



HAL
open science

Méthode d'évaluation de la productivité des sites aquifères au Burkina Faso : géologie, géophysique, télé-détection

Samuel Nakolendousse

► **To cite this version:**

Samuel Nakolendousse. Méthode d'évaluation de la productivité des sites aquifères au Burkina Faso : géologie, géophysique, télé-détection. Hydrologie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1991. Français. NNT : . tel-00756438

HAL Id: tel-00756438

<https://theses.hal.science/tel-00756438>

Submitted on 23 Nov 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THESE**Alex.

présentée par

NAKOLENDOUSSE Samuel

Pour obtenir le titre de DOCTEUR de

P'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I

(Arrêté Ministériel du 5 juillet 1984)

Spécialité : Géophysique appliquée

_____ 2

**Méthode d'évaluation de la productivité
des sites aquifères au Burkina Faso
Géologie - Géophysique - Télédétection**

Date de soutenance : 25 octobre 1991

Composition du jury :

M. J.	SARROT-REYNAULD	Professeur U.J.F. Grenoble	Président
M. P.	LOUIS	Professeur U.S.T.L. Montpellier	Rapporteurs
M. J.C.	FOURNEAUX	Maître de Conférence U.J.F. Grenoble	
M. M.	VALLON	Professeur U.J.F. Grenoble	Examineurs
M. A.N.	SAVADOGO	Maître de Conférence U. Ouagadougou	

Thèse de Doctorat de l'Université
Joseph Fourier - Grenoble I
Mention : Géophysique appliquée

Titre de l'ouvrage :

**METHODES D'EVALUATION DE LA
PRODUCTIVITE DES SITES AQUIFERES
AU BURKINA FASO
GEOLOGIE - GEOPHYSIQUE -
TELEDETECTION**

Nom de l'auteur :

Samuel NAKOLENDOUSSE

Etablissement :

Université Joseph Fourier - Grenoble I

RESUME

Au moyen de diverses méthodes géophysiques, après une étude géologique et de télédétection, dix sites comprenant vingt deux forages très productifs, moyennement productifs ou secs ont fait l'objet d'une étude "post mortem" de détail.

- Un certain nombre de facteurs de productivité des ouvrages du socle cristallin du Burkina Faso ont été mis en évidence, ainsi que l'apport de la prospection hydrogéophysique par le Maxmin.

- Le dispositif carré permettant d'effectuer des profils d'anisotropie a fourni les meilleurs résultats pour la recherche des forages à haut rendement.

Deux propositions ont été retenues :

- Une méthode de traitement numérique d'images satellites faisant mieux ressortir les caractéristiques hydrogéologiques.

- Une méthode d'implantation type d'un forage à haut rendement dans le socle cristallin du Burkina Faso.

MOTS CLES

Géophysique appliquée ; Electrique ;
Electromagnétisme ; Socle cristallin ; Fractures ;
Télédétection ; Sondages ; Anisotropie ;
Méthodologie ; Géologie ; Productivité.

THESE

présentée par

NAKOLENDOUSSE Samuel

Pour obtenir le titre de DOCTEUR de

L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I

(Arrêté Ministériel du 5 juillet 1984)

Spécialité : Géophysique appliquée

Méthode d'évaluation de la productivité des sites aquifères au Burkina Faso Géologie - Géophysique - Télédétection

Date de soutenance : 25 octobre 1991

Composition du jury :

M. J.	SARROT-REYNAULD	Professeur U.J.F. Grenoble	Président
M. P.	LOUIS	Professeur U.S.T.L. Montpellier	Rapporteurs
M. J.C.	FOURNEAUX	Maître de Conférence U.J.F. Grenoble	
M. M.	VALLON	Professeur U.J.F. Grenoble	Examineurs
M. A.N.	SAVADOGO	Maître de Conférence U. Ouagadougou	

Thèse préparée au sein du laboratoire d'Hydrogéologie
Institut Dolomieu - Université Joseph Fourier - GRENOBLE I

NNB 10104281

AVANT PROPOS

Avant d'aborder la présentation des résultats du travail effectué dans le cadre de ce mémoire, fruit de trois ans et demi de recherche, il m'est très agréable de remercier tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à sa réalisation.

Monsieur le Professeur Jean Sarrot Reynauld, directeur du service hydrogéologique de l'Institut Dolomieu, qui m'a accueilli dans son laboratoire et qui m'a fait l'honneur d'une visite sur le terrain au Burkina Faso. Malgré ses nombreuses occupations, il n'a ménagé ni de son temps, ni de ses conseils pour que ce travail puisse aboutir. Ses maintes critiques portées à mon manuscrit m'ont été d'un grand secours.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Savadogo Alain Nindaoua qui a encadré mes travaux sur le terrain et au laboratoire au Burkina Faso. J'ai su profiter de son ardeur au travail et sa bonne gestion de la chose publique pour mener à bien mes travaux de recherche.

Je remercie vivement le Professeur Pierre Louis qui fut mon premier Professeur de géophysique en France; Monsieur le Professeur Pierre Louis connaît bien les problèmes géologiques et hydrogéologiques de L'Afrique pour y avoir travaillé et dirigé beaucoup de travaux de recherche et il a accepté de participer au jury.

Mes sincères remerciements à Monsieur Jean Claude Fourneaux et Monsieur Michel Vallon qui ont accepté de participer au jury.

Les travaux de recherche ont pu être menés grâce à une subvention du Centre de Recherche pour le Développement International (CRDI) et mon séjour en France a été pris en charge par la Fondation Jean Paul II pour le sahel. J'exprime ma profonde et sincère remerciements à ces deux institutions.

Mes remerciements vont aux personnels de l'Université de Ouagadougou et de l'Université Joseph Fourier, aux enseignants du département de géologie de l'Université de Ouagadougou, Monsieur François Bourges et Monsieur Wenmenga Urbain ainsi qu'aux techniciens et manoeuvres.

A mon épouse et à mes deux enfants qui ont accepté des sacrifices pour que ce travail aboutisse je dédie ce présent mémoire.

1 - INTRODUCTION

La mauvaise répartition des pluies dans le temps et dans l'espace, les conditions géographiques et géologiques, rendent insuffisantes les eaux de surface au Burkina Faso, comme dans tous les pays du sahel sans oublier leur potabilité douteuse pour la consommation humaine.

Le recours à l'eau souterraine est alors indispensable, mais en raison de la complexité des aquifères discontinus des terrains de socle qui constituent 80% du territoire burkinabè, cette eau est difficile d'accès. Pour les petites agglomérations où des forages à gros débit sont indispensables le dilemme devient énorme.

Les travaux en matière de prospection et d'exploitation des eaux souterraines dans les régions de socle ont permis de préciser leur mode de gisement.

Il est acquis que les nappes d'eau y sont de faible extension et qu'elles présentent l'aspect d'un réseau tridimensionnel de failles et de fractures d'extension variable, caractéristiques de ce type de substratum géologique (Savadogo, A.N., 1984).

Des méthodes pour la localisation des nappes ont permis d'améliorer l'implantation des ouvrages de captage des eaux souterraines; mais le débit de ces ouvrages varie énormément de 0 à 50 m³/h et il est difficile de définir les facteurs qui déterminent la productivité des ouvrages.

Notre étude s'inscrit dans le cadre des recherches de ces facteurs de productivité.

Le travail consiste à:

-l'évaluation comparative du contexte hydrogéologique de dix sites de forages implantés dans le socle précambrien, soit des forages à haut rendement (plus de 20m³/h), jumelés dans certains cas de forages à faible rendement (moins de 2m³/h) ou totalement secs dans le même contexte géologique, notons que tous ces débits ont été obtenus à l'air lift et que tous les forages concernés

par cette étude ont un diamètre de 6 pouces, en conséquence les forts débits ne peuvent provenir que de la frange fissurée du substratum.

-la détermination des traitements numériques d'images satellites qui font le mieux ressortir les caractéristiques hydrogéologiques d'une région représentative du socle précambrien burkinabè.

-l'identification, par leur signature géomorphologique et géophysique des facteurs lithologiques et tectoniques qui influencent le rendement des forages implantés dans le socle précambrien.

-l'évaluation de l'apport de la prospection géophysique par les méthodes électromagnétiques à émetteur et récepteur mobiles: le MAXMIN.

-l'évaluation de la potabilité des eaux et de leurs conditions de renouvellement par des analyses chimiques et isotopiques.

Le plan de cette étude comporte quatre parties:

-dans la première partie nous présenterons un cadre général du Burkina Faso, un bref aperçu de la géologie du socle cristallin du Burkina Faso et du mode de gisement des aquifères.

-dans une deuxième partie nous aborderons les méthodes d'études des sites que nous avons employées à savoir la télédétection, la prospection géologique et la prospection géophysique.

-la troisième partie sera réservée à l'analyse des résultats .

-enfin nous aborderons en dernière partie l'analyse chimique et isotopique des échantillons d'eau de forages.

Les travaux de recherche se sont déroulés au Burkina Faso (travaux de terrains et laboratoire), à l'université du Québec à Chicoutimi, auprès des sociétés GEONICS et APEX à Toronto au Canada et enfin au laboratoire d'Hydrogéologie de l'Institut Dolomieu à Grenoble en France.

2 SITUATION GENERALE

2.1- CADRE GENERAL

Le Burkina Faso est situé au coeur de l'Afrique Occidentale, à l'intérieur de la boucle du Niger, entre 9° et 15° de latitude Nord et 2° de longitude Est et 5° de longitude Ouest. Pays enclavé, le Burkina est limité au Nord et à l'Ouest par le Mali, au Nord-Est par le Niger, au Sud-Est par le Benin et au Sud par le Togo, le Ghana et la Côte d'Ivoire; sa superficie est de 274000km² .

Le pays est constitué dans son ensemble, du point de vue relief, d'un vaste plateau de 200 à 400 mètres d'altitude , légèrement incliné du Nord au Sud.

La végétation varie énormément du Nord au Sud: le Sud du pays se présente sous forme d'une savane boisée qui se transforme en terres sablonneuses, semi-désertiques, quand on se déplace vers le Nord.

Au sud le climat est de type soudanéen avec des précipitations pluviales variant entre 650 et 1400 mm. Lorsqu'on se déplace vers le Nord, on a des traits de climat sahélien, avec des précipitations pluviales qui diminuent jusqu'à moins 250 mm. Outre cette inégalité spatiale des pluies, la répartition dans le temps est aussi irrégulière avec une saison pluvieuse de 4 à 5 mois entre mi-mai et mi-octobre et une saison sèche entre mi-octobre et mi-mai.

La plus grande partie du réseau hydrographique composée en grande partie des trois Voltas , de la Comoé et de la Léraba, est à sec pendant la saison sèche.

Le Burkina Faso a connu une grave sécheresse dans les années 1970 et cette dernière décennie n'est pas du tout épargnée: on a ainsi une manque considérable d'eau pour les besoins des populations en grande majorité rurales dont le nombre est supérieur à huit millions de nos jours avec un revenu par tête inférieur à 200 dollars.

2.2- BREF APERCU DE LA GEOLOGIE DU SOCLE CRISTALLIN DU BURKINA

2.2.1- LES FORMATIONS GEOLOGIQUES Figure 1

Le socle cristallin couvre 80 pour cent du territoire du Burkina Faso. Trois grandes formations s'y rencontrent. Elles présentent une distribution hétérogène avec des caractéristiques pétrographiques et tectoniques très diversifiées.

2.2.1.1- Les formations granito-migmatitiques

On y rencontre :

- des gneiss diversifiés fortement représentés dans l'Oudalan, la région de Sebba, la région de Tenkodogo. Ces gneiss sont sous forme dispersée dans les migmatites et généralement accompagnés de faciès schisteux et micaschisteux, avec association de faciès graphiteux et manganésifères.

- des leptynites et migmatites leptynitiques caractérisées par deux types d'affleurements soit sous forme de lentilles d'extension kilométrique soit sous forme de masses. Elles sont localisées dans les régions de l'Oudalan, Sebba, Fada N'Gourma, Diapaga et Tenkodogo. Les faciès communs dominants sont les granitoides planaires en association avec des faciès migmatitiques.

-des migmatites à biotite représentées par le panneau de Sidéradougou Mangadora et le panneau de Gourcy. Elles sont formées de gneiss rubanés à composition granodioritique et quartzodioritique. Les migmatites à amphibole et biotite occupent l'Est du pays et sont également de composition granodioritique.

-des migmatites et granites indifférenciés. Ils occupent la plus

grande partie du territoire avec des affleurements épars composés de migmatites hétérogènes et de granites calco-alcalins.

2.2.1.2- Les formations volcano-sédimentaires

Ces formations constituent le matériel de remplissage des sillons engendrés par la fracturation du socle ancien. On y rencontre deux groupes essentiels :

a- Le groupe métavolcanique et volcano-sédimentaire basal.

Ce groupe est composé essentiellement de :

- volcanites basiques (région de Ouahigouya) de faciès grenus de diorites ou de gabbros (à l'Est et au Nord-Est) ainsi que de faciès microgrenus de gabbros et de dolérites sous forme de sills; elles sont également de faciès ultrabasiques avec des péridotites serpentinisées et des pyroxénolites dans les régions de Ouga-Yarsé et Korsimogho-Kaya, Bogandé, Boulsa et Poura.

- des formations volcano-sédimentaires avec des tufs et grauwackes.

- des séquences de laves diversifiées

- des métasédiments associés et des intrusions subvolcaniques de diorites et microdiorites quartziques.

b- Le groupe métasédimentaire terminal

Ce sont essentiellement des formations détritiques (grossières à fines) de comblement avec des intercalations charbonneuses.

c- Les roches plutoniques

On y distingue deux catégories :

a- les formations basiques

Elles sont composées d'orthoamphibolites et d'amphibolopyroxénites schisteuses ou massives et de métagabbros. Ces roches se rencontrent essentiellement dans l'Oudalan, à l'Est et au Sud-Est du pays.

b- les plutonites communes aux noyaux migmatitiques et aux sillons

Ce sont :

- les complexes granodioritiques tonalitiques rencontrés dans les régions du Sud-Ouest et du Nord-Ouest. Les faciès, allant des termes mésocrates riches en enclaves basiques aux termes à tendance leucocrate se retrouvent dans le massif de Tengrela, le massif de Kiembéra, le massif Koussouka et celui de Niogotenga.

- les granites syn à tardi tectoniques. Ils sont représentés par des granodiorites, granites à biotites-amphibole (Sud-Ouest), des granites à biotite, parfois muscovite (Est), des granites à biotite et muscovite, des granites pegmatitiques et des granites aplitiques (au Sud-Ouest, au Centre-Ouest, au Centre et au Nord-Est), enfin des granites calco-alcalins en massifs circonscrits dans les régions de Pô-Tiébélé, Kaya-Goren et Zogoré.

- des complexes alcalins ou à tendance alcaline dans l'Oudalan et dans les régions de Pama-Diapaga, ainsi que des syénites de Wayen et Zoungou, roches à structure équante largement grenue, parfois porphyroïde.

- des gabbros vanadifères de type Tin Edia, généralement sous forme de sillons et de massifs intusifs dans les gneiss et les migmatites antébirrimiens. Ils se rencontrent généralement dans l'Oudalan (région d'Oursi) et dans l'unité birrimienne de Djibo.

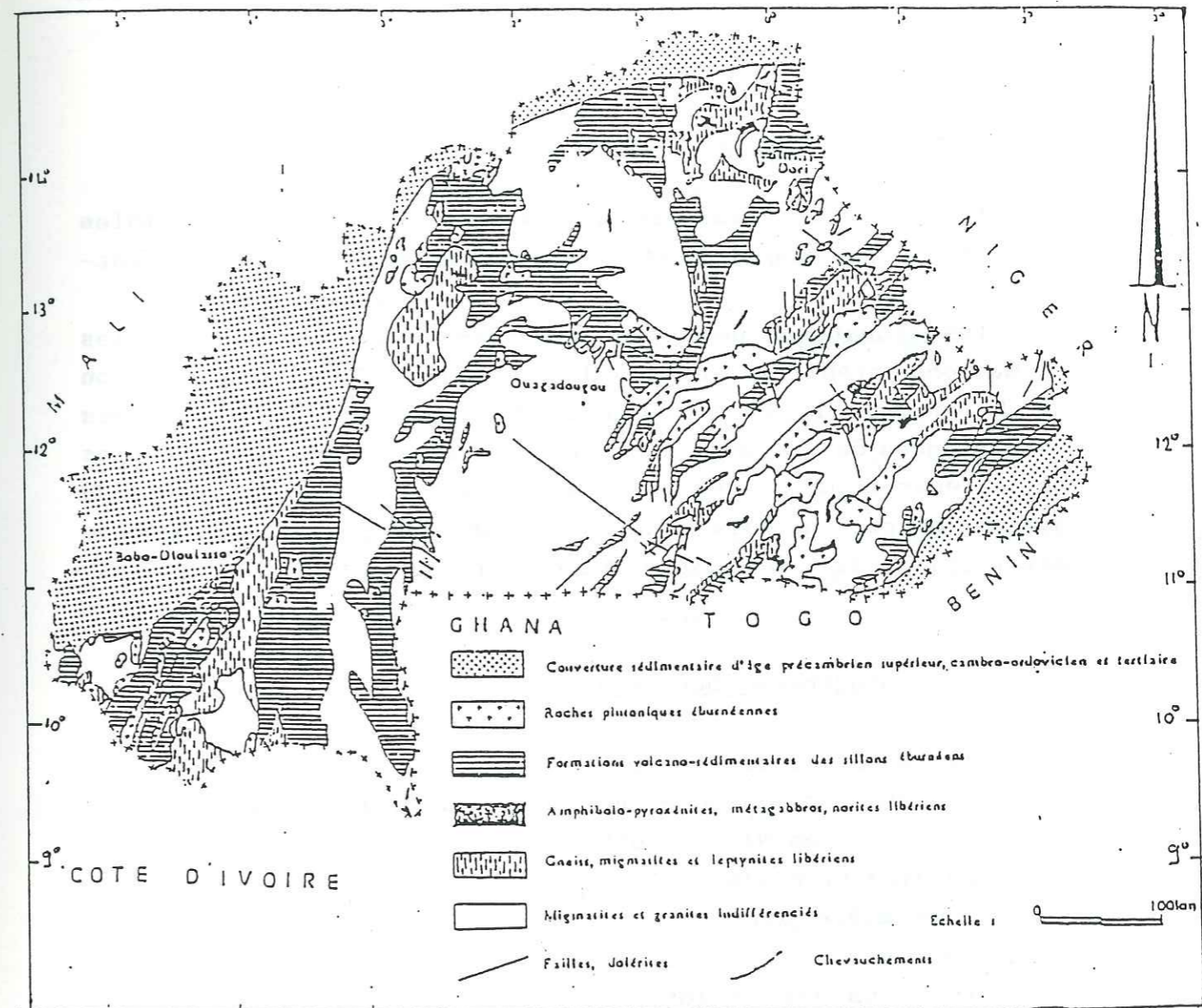


Figure 1 Esquisse géologique du Burkina Faso (G. Hottin et O.F. Ouédraogo 1979)

2.2.2- TECTONIQUE

Deux grandes orogénèses ont intéressé le socle cristallin du Burkina Faso :

2.2.2.1- L'orogénèse libérienne

Elle se caractérise par la formation de synclinaux, de moles granito-gneissiques et de structures d'ensemble de direction Est-Ouest.

Les signatures de cette orogénèse se retrouvent dans les formations antébirrimiennes de la moitié orientale du pays (région de l'Oudalan, de Fada-N'Gourma et de Diapaga) où on a des persistances de grandes structures, parfaitement indépendantes de la répartition et des plissements des unités ultérieures du système birrimien; mais dans la plupart des cas cette orogénèse est reprise par l'orogénèse éburnéenne.

2.2.2.2- L'orogénèse éburnéenne

Elle s'est manifestée par :

- la fracturation du socle ancien suivant deux directions
une direction N15 à N20°E
une direction N100 à 120°E

La première direction est prédominante sur les bordures Nord, Est et Ouest du noyau Mossi tandis que la deuxième prédomine dans les régions de Ouahigouya, Séguénéga, Kaya et Boulsa.

- l'intrusion de dykes granodioritiques à tonalitiques.
- l'apparition et l'évolution des sillons dûes à la fracturation
- un métamorphisme, des plissements et une granitisation syntectonique pendant la phase paroxysmale autour de 2000 MA.

- des fractures et des rejeux avec émissions de dolérites.

Le socle qui résulte de cette phase tectonique est plus ou moins régénéré (blastomylonisation et recristallisation) avec des séries birrimiennes métamorphosées dans l'épizone, rarement dans la mésozone, fortement plissées : on a soit

-des séries isoclinales à plis plus ou moins serrés très redressés (dans les grands sillons linéaires)

-des séries très tectonisées (contacts faillés, chevauchements, écaillages) dans les régions de Youga, Zorgho, Fada N'Gourma ainsi que dans le noyau Mossi.

-des structures complexes composées de metabasites et de granodiorites en accordance avec les structures voisines.

H. JOANES, J. PARNOT, F. RANTUA et N.A. SOW (1987) ont retenu dans leur étude les directions Nord-Est -Sud Ouest et Nord Nord Est-Sud Sud Ouest comme principales directions tectoniques.

Selon une étude du C.I.E.H. (novembre 1989) la partie crustale du socle du Burkina serait encore soumise à des influences tectoniques malgré son apparence de tranquillité, ces dernières jouant probablement un rôle sur le comportement des roches du point de vue de leur perméabilité. Cette contrainte tectonique serait uniforme sur le plan régional. Les directions des axes de contraintes principales majeure et mineure sont :

σ_1 = Nord 05E

σ_3 = Nord 95E

La géologie du socle se caractérise par la diversité et la complexité. En conséquence la répartition de l'eau dans le sous sol sera régie par la même loi, si bien qu'une étude hydrogéologique à très grande échelle est exclue. Une approche par petites zones doit alors être envisagée pour mieux comprendre les caractéristiques fondamentales des aquifères du socle cristallin.

2.3 MODE DE GISEMENT DES AQUIFERES DU SOCLE CRISTALLIN DU BURKINA

La géomorphologie externe et la morphologie profonde du substratum guident le mode de gisement des aquifères du socle. On y distingue deux types de nappes :

- les nappes superficielles dépendant de la géomorphologie externe
- les nappes profondes liées au modelé du bed-rock.

La géomorphologie du Burkina se caractérise par la présence :

-des interfluviaux constitués de cuirasses éocène, pliocène, plio-villafranchienne et ouljiennne. Le recouvrement latéritique domine au niveau des paysages pénéplanés, mollement ondulés et tabulaires, caractérisant la plus grande partie du territoire du Burkina Faso.

-des marigots : on a généralement un couplage marigot et fracture surtout lorsqu'il s'agit de cours d'eau rectiligne; mais il est rare que la fracture emprunte le lit du cours d'eau.

-des basfonds : le basfond est l'indice d'une zone altérée qui s'est développée à la faveur d'une convergence de failles (CIEH-Géohydraulique, 1978) .Il est en général situé loin du marigot principal, peu drainé, avec des sols hydromorphes. Des forages implantés dans les bas-fonds ne donnent pas toujours une bonne épaisseur d'altération, par contre cette morphologie est favorable à l'exploitation de cuirasses noyées (CIEH-Géohydraulique, 1978).

-des plateaux et les versants

La figure 2 montre une coupe morphologique plateau-versant.

Les nappes superficielles liées à cette morphologie externe sont:

- les nappes de cuirasse noyée tributaires de l'évapotranspiration importante et de la pluviométrie.
- les nappes d'alluvions.

Les nappes liées au modelé du bedrock ou nappes profondes doivent leur existence au réseau de fissures et de fractures . Ce modelé de bedrock n'est connu que de façon indirecte. La figure 3 tirée de A.N. Savadogo 1984 résume le mode de gisement des aquifères du socle du Burkina .

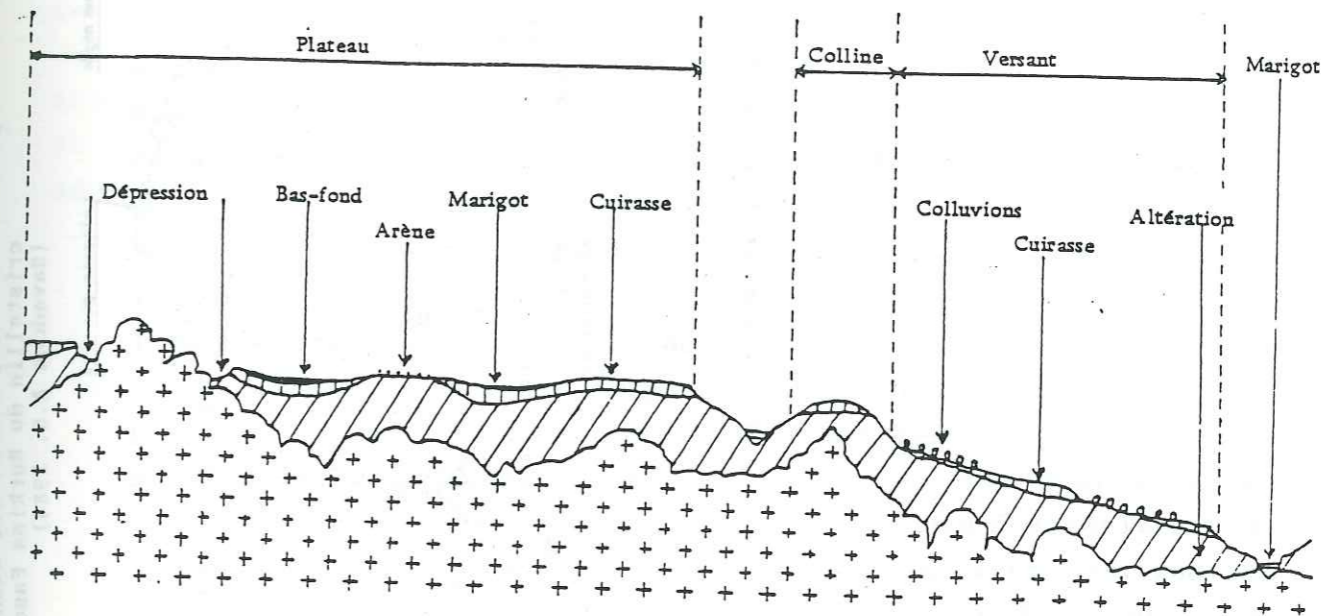


Figure 2 Coupe morphologique schématique, plateau-versant (M. Engalenc 1975)

3 LES METODES D'ETUDES DES SITES

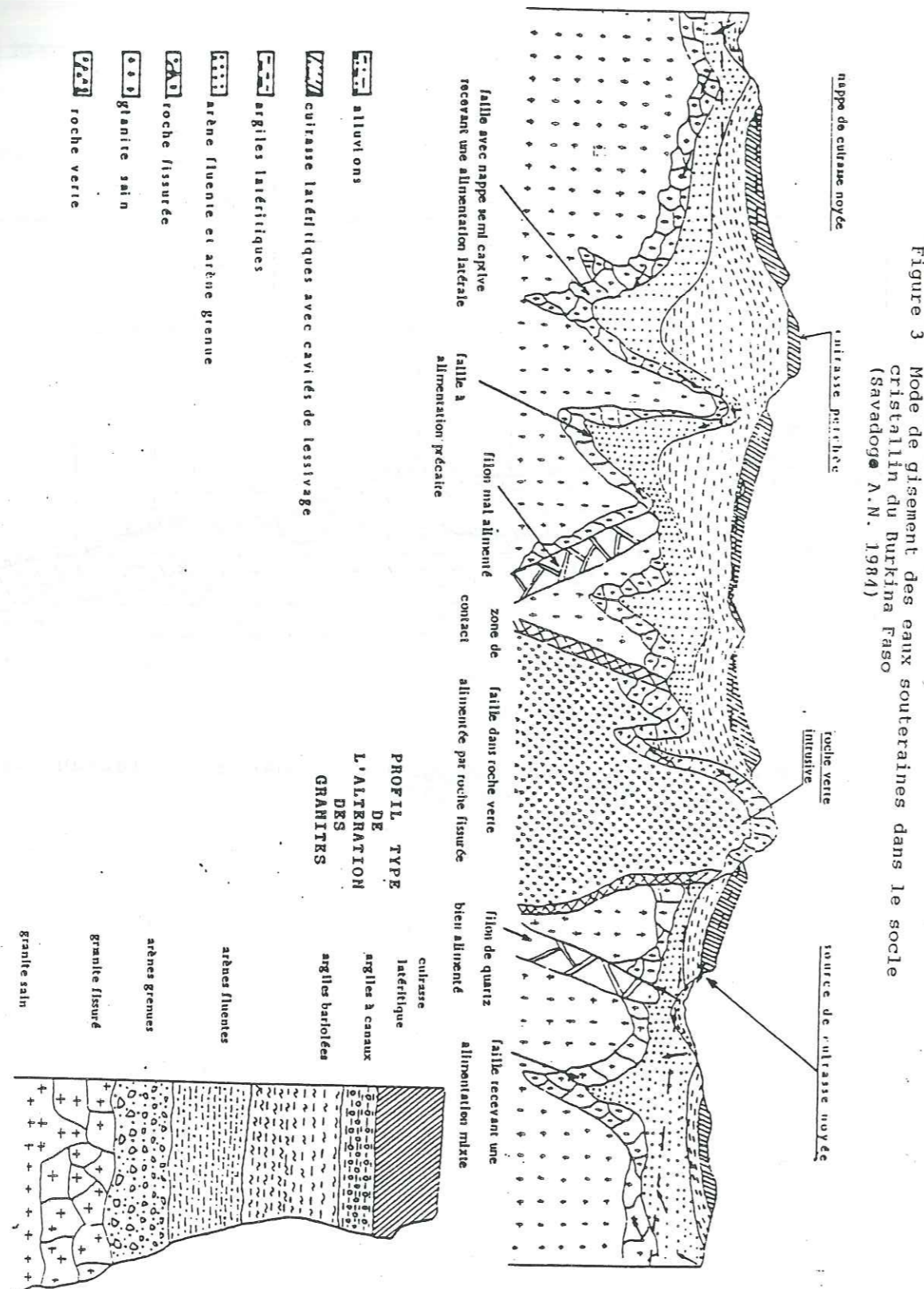
Les travaux de recherches hydrogéologiques dans le socle cristallin du Burkina Faso connaissent depuis les années 1975 un essor important et sans précédent. Les travaux sont généralement menés par des bureaux d'études étrangers, français notamment comme le BRGM, le BURGEAP, Géohydraulique, la CGG, hollandais comme IWACO, allemands comme le BGR et DIWI.

L'Université de Ouagadougou, le CIEH, l'EIER, le BUMIGEB et la Direction des Etudes et de la Planification du Ministère de l'eau prennent une part très active dans ces travaux.

Comme nous l'avons indiqué plus haut les réserves d'eau les plus significatives sont dans des fractures qui affectent le substratum. Sous climat tropical, ces fractures sont rarement visibles sur le terrain en raison des épaisseurs d'altérites très importantes. Le repérage de ces fractures, de leur localisation précise et de leurs caractéristiques constitue l'essentiel de l'étude de la recherche d'eau souterraine.

Après avoir sélectionné un certain nombre de forages à haut rendement (débit supérieur à 20 m³/h) auxquels nous avons adjoint si possible des forages à faible rendement (débit inférieur à 3m³/h) ou totalement secs dans les mêmes conditions géologiques que les premiers nous avons déployé une méthodologie comportant les phases suivantes:

- télédétection à travers l'analyse des images satellites et des photographies aériennes permettant la cartographie des linéaments.
- levés géologiques ayant pour but de préciser sur le terrain la signification des objets vus en télédétection. De plus, les affleurements s'ils existent permettent une description des faciès pétrographiques, des analyses microtectoniques pour déterminer les sollicitations dont les formations géologiques ont fait l'objet.
- prospection géophysique permettant de confirmer la correspondance linéament-fracture, l'orientation des fractures



existantes, leurs extensions longitudinales et latérales et l'importance de la frange fissurée induite par les fractures. -analyses chimiques et isotopiques permettant d'avoir des informations sur la qualité des eaux ainsi que leurs conditions de renouvellement dont la connaissance est indispensable pour une programmation de leur exploitation à long terme.

Nous avons initié à l'Université cette approche d'étude post mortem des couples de forages secs (ou très peu productifs) et très productifs pris dans le même contexte géologique, approche originale dans la sous région.

3.1 LES METHODES DE TELEDETECTION

3.1.1 Généralités

3.1.1.1-définition

La télédétection comporte l'ensemble des techniques permettant de détecter à distance les caractéristiques physiques et / ou biologiques d'un objet sans entrer en contact avec le dit objet : en anglais le terme consacré est "remote sensig" . Elle implique l'utilisation à distance d'appareils (avion, satellite...) servant à l'acquisition de l'information telle que la mesure du champ de force , de la radiation électromagnétique ou d'autres formes d'énergie .

Dans un sens plus restrictif , c'est l'acquisition de données dans les fréquences allant de l'ultraviolet jusqu'aux ondes radio .

La photographie aérienne traditionnelle est quant à elle restreinte à la partie visible du spectre électromagnétique . L'utilisation des caractéristiques spectrales des éléments du paysage permet de comprendre le fonctionnement de la nature . C'est un moyen parmi tant d'autres permettant de mieux cerner les interactions dynamiques qui ont pour siège la surface terrestre.

3.1.1.2-le rayonnement électromagnétique

L'énergie existe sous plusieurs formes et chacune nécessite un milieu favorable pour se propager :c'est par exemple le cas des ondes sismiques dans les milieux solides .

Le rayonnement électromagnétique est une forme dynamique d'énergie qui se manifeste par son interaction avec la nature Il se caractérise par sa fréquence, sa vitesse de propagation ou sa longueur d'onde .

Dans le vide sa vitesse est $v=3.10^8$ m/s . Elle est réduite dans d'autres milieux et le rapport des vitesses donne l'indice de

réfraction du dit milieu .

Les grandes propriétés du rayonnement sont :

-EMISSION : Tout corps dans une certaine condition de température émet un rayonnement électromagnétique : le corps est dit source.

-ABSORPTION : Tout corps qui reçoit un rayonnement d'une source quelconque peut en absorber une partie servant à modifier son énergie interne : on appelle absorptivité le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie reçue

-REFLEXION : Un corps qui reçoit un rayonnement peut en réfléchir une partie : on appelle réflectivité le rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente . Dans le cas où l'énergie reçue est l'énergie solaire et où les surfaces irradiées sont des surfaces terrestres , on utilise le terme d'albédo .

-TRANSMISSION : Dans ce cas, le rayonnement reçu est transmis , le rapport entre le transmis et l'incident est la transmissivité . On peut schématiser la relation entre ces différentes propriétés par la figure 4

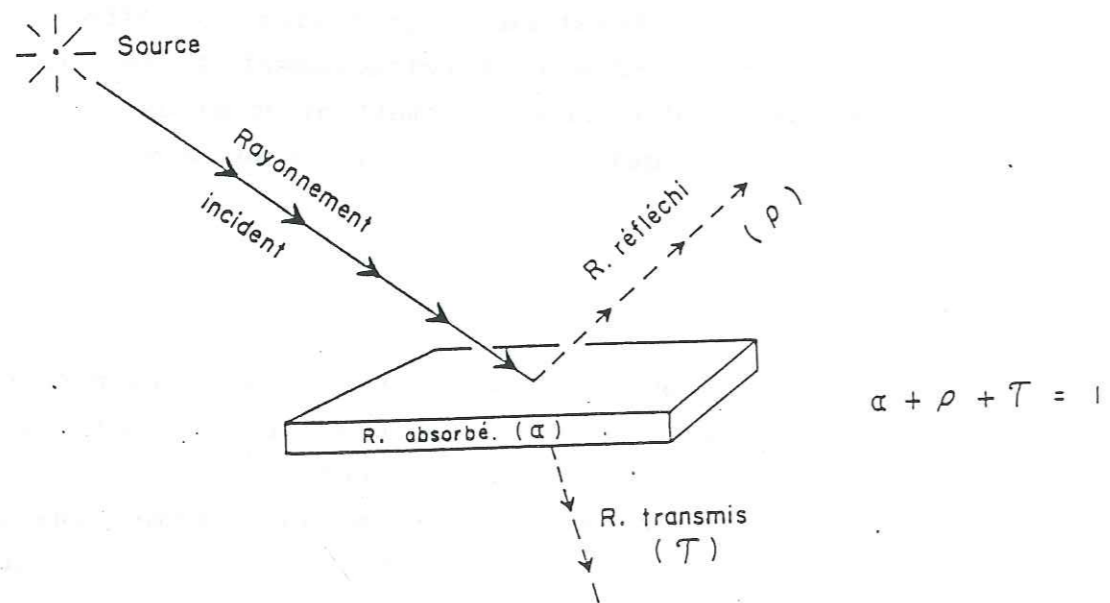


Figure 4 Absorption, Réflexion, Transmission
(Scanic J.Y. 1983)

-DIFFUSION : L'existence de particules microscopiques dans un milieu de transmission amène la diffusion dans toutes les directions d'une partie de l'énergie émise par la source ; cette diffusion est importante pour les petites longueurs d'ondes (bleu) et pour les grandes longueurs d'ondes (rouge)

3.1.1.3-Le spectre électromagnétique

Les ondes électromagnétiques sont le résultat d'une superposition d'ondes sinusoïdales simples caractérisées chacune par une amplitude , une fréquence et une longueur d'onde propres . Cette onde sinusoïdale est appelée composante spectrale.

la figure 5 représente le spectre électromagnétique.

Les principales zones du spectre dans lesquelles des mesures sont prises en télédétection sont :

- l'ultraviolet
- le visible
- l'infrarouge proche
- l'infrarouge thermique
- les micro-ondes actives (radar)

Dans ces différentes zones l'atmosphère est transparente au rayonnement et ces zones portent communément le nom de fenêtres . Il est à noter que la diffusion du rayonnement à l'intérieur des fenêtres dépend de la qualité de l'atmosphère.

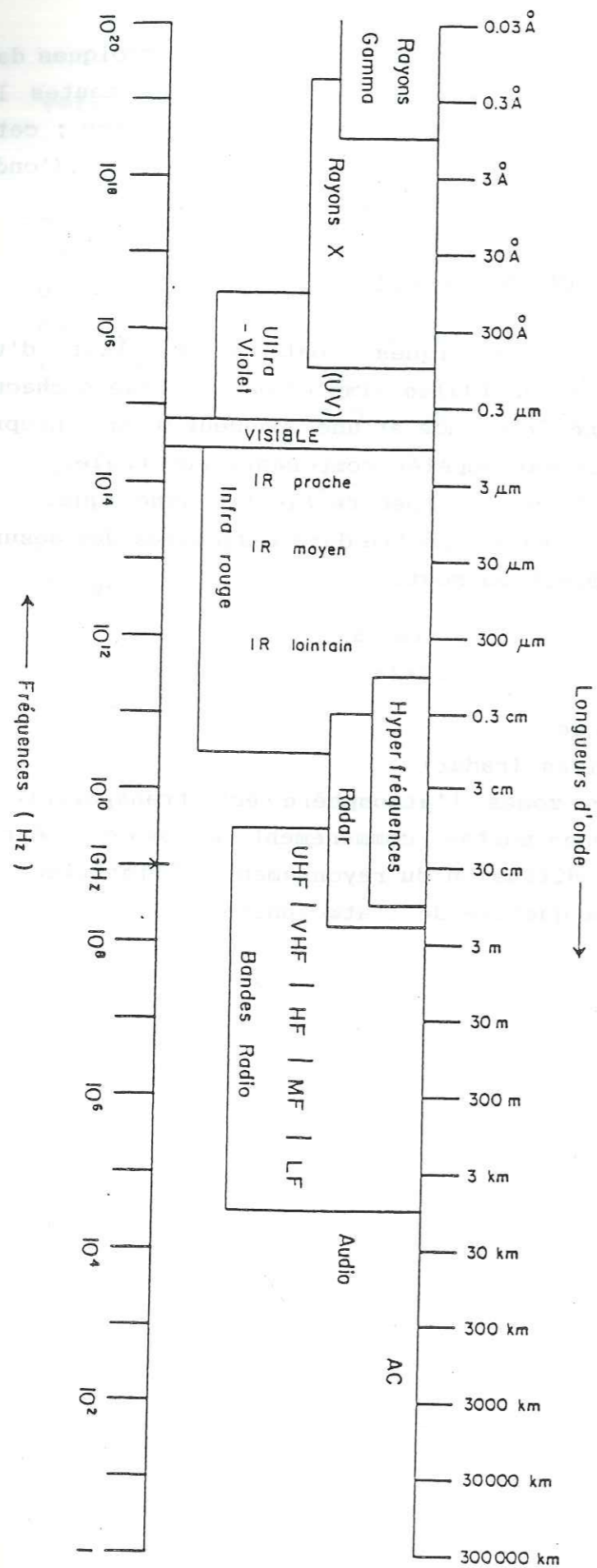


Figure 5 Le spectre électromagnétique (Scanic J.Y. 1983)

3.1.1.4 Propriétés physiques des surfaces détectables à distance

Loin d'être limitatives on peut examiner quelques applications potentielles de la télédétection avec un aperçu des phénomènes physiques à la surface terrestre dont les manifestations sont détectables dans les différentes bandes du spectre .

-Le visible , le proche infrarouge et l'ultraviolet : 0.35 à 2 \mu m
 Dans ces différentes longueurs d'ondes, on détecte la réflexion du rayonnement solaire sur la surface terrestre .

-L'ultraviolet 0.35 à 0.4 \mu m
 Les images sont généralement floues car le rayonnement est très diffusé avant d'être réfléchi . Ce rayonnement ne sera utilisé que dans des cas très précis autres que la prospection géologique.

-Le bleu 0.4 à 0.5 \mu m
 Les images dans la bande bleue sont très utilisées dans des conditions atmosphériques très claires . Puisque l'eau absorbe très peu le bleu , cette bande pourra être utilisée pour différencier les secteurs immergés (réseau hydrographique) .

-Le jaune -vert $.5$ à $.6 \text{ \mu m}$
 Cet intervalle spectral correspond au maximum de l'énergie solaire arrivant au sol . La végétation ainsi que les sols nus réfléchissent dans cette bande . Cette bande peut alors être utilisée pour détecter les affleurements géologiques ainsi que le réseau hydrographique et les alignements des végétaux .

-Le rouge 0.6 à 0.7 \mu m
 C'est la bande la plus absorbée par la végétation et la plus réfléchiée par les surfaces des sols nus . Puisque le rayonnement rouge est utilisé comme source d'énergie pour la photosynthèse, le rayonnement arrivant à la surface terrestre est moins diffusé et est réfléchi de façon directe : de ce fait il sera plus sensible à la rugosité de la surface réfléchissante .

-Le proche infra-rouge(1) 0.7 à 0.8 \mu m
 Deux phénomènes caractérisent cette bande du proche infra-rouge:

+ l'eau l'absorbe totalement tandis que la végétation le réfléchit très fortement.

+ les sols nus tels les affleurements et les clairières absorbent plus le proche-infra-rouge que le visible . Ainsi ils apparaîtront en sombre sur les images prises dans cette bande .

-Le proche infra-rouge (2) 0.8 à 1.1 µm

Cette bande a les mêmes caractéristiques que la précédente mais un peu plus accusée.

Fort de ces caractéristiques , en géologie et plus particulièrement en hydrogéologie, on utilisera les bandes ci-dessus citées, qui font ressortir le mieux possible le réseau hydrographique , la végétation , les affleurements , les cuirasses , les éboulis et les basfonds .

3.1.2 La photographie aérienne

La photographie aérienne intéresse comme nous l'avons déjà signalé plus haut la partie visible du spectre .

On obtient grâce à la prise de vue aérienne des photographies généralement à l'échelle 1/50000 ème . L'étude de ces photos repose sur l'analyse des formes du relief soit directement par vision stéréoscopique soit indirectement par l'étude du réseau hydrographique et des variations de teintes de gris et des alignements morphostructuraux . Il existe une relation étroite entre les linéaments et les fractures profondes et anciennes et ces fractures déterminent les systèmes de drainage (subaérien ou souterrain) induisant des modifications linéaires de la végétation ou des différences de tonalité .

L'interprétation des photographies aériennes revient à la détermination des linéaments ainsi que le tracé de cours d'eau.

Le tableau 1 tiré des publications du CIEH montre l'influence sur le tracé du cours d'eau du type de fracturation , de la nature et de la structure de la roche . On doit néanmoins se garder de placer un forage dans le lit d'un marigot car il est extrêmement rare que ce dernier se superpose directement avec une fracture. Il faut éviter également les centres des mailles de facturation. (CIEH 1978)

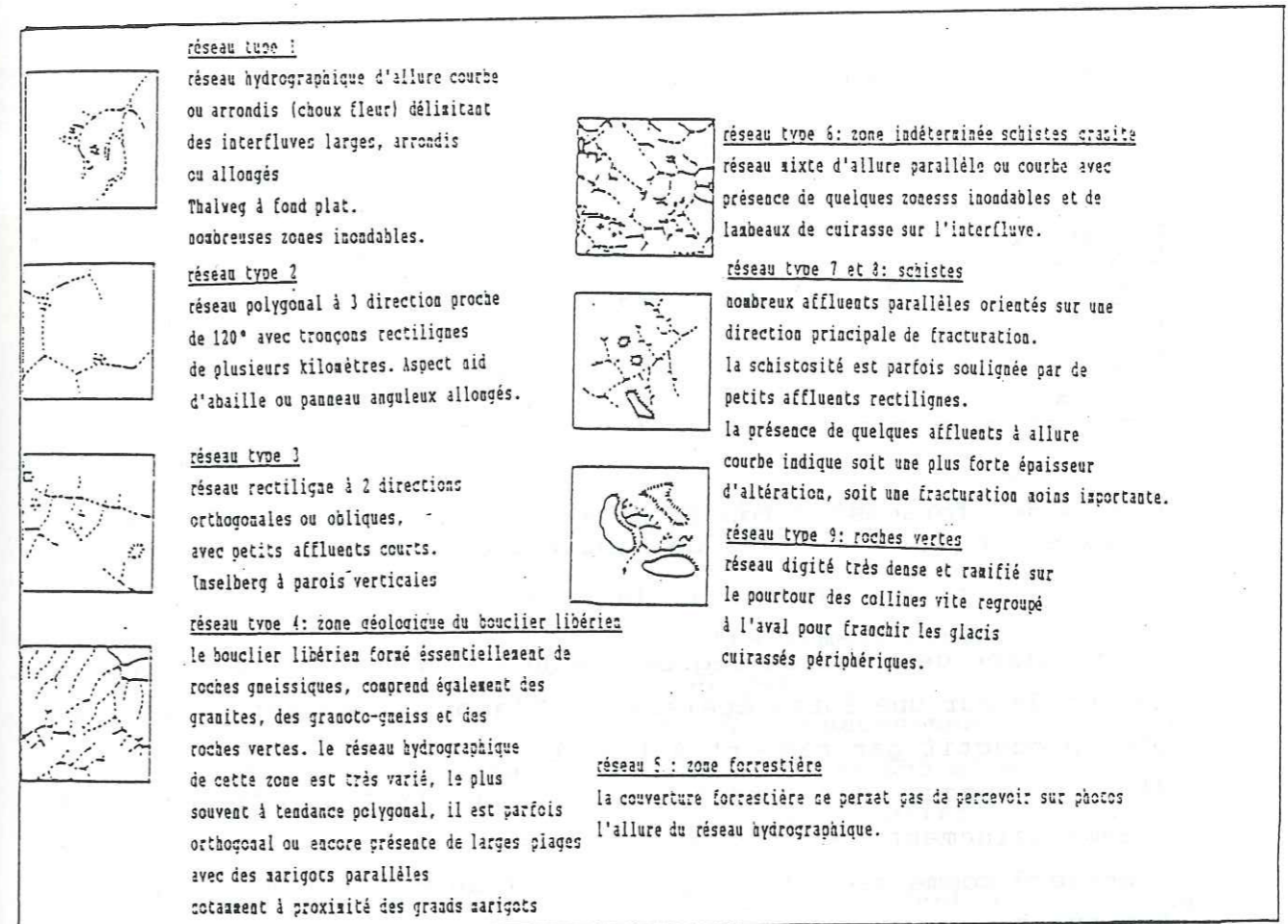


Tableau 1 Exemples de types de réseaux hydrographiques en Cote d'Ivoire (BOURGUET , L. (1980)

Il faut de préférence implanter les forages :

1) à l'intersection de fractures sécantes . Le tableau 2 ci-dessous montre l'influence de ce facteur sur la productivité des ouvrages.

Débit →	0	< 0,5 m ³ /h	< 1 m ³ /h	1 à 5 m ³	> 5 m ³ /
Granites	0	0	5%	35%	60%
Schistes	0	0	0	51,8%	48,2%

Tableau 2 Forages situés sur des noeuds de fractures (74 noeuds, Boucle du Cacao, RCI, Géohydraulique, 1981)

2) sur les linéaments multikilométriques

Longueur	débit							classes des fractures
	0	< 500 l/h	< 1m ³ /h	1 à 4	4 à 7	7 à 15	>15	
< 500 m	10%	13,7	37,7	51,7	10,1	0	0	secondaires
0,500 - 1 km	8	14,8	29,6	46,9	10,8	5,4	0	
1 à 2	4,3	6	14,5	61,2	13,7	10,3	0	kilométriques
2 à 5	3,6	3,6	8,4	49,9	32,9	7,2	1,2	
5 à 10	0	2,4	4,8	47,8	33,8	12	0	multikilométriques
10 km	0	0	0	5,5	27,7	33,2	33	

tableau 3
Débits des forages en fonction de la longueur des fractures exprimés en% (378 relevés de débit) R.C.I. Boucle du Cacao

3) en raison de l'action régressive de l'érosion l'altération est conservée sur une forte épaisseur à l'amont, rendant ce dernier plus productif par rapport à l'aval.

4) la fréquence des fractures est un facteur favorable à l'emménagement des réserves, mais ce critère doit être considéré comme secondaire par rapport au degré d'ouverture des fractures.

5) l'ouverture, la fréquence et la pénétration des fractures sont fonction de l'orientation de la direction d'allongement de ces fractures (CIEH 1981). Le tableau 4 donne un exemple d'étude menée en la matière. L'ouverture de la fracture dépend de sa position vis à vis des contraintes régionales.

PAYS	DIRECTIONS FAVORABLES	DIRECTIONS DEFAVORABLES
<u>Côte d'Ivoire</u>		
"Coton" - (granite) [5]	(0-10)(20-30)(110-120)	(160-170)
"Coton" - (schiste) [5]	(10-40)(70-80)(90-120)(130-150)	(40-50)(120-130)
"Cacao" - (granite) [12]	(0-20)(40-50)(70-80)(110-120)(160-170)	(60-70)(80-90)(170-180)
"Cacao" - (schiste) [12]	Toutes acceptables (0-10)(50-60)(70-90)(110-130)	Méant moins bonnes : (30-40)(90-100) (140-150)(150-170)
<u>Sénégal Oriental</u> [15]	Presque toutes sauf -	(0-10)
<u>Mali - Kayes</u> [2]	(0-10)(40-60)(70-80)(130-140)(160-180)	toutes les autres
<u>HAUTE VOLTA</u>		
Sanié [1]	(0-10)(20-40)(50-80)(120-140)(160-170)	Toutes les autres
Mogtedo [3]	10° (20-30)(150-170)	(60-80)(110-120)
Zigla [2]	(20-30)(60-80)	(80-95)(150-170)(110-120)

Tableau 4 Directions des fractures les plus favorables ou défavorables à l'obtention d'un % de réussite satisfaisant (débit supérieur ou égal à 0.6m³/h) (Géohydraulique, 1981)

3.1.3 Les images satellites

On utilise les combinaisons des bandes 2, 4, 5 et 7 pour les raisons citées plus haut. Nous avons utilisé pour nos travaux les images satellite suivantes :

images satellites Landsat TM et MSS

images satellites SPOT

Les images sont soit :

sur papier permettant un tracé des linéaments et des structures utiles pour l'hydrogéologie.

sous forme numérique permettant une interprétation par ordinateur. Nous avons utilisé le système de traitement numérique PCIMC. Le traitement se fait en plusieurs étapes :

*l'étalement qui permet de faire des rehaussements en ramenant les minima et les maxima de la bande à 0 et 255 afin d'exploiter le potentiel des 256 niveaux de gris offert par l'octet informatique.

*les filtres: la plupart des auteurs s'entendent à déclarer que les filtres directionnels font bien ressortir les structures, les failles et les plissements. (Yésou et al., 1990; Gwyn et al., 1989; Bruce, 1987; Hornsby et al., 1985; Seuthé et al., 1985; Dubé et al., 1984). Ces filtres utilisent une matrice de poids relatifs servant à donner une nouvelle valeur au pixel central de la matrice. La grandeur et le poids de la matrice varient selon l'information que l'on désire rehausser. Ainsi un filtre passe bas de moyenne 3*3 avec les poids 1,1,1/1,1,1 élimine les hautes fréquences par rapport aux pixels voisins et permet de lisser une image en atténuant ses anomalies. On a utilisé aussi des filtres passe bas de type gaussien, des filtres Laplaciens ou omni directionnels, mais ces derniers n'ont pas donné des résultats satisfaisants. Par contre, des filtres directionnels ont permis d'accentuer les lignes de contraste existantes en rehaussant les fortes brillances et en diminuant les faibles brillances.

*l'indice de végétation: on constitue des algorithmes utilisant

des rapports de bandes ainsi que des opérations mathématiques pour engendrer de nouvelles bandes laissant apparaître une information sélective tels les indices de végétation (Perras et al., 1985).

On pourrait se servir des espèces hydrophiles, indicateurs de points d'eau (*Ficus gnafolocarpa* et *Myrtgyna inermis*) qui s'alignent généralement dans des directions de fractures.

Il est aussi intéressant d'utiliser des algorithmes mathématiques qui permettent de distinguer les zones de forte activité chlorophyllienne des zones à faible activité, en faisant intervenir le rapport suivant appelé VI: $TM4 - TM3 / TM4 + TM3$, car la chlorophylle est très fortement réfléchiée dans le proche infra-rouge (TM4) et fortement absorbée dans la portion du rouge du spectre visible (TM3). La chlorophylle est un indice de fracture du rocher quand on la retrouve sous forme linéaire.

*le rapport de bandes en particulier le rapport $TM7/TM5$ qui permet de rehausser des contrastes peu marqués en géologie et d'atténuer les effets topographiques (Seuthé et al., 1985).

* l'analyse en composantes principales (augmentation des contrastes et diminution des bruits de fond) dont la composante No 2 (CP2) a été retenue comme donnée de base à laquelle on a appliqué un filtre passe bas de moyenne servant de bande d'entrée dans la composition des filtres directionnels de type Sobel. On en ressort quatre images filtrées (tirées des quatre directions azimutales) qui sont additionnées à la composante principale No2 moyennée pour être ensuite interprétées visuellement.

Les poids retenus dans la composition du filtre directionnel de type Sobel sont ceux suggérés par Showengerdt, cotés comme étant les plus performants par Yésou et al. (1990), auxquels nous avons attribué des orientations adaptées des filtres directionnels de Moore et al. (1983). Les filtres directionnels de type Sobel et leurs poids respectifs sont les suivants:

Filtre directionnel E-O	1	2	1
	0	0	0
	-1	-2	-1

Filtre directionnel N-S	1	0	-1
	2	0	-2
	1	0	-1

Filtre directionnel NO-SE	0	1	2
	-1	0	1
	-2	-1	0

Filtre directionnel NE-SO	2	-1	1
	0	-1	1
	-1	-2	0

la télédétection joue un rôle primordial en recherche d'eau surtout dans les régions où il n'existe pas d'étude géologique détaillée ou d'anciens travaux. Elle est un outil indispensable à la géophysique pour le positionnement de profils. Il est à noter que dans certains cas jugés non difficiles, la télédétection seule a permis l'implantation de forages avec un taux d'échec relativement bas mais il faut toujours utiliser des méthodes complémentaires surtout dans les recherches de débits élevés.

3.2 Les études géologiques

L'eau est contenue dans les roches . On ne peut faire une étude du contenu sans passer par le contenant dans la mesure où ce sont les paramètres de ce dernier qui conditionnent son existence . Comme nous l'avons vu dans les généralités , les formations du socle cristallin peuvent être subdivisées en deux catégories :

- les schistes
- les roches cristallines

Les schistes qui sont des roches plastiques se déforment mais ne se morcellent pas sous l'action des contraintes. Ce n'est que lorsqu'elles contiennent des filons qu'elles deviennent alors très productives avec des taux d'échec relativement bas .

Les roches cristallines sont généralement très fissurées car elles sont aptes à se briser , mais la texture , la structure de la roche jouent un rôle essentiel dans la productivité de ces roches .

Si on prend en considération les roches cristallines beaucoup d'auteurs et entre autres N.A. Savadogo 1984 ,admettent la hiérarchie suivante dans la productivité des formations :

- 1-filons de quartz et de pegmatites
- 2-migmatites gneissiques ocellées à débit planaire
- 3-roches basiques
- 4-granites migmatitiques homogènes et granites intrusifs

La première étape de la prospection géologique consiste en une reconnaissance pétrographique sur le terrain et au besoin une étude microscopique au laboratoire . On détermine ainsi la nature de la roche ainsi que sa structure . le deuxième travail consistera en une étude tectonique sur les affleurements visibles sur le terrain : on relève à cet effet :

- les fractures
- les joints ouverts ou fermés
- les foliations
- les schistosités
- les axes de pli

-les directions des filons

Il est à noter que les filons qui sont des critères de productivité des ouvrages empruntent généralement les directions des fractures ouvertes.

L'étude des fractures permet de reconstituer les différentes phases tectoniques et par conséquent en déduire les grands axes de drainage.

Les tableaux ci-dessous montrent l'influence de la structure géologique géologique sur la productivité des ouvrages réalisés au Togo, au Mali et au Burkina Faso ces dernières années.

Nature des roches	Nombre puits	Q < 500 l/h	Q > 500 l/h	% puits Q > 500 l/h
Grès Pendjari	8	8	0	0 %
Argilites OTI	17	17	0	0 %
Schistes BUEM	7	4	3	43 %
Grès BUEM	7	5	2	28 %
Chlorito - Schistes Kandé	5	4	1	20 %
Schistes sériciteux Kandé	4	2	2	50 %
Micaschistes ATACORA	5	3	2	40 %
Granite	4	4	0	0 %
Orthogneiss acide	9	5	4	45 %
Orthogneiss basique	6	3	3	50 %
Migmatites acides	5	5	0	0 %
Granite Dapaong	14	3	11	78 %

Tableau 5 Influence de la géologie sur la productivité des ouvrages (Togo, Géohydraulique, 1981)

Nature des roches	Nombre forages	Forages dont le débit < 700 l/h	Forages dont le débit > 700 l/h	% forages dont le débit est < 700 l/h
Migmatites Dahomeyen	157	41	116	73,9 %
Gneiss de l'OFE	31	13	18	58,1 %
Quartzites ATACORA	6	4	2	33,3 %
Micaschistes ATACORA	39	10	29	74,4 %
Quartzites BUEM	1	0	1	100 %
Schistes BUEM	23	0	23	100 %
Gneiss basiques Kabré	3	0	3	100 %
Schistes de Kandé	13	0	13	100 %
Granites Dapaong	15	1	14	93,3 %
Argilites OTI	4	1	3	75 %
Grès Dapaong	3	0	3	100 %

Tableau 6 Influence de la géologie sur la productivité des ouvrages (Togo, Géohydraulique, 1981)

Diorite	4	5	1	4	80 %
Granite	18	36	16	20	55 %
Grano-diorite	10	12	4	8	66 %
Micaschistes	7	5	2	3	60 %
Schistes	10	5	0	5	100 %
paragneiss	4,5	4	1	3	75 %
Dalérite	20	7	1	6	86 %

Tableau 7 Influence de la géologie sur la productivité des ouvrages (Mali, Géohydraulique, 1981)

Nature des roches	debit max. absolu	Nombre forages	Forages Q < 600 l/h	Q > 600 l/h	% forages Q > 600 l/h
Gres	12 m ³ /h	2	1	1	50 (1)
Volcano-sédimentaire	< 3	15	10	5	33
schistes	< 1,6	5	14	1	20
roches vertes	5	2	0	2	100 (1)
granites	6,6	33	12	21	64
		57 retenus			(1) non significatif

Tableau 8 Influence de la géologie sur la productivité des ouvrages (Haute-Volta, Géohydraulique, 1981)

Nature des roches	Nombre forages	Q < 500 l/h	Q > 500 l/h	% forages Q > 500 l/h
- Sédimentaire	5	1	4	80 %
- Schistes et Volcano-sédi. du Birrimien	11	1	10	91 %
- Granites tardi-tectoniques	13	10	3	23 %
- Granites régénérés	24	12	12	50 %
- Vieux socle anté-birrimien	27	8	19	71 %

Tableau 9 Influence de la géologie sur la productivité des ouvrages (Haute-Volta, Géohydraulique, 1981)

Les conditions requises pour une sûreté d'implantation des forages se trouvent aux abords de l'intersection des fractures en extension et de cisaillement (CIEH Novembre 1989). Pour le Burkina on pense (figure 6) que les zones d'extension seraient Nord-Sud plus ou moins 37.5 tandis que les zones de cisaillement seraient Nord 30 et Nord 150 plus ou moins 37.5.

Les zones anticlinales sont des zones d'infiltration du fait des fissures de distension qui affectent l'extrados du pli mais ne sont jamais de zones d'accumulation. Les zones synclinales sont essentiellement des zones de circulation et d'accumulation favorables pour une exploitation d'eau souterraine.

Une analyse pétrographique et tectonique permet d'augmenter les chances de réussite des forages car non seulement la productivité est liée à la nature pétrographique mais aussi la tectonique de surface reflète en grande partie les caractéristiques profondes des formations géologiques. Le manque d'étude géologique conduit très souvent à un pourcentage très élevé d'échecs, car on fait souvent trop confiance aux résultats de la prospection géophysique au détriment des études géologiques sur le terrain.

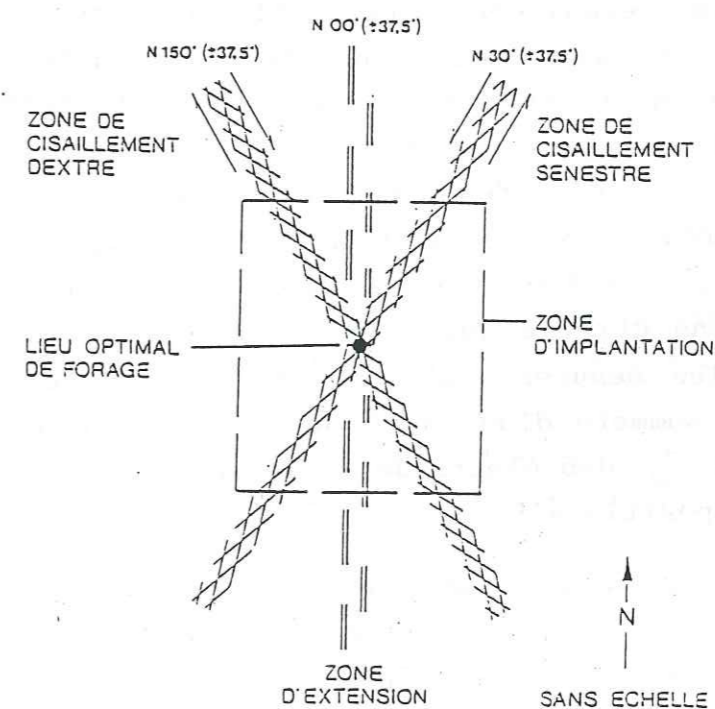


Figure 6 Principe d'implantation d'un forage à grand débit en milieu cristallin du Burkina Faso sur la base des structures tectoniques. (CIEH-BGR 1989)

3.3 LA PROSPECTION GEOPHYSIQUE

LA Prospection géophysique a constitué l'activité de terrain et de laboratoire la plus importante de ce travail. Les méthodes de base employées sont: la méthode électrique et la méthode électromagnétisme. Différents dispositifs ont été déployés avec un maillage très serré sur tous les sites

3.3.1 La méthode de prospection électrique

Elle est basée sur la loi d'Ohm: $\Delta V = RI$

ΔV =différence de potentiel

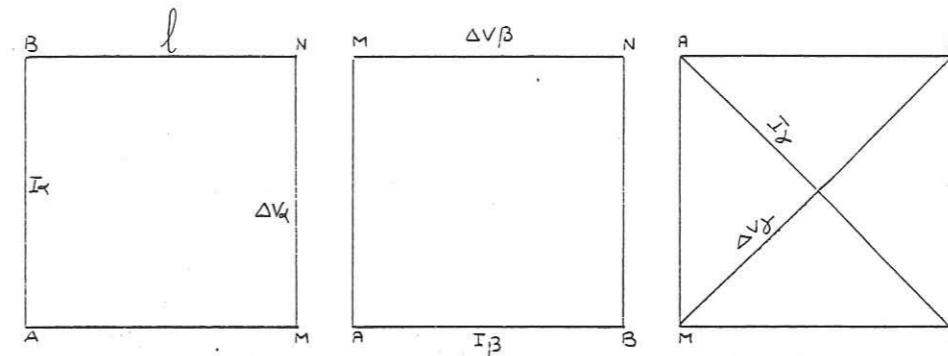
R=résistance

I=intensité de courant

Le principe de la prospection électrique repose sur la mesure de la résistivité du sous-sol. Comme c'est presque toujours le cas, on injecte un courant dans le sol à l'aide deux électrodes (A et B) et le potentiel qui en résulte est mesuré à l'aide de deux autres électrodes (M et N).

Plusieurs techniques sont utilisées pour les mesures électriques. Lorsqu'on garde les électrodes d'injection à une distance fixe on effectue des mesures de résistivité apparente à une profondeur jugée constante. Il suffit de se déplacer sur des profils et on effectue ainsi des trainés de résistivité. On peut en gardant fixe le milieu du dispositif, faire varier la longueur AB, on effectue des sondages électriques.

Nous avons utilisé aussi la technique de profilage carré simple pour les mesures d'anisotropie. Les électrodes A,B;M;N occupent les sommets d'un carré de côté l. On définit trois position α, β, γ des électrodes. le schéma ci-dessous résume ces trois dispositions.



Nous avons utilisé les positions α et β

$$\rho_a(\alpha) = K \frac{\Delta V_{\alpha}}{I_{\alpha}}$$

$$\rho_a(\beta) = K \frac{\Delta V_{\beta}}{I_{\beta}} \quad K = \frac{2\pi l}{2 \cdot \sqrt{2}}$$

Si $\rho_a(\alpha) \neq \rho_a(\beta)$ on a alors une anisotropie et on définit un coefficient d'anisotropie apparent $\lambda_a = \sqrt{\rho_a(\alpha) / \rho_a(\beta)}$ et une résistivité moyenne $\rho_m = \sqrt{\rho_a(\alpha) \cdot \rho_a(\beta)}$. Notons que le dispositif carré permet de mieux mettre en évidence l'anisotropie que le dispositif Schlumberger (P. Louis et R. Darboux-Afouda 1989)

3.3.1.2 INTERPRETATION

3.3.1.2.1) les trainés de résistivité

On décèle sur un profil de résistivité les différents types d'anomalies en tenant compte du contraste de résistivité et d'une éventuelle dissymétrie de forme. On considère en général que l'altération agit de préférence sur l'axe d'un accident tectonique et que la dissymétrie résulterait d'un pendage éventuel des failles.

On observe trois types d'anomalies :

- type compartiment conducteur, étroit ou large selon le cas, parfois dissymétrique;
- type contact où on observe deux paliers de résistivité distincts : on retrouve ce cas avec les filons.
- type palier conducteur: on observe des faibles valeurs de

résistivité apparente et sans présence d'un encaissant net.

Généralement, on implante le forage au minimum de résistivité mais ce minimum peut correspondre à un noyau argileux ce qui peut engendrer un échec.

Avant de faire les trainés de résistivité, il est souhaitable de faire un sondage électrique pour déterminer au mieux la longueur de ligne AB de sorte qu'on reste dans la branche montante de la courbe de sondage électrique; ainsi on peut suivre la variation de l'épaisseur des altérites et la morphologie du bedrock. En effectuant plusieurs profils de résistivités, on peut tracer une carte d'isorésistivité pour déterminer les axes les plus conducteurs.

3.3.2.2-Méthode d'interprétation des sondages électriques

3.3.2.2.1 Méthode d'interprétation à l'aide des abaques Cagniard

Nous utilisons la méthode Cagniard qui consiste à décomposer plusieurs terrains en une série de deux terrains. Les principales étapes sont les suivantes :

- on superpose la courbe expérimentale et l'abaque "deux terrains" en faisant coïncider la première branche avec une des courbes "deux terrains" tout en gardant les axes parallèles entre eux. On pointe la croix de l'abaque sur la courbe expérimentale et ses coordonnées donnent ρ_1 et h_1 respectivement résistivité et épaisseur du premier terrain. Le rapport ρ_2/ρ_1 de la courbe deux terrains choisie permet de calculer ρ_2 .

- De la même manière on fait coïncider la deuxième branche de la courbe expérimentale avec une courbe deux terrains :

* si le second terrain est suffisamment épais on détermine aisément la seconde croix et ses coordonnées caractérisent un terrain électriquement équivalent aux deux premiers terrains (ρ_{1-2} et h_{1-2}). La courbe deux terrains donne ρ_3/ρ_{1-2} ce qui permet de tirer ρ_3 . On superpose ensuite la courbe expérimentale à l'abaque lieu de croix avec la première croix à l'origine, la deuxième croix se situant à l'intersection de deux familles de

courbe l'une donnant ρ_2/ρ_1 déjà connu, l'autre donnant le rapport h_2/h_1 , on en déduit h_2 .

* Lorsqu'on a un second terrain très peu épais, on place la première croix à l'origine de l'abaque des lieux de croix et on trace la courbe du rapport ρ_2/ρ_1 déterminée en première étape. La seconde branche de la courbe expérimentale est mise en coincidence avec l'abaque deux terrains en déplaçant l'origine de l'abaque deux terrains sur la courbe du rapport ρ_2/ρ_1 tout en gardant les axes parallèles. On détermine ainsi la deuxième croix et partant ρ_3 et on procède comme précédemment pour déterminer h_2 .

- Lorsqu'on a une courbe à quatre terrains le processus de calage reste le même. Les coordonnées de la troisième croix donnent ρ_{1-2-3} et h_{1-2-3} , résistivité et épaisseur équivalentes électriquement aux trois premiers terrains, la courbe "deux terrains" donnant le rapport ρ_4/ρ_{1-2-3} ; permettant de tirer ρ_4 sur l'abaque lieux de croix on place la seconde croix à l'origine et la troisième croix se trouve ainsi à l'intersection de deux familles de courbes, l'une donnant le rapport ρ_3/ρ_{1-2} et l'autre h_3/h_{1-2} , ce dernier permet de calculer h_3 .

Bon nombre d'auteurs ont réalisé des programmes informatiques permettant l'interprétation par ordinateur des sondages électriques. Nous avons ainsi utilisé le programme SEV de M J.L. ASTIER. Ce programme permet dans un premier temps grâce à une description de la courbe expérimentale (couche résistante ou conductrice, épaisse ou mince par rapport à la couche située au dessus) d'obtenir une répartition des différentes couches de terrain avec leur résistivité et leur épaisseur comme avec les abaques. On peut ensuite se donner une marge d'erreur (10% pour notre choix) et calculer ainsi des classes d'équivalences permettant ainsi d'avoir non pas une résistivité et une épaisseur brutes mais des valeurs minimales

et maximales. Dans un deuxième temps on optimise les résultats obtenus en les introduisant comme modèles ce qui permet de diminuer les erreurs par itérations successives.

En plus de l'interprétation le programme SEV permet au préalable:

- de calculer le facteur géométrique K
- de calculer les résistivités apparentes
- de raccorder les courbes à l'embrayage.

Outre la mise en évidence d'un terrain conducteur, notamment une arène grenue et une frange fissurée caractérisées par une gamme de résistivités, certaines caractéristiques de la courbe de sondage doivent être examinées :

- la remontée trainante qui met en évidence une frange fissurée; plus elle est importante plus la frange fissurée est étendue (A.N. SAVADOGO, 1984)

- l'accroissement brutal de l'épaisseur des alterites : il est un critère de zone faillée

- l'embrayage : il consiste, lors du sondage électrique, à mesurer, pour une longueur le ligne AB constante, deux valeurs de résistivité apparente en variant la longueur de ligne MN; il est généralement exécuté lorsque les lectures de ΔV deviennent très difficiles à cause d'une longueur de ligne MN très petite. Lorsqu'on a un embrayage négatif cela signifie qu'on passe de l'arène grenue à un noyau argileux; par contre un embrayage positif indique qu'on quitte l'arène grenue pour s'intéresser à une frange fissurée (A.N. SAVADOGO, 1984).

3.3.1.2.3- Le profilage carré

Les résultats que nous évoquons ci-dessous sont tirés des travaux suivants : BRION (1976) ; D. Le MASNE (1979) ; BRION et J.C. LACHAUD (1979) ; M. BRO, C. Hubert et P. MOULANT (1980-1981) ; A. SEHLI (1980) ; M. BRO et P. CHAPEROT (1982-1983).

Pour la résistivité moyenne, on a les mêmes types de courbes

que pour le coefficient d'allongement (ou d'anisotropie), on distingue généralement deux cas :

a) On enregistre une ascension régulière ou en dents de scie de la courbe: on obtient une valeur maximale à l'aplomb de la zone conductrice, c'est-à-dire correspondant à la plus basse valeur de résistivité : type A. Il est associé au type en palier et caractérise des zones intensément fissurées.

b) La courbe du coefficient d'allongement épouse la même allure ou la même forme que la courbe de résistivité : type D.

Le socle fissuré se comporte de façon type macro-anisotrope : c'est la base de l'interprétation des résultats du profilage carré (figure 7).

Les facteurs pouvant influencer les valeurs du coefficient d'anisotropie sont principalement le recouvrement, la fissuration, les noyaux argileux, le pendage des fractures.

- λ_a et ρ_{ma} diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de recouvrement ;

- si le recouvrement est résistant le minimum en résistivité est accentué, de même que le maximum en coefficient d'anisotropie ;

- λ_a et ρ_{ma} diminuent lorsque la pente de la faille tend vers l'horizontale ;

- λ_a tend à s'affaïsser du côté où plonge la fracture ;

- λ_a augmente avec l'intensité de la fissuration ;

- pour un milieu granitique λ_a baisse avec la présence d'un noyau argileux.

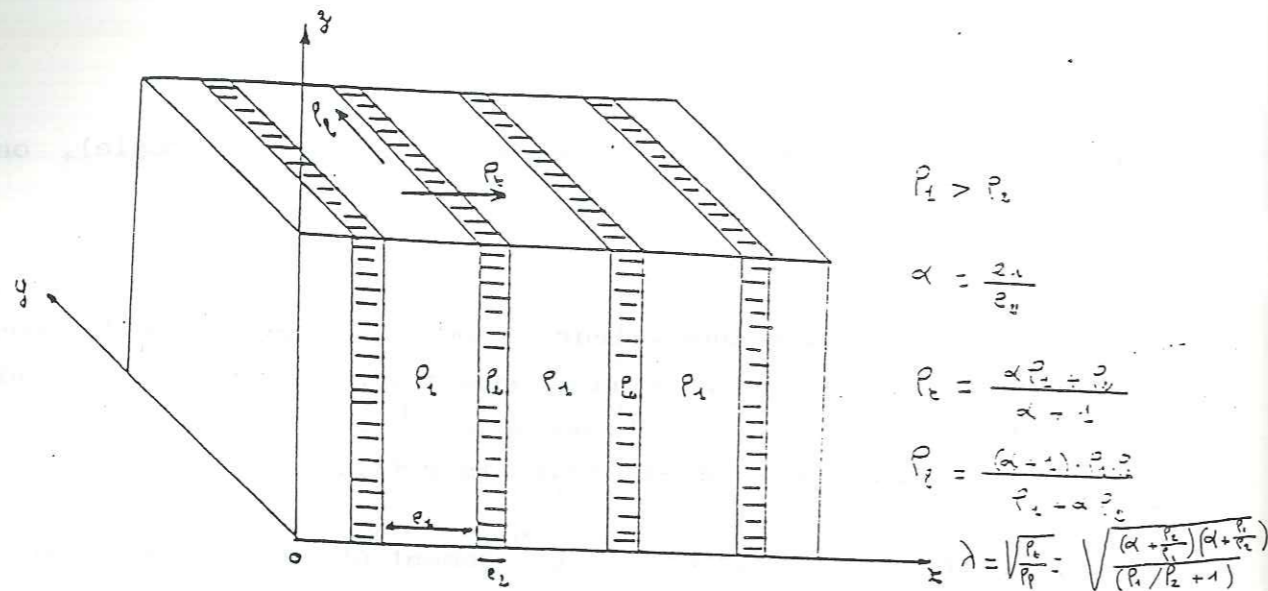


Figure 7 Modèle macroanisotrope
(D. Le Masme, 1979)

le tableau ci-dessous ainsi que les figures 8, 9, 10, 11, 12, 13 résumant les caractéristiques des résultats du profilage carré, tableau et figures inspirés de la thèse de DARBOUX-AFOUDA, 1985.

Type anomalie	Résist. Apparente	Résist. Apparente moy	Coéf. anisotropie	Fig
Modèle Type				
Granitique				
1: zone fracturée large	Palier	Compartment	A	8
2: zone contact	Contact	Contact	D	9
3: basfond sans fracture	compartment	Compartment	D	10
Birrimien				
1: filon fissuré pendage(90)	Contact avec pic	Contact avec pic	D	11
2: filon fissuré pendage(60)	Contact avec pic	Contact avec pic	D	12
3: dyke vertical			D	13

Tableau 9 Caractéristiques des courbes du profilage carré

Ainsi selon P. LOUIS et R. Darboux-Afouda, d'après des études faites au Bénin dans les formations cristallines, les implantations les meilleures se situent aux points présentant l'anisotropie la plus marquée.

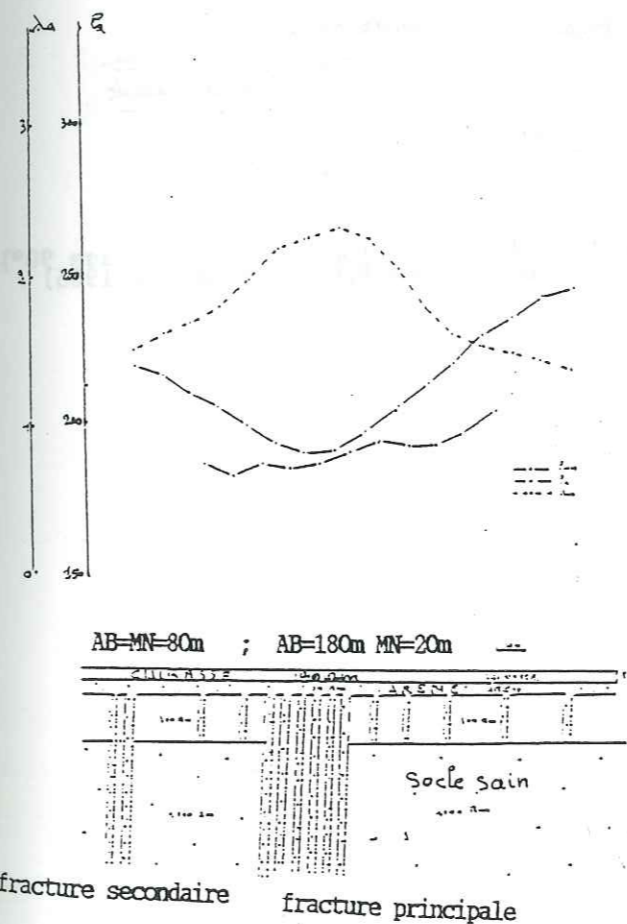


Figure 8 Modèle de zone fracturée large
(inspiré de R. Darboux-Afouda, 1985)

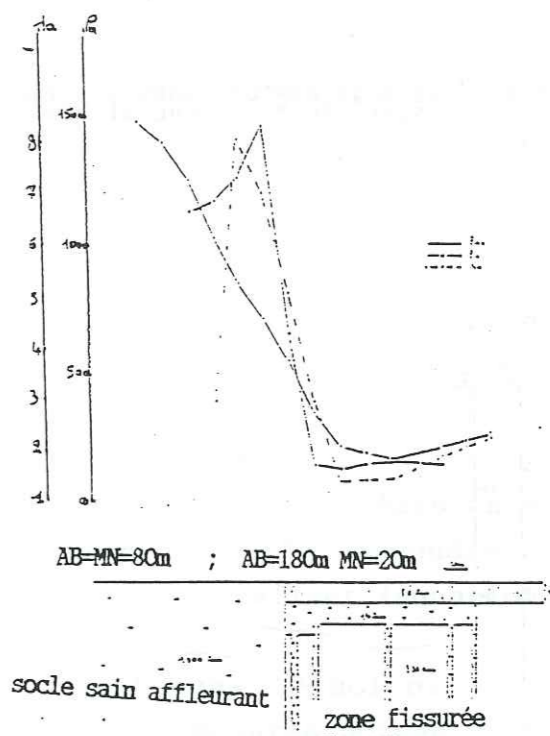


Figure 9 Modèle de zone de contact
(inspiré de R. Darboux-Afouda, 1985)

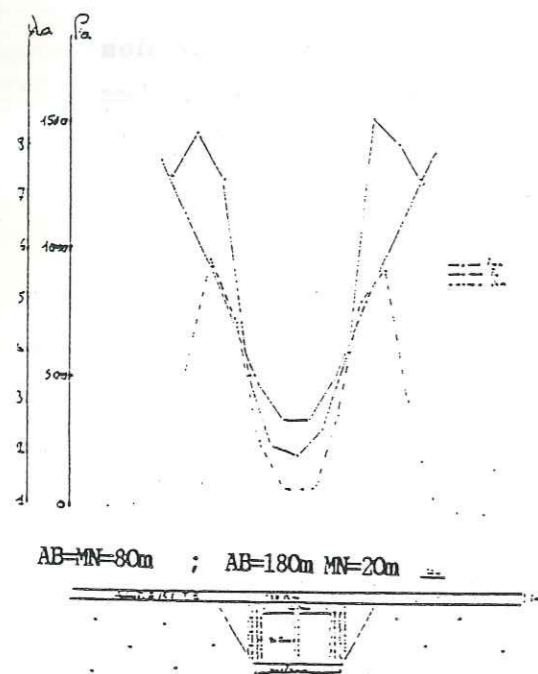


Figure 10 Modèle de basfond sans fracture (inspiré de R.Darboux-Afouda,1985)

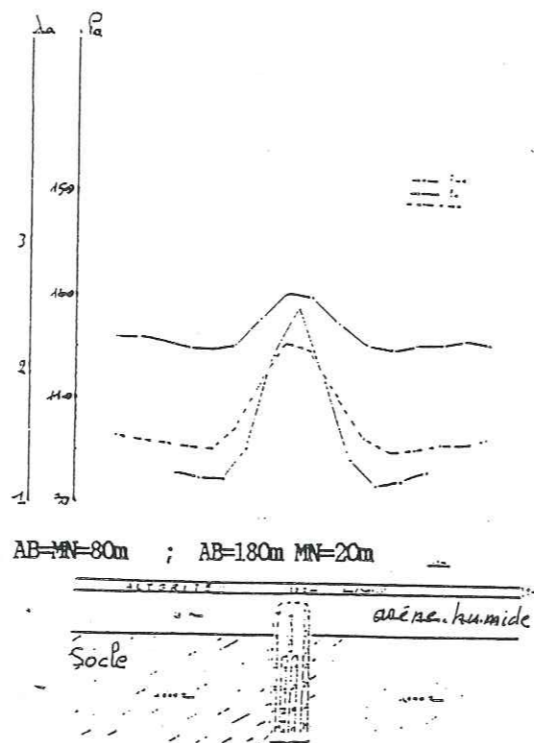


Figure 11 Modèle de filon fissuré (pendage 90°) (inspiré de R.Darboux-Afouda,1985)

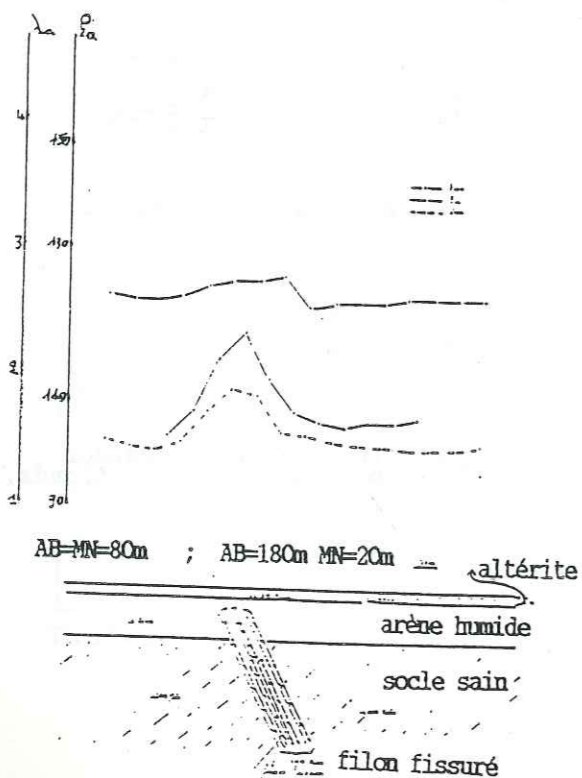


Figure 12 Modèle de filon fissuré (pendage 60°) (inspiré de R.Darboux-Afouda,1985)

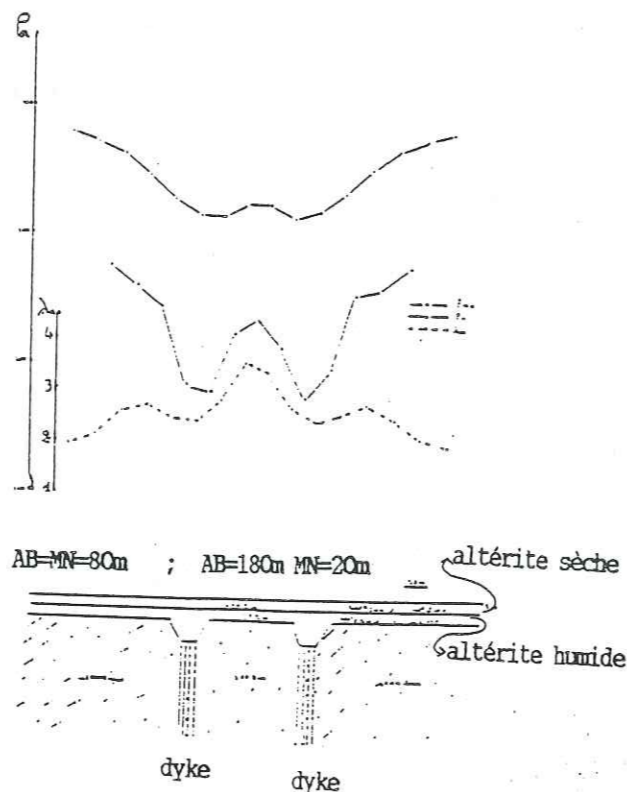


Figure 13 Modèle de dyke vertical (inspiré de R.Darboux-Afouda,1985)

3.3.2-METHODE ELECTROMAGNETIQUE

La théorie de l'électromagnétisme est basée sur les équations de Maxwell qui relient les différentes quantités H,B,D,et J avec:

- B= induction magnétique
- H= intensité du champ magnétique
- D= déplacement électrique
- J= densité de courant

Ces équations sont:

- 1-Rot. $E = -\partial B / \partial t$
- 2-Rot. $H = \partial D / \partial t + J$
- 3-Div. $B = 0$
- 4-Div. $E = 0$

On définit l'équation fondamentale de l'électromagnétisme par des opérations sur ces différentes équations; cette équation: $\Delta E = \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t}$ donne par résolution la solution pour un sous-sol de résistivité ρ

$$\rho = \frac{-i}{\omega \mu} \left(\frac{E_x}{H_y} \right)^2$$

i provenant de la différence de phase entre H et E

3.3.2.2 THEORIE DE L'INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

Si une masse conductrice enfouie dans une roche résistante est soumise à un champ magnétique alternatif, elle engendre à son tour un champ magnétique permettant de la localiser (équation de Maxwell).

Le champ magnétique primaire est produit dans le sol par une bobine émettrice ou station émettrice. Les mesures portent sur le courant induit qui résulte de l'interaction du champ primaire H_p et du champ secondaire H_s .

Comme méthode d'induction nous avons utilisé la méthode électromagnétique bipôle "Maxmin II".

la figure 14 montre le phénomène d'induction pour un système électromagnétique bipôle. On peut faire des sondages électromagnétiques en faisant varier les fréquences utilisées

pour engendrer le courant inducteur ceci afin de varier le profondeur d'investigation. En effet nous avons vu plus haut que:

$$P = \frac{-i}{\omega \mu} \left(\frac{E_x}{H_y} \right)^2 \quad \text{en considérant } \mu=1 \quad \omega = 2\pi f, \quad T = \frac{1}{f} \quad \text{on tire}$$

$$\frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{1}{2\sigma T}}$$

La profondeur d'investigation est $h = \frac{3.162}{2\pi} \sqrt{PT}$, elle est inversement proportionnelle à la fréquence; ainsi les hautes fréquences sont beaucoup moins pénétrantes que les plus basses fréquences.

Pour le système bipôle le champ secondaire dépend de la fréquence, de la séparation des bobines et de la conductivité de la roche que l'on peut traduire sous forme mathématique par la fonction simplifiée:

$$\frac{H_s}{H_p} = \frac{\omega \mu_0 S^2 \sigma}{4}$$

avec:

H_s = champ magnétique secondaire

H_p = champ magnétique primaire

$\omega = 2\pi f$ f étant la fréquence

S = séparation des bobines

Le rapport entre les champs secondaire et primaire est linéairement proportionnel à la résistivité apparente.

