

COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES
(C.I.E.H)

212.1
84UT

UNION DES METHODES GEOPHYSIQUES
POUR LA RECHERCHE D'EAU
DANS LES AQUIFERES DISCONTINUS



BURGEAP

COMPAGNIE GENERALE
DE GEOPHYSIQUE

*
MEDITERRANEE
GEOELECTRIQUE

212.1-84UT

COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES
(C.I.E.H)
B.P. 369 - OUAGADOUGOU - HAUTE-VOLTA

UTILISATION DES METHODES GEOPHYSIQUES
POUR LA RECHERCHE D'EAU
DANS LES AQUIFERES DISCONTINUS

LIBRARY, INTERNATIONAL REFERENCE
CENTRE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY
AND SANITATION (IRC)
P.O. Box 93190, 2509 AD The Hague
Tel. (070) 814911 ext. 141/142

RN: 07096
LC: 212.1.84UT

R. 543/E. 1219

Janvier 1984

B U R G E A P
70, rue Mademoiselle
75015 PARIS

COMPAGNIE GENERALE DE GEOPHYSIQUE
6 rue Galvani - B.P. N° 56
91301 MASSY

MEDITERRANEENNE GEOELECTRIQUE
52 Grand'rue Jean Moulin
34000 MONTPELLIER

A V E R T I S S E M E N T

Le CIEH se réserve le droit d'usage de ce document. Toute reproduction, même partielle, de ce document fera l'objet d'une autorisation préalable par le CIEH.

S O M M A I R E

AVANT PROPOS

RESUME

	Pages
<u>CHAPITRE 1. CADRE GENERAL DE L'ETUDE</u>	
<u>1.1. INTERET DES ETUDES GEOPHYSIQUES POUR LA RECHERCHE D'EAU DANS LES AQUIFERES DISCONTINUS</u>	
1.1.1. Objectifs assignés aux études géophysiques	1
1.1.2. Impact de la géophysique sur le coût des ouvrages	2
<u>1.2. RESULTATS GLOBAUX D'UNE TRENTAINE DE PROJETS EN AFRIQUE DE L'OUEST</u>	5
1.2.1. Classement général des données	5
1.2.2. Paramètres influençant le taux de réussite en forage	6
1.2.3. Présentation des résultats des projets et essai de synthèse	8
<u>CHAPITRE 2. APPORT TECHNIQUE DES METHODES GEOPHYSIQUES</u>	
<u>2.1. REVUE DES DIFFERENTES METHODES GEOPHYSIQUES</u>	19
2.1.1. Le sondage électrique	21
2.1.2. Le trainé électrique	23
2.1.3. La méthode pluridirectionnelle	25
2.1.4. Les méthodes électromagnétiques	27
2.1.5. La méthode magnétique	29
2.1.6. La sismique réfraction	31
2.1.7. La microgravimétrie	32

	Pages
2.2. <u>ENSEIGNEMENTS TIRES DE 450 FORAGES IMPLANTÉS AVEC GÉOPHYSIQUE</u>	33
2.2.1. Cadre de l'analyse	33
2.2.2. Comparaison entre les directions de linéaments repérées sur photos aériennes et celles trouvées par trainé électrique	35
2.2.3. Profondeur du socle granitique sain en sondages électriques et en forages	39
2.2.4. Essai de corrélations entre l'allure des anomalies électriques et les débits de forages dans les terrains de socle cristallin	41
2.2.5. Comparaison des méthodes électriques et électromagnétiques (Max. Min)	43
2.2.6. Réponse des autres méthodes	44
2.3. <u>RESULTATS DES TESTS METHODOLOGIQUES EFFECTUÉS EN HAUTE-VOLTA</u>	47
2.3.1. Site de Yaoua-Mera	49
2.3.2. Site de Gourcy	50
2.3.3. Site de Rapadama	51
2.3.4. Conclusions : enseignements apportés par les tests	52
2.4. <u>PRESENTATION DE "CAS TYPES"</u>	55
CHAPITRE 3. <u>OPTIMISATION DE L'EMPLOI DES METHODES GÉOPHYSIQUES</u>	87
3.1. <u>ELEMENTS DE COÛTS</u>	89
3.2. <u>LIMITES ECONOMIQUES D'EMPLOI DE CHAQUE METHODE</u>	92
3.3. <u>CHAMPS D'APPLICATION TECHNIQUE DES DIFFERENTES METHODES</u>	95

