en calcium, magnésium, en fer et en eau de constitution de ces mêmes dolérites.

Ainsi les compositions respectives, sur 13 échantillons, sont fort contrastées pour les constituants essentiels, sauf en ce qui concerne l'aluminium.

Le pôle granitique est caractérisé par des teneurs plus fortes en silice, sodium et potassium. Le pôle basique présente des teneurs plus fortes en fer, magnésium, calcium et eau.

Ce contraste résulte finalement de la différence de composition minéralogique qui est définie par le quartz, le microcline et un plagioclase sodique pour le pôle acide et caractérisée par les minéraux ferromagnésiens et un plagioclase calco-sodique dans le cas du pôle basique.

En effet ce granite à biotite $[(Si_6 Al_2 O_{20}) Mg_6 (OH)_4 K_2]$, et muscovite $[(Si_6 Al_2 O_{20}) Al_1 (OH)_4 K_2]$ a une constitution minéralogique estimée par diffraction des rayons X qui est la suivante :

* quartz (SiO₂) : 32 - 33%

Tab. 3 : Composition moyenne en % des éléments majeurs d'après le faciès pétrographique et le niveau du profil d'altération (Blot, 1980)

Teneur m en (%)	Roche saine		Altérite de		Niveau ferrugineux		Sol	
	Granite (13 écha)	Dolérite (13 échan)	Granite (64 écha)	Dolérite (37 écha)	Granite (25 échan)	Dolérite (9 échan)	Granite (22 écha)	Dolérite (6 écha)
SiO ₂	74.05	51.72	73.05	52.15	58.83	40.24	85.8	58
Na ₂ O	40.6	2.93	2.80	2.00	0.07	0.1	0.15	0.15
K ₂ O	4.45	2.15	4.51	1.93	0.74	0.63	1.3	1.48
CaO	0.42	6.85	0.32	2.60	trace	0.2	0.03	0.06
MgO	0.21	4.40	0.26	2.22	0.18	0.17	0.13	0.06
Fe ₂ O ₃	0.88	12.57	1.41	11.38	21.97	34.95	3.3	4
Al ₂ O ₃	14.62	14.37	14.89	16.35	10.56	12.91	6.1	5.6
H ₂ O (PF)	1.06	2.24	2.39	9.05	6.84	9.36	2.75	2.73

* plagioclase sodique, albite ($\text{Si}_3 - \text{Na}_2\text{O}$) et oligoclase : 35 - 42%

* feldspaths potassique, microcline ($\text{Si}_3 \text{Al}_2 \text{O}_8$) : 26-30%

Contrairement au granite, les roches basiques de Kondokho, les dolérites en particulier sont riches en ferromagnésiens. Ces dolérites sont constituées essentiellement de :

* ferromagnésiens 42% : pyroxènes (augite (Si Al O_6) Ca (Fe, Mg, Al), amphiboles (hornblende [$\text{Si}_6 \text{Al}_2 \text{O}_{22}$] Ca₂ (Fe Mg)₄ Al (OH)₂ Na.

Aux minéraux ferromagnésiens correspond le groupe $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{TiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$.

* plagioclases calco-sodiques 32% : le labrador contient 50 à 70% d'anorthite qui a pour formule chimique $2 \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2 \cdot \text{CaO}$ (Jung, 77). Aux plagioclases correspond le groupe $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{CaO}$.

* microcline : 20%

* quartz : 2%

* oxydes primaire, l'ilménite ($\text{TiO}_2 \cdot \text{FeO}$) en particulier : 2%

Ces deux familles de roches présentent néanmoins des traits communs qui sont limités en ce qu'elles représentent des formations peu altérées, où l'hydroxylation est limitée et la porosité faible.

En effet, pour leur plus grande partie, les roches cristallines sont composées de minéraux silicatés dans lesquels l'eau n'intervient pas dans le réseau : quartz, feldspaths, plagioclases, pyroxènes.

L'eau n'est présente sous forme d'OH que dans un nombre limité d'espèces minérales primaires, qui sont principalement :

- les micas telles que la biotite ($\text{Si}_6 \text{Al}_2 \text{O}_{20}$) Mg₆ (OH)₄ K₂

la muscovite ($\text{Si}_6 \text{Al}_2 \text{O}_{20}$) Al₄ (OH)₄ K₂

- les amphiboles telle que l'hornblende : ($\text{Si}_6 \text{Al}_2 \text{O}_{22}$) Ca₄ (Fe Mg)₄ Al(OH)₄ Na₂ (Jung, 1977)

Dans les granites à biotite et muscovite, les silicates non hydroxylés sont largement dominants.

Les dolérites du massif de Saraya présentent une « amphibolitisation » et une séricitisation.

b - Compositions chimique et minéralogique des altérites

L'altération des roches qui se traduit par une diminution progressive de la densité apparente des altérites, est le résultat d'une augmentation de porosité allant de la roche vers le sommet des altérites.

Cette porosité traduit d'une part une élimination sélective, celle concernant les minéraux les uns par rapport aux autres et d'autre part celle relative à une partie du matériel de chaque minéral. On peut qualifier cette porosité qui ne modifie pas la nature des minéraux, de porosité de dissolution ou de porosité d'hydrolyse.

On peut aussi distinguer l'apparition d'une porosité liée à l'organisation des minéraux secondaires, pouvant être guidée par le réseau cristallin du minéral primaire auquel ils se substituent.

b₁ - Evolution des éléments dans les altérites des granites

L'observation du tableau 3 montre que la composition moyenne (64 échantillons) des altérites des granites est légèrement différente de la composition des roches, avec la silice largement dominante

Cependant on note une nette hydratation des matériaux ; une diminution sensible des teneurs en sodium et calcium ; on note en même temps une légère augmentation des teneurs en magnésium, en fer, en aluminium et en potassium.

L'évolution de la teneur des éléments dépend beaucoup de la constitution minéralogique des minéraux néoformés lors de l'altération météorique qui sont d'une part des silicates aluminés hydroxylés (argiles) et d'autre part des oxydo-hydroxydes métalliques.

En plus du fond primaire (quartz, microcline, plagioclase, mica), les altérites sont constituées d'un certain nombre de minéraux secondaires hydroxylés suivant les proportions (Blot, 1980) :

- * kaolinite ($\text{Si}_4 \text{O}_{10}$) $\text{Al}_4 (\text{OH})_8$: 1 à 39%
- * hydroxyde de fer (goethite $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) : 0 à 7%
- * nontronite, argile smectite ($\text{Si}_4 \text{O}_{10}$) $\text{Fe}_4 (\text{OH})_2 + \text{Aq}$: 0 à 5%
- * quartz : 25 à 42%
- * microcline ($\text{Si}_3 \text{AlO}_8$) K : 11 à 35%
- * oligoclase, plagioclase sodique : 4 à 44%

Le quartz est le minéral le plus stable et le plus abondant avec des variations de teneur peu importantes dans les profils, déterminant ainsi un fond de silice (SiO_2) constant. En même temps la genèse des minéraux hydroxylés implique une redistribution d'éléments qui sont de ce fait en compétition avec les éléments composant les minéraux primaires :

- compétition entre la kaolinite et les alumino-silicatés ;
- redistribution de la silice, du fer et de l'alumine avec la nontronite ;
- redistribution du fer avec les hydroxydes de fer.

b₂- Evolution des éléments dans les altérites des dolérites

Les altérites des roches basiques sont d'après la morphologie des profils beaucoup plus évoluées que les altérites des granites. En particulier l'argilification peut être très importante et aboutir à l'individualisation d'un horizon argileux assez bien défini. Ceci est d'ailleurs bien illustré sur les courbes de sondages électriques en milieux de roches granitique et doléritique.

La composition moyenne (37 échantillons) des altérites des roches basiques fait apparaître une profonde différence d'avec les roches mères. L'eau y prend une importance très grande ; en même temps les alcalino-terreux et le sodium y sont beaucoup moins représentés.

La constitution minéralogique des altérites est caractérisée par :

- les minéraux primaires hérités dans les altérites sont le pyroxène, amphiboles, plagioclases auxquels s'ajoutent du microcline et du quartz ;
- les minéraux secondaires hydroxylés prennent une grande importance, comme l'indique notamment l'hydratation importante des matériaux.

Ces minéraux secondaires sont des silicates et des hydroxydes dont la nature est semblable à celle des minéraux des altérites granitiques dans les proportions suivantes :

- * kaolinite : 8 à 45%
- * hydroxyde de fer (goethite) : 2 à 15%
- * nontronite : 10 à 40%
- * quartz : 4 à 20%
- * microcline : 7 à 20%
- * oligoclase : 9 à 35%
- * oxyde primaire (ilménite) : 2 à 3%
- * ferromagnésiens (augite et hornblende) : 0 à 40%

L'hydratation va de paire avec la diminution du calcium, du sodium et du magnésium. Ainsi les minéraux argileux se développent au détriment des plagioclases (calco-sodiques) et des minéraux ferromagnésiens (calciques et magnésiens).

b₃.- Comparaison entre les altérites basiques et granitiques

- Les altérites des deux formations ont des traits communs qui sont d'être plus hydratées que les roches et de contenir des minéraux hydroxylés de même nature, avec leur propriétés correspondantes matériaux meubles ou peu cohérents, de porosité élevée. Ces traits communs contribuent à atténuer le contraste entre les compositions des deux formations, par rapport à ce qu'il était dans les roches.

- En considérant l'eau (moléculaire et de constitution des silicates), on remarque qu'elle est beaucoup mieux représentée dans les altérites basiques. Ceci implique une argilification smectitique bien marquée dans les altérites basiques, dans un contexte par ailleurs plus riches en argiles que les altérites granitiques.

b₄- Evolution ultérieure des éléments vers le sommet du profil

a - Dans les niveaux ferrugineux

La particularité de ces niveaux est de contenir des oxydes et hydroxydes de fer (goethite, hématite et ilménite). Ils contiennent en outre d'autres minéraux tels que le quartz et la kaolinite qui constituent, avec les minéraux de fer, les minéraux cardinaux de ces niveaux. Ces minéraux cardinaux représentent en moyenne 95% des matériaux des cuirasses et carapaces latéritiques.

La composition géochimique des niveaux ferrugineux est caractérisée par rapport aux altérites par :

- une diminution des teneurs en silice, sodium, calcium, potassium, magnésium et aluminium ;
- une augmentation des teneurs en fer ainsi qu'une hydratation plus importante des matériaux.

Les résultats du tableau 3 montrent que les niveaux ferrugineux en zone granitique sont plus riches en silice. Le potassium, le sodium et le magnésium ont des teneurs comparables. En domaine doléritique, le fer, l'aluminium et l'eau de constitution sont plus importants.

On en déduit ainsi que :

- dans le granite, le quartz est le minéral principal, suivi des oxydes et hydroxydes de fer puis de la kaolinite ;
- dans le dolérite, les minéraux de fer sont dominants par rapport à la kaolinite et au quartz.

b - Dans les niveaux hypersiliceux de surface

Ces niveaux correspondent aux horizons supérieurs des sols, dont l'épaisseur varie en moyenne de 30 cm à plus de 1m.

C'est l'abondance du quartz (avec des teneurs de l'ordre de 80%) qui permet de mieux définir les sols du massif de Saraya par rapport aux roches, aux altérites et aux niveaux ferrugineux.

Les autres minéraux sont peu abondants, et d'origine différentes.

Il existe en effet des minéraux primaires représentés par des feldspaths et des muscovites pour l'essentiel et des minéraux secondaires hydroxylés ou oxydés : oxydes et hydroxydes de fer et kaolinite principalement.

La géochimie est dominée par l'importance prise par la silice.

On constate en outre une légère augmentation des teneurs en sodium et en potassium par rapport aux niveaux ferrugineux.

La comparaison des sols sur le granite et sur la dolérite permet de constater qu'au sein de la matrice quartzreuse, les minéraux primaires et secondaires sont excessivement corrodés. A l'exception des teneurs en silice, la spécificité des sols sur granite par rapport à ceux sur dolérite n'apparaît pas.

l'évidence et la composition chimique notamment, ne permet pas d'établir une différence entre les uns et les autres.

L'étude de l'altération des roches du massif de Saraya a permis de comparer les profils de deux familles de roches (granites et dolérites) soumises aux mêmes contraintes exogènes.

En première approche, la nature et le sens des transformations sont semblables dans les deux situations. Cela se traduit en particulier par l'individualisation d'horizons comparables dans les profils.

Ainsi de la roche vers la surface on aura :

- des altérites représentant un milieu privilégié de formation des silicates hydroxydés ;
- des niveaux ferrugineux correspondant à un milieu dominé par la présence d'oxydes et d'hydroxydes de fer ;
- des niveaux hypersiliceux, qui sont avant tout des milieux très riches en quartz.

On observe dans les altérites notamment différentes étapes de la formation des minéraux suivants :

* kaolinite, nontronite, quartz, oxydes et hydroxydes de fer (goethite, hématine, ilménite).

Toutes ces transformations s'effectuent dans un contexte de lessivage de l'ensemble des éléments, à l'exception du fer.

Des différences sont toutefois préservées dans les profils, comme la présence d'un squelette quartzo-feldspathique dans les altérites granitiques limitant l'extension des minéraux secondaires, ou la plus grande richesse en fer des altérites basiques.

Des différences dans les transformations superficielles existent aussi tenant d'abord à l'intensité de l'altération et à la présence persistante d'un caractère hérité :

- ainsi les minéraux secondaires hydroxylés et oxydés sont-ils à chacun des niveaux d'altération plus abondants dans les profils basiques que dans les profils granitiques ;
- de même, au plan géochimique, on a pu observer qu'exceptés l'aluminium et la silice, tous les éléments s'appauvrissent dans les altérites basiques, alors que le fer, l'aluminium, le magnésium et le potassium sont épargnés dans les altérites granitiques.

« RIEN NE SE PERD, RIEN NE SE CREE, TOUT SE TRANSFORME » ; la qualité des eaux des nappes est donc étroitement liée à la composition chimique et minéralogique des roches qui les contiennent, et en particulier à la nature des minéraux primaires susceptibles de s'altérer en libérant dans le milieu des éléments chimiques ou en intégrant des éléments chimiques du même milieu.

2.4- Application à la recherche d'eaux souterraines

En 1994 une étude du Ministère de l'hydraulique relative à la piézométrie des aquifères du socle, montre qu'il n'existe pas d'aquifères généralisés dans la zone du socle, mais un éventail d'aquifères juxtaposés, souvent en contact et ayant cependant bon nombre de caractéristiques communes. On est en présence d'aquifères discontinus à semi-continus circulant dans les franges supérieures altérées des roches saines et/ou dans les réseaux de fractures et de fissures qui traversent la partie supérieure de la roche mère.

Leur perméabilité est donc étroitement liée d'une part à la nature des produits altérés eux-mêmes dépendant de la nature de la roche mère, d'autre part à la densité et à l'extension des réseaux de fissures qui affectent ces roches-mères ainsi qu'aux grands accidents régionaux qui les traversent.

La carte piézométrique (fig. 16) établie à l'issue de cette étude montre l'allure générale de la morphologie des eaux souterraines.

Dans le socle, le niveau statique est en moyenne compris entre 10 et 20 m/sol sur l'ensemble de la région avec des valeurs plus faibles dans les bas-fonds et les vallées (6,55 m à Golmy, 8,15 m à Saensoutou) et plus élevées sur les limites Est des terrains anciens (50,01 m à Koussan, 56 m Koininguel). Il est remarquable de constater que les altitudes de la surface piézométrique s'organisent de façon très cohérente mettant en évidence les éléments suivants :

- la zone haute (niveau piézométrique de 200 m d'altitude) sur la frontière de la Guinée, se situe à la limite amont (à cheval sur le batholite de Saraya) des bassins versants des fleuves Gambie et Falémé qui constituent les principales zones de recharge des aquifères du socle ;

- la nappe s'écoule ensuite à partir du batholite de Saraya, selon deux directions majeures divergentes de part et d'autre d'une ligne de partage des eaux souterraines qui suit schématiquement celle des bassins versants des deux fleuves, la Falémé puis le Sénégal à l'Est, la Gambie à l'Ouest ;

- la Falémé et le Sénégal apparaissent très nettement comme des axes de drainages des aquifères du socle ;

- par contre, les bras du réseau hydrographique en amont de la Gambie constituent autant d'axes de recharge des aquifères du socle avec les isopièzes plus ou moins parallèles à la limite d'affleurement du socle et du bassin sédimentaire, passant de +300 m sur la frontière de Guinée à +51 m sur la limite du bassin sédimentaire mésozoïque, cénozoïque ;

- la juxtaposition avec la piézométrie des aquifères du bassin sédimentaire montre aussi la cohérence de la piézométrie des aquifères du socle puisque les isopièzes semblent se raccorder parfaitement entre les deux domaines ;

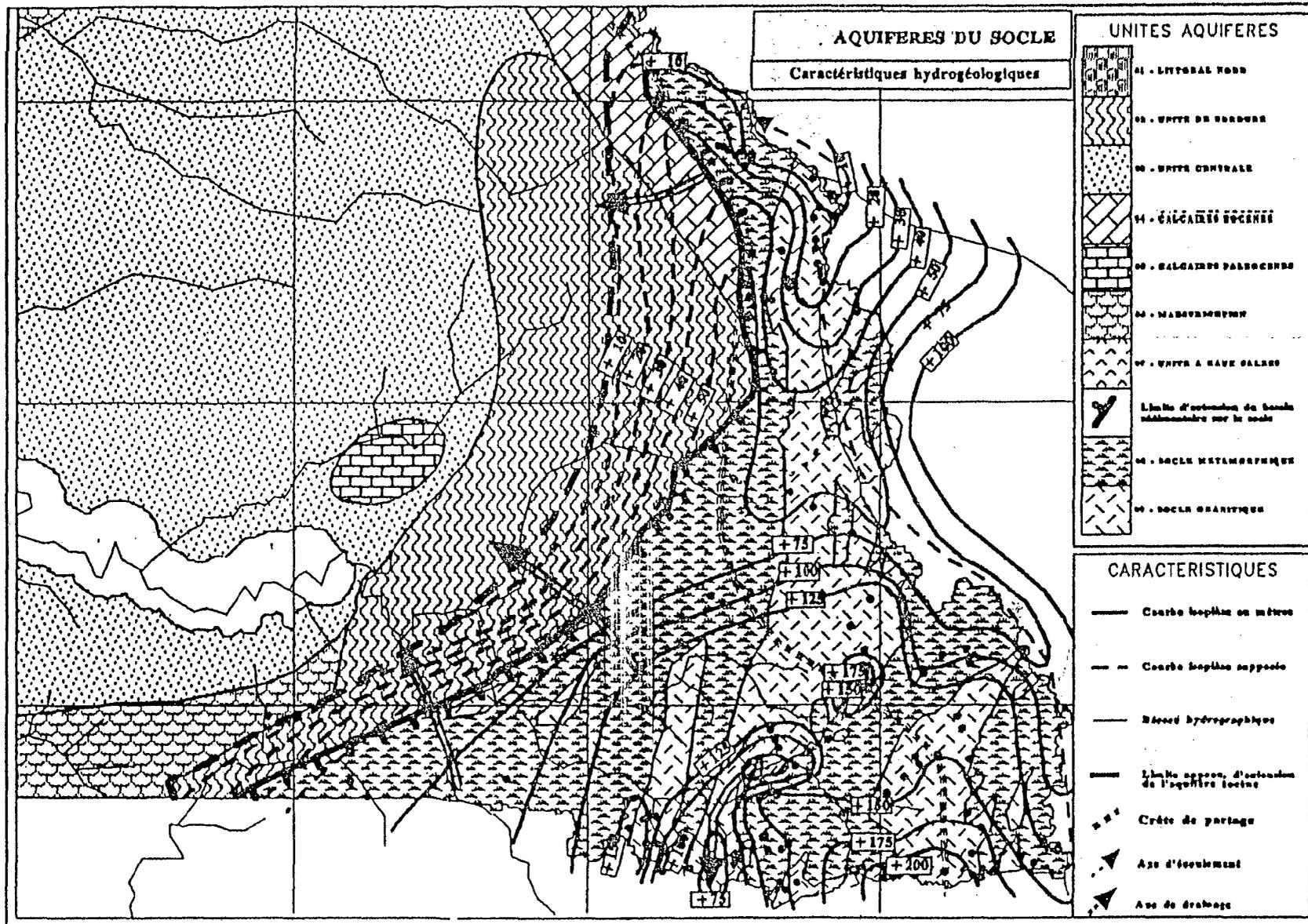


Fig. 46 : Carte piézométrique des aquifères du socle (S I G RES , 1994)

Appliquée à l'échelle d'un secteur restreint, l'étude de la morphologie de la surface piezométrique permet de déterminer les modalités de l'écoulement des eaux souterraines, lesquelles dans les conditions naturelles, dépendent de différents facteurs (perméabilité des terrains, présence ou non de limites hydrogéologiques, hétérogénéité ou non des terrains, zones de fortes exploitation, etc.).

L'interprétation structurale a été aussi utilisée pour la recherche en eaux souterraines dans la zone de socle.

Une étude portant sur une comparaison de la densité relative de la végétation avec la position de zones structurales (de type « shear ») a permis de définir des secteurs ayant un certain potentiel pour la recherche en eaux souterraines (Witchard, 1995).

Comme toutes les scènes SPOT de cette étude ont été enregistrées vers la fin de la période sèche, la végétation la plus dense (enregistrée dans l'infrarouge proche) se trouvera en principe dans des régions où le sous-sol aura la meilleure faculté de retenir l'eau.

Ces zones de végétation suivent souvent des structures pouvant représenter des collecteurs aquifères intéressants. Il est connu que des fractures principales, des fractures secondaires, des failles et des filons de diabase, du type que l'on rencontre au Nord et à l'Est du secteur de Saraya (cf. fig. 10) peuvent représenter des collecteurs en eaux utilisables. Ce phénomène est probablement dû, dans le cas des structures fracturées ou faillées, à une augmentation importante de la porosité et de la perméabilité du milieu. Dans le cas de l'intrusion de filons de diabase, ce phénomène est dû à la différence de compétence des roches intrusives et des roches encaissantes, résultant en une zone ayant une porosité due à une intense fracturation tardive.

Un autre cas d'intérêt pour la recherche en eau concerne les zones de végétations qui bordent certaines formations géologiques majeures. Ce cas est bien représenté à l'Est de Saraya (à proximité du village de Faraba) où le granite de Saraya est bordé par deux zones de végétation relativement dense correspondant probablement à des zones riches en fractures tardives dues à la différence de compétence des roches granitiques et des roches encaissantes.

La nature pétrographique et minéralogique des roches intervient pour beaucoup sur les potentialités aquifères des faciès géologiques. Car il est évident qu'un granite à biotite riche en muscovite qui occupe le centre et le Nord du massif de Saraya aura une porosité et une perméabilité plus importante qu'un faciès à biotite pauvre en muscovite qui occupe toute la partie sud-ouest du massif.

Les cristaux de muscovite sont issus de la déstabilisation des biotites. Ce phénomène d'altération de la biotite est très prononcé dans les parties centrale et septentrionale du batholite et très discret dans la partie sud. Ce phénomène confère ainsi au granite de la partie centrale et septentrionale du massif une porosité et une perméabilité plus importantes que dans le Sud.

Il est aussi évident qu'un granite fracturé ou altéré possède des potentialités aquifères plus importantes qu'un granite sain « imperméable ». De même on sait que, dans les mêmes conditions naturelles, les métaschistes sont plus favorables en matière de recherche d'eaux souterraines que les granites.

La planéité du relief, les couvertures herbeuses, forestières ou sableuses, la couverture généralisée des altérites rendent rare les affleurements rocheux. Le marigot au lit à peine marqué, l'absence de repères géographiques précis et évidents, l'absence de belvédères sans oublier les difficultés d'accès, rendent stériles les longs séjours de prospection sur le terrain s'ils ne sont pas précédés de télédétection.

Mais comme les relevés des fractures se fondent sur des alignements d'arbres, sur la rectitude des bras de cours d'eau, l'allure en bayonnettes, les contours morphostructuraux rectilignes et non sur des objets géologiques vrais (décrochement de bancs, changement de lithologie), la part d'interprétation subjective y est appréciable.

Par exemple, l'interprétation de la même image satellite par une même personne à des périodes différentes ou l'interprétation d'une même image par deux auteurs différents peut présenter des discordances. De même la présence d'une couverture latéritique (cuirasse) généralisée empêche souvent à la télédétection et à la photographie aérienne d'identifier les structures linéaires présentes dans le secteur.

Les linéaments satellitaires et les photos-linéaments ne peuvent présenter un grand intérêt en hydrogéologie que lorsqu'ils correspondent à des structures au sol accompagnées de fracturations, de fissurations avec des porosités et perméabilités intéressantes.

Ainsi l'exploitation rationnelle des données des images satellites ne peut se faire sans contrôle sur le terrain avec l'utilisation de la prospection géophysique.

L'étude géophysique réalisée à Kondokho a montré que l'interprétation hydrogéologique des données de résistivités électriques est étroitement liée à la nature des faciès géologiques, à leur composition minéralogique, à leur degré de fracturation, à la présence ou non d'argiles mais aussi à leur degré de saturation en eau.

Le tableau 4 montre aussi que 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 100 ohm.m peut correspondre à des sables et graviers à eau douce, des calcaires compacts, des grès argileux, des schistes argileux ou altérés, des tufs volcaniques ou bien à des granites altérés.

Toutefois dans un secteur donné, les variations relatives de résistivité entre diverses couches peuvent apporter des informations sans ambiguïté si on les met en relation avec la géologie locale utilisée avec bon sens.

Ainsi l'interprétation des données électriques permettra de donner une signification, dans un domaine d'application du paramètre physique qui est la résistivité. Plusieurs techniques concourent à l'interprétation des données électriques : lithologie, pétrographie, géochimie, piézométrie, hydrochimie etc...

L'interprétation des données de l'électrique donnera donc des informations sur les variations latérales de faciès (contact granites-schistes par exemple), sur la présence ou non de zones fracturées, sur l'importance de cette fracturation (fracture principale, fracture secondaire, faille) et sur les potentialités aquifères des formations géologiques. La géophysique permet aussi de mettre en évidence deux types de formations aquifères que l'on rencontre dans le contexte de socle cristallin et cristallophyllien (cf. fig. 7) :

- d'une part les colluvio-alluvions perchées et les altérites argileuses ou sableuses, qui constituent les aquifères superficiels ;
- d'autre part la zone fissurée ou fracturée du substratum qui constitue les aquifères profonds.

TROISIEME PARTIE :

CAMPAGNES DE PROSPECTION
GÉOPHYSIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE
DANS LE SECTEUR DU BATHOLITE DE
SARAYA ET SES ENVIRONS

CHAPITRE 1.- LES METHODES UTILISEES

1.1. - La prospection géophysique

Après l'étude minéralogique et géochimique des différents faciès géologiques et l'identification indirecte (télédétection) des structures à même de représenter des aquifères, vient ensuite la reconnaissance sur le terrain. Les fonds cartographiques à l'échelle 1/50.000 et l'utilisation du G.P.S. (Global Positioning System) guident le repérage et le positionnement sur le terrain. Dans la localisation et l'identification sur le terrain des structures représentant les linéaments, ou les contacts géologiques, nous avons utilisé des techniques géophysiques.

Les investigations géophysiques au sol sont utilisées pour identifier et caractériser les zones de broyage, les zones de contact géologique, mais aussi pour expliquer la différence significative de productivité entre deux forages d'une même localité. Pour ce faire, les dispositifs d'investigations latérales (traînés) ainsi que des panneaux multiélectrodes sont employés dans les zones identifiées comme potentiellement favorables par image satellite.

L'étude de la succession lithologique des terrains à l'aplomb des anomalies géoélectriques ainsi repérées est faite à l'aide de dispositifs d'investigation en profondeur (sondages électriques et panneaux multiélectrodes) en corrélation avec les sondages mécaniques (forages et puits) existants.

Entre 1994 et 1997, nous avons effectué plusieurs campagnes utilisant des méthodes d'investigations latérales ainsi que des méthodes d'investigations en profondeur dans l'ensemble de la région du socle en général et dans le secteur de Saraya en particulier. Au total quelques 380 traînés et sondages électriques de type Schlumberger et 17 panneaux multiélectrodes ont été ainsi réalisés (cf. fig. 10) et (fig. 17).

a. - Les principes et les dispositifs de sondages et de traînés électriques

Pour l'acquisition des données nous avons utilisé un résistivimètre TERRAMETER SAS 300 C avec un survolteur TERRAMETER BOOSTER SAS 2000

Rappelons que les principes et les dispositifs de ces méthodes électriques ont déjà été expliqués dans la deuxième partie du mémoire.

Pour interpréter les sondages électriques, nous avons initialement utilisé le programme d'inversion (Zohdy et Bisdorf, 1989) pour sortir un modèle initial qui a été amélioré avec le programme PISE 4 (Gabalda et Tabbagh, 1994) en tenant compte des paramètres géologiques et/ou hydrogéologiques du domaine étudié.

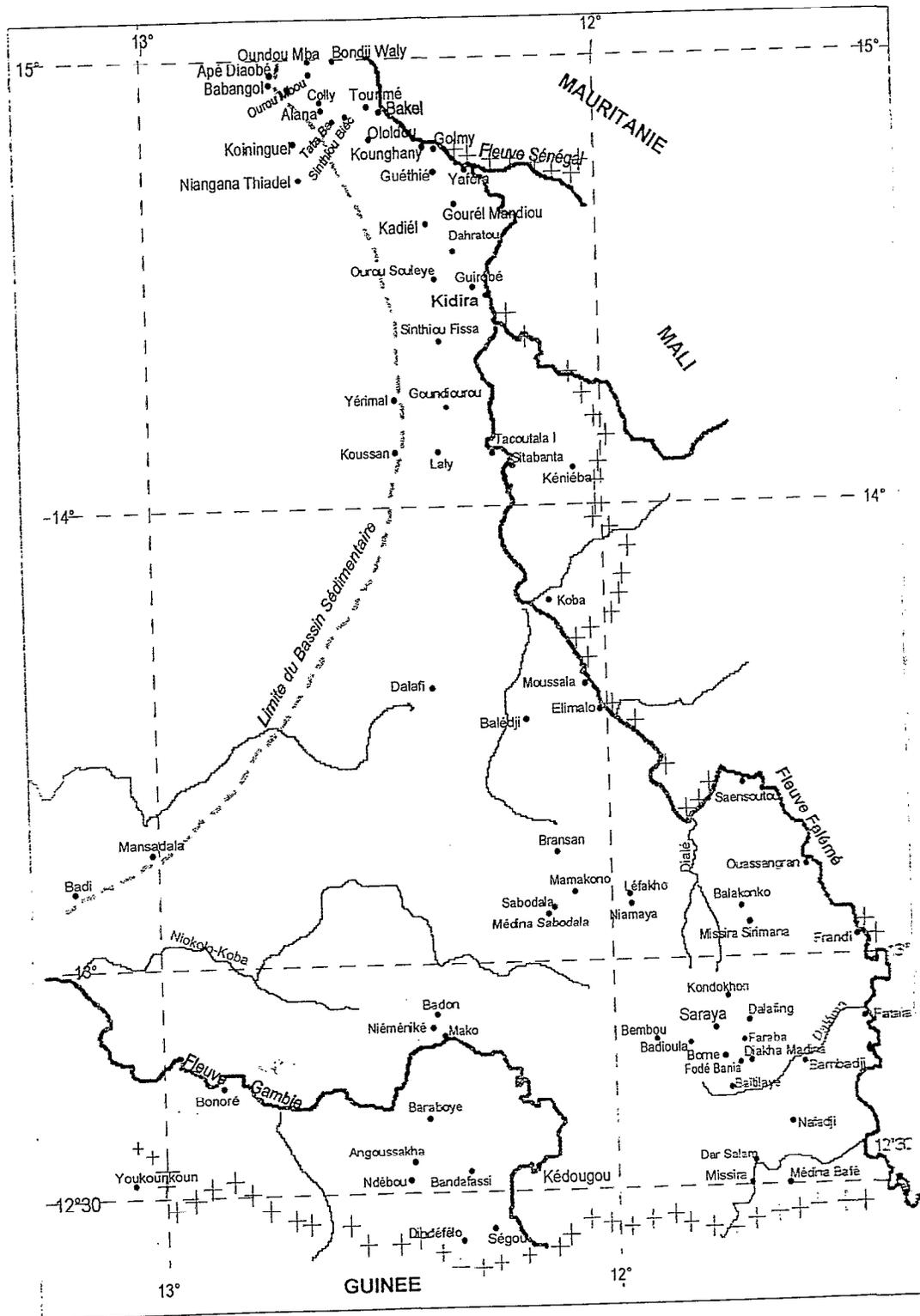


Fig. 17: Localisation des secteurs étudiés

Pour les traînées électriques les données de mesure ont été traitées et mises en forme à l'aide du logiciel Grapher.

b. - Les dispositifs multiélectrodes -ABEM Lund Imaging System - :

b₁. - Description des dispositifs

Ces dispositifs sont basés dans le cadre de notre étude sur l'utilisation de 32 électrodes connectées au résistivimètre par l'intermédiaire d'un sélecteur d'électrodes piloté par micro-ordinateur (fig. 18). Les mesures sont exécutées de façon automatique par l'ordinateur à l'aide d'un programme appelé ERIC par l'intermédiaire de fichiers adresse (.ADR) et de fichiers protocole (.ORG) (Dahlin, 1995). Les données de mesures sont stockées dans un fichier .OHM.

* Le fichier adresse

Ce fichier porte une extension .ADR.

Il renferme des informations à propos de la configuration des câbles utilisés (tab. 5).

* Le fichier protocole

Il porte une extension .ORG et comprend quatre colonnes définissant le numéro respectif des électrodes A, B, M, N ou encore C₁, C₂, P₁ P₂. (tab. 6).

Le fichier protocole spécifie la séquence des mesures et permet de réaliser de façon arbitraire les mesures envisagées.

Le fichier protocole est présenté en un seul dispositif qui peut être le dispositif Schlumberger, Wenner ou autres.

* Le fichier de données (format) .OHM.

Il présente le résultat de la série de mesures réalisées à l'aide du protocole défini. Ce fichier indique (cf. tab. 6):

- l'orientation du profil,
- coordonnée de la première station de mesure (l'abscisse du centre du dispositif de mesure),
- la date et l'heure du début des mesures,
- l'espacement entre deux électrodes successives,
- le nombre de fichiers protocole utilisé,
- le nom du protocole,
- le fichier organisation,

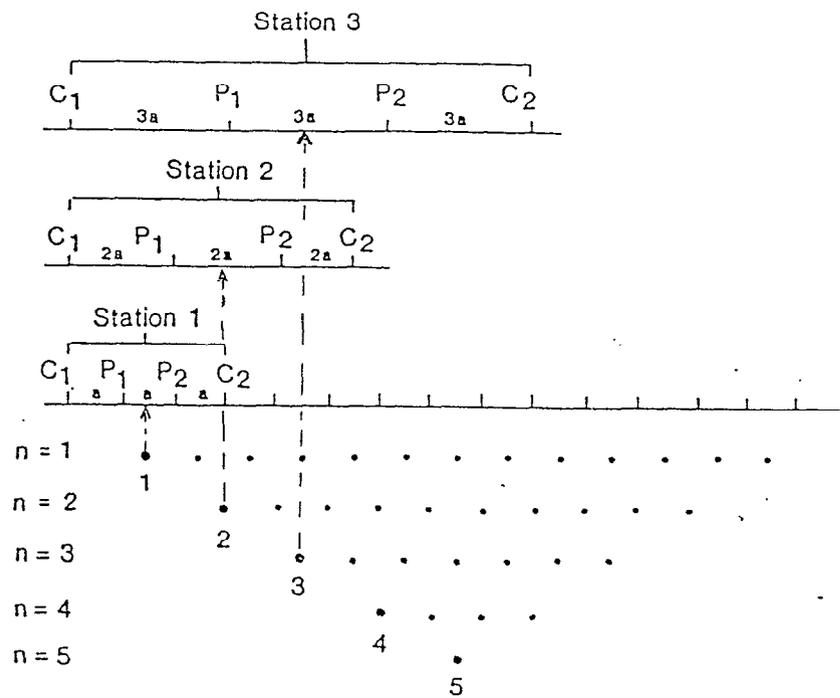
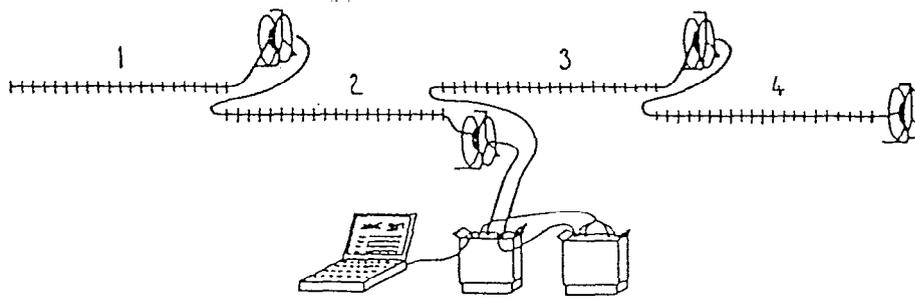


Fig. 18: Principe de la pseudosection (Barker, 1992 in Dahlin, 1995)

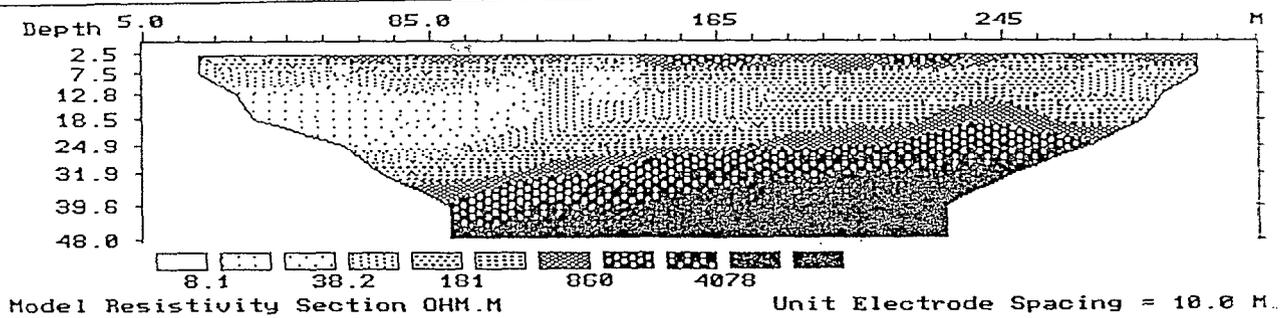


Fig. 19 : Modèle d'interprétation 2D

Tab. 5 : Description du fichier Adresse (.ADR).

DOUB2X32.ADR

4 16	Nous choisissons de représenter 4 cables de 16 électrodes à cause d'une limitation graphique
1 16	toutes les électrodes sont branchées donc le coefficient pour la distance inter-électrodes est 1
32	Nombre total d'électrodes sur le dispositif
1	Electrode 1 de votre dispo: en effet le take-out le plus loin arrive en A sur la prise 18/32 et cela
3	est l'adresse No 1 sur le sélecteur d'électrodes.
5	
7	
9	
11	
29	
31	Electrode 16 de notre dispositif
64	Electrode 17 de notre dispositif
62	
60	
38	
36	
34	
1-1	La suite concerne la représentation graphique des électrodes
1-3	
1-5	
3-1	
3-3	
3-5	
3-7	
3-11	
3-13	
3-15	
4-1	
4-3	
4-5	
4-7	
4-9	
4-11	
4-13	
4-15	

Tab. 6. Description des fichiers (.ORG, .OHM et .DAT).