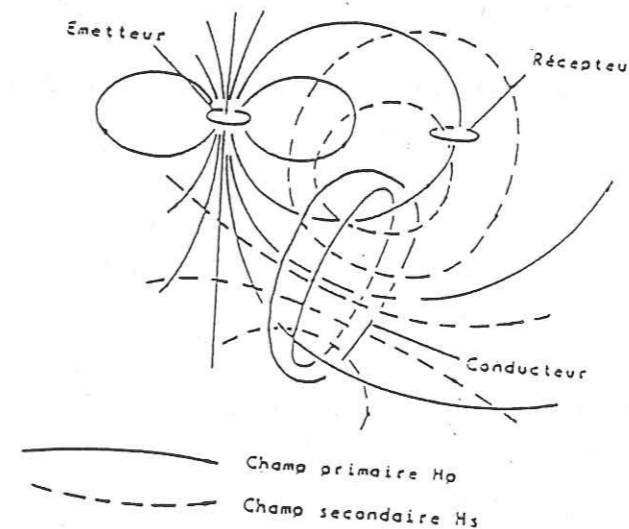
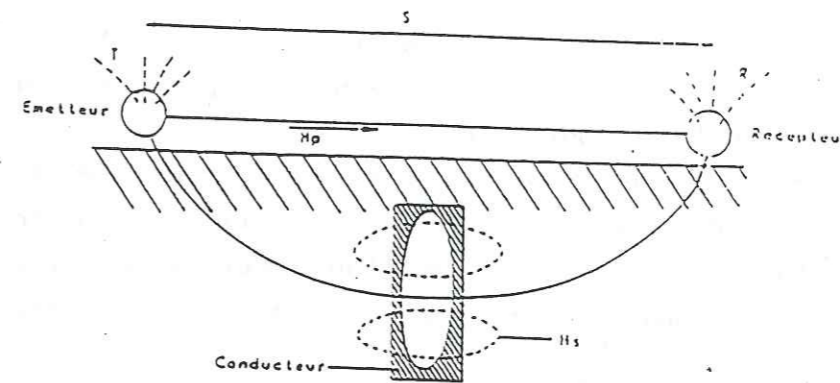


Figure 14 Schéma de l'induction électromagnétique du système EMB (Bieler G. et al. 1988)

3.3.2.3 ELECTROMAGNETISME MAXMIN

3.3.2.3.1) généralités

Le Maxmin II est un système électromagnétique portable, utilisable par deux personnes. Il comprend un récepteur et un émetteur reliés par un câble conducteur.

L'émetteur (13kg) est composé d'une boucle ovale composée de bobines à spires enroulées dans un cadre isolant, un générateur alimenté par des piles rechargeables, ce générateur permettant la circulation dans la bobine d'un courant alternatif à des fréquences sélectionnées.

Le récepteur (6kg) se compose de deux bobines rigides solidaires avec un boîtier de mesures à trois cadrans (composante en phase, composante en quadrature, angle d'inclinaison).

Le Maxmin II possède les caractéristiques suivantes:

-huit systèmes de fréquence: 110, 220, 440, 880, 1760, 3520, 7040, 14080 hertz pour faire face aux larges gammes de conductivité des conducteurs du bedrock et de subsurface.

-onze séparations de bobines : 12.5, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 300, 400 mètres.

-un inclinomètre pour contrôler l'inclinaison en terrain non plat et pour réduire le bruit de fond des lectures de la composante en phase.

-un système de télécommunication reliant l'émetteur au récepteur.

-une électronique performante pour réduire l'effet des lignes de tension et les effets atmosphériques.

-un signal lumineux pour signaler les mauvaises lectures.

-cinq modes opératoires : Max1, Max2, Max3, Min1, Min2. En outre on peut utiliser le récepteur seul pour faire des mesures de puissance de courant tellurique à 50 ou 60 hertz.

Le Maxmin II est approprié pour les mesures des composantes en phase et en quadrature du champ anormalique de zone conductrice électriquement sous forme de pourcentage par rapport au champ primaire.

3.3.2.3.2 PRINCIPE

La boucle émettrice crée un champ magnétique vertical H_p avec :

$$H_p = nSI\pi R^3$$

I = intensité de courant

n = nombre de spires

S = surface de la boucle

R = distance émetteur-récepteur

En présence d'un conducteur, il y a induction de courants de Foucault dans le conducteur. Ces derniers créeront un champ secondaire H_s de phase différente de H_p mais de même fréquence.

Le champ résultant $H_r = H_p + H_s$ peut être décomposé en champ horizontal et vertical. On procède au préalable à une compensation du récepteur sur un terrain sans anomalie. En présence d'un conducteur, les valeurs des composantes en phase et en quadrature sont directement lues sur les cadrans.

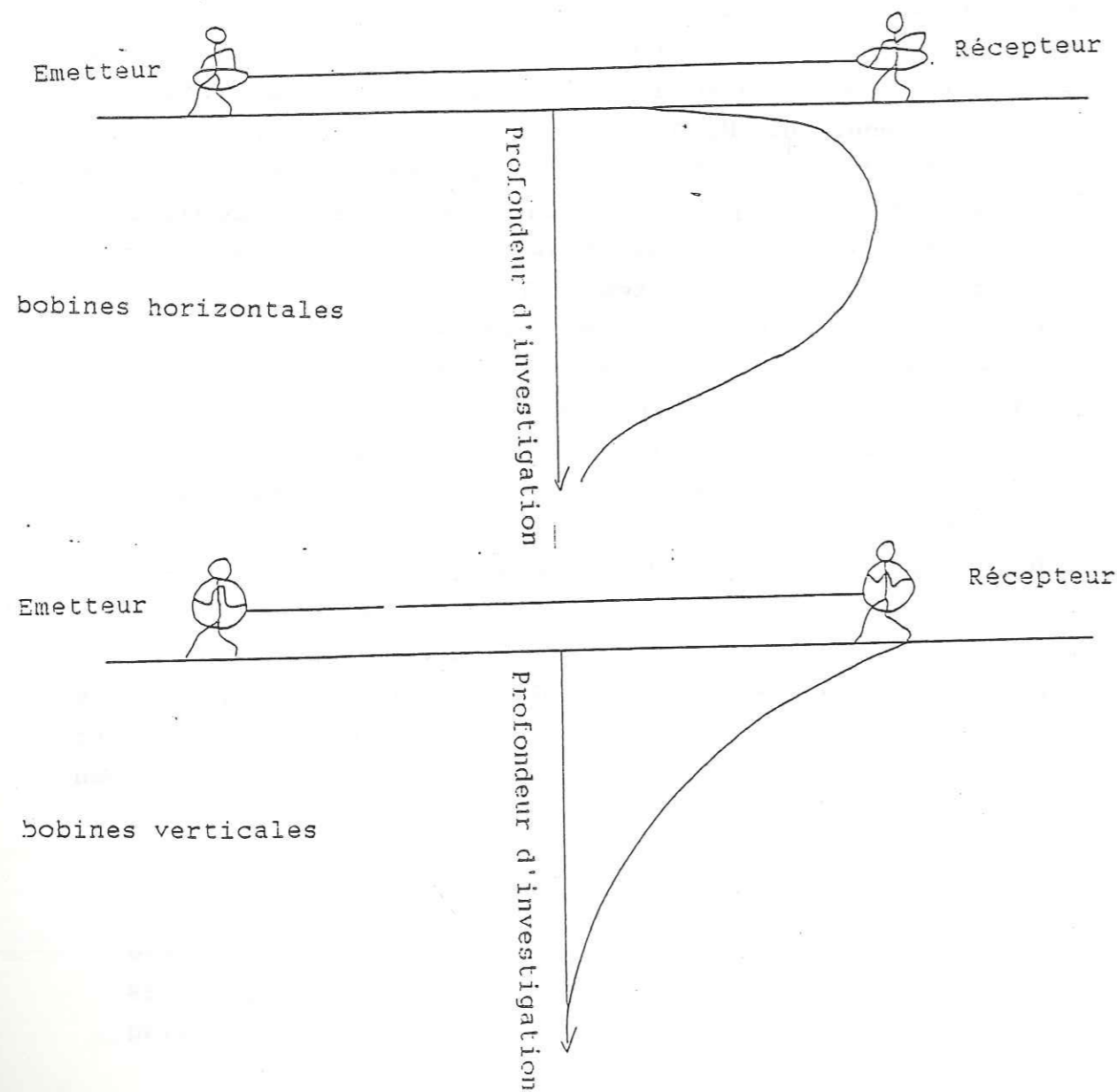
Deux modes opératoires ont été expérimentés dans le cadre de notre étude (figure 15): le Max1 et le Max2

Le Max1 ou horizontal loop; la boucle émettrice est gardée horizontale tandis que les bobines du récepteur sont en position verticale. Des bulles permettent de les garder horizontales et coplanaires.

Le Max2 ou vertical loop: la boucle émettrice en position verticale et les bobines du récepteur en position horizontale.

Les bobines du récepteur sont en position verticale lorsqu'on les place dans le creux des épaules, de part et d'autre de la tête de l'opérateur. En position verticale, l'ensemble bobines et boîtier de mesures sont portés en harnais ventral juste au niveau de la poitrine.

Figure 15 Mode bobines verticales et mode bobines horizontales
(inspiré de McNeil, 1991)



3.3.2.3.3 INTERPRETATION

3.3.2.3.3.1-Interprétation qualitative

Lorsqu'on traverse un conducteur vertical ou subvertical (faille) la composante en phase (IN-PHASE) chute à une faible valeur de même que la composante en quadrature mais cette dernière reste décalée par rapport à la composante en phase. Ce décalage est fonction de la conductivité et de la profondeur du bedrock (figure 16) .

Le décalage est faible juste au niveau de la faille car la résistivité de la zone d'altération est peu différente de celle de la faille. On observe deux passages au zéro lorsque le récepteur et l'émetteur sont situés au dessus du conducteur et deux pics positifs médians au delà desquels la courbe tend vers zéro. Le courant circulant dans la bobine de même que le champ secondaire $H_s = (H_s)_{\max} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2} - \theta)$ sont en retard de phase de par rapport à H_p et $\theta = \text{Tan}^{-1}(\frac{\omega L}{R})$

Le déphasage est causé par la loi fondamentale d'induction et l'angle par les propriétés électriques du circuit secondaire.

Pour un bon conducteur, $R \rightarrow 0$ donc $\theta \Rightarrow \frac{\pi}{2}$ H_s est quasi en opposition de phase du champ primaire. $H_s = (H_s)_{\max} \sin(\omega t - \pi)$ et $H_r = H_p + H_s$ est alors minimum.

Pour un mauvais conducteur $R \rightarrow \infty$, $\theta \rightarrow 0$ et $H_s = (H_s)_{\max} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ le champ résultant est alors maximum.

La variation de la fréquence du champ primaire H_p a le même effet.

Si f augmente $\omega \rightarrow \infty$, $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$ et en conséquence $H_s = (H_s)_{\max} \sin(\omega t - \pi)$ de sorte H_r devient minimum. Si H_p décroît et que la limite devient très petit $\omega \rightarrow 0$, $\theta \rightarrow 0$ et $H_s = (H_s)_{\max} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ et H_r devient maximum .

Ainsi, compte tenu de la résistivité des roches, il faut tester les différentes fréquences pour déterminer celle qui fait le mieux ressortir les anomalies.

Pour nos différentes investigations, c'est la fréquence 3520 qui fournit les meilleurs résultats avec une séparation de bobine de 50m.

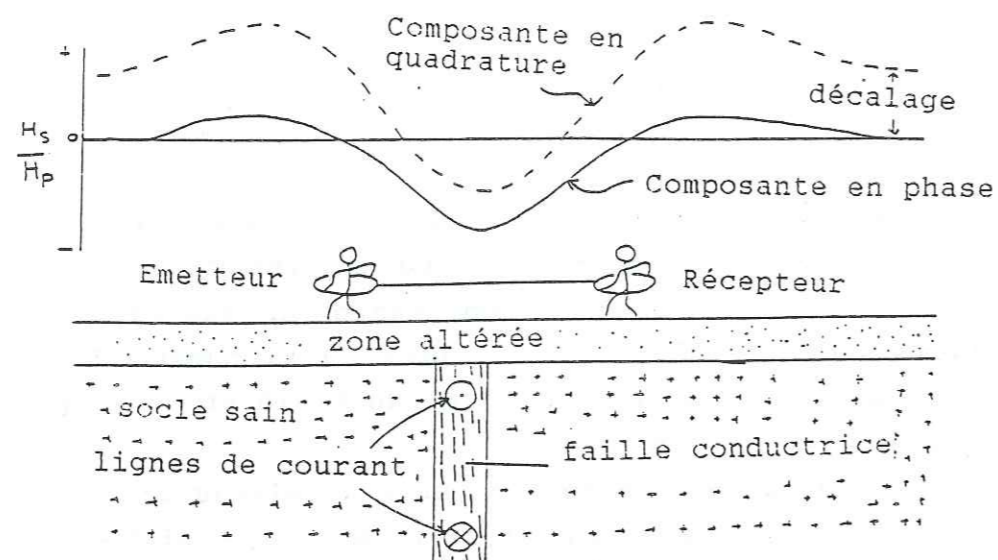


Figure 16 Données de Maxmin à travers un conducteur vertical
(inspiré de McNeol J.D., 1991)

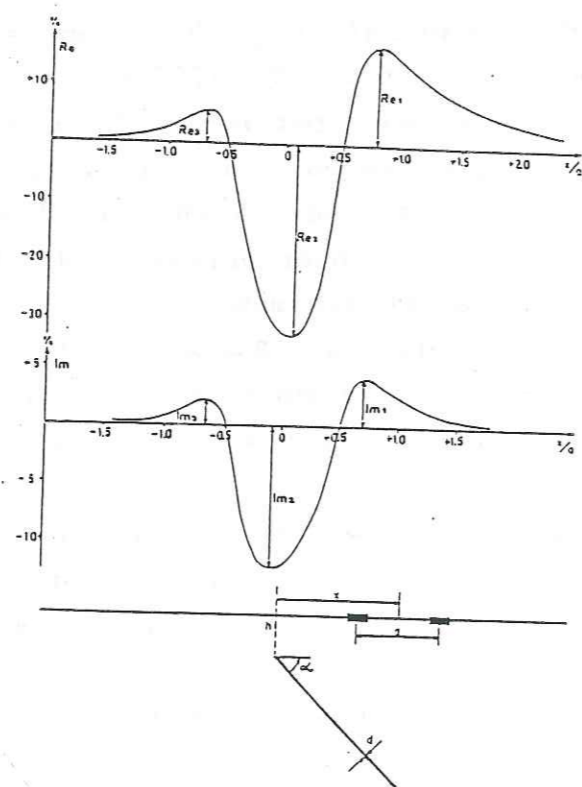


Figure 17 Symboles des valeurs lues sur la courbe expérimentale
(John Best, documents du Maxmin II)

3.3.2.3.3.2-Interprétation quantitative

Les anomalies en électromagnétisme Maxmin peuvent être interprétées par des courbes dites courbes types. En effet il existe des courbes types basées sur des modèles expérimentaux de laboratoires ainsi que des exemples de cas réels en prospection minière.

On compare la courbe expérimentale de terrain avec les courbes types et les paramètres de la courbe type concordante sont pris comme étant les paramètres du terrain expérimenté.

Les modèles ont été expérimentés par des feuillets d'aluminium et le paramètre dimensionné est:

$$W = \sigma \mu \omega a d \quad \text{avec}$$

σ = conductivité

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

$$\omega = 2\pi f \quad f = \text{fréquence}$$

a = séparation de bobines

d = épaisseur

La séparation des bobines et la fréquence sont des entités connues

La figure 17 représente les valeurs lues sur la courbe expérimentale ($Re_1, Re_2, Re_3, Im_1, Im_2, Im_3$). On convient de représenter la composante réelle ou composante en phase par Re et la composante imaginaire ou composante en quadrature par Im

Re_1 = composante en phase maximale (pic maximal)

Re_2 = composante en phase minimale

Re_3 = composante en phase maximale relative (pic minimal)

Im_1 = composante en quadrature maximale (pic maximal)

Im_2 = composante en quadrature minimale

Im_3 = composante en quadrature maximale relative (pic minimal)

Les modèles ont été calculés pour cinq paramètres dimensionnés

$$W = \infty, W = 1.75, W = 5.26, W = 12.3, W = 19.2, W = 29.7$$

On retrouvera plus de détail à l'annexe.

En combinant plusieurs fréquences, on exécute un sondage de fréquence semblable à un sondage type Schlumberger: la fréquence jouant le même rôle que l'écartement des électrodes A B.

Il existe des diagrammes dits diagrammes de phase pour l'interprétation des sondages électromagnétiques .

Interpex a conçu un programme informatique :EMIXMM permettant une interprétation plus rapide, plus aisée, plus précise. EMIXMM est un programme de modélisation par procédé direct et inverse nous avons utilisé ce logiciel pour l'interprétation de nos résultats.

4 ANALYSES DES RESULTATS

La figure 18 représente la localisation des sites étudiés qui se situent dans le centre du pays et le Nord du territoire burkinabè.

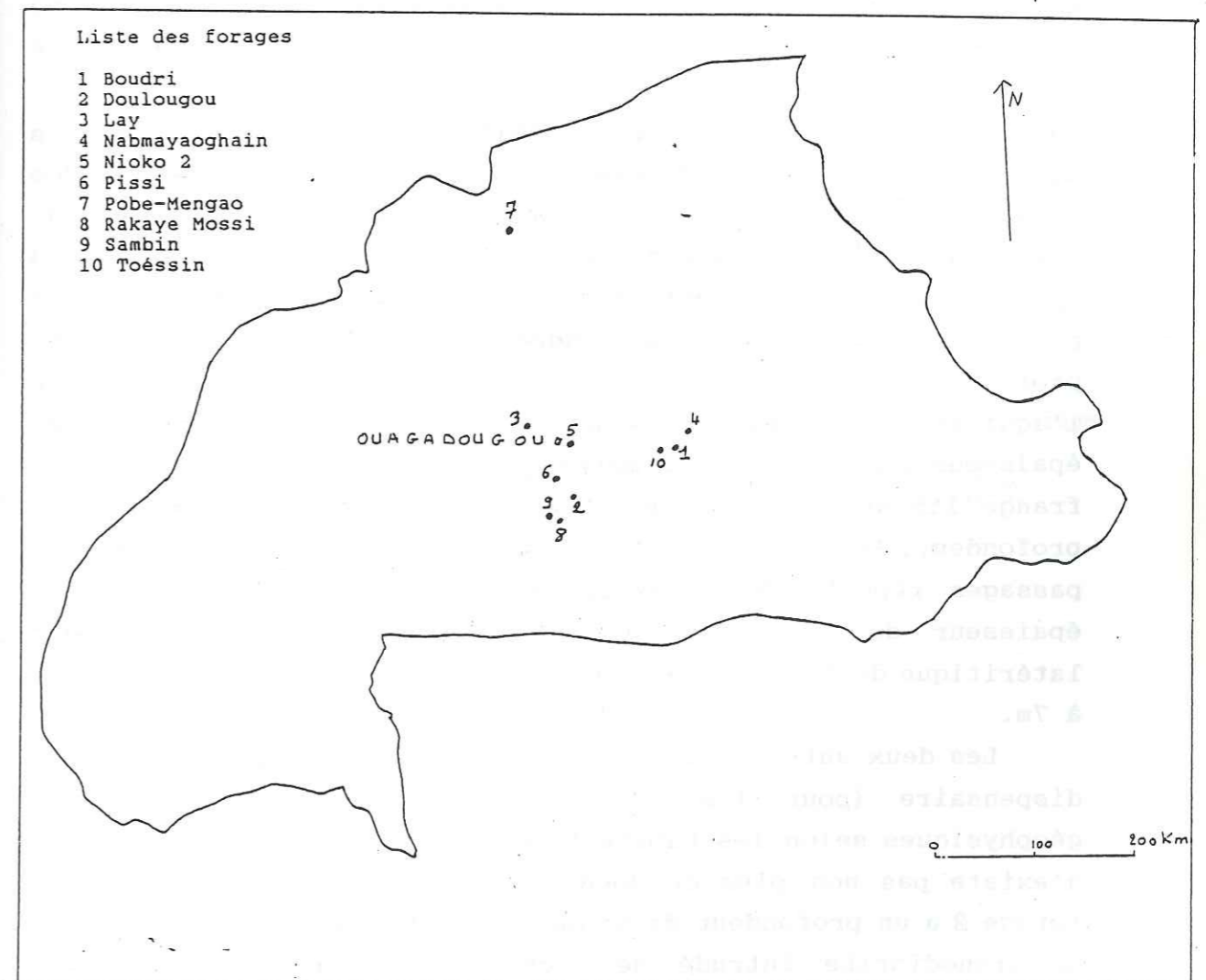


Figure 18 Localisation des sites investigués

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES SCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : plalour@ujf-grenoble.fr

4.1 PROVINCE DU BAZEGA

4.1.1 site de Pissi

Le village de Pissi est situé sur le plateau mossi à une quarantaine de kilomètres au sud de Ouagadougou. Il relève administrativement de la province du Bazèga et de la préfecture de Saponé et est situé à 11 km de Saponé sur l'axe Saponé-Kombissiri (figure 19). La pluviométrie varie entre 800 et 1000 mm par an. Sur le site de Pissi trois forages ont été investigués:

un hautement productif avec un débit de 36 m³/h, un à débit très bas (1.2 m³/h) et le dernier totalement sec. Au regard des documents que nous avons eu à notre disposition le forage à haut rendement a été implanté sur la base d'une photo-interprétation (photographies aériennes) et une prospection géophysique (deux profils de résistivité et un sondage électrique). Le forage a une profondeur de 34 mètres et le log de forage indique que l'aquifère se trouverait dans un granite gris fissuré, d'une épaisseur supérieure à 20 mètres (le forage demeure dans cette frange fissurée), avec une fissure importante à 22 mètres de profondeur. Au niveau de cette frange fissurée, on enregistre des passages répétés de pyroxénites. L'arène granitique a une épaisseur de 10 mètres, elle est surmontée par une couche latéritique de 1.5m et des argiles de 1m. Le niveau statique est à 7m.

Les deux autres forages ont été implantés à proximité d'un dispensaire (pour les besoins de la cause), sans études géophysiques selon les habitants que nous avons questionnés. Il n'existe pas non plus de documents de photointerprétation. Le forage 2 a une profondeur de 55 mètres et le log de forage indique un granodiorite intrudé de roche verte. On a une cuirasse latéritique de 2 m, une couche argileuse de 1m suivie d'une arène argileuse de 4 m. Hors-mis les intrusions de roches vertes assez fréquentes, on observe très peu de zone fissurée et le socle sain est signalé à 34 m. Le forage 3 a une profondeur de 73 m

avec une cuirasse latéritique de 3 m. On enregistre des venues d'eau à 30.5m juste au dessus d'une intrusion de filon de quartz et à 44.8m au dessus du substratum sain. L'arène argileuse a une épaisseur de 7m. De 11 à 45m de profondeur, on observe seulement des intrusions de quartz sans présence de fissure. Le niveau statique du forage est à 11 m de profondeur.

Nous présentons l'étude du site de Pissi sous les aspects suivants:

relevé géologique, télédétection et prospecton géophysique.

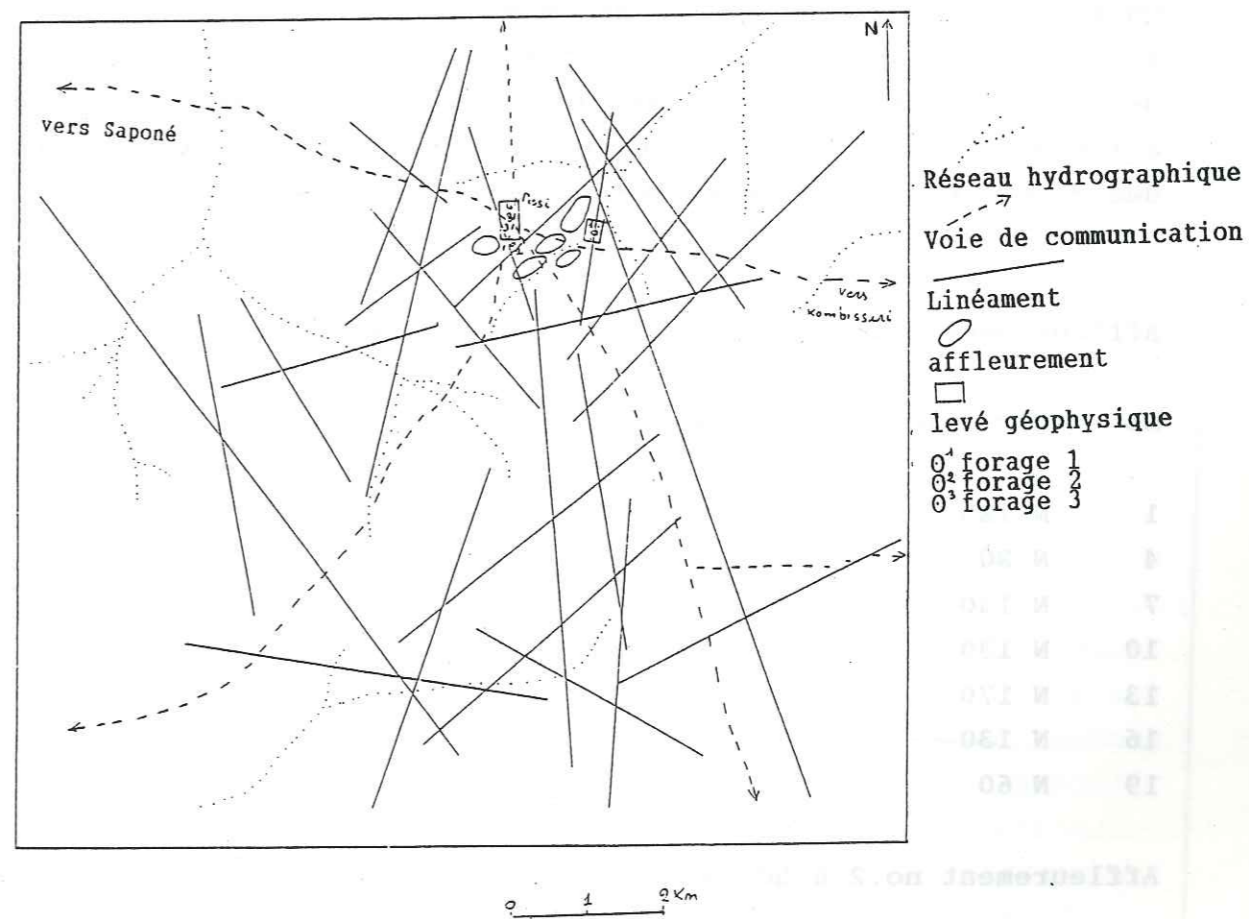


Figure 19 Carte de photo-interprétation
(site de Pissi)

4.1.1.1 relevé géologique

Le site de Pissi appartient au môle granito-migmatitique libérien de Ouagadougou. Nous avons localisé dans les environs des forages étudiés (figure 19) des affleurements qui laissent voir un granite clair à grain grossier, intensément fissuré. Localement le granite devient gris sombre surtout aux abords du forage 1. Ce granite est parcouru par de nombreux filons de quartz s'injectant généralement dans la direction Nord-Sud. Les fissures sont généralement ouvertes parfois avec des largeurs de 5 à 10 cm. Les différents affleurements présentent un allongement Nord 15° Est. Le tableau ci-dessous donne les valeurs des directions de fissures mesurées sur affleurements:

Affleurement no.1 à 500 mètres à l'Ouest du forage 1

No	Direction	No	Direction	No	Direction
1	N 125	2	N 120	3	N 35
4	N 20	5	N 70	6	N 25
7	N 130	8	N 160	9	N 50
10	N 130	11	N 130	12	N 170
13	N 170	14	N 130	15	N 130
16	N 130	17	N 0	18	N 90
19	N 60				

Affleurement no.2 à 500 mètres au Sud du forage sec

No	Direction	No	Direction	No	Direction
1	N 20	2	N 20	3	N 40
4	N 40	5	N 40	6	N 40
7	N 40	8	N 40	9	N 45
10	N 45	11	N 60	12	N 65

13	N 70	14	N 70	15	N 70
16	N 70	17	N 70	18	N 70
19	N 67	20	N 70	21	N 80
22	N 90	23	N 90	24	N 100
25	N 120	26	N 120	27	N 125
28	N 135	29	N160	30	N 170

L'analyse statistique des directions des fissures (figure 20) des deux affleurements laisse apparaître comme directions dominantes celles N 60-70°, N 120-130° et N 30-40°. On remarque que la direction Nord selon laquelle s'injectent les filons de quartz et de pegmatite n'est pas une direction dominante.

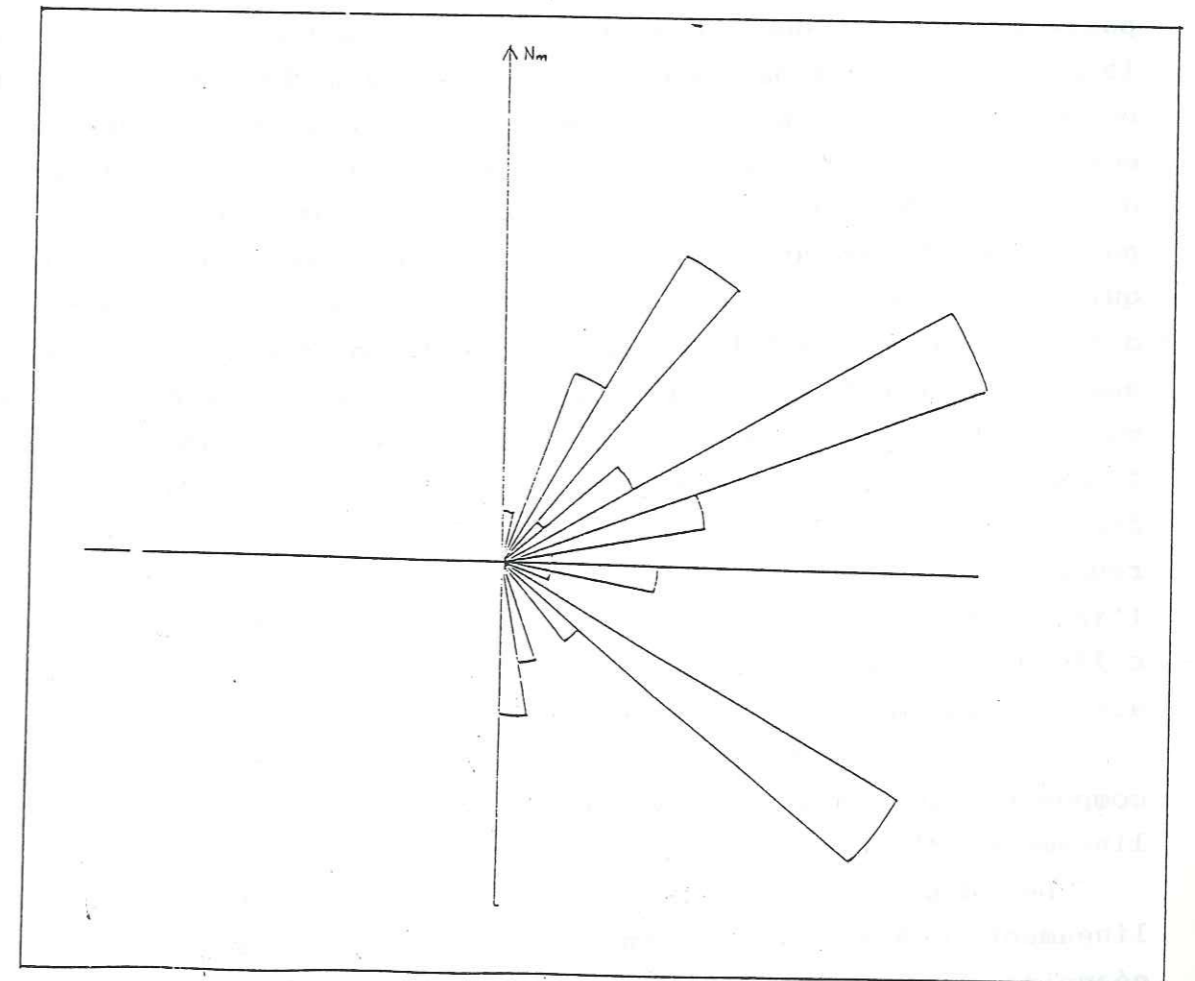


Figure 20 Rosaces de fissures (site de Pissi)

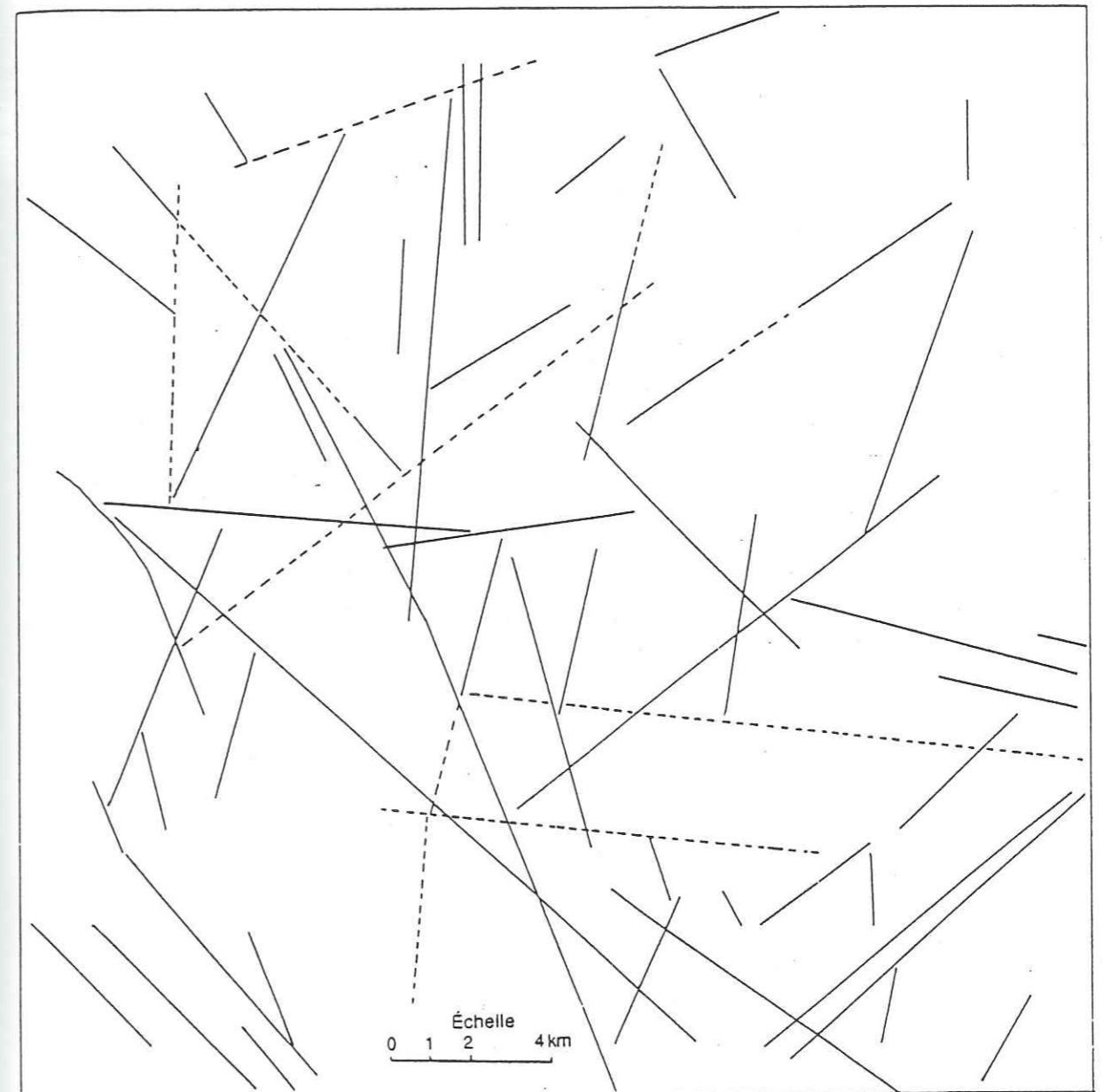
4.1.1.2 Etude par télédétection

4.1.1.2.1 Photo interprétation sur image satellite numérique

A partir de l'image satellite Landsat TM (numérique), nous avons extrait des sous images de 1024 pixels par 1024 lignes autour du village de Pissi correspondant à une zone d'environ 784 kilomètres carrés. Le contenu informatif de toutes les bandes a été retranscrit sur papier à l'aide d'un imprimante à jet d'encre, mais nous n'avons retenu que les images les plus significatives : la composition conventionnelle TM5, TM4, TM3 et la composition infrarouge fausses couleurs TM4, TM3, TM2 sont les composantes multibandes les plus pertinentes tandis que les traitements procurant les meilleurs résultats se révèlent être la deuxième composante principale (CP2) sur laquelle un filtre passe bas de moyenne est appliqué. L'information résultante de la CP2 tire sa composition surtout des bandes TM7, TM4 et TM6 et permet de voir de nombreux éléments linéaires, mais toutes les compositions et traitements doivent être considérés sous l'angle de la complémentarité car un linéament peut être absent ou partiellement absent sur une image et être révélé sur une autre qui, d'autre part, s'avère très pauvre en quantité d'informations. Les filtres directionnels ont été décevants avec une signature très peu visible de la direction spécifiée par leur matrice de poids et une faible accentuation des linéaments de façon générale. La composante no.1 et l'indice de végétation ont été affectés par les brulis juste avant les prises de vue les rendant inutilisables. Le rapport TM7 sur TM5 a permis d'éliminer l'information reliée à la végétation et de conserver uniquement celle liée à la géologie, procurant ainsi une assez bonne accentuation de certains éléments linéaires.

La figure 21 représente la carte de linéaments selon la composante principale no.2 tandis que la figure 22 celle de linéaments d'après tous les traitements autres que la CP2.

Les deux cartes sont complémentaires car il existe des linéaments présents dans l'une et absents dans l'autre. On voit néanmoins que l'essentiel de l'information figure déjà sur la carte de la CP2.



Interprétation de la composante principale no. 2

Figure 21 Linéaments selon l'image numérique
carte selon la composante principale no.2
région de Pissi

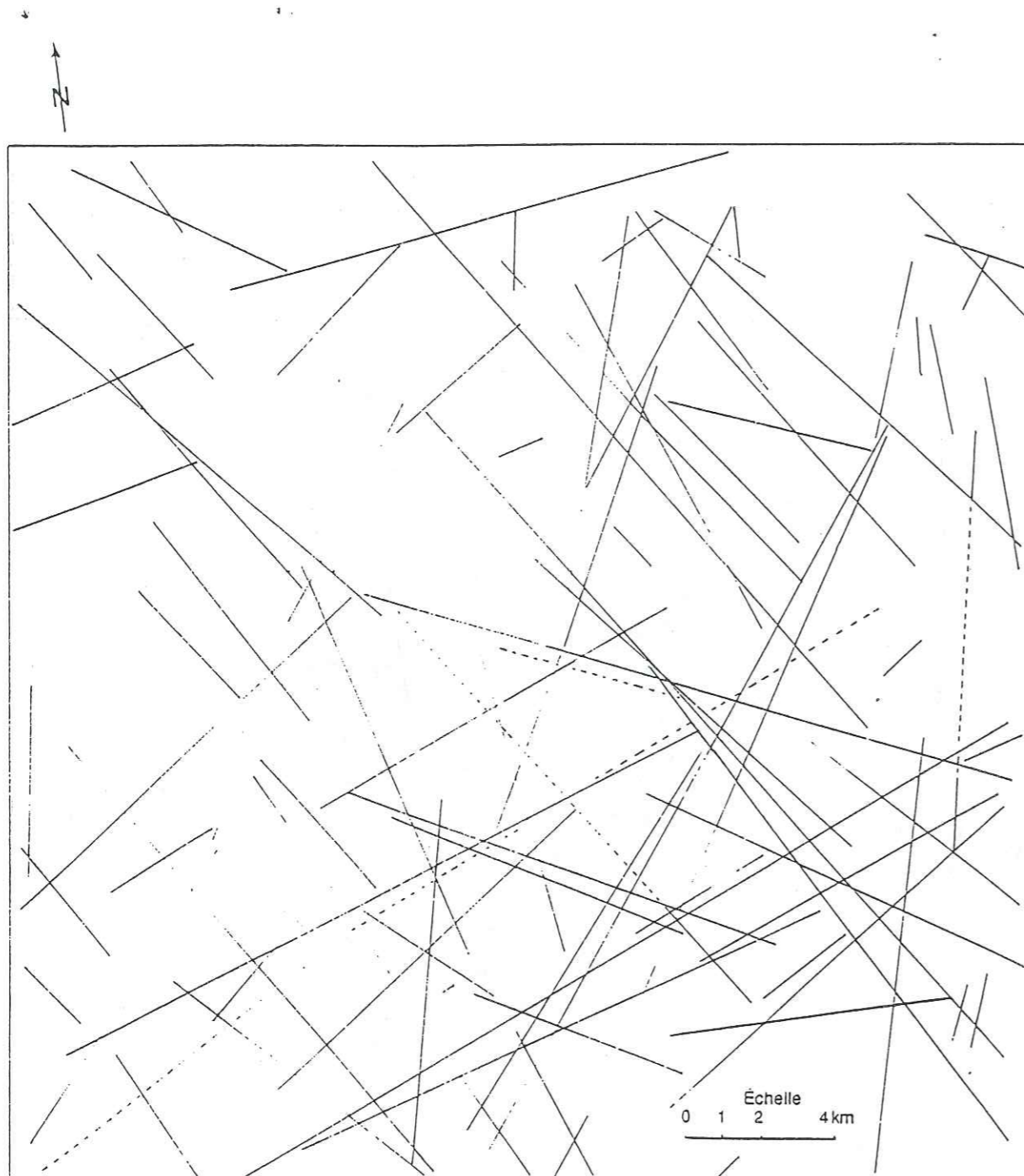


figure 22 Linéaments selon l'image numérique
carte synthèse de tous les traitements
autres que la composante principale no.2
région de Pissi

La figure 23 est une carte synthétique de tous les traitements, correspondant au territoire des photographies aériennes 7061 et 7062. Cette dernière carte a fait l'objet d'une analyse statistique sous forme de rosaces (figures 24a et 24b) correspondant à chacune des photographies aériennes. Les linéaments montrent deux directions dominantes: l'une N 140-180 et l'autre N 60-70. La direction N60-70 correspond à une direction dominante de fissures mesurée sur affleurements tandis que la N140-180 est une direction où s'injectent les filons. Deux linéaments Nord-Sud se retrouvent aux abords du forage 1 tandis qu'on enregistre une absence totale de linéaments dans les environs immédiats de deux autres forages. Les linéaments sont en général multikilométriques et on enregistre une densité assez importante avec plus de 200km de longueur de linéaments pour un territoire de 121 kilomètres carrés.

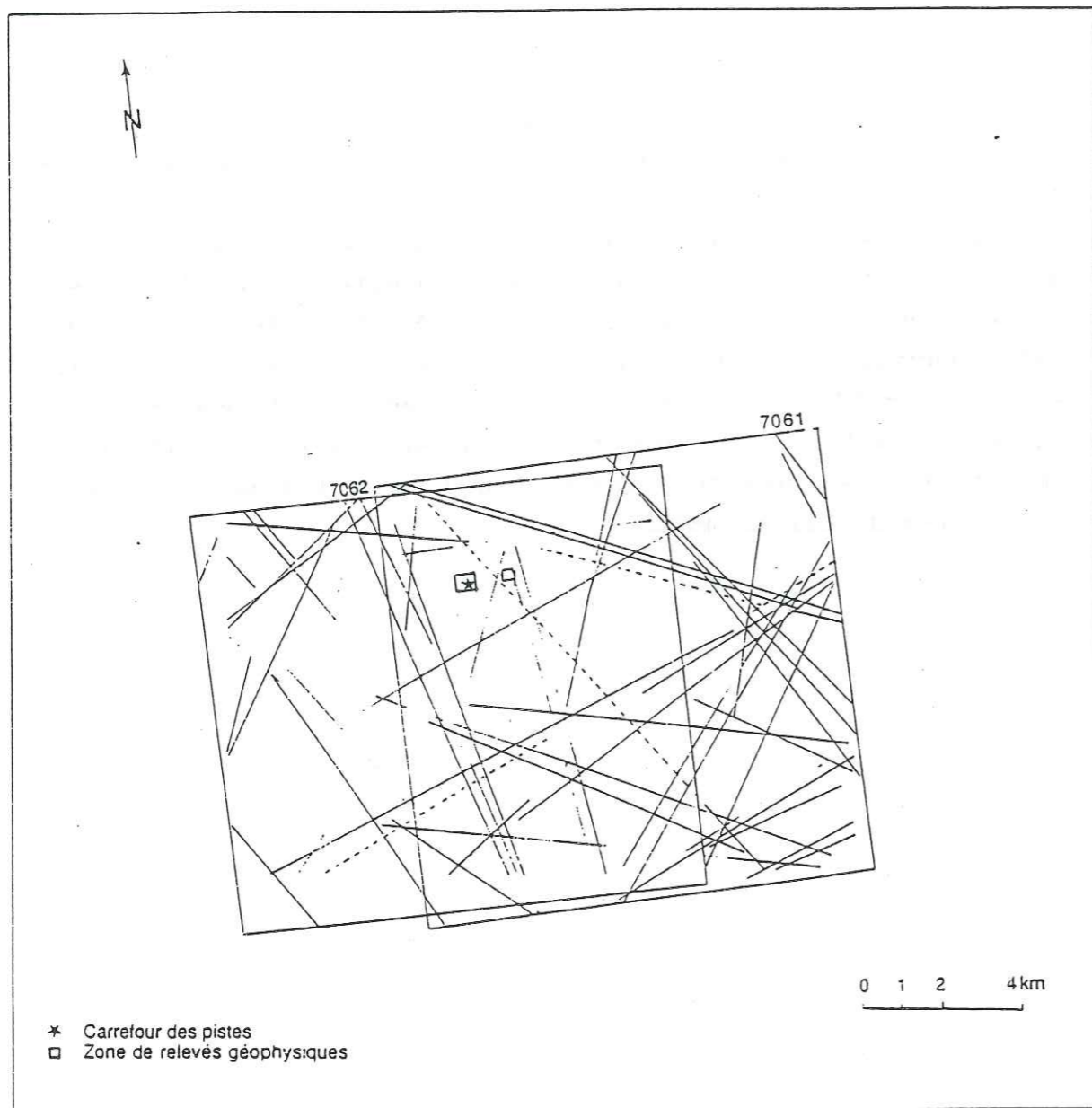


Figure 23 Linéaments selon l'image numérique
Carte synthèse de tous les traitements
Région de Pissi

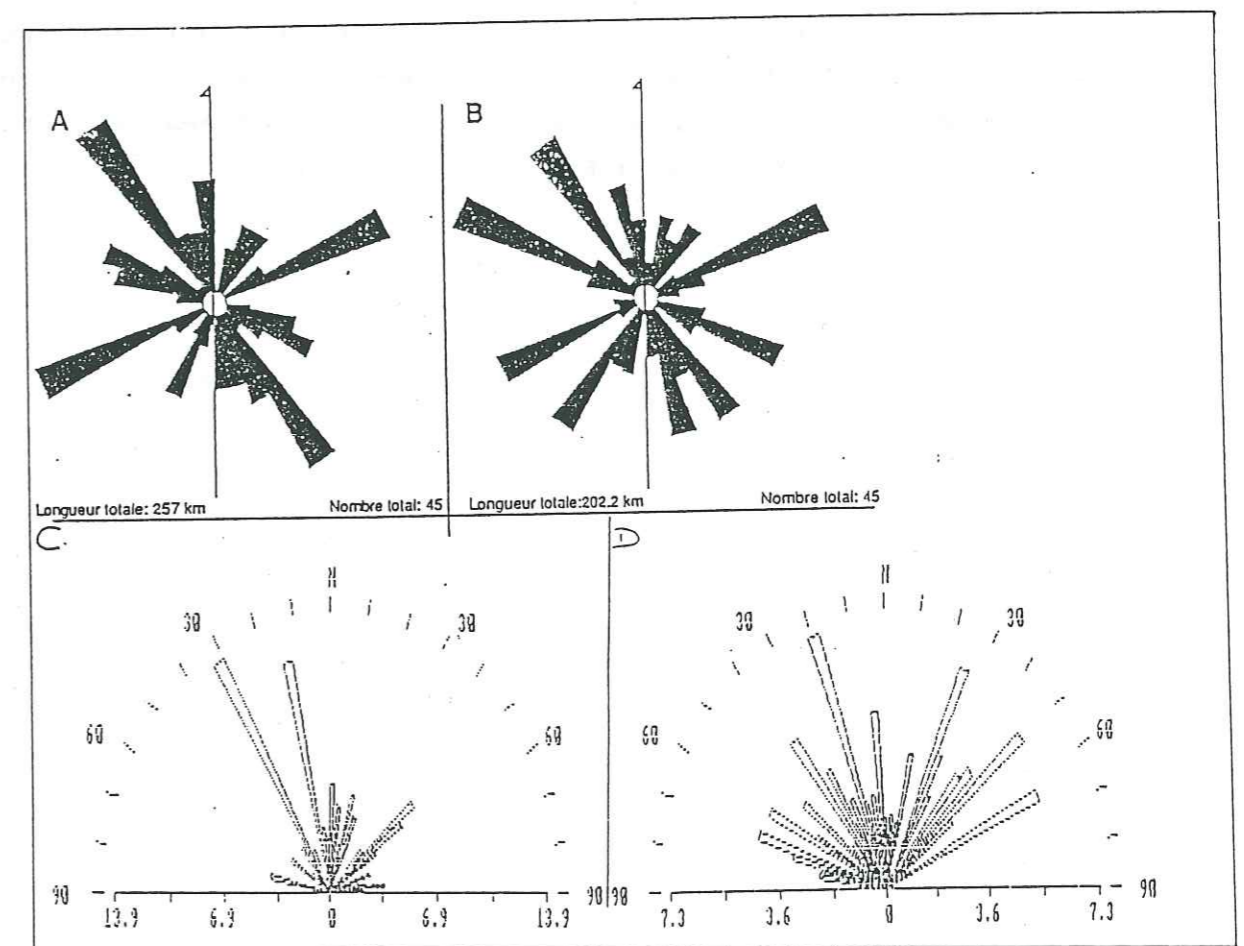
Figure 24 rosace de linéaments

A-Image numérique (territoire équivalent à la photo 7062

B-Image numérique (territoire équivalent à la photo 7061

C-Photographies aériennes (7061-7062)

D-Image satellite Spot sur papier



4.1.1.2.2 Photo-interprétation sur photographies aériennes

La photo interprétation des photos 7061 et 7062 (figures 19, 24c, 25a, 25b) met en évidence trois directions dominantes :
-Nord-Sud, N140-160, N40-60

La direction Nord-Sud est prédominante sur les deux autres avec des linéaments plurikilométriques. Les forages 2 et 3 se trouvent presque sur une ligne de partage des eaux de deux bassins versants contrairement au forage 1 qui se trouve sur un linéament Nord-Sud et à proximité d'un cours d'eau. Le réseau hydrographique est peu dense, empruntant généralement les directions Nord-Sud et Nord-Est.

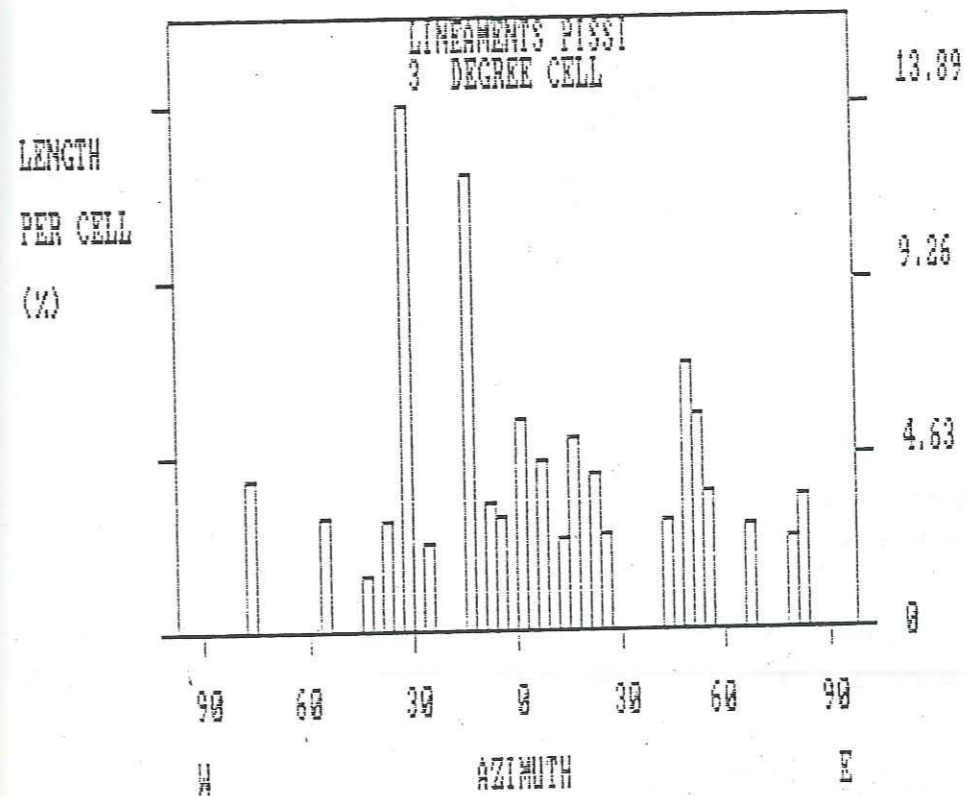
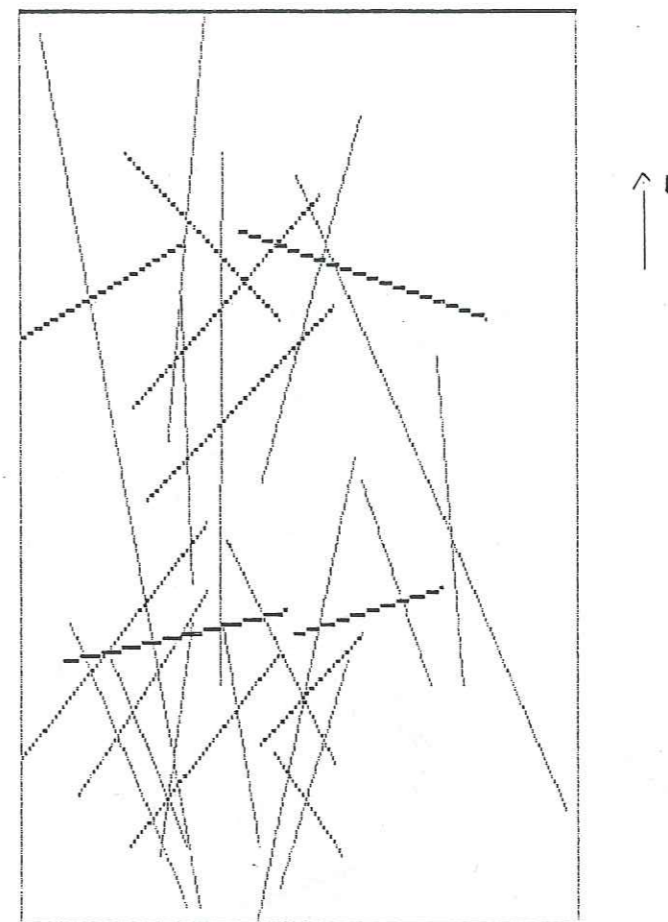


Figure 25 carte et histogramme de linéaments de photo-aériennes
site de Pissi

4.1.1.2.3 Photo interprétation sur image satellite Spot

L'interprétation d'une image satellite 60km/60km couvrant le site de Pissi ne montre pas clairement de direction dominante. Cependant on peut retenir les directions N20-50, N290-310, N320-10 qui semblent s'individualiser (figures 24d,26)

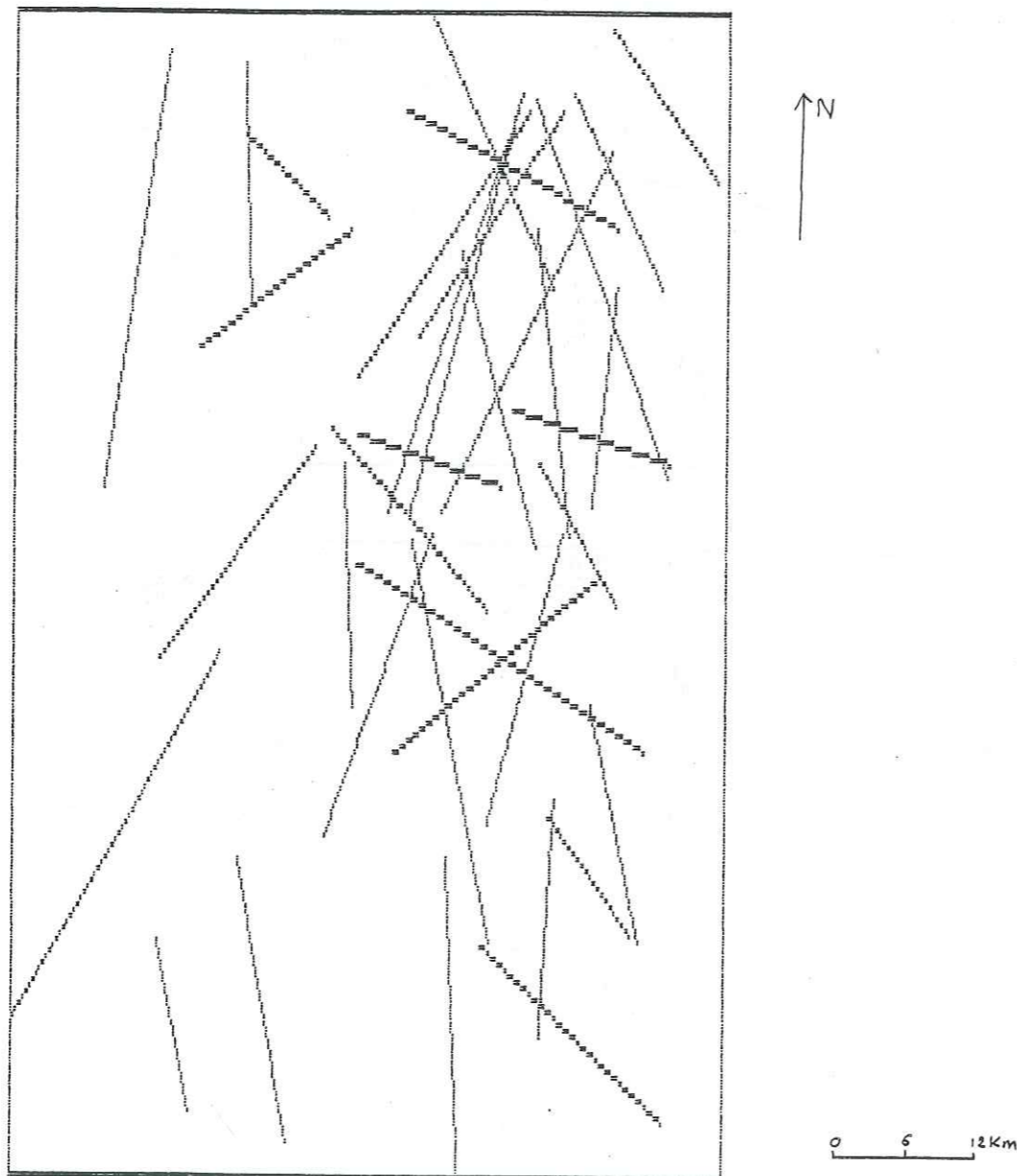


Figure 26 carte de linéaments d'image satellite (région de Pissi)

4.1.1.2.4 Comparaison des différentes interprétations

	Photos aériennes	Image spot	Image numérique
	N40-60	N20-50	N60-70
Orientations dominantes	N140-180	N110-140 N150-190	N140-170
Longueur totale	59km	384km	257km
Nombre de linéaments	27	36	45

Il apparait une différence d'orientation et de longueur des linéaments sur photographie aérienne et sur image satellite.

Cela pourrait vraisemblablement être dû la différence d'échelles des deux documents car les éléments à petite échelle sont difficiles à déterminer sur photographie aérienne. Il en est de même de ceux à grande échelle sur image satellite. La vue d'ensemble et la possibilité de voir au delà de la zone environnante du site qui permettent d'interpréter sur de plus grandes distances font que les linéaments sur image satellite sont beaucoup plus importants en longueur que ceux détectés par photographie aérienne. Les traitements effectués sur l'image satellite ont permis de détecter plus de linéaments. Une direction dominante se retrouve au niveau des trois cas: il s'agit de la direction N140-180 où s'injectent les filons. Le fait qu'on ne retrouve pas les mêmes directions dominantes sur la photo aérienne et sur l'image spot relève de l'hétérogénéité de la fissuration du bati libérien, rendant ainsi une étude régionale assez difficile mais non irréalisable.

4.1.1.3 La prospection géophysique

Sur le site de Pissi , trois plateformes ont été prospectés autour des trois forages.

En quantité de travaux , nous avons réalisé:

14 profils de trainés de résistivité de 1920 mètres de longueur
26 profils de trainés électromagnétiques de 9320 mètres de longueur

6 sondages électriques

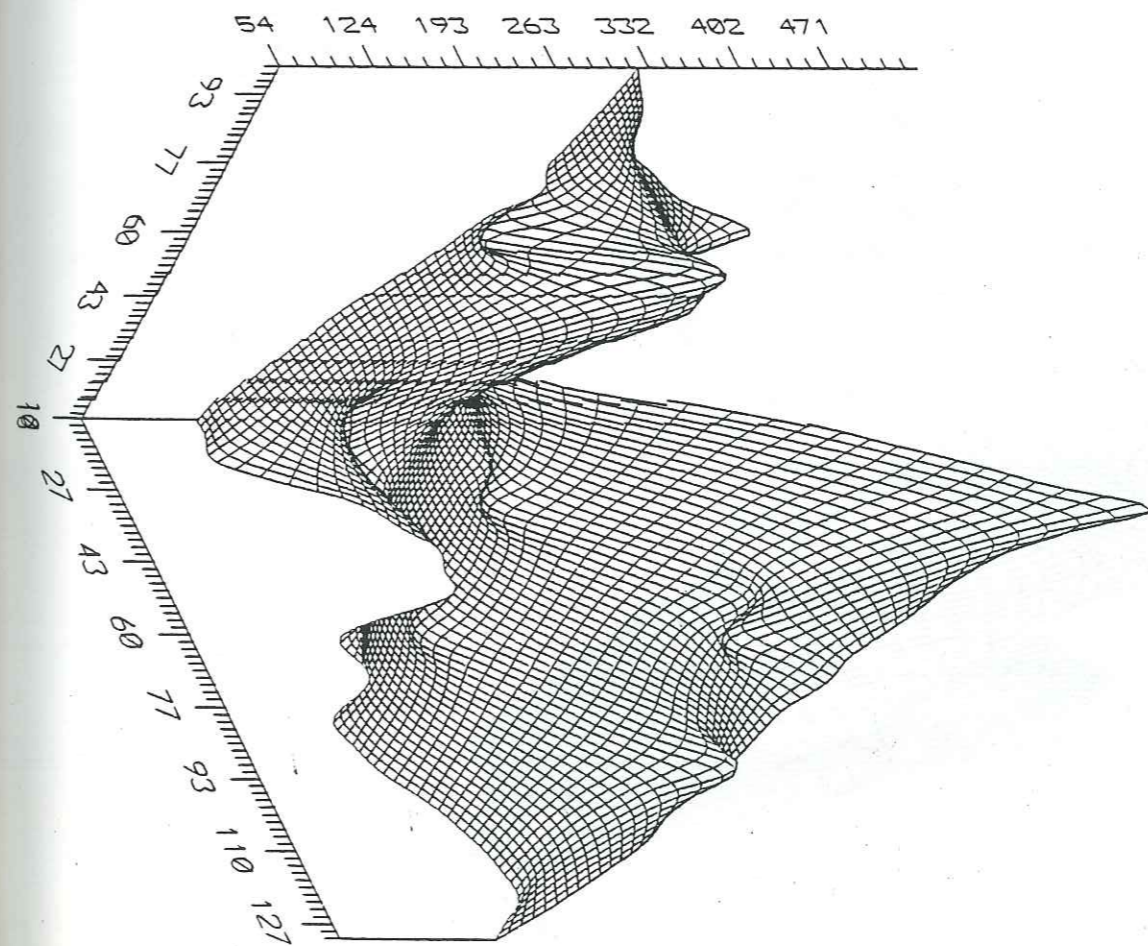
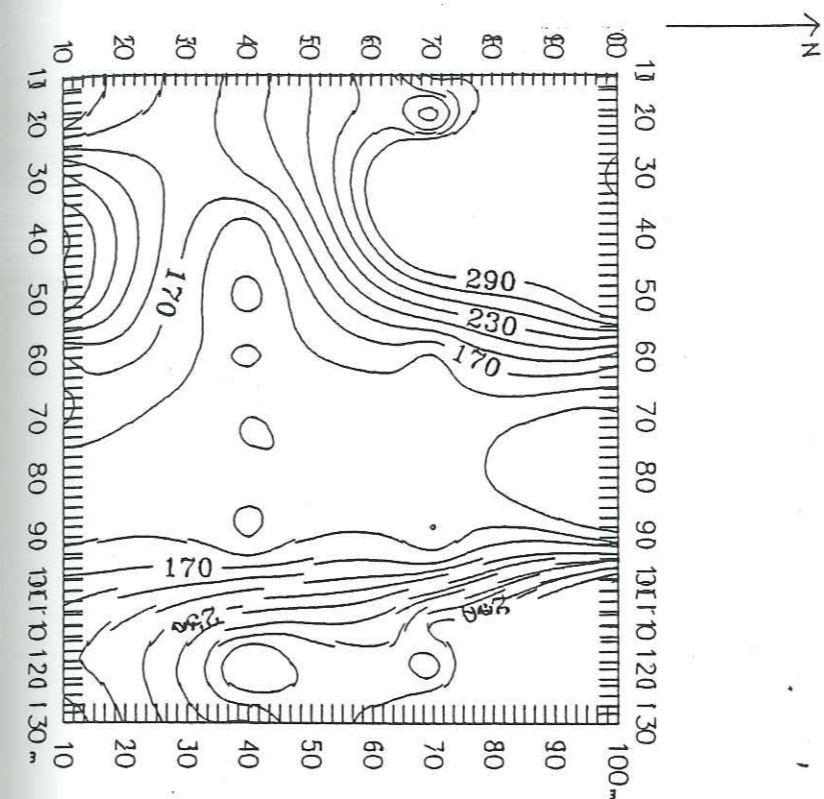
2 profils de profilage carré

2 cercles de mesures rotatives électromagnétiques

Les résultats sont présentés sous forme de cartes de résistivité apparente, de cartes de pourcentage de champs électromagnétiques, de courbes de sondages électriques, et de profils d'anisotropie. La carte de résistivité apparente de la plateforme 1 (figure 27) met en évidence deux axes conducteurs , l'un de direction Nord-Sud et l'autre de direction NNE-SSO. Les deux axes se recoupent presque'au niveau du forage. Les valeurs de résistivité apparente au niveau des axes conducteurs sont inférieures à 150 ohm-m tandis que tout autour on a des valeurs supérieures à 200 ohm-m.

La carte électromagnétique (figure 28) est superposable à la carte de résistivité apparente du point de vue des contours de courbes d'isovaleurs.

Du point de vue extension latérale , les deux axes qui n'occupent que 20 mètres d'extension induisent à leur intersection une zone de basses valeurs de résistivité s'étendant sur 50 à 60 mètres. Longitudinalement , ces axes conducteurs ont été recoupés au Nord et au Sud du forage sur au moins 5 kilomètres par des profils électriques et électromagnétiques (figure 29). Ils ont donc chacun au moins cinq km de longueur et se placent parmi les failles plurikilométriques.



AB=200m MN=20m Pas de mesure=10m

Figure 27 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) Plateforme 1 (site de Pissi)

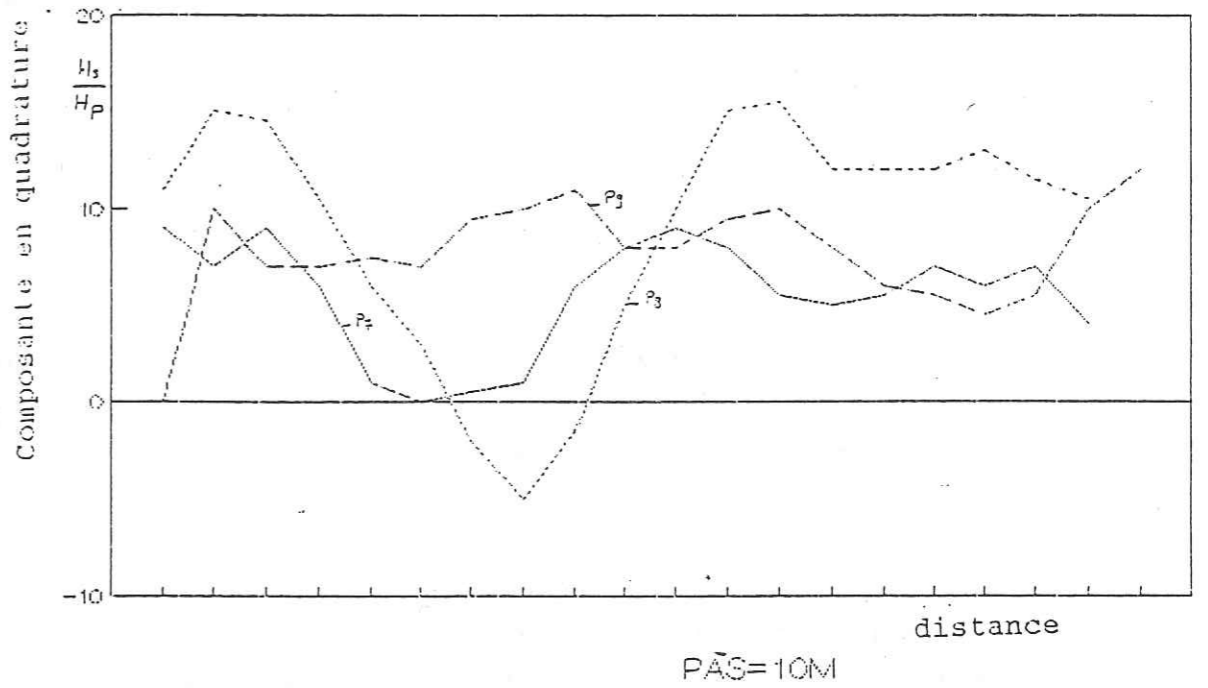


figure 29 Profils électromagnétiques: extension latérale de l'axe conducteur (site de Pissi)

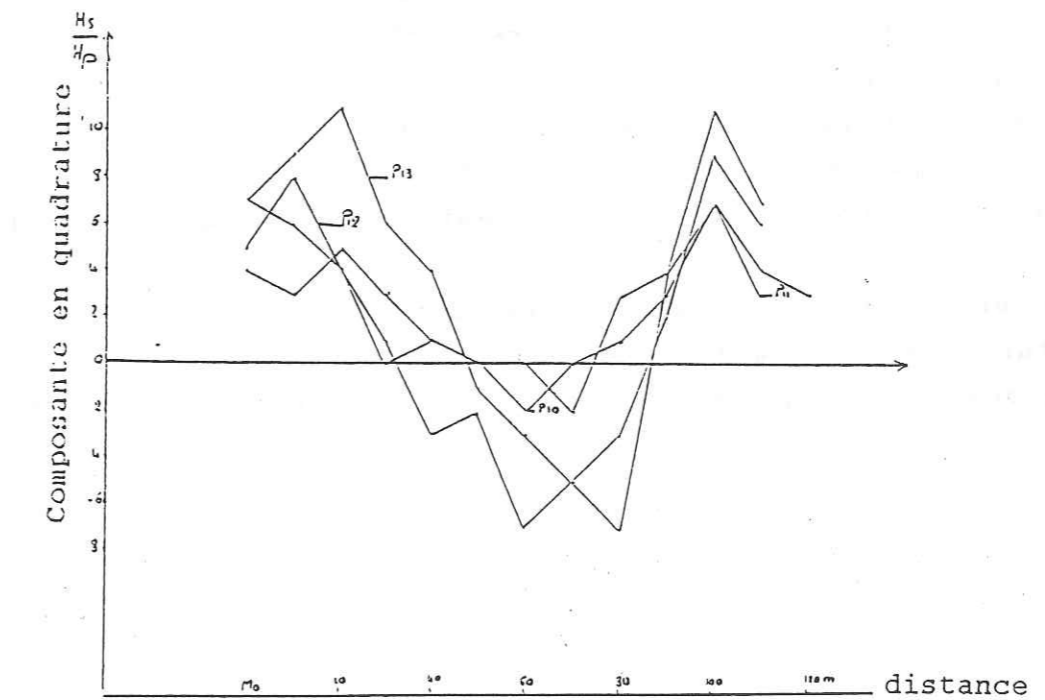


Figure 28 Carte et représentation en perspective des valeurs de $(\frac{H_x}{H_0})$, composante en quadrature Plateforme 1 (site de Pissi)

F=3520Hz S=50m Pas de mesure=10m

Les plateformes 2 et 3 sont jumellées en raison de la proximité des forages 2 et 3. La carte de résistivité apparente (figure 30) met en évidence un axe conducteur N120 degrés qui passerait à égale distance du forage 2 et du forage 3 situés de part et d'autre de cet axe avec toutefois le premier en zone de surcreusement et le deuxième à mi-pente de l'anomalie.

La carte électromagnétique (figure 31) épouse la même forme que la carte d'isorésistivité.

L'anomalie conductrice semble avoir une extension latérale très grande de l'ordre de 40 à 50 mètres surtout au niveau du forage 2 mais l'extension longitudinale est limitée.

Les six sondages présentés dans la figure 32 ont été réalisés en raison de deux par forage: un dans l'axe conducteur et le deuxième perpendiculaire au premier. Au niveau du forage 2 et du forage sec, on observe des courbes en fond de bateau avec un remontée trainante au niveau du forage 2; cette dernière n'existe pas au niveau du forage sec présentant une remontée brusque à 45 degrés.

Les courbes du forage sec dessinent un V très fermé ce qui traduit une absence de frange de roche fissurée au dessus du substratum. La couverture d'arène humide y est également peu épaisse.

Au niveau du forage à haut rendement, nous observons une couverture d'arène humide très épaisse, une remontée trainante très prononcée traduisant ainsi une frange fissurée importante.

Figure 30 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) Plateforme 2 (site de Pissi)

AB=200m MN=20m Pas de mesure=10m

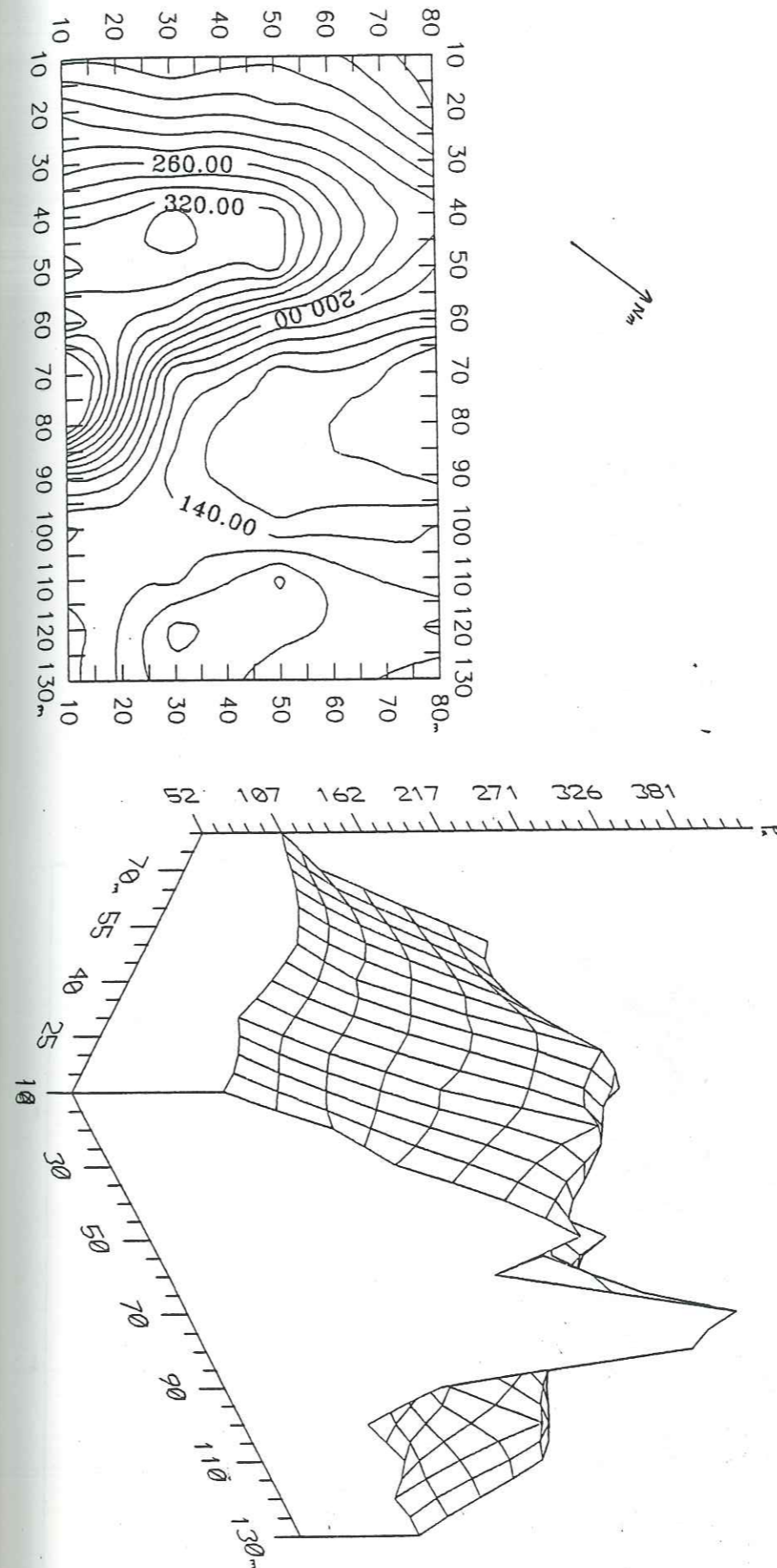


Figure 32 Courbes de sondages électriques
(site de Pissi)

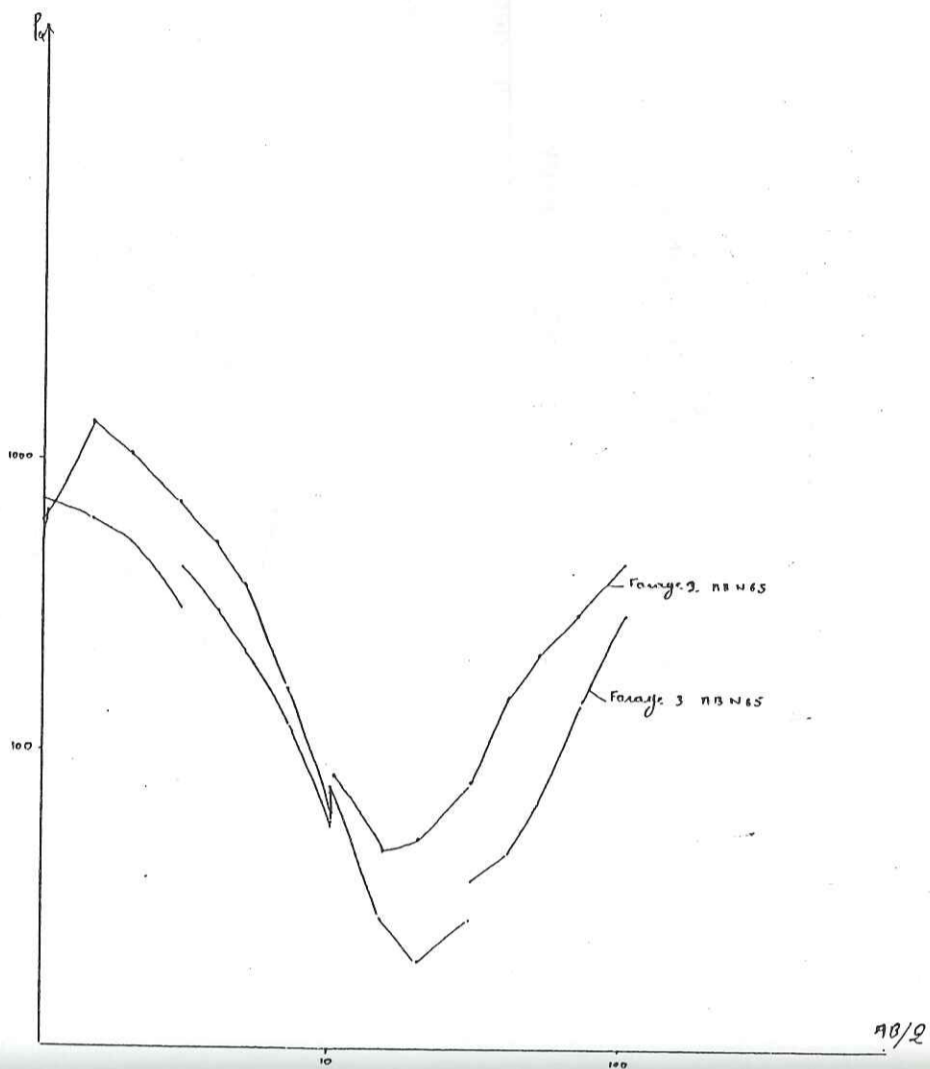
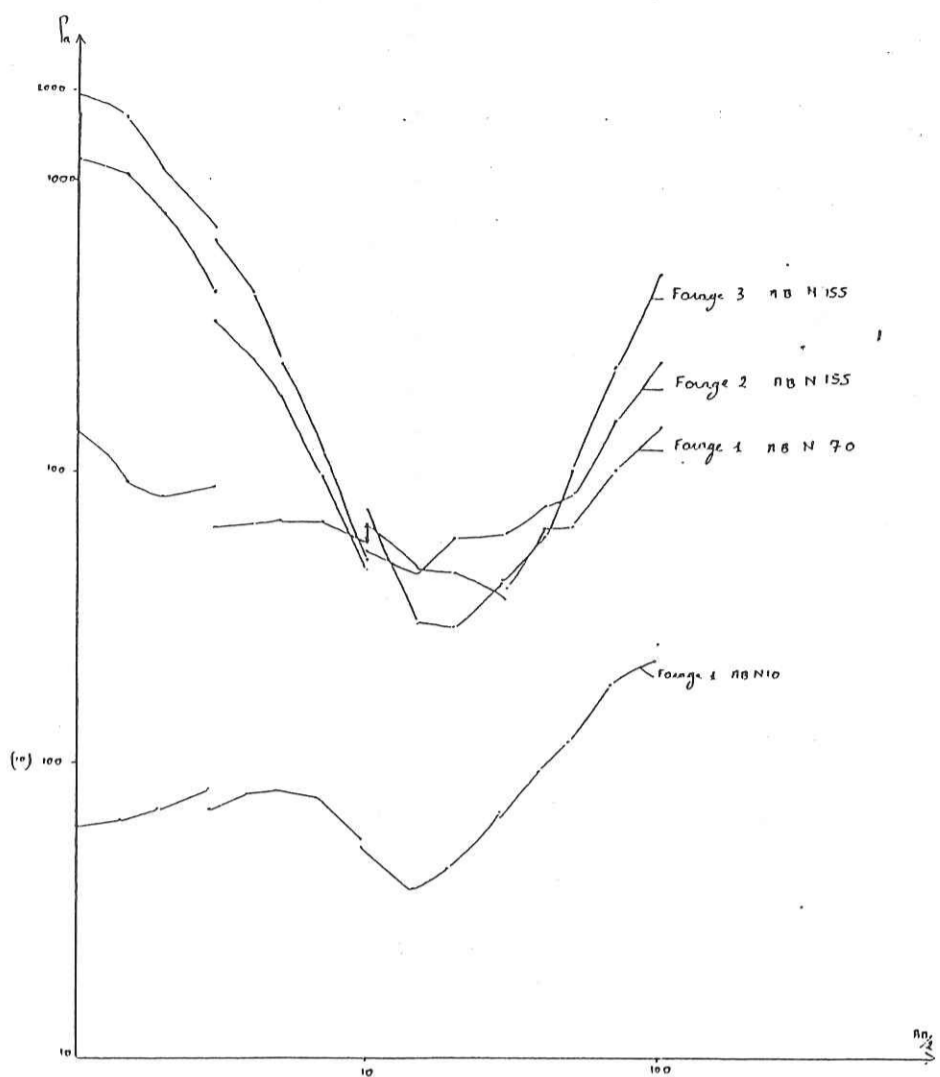
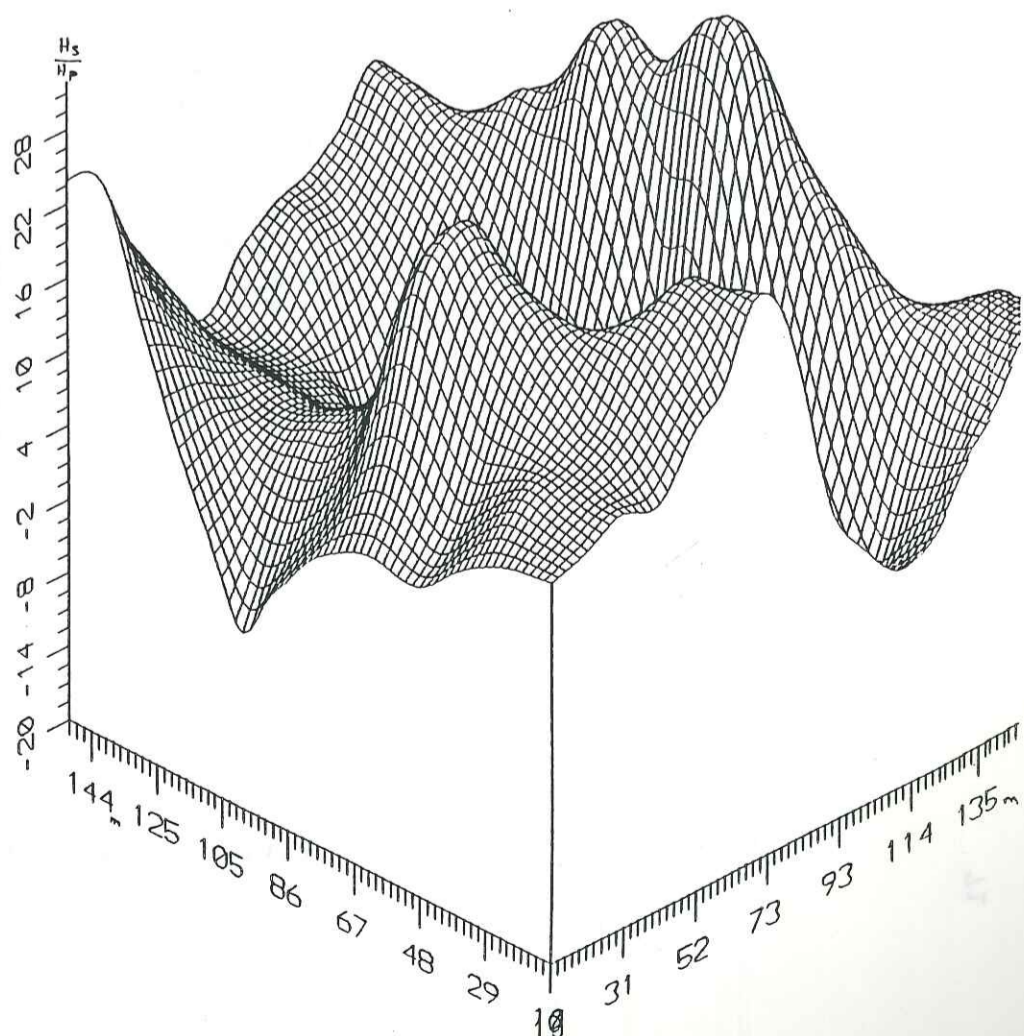
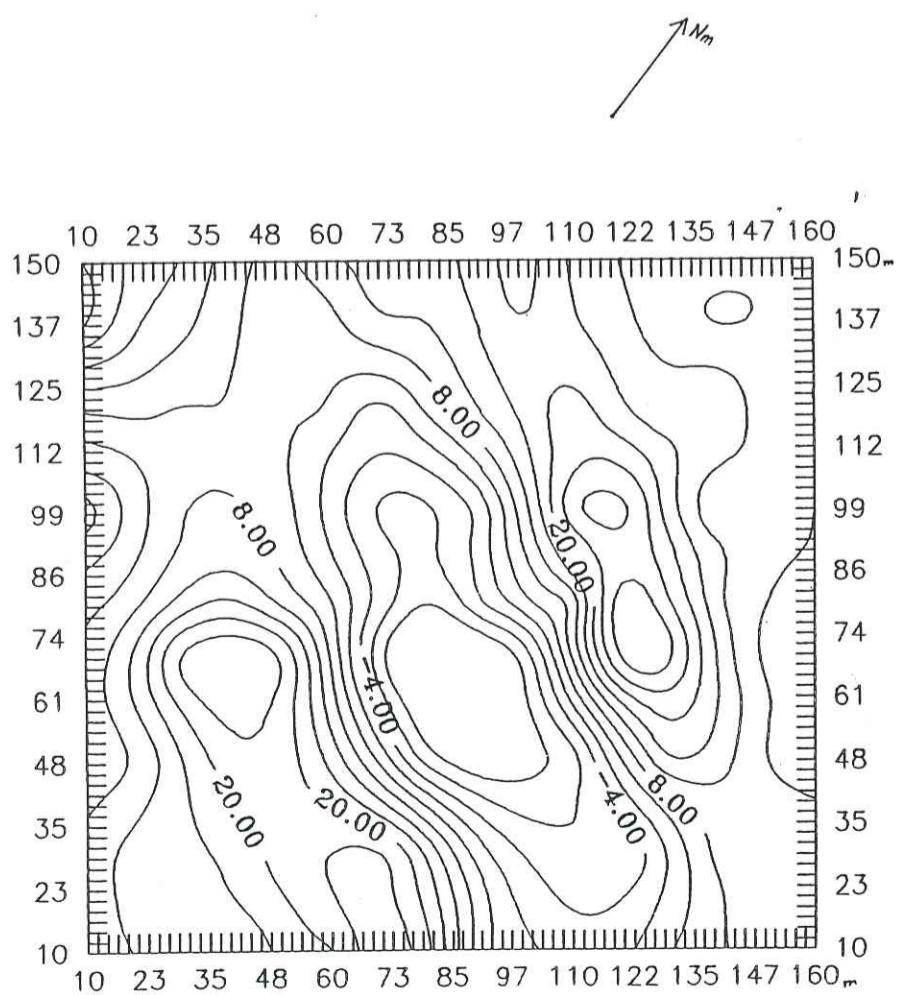


Figure 31 Carte et représentation en perspective des valeurs de
 $(\frac{H_s}{H_p})$, composante en quadrature Plateforme 2 (site de Pissi)

F=3520Hz S=50m Pas de mesure=10m



Le profilage carré:

La figure 33 montre les profils d'anisotropie: on note au niveau du forage à haut rendement un pic positif juste à l'aplomb du forage tandis qu'on a un effondrement au niveau du forage sec.