	Pages
3.4. <u>STRATEGIE DE PROSPECTION</u>	99
3.5. <u>CONCLUSIONS, RECOMMANDATIONS ET VOIES DE RECHERCHE</u>	104
3.5.1. Les points acquis	104
3.5.2. Développement des méthodes "nouvelles"	105
3.5.3. Amélioration des méthodes géophysiques	106
3.5.4. Formation du personnel	107

T A B L E A U X

	Pages
Tableau 1 : résultats bruts des projets	9
Tableau 2 : taux de réussite à 1 m ³ /h obtenus avec géophysique et sans géophysique par différents projets	13
Tableau 3 : Ordre de grandeur des taux de réussite à 1 m ³ /h dans différentes formations géologiques	15
Tableau 4 : liste des projets recensés	16
Tableau 5 : comparaison entre les directions de linéaments vues en photo interprétation et celles des anomalies trouvées par profils géophysiques	37
Tableau 6 : ordre de grandeur du coût des prospections géophysiques	90
Tableau 7 : valeurs de $\frac{1}{r_1}$ - $\frac{1}{r_2}$	92
Tableau 8 : valeurs de $\frac{G}{F^-}$	93

P L A N C H E S

Pl 1 :	situation des projets et résultats globaux	10
Pl 2 :	schéma du sondage électrique	20
Pl 3 :	schéma du trainé électrique et présentation des mesures	22
Pl 4 :	principe de la méthode électrique pluridirectionnelle	24
Pl 5 A :	principe de la méthode électromagnétique VLF EM 16 et courbes théoriques	26
Pl 5 B :	électromagnétisme Max-Min ; courbe expérimentale sur modèle	26
Pl 6 :	anomalies magnétiques de structure à deux dimensions	28
Pl 7 :	principe de la méthode sismique réfraction	30
Pl 8 :	corrélation entre profondeur du socle sain en sondages électriques et en forages	38
Pl 9 :	trainé électrique ; influence comparée de la largeur des anomalies et du contraste de résistivité sur la réussite des forages	40
Pl 10 :	tests en Haute-Volta - Plan de situation	48
Pl 11 :	cas type : Lokola (Côte d'Ivoire) - projet 33	56
Pl 12 :	cas type : Bamassapla (Côte d'Ivoire) - projet 33	58
Pl 13 :	2 cas types : Weuimel et El Greyg (Mali, Nara Est)	60
Pl 14 :	cas type : Mbeuryeu (Mali, Nara Est)	62
Pl 15 :	cas type : R 9, R 13 (Mauritanie, route Kiffa Néma)	64
Pl 16 :	cas type : R 32 (Mauritanie, route Kiffa Néma)	66
Pl 17 :	cas type : Mankarga (Haute-Volta)	68
Pl 18 :	4 cas type : Sikoro, Demabougou, Mariboubonzi et Kilikon (Mali, projet n° 27)	70
Pl 19 :	2 cas types : Doubabougou et Sosso (Mali, projet n° 27)	72
Pl 20 :	cas type : Mamou (Guinée, AEP 7 centres)	74

Pl 21 : cas type : Bolsi 1 (Niger, inédit, Université de Niamey)	76
Pl 22 : cas type : Ranch de Léo (Haute-Volta -Géohydraulique)	78
Pl 23 : cas type : Ranch de Léo (Haute-Volta - Géohydraulique)	80
Pl 24 : cas type : Lolobo (Côte d'Ivoire- Géomines)	82
Pl 25 : cas type : Sabodala (Sénégal- BRGM)	84
Pl 26 : domaines économiques d'emploi de chaque méthode	94