Aide

SCHBIS.ORG

```

: SCHLUMBERGER
: COUB2X32 LONG ARRAY
: 32 16 17
: 30 15 16
: 31 16 17
: 32 17 18
: 28 14 15
: 29 15 16
: 30 16 17
: 31 17 18
: 32 18 19
: 26 13 14
: 1 1 1
: 28 26 27
: 29 27 28
: 30 28 29
: 31 29 30
: 32 30 31
    
```

Fichier Edition Recherche Options

Aide

FARA1.OHM

NW positif

```

: { first station coordinate }
1995-06-17 17:28:46 ERIC ver. 1.3 1995-09-20
: { electrode take-out spacing }
: { no. of protocol files used }
    
```

SCHBIS 3
SCHBIS.ORG
225

1995-06-17 17:28:54 ERIC ver. 1.3 1995-09-20

-155	155	-5	5	1.620E-2	31.4	2	2
-155	135	-15	-5	2.695E-2	59.6	2	2
-145	145	-5	5	2.365E-2	18.2	2	2
-135	155	5	15	3.520E-2	29.3	2	2
-155	115	-25	-15	7.810E-3	56.7	2	2
-145	125	-15	-5	1.465E-2	28.5	2	2
-135	135	-5	5	2.224E-2	14.3	2	2

Fichier Edition Recherche Options

Aide

FARA1.DAT

```

: 150 122
-10 140 178
: 140 156
: 140 232
-20 130 44.7
-10 130 83.8
: 130 127
: 130 170
: 130 314
-20 120 31
-10 120 79.6
: 120 131
: 120 165
: 120 253
: 120 312
    
```

- le nombre de points de mesure,
- le numéro de la première station de mesure.
- la date et l'heure du début des mesures,

A partir de la 11^{ème} ligne du tableau, nous distinguons :

- l'abscisse de chacune des 4 électrodes successives A, B, M, N pour chaque mesure effectuée,
- la résistance V/I ,
- le coefficient de variation
- le nombre de cycles de mesure pris en compte sur le nombre total de cycles d'injection de courant.

Notons que ce fichier peut enregistrer aussi bien les résistances positives que négatives.

* Le fichier de données format .DAT

Le programme MAKE-DAT.EXE convertit ce format .DAT à partir du fichier .OHM.

Ce fichier .DAT est constitué de trois colonnes représentant respectivement l'abscisse du point de mesure, la pseudo-profondeur et la résistivité apparente correspondante.

Contrairement au fichier .OHM, les résistivités apparentes de valeur négative ne sont pas enregistrées dans le fichier .DAT.

A partir du fichier .DAT, le logiciel ERIGRAPH élabore la pseudosection, une structure à deux dimensions qui est la représentation graphique des résistivités apparentes en fonction de la distance et de la pseudo-profondeur (fig. 18).

La pseudo-profondeur dépend de l'organisation des électrodes ABMN et de l'espacement AB, la distance entre deux électrodes successives étant fixée à 10 m dans notre dispositif.

La modélisation des pseudosections par le logiciel RES2DINV (Loke, 1996) fournit une structure géoélectrique en deux dimensions des résistivités vraies en fonction de la distance et de la profondeur (fig. 19).

b₂- La configuration des dispositifs de mesures

A la suite des sondages électriques de reconnaissance, les configurations suivantes ont été retenues pour les traînés électriques Schlumberger : AB = 180 à 200 m ; MN = 10 m ; pas de 5 à 100 m.

Pour la méthode multiélectrode, des panneaux successifs ou imbriqués de 32 électrodes sont réalisés au niveau des anomalies conductrices révélées par les traînes. La distance entre deux électrodes successives ($a = 10$ m) est choisie de sorte à réduire le temps de mesure et à atteindre des profondeurs d'investigation intéressant le toit de la roche saine situé entre 40 à 80 m selon les faciès. Seul deux dispositifs ont pu être utilisés (Schlumberger, Werner) parce que l'emploi du dispositif pôle-pôle

nécessitait l'utilisation de deux câbles de 1500 m chacun (dont on ne disposait pas) pour l'installation de deux électrodes à l'infini.

1.2. - Etude piézométrique du secteur de Saraya et ses environs

Au mois de juin 1996, une campagne de mesure de la profondeur du niveau d'eau des puits dans 11 localités du secteur de Saraya et ses environs nous a permis d'établir à l'aide du programme « WINSURF » une carte isopièze locale.

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une sonde électrique à signal sonore.

1.3.- Etude de la chimie des eaux des nappes du secteur de Saraya et ses environs

Le dosage des éléments chimiques des échantillons d'eau des puits et forages de ce secteur a pour objet de déterminer la potabilité des eaux et de définir les niveaux de relation entre la minéralisation des eaux et la géochimie des aquifères.

Nous avons effectué l'analyse chimique des eaux provenant de différentes nappes du secteur de Saraya et ses environs (nappes des altérites, nappes de granites, de schistes fissurés, de dolérites, de syénites et de grès et micas) en complément aux analyses faites sur les eaux des forages réalisés dans le cadre du programme UNICEF de lutte contre le ver de Guinée et les maladies diarrhéiques.

Les prélèvements effectués en 1996 dans le secteur de Saraya ont été analysés au laboratoire d'hydrochimie du Département de Géologie (Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar). Les cations et les anions ont été déterminés par la méthode de chromatographie ionique à l'aide d'un analyseur « DIONEX QIC Analyzer » respectivement sur colonne CS-12 mm (10-32) et sur colonne AS4A-SC mm (10-32).

La silice (SiO_2) a été déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre UV/ visible de marque JASCO Modèle 7800 par la méthode au molybdate d'ammonium..

Lors de la campagne d'échantillonnage, à chaque point d'eau, un certain nombre de mesures in situ ont été réalisés :

- le pH, à l'aide d'un pH-mètre HANNA instruments de type HI8014 avec un dispositif de compensation manuelle de température ;
- la conductivité et la température, au moyen d'un conductivimètre TDS/mètre HACH, modèle 44600 ;

La détermination de la conductivité des eaux de puits et de forages permet, en associations avec les résistivités des différents niveaux aquifères, de définir la variation de la porosité en fonction des faciès

hydrogéologiques (loi d'Archie), car il y a une relation directe entre conductivité des eaux et la porosité des aquifères.

Ces différentes méthodes de recherche utilisées conjointement participent à une meilleure connaissance de la géologie, de la répartition des zones fracturées en confirmant ou non les données de la télédétection satellitaire et les données géologiques antérieures. Elles participent aussi à la caractérisation géoélectrique et hydrochimique des aquifères du socle du Sénégal oriental en général et du batholite de Saraya en particulier.

CHAPITRE 2 : RÉSULTATS DES CAMPAGNES

La télédétection a décrit un certain nombre de linéaments, des contacts géologiques et des zones à potentiel aquifère important. Mais comme les relevés des fractures et autres se fondent sur des alignements d'arbres, sur la rectitude des bras de cours d'eau, l'allure en bayonnettes, les contours morphostructuraux rectilignes et non sur des objets géologiques vrais (décrochement de bancs, changement de lithologie), la part d'interprétation subjective y est appréciable.

Ainsi l'exploitation rationnelle des données des images satellites ne peut se faire sans contrôle sur le terrain avec l'utilisation d'une prospection géophysique et hydrogéologique.

Les fracturations et les contacts géologiques ont pour effet de modifier la porosité (en grand en dessous du domaine argileux d'altération d'où un changement des paramètres physiques (électriques et hydrodynamiques de l'aquifère) et chimiques de l'eau d'imbibition.

La mise en oeuvre de méthodes d'investigation est rendue nécessaire par l'absence d'affleurements ou par la non matérialité des mégafractures à l'affleurement ; d'où la nécessité de contrôler la réalité des fractures et des zones de contacts associés aux relevés satellitaires mais aussi de caractériser ces fractures en précisant la nature et l'épaisseur des zones broyées induites qui intéressent l'hydrogéologue.

2.1. - Identification des anomalies

2.1.1. - Fractures et zones de contact granite-roches volcano-sédimentaires

Pour vérifier que les linéaments et les contacts géologiques vus sur image SPOT correspondent effectivement à des signatures de mégafractures ou de structures géologiques vraies, nous allons, après avoir déterminé la nature des faciès géologiques du secteur (l'interprétation des résistivités électriques a le sens que quant elle est faite en relation avec les types de faciès géologiques), utiliser la méthode de prospection électrique (traînés électriques, panneaux multiélectrodes et sondages électriques).

Le sondage électrique établit une coupe verticale de résistivités, donc devrait fournir facilement à profondeur du substratum, la frange fissurée, le niveau argileux et la cuirasse si elle existe. Les résultats des sondages de reconnaissance permettront de faire le choix de la longueur de ligne AB du traîné électrique qui constitue un artefact de poids pour l'identification des hétérogénéités.

Sachant qu'il y a un linéament dans un secteur déterminé (utilisation cartes de linéaments et G.P.S), nous pourrions être amenés à effectuer un traîné dont le but est de déterminer si le linéament est lié à la présence d'une fracturation caractérisée sur le terrain par une variation latérale significative des résistivités.

Ensuite nous mettons en oeuvre les panneaux multiélectrodes 2D pour estimer autant que possible la forme et les dimensions des aquifères potentiels.

Les modèles géoélectriques, les logs de forage et les variations de la porosité (établies à partir de la loi d'Archie) permettront de décrire en fonction de la profondeur les types d'aquifères rencontrés.

Pour cela plusieurs secteurs ont été étudiés:

A - Secteur de Faraba

Situé à l'Ouest de Saraya, ce secteur est traversé par des linéaments de direction NE-SO (cf. fig. 10). Il est caractérisé par une zone de contact entre granites et les schistes birimiens d'origine sédimentaire mais aussi par une image infrarouge en fin de saison sèche traduisant un potentiel aquifère persistant situé au voisinage du contact. Enfin il comporte un forage manuel avec un débit de $3\text{m}^3/\text{h}$ dont le niveau statique est à 6.2 m par rapport au sol.

A partir des sondages électriques de reconnaissance, trois niveaux sont identifiés avec en surface un recouvrement sablo-argileux de 1 m d'épaisseur reposant sur 5 m d'argile ayant une résistivité d'environ 10 ohm.m. En profondeur, un niveau à potentiel aquifère, de résistivité moyenne 150 ohm.m repose sur le substratum granitique (> 500 ohm.m).

La comparaison entre le traîné électrique et le profil multiélectrode Schlumberger (qui est une association de quatre panneaux successifs) réalisés dans ce secteur permet d'observer (fig. 20) une variation latérale des résistivités moyennes qui suggère un relèvement du socle ou un changement latéral de faciès accompagné d'une série d'anomalies conductrices.

En effet plusieurs failles ont été identifiées le long du profil électrique. Ces failles se manifestent sur le traîné électrique par un palier de hautes valeurs de résistivités apparentes (compartiment soulevé) passant à un palier de basses valeurs de résistivités (toit du substratum effondré).

Deux techniques électriques ont été utilisées conjointement dans la mise en évidence du contact géologique granites - roches volcano-sédimentaires au Sud de Faraba.

Le profil électrique et les panneaux multiélectrodes orientés selon une direction -NO-SE; perpendiculaire au linéament Sud Faraba et traversant les granitoïdes puis les volcano-sédimentaires, donnent plusieurs enseignements :

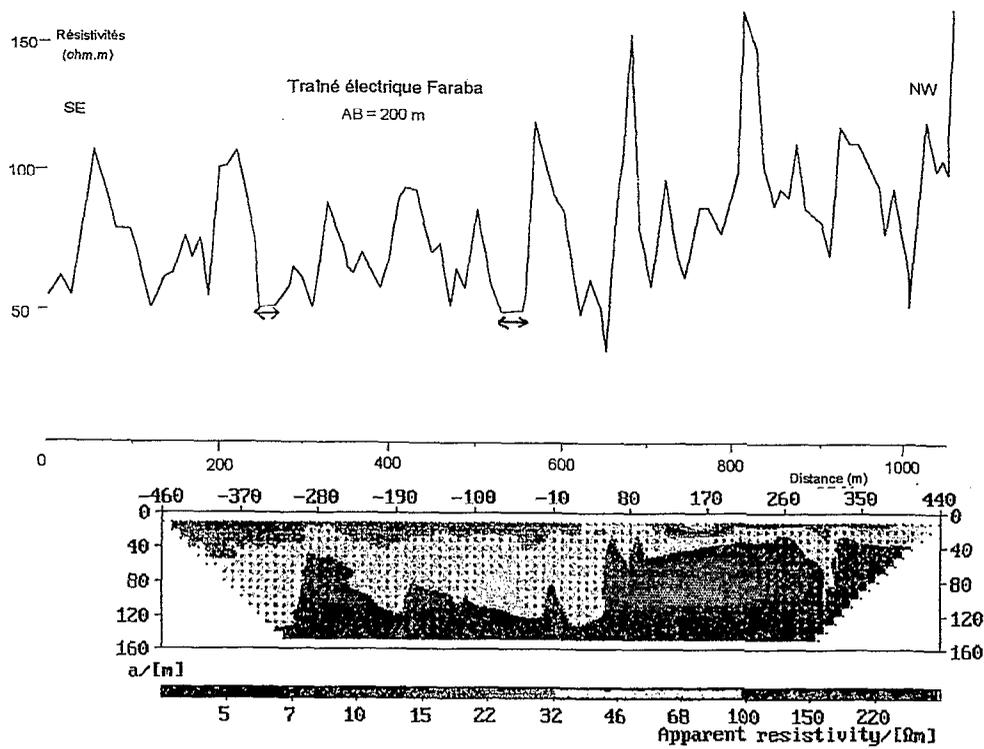


Fig. 20: Comparaison traîné électrique et multiélectrodes des résistivités apparentes à Faraba

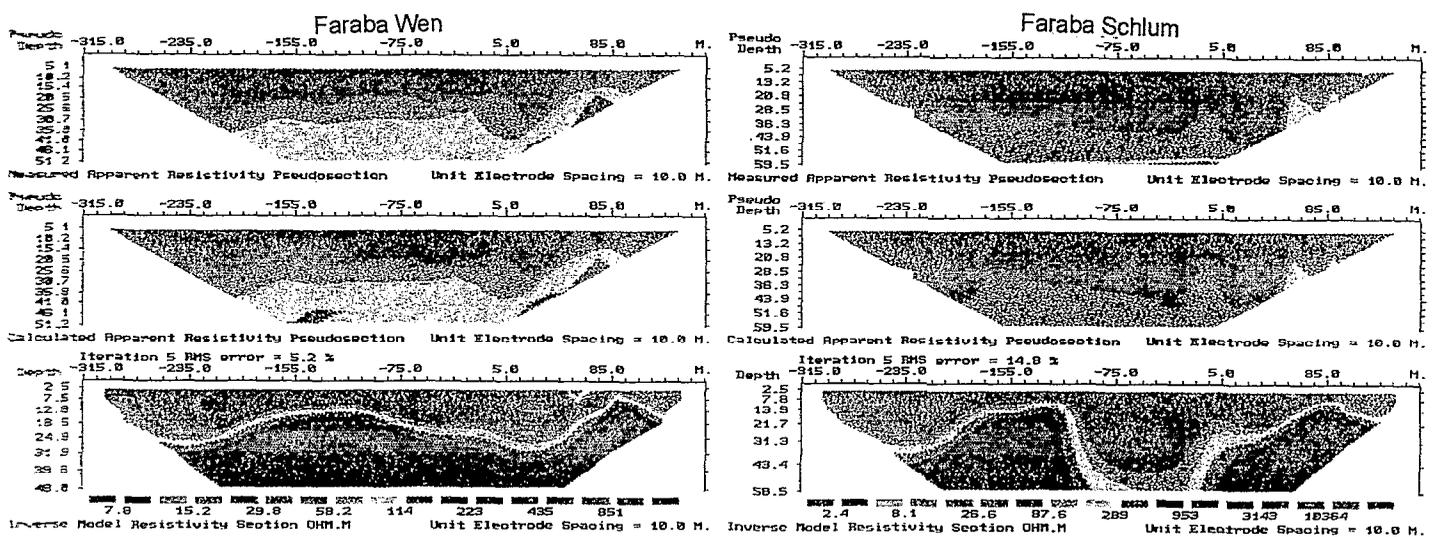


Fig. 21: Comparaison des profils multiélectrodes Wenner et Schlumberger à Faraba

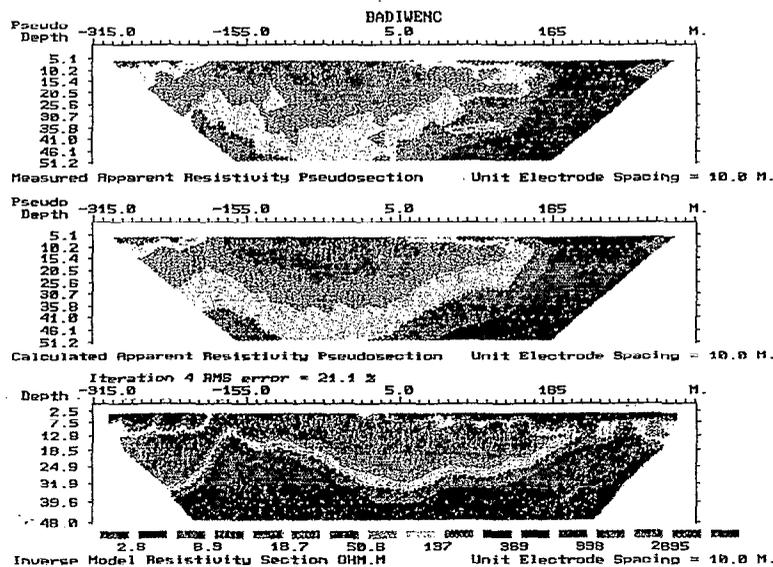


Fig. 26: Profil multiélectrodes Wenner à Badioula

- un palier de hautes valeurs sur substratum granitique qui passe à de basses valeurs de résistivités dans les volcano-sédimentaires (schistes).

La zone de contact est marquée par une anomalie de type filonien (large de 50 m environ) c'est-à-dire en forme de W et par des failles dont l'anomalie a une forme de V.

- le traîné électrique est caractérisé aussi par deux paliers de résistivités apparentes (\leftrightarrow) situés aux abscisses 250 et 550 m avec des largeurs respectives de 40 et 50 m. Ce dernier palier matérialisé par les coordonnées géographiques $11^{\circ}41'44''$ Ouest et $12^{\circ}48'46''$ Nord correspond exactement à la zone de cisaillement identifiée par l'image SPOT au Sud-est de Faraba.

Ainsi l'existence de ces différentes anomalies (failles, zones de cisaillement et de contact géologique) font de Faraba un secteur à potentiel aquifère qui se caractérise par une végétation la plus dense en fin de saison sèche ; confirmant ainsi les révélations de l'image satellite.

Les modèles de résistivité de types Wenner et Schlumberger (fig. 21) obtenues à partir de la jonction des deux panneaux centraux de la pseudosection, ne sont pas tout à fait contradictoires. Le modèle du dispositif Schlumberger montre des structures plus profondes et plus marquées. En effet avec le dispositif Wenner des perturbations dues aux hétérogénéités locales au voisinage des électrodes MN_1 ou à-coups de prises peuvent faire croire à la présence de terrains inexistant en réalité (fig. 22).

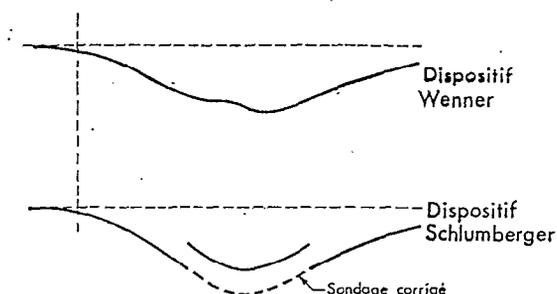


Fig. 22 : Effet des à-coups de prise sur les sondages électriques effectués avec un dispositif Wenner et un dispositif Schlumberger (Astier, 1971).

Le modèle Schlumberger met en exergue une structure compartimentée par des failles qui n'excluent pas la présence de filons doléritiques dans le secteur comme l'atteste d'ailleurs la nature des débris au forage de Faraba.

Un potentiel aquifère important autour de l'abscisse $x = -35$ et un second à $x = -235$ confirment encore l'existence de zones de cisaillement localisées par le traîné électrique et révélée par l'image satellite en infrarouge liée à une végétation vivace en fin de période sèche. En effet ces anomalies géoélectriques correspondent aux niveaux fracturés dont les résistivités, dans le domaine schisteux (volcano-sédimentaire), situées entre 58 et 289 ohm.m, constituent des zones de drainage des eaux souterraines.

B - Secteur de Baïtilaye

Il est caractérisé par une image infrarouge traduisant un contact granite-schiste situé entre le village et le pont sur la Daléma (carte géologique Kéniéba au 1/200.000^e). Il se caractérise aussi par des débris du forage identifiés à des microsyénites calco-alcalins *qui sont caractéristiques de faciès de bordure à la périphérie des massifs de granite*. Après reconnaissance à l'aide de cartes géologiques et d'un G.P.S., une prospection par traîné électrique et panneau multiélectrode a été réalisée.

L'analyse du traîné montre la présence de deux phases caractéristiques d'une variation latérale des résistivités moyennes.

En effet on observe sur la figure 23 un palier de hautes valeurs de résistivités moyennes sur substratum granitique qui passe latéralement à de plus faibles valeurs dans les volcano-sédimentaires.

La zone de contact est marquée comme dans le secteur de Faraba par une anomalie de type filonien (large de 70 m). Un palier de faibles résistivités apparentes (100 ohm.m) situé entre les abscisses 460 et 530 m fait suite à la zone de contact. Ce palier correspondrait à une zone de cisaillement hydrogéologiquement très intéressante.

L'utilisation de la multiélectrode a abouti dans ce secteur à des résultats non exploitables, dus à une dispersion très importante des mesures qui peut être attribuée à un mauvais contact électrodes-sol cuirassé.

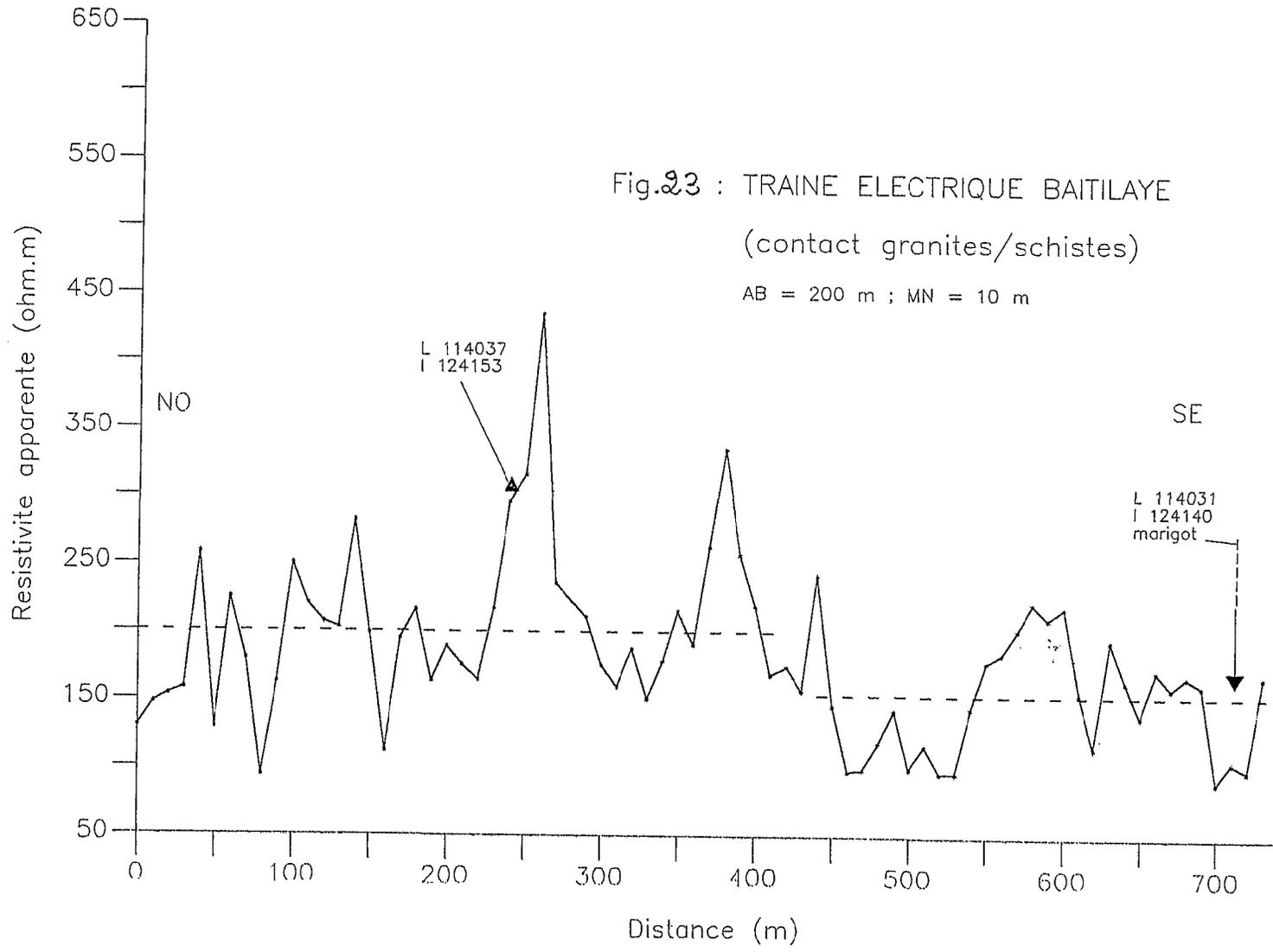
a. - Courbes isopièzes du secteur de Saraya et variation latérale des faciès géologiques

Les résultats de l'analyse spatiale des courbes isopièzes du secteur de Saraya et ses environs (fig. 24) semblent comme la géophysique confirmer la présence d'une zone de contact à l'Est et au Sud de Saraya. En effet la morphologie de la surface piézométrique est déterminée par les modalités de l'écoulement des eaux souterraines, lesquelles dans les conditions naturelles, dépendent de différents facteurs (perméabilité des terrains, présence ou non de limites hydrogéologiques, hétérogénéité ou non des terrains, zones de fortes exploitation, etc...).

Les courbes isopièzes vont permettre donc d'obtenir des informations sur l'hydrologie des eaux souterraines à l'échelle du niveau des aquifères dans son ensemble, donc son étude globale : délimitation des zones hydrologiques, détermination des lois générales de l'écoulement et données sur les caractéristiques hydrogéologiques.

L'analyse spatiale de la côte piézométrique montre d'une part l'existence d'un dôme sur l'axe Saraya-Badioula.

De part et d'autre d'une ligne perpendiculaire à cet axe, les eaux s'écoulent à l'Est vers le fleuve Falémé et à l'Ouest vers le fleuve Gambie.



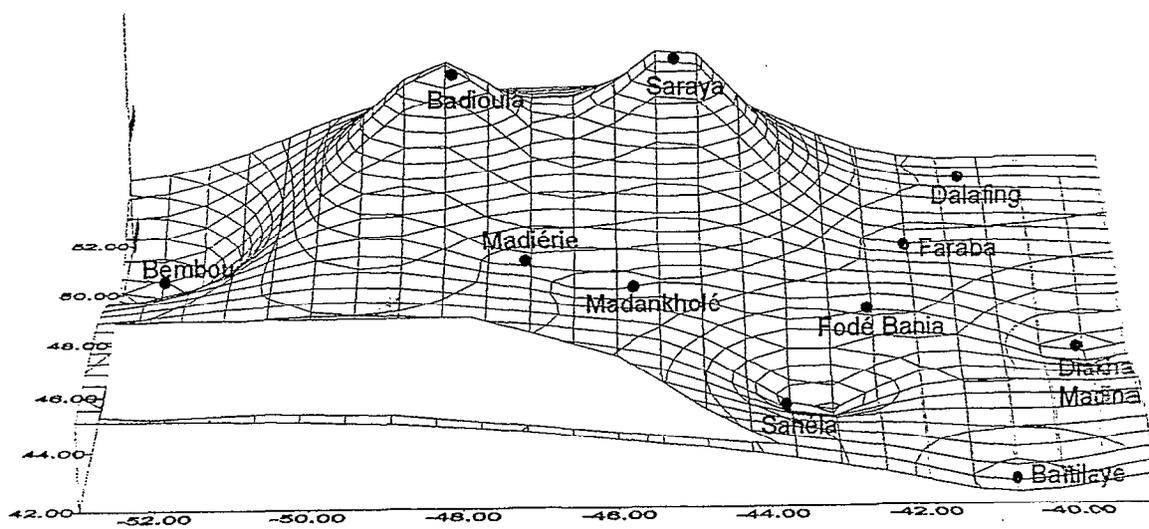
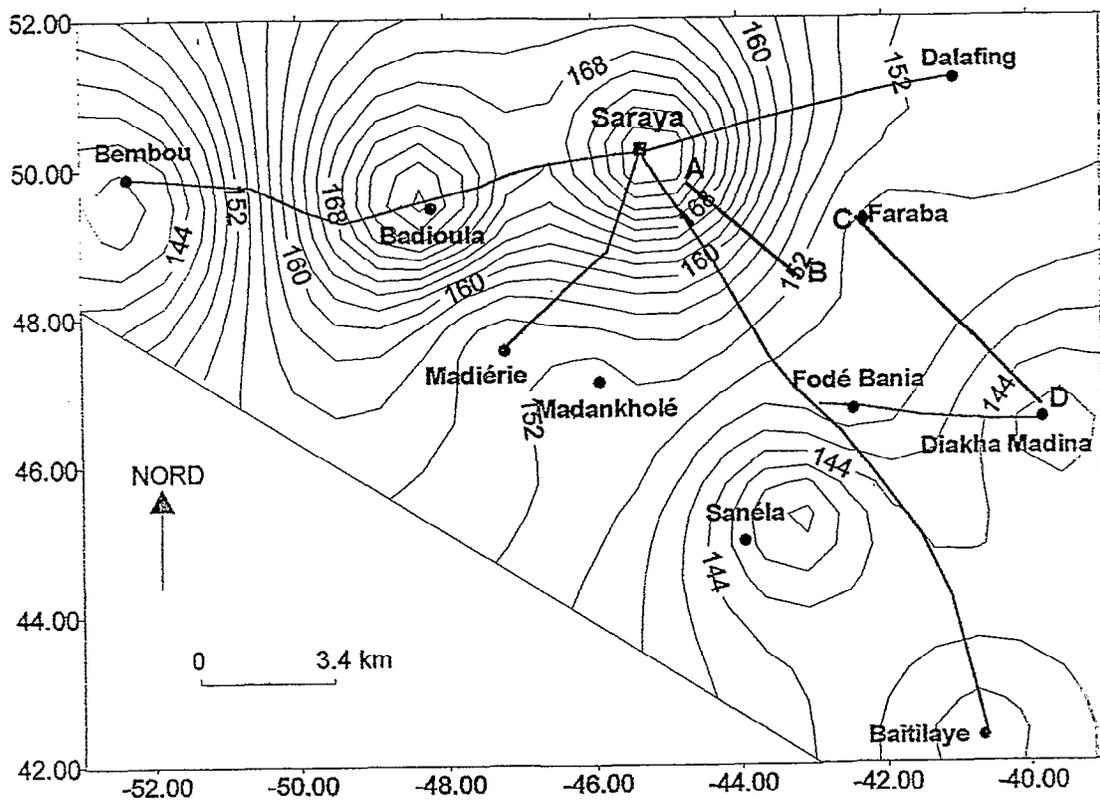


Fig. 24 : Piézométrie locale du secteur de SARAYA (juin 1996)

Cette ligne de partage des eaux souterraines est en parfaite concordance avec la distribution du réseau hydrographique car elle constitue la zone de départ des marigots qui alimentent d'une part le fleuve Gambie et d'autre part la Falémé (fig. 25).

L'interprétation des courbes isopièzes donne aussi des informations sur les caractéristiques hydrogéologiques des couches aquifères.

En effet à partir du dôme piézométrique du secteur de Saraya-Badioula, les courbes de niveau s'écartent de plus en plus en direction de l'Est et du Sud-est ; ce qui est un indice de perméabilité croissante dans le sens de l'écoulement. On est en présence d'une nappe à écoulement non uniforme avec un double écoulement latéral ; le milieu est alors hétérogène.

Ce phénomène peut être dû par exemple à des contacts d'assises d'âges différents ou à des passages latéraux de faciès.

Ceci confirme bien les résultats de l'interprétation de l'image SPOT et de la géophysique relatifs à l'existence dans le secteur de Faraba-Baïtilaye d'une zone de contact entre granites de Saraya et les roches volcano-sédimentaires représentées par les schistes birimiens de perméabilité plus élevée (métaschistes 10^{-4} à 10^{-9} cm/s et granite 10^{-9} à 10^{-10} cm/s d'après Meyer De Stadlhofen, 1991).

Dans certaines localités, les courbes isopièzes dessinent des structures circulaires. Selon l'orientation de la concavité par rapport à la direction de l'écoulement qui est soit tournée vers l'amont soit vers l'aval, il est possible de tirer des conclusions sur les caractéristiques du flux des eaux souterraines:

- Dans le secteur de Saraya-Badioula, on a une concavité tournée vers l'amont qui se traduit par un bombement général de la surface piézométrique et par une forte courbure du profil de dépression. Il est donc l'expression d'une faible perméabilité.

- Par contre dans le secteur de Bembou et secteur de Sanéla-Baïtilaye-Diakha Madina, on a une concavité orientée vers l'aval, on est en présence d'une zone déprimée, donc de fortes perméabilités.

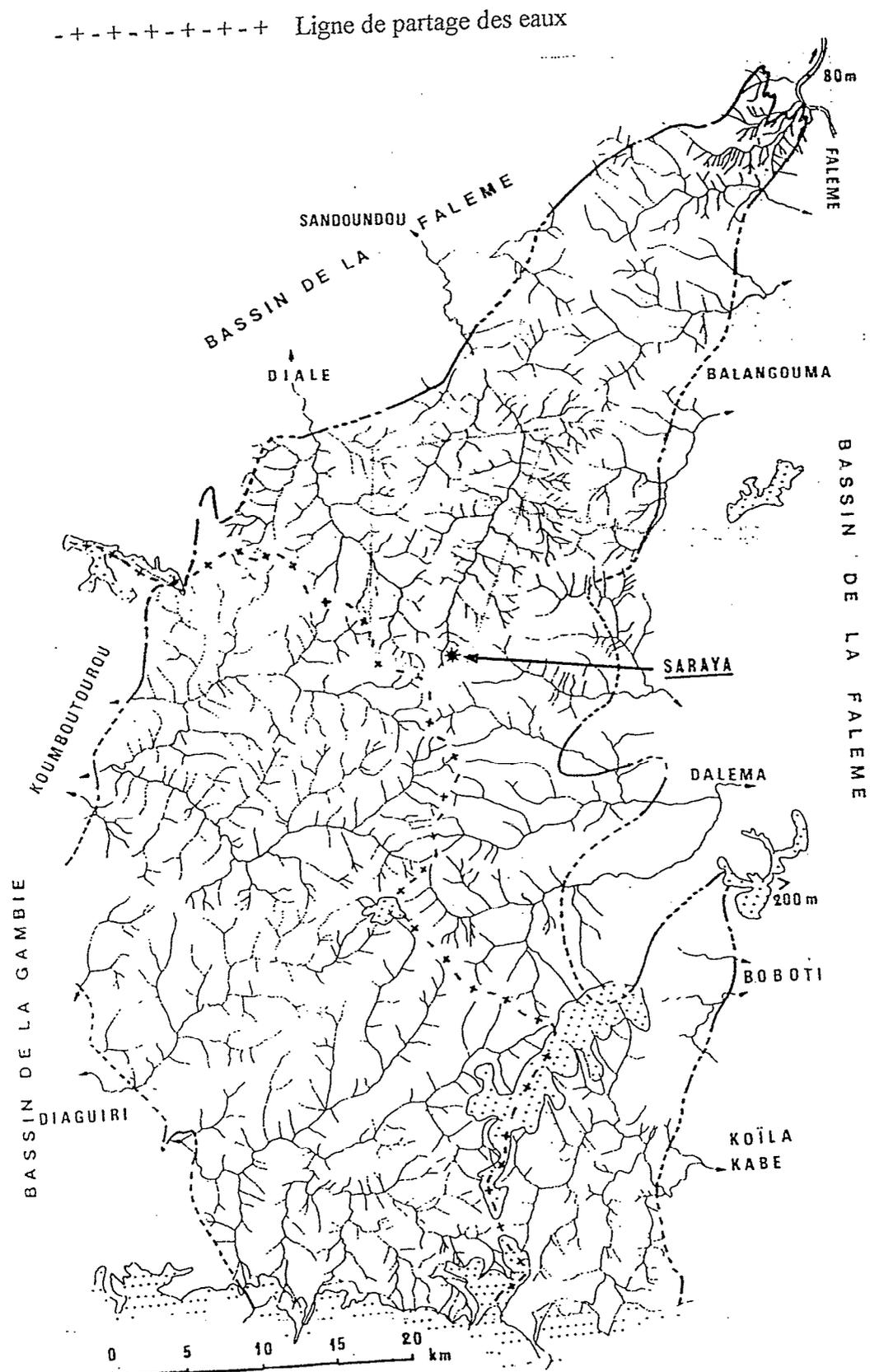
C'est en générale la structure des zones de drainage par les cours d'eau de surface.

D'autre part l'étude de la variation du gradient hydraulique ou perte de charge par unité de longueur qui est un paramètre important dans la circulation des eaux souterraines permet d'aborder dans le même sens.

Si l'on connaît les niveaux piézométriques H_A et H_B dans deux sections transversales du courant liquide, A et B, distantes d'une longueur horizontale L, nous pourrons en tirer :

$$j = \frac{H_A - H_B}{L_{AB}}$$

Fig. 25: Cadre physique du massif de Saraya : réseau hydrographique et orographique
(Blot, 1980)



L'espacement des courbes isopièzes exprime directement le gradient hydraulique et traduit la forme du profil de dépression.

Les courbes serrées observées au niveau du dôme piézométrique indiquent un fort gradient hydraulique donc une faible perméabilité. La détermination du gradient (i) entre A et B donne :

$$i_{AB} = \frac{H_A - H_B}{L_{AB}} = \frac{174 - 152}{3873} = 6.10^{-3}$$

Lorsque les courbes sont étalées comme c'est le cas dans le secteur de Faraba-Baïtilaye, on est en présence d'un gradient hydraulique i_{CD} moins élevé, d'une pente faible, d'une perméabilité forte ou d'une augmentation de la section d'écoulement du terrain aquifère.

$$i_{CD} = \frac{H_C - H_D}{L_{CD}} = \frac{150 - 142}{6399} = 1.10^{-3}$$

Le début de distribution des bras du réseau hydrographique de la Gambie et de la Falémé sur schématiquement dans le secteur du massif de Saraya la ligne de partage des eaux souterraines.