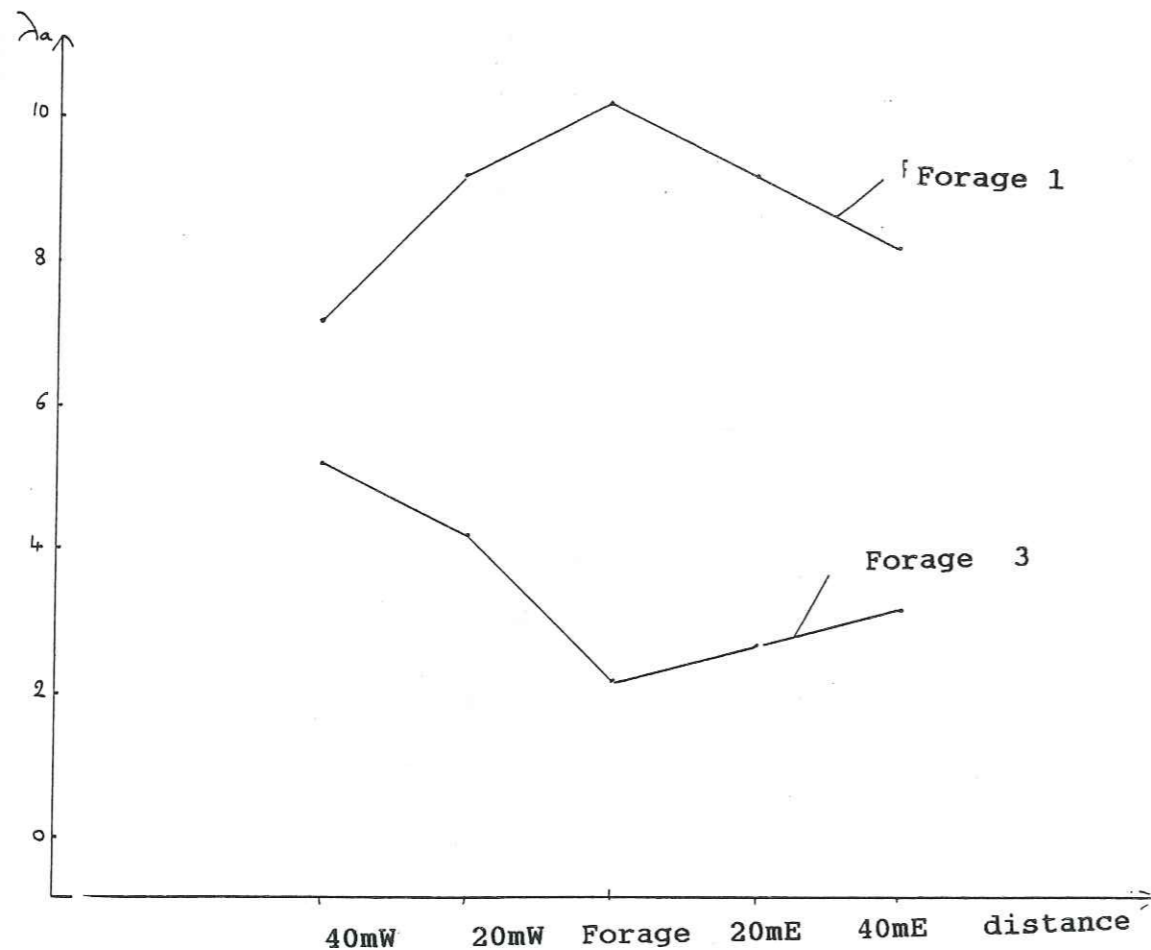


Figure 33 Profils d'anisotropie
(site de Pissi)

De l'analyse des résultats des plateformes de Pissi, on peut retenir les faits suivants:

-Le forage à haut rendement est implanté à l'intersection de deux anomalies conductrices correspondant à deux discontinuités structurales significatives affectant le substratum. La présence du cours d'eau favorise l'infiltration et assure la réalimentation de la nappe.

-Le forage 2 est sur une anomalie conductrice pouvant correspondre à une faille dont la frange fissurée est épaisse au point d'implantation. La réalimentation de cette faille se fait difficilement en raison d'une couverture latéritique compacte et une situation en hauteur par rapport au reste de la zone environnante.

-Le forage sec est probablement implanté en bordure d'une faille mais il ne recoupe pas une zone fissurée importante.

Du point de vue méthodologie, on peut affirmer que l'électromagnétisme Maxmin peut jouer le même rôle que la méthode électrique pour la mise en évidence des fractures du socle sur le plan de la direction et des extensions latérale et longitudinale. Les profils d'anisotropie sont très caractéristiques et méritent d'être envisagés avec beaucoup d'attention sur les autres sites. Le levé géologique a permis outre la description pétrographique de montrer que les filons s'injectent dans une direction dominante qui correspond à la direction de l'axe conducteur au niveau du forage à haut rendement.

La figure 34 représente la disposition des profils de mesures autour du forage.

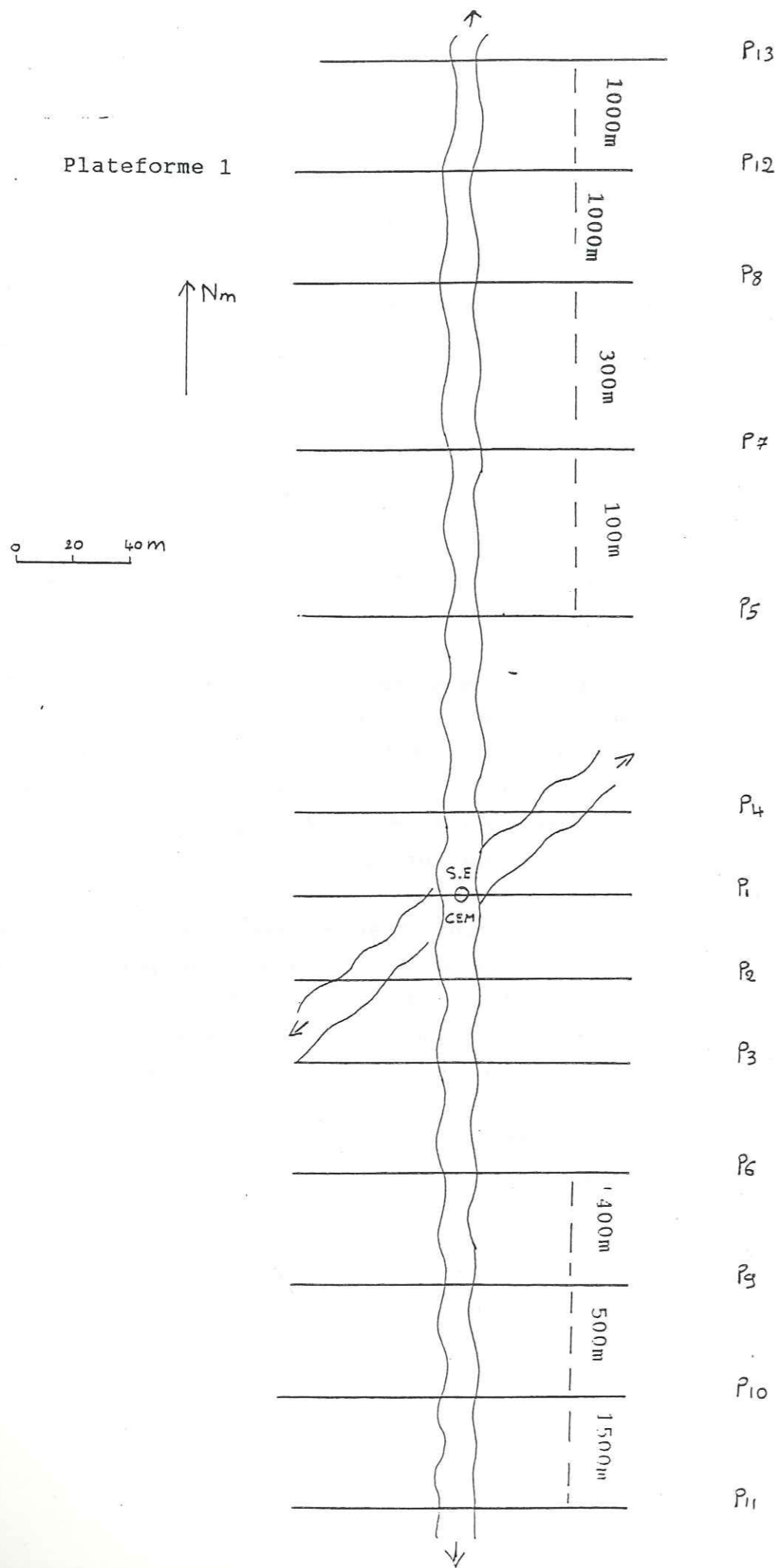


Figure 34 disposition des profils de mesures (site de Pissi)

4.1.2 Le site de Rakaye Mossi

Le village de Rakaye Mossi, situé à une cinquantaine de km au Sud de Ouagadougou sur l'axe Ouagadougou-Léo relève de la province de Bazèga et de la Préfecture de Doulougou (figure 36). Sur le site nos investigations se sont portées sur un forage à haut rendement ($Q=36\text{m}^3/\text{h}$). Ce dernier a été implanté sur la base d'une étude de photographies aériennes et de géophysique (trainés de résistivité et sondage électrique). La photo-interprétation avait mis en évidence un linéament N 140-150, confirmé par la prospection géophysique comme étant un axe conducteur. Le forage a une profondeur de 56m et le log de forage montre successivement une cuirasse latéritique de 3m, une arène grenue de 7m et le reste constitué d'une frange fissurée de granite migmatitique avec des intercalations de filons de quartz et de pegmatites. Le niveau statique se situe à 6.5m.

4.1.2.1 relevé géologique

Tout comme le site de Pissi, celui de Rakaye appartient au même granito-migmatitique libérien de Ouagadougou. Localement les affleurements montrent tantôt des granites à grains fins homogènes, des amphibolites avec beaucoup de filons de quartz, des granites à grains grossiers très altérés avec des enclaves visibles sur près de 30 mètres de direction Nord 35 degrés avec un pendage de 65 degrés Sud-Est plus feldsiques avec alternance de grains grossiers et grains fins et enfin des migmatites à grains grossiers. Hormis dans les granites à grains fins homogènes, on rencontre partout ailleurs des filons de largeurs variant entre 10 et 50 mètres voire parfois 70 mètres. Beaucoup de fissures sont ouvertes et visibles sur près de 40 à 50 mètres. Les pendages des fissures varient du sub-vertical à 70 degrés. Nous avons pu mesurer 153 directions de fissures, 57 directions de filons et 29 directions de foliations que nous représentons sous forme de rosaces issues de l'interprétation statistique (figures 35a, 35b, 35c).

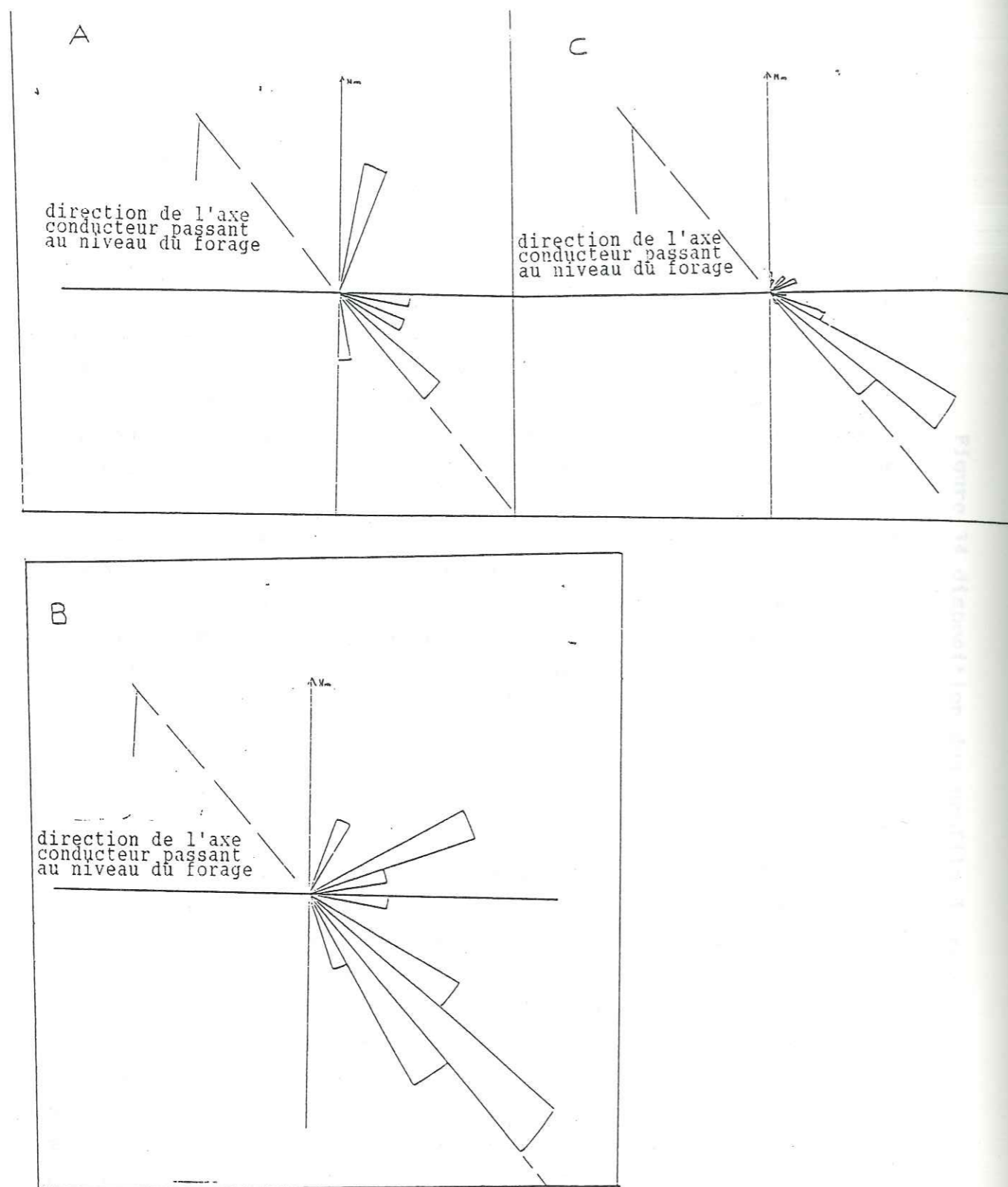


Figure 35 A-rosace de foliations
 B-rosace de fissures
 C-rosaces de filons
 (site de Rakaye Mossi)

De l'analyse de ces rosaces il ressort que:

- les fissures présentent une direction dominante N120-150
 - les filons deux directions dominantes N130-150 et N60-80
 - les foliations deux directions également N10-20 et N130-140
- L'une des directions où s'injectent les filons n'est pas une direction dominante de fissures. On remarque que les foliations dont la direction dominante est généralement considérée comme fermée présentent ici une direction dominante qui correspond, si non est proche d'une direction dominante de fissure et de celle surtout de filons.

Trois lames minces issues des échantillons de roches des différents affleurement confirment la description macroscopique.

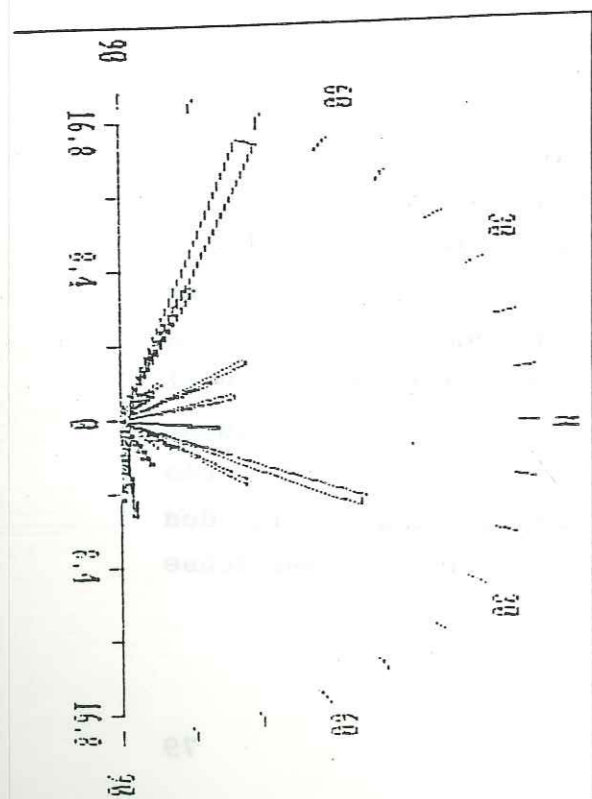
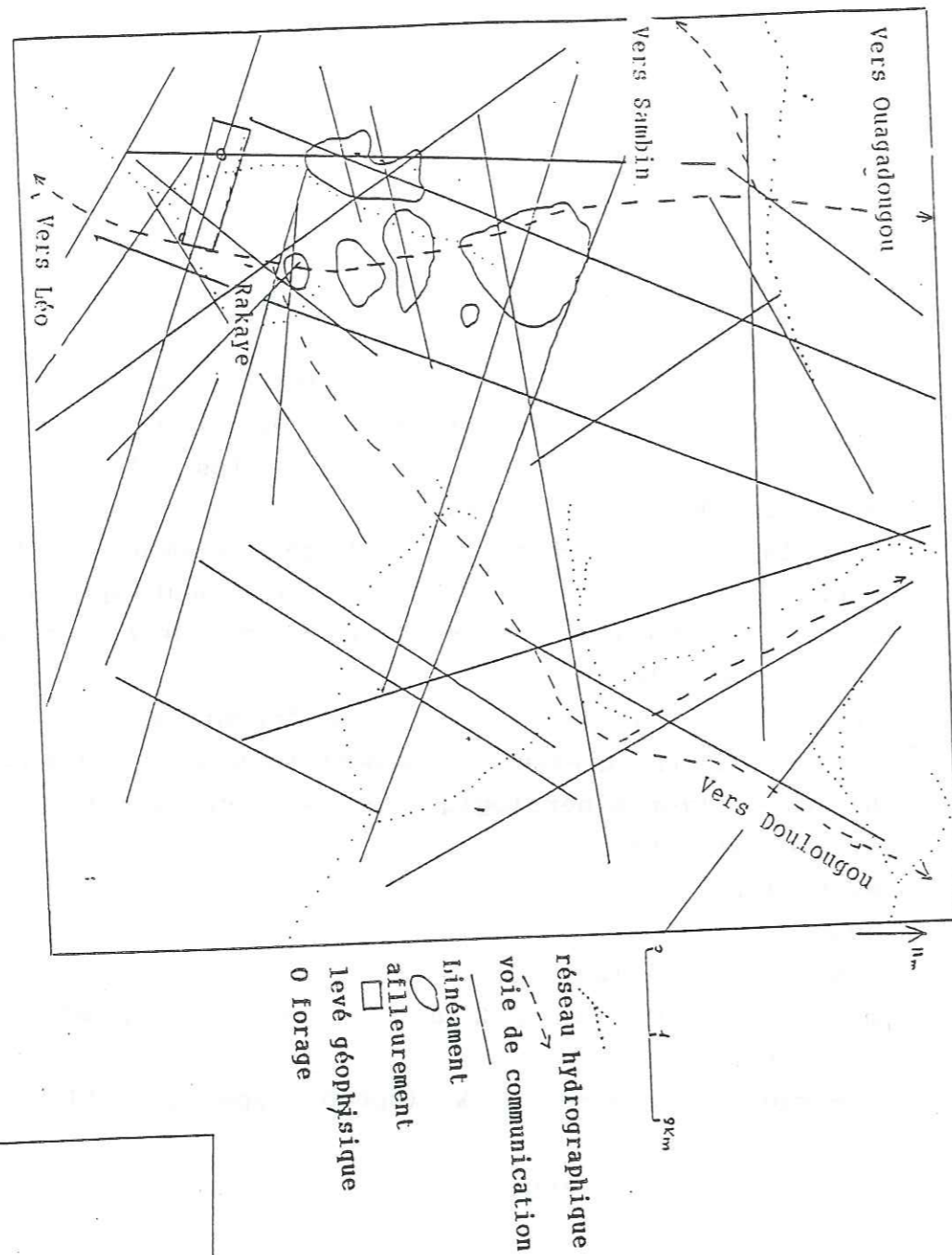
La composition minéralogique moyenne est la suivante:

- plagioclase 40%
- microcline 25%
- quartz 20%
- biotite 5 à 10%
- minéraux d'altération 2 à 5 % (épidotes , micas blancs et chlorite)
- minéraux accessoires 5 % (sphène, apatite, allanite, zircon)

4.1.2.2 Télédétection

La télédétection du site de Rakaye est constituée par l'analyse de photographie aérienne au 1/500000^e (figure 36), car nous ne disposons pas d'images satellites couvrant le site . L'analyse statistique des linéaments montre deux directions dominantes: N20-30 et N130-160. Le forage se situe à l'intersection de deux linéaments l'un de direction N140-150 et l'autre N0-10. On dénombre au total 28 linéaments d'une longueur totale de 80 km, ce qui montre que la région devrait être très fracturée. Quelques rares linéaments empruntent la direction des cours d'eau qui du reste présentent une distribution peu dense dans la région.

Figure 36 Carte de photo-interprétation (site de Rakaye Mossi)



4.1.2.3 Prospection géophysique

Sur le site de Rakaye , une plateforme a été prospectée autour d'un forage à haut rendement (36 m³/h). En quantité de travaux :

- 9 profils de résistivité apparente de 1080 m de longueur
- 10 profils électromagnétiques de 2500m de longueur
- 2 sondages électriques
- 1 profil de profilage carré

La carte d'isorésistivité (figure 37) montre trois axes conducteurs: -N140-150, -N30-40, -N50-60. Celui de direction N140-150 semble prédominant. Il a une extension latérale de 20 à 30 mètres mais induit avec les deux autres une zone de basses valeurs de résistivité au niveau du forage. Longitudinalement cet axe a été recoupé au Nord-Ouest sur 500m et au Sud -Est sur 3000 mètres (figure 38). Il forme une discontinuité majeure au niveau du substratum.

La carte électromagnétique (figure 39) montre deux axes conducteurs, l'un N140-150 et l'autre N30-40. On retrouve la discontinuité majeure N140-150 et la faille secondaire N30-40. L'anomalie N50-60 ne se retrouve pas au niveau de cette carte.

Figure 38 Profils électromagnétiques: extension de l'axe conducteur (site de Rakaye Mossi)

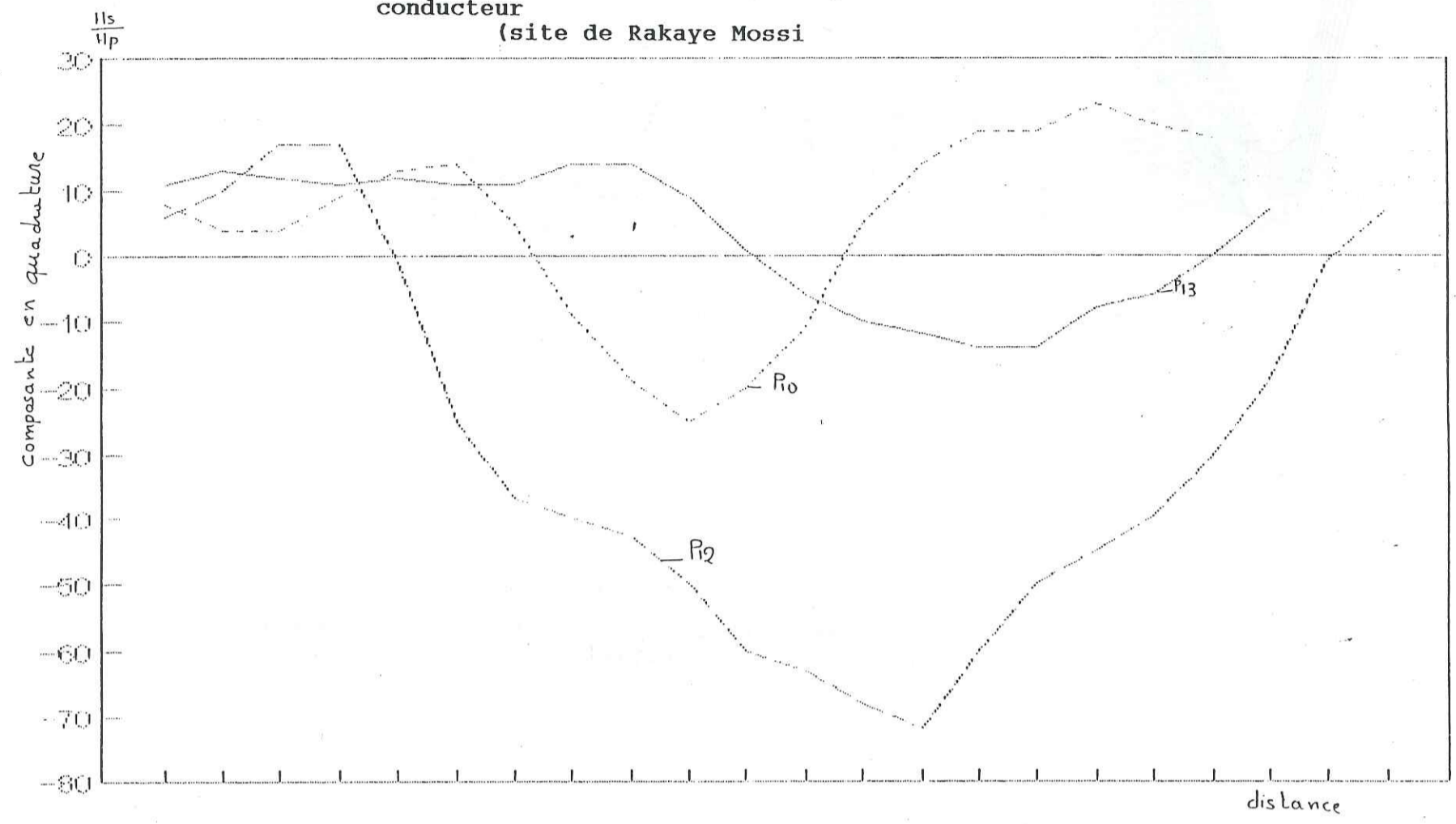
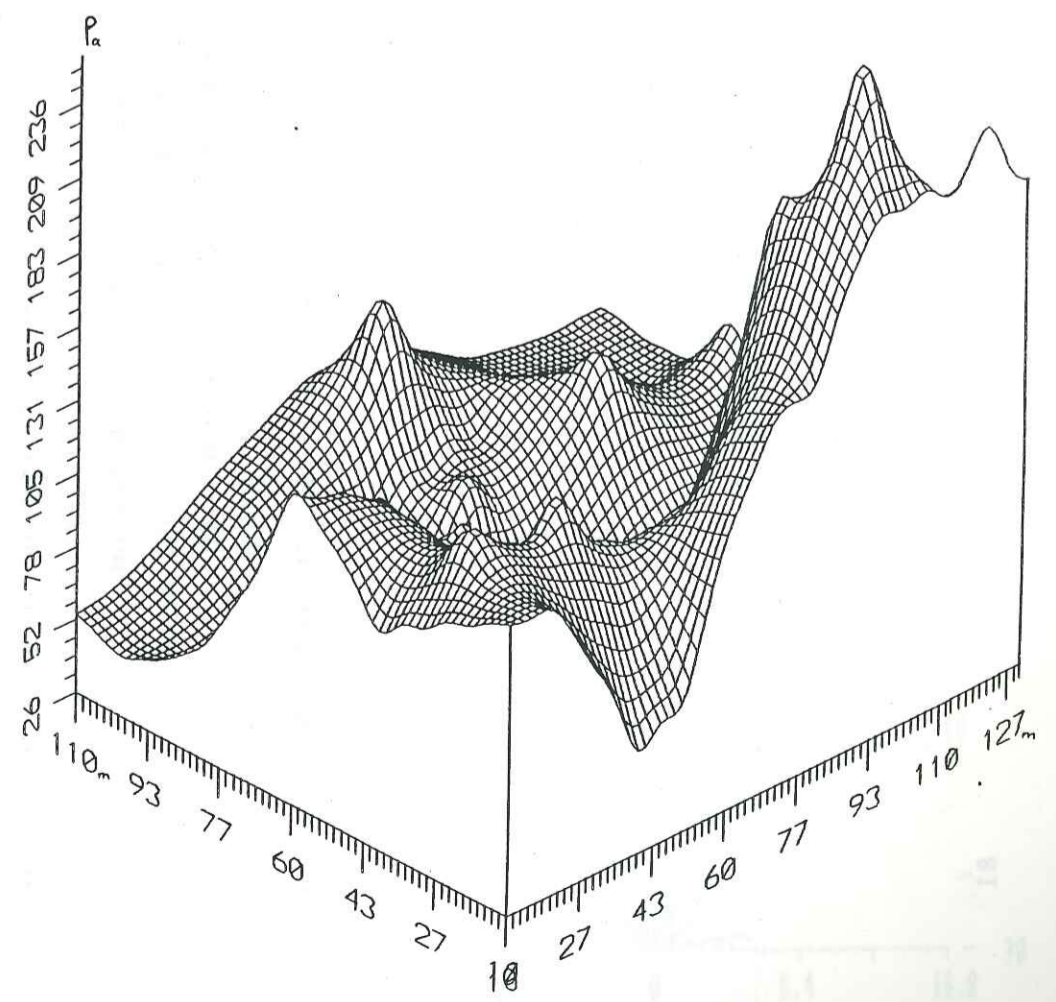
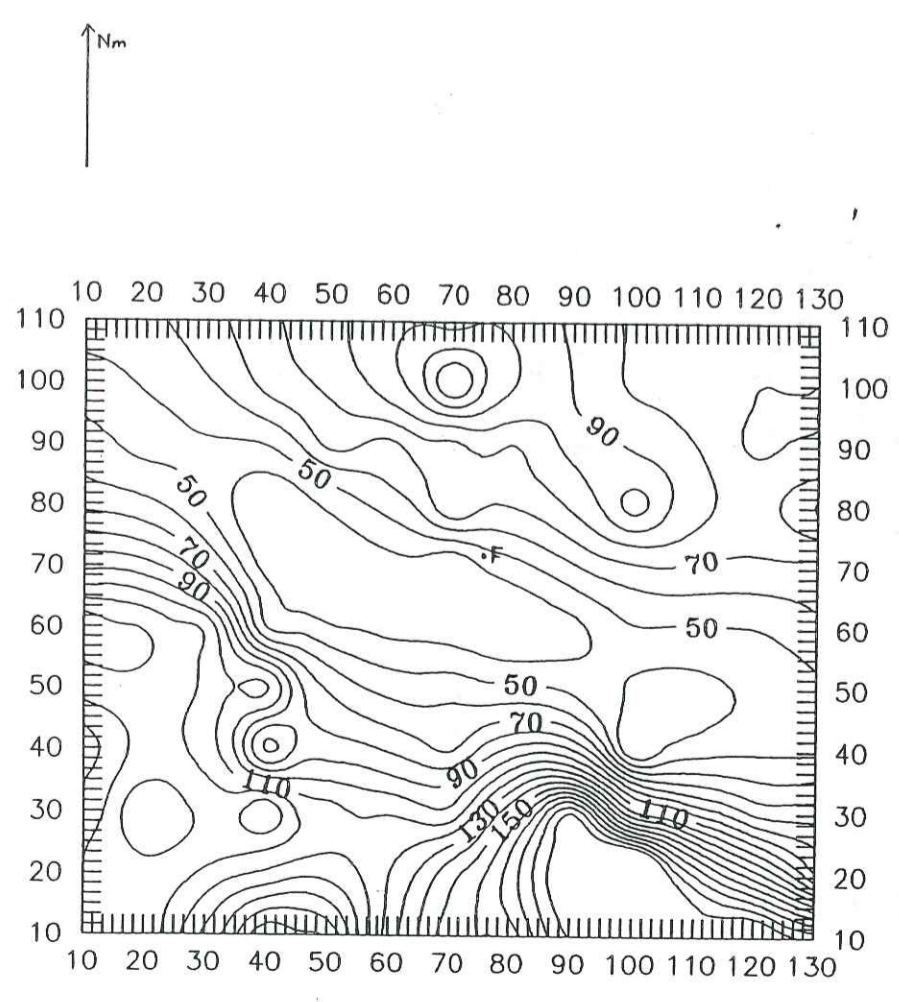


figure 51 profils électromagnétiques: extension de l'axe conducteur (site de Rakaye Mossi)

Figure 37 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Rakaye Mossi)

AB=200m MN=20m Pas de mesure=10m



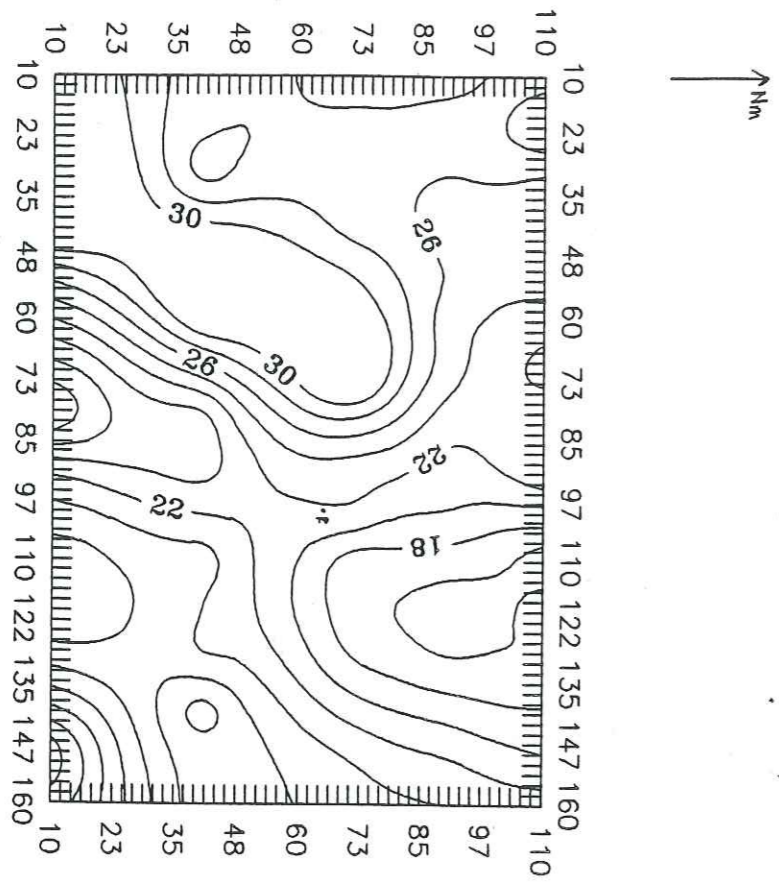
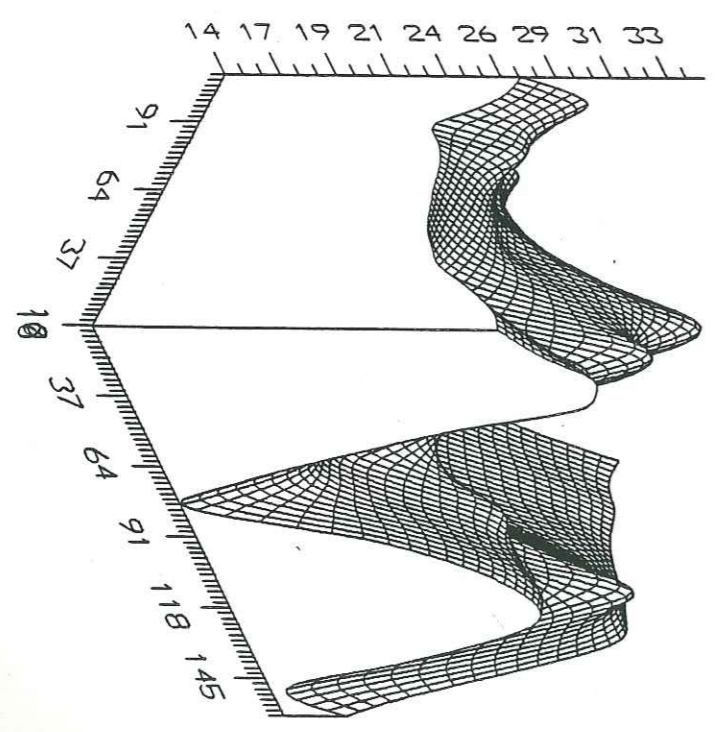
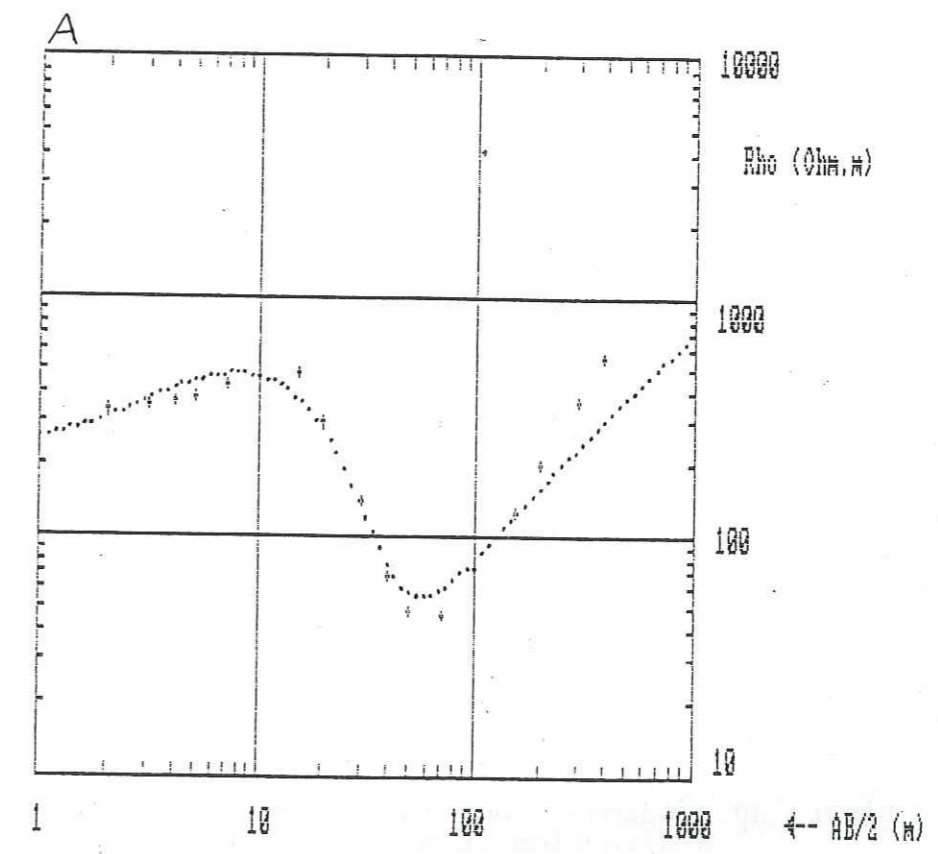


Figure 39 Carte et représentation en perspective des valeurs de $(\frac{H_p^H_p}{H_p})$, composante en quadrature (site de Rakaye Mossi)
 F=3520Hz S=50m Pas de mesure=10m

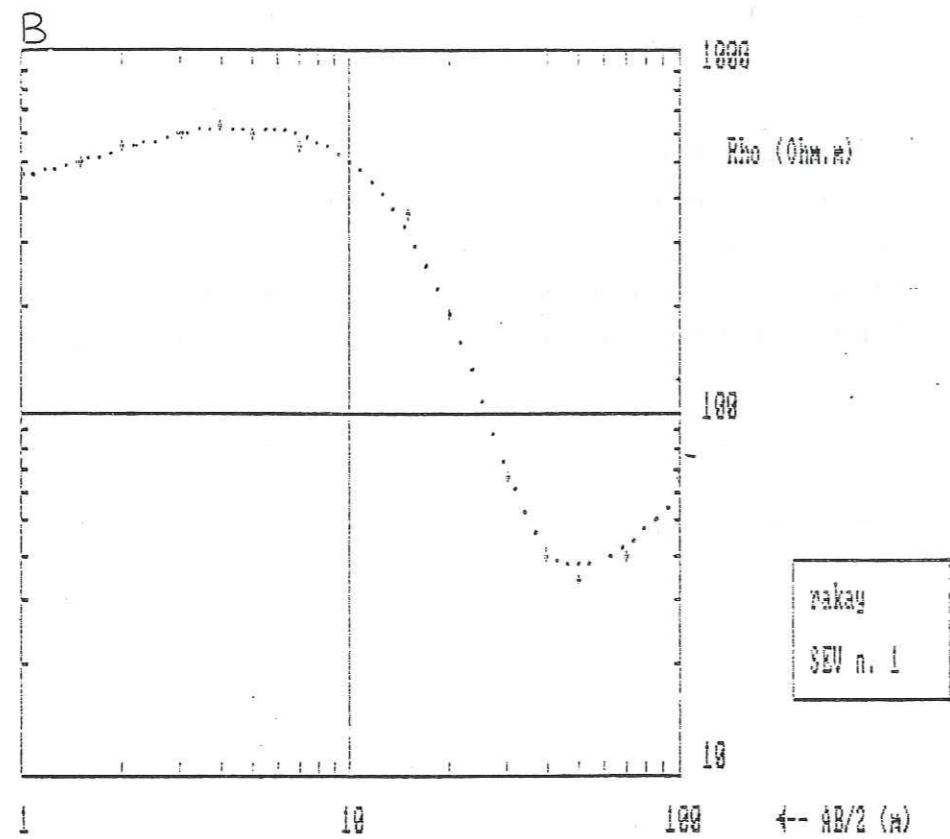


Les deux courbes de sondages électriques découlent de deux sondages effectués l'un dans la direction de la discontinuité majeure et l'autre perpendiculairement au premier. Ces deux courbes qui sont des courbes quatre terrains ont la particularité de montrer la présence d'une zone très conductrice et très épaisse (figures 40a,40b) située en dessous de la carapace latéritique. Cette zone très favorable du point de vue aquifère correspondrait peut être à une fracture ouverte. La remontée à 45° semble bien marquée. Nous ne disposons pas de résultats de forage stérile sur le site de Rakaye Mossi pour faire une étude comparative, on remarquera toutefois sur le profil d'anisotropie le même type de courbe caractéristique du forage à haut rendement étudié sur le site de Pissi.



LIMITES D'EQUIVALENCE (Erreur max = 10.%)

couche	E min	E max	R min	R max
1	0.72	1.41	154.20	300.54
2	5.34	8.60	554.22	751.65
3	22.59	46.05	18.07	38.07
4			1239.33	inf.



LIMITES D'EQUIVALENCE (ERREUR max = 10 %)

couches	E min	E max	R min	R max
1	0.61	0.86	343.19	476.74
2	5.70	6.77	667.05	791.88
3	39.27	53.79	22.38	31.45
4			227.89	inf.

Figure 40 sondages électriques (site de Rakaye Mossi)
 A-direction AB=N150
 B-direction AB=N60m

Le profil d'anisotropie (figure 41) présente une courbe en cloche avec un pic à l'aplomb du forage ce qui était prévisible compte tenu de la productivité du forage. La disposition des profils de mesures est représentée à la figure 42.

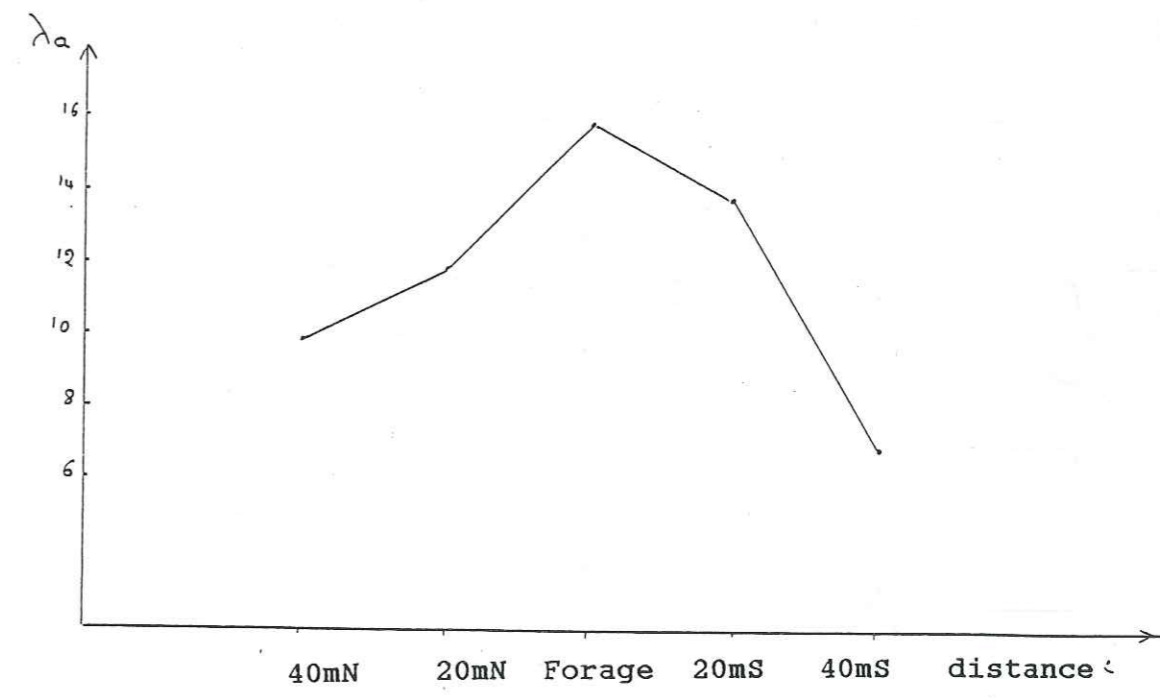
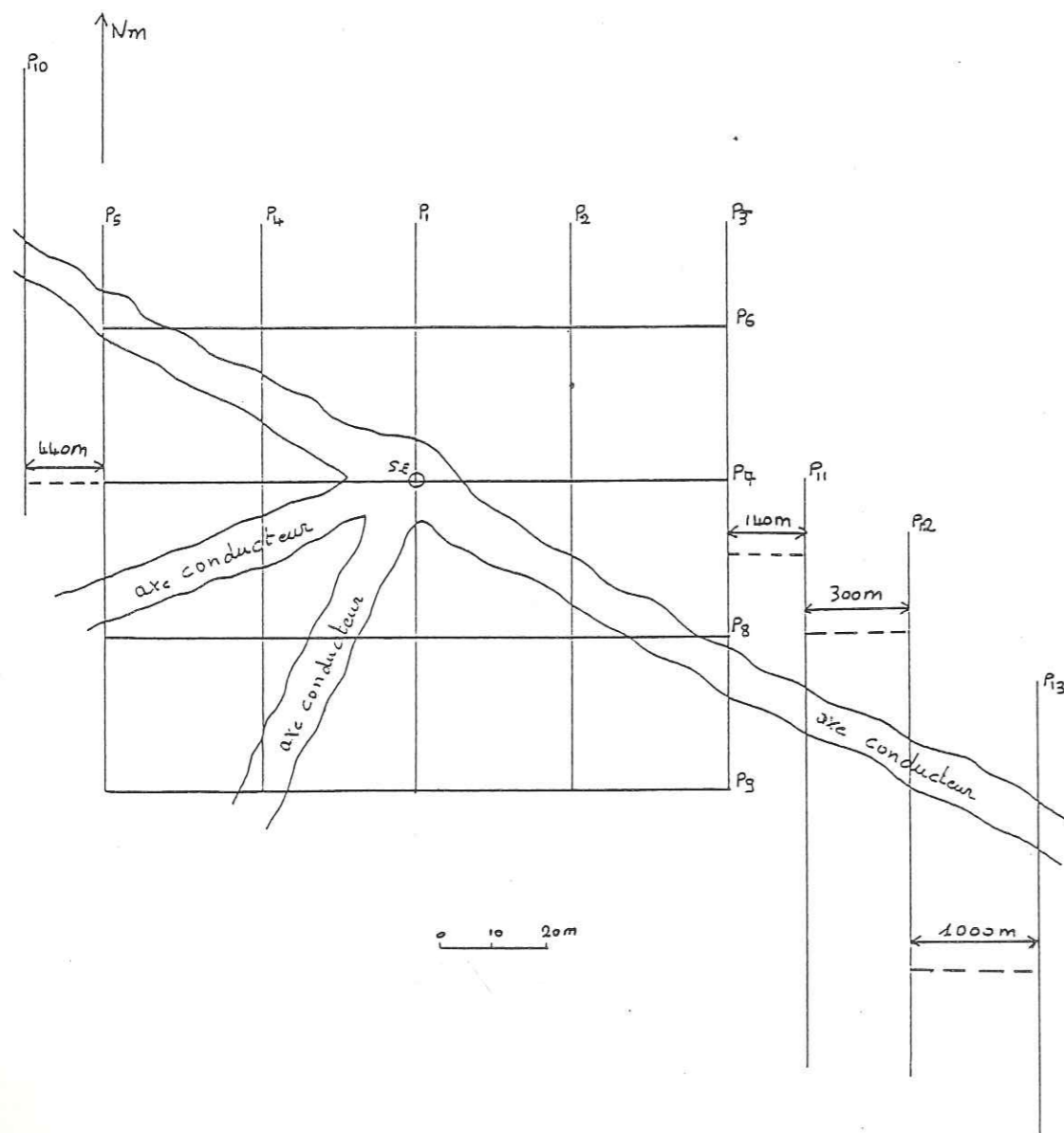


Figure 41 Profil d'anisotropie
 (site de Rakaye Mossi)

Figure 42 Disposition des profils de mesures
(site de Rakaye Mossi)



On peut ainsi conclure que le forage est situé à l'intersection d'une discontinuité majeure et d'une faille. Il est très possible que cette discontinuité majeure soit ouverte en profondeur et il faudrait déployer une autre méthode pour le vérifier. La région du village de Rakaye est généralement considérée une région difficile pour l'implantation de forages mais les résultats obtenus montrent que le sous sol est bel et bien fracturé et qu'il reste à faire un travail concis et précis pour bien implanter les forages. De par sa situation géographique, en hauteur et loin du cours d'eau le forage est dans des conditions hydrogéologiques défavorables, hormis le linéament très visible sur photographie aérienne confirmé par la géophysique comme étant une discontinuité structurale majeure. Les conditions de réalimentation sont difficiles en raison d'une couverture de carapace latéritique.

Nous ne disposons pas sur ce site des résultats de forage non productif ou faiblement productif en vue d'une étude comparative, néanmoins il est important de remarquer qu'on retrouve sur le profil d'anisotropie le même type de courbe caractéristique du forage à haut rendement étudié sur le site de Pissi, sans oublier l'importance du levé géologique et du rôle des filons qui s'injectent préférentiellement selon les directions ouvertes et qui sont de véritables drains pour l'eau souterraine.

4.1.3 Le site de Sambin

Le village de Sambin situé à 7 km à l'Ouest du village de Rakaye Mossi relève administrativement de la province du Bazèga et de la Préfecture d'Ipélécé (figure 43). Sur le site de Sambin deux forages ont été investigués: un forage à haut rendement ($Q=36\text{m}^3/\text{h}$) et un forage à très faible débit ($Q=1.93\text{m}^3/\text{h}$). Ces deux forages ont été implantés sur la base d'une interprétation de photographies aériennes qui plaçait les deux forages sur un même linéament plurikilométriques.

Le forage à haut rendement a une profondeur de 56m et le log de forage montre successivement de haut en bas une altération argileuse de 2m, une arène grenue de 7m et enfin une frange fissurée d'un granite gris intrudé de filons de quartz et de pegmatite. Le niveau statique est à 3.2m.

Le forage à faible débit a une profondeur de 50m avec une altération argileuse de 5m surmontant une arène grenue de 5m puis un socle granitique altéré et peu fissuré de 7m et enfin un socle sain constitué de granite gris. Le niveau statique se trouve à 6m de profondeur.

4.1.3.1 Levé géologique

Nous sommes toujours dans le môle granito migmatitique de Ouagadougou mais en raison du manque d'affleurements dans les environs du site, nous n'avons pas pu faire de relevé géologique. Il ressort de l'analyse des logs des forages que ceux-ci sont situés sur du granite très fissuré par endroits. En raison de la proximité avec le site de Rakaye, nous pouvons considérer que nous sommes dans les mêmes conditions géologiques.

4.1.3.2 Etude par télédétection

L'analyse des photos aériennes (figure 43) montre deux directions dominantes de linéaments. L'une de direction N80 à N100 degrés prédomine sur la deuxième de direction N170 à N180. Un seul cours d'eau y est recensé; il coule généralement d'Est en Ouest avec quelques embranchements dans la direction Nord Sud. Le réseau de linéaments est peu dense et le forage à haut rendement est situé sur un linéament N100 degrés qui en recoupe deux autres de direction N90 à N60 à proximité du forage.

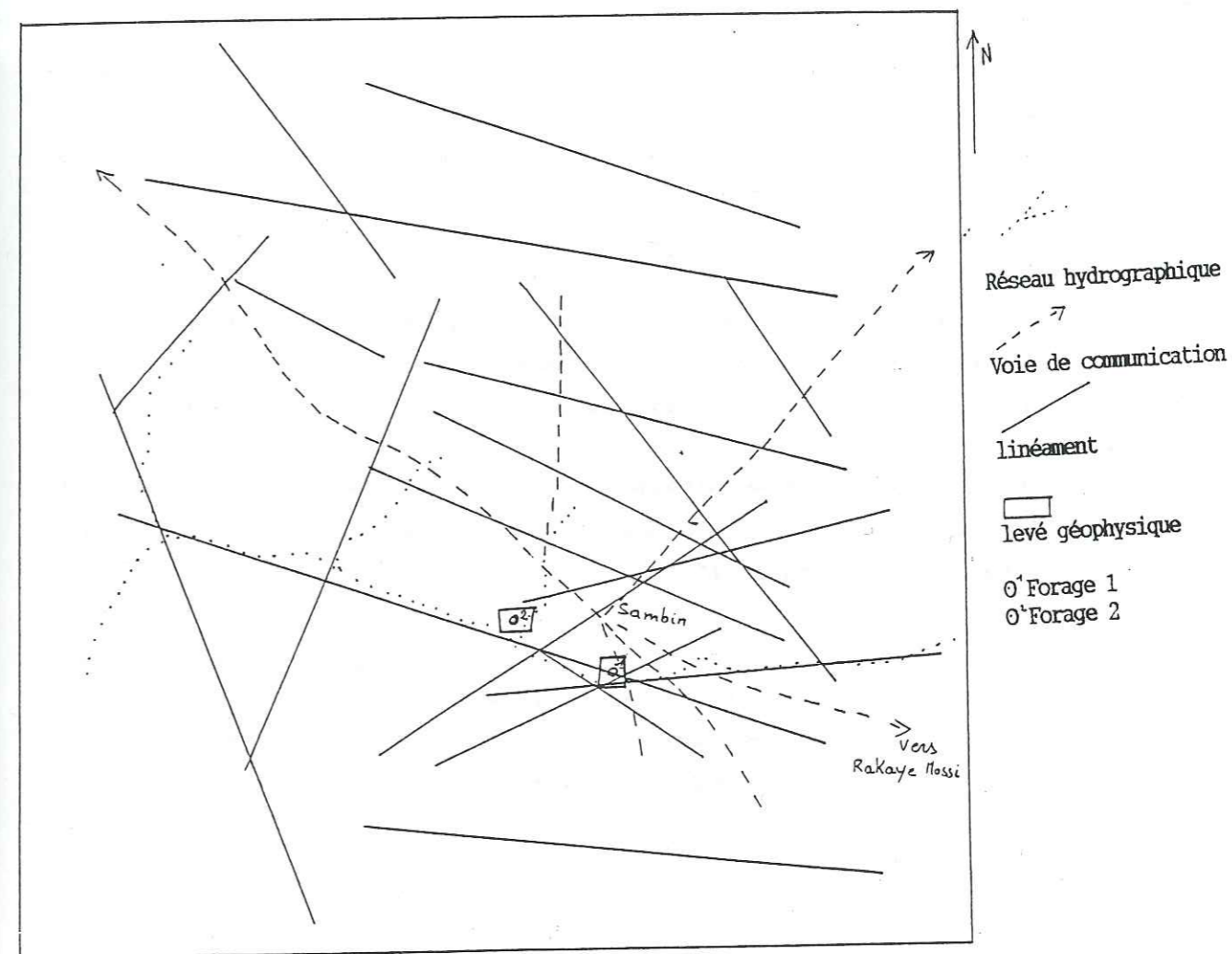
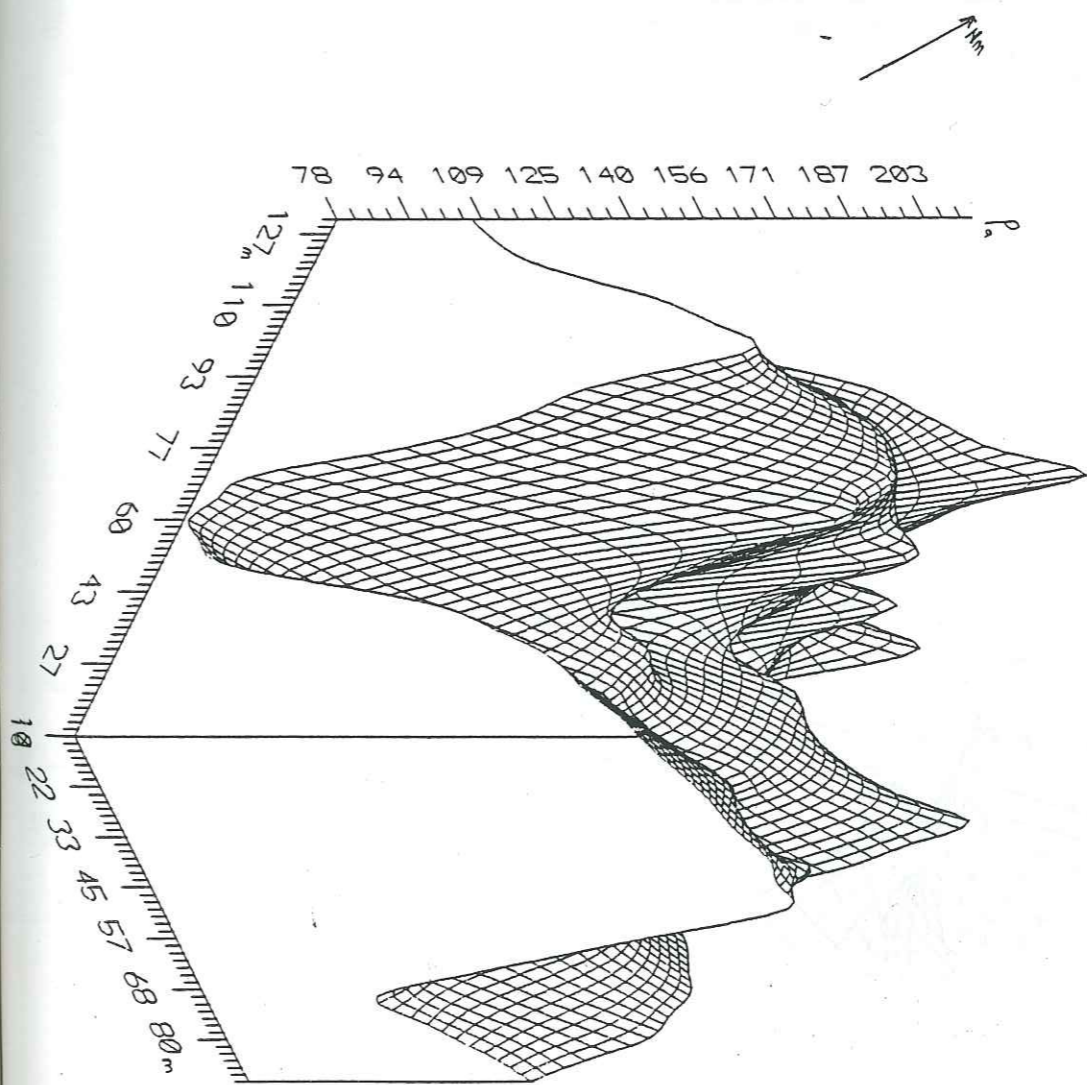
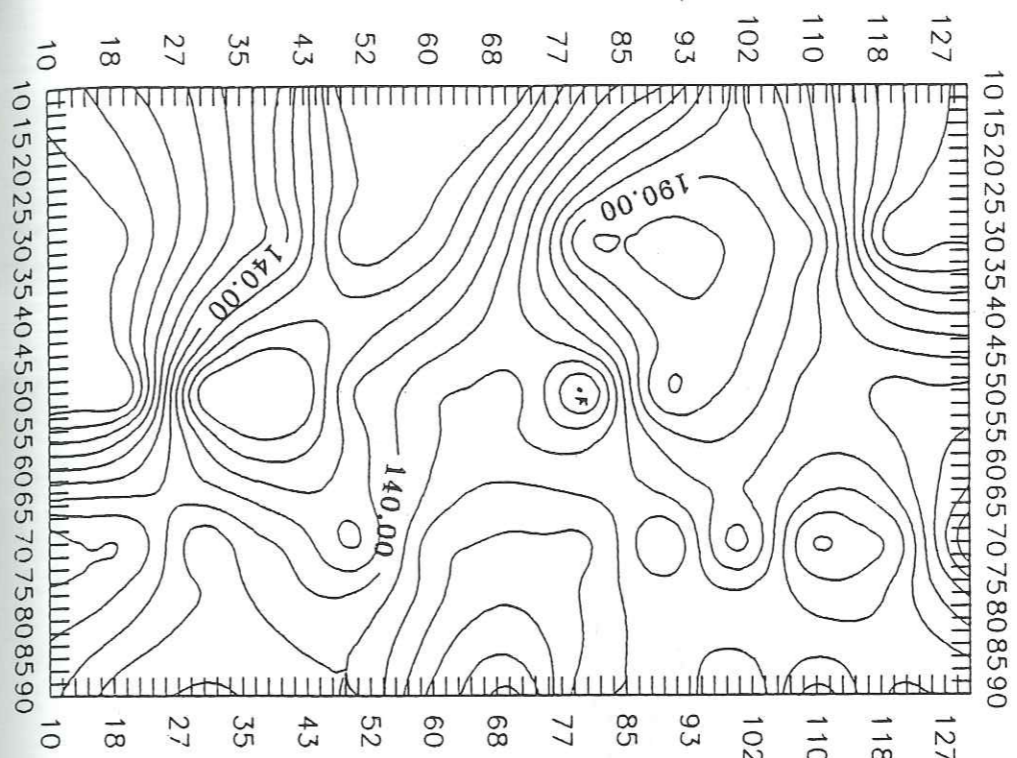


Figure 43 Carte de photo-interprétation (site de Sambin)

Figure 44 Carte et représentation en perspective de résistivité
(Ohm-m) Plateforme 1 (site de Sambin)

AB=200m MN=20m Pas de mesure=10m



4.1.3.3 Prospection géophysique

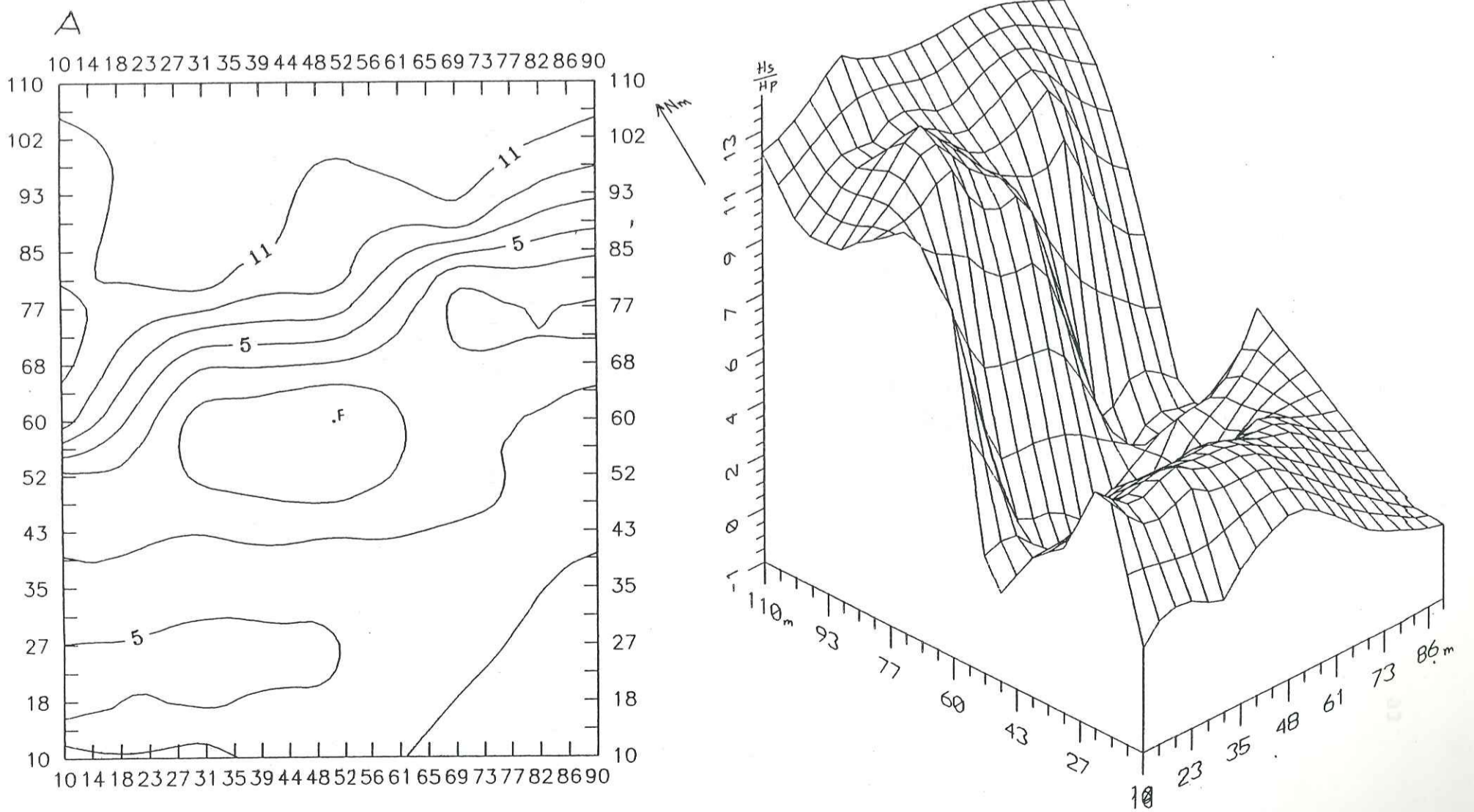
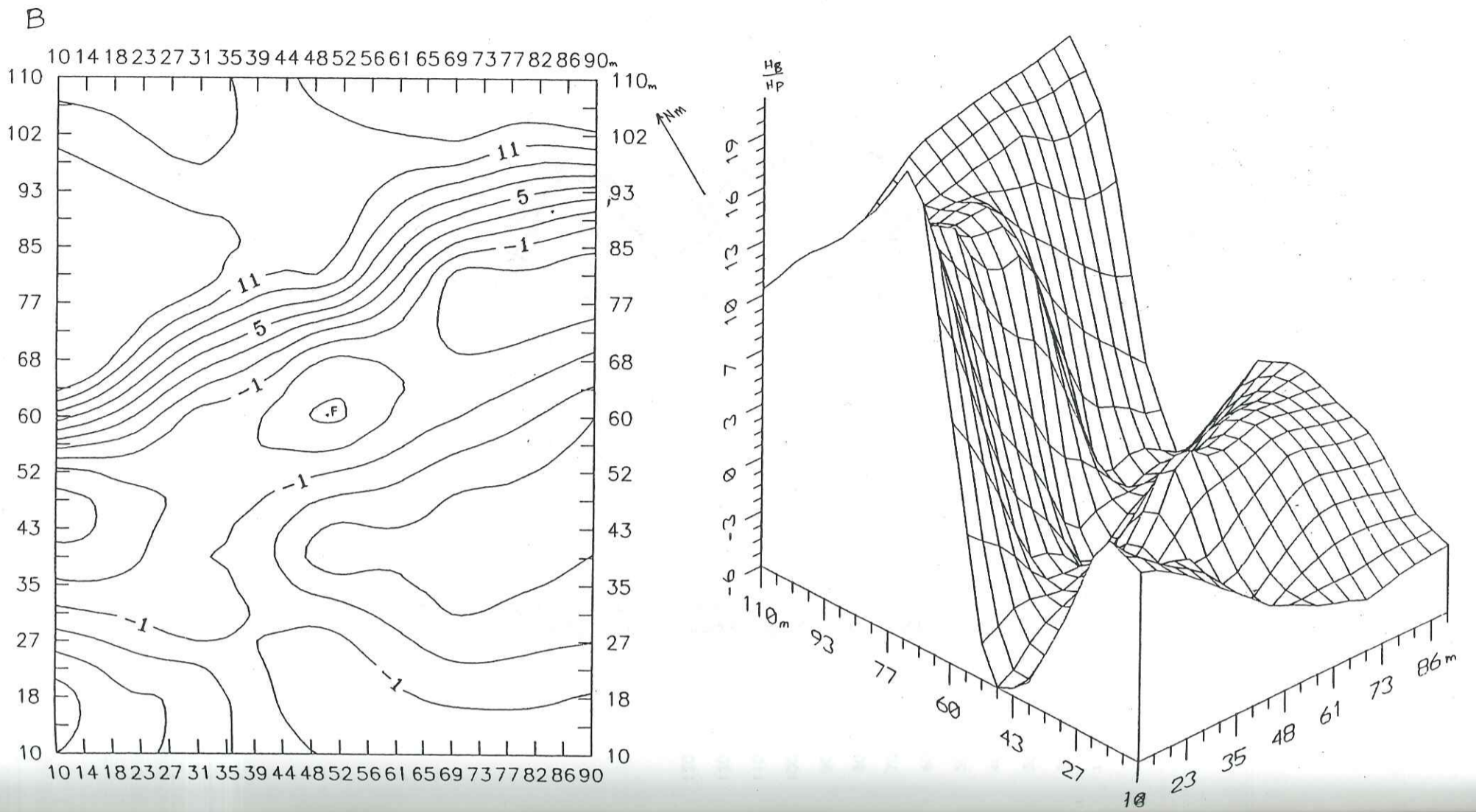
La prospection géophysique s'est faite sur deux plateformes autour des deux forages.

La carte d'isorésistivité apparente (figure 44) montre deux axes conducteurs : N90 et N150 degrés. Les deux axes ne se recoupent pas parfaitement au niveau du forage mais induisent une zone de faible valeur de résistivité situé côté Nord-Ouest du forage. Le cours d'eau étant situé au Sud du forage il en découle que les deux failles correspondant à ces deux axes conducteurs alimentent le forage puisque le drainage se fait du Nord au Sud et d'Est en Ouest.

Les deux cartes d'électromagnétisme (figures 45a,45b) confirment l'existence des deux axes conducteurs mais on remarque que celui de direction N150 degrés n'apparaît pas sur la figure 45a. Nous avons voulu montrer cet exemple pour prouver l'efficacité de la composante OUT phase par rapport à la composante In phase; en plus cela prouve que l'axe de direction N90 est prédominant. Cet axe a été recoupé sur près de 5 km par des profils électromagnétiques (figure 46).

Figure 45 Cartes et représentations en perspective des valeurs de (-), A composante en phase, B composante en quadrature Plateforme 1 (site de Sambin)

F=3520Hz S=50m Pas de mesure=10m



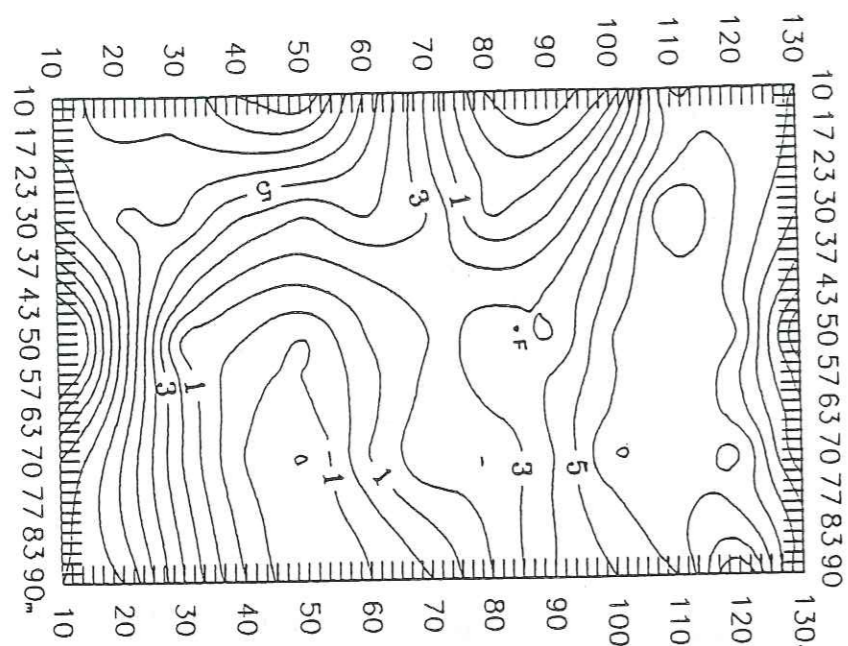
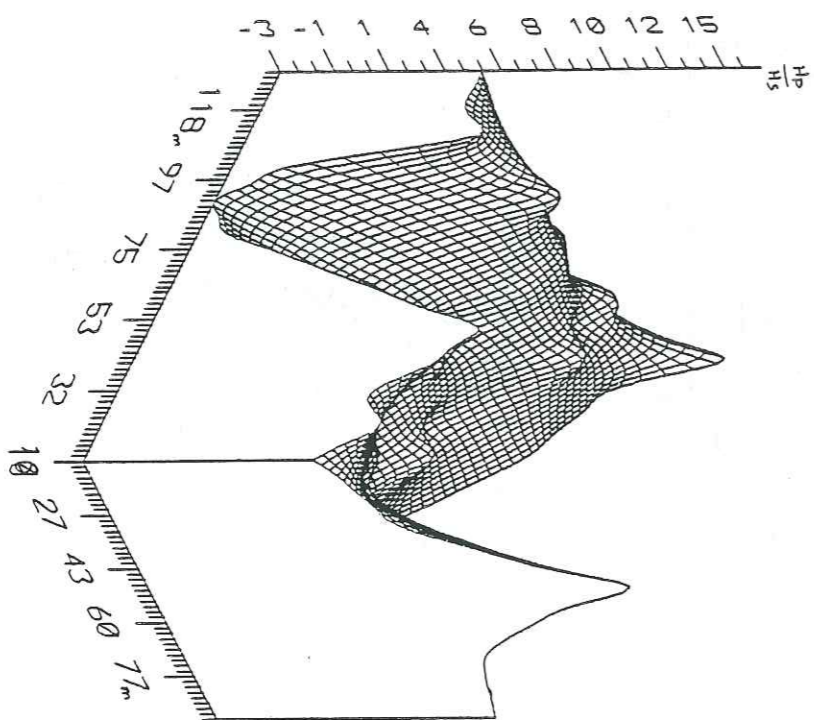
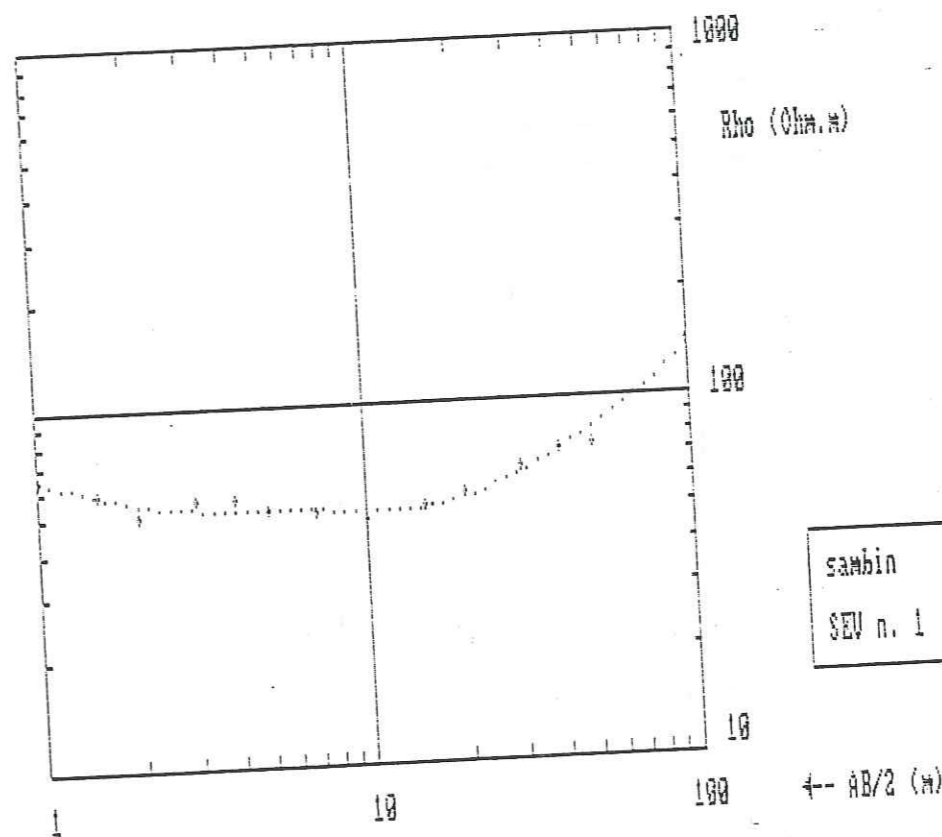


Figure 48 Carte et représentation en perspective des valeurs de (ρ_{sp}) , composante en quadrature Plateforme 2 (site de Sambin)
 F=3520Hz S=50m Pas de mesure=10m



Les sondages électriques ont été réalisés à raison de deux par plateforme dont nous présentons deux giagrammes dans la figure 49. Nous remarquons au niveau de la plateforme 1 la présence d'arène humide très épaisse surmontant une frange fissurée aussi importante marquée par la présence d'une remontée trainante assez prononcée. Au niveau de la plateforme 2 (Sambin 3) on remarque une présence d'argile très importante suivie d'arène humide mais sans frange fissurée.



LIMITES D'EQUIVALENCE (Erreur max = 10 %)

couche	E min	E max	R min	R max
1	0.24	0.67	31.05	171.25
2	1.35	2.11	39.33	54.20
3	0.80	1.59	42.99	34120.15
4	9.21	12.34	35.35	51.94
5	28.10	37.94	65.65	165.27
6			349.20	inf.

Les deux profils d'anisotropie effectués au niveau des deux plateformes (figure 50) montrent une courbe en cloche pour la plateforme 1 tandis qu'on observe presque un palier au niveau de la plateforme 2. Une fois encore les profils d'anisotropie sont caractéristiques : celui du forage 1, à fort débit, présente un net contraste avec celui obtenu au niveau du forage 2, à très faible débit.

La figure 51 représente la position des différents profils de mesures autour des deux forages

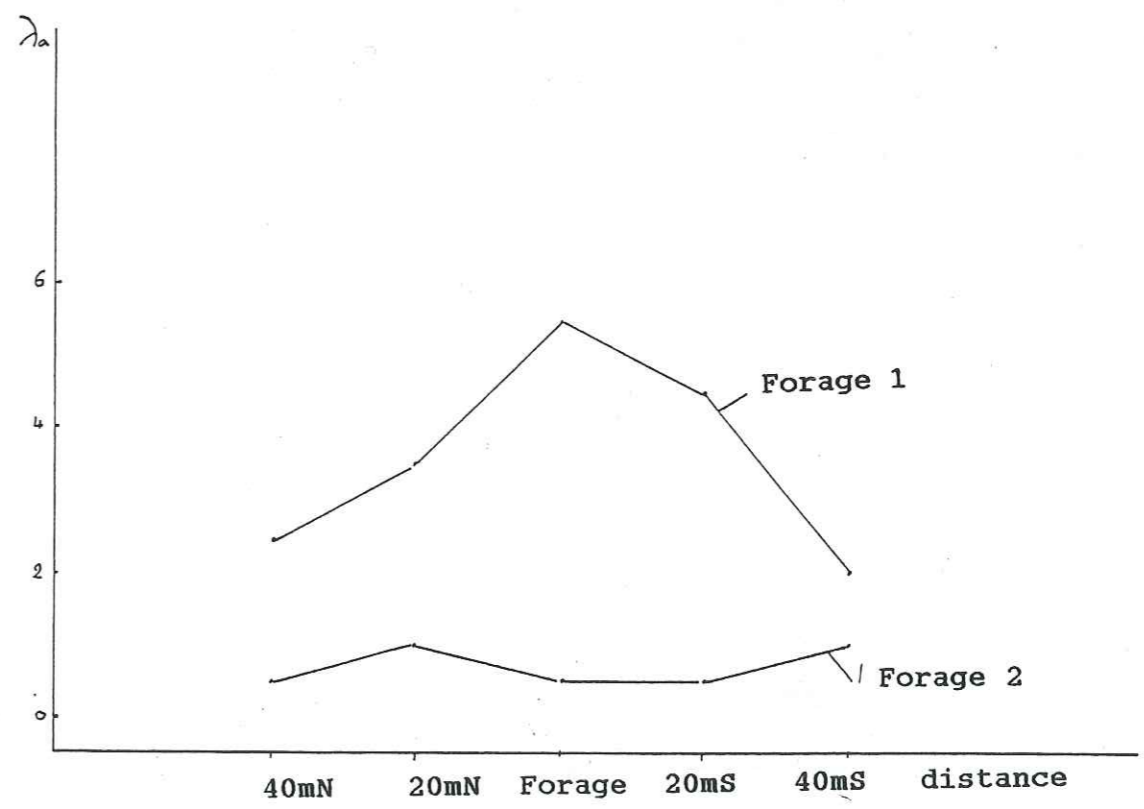


Figure 50. Profils d'anisotropie (site de Sambin)

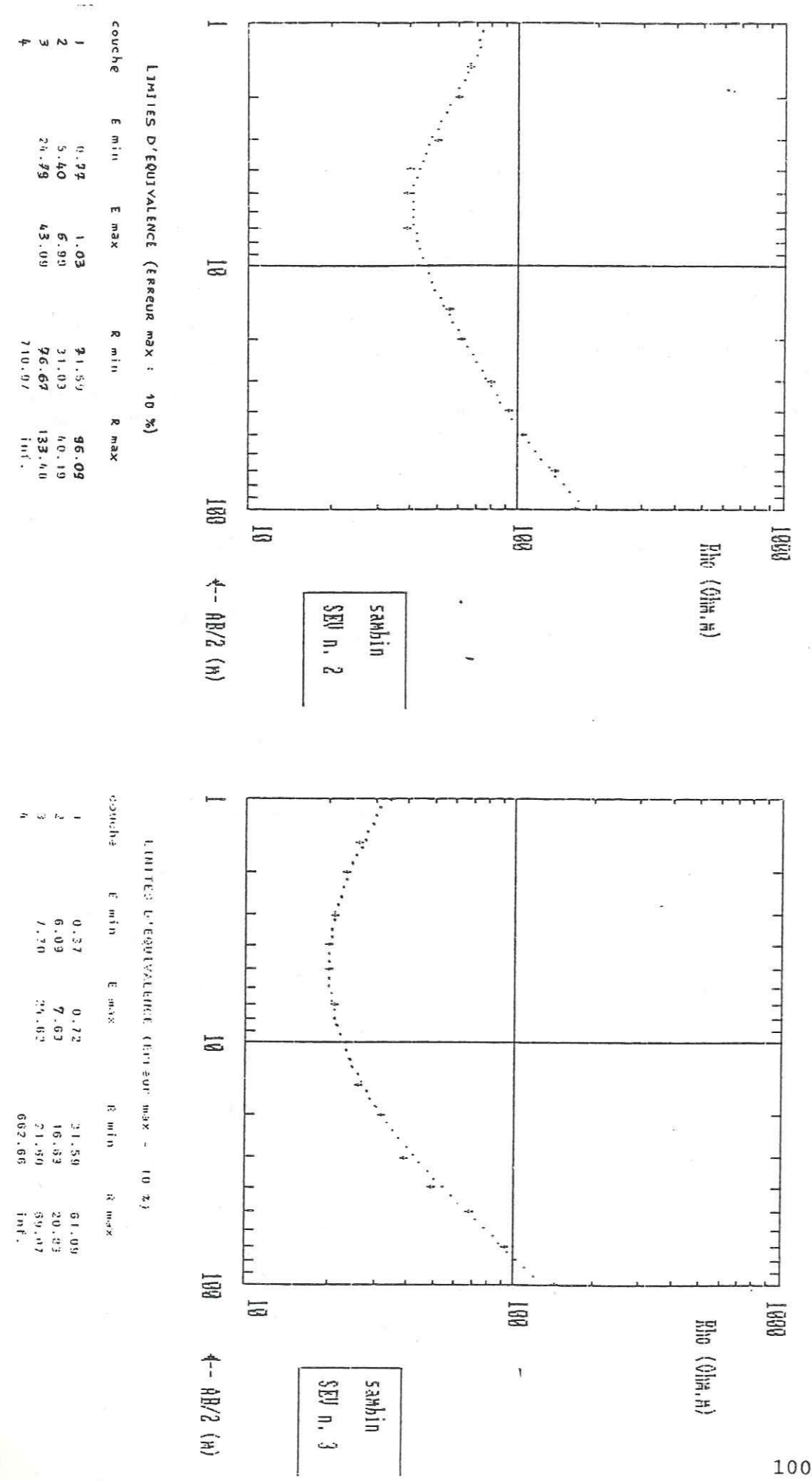


Figure 49 Coupes de sondages électriques (site de Sambin)

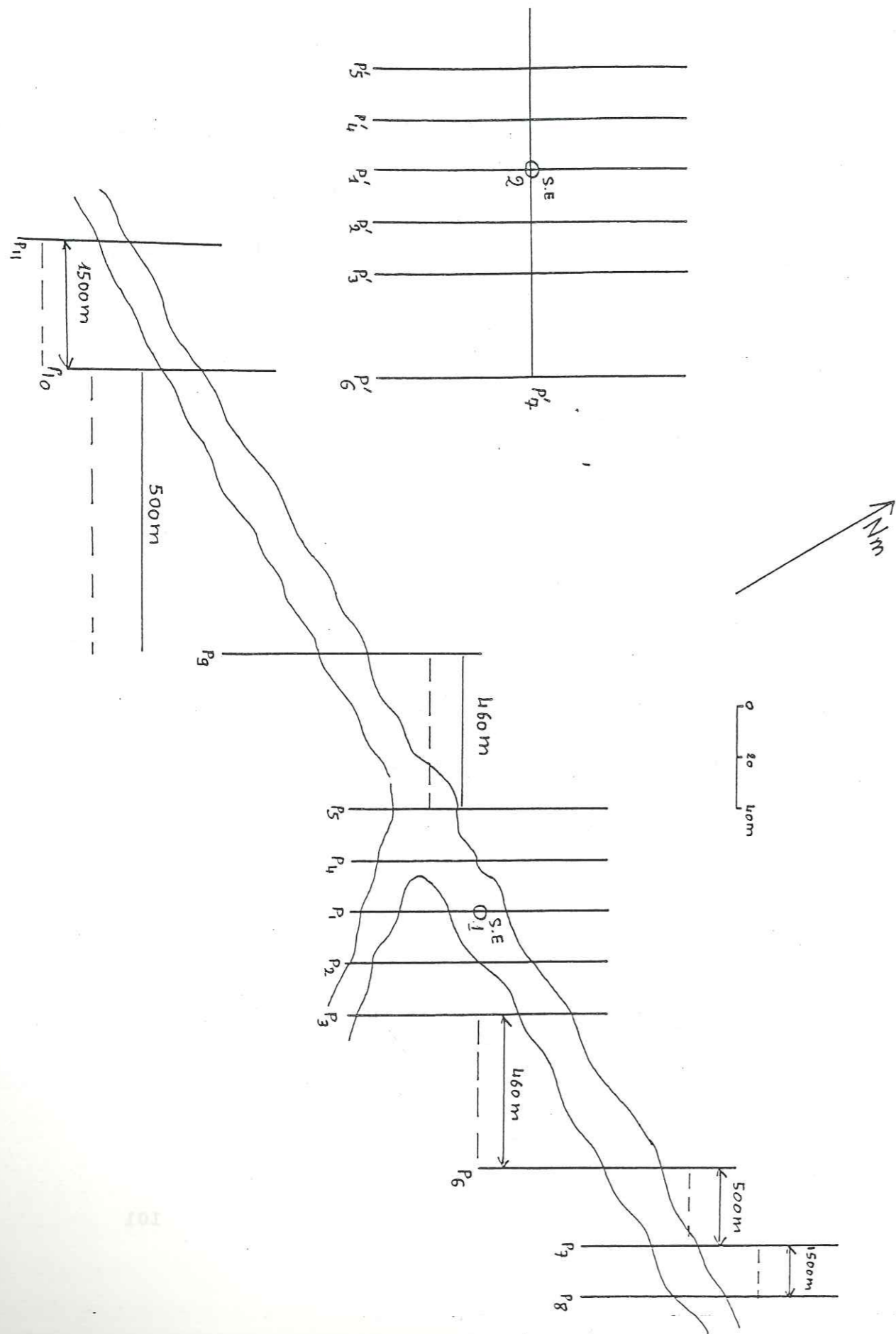


Figure 51 Disposition des profils de mesures (site de Sambin)

Le forage 1 est implanté sur une discontinuité majeure que recoupe une faille secondaire. Sa réalimentation est en outre assurée par un cours d'eau situé à une cinquantaine de mètres. Les résultats ne montrent aucun axe conducteur sur le site du forage 2 où les sondages et le profil d'anisotropie n'ont pas fourni de critères favorables. L'eau du forage dégage une odeur semblable à celle du marigot situé à proximité ce qui permet de penser que son débit de 1.93m³/h provient essentiellement d'infiltration depuis le marigot.