A N N E X E

DETAIL DES TESTS EFFECTUES EN HAUTE-VOLTA DANS LE CADRE DE LA PRESENTE ETUDE :	109
Pl 27 : site de Yaoua Mera - plan de situation	122
Pl 28 : site de Yaoua - profil P1	124
Pl 29 : sondages électriques de Yaoua	126
Pl 30 : modèle gravimétrique et électrique Yaoua	128
Pl 31 : site de Méra - profil P 3	134
Pl 32 : sondages électriques Méra	136
Pl 33 : site de Gourcy - cartes de résistivité	140
Pl 34 : sondages électriques Gourcy	142
Pl 35 : site de Gourcy - profils P1 à P5	144
Pl 36 : site Rapadama R 8 - plan et profils	150
Pl 37 : site Rapadama R 8 - sondages électriques	152
Pl 38 : site Rapadama R 2	158
Pl 39 : site Rapadama R 2, sondages électriques	160

NOTA : les volumineux tableaux de dépouillement détaillé des caractéristiques des anomalies géophysiques et des forages, ne sont pas joints au présent rapport, un seul exemplaire a été remis au C.I.E.H.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

L'emploi des méthodes géophysiques pour l'étude du sous-sol a été largement développé pour les prospections pétrolières à grande profondeur, pour les prospections minières et enfin pour des prospections à faible profondeur : recherches de matériaux, recherches d'eau, génie civil etc...

Ces méthodes sont basées sur l'étude des variations spatiales des propriétés physiques du sous-sol, variations qui sont elles-mêmes liées aux structures géologiques que l'on recherche. Toutes ces méthodes se ramènent à déterminer la forme et l'extension de ces structures par le biais des perturbations locales qu'elles engendrent sur des "champs de potentiels" naturels ou artificiellement créés : on peut donc dire que les méthodes géophysiques sont toujours indirectes "au 2ème degré".

On doit ainsi avoir bien présent à l'esprit que "la géophysique" ne "trouve" ni ne "sent" l'eau ; elle sert uniquement à mettre en évidence, en des points, coupes ou profils d'étude, des structures géologiques que l'on peut alors classer - par comparaison avec tous les schémas simples que l'on peut imaginer de représentation du sous-sol - comme étant a priori favorables, ou défavorables, à la présence d'eau. S'agissant du milieu naturel, les résultats obtenus ensuite par forage ponctuels dans ces structures ne peuvent alors être analysés que statistiquement.

Par rapport aux prospections pétrolières ou minières, le cas de l'hydraulique villageoise ou urbaine dans les régions d'aquifère discontinus est original à plus d'un titre :

- d'une part les enjeux financiers, et par conséquent les moyens mis en oeuvre, sont sans commune mesure : dans le domaine hydraulique, le champ des méthodes utilisables et les temps de prospection sont donc obligatoirement plus réduits ; Les profondeurs d'investigation sont d'ailleurs beaucoup plus faibles. Par ailleurs les cadences de forage introduites depuis une dizaine d'années par la technique du "marteau fond de trou" imposent d'accroître le rythme des prospections géophysiques, et la tendance actuelle est d'expérimenter des méthodes de plus en plus rapides et de plus en plus légères ;

- d'autre part, dans les prospections pétrolières les forages sont implantés exclusivement sur les sites les plus favorables d'après les études géophysiques, et l'on n'hésite pas à abandonner complètement des zones de plusieurs centaines voire milliers de Km², jugées défavorables.

En hydraulique villageoise, au contraire, le site est toujours imposé par la présence d'un village démuné qu'il faut bien alimenter que le secteur soit favorable ou non : il faut en outre implanter le forage le plus près possible, et si l'on peut à moins de 200 m du village ; enfin l'on observe que les villages qui manquent le plus d'eau sont généralement situés dans un contexte hydrogéologique défavorable, puisque les recherches traditionnelles n'ont pas abouti.

On est donc très fréquemment contraint de forer, même dans les cas que les études géophysiques préliminaires ont considéré comme défavorables, sur des emplacements ponctuels qui sont finalement choisis non pas comme étant "les meilleurs" mais plutôt comme "les moins mauvais" à l'échelle du village.

Dans de telles conditions il n'est pas étonnant que l'on observe encore souvent dans certains villages des taux d'échec élevés même après études géophysiques.

L'importance actuelle de l'effort d'équipement villageois en Afrique, et la conviction qu'à l'aide de l'expérience acquise et de l'amélioration des instruments de mesure il est possible d'accroître l'efficacité et le rendement des méthodes géophysiques, imposent donc aujourd'hui une réflexion sur l'ensemble de ces méthodes.