La faible perméabilité des niveaux de surface associée à cet important réseau hydrographique va favoriser dans cette région du socle la présence d'aquifères faiblement capacitifs et très tributaires des variations saisonnières de la pluviométrie.

L'étude de la variation de la morphologie des isopièzes qui traduit dans les conditions naturelles une variation de perméabilité et/ou de la section d'écoulement de l'aquifère, représente un outil précieux pour la caractérisation hydrogéologique des aquifères en reconfirmant une fois encore l'existence au Sud-est de Saraya d'une zone de contact granite-schiste signalée par la télédétection et identifier sur le terrain par les traînés électriques et par les profils multiélectrodes.

La variation supposée de la section d'écoulement déduite de celle de la morphologie des isopièzes concorde bien avec les résultats des profils électriques. En effet la pseudosection réalisée à Faraba (cf. fig. 20) montre nettement l'augmentation de la section d'écoulement (augmentation de la profondeur du toit du substratum imperméable) quand on passe des granites aux schistes, volcano-sédimentaires

C. - Secteur de Badioula

Ce secteur est caractérisé par l'intersection de linéaments identifiés par télédétection dont l'une des directions correspond au prolongement d'une intrusion basique matérialisée par méthode électrique à Kondokhon (Blot, 1980) et observable sur la carte géologique du bathholite de Saraya (cf. fig. 13).

Il est aussi caractérisé par l'existence d'un forage qui donne un débit exceptionnel (en zone de socle) de 19 m³/h.

L'investigation menée porte sur la juxtaposition de trois profils multiélectrodes Wenner perpendiculairement à la direction du linéament (fig. 26).

Fig. 28 Profils multi-électrodes (pseudosections) en fonction des débits de forage à Bambou

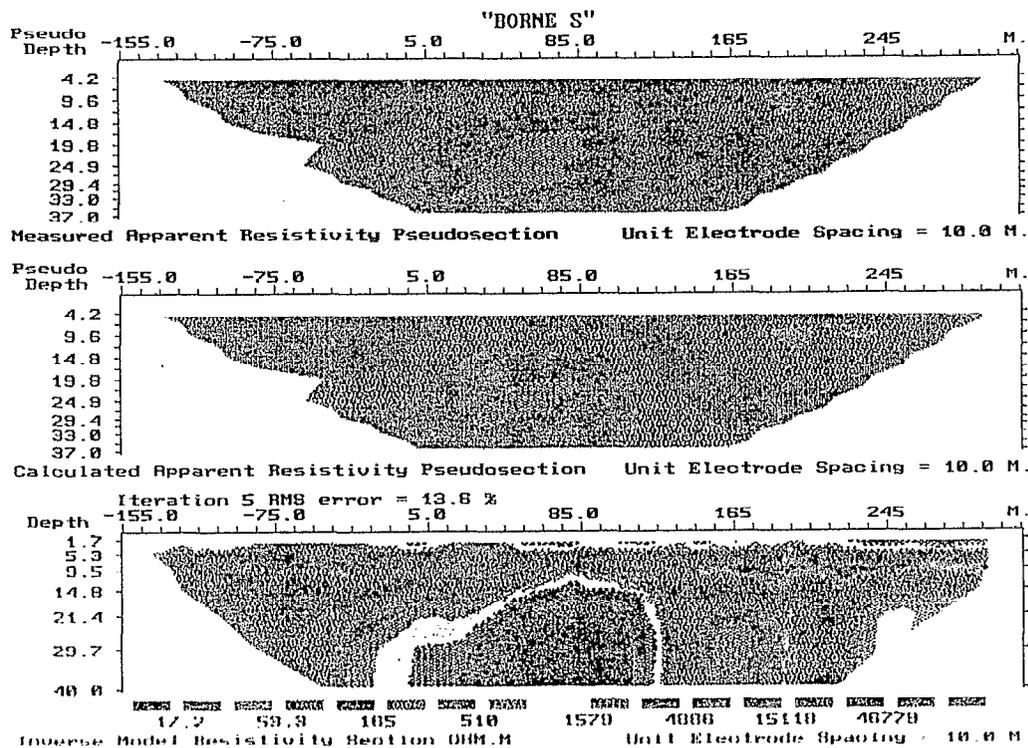
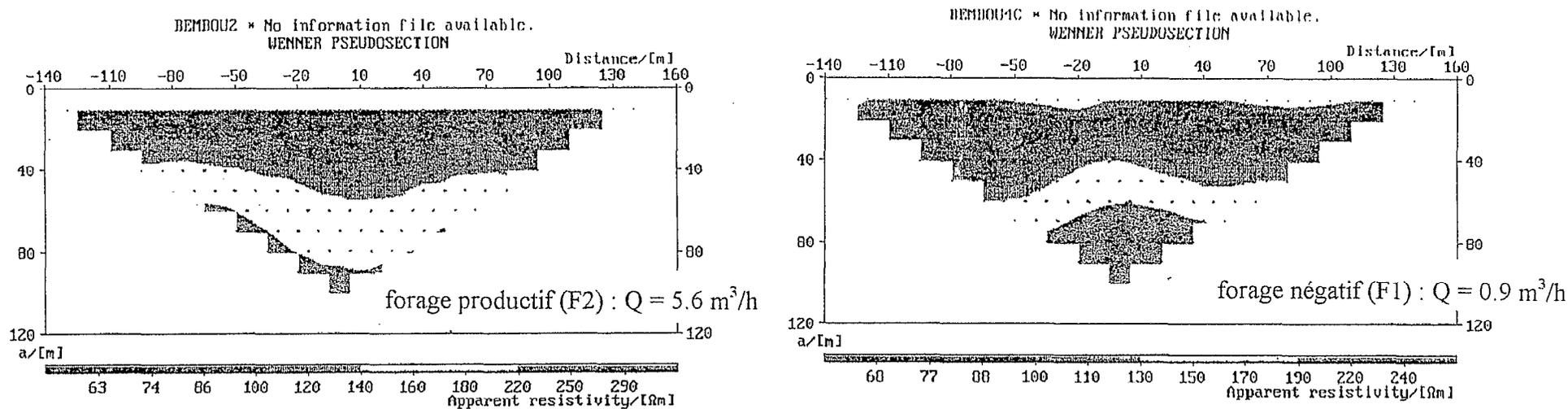


Fig. 27: Profil multi-électrodes

Schlumberger à « Borne »

La modélisation fait apparaître un enfoncement du toit des niveaux aquifères (50 à 369 ohm.m) à l'abscisse 5 m encadrés par deux secteurs de fortes résistivités (998 à 2695 ohm.m) correspondant à la roche saine non fissurée. Cet approfondissement traduit la présence d'une importante structure fracturée qui peut être due au noeud de failles ou au prolongement du filon intrusif de Kondokhon.

La comparaison des résultats de l'interprétation du *sondage électrique composite* obtenu au centre du profil multiélectrode (annexe I1) avec le log lithostratigraphique du forage hydraulique de Badioula donne :

Log du forage de Badioula	Sondage électrique composite à Badioula
0 à 3 mlatérite	0 à 4.5 m.....192 ohm.m
3 à 7 m.....argile latéritisée	4.5 à 7 m.....21 ohm.m
7 à 12 m.....arène granitique +/- argileuse	7 à 10 m8 ohm.m
12 à 14 m.....arène granuleuse, filon de quartz	10 à 15 m23 ohm.m
14 à 25.90 m.....granite altéré, filon qrtz et pégmaitite	15 à 21 m82 ohm.m
25.90 à 44 m.....gabbro dur, fracturation	21 à 32 m254 ohm.m
25.90 à 45 m..... gabbro sain, faible fissuration, dur	32 à 48 m755 ohm.m
	48 à l'infini.....2488 ohm.m

On observe ainsi une parfaite corrélation entre les résultats de la géophysique et les données du forage. L'électrique confirme et précise sur le terrain la présence de structures fracturées révélées par la télédétection. L'important débit observé au forage de Badioula s'explique par la présence de l'intrusion basique fracturée et par l'existence du noeud de failles qui sont autant de réseaux drainants réunissant plusieurs aquifères collecteurs.

D. - Secteur Borne

Un profil multiélectrode est réalisé perpendiculairement au linéament révélé par l'image satellite.

Ce linéament constitue le prolongement de l'une des deux structures de direction ENE-OSO encadrant la zone de végétation vivace de Faraba et qui correspond à une zone de cisaillement.

L'objectif de cette étude était d'abord d'identifier sur le terrain la fracturation associée au linéament déterminé sur les images satellites et ensuite confirmer le type de structure identifiée à ce linéament.

Le modèle géoélectrique (fig. 27) fait apparaître une structure compartimentée comparable à celle de Faraba. En effet ce modèle révèle un potentiel aquifère important autour de l'abscisse $x = 195$ et un second à $x = -55$.

Ce potentiel situé à l'abscisse 215 avec une largeur de 40 m environ correspondrait à la zone de cisaillement identifiée par l'image SPOT.

L'existence d'une structure très résistante à l'abscisse $x = 85$ n'exclue pas en profondeur la présence d'un filon doléritique.

L'interprétation des modèles multiélectrodes réalisés à Faraba et à Borne montre que les structures linéaires identifiées par l'image satellite dans ces deux localités sont du même type (anomalies géoélectriques très larges identifiées à des zones de cisaillement).

E. - Secteur de Bembou

Il est caractérisé par la présence de deux forages voisins (distants de 200 m environ) dont l'un productif ($5,6 \text{ m}^3/\text{h}$) et l'autre stérile ($0,9 \text{ m}^3/\text{h}$). Pour trouver une explication à cette variation de débit nous avons réalisé au voisinage de chacun des forages et suivant une direction Est-ouest un panneau multiélectrode.

Les sections multiélectrodes ainsi obtenus (fig. 28) révèlent malgré une même succession d'horizons géoélectriques une disposition structurale différente.

En effet, le forage productif profond de 49 mètres est implanté sur une structure en synclinae assimilable à un couloir dépressionnaire très favorable au drainage des eaux environnantes.

Par contre la non productivité du second ouvrage (62 mètres de profondeur) est attribuée à la présence d'une structure en dôme caractérisée par une remontée du substratum résistant (220 à 290 Ωm) comparable à une surface d'alimentation donc non favorable au captage.

La méthode multiélectrode met ainsi en exergue le caractère très discontinu des aquifères dans cette localité.

F. - Secteur Balakonko

Dans ce secteur un certain nombre de structures linéaires ont été reconnues comme des filons de diabase probables d'après l'image SPOT. Elles ont toutes une orientation E-W à ESE-WNW et se trouvent principalement au Nord du secteur de Saraya dans le domaine volcano-sédimentaire. Deux de ces filons sont repérés entre Missira Siramana et Balakonko. La prospection électrique réalisée dans ce secteur devrait confirmer ou infirmer sur le terrain l'existence de ces structures.

Il est connu que les filons de diabase, du type que l'on rencontre au Nord de Saraya peuvent représenter des collecteurs en eau utilisables.

Le traîné électrique ainsi réalisé a mis en évidence la présence de deux pics de résistivité (fig. 29).

Ces anomalies géoélectriques pourraient correspondre à la présence de deux filons. En effet les deux pics situés respectivement aux abscisses $x = 100$ et $x = 290$ m présentent l'aspect de structures filoniennes intrusives avec de part et d'autre des zones de faibles résistivités caractéristiques de zones de contact roches intrusives-roches encaissantes (schistes).

La réalisation d'un panneau multiélectrode, au milieu du pic du traîné situé à l'abscisse 100 m donne, malgré les difficultés rencontrées lors des mesures (points aberrants dus aux mauvais contacts de

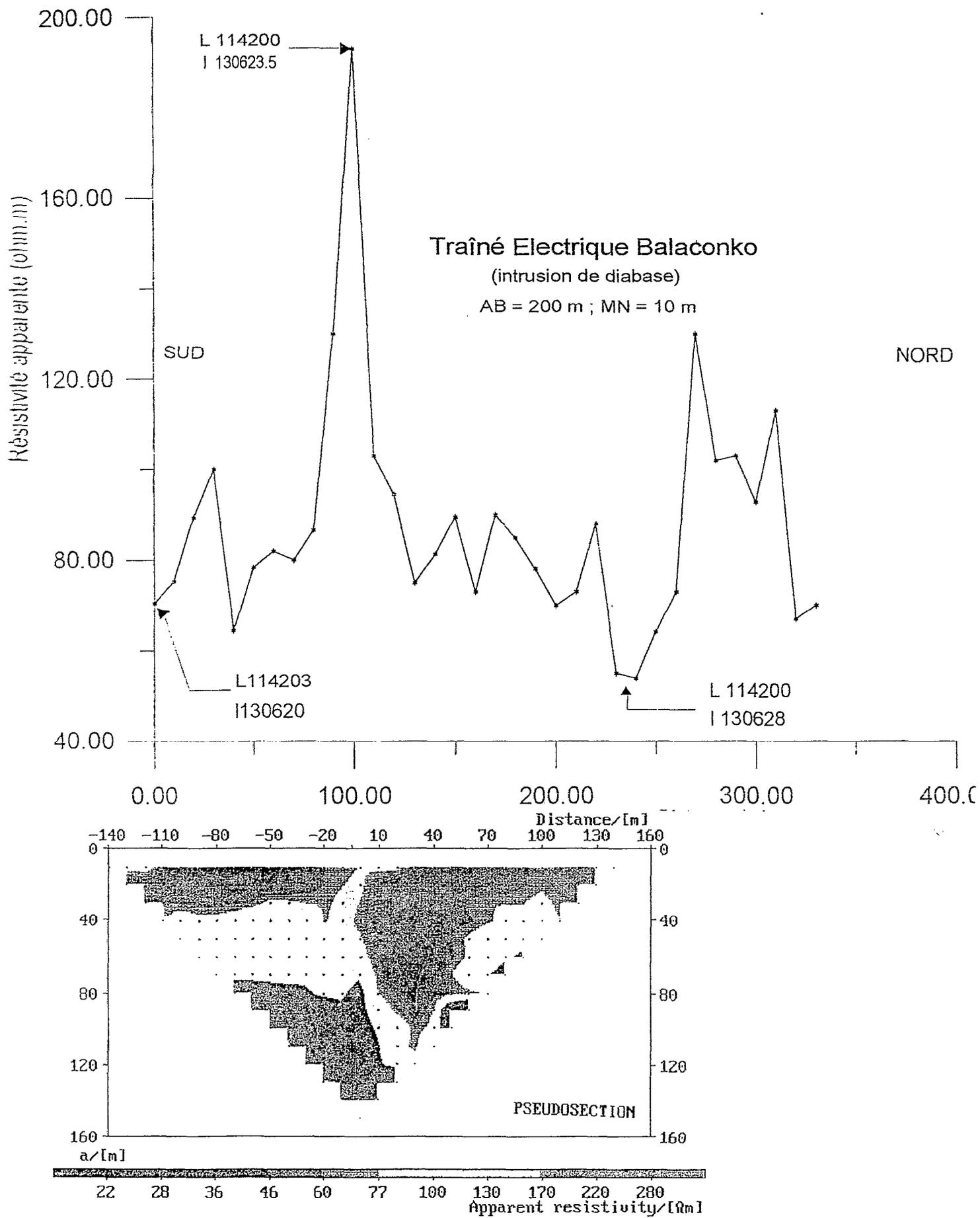


Fig. 29 : Trainé électrique et multi-électrodes pseudosection à Balaconko

électrodes), des résultats en corrélation avec le traîné électrique. En effet la pseudosection indique à son origine une zone de hautes résistivités apparentes (couleur jaune) avec de part et d'autre des zones de faibles résistivités.

Ce phénomène concorde bien avec la présence d'un filon résistant (non fracturé) dans un encaissement schisteux très fracturé.

La tentative de modélisation de la pseudosection n'aboutit pas à un modèle interprétation à cause de l'existence de nombreux points aberrants.

Les résultats des différentes méthodes d'investigations électriques vont nous permettre, en dehors de la matérialisation des linéaments et des zones de contact, de tirer plusieurs enseignements en fonction de la méthode d'investigation :

- Investigation latérale

Deux méthodes électriques ont été utilisées pour l'identification des structures conductrices à partir de la carte des linéaments : la méthode de traîné électrique et la méthode électrique multiélectrode.

Dans la première phase d'investigation latérale, la rapidité d'exécution et la facilité de mise en œuvre du traîné électrique nous conduisent à conseiller leur utilisation.

Cette phase détermine avec une bonne précision la position exacte des anomalies conductrices au niveau desquelles seront réalisés des profils multiélectrodes qui permettront d'obtenir en deux dimensions la configuration hydrogéologique des différentes structures conductrices et résistantes. Ces structures peuvent être présentées en pseudosection (c'est-à-dire les pseudo-profondeurs en fonction des résistivités apparentes) ce qui par modélisation permet de déterminer les profondeurs vraies en fonction des résistivités vraies.

Ces dispositifs d'investigation latérale constituent la base de l'identification des zones de broyage du socle (failles, contacts géologiques, zones de cisaillement, fractures) qui représentent en général des réservoirs préférentiels de stockage d'eaux souterraines. Dans la région de Saraya, failles et zones de cisaillement se distinguent nettement grâce aux profils de résistivités électriques sur lesquels elles se manifestent par des paliers bien distincts, correspondant à des structures en horst et graben.

Dans l'identification du contact géologique entre granites et schistes près des villages de Faraba et Baïtilaye, les profils électriques se sont montrés efficaces en faisant apparaître des variations latérales de résistivités moyennes correspondant à un changement latéral de faciès.

- Investigation en profondeur

L'investigation en profondeur a été réalisée dans l'ensemble de la région du socle et en particulier dans la zone de Saraya aux moyens de sondages électriques verticaux et de panneaux multiélectrodes. Les modèles d'interprétation obtenus à partir de ces méthodes ont permis de déterminer la succession des différentes formations en mettant en exergue les variations lithologiques en fonction des faciès. C'est ainsi qu'on note :

- la présence fréquente d'une cuirasse latéritique dans les zones de granites, et plus rarement en terrain schisteux ;
- la proportion d'argiles dans les altérites schisteuses est nettement supérieure à celle des altérites granitiques ;
- le toit du substratum sain est plus profond dans les schistes que dans les granites ; ce qui se traduit par des ouvrages de captage au niveau des schistes plus profonds que sur granites, 60 à 80 m et 40 à 50 m respectivement.

2.2.- Caractérisation lithologique des aquifères

L'analyse de l'allure des courbes de sondages électriques réalisés ainsi que leur mode d'interprétation, associés aux logs lithostratigraphiques des forages et aux mesures de niveaux piézométriques et de conductivité des eaux dans divers contextes géologiques, ont permis dans la plupart des cas de différencier les types d'aquifères en fonction des faciès géologiques et en fonction de leur profondeur.

En effet la loi d'Archie appliquée à ces aquifères permet de déterminer leur porosité en grand à partir de laquelle on distingue deux types d'aquifères : les aquifères profonds et les aquifères superficiels

$$\rho_r = a \frac{\rho_w}{\phi^m S^2}$$

S = saturation = 1

a = est un facteur proche de 1

$$\rho_r = \frac{\rho_w}{\phi^m}$$

ϕ = porosité

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

m = coefficient de distribution des vides:

- formations meubles d'altération : m = 1,3

- formations consolidées à porosité de fissuration : m = 2,35

- formations consolidées à porosité d'interstices : m = 1,9

$$\rho_w = \frac{1}{\sigma_w}$$

$$F = \rho_r \cdot \sigma_w$$

F = facteur de formation

ρ_r = résistivité de la roche

$$\phi_{\text{meubles d'altération}} = \left(\frac{1}{\rho_r \cdot \sigma_w} \right)^{\frac{1}{1.3}}$$

ρ_w = résistivité de l'eau d'imbibition

$$\phi_{\text{consolidé e. de fissuration}} = \left(\frac{1}{\rho_r \cdot \sigma_w} \right)^{\frac{1}{2.35}}$$

σ_w = conductivité de l'eau d'imbibition

$$\phi_{\text{consolidé e. d'interticien}} = \left(\frac{1}{\rho_r \cdot \sigma_w} \right)^{\frac{1}{1.9}}$$

Lorsque $F < 2,5$, ceci note la présence d'argiles dans la formation aquifère.

L'analyse des résultats obtenus (tab. 7) permet de dire que nous sommes en présence de nappes à eau douce.

Tab. 7 : Porosités totales des aquifères à partir de la loi d'Archie

Localités	Profondeur (m)	Niveau stat/sol (m)	σ_w (S/m)	ρ_r (ohm.m)	$F = \rho_r \cdot \sigma_w$	m	$\phi = \left[\frac{1}{F} \right]^m$ (%)
Badioula (forage)	45,1	7,28	$33 \cdot 10^{-3}$	755	24,91	2,35	26
Badioula (puits)	9,53	7,25	$27 \cdot 10^{-3}$	82	2,2	1,3	54
Bembou (forage)	49,2	3	$22 \cdot 10^{-3}$	556	12,2	2,35	34
Baïtilaye (forage)	34,4	5,8	$33 \cdot 10^{-3}$	173	5,7	2,35	48
Faraba (forage)	40,1	6,2	$41 \cdot 10^{-3}$	501	20,5	2,35	28
Faraba (puits)	6,64	5,87	$33 \cdot 10^{-3}$	78	2,6	1,3	48
Dalafing (forage)	39,85	2,44	$33 \cdot 10^{-3}$	1611	53,2	2,35	18

En effet la conductivité des eaux de puits et forages est proche de celle du niveau guide de l'eau de consommation ($40 \cdot 10^{-3}$ S/m) recommandée par l'O.M.S. en 1994. De même les résistivités (ρ_r) de la roche (l'aquifère) qui se situent entre 78 et 1611 ohm.m montrent bien qu'on est en présence d'eau douce.

On note aussi que les aquifères captés par les puits présentent une porosité totale plus importante que celle des aquifères profonds captés par les forages. Ceci dénote de l'importance du taux d'argiles dans les altérites. Ainsi deux types de formations aquifères se confirment nettement dans ce contexte de socle cristallin : les aquifères profonds et les aquifères superficiels.

Parmi ces aquifères profonds, celui capté par le forage de Baïtilaye présente une porosité totale comparable à celle des aquifères captés par les puits. En effet les microsénites sont des faciès de bordure à la périphérie des massifs granitiques, contexte favorable à l'existence d'une fissuration et d'une fracturation intenses.

2.3. - Caractérisation hydrochimique du système aquifère-nappe phréatique en zone de socle cristallin et cristallophyllien

Dans cette partie du mémoire, nous traiterons de la qualité chimique des eaux de différentes nappes du massif de granite de Saraya dans un premier temps, ensuite de façon plus générale, nous essayerons d'établir pour l'ensemble de la zone de socle du Sénégal oriental un schéma globale sur les relations existant entre nature de la géochimie des aquifères et la chimie des eaux des nappes.

Les aquifères captés par les différents ouvrages échantillonnés peuvent être regroupés en deux groupes :

- 1 - aquifères des argiles latéritiques et du toit des altérites argileuses (cas des nappes captées par les puits villageois)
- 2 - aquifères de socle fissuré et fracturé (cas des nappes captées par les forages)

L'étude de la minéralisation des eaux phréatiques du massif de Saraya a été abordée en 1980 par A. Blot. Elle a porté sur 12 échantillons d'eaux de puits du village de Kondokho, au nord de Saraya. Nous allons étendre le domaine et compléter les données par des analyses physico-chimiques de 17 échantillons d'eau de puits villageois (P) et de forages (F) dans différents contextes géologiques (roches basiques, acides, schistes et syénites) (tab. 8).

2.3.1.- Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du batholite de Saraya et ses environs

A.- Les Paramètres physiques

1. La température

La température de l'eau est régie par le gradient géothermique qui est en moyenne de 3°C pour 100 m de profondeur de pénétration.

Des facteurs secondaires viennent ajouter leur action, comme les réactions physico-chimiques exothermiques (oxydation et réduction).

La température varie entre 28,7°C et 35,8°

En zone de granite, en moyenne, les températures mesurées au niveau des puits et forages suivent la loi du gradient géothermique.

La température de l'eau est plus élevée dans les forages en milieu schisteux avec une moyenne de 34,4°C.

Tab. 8 : Composition chimique des eaux de 17 puits et forages du massif de Saraya et ses environs

(en mg/l).

Localité	Longitu	Latitud	Altitude (m)	Faciès	Niv stat (m/sol)	pH	Tempér atu (°C)	Condu (µs/cm)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	No ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	CO ₃ ²⁻	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Σanions	Σcations	B.I (%)	SiO ₂
Badioula (F) 1	1148.35	1249.58	186	granite	7.28	7.48	33.4	330	219.6	0.68	0.00	0.00	0.23	0	1.79	16.36	27.15	11.79	3.618	3.258	-5.2	83.08
Badioula (P) 2	1148.21	1249.62	186	granite	7.25	7.33	32	270	140.3	7.86	17.13	0.95	0.34	0	1.88	10.99	26.56	16.02	2.816	2.973	2.97	77.53
Baitilaye (F) 3	1140.72	1242.35	145	syénite	5.8	6.88	32	330	195.2	0.8	0.00	0.00	5.45	0	4.18	10.36	31.64	11.08	3.221	3.035	-3	42.97
Balakonko (F2) 4	1141.75	1308.50	133	schiste	19.3	7.78	33	310	213.5	1.1	0.00	2.00	0.58	0	1.24	13.5	31.33	16.82	3.572	3.436	-1.9	42.29
Balakonko (F1) 5	-	-	133	schiste	18.6	7.81	35.8	330	207.4	1.45	0.00	0.34	1.74	0	1.46	15.58	25.6	17.29	3.448	3.345	-1.5	12.41
Bembou (F) 6	1152.42	1249.77	142	granite	3	7.01	31.2	220	122	6.62	0.00	2.62	0.76	0	3.22	7.12	18.33	12.62	2.24	2.14	-2.3	92.12
Diakha Mad (F) 7	1139.70	1246.47	150	granite	9	7.68	31.4	280	319.64	1.03	0.00	4.53	0.46	0	1.21	15.23	75.35	9.69	5.362	5.463	0.9	63.85
Dalafing (F) 8	1141.30	1251.65	154	granite	2.44	7.29	31.2	330	207.4	2.83	0.00	0.00	2.25	0	1.45	13.08	18.65	25.25	3.479	3.142	-5.1	77.53
Faraba (P) 9	1141.92	1248.97	155	granite	5.87	7.17	31.9	330	97.6	37.55	54.73	5.53	0.15	0	8.37	13.44	25.15	16.25	3.656	3.28	-5.4	28.63
Faraba (F) 10	1141.38	1248.98	155	dolér qtz	6.2	7.58	32.2	410	204.96	0.46	0.00	0.25	0.63	0	6.6	15.66	23.85	16.04	3.377	3.344	-0.5	86.69
Fodé Bania (P) 11	1142.42	1247.10	157	granite	7.45	7.42	30.9	200	122	3.53	1	0.46	1.34	0	1.58	5.49	17.75	14.55	2.124	2.019	-2.5	90.22
Madankholé (P) 12	1146.27	1246.95	158	granite	7.5	7.13	29.4	180	87.84	4.57	11.48	0.03	0.34	0	6.38	3.01	7.47	15.8	1.755	1.565	-5.7	78.12
Madiérie (P) 13	1147.30	1247.57	159	granite	6.25	7.26	28.7	300	100.04	35.48	24.77	6.18	0.47	0	7.35	10.76	19.55	21.85	2.896	2.993	1.6	82.08
Sissira Siram (F) 14	1142.00	1205.00	144	dolérite	20.5	7.71	31.7	600	378.2	0.73	0.00	1.91	0.93	0	2.23	15.36	80.01	9.40	6.261	5.745	-4.3	64.46
Sanéla (F) 15	1143.95	1245.16	145	grnrite	5.5	7.26	30.6	140	85.4	0.54	0.00	0.03	0.00	0	2.26	3.33	13.74	11.73	1.414	1.533	4	76.95
Sanéla (P) 16	1143.90	1245.14	145	granite	7.85	7.5	29	360	195.20	10.46	17.59	1.77	0.50	0	5.00	9.64	38.16	18.10	3.814	3.612	-2.7	71.73
Saraya (F) 17	1145.05	1250.12	186	grès mic	7.15	7.54	32.8	328	250.10	27.72	1.25	9.17	0.97	0	1.31	23.4	45.16	35.5	5.092	5.753	6.1	58.05
Valeurs guides O.M.S 1994						6.5 à 8	-	400	≥ 30	200	50	250	1.5	-	12	50	100	200			+/-6.0	-

2. Le pH

Dans l'ensemble, les pH mesurés sont dans l'intervalle de normes de potabilité d'eau de boisson selon les valeurs guides de l'O.M.S. ($6,5 < \text{pH} < 8$) (O.M.S., 1994).

Les pH des eaux en aquifères schisteux et doléritiques sont plus élevés par rapport aux aquifères des granites et grès micacés.

La basicité observée dans l'ensemble des eaux peut s'expliquer par la période d'échantillonnage des eaux qui a coïncidé avec le début de la saison des pluies. En effet en hivernage, le pH des nappes augmente à cause de l'apport d'eau de pluie car l'eau de surface étant plus basique.

Les teneurs en HCO_3^- expliquent ces valeurs relativement élevées du pH.

3. La conductivité électrique

La conductivité varie entre 140 et 600 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

En tenant compte des valeurs guides de l'O.M.S. sur la potabilité des eaux de boisson (400 $\mu\text{s}/\text{cm}$), nous constatons que les eaux des forages de Faraba et Missira Siramana ont des conductivités supérieures à la valeur guide avec respectivement 410 et 600 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Ces conductivités élevées correspondent toutes à des nappes en aquifère doléritique.

Le calcul des moyennes montre que les eaux en aquifère granitique ont les conductivités électriques les moins élevées.

Ces observations sur la conductivité sont confirmées par les moyennes sur la minéralisation totale. En effet il y a une relation linéaire entre Σ ions et conductivité

Les eaux du forage manuel du village de Saraya implanté sur des grès micacés enregistrent la minéralisation totale la plus importante. Ce constat n'est pas en contradiction avec les affirmations de Alain. Blot qui disait en 1970 qu'«au Sénégal oriental, seul peut être, l'eau du puits de Saraya semble s'apparenter aux eaux saumâtres de fin de saison sèche».

B.- Concentrations des principaux ions

1. La balance ionique

La Balance ionique B se définit :

$$B = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100$$

Les teneurs des Σ cations et Σ anions sont exprimées en meq/l

Selon les recommandations de l'O.M.S., une analyse est bonne si $-6 \leq B \leq +6$.

Cette condition est rencontrée dans tous les échantillons d'eau (cf. tab. 8). Mais sur 12 échantillons on obtient des balances négatives. Ceci ne permet pas de dire qu'on a trop d'anions et peu de cations.

Ce déséquilibre en faveur des anions, peut s'expliquer par le fait que des cations autres que ceux classiquement dosés jusque là, pourraient avoir des concentrations assez fortes (Al^{3+} par exemple) dans les eaux analysées.

2. Caractères généraux

Les eaux souterraines du massif de Saraya sont faiblement minéralisées à l'exception des teneurs en SiO_2 très élevées et des teneurs notables en bicarbonates. La comparaison avec les eaux souterraines des séries sédimentaires (tab. 9) confirme cette affirmation. La différence est nette pour sodium, sulfate, chlore et bicarbonate.

Dans ces eaux du socle, le calcium est le cation dominant.

Tab. 9 : Comparaison de la composition moyenne (mg/l) des eaux souterraines du massif de Saraya et ses environs avec celles des séries sédimentaires.

Types de Nappes aquifères	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na+	K+	Minéralisation totale
Granite (F)	2.67	1.32	158.6	0.00	19.47	9.97	15.35	2.18	209.71
altérites granite (P)	16.58	2.49	123.83	21.12	22.44	8.88	17.09	5.09	218.04
Dolérites (F)	0.59	1.08	291.58	0.00	51.93	15.5	12.72	4.42	378.5
Schistes (F)	1.28	1.17	210.45	0.00	28.46	14.54	17.05	1.35	275.48
Syérites (F)	0.92	2.27	257.42	0.00	53.49	12.97	10.38	2.69	342.93
Grès nicacés, qrtztes (F)	27.72	9.17	250	1.25	45.16	23.4	35.5	45.16	394.58
Touba (F2) maastricht (Mars 76)	567.72	64.4	372.2	0.00	14	10.5	487	19.8	1535.3
Pout S6 (F) maastricht (Mai 71)	16.3	5.8	317.3	trace	94.8	6.2	10.8	2.3	453.5
Samécouta peul (F14) oligo-miocène (Avril 86)	5.7	-	189.2	<2	50.7	2.2	12.4	-	262.2
Beer Tialane (F) calcaires paléocène (Février 96)	6.2	31.7	366.2	3	68.5	16.8	79.8	0.8	573

La comparaison de la composition chimique des eaux de puits de forages dans le même contexte géologique du socle révèle une dispersion dans les résultats. Les causes de cette dispersion sont à chercher dans la complexité des intrications lithologiques définissant des aquifères discontinus.

Cette complexité est augmentée par la juxtaposition des différentes espèces d'altération décrites dans la région.

Les eaux analysées dans le cadre de cette présente étude sont potables. Ceci reste vrai vis-à-vis des valeurs guides établies par l'O.M.S. sauf pour quelques données exceptionnelles :

- les eaux des forages de Faraba et Missira Siramana ont des conductivités (600 $\mu\text{s/cm}$) supérieures à la valeur guide (400 $\mu\text{s/cm}$) ;

- la valeur guide pour le fluorure étant de 1.5 mg/l, ce taux est largement dépassé dans le forage de Baïtilaye (5.45 mg/l) et dans une moindre mesure à Dalafing (2.25 mg/l) et à Balakonko F₁ (1.74 mg/l) ;

- les eaux du puits de Faraba présentent une concentration en nitrate (54.73 mg/l) légèrement supérieure à la valeur guide (V.G.) qui est 50 mg/l. En effet selon les recommandations de l'O.M.S. le rapport concentration de l'élément sur sa valeur guide, doit être inférieur ou égal à l'unité :

$$\frac{[C]}{VG} \leq 1$$

C.- Influence de la nature de l'aquifère sur la composition chimique des eaux souterraines

1. Composition des eaux en aquifère de roches granitiques et en aquifère d'altérites granitiques

Les prélèvements ont été effectués en début de saison des pluies. Ainsi le niveau piézométrique de la nappe a subi une légère remontée ; ce qui a permis à certains puits, secs en saison sèche d'être inondés.

L'analyse des résultats (tab. 10) montre que l'eau des altérites (captée par les puits) est plus riche en Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} et en NO_3^- que l'eau de la roche fissurée (captée par les forages).

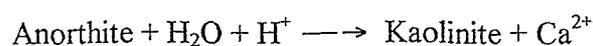
La qualité de l'eau dépend donc de la composition chimique et minéralogique des aquifères, et en particulier des minéraux primaires susceptibles de s'altérer. Les teneurs en éléments dissous dans les eaux de nappes résultent d'un équilibre entre les solutions et le milieu solide.

En effet, la géochimie des eaux de puits est à la fois fonction de la composition chimique des silicates primaires et des altérites. Tandis que celle de l'eau des forages, plus en profondeur, dépend en grande partie de la mobilité des éléments des minéraux primaires.

La diminution de la teneur des altérites en Na_2O , K_2O et CaO contribue ainsi à la minéralisation des nappes phréatiques en les *enrichissant en ions Na^+ , K^+ et Ca^{2+}* .

Lors de l'altération des granites, on observe une diminution de la teneur en Na_2O et CaO (tab. 5).

La composition chimique des granites montre que la formation des minéraux secondaires hydroxydés s'accompagne avec la libération des ions Na^+ , Ca^{2+} et K^+ contribuant ainsi à la minéralisation de la nappe :



Tab. 9 : Aquifères du massif de Saraya. Composition moyenne en % des éléments majeurs d'après le

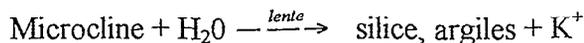
faciès pétrographique et le niveau du profil d'altération

Kondokho Teneur m en (%)	Roche		Altérite de		Niveau ferrugineux		Sol	
	Granite	Dolérite	Granite	Dolérite	Granite	Dolérite	Granite	Dolérite
SiO ₂	74.05	51.72	73.05	52.15	58.83	40.24	85.8	58
Na ₂ O	40.6	2.93	2.80	2.00	0.07	0.1	0.15	0.15
K ₂ O	4.45	2.15	4.51	11.93	0.74	0.63	1.3	1.48
CaO	0.42	16.85	0.32	2.60	trace	0.2	0.03	0.06
MgO	0.21	4.40	0.26	2.22	0.18	0.17	0.13	0.06
Fe ₂ O ₃	0.88	12.57	1.41	11.38	21.97	34.95	3.3	4
Al ₂ O ₃	14.62	14.37	14.89	16.35	10.56	12.91	6.1	5.6
H ₂ O (PF)	1.06	2.24	2.39	9.05	6.84	9.36	2.75	2.78

Tab. 10 : Composition moyenne des eaux du massif de Saraya et ses environs (en mg/l) d'après le

faciès Pétrographique et le niveau du profil d'altération

Secteur Saraya Teneur m en (mg/l)	Granite / Forage / Puits / Dolérite	Schiste / Syénite	Grès micacés quartzites
SiO ₂	$\frac{82.42}{71.38} / 75.56$	27.35 / 53.41	58.05
Na ⁺	$\frac{15.35}{17.09} / 12.72$	17.05 / 10.38	35.5
K ⁺	$\frac{2.18}{5.09} / 4.42$	1.35 / 2.69	1.31
Ca ²⁺	$\frac{19.47}{22.44} / 51.93$	28.46 / 53.49	45.16
Mg ²⁺	$\frac{9.97}{8.88} / 15.51$	14.54 / 12.97	23.4
CO ₃ H ⁻	$\frac{158.6}{123.83} / 291.58$	210.45 / 257.42	250
Cl ⁻	$\frac{2.67}{16.58} / 0.59$	1.28 / 0.92	27.72
SO ₄ ²⁻	$\frac{1.32}{2.48} / 1.08$	1.17 / 2.27	9.17
NO ₃ ⁻	$\frac{0.00}{21.12} / 0.00$	0.00 / 0.00	1.25
F ⁻	$\frac{0.81}{0.52} / 0.78$	1.16 / 2.96	0.97
pH	$\frac{7.26}{7.36} / 7.65$	7.79 / 7.28	7.54
Conductivité (µs/cm)	$\frac{255}{273} / 505$	320 / 305	328
Température (°C)	$\frac{31.6}{30.32} / 31.95$	34.4 / 31.7	32.8
minéralisation Totale (mg/l)	$\frac{209.71}{218.04} / 378.5$	275.48 / 342.93	394.58



Ces trois cations occupent une bonne place dans l'échelle de mobilité des éléments définie par Blot en 1970 :

Echelle décroissante de mobilité des éléments :

Na - Ca - Mg - K - Si - Mn - Ti - Fe - Al

Les éléments les plus mobiles sont les éléments qui sont mineurs dans les roches et majeurs dans les eaux.

La mobilité est définie par le rapport établi entre une quantité de chaque élément dans un volume d'eau par rapport à la quantité de cet élément contenu dans un même volume de roche. Il s'agit en réalité d'un rapport de concentration.

* En dehors de ces trois éléments (Na^+ , Ca^{2+} et K^+), on constate que les *teneurs en chlorures* sont beaucoup plus élevées dans l'eau des puits ; qui s'explique par les entraves de la circulation de l'eau dans les altérites argileuses (Savadogo, 1984 ; in Coussoubé, 1996).