La méthodologie sur ce site a permis de montrer les facteurs de productivités des forages; la condition nécessaire pour l'obtention d'un débit acceptable est prouvée (fracture dans le socle), celle de l'obtention de haut débit étant une extension latérale de la fracture sur 40 à 50m et une extension longitudinale sur 3 à 5km. Les profils d'anisotropie sont très caractéristiques et sont comparables à ceux du site de Pissi.

4.1.4 Le site de Doulougou

Doulogou, chef lieu de préfecture relève de la province du Bazèga. Le site (figure 52) prospecté se situe non loin de l'école primaire qui y fait chaque année du jardinage. Nous disposons sur ce site d'un forage à haut rendement ($Q=32m^3/h$) qui a été implanté sur la base d'une étude de photographie aérienne et de prospection géophysique (trainés de résistivité et sondage électrique). La conclusion de cette étude indique que le forage se situe sur le noeud d'un accident tectonique.

On note la présence d'un puits à proximité du forage. La profondeur du forage est de 46m avec successivement une argile sableuse grise avec des éléments de quartz et de feldspath sur 7m, une arène argileuse de 15m d'épaisseur, une pegmatite plus ou moins altérée et faillée avec des éléments de gneiss sur 9m, un filon de quartz porphyroïde faillé et oxydé sur 3m, une pegmatite rose oxydée, faillée, plus ou moins altérée avec des éléments de pyrite sur 6m et enfin une migmatite plus ou moins altérée avec la présence d'éléments de gneiss. Le niveau statique de l'eau se situe à 5.1m.

4.1.4.1 Levé géologique

Les affleurements prospectés sur le site de Doulogou (figure 52) présentent une orientation préférentielle N150 degrés.

Il s'agit de migmatites avec une granulométrie variant énormément d'un endroit à l'autre. La foliation est bien marquée avec une orientation dominante N60 à 70, mais on remarque aussi des foliations N90.

On rencontre beaucoup de fissures dont les deux directions dominantes sont N0-30 et N130-140, des veines de quartz de direction N100, dont l'épaisseur dépasse parfois 5 cm et la longueur atteint 30 à 40 mètres, ainsi qu'une enclave d'amphibolite de direction N30 à pendage incertain.

L'analyse microscopique d'échantillons montre une texture grenue équante avec la présence de fracturation et de recristallisation locale.

La composition minéralogique est la suivante: 30% de plagiocase, 30% de microcline, 30% de quartz, 3% de biotite, 5% de minéraux d'altération (épidote, muscovite, chlorite) et 2% de minéraux accessoires (allamite, opaques).

4.1.4.2 Etude par télédétection

L'étude par télédétection du site de Doulogou consiste en l'analyse de photographies aériennes (figure 52). On peut retenir qu'il existe deux directions dominantes de linéaments: N0-20 et N160-180.

Le réseau hydrographique, peu dense par rapport aux autres sites de la province a une orientation d'ensemble Nord-Ouest à Nord.

Quant au réseau de linéaments, il est dense surtout à proximité du forage ce qui laisse penser à une fracturation très importante du substratum.

Le forage est situé sur un linéament N 5 et à proximité d'un cours d'eau.

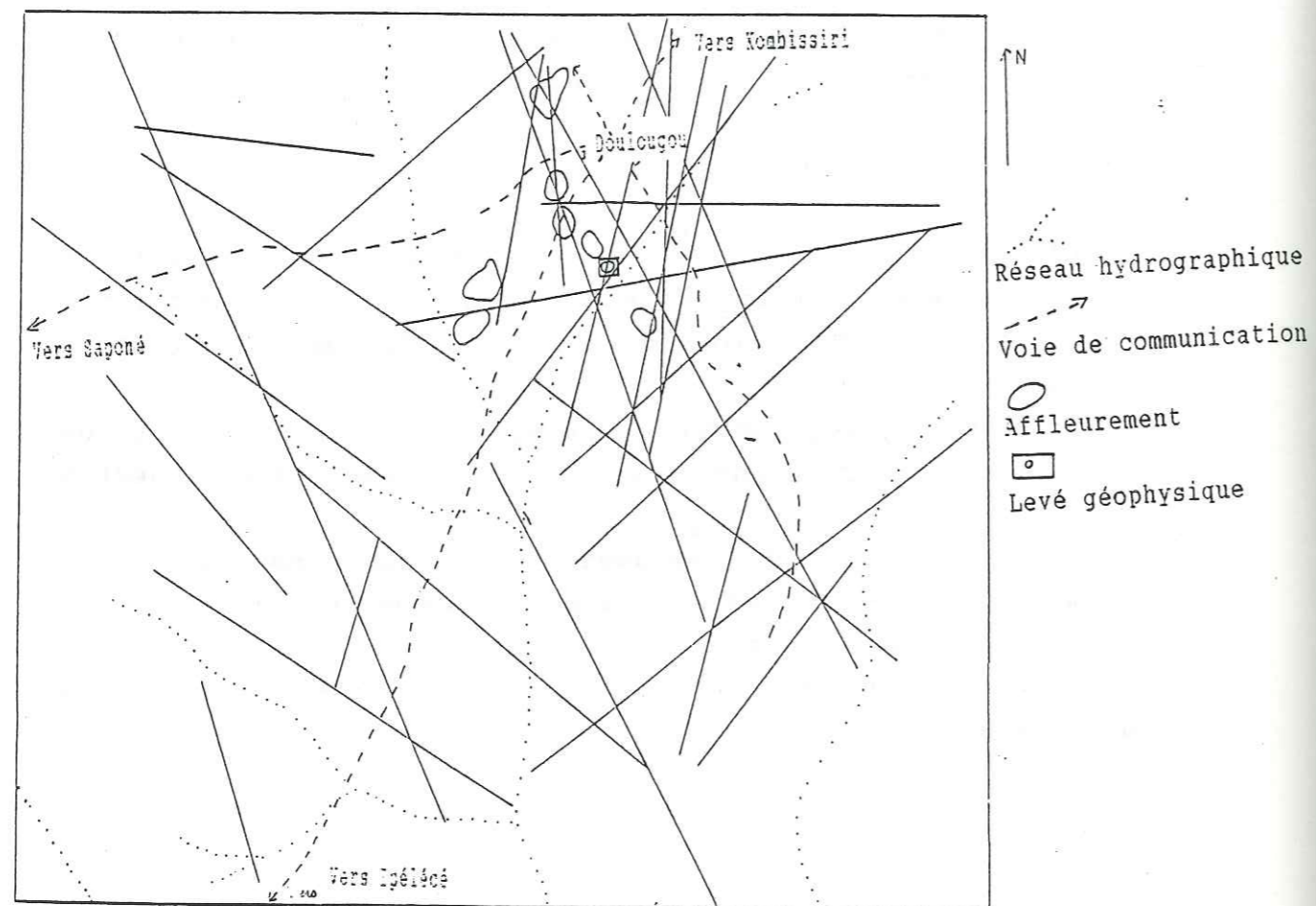


Figure 52 Carte de photo-interpretation (site de Doulougou)

4.1.4.3 Prospection géophysique

Nous nous sommes rendu compte après avoir fait deux profils électromagnétiques que la présence du grillage du jardin scolaire n'autorisait pas de mesure en électromagnétisme. Le grillage étant un très bon conducteur engendre de grosses anomalies électromagnétiques qui cachent toute information du sous sol. Nos investigations se sont réduites à:

- 12 profils électriques de 2500 mètres de longueur totale
- 2 sondages électriques
- 1 profil d'anisotropie

La carte de résistivité apparente (figure 53) montre une zone de 20 à 30 mètres de largeur très résistante. Nous avons assimilé cette zone à un filon vu la productivité du forage et les valeurs très élevées de résistivité. Ce filon est très fissuré: on recense 5 fissures sur 200 mètres.

Les sondages électriques (figure 54) sont des courbes quatre terrains. La remontée trainante n'est pas très évidente et seule la présence d'arène humide semble visible.

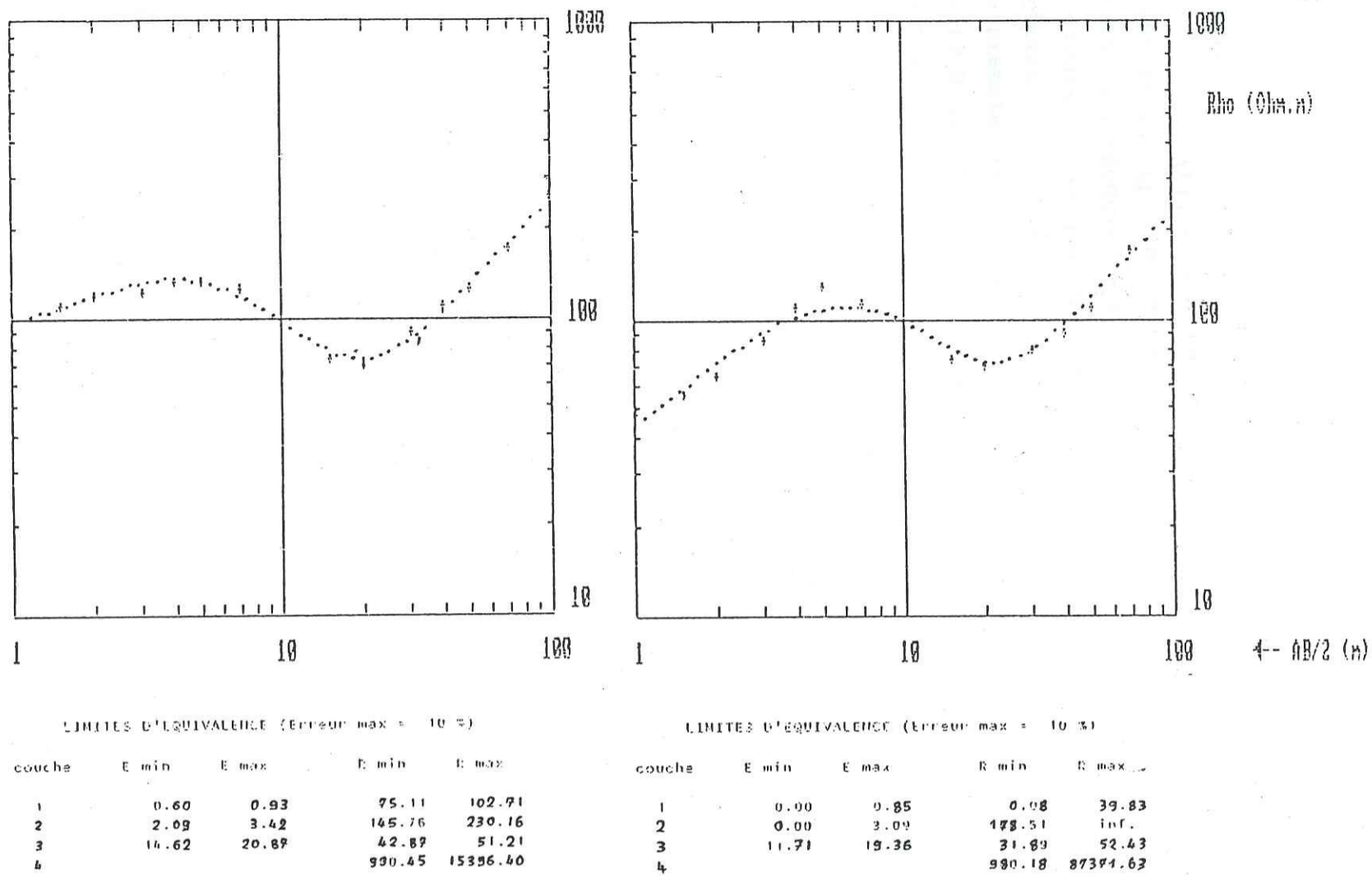
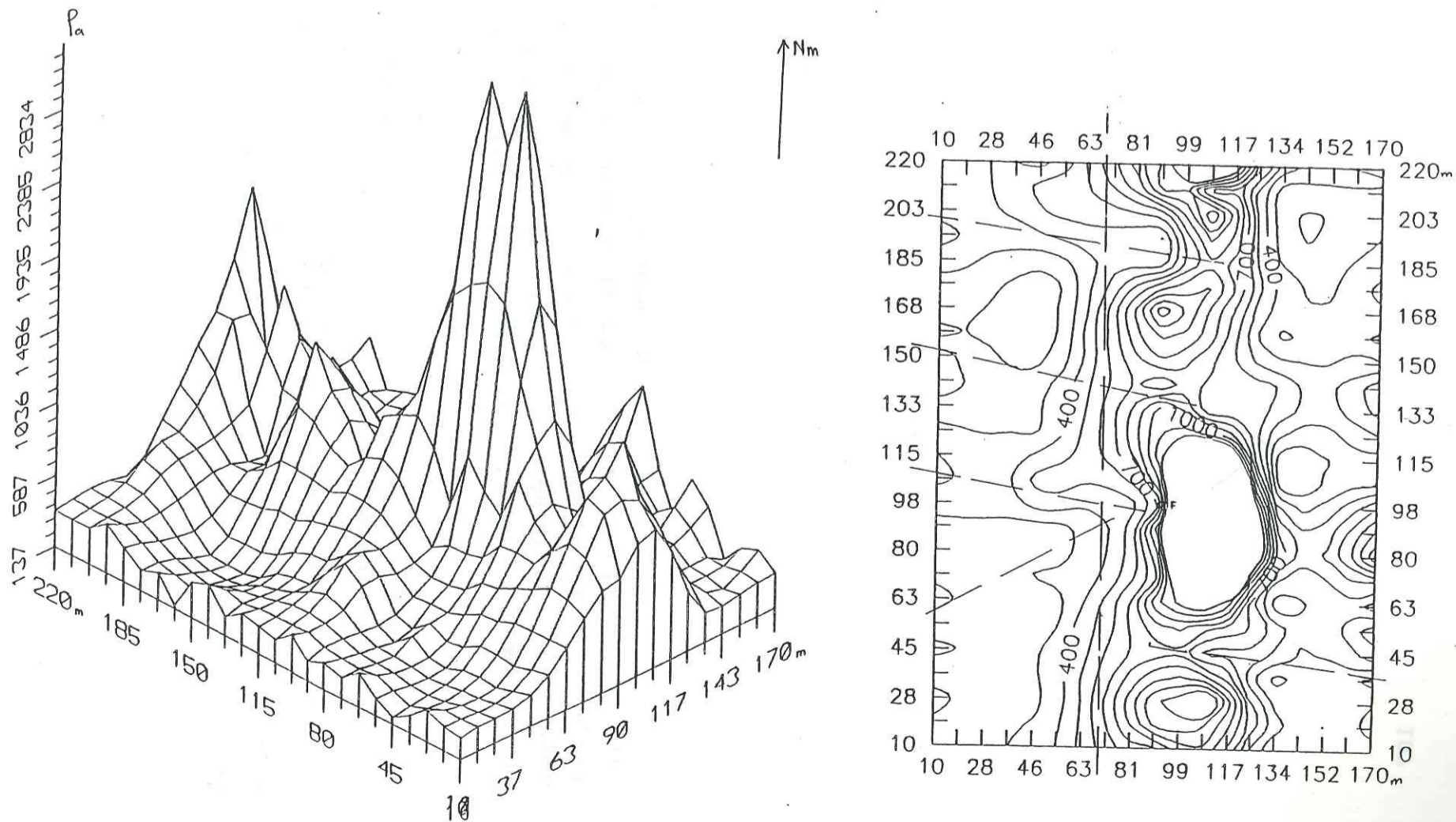


Figure 54 Courbes de sondages électriques (site de Doulogou)

Figure 53 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Doulogou)

AB=200m MN=20m Pas de mesure=10m



Le profil d'anisotropie (figure 55) montre une courbe en dents de scie. On enregistre pas de maximum véritable à l'aplomb du forage. Le filon se comporte différemment d'une fracture. Cela résulte du fait que la faille ouverte est un conducteur assez homogène tandis que le filon est très hétérogène de point du vue conductivité avec ses fissures contenant l'eau très conductrices contrastant nettement avec le reste du filon très résistant.

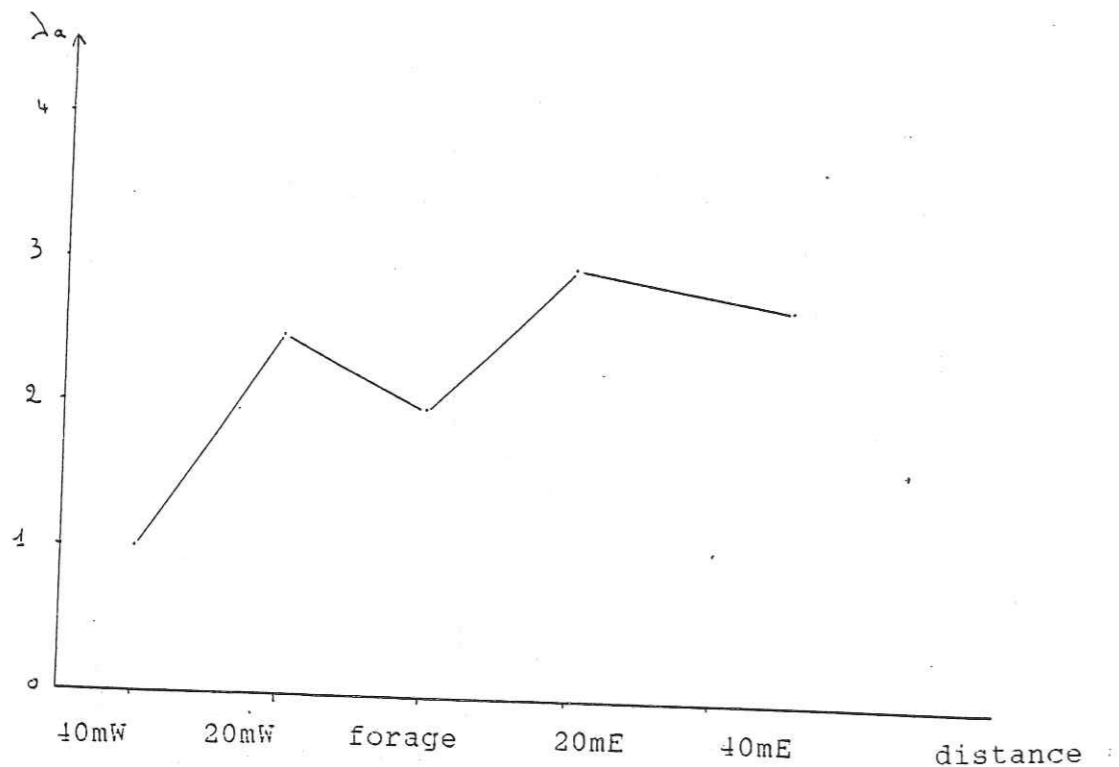


Figure 55 Profil d'anisotropie (site de Doulogou)

La productivité élevée du forage est liée à un filon drain très fissuré (ce qui confirme les études géologiques sur le site de Rakaye (rosace de filons)) et à la proximité d'un cours d'eau qui assure la réalimentation. Compte tenu des contraintes de terrain la méthodologie n'a pas été complète comme sur les sites précédents et il faut noter l'allure différente de la courbe d'anisotropie (filon) par rapport à celles obtenues sur fractures du socle.

4.2 LE PLATEAU CENTRAL

4.2.1 le site de Lay

Lay chef lieu de préfecture relève de la province d'Oubritenga. Il est situé à 35 km de Ouagadougou sur l'axe Ouaga-Yako (figure 56). Trois forages ont fait l'objet de nos investigations: un forage à haut rendement (50m³/h), un forage à rendement moyen (7m³/h) et un forage sec. Ces trois forages ont été implantés sur la base d'interprétation de photographies aériennes. Pour cette étude le forage 1 se situe au croisement de deux linéaments: N 130-150 et N 135.

Les forages 2 et 3 sont sur le linéament N 130-150 au Nord-Ouest du forage 1.

Les études (BGR-CIEH, 1987) n'ont pas confirmé l'existence des deux linéaments ci-dessus cités; leurs études géophysiques (magnétisme et électromagnétisme VLF) n'ont mis en évidence que de très faibles structures E.M. dans des directions NNE et ENE au voisinage du forage 1.

Ces études concluent que les seules signes de facteurs de productivité du forage seraient sa position au croisement de cours d'eau et de la prolongation de linéament photoaérien ainsi que l'aspect des résistivités qui rend vraisemblable l'existence de poches d'altération dans la roche.

4.2.1.1 Etude du cadre géologique

A défaut d'affleurements dans les environs des forages prospectés, nous avons axé notre étude sur les logs de forages. En effet beaucoup de forages ont été implantés dans le secteur et offrent par la description des logs des informations sur la géologie du secteur de Lay.

Pour le forage 1 à haut rendement, il s'agit d'un granite intrudé de filons de quartz et de pegmatite, ainsi que de granito gneiss. Le forage d'une profondeur de 37.5 m demeure dans la frange fissuré du substratum et comporte une épaisseur importante

d'arène (15m).

Pour le forage 2, on fait état d'un granodiorite avec des passages de filons de pegmatite; l'épaisseur de l'arène granitique y est importante (12m) mais celle de la frange fissurée est minime par rapport à celle du forage 1.

Un autre forage situé à peine à cinq mètres du forage 2 dans du granite capte le même réservoir que ce dernier. Le forage sec est implanté dans un granito-gneiss avec des veines de quartz. On note un premier terrain constitué de carapace latéritique et une épaisseur minime d'arène grenue (à peine 5m) et de frange altérée, très peu fissurée (7m). Sa profondeur est de 40m. Un autre forage sec a traversé un granito-gneiss avec de rares filons de quartz. Enfin un dernier forage avec un débit de (1.2 m³/h) traverse un granito-gneiss avec présence d'amphibolite et quelques filons de quartz. Bien que la description pétrographique des logs de forage soit à prendre avec des réserves, on peut néanmoins retenir que tous les forages se trouvent dans des formations granitiques tectonisées, intrudées de filons et de granodiorite.

4.2.1.2 Etude par télédétection

L'étude des photographies aériennes a constitué l'essentiel de la télédétection du site de Lay (figure 56). Les linéaments recensés, assez denses, présentent deux directions dominantes: N150-170 et N40-60 degrés.

Le forage 1 est situé sur un linéament N80 recoupé par le linéament N140 sur lequel se trouve le forage 2.

Les deux linéaments sont bien marqués sur le terrain par un alignement de ficus gnafolocarpa. Le forage 1 est situé en aval d'une zone qui remonte jusqu'au village en bordure de la route qui se trouve en hauteur sur une cuirasse latéritique. Le réseau hydrographique est peu dense et les forages se trouvent presque à la limite de partage des eaux entre la Volta Blanche et la Volta Rouge. Un marigot passe à cinquante mètres au Nord du forage 1.

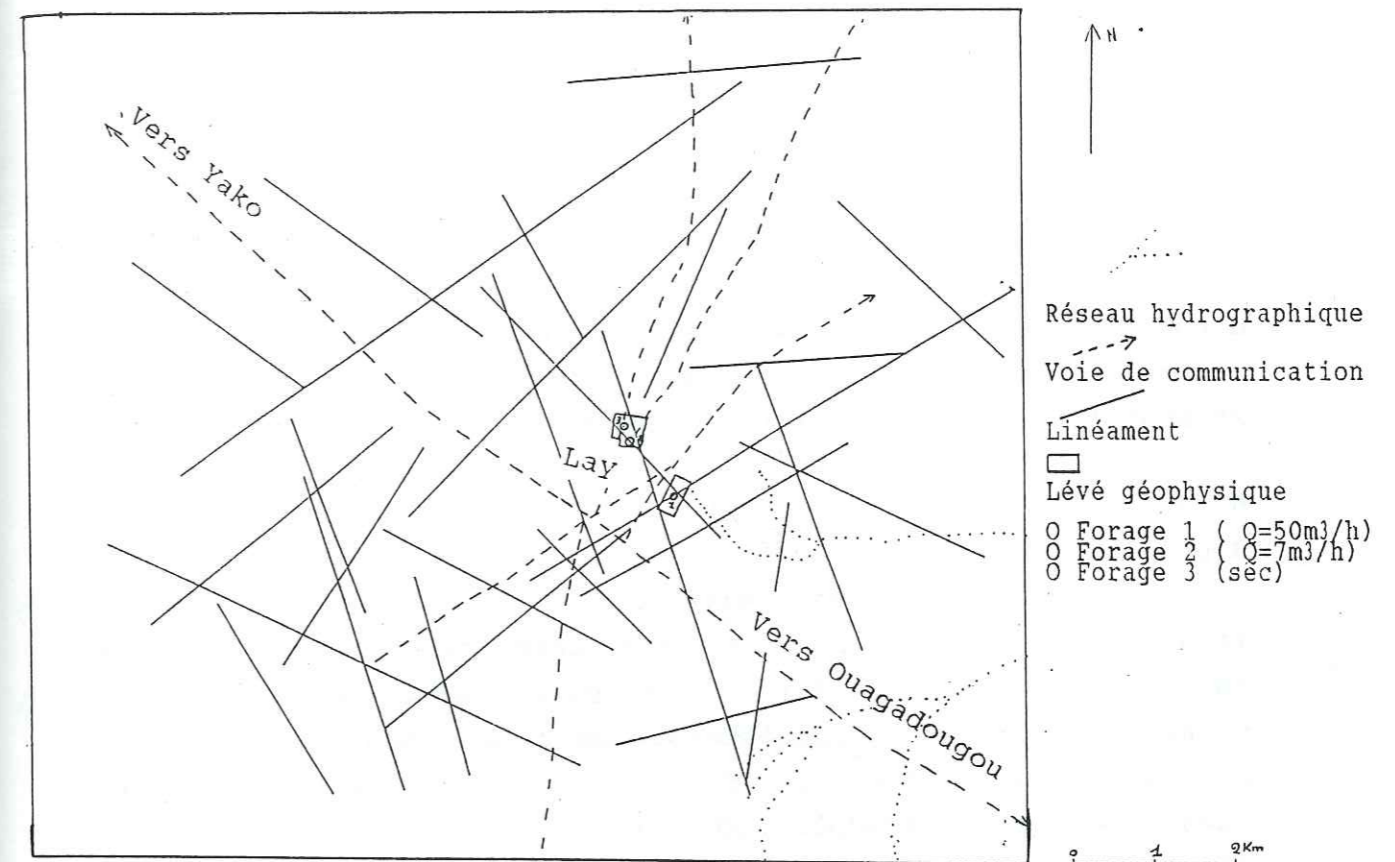


Figure 56 Carte de photo-interprétation (site de Lay)

4.2.1.3 Prospection géophysique

Le site de Lay subdivisé en deux plateformes a fait l'objet d'une investigation géophysique caractérisée par l'ampleur du nombre de mesures. Ainsi on a réalisé:

28 profils électromagnétiques de 8300 mètres de longueur totale

19 profils électriques de 3900 de longueur totale

6 sondages électriques

3 profils d'anisotropie

La carte d'isorésistivité apparente de la plateforme 1 (figure 57) montre un axe conducteur principal de direction N 45 recoupé par un axe secondaire de direction N130. L'axe conducteur principal a une extension latérale de 20 à 30 mètres; il en est de même de l'axe secondaire. En extension longitudinale, les deux axes ont été recoupés par des profils électriques et électromagnétiques sur plus de cinq kilomètres (figure 58).

La carte électromagnétique (figure 59) confirme l'existence des deux axes conducteurs et indique la présence d'un troisième axe qui recoupe l'axe principal au niveau du forage 1.

La carte d'isorésistivité de la plateforme 2 (figure 60) touchant le forage 2 et le forage sec met en évidence un axe conducteur de direction N130 (il s'agit de celui -là même qui coupe l'axe principal au niveau du forage 1). Le forage sec est situé loin de cet axe, il est sur une zone résistante où aucune anomalie ne peut être décelée.

La carte électromagnétique (figure 61) confirme les résultats de la carte de résistivité ce qui nous fait dire qu'il y a eu une erreur grave dans l'implantation du forage sec. L'axe conducteur a une extension longitudinale de plus de cinq kilomètres; il a été recoupé par des profils électromagnétiques (figure 62).

Si on observe les valeurs absolues (en électromagnétisme) des axes conducteurs, on constate des valeurs plus basses au niveau de l'axe N130. Cela n'est pas lié à l'intensité de la fissuration, mais est dû au fait que cet axe suit le lit du cours d'eau, responsable de ces basses valeurs.

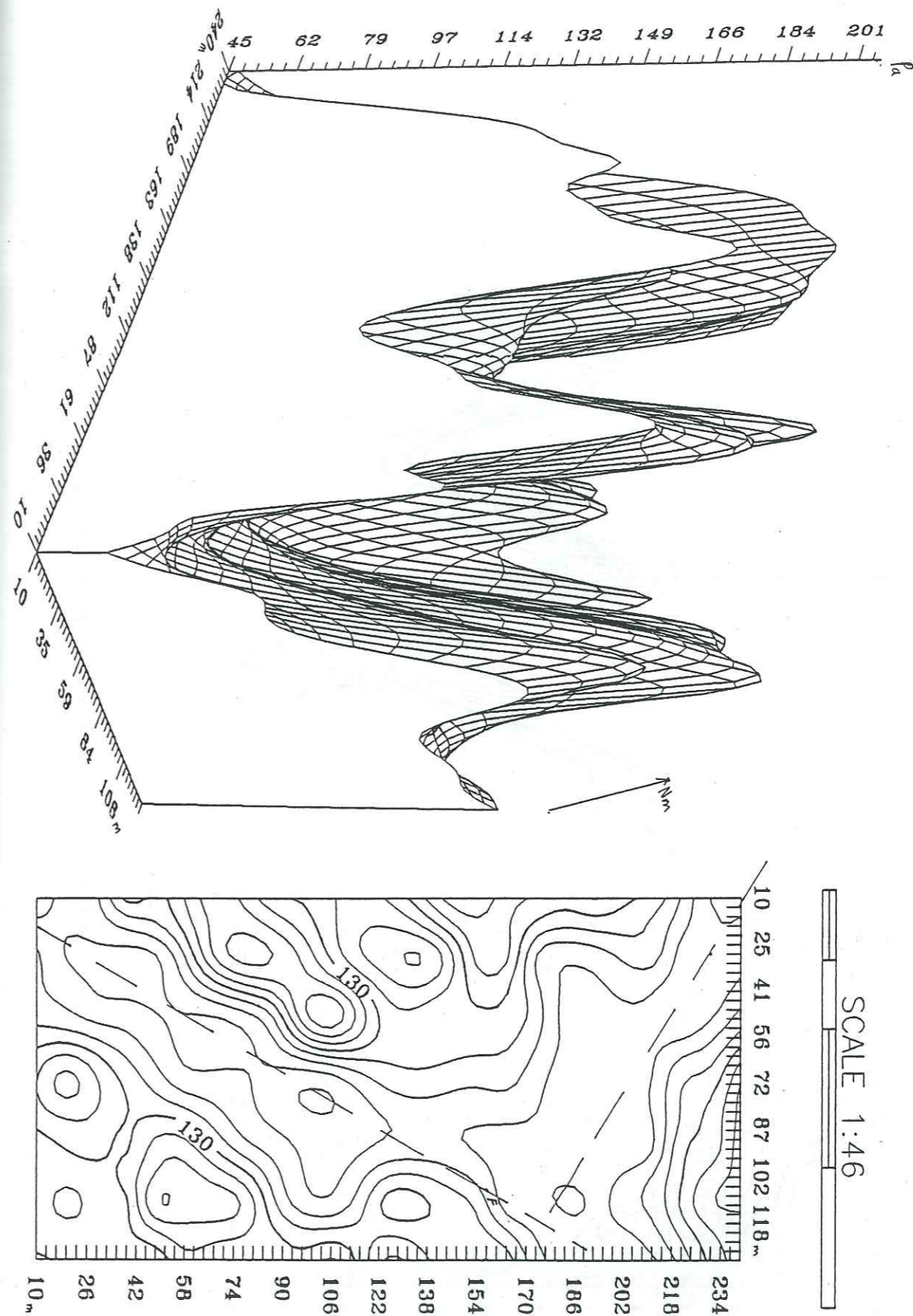


Figure 57 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) Plateforme 1 (site de Lay)

Figure 59 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) Plateforme 2 (site de Lay)

AB=200m MN=20m Pas de mesure=10m

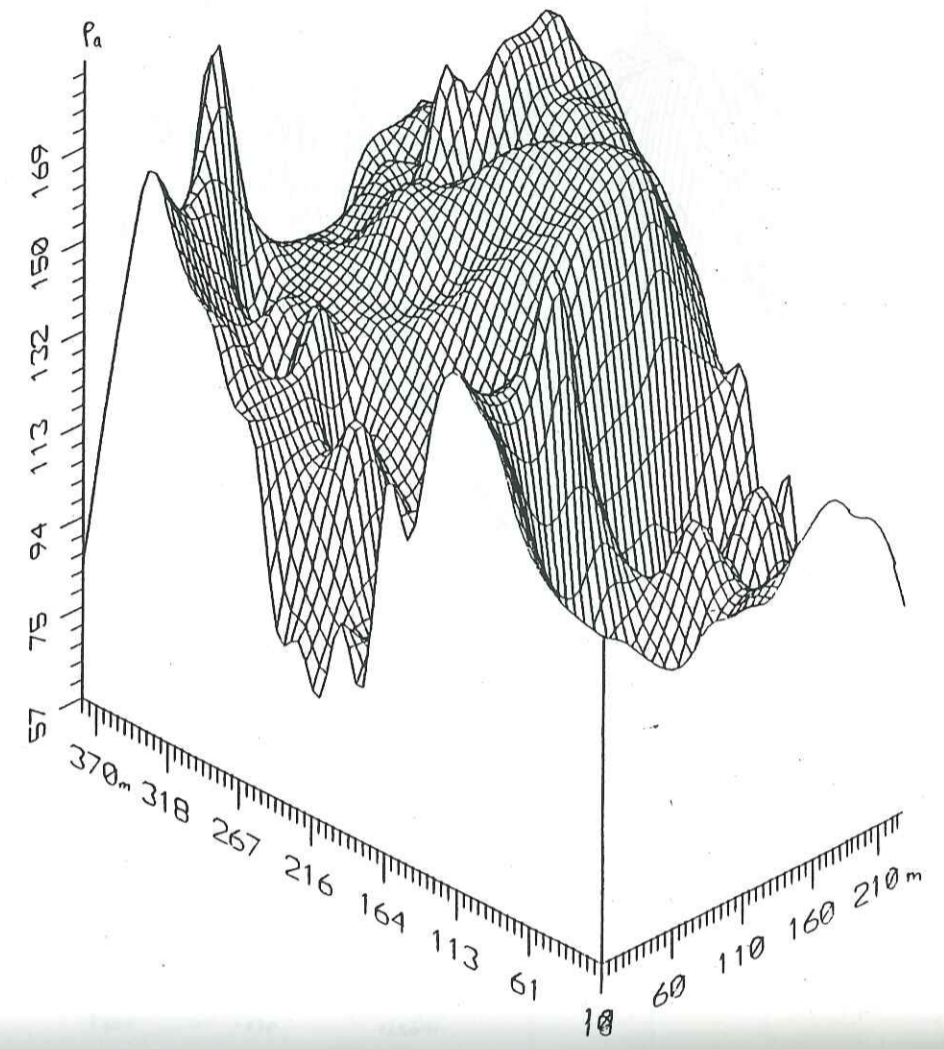
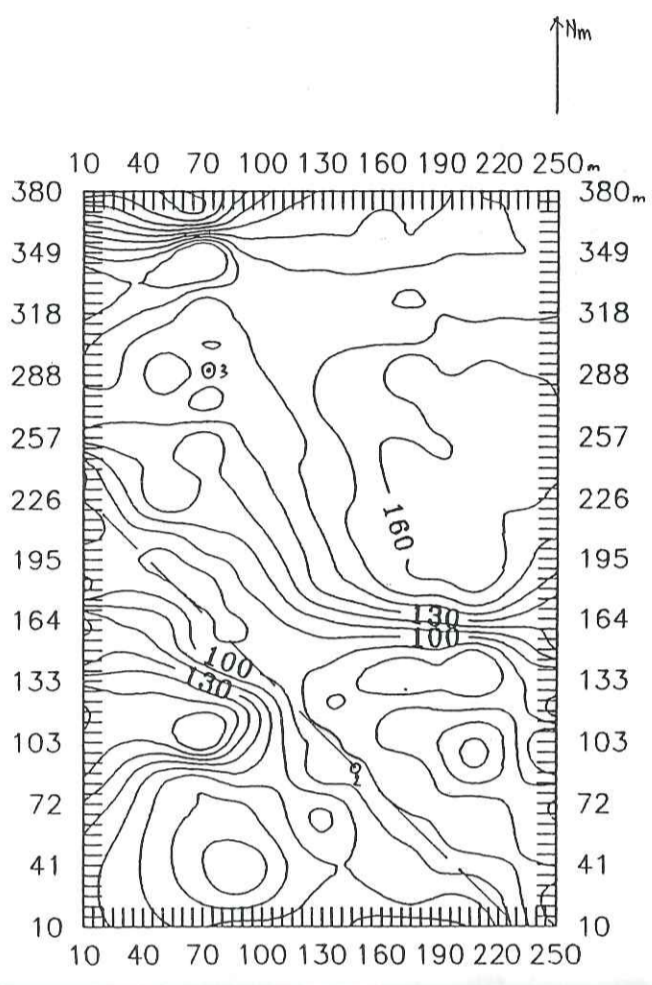


Figure 58 Carte et représentation en perspective des valeurs de $\frac{H_z}{H_p}$, composante en quadrature Plateforme 1 (site de Lay)

F=3520Hz S=50m Pas de mesure=10m

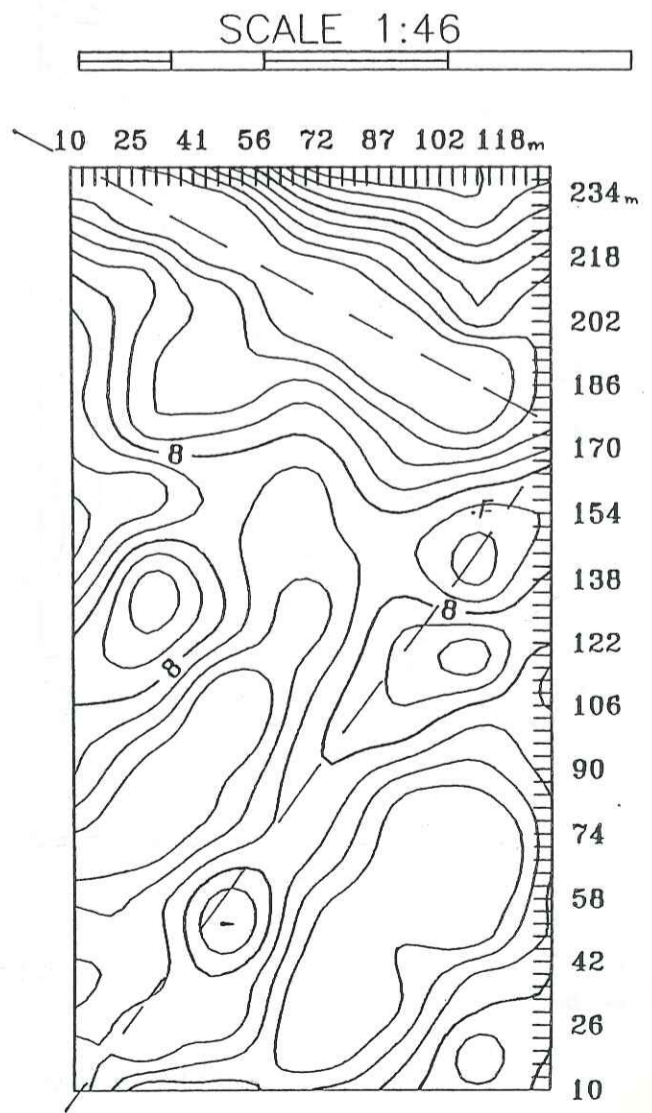
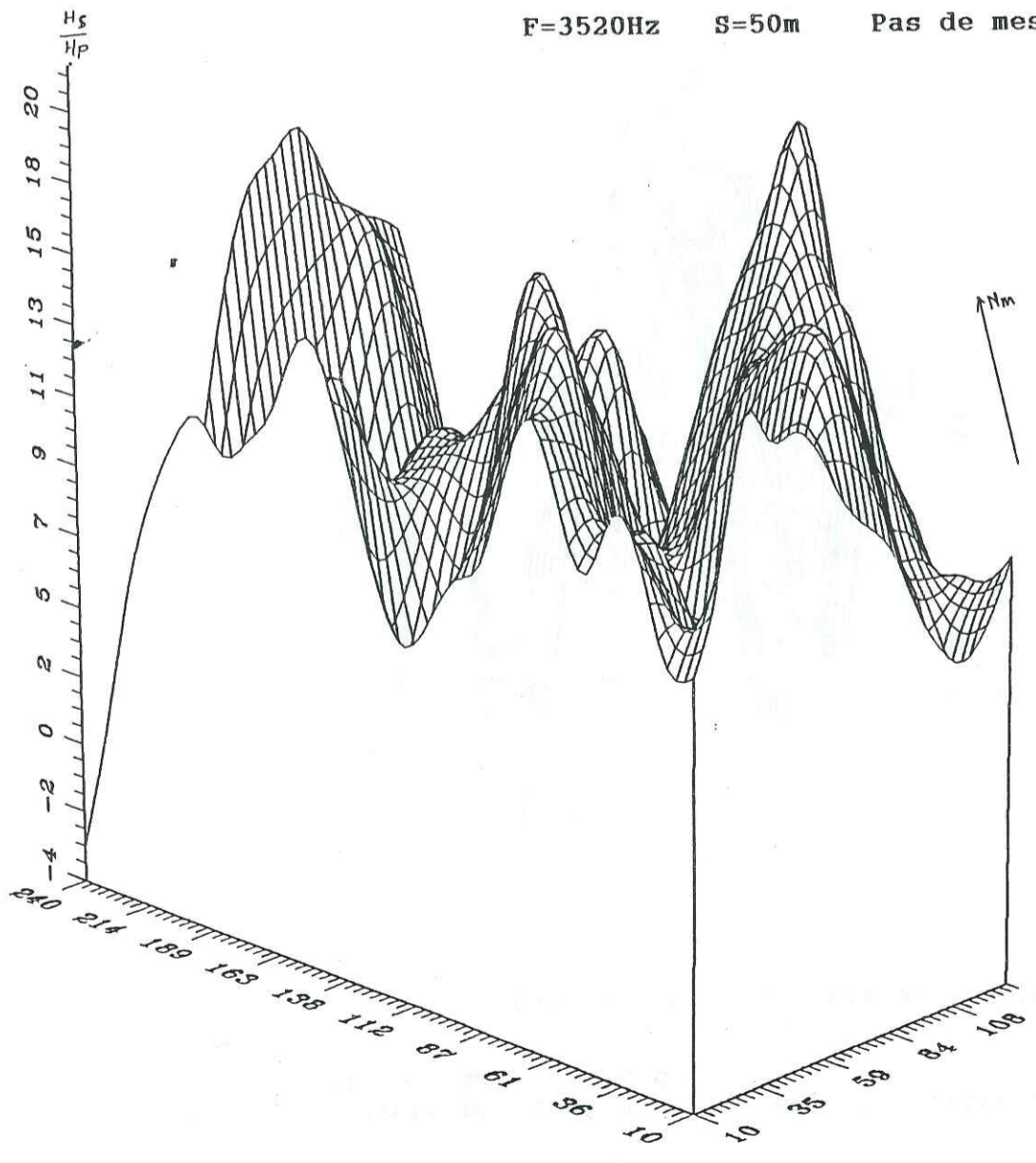


Figure 61 Profils électromagnétiques: extension de l'axe conducteur plateformel (site de Lay)

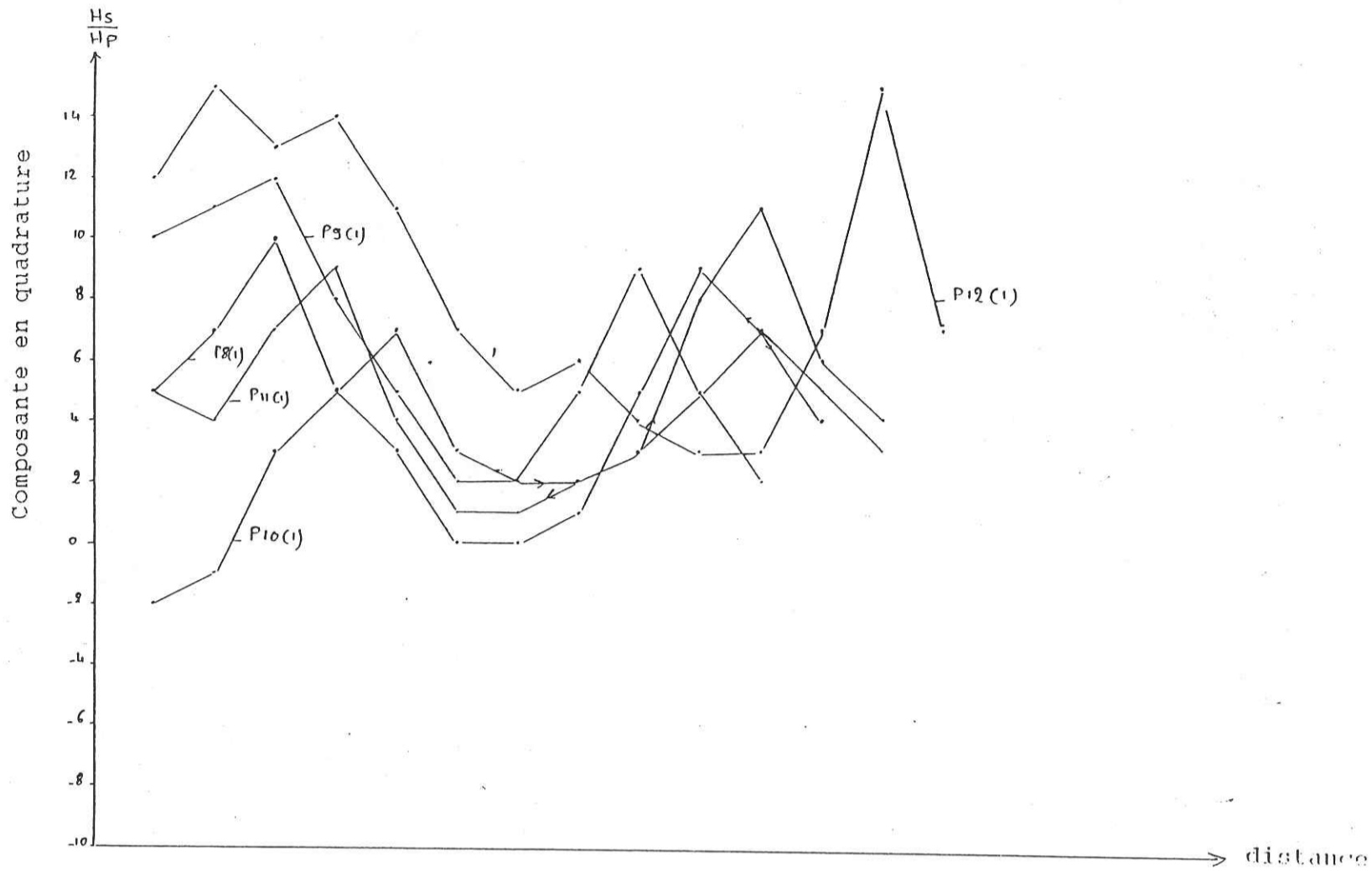
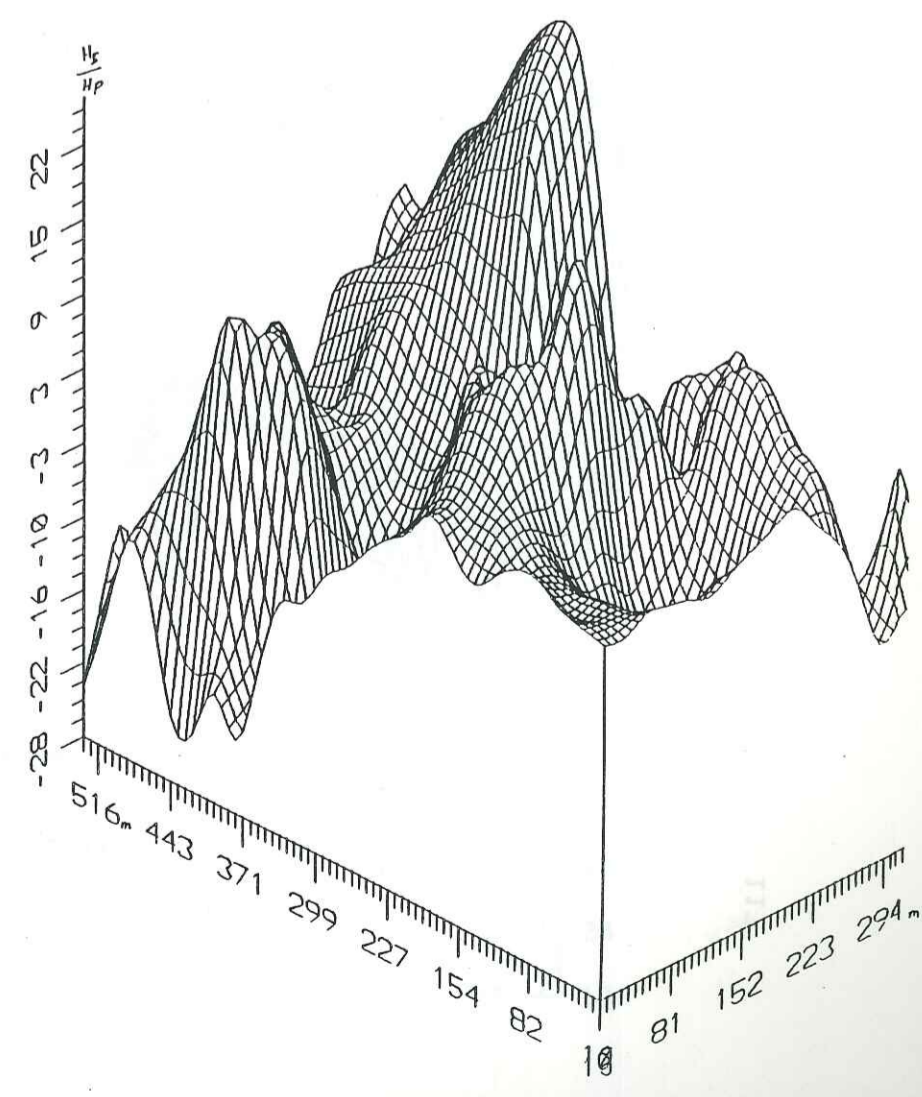
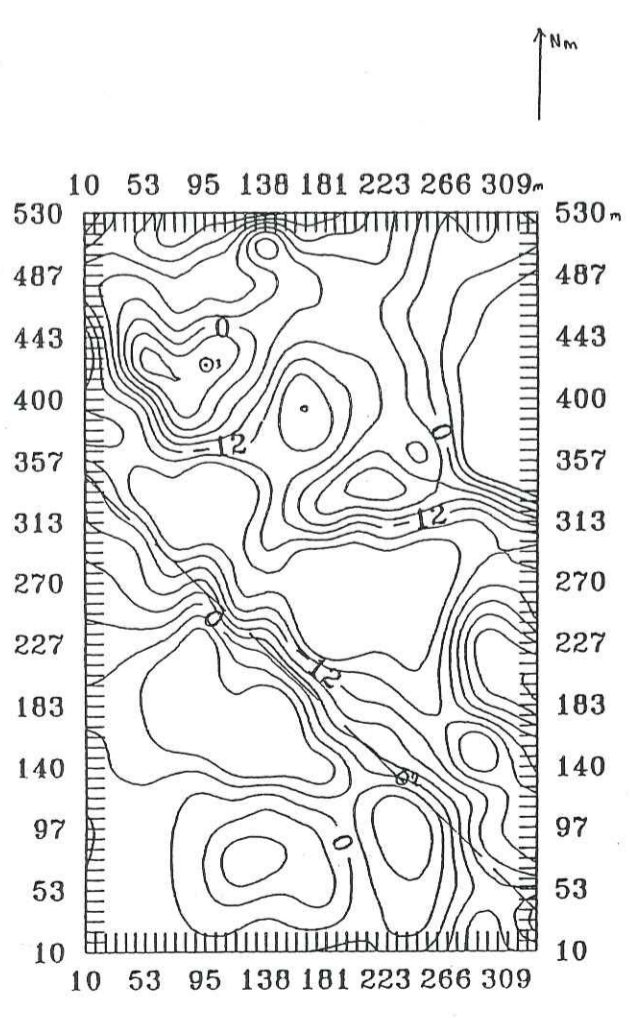
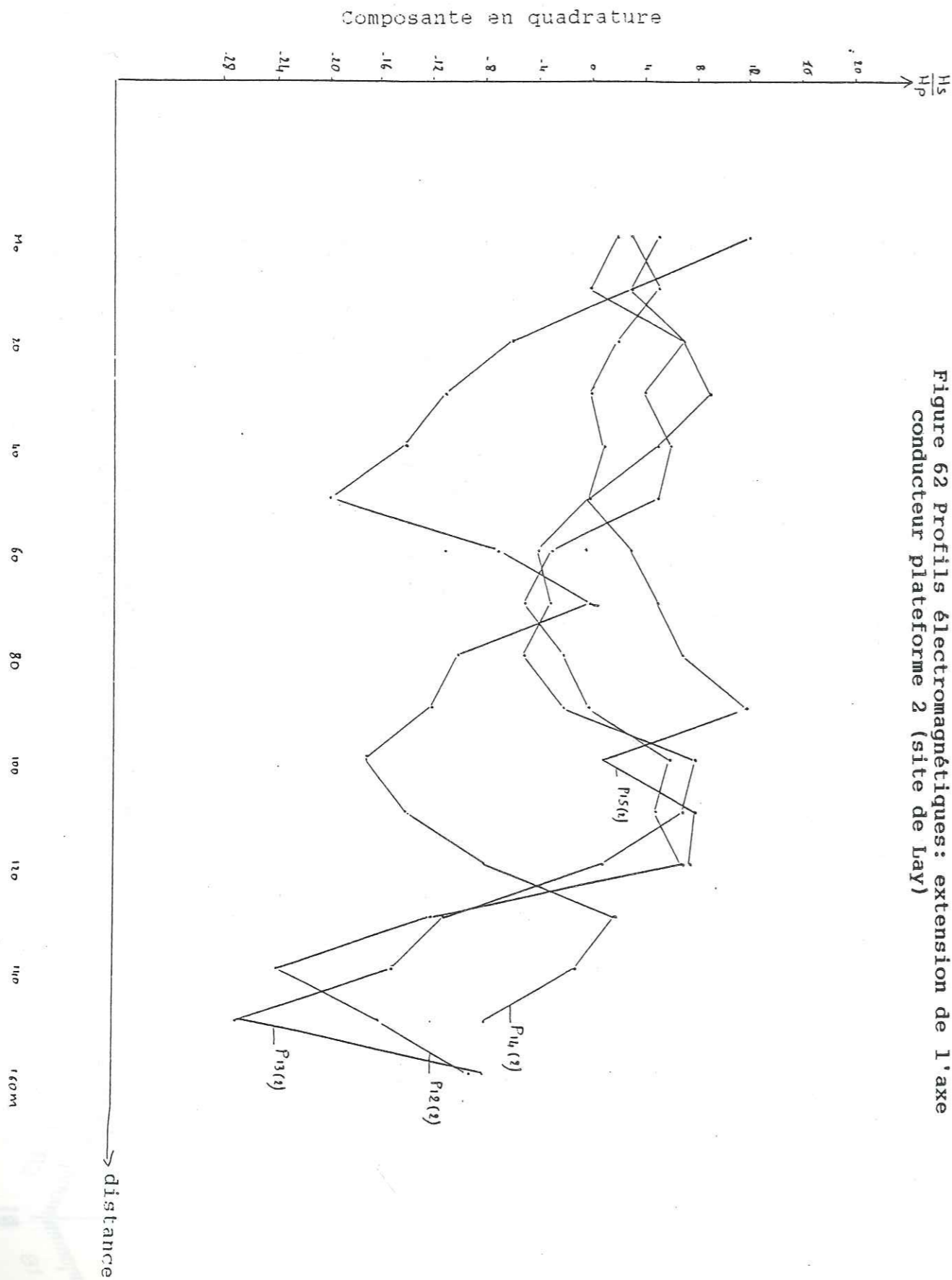


Figure 60 Carte et représentation en perspective des valeurs de $\left(\frac{H_s}{H_p}\right)$, composante en quadrature Plateforme 2 (site de Lay)

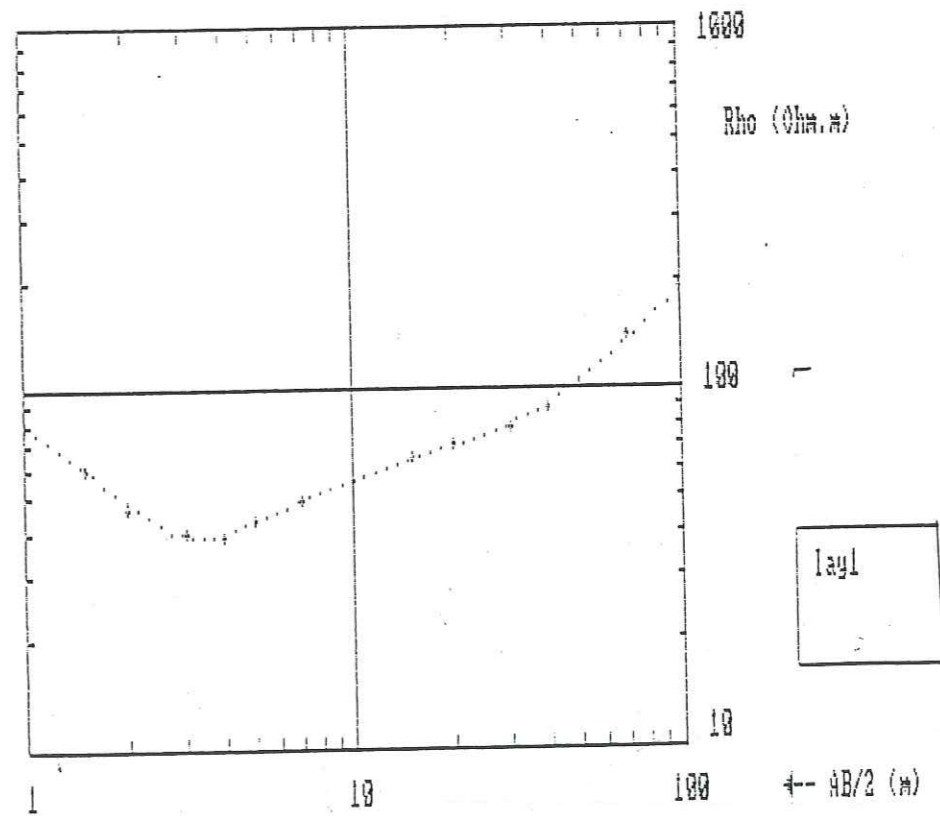
F=3520Hz S=50m Pas de mesure=10m





Des six sondages électriques réalisés à raison de deux par forage nous en représentons les trois plus significatifs à la figure 63. Comme nous l'avons déjà vu avec l'étude des logs de forage le sondage, Layl montre une arène humide très importante ainsi qu'une frange fissurée bien marquée par une remontée trainante bien prononcée. Au niveau du forage 2 la présence d'arène est bien marquée mais la frange fissurée ne se présente pas de façon évidente: on n'a pas de remontée trainante. Pour le forage sec, l'arène semble sèche en surface et on a une remontée à 45 degrés preuve qu'il n'existe pas de frange fissurée. La frange fissurée étant induite par une faille, le résultat du forage sec n'est pas étonnant puisque nous avons prouvé l'inexistence d'axe conducteur au niveau du forage.

Si l'on considère les trois sondages dans l'ensemble on remarque que les résistivités augmentent du forage 1 au forage sec traduisant bien l'évolution de la productivité des trois forages ce qui semble vrai pour une zone restreinte car cette relation n'est pas vérifiée dans un cadre régional plus grand.



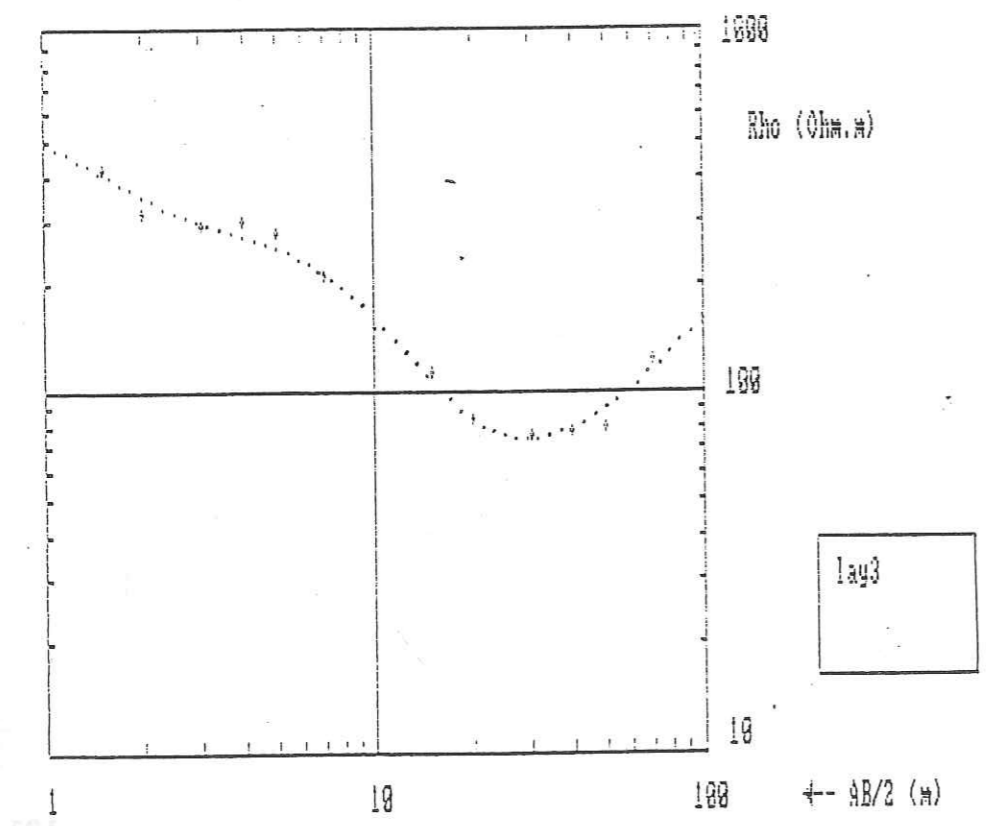
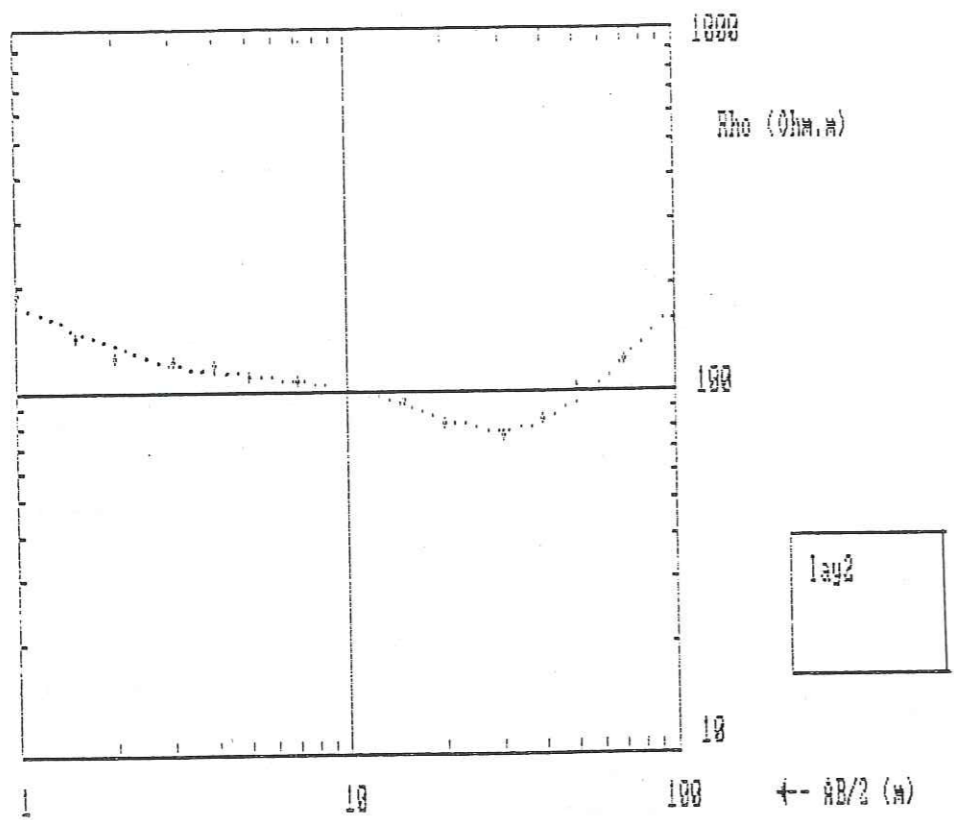


Figure 63 Courbes de sondages électriques (site de lay)

Les trois profils d'anisotropie représentés à la figure 64 montrent deux courbes en cloche pour les forages 1 et 2 et une courbe en palier pour le forage sec. le maximum au niveau du forage 1 est bien supérieur à celui du forage 2. La position des profils de mesures est présentée à la figure 65.

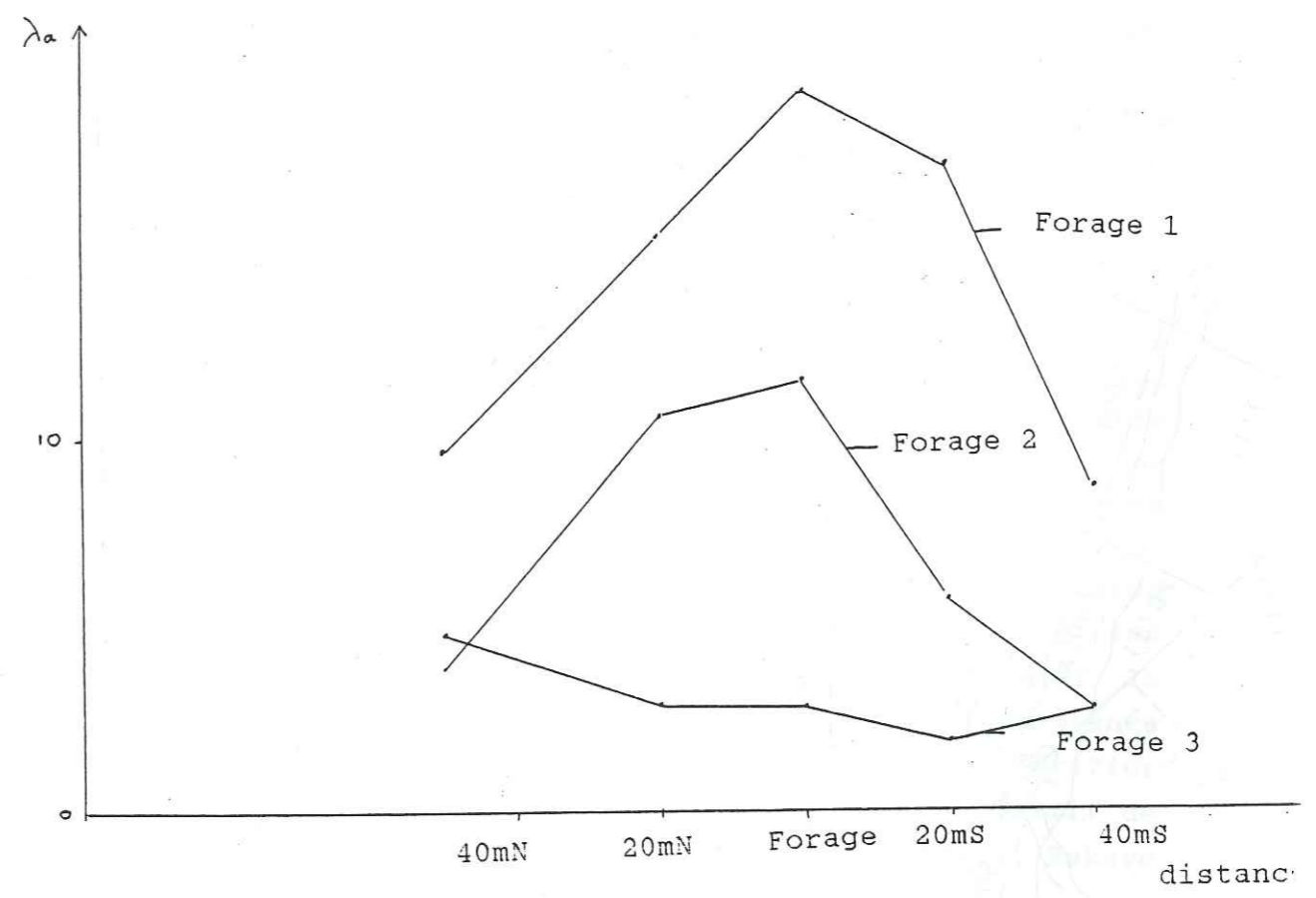


Figure 64 Profils d'anisotropie (site de Lay)

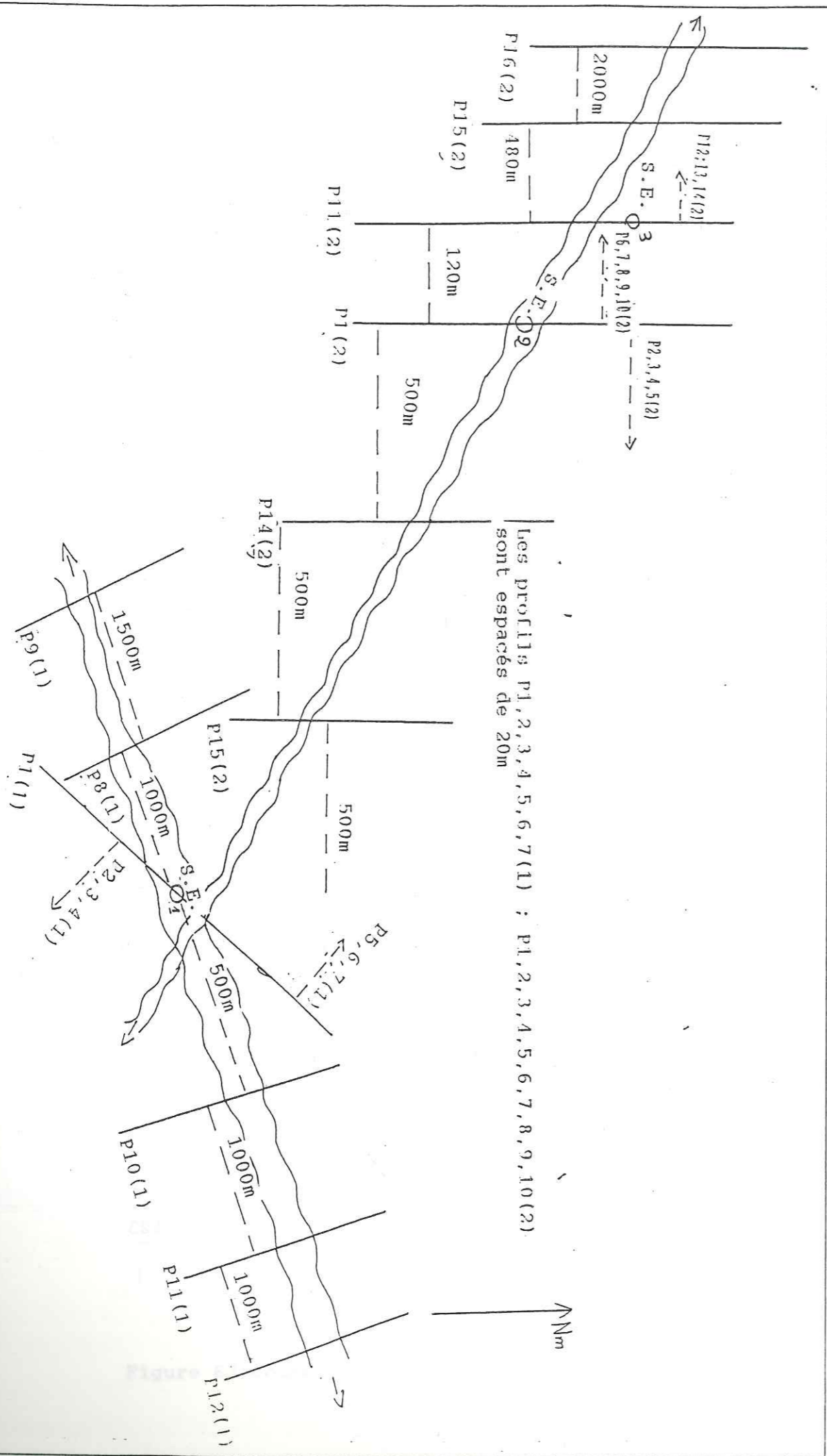


Figure 65 Disposition des profils de mesures (site de Lay)

De tous ces résultats nous pouvons conclure que:

- le forage 1 est situé sur une discontinuité majeure recoupée par une autre non moins importante. Le marigot qui est situé à une cinquantaine de mètres au Nord du forage joue un rôle important pour l'infiltration en saison pluvieuse mais il est vite tari dès la fin des pluies. La grande épaisseur des altérites et de la frange fissurée jouent un rôle important dans la productivité du forage.
- Le forage 2 est sur une faille affectant le substratum. Cette faille assure une alimentation permanente du forage 2 ainsi qu'un deuxième forage implanté plus tard à moins de cinq mètres de ce dernier. Le forage est implanté en bordure de faille ce qui limite sa productivité.
- Le forage sec résulte d'une mauvaise implantation. Il a été implanté grâce à la photo-interprétation qui plaçait le forage 2 et le forage sec sur le même linéament. Même une simple observation des indices biologiques aurait dû amener à éviter l'implantation du forage car l'alignement des ficus au niveau du forage 2 ne s'approche pas du tout du forage sec.

La méthodologie employée a permis d'avoir résultats originaux pour le site de Lay car les travaux d'implantation et les travaux de recherche menés par le BGR pour expliquer la productivité du forage 1 n'ont pas mis en évidence l'existence d'axe conducteur. Elle a permis en outre de vérifier l'importance de l'implantation des forages sur les noeuds de fracture, ceci étant déjà aperçu sur les sites de Pissi, Rakaye et Sambin.

Les profils d'anisotropie apparaissent particulièrement significatifs pour la mise en évidence de sites à forte productivité.

4.2.2 le site de Nioko

Le village de Nioko, situé à 7 km du centre ville de Ouagadougou sur l'axe Ouaga-Kaya relève administrativement de la province du Kadiogo (figure 66). Le site de Nioko, généralement appelé "champ de captage de Nioko", est une zone d'expérimentation de l'Office Nationale de l'Eau et l'assainissement (ONEA). Ce champ compte plusieurs forages ainsi que des piézomètres. Nos investigations ont couvert quatre forages (forage 1 : Q=93m³/h), (forage 2:Q=18m³/h), (forage 3:Q=19.6m³/h), (forage 4:Q=24m³/h). Tous ces forages ont été implantés à partir d'études de photographies aériennes et de géophysique (prospection électrique et électromagnétique). Les caractéristiques des différents forages données par les logs de forage sont les suivants:

Forage	Profondeur totale	Nature de la roche mère	épaisseur de frange fissurée	épaisseur de l'arène	débit
1	67m	migmatite	34m	18m	93
2	62m	amphibolite	34m	9m	18
3	70m	amphibolite	40	4m	19
4	61	gneiss	38m	7m	24

Au niveau de la frange fissurée, on note des intrusions de filons de pegmatite.

4.2.2.1 cadre géologique

Comme l'indiquent les logs de forage le site de Nioko se situe en domaine de granite migmatitique avec beaucoup de filons de quartz et de pegmatite., recouvert d'altérites sableuses. Aucun affleurement n'est visible sur ce site.

4.2.2.2 Etude par photo-interprétation

l'étude par photo-interprétation (figure 66) révèle un réseau de linéaments répartis sur deux directions dominantes: N160-170 et N40-60.

Ces deux directions correspondent aux deux sens d'écoulements des eaux du réseau hydrographique. Le réseau de linéaments n'est pas très dense mais il s'agit essentiellement de linéaments kilométriques. les forages 1,2 et 4 sont sur un linéament de direction N170 sur le lit principal du marigot. Le forage 3 se trouve lui aussi sur le lit d'un marigot. En saison pluvieuse toute la zone est inondée.

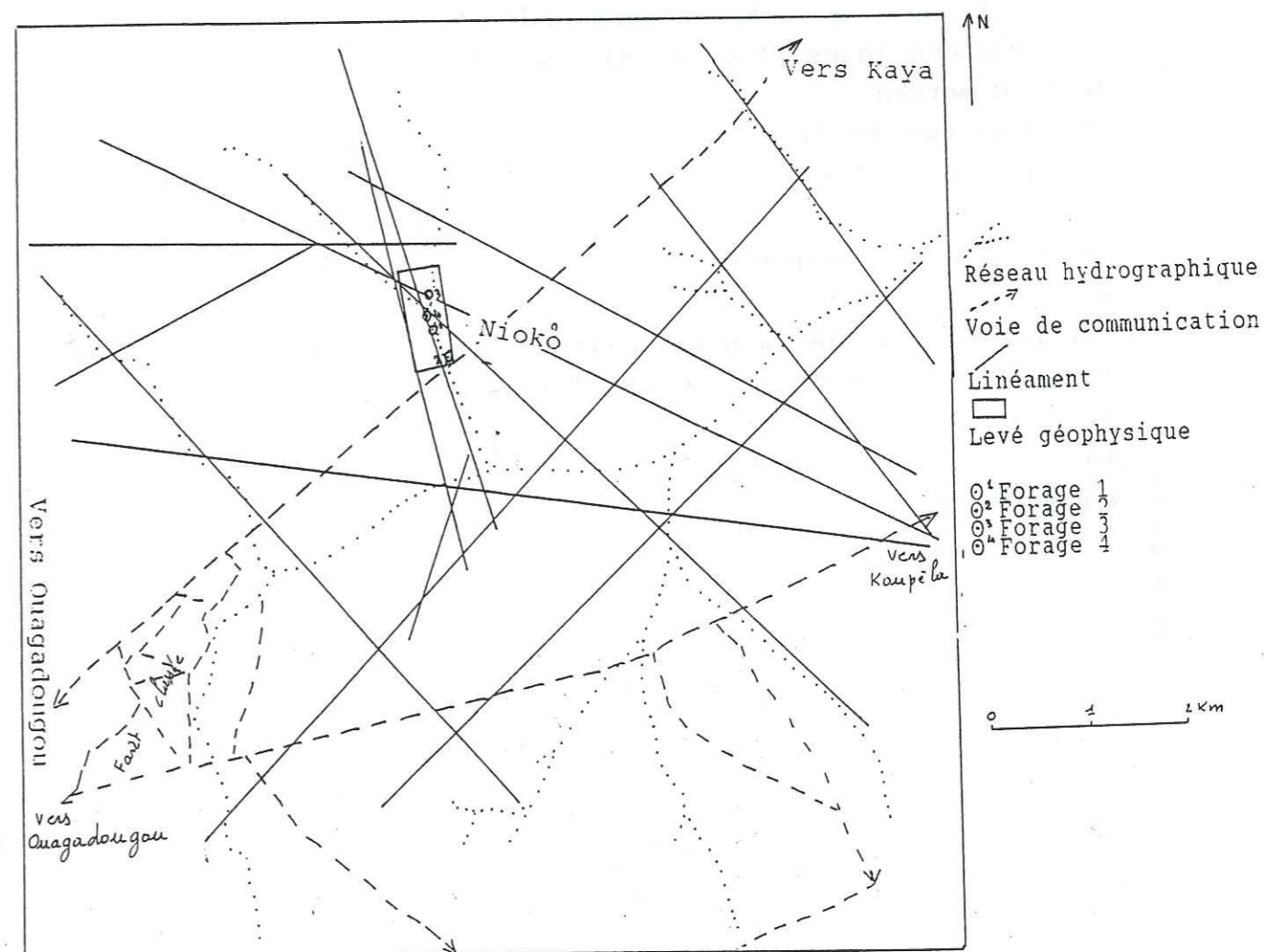


Figure 66 Carte de photo-interprétation (site de Nioko)

4.2.2.3 Prospection géophysique

Pour des raisons techniques (pannes de résistivimètres) les travaux géophysiques ont été dominés par l'électromagnétisme. Nous avons réalisé:

- 20 profils électromagnétiques d'une longueur totale de 2900m
- 6 profils de résistivité apparente
- 2 sondages électriques
- 2 cercles de mesures rotatives électromagnétiques
- 1 profil d'anisotropie

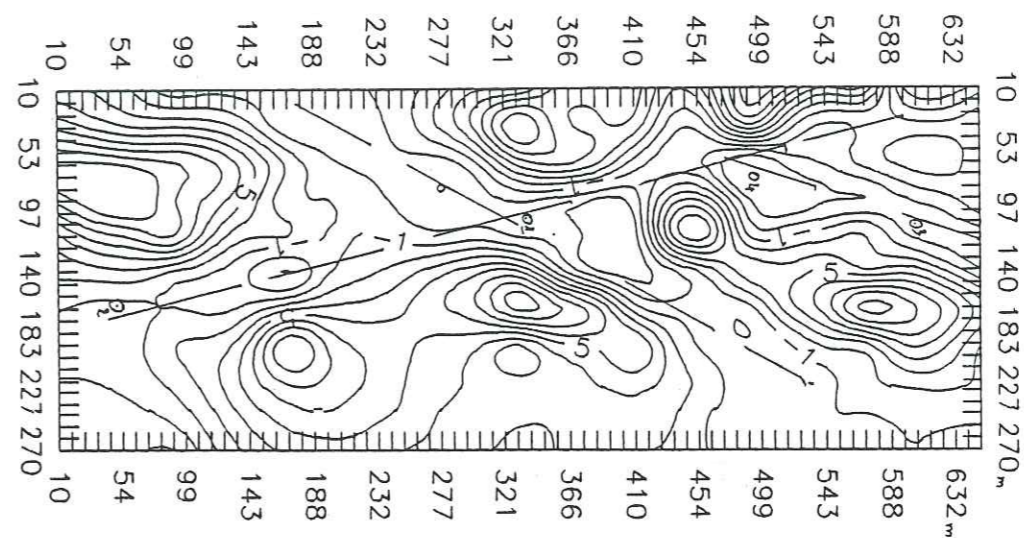
La carte électromagnétique (figure 67) couvre les quatre forages. Nous y décrivons trois axes conducteurs principaux:

-le premier de direction N170 degrés passe par les forages 1,2 et 4; mais tandis que les forages 2 et 4 se trouvent en bordure de cet axe, le forage 1 se place lui en plein coeur de celui-ci. Cet axe a été recoupé sur 5 km par des profils électromagnétiques (figure 68). Son extension latérale est de 40 à 50 mètres.

-Le deuxième de direction N50 recoupe le premier au niveau du forage 1 et induit avec ce dernier une vaste zone de valeur du rapport - négative. nous avons recoupé cet axe sur 3 km par des profils électromagnétiques et sur le terrain cet axe est matérialisé par un alignement de ficus.

-le dernier recoupe le premier au niveau du forage 4 et passe par le forage 3. Sa direction est N30 degrés, avec une extension latérale de 20 à 30 mètres.

La carte d'isorésistivité figure 69 confirme les axes conducteurs.