Les méthodes géophysiques, comme toutes méthodes de reconnaissance, ne se justifient que si elles permettent soit d'abaisser les coûts à résultat égal, soit d'offrir un meilleur service pour un coût identique :

- en hydraulique urbaine, on recherche avant tout une garantie sur la pérennité des débits, en raison du coût élevé des infrastructures. La reconnaissance doit donc porter au moins autant sur l'étendue du réservoir et l'évaluation des réserves, que sur l'implantation des forages eux-mêmes. Eu égard à l'enjeu financier, les méthodes géophysiques se justifient amplement et ont depuis longtemps montré leur efficacité ; les méthodes électriques et sismiques sont habituellement les plus employées ;

- en hydraulique villageoise, l'emploi de la géophysique, en donnant une vision plus aiguë des gisements aquifères possibles, permettrait surtout d'implanter les points d'eau le plus près possible des villages, condition fondamentale pour en garantir l'usage et le bon entretien des pompes. Mais la masse financière attribuée à la géophysique et correspondant aux économies qu'elle est susceptible d'introduire au niveau des réalisations (réduction du taux d'échecs et de la profondeur des forages) est nettement plus faible.

L'extension d'emploi de la géophysique suppose donc un effort de recherche :

a) dans la sélection des méthodes les plus aisément vulgarisables et les plus faciles à mettre en oeuvre par un personnel non spécialisé (même si la précision est moins grande et l'interprétation plus qualitative que quantitative). On retiendra les méthodes utilisant un matériel simple dans sa conception (exemple : potentiomètre) ou dans son utilisation (exemple : magnétomètre) ;

b) en vue d'une meilleure connaissance des structures habituellement productives et des méthodes de prospection appropriées. Cela impose notamment un examen critique des résultats des campagnes de forages déjà réalisées après prospection géophysique. L'expérience prouve que chaque fois qu'un tel effort méthodologique a été entrepris, cela s'est traduit par une amélioration tant dans le choix des méthodes et leur mise en oeuvre qu'au niveau de l'interprétation ;

c) dans la mise au point des éléments d'une stratégie de reconnaissance, visant à définir l'emploi des méthodes de géophysique, en fonction des objectifs : hydraulique urbaine, villageoise ou pastorale. L'objectif final est de rechercher à optimiser l'ensemble des travaux : reconnaissance, forages, équipement.

Cet effort de réflexion doit faciliter et guider la formation du personnel local, appelé dans le domaine de l'hydraulique villageoise, à prendre en main, dans les prospections géophysiques :

1) dans un premier temps la totalité des travaux de terrain,

2) ultérieurement la totalité des travaux d'interprétation, en n'étant plus secondé qu'épisodiquement, si nécessaire, par des missions d'appui de spécialistes.

Les efforts de formation à entreprendre avec le personnel local doivent viser à parvenir le plus rapidement possible à une utilisation banalisée de la géophysique, peut être plus qualitative, mais également plus économique qu'aujourd'hui. Cet effort est d'autant plus nécessaire que les programmes d'hydraulique sont actuellement en pleine expansion.

La présente étude, définie comme "l'étude de l'utilisation des méthodes géophysiques pour la recherche d'eau souterraine en zone d'aquifères discontinus (terrains cristallins et formations infra-cambriennes d'Afrique de l'Ouest) comprend trois chapitres :

a) après avoir situé le problème de l'emploi des méthodes géophysiques dans le cadre très particulier de l'hydraulique villageoise en aquifères discontinus, le chapitre premier analyse les résultats d'une trentaine de campagnes déjà réalisées, et tente de faire le point de l'apport de la géophysique à ces projets ;

b) le chapitre 2 passe en revue rapidement les diverses méthodes utilisables, tire les enseignements de 450 forages implantés avec l'aide de la géophysique, présente les résultats des tests effectués sur 3 sites de Haute-Volta, et présente une vingtaine de cas types ;

c) le chapitre 3 enfin, réalise la synthèse des résultats obtenus, intégrant les considérations techniques et économiques, dans le souci d'établir les éléments d'une stratégie cohérente des reconnaissances, en optimisant l'emploi des méthodes géophysiques.

R É S U M É

Les méthodes géophysiques présentent un intérêt certain pour les recherches d'eau dans les aquifères discontinus, pour lesquelles elles sont employées depuis le développement de la méthode de forage au marteau fond de trou (années soixante dix).