Kuroda et Sandell (1953) in Hem, 1989, suggèrent que des chlorures peuvent remplacer des hydroxydes dans la formule chimique de la biotite ou de l'hornblende.

* L'augmentation des *teneurs en NO_3^-* des eaux de puits a pour origine les réactions d'oxydoréduction de matières organiques liées aux activités humaines ou à la production animale ou végétale.

En effet, le long séjour des déjections animales aux abords des points d'eau contribue à la « pollution » des nappes en nitrate. Les forages n'échappent pas souvent à ce phénomène, car les fissures et fractures associées à ces aquifères assureraient le transit souterrain des nitrates par lessivage jusqu'à contaminer la nappe.

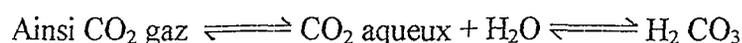
C'est probablement le cas du forage à pompe manuelle de Saraya (70 m de profondeur) en aquifère de grès micacés.

* *Le bicarbonate*, dominant dans ces nappes du socle est plus présent dans l'eau de la roche par comparaison à l'eau des altérites granitiques captée par les puits.

Les carbonates peuvent provenir de l'atmosphère (gaz carbonique, méthane), des réactions chimiques avec la matière organique, ou bien peut avoir une origine profonde.

Pour les eaux souterraines l'échange eau-atmosphère est lent par rapport aux échanges plantes-atmosphères.

Dans les milieux ouverts, selon la loi de Henry $[\text{H}_2\text{CO}_3] = \alpha p \text{CO}_2 = C^{\text{ste}}$



$$\alpha = \frac{[H_2CO_3]}{PCO_2} = 10^{-1.46} \text{ à } 25^\circ \text{ et } 1 \text{ atm}$$

Pour les milieux fermés, cas des nappes captives, c'est la somme du carbone qui est constante :

$$[H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] = \Sigma CO_2 = \text{constante.}$$

Ces milieux « fermés » sont en général utilisés pour la datation des eaux.

* *Les sulfates d'origine atmosphérique* sont généralement peu importants, mais quelques espèces de minéraux accessoires peuvent fournir de grandes quantités de cet élément (Hem, 1989).

Mais lors de l'altération, les actions biologiques peuvent aussi intervenir mécaniquement (racines de végétaux) en engendrant surtout des produits chimiques (composés humiques, ammoniacaux, CO_2 , HNO_3 , PO_4 et SO_4). Ceci expliquerait surtout la teneur plus élevée des sulfates dans l'eau des puits.

* *La teneur en Mg^{2+}* est légèrement plus élevée dans l'eau de la roche. En effet, en milieu granitique, la teneur de l'élément MgO augmente très faiblement de la roche aux altérites ; ce qui se traduirait par une remobilisation des ions Mg^{2+} de l'eau. Cation divalent, le magnésium est de taille plus petite que le calcium donc se loge dans des minéraux là où le Ca^{2+} ne peut pas.

* *La silice diminue* sensiblement dans l'eau des altérites.

L'ensemble de la silice (silice des silicates primaires, secondaires et du quartz) est en diminution faible dans les altérites.

Cette diminution n'implique pourtant pas une augmentation de la silice dans l'eau des altérites par rapport à la roche.

Il s'agit d'un bilan entre la destruction de silicates et la formation de nouveaux silicates en présence de quartz relativement stable.

Ainsi, la formation des silicates secondaires ne recycle qu'une partie de la silice provenant de la destruction des minéraux silicatés primaires, et qu'une autre partie est exportée en solution avec principalement du calcium et du sodium.

Ces éléments de comparaison entre les compositions chimiques des différentes eaux du profil d'altération, montrent schématiquement que les nappes reflètent les transformations au sein des profils drainés.

2.- Comparaison de la chimie des eaux des aquifères de roches granitiques et doléritiques

La gamme des compositions enregistrées fait apparaître des affinités ou des contrastes d'un forage à un autre. En premier lieu on observe que la minéralisation des eaux d'aquifère de roche basique est plus

forte en général, que celle des eaux d'aquifères de granites. Ceci est particulièrement net, ainsi qu'on peut le voir sur le tableau 10 pour les teneurs en bicarbonates, en calcium, en magnésium et en potassium. Par contre les eaux d'aquifères de granites sont elles plus riches en chlorures.

On a pu distinguer ainsi une nappe basique d'une nappe granitique sauf en ce qui concerne la silice et le sodium où la différence n'est pas significative. Donc il ressort clairement que la composition des eaux souterraines est fonction de la nature des roches aquifères.

En effet, granite et dolérite présentent des différences significatives dans leurs compositions chimiques et minéralogiques ; Les dolérites, en plus, du quartz, de la microcline et du plagioclase également présents dans les granites, contiennent 42% d'amphiboles et pyroxènes et 2% d'ilménite.

Minéraux inosilicatés, les amphiboles et pyroxènes sont des minéraux ferromagnésiens et calciques.

Ainsi les eaux plus riches en Ca^{2+} , Mg^{2+} correspondent à des aquifères riches en ces éléments donc aux formations basiques.

Cependant les relations entre la géochimie des eaux et la géochimie des roches aquifères sont tenues car on ne retrouve que partiellement les éléments des roches dans l'eau.

Au niveau de l'indication portée par la composition des eaux, il apparaît en dehors du bicarbonate que ce sont le magnésium et le calcium qui sont les éléments traduisant le mieux l'hydrolyse des minéraux tels que les minéraux ferromagnésiens.

3. Comparaison de la chimie des eaux des aquifères granitiques et schisteux ou syénitiques

Dans les eaux en aquifères schisteux et syénites on observe par rapport au granite :

- une diminution sensible des teneurs en silice et dans une moindre mesure en chlorures ;
- une augmentation significative en calcium, bicarbonate et magnésium.

L'analyse de la composition minéralogique des schistes et des syénites du massif de Saraya et ses environs (Bois, 1962) montre que ces faciés sont formés essentiellement par des minéraux ferromagnésiens et calciques ou sodo-potassiques, *pauvres en quartz* :

* *Schistes* :

- oligoclase qui contient 30 à 50 d'anorthite ($2 \text{SiO}_2 \text{Al}_2 \text{O}_3 \text{CaO}$)
- muscovité, ($\text{Si}_6 \text{Al}_2 \text{O}_{20}$) $\text{Al}_4 (\text{OH})_4 \text{K}_2$
- biotite, ($\text{Si}_6 \text{Al}_2 \text{O}_{20}$) $\text{Mg}_6 (\text{OH})_4 \text{K}_2$
- pyroxène (augite) ($\text{Si}_6 \text{Al} \text{O}_6$) $\text{Ca} (\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})$
- hornblende ($\text{Si}_8 \text{O}_{22}$) $\text{Ca}_2 (\text{Fe}, \text{Mg})_4 \text{Al} (\text{OH})_2 \text{Na}$
- quartz (SiO_2)

* Syénites :

- microcline $6 \text{ SiO}_2 \text{ Al}_2 \text{ O}_3 \cdot \text{K}_{20}$
- albite $6 \text{ SiO}_2 \text{ A}_2 \text{ O}_3 \text{ Na}_2\text{O}$
- pyroxène $(\text{Si Al O}_6) \text{ Ca} (\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})$
- hornblende $(\text{Si}_8 \text{ O}_{22}) \text{ Ca}_2 (\text{Fe}, \text{Mg})_4 \text{ Al} (\text{OH})_2 \text{ Na}$
- quartz (SiO_2)

Ces schistes et syénites, sont formés essentiellement d'alcalino-terreux et d'alcalins (Bois, 1962) qui occupent un rang important sur l'échelle de mobilité des éléments chimiques.

Mais l'observation des résultats de l'analyse des eaux du secteur (cf. tab 8), fait dégager des remarques importantes concernant la minéralisation des eaux dans les forages de Baïtilaye et de Diakhr Madina respectivement en aquifères de syénites avec des niveaux de marbres et en aquifère de granites

En effet, la présence des marbres a sensiblement augmenté les teneurs en bicarbonates, sulfates, magnésium, calcium et en silice.

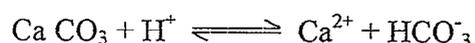
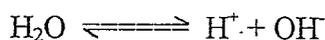
Ce marbre issu de la dédolomitisation contient des minéraux de métamorphisme magnésiens conformément aux réactions (Jung, 1977) :



Avec l'intensification du métamorphisme apparaissent les minéraux :

- le diopside, pyroxène ferromagnésien et calcique : $(\text{Si}_2 \text{ O}_6) \text{ Ca Mg}$
- la forestérite qui est un péridot : $(\text{SiO}_4) \text{ Mg}_2$
- la hornblende $(\text{Si}_6 \text{ Al}_2 \text{ O}_{22}) \text{ Ca}_2 (\text{Fe}, \text{Mg})_4 \text{ Al} (\text{OH})_2 \text{ Na}$
- le grossulaire, grena calcique $(\text{SiO}_4)_4 \text{ Ca}_3 \text{ Al}_2$
- l'anorthite, feldspath plagioclase $(\text{Si}_2 \text{ Al}_2 \text{ O}_8) \text{ Ca}$.

Le carbonate de calcium issu de la dédolomitisation peut réagir ainsi avec l'eau, contribuant à enrichir la nappe en bicarbonate et en calcium par les réactions :



4. Cas de l'aquifère des grès micacés et quartzites de Saraya

La minéralisation totale est plus élevée dans ces eaux. Les teneurs en sodium, en magnésium, chlorures et en sulfates sont aussi plus importantes. L'analyse des données du tableau 11 montre que les grès du forage manuel de Saraya ont une porosité et une perméabilité en général beaucoup plus élevées que celles des aquifères des granites, dolérites et des schistes.

La coupe géologique de ce forage montre de bas en haut la succession suivante :

- 0 - 4 m : graviers latéritiques
 - 4 - 12 m : grès rose
 - 12 - 28 : grès et mica rose
 - 28 - 30 : grès rose quartzite très dur
 - 30 - 70 : grès quartzites très dur
- Niveau statique 7,75 m. Venues d'eau enregistrées à 27 m.

Tab. 11 Valeurs empiriques des résistivités sur diverses roches consolidées
(Meyer De Stadelhofen, 1991)

Roches	Porosité en %	Perméabilité en cm/s	Résistivité en ohm.m
Argilite	35	10^{-8} - 10^{-9}	70 à 200
Craie	35	10^{-5}	30 à 300
Tuff volcanique	32	10^{-5}	20 à 300
Marnes	27	10^{-7} - 10^{-9}	20 à 200
Grès	3 à 35	10^{-3} - 10^{-6}	50 à 800
Dolomite	1 à 12	10^{-5} - 10^{-7}	200 à 10 000
Calcaires	3	10^{-10} - 10^{-12}	2000 à 10 000
Métaschistes	2,5	10^{-4} - 10^{-9}	300 à 800
Gneïss	1,5	10^{-8}	1000 à 20 000
Quartzite	<1	10^{-10}	1000 à 10 000
Granite	1	10^{-9} - 10^{-10}	1000 à 15 000
Gabbro	1 à 3	10^{-4} - 10^{-9}	6000 à 10 000
Basalte	1,5	10^{-6} - 10^{-8}	800 à 15 000

Cette perméabilité significative et l'absence d'argiles entre la nappe et la surface pourraient être à l'origine de la « pollution » de cette nappe par les nitrates. Ceci semble être confirmé par le fait exceptionnel que parmi tous les forages, seul celui de Saraya enregistre la présence de nitrates dans les eaux.

Ces grès sont constitués essentiellement par :

- quartz SiO_2
- muscovite $(\text{Si}_6 \text{Al}_2 \text{O}_{20}) \text{Al}_4 (\text{OH})_4 \text{K}_2$
- albite $(\text{Si}_3 \text{AlO}_8) \text{Na}$
- oligoclase qui contient 30 à 50% d'anorthite $(2 \text{Si}_6 \text{O}_2 \text{Al}_2 \text{O}_3)$.

La muscovite secondaire de Saraya issue d'une forte altération deutérique de la biotite est riche en sodium (N'Diaye et al., 1997).

L'augmentation de la teneur des éléments chimiques dans la nappe fait suite aux phénomènes mécaniques à caractère surtout physique qui ont pour effet de disjoindre tout d'abord les blocs rocheux les uns des autres en augmentant l'importance des diaclases (désagrégation en boules) et de désagréger la roche elle-même en séparant les cristaux (désagrégation granulaire). Interviennent ici les actions mécaniques qu'engendrent les écarts de température (thermoclastie) ainsi que l'action combinée de la pénétration des eaux.

Les actions biologiques interviennent aussi mécaniquement (racines des végétaux) mais elles engendrent surtout des produits chimiques actifs tels que composés humiques ; ammoniacale, CO_2 , HNO_3 , (PO_4) et SO_4). L'hydrolyse ou décomposition des sels minéraux par l'eau est alors le mécanisme fondamental de l'altération des silicates considérés.

L'ordre décroissant de mobilité des éléments est le suivant : d'abord Na, Ca, Mg, puis K, ensuite Si, Fe et enfin Al (Aubouin et al., 1975).

L'hydrolyse des sels minéraux se traduit ainsi par la mobilisation dans l'eau des éléments avec augmentation importante des ions Ca^{2+} , Na^+ et Mg^{2+} .

D.- Les faciès hydrochimiques

Les éléments dominants dans les eaux des nappes du secteur de Saraya et ses environs sont les bicarbonates et calcium.

Ainsi deux faciès hydrochimiques peuvent être distingués.

Nous en présenterons les caractéristiques principales à l'aide du diagramme de Piper (fig. 30 et fig. 31) (les numéros de 1 à 17 représentent les villages où ont été effectués les échantillonnages d'eau (cf. tab. 8).

1. Eaux bicarbonatées calciques

Les faciès bicarbonatés calciques sont les plus représentés dans les eaux analysées provenant d'une part des nappes profondes ou de nappes superficielles. Sur les diagrammes de Piper, les anions et cations se groupent dans le secteur (II) caractéristique des eaux bicarbonatées et calciques.

Ces eaux montrent une diminution de la teneur en Na + K qui égale celle des ions Ca ou Mg.

Parfois ces derniers prédominent. Tous les échantillons d'eaux analysées sont bicarbonatés calciques à l'exception du numéro 12 représentant le puits de Madankholé qui est bicarbonaté sodique.

2. Eaux bicarbonatées sodiques

Ces eaux montrent une forte proportion de Na + K par rapport à celle du Ca. Le diagramme de Piper montre le regroupement des anions dans le secteur (IV), carbonaté et sodique.

Les eaux du puits de Madankholé sont caractéristiques de ce type de faciès hydrochimique.

Dans ces différents contextes géologiques, on peut définir plusieurs caractéristiques des nappes et plusieurs niveaux de relations entre la minéralisation des eaux et la géochimie des aquifères :

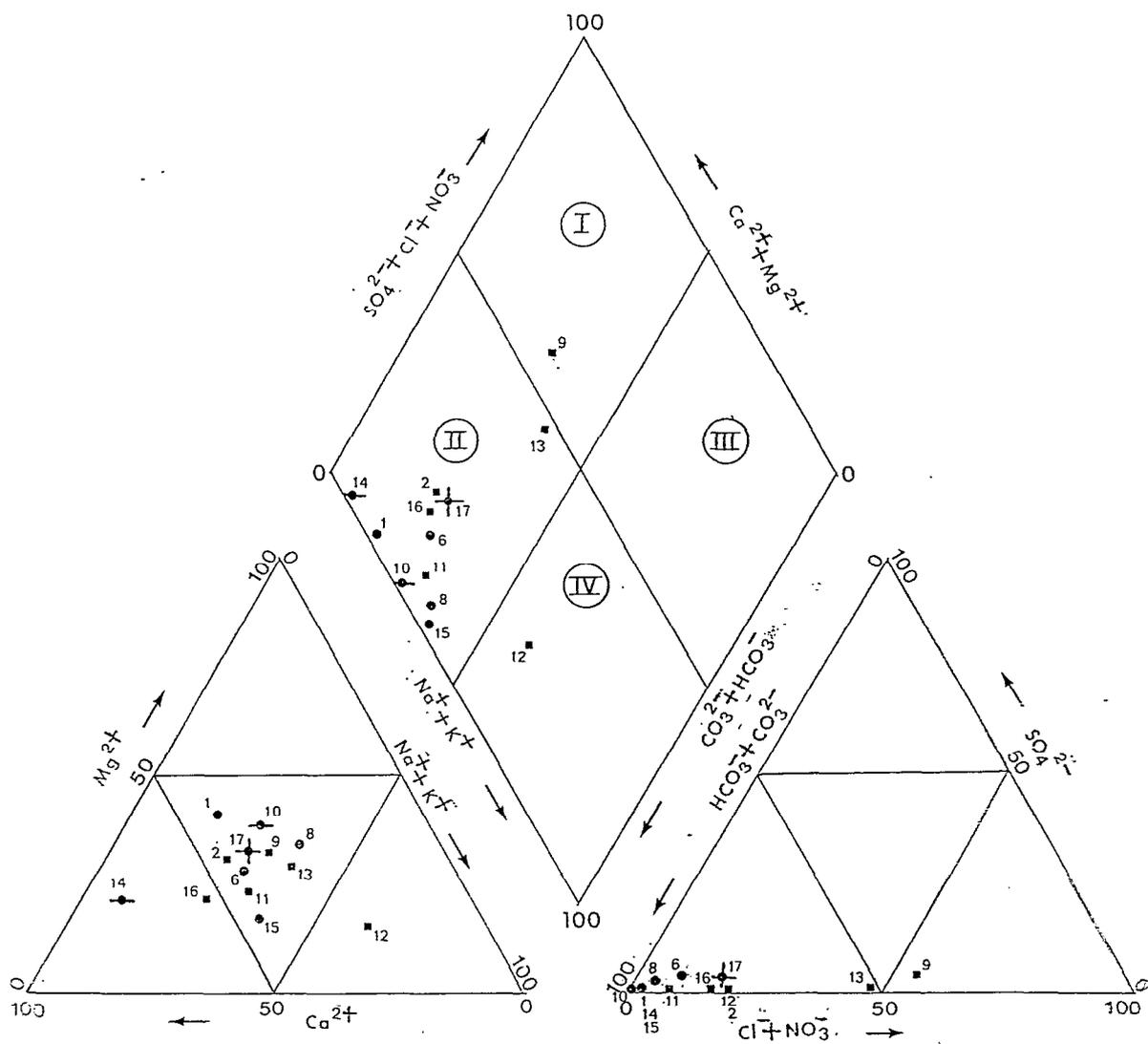


Figure 30: Diagramme de Piper des eaux des granites, dolerites et grès

1 numéro du village échantillonné

- Puits captant dans les altérites de granites
- forage captant dans les granites
- ▲ forage captant dans les dolerites
- ✦ forage captant dans les grès micacés

- I Eau chlorurée et sulfatée, calcique et magnésienne
- II Eau bicarbonatée calcique
- III Eau chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique
- IV Eau bicarbonatée sodique et potassique

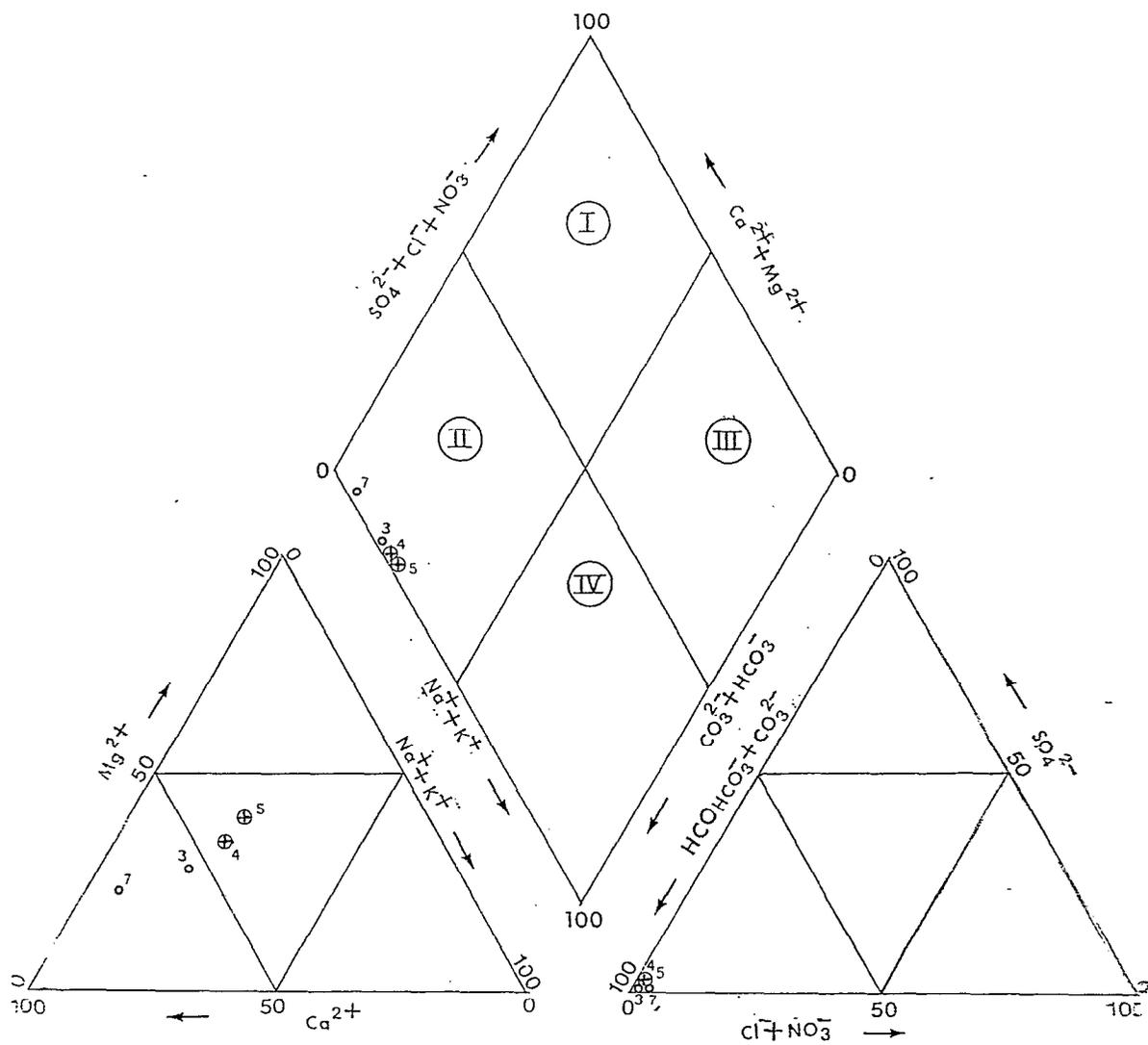


Figure.34: Diagramme de Piper des eaux des schistes et syénites

3 numéro du village échantillonné

- forage captant dans les syénites
- ⊕ forage captant dans les schistes

I Eau chlorurée et sulfatée, calcique et magnésienne

II Eau bicarbonatée calcique

III Eau chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique

IV Eau bicarbonatée sodique et potassique

* Les eaux du batholite de Saraya et ses environs sont faiblement minéralisées à l'exception de fortes teneurs en silice et bicarbonate. Elles présentent un déséquilibre de la balance ionique en faveur des anions,

* leur étude hydrochimique nous a permis d'identifier dans l'ensemble un seul faciès hydrochimique bicarbonaté calcique à l'exception des eaux du puits de Madankholé qui sont bicarbonatées sodiques,

* les eaux souterraines analysées sont potables. Néanmoins on note la présence de nitrates à faible teneur dans l'ensemble des puits. A l'exception du forage de Saraya, on note l'absence de nitrates dans les nappes profondes,

* globalement la composition des eaux dépend de la nature de l'aquifère :

- Dans le socle, les eaux les plus riches en Ca^{2+} et Mg^{2+} correspondent à des aquifères riches en ses éléments donc aux formations basiques, schisteuses et grès micacées tandis que les eaux riches en Cl⁻ correspondent aux aquifères des grès micacés et des granites.

- La teneur en chlorure est nettement plus importante dans les eaux des altérites des granites que dans celles de la roche.

- Les eaux des grès micacés présentent une minéralisation totale plus élevée avec des teneurs en sodium, sulfate très importantes.

- Les eaux des aquifères de roches granitiques sont aussi plus riches en silice que les roches basiques, grès micacés, syénites et schistes.

* Cependant les relations entre la minéralisation des eaux et la géochimie des roches aquifères sont ténues, car on retrouve que partiellement les éléments des roches dans l'eau. En effet, les éléments engagés dans les minéraux constitutifs des roches ne sont libérés qu'en fonction de leur mobilité et de l'altérabilité des minéraux ; une partie d'entre eux peut être précocement réintégrée dans de nouvelles structures cristallines.

Nous venons de montrer que la minéralisation des eaux des nappes est étroitement liée à la nature minéralogique et géochimique des aquifères. Donc l'interprétation de la composition chimique des eaux des nappes constitue une méthode valable d'identification et de caractérisation des aquifères de socle.

Conclusion

La méthode de recherche qui consiste à utiliser de façon intensive plusieurs techniques de prospection, l'électrique en particulier, s'est révélée efficace. L'électrique, qui en corrélation avec les autres méthodes identifie aisément les zones stériles où le complexe conducteur s'avère absent et les

niveaux aquifères de la frange fissurée, représente donc un outil valable en matière de recherche d'eau souterraine en zone de socle cristallin et cristallophyllien.

Mais pour donner des résultats valables, les études géophysiques devront s'appuyer sur une série de mesures systématiques. *Le contexte hydrogéologique pourra être défini et des contextes similaires pourront être ainsi comparés entre eux* ; ce qui nous amène dans un domaine d'application plus large qui est « la prospection géophysique et recherche d'eaux souterraines dans l'ensemble de la région du socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental ».

CHAPITRE 3 : LA PROSPECTION GEOPHYSIQUE ET LA RECHERCHE D'EAUX SOUTERRAINES DANS LA REGION DE SOCLE CRISTALLIN ET CRISTALLOPHYLLIEN DU SENEGAL ORIENTAL

Etagées du Birimien à l'Ordovicien, les formations du socle du Sénégal oriental sont lithologiquement et structurellement extrêmement complexes car les séries granitiques et métamorphiques du Birimien, quartzites de l'Infracambrien et sédimentaires (grès, calcaires) du Primaire s'imbriquent et sont recoupées par des complexes effusifs ou volcaniques (dolérites).

Sur le plan hydrogéologique cette complexité ajoutée à la compacité des roches du substratum font qu'il n'existe pas d'aquifères généralisés, mais un éventail d'aquifères juxtaposés, souvent en contact et ayant cependant bon nombre de caractéristiques communes. Ce sont tous des aquifères discontinus à semi-continus circulant dans les franges supérieures altérées des roches saines et/ou dans les réseaux de fractures et de fissures qui traversent la partie supérieure de la roche mère.

Leur perméabilité est donc étroitement liée d'une part à la nature des produits altérés eux-mêmes dépendant de la nature de la roche mère, d'autre part à la densité et à l'extension des réseaux de fissures qui affectent ces roches-mères ainsi qu'aux grands accidents régionaux qui les traversent.

Il y a une trentaine d'années l'alimentation en eau des villages ne se faisait qu'à partir des eaux superficielles ou au moyen de puits traditionnels, de puits peu profonds de gros diamètre et de puisards le plus souvent creusés dans les marigots. Seule la nappe contenue dans les arènes et les altérites argileuses du rocher était reconnue et exploitée (Bernardi et al., 1988).

L'importance hydrogéologique de la zone décomprimée et fracturée du socle a été reconnue plus tardivement. Cette dernière donne des ressources plus stables dans le temps et présente moins de risque de pollution (M. Bolognini et al., in Bernardi et al., 1988).

Dès 1983, les études effectuées au Sénégal oriental dans le cadre du programme C.E.A.O (Communauté Economique de l'Afrique de l'Ouest), d'hydraulique villageoise et pastorale, ont mis en évidence l'intérêt de la photo-géologie pour détecter les fractures majeures et la pertinence des investigations géophysiques pour la recherche des eaux souterraines dans le socle.

Depuis cette date, les études effectuées ont confirmé l'intérêt de ces techniques et les ont généralisées, définissant ainsi une méthodologie de la recherche d'eaux souterraines en zone de socle qui permettra d'orienter et d'optimiser les campagnes futures.

3.1.- Caractérisation géoélectrique des aquifères du socle par l'exploitation des différents types de courbes de sondages électriques

Les sondages électriques réalisés dans le cadre du projet « CAMPUS » ORSTOM en 1996 et des programmes PNUD, U.N.I.C.E.F et Ministère de l'Hydraulique de 1994 à 1998 ont permis de dégager de façon générale des familles de courbes correspondant à des successions identiques de couches des terrains aquifères ou non. Nous avons donc tenté une classification inspirée de celle réalisée par Koussoubé (1996) dans le bassin de Bidi (Burkina fasso), dans un même contexte géologique que le socle cristallin et cristallophylien que du Sénégal oriental (cf. fig. 17).

Ainsi cinq (5) types de courbes de sondages électriques verticaux peuvent ainsi être distingués :

a) *Courbes de sondages électriques en « fond de bateau »*

Ces courbes caractérisent les régions à cuirasse latéritique (ou carapace latéritique). Ce cas de figure est très répandu dans la zone où la couverture latéritique est généralisée. L'interprétation globale de ce type de courbe montre une structure à trois couches de terrain géoélectrique distinctes (fig. 32) :

- Le recouvrement superficiel : c'est la couche superficielle correspondant généralement à la cuirasse latéritique. Sa résistivité varie en fonction de son niveau de démantèlement. Son épaisseur est généralement faible et varie, dans la zone du granite de Saraya, entre 0,5 m et 6 m.

- Le complexe aquifère conducteur : c'est la portion représentée sur la courbe de sondage par le « fond de bateau » et le début de la phase de remontée. Dans le secteur de Saraya, les résistivités de ce « complexe » varient entre 40 et 300 ohm.m. Il est souvent associé à une altération argileuse de faibles résistivités (5 à 18 ohm.m) dont l'épaisseur (4 à 10 m) est fonction de l'importance de la fracturation.

- Le socle résistant : c'est la partie de la courbe de sondage qui remonte avec une pente de 45°. Il correspond au socle sain ou à la roche peu fissurée. Les résistivités sont généralement élevées (300 à 7500 ohm.m) et varient en fonction des faciès géologiques.

b) *Courbes de sondages en « cloche dans le fond de bateau »*

C'est une variante du type de courbe de sondage électrique précédent se traduisant par une remontée en cloche dans le fond de bateau (fig. 33). Cette modification de la courbe peut être liée à la

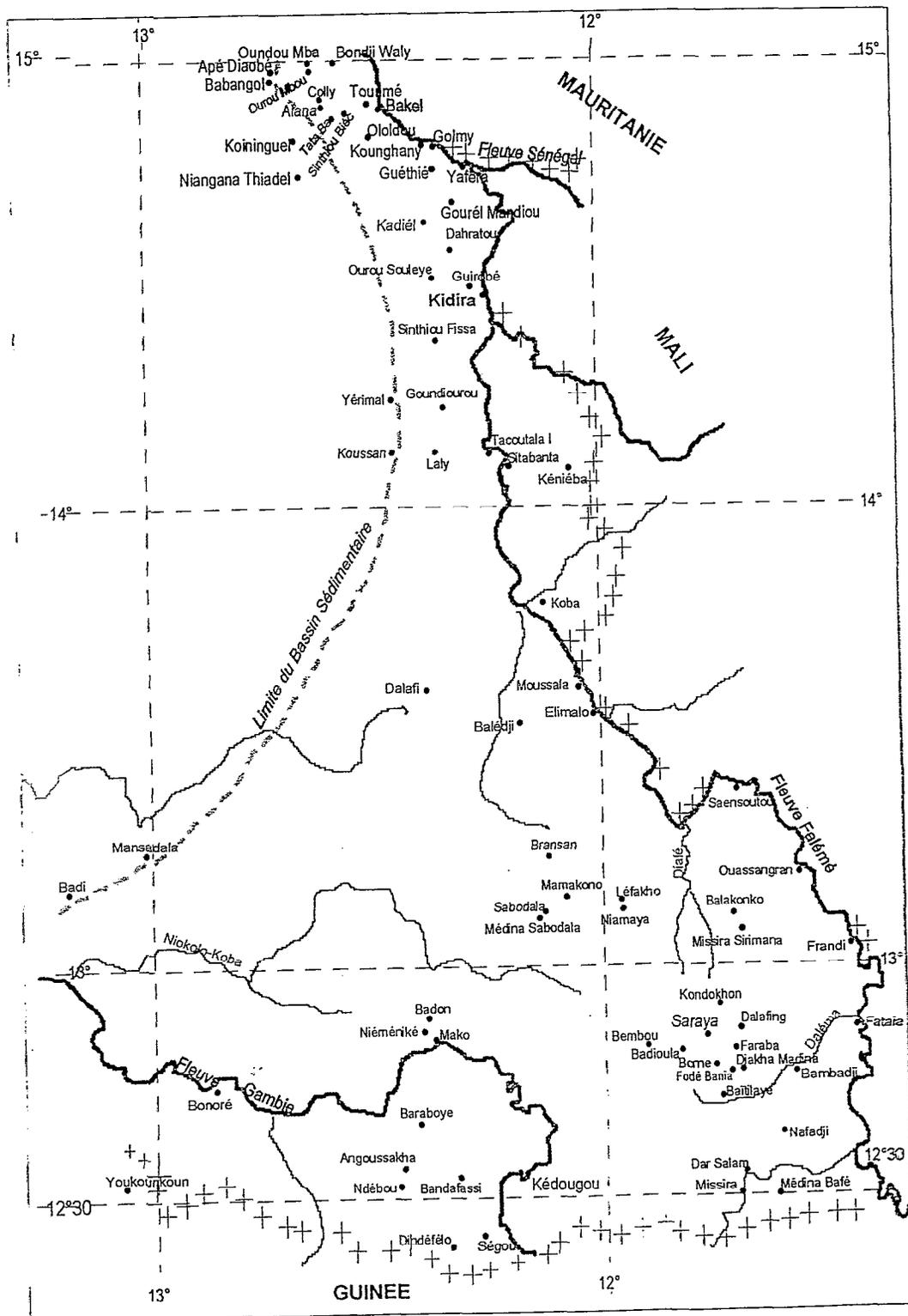


Fig. A7 Localisation des secteurs étudiés

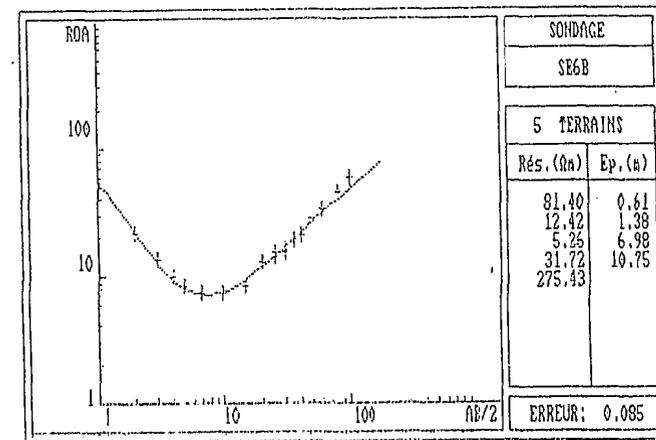
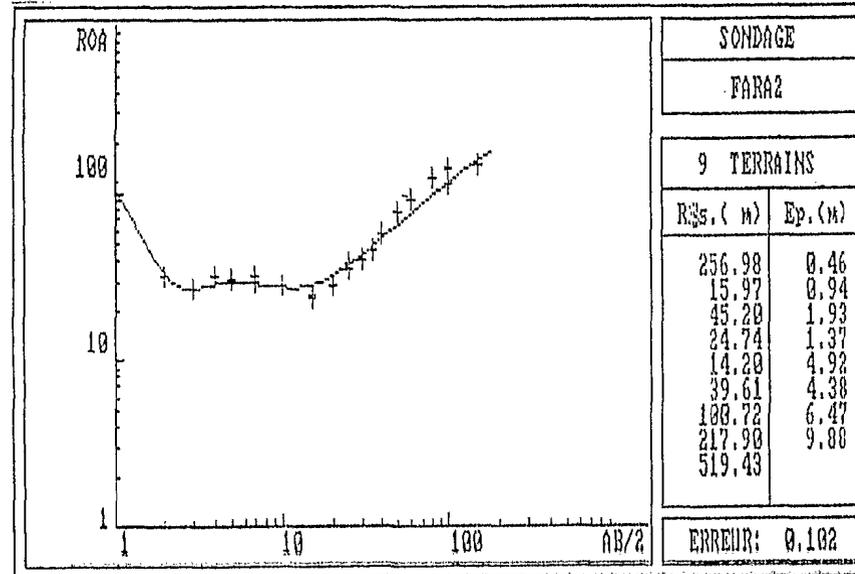
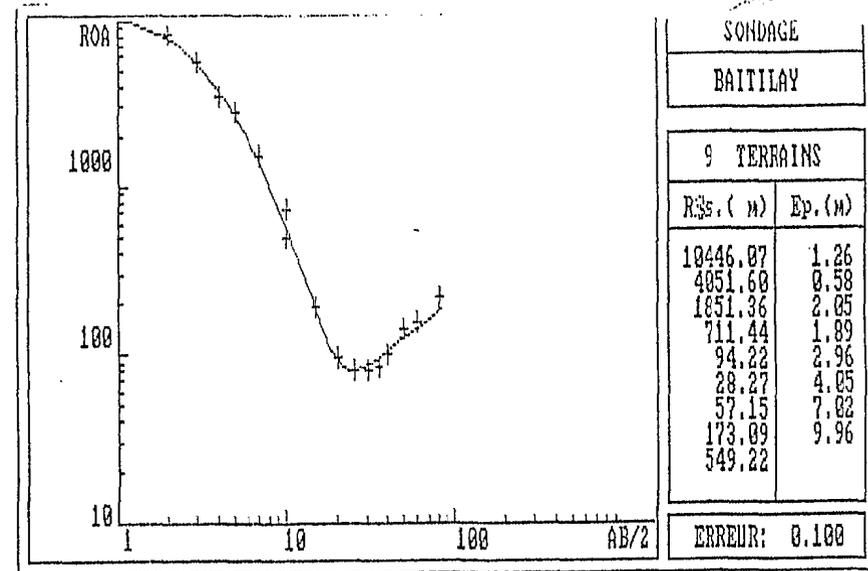
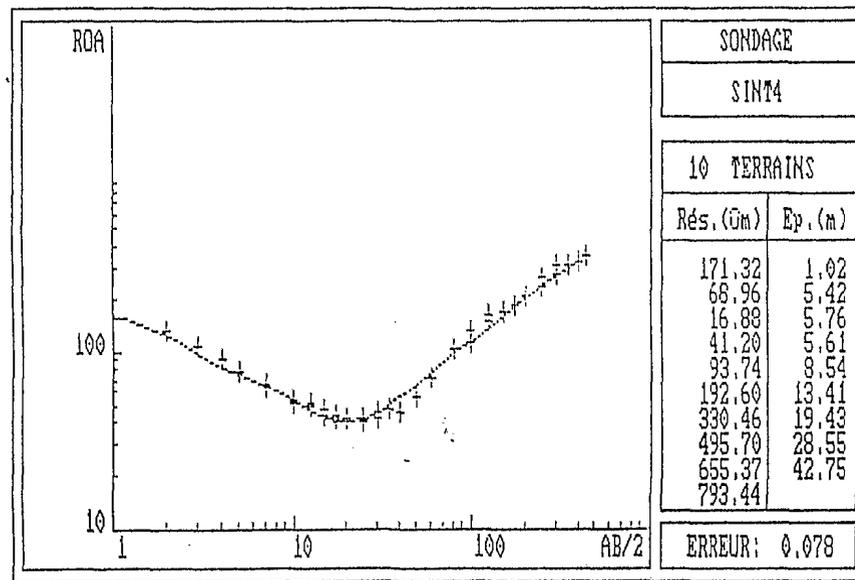