F=3520Hz

S=50m

Pas de mesure=10m

Figure 67 Carte et représentation en perspective des valeurs de (-), composante en quadrature (site de Nioko)

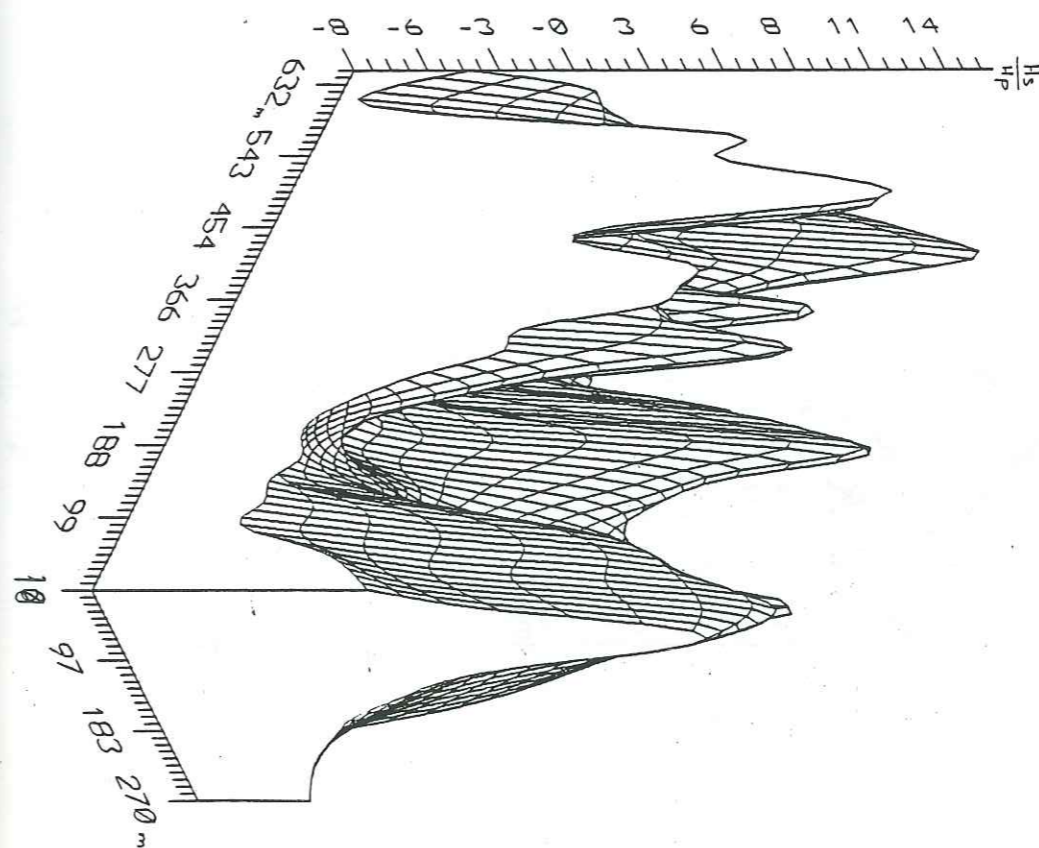


Figure 68 profils électromagnétiques : extension de l'axe conducteur (site de Nioko)

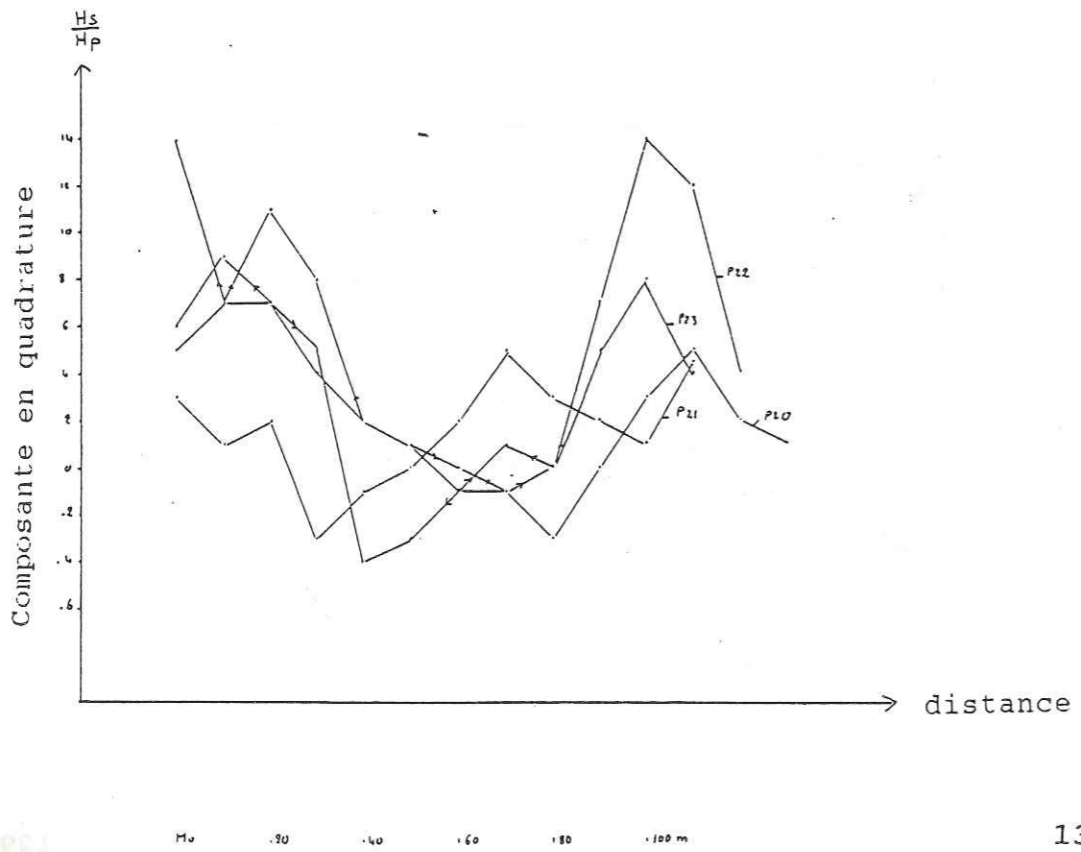
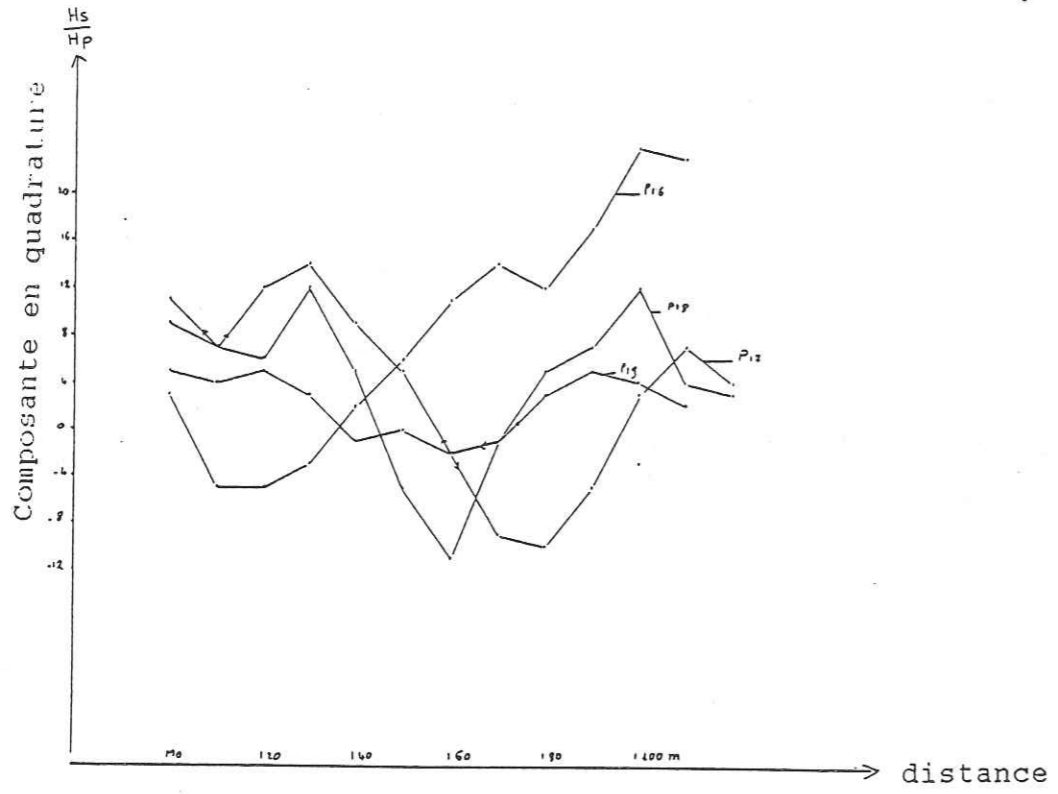
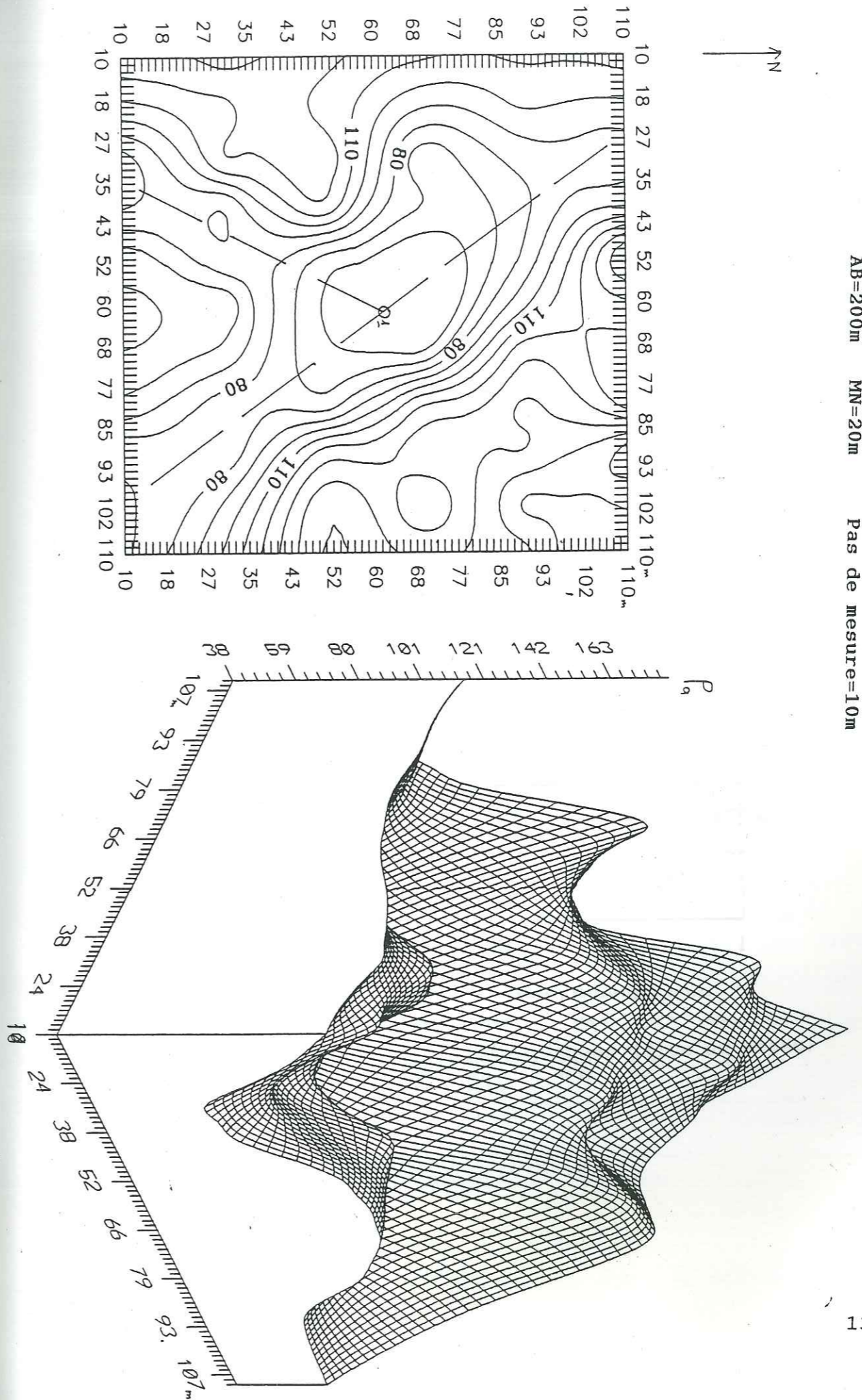
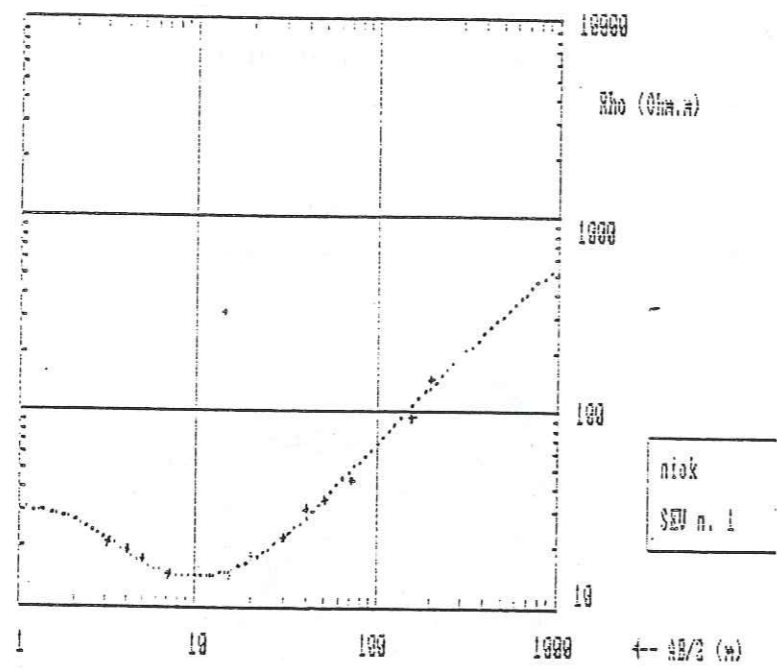


Figure 69 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Nioko)

AB=200m MN=20m Pas de mesure=10m

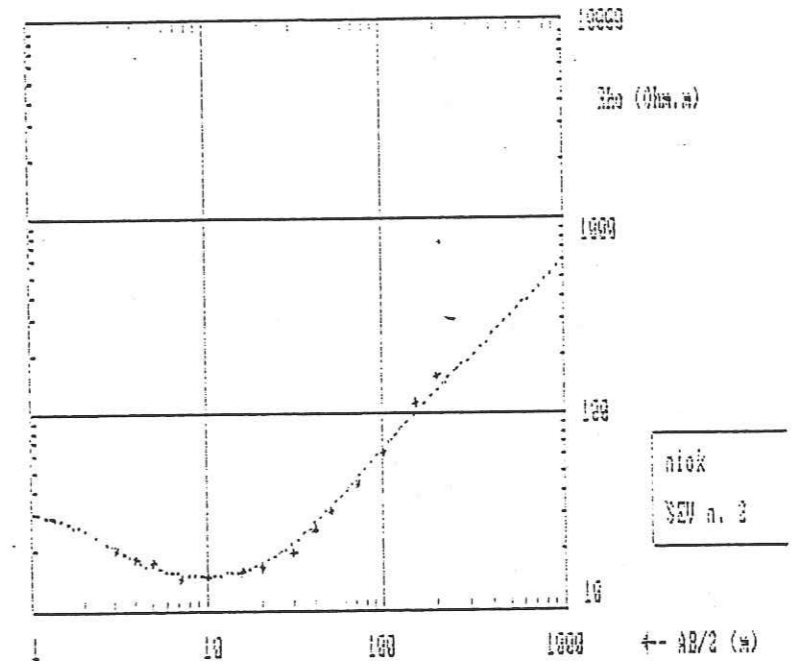


Les deux sondages électriques (figure) ont été réalisés sur le site du forage 1. L'interprétation nous montre une arène grenue d'une quinzaine de mètres et une frange fissurée d'une épaisseur de l'ordre de onze mètres . Sur la courbe on ne remarque pas de remontée trainante , mais la courbe ne remonte pas à 45 degrés non plus.



LIMITES D'EQUIVALENCE (ERREUR max = 10 %)

couche	E min	E max	R min	R max
1	0.00	1.25	22.64	46.93
2	10.34	13.45	11.14	14.09
3	0.00	35.59	0.00	19.40
4			615.59	inf.



LIMITES D'EQUIVALENCE (ERREUR max = 10 %)

couche	E min	E max	R min	R max
1	0.96	1.74	20.43	46.56
2	12.73	15.89	12.29	13.35
3	0.00	36.74	0.01	65.37
4			927.34	inf.

Figure 70 Courbes de sondages électriques (site de Nioko)

Les deux cercles de mesures rotatives (figure 71.) effectués aux forages 1 et 3 montrent clairement les directions des axes conducteurs observés sur la carte électromagnétique. Il s'agit d'une méthode expérimentale en vue de tester la possibilité de détecter la direction d'anisotropie principale par mesure rotative électromagnétique comme en sondage pluridirectionnel en prospection électrique.

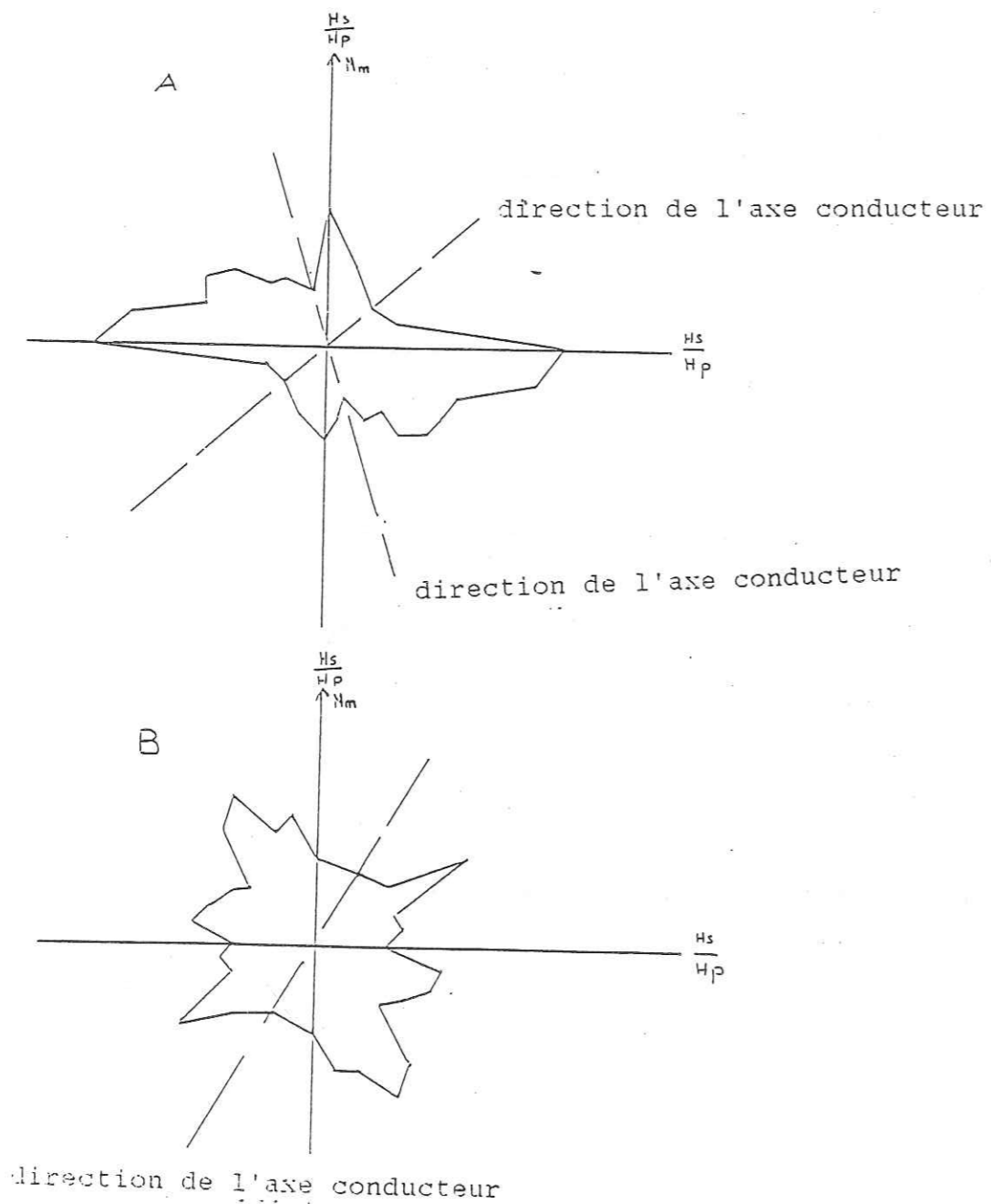


Figure 71 cercles de mesures rotatives
A-forage 1
B-forage 3

Le profil d'anisotropie (figure 72) montre une courbe en cloche avec un maximum décalé de 20 m par rapport au forage. La position des profils de mesures a été représentée à la figure 73.

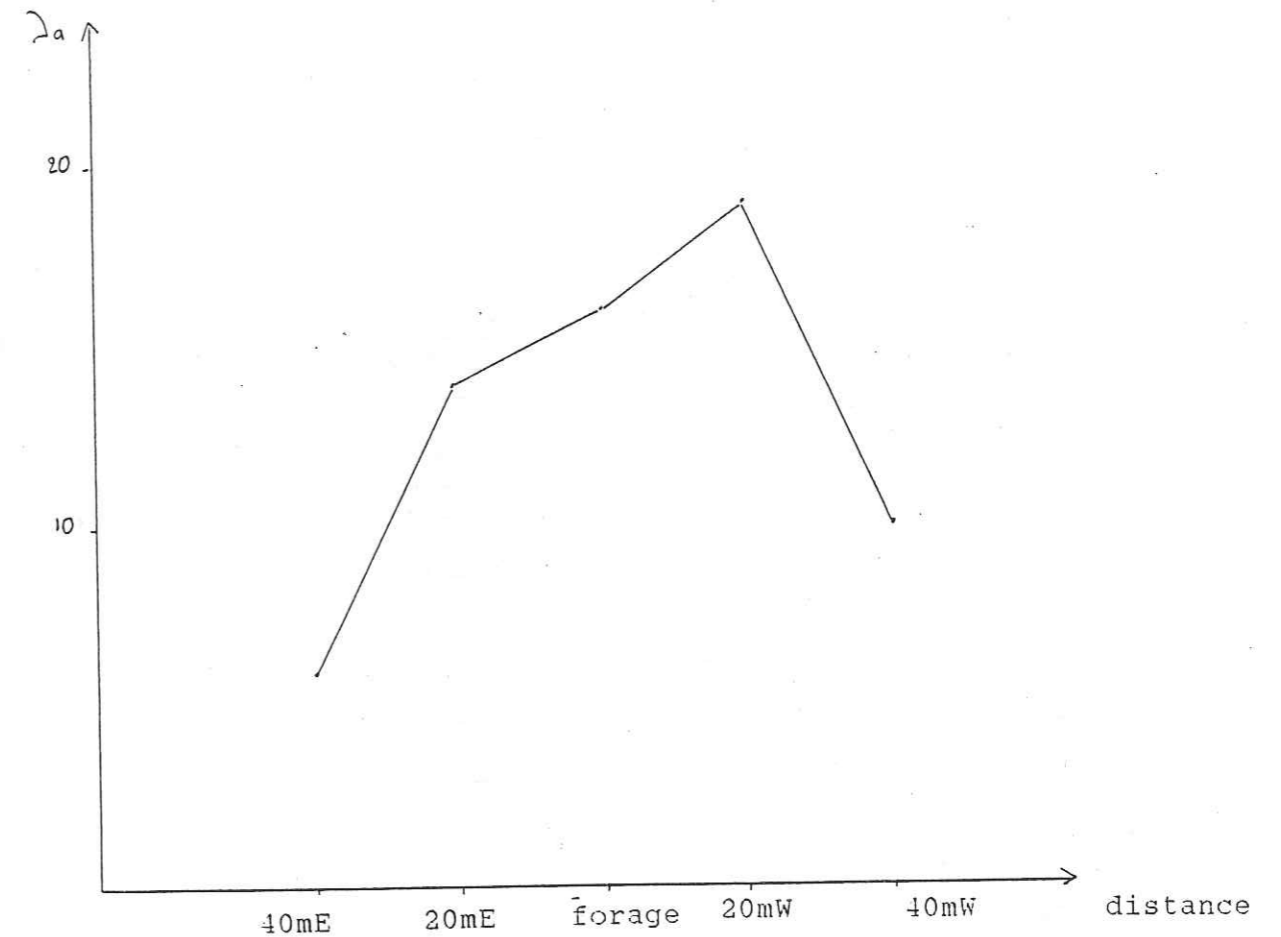


Figure 72 Profil d'anisotropie (site de Nioko)

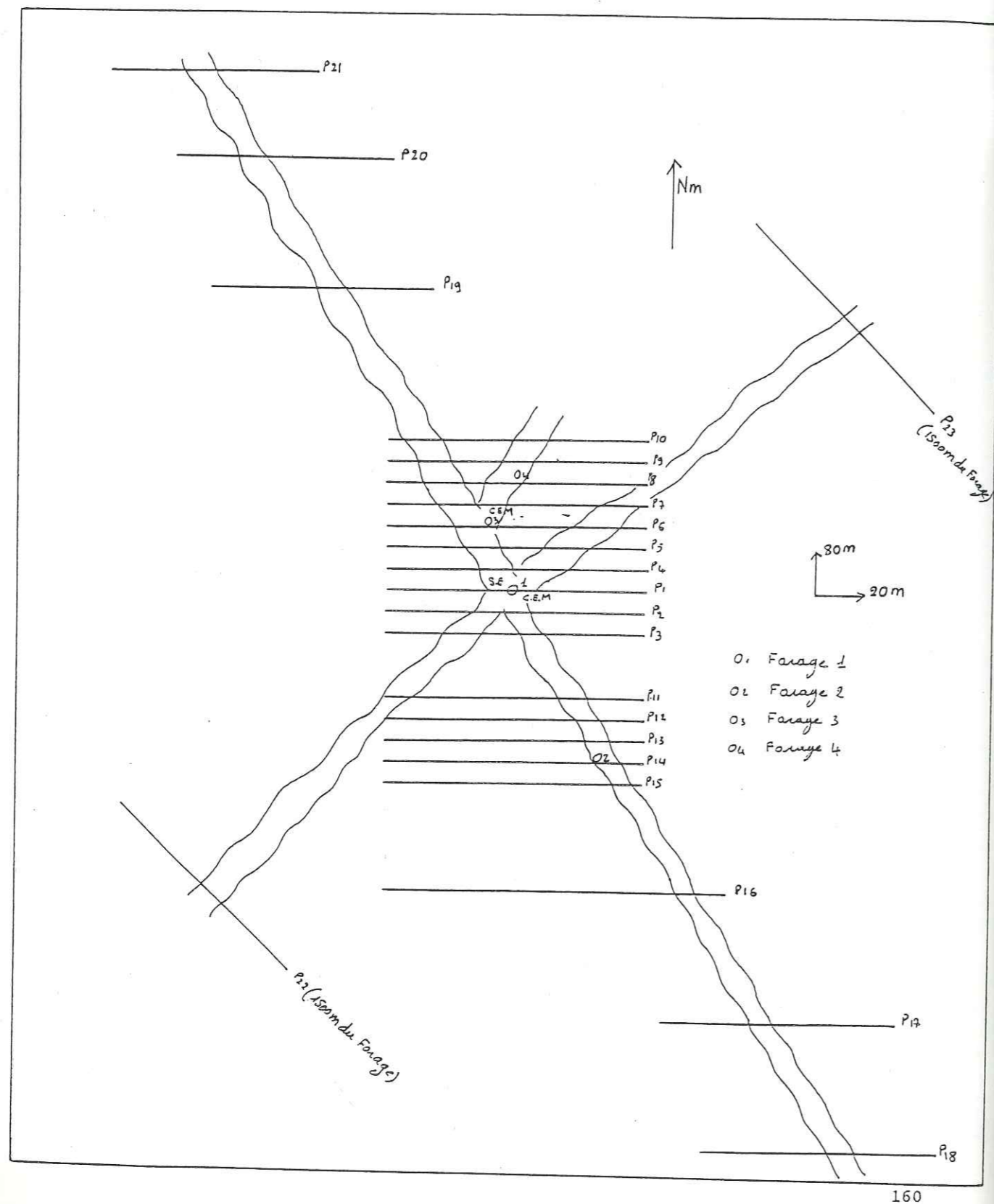


Figure 73 disposition des profils de mesures (site de Nioko))

De ces résultats nous pouvons conclure que:

- le forage 1 est implanté à l'intersection de deux discontinuités majeures. Il s'agit probablement d'une zone de cisaillement, en plein coeur d'une zone inondée en saison pluvieuse.
- Le forage 2 est implanté en bordure d'une discontinuité majeure.
- Le forage 4 est implanté en bordure d'une discontinuité majeure et sur une faille secondaire recoupant la discontinuité majeure mais aussi dans un lit de marigot.
- Le forage 3 est implanté sur une faille, dans un lit de marigot. la productivité est accrue lorsque le forage est implanté à l'intersection de deux mégastructures tandis que l'implantation en bordure de faille limite la productivité de l'ouvrage.

Il est encore à remarquer l'intérêt des profils d'anisotropie ainsi que celui de la prospection électromagnétique rotative qui fait bien apparaître les directions des axes conducteurs favorables à une bonne productivité.

4.3 La province du Soum Nord

Le site de Pobe Mengao

Pobe Mengao est situé à 25 km de Djibo capitale de la province du Soum, sur l'axe Djibo-Ouahigouya, en pleine zone sahélienne (figure 75) où la pluviométrie ne dépasse guère 300 mm. En 1987, on a recueilli 187 mm de pluie durant toute l'année.

Un seul forage a été investigué sur le site de Pobe Mengao: il s'agit d'un forage à haut rendement ($Q=32\text{m}^3/\text{h}$) qui a été implanté sur la base de photo-interprétation et de prospection géophysique (trainés de résistivité et sondage électrique). Le forage a une profondeur de 37.5m avec 5m d'argile sableuse, 7m d'arène grenue et le reste constitué de frange fissurée d'un granite gris intrudé de filons de pegmatite. le niveau statique est à 13.1m de profondeur.

4.3.1 levé géologique

Lors du levé géologique nous avons pu observer plusieurs faciès granitiques, beaucoup de fissures et de filons de quartz et de pegmatites. Ainsi, on observe des granites à grain fin, avec tantôt des affleurements orientés Nord 60 degrés très fissurés avec des filons de quartz de 10 à 15 cm de largeur ainsi que des filons de pegmatites dont la largeur dépasse parfois 50 cm. Plus au Sud (Barkane) le faciès est plus grossier et plus clair. Dans une mare située près du forage, on observe des panneaux non digérés de pegmatites à très faible pendage recoupés par la fracture captée par le forage. L'altération au niveau de la mare est marquée par la présence de mica et d'une alternance de couleur blanchâtre et rougeâtre qui fait penser à une altération hydrothermale.

L'ensemble du secteur de Pobe Mengao est une zone tectoniquement très perturbée, marquée par la présence de beaucoup de fissures et de filons de quartz. Nous avons pu relever 210 fissures et 42 filons.

L'interprétation statistique des fissures (figure 74a) montre deux directions dominantes : N40-80 et N120-180. La direction N40-80 est prédominante. La figure 74b présente les résultats statistiques du levé de filons qui s'injectent généralement dans la direction N130-170.

On remarque que la direction prédominante des fissures n'est pas empruntée par les filons.

L'observation microscopique de deux lames minces indique:

-lame 1

un granitoïde à texture équilibrée. La roche a été disloquée au polissage (artéfact) signe d'une fracturation originelle discrète. La composition minéralogique est la suivante:

plagioclases destabilisés	35%
microcline	30%
quartz	20%
biotite	10-15%
minéraux accessoires (sphène, opaques, apatite) et minéraux d'altération	1-5%

-lame 2

Une texture migmatitique modifiée (grain majeur) avec une recristallisation très importante (quartz) et une fracturation importante des plagioclases et du microcline. La composition minéralogique est la suivante:

plagioclase	40%
quartz	20-25%
microcline	30%
biotite plus ou moins altérée	5%

on observe quelques minéraux accessoires (allanite, opaques) et des minéraux d'altération (muscovite, chlorite, hydroxyde de fer).

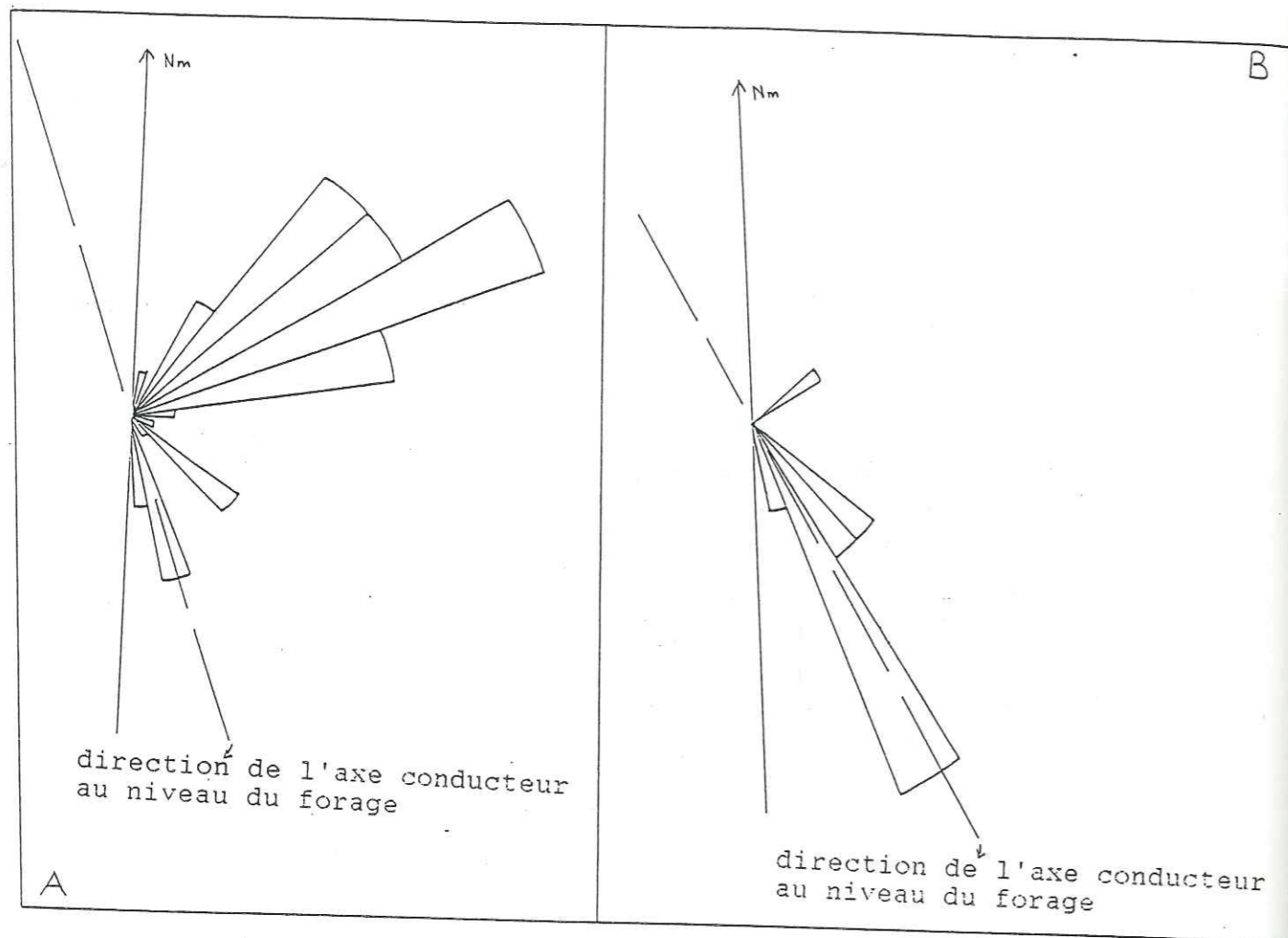


Figure 74 A-rosace de FISSURES. B-rosace de filons
(site de Pobe Mengao)

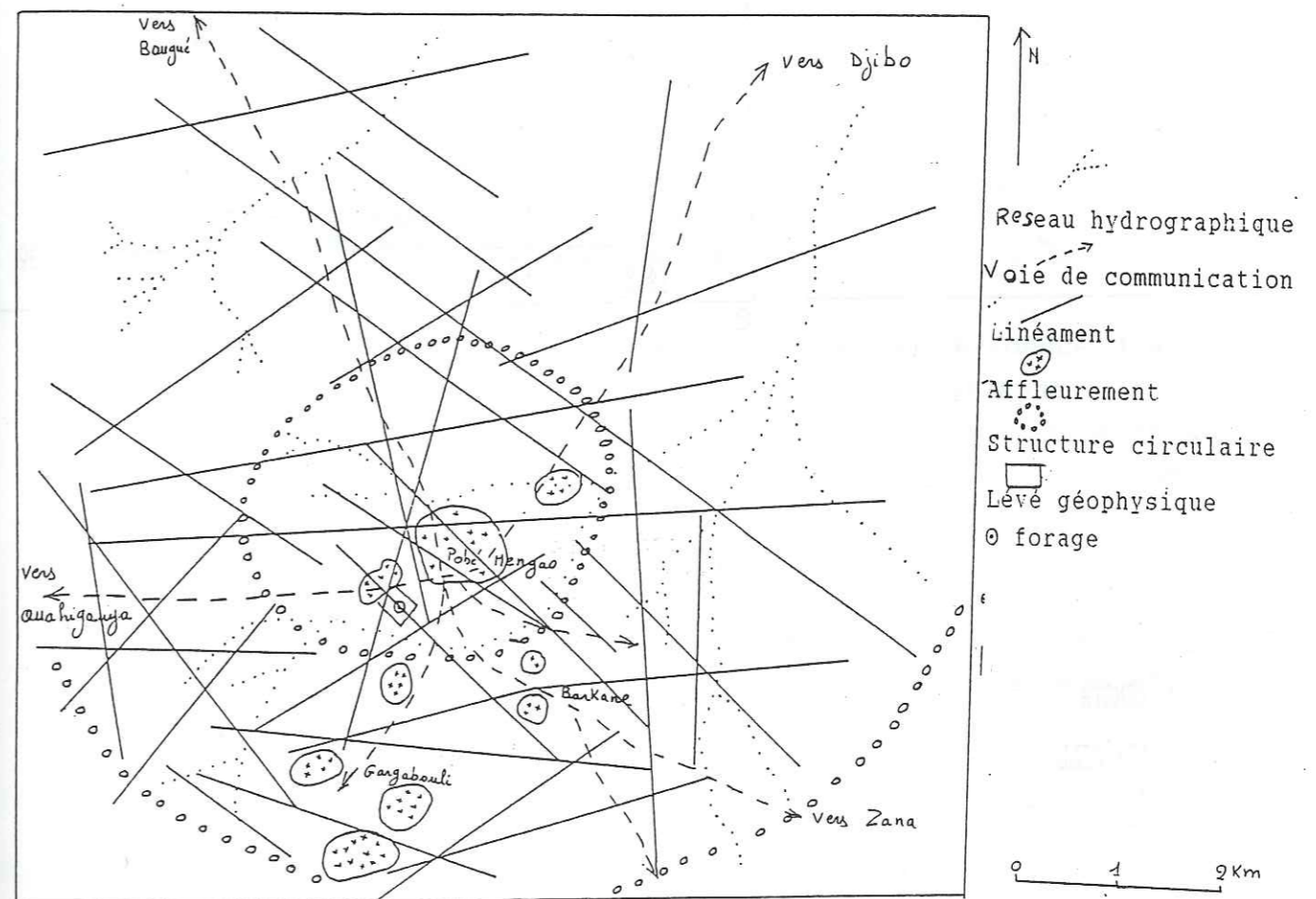
4.3.2 Etude par photo-interprétation

La photo-interprétation (figures 75 et 76) montre un réseau de linéaments très dense, indiquant une fracturation importante du substratum si ces linéaments correspondent au réseau de fractures.

On relève deux directions majeures: N50-80 et N120-150 .

Le réseau hydrographique semble dense avec un sens d'écoulement variant de NE à EO. Sur la photographie aérienne, on observe des structures circulaires dont nous n'avons pas pu confirmer la signification sur le terrain. Le forage investigué se trouve sur un linéament N150 , à côté d'une mare pérenne à crocodile et enfin en plein milieu d'affleurements.

figure 75 Carte de photo-interprétation (site de Pobe Mengao)



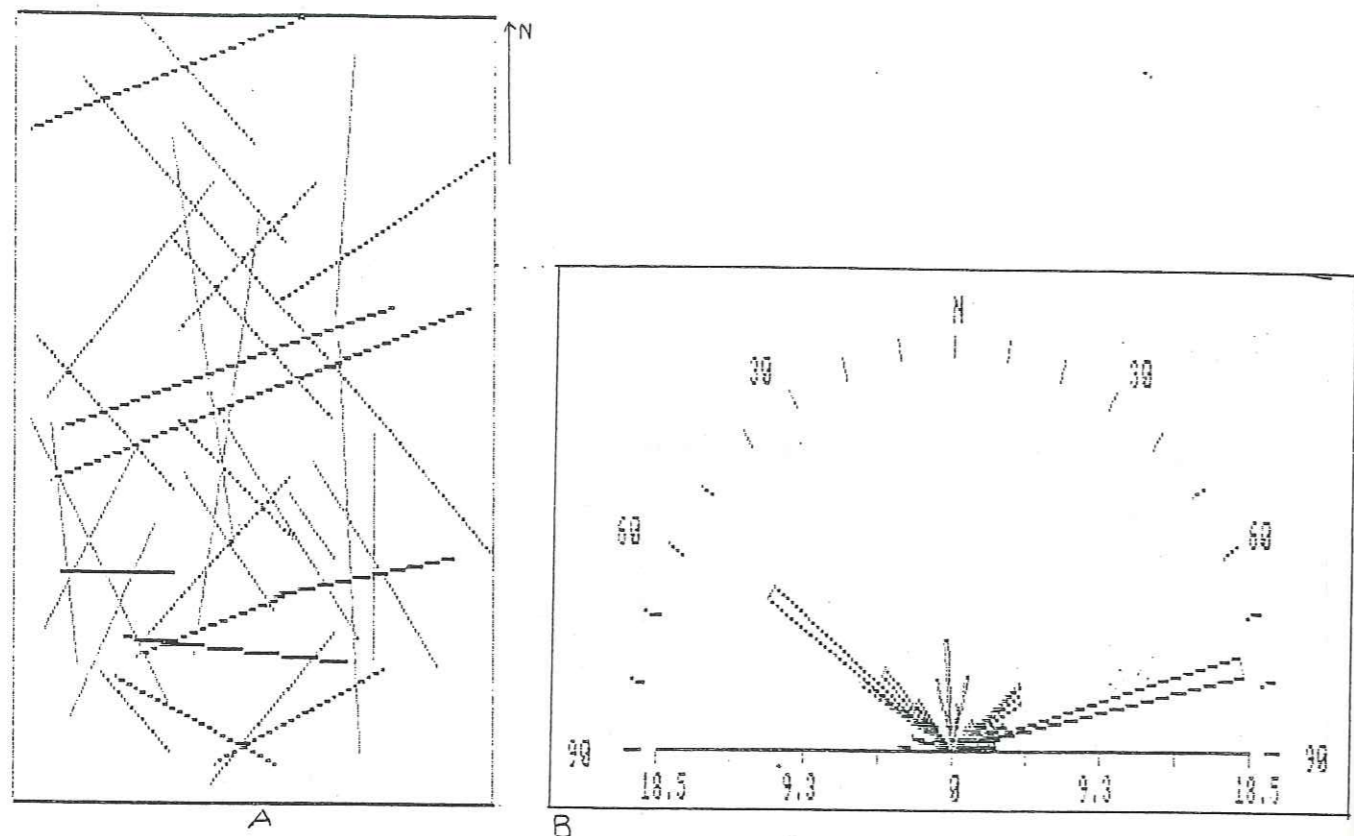


Figure 76 Photo-interpretation
 A-carte de linéaments
 B-rosace de linéaments
 C-histogramme de linéaments

4.3.3 Prospection géophysique

Elle s'est faite sur une plateforme autour du forage. Nous avons réalisé:

- 8 profils électriques de 800m
- 12 profils électromagnétiques de 2000m
- 2 sondages électriques
- 4 sondages électromagnétiques
- 1 cercle de mesure rotative électromagnétique

La carte de résistivité apparente (figure 77) met en évidence deux axes conducteurs l'un de direction N135 et l'autre de direction N45. Les deux axes se recoupent au niveau du point d'implantation du forage.

La carte électromagnétique (figure 78) met en évidence l'axe conducteur N135 mais le deuxième n'est pas très évident.

Du point de vue extension latérale l'axe N135 occupe 30 à 40 m et induit avec le second une zone de basses valeurs de - autour du forage. Le deuxième axe est très étroit, il occupe à peine 15 m et c'est peut être pour cela qu'il n'apparaît pas nettement sur la carte électromagnétique.

Longitudinalement l'axe N135 a été recoupé au Nord-Ouest et au Sud-est par des profils électromagnétiques sur 3 km (figure 82).

Figure 78 Carte et représentation en perspective des valeurs de (-), composante en quadrature (site de Pobé Mengao)

F=3520Hz S=50m Pas de mesure=10m

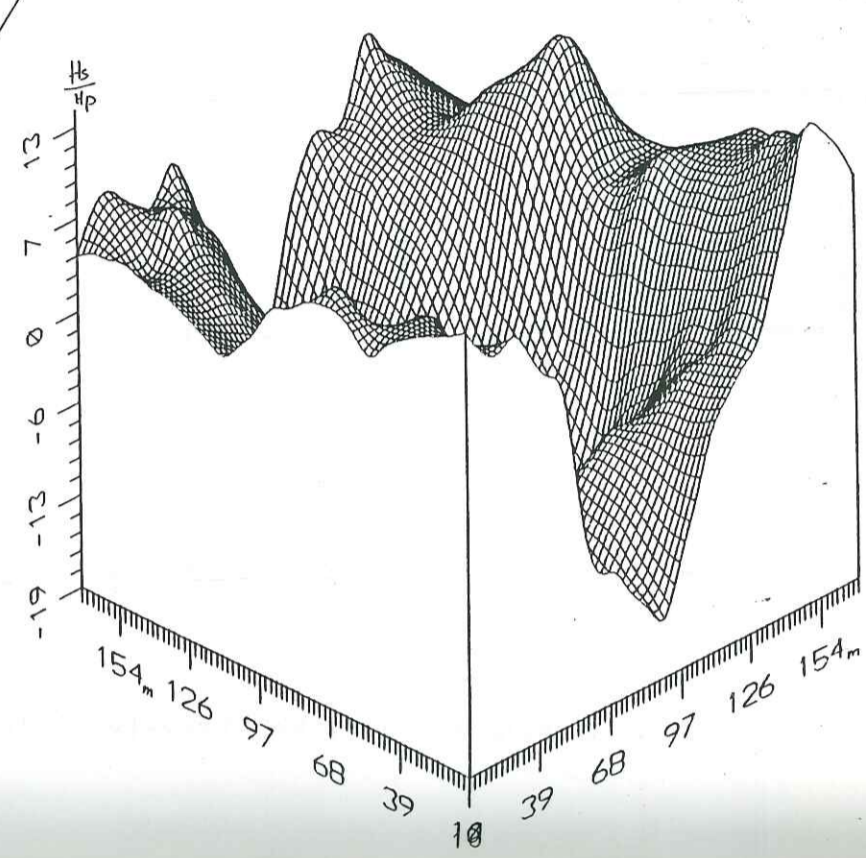
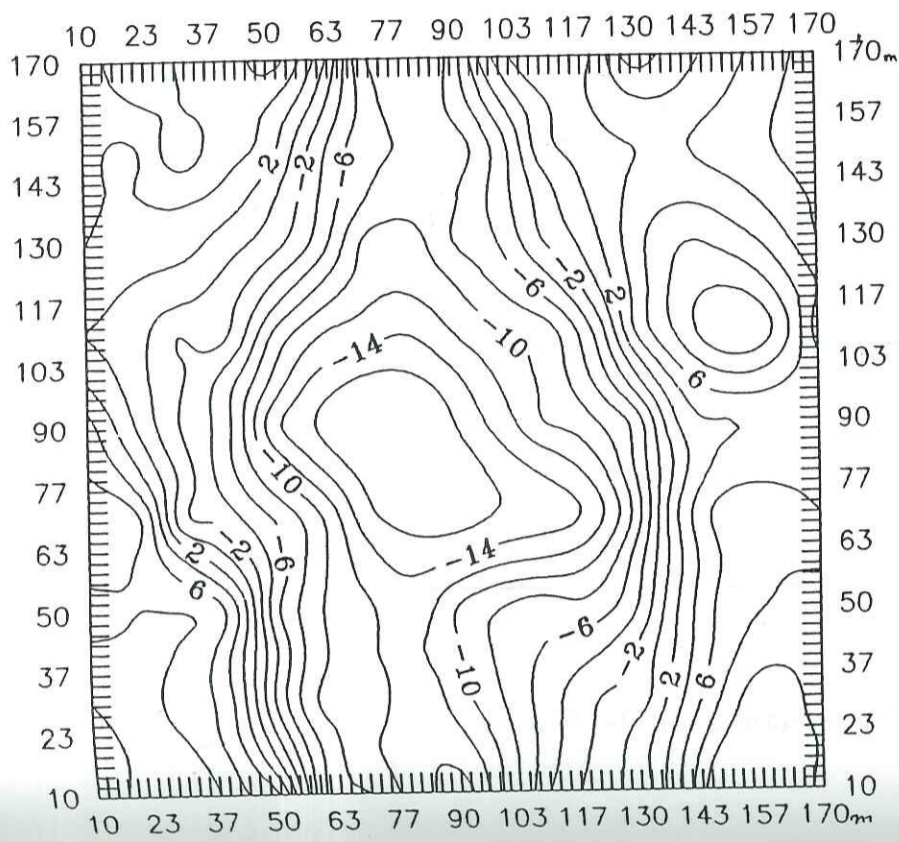
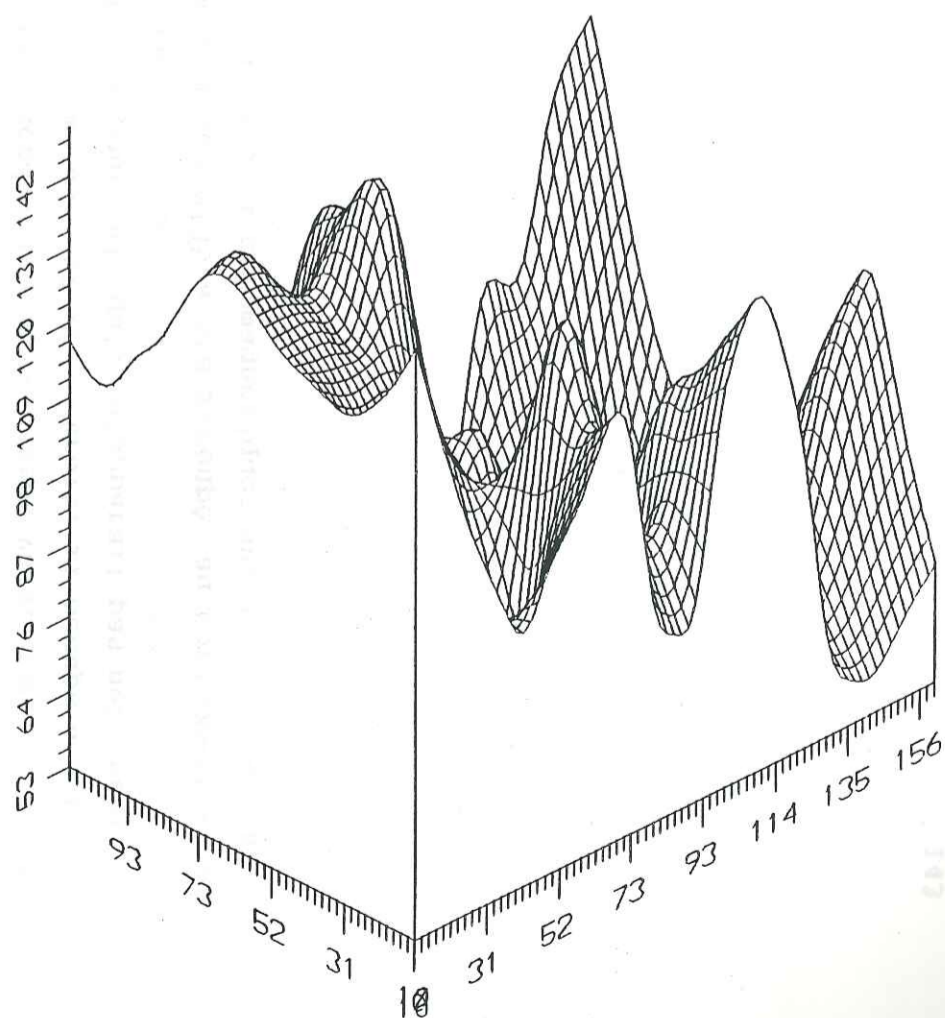
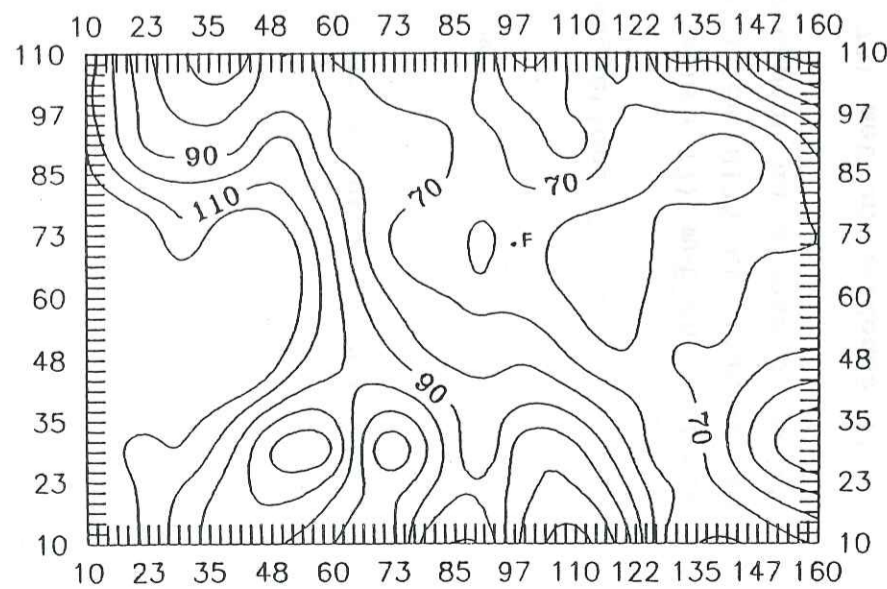


Figure 77 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Pobé Mengao)

AB=200m MN=20m Pas de mesure =10m



Les deux sondages électriques (figure 92) se caractérisent par une remontée trainante bien prononcée. L'interprétation propose 34 mètres de frange fissurée.

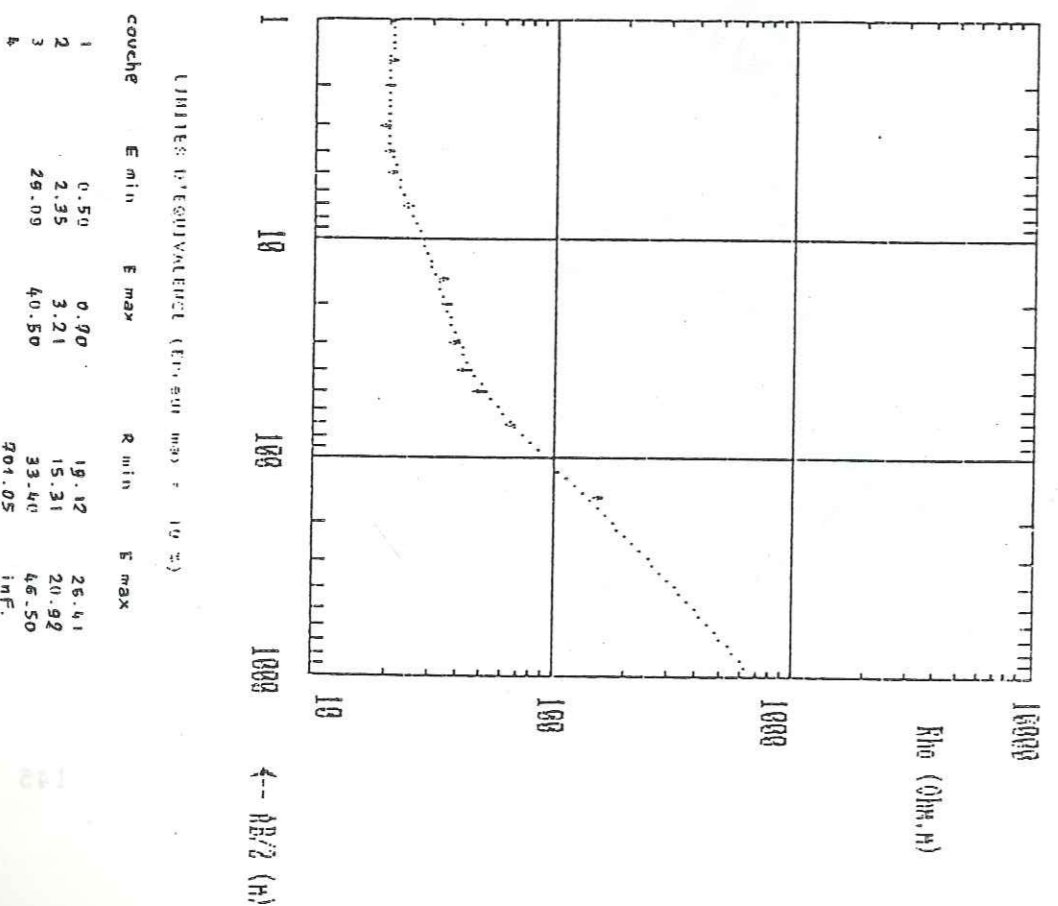
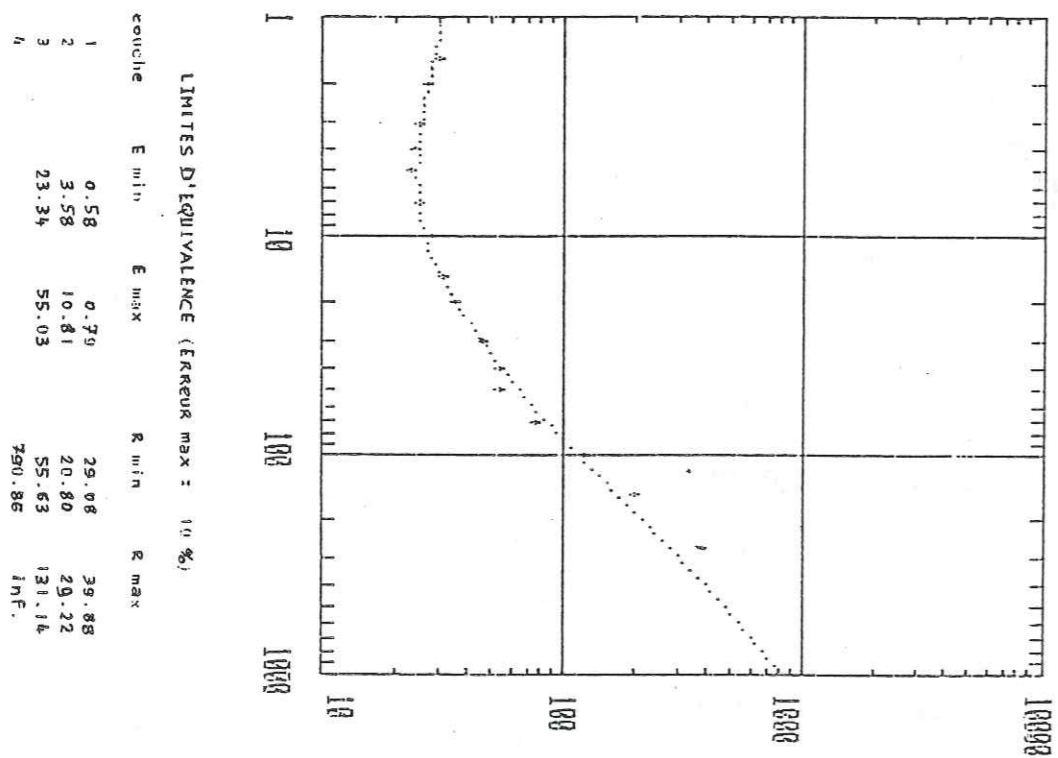
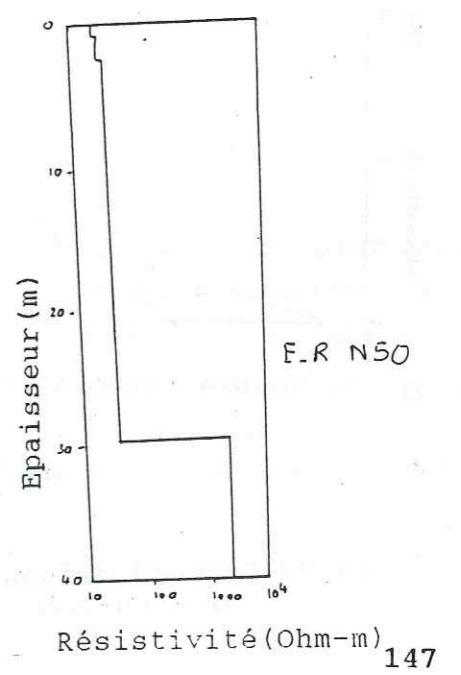
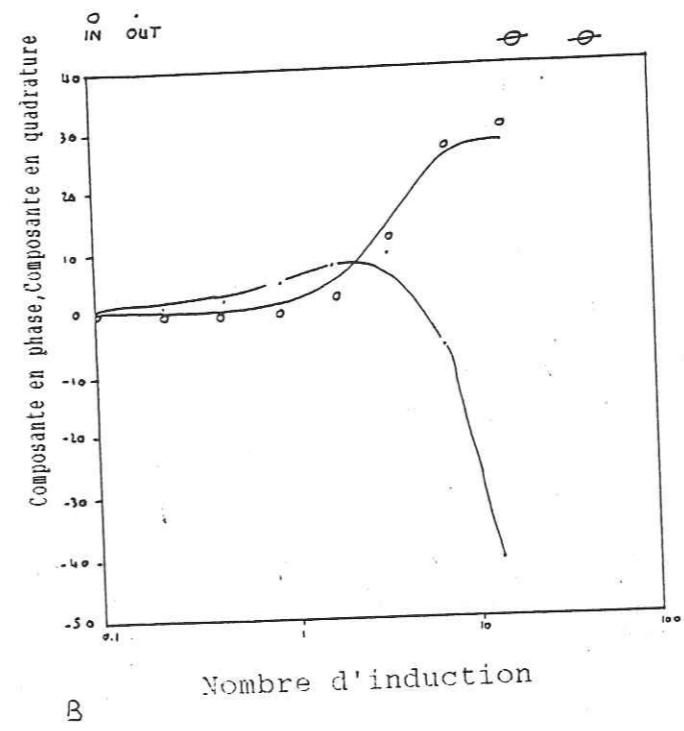
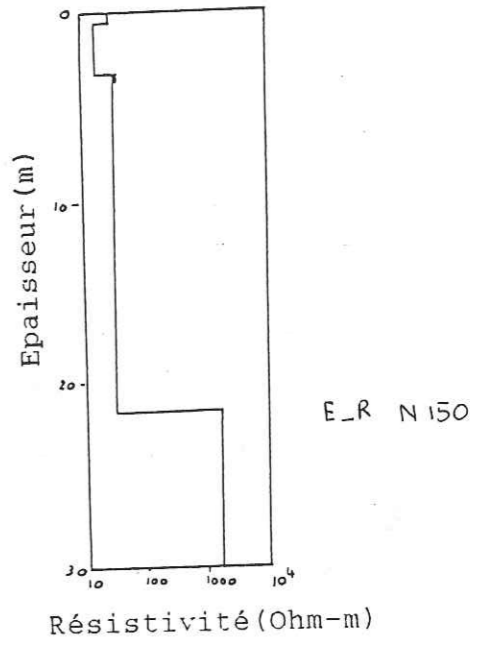
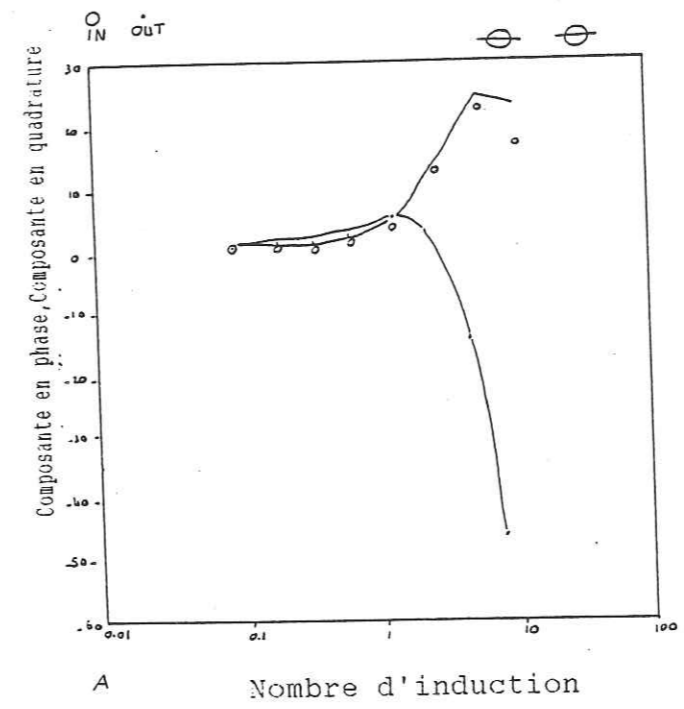
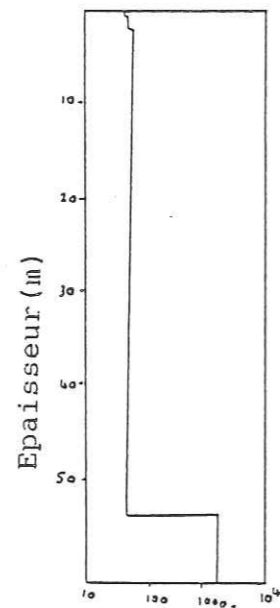
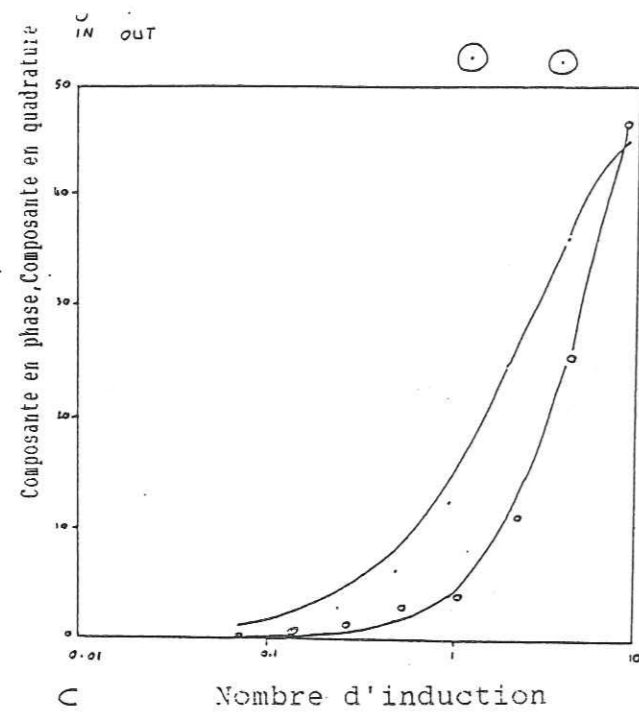


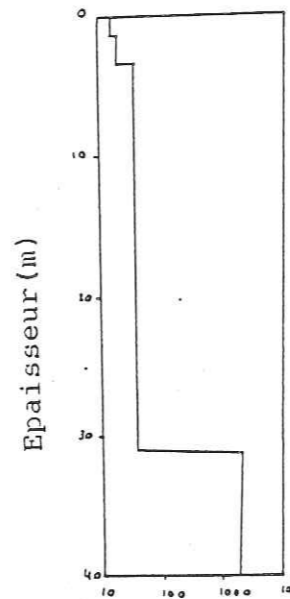
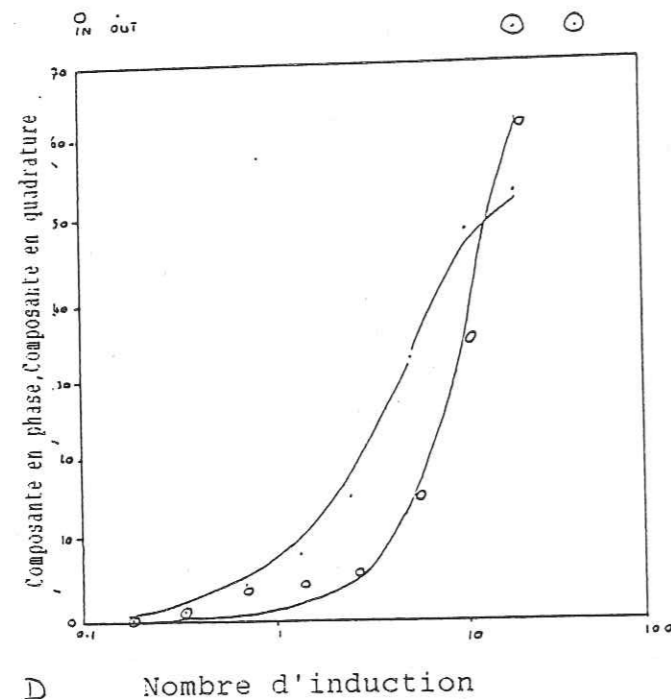
Figure 79 Courbes de sondages électriques (site de Pobé Mengao)

Nous avons expérimenté des sondages électromagnétiques en bobine verticale et horizontale (figures 80a, 80b, 80c, 80d,). Dans l'ensemble ces sondages montrent une frange fissurée importante.





F.R N140



F.R N50

Figure 80 Courbes de sondages électromagnétiques (site de Pobé Mengao)

Le tableau ci-dessous présente les résultats à titre comparatif des sondages électriques et des sondages électromagnétiques.

Numero de Couche	SONDAGES ELECTRIQUES				SONDAGES ELECTROMAGNETIQUES							
	DIRECTION A - B				Bobine horizontale				Bobine Verticale			
	N 110	N 80			Direction Emetteur-Receiver		Direction Emetteur-Receiver		Direction Emetteur-Receiver		Direction Emetteur-Receiver	
	Résistivité (Ωm)	Epaisseur (m)	Résistivité	Epaisseur	N 140		N 50		N 140		N 50	
1	33	.68	22	.6	27	.8	46	1.25	33	.8	28	.9
2	23	9.69	18	2.78	15	2.7	53	4.6	37	2.15	38	4
3	90	38	40	35	32	18	61	5.1	41	4.9	64	4.9
4	2167		2023		2158		2198		2083		2200	

Tableau 11 Comparaison : sondages électriques et sondages électromagnétiques

Ce tableau montre que les résultats fournis par les sondages électromagnétiques sont dans l'ensemble comparables à ceux fournis par sondages électriques. Les mesures avec la bobine en position verticale semblent donner des résultats plus satisfaisants que lorsque la bobine est horizontale.

Le cercle de mesures rotatives (figure 81) met en évidence l'axe conducteur N135.

Nous avons représenté la position des profils de mesures à la figure 83.

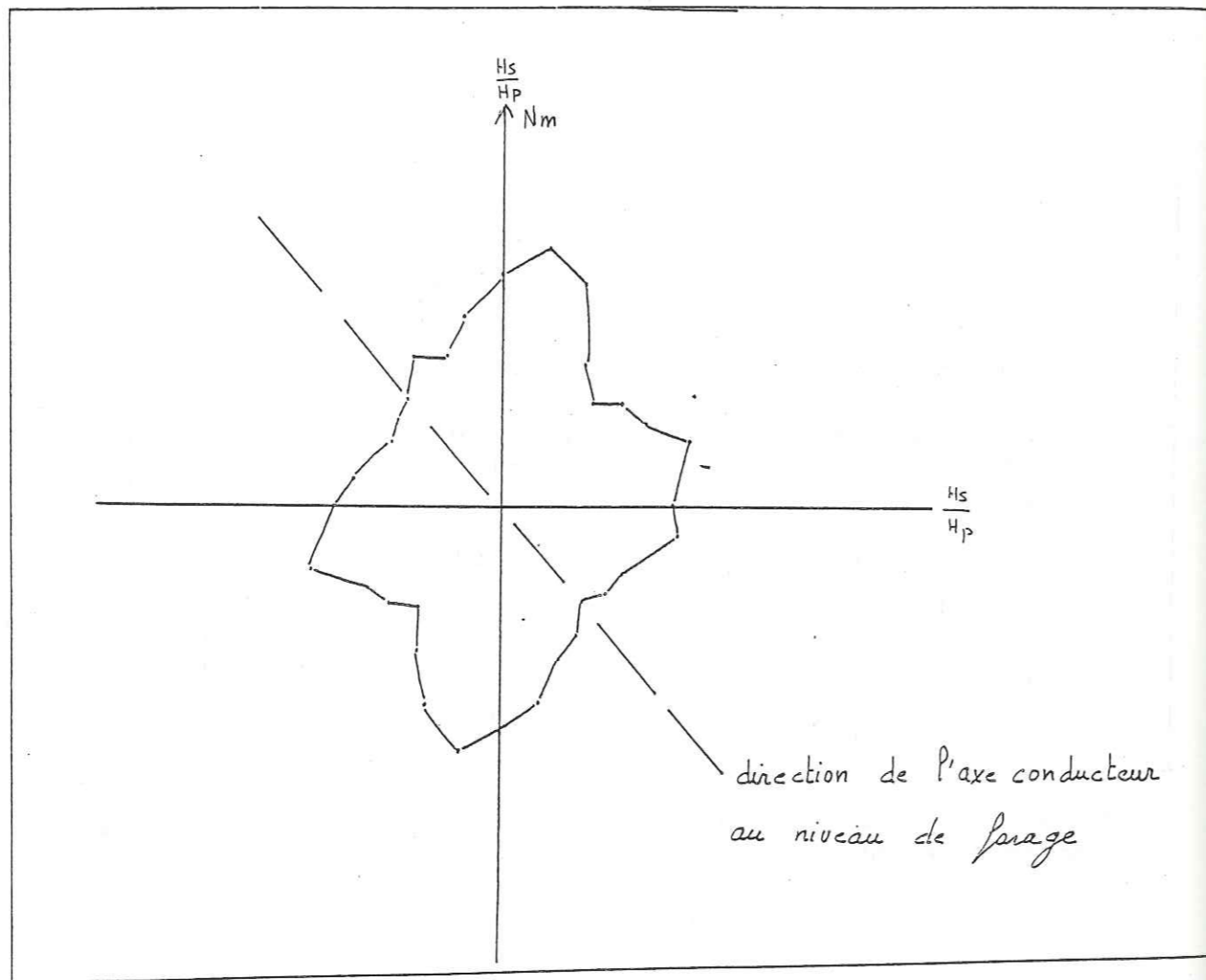


Figure 81 Diagrammes de cercles de mesures rotatives
(site de Pobé Mengao)

Figure 82 Profils électromagnétiques : extension de l'axe
conducteur (site de Pobé Me. ngao)

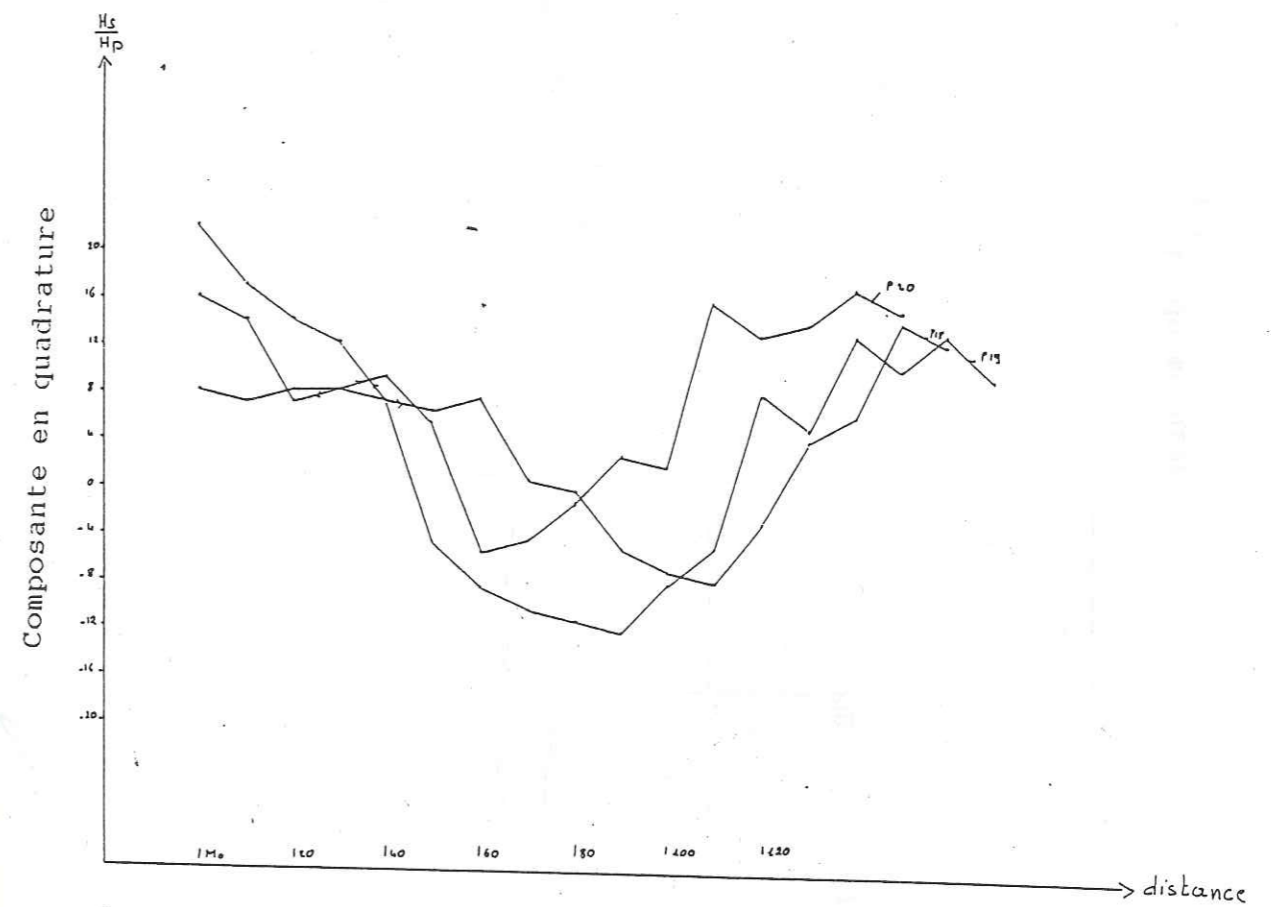
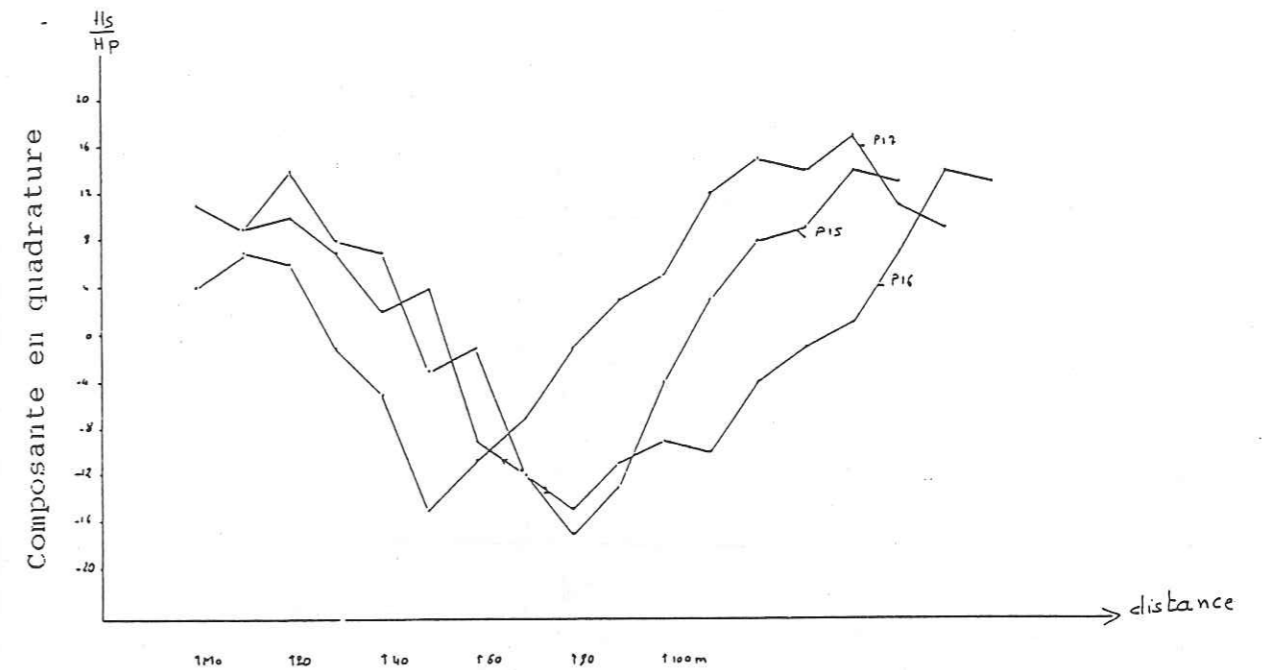
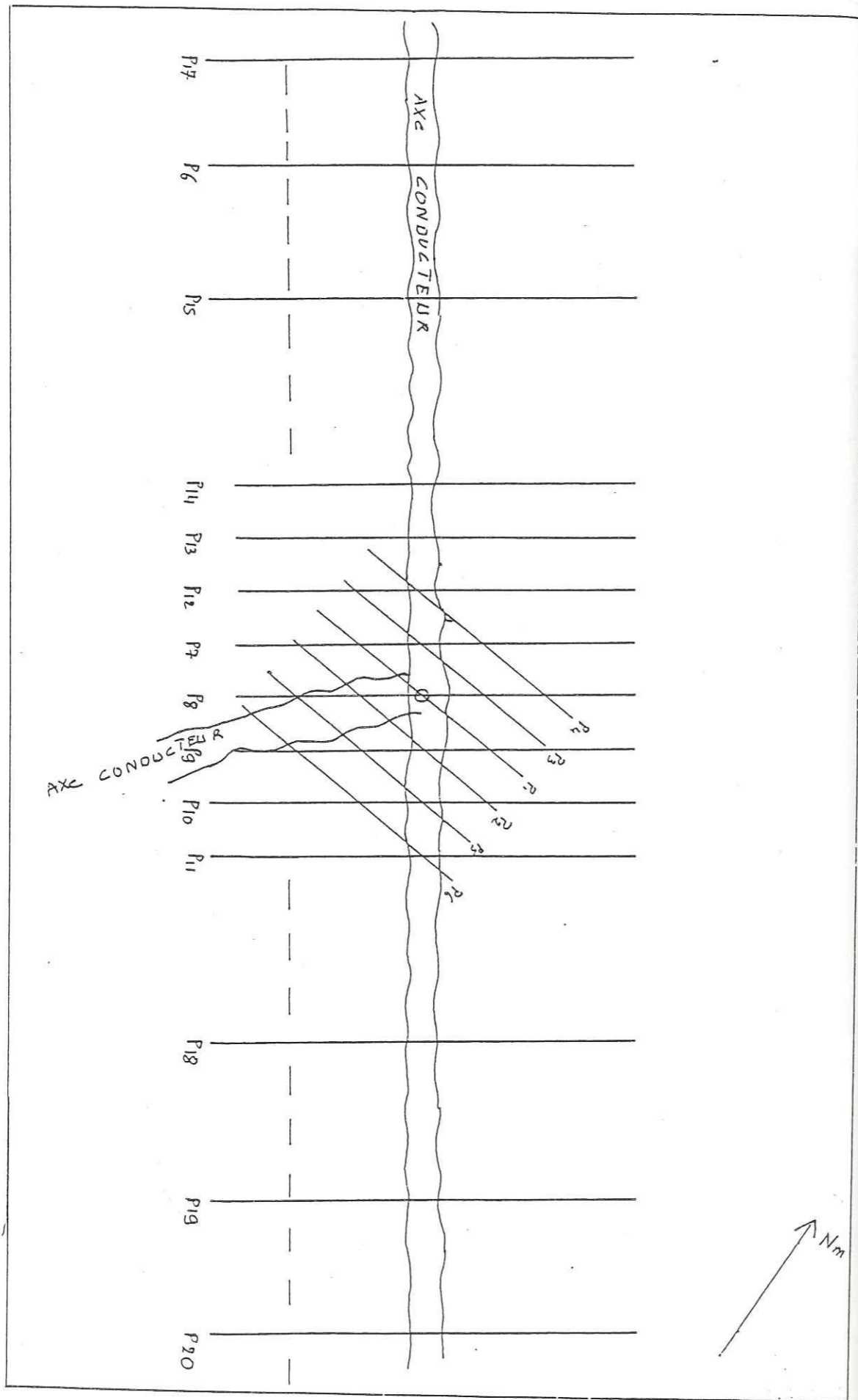


Figure 83 Disposition des profils de mesures
(site de Pobé Mengao)



De L'analyse de tous ces résultats, on peut retenir les faits suivants:

Le forage est implanté sur une discontinuité structurale significative affectant le substratum. Il est fort possible que cette discontinuité soit recoupée par une faille secondaire au niveau du forage.

Il est important de remarquer une fois de plus que les mesures électromagnétiques rotatives permettent de déterminer la direction des axes conducteurs favorables à une forte productivité; malheureusement une panne d'appareil ne nous a pas permis d'effectuer un profil d'anisotropie.

Le site de Pobé mengao est dans un contexte hydrogéologique défavorable par rapport aux autres sites en raison d'une faible pluviométrie et une évaporation très importante. Néanmoins grâce à la méthodologie employée on peut envisager trouver des sites de forages productifs pour les populations du sahel.

4.4 PROVINCE DU GANZOURGOU

4.4.1 le site de Nabmayaoghain

Le village de Nabmayaoghain est situé à 2km au Nord-Est du centre ville de Zorgho, capitale de la province du Ganzourgou. Nos investigations ont porté sur un forage à grand débit (forage 1: $Q=32m^3/h$ et deux forages négatifs (forage 2 et 3) (figure 97).

Le forage positif a une profondeur de 39m et le log de forage présente successivement une altération argileuse de 2m, une arène grenue de 10m et une frange fissurée de granite d'une épaisseur totale de 22m. cette frange fissurée est intrudée de filon de pegmatite. Les premières venues d'eau ont été enregistrées au niveau de l'arène mais l'aquifère principal se situe au niveau de la frange fissurée.

Le forage 2 avec une profondeur de 37.5m montre une cuirasse latéritique en surface d'une épaisseur de 3m. L'arène grenue et la frange fissurée y sont très minces. Le socle sain granitique se trouve à 19m de profondeur.

Le forage 3 a été arrêté seulement à 16m de profondeur car ayant rencontré la roche saine granitique à 7m.

4.4.1.1 cadre géologique

Le site de Nabmayaoghain repose sur du granite dit granite de Zorgho. C'est un granite à grain grossier, clair, très tectonisé, un granite à biotite parfois à muscovite à orientation NW-SE. On y rencontre beaucoup de fissures empruntant de préférence la direction E-O ou la direction N-S. Quant aux filons de quartz et de pegmatite ils sont aussi abondants et s'injectent en général selon la direction N-S

4.4.1.2 Photo-interprétation

La photo-interprétation (figure 84) met en évidence un réseau de linéaments très dense ainsi qu'un réseau hydrographique bien développé. Les linéaments présentent deux directions dominantes: l'un NNE et l'autre NO, empruntés en grande partie par le réseau hydrographique.

Le forage à haut rendement se trouve sur un linéament NNO à coté d'un cours d'eau. Le forage 2 qui se trouve du coté opposé de la rive n'est apparemment pas sur un linéament décelable sur les photos aériennes.

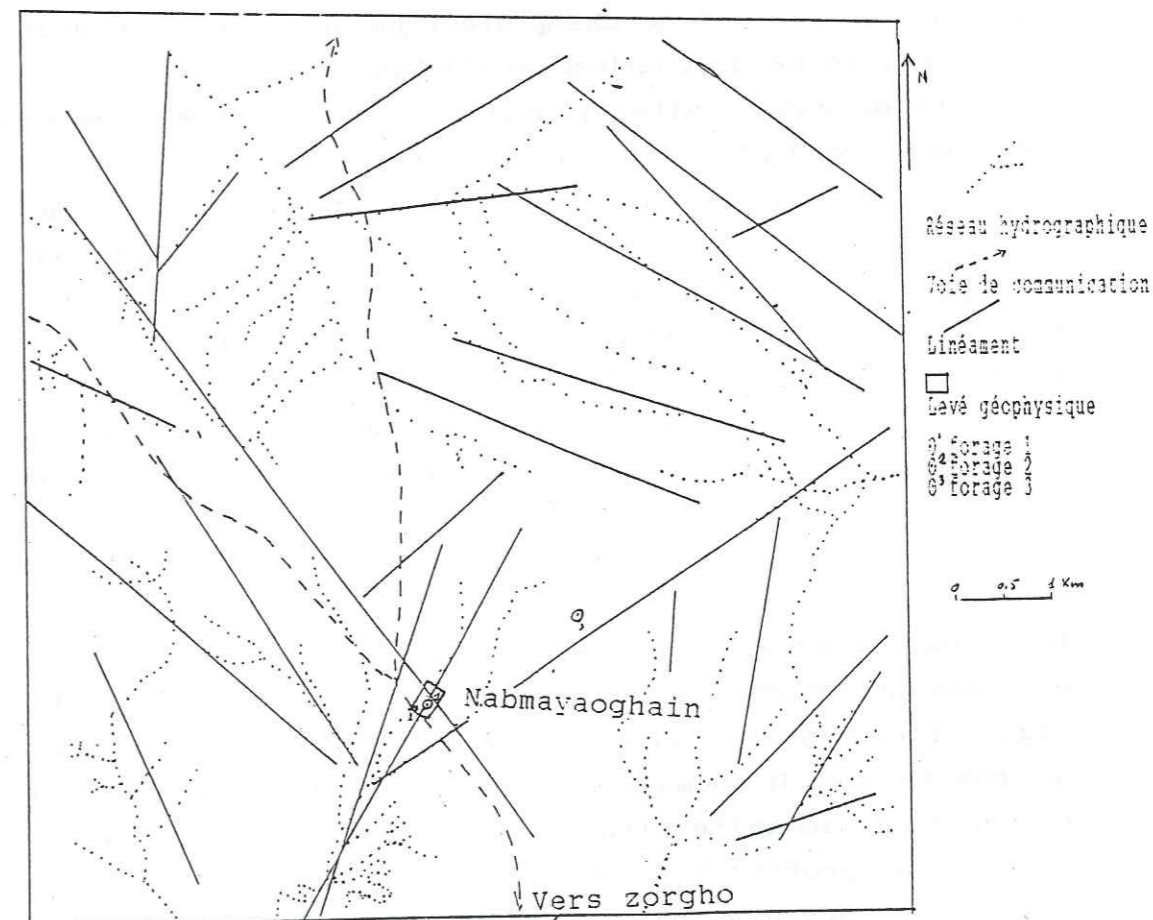


Figure 84 Carte de photo-interprétation (site de Nabmayaoghain)

4.4.1.3 Prospection géophysique

Sur le site de Nabmayaoghain le levé géophysique s'est fait sur deux plateformes autour des trois forages.

Nous avons réalisé:

6 profils électriques de 700 m

14 profils électromagnétiques de 3500 m

7 sondages électriques

8 sondages électromagnétiques

1 profil d'anisotropie

Les résultats sont présentés sous forme de cartes (résistivité apparente et rapport de champ électromagnétique), de profils et enfin sous forme de courbes de sondages.

La carte de résistivité apparente (figure 85) met en évidence deux axes conducteurs: l'un de direction NNE et l'autre de direction NO. Au niveau de ces deux axes conducteurs, on relève des résistivités apparentes inférieures à 150 ohm-m tandis que partout ailleurs les valeurs sont beaucoup plus élevées.

La carte électromagnétique (figure 86) confirme l'existence de l'axe conducteur NNE et met en évidence deux autres axes conducteurs NE, Mais ces derniers ne passent pas par le forage 1. Les trois axes convergent vers un point commun au Sud-Ouest du forage 1.

Du point de vue extension latérale, l'axe NNE occupe 20 à 40 mètres tandis que celui NO occupe environ 15 à 25 mètres.

Longitudinalement, l'axe NNE a été recoupé par des profils électromagnétiques sur trois kilomètres (profils 7,8,9,10,11,12 figure 92). Le profil 6 (figure 87) qui passe par le forage sec ne montre pas d'anomalie à l'aplomb du forage mais met en évidence une anomalie située à cinquante mètres à l'Ouest de ce dernier. Le profil 13 (figure 87) montre la continuité de l'anomalie recoupée par le profil 6; cette dernière a fait l'objet de sondages électriques et électromagnétiques et a été nommée anomalie 1 (an1).

Pour le deuxième forage sec de la plateforme 2 le profil 14

(figure 87) ne met pas en évidence d'anomalie à l'aplomb du forage, par contre deux anomalies se trouvent respectivement à 200 et 250 mètres à l'Ouest du forage, sur lesquelles nous avons fait des sondages électriques.

La figure 88 représente les 7 sondages électriques réalisés: on remarque que ceux de la plateforme 2 montrent des valeurs de résistivité très élevées par rapport à celles de la plateforme 1. Toutes ces courbes présentent un fond de bateau. Celles du forage à haut rendement montrent une légère remontée trainante tandis que celle de l'anomalie 1 est très caractéristique avec une remontée trainante très importante.

L'interprétation indique une couche de résistivité comprise entre 114 et 290 Ohm-m et une épaisseur comprise entre 51 et 130 m. Nous pensons qu'il s'agit là d'une discontinuité structurale très importante affectant le substratum. On peut émettre l'hypothèse comme à Rakaye Mossi, qu'il s'agit d'une fracture ouverte.

Les résultats de tous les sondages sont présentés sur les figures 89a, 89b, 89c, 89d, 89e, 89f, 89g.