L'accélération importante des cadences de forage, qui impose un rythme plus rapide aux prospections géophysiques, et la conviction qu'à l'aide de l'expérience acquise il est possible d'accroître leur efficacité et leur rendement, imposent une réflexion sur l'ensemble de ces méthodes.

Un effort de recherche est entrepris par ailleurs vers des méthodes portables, légères et aisément vulgarisables.

Dans ce cadre, la présente étude, réalisée à la demande du CIEH, comporte 3 aspects :

- la revue des différentes méthodes , et l'analyse de quelques campagnes déjà réalisées ;
- l'exposé de tests méthodologiques effectués sur 3 sites en Haute-Volta ;
- une synthèse intégrant des considérations techniques et économiques et visant à définir les éléments d'une stratégie des reconnaissances.

CHAPITRE 1. CADRE GENERAL DE L'ETUDE

1.1. Intérêt des études géophysiques pour la recherche d'eau dans les aquifères discontinus.

- Elles doivent viser à abaisser le coût des ouvrages en diminuant le nombre de forages négatifs, par le biais d'implantations plus sûres ; elles peuvent également avoir pour résultat la découverte de meilleurs débits, un meilleur contrôle de la profondeur à forer, et à coût égal l'obtention d'un meilleur service (par exemple forages villageois plus proches des villages).

- L'impact du coût "G" de la géophysique sur le coût des ouvrages productifs est analysé ; la formule suivante :

$$G \leq F \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

qui est proposée en fonction du coût des forages négatifs et des taux de succès probables avec et sans emploi de la géophysique, devrait aider à la définition de stratégies de prospection adaptées à chaque projet (cf. chapitre 3).

1.2. Résultats globaux d'une trentaine de projets

Les taux de réussite à 1 m³/h obtenus sans géophysique par une trentaine de projets en Afrique de l'ouest dans des contextes climatiques et géologiques variés, sont présentés planche 1 et tableau 1 ; bien qu'ils ne soient pas toujours strictement comparables entre les divers projets, ils paraissent assez sensiblement représentatifs des formations géologiques concernées :

Roche	taux de réussite médian
Granite	55 %
Schistes birrimiens	75 %
Gneiss	40 %
Grès infracambriens	60-85 %
Pélites cambriennes	30-40 %

Les études géophysiques entreprises ont permis généralement d'accroître de 5 à 20 points les taux de réussite, ce qui suffit largement à justifier sur le plan économique, l'emploi de ces méthodes.

CHAPITRE 2. APPORT TECHNIQUE DES METHODES GEOPHYSIQUES

2.1. Revue des différentes méthodes

Chaque méthode est présentée sous forme d'une fiche simple, illustrée, rappelant ses caractéristiques et conditions d'emploi.

- Le sondage électrique, permet d'étudier ponctuellement la répartition verticale des résistivités apparentes dans le sous-sol.

- Le trainé (ou profil) électrique étudie, à profondeur d'investigation constante, les variations horizontales de la résistivité apparente ; les zones fracturées se marquent généralement par des anomalies conductrices.

- La méthode électrique pluridirectionnelle, sorte de "sondage électrique tournant" permet de découvrir des directions d'anisotropie ; elles coïncident généralement avec des directions de fracturation.

- Les méthodes électromagnétiques localisent des conducteurs superficiels par les perturbations qu'ils engendrent sur un champ électromagnétique artificiel. L'une, (EM-RE) produit son propre champ électromagnétique, l'autre (VLF) utilise des émissions radio situées à l'infini.

- La méthode magnétique, localise à l'aide d'un magnétomètre portatif des anomalies liées aux roches magnétiques, ou de faibles variations de magnétisme liées à la fracturation.

- La sismique réfraction étudie la vitesse de propagation des ondes élastiques produites par des charges explosives ; elle reconnaît l'épaisseur d'altération et dans certains cas peut localiser des zones de fracture.

- La microgravimétrie étudie les variations de masse du sous-sol ; elle permet de localiser des zones décomprimées liées à l'altération et (ou) à la fracturation.

2.2. Les enseignements tirés de 450 forages implantés avec géophysique :

L'analyse, souvent plus qualitative que statistique