Fig. 3A: Courbe de sondages électriques en « fond de bateau »

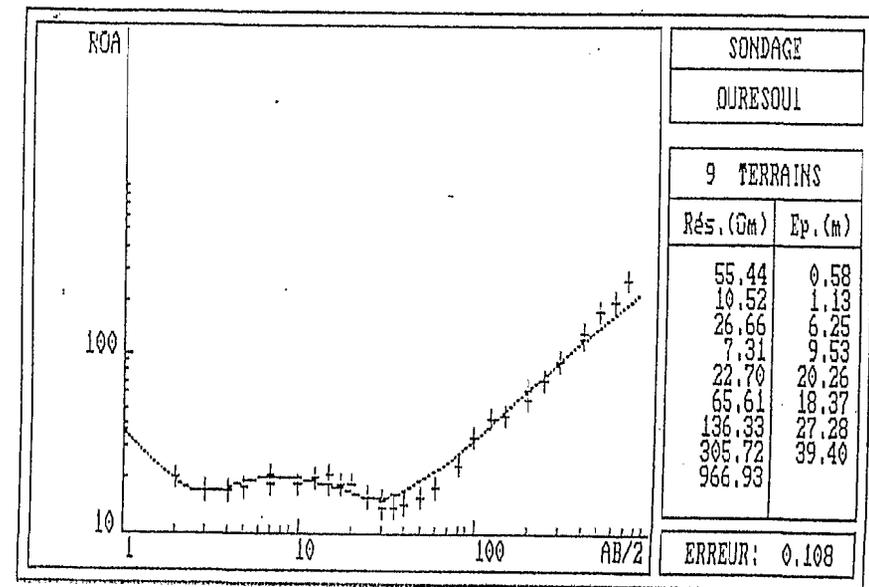
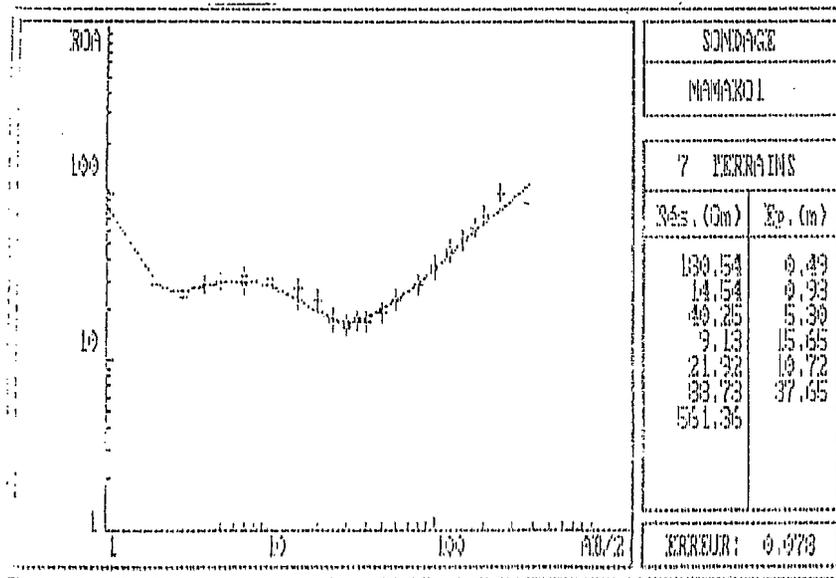
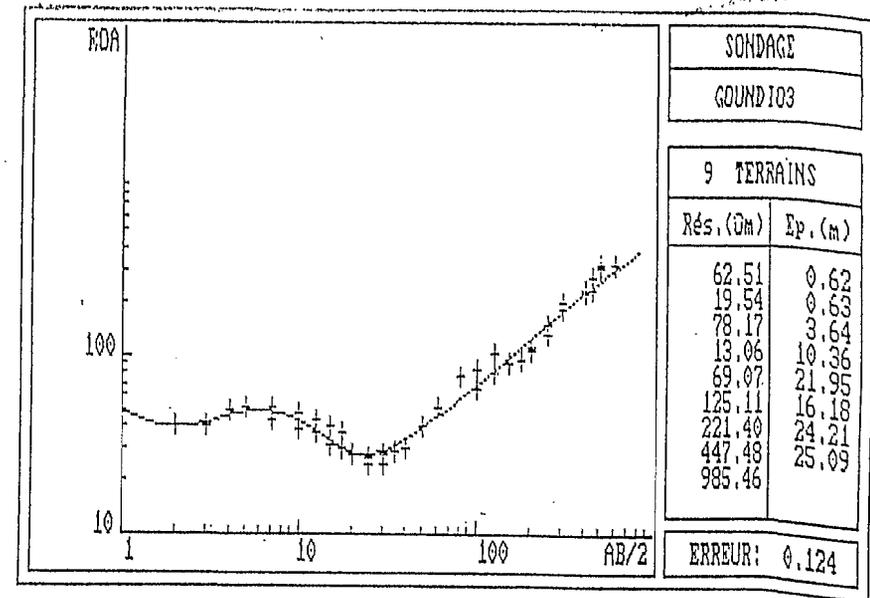
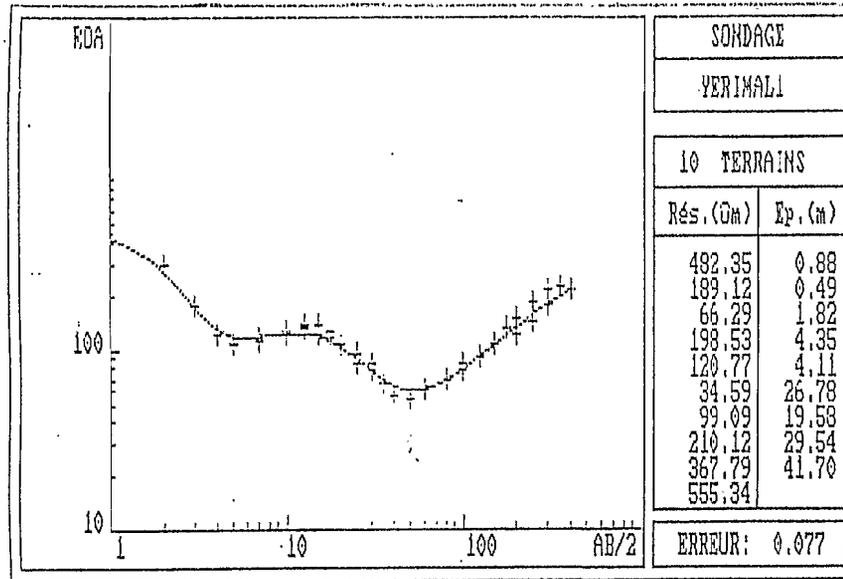


Fig. 33 : Courbe de sondages électriques en « cloche dans le fond de bateau »

présence d'un horizon d'argiles sèches ou d'argiles gravillonnaires. Ce type de courbe de sondage électrique a été rencontré à Yérimalo, Mamakono, Ouroussouleye et Goundiourou.

c) Courbes de sondages électriques en « cloche puis en fond de bateau »

C'est une variante du type en « fond de bateau ». Quatre terrains peuvent être distingués.

La couche de terrain superficiel est représentée par un recouvrement arable sableux de champs de cultures avec des résistivités variant entre 80 et 440 ohm.m et des épaisseurs de 2 à 10 m (fig. 34).

Les autres terrains sous-jacents sont les mêmes que ceux définis dans les courbes en « fond de bateau ».

d) Courbes de sondages électriques à une « seule branche »

Ce type de courbe indique un terrain à deux couches (fig. 35). La première couche est formée par argiles sableuses ou les sables argileux dont la résistivité s'échelonne entre 17 et 120 ohm.m, les épaisseurs vont en général de 2 à 70 m. La forme de cette courbe suppose l'absence d'une couche latéritique qui correspond à la première partie de la courbe en « fond de bateau ».

La seconde couche de terrain correspond au socle résistant. Ce type de courbe est rencontré dans les sondages électriques réalisés à Dahratou, Babangol, Tata Batchili et Bondji Waly.

e) Courbe de sondages électriques à « remontée traînante »

Dans ce cas, les deux branches de la courbe sont dissymétriques (fig. 36). La diminution de la pente montante est due à l'existence d'un niveau très intéressant en hydrogéologie, à savoir le socle fissuré, entre l'horizon conducteur et le socle sain. Plus l'épaisseur du socle fissuré est grande, plus elle s'exprime sur la courbe par une remontée traînante marquée. Ce type de sondage est lié à l'influence d'une mégafracture (Savadogo, 1984 ; Biemi, 1992 in Koussoubé, 1996). L'inflexion de la branche montante peut être assez prononcée et donner une courbe de sondage avec « escalier sur la branche montante » (fig. 37).

L'analyse de la constitution du complexe aquifère conducteur des courbes de sondage électriques montre qu'on est en présence de deux types d'aquifères en fonction de la profondeur :

- les aquifères profonds qui s'identifient à la frange fissurée et fracturée du socle ;
- les aquifères superficiels caractérisés par les matériaux perméables de subsurface (colluvion-alluvions, cuirasses latéritiques, base des altérites latéritiques, couverture tertiaire de bordure).

3.1.1.- Les aquifères profonds

L'alimentation des nappes dans ce contexte se fait selon le mode direct : l'eau de pluie s'infilte à la verticale de l'aquifère. Cette eau parvient à la nappe par percolation à travers la zone non saturée après avoir comblé le déficit en eau du sol et l'évapotranspiration.

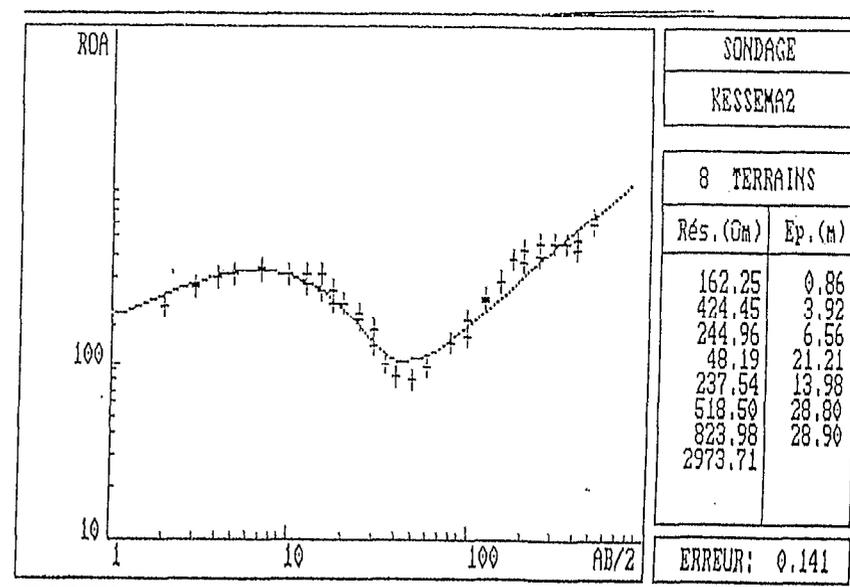
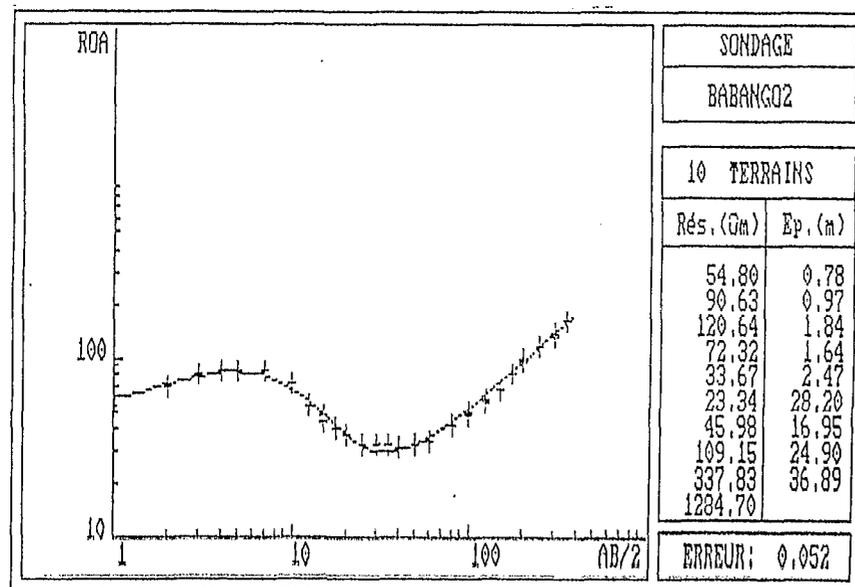
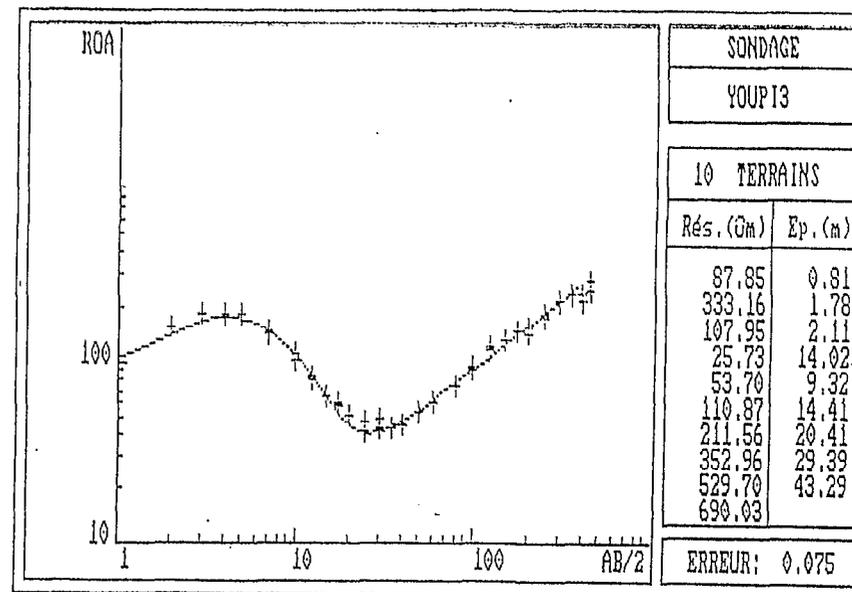
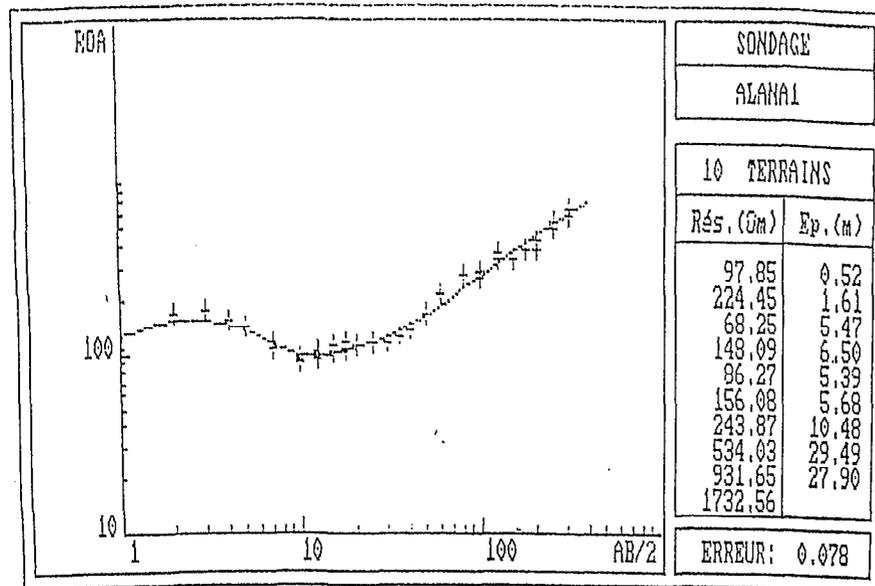


Fig. 31 : Courbe de sondages électriques en « cloche puis en fond de bateau »

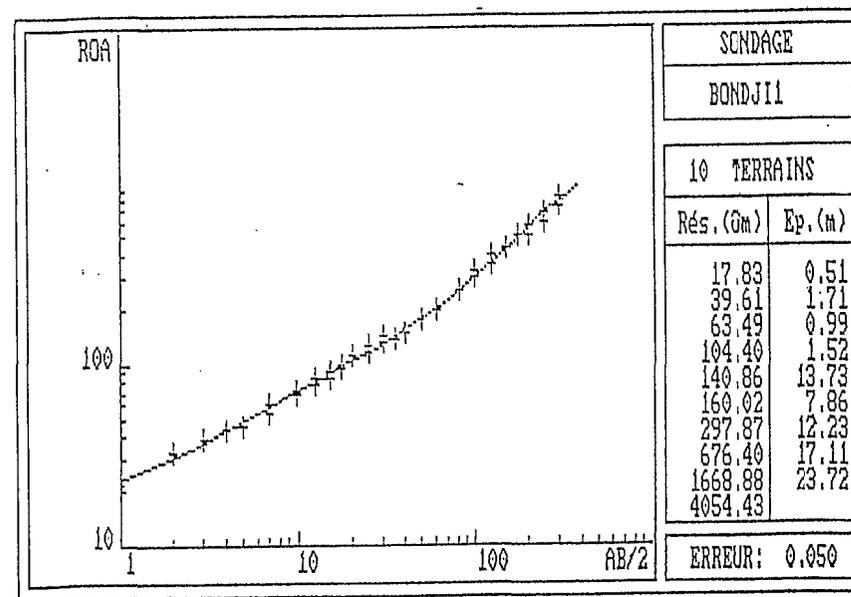
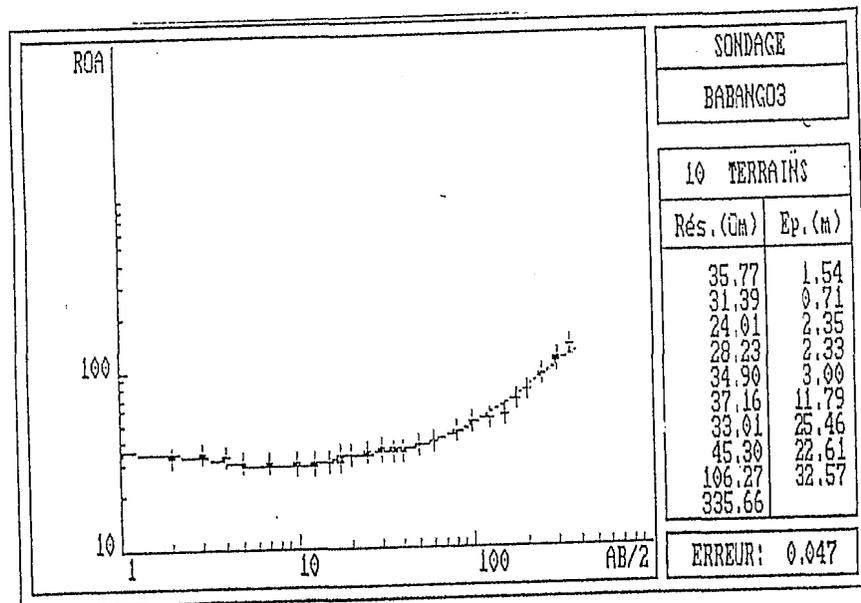
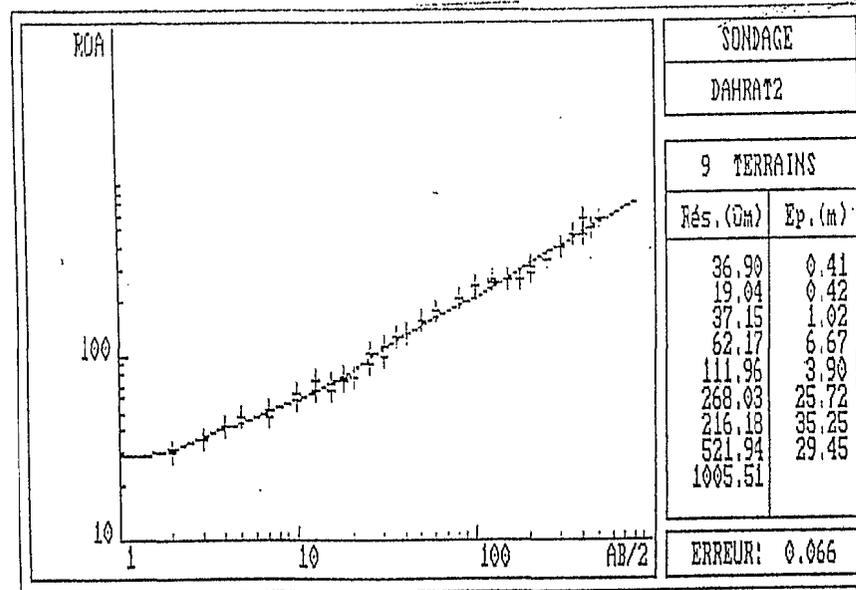
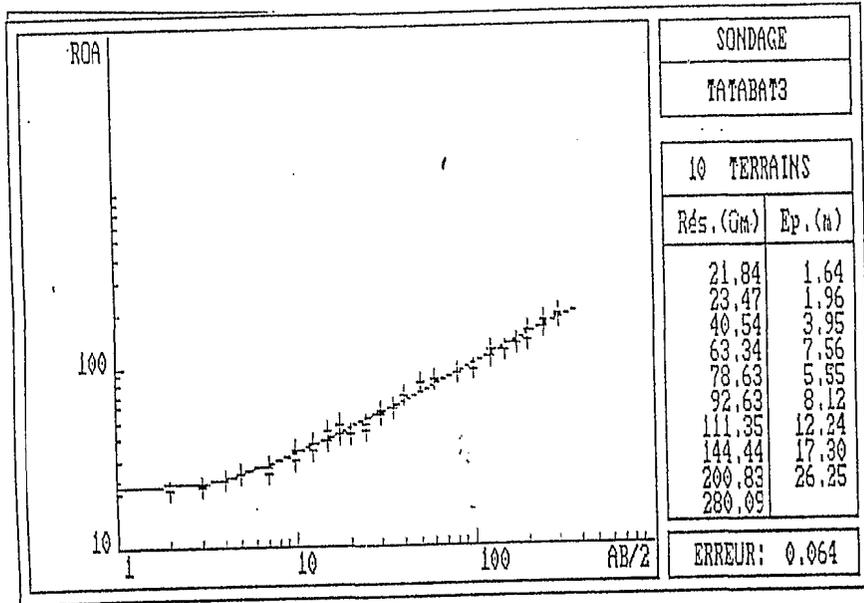


Fig.35 : Courbe de sondages électriques à « une seule branche »

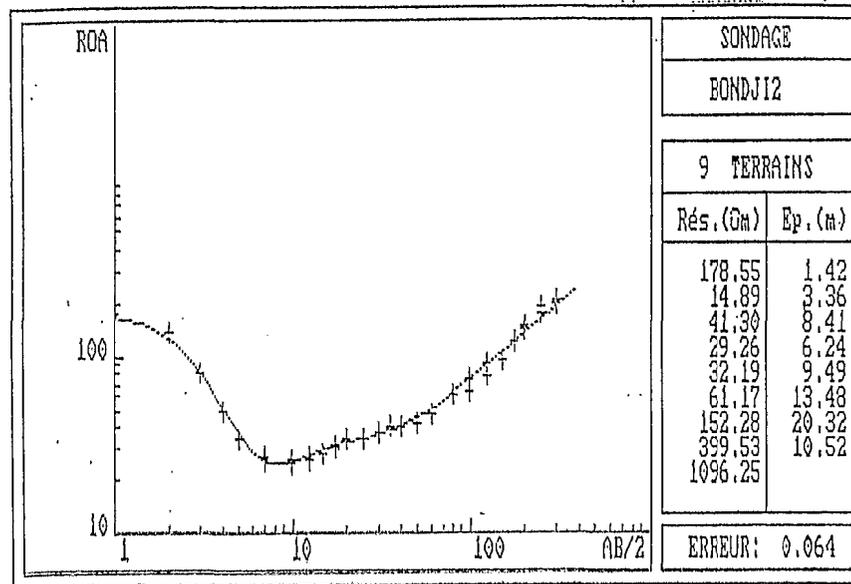
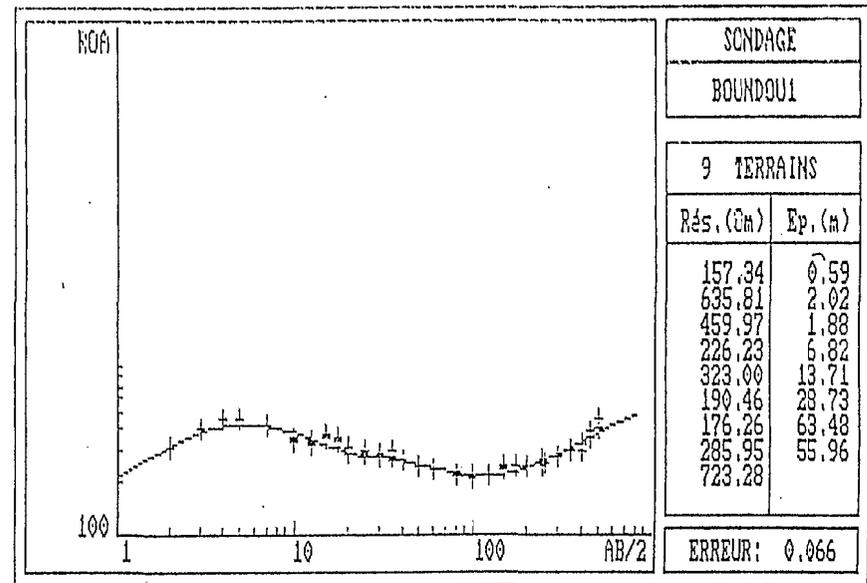
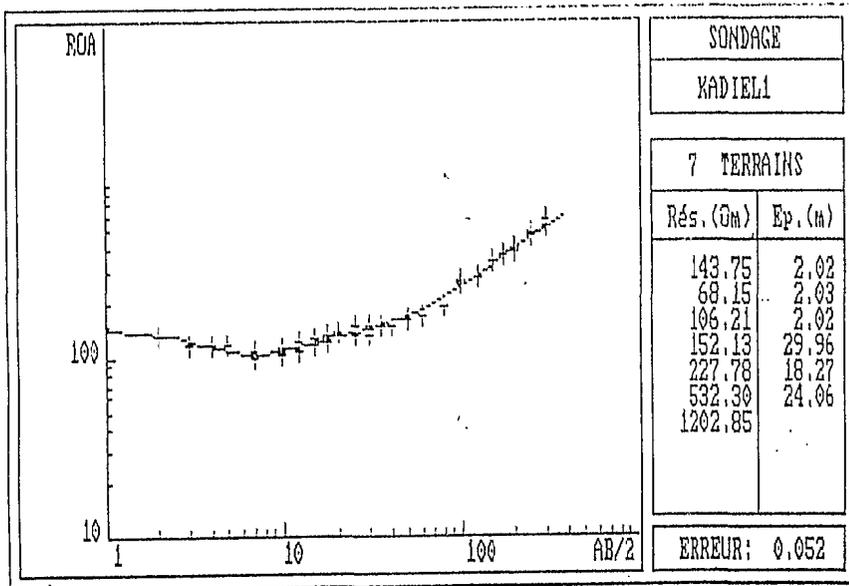


Fig. 36 : Courbe de sondages électriques à « remontée traînante »

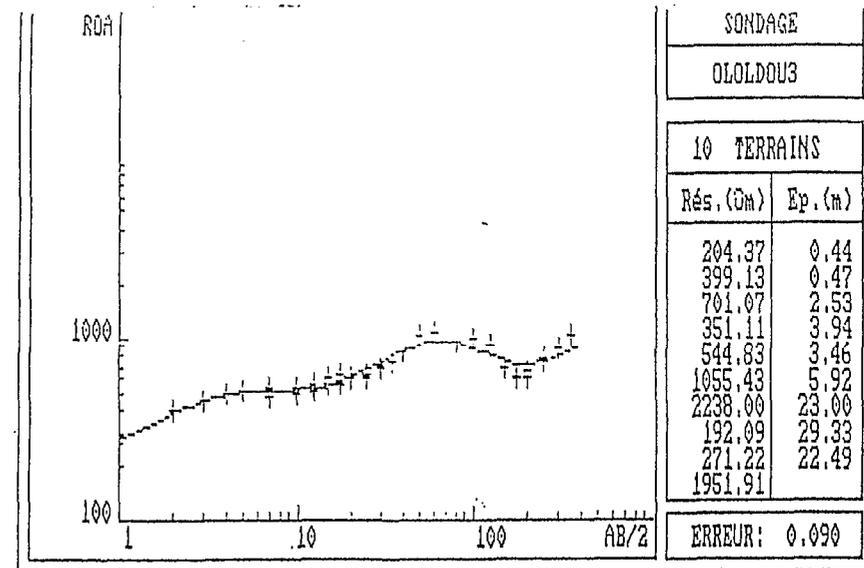
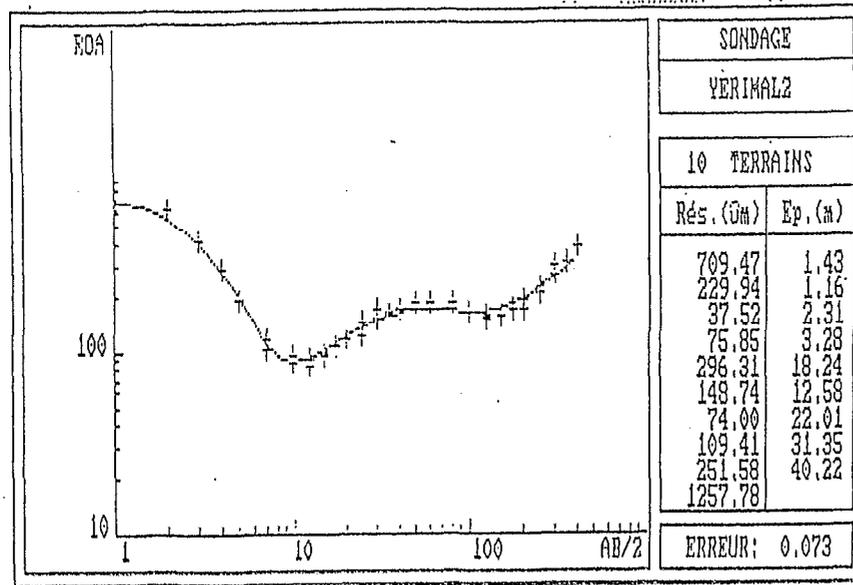
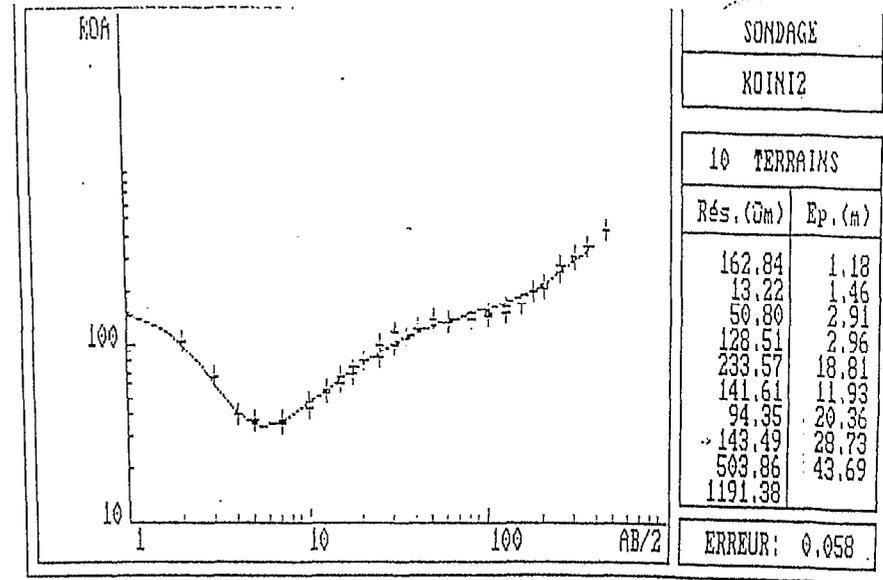
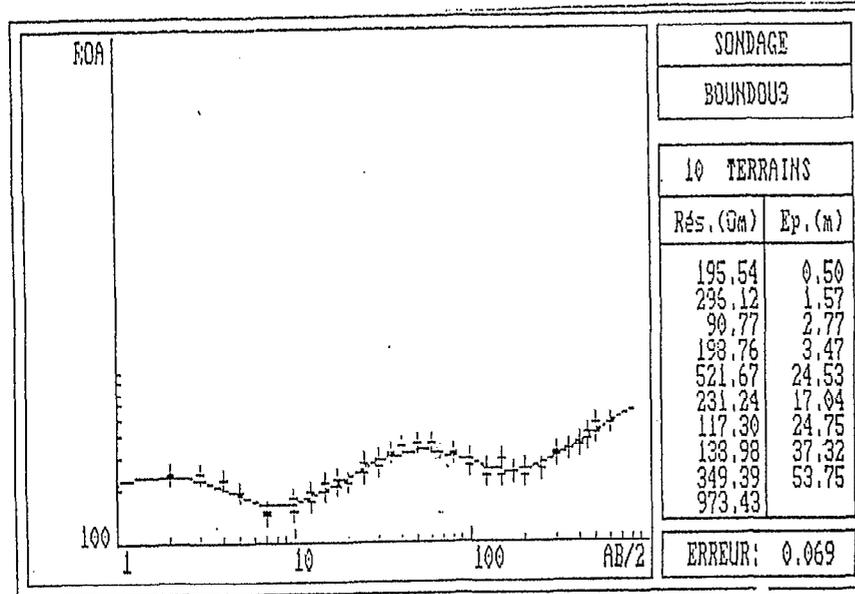


Fig. 37 : Courbe de sondages électriques en « escalier sur la branche montante »

En zone de granite, il peut exister un troisième niveau aquifère constitué par les arènes granitiques qui jouent non seulement un rôle capacitif, mais contribuent à stopper la descente progressive des argiles superficielles dans les lieux de captage, évitant ainsi la chute de la productivité des suites de colmatage des fissures par les argiles d'altération (phénomène d'autodéveloppement).

La productivité des aquifères profonds dépend en partie de la nature des faciès géologiques, de leur composition minéralogique et des phénomènes tectoniques survenus au cours de l'histoire géologique.

Les observations faites sur l'ensemble de la zone du socle, permettent de dire que les formations birimiennes (schistes essentiellement et roches vertes) ne recèlent pas de réserves profondes importantes et généralisées. Si des ressources existent, elles le seront toujours dans des conditions géologiques très particulières (zones de fractures, niveaux drainants - cipolins par exemple -, etc...).

A.- Les schistes : ne présentent pas de porosité d'interstices. Le quartz filonien qui crée des niveaux favorables au drainage des eaux dans les schistes plus métamorphiques de Bakel et des collines Bassaris, est très rarement présent dans les schistes birimiens. Les sondages électriques réalisés à Ololdou et à Kadiel (fig. 38) illustrent l'influence du passage d'un filon de quartz dans la productivité des aquifères en terrain schisteux. Le passage du filon est illustré sur la courbe de sondage électrique de Ololdou par la présence d'une importante inflexion sur la phase de remontée.

Contrairement aux schistes de la localité de Kadiel, le passage en profondeur d'un filon dans les schistes de Ololdou crée une intense fracturation tardive favorable au drainage des eaux, donc à l'existence d'un aquifère productif.

Les réseaux aquifères créés par ouverture des plans de schistosité de la roche seront aussi à chercher dans le voisinage des granites intrusifs ou des intrusions de roches vertes.

Les zones d'altération des schistes, favorables à la circulation et à la rétention de l'eau, sont aquifères ; toutefois les débits restent en général faibles.

B.- Les différents types de granite rencontrés au Sénégal Oriental et dont nous avons fixé la répartition dans les chapitres précédents, se distinguent très peu du point de vue hydrogéologique. Leur altération conduit à la formation d'arènes présentant en gros les mêmes caractéristiques lithologiques et les mêmes types de perméabilité. Les différences dont nous pouvons faire état tiennent à la taille des éléments détritiques : il est évident que l'altération d'un granite grossier conduira à un matériau d'arène plus perméable que celui que pourrait donner par désagrégation un granite à grain fin.

Il est aussi évident qu'une absence d'enclave microgrenue ainsi qu'une altération deutérique de la biotite en une muscovite caractéristique du granite à deux micas de Saraya conduit à une perméabilité en

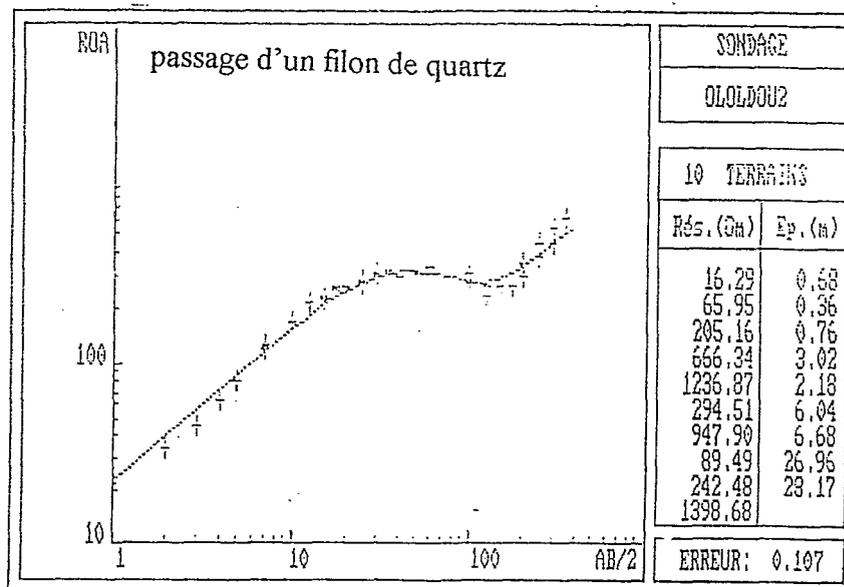
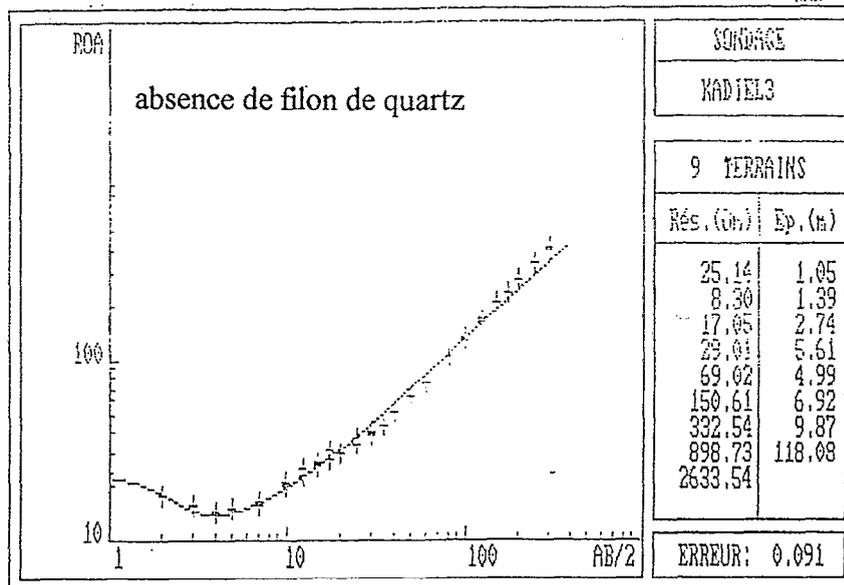


Fig.38 : Influence du passage d'un filon de quartz sur l'allure des courbes de sondages électriques en aquifère des schistes

grand plus importante par rapport à celle d'un granodiorite à biotite et amphibole de Dar Salam et de Moussala ou d'un granodiorite à pyroxène de Boboti.