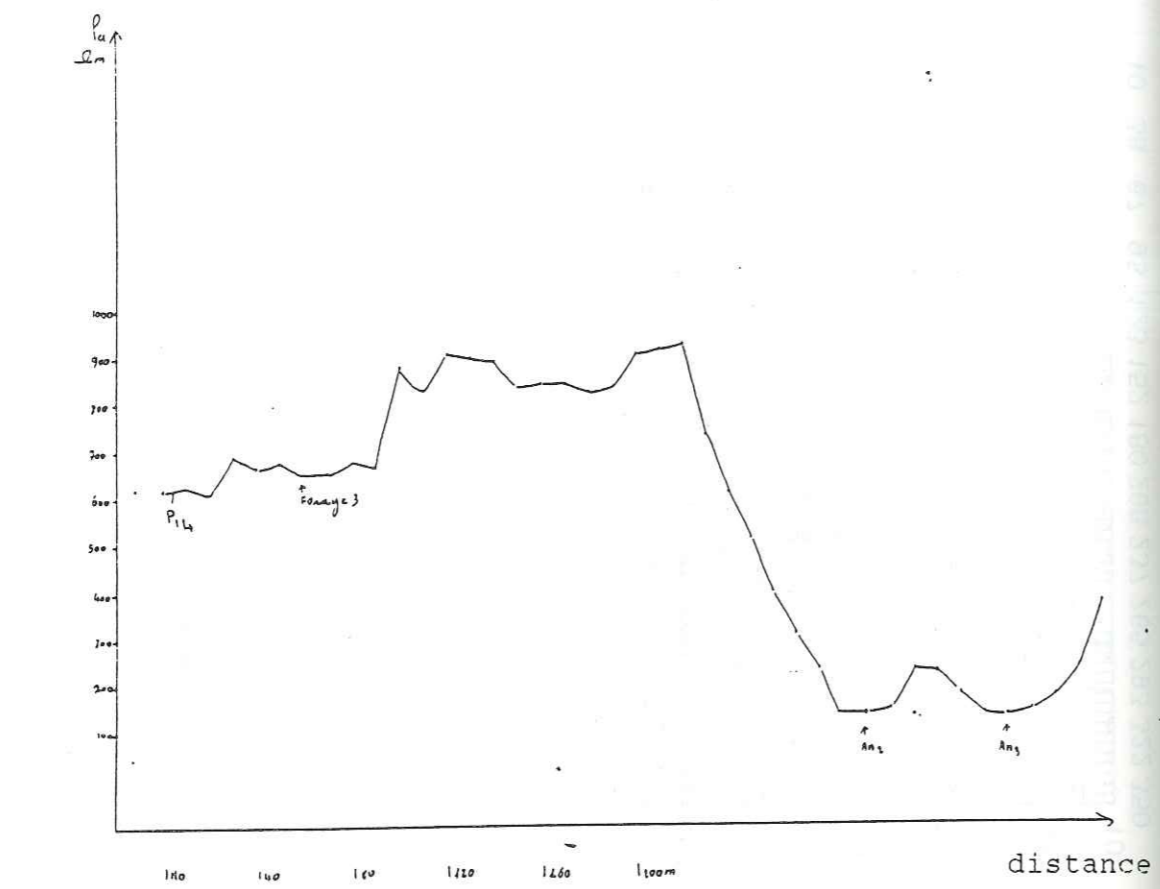
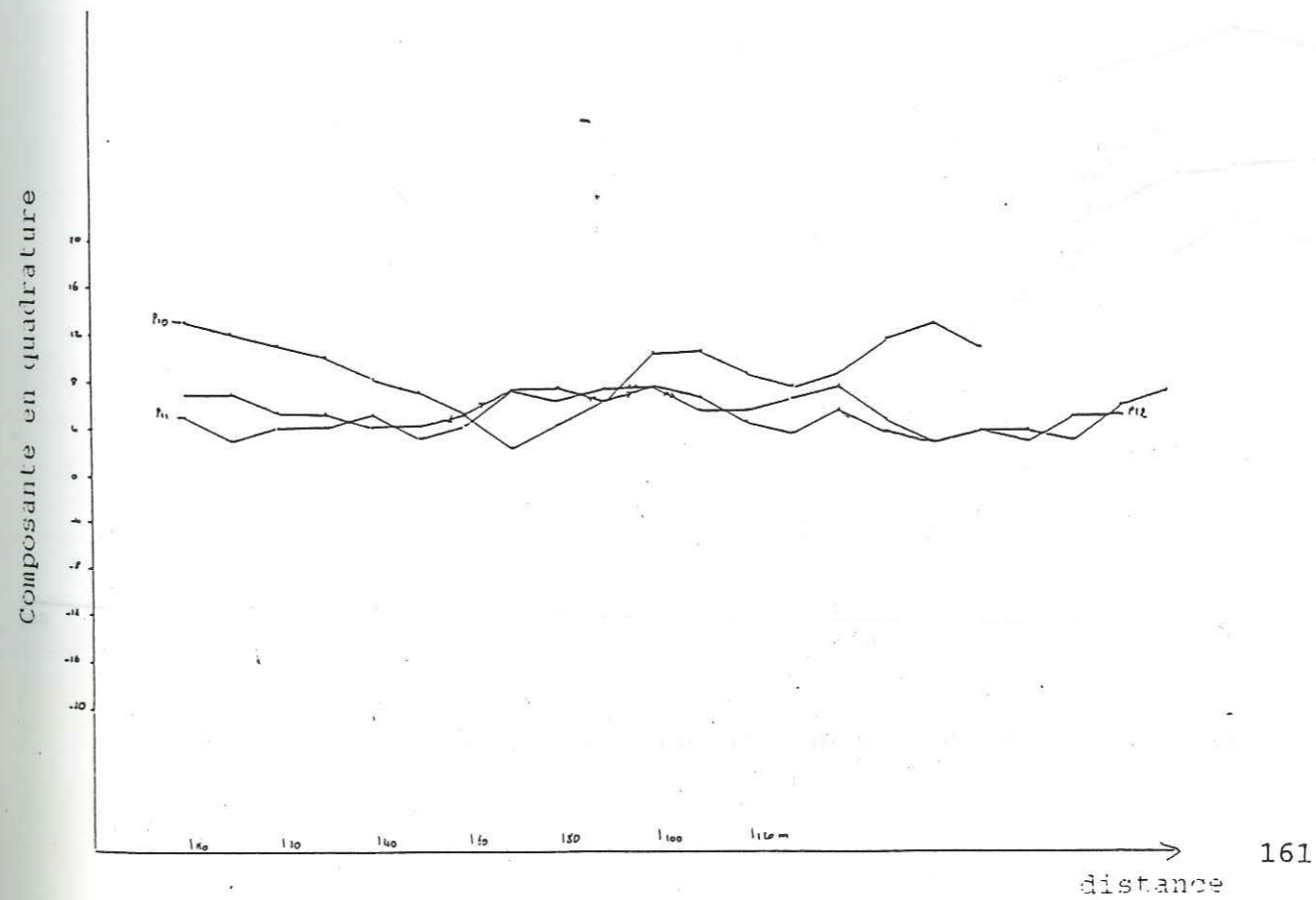
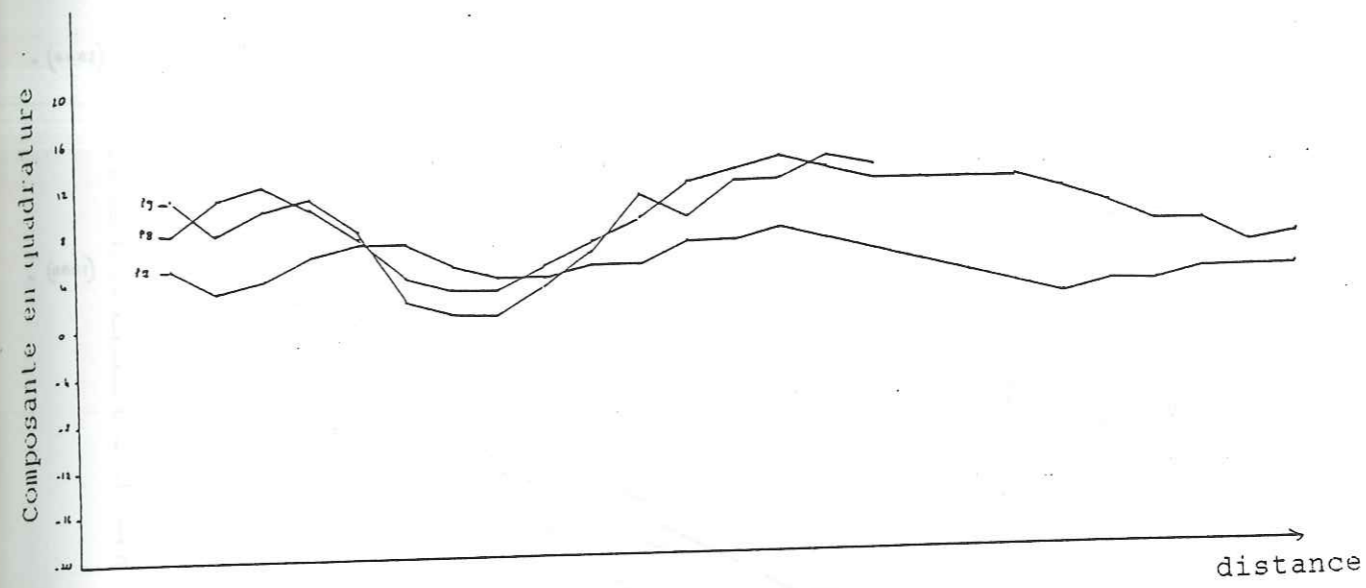


Figure 87 Profil de résistivité - Profils électromagnétiques (site de Nabmayaoghain)

Figures 88 Profils électromagnétiques (site de Nabmayaoghain)



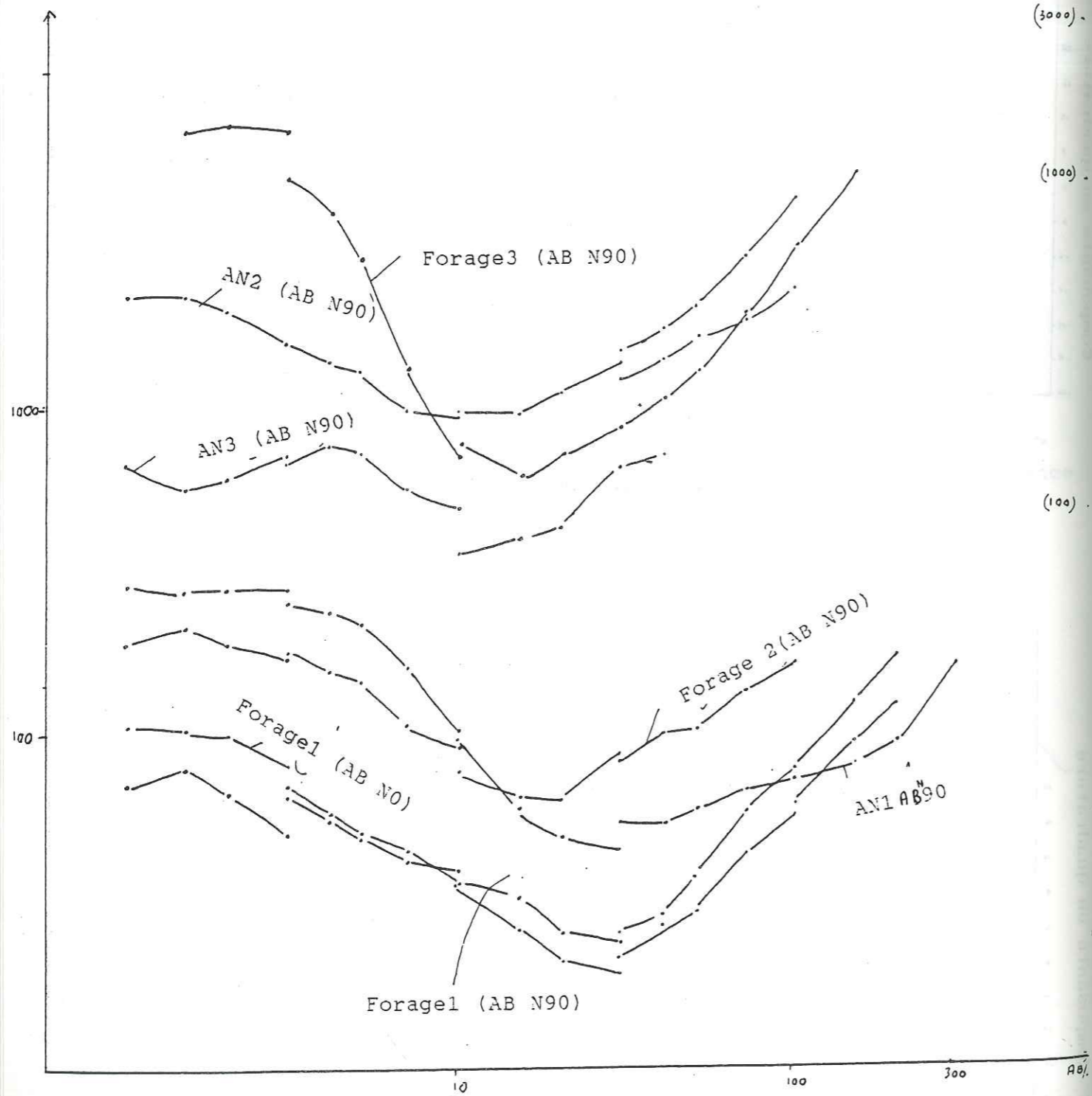
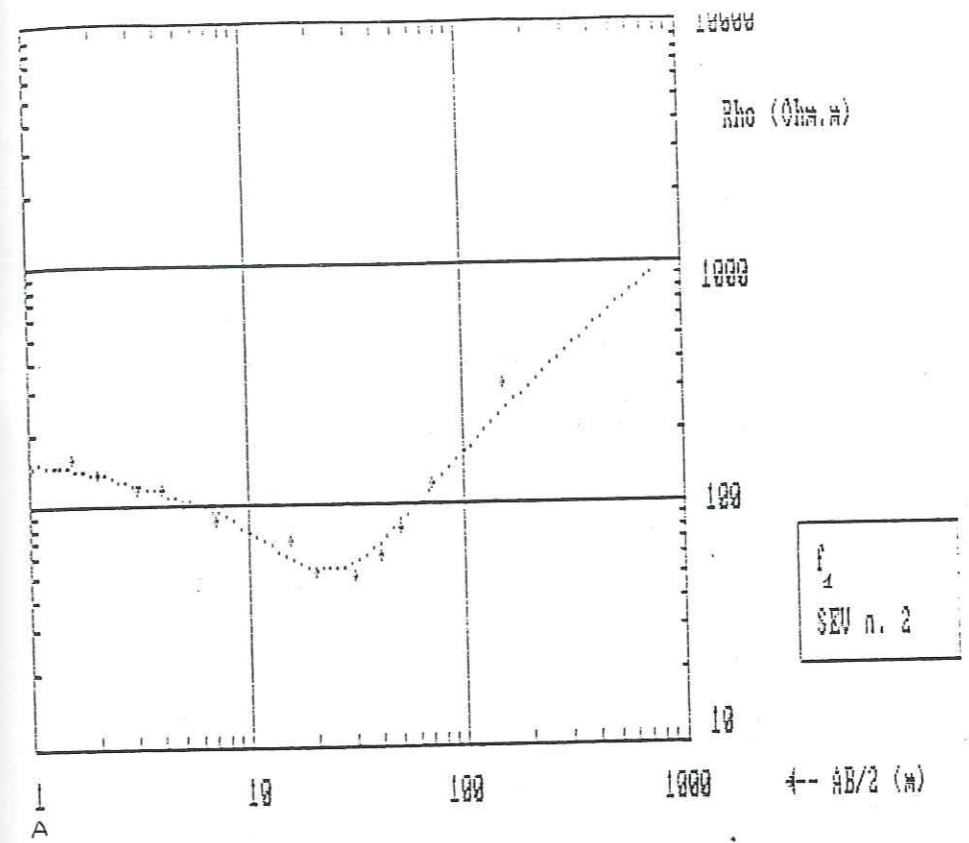


figure 89 Courbes de sondages électriques (site de Nabmayaoghain)

(3000)

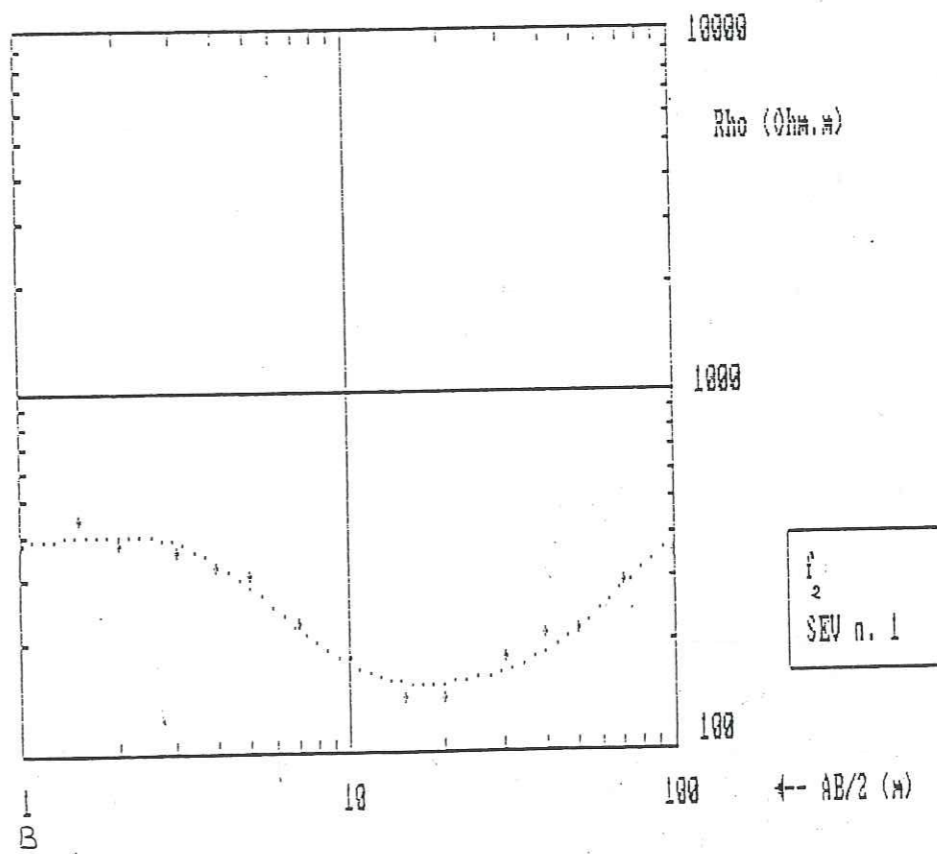
(1000)

(100)



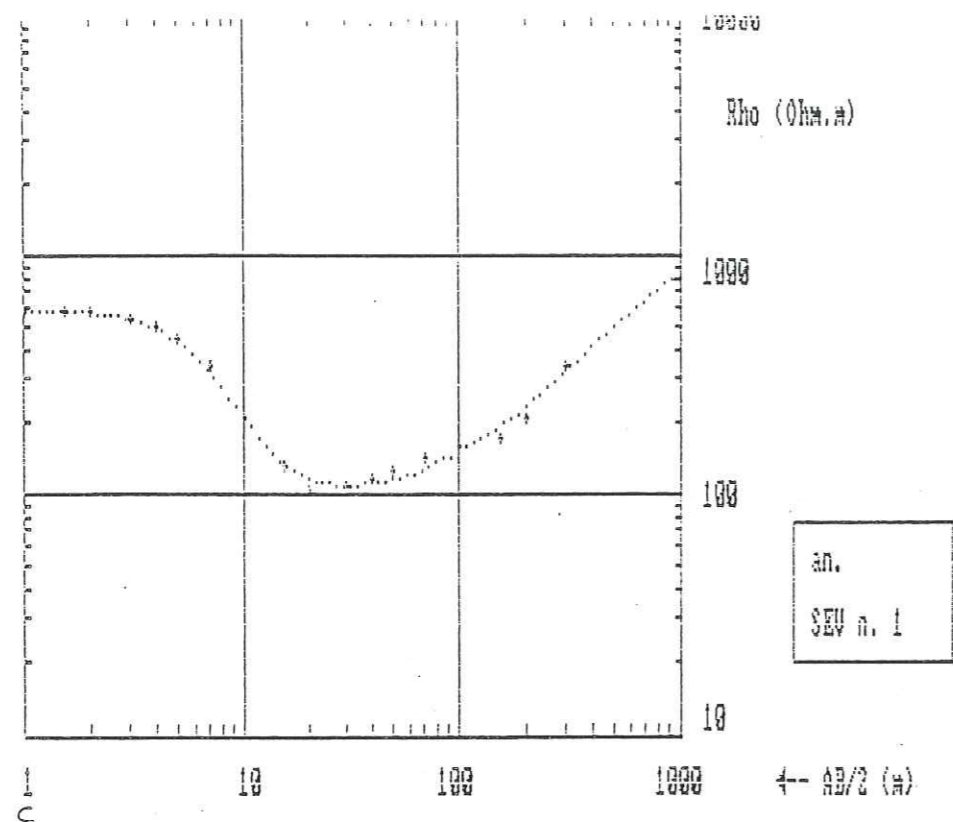
LIMITES D'EQUIVALENCE (Erreur max = 10 %)

couche	E min	E max	R min	R max
1	0.90	1.14	139.20	177.16
2	3.88	5.25	39.73	122.23
3	15.39	23.54	28.31	44.07
4			1129.04	inf



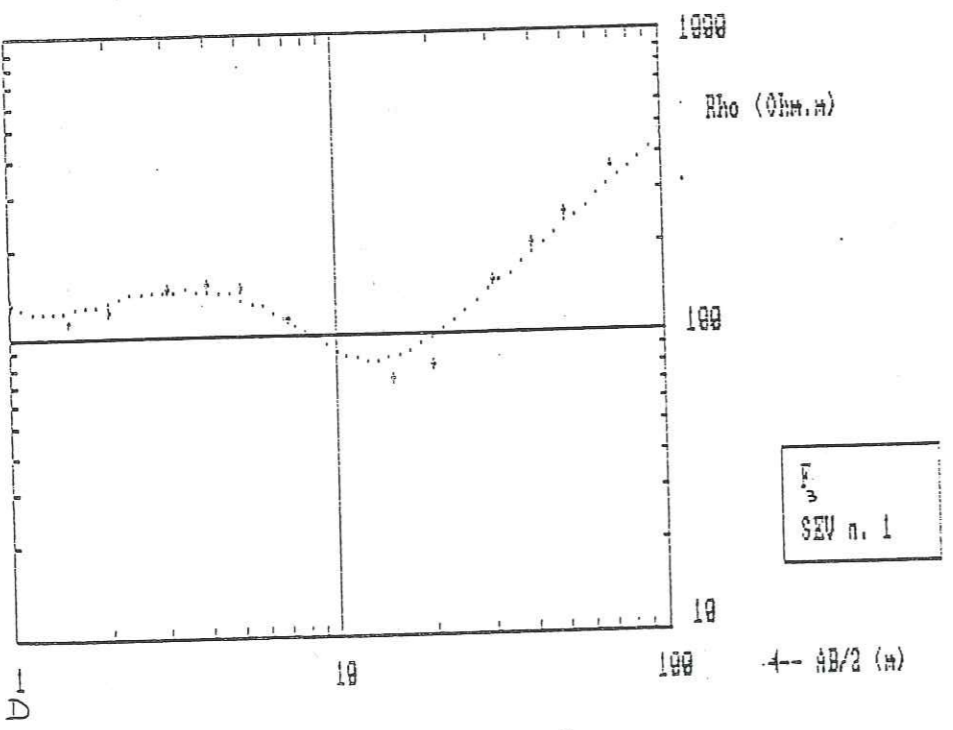
SOLUTION PROPOSEE (à 4 couches)

Couche n.	Résistivité (Ohm.m)	Epaisseur (m)	Prof.toit (m)	Cote toit (m)
1	380.00	1.00	0.00	90.00
2	967.63	0.57	-1.00	89.00
3	139.48	31.12	-1.57	88.43
4	2502.62	inf.	-32.69	57.31



LIMITES D'EQUIVALENCE (Erreur max = 10 %)

couche	E min	E max	R min	R max
1	3.02	3.89	534.98	655.35
2	34.44	42.30	30.39	112.80
3	51.80	120.50	116.79	290.30
4			995.68	inf.

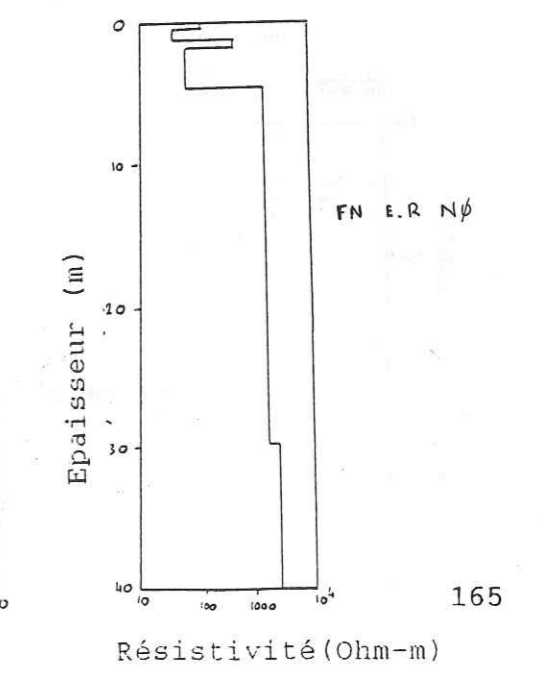
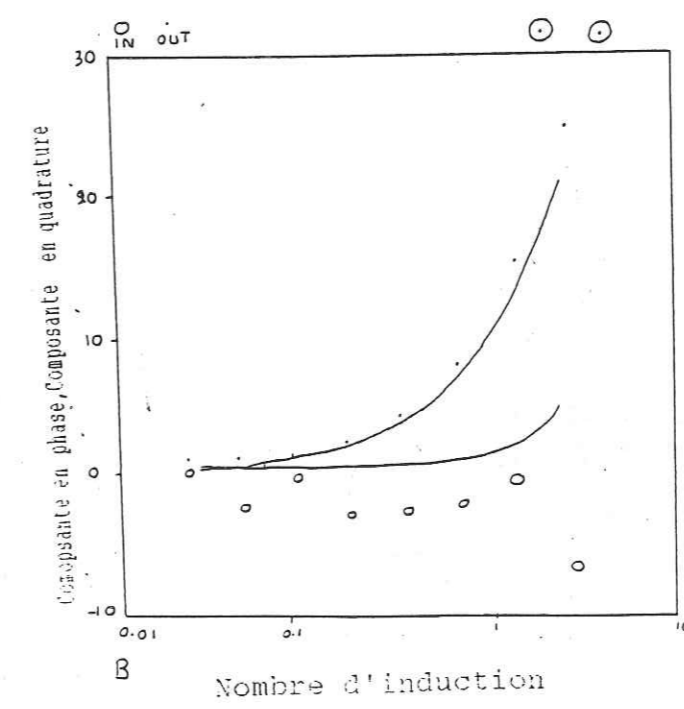
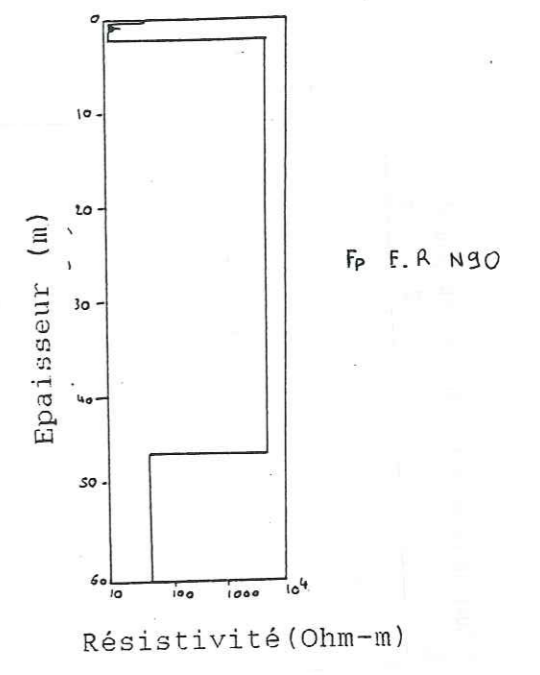
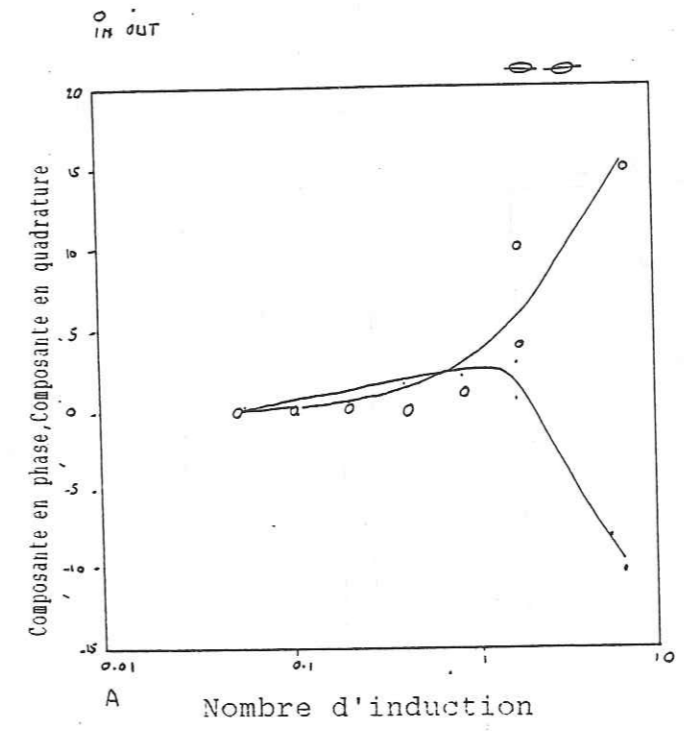


LIMITES D'EQUIVALENCE (Erreur max = 10 %)

couche	E min	E max	R min	R max
1	0.23	0.50	125.09	329.09
2	0.00	0.54	0.24	37.01
3	0.31	2.23	194.82	534.75
4	5.76	10.51	30.31	55.31
5			1713.14	18996.45

Figure 90 Courbes de sondages électromagnétiques (site de Nabmayaoghain)

Poursuivant notre expérimentation sur les sondages électromagnétiques, nous en avons réalisé 8 sur le site de Nabmayaoghain. Nous enregistrons encore des résultats comparables aux sondages électriques. On remarque en particulier que les résultats concernant l'anomalie 1 sont confirmés. Néanmoins on retiendra que les épaisseurs en sondages électromagnétiques sont plus importantes (figures 90a, 90b, 90c, 90d, 90e, 90f, 90g).



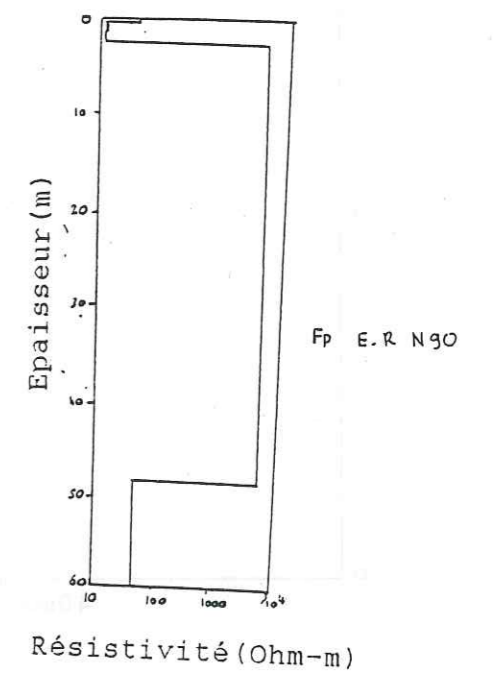
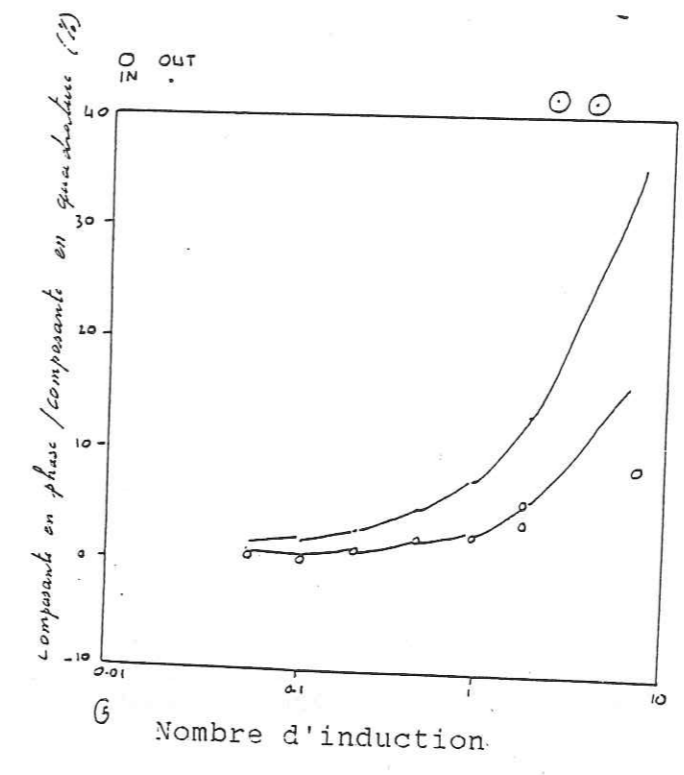
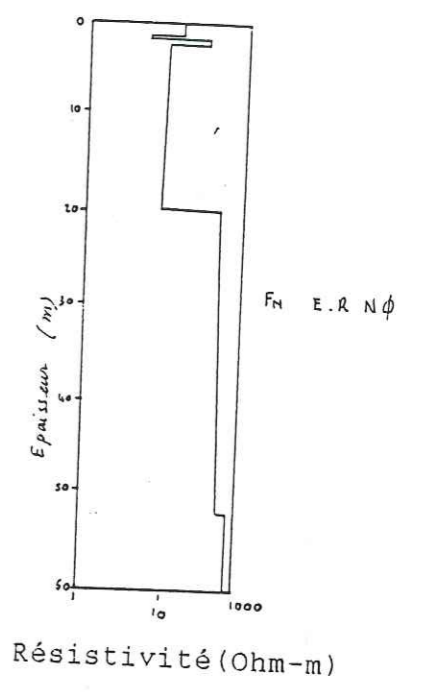
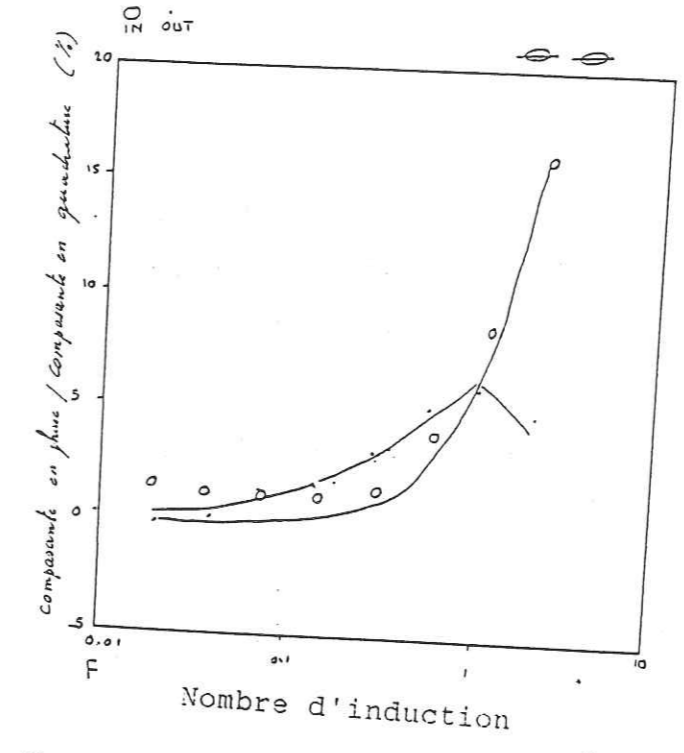
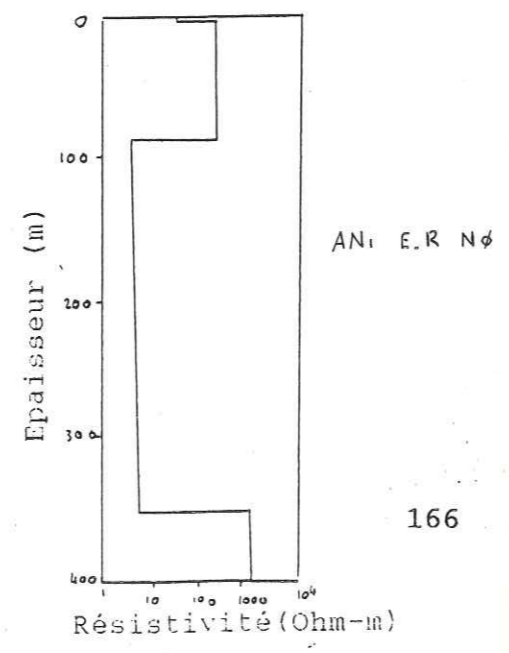
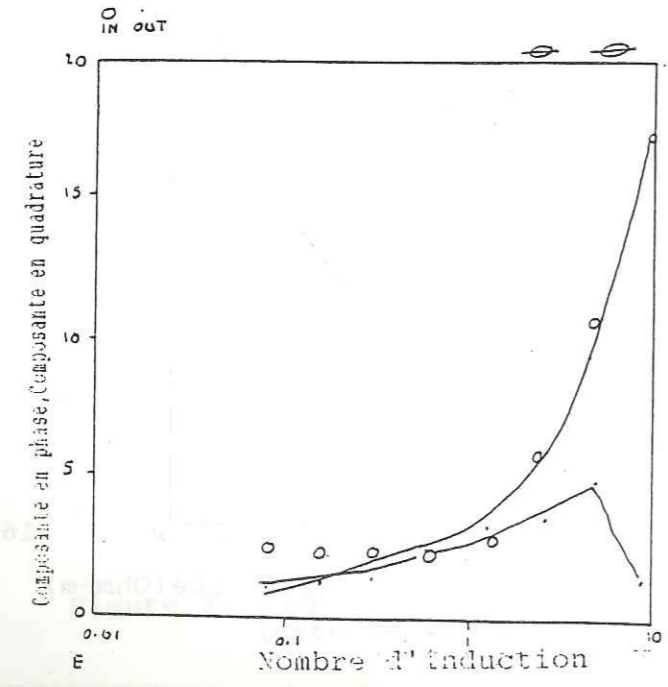
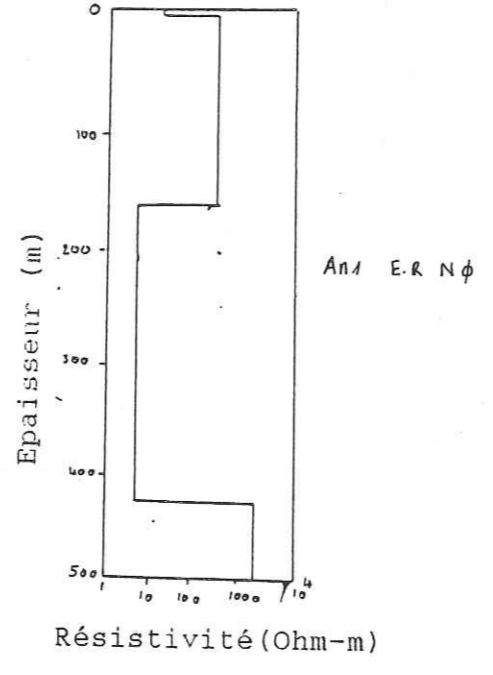
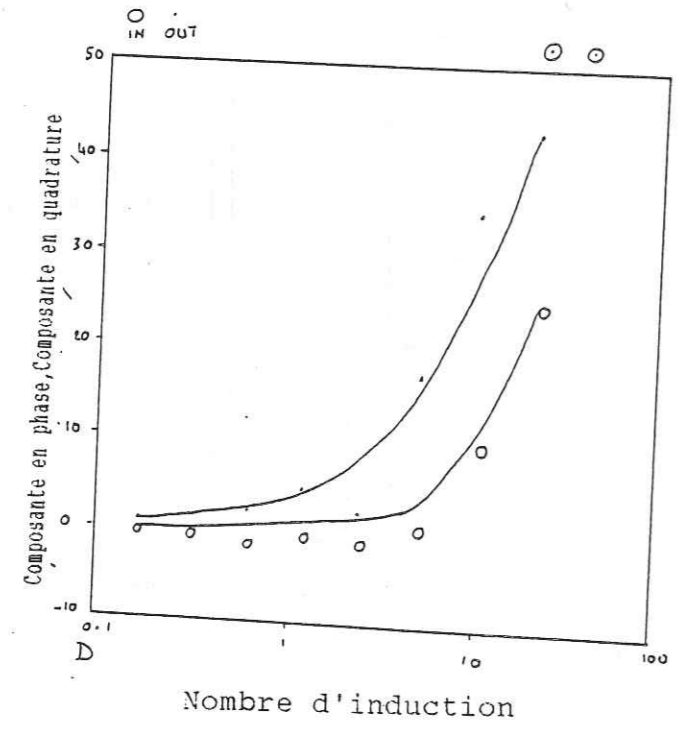
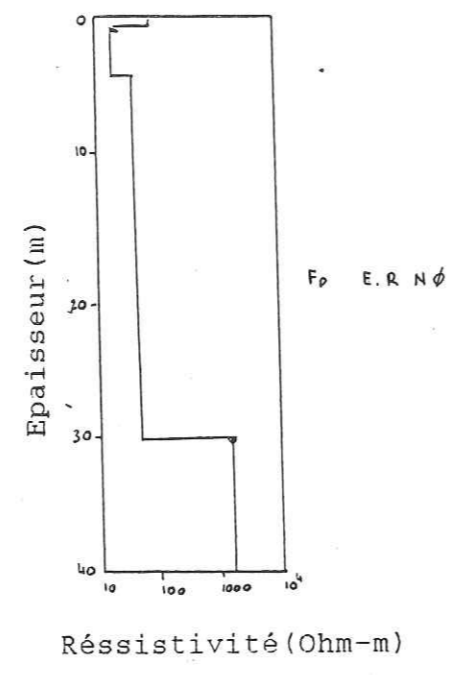
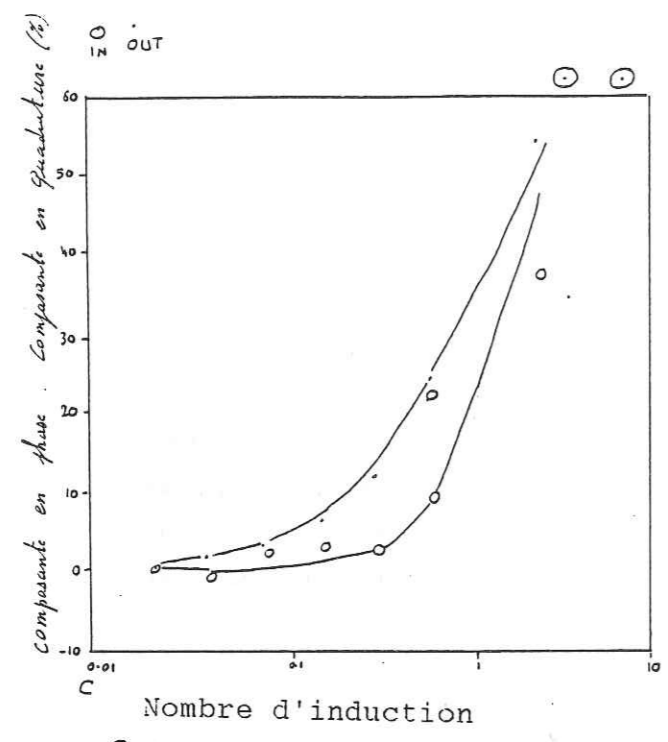


Figure 92 Disposition des profils de mesures (site de Nabmayaoghain)

Le profil d'anisotropie (figure 91) qui a été effectué au niveau du forage à haut rendement montre une courbe en cloche avec un maximum décalé par rapport au forage.
 Nous avons positionné les profils de mesures à la figure 93.

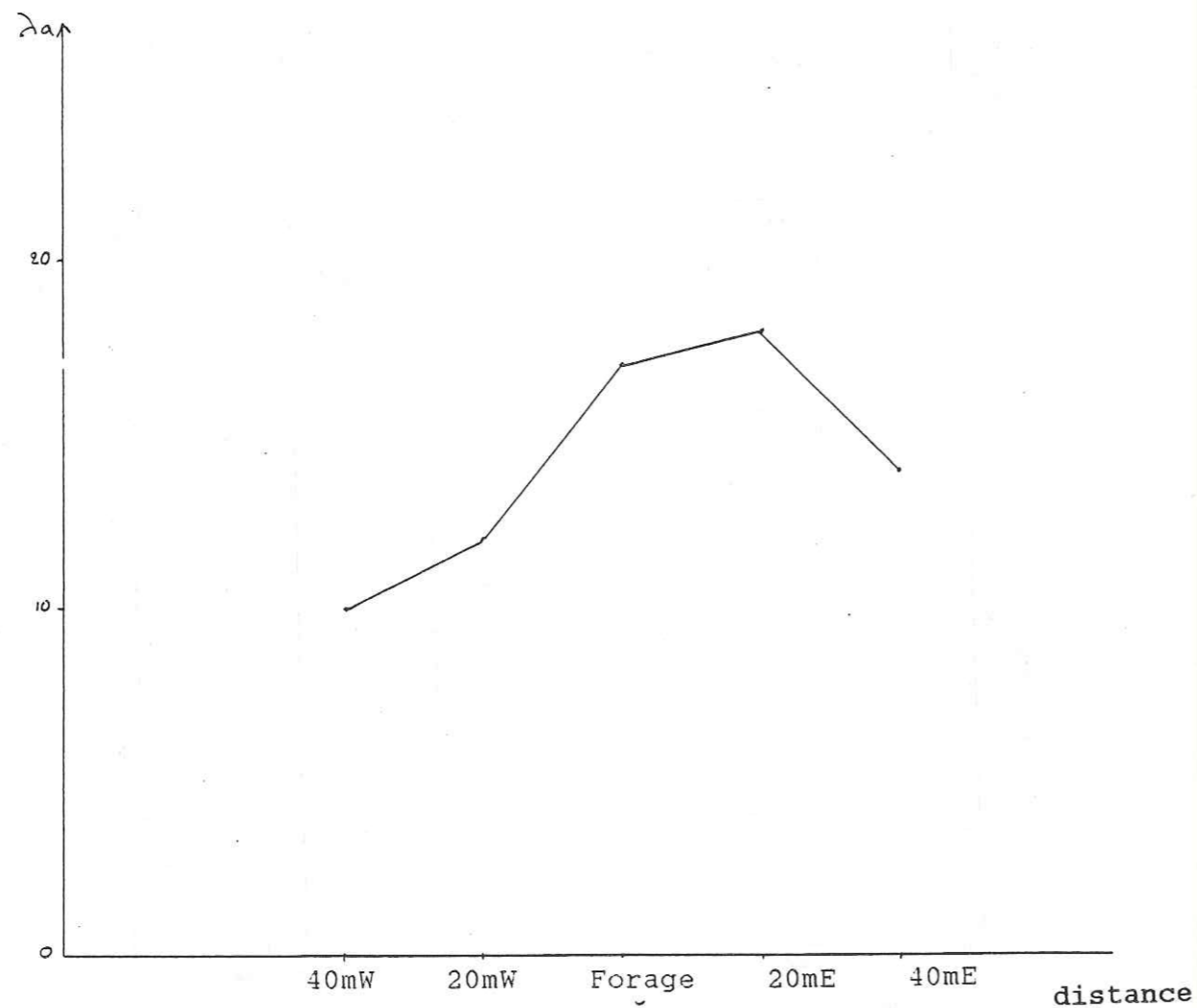


Figure 91 Profil d'anisotropie (site de Nabmayaoghain)

Plateforme 1
 Nabmayaoghain

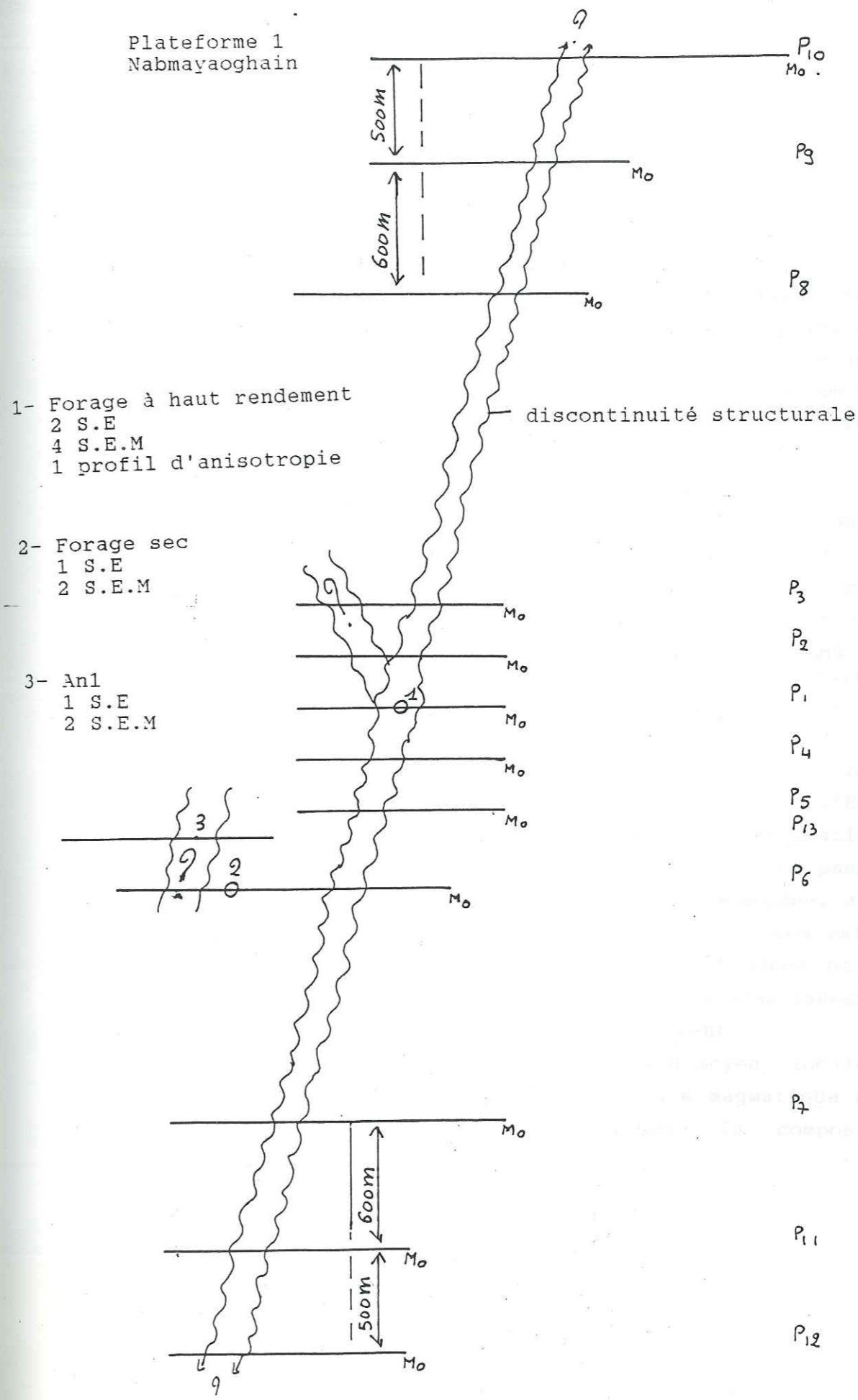


Figure 106 Position des profils de mesures (site de Nabmayaoghain)

Au regard de tous ces résultats, nous pouvons retenir les faits suivants:

-Le forage à haut rendement est implanté sur une discontinuité majeure affectant le substratum ; il est possible qu'une faille moins importante recoupe cette discontinuité au niveau du forage.

-Le forage sec est dû à une mauvaise implantation.

L'anomalie 1 pourrait donner un forage productif: nous l'avons recommandée à une école primaire située à proximité, école qui avait financé le forage sec.

La figure 100 présente le plan des investigations géophysiques ainsi qu'il matérialise la trace de la discontinuité mise en évidence.

Nous avons la confirmation de l'intérêt des profils d'anisotropie ainsi que celui des sondages électromagnétiques comparables aux sondages électriques, néanmoins il faut noter que les épaisseurs sont pour la plupart des temps surestimées.

4.4.2 le site de Boudri

Boudri, chef lieu de préfecture est situé à 10 km au Sud de l'axe Ouagadougou -Zorgo à 10 km de Zorgo. Le site de Boudri comporte trois forages dont un très productif et les deux autres complètement secs (figure 94). Ces trois forages ont été implantés à l'aide d'interprétation de photographies aériennes et de prospection géophysique électrique. Le forage productif a une profondeur de 40.5m et le log de forage montre successivement 3.5m de colluvions sableuses, 6.5m d'altérite argileuse, une frange fissurée de gabbro de 27m dans laquelle on rencontre des schistes altérés. Le socle sain se trouve à 36m de profondeur et le niveau statique à 16.24m.

4.4.2.1 levé géologique

Il n'existe pas d'affleurements à Boudri même mais les rejets récents de deux forages secs montrent pour le premier du granite à mica noir et amphiboles, tandis que dans le deuxième on rencontre une roche sombre, riche en amphibole et biotite avec néanmoins des passages riches en quartz et feldspath. A l'Est du village, sur les collines, on rencontre du granite migmatitique (faciès granodioritique) à biotite et amphibole passant latéralement à des faciès de granite gris assez homogène, altéré en boule. Des intrusions de type gabbros dans un contexte de cisaillement y sont rencontrés; elles sont intrudées par des filons de quartz. Nous avons étudié deux lames minces issues des affleurements des collines et ces lames montrent:

-pour la lame 1 : un contexte grenu à grain moyen, localement fin dans les zones recristallisées; la texture magmatique a été modifiée par des phénomènes tectoniques. la composition minéralogique est la suivante:

-35% de quartz

-25 à 30% de feldspath alcalin

-25% de feldspath plagioclase

-5% de biotite

- 2% de minéraux accessoires (épidote, zircon)
- 3% de minéraux d'altération (mica blanc, chlorite)

La deuxième lame montre une texture semblable à la première mais les grains sont plus grossiers et la texture magmatique est très modifiée avec des zones franchement recristallisées (ancien broyage?) . On a une altération hydrothermale avec une épidotisation importante. La composition minéralogique est la suivante:

- 25% de quartz à texture mosaïque plus ou moins tectonisée
- 30% de feldspath alcalin
- 10% de biotite
- 30% de plagioclase
- 3% de minéraux accessoires et de minéraux d'altération.

4.4.2.2 Etude par télédétection

La photo-interprétation (figure 94) met en évidence un réseau de linéaments très dense, caractérisé par des linéaments kilométriques. Ils ont deux directions dominantes: l'une Nord-Ouest, l'autre Nord-Est. On retrouve en plus des linéaments d'orientation Est-Ouest. Le réseau hydrographique moins dense que le réseau de linéaments a deux sens principaux d'écoulement qui correspondent aux deux directions des linéaments. Le forage positif, à haut rendement ($q=32\text{m}^3/\text{h}$) est à l'intersection de deux linéaments (Est-Ouest et Nord-Ouest) et il se trouve près d'un cours d'eau. Les deux forages secs bien que proches d'un cours d'eau ne recoupent pas des linéaments.

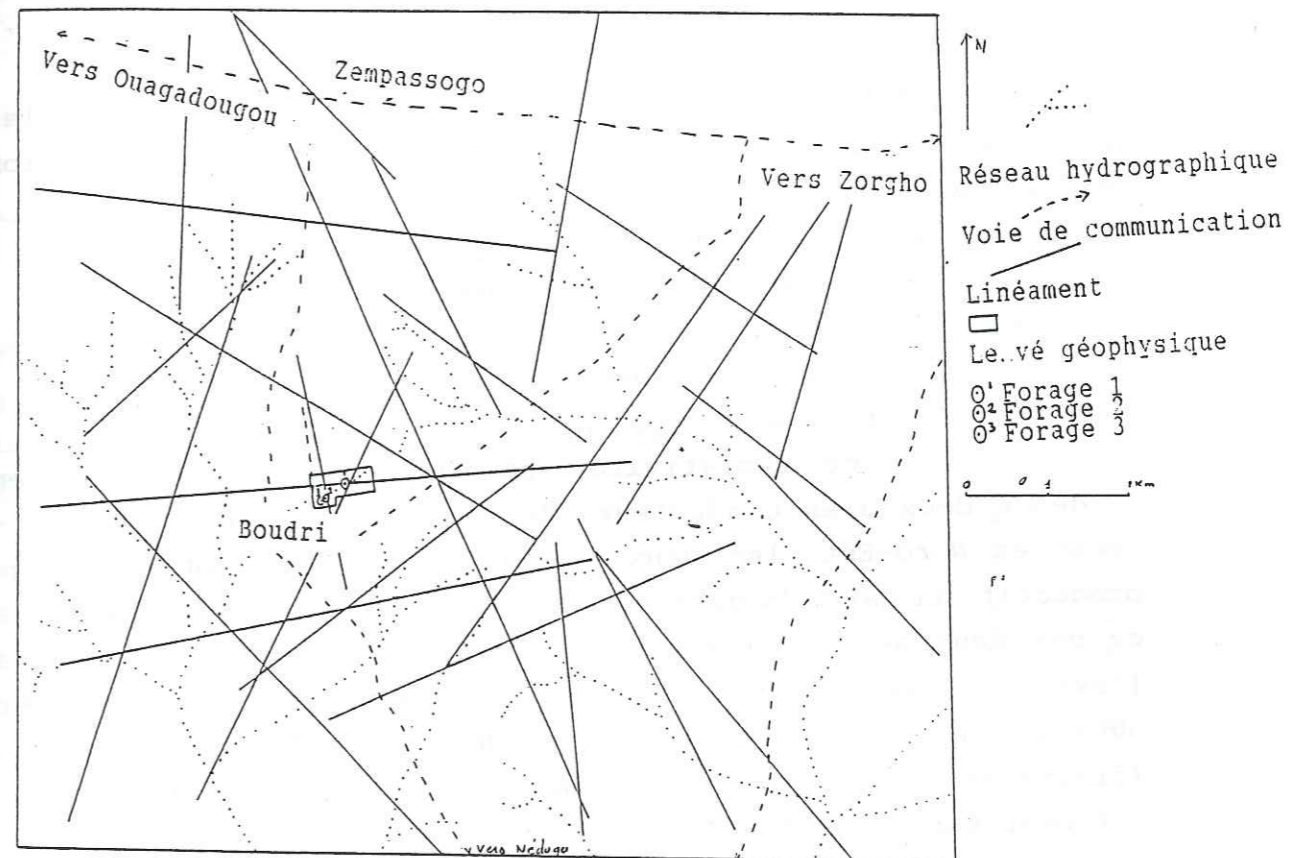


Figure 93 Carte de Photo-interprétation (site de Boudri)

4.4.2.3 Prospection géophysique

Une plateforme couvrant le forage à haut rendement et les deux forages à débit nul a été l'objet de la prospection géophysique. Nous avons réalisé:

- 10 profils électriques de 2400m
- 10 profils électromagnétiques de 3500m
- 4 sondages électriques
- 6 sondages électromagnétiques
- 2 profils d'anisotropie

La carte de résistivité apparente (figure 95) met en évidence deux axes conducteurs de directions respectives Est-Ouest et Nord-Est, les deux se recoupant au niveau du forage productif. Il est très difficile d'apprécier l'extension latérale de ces deux axes en raison des formes des anomalies; quant à l'extension longitudinale, nous avons recoupé l'axe Est-Ouest sur 500m par un profil électrique et un profil électromagnétique (figure 96). Les roches qui sont sur ce site plus bassiques, influent sur les valeurs électriques.

La carte électromagnétique (figure 97) épouse la forme de la carte de résistivité et met en évidence les deux axes conducteurs.

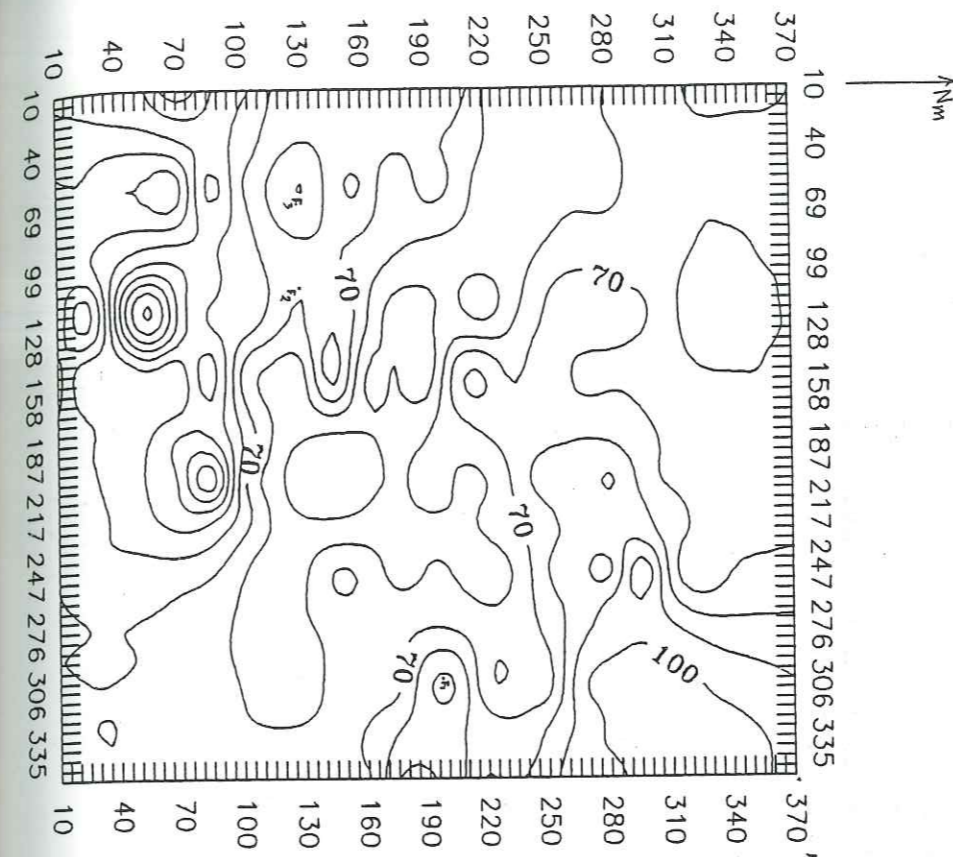
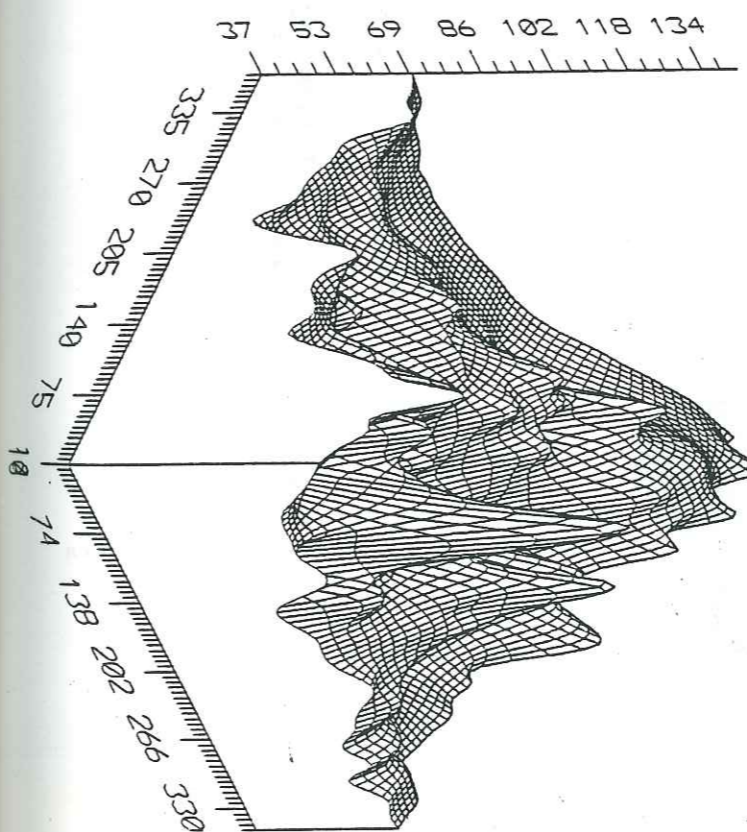


Figure 94 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Boudri)

AB=200m MN=20m Pas de mesure=10m



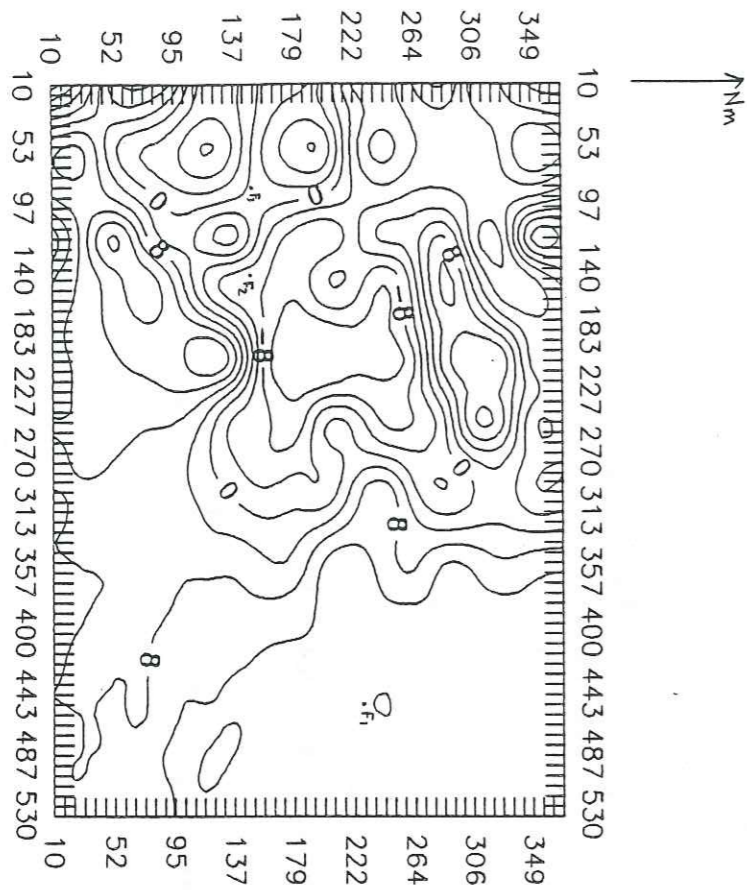
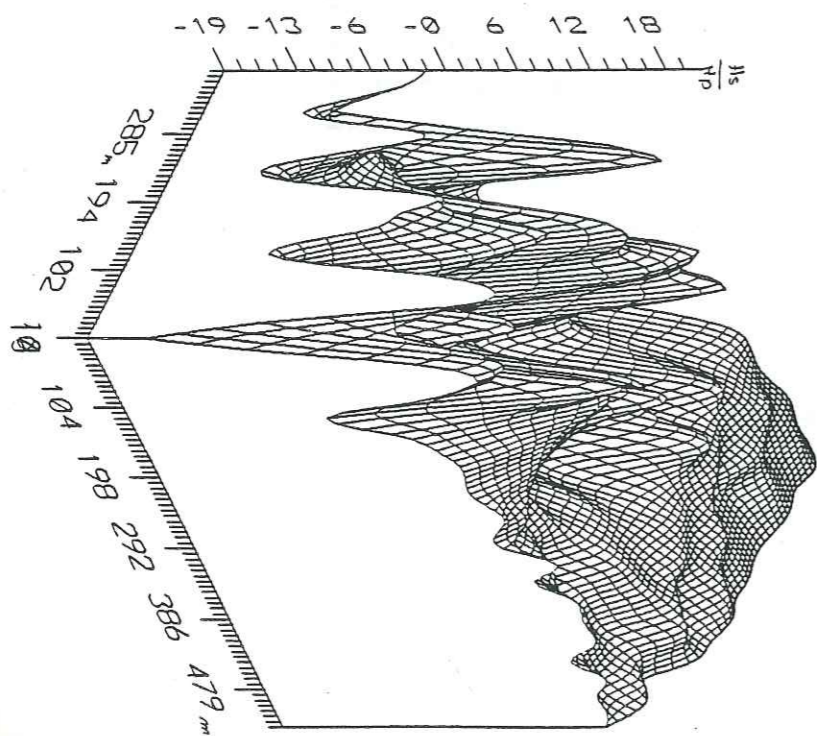


Figure 95 Carte et représentation en perspective en quadrature () , composante en quadrature (site de Boudri)

F=3520Hz

S=50m

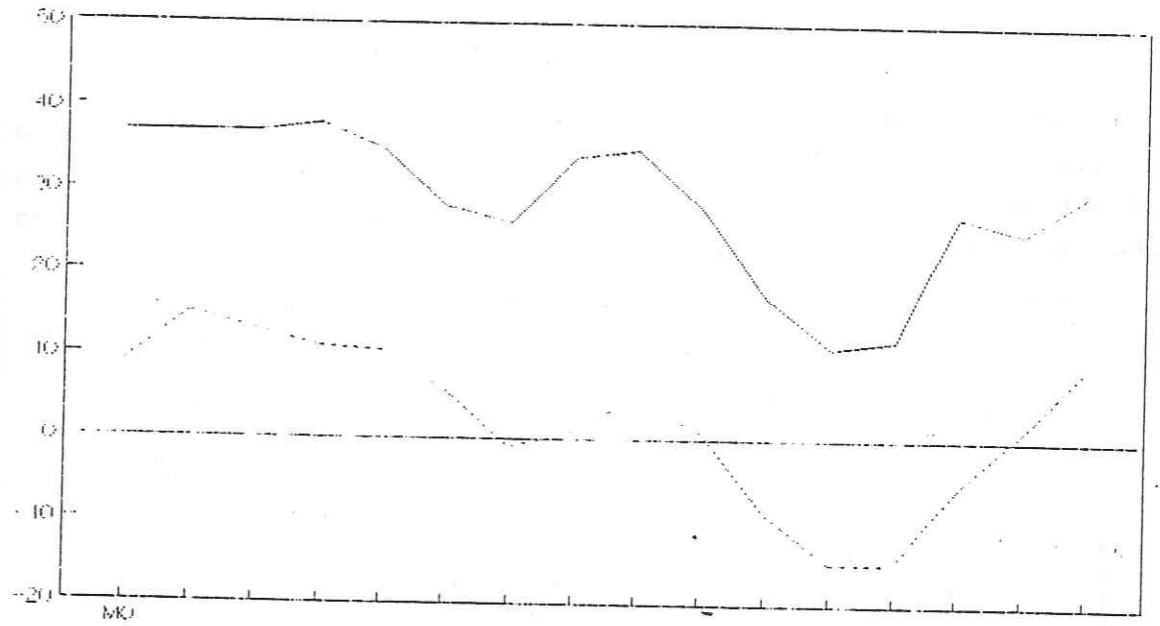
Pas de mesure=10m



SITE DE BOUDRI
ELECTROMAGNETISME MAXMIN

— PROFIL P10
F=3520 IN

--- PROFIL P10
F=3520 OUT



SITE DE BOUDRI
PROFIL DE RESISTIVITE

— PROFIL P10

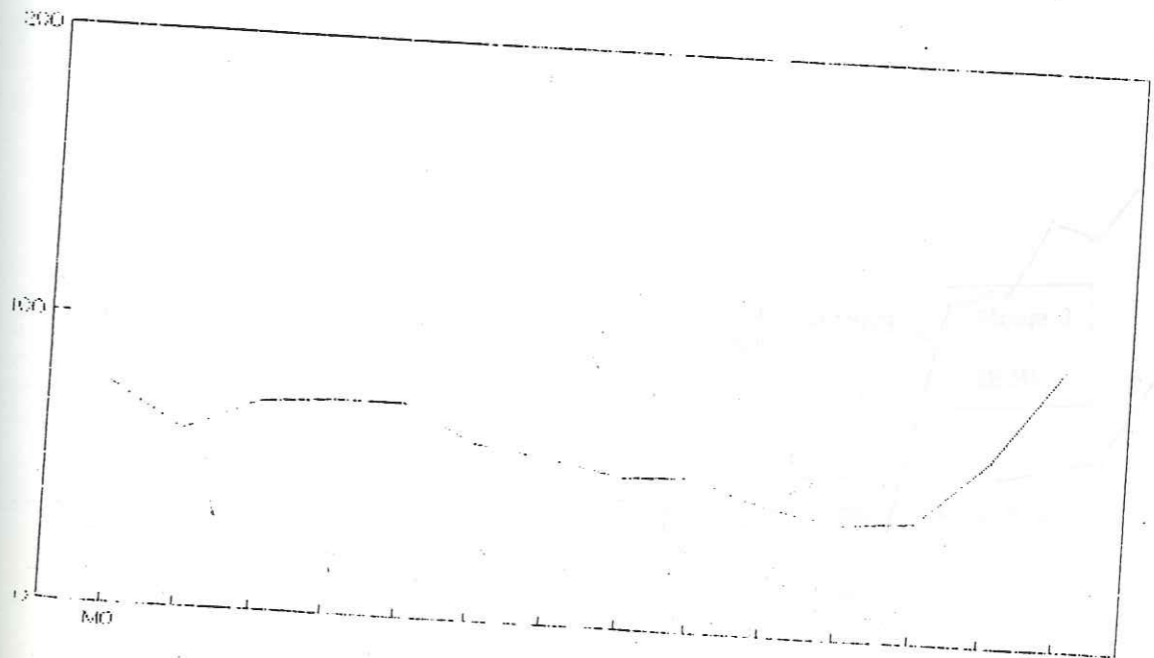
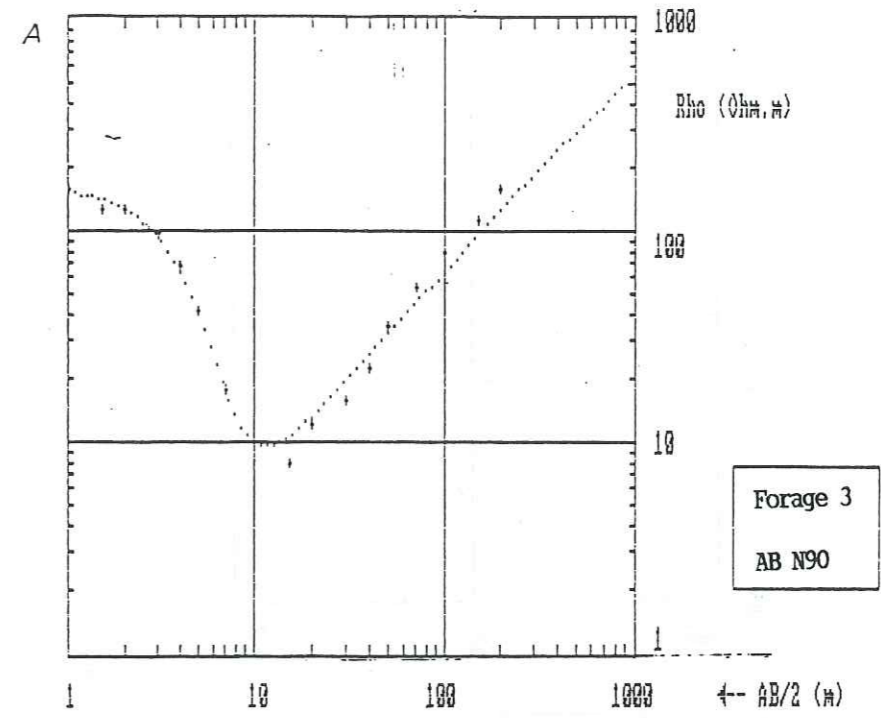
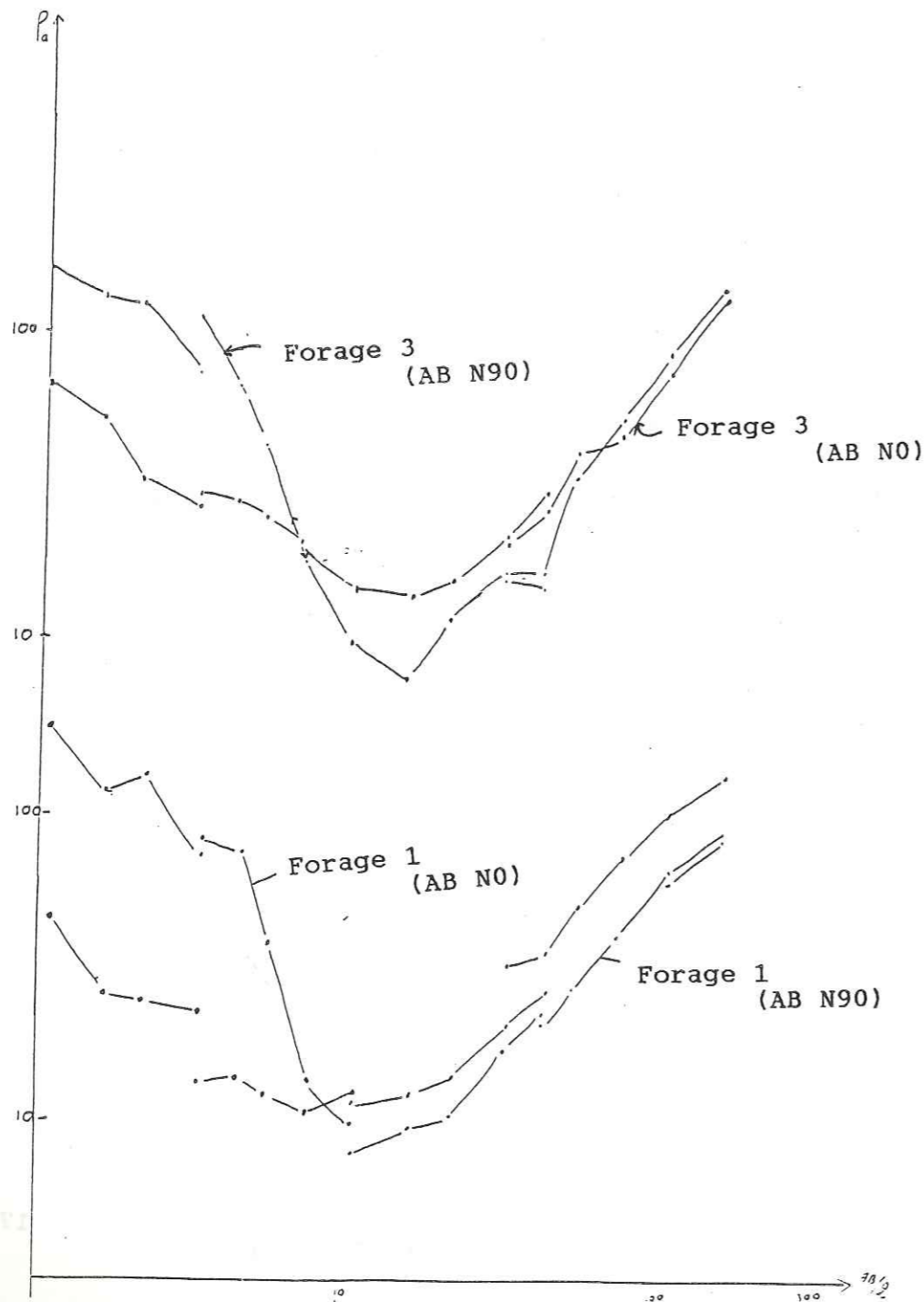


Figure 96 Profils P10 (site de Boudri)

Les quatre sondages électriques (figure 98) montrent des courbes en fond de bateau ; comme nous l'avons déjà vu avec le site de Pissi les courbes obtenues sur le forage sec présentent un V beaucoup plus fermé . L'épaisseur des arènes, surtout très humides , y est peu épaisse (figures 99a,99b,99c,99d)

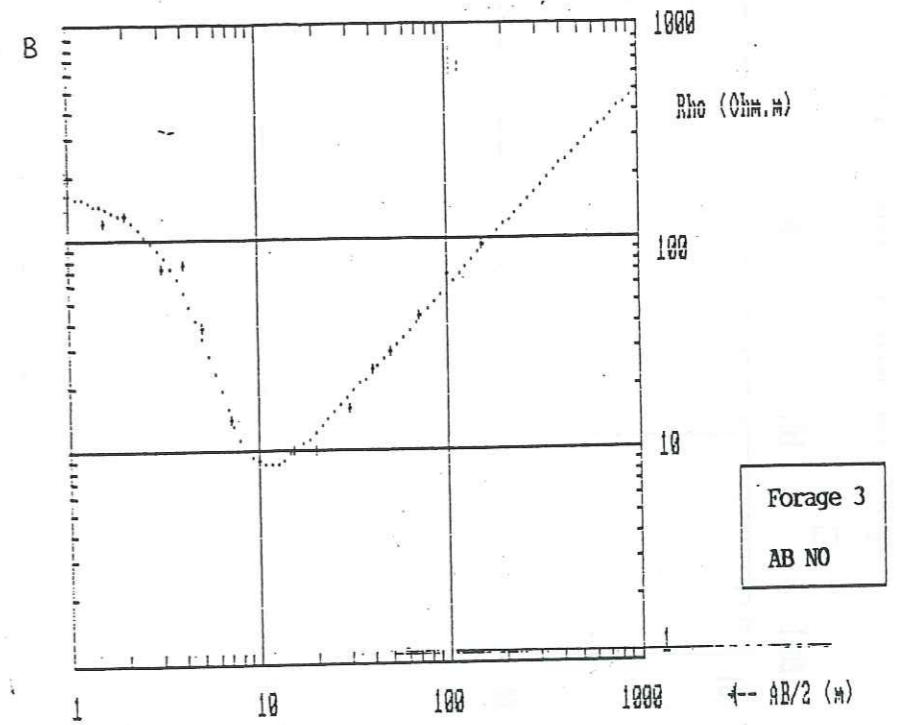
Les sondages électromagnétiques (figures 100a,100b,100c,100d,100e,100f) montrent une frange fissurée plus importante au niveau du forage positif qui se traduit par un décalage vers la droite pour la courbe du forage positif.

Figure 97 Courbes de sondages électriques (site de Boudri)



LIMITES D'EQUIVALENCE (Erreur max = 10 %)

couche	E min	E max	R min	R max
1	0.45	0.55	146.84	177.32
2	1.23	1.57	132.71	170.06
3	5.21	8.83	4.17	7.07
4	0.00	41.43	0.00	157.88
5				inf.

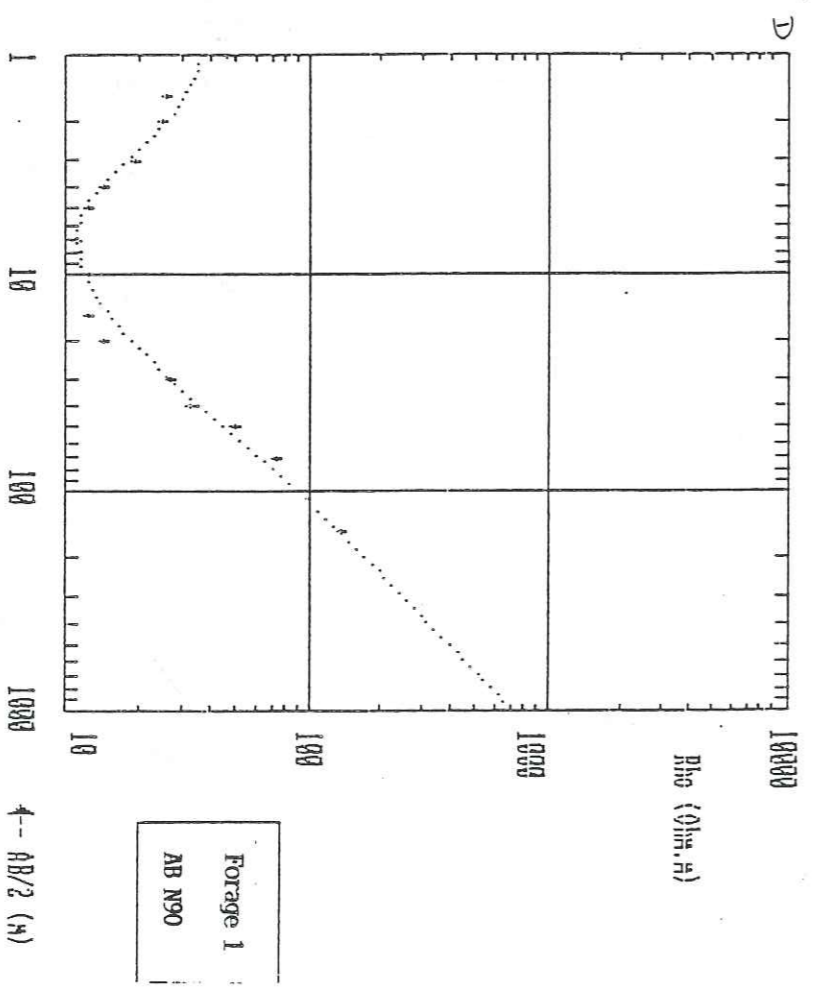
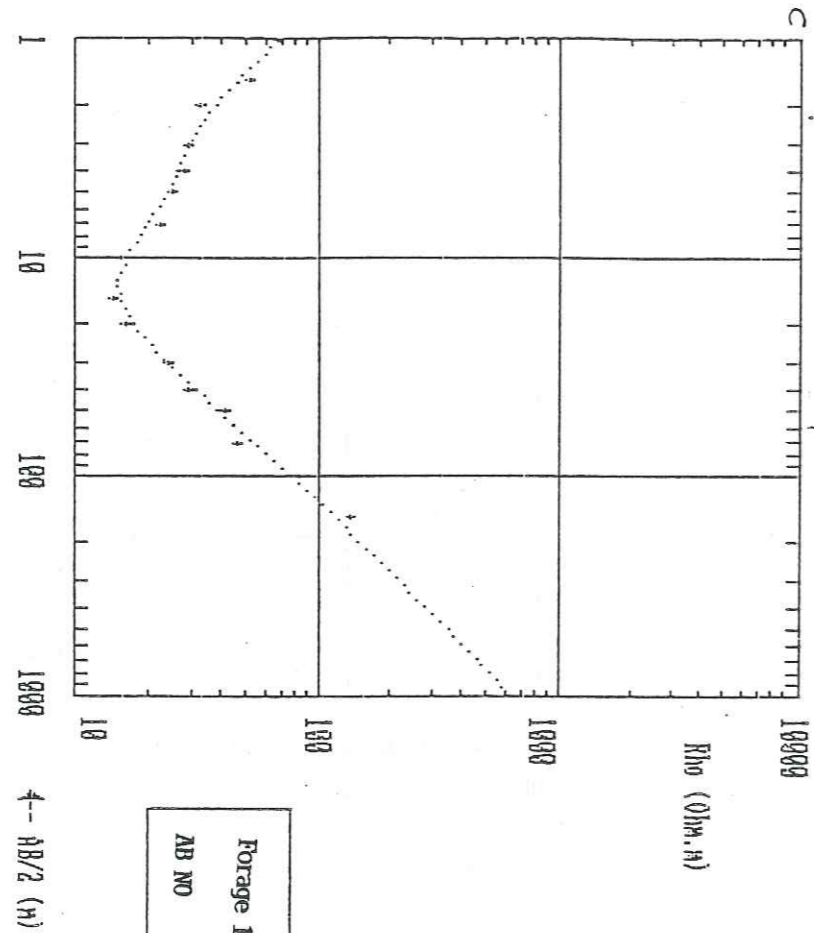


LIMITES D'EQUIVALENCE (Erreur max = 10 %)

couche	E min	E max	R min	R max
1	0.44	0.54	156.26	201.10
2	1.20	1.49	129.89	161.31
3	5.23	9.29	4.16	6.83
4	0.00	49.91	0.01	194.74
5			579.25	inf.