Il existe dans le profil d'altération d'un granite différents niveaux aquifères superposés. La nappe est constituée par l'ensemble de ces horizons présentant des possibilités différentes de rétention de l'eau.

- Caractéristiques hydrogéologiques des profils d'altération en zone de granite

Où se trouve l'eau exploitable par les puisards, les puits et les forages dans ce contexte d'altération des granites ?

On peut répondre à cette question en se fondant sur les caractéristiques hydrogéologiques des différents horizons du profil d'altération (fig. 39) :

a) - au sommet la cuirasse latéritique est souvent parcourue de tubules et de nombreuses petites fissures. Elle est donc de ce fait très perméable malgré son apparente compacité ;

b) - horizon des argiles à canaux qui est presque aussi perméable que la cuirasse qui la surmonte là où il existe ;

c) - argile bariolée et arène argileuse constituent une zone très poreuse (porosité : propriété d'un corps, d'un milieu, de comporter des vides interconnectés ou non, exprimée quantitativement par le rapport du volume de ces vides au volume total du milieu) (40 à 45%) mais sont pratiquement imperméables (perméabilité : attitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de potentiel) (10^{-8} à 10^{-9} cm/s).

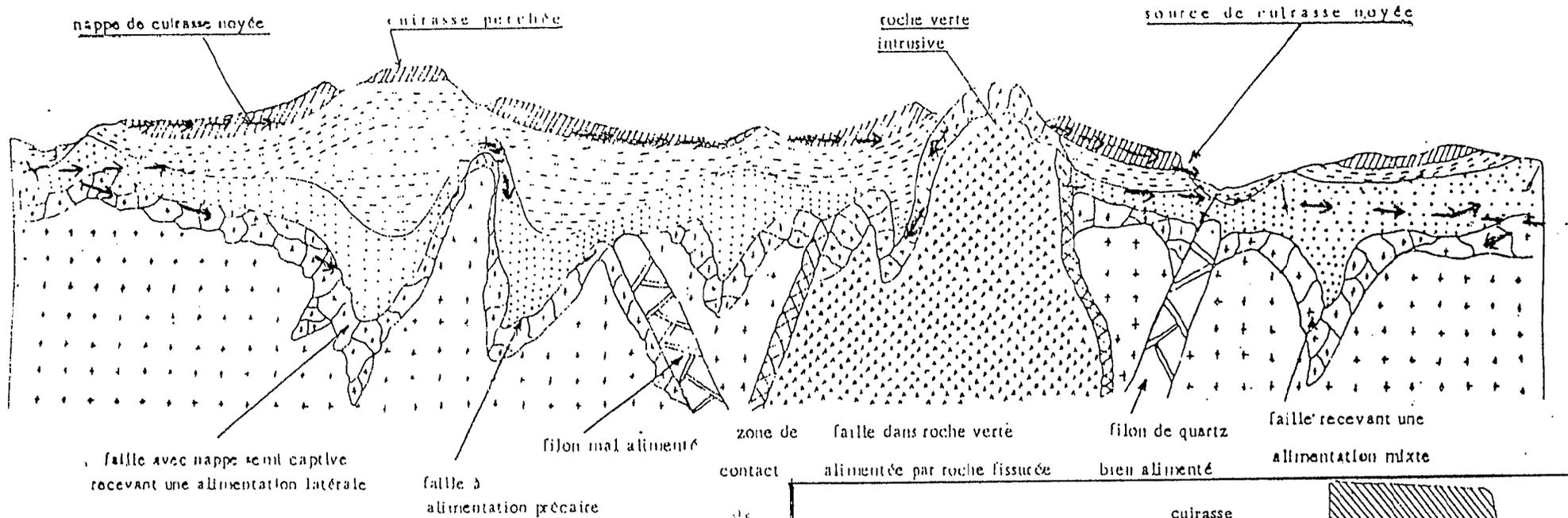
Dans les régions occupées par des roches basiques et les schistes, il arrive que cette bicouche soit la zone perméable sommitale de celle sous-jacente (roche saine ou fissurée). Dans ces conditions, en cours de foration, après avoir rencontré de l'eau dans les premiers niveaux, on traverse les argiles sèches avant de retomber en profondeur dans la zone d'eau du profil.

La porosité utile de ces deux niveaux ne dépasse pas 5% ;

d) - horizon des arènes grenues très poreux (45% environ), gorgé d'eau, il constitue un horizon qualifié de fluent. Il est difficile à traverser par forage et par puits à grand diamètre. Ce horizon renferme beaucoup d'eau et on y retrouve l'essentielle des réserves d'eau du profil. Il libère très peu d'eau car sa porosité utile ne dépasse pas 5%. De ce fait, il a une fonction capacitive très importante pour la pérennité des ouvrages.

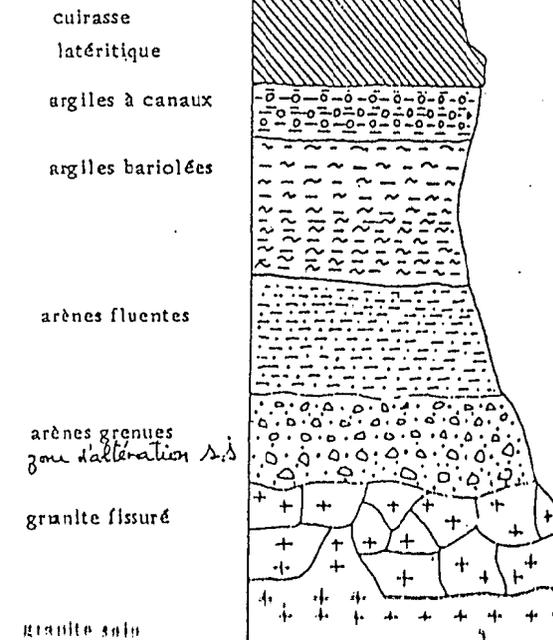
Lorsqu'on a affaire aux roches basiques (gabbro, basaltes, dolérites, diorites, gneiss schistes), les horizons argileux viennent reposer directement sur le substratum fissuré ; ce qui favorise à long terme le colmatage des fissures de l'aquifère ou des crépines des forages.

Fig. 40 : Mode de gisement des eaux souterraines dans le socle granitique en climat tropical



- alluvions
- cuirasse latéritiques avec ravinés de lessivage
- argiles latéritiques
- arène fluente et arène grenue
- roche fissurée
- granite sain
- roche verte

Fig. 39 : PROFIL TYPE DE L'ALTERATION DES GRANITES



e) - la frange fissurée du substratum présente une porosité très inférieure à celle de l'horizon sus-jacent mais elle est très perméable. Les courbes de sondages électriques de la figure 33 illustrent bien les différentes couches de ce type de profil.

En résumé, il existe trois horizons de bonne perméabilité dans le profil d'altération :

- * la cuirasse latéritique,
- * l'horizon des argiles à canaux,
- * la frange fissurée du substratum.

Le profil n'est donc productif qu'à son sommet et à sa base.

Du point de vue de la présentation générale, on peut résumer le mode de gisement des eaux souterraines dans la formation du socle granitique par la figure 40.

Au sommet on a la nappe de la cuirasse noyée qui peut être en continuité hydraulique avec la nappe profonde (tout dépend de la perméabilité des horizons intermédiaires). La présence de cette nappe superficielle est essentiellement commandée par la géomorphologie.

La présence de la nappe profonde est influencée par les fractures affectant le socle.

On note que l'épaisseur totale des altérites est généralement plus importante sur les schistes que sur les granites. Les courbes de sondages électriques (fig. 41) donnent un exemple de l'importance comparée de l'épaisseur des altérites en zone de granites et de schistes. Ceci se traduit par des ouvrages de captage au niveau des schistes plus profonds qu'au niveau des granites avec 60 à 80 m et 40 à 50 m respectivement.

C.- Les grès quartzites roses infracambriens, peu altérés, sont pratiquement imperméables, et les fissures et diaclases sont surtout développées en surface. Dans ces conditions, il est peu probable que ces grès quartzites soient le siège d'une importante circulation d'eau.

Les niveaux aquifères sont localisés dans les passés gréseux tendres passant latéralement à des calcaires gréseux que l'on trouve au sein des grès quartzites.

Un tel matériau constitue par sa bonne perméabilité un excellent réservoir aquifère, alimenté par infiltration directe et par les eaux de percolation des grès quartzites.

D.- Les pélites et grès schisteux du Cambrien inférieur ont de faibles possibilités aquifères. En effet leur altération aboutit à un matériau de perméabilité réduite et discontinue alors que les fissures de la roche saine sont toujours en profondeur colmatées par les argiles d'altération.

E.- L'altération des faciès métamorphiques du Cambrien conduit à un matériau dont la perméabilité très variable est fonction de l'intensité du métamorphisme des terrains et du degré d'altération.

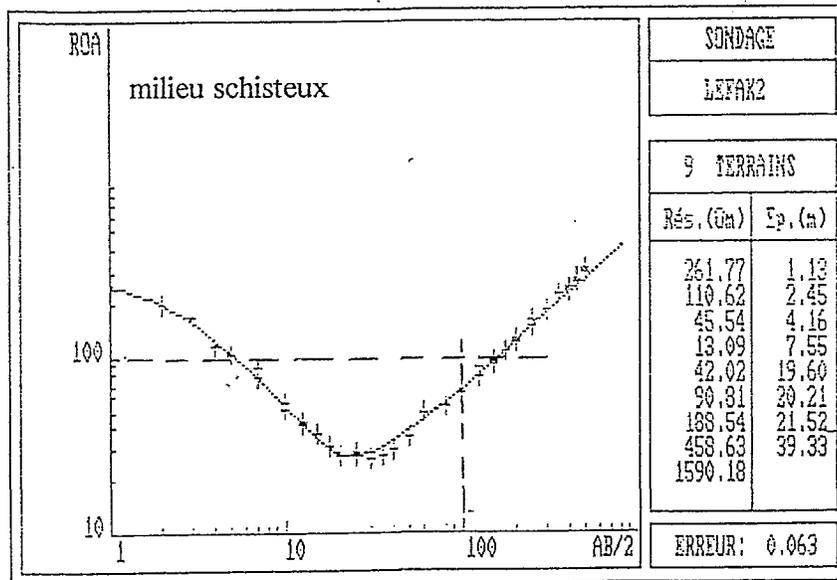
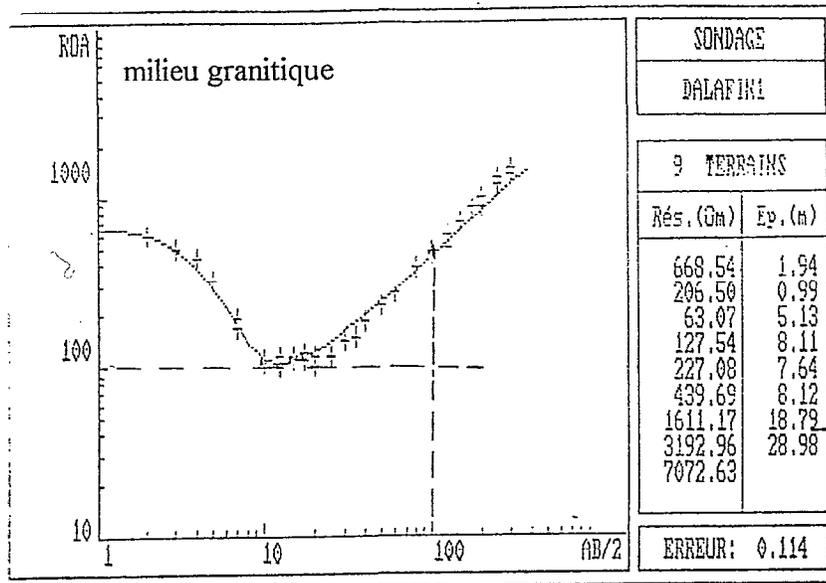


Fig. 4.1: Comparaison de l'épaisseur des altérites et de la profondeur du toit du substratum sain en milieu granitique et en milieu schisteux à l'aide de sondages électriques

qu'ils présentent. Les régions où le métamorphisme est intense et l'altération peu poussée sont les plus favorables.

Dans ce contexte les schistes constituent la roche aquifère exploitable, les quartzites leur apportant un complément d'alimentation en eau non négligeable. Les ouvrages de captage devront être implantés dans les faciès intermédiaires des schistes quartzeux qui présentent la meilleure perméabilité.

Mais les schistes métamorphiques sous le biseau sec du continental terminal à proximité de la bordure du socle sont des aquifères très pauvres. Néanmoins la présence de quartz filoniens peut représenter une condition de terrain à priori favorable qui se manifestent en générale par une inflexion (observée pour des AB/2 élevés) sur la phase ascendante de la courbe de sondage électrique comme c'est le cas à Koïninguel, Niangana Tiadel et Koussan (fig. 42).

En effet, ces terrains schisteux sont parfois recoupés en profondeur par des filons de quartz fracturés qui représentent des collecteurs en eau utilisable. La différence de compétence des roches intrusives et des roches encaissantes résulte, en dehors du filon de quartz lui même, en une zone ayant une porosité due à une intense fracturation tardive et très productive.

Nous avons l'exemple du forage de Koussan réalisé en 1995 dans le socle qui, contrairement aux précédents moins profonds, a rencontré un filon de quartz à partir de 90 m de profondeur, donnant ainsi un débit intéressant de 8 m³/h avec un niveau statique à 50.01 m caractéristique des secteurs du « biseau sec ». Ce débit pouvait être plus important si l'équipe de forage disposait de plus de 94 m de tige pour continuer la foration jusqu'à 112 m comme le prévoit le sondage électrique KOUSS4 (fig. 42).

Ces zones de contact Continental terminal-socle sont caractérisées par un contexte hydrogéologie très complexe ; et la comparaison de deux forages proches réalisés à Koussan, l'un au niveau du socle et l'autre dans le Continental terminal montre l'importance des variations latérales de faciès (fig. 43) dans cette même localité.

Toutes ces observations ne font que confirmer l'importance de l'utilisation de la prospection électrique dans les programmes d'implantation de puits et forages en terrain ancien en général et en particulier dans les contextes du « biseau sec », contextes où les puits sont souvent stériles ou trop profonds comme l'attestent le sondage électrique et le forage de Apé Diaobé (fig. 44) avec un recouvrement sableux et argileux de 43 m d'épaisseur. et un niveau statique à 32.10 m

F.- La frange d'altération des grès rouges feldspathiques du Cambrien supérieur présente en général une perméabilité faible. Mais des conditions favorables se présentent dans les zones où les grès ont subi un certain degré de recristallisation ; les sols d'altération renferment alors des niveaux gravillonnaires favorisant l'infiltration et la rétention de l'eau.

Les grès sains affectés par la tectonisation, les diaclases et les fractures représentent des aquifères intéressants.

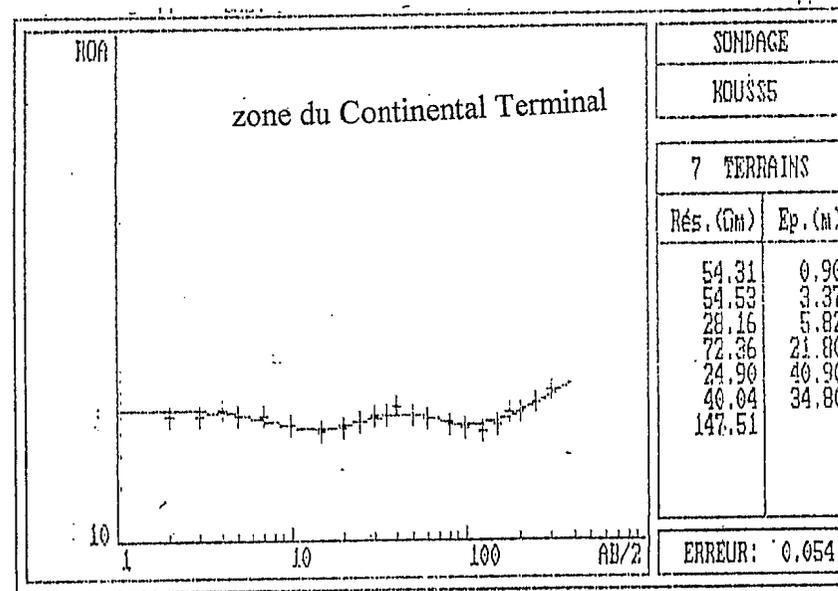
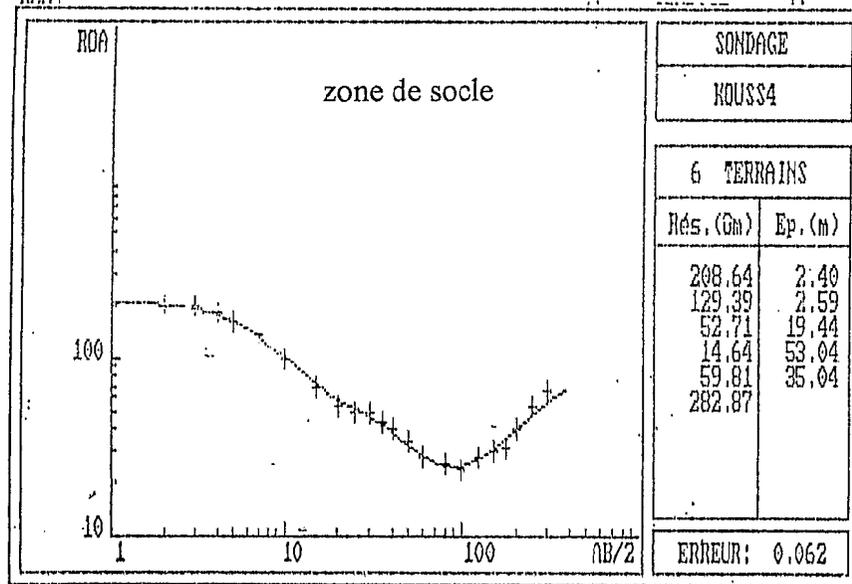
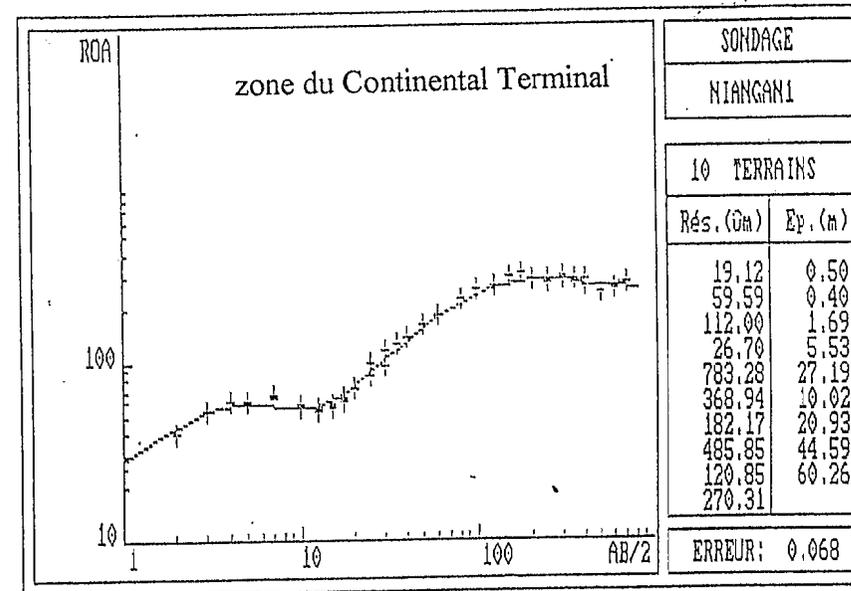
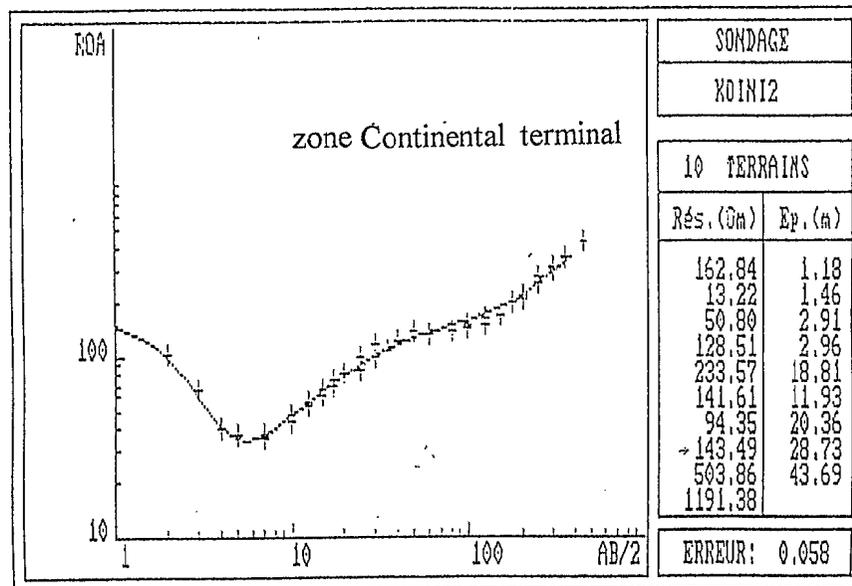


Fig. 1.2: Coubes de sondages électriques à Cotinguel, Niangana Tiadel et Koussan

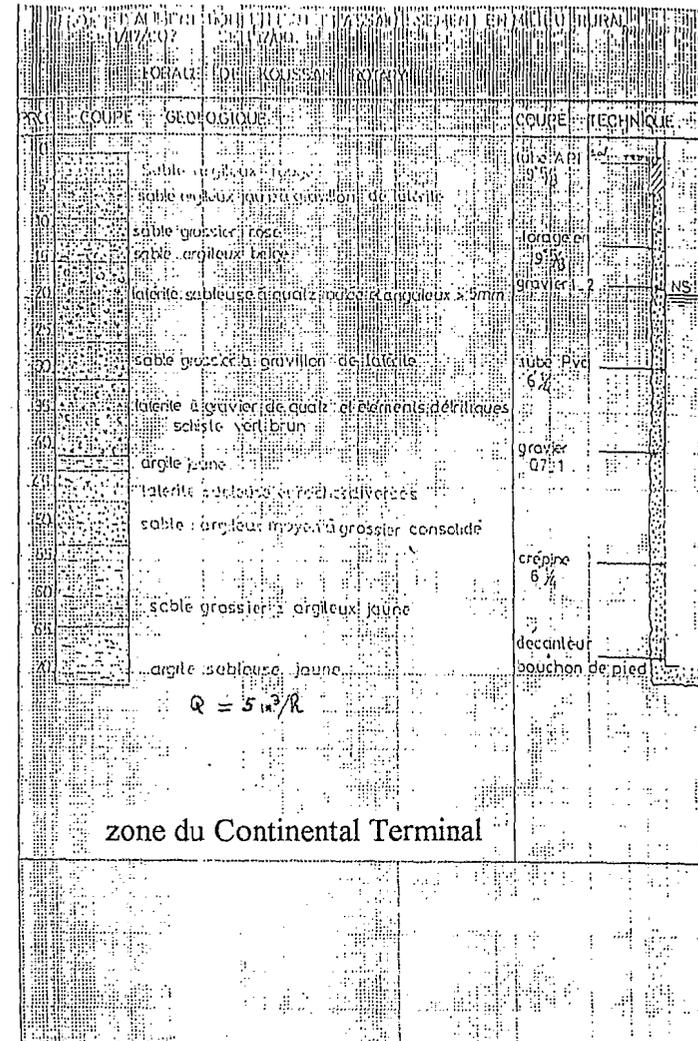
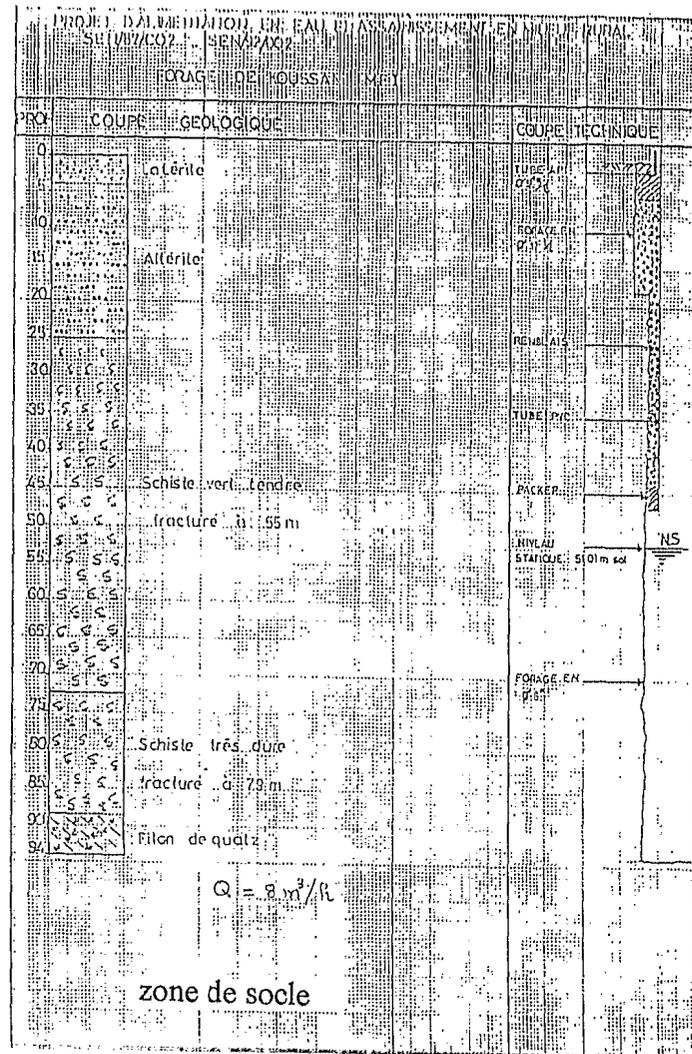


Fig. 1.3: Logs lithostratigraphiques des forages de Koussan

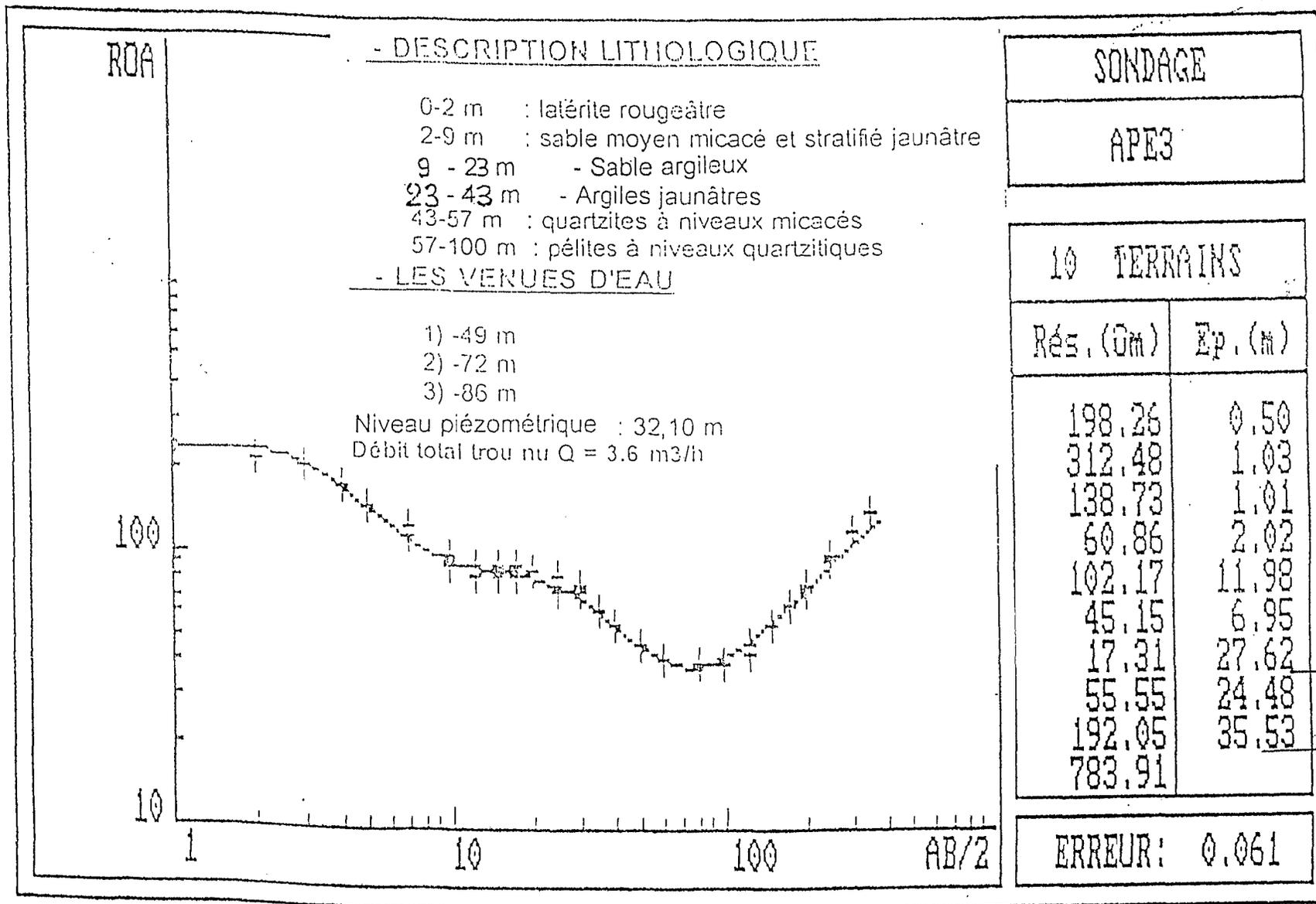


Fig. 44: Sondage électrique et log de forage a Apé Diaobé

G.- Les massifs à grès blancs ordoviciens sont le siège d'une circulation de fissure importante avec des résurgences qui alimentent de nombreux marigots (du plateau de Banharé descendent de nombreux affluents de la Gambie et du Niokolo-Koba) (Camus et Debuissou, 1964).

H.- L'intrusion des filons doléritiques-primaires créent à la zone de contact avec l'encaissant un couloir broyé.

Ce couloir constitue un aquifère très perméable et très productif. Par contre la zone du filon en elle-même est en général non productive et peut provoquer lors de la réalisation de forages des accidents comme le coinçage des outils de fonçage par les blocs de dolérite.

L'étude géophysique suivie de la réalisation de forages dans la localité de Bondji Waly constitue un exemple illustré de problèmes que l'on rencontre dans le contexte hydrogéologique de zone de contact dolérite-roche encaissante.

La figure 45 représente un traîné et trois types de sondages électriques réalisés à Bondji :

- le premier type effectué sur l'encaissant schisteux est caractéristique d'une courbe de sondage en « une seule branche »,
- les deux autres effectués sur la zone de contact schiste-dolérite sont, l'un caractéristique d'une courbe de sondage à « remontée traînante » qui met en exergue l'existence d'une zone broyée très intéressante du point de vue hydrogéologique. L'autre courbe est caractéristique d'un sondage en fond de bateau.

Il faut noter dans ce contexte, la difficulté qu'il y a de repérer avec précision la zone broyée parce que sa largeur étant de l'ordre de 0.5 m à 2 m. L'implantation d'un forage doit être réalisée à quelques mètres près et en bordure de l'anomalie conductrice qui se localise sur l'axe de la structure, du fait de l'altération argileuse très conductrice de la partie supérieure du dyke (fig. 46).

De la même façon, l'existence d'un filon incliné représente une contrainte qui oblige les foreurs à réaliser le forage au milieu du filon pour atteindre la zone broyée en profondeur ; ce qui peut entraîner le coinçage des outils de fonçage.

Lors de l'implantation de l'actuel forage de Bondji Waly, il a suffi reculer seulement de 2 mètres à partir du forage non productif pour obtenir un débit de 2 m³/h et éviter du coup un second coinçage au marteau.

3.1.2.- Les aquifères superficiels

L'alimentation des nappes imprégnant les formations colluvion-alluvions de bas-fond se fait selon le mode indirect : après ruissellement, l'eau percole jusqu'à la nappe après la collecte dans les axes de drainage des cours d'eau. Mais du fait de la connexion entre les aquifères superficiels et les aquifères profonds, leurs modalités d'alimentation peuvent être associées.

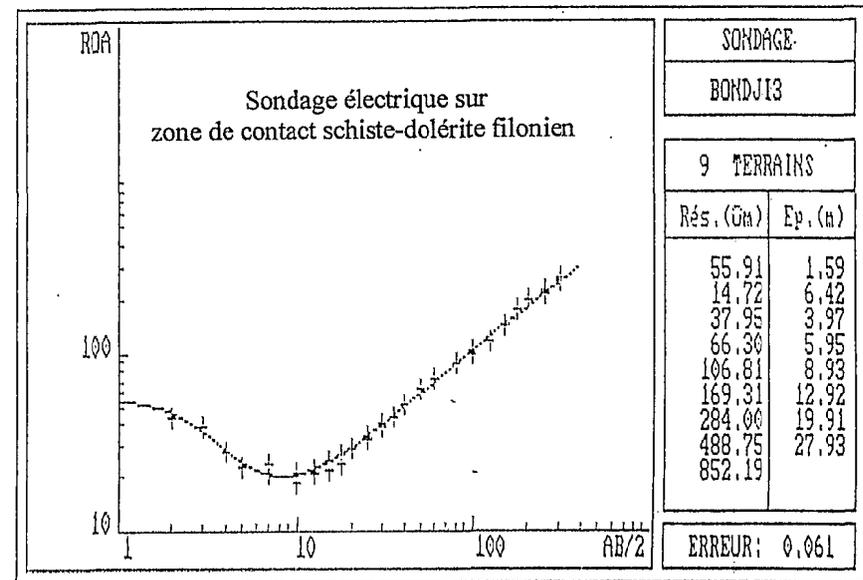
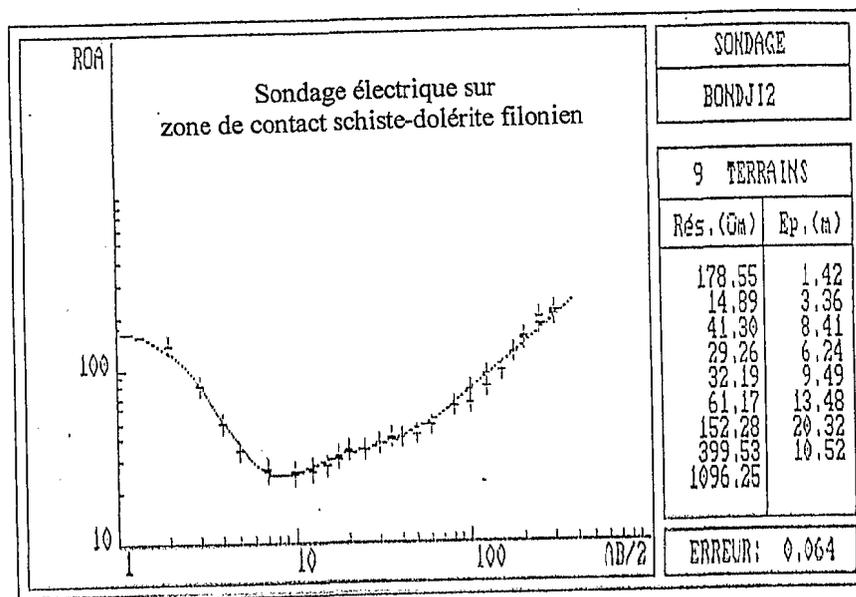
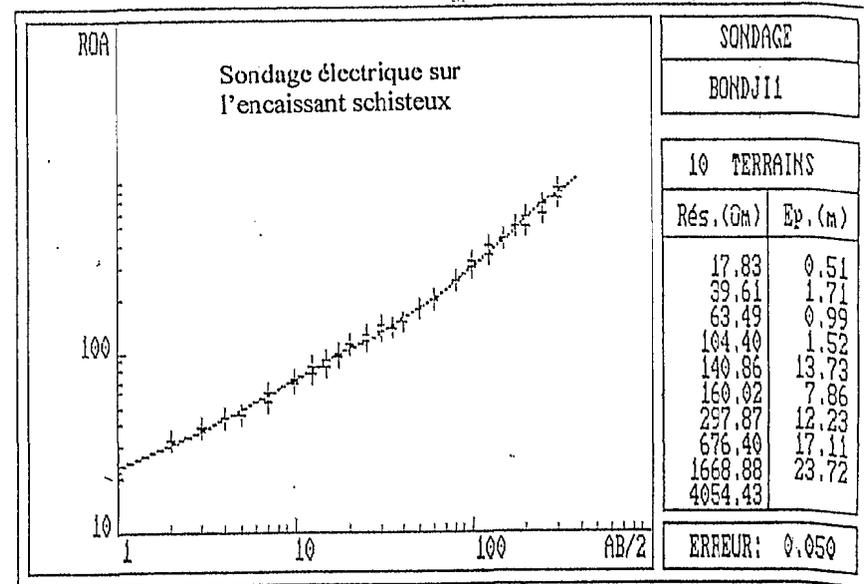
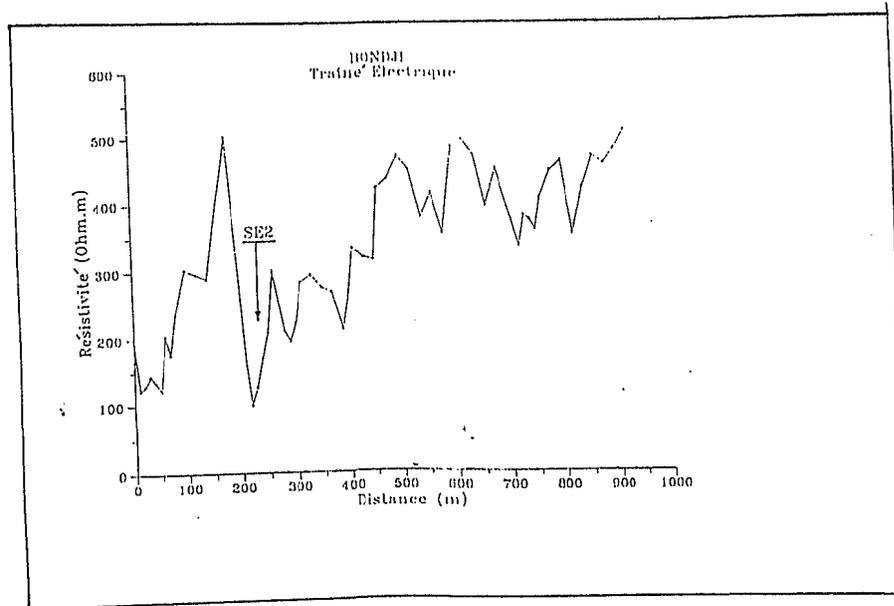


Fig. 45: Prospection électrique à Bondji Waly (zone de contact schistes-dolérite filonien)

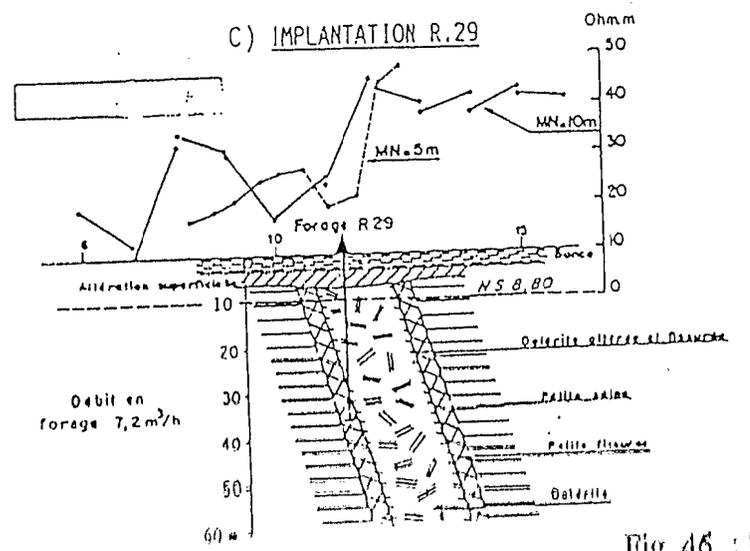
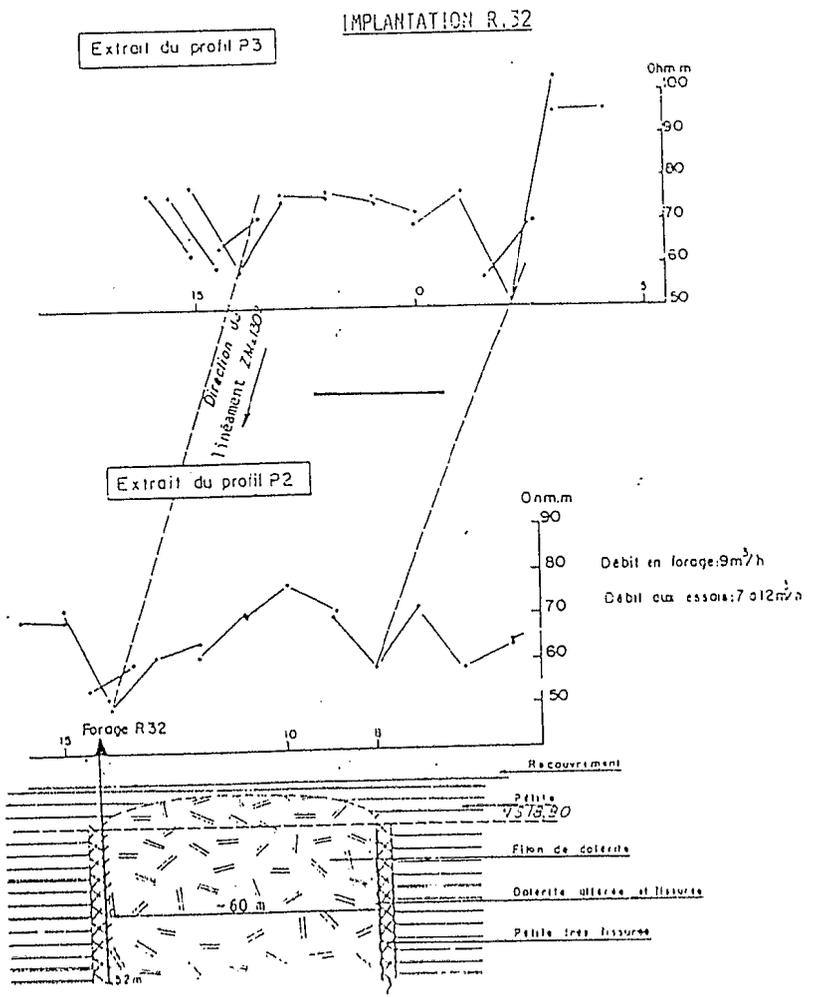
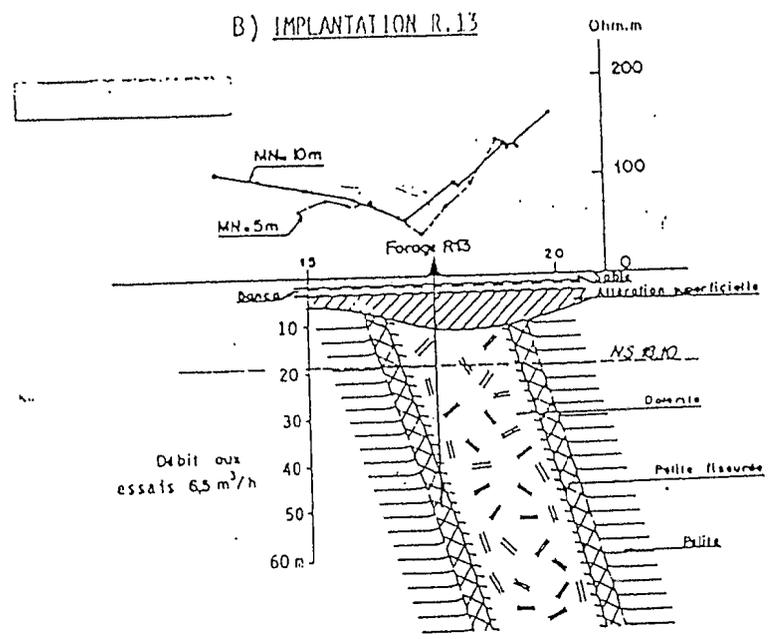


Fig. 46 : Prospection électrique à la recherche des épontes fracturées d'un filon de dolérite dans les pélites

A.- La cuirasse et la carapace latéritiques ont une perméabilité en grand assez importante, ce qui permet de favoriser :

- d'une part une percolation lente dans l'épaisseur des terrains altérés, avec constitution à des niveaux variés de petites nappes locales dans les horizons plus perméables ;
- d'autre part, un écoulement latéral « rapide » dans la cuirasse et la carapace vers les axes de drainage que constituent les marigots, auxquels il fournit un appoint de crue : c'est le drainage sous-latéritique (cf. Fig. 40).

B.- Les possibilités aquifères de la couverture tertiaire de bordure

La perméabilité des formations tertiaires continentales du Mio-Pliocène est nettement supérieure à celle des terrains anciens.

Ces sables argileux et grès continentaux contiennent une nappe continue dans tout le bassin sédimentaire. Cependant à l'Est, le dépôt des terrains post-paléozoïques de faible épaisseur s'est effectuée sur la surface d'érosion du vieux continent.

Toute cette région située dans la zone de contact bassin sédimentaire-socle métamorphique appelée communément « biseau sec » ne possède que de très faibles ressources aquifères en dehors de la période d'hivernage qui s'explique par :

- une nappe alluvionnaire embryonnaire, inexistante ou sous-alimentée;
- une épaisseur trop faible des formations du Continental terminal, lenticulaire et sporadique, pour receler une nappe continue ;
- une stérilité du socle.

D.- Les nappes alluvionnaires

L'alimentation des nappes imprégnant les formations colluvio-alluviales se fait selon le mode direct.

L'« imperméabilité » d'ensemble des terrains anciens du Sénégal Oriental est la cause première du développement important du réseau hydrographique.

Tous les cours d'eau sont à l'origine de dépôt d'alluvions plus ou moins exploités le plus souvent par puisards. Cependant les ressources sont, par rapport à d'autres pays, modestes voire sporadiques.

Ceci est dû au développement relativement faible du dépôt alluvionnaire comme on a pu le constater au niveau des forages de Golmy, Saensoutou et Koungany (fig. 47g). On assiste actuellement à un recreusement des lits mineurs ce qui aboutit à des dépôts alluvionnaires, morcelés, peu épais séparés par des biefs où le bedrock affleure.

Ces nappes alluviales s'épuisent :

- par l'écoulement souterrain axial (inféroflux des marigots) ;

- sous l'action de l'évaporation ;
- par le jeu de l'exploitation (puisage) ;
- par l'infiltration dans les fissures que présente le bedrock.

Ces pertes peuvent être assez importantes et aboutir à un drainage rapide de la nappe alluviale surtout surtout en période de saison sèche.

3.2. - Prospection géophysique et optimisation de la recherche d'eau souterraine en zone de socle du Sénégal oriental

Cette optimisation consiste en tout premier lieu à accroître le plus possible la rentabilité de l'investissement consenti, en faisant de sorte que les points d'eau soient utilisés au maximum par les populations. Or, l'expérience a montré que pour atteindre ce but, ces points d'eau doivent non seulement être pérennes mais également être implantés au plus près des villages (dans des zones où n'apparaissent bien souvent que des accidents tectoniques secondaires de dimensions restreintes).

Cette optimisation consiste en un second lieu à réduire le coût des ouvrages en essayant de diminuer le taux d'échec et la profondeur moyenne des campagnes de forages.

A partir de 1994 nous avons effectué des reconnaissances géophysiques sur plus de 130 villages au Sénégal oriental dans divers contextes géologiques (schistes, granites, dolérites, grès, alluvions des fleuves Falémé et Sénégal,...) dans le cadre du programme « alimentation en eau et assainissement en milieu rural » (U.N.I.C.E.F et P.N.U.D), du programme de consolidation hydraulique N°4 (D.H.A du ministère de l'hydraulique) et du programme d'approvisionnement en eau de l'usine de traitement de l'or de Sabodalla (Eeximcor-Afrique).

Sur 71 forages déjà réalisés, 55 sont positifs soit un taux de réussite de 77.46% avec des débits allant de 1 à 20 m³/h.

3.2.1. - Analyse des résultats

Après l'exécution de 71 forages marteau-fond-de-trou (tab. 12 et fig. 47a,b,...47g) les données suivantes semblent être acquises :

a- Les profondeurs des niveaux aquifères révélées par les sondages électriques reflètent bien celles des niveaux aquifères identifiées sur les logs lithostratigraphiques des forages.

Mais il faut souligner d'une part qu'au niveau de certains forages on a une profondeur de foration inférieure à la profondeur prévue par l'investigation géophysique. Ceci s'explique par le fait qu'au cours de la foration des débits intéressants et suffisants pour satisfaire aux besoins réels sont obtenus avant d'atteindre les profondeurs maximales prévues par sondages électriques. C'est le cas des

Fig. 47a

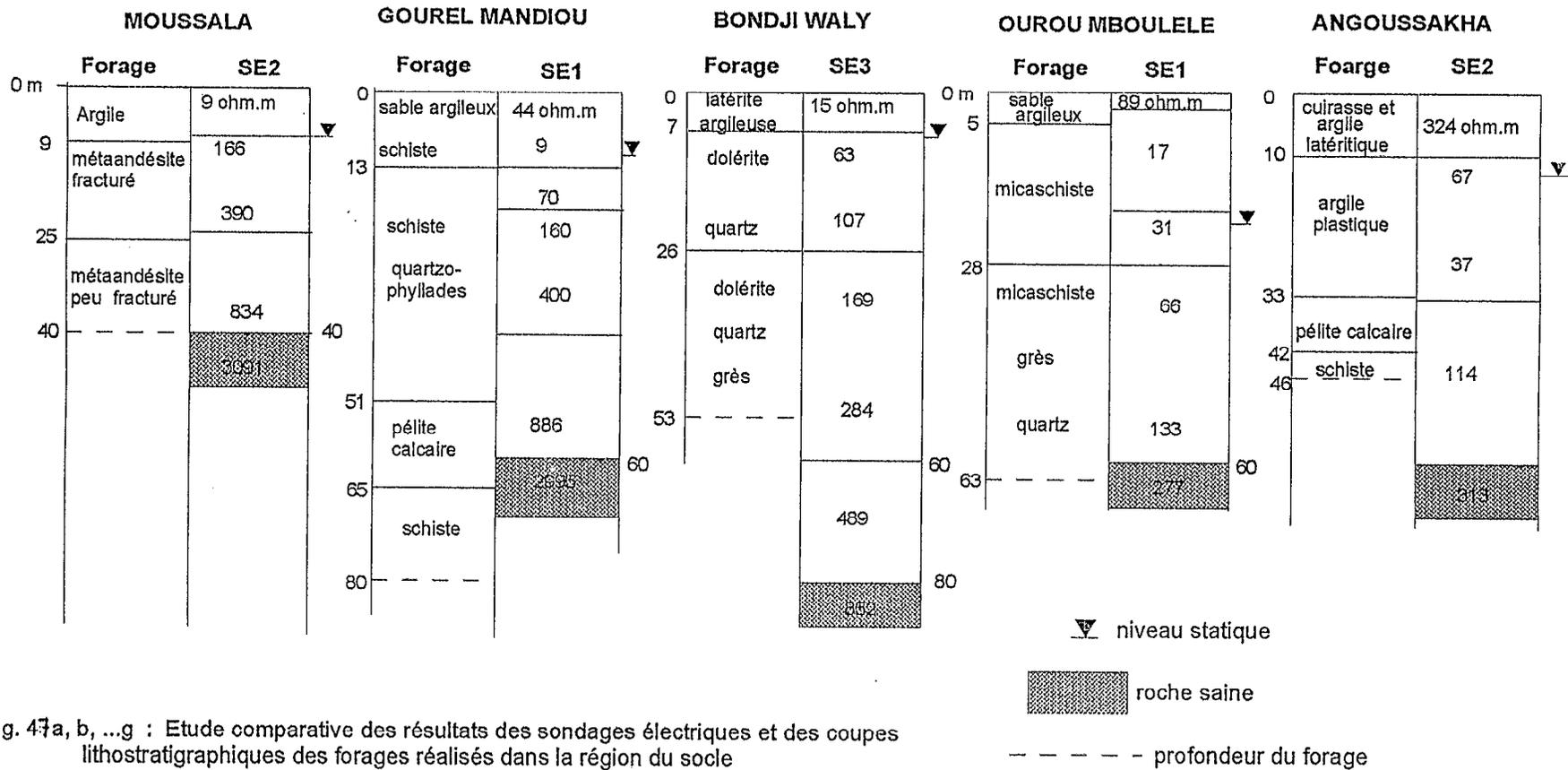


Fig. 47a, b, ...g : Etude comparative des résultats des sondages électriques et des coupes lithostratigraphiques des forages réalisés dans la région du socle

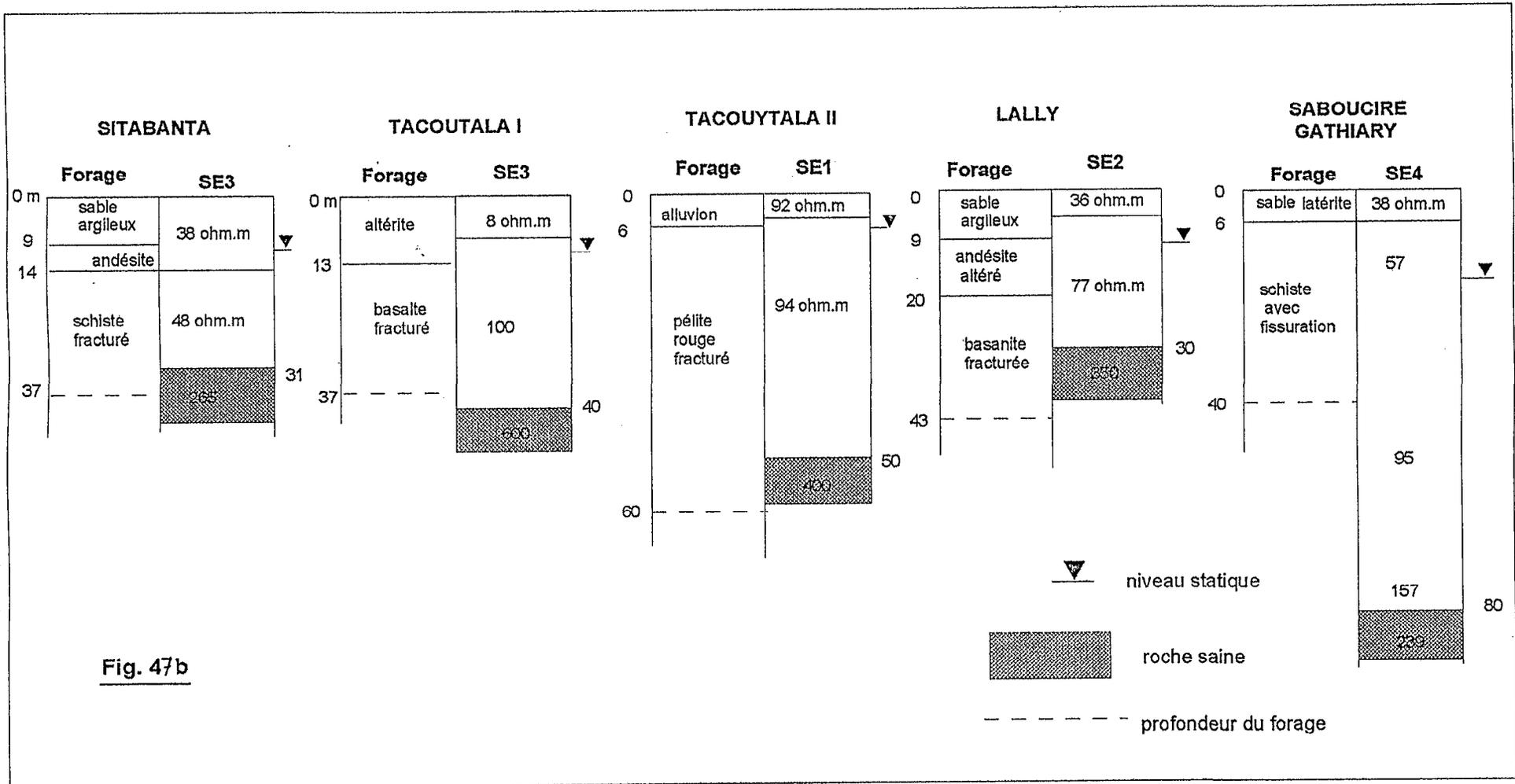
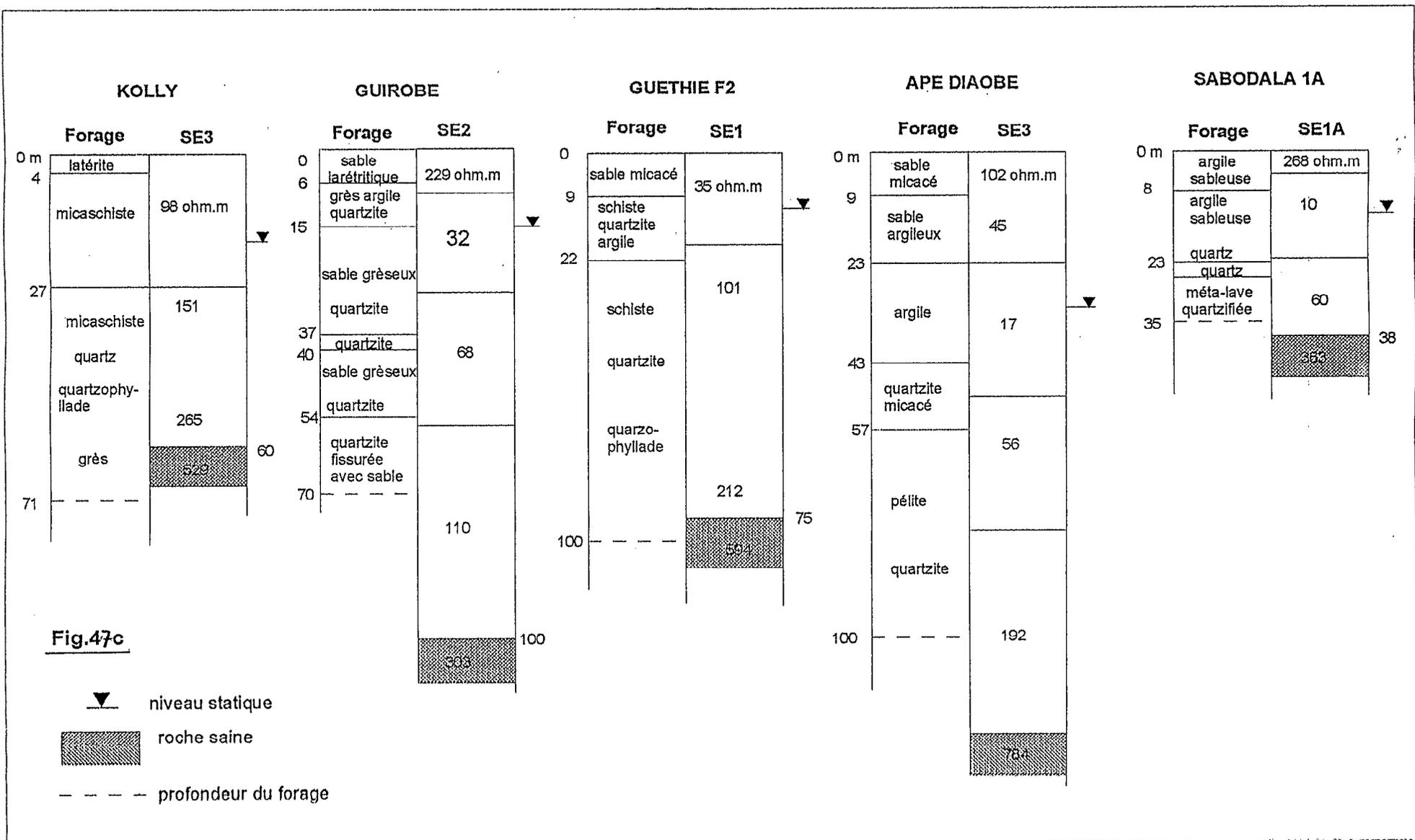
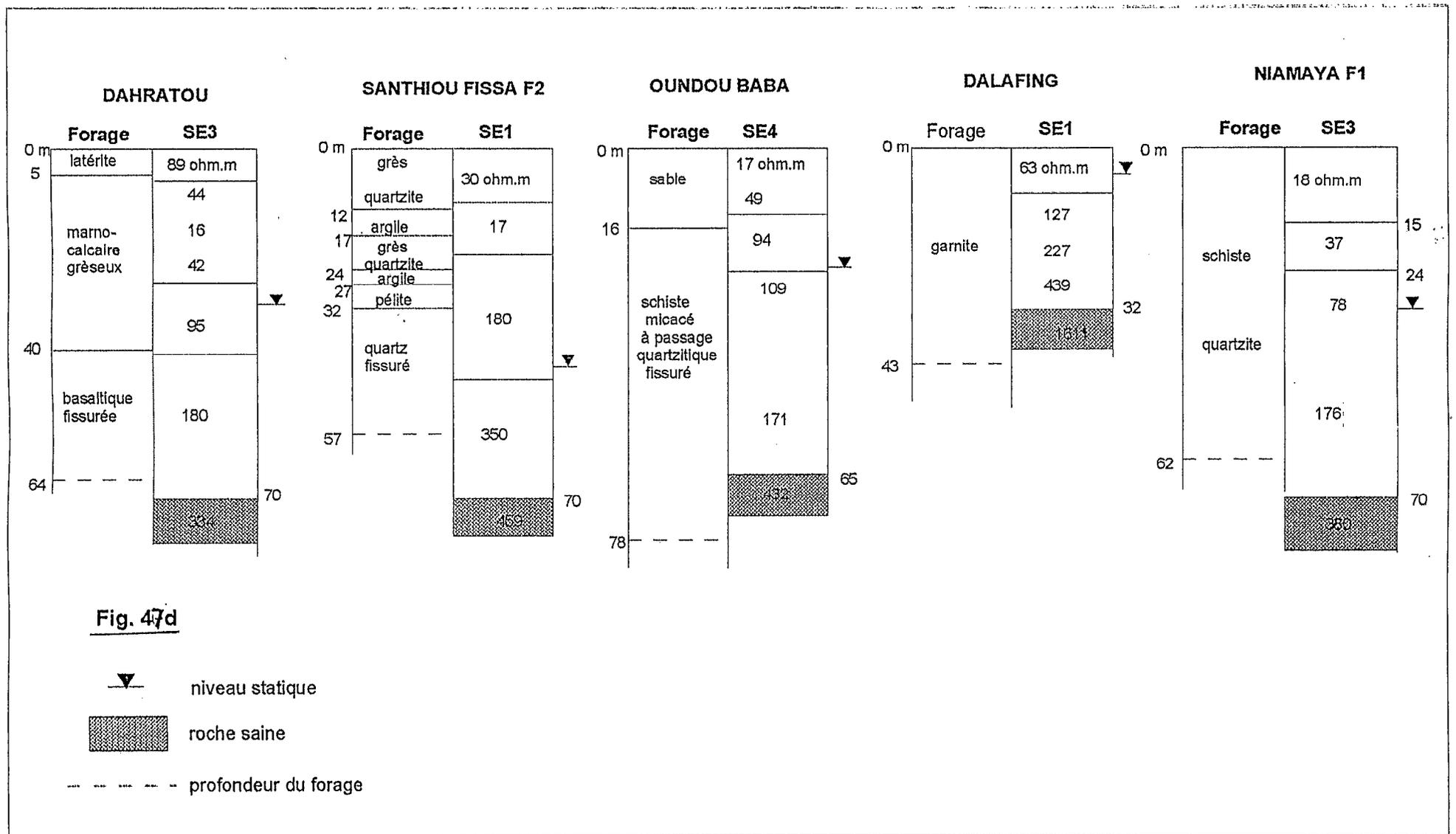
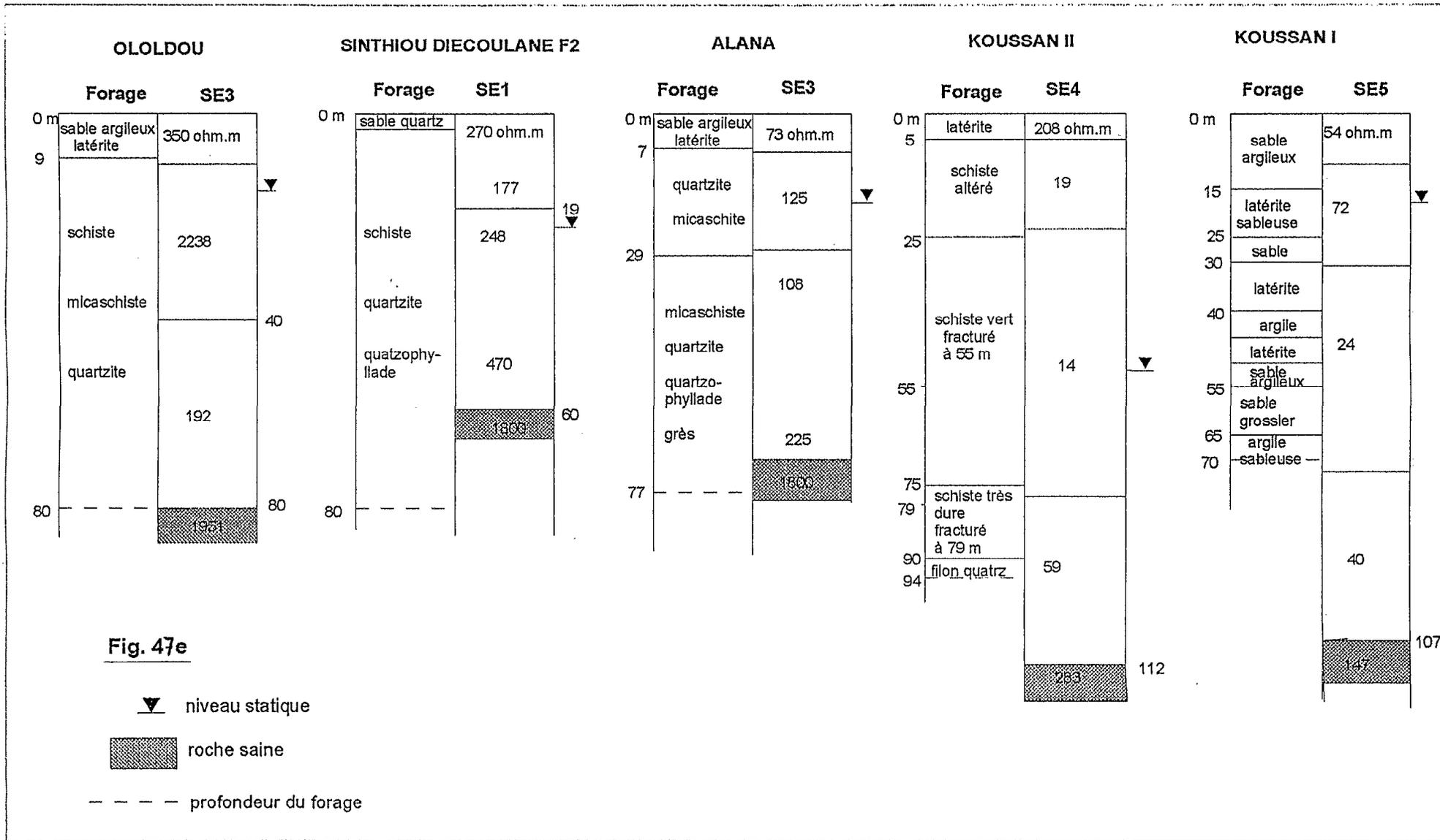
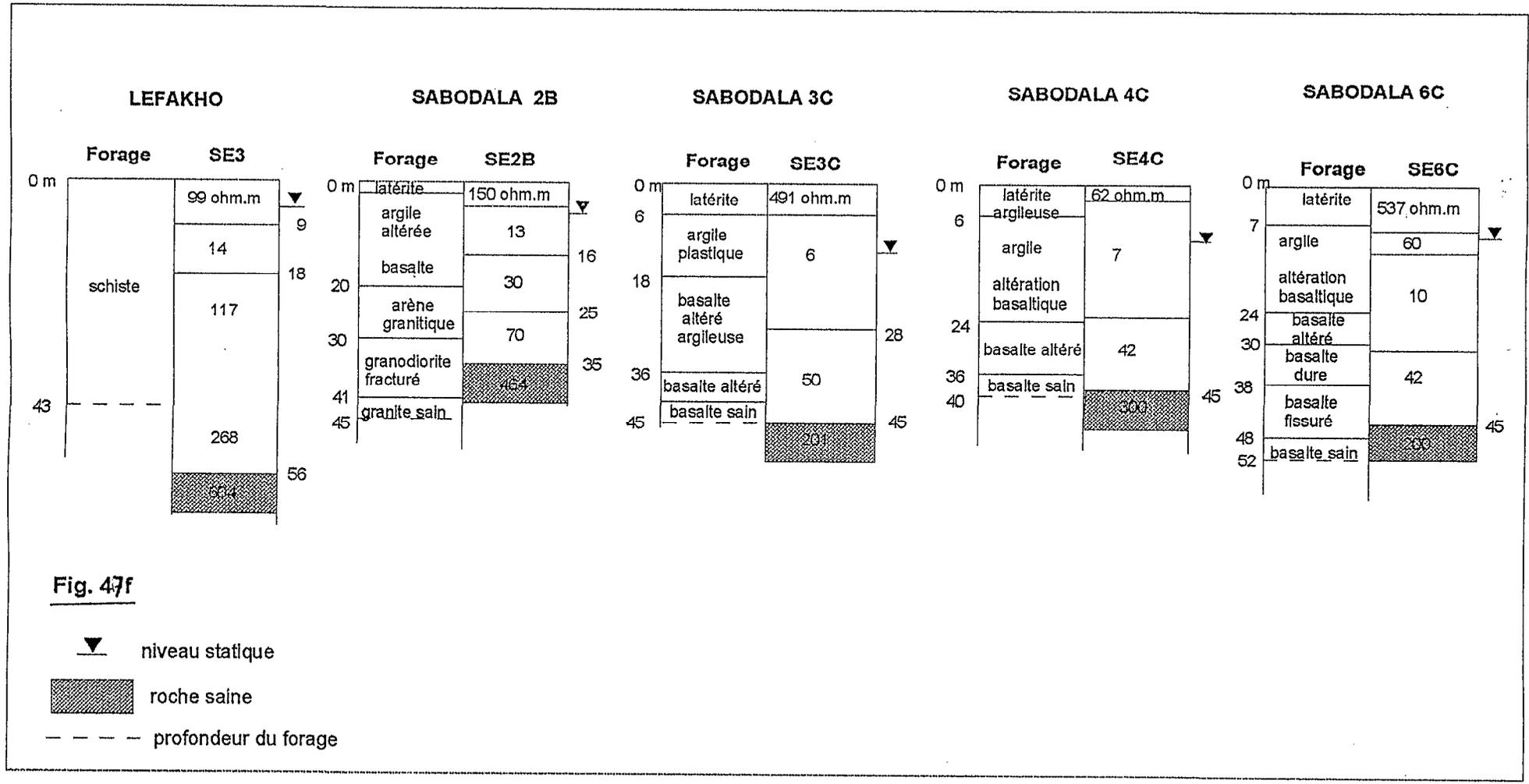


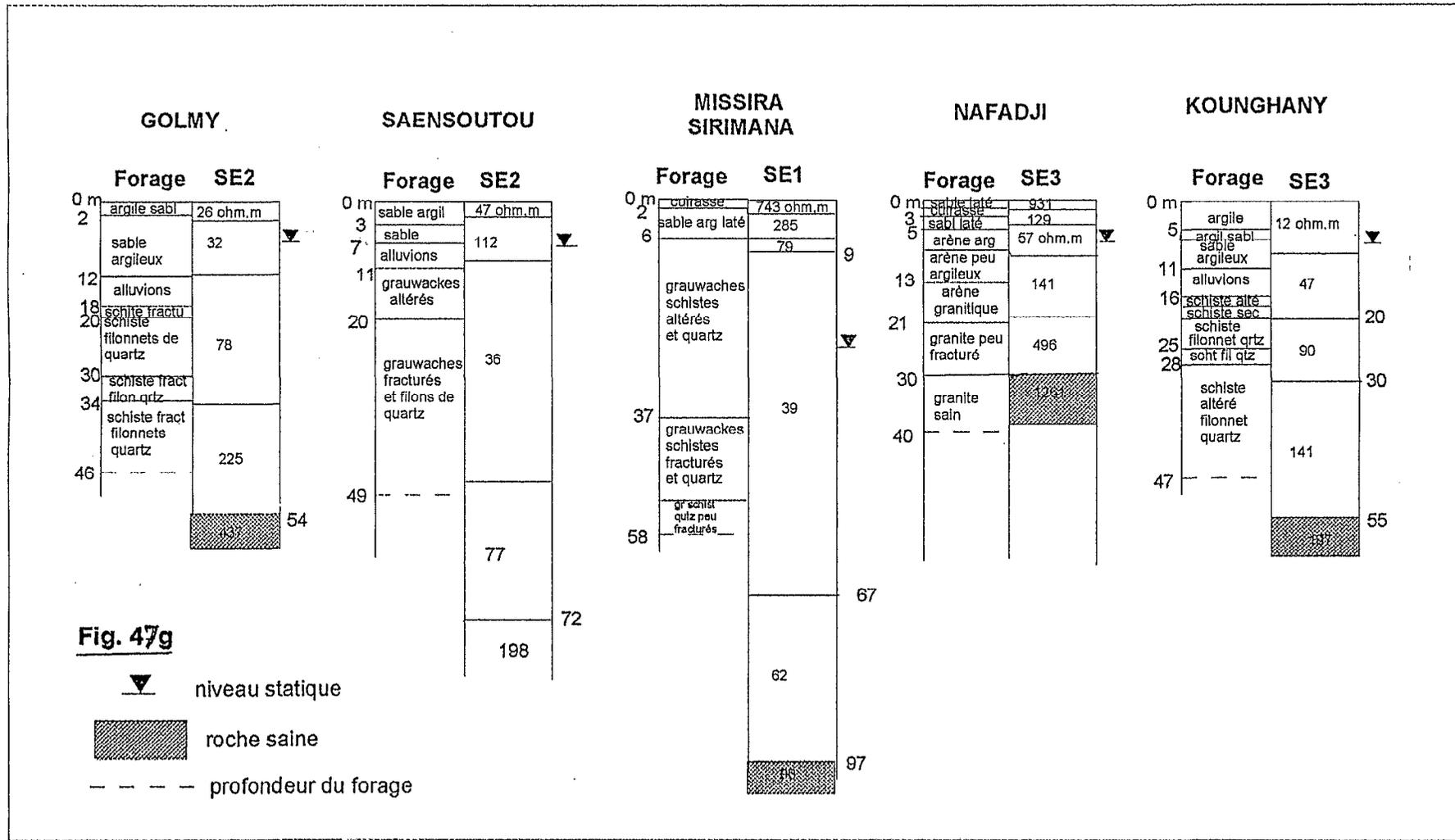
Fig. 47b











forages de Missira Sirimana, de Saensoutou, de Golmy, de Koungany, de Koussan I, Koussan II, Sabouciré Gathiary, Angousakha, Bondji Wally, Guirobé Léphakho, Saensoutou et de Missira Siramana, ect...