LIMITES D'EQUIVALENCE (Erreur max = 10 %)

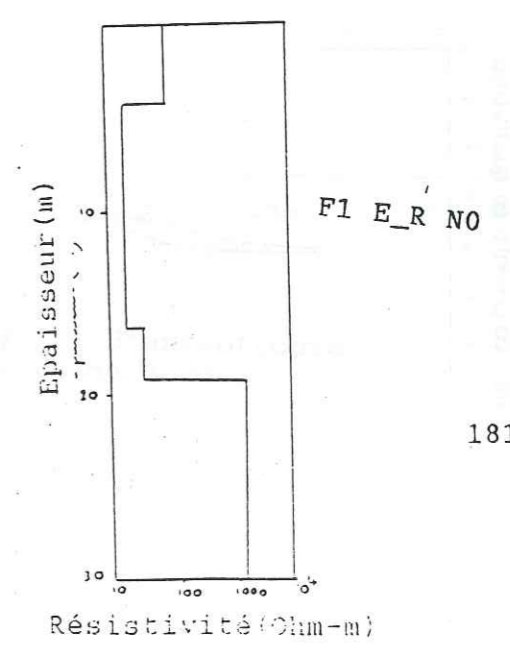
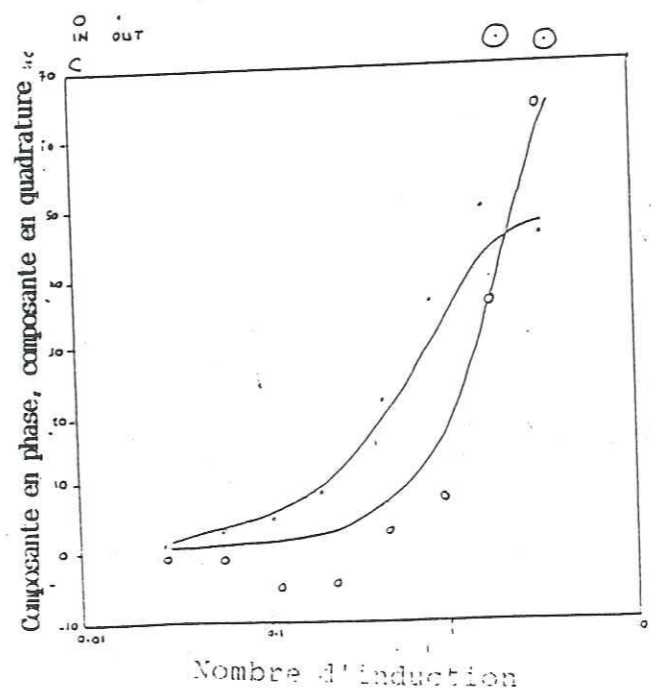
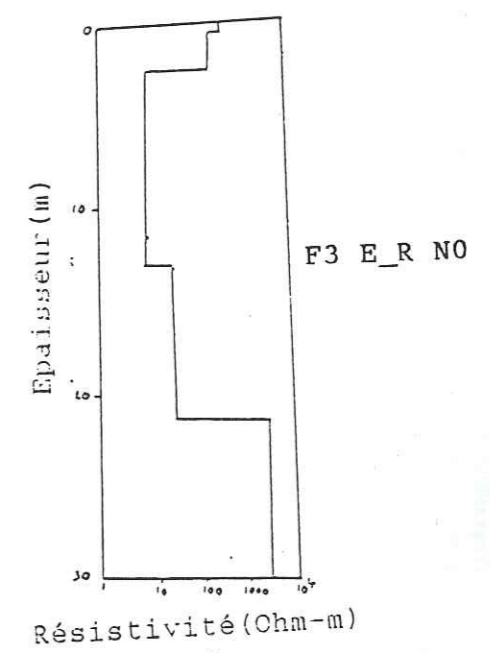
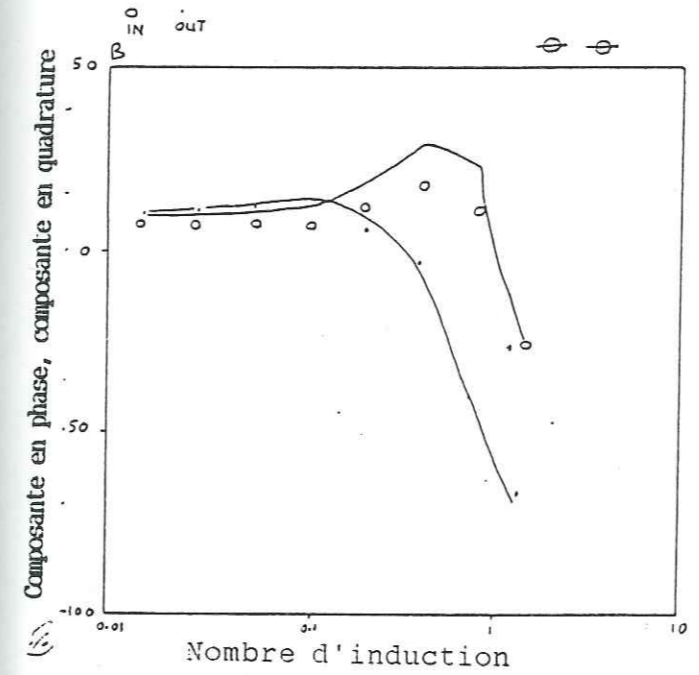
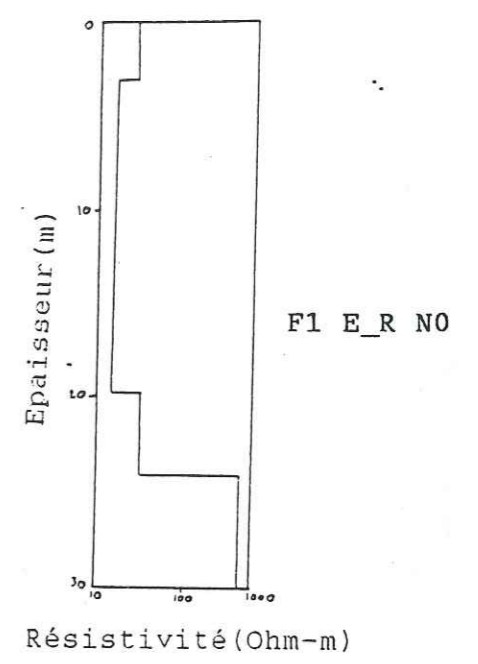
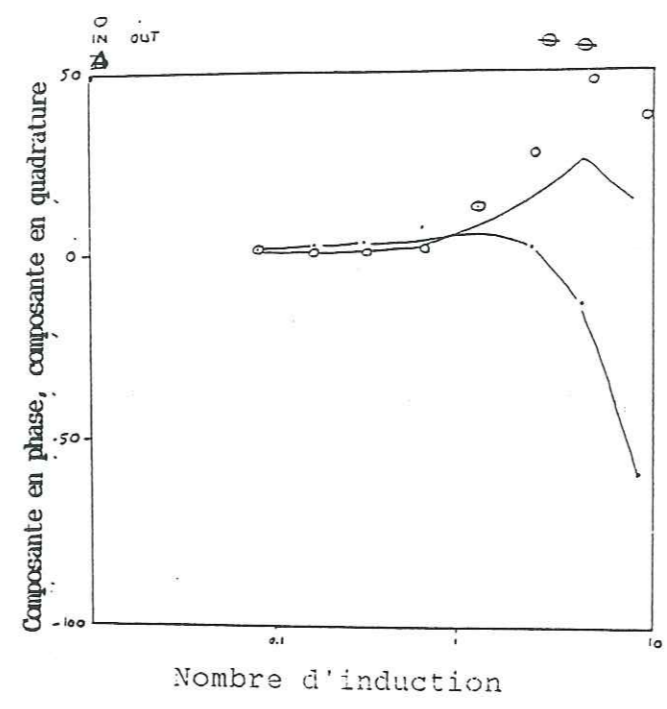
Couche	E min	E max	R min	R max
1	0.43	0.67	79.33	123.71
2	2.93	3.76	24.63	31.69
3	6.04	10.75	6.27	11.17
4	9.00	32.57	0.00	433.03
5			inf.	inf.

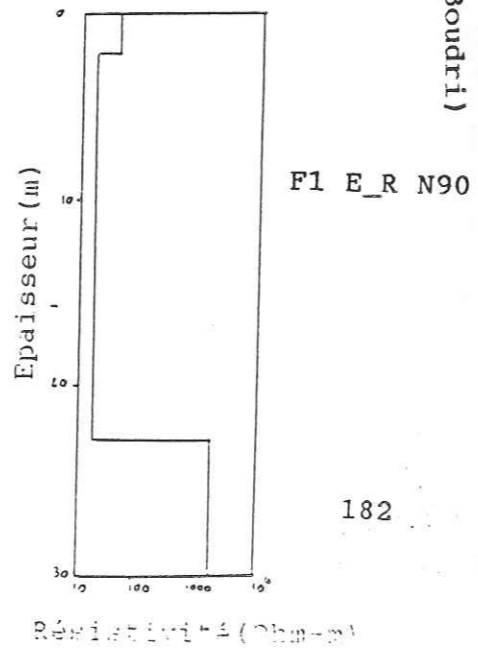
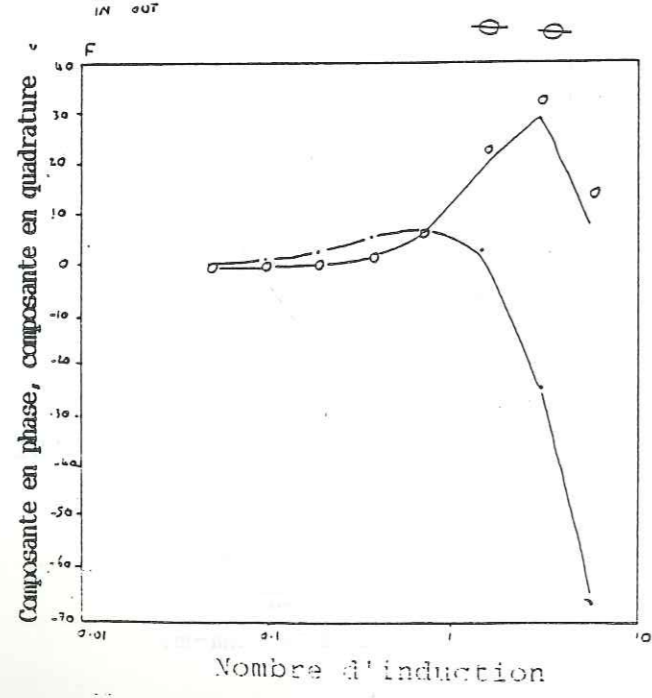
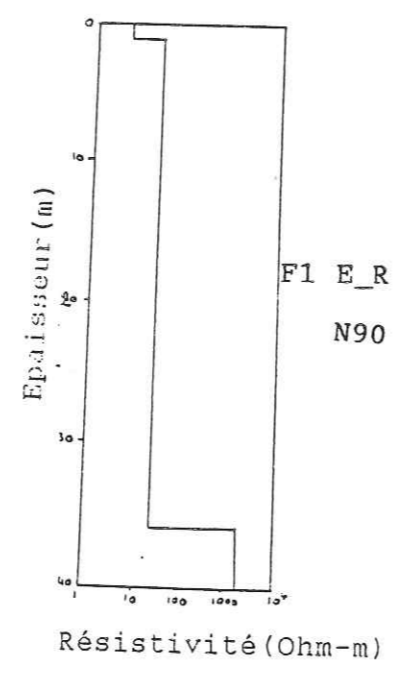
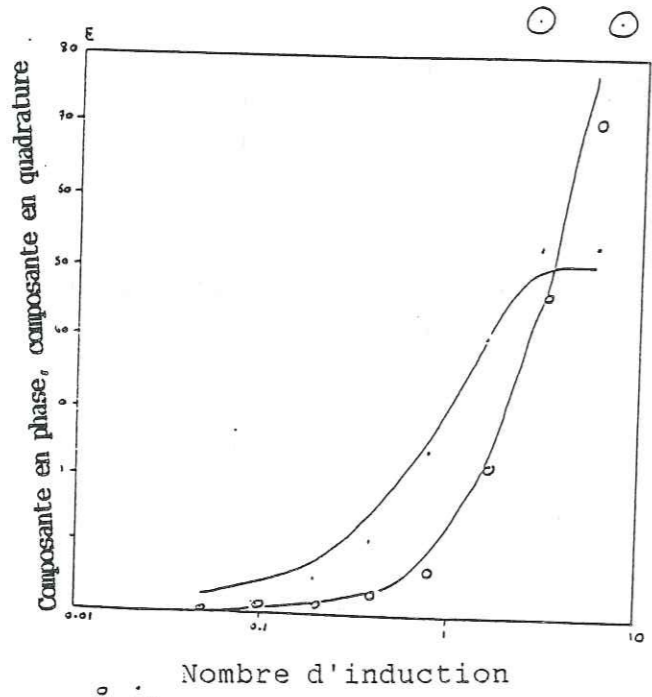
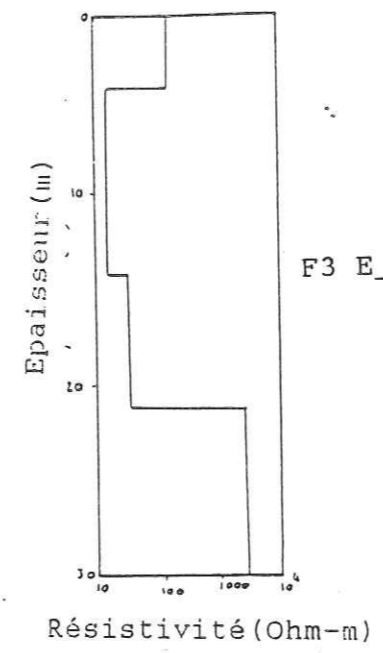
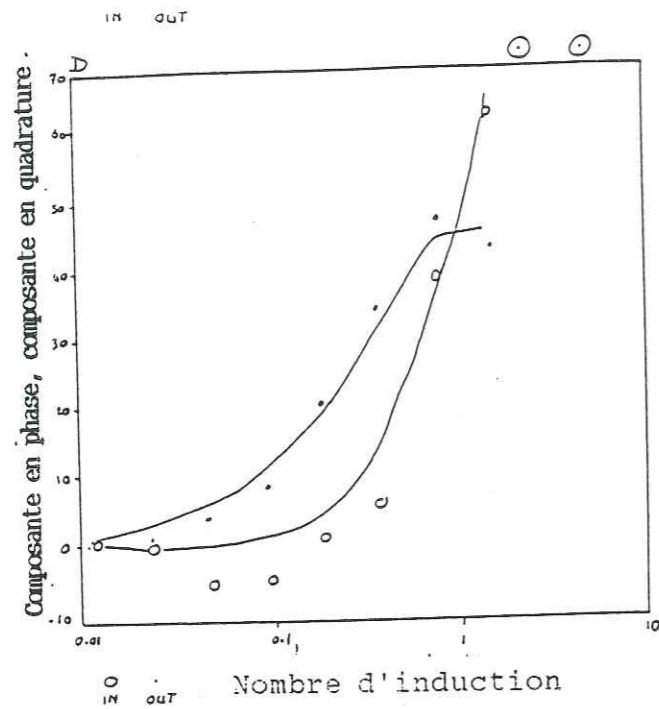


LIMITES D'EQUIVALENCE (Erreur max = 10 %)

Couche	E min	E max	R min	R max
1	0.93	1.23	35.11	46.46
2	7.33	9.47	7.99	10.33
3	0.00	51.85	0.02	379.30
4			780.83	inf.

Figure 98 Courbes de sondages électriques (site de Boudri)





F3 E_R N0

Figure 99 Courbes de sondages électromagnétiques (site de Boudri)

F1 E_R N90

182

Les profils d'anisotropie (figure 10) montrent une courbe en dents de scie pour le forage positif et le forage sec. Il faut néanmoins remarquer que la courbe du forage positif reste au dessus de celle du forage sec sauf pour un seul point. La position des profils de mesures est présentée par la figure 102

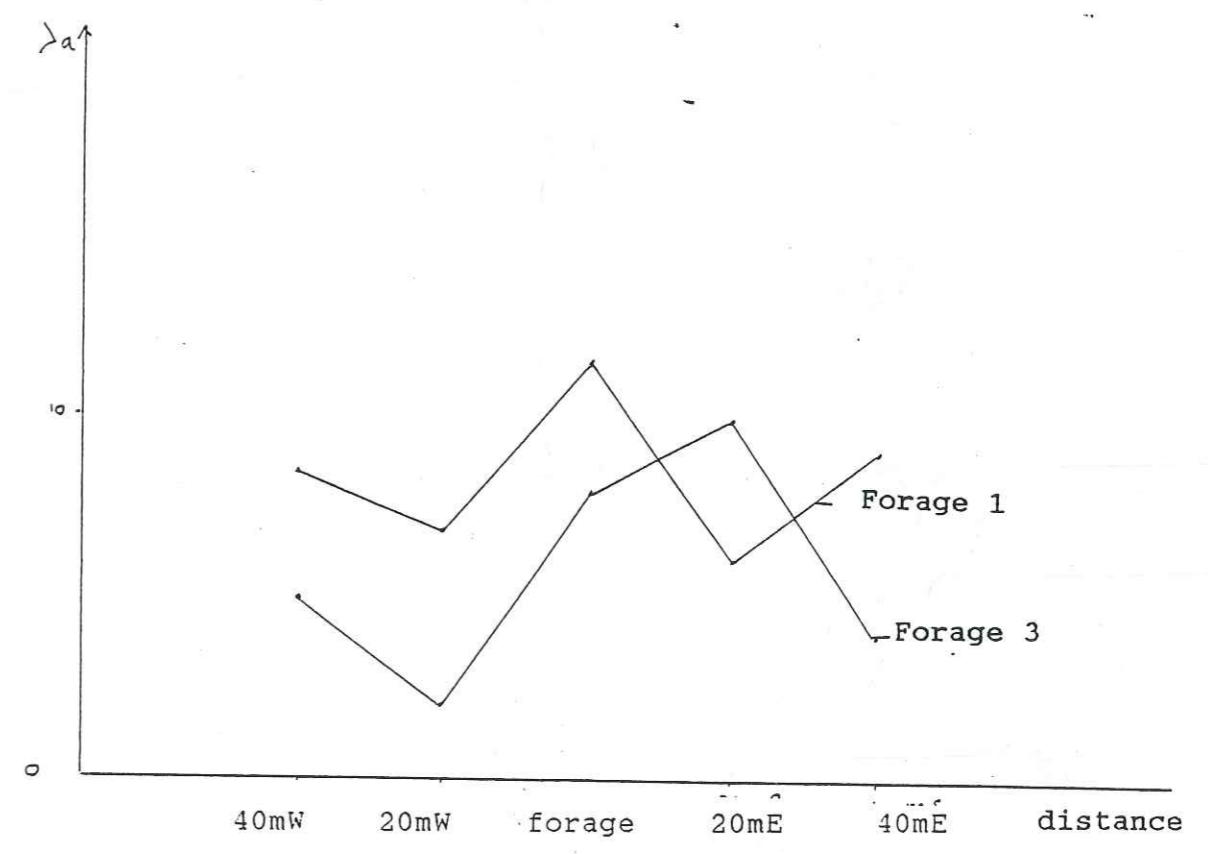


Figure 100 Profil d'anisotropie (site de Boudri)

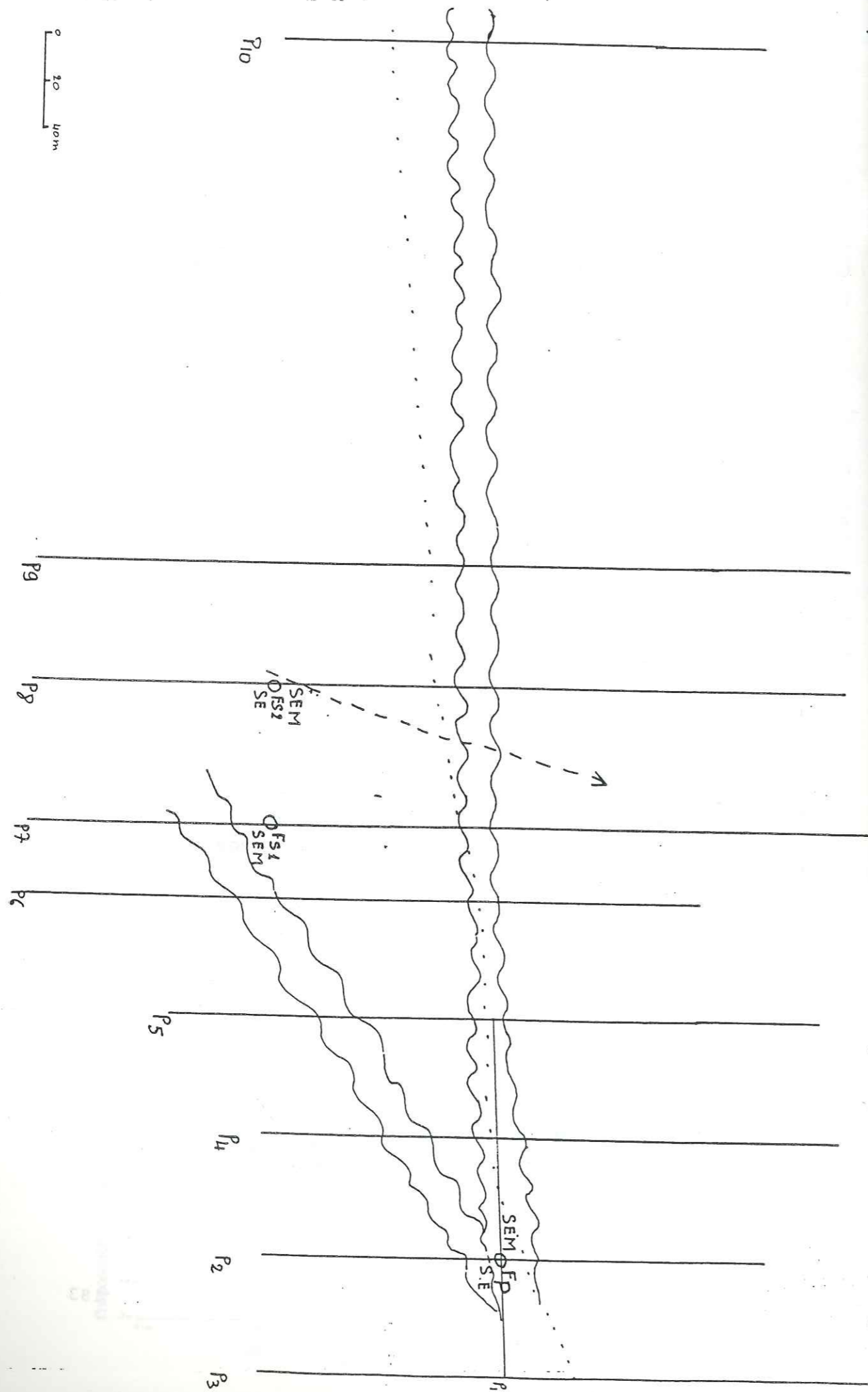


Figure 101 Disposition des Profils de mesures (site de Boudri)

4.4.2.4 cartographie d'indice biologique

Nous avons cartographié des termitières qui sont en nombre très important dans les environs des forages. Nous avons pu ainsi recenser 39 termitières dans un secteur de 60ha
 La figure 10 montre un alignement préférentiel dans la direction Nord-Est qui confirme le caractère aquifère des accidents présentant cette direction (A.N. Savadogo 1984).

Figure 102 Cartographie d'indices biologiques (termitières)

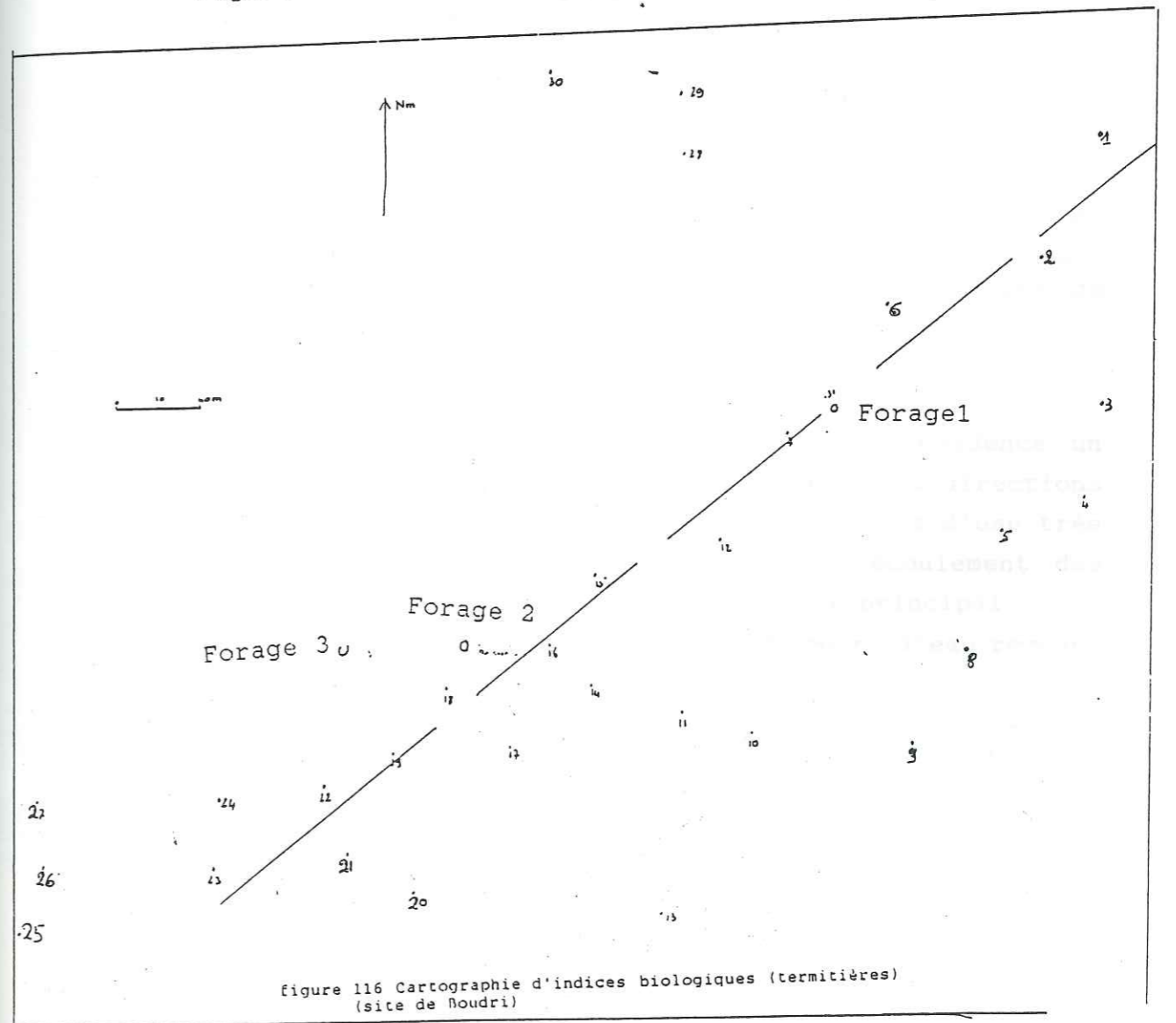


Figure 116 Cartographie d'indices biologiques (termitières) (site de Boudri)

Ainsi au regard de tous ces résultats nous pouvons conclure que:

-Le forage positif semble être sur une zone de cisaillement mais à notre avis l'épaisseur d'argile très humide apportée par le cours d'eau influe négativement sur les mesures.

-Les deux forages secs sont décalés par rapport aux discontinuités et bien qu'il existe des altérites humides, l'absence d'une frange fissurée semble responsable de l'échec.

On a une bonne concordance entre les cartes électrique et électromagnétique d'une part et entre les sondages électriques et électromagnétiques d'autre part. Les profils d'anisotropie sont caractéristiques et démontrent une fois de plus leur intérêt déjà évoqué sur les autres sites.

4.4.3 Le site de Toéssin

Le village de Toéssin se situe au Sud-Ouest à 4 km de Mogtédou, et à 2 km au Sud de l'axe Ouagadougou-Koupèla (figure 104). Un seul forage y a été investigué; ce dernier a été implanté sur la base de photo-interprétation de prospection géophysique électrique. Le forage se situerait au noeud de linéaments, l'un Nord-Sud et l'autre Nord-Est, sur un accident principal en bordure de marigot. Le forage a une profondeur de 60m et le log de forage montre 6m d'argile sableuse suivis d'une altération de schistes de 6m. Le substratum sain (schistes) se trouve à 57m de profondeur surmonté de 45m de schistes graphiteux fissurés de 45m et le niveau statique à 18.9m.

4.4.3.1 cadre géologique

Contrairement aux autres sites qui se situent sur des granito-migmatites Toéssin est dans une zone de schistes birrimiens.

En effet le levé géologique montre des schistes orientés Nord-Est à Est-Ouest, très altérés en surface. On retrouve beaucoup de filons très dispersés rendant toute mesure de direction impossible.

4.4.3.2 Photo-interprétation

La photo-interprétation (figure 104) met en évidence un réseau très dense de linéaments orientés dans deux directions prédominantes: Nord-Ouest et Nord-Est. Un seul cours d'eau très ramifié parcourt la zone du site. Le sens d'écoulement des affluents est Nord-Est tandis que cours d'eau principal coule vers le Nord-Est. Le forage qui est proche du cours d'eau recoupe un linéament de direction N45°E

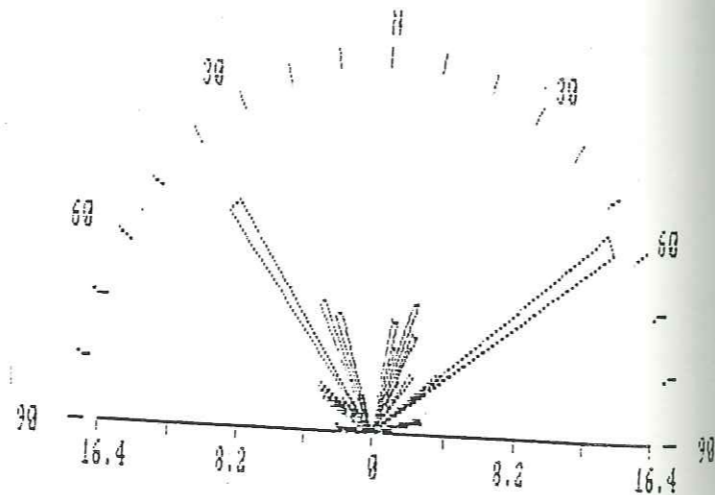
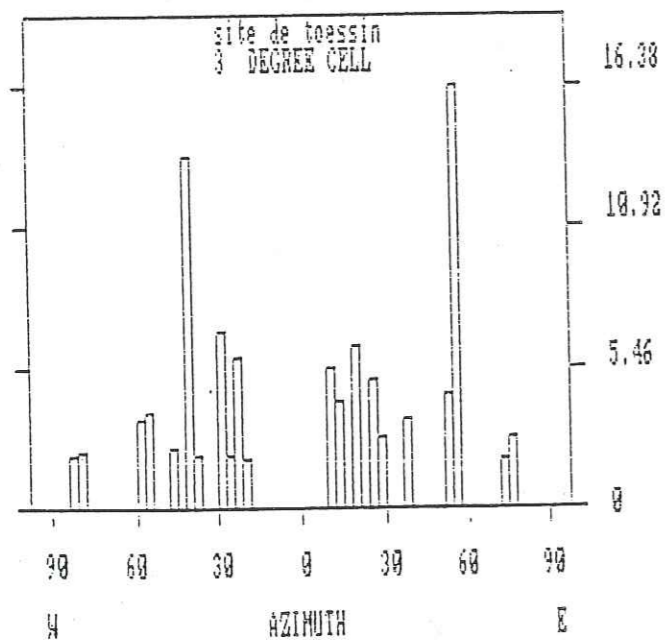
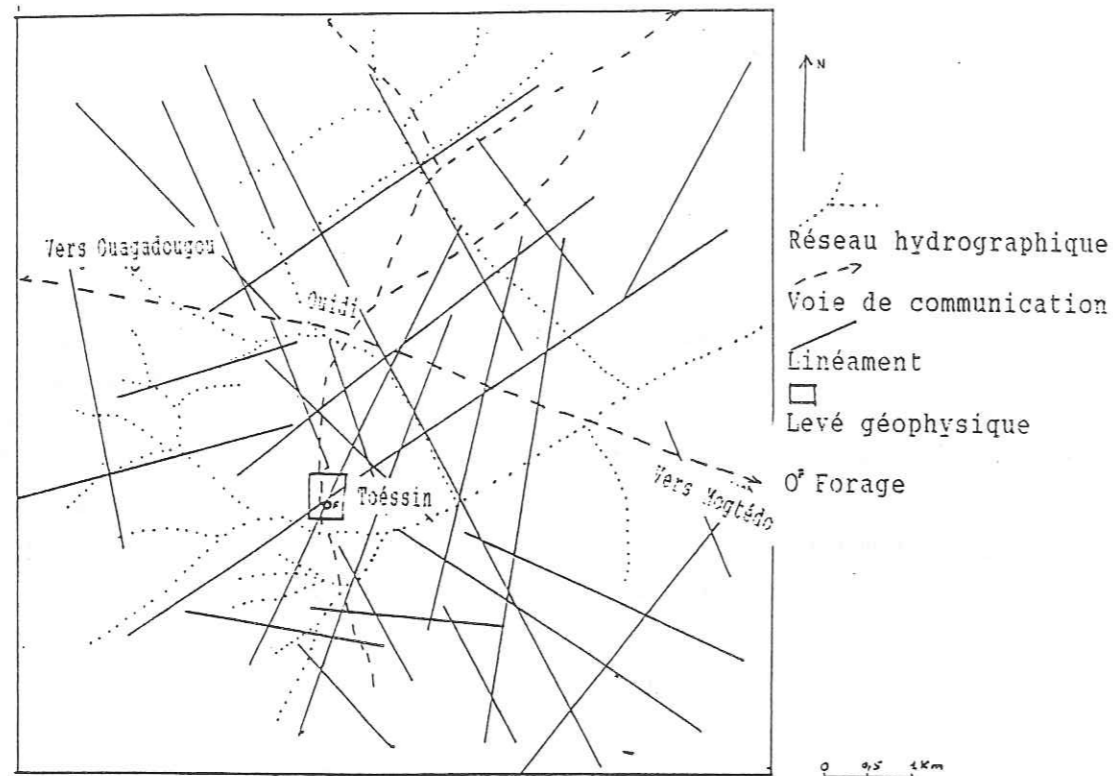


Figure 103 Photo-interprétation (site de Toéssin)

4.4.3.3 Prospection géophysique

Le levé géophysique a concerné une plateforme autour d'un forage à haut rendement. Nous avons réalisé:

- 6 profils électriques de 2250m
- 9 profils électromagnétiques de 3000m
- 2 sondages électriques
- 14 sondages électromagnétiques
- 1 profil d'anisotropie

Les mesures électriques ont été particulièrement difficiles en raison de l'altération argileuse très importante en surface. (Il faut souligner en outre que la zone a reçu une pluie la veille des mesures). Les mesures électromagnétiques devraient théoriquement connaître le même sort mais la présence de filons a effacé l'effet d'une première couche très conductrice.

La carte d'isorésistivité apparente (figure 105) met en évidence deux axes conducteurs d'orientation Nord-Est et Nord Nord-Ouest qui se recoupent au niveau du forage.

La carte électromagnétique (figure 106) ne met en évidence qu'un seul axe Nord-Est.

Sur la carte de résistivité, il est difficile de déterminer l'extension latérale des conducteurs mais la carte électromagnétique permet d'attribuer une extension latérale de 40 à 50 m à l'axe Nord-Est.

Figure 105 Carte et représentation en perspective des valeurs de $(\frac{H_s}{H_p})$, composante en quadrature (site de Toéssin)

F=3520Hz S=50m Pas de mesure=10m

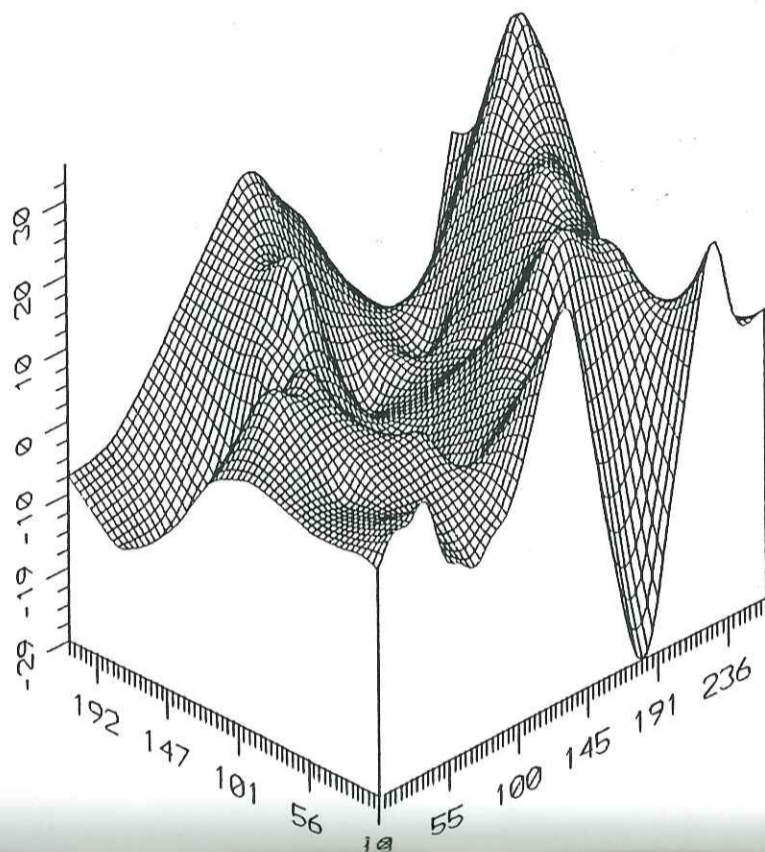
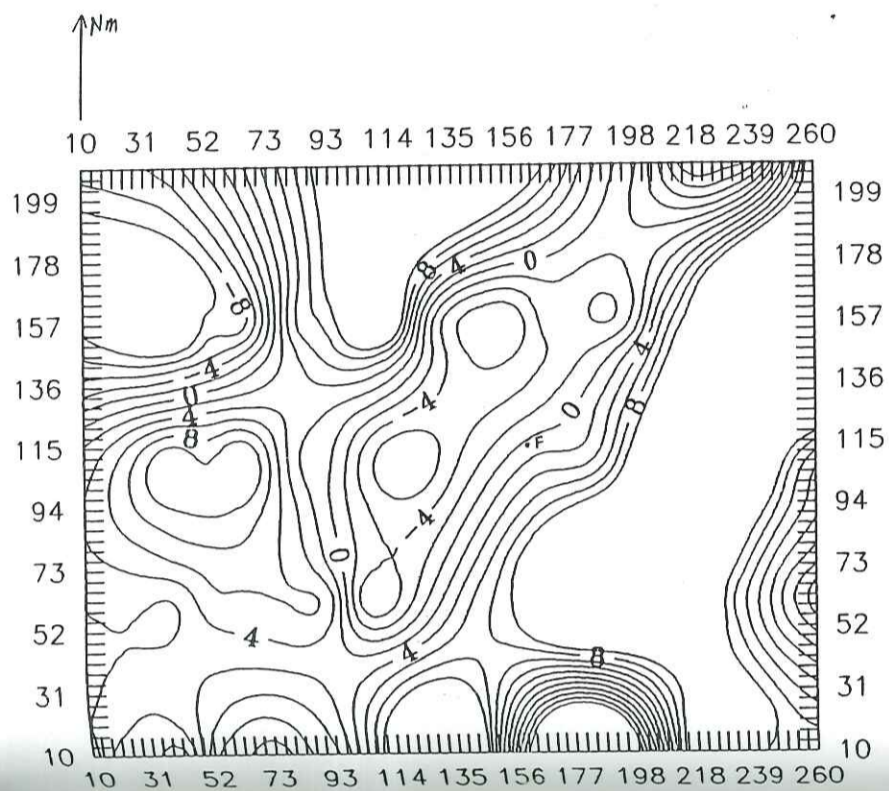
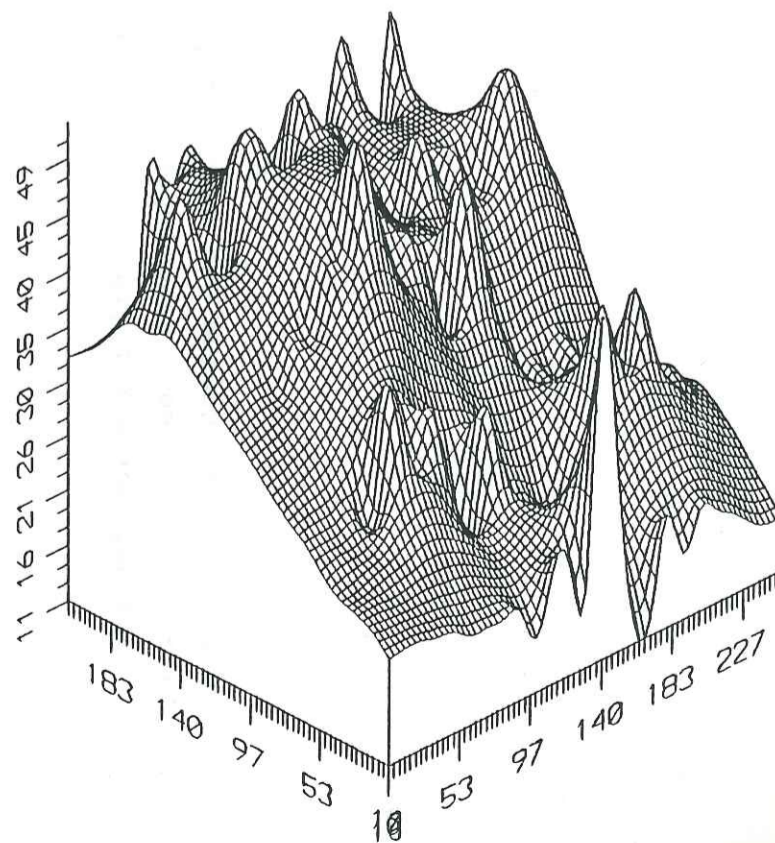
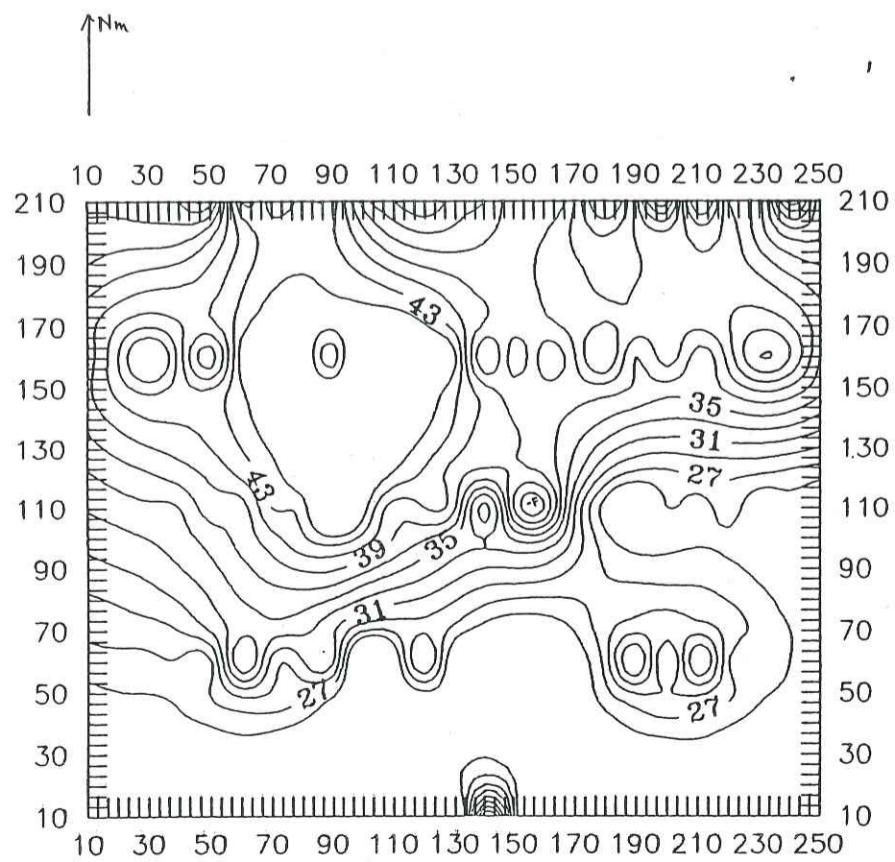
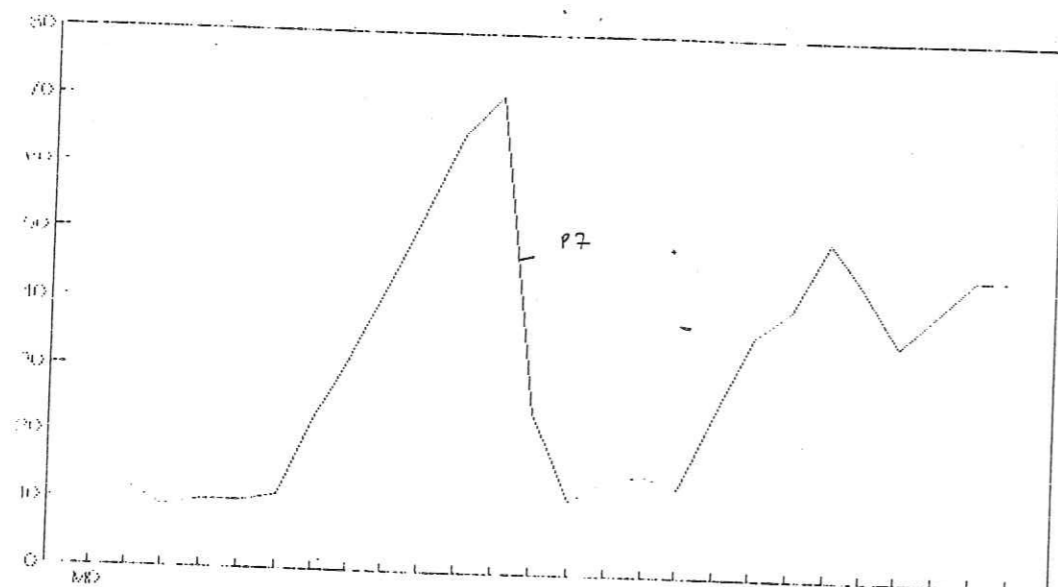


Figure 104 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Toéssin)

AB=200m MN=20m Pas de mesure=10m



Longitudinalement, l'axe Nord-Est a été recoupé au Sud-Ouest à 600m du forage où existe un deuxième forage productif (figure 107, profil 7) et au Nord-Est sur 1500m par des profils électromagnétiques (figure 107 profils 8 et 9).



SITE DE TOÉSSIN
PROSPECTION ELECTROMAGNETIQUE

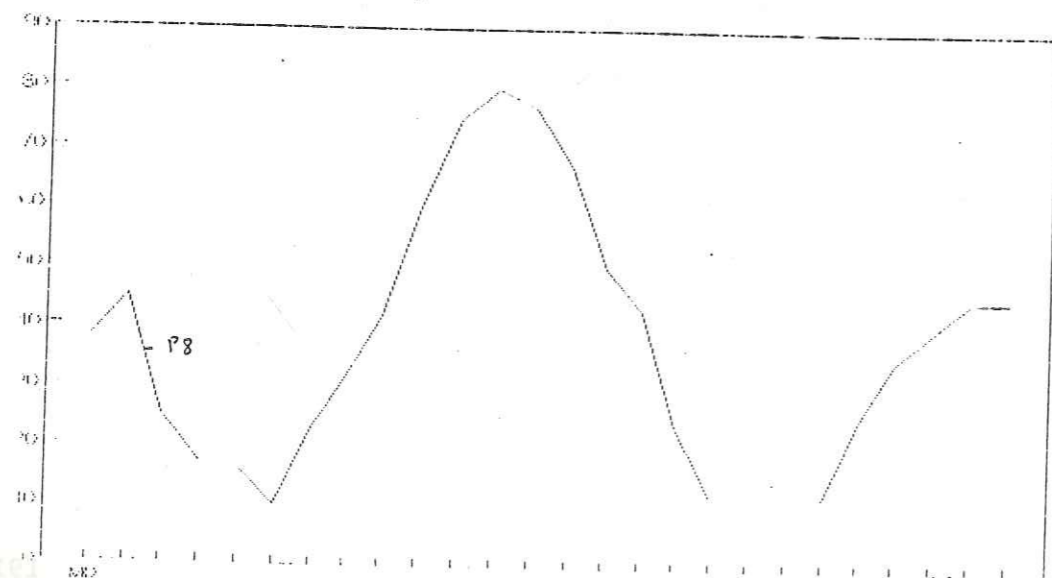


Figure 106 Profils électromagnétiques (site de Toéssin)

Les deux sondages électriques montrent deux courbes dont les valeurs de résistivité restent basses avec AB/2 croissant. L'interprétation (figure 108) met en évidence une frange fissurée très épaisse, l'épaisseur minimale étant de 75m.

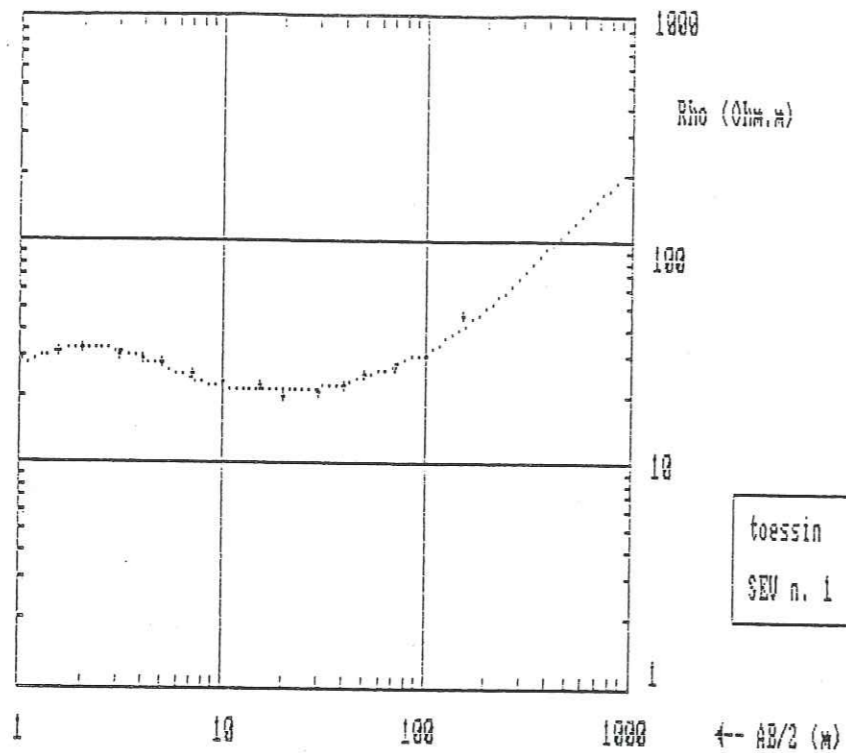
Nous avons réalisé des sondages électromagnétiques pluridirectionnels pour pouvoir étudier l'influence de la direction sur les résultats. Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus.

Direction Emetteur - Récepteur	N15		N45		N75		N105		N135		N165		SONDAGE ELECTRIQUE		
	BV	BH	BH	BV	BH	BV	BH	BV	BH	BV	BH	BV	AB N90	BB N0	
1	Epaisseur	.6	.5	.4	.6	.4	.6	2	3.4	5	14	5	6	.5	.5
	Résistivité	7	20.5	14	1.11	2.3	1.05	5.25	25	51	43	125	55	20.5	20.7
2	Epaisseur	.5	.15	.5	.23	.23	.23	.23	.23	.23	.24	.10	21.5	.54	.6
	Résistivité	53	66	57	40	40	39	39	43	34	40	7	37.5	56	66
3	Epaisseur	22.5	44.5	45	7	6.5	7.4	6.2	12	10	13	190	93	16	29
	Résistivité	26	27	42	28	34	28	45	44	6	21	139	920	20	20.5
4	Epaisseur	96	71	84	99	82	80	105	33	63	64			145	105
	Résistivité	127	40	79	119	102	63	55	26.5	220	217	2015	230	33.5	38.5
5	Epaisseur														
	Résistivité	2057	2000	2062	2066	2066	2067	2060	2042	2023	2024			1989	2002

Tableau 12 Résultats des sondages électromagnétiques en fonction de la direction Emetteur-Recepteur (site de Toéssin)

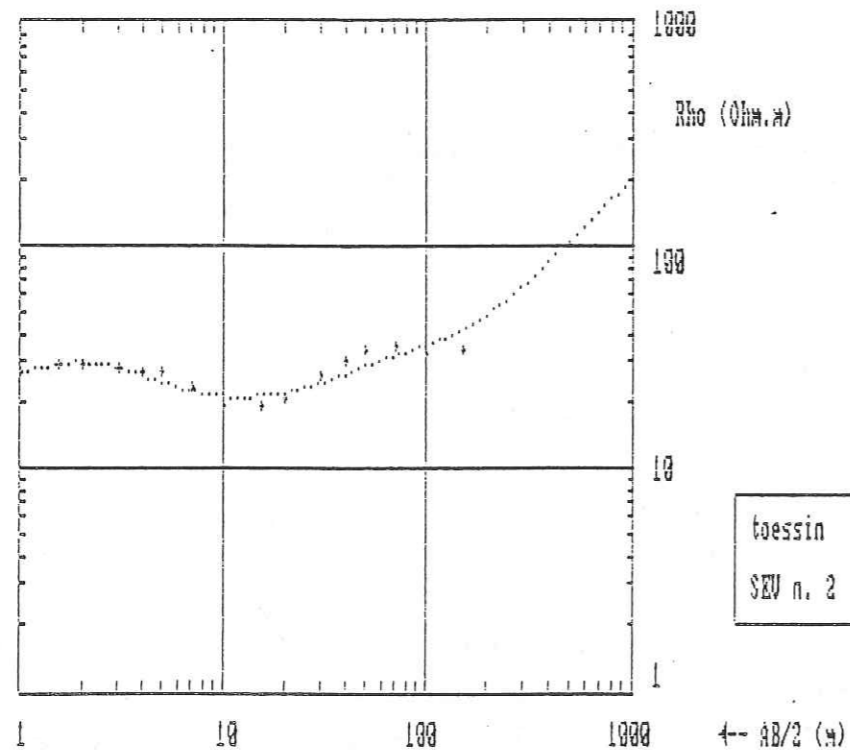
De l'analyse de ce tableau nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

- Toutes les directions indiquent une frange fissurée importante confirmée par les sondages électriques.
- Les meilleurs résultats par rapport au sondages électriques se retrouvent aux directions N15 et N105 respectivement direction de la discontinuité et direction perpendiculaire à la discontinuité.
- Dans l'axe de la discontinuité, c'est le dispositif bobine horizontale qui donne les meilleurs résultats, tandis que dans l'axe perpendiculaire c'est le dispositif bobine verticale.



LIMITES D'EQUIVALENCE (Erreur max = 10 %)

couche	E min	E max	R min	R max
1	0.19	0.54	7.39	26.38
2	0.00	0.96	42.79	inf.
3	26.37	32.84	18.26	22.60
4	75.19	137.90	27.56	30.54
5			123.56	inf.



LIMITES D'EQUIVALENCE (Erreur max = 10 %)

couche	E min	E max	R min	R max
1	0.25	0.62	10.37	25.39
2	0.00	3.34	35.77	11739.46
3	16.02	17.57	17.24	21.36
4	100.75	170.00	32.59	43.02
5			35.39	inf.

Figure 107 Courbes de sondages électriques (site de Toëssin)

La figure 109 montre le profil d'anisotropie avec une courbe en cloche dont le maximum est décalé par rapport au forage; ceci était prévisible compte tenu du fait que le forage a été implanté en bordure de la faille.

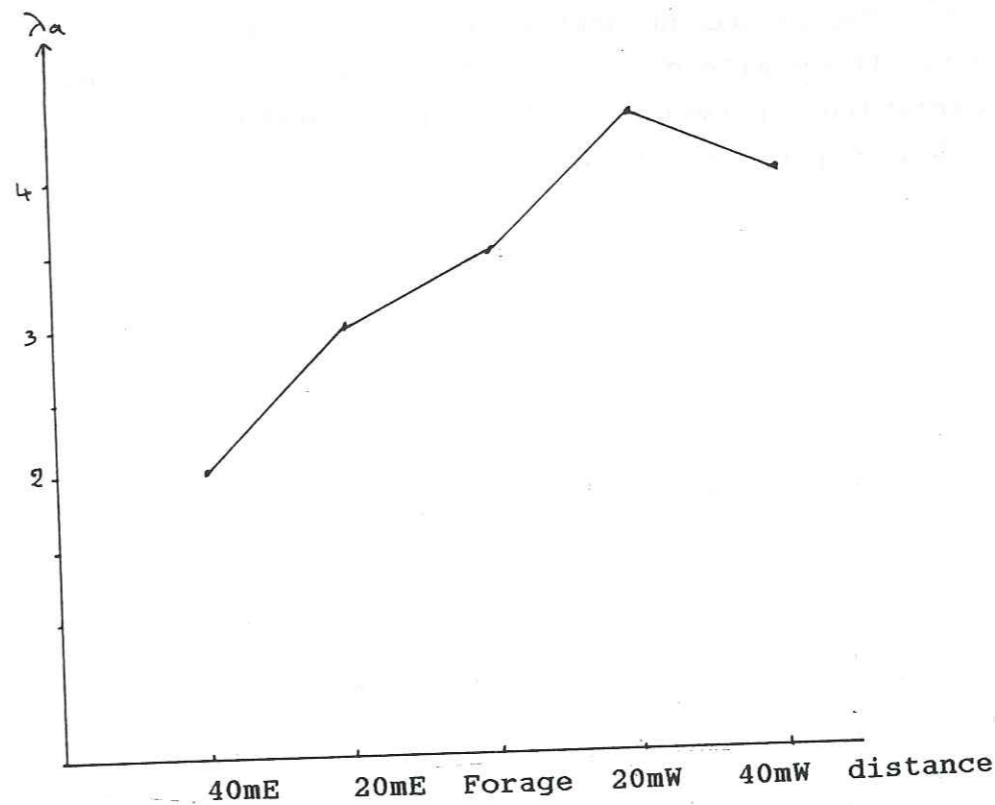


Figure 109 Profil d'anisotropie (site de Toëssin)

De l'analyse de tous ces résultats on pourrait retenir les faits suivants:

-le forage productif est implanté à l'intersection de deux discontinuités structurales affectant le substratum.

ces discontinuités ont induit une grande épaisseur de frange fissurée.

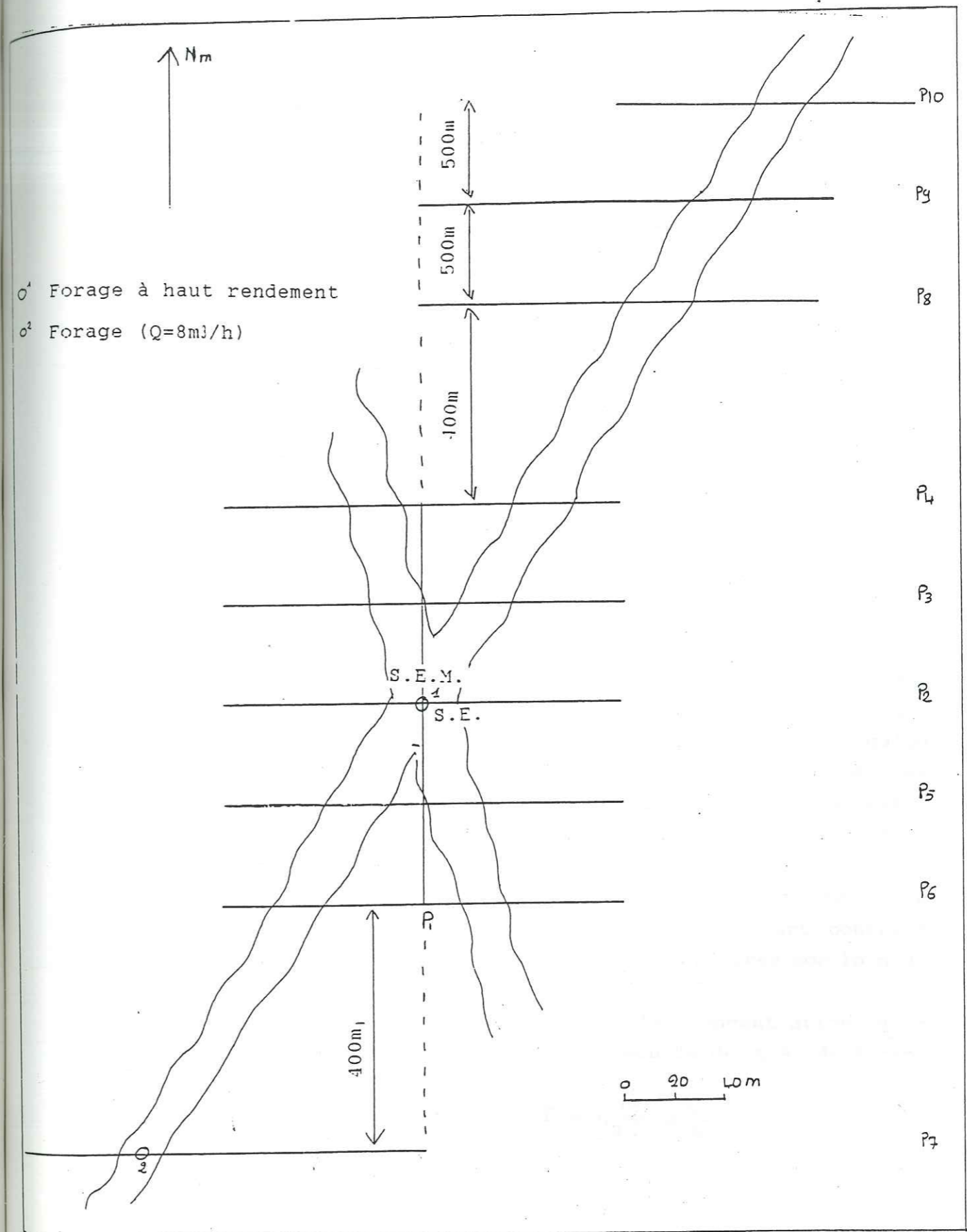
-Il pourrait s'agir fort probablement d'une zone de cisaillement.

La figure 110 montre le plan des mesures géophysiques ainsi que la situation des deux discontinuités par rapport au forage.

Par ailleurs, la comparaison des résultats des mesures par méthodes électromagnétiques et électriques montre l'importance de la position des bobines et l'influence des directions des anomalies sur les valeurs obtenues ce qui peut entraîner des erreurs si l'on effectue pas un nombre suffisant de mesures.

La particularité du site de Toéssin de se situer en domaine de schistes birrimiens permet de vérifier l'aptitude de la méthodologie adoptée pour ce type de formation géologique.

Figure 109 Disposition des profils de mesures (site de Toéssin)



5 ANALYSE CHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES EAUX DE FORAGE

Nous avons abordé les études isotopiques en vue de vérifier d'une part si la productivité des aquifères était en relation avec le voisinage des marigots, et d'autre part la pérennité des forages. En effet si les eaux prélevées sont des eaux actuelles la relation forage marigot est probable et le débit sera vraisemblablement pérenne. Si les eaux sont anciennes il n'y a pas de relation marigot-forage et la pérennité à long terme n'est pas assurée.

Par ailleurs nous avons tenté de déterminer s'il y avait une relation entre la productivité des divers forages et la teneur en arsenic des eaux captées car cet élément (sous forme d'acide arsénieux) a un rôle important du point de vue santé publique.

5.1 Géochimie isotopique

La problématique de la datation isotopique relève des processus de dispersion et de mélange des eaux d'infiltration. Néanmoins cette datation qui donne un âge qu'on pourrait considérer comme approximatif, correspond à une distribution dans le temps de plusieurs écoulements élémentaires (Mook, 1980) et permet de déterminer le temps de résidence dans les aquifères de l'eau des échantillons prélevés.

Un temps élevé peut indiquer une infiltration lente ou éloignée géographiquement, tandis qu'un temps court pourrait indiquer une recharge rapide avec de l'eau infiltrée non loin du point d'échantillonnage.

Par désintégration radioactive, la concentration d'un isotope ayant une demi-vie de T est réduite de A_0 à A_t durant le temps t .

$$T = \left(\frac{T_{1/2}}{\ln 2} \right) \ln \frac{A_0}{A_t} \quad (1)$$

Pour connaître t il suffit de mesurer At et de connaître A0. Les éléments radioactifs les plus couramment utilisés pour dater les eaux souterraines sont le carbone 14 (¹⁴C) et le tritium (³H).

5.1.1 datation par le carbone 14

5.1.1.1 principe de base

La méthode de datation de l'eau par le ¹⁴C est basée sur le principe de la désintégration radioactive du ¹⁴C dissous dans l'eau sous forme de bicarbonates ou de carbonates (CO₂ (aq), H₂CO₃ (aq), HCO₃⁻, CO₃²⁻). Le carbone inorganique total dissous (CITD) est mis en solution durant le processus de recharge par la dissolution du CO₂ présent dans le sol et, par la suite, par la dissolution des minéraux carbonatés (calcite, dolomie).

Les résultats des mesures d'activité du ¹⁴C (a¹⁴C) sont généralement exprimés en terme de pourcentage par rapport à ce qu'on appelle le carbone moderne (pour cent du carbone moderne ou pcm). Le carbone moderne représente en principe l'activité spécifique de ¹⁴C dans le CO₂ atmosphérique avant toute dilution significative causée par la combustion des hydrocarbures fossiles. Le point de référence de datation est celui des troncs d'arbre datant de la fin du 19^e siècle. Outre le CO₂ du sol, il y a aussi celui provenant de la décomposition des matières végétales dont l'activité en ¹⁴C est égale à celle de l'atmosphère actuelle. On peut ainsi considérer que l'activité en ¹⁴C du CO₂ du sol est aussi actuelle ou «moderne».

L'activité du ¹⁴C atmosphérique quant à lui n'est pas constante à cause des essais thermonucléaires; dans les années 50 il était de 100 pcm actuellement il est de l'ordre de 117 pcm. Certaines évidences indiquent qu'au début de l'Holocène (environ 10000 ans) il était plus élevé que 100 pcm et qu'il aurait pu monter plus haut que 120 pcm (Klein et al., 1980).

La dissolution des carbonates dans l'eau, minéraux ne contenant pas de carbone 14 peut engendrer des valeurs de a¹⁴C inférieures à 100 pcm. La réduction est proportionnelle au taux de dissolution des carbonates. On doit alors corriger la valeur de l'activité en se basant sur des modèles de géochimie isotopique.

5.1.1.2 principe de la correction à l'aide du ¹³C

Le carbone 13 étant un isotope stable, on se base sur sa teneur pour corriger les âges obtenus par le carbone 14. La teneur en un isotope stable est donnée en valeur de delta (δ), ou de différence relative par rapport à un standard; elle est exprimée en pour mille (‰). Pour le ¹³C, le standard est le PDB («Peedee Formation Belemnite») de la Caroline du Nord). La teneur en ¹³C d'un échantillon est exprimée ainsi:

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{échant}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}} - 1 \right] \times 1000 \text{ (‰ PDB)} \quad (2)$$

La valeur du ¹³C du CITD dans l'eau varie selon l'origine du carbone. Dans l'atmosphère elle est de -8, tandis que dans le sol elle est contrôlée par le type de végétation. Dans un climat tempéré la valeur est de l'ordre de -25 à -20; dans un environnement tropical cultivé, comme celui du Burkina elle est plus élevée et serait de l'ordre de -18 à -12 (Fontes et al., 1991). Il faut en outre considérer un enrichissement en ¹³C pendant l'infiltration ce qui ramènerait la valeur pour le cas du Burkina dans l'ordre de -12 à -6, sans oublier la dissolution des carbonates après infiltration.

5.1.1.3 Mode de Calcul de l'âge corrigé

En appliquant l'équation (1) au ¹⁴C (T_{1/2}=5730a), on obtient

$$\text{âge} = t = -8270 \ln \frac{a_m^{14}\text{C}}{a_0^{14}\text{C}} \quad (3)$$

où a¹⁴C est l'activité mesurée en ¹⁴C et a⁰¹⁴C est l'activité initiale en ¹⁴C, i.e. juste après l'infiltration de l'eau et la dissolution des carbonates.

On estime la valeur de a⁰¹⁴C à partir des données sur le ¹⁴C CITD selon la relation (Mook, 1980):

$$a_0^{14}\text{C} = q \cdot a^{14}\text{C}_{\text{actuelle}} \quad (4)$$

où a¹⁴C_{actuelle} représente l'activité en ¹⁴C dans l'atmosphère actuelle (tableau ci-dessous):

TABLEAU 13: Variations récentes de l'activité en ^{14}C dans l'atmosphère.

années	$a^{14}\text{C}$ actuelle (pcm)
1980 - présent	~117
1970 - 1980	~125
1955 - 1970	~140
< 1955	100
30 dernières années	~120

Le facteur de correction q tient compte des valeurs de ^{13}C selon le rapport:

$$q = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{éch.}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}} \quad (5)$$

On évalue grossièrement les valeurs de $^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$ et de $^{13}\text{C}_{\text{CITD}}$ selon les données publiées dans la littérature qui sont respectivement d'environ -1 et -9.

En raison des conditions existant dans la zone d'infiltration à l'époque de la recharge la valeur de q peut varier selon les forages surtout dans le cas du Burkina.

5.1.2 datation par le tritium

L'âge obtenu par le carbone 14 permet de distinguer des eaux anciennes des eaux récentes de façon approximative. La datation au tritium permet de préciser davantage l'âge des eaux souterraines.

Le tritium est un isotope radioactif de l'hydrogène, de ce fait il fait partie de la molécule d'eau elle-même, en plus il a une demi-vie plus courte (12.43 ans).

Dans l'atmosphère, la production naturelle en tritium est de l'ordre de 15 TU (<<Tritium Unit>>; 1TU=1 3H par 10¹⁸ 1H). Les essais nucléaires atmosphériques ont injecté d'énormes quantités de tritium dans l'atmosphère; on a ainsi obtenu un pic en 1964 excédant 3000 TU dans les eaux de précipitation. La teneur actuelle est de l'ordre de 10 à 30 compte tenu du traité de non prolifération nucléaire de 1965. On peut alors distinguer des

eaux souterraines actuelles (10 à 20 TU) des eaux rechargées pendant les années 60 et 70 (TU>30) et des eaux plus anciennes (TU<1). Des eaux souterraines présentant de basses valeurs en tritium (1 à 5 TU) indiquent normalement un mélange entre des eaux plus anciennes que 35 ans et des eaux actuelles.

5.1.3 les résultats

Les analyses isotopiques sont réalisées par le laboratoire GETOP de l'Université du Québec à Montréal et nous ne sommes pas encore en possession des analyses du tritium.

Le tableau 14 résume les résultats d'analyse ^{13}C et ^{14}C ainsi que leur interprétation:

TABLEAU 14: Résultats d'analyse de ^{13}C et ^{14}C .

ÉCHANTILLON	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}}$ (‰ PDB)	$a^{14}\text{C}$ (pcm)	CALCULS		ÂGE INTERPRÉTÉ (an)
			q	âge (an)	
Lay-1	-3,4	91,8 ± 1,4	0,30	-7 700	t < 35
Lay-2	-7,5	94,4 ± 1,4	0,81	-1 250	t < 35
Ziniar	-7,9	106,6 ± 1,6	0,86	-270	t < 20
Guilongou	-9,7	90,8 ± 1,4	1,0	800	1000 > t > 35
Gangrin	-6,1	97,6 ± 1,5	0,64	-1 980	t < 35
Pissi	-9,0	91,3 ± 1,4	1,0	750	1000 > t > 35

De ce tableau on peut relever les faits suivants:

- les échantillons de Lay1, Lay2, Ziniar et Bangrin donnent des âges <<futurs>>, ce qui correspond au temps t=0 an.
- les deux autres peuvent être datés de quelques centaines d'années, mais compte tenu de la large gamme des teneurs en ^{13}C (^{13}C de -9.7 à -3.4) et des activités toujours supérieures à 90 pcm, ces eaux peuvent être considérées comme <<modernes>>.
- parmi les quatre sites d'échantillonnage hormis celui de Bangrin les autres se trouvent à proximité d'un cours d'eau, tandis que les sites de Guilongou et Pissi se trouvent loin d'une retenue d'eau de surface. La première couche au niveau de ces deux

derniers sites est une cuirasse latéritique indurée, très résistante. Les variations en âge calculé peuvent alors s'expliquer par les différences en ^{137}Cs dans les zones de recharge.

Les résultats d'analyse du tritium devraient nous permettre de préciser d'avantage ces âges. On pourra éventuellement à partir d'analyses chimiques, en particulier de l'alcalinité, avoir une meilleure estimation du temps de résidence des eaux souterraines.

Les résultats de la géophysique ont mis en évidence des fractures en relation avec des marigots, ces derniers jouant un rôle important dans la réalimentation des nappes. On peut de ce fait envisager que ces marigot sont responsable de l'âge <<moderne>> observé.

5.2 analyse chimique

Dans le cadre d'une campagne organisée dans le but de connaître la répartition des éléments toxiques présents naturellement dans les eaux nous avons prélevé un certain nombre d'échantillons sur lesquels l'arsenic présent sous forme d'arseniates a été dosé. Le tableau 15 résume les résultats de l'analyse:

TABLEAU 15: Résultats d'analyse de l'arsenic.

échantillon	concentration mesurée (ppb)*
Rectorat	19.3
ISP	18.0
Lay 1	21.6
Lay 2	33.6
Pobe Mengao	39.4
Guilougou	4.1
Ziniaré	50.2
Rakaye	48.0
Pissi	49.5
Doulougou	43.3
Sambin	36.9

* Mesures effectuées par spectrométrie de masse (source au plasma).

Les échantillons Rectorat et ISP proviennent du domaine universitaire de Ouagadougou.

le forage de l'ISP étant plus productif que celui du rectorat. Les échantillons Guilougou et Ziniaré proviennent de deux forages

de la province d'Oubritenga avec des débits respectifs de 7 et 5 m³/h.

Ces résultats varient de 4.1 à 50.2 ppb. les normes internationales (OMS) préconisent un seuil de 50ppb pour l'eau de consommation. Cinq des douze échantillons analysés montrent une teneur proche de cette limite: ce sont les échantillons des forages de Lay2, Pobe Mengao, Rakaye, Pissi et Doulougou. L'échantillon de Ziniaré dépasse cette limite. La teneur du forage de Guilougou présente la plus faible valeur et par conséquent peut être considérée comme la meilleure eau si on tient compte uniquement de la teneur en arsenic. Si on considère géographiquement ces teneurs on remarque qu'elles sont localisées ponctuellement: en effet les forages Lay1 et Lay2 sont distants au maximum de 1.5 km et on enregistre une différence de 12 ppb; les forages de Guilougou et Ziniaré sont distants de 3 km et on a une différence de 46.1 ppb.

La teneur en arsenic diminue quand le débit augmente lors qu'on considère ces résultats par région:

-site de Lay (Lay1, Lay2): lorsqu'on passe d'un débit de 50m³/h (Lay1) à un débit de 7m³/h la concentration augmente de 21.6 à 33.6.

-domaine universitaire (ISP, Rectorat): le forage de l'ISP qui est plus productif que le forage du Rectorat a une concentration plus basse en arsenic.

-Province de Bazèga (Sambin, Doulougou, Rakaye, Pissi): le forage de Pissi qui est le moins productif (Q=1.4m³/h) a la plus grande valeur de concentration, tandis le forage de Sambin, le plus productif a la plus basse valeur de concentration, les deux autres échantillons étant intermédiaires.

-Province d'Oubritenga (Guilougou, Ziniaré): le forage de Guilougou avec un débit de 7m³/h a une concentration de 4.1 tandis que le forage de Ziniaré avec un débit de 5m³/h a une concentration de 50.2

Pour un même site la teneur diminue avec la productivité mais on constate que d'un site à l'autre les teneurs évoluent ce qui montre bien que c'est le contexte géologique qui est à l'origine des teneurs plus ou moins importantes observés.

CONCLUSION

Au terme des investigations "post mortem" des conditions d'implantation des forages d'eau par interprétation des données de la télédétection, de la géologie et de la prospection géophysique, sur 22 forages dont 13 à haut rendement (débit supérieur à 20 m³/h), quatre à faible rendement (débit inférieur à 2m³/h) et 5 totalement secs, nous avons pu montrer les faits suivants:

I-Les principaux résultats scientifiques et méthodologiques

-A >Facteurs de productivités des aquifères du socle

-une condition particulière pour l'obtention d'un forage à débit élevé est de le situer sur une mégafracture longue de 5 kilomètres au moins.

-la productivité est accrue si on le situe à l'intersection de deux mégastructures.

-la zone broyée induite par la ou les discontinuités affectant le substratum doit avoir une extension latérale de cinquante mètres au moins. Cette extension latérale est aussi importante que l'épaisseur de la frange fissurée surmontant le substratum.

-La proximité ou le recouvrement d'un bas-fond ou d'un marigot favorisent énormément la réalimentation des aquifères.

-la direction dominante des filons de quartz et de pegmatite cartographiés sur le terrain donne la direction des failles productrices, tandis que celle des fissures ne conduit qu'à des résultats très aléatoires.

-la présence d'affleurements ne constitue pas forcément un facteur défavorable à l'obtention de débits élevés. En effet les zones de sub-affleurement généralement sabloneuses en région granitique favorisent l'infiltration et donc la réalimentation des nappes aquifères. Ceci a pu être vérifié sur la plupart de nos sites d'études. Les affleurements permettent aussi une étude géologique dont l'apport est déterminant pour la recherche des forages à haut débit.

-les indices biologiques: termitières et ficus gnafolocarpa, lorsqu'ils sont alignés donnent la direction de la fracturation et permettent dans bien de cas d'éviter des échecs.

-B >Méthodes de traitement numérique d'images satellites

Notre étude nous a amené à considérer que la composante principale no.2 (CP2) associée à un filtre passe-bas de moyenne est la meilleure bande d'entrée dans une composition de filtres directionnels de type Sobel permettant de mieux faire ressortir les caractéristiques hydrogéologiques en particulier les linéaments plurikilométriques ayant un lien étroit avec la fracturation profonde.

-C >Apport de la prospection hydrogéophysique par le dispositif MAXMIN:

-les profils de trainés électromagnétiques MAXMIN ont prouvé leur aptitude à mettre en évidence les failles dans tous les faciès pétrographiques du socle mais il faut néanmoins souligner que les valeurs absolues varient énormément d'un site à l'autre. Elles sont généralement plus basses dans les zones schisteuses (Toéssin) que dans les régions granitiques et latéritiques.

-le mode MAX1 ou horizontal loop en balayage permet un repérage précis des directions des failles, de leurs extensions latérale et longitudinale.

-la fréquence recommandée pour le Burkina est la fréquence 3520 Hz avec une séparation de bobines de 50 mètres ou cent mètres pour les cas difficiles.

-Les sondages électromagnétiques donnent des résultats comparables à ceux des sondages électriques mais il faudrait constituer un catalogue pour en tirer des conclusions plus pertinentes. Néanmoins on peut déjà retenir que les meilleurs résultats s'obtiennent en plaçant le récepteur et l'émetteur soit dans la direction de la faille pour le mode MAX1, soit dans une direction perpendiculaire pour le mode MAX2.

-les cercles de mesures rotatives donnent la direction des axes

conducteurs. Ce résultat est comparable au sondage pluridirectionnel en sondage électrique.

D- Diagrammes d'anisotropie

-les diagrammes d'anisotropie ont été particulièrement significatifs sur tous les sites. L'aplomb des axes conducteurs se caractérise par des coefficients d'anisotropie élevés, contrastant avec les valeurs avoisinantes et traduisant une fissuration plus importante. Les sites improductifs ne présentent pas la courbe en cloche bien marquée sur les sites productifs. La figure 111 montre toutes les courbes obtenues sur les différents sites.

Tandis qu'on observe généralement une en cloche pour les fractures ouvertes, les filons fracturés montrent une courbe en dent de scie montant ainsi une différence de comportement entre les deux structures.

E- Potabilité et recharge des eaux souterraines

-les analyses chimiques des teneurs en arsenic des eaux des forages ont révélé des taux assez inquiétants (presque tous proches des normes recommandés par l'OMS) et nous recommandons de ce fait une analyse à grande échelle des eaux des forages tant en arsenic qu'en d'autres éléments qui altèrent la potabilité des eaux. Il serait intéressant de vérifier si cet arsenic est lié à d'autres minerais notamment l'or en raison des teneurs élevées.

-les teneurs en arsenic diminuent lorsque la productivité augmente, ceci grâce au lessivage.

-compte tenu du fait que nous ne sommes pas encore en possession des résultats des analyses des teneurs du tritium, une appréciation définitive de l'âge des eaux des forages serait imprécise. On peut néanmoins retenir avec quelques réserves que presque toutes les eaux des forages étudiés sont «modernes» et cela se justifie par l'influence considérable des marigots sur la réalimentation des nappes.

F- Remarques générales sur l'implantation des forages

-L'implantation de certains forages à haut rendement correspond rarement au cas théorique recommandé. Cela est dû aux études avant forage nettement légères par rapport aux nôtres.

-on a eu des allures atypiques de courbes de sondages électriques pour des forages à haut rendement, marquées par l'absence de remontée trainante traduisant une épaisseur importante de roche fissurée au-dessus du substratum. On pourrait attribuer ces allures au fait que les implantations ne correspondent pas toujours au cas idéal, mais la présence d'une zone très conductrice et très épaisse (cas de Rakaye et Nabmayaoghain) pourrait faire envisager l'existence à une fracture ouverte.

-il n'est pas possible de prévoir la productivité d'un ouvrage à partir de sondages électriques mais on peut indiquer parmi plusieurs sondages celui qui présente le plus de chances de fournir les meilleurs résultats.

-le dispositif carré peut améliorer ces implantations car il permet de situer le point où l'anisotropie est la plus marquée dans le couloir broyé de la faille et surtout permet l'établissement de courbes d'anisotropie dont nous avons déjà souligné l'importance.

-la plupart des forages négatifs sont dus à des erreurs graves d'implantation.

-on pourrait envisager des sondages sismiques pour vérifier l'ouverture des failles mais il ne faut pas oublier que la mise en oeuvre est lourde et coûteuse.

II-Sur le plan pratique et économique

Au regard des facteurs de productivité que nous avons mis en évidence, nous recommandons la mise en oeuvre simultanée et coordonnée des méthodes et des dispositifs employés lors de nos investigations pour les programmes de recherche d'eau à venir. La figure 112 montre ce dispositif recommandé. Cette mise en oeuvre semblerait coûteuse (trois jours de terrain par site avec

un géophysicien, un technicien, quatre manoeuvres).
 Mais si nous considérons qu'il ya au Burkina Faso au moins trois cents centres secondaires qu'il faudrait équiper en forages à haut rendement , on arrive à 600 forages à raison de 2 par agglomération.

Considérant que le taux de réussite à l'heure actuelle pour ce type de forage est de 15% , il faudrait au moins 4000 forages à environ 2200000 francs C.F.A. l'unité, soit des dépenses totales de 8800000000 francs C.F.A. Si l'application de la mise en oeuvre que nous préconisons augmentait le taux de réussite à 50% comme nous l'espérons bien , on réduirait les dépenses pour l'obtention des mêmes 600 forages à 2640000000 francs C.F.A., soit une économie de 6160000000 francs. Un tel chiffre mérite d'être médité et à lui seul justifie le programme de prospection méthodique que nous proposons.

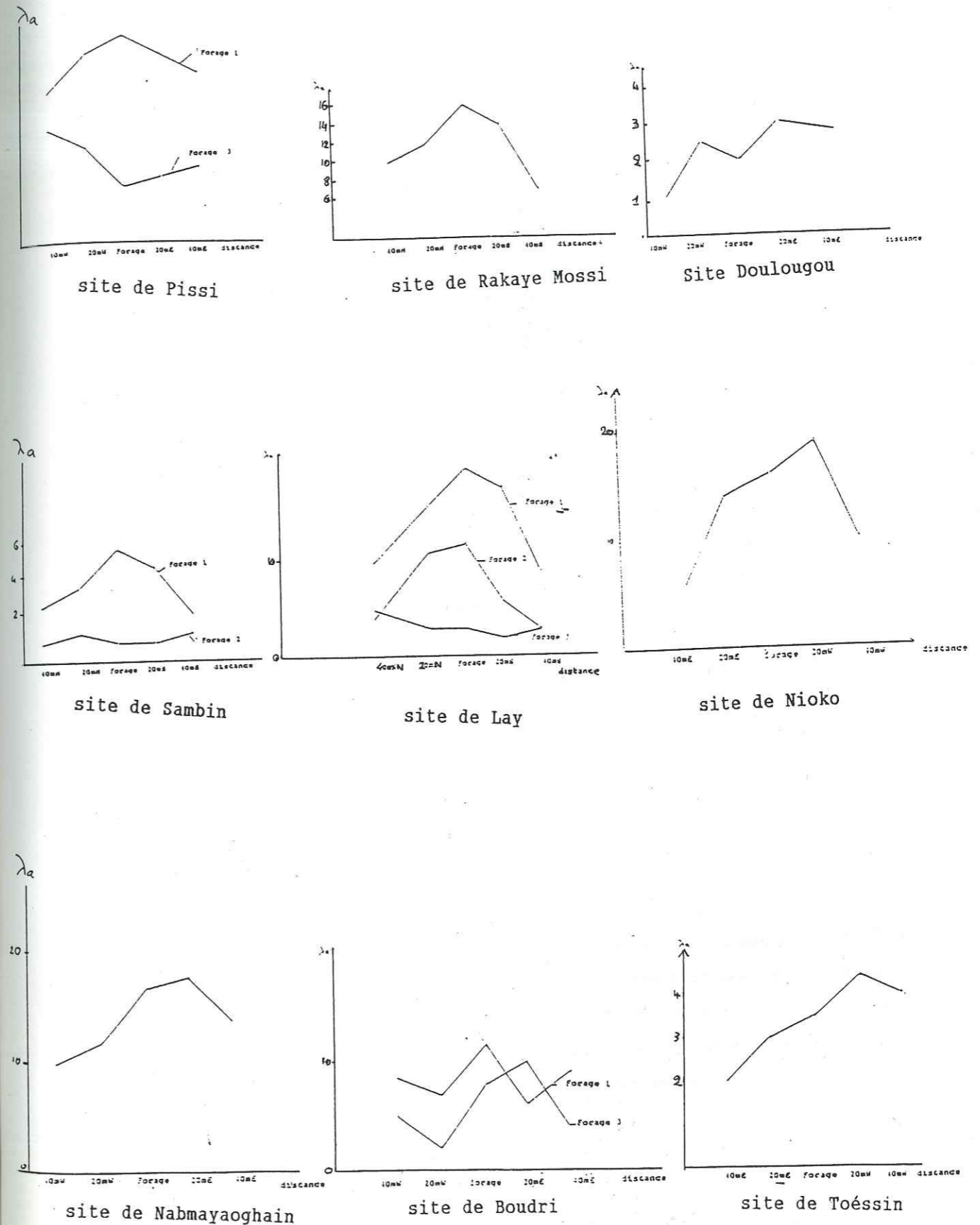


Figure 110 Profils d'anisotropie de tous les sites investigués: 210

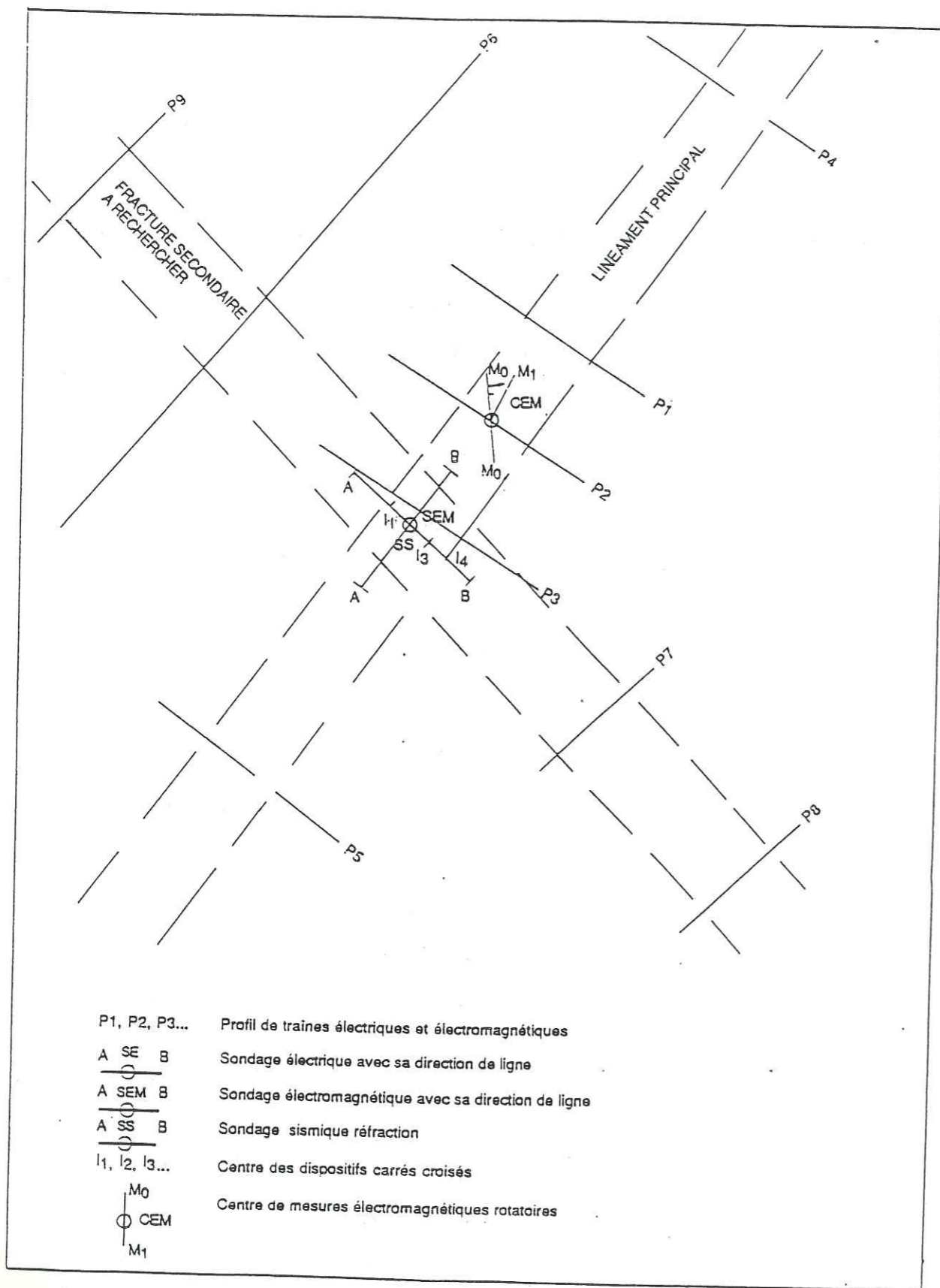


Figure 111 Dispositifs géophysiques recommandés après les études de télédétection et géologiques pour l'implantation des forages à haut rendement (A.N.Savadogo, A.Rouleau, G.lemieux, R.Dubergger, D.W.Roy, S.Perron, S.Nakolendoussé, D.Tremblay)

BIBLIOGRAPHIE

Astier, J.L., 1977 . Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Masson et Cie, Paris

Astier, J.L., et al., 1981. Evaluation et révision des études géophysiques au sahel de Haute Volta en vue de l'implantation de forages d'eau. Division de la mise en valeur des terres et des eaux, F.A.O. Rome.

Bérard, P., 1982. Interprétation des images satellites en complément à la photo-interprétation traditionnelle pour la définition des structures hydrogéologiques au Niger et en Haute Volta. In colloque sur les milieux discontinus en hydrogéologie, Document 45, BRGM, Orléans, p.67-82

Bernard, A. et al., 1989. Intérêt de la prospection géophysique: exemple du programme d'urgence d'hydraulique villageoise Nord-Cameroun. Bull. CIEH, no.74-75, Octobre 1988-janvier 1989 p.47-68.

Bernard, A. et Mouton, J., 1980. Les recherches d'eau dans le socle africain: apports de la géophysique. Bulletin BRGM (2) 3,4 p.293-309.

Bieler, G. Burri, M., Muller, I., 1988. Rapport de la mission de prospection hydrogéologique intégrée dans la plaine de Gondo (Republique du Mali). Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchatel, Institut de Géologie; Décembre 1978-Janvier 1988

Bro, M., 1989. Utilisation de la méthode sismique-réfraction en recherche hydrogéologique sur le socle. Bull. CIEH no.74-75 Octobre 1988-Janvier 1989 p.3-22.

BURGEAP-CGG-Méditerranée-Géoélectrique,1984. Utilisation des méthodes géophysiques pour la recherche d'eau dans les aquifères discontinus. Bull. CIEH, série hydrogéologie, 236p.

Camerlo, J. et Fahy, J. C.,1981. Premiers résultats obtenus en Côte d'Ivoire dans les recherches d'eau axées sur les fractures secondaires dans les roches grnues du socle. Bull. BRGM (deuxième série) section III no.4 p.289-291.

C.G.G.,1959. La géophysique appliquée aux problèmes d'hydrologie, de mines,de génie civil et aux études structurales. Compagnie Générale de Géophysique Paris 1959 39p.

CIEH-BGR,1987. Recherche sur la fracturation profonde en zone de socle cristallin à partir de forages à gros débits et de linéaments Landsat à l'aide de méthodes de géophysiques avancées. Bulletin CIEH série hydrogéologie.

CIEH-BGR,1989. Contribution à la méthologie de prospection des eaux souterraines sur le bouclier cristallin de l'Afrique de l'Ouest. Etudes hydrogéologiques et géophysiques au Burkina Faso. Bulletin CIEH série hydrogéologie.

Crosta,A.,1989. Geological mapping using Landsat Thematic Mapper imagery in Almeria Province, south-east Spain. Int.J. of Remote sensing , vol.10, no 3, p. 505-514.

Darboux-Afouda,R.,1985. Recherches hydrogéologiques par les méthodes géophysiques dans les régions de socle en Afique Occidentale. Thèse présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc Montpellier .

Darboux-Afouda,R., LOUIS,P.,1989. Contribution des mesures de l'anisotropie électrique à le recherche des aquifères de fracture en milieu cristallin au Bénin. Geophysical Prospecting 37,p.91-105 ,1989.

Eadie,Tom,1979. Stratified Earth Interpretation using standard horizontal loop electromagnetic data. Geophysics labotory, Departement of physics University of Toronto no.9 Octobre 1979 37p.

Engalenc,M.,1978-1979. Méthode d'étude et de recherche d'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest.vol.1 et 2 CIEH.

Engalenc,M.,1978. Modalités de la recherche d'eau dans les roches cristallines fissurées de l'Afrique de l'Ouest. Journées techniques du CIEH Togo.

Engalenc,M.,1979. Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine dans les roches cristallines de l'Afrique de L'Ouest (volume 3). CIEH Août 1979 191p.

Engalenc,M.,1981. Eléments pour la quantification des ressources dans les roches cristallines. Bulletin BRGM section III,no.4, 1981 p.325-326.

Engalenc,M.,1983. Rôle de la photo-interprétation dans la détermination des facteurs influant la productivité des fractures du socle cristallin. Bulletin CIEH 1983 p.291-299.

Fontes,J.Ch.,Andrews,J.N., Edmunds, W.N., Guerre, et Travi,Y., 1991. Paleorecharge by the Niger River (Mali) deduced from grongwater geochemistry; Water Res. Research, vol.27,no.2,p. 199-214.

Fourniquet, J., Motti, E. et Pointet, T., 1984. Application de la télédétection à la prospection hydrogéologique en zones arides. Challenges in Africa Hydrology and Water Resources (Proc. of the Harare Symposium) Juillet 1984, IAHS Publ. no 144, p. 129-137.

Géohydrologie-CIEH, 1978. Méthodes d'étude et de recherche d'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Bull. CIEH série hydrogéologie 318p.

Géohydrologie-CIEH, 1981. Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine dans les roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest (volume 3): Atlas de photo-interprétation. Bulletin CIEH, 1981

Hottin G. et Ouédraogo, O., F., 1975. Notice explicative de la carte géologique au 1/1000000^e de la République de Haute Volta. Editions du BRGM 6-8 rue Chasseloup-Laubat Paris

Joanes, H., Parnot, J., Rantrua, F., Sow, N.A., 1986. Possibilités d'utilisation de la télédétection dans le domaine de l'eau en Afrique. CIEH Octobre 1986 141p.

Jones, M.J., 1985. The weathered zone aquifers of the basement complex areas of Africa. Quarterly Journal of the Geophysical Society of London, volume 18, p.35-46.

Jong, S.J. De, Dirks, F.J.H., Kikietta, A., Palaky, G.L. and Titsema, I.L., 1981. Expérimentations de méthodes électromagnétiques appliquées à la recherche des eaux en terrain de socle cristallin en Haute Volta. Bull. CIEH, série hydrogéologie no.44 p.17-26.

Keller, O. and Biewinga, D.T., 1976. The application of electromagnetic frequency sounding to groundwater problems. Geosurvey, volume 14 p.229-241.

Klein, J. Lerman, J.C., Damon, P.E., T.W., 1980. Radiocarbon concentration in the atmosphere: 8000 years record of variation in tree rings: first results of a USA Workshop; in Stuiver, M. et Kra, R. (éditeurs), Int. Radiocarbon Conf., 10th, Proc.: Radiocarbon, vol.22, no. 3, p.950-961.

Larson, I., 1972. Ground Water in granite rocks and tectonic models. Nordic hydrology vol.3 no. 3 p.111-129, 1972

Lindqvist, J.G., 1987. Use of electromagnetic techniques for groundwater explorations in Africa. Geophysics, volume 52, number 3 p.456-458.

Maillard, J., Valentin, J., 1983. Possibilités des méthodes EM dans le domaine de l'hydrogéologie. Rapport BRGM, Orléans, 1983.

McNeil, J.D., 1991. Use of electromagnetic methods for groundwater studies. Paper accepted for Publication in Geotechnical and Environmental Geophysics. Investigations in Geophysics, no4. Society of Exploration Geophysicists.

Meyer De Tadelhofen, C., 1991. Application de la géophysique aux recherches d'eau. Lavoisier, 1991, 183p.

Michel Detay, Patrice Poyet, Gibert Castany, Angelo Bernadi, Roger Casanova et Gilles Aubrac, 1991. Hydrogéologie de la limite du bassin du lac Tchad au Nord Cameroun, mise en évidence d'un aquifère semi-captif de socle dans les zones de piémont et de «biseau sec». C.R. Acad. Sci. Paris, t.312 Série II, p.1049-1056 1991.

Mook, W.G., 1980. Carbon-14 in hydrogeological studies; in Fritz, P. et Fontes, J.-Ch. (éditeurs), 1980; Handbook of environmental Isotope Geochemistry, vol.1, The terrestrial Environment, partie A, p. 49-74.

Moore, G. et Waltz, F., 1983. Objective procedures for lineament Enhancement and Extraction. Photogrammetric Engineering and remote sensing, vol.49, no. 5, mai 1983, p. 641-647.

Ozer, A., 1989. Ressources minérales et ressources en eau: apport de la télédétection dans le monde francophone. Télédétection en francophonie: bilans régionaux et thématiques, Edition John Libbey, Eurotext, France, p.405-411.

Pallaky, G.J., Ritsema and Dejong, S.J. 1981. Electromagnetic prospecting for groundwater in precambrian terrains in the Republic of Upper Volta. Geophysical Prospecting, 1981, 29, p. 932-955.

Poddar, M. and Rathor, B.S., 1983. VLF survey of the weathered layer in southern INDIA. Geophysical prospecting 31, p.524-537, 1983.

Prévost, C., 1983. Application de la télédétection par satellite à l'inventaire des ressources en eau au sahel. Thèse de maîtrise présentée à l'école des Gradés de l'Université de Laval, 200p.

Prévost, C. et Rochon, G., 1983. Application de la télédétection par satellite à l'inventaire des ressources en eau au sahel. Compte rendu du 10^e Symposium canadien de télédétection, Edmonton, Canada, p. 927-933.

Savadogo, A.N., 1984. Géologie et hydrologie du socle cristallin de Haute Volta, étude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de doctorat en sciences naturelles présentée à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble, France.

Savadogo, A.N., 1978-1979. Géophysique appliquée à la recherche d'eau dans les formations cristallines de Haute Volta. Bull. CIEH no.35-36 p.43-49.

Savadogo, A.N., Rouleau, A., Lemieux, G., Duberger, R., Roy, D.W., Perro n, S., Nakolendoussé, S., Tremblay, D., 1991. Productivité de aquifères du socle cristallin du Burkina Faso, rapport du projet CRDI no. 3-P-87-1017. 1991

Sawadogo, S., 1982. Contribution de la télédétection à l'étude de la fracturation, application à l'hydrogéologie de socle en milieu inter-tropical (Haute Volta). Thèse de 3^e cycle présentée à l'Université d'Orléans, Sciences fondamentales et Sciences appliquées.

Scanvic, J.Y., 1983. Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. Manuels et méthodes, 7, BRGM, Orléans, 159p.

Séguin, M.K., 1971. La géophysique et les propriétés physiques des roches. Les presses de l'Université de Laval, Québec.

Seuthé, C., 1984. Le traitement numérique des images Landsat en géologie. Ministère de l'Energie et Ressources du Québec, CQCT, contrat 84-314, 35p.

Seuthé, C. et al., 1985. Etudes géologiques par interprétation d'images Landsat accentuées. Télédétection et gestion des ressources: l'aspect opérationnel, vol.V, Bernier, Lessard et Gagnon (éditeurs), l'Association Québécoise de télédétection, p.295-308.

Shaw, S.H., O.B.E., M.Sh., Ph.D., F.G.S., 1981. Some aspects of geophysical surveying for groundwater. Geophysical surveying for groundwater, 1981, p.175-188p.

Singh, C.L., 1984. Role of surface geophysical methods for groundwater exploration in hard rock areas. International Workshop on Rural hydrogeology and hydraulics in fissured basement zones, 1984 Silver jubilee year, Departement of earth sciences, University of Roorkee.

Stewart Mark and Bretnall Robert, 1986. Interpretation of VLF Resistivity Data for groundwater contamination surveys, 1986, 5p. Geonics, Canada

Streltsova, T.D., 1976. Hydrodynamics of groundwater flow in a fractured formation. Water Resources Research vol.12 no.3 p.405-414, 1976.

Telford, W.M., Geldrart, L.P., Sheriff, R.E., Keys, D.A. Applied geophysics (3 tomes) . Cambridge University Press.

Todd, D.K., 1980. (2è édition). Groundwater hydrology; John Wiley, 535p.

Van Der Stricht, 1989. Etude statistique sur l'implantation par photo-interprétation et géophysique de 875 forages en zone granitique et volcanosédimentaire. Bull. CIEH, no.74-75, Octobre 1988-Janvier 1989 p.69-88

Warren, J.E. and Root, P.J., 1963. The behavior of naturally fractured reservoirs. Soc.Pet.Eng.J. 1963 p.245-255

Yésou, H.R., Saint Jean, Pion, J.C. et Besnus, Y., 1990. Amélioration des données Spot pour la cartographie structurale en milieu tropical: exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala (Togo, Afrique Occidentale). Actes du colloque Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux, Troisièmes journées scientifiques du réseau de télédétection de l'UREF, 13-16 novembre 1990.

Zohdy, A.A.R., Aeton, G.P., and Mabery, D.R., 1974. Application of surface geophysics to groundwater investigations. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geophysical Survey, Book 2, Chapter D1, 1974.

TABLE DES MATIERES

	page
1 Introduction	3
2 Situation générale.....	5
2.1 cadre général.....	5
2.2 Bref aperçu de la géologie du socle cristallin du Burkina Faso.....	6
2.2.1 Les formations géologiques.....	6
2.2.1.1 Les formations granito-migmatitiques.....	6
2.2.1.2 Les formations volcano-sédimentaires	7
2.2.2 Tectonique.....	10
2.2.2.1 L'orogénèse libérienne.....	10
2.2.2.2 L'orogénèse éburnéenne.....	10
2.3 Mode de gisement des aquifères du socle cristallin du Burkina Faso.....	12
3 Les 'méthodes d'étude des sites.....	15
3.1 Méthodes de télédétection.....	17
3.1.1 Généralités.....	17
3.1.1.1 Définition.....	17
3.1.1.2 Le rayonnement électromagnétique.....	17
3.1.1.3 Le spectre électromagnétique.....	19
3.1.1.4 Propriétés physiques des surfaces détectables à distance.....	21
3.1.2 La photographie aérienne.....	22
3.1.3 Les images satellites.....	25
3.2 Les études géologiques.....	28
3.3 La prospection géophysique.....	32
3.3.1 La méthode de prospection électrique.....	32
3.3.1.2 Interprétation.....	33
3.3.1.2.1 Les trainés de résistivité.....	33
3.3.2.2 Méthodes d'interprétation des sondages électriques	34
3.3.2.2.1 Méthode d'interprétation à l'aide des abaques Cagniard.....	34

3.3.1.2.3 Le profilage carré.....	36
3.3.2 Méthodes électromagnétiques.....	41
3.3.2.2 Théorie de l'induction électromagnétique.....	41
3.3.2.3 Electromagnétisme MAXMIN.....	44
3.3.2.3.1 Généralités.....	44
3.3.2.3.2 Principe.....	45
3.3.2.3.3 Interprétation.....	47
3.3.2.3.3.1 Interprétation qualitative.....	47
3.3.2.3.3.2 Interprétation quantitative.....	49
4 Analyses des résultats.....	51
4.1 Province du Bazèga.....	52
4.1.1 Le site de Pissi.....	52
4.1.1.1 Relevé géologique.....	54
4.1.1.2 Etude par télédétection.....	56
4.1.1.2.1 Photo-interprétation sur image satellite numérique	56
4.1.1.2.2 Photo-interprétation sur photographies aériennes	62
4.1.1.2.3 Photo-interprétation sur image satellite Spot...	64
4.1.1.2.4 Comparaison des différentes interprétations.....	65
4.1.1.3 Prospection géophysique.....	66
4.1.2 Le site de Rakaye Mossi.....	75
4.1.2.1 Relevé géologique.....	75
4.1.2.2 Télédétection.....	79
4.1.2.3 Prospection géophysique.....	81
4.1.3 Le site de Sambin.....	90
4.1.3.1 Cadre géologique.....	90
4.1.3.2 Etude par télédétection.....	90
4.1.3.3 Prospection géophysique.....	92
4.1.4 Le site de Doulougou.....	104
4.1.4.1 Levé géologique.....	104
4.1.4.2 Etude par télédétection.....	105
4.1.4.3 Prospection géophysique.....	107
4.2 Le plateau central.....	111
4.2.1 Le site de Lay.....	111
4.2.1.1 Etude du cadre géologique.....	111
4.2.1.2 Etude par télédétection.....	112
4.2.1.3 Prospection géophysique.....	114
4.2.2 Le site de Nioko 2.....	126

4.2.2.1 Cadre géologique.....	126
4.2.2.2 Etude par photo-interprétation.....	127
4.2.2.3 Prospection géophysique.....	128
4.3 La province du Soum Nord Le site de Pobé Mengao.....	138
4.3.1 Levé géologique.....	138
4.3.2 Etude par photo-interprétation.....	140
4.3.3 Prospection géophysique.....	143
4.4 Province du Ganzourgou.....	154
4.4.1 Le site de Nabmayaoghin.....	154
4.4.1.1 Cadre géologique.....	115
4.4.1.1 Photo-interprétation.....	155
4.4.1.3 Prospection géophysique.....	156
4.4.2 Le site de Boudri.....	171
4.4.2.1 Levé géologique.....	171
4.4.2.2 Etude par télédétection.....	172
4.4.2.3 Prospection géophysique.....	174
4.4.2.4 Cartographie d'indice biologique.....	185
4.4.3 Le site de Toéssin.....	187
4.4.3.1 Cadre géologique.....	187
4.4.3.2 Photo-interprétation.....	187
4.4.3.3 Prospection géophysique.....	189
5 Analyse chimique et isotopique des eaux de forage.....	198
5.1 Géochimie isotopique.....	198
5.1.1 Datation par le ¹⁴ C.....	199
5.1.1.1 Principe de base.....	199
5.1.1.2 Principe de correction à l'aide du ¹³ C.....	200
5.1.1.3 Mode de calcul de l'âge corrigé.....	200
5.1.2 Datation par le tritium.....	201
5.1.3 Les résultats.....	202
5.2 Analyse chimique.....	203
Conclusion.....	205
Bibliographie.....	212
Table des matières.....	220
liste des figures.....	223
liste des tableaux.....	229
Annexes.....	230

Liste des figures

	Page
1 Esquisse géologique du Burkina Faso (G. Hottin et O.F. Ouédraogo 1979)	9
2 Coupe morphologique schématique, plateau-versant (M. Engalenc 1975).....	13
3 Mode de gisement des eaux souterraines dans le socle cristallin du Burkina Faso (Savadoga A.N. 1984).....	14
4 Asorption, Réflexion, Transmission (Scanic J.Y. 1983).....	18
5 Le spectre électromagnétique (Scanic J.Y. 1983).....	20
6 Principe d'implantation d'un forage à grand débit en milieu cristallin du Burkina Faso sur la base des structures tectoniques. (CIEH-BGR 1989).....	31
7 Modèle macroanisotrope non homogène (D. Le Masme 1979)	38
8 Modèle de zone fracturée large (inspiré de Darboux-Afouda R. 1985).....	39
9 Modèle de contact de deux zones différentes (inspiré de Darboux-Afouda R. 1985).....	39
10 Modèle de bas-fond sans zone de fracture (inspiré de Darboux-Afouda R. 1985).....	40
11 Modèle de roche filonienne fissurée (pendage 90°) (inspiré de Darboux-Afouda R. 1985).....	40
12 Modèle de roche filonienne fissurée (pendage 60°) (inspiré de Darboux-Afouda R. 1985).....	40
13 Modèle de dyke (inspiré de Darboux-Afouda R. 1985).....	40
14 Schéma de l'induction électromagnétique du système EMB (Bieler G. et al. 1988).....	43
15 Mode boucles verticales et mode boucles horizontales	

(inspiré de McNeil J.D. 1991).....	46
16 Données de Maxmin à travers un conducteur vertical (inspiré de McNeil J.D. 1991).....	48
17 Symboles de valeurs lues sur la courbe expérimentale (John Best, documents du Maxmin II).....	48
18 Localisation des sites investigués.....	51
19 Carte de photo-interprétation (Site de Pissi).....	53
20 rosace de fissures (site de Pissi).....	55
21 Carte de linéaments selon la composante principale no.2 (site de Pissi).....	57
22 Carte de linéaments: synthèse de tous les traitements autres que la composante principale no.2 (site de Pissi).....	58
23 Carte de linéaments: synthèse de tous les traitements (site de Pissi).....	60
24 rosace de linéaments (photographies aériennes, image satellite numérique, image Spot sur papier) (site de Pissi).....	61
25 Carte et histogramme de linéaments photo-aériens (site de Pissi).....	63
26 Carte de linéaments d'image satellite (site de Pissi).....	64
27 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) Plateforme 1 (site de Pissi).....	67
28 Carte et représentation en perspective des valeurs de (-), composante en quadrature Plateforme 1 (site de Pissi)	68
29 Profils électromagnétiques: extension longitudinale de l'axe conducteur (site de Pissi).....	69
30 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) Plateforme 2 (site de Pissi).....	71
31 Carte et représentation en perspective des valeurs de (-), composante en quadrature Plateforme 2 (site de Pissi).....	72
32 Courbes de sondages électriques (site de Pissi)	73
33 Profil d'anisotropie (site de Pissi).....	74
34 disposition des profils de mesures (site de Pissi).	76

35 a-rosace de foliations b-rosace de fissures c-rosace de filons (site de Rakaye Mossi).....	78
36 Carte de photo-interprétation (site de Rakaye Mossi)	80
37 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Rakaye Mossi).....	82
38 profils électromagnétiques: extension de l'axe conducteur (site de Rakaye Mossi).....	83
39 Carte et représentation en perspective des valeurs de (-),composante en quadrature (site de Rakaye Mossi)...	84
40 Courbes de sondages électriques (site de Rakaye Mossi).....	85-86
41 Profil d'anisotropie (site de Rakaye Mossi).....	87
42 Position de profils de mesures (site de Rakaye Mossi).....	88
43 Carte de photo-interprétation (site de Sambin).....	91
44 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) Plateforme 1 (site de Sambin).....	93
45 cartes et représentations en perspective des valeurs de (-), ^B composante en quadrature et ^A composante en phase Plateforme 1 (site de Sambin).....	94-95
46 profils électromagnétiques: extension longitudinale de l'axe conducteur (site de Sambin).....	96
47 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) Plateforme 2 (site de Sambin).....	97
48 Carte et représentation en perspective des valeurs de (-),composante en quadrature Plateforme 2 (site de Sambin).....	98
49 Courbes de sondages électriques (site de Sambin)...	99-100
50 Profils d'anisotropie (site de Sambin).....	101
51 Position des profils de mesures (site de Sambin)...	102
52 Carte de photo-interprétation (site de Douougou)..	106
53 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Douougou).....	108
54 Courbes de sondages électriques (site de Douougou)	109
55 Profil d'anisotropie (site de Douougou).....	110
56 Carte de photo-interprétation (site de Lay).....	113
57 Carte et représentation en perspective de résistivité	

(Ohm-m) Plateforme 1 (site de Lay).....	115
61 Profils électromagnétiques: extension longitudinale de l'axe conducteur Plateforme 1 (site de Lay).....	119
58 Carte électromagnétique Plateforme 1 (site de Lay).	116
59 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) Plateforme 2 (site de Lay).....	117
60 Carte électromagnétique Plateforme 2 (site de Lay).	118
62 Profils électromagnétiques; extension longitudinale de l'axe conducteur Plateforme 2 (site de Lay).....	120
63 Courbes de sondages électriques (site de Lay).....	121-122
64 Profils d'anisotropie (site de Lay).....	123
65 Position des profils de mesures (site de Lay)	124
66 Carte de photo-interprétation (site de Nioko 2)....	127
67 Carte et représentation en perspective des valeurs de (-),composante en quadrature (site de Nioko 2).....	129
68 Profils électromagnétiques: extension de l'axe conducteur (site de Nioko 2).....	130
69 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Nioko 2).....	131
70 Courbes de sondages électriques (site de Nioko 2)..	132-133
71 Diagrammes de cercles de mesures électromagnétique. (site de Nioko 2).....	134
72 Profil d'anisotropie (site de Nioko 2).....	135
73 Position des profils de mesures (site de Nioko 2)..	136
74 a-rosace de fissures et b-rosace de filons (site de Pobé Mengao).....	140
75 Carte de photo-interprétation (site de Pobé Mengao)	141
76 a-linéament photo-aériens, b-rosace et c-histogramme de linéament (site de pobé Mengao).....	142
77 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Pobé Mengao).....	144
78 Carte et représentation en perspective des valeurs de (-), composante en quadrature (site de Pobé Mengao)..	145
79 Courbes de sondages électriques (site de Pobé Mengao).....	146
80 courbes de sondages électromagnétiques (site de Pobé Mengao).....	147-148

81 Diagramme de cercle de mesures électromagnétiques (site de Pobé Mengao).....	150
82 Profils électromagnétiques: extension de l'axe conducteur (site de Pobé mengao).....	151
83 Position des profils de mesures (site de Pobé Mengao).....	152
84 Carte de photo-interprétation (site de Nabmayaoghin)	155
85 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Nabmayaoghin).....	158
86 Carte et représentation en perspective des valeurs de (-), composante en quadrature (site de Nabmayaoghin)	159
87 Profils électromagnétiques et électrique P6,P13,P14 (site de Namayaoghin).....	160
89 Courbes de sondages électriques (site de Nabmayaoghin).....	162
90 Courbes de sondages électriques (site de Nabmayaoghin).....	163-164
90 Courbes de sondages électromagnétiques (site de Nabmayaoghin).....	165-166-167
91 Profil d'anisotropie (site de Nabmayaoghin).....	168
88 Profils électromagnétiques: extension de l'axe conducteur (site de Nabmayaoghin).....	161
92 Position des profils de mesures (site de Nabmayaoghin).....	169
93 Carte de photo-interprétation (site de Boudri)....	173
94 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Boudri).....	175
96 Profils électromagnétiques et électrique: extension longitudinale de l'axe conducteur (site de Boudri).	177
95 Carte et représentation en perspective des valeurs de (-), composante en quadrature (site de Boudri).....	176
97 Courbes de sondages électriques (site de Boudri)...	179
99 Courbes de sondages électriques (site de Boudri)...	182
98 Courbes de sondages électromagnétiques (site de Boudri).....	180-181
100 Profils d'anisotropie (site de Boudri).....	183
101 Position des profils de mesures (site de Boudri)..	184

102 Cartographie d'indices biologiques (termitières) (site de Boudri)	185
103 Carte de photo-interprétation (site de Toéssin)...	188
104 Carte et représentation en perspective de résistivité (Ohm-m) (site de Toéssin).....	190
105 Carte et représentation en perspective des valeurs de (-), composante en quadrature (site de Toéssin)...	191
106 Profils électromagnétiques P8-P9 (site de Toéssin).....	192
107 Courbes de sondages électriques (site de Toéssin).	194
108 Profil d'anisotropie (site de Toéssin).....	195
109 Position des Profils de mesures (site de Toéssin).	197
110 Profils d'anisotropie de tous les sites investigués	
111 Dispositifs géophysiques recommandés après les études de télédétection et géologiques pour l'implantation des forages à haut rendement.....	232
112 abaque deux terrains.....	243'
113 abaque lieu de croix pour =0.....	244
114 abaque lieu de croix pour >	245
115 abaque lieu de croix pour =	246
116 courbes caractéristiques pour un demi-espace.....	253
117 courbes caractéristiques pour un demi-espace.....	253
118 courbes caractéristiques pour un demi-espace	254
119 courbes caractéristiques pour un demi-espace	254
120 courbes caractéristiques pour un demi-espace	255
121 courbes caractéristiques pour un demi-espace.....	255

Liste des tableaux

	page
1 Exemples de types de réseaux hydrographiques en Cote d'Ivoire (Bourguet, L. 1980).....	23
2 Forages situés sur des noeuds de fractures..... (74 noeuds, Boucle du Cacao, RCI, Géohydraulique, 1981)	23
3 Débits des forages en fonction de la longueur des fractures (exprimés en %) (RCI, Boucle du Cacao, Géohydraulique, 1981).....	24
4 Directions des fractures les plus favorables ou défavorables à l'obtention d'un % de réussite satisfaisant (débit supérieur ou égal à 0.6m ³ /h) (Géohydraulique, 1981).....	24
5 Influence de la géologie sur la productivité des ouvrages (Togo, Géohydraulique, 1981).....	29
6 Influence de la géologie sur la productivité des ouvrages (Togo, Géohydraulique, 1981).....	29
7 Influence de la géologie sur la productivité des ouvrages (Mali, Géohydraulique, 1981).....	30
8 Influence de la géologie sur la productivité des ouvrages (Haute-Volta, Géohydraulique, 1981).....	30
9 Influence de la géologie sur la productivité des ouvrages (Haute-Volta, Géohydraulique, 1981).....	30
10 Caractéristiques des courbes du profilage carré Darboux-Afouda R., 1985).....	38
11 Comparaison des résultats de sondages électriques et de sondages électromagnétiques (site de Pobé Mengao).	149
12 Résultats des sondages électromagnétiques en fonction de la direction Emetteur-Récepteur.....	193
13 Variations récentes de l'activité en ¹⁴ C dans l'atmosphère.....	201
14 Résultats et interprétation d'analyse ¹³ C et ¹⁴ C	202
15 Résultats des analyses de l'arsenic.....	203
16 exemple des valeurs minimales et maximales d'une courbe expérimentale.....	252

ANNEXES

A.1 La méthode de prospection électrique

A.1.1 Généralité

A.1.1.1 La loi d'Ohm

Le principe de la méthode de prospection électrique par courant continu est basée sur la loi d'Ohm . Dans sa forme originelle , cette loi ne s'appliquait qu'aux circuits . Cette loi stipule que: pour un courant continu traversant un circuit élémentaire le rapport entre la différence de potentiel à travers l'élément et la quantité de courant est une constante caractéristique de l'élément . Cette quantité est définie comme étant la résistance électrique de l'élément donnée par la relation:

$$R = - \Delta V / I$$

avec

R=résistance

ΔV =différence de potentiel

I=l'intensité de courant

Si nous considérons un cylindre homogène parcouru par un courant dans la direction de son axe , la résistance sera proportionnelle à la longueur L et inversement proportionnelle à la section traversée A c'est-à-dire :

$$R = k L / A$$

Le coefficient de proportionnalité k qui est un scalaire est la résistance entre les faces opposées d'un cube de dimension unitaire représentant un élément de ce matériel . C'est la résistivité ou résistance spécifique du matériel.

Considérons un parallélépipède rectangle de dimensions

Δx , Δy , Δz situé en un point p et orienté de telle sorte que oz soit dans la direction de la densité de courant J à travers ce parallélépipède

S'il n'existe aucune discontinuité du champ de courant au point p , la résistance à travers ce parallélépipède peut s'écrire :

$$R = E \cdot \Delta z / J \cdot \Delta x \cdot \Delta y$$

$$\text{soit } R = k \cdot \Delta z / J \cdot \Delta x \cdot \Delta y \text{ et } \nabla = E/J$$

Si le matériel est isotrope E et J ont la même direction .

La loi d'Ohm peut s'écrire :

$$kJ = E \text{ ou encore } J = \sigma * E \text{ avec } \sigma = 1/k$$

σ est la conductivité ; dans le système MKSA son unité est MHO = Ohm/m . Elle est liée à la densité de courant et à la mobilité des charges électriques .

La loi d'Ohm est une loi empirique sujette à des exceptions . En effet certains matériaux n'obéissent pas à cette loi lorsqu'on a de fortes intensités de courant .

En géophysique appliquée, les densités de courant utilisées sont en général faibles et n'excèdent pas 1 amp/m².

Pour un milieu anisotrope, la résistivité dépend de la direction et J et E ne sont pas forcément parallèles.

$$J = \sigma E \text{ devient } J_i = \sigma_{ik} E_k$$

σ_{ik} est un tenseur de second ordre . Les composantes de ce tenseur dépendent de la caractéristique de l'anisotropie .

Quand $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33}$ et que les autres composantes s'annulent on retrouve le cas de matériel isotrope .

Loin d'être un handicap pour la prospection l'anisotropie joue un rôle important dans bien de cas .

Beaucoup de roches ou de minéraux sont de très faibles conducteurs . Tout passage de courant à travers de tels matériels s'effectue par conduction électrique à travers l'eau interstitielle . Les eaux souterraines lorsqu'elles contiennent des sels dissous , sont de véritables conducteurs par rapport à la roche mère . Dans ce cas, le courant prendra la trajectoire de moindre résistance permettant ainsi sa localisation . C'est le cas des failles et des fissures dans le socle

A.1.1.2- Equation générale du potentiel électrique

La relation entre la densité de courant J et le champ électrique E est donnée par la loi d'Ohm $J = \sigma E$. Le champ E dérive d'un potentiel $E = -\Delta V$

La relation entre la densité de courant J et le champ électrique E est donnée par la loi d'Ohm $J = \sigma E$. Le champ E dérive d'un potentiel $E = -\Delta V$

$$\text{d'où } J = \sigma \Delta V$$

Selon le principe de conservation de charge, dans les conditions normales , la charge électrique ne se crée , ni ne se détruit , elle est mise seulement en évidence par l'expérience .

Cela signifie qu'à travers une surface S délimitant un volume où il n'existe aucune source de courant on a $\int J_{nds} = 0$, d'où selon le théorème de Gauss $\nabla \cdot J = 0$ d'où $\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0$, $\nabla \cdot \sigma \nabla V + \sigma \nabla \cdot \nabla V = 0$. Si σ est une constante il s'en suit que $\Delta V = 0$ et le potentiel dans ce cas est une fonction harmonique.

Les conditions aux limites permettant la résolution de cette équation sont les suivantes :

-le potentiel et ses dérivées sont continus dans tout milieu homogène .

-au voisinage des électrodes d'injection $V = \rho I / 2\pi R$

-sur une surface de discontinuité les dérivées premières de la fonction potentiel sont discontinues mais $\partial V / \partial n$ est continu (n étant la normale à la surface de séparation).

3.3.1.1.3- principe de la prospection électrique

Le principe de la prospection électrique repose sur la mesure de la résistivité du sous-sol . Comme c'est presque toujours le cas , on injecte un courant dans le sol à l'aide de deux électrodes (A et B) et le potentiel qui en résulte est mesuré à l'aide de deux autres électrodes (M et N).

Dans un milieu homogène , la circulation de courant obéit à la loi de conservation de la charge : $\text{Div } J = \partial Q / \partial T$ avec $J = \text{densité de courant}$ $Q = \text{densité de charge}$.

Si on utilise un courant continu , on se trouve en état stationnaire ce qui signifie que $\text{Div } J = 0$.

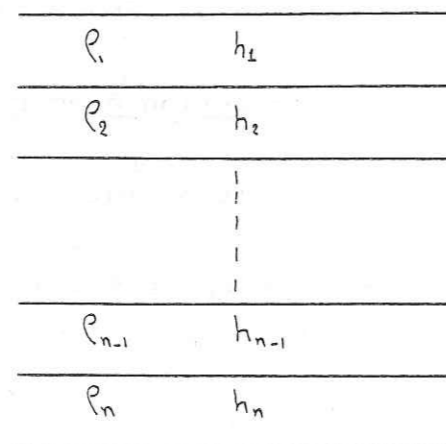
La loi d'Ohm stipule que $J = E / \rho = -\text{grad}.V / \rho$ où V est le potentiel électrique . On en déduit alors $\text{Div}.(\text{grad}.V / \rho) = 0$.

On obtient ainsi une équation différentielle du second ordre .
On peut alors résoudre cette équation pour des cas spécifiques
donnés.

Plusieurs techniques sont utilisées pour les mesures
électriques . Lorsqu'on garde les électrodes d'injection à une
distance fixe on effectue des mesures de résistivité apparente
à une profondeur jugée constante . Il suffit de se déplacer sur
des profils et on effectue ainsi des trains de résistivité .
On peut en gardant fixe le milieu du dispositif , faire varier la
longueur A B , on effectue des sondages électriques . Deux
dispositifs sont généralement utilisés : le dispositif Wenner et
le dispositif Schlumberger

A.1.1.4 Potentiel à la surface d'un sous-sol stratifié

Soit le schéma suivant:



Le potentiel créé vérifie dans chaque domaine D_i où i est
constante l'équation $\Delta V=0$ ainsi qu'un certain nombre de

conditions aux limites déjà énoncées .

$$\Delta V=0$$

en coordonnées cylindriques cette équation s'écrit

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

Pour des raisons de symétrie V ne dépend pas de θ , l'équation
devient alors

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

on cherche une solution sous la forme

$$V(r, z) = U(r)W(z)$$

(1) devient

$$\frac{1}{U} + \frac{dU}{dr^2} + \frac{1}{rU} \frac{dU}{dr} = - \frac{1}{W} \frac{d^2 W}{dz^2}$$

Il suffit de trouver U et W solution de

$$\frac{d^2 W}{dz^2} = -\lambda^2 W \quad \text{et} \quad \frac{d^2 U}{dr^2} + \lambda^2 r U = 0$$

où λ est un réel quelconque

$$\text{on obtient } W = A e^{-\lambda z} + B e^{\lambda z}$$

$$V = A J_0 e^{-\lambda z} + B Y_0 e^{\lambda z} \quad (A \text{ et } B = \text{Constantes arbitraires})$$

J_0 étant la fonction de Bessel d'ordre zéro.

L'équation (1) étant linéaire une classe de fonction , solution de
1 peut s'écrire :

$$V(r, z) = \int_0^{\infty} [A(\lambda) J_0(\lambda r) e^{-\lambda z} + B(\lambda) J_0(\lambda r) e^{\lambda z}] d\lambda \quad (1)$$

Si on a un demi espace homogène de résistivité ρ_1

$$\text{on a } V_0 = \frac{\rho_1 I}{2\pi \sqrt{r^2 + z^2}} \quad \text{avec} \quad \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda$$

$$\text{Si on pose que } A(\lambda) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} (1 + K(\lambda)) \quad B(\lambda) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \chi(\lambda)$$

L'équation 2 devient

$$V = V_0 + \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} [K(\lambda) J_0(\lambda r) e^{-\lambda z} + \chi(\lambda) J_0(\lambda r) e^{\lambda z}] d\lambda$$

Si on dispose de n couches, on cherche les fonctions

$$K_n(\lambda) \text{ et } \chi_n(\lambda) \quad (n=1 \dots n)$$

telles que:

$$V = V_0 + \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} [K_1 \dots K_n \dots \chi_n \dots] d\lambda$$

vérifient les conditions aux limites .

$$a) \frac{1}{\rho_n} \frac{\partial V_n}{\partial z}(r, h_n) = \frac{1}{\rho_{n+1}} \frac{\partial V_{n+1}}{\partial z}(r, h_{n+1}) \quad n=1 \dots n$$

comme V_0 est continu partout il suffit d'avoir:

$$[K_n - K_{n+1}] e^{-\lambda h_n} + [\chi_n - \chi_{n+1}] = 0 \quad (a)$$

$$b) V_n(r, h_n) = V_{n+1}(r, h_n) \quad n=1 \dots n$$

Si on prend V_n sous la forme

$$V_n = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} [J_0(\lambda r) e^{-\lambda z} + K_n(\lambda) J_0(\lambda r) e^{-\lambda z} + \chi_n(\lambda) J_0(\lambda r) e^{-\lambda z}] d\lambda$$

on arrive à:

$$-K_n(\lambda) e^{-\lambda h_n} + \chi_n e^{\lambda h_n} + \frac{\rho_n}{\rho_{n+1}} K_{n+1}(\lambda) e^{-\lambda h_n} - \frac{\rho_n}{\rho_{n+1}} \chi_n e^{\lambda h_n} = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_{n+1}} e^{-\lambda h_n} \quad (b)$$

Pour la frontière à la surface du sol, on impose:

$$\frac{\partial V_n}{\partial z}(r, 0) = 0 \quad \text{et} \quad V_n \rightarrow 0 \quad z \rightarrow \infty$$

d'où

$$K_n = \chi_n \quad \text{et} \quad \chi_n = 0 \quad (c)$$

avec les équations a)b)c)d)

on se retrouve avec $2N$ équations linéaires.

La résolution de ces équations donne la solution suivante:

$$V(r, 0) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} + \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} K_1(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda$$

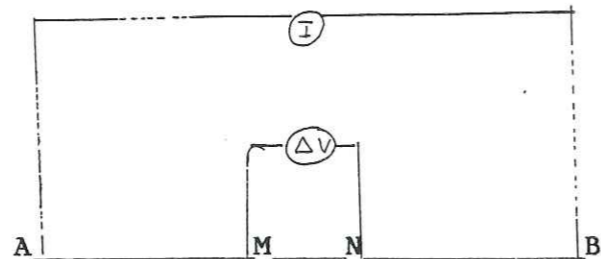
A.1.2 INTERPRETATION

A.1.2.1-Principe d'interprétation des sondages électriques

A.1.2.1.1) rappel

Dans un milieu homogène de résistivité ρ la relation suivante est vérifiée :

$$\Delta V = \rho I / 2\pi (1/AM - 1/AN - 1/BN + 1/BN)$$



On introduit, dans un cas réel, la notion de résistivité apparente qui pour un dispositif donné est défini par:

$$\rho_a = 2\pi \Delta V (1/AM - 1/AM - 1/BM + 1/BN) I$$

ON peut utiliser différents dispositifs des électrodes en particulier le dispositif Schlumberger, symétrique (où $NM \ll AB$) dans ce cas $a = \pi \cdot V \cdot (AB/2) \cdot (MN/2) / (MN/2)$

Faire un sondage Schlumberger au point O, c'est déterminer les valeurs de ρ_a quand, le centre restant en O, on augmente les valeurs de AB. L'objet de l'interprétation est de déduire la répartition de la résistivité en profondeur à partir de la fonction $\rho_a(AB/2)$. Ceci sera possible, à quelques restrictions près dans le cas d'un sous sol tabulaire.

A.1.2.1.2- Unicité et Stabilité

Si une structure est tabulaire le problème est de déduire $\rho(z)$ de $\rho_a(AB/2)$. On peut montrer que si $\rho_a(AB/2)$ est une fonction susceptible d'être obtenue par sondage électrique pour un milieu tabulaire, il existe une et une seule distribution de résistivités qui la donne. Ceci est très satisfaisant mais reste malheureusement très théorique car en pratique on ne connaît pas la fonction $\rho_a(AB/2)$ mais seulement quelques valeurs de cette fonction (pour les AB/2 où on fait les mesures) et ceci avec des erreurs de mesure. Il faut donc examiner la stabilité des correspondances entre ρ_a et ρ . La correspondance $\rho(z)$ — $\rho_a(AB/2)$ est stable (une petite variation de $\rho(z)$ n'entraîne

qu'une petite variation de $\rho_a(AB/2)$, mais l'inverse n'est pas vrai (une petite variation de $\rho_a(AB/2)$ peut être causée par une grande variation de $\rho(z)$). Il y aura nécessairement des indéterminations. Examinons en les principaux cas:

a) principe d'équivalence

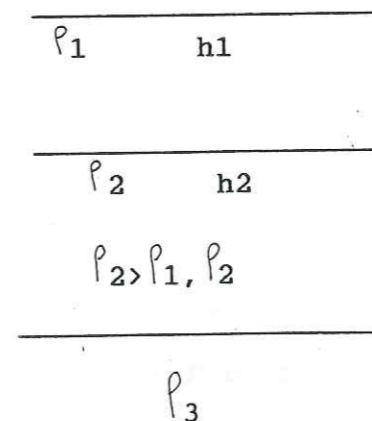
-lorsqu'on a une couche résistante située entre deux couches conductrices:

soit:

- ρ_1 =résistivité du premier terrain
- ρ_2 =résistivité du deuxième terrain
- ρ_3 =résistivité du troisième terrain

- h_1 =épaisseur du premier terrain
- h_2 =épaisseur du deuxième terrain
- h_3 =épaisseur du troisième terrain

la fonction $\rho_a(AB/2)$ varie peu quand ρ_2 et h_2 varient de façon que la résistance transversale $h_2 \cdot \rho_2$ reste constante et que h_2 / ρ_2 reste petit par rapport à h_1 / ρ_1 et h_3 / ρ_3



-lorsqu'on a une couche conductrice entre deux couches résistantes on remarque que la fonction $\rho_a(AB/2)$ varie peu quand ρ_2 et h_2 varient de façon que la conductance horizontale h_2/ρ_2 reste constante et que

$$\rho_2 \cdot h_2 \text{ reste petit par rapport à } \rho_1 \cdot h_1 \text{ et } \rho_3 \cdot h_3$$

Lorsqu'on se trouve dans ces deux cas, les paramètres significatifs sont la résistance transversale et la conductivité horizontale et non les valeurs de ρ_2 et h_2 .

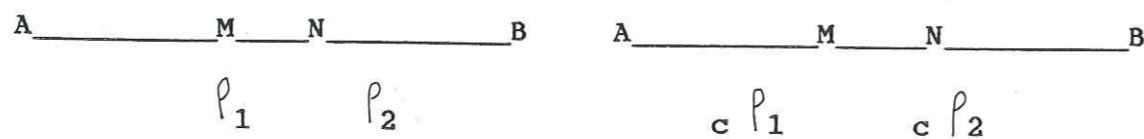
b) principe de suppression

Lorsqu'on a une succession de trois terrains (ρ_1, h_1 ; ρ_2, h_2 ; ρ_3, h_3 ;) si la résistivité du deuxième terrain ρ_2 est intermédiaire entre la résistivité du premier et celle du troisième et que h_2 n'est pas très grand, l'effet de ce terrain peut être négligeable.

A.1.2.1.3) Relations de similitudes

a) similitude électrique

Soit un terrain de résistivité ρ_1 renfermant un corps de résistivité ρ_2 et un deuxième terrain de résistivité $c\rho_1$ contenant lui aussi un corps de résistivité $c\rho_2$, c étant une constante. Si à l'aide d'un quadripole ABMN, on mesure les résistivités apparentes correspondant à ces deux cas (figures ci-dessous)

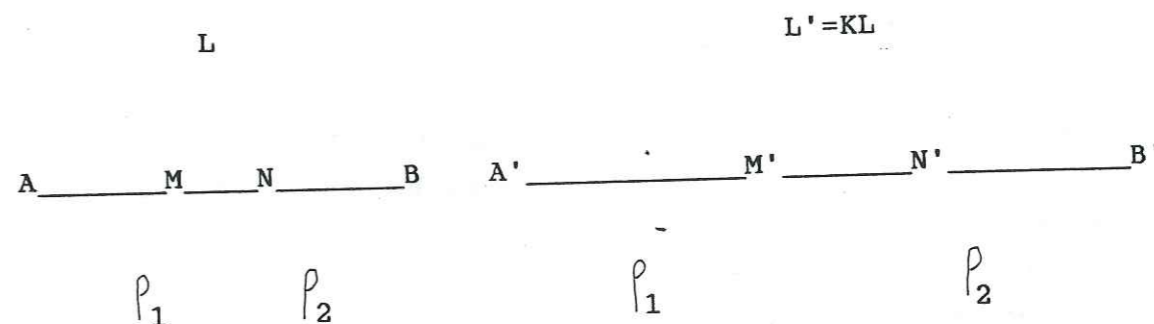


on remarque que:

$$\rho_a(AB/2) = c \rho_a(AB/2)$$

b) similitude géométrique

Soit dans un premier temps un terrain de résistivité ρ_1 contenant un corps de résistivité ρ_2 . On considère dans un deuxième temps le même terrain de résistivité ρ_1 contenant un corps de résistivité ρ_2 mais dont les dimensions sont K fois celles du corps dans le premier cas. Si on mesure la résistivité apparente dans le premier cas avec un quadripole ABMN, et celle du deuxième cas par un quadripole A'B'M'N' dont les dimensions sont K fois celles de ABMN (figures ci-dessous):



on remarque que:

$$\rho_a(AB/2) = \rho_a(AB/2K)$$

c) Conséquence : utilité des coordonnées bilogarithmiques

En combinant les deux propriétés précédentes, il est facile de passer de la fonction f_a pour une structure à la fonction f_a' pour une structure semblable électriquement et géométriquement avec les rapports K et v . En effet à partir d'un point $x = AB/2$, $y = a(AB/2)$ de la première courbe $y = a(x)$ on construit un point de la courbe correspondant à la deuxième structure : $x = vx$, $y' = Ky$.

L'intérêt d'un système de coordonnées bilogarithmique est alors évident : on passe d'une courbe à l'autre par une simple translation de vecteur $(\log v, \log k)$.

3.3.1.2.2.4- Les abaques

a) Sondage deux terrains figure 112

La résolution de l'équation générale du potentiel à la surface de deux terrains parallèles homogènes et isotropes, aboutit à la solution:

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 2 \int_0^{\infty} \frac{K_n L^3}{[L^2 + (2n)^2]^{3/2}} (1)$$

avec $K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ et $L = OA/h_1$; ρ_1 et ρ_2 étant les résistivités vraies des deux terrains et h_1 l'épaisseur du premier terrain.

-Si $\rho_2 = 1$ alors $K=0$ et $\rho_a = \rho_1 = \rho_2$

-Si $OA \rightarrow 0$, $L \rightarrow 0$ et $\rho_a = \rho_1$

-Si $OA \rightarrow \infty$, $L \rightarrow \infty$ et $\rho_a = \rho_2$

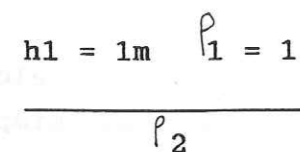
En posant $\rho_1/\rho_2 = \text{constante}$, on aura $K = \text{constante}$ et (ρ_a/ρ_1) dans l'équation (1) ne dépend que de L .

Par commodité, on représente (ρ_a/ρ_1) en fonction de (OA/h_1) pour différentes valeurs de (ρ_2/ρ_1) sur du papier bilogarithmique: la relation devient:

$$\text{Log}(\rho_a/\rho_1) = F(\text{log}(OA/h_1)).$$

L'ensemble de ces courbes (figure 112) constitue les abaques deux terrains ou abaque CH1.

Chaque courbe de cet abaque correspond à la courbe d'un sondage électrique deux terrains, représentés par la figure ci-dessous:



On considère un premier terrain de résistivité $\rho_1 = 1$ et d'épaisseur $h_1 = 1$ et on choisit diverses valeurs de ρ_2 résistivité du deuxième terrain. Grâce aux relations de similitudes et à l'utilisation de coordonnées bilogarithmiques et en utilisant une feuille de calque on déduit les courbes pour toutes les valeurs de h_1 , ρ_1 , ρ_2

b) Abaques lieux de crois.

Lorsqu'on dispose d'une succession de plus de deux terrains, il faut faire une interprétation par morceaux à l'aide de l'abaque deux terrains. Les abaques lieux de crois servent à déterminer le "terrain équivalent à deux terrains, vis à vis du substratum. Ils sont approximatifs. On en utilise surtout trois (figures 113, 114, 115)

a) $\rho_{(i+2)} = 0$ si $\rho_{(i+2)} \ll \rho_i$ et ρ_{i+1}

b) $\rho_{(i+2)} = \infty$ si $\rho_{(i+2)} \gg \rho_i$ et ρ_{i+1}

c) $\rho_{(i+2)} = \rho_i$ si $\rho_{(i+2)} \approx \rho_i$ (en comparant avec $\rho_{(i+1)}$).

On compare l'ensemble des $n-1$ terrains au n ème terrain supposé d'épaisseur infini.

Figure 112 Abaques "deux terrains"

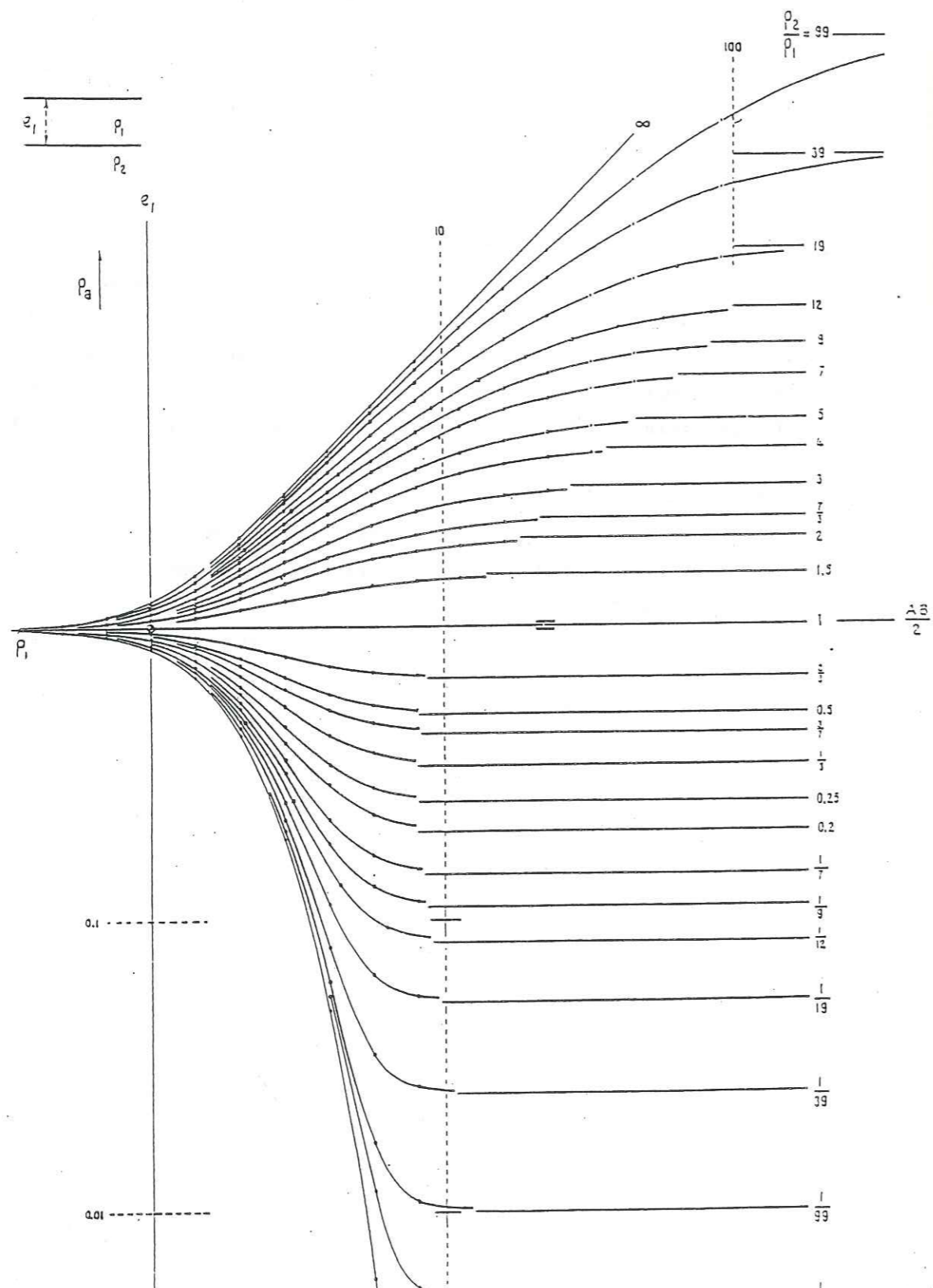


Figure 113 Abaque lieu de crois pour $\rho_3=0$

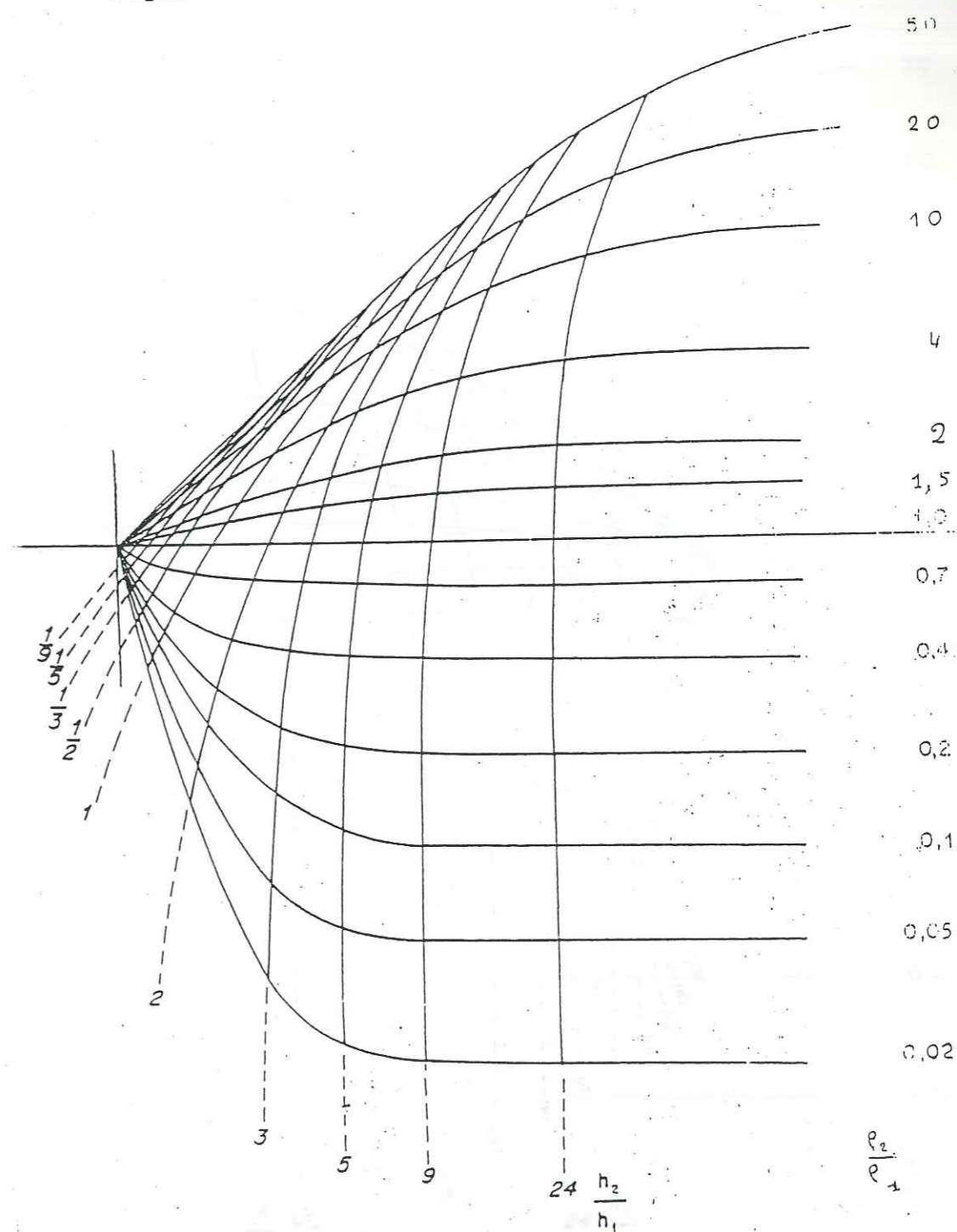


Figure 114 Abaque lieu de croix pour $\rho_3 = \rho_1$

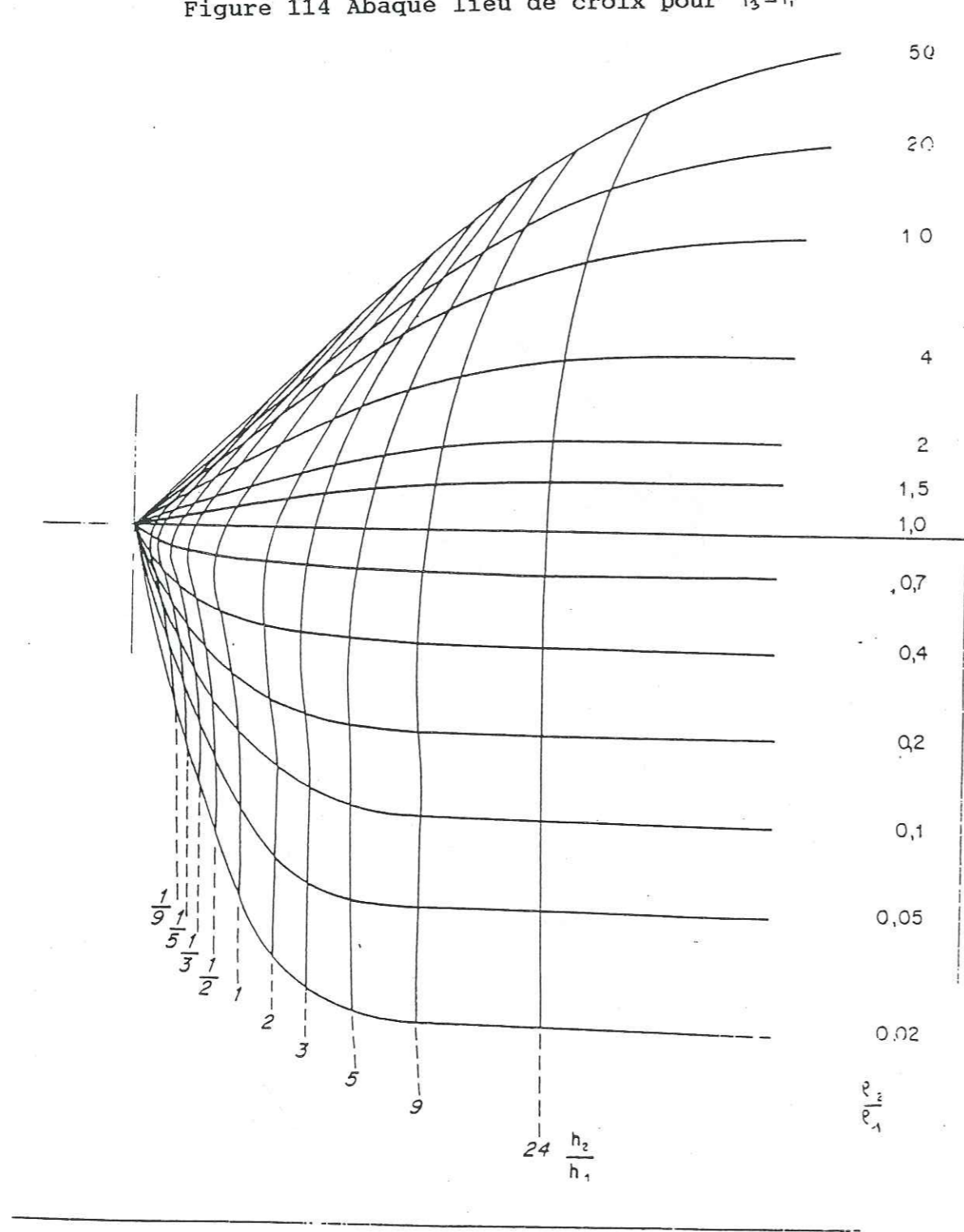
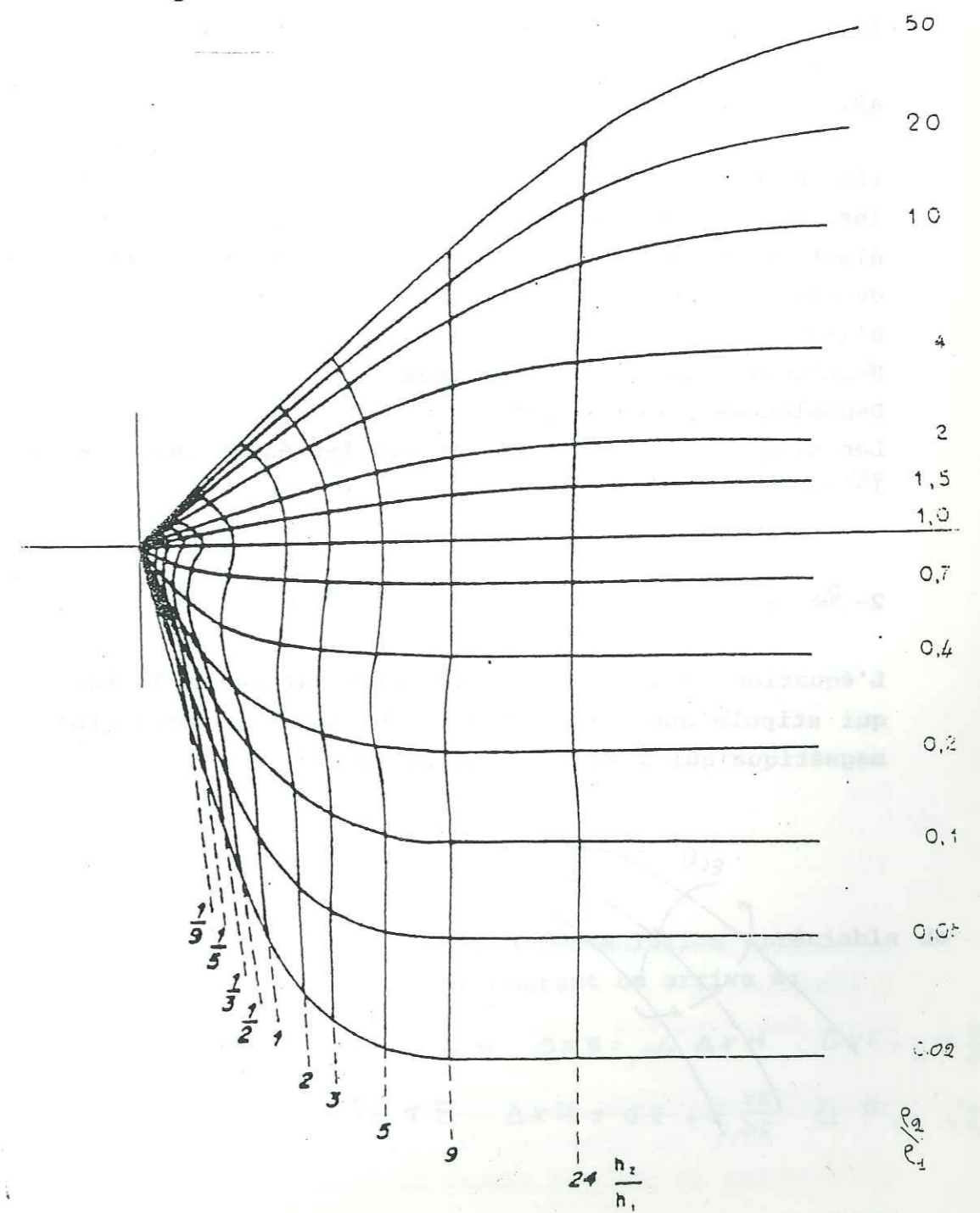


Figure 115 Abaque lieu de croix pour $\rho_3 = \infty$



A2-METHODE ELECTROMAGNETIQUE

A2.1- théorie de l'électromagnétisme

A2.1.1) Les équations de Maxwell

Pour déterminer les champs électrique et magnétique dans une région donnée on doit déterminer cinq vecteurs de champ. Ce sont les quatre vecteurs B H E et D qui décrivent le champ électromagnétique et la densité de courant J qui décrit la notion de charge libre.

B=induction magnétique

H=intensité du champ magnétique

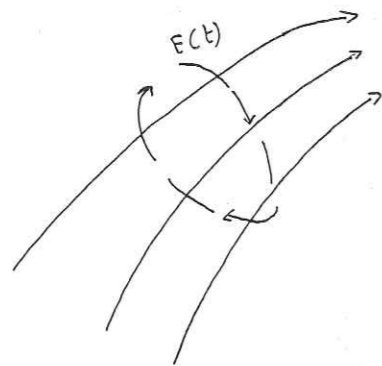
D=déplacement électrique

Les cinq vecteurs sont reliés par les équations de Maxwell.

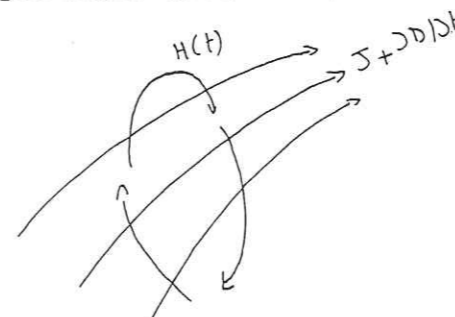
$$1- \text{Rot. } E = -\partial B / \partial t$$

$$2- \text{Rot. } H = J + \partial D / \partial t$$

L'équation 1 est la formulation mathématique de la loi de Faraday qui stipule que tout champ électrique qui varie crée un champ magnétique qui s'enroule autour de lui.



La seconde équation indique qu'un champ magnétique qui varie crée un un champ électrique qui circule autour de ce champ magnétique avec conduction et déplacement d'électrons.



Quelque soit un vecteur V on a $\Delta \cdot \Delta X V = 0$

En prenant la divergence de l'équation 1 on obtient:

$$\Delta \cdot \Delta X E = 0 \Leftrightarrow \Delta \cdot \partial B / \partial t = -\frac{\partial}{\partial t} \Delta \cdot B$$

La divergence étant indépendante du temps, il s'en suit que :

$$\Delta \cdot B = 0$$

de même en prenant la divergence de l'équation 2

$$\Delta \cdot \Delta X B = 0 \Leftrightarrow \Delta \cdot J + \Delta \cdot \partial D / \partial t = \Delta \cdot J + \frac{\partial}{\partial t} \Delta \cdot D$$

soit e= la densité de charge

$$\Delta \cdot J = \frac{\partial e}{\partial t}, \quad \frac{\partial}{\partial t} (\Delta \cdot D \cdot e) = 0 \quad \Delta \cdot D = e \quad (4)$$

Si on considère qu'il n'y a pas d'accumulation appréciable de charge pendant la circulation du courant on arrive à:

$$\Delta \cdot J = 0 \Leftrightarrow \Delta \cdot D = 0 \quad B = \mu_0 H \quad \Delta X B = \mu_0 \Delta X H \quad \Delta X E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (6)$$

$$D = \epsilon_0 E - \Delta \cdot H \quad (6) \quad J = \sigma E \quad \Delta X H = \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad \Delta \cdot E = 0 \quad (8)$$

Les équations 5,6,7,8 constituent les quatre équations de Maxwell.

A2.1.2- Equation fondamentale de l'électromagnétisme

a) définition

A partir des équations de Maxwell nous pouvons déterminer la conductivité; on a $\sigma=f(E,H)$. Pour simplifier cette équation on utilise les propriétés des relations d'opérateurs vectoriels. Quelque soit un vecteur V

$$\Delta \times \Delta \times V = \text{grad } \Delta \cdot V - \Delta^2 V$$

D'après l'équation 7

$$\Delta \times \Delta \times E - \mu \frac{\partial}{\partial t} \Delta \times H = \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} : \Delta E$$

d'où

$$\Delta E = \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

Par similitude, on aura:

$$\Delta H = \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

$\mu\sigma$ =terme dissipatif

μ =indique la vitesse de l'onde.

C'est une équation d'onde

b)simplification en géophysique de l'équation d'onde

L'ordre de grandeur des termes montre qu'en prospection géophysique on peut se passer du terme

$$\mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

c) Résolution de l'équation d'onde

$$E=E_x \quad H=H_y$$

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} = \mu \sigma \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad \text{et} \quad E_x = E_0 e^{-3 \sqrt{\frac{\pi \mu \sigma}{T}}} \cos \left[\frac{2\pi t}{T} - 3 \sqrt{\frac{\pi \mu \sigma}{T}} \right]$$

de même

$$E_x = E_0 e^{-3 \sqrt{\frac{\pi \mu \sigma}{T}}} \sin \left(\frac{2\pi t}{T} - 3 \sqrt{\frac{\pi \mu \sigma}{T}} \right)$$

est aussi solution

Par similitude, on a la même équation en H_y comme solution de l'équation:

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} = \mu \sigma \frac{\partial H_y}{\partial t}$$

H_y doit avoir le même type de forme que E_x , à un coefficient multiplicateur près:

$$H_y = X e^{-i\omega t}$$

Cette solution satisfera les équations de Maxwell

Pour satisfaire l'équation de Maxwell:

$$- \sqrt{i \omega \mu \sigma} E_x = i \omega \mu H_y$$

$$\frac{E_x}{H_y} = \frac{i \omega \mu}{\sqrt{i \omega \mu \sigma}} = \frac{\sqrt{i \omega \mu}}{\sqrt{\sigma}}$$

au dessus d'un sous sol de résistivité ρ

$$\rho = \frac{-i}{\omega \mu} \left(\frac{E_x}{H_y} \right)^2$$

i provenant de la différence de phase E et H étant des complexes. Il disparaît de la formule lorsqu'on s'intéresse aux valeurs absolues de E et H.

A2.2 exemple d'interprétation avec les courbes types

soit les valeurs suivantes:

Re1=6.9 Re2=-18 Re3=0 Im1=6 Im2=-14.6 Im3=3.6

En reportant (Im1-Im3) Re2 Im2 (Re1-Re3) sur les figures et on en déduit h α et W, α étant le pendage du corps conducteur et h la profondeur de son toit.

Pour notre exemple choisi, on obtient le tableau suivant:

Minima		Différ. maxima		Figure	Résultats			
Re2	Im2	Re1-Re3	Im1-Im3		h/a	h	α	W
-18		6.9		40	.28	11m	57	12.3
	-14.6		2.4	40	.20	8m	63	12.3
-18		6.9		41	.15	6m	53	5.26
	-14.6		2.4	41	.18	7m	70	5.26

Tableau 11 Exemple des valeurs maximales et minimales d'une courbe expérimentale

Le maximum Re3= 0 est trop petit et correspond certainement à une erreur de mesure, ce qui a pour conséquence d'augmenter la valeur de (Re1-Re3), abaissant ainsi la valeur de α . En comparant

les résultats ainsi obtenus (tableau ci-dessus) avec les courbes types (figure 116) on se rend compte que le modèle correspond donc à W=5.26

Par conséquent on peut estimer que $\alpha=70$ est la meilleure interprétation.

Les modèles ont été calculés pour cinq paramètres dimensionnés

W= ∞ , W=1.75, W=5.26 W=12.3 W=19.2 W=29.7 (figures 116 à 121)

Chaque modèle correspond à une forme d'anomalie donnée. En combinant plusieurs fréquences, on exécute un sondage de fréquence semblable à un sondage type Schlumberger: la fréquence jouant le même rôle que l'écartement des électrodes A B.

Figure 118 Courbes caractéristiques pour un demi-espace

(John Best, documents du Maxmin II)

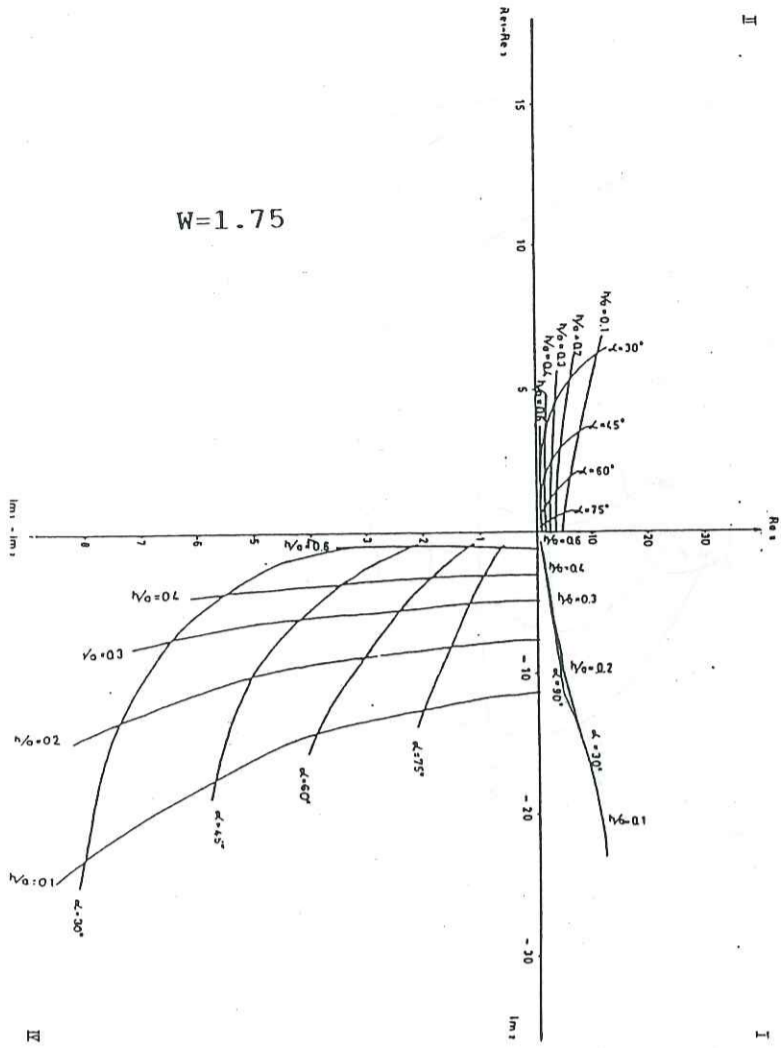


Figure 119 Courbes caractéristiques pour un demi-espace

$W=29.7$

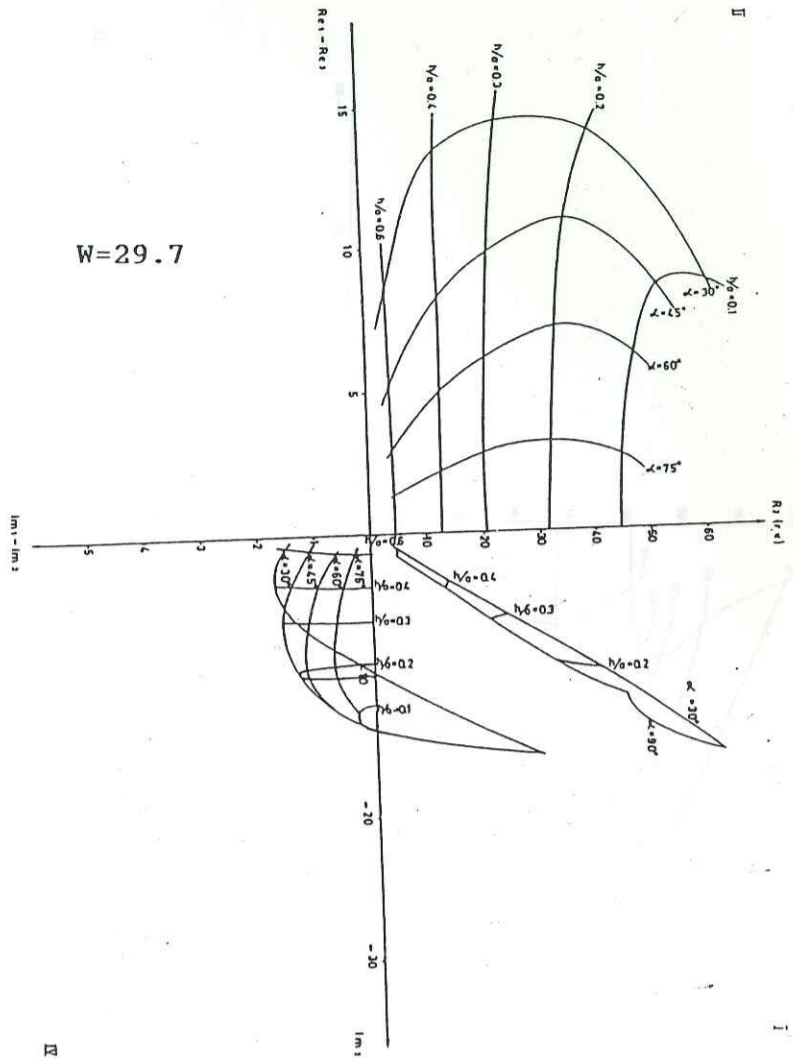


Figure 119 Courbes caractéristiques pour un demi-espace
(John Best, documents du Maxmin II)

Figure 116 Courbes caractéristiques pour un demi-espace

(John Best, documents du Maxmin II)

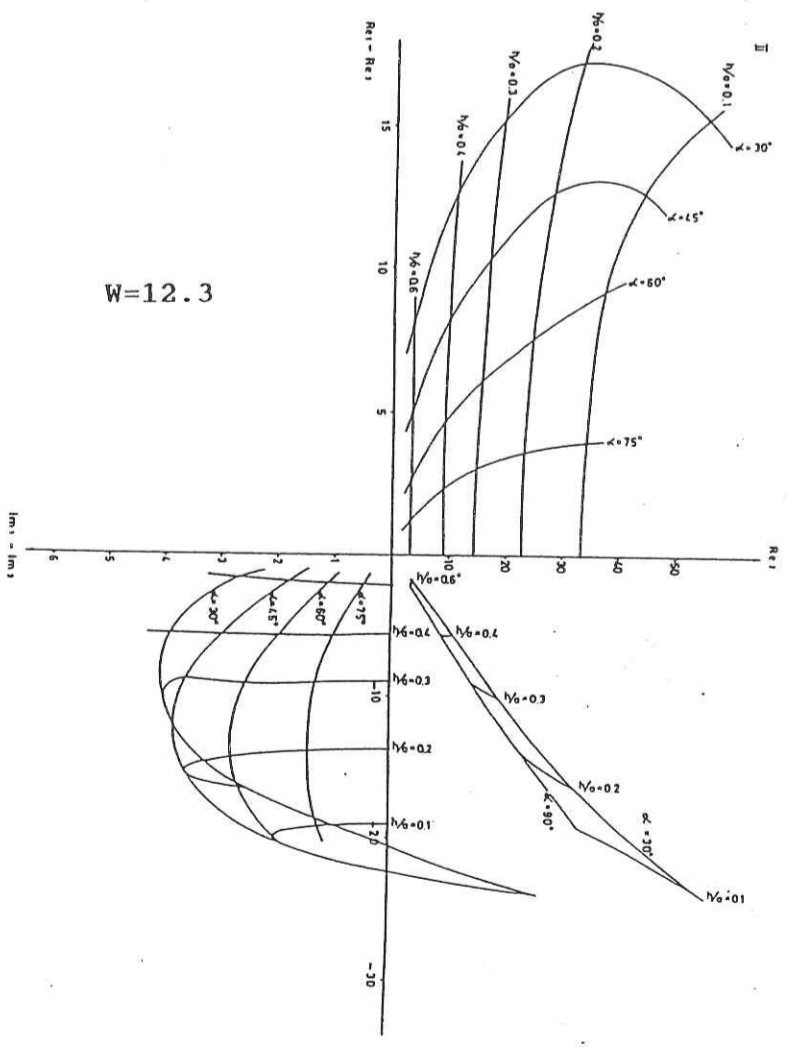
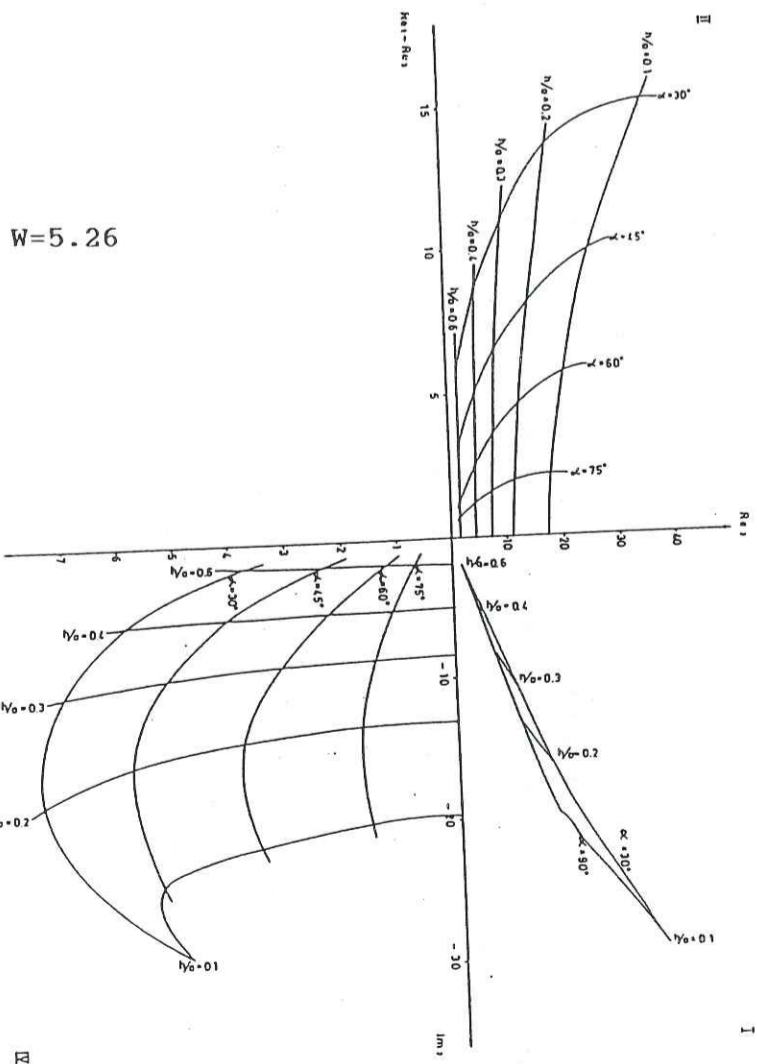


Figure 117 Courbes caractéristiques pour un demi-espace
(John Best, documents du Maxmin II)

Figure 121 Courbes caractéristiques pour un demi-espace
(John Best, documents du Maxmin II)

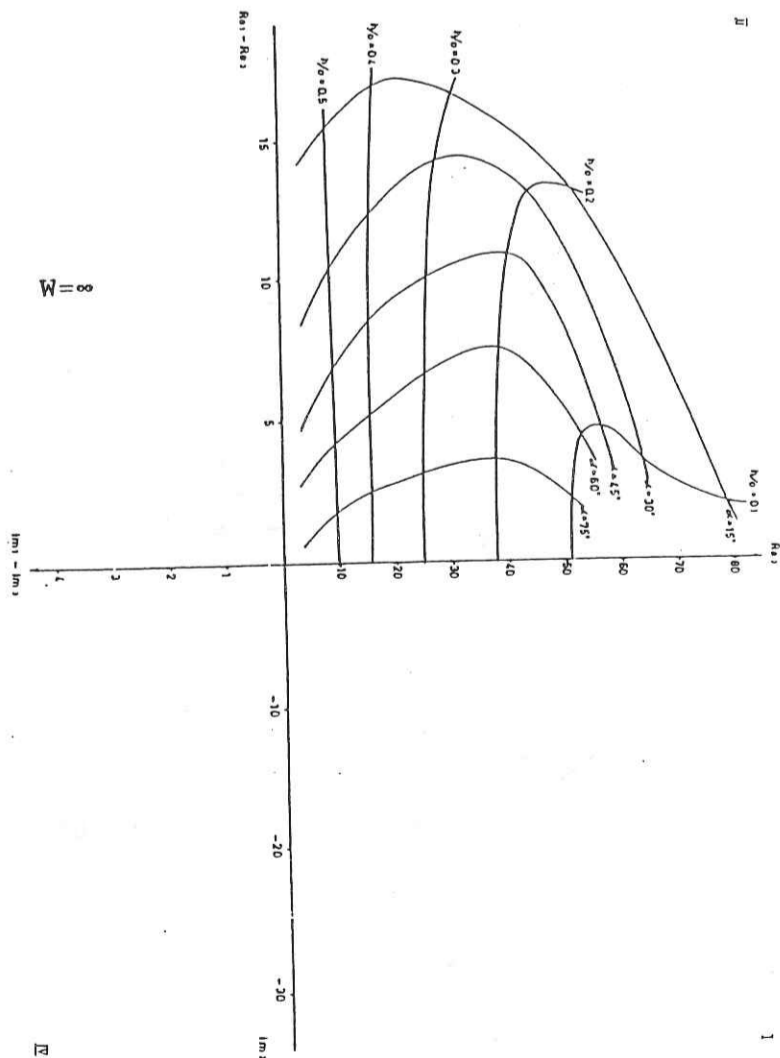
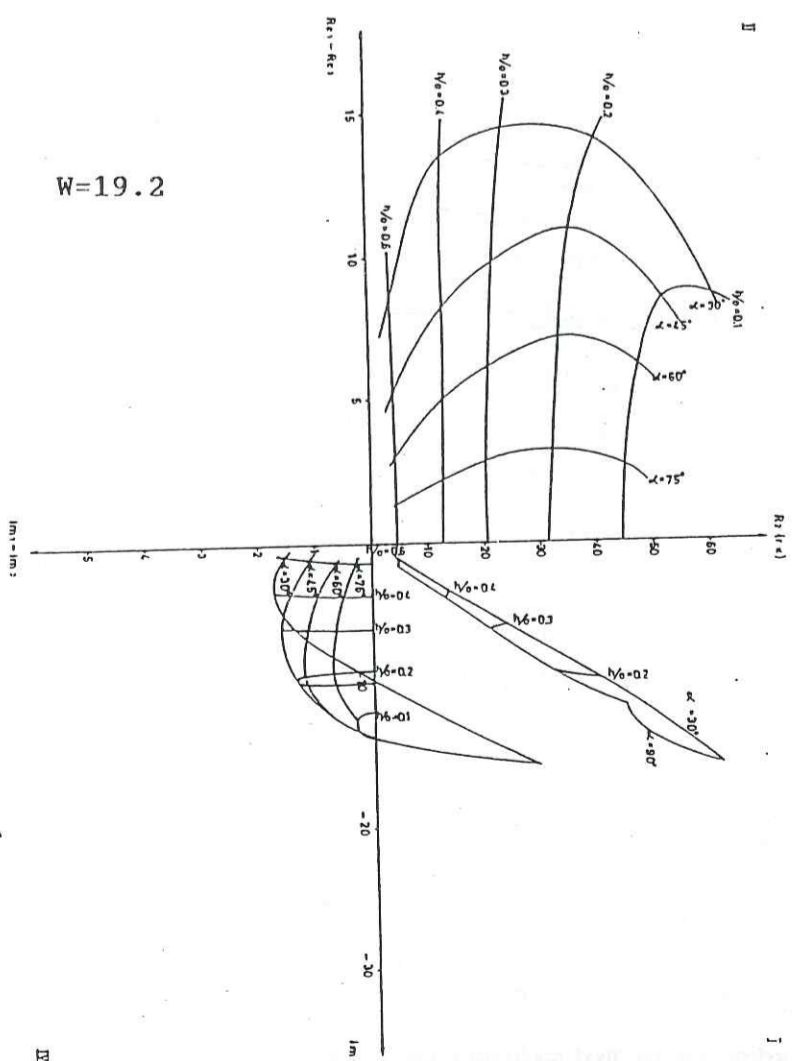


Figure 120 Courbes caractéristiques pour un demi-espace
(John Best, documents du Maxmin II)

Thèse de Doctorat de l'Université
Joseph Fourier - Grenoble I
Mention : Géophysique appliquée

Titre de l'ouvrage :

**METHODES D'EVALUATION DE LA
PRODUCTIVITE DES SITES AQUIFERES
AU BURKINA FASO
GEOLOGIE - GEOPHYSIQUE -
TELEDETECTION**

Nom de l'auteur :

Samuel NAKOLENDOUSSE

Etablissement :

Université Joseph Fourier - Grenoble I

RESUME

Au moyen de diverses méthodes géophysiques, après une étude géologique et de télédétection, dix sites comprenant vingt deux forages très productifs, moyennement productifs ou secs ont fait l'objet d'une étude "post mortem" de détail.

- Un certain nombre de facteurs de productivité des ouvrages du socle cristallin du Burkina Faso ont été mis en évidence, ainsi que l'apport de la prospection hydrogéophysique par le Maxmin.

- Le dispositif carré permettant d'effectuer des profils d'anisotropie a fourni les meilleurs résultats pour la recherche des forages à haut rendement.

Deux propositions ont été retenues :

- Une méthode de traitement numérique d'images satellites faisant mieux ressortir les caractéristiques hydrogéologiques.

- Une méthode d'implantation type d'un forage à haut rendement dans le socle cristallin du Burkina Faso.

MOTS CLES

Géophysique appliquée ; Electrique ;
Electromagnétisme ; Socle cristallin ; Fractures ;
Télédétection ; Sondages ; Anisotropie ;
Méthodologie ; Géologie ; Productivité.