Tab. 12 : Etude comparative des résultats des sondages électriques et des coupes techniques des forages réalisés dans la région du socle

Localité (forage)	Faciès de l'aquifère	Niveau statique (m)	Profondeur maximale prévue/géophysique (m)	Profondeur du forage (m)	Débit forage (m ³ /h)	Résistivité aquifère (ohm.m)
Ololdou	schiste quartzite	15.47	80	80.08	1.029	192
Gourel Mandhiou	schiste quartz calcaire	9.35	60	80.22	20	400
Guethié F2	schiste quartzite	10.15	75	80.17	4	213
Sinthiou Diécoul F2	schiste quartzite	22.96	70	80.13	1.5	280
Bondji Waly F2	schiste quartzite	18.60	60	70.89	1.8	152
Bondji Waly F1	dolérite quartz grès	18.74	70	53	2	284
Bondji Diabougou	schiste micaschiste	9	70	64.91	2	132/228
Bondji Sébé	schiste quartz	15.70	65	55.76	2	124
Orou MBouléle	micaschiste grès qrtz	21.30	70	63	2.4	133
Kolly	micaschiste qrtz grès	13.7	60	72	4	357
Alana	micaschiste qrtz grès	18	70	77.05	1.62	225
Angoussakha	latérite argileu schiste	13	53	53	1.7	313
Koussan II	schiste filon quartz	51.01	112	94	8	60
Koussan I	sable latérite quartz	17.79	107	71	5	40
Sitabanta (Falémé)	schistes	10.36	31	37	10	48
Takoutala I (Falémé)	basalte fracturé	11.22	67	37	10	40
Takoutala II (Falémé)	pélite fracturé	6.04	50	60	8	-
Laly (Falémé)	basalte fracturé	10.24	30	43	7	70
Guirobé	sable gréseux quartzit	15.53	100	70	7.76	111
Saboussiré Gathiari	schiste	17.23	80	40	11.65	157
Dahratou	ro basaltique fissurée	32.10	70	64	3.56	149
Santhiou Fissa	quartzite fracturé	43.82	70	68	2	180
Oundou Baba	schiste micacé quartzit	23.58	65	68	1.68	171
Appé Diaobé	quartzite pélite	32.10	120	100	3.6	198
Moussala (Falémé)	métaandésite métabas	7.65	40	43.39	1	390
Dalafing	granite	5.07	32	39.85	9	227
Niamaya F1	schiste quartz	32.36	70	62	15	177
Niamaya F2	schiste quartz	25.4	70	60.78	3	114/215
Léphakho	schiste métamorphique	5.25	56	43.5	10	90
Médina Sabodala F2	schiste métamorphique	23.1	50	61.78	0.9	151
Ouassangran (Falémé)	schiste	9.17	30	31.7	3	114/215
Yaféra	grès pélite métamorp	10	30	45	4	60
Tourimé	schiste quartzite	10.44	60	82.68	5.4	80
Samba Niama	schiste micaschis qrtz	11.7	30	45	10	93
Niéméniké	quartz fissuré andésit	3.62	18.5	25	2	642
Dindéfélo	sable grès grossier	6.62	46	40	1.5	116
Sabodala 1A	filon quartz fracturé	13.10	38	35	10	60
Sabodala 2A	basalte fissuré	10.38	39.4	34	3.5	65
Sabodala 3A	basalte fissuré	9.55	38	32	5	44

Sabodala 2B	arène granit granodio	5.5	35	45	12.375	70
Sabodala 3C	basalte altéré fracturé	13.11	44.5	44.5	7.5	50
Sabodala 4C	basalte altéré	10.72	39	40	12.375	40
Sabodala 6C	basalte fissuré	8.5	38	52	12.375	49
Missira Sirimana	grauwacke schist qtz	25.70	97	58	8	39
Saensoutou	grauwacke quartz	8.15	72	49	16	37
Nafadji	granite	6.10	50	40	4.5	141/496
Golmy	alluvions schiste	6.55	60	46	12	79
Kounghany	alluvions schiste	7.35	80	47	20	90/141
Kawal F1	schiste quartzite	23.80	75	73.96	2	101/249
Babangol	pélite schiste quartzite	20.94	90	49.55	1.8	109
Kadiel	schiste quartzophyl	6.16	33	55.69	1.98	150/332
Niaroual	pélite schiste quartzite	33.50	55	67.73	1.5	173
Débélémane	pélite schiste quartzite	25.20	60	61.62	1.5	157
Débi	schiste quartz doléri pél	17.20	—	43.50	5	—

Ceci permet dans certains projets de réaliser des économies sur la profondeur totale de foration, permettant ainsi d'étendre la réalisation des forages sur un plus grand nombre de villages.

D'autre part la profondeur de certains forages dépasse de façon significative le toit de la roche saine identifiée par la géophysique. (Sinthiou Diécoulane, Oundou Baba, Kolly, et Gourel Mandiou, ...ect). En effet, sur les logs géoélectriques, les franges considérées comme aquifères reposent en général sur un socle sain relativement fissuré et qui peut donc constituer des réserves potentielles en eau restituables.

L'hétérogénéité des faciès peut aussi expliquer cette différence de profondeurs car les intervalles de résistivités du substratum résistant varient de façon significative. En passant des schistes homogènes à des schistes mélangés à des quartzites ou à des quartzophyllades, les valeurs limites des résistivités varient en augmentant. Si la couche d'altération est très conductrice, ce substratum peut comprendre aussi la partie fissurée aquifère du socle : le principe de suppression ou de quasi-suppression limite en effet la possibilité de détecter des terrains (de faible épaisseur) de résistivité intermédiaire entre le recouvrement et le substratum.

Certaines couches profondes n'affectent que très faiblement voir pas du tout la courbe de sondage obtenue sur le terrain. Ce type de suppression intervient généralement pour des couches minces dont les résistivités sont peu différentes de celles des couches voisines.

On observe en effet, cette suppression de couches sur les sondages électriques réalisés à Sinthiou Fissa SE1 (fig. 47d) et à Koussan I SE5 (fig. 47e).

b - Le toit de la roche saine située à de faibles profondeurs au niveau des villages localisés le long de la Falémé (Moussala, Lally, Takoutala I, Sitabanta) et en zone de granite (Dalaing).

Par contre les aquifères de schistes birimiens ou infracambriens sont caractérisés en général par des profondeurs importantes du substratum résistant.

d - Le taux d'échecs de 22.54% reste relativement élevé. Pour donner une explication, plusieurs hypothèses peuvent être envisagées :

d₁ - L'anomalie conductrice est due à un phénomène superficiel sans lien avec la fracturation (variation de résistivité dans le recouvrement).

Cette erreur est relativement rare lorsque les programmes se limitent à détecter le passage de la photo-fracture ; par contre, lorsque les études intéressent un secteur étendu, où la photo-fracturation est incertaine (zone totalement défrichée, centre localité, zone de culture) comme c'est le cas au niveau des villages intéressés par les programmes d'hydraulique villageoise, certaines anomalies peuvent être dues aux variations de résistivités du recouvrement (présence d'une épaisse couche d'argile).

La solution consiste à effectuer quelques sondages électriques complémentaires ou des profils de résistivité avec un dispositif carré surtout en milieu cristallin. Le dispositif carré permet d'établir la courbe de variation du coefficient d'anisotropie apparent (λa) en fonction de la distance. L'allure de la courbe ainsi obtenue permet de donner des précisions exactes quant à la présence ou non d'une zone fracturée.

d₂ - La zone fracturée présente un pendage

Ce doit être, à notre avis, le cas d'échec le plus fréquent car en fait, l'anomalie conductrice détermine la position de l'apex de la zone fracturée.

Selon les données théoriques, il est parfois possible de déterminer grâce à la dissymétrie des anomalies (dans le cas d'un traîné électrique) le sens du pendage d'une structure conductrice de type éilonien. On peut aussi lever cette alternative en réalisant un panneau multiélectrode.

d₃ - La zone fracturée est stérile (zone d'interfluve, zone à nappe profonde, fermeture des fractures).

Il faut noter que la roche est fissurée à toutes les échelles jusqu'à de très grandes profondeurs. Mais en hydrogéologie on ne s'intéresse qu'aux fractures ouvertes.

La fermeture des fractures avec la profondeur est liée à l'ancienneté du relief qui est elle même fonction du contexte géologique régional. Il faudra entendre par contexte géologique régional l'ancienneté des orogénèses et l'état du relief.

En effet dans les orogénèses récentes (alpines), l'état du relief fait que l'appel latéral au vide est encore important et les fractures peuvent être très profondes et on peut enregistrer d'importantes venues d'eau sous une couverture épaisse de plusieurs centaines de mètres.

Par contre dans les régions du craton Ouest-africain, les fractures ont été érodées jusqu'à leur base. Les fractures initialement peu profondes ou celles qui sont déjà été décapitées. Ce phénomène d'érosion réduit aussi les fonctions capacitatives assurées soit par un milieu poreux (sable, altérites, alluvions) soit par un

milieu microfissuré. Or la productivité d'un ouvrage de captage est liée à la conjugaison de deux fonctions qui sont les fonctions capacitive et drainante.

d₄ - La zone fracturée constitue une structure complexe (cas des filons de quartz ou des dykes et sils de roches type doléritique).

Fréquent dans le secteur de Bondji Waly et au Nord de Saraya où certains alignements photo-satellites, généralement les plus larges, correspondent à des dykes doléritiques.

Dans ces contextes la zone fissurée et perméable se localise le long des flancs de la structure dans les schistes ou dans les grès, alors que le dyke de dolérite est totalement imperméable.

d₅ - La non prise en compte du temps de réaction de la nappe au cours de la foration (cas des aquifères de schistes birimiens ou infracambriens)

En effet au cours de la foration il est nécessaire de procéder à des arrêts fréquents pour permettre à la nappe de réagir en s'autodéveloppant car la percussion continue du marteau et la pression hydraulique développée par le compresseur peuvent constituer en elles mêmes une cause du colmatage de l'aquifère.

Cette technique est d'ailleurs bien maîtrisée par l'équipe de l'unité de forage marteau-fond de trois de l'U.N.I.C.E.F ; ce qui leur permet d'obtenir des débits d'exploitation au niveau de certains forages (jugés antérieurement sites non productifs cas des villages de Sinthiou Diécoulane, Alana et Moussala) où il a été enregistré de très faibles quantités d'eau à la fin d'une foration en continue. Mais le lendemain la nappe a réagit positivement en donnant des débits allant de 1 à 1.5 m³/h.

L'emploi d'un matériel adéquat de forage, en l'occurrence l'utilisation de tubes de soutènement en casing acier peut dans certains contextes géologiques être un facteur de réussite d'un forage. En effet l'absence de ces tubes dans les secteurs où l'on rencontre une nappe des sables alluvionnaires au-dessus de l'aquifère du socle fracturé entraîne au cours de la foration des éboulements conduisant à l'abandon du forage comme c'est le cas dans les localités de Léfakho et Dindéfélo ou à un retard considérable dans l'exécution du forage (cas du forage de Golmy en septembre 1998).

3.3 - Apport complémentaire de la prospection géophysique à l'analyse de l'image satellite et de la photo-aérienne

La géophysique et tout particulièrement la prospection électrique, est un complément indispensable et déterminant de la photo-interprétation et des images satellites car elle permet de :

* déterminer avec une précision de l'ordre de quelques centimètres, le passage de l'accident photo-aérien par exemple ;

* préciser s'il s'agit d'une fracture simple ou complexe, d'un contact géologique jalonné ou non par une faille ou d'un contact entre deux compartiments se différenciant par l'épaisseur des altérites ;

* choisir le long de la fracture la zone la plus favorable en évitant les zones de hiatus ou de discontinuité de la zone fracturée ;

* d'établir des hypothèses sur le sens du pendage de la zone fracturée (traîné électrique). Mais l'emploi de profils multiélectrodes dont la modélisation permet d'avoir les structures hydrogéologiques en deux dimensions, constitue actuellement un outil efficace dans l'identification des anomalies conductrices en précisant leur pendage et leur largeur.

La prospection électrique permet en outre de palier aux insuffisances de l'analyse de l'image satellite et de la photo-aérienne lorsque :

- il existe une très forte épaisseur de latérites ;
- les caractères des fractures sur les images satellites et les photos-aériennes s'estompent ou se modifient sous l'influence du défrichement, des cultures et de l'urbanisation. Or, il est certain qu'un point d'eau, pour qu'il soit utilisé doit avant tout se situer dans la localité ou à moins de 200 à 300 mètres et présenter doit avoir une eau dont la potabilité est assurée.

D'une part cette nécessité d'implanter des points d'eau à proximité immédiate des villages confère une importance primordiale à la géophysique qui contribuera à minimiser le taux d'échec en région de socle.

D'autre part la nécessité de garantir dans une certaine mesure une eau potabilité aux populations fait de l'étude de la morphologie de la surface piézométrique constitue une étape non négligeable lors des travaux de prospection et des essais expérimentaux sur le terrain, car permet de définir le sens de l'écoulement des eaux souterraines, d'identifier les zones de recharge et d'alimentation et de déterminer la ligne de partage des eaux. En hydraulique villageoise, et dans les secteurs où le socle affleure et où les argiles de surface sont absentes, la connaissance du sens de l'écoulement des eaux souterraines constitue (après l'établissement des cartes linéamentaires) une information importante pour le positionnement des profils électriques lors de la prospection sur le terrain.

En effet, les ouvrages de captage implantés le long des failles ou le long des zones de cisaillement en aval par rapport au village et dans le sens de l'écoulement des eaux souterraines, sont sous la menace d'une pollution par les nitrates provenant de l'infiltration des eaux des fosses d'aisances (latrines) et du lessivage des déchets liés à la production animale.

Rappelons qu'au-dessus d'une valeur guide de 50 mg/l, la présence des nitrates a des effets nocifs sur la santé des bébés et des personnes âgées (méthémoglobinémie).

Conclusion

Les ressources des nappes alluviales, celles de la cuirasse et de la carapace latéritique recouvrent en grande partie les formations géologiques du socle au Sud du 14^{ème} parallèle. Mais de par leur gîte, ces nappes sont très sensibles aux irrégularités de la pluviosité.

Aujourd'hui la croissance démographique dans cette région, le développement de l'élevage et des cultures maraîchères, ainsi que les perspectives d'installation d'unités d'exploitation de l'or dans la région (mine de Sabodala avec un besoin de 400 m³/jour), font que le recours aux ressources profondes des terrains anciens représente la solution la plus sûre.

La prospection des ressources profondes des terrains anciens est liée à la recherche de conditions naturelles qui peuvent avoir comme critères favorables :

- les régions où le métamorphisme qui affecte certaines formations est le plus poussé.

En effet, les terrains métamorphisés constituent un matériau plus perméable, plus accessible à l'infiltration que les terrains non métamorphiques ;

- les grands accidents tectoniques (failles), les zones de microplissements, les filons de quartz fracturés, les zones de contact de deux formations géologiques inégalement plastiques caractérisés par une dysharmonie de plissement (contact schistes-quartzites ; contact filons doléritiques-encaissant) au voisinage desquels les roches sont le plus intensément fissurées.

L'étude géologique et hydrogéologique des formations aquifères du Sénégal Oriental montre que la connaissance très détaillée de la stratigraphie et de la tectonique des diverses formations est indispensable à la prospection des nappes qu'elles sont susceptibles de receler.

La meilleure connaissance des faciès et de leur répartition permettrait très certainement de découvrir certains niveaux aquifères. Cependant les problèmes à résoudre sont à une échelle plus petite et très dispersée puisqu'il s'agit en général de rechercher des ressources pérennes pour les villages et près de ces villages. Il faut à cet effet souligner combien la télédétection et la géophysique, l'électrique en particulier peuvent apporter une contribution particulièrement précieuse pour la localisation précise des zones d'altération, des failles, des dysharmonies, qui sont autant de zones favorables à la présence d'eau dans les terrains anciens.

Donc le développement de méthodes de prospection appropriées est indispensable pour identifier et caractériser les aquifères afin d'augmenter les chances de succès des forages qui passe aussi par une bonne maîtrise des techniques marteau fond-de-trou en zone de socle.

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES

L'objectif de ce travail était, à l'aide de différentes méthodes d'investigation, de localiser et de caractériser les aquifères du socle du Sénégal oriental en général et du massif de granite de Saraya en particulier. Les objectifs spécifiques étaient :

- tester la réponse de l'électrique pour localiser et quantifier la zone de broyage, la profondeur du toit du substratum des structures aquifères associées aux linéaments et contacts géologiques identifiés sur image SPOT,
- déterminer les caractéristiques physiques et chimiques des aquifères,
- montrer le rôle de la composition chimique et minéralogique des roches dans la minéralisation des eaux des nappes

Les travaux qui ont été menés dans cette région sont présentés dans l'ordre suivant : d'abord l'étude du milieu naturel (géographie physique et géologie) ; ensuite la localisation et la caractérisation physique et chimique des aquifères dans la partie hydrogéologique.

1 - LE MILIEU NATUREL

Le réseau hydrographique très développé est tributaire de trois grands cours d'eau (le Sénégal, le Falémé, la Gambie) dont les débits d'écoulement sont fonction des saisons. Dans ces domaines sahélo-soudaniens et soudaniens avec une moyenne annuelle respective de 500 mm et 1100 mm de pluie, la quantité d'eau capable de drainer est très forte mais réduite à une courte période de l'année.

L'étude géologique a permis de constater que le socle du Sénégal oriental est constitué par un ensemble de roches d'origine sédimentaire ou volcanique et de massifs de granites appartenant à la chaîne pan-africaine des Bassarides. D'apparence plate et monotone, cette région a été le théâtre d'importants mouvements tectoniques associés à des phénomènes d'érosion et métamorphiques qui ont donné naissance à une hétérogénéité des faciès et à un réseau intense de fracturations.

L'interprétation des données de résistivités électriques est fonction de la nature et de la composition minéralogique des faciès géologiques. L'hétérogénéité de ces faciès qui a pour conséquence des propriétés physiques (porosité, perméabilité et conductivité vis à vis du passage du courant électrique) différentes, font que l'étude de la géologie détaillée du secteur apparaît donc indispensable pour l'interprétation géoélectrique et pour la détermination de zones géologiques susceptibles d'avoir un potentiel aquifère important.

Ces différents phénomènes induisent des caractéristiques hydrogéologiques particulières qui sont : nappes discontinues, peu étendues et aquifères peu profonds. La productivité de ces aquifères est très tributaire à leur nature, au degré de fissuration, de fracturation et à leurs caractéristiques pétrographiques.

2 - HYDROGEOLOGIE

La localisation et la caractérisation physique et chimique des aquifères du batholite de Saraya et ses environs ont porté sur la mise en oeuvre de plusieurs méthodes qui sont : la télédétection satellitaire, la géologie, la géophysique (l'électrique), la piézométrie et l'hydrochimie.

* La télédétection

Les images satellites résultant du traitement des scènes SPOT sont utilisées pour l'identification des contacts granites-volcano-sédimentaires, des filons de roches basiques, des zones de cisaillement et des failles qui sont autant de structures susceptibles de constituer des réserves aquifères.

Mais comme les relevés de ces différentes structures ne se fondent pas sur des objets géologiques vrais, la part d'interprétation subjective y est appréciable. C'est pourquoi l'exploitation rationnelle des données des images satellites et des photos-fracturations ne peut se faire sans contrôle sur le terrain à l'aide de cartes géologiques et avec l'emploi de méthodes de prospection géophysique.

* La géophysique

Trois dispositifs d'investigation électrique ont été utilisés : le sondage, le traîné et la multiélectrode. Ils ont permis d'identifier sur le terrain des structures hydrogéologiques liées à l'interprétation de l'image satellite en mettant en exergue les contacts géologiques ainsi que les zones de cisaillement.

La prospection électrique a permis de localiser les deux types d'aquifères : les aquifères superficiels captés par les puits (cuirasse latéritique, altérites latéritiques, altérites argilo-sableuses) et les aquifères profonds captés par forage (socle fracturé).

Le socle fracturé du substratum rocheux est l'aquifère le plus recherché en prospection car le drainage des eaux y est plus élevé et les risques de colmatage des ouvrages de captage par les particules fines argileuses y sont minimisés. Il est en général à l'abri des fluctuations piézométriques saisonnières et des risques de pollution.

L'obligation d'implanter des points d'eau à proximité immédiate des villages, en marge d'une zone favorable introduit parfois une incertitude que l'on est tenté de lever, ce qui confère à la géophysique une importance primordiale.

* La piézométrie

La construction et l'interprétation de la courbe de dépression de la surface piézométrique ainsi que la détermination du gradient hydraulique moyen, permettent d'aboutir à des conclusions intéressantes pour la caractérisation hydrogéologique des aquifères.

En effet, la variation de l'espacement des courbes isopièzes signifie une variation de la perméabilité, du débit ou de la section d'écoulement de l'aquifère.

Ces variations sont dues soit à une hétérogénéité latérale de faciès, soit à un contact entre deux assises d'âges différents comme c'est le cas dans le secteur de Faraba-Baïtilaye où l'on passe des granites aux roches volcano-sédimentaires. La réduction ou l'augmentation de la puissance du complexe aquifère (remontée ou enfoncement du toit du substratum sain), entraîne aussi des variations de la section d'écoulement.

Les cartes des eaux souterraines permettent d'obtenir des données valables sur les niveaux des aquifères et leur comportement hydrologique : délimitation, des zones hydrogéologiques, détermination des lois générales de l'écoulement, étude du régime alimentation-drainage (pertes naturelles et artificielles) et données générales sur les caractéristiques hydrogéologiques. Ce travail est indispensable à l'établissement de programmes précis et efficaces de reconnaissances .

* Géologie et hydrochimie

Dans l'ensemble, les eaux du batholite de Saraya et ses environs sont de bonne qualité concernant les éléments chimiques dosés. Mais, puisque des campagnes de prospection minière ont révélé la présence d'indices d'*uranium* dans la région, il serait important d'inclure dans les futurs programmes de recherche hydrogéologique, le dosage de cet élément dans les eaux afin de prévenir d'éventuels accidents sur la santé des populations.

On a pu définir plusieurs caractéristiques des nappes et plusieurs niveaux de relations entre la minéralisation des eaux et la géochimie des aquifères.

La qualité de l'eau dépend donc étroitement de la composition chimique et minéralogique des roches, plus vraisemblablement d'une différence dans la nature des minéraux primaires susceptibles de s'altérer.

* Cependant les relations entre la géochimie des eaux et la géochimie des roches aquifères sont tenues, car on retrouve que partiellement les éléments des roches dans l'eau. En effet, les éléments engagés dans les minéraux constitutifs des roches ne sont libérés qu'en fonction de leur mobilité et de l'altérabilité des minéraux ; une partie d'entre eux peut être précocement réintégrée dans de nouvelles structures cristallines.

CONCLUSIONS

La méthodologie de travail adoptée pour la localisation et la caractérisation des aquifères du socle du Sénégal oriental en général et du batholite de Saraya en particulier associe plusieurs disciplines : géologie, télédétection, géophysique, piézométrie et hydrochimie.

Ceci a permis d'abord de faire la corrélation entre les résultats des différentes méthodes utilisées en vue d'obtenir une meilleure identification et une caractérisation des aquifères.

En prospection hydrogéologique l'utilisation de la méthode électrique s'est révélée efficace (77.46% de taux de succès) dans le cadre du programme d'implantation de forages dans les villages du Sénégal oriental. De tels résultats confirment que l'hydrogéologie des roches cristallines et cristallophylliennes repose sur la recherche des fractures par images satellites, photo-interprétation et par prospection géoélectrique.

En zone de socle, la productivité d'un ouvrage de captage ne dépend pas seulement de son débit.

Elle est aussi fonction de la qualité des eaux, car une pollution, surtout par les nitrates, peut provoquer l'abandon d'un forage. Donc la connaissance du sens de l'écoulement des eaux, la connaissance des zones de drainage et d'alimentation sont aussi autant d'éléments qui participent à la réussite d'un programme de recherche hydrogéologique.

L'étude géophysique pourra aisément identifier les zones stériles où le complexe conducteur s'avère absent. Cet apport méthodologique contribuera donc à l'optimisation des programmes de recherche de zones favorables à l'implantation de puits ou de forages, à condition toutefois que le coût de la prospection électrique nécessaire ne soit pas supérieur à l'économie réalisée du fait de la diminution du taux d'échec.

Le taux de succès dans une campagne de forage ne dépend pas seulement de l'existence du système fracturé décelé par image satellite ou photo-interprétation et confirmé par la géophysique. Le matériel de foration ainsi que la maîtrise des techniques de forages marteau fond-de-trou y sont déterminants.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Albouy Y., Pion J.C. et Wackermann J.M.- 1970.-** Application de la prospection électrique à l'étude des niveaux d'altération. Cah. ORSTOM, sér. Géol. (1970), II, 2, 161-170.
- Astier J.L.- 1971 -** Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Masson et Cie, Paris, 1971. 277p.
- Aubouin J., Brousse R. et Lehman J.P.- 1975.-** Précis de géologie 1. Paris, Bordas, 717 p.
- Bassot J.P.-1966.-** Etude géologique du Sénégal oriental et de ses confins Guinéo-maliens. Mém. Bur. Rech. géol. min., Paris, 40, 322 p.
- Bassot J.P.- 1987.-** Le complexe volcanoplutonique calco-alcalin de la rivière Daléma (Est Sénégal) : Discussion de sa signification géodynamique dans le cadre de l'orogénie éburnéenne (Protérozoïque inférieur). Journal of African Earth Scienc, 6, N°1, pp 109-115
- Bernadi A., Detay M., Machard de Gramont H.- 1988.-** Recherche d'eau dans le socle africain, corrélation entre les paramètres géoélectriques et les caractéristiques hydrodynamiques des forages en zone de socle. Hydrogéologie, n° 4, 1988, pp. 245-253.
- Bessoles B.- 1977.-** Géologie de l'Afrique. Le craton ouest africain. Mém. B.R.G.M., Paris, n° 88, 402 p.
- Blot A.- 1970.-** Les nappes phréatiques au Sénégal oriental. Données géochimiques sur les eaux. ORSTOM. Dakar-Hann Sénégal, 34 p.
- Blot A.- 1980 -** L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal. Thèse de Doctorat ès Sciences (1980) et Mémoires ORSTOM n° 114, Paris 434 p.
- Bois J.- 1962.-** Mission Ouest-Saraya. Rapport de fin de campagne 1962. B.R.G.M. Dak. 62 - A30 28 p.
- Bro M., Hubert C.- 1978.-** Synthèse sur l'emploi des techniques géophysiques appliquées aux recherches d'eau dans les fractures du Mali. Conférence Africaine sur les techniques d'exploitation des eaux souterraines. CATEES/BAMAKO. Novembre 1978 et Bul. du CIEH n° 37, 38.
- Camerlo J. Fahy J.C. et Haubert M.- 1977.-** Premiers résultats des forages destinés à l'alimentation en eau des villages réalisés dans le Birimien de Côte-d'Ivoire. Conférence des Nations Unies sur l'eau de Mar Del Plata (Argentine). Mars 1977 et CIEH bul. N) 28-29 de 1977.
- Camus H. et Debuissou J.- 1964.-** Etude hydrogéologique des terrains anciens du Sénégal Oriental. Campagne 1962-1963. Rapp. B.R.G.M., Dakar, Dak. 64-06, 143 p. multigr.
- Castany G.- 1963.-** Traité pratique des eaux souterraines. Dunod Paris, 657 p.
- COGEMA.- 1977. -** Rapport inédit.
- Dahlin T.- 1995. -** Manual for Lund Imaging System. Draft version 1995-03-01, 62 p.

- Dia A., Diallo D.P., Debat P., N'Gom P.M., Sylla M.**- 1993.- Pétrographie et géochimie des roches métavolcanodétritiques du Protérozoïque inférieur du supergroupe de Mako (Sénégal, Afrique de l'Ouest) : incidences géotectoniques. Publi. Occas 1993
- Engalenc M.**, 1978.- Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. CIEH, Février 1978.
- Gabalda G., Tabbagh J.**- 1994.- Programme d'interprétation de sondages électriques (méthode Schlumberger). Version 4.
- Hen D.J.**- 1989.- Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water : U.S. Geological Survey water supply paper 2254, 263 p.
- Jung A.**- 1997.- Précis de pétrographie. Paris, Masson (3e éd.) 32p.
- Koussoubé Y.**- 1996.- Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso. Cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (province du Yatenga). Thèse 3ème cycle, U.C.A.D., 206 p. + annexes.
- Loke M.H.**- 1996.- Rapid resistivity inversion. Version 2. 14C.
- Milesi J.P., Diallo M., Dommagnet A., Feybesse J.L., Keita F., Ledru P. et Vinchon C.**- 1986.- Caractérisation litho-structurale de deux ensembles successifs dans les séries birimiennes de la fenêtre de Kédougou (Sénégal-Mali) et du Niandan (Guinée) ; implication géologique. CIFEG, Paris, Pub.occasionnelle, 10, 113-121.
- Meyer De Stadlhofen C.**- 1991.- Application de la géophysique aux recherches d'eau, 183 p.
- N'Diaye P.M., Dia A., Vialette Y., Diallo D.P., N'Gom P.M., Sylla M., Wade S.**-1997. - Les granitoïdes du Protérozoïque inférieur du supergroupe de Dialé-Daléma. Données pétrographiques, géochimiques et géochronologiques nouvelles. Publi. Occas 1997.
- N'Gom P.M.**- 1985.- Contribution à l'étude de la série birimienne de Mako dans le secteur aurifère de Sabodala (Sénégal oriental). Thèse Doc.Univ.Nancy,Fr., 134p.
- O.M.S.**- 1994.- Directives de qualité pour l'eau de boisson (2e éd, volume 1).
- S.I.G.R.E.S.**- 1994.- Bilan-Diagnostique des ressources en eau du Sénégal. Projet MH/PNUD/DDSMS-SEN/87/006 « Planification des ressources en eau ».
- Villeneuve M.**- 1984.- Etude géologique sur la bordure Sud-Ouest du craton Ouest-Africain (La suture Panafricaine et l'évolution des bassins sédimentaires Protérozoïques et Paléozoïques de la marge NW du continent de Gondwana). Thèse de Doctorat ès-Sciences, Marseille, 552 p.
- Witschard F.**- 1965.- Contribution à l'étude géologique, pétrographique et métallogénie des massifs granitiques du Sénégal oriental. Mém. B.R.G.M., Paris, 44, 170 p.
- Witschard, F.**, 1995 - Rapport inédit.
- Zohdy A.R.A., Bisdorf J.R.**- 1989.- Schlumberger Sounding data Processing and interprétation program. Version 1.82.

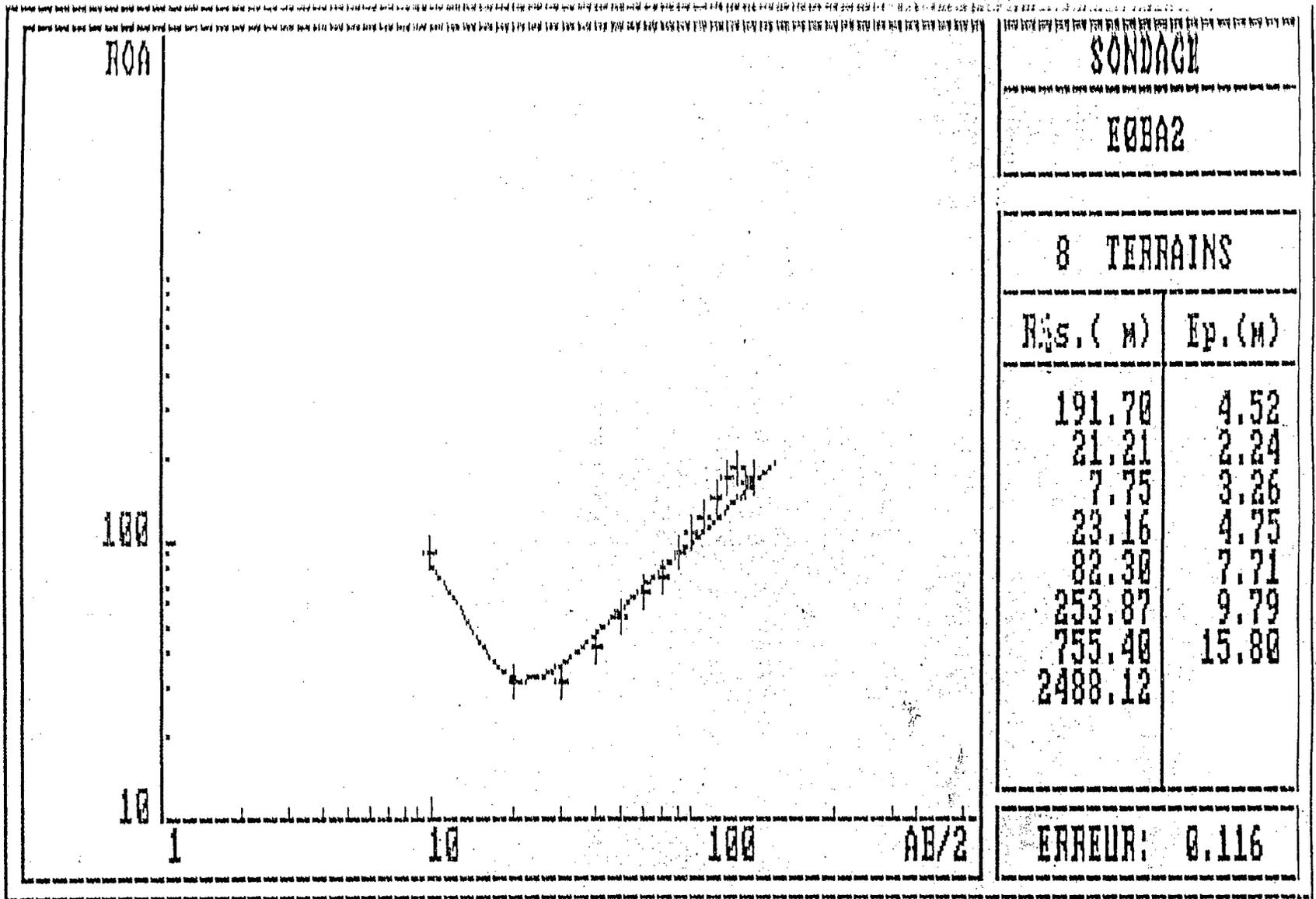
ANNEXES

ANNEXES

ANNEXE I-1 : SONDAGE ELECTRIQUE COMPOSITE A BADIOULA

ANNEXE I-2 : MISSION GEOPHYSIQUE « SOCLE DU SENEGAL ORIENTAL DE 1994
A 1998 »
LOCALISATION GPS DE QUELQUES VILLAGES CITES DANS LE TEXTE

ANNEXE I-3 : MISSION GEOPHYSIQUE « SARAYA » DU 11/06/96 AU 26/06/96
LOCALISATIONS GPS



ANNEXE I - 1 : Sondage électrique composite de Badioula

**ANNEXE I-2 : MISSION GEOPHYSIQUE « SOCLE DU SENEGAL ORIENTAL DE
1994 A 1998 »**

LOCALISATION GPS DE QUELQUES VILLAGES CITES DANS LE TEXTE

LOCALITE	LATITUDE	LONGITUDE
Gougél Mandiou	14° 42,00'	12° 19,91'
Ololdou	14 50,45	12 31,40
Géthié F2	14 46,36	12 22,00
Sinthiou Diécoulane	14 54,54	12 34,20
Bondji Waly	15 00,82	12 36,00
Ourou MBouléle	15 00,00	12 40,10
Kolly	14 56,90	12 38,41
Alana	14 55,90	12 37,85
Angoussakha	12 33,54	12 25,24
Koussan	14 07,64	12 26,64
Sitabanta	14 06,27	12 12,34
Tacoutala I	14 09,00	12 14,30
Laly	14 09,00	12 11,22
Guirobé	14 28,63	12 14,02
Saboussiré Gathiry	14 19,36	12 06,73
Dahratou	14 35,58	12 19,14
Santhiou Fissa	14 24,11	12 22,15
Oundou Baba	15 00,00	12 39,81
Apé Diaobé	15 00,00	12 44,30
Sabodala	13 09,54	12 07,00
Moussala	13 41,73	12 04,21
Dalafing	12 51,27	11 41,22
Niamaya	13 09,54	11 65,63
Léphakho	13 10,64	11 57,19
Médina Sabodala	13 12,54	12 07,85
Ouassangran	13 12,54	11 33,10
Yafèra	14 47,18	12 17,38
Tourimé	14 54,54	12 30,84
Niéméniké	12 53,18	12 23,00
Dindéfélo	12 23,18	12 19,35
Goundiourou	14 14,18	12 20,47
Mamakono	13 10,64	12 03,93
Yérimale	14 15,00	12 27,48
Ouroussouleye	14 30,00	12 21,87
Babangol	12 44,02	14 58,09
Tata Btchili	14 53,72	12 35,61
Kadiél	14 39,00	12 22,71
Niagana Tiédél	14 44,18	12 41,49
Koïninguél	14 50,73	12 40,65
Koungany	14 50,45	12 24,00
Saensoutou	13 23,47	11 38,40
Golmy	14 49,22	12 20,67
Nafadji	12 37,28	11 36,78

SECTEUR DE FARABA

FO: FORAGE FARABA	12 48 59	11 41 47
ME: FARA1_S	12 48 54	11 41 51
ME: FARA2_S, FARA3_W (350M SE FARA1)	12 48 46	11 41 46
ME: FARA4_S, FARA5_W (-160M FARA2)	12 48 43	11 41 38
ME: FARA6_S (-320 M)	12 48 39	11 40 35.5
TR: début	12 48 57.5	11 41 52.5
TR: cf profil	12 48 46.5	11 41 44.5
SE: FARA1 SANS EXTENSION	12 48 54	11 41 51
SE: FARA2 SANS EXTENSION	12 48 46	11 41 46
SE: FARA4B	12 48 43	11 41 38
PU: FARABA VILLAGE	12 48 58	11 41 55
PU: FARABA ABP	12 48 58	11 41 56

SECTEUR BORNE ASTRO

AS: BORNE ASTRO au SE de SARAYA	12 47 57.5	11 43 39.5
TR: début	12 47 58	11 43 39.5
TR: cf profil	12 47 48	11 43 32
ME: BORNE1_S BORNE2_W	12 47 57.5	11 43 39.5
ME: BORNE3_S (à 160M de BORNE1) vers Saraya		
SE: BORNE décalé de 20 m vers Saraya/borne astro et ortho à la route		

SECTEUR DE BAITILAYE

TR: début 3 à 400M sud village	12 41 49	11 40 34
TR: proche résist. maximum	12 41 53	11 40 37
TR: marigot	12 41 40	11 40 31
ME: BAITI1_S, BAITI2_W (500M sud vil.)	12 41 54	11 40 36
SE: BAITILAY	12 41 54	11 40 36
FO: BAITILAYE	12 42 21	11 40 43.5

SECTEUR DE BEMBOU

ME: BEMBOU1_S, BEMBOU2_W	12 49 48	11 52 22
FO: (-50M BEMBOU1, forage positif)	12 49 46	11 52 25
ME: BEMBOU3_S, BEMBOU4_W	12 49 33	11 52 23
FO: (+55M, forage négatif)		
SE: BEMBOU	12 49 48	11 52 22

COMPLEMENTS HYDROGEOLOGIQUES

PU: FODE BANIA	12 47 08	11 42 27
PU: FODE BANIA (échantillons)	12 47 06	11 42 29
FO: DIAKHA MADINA	12 46 28	11 39 42
PU: DIAKHA MADINA	12 46 16	11 40 01

ANNEXE I-3 : MISSION GEOPHYSIQUE « SARAYA » DU 11/06/96 AU 26/06/96

LOCALISATIONS GPS

ME (multiélectrodes), SE (sondage électrique), TR (trainé elect.)
 FO (forage hydraulique), PU (puit), AS (borne astro)

CARACTERISATION DU SITE	LATITUDE	LONGITUDE
SECTEUR BADIOULA		
FO: BADIOULA	12 49 50	11 48 10
ME: BADI1_W, BADI2_S	12 49 35	11 48 20.5
ME: BADI5_S, BADI6_W, BADI7_D	12 49 36	11 48 24
ME: BADI3_W	12 49 35	11 48 27.5
SE: BADIOULB	12 49 35	11 48 27.5
ME: OULA1, OULA2	12 49 17	11 49 33
SE: CULAB	12 49 11	11 50 01
TR: OULA (résist. basse)	12 49 17	11 49 33
SECTEUR MISSIRA		
AS: 30M à l'W de la borne IGN)	13 05 12	11 41 53
FO: FORAGE	13 05 10	11 42 00
ME: MIS1 _s , MIS2 _w , MIS3 _s (240 M à l'w route)		
ROUTE MISSIRA BALAKONKO		
SOMMET COLLINE	13 06 14	11 42 02
BALAKONKO ECOLE	13 08 23	11 41 49
TR: début	13 06 20	11 42 03
TR: résist. maximum	13 06 23.5	11 42 00
TR: résist. minimum	13 06 28	11 42 00
ME: BALA	13 06 23.5	11 42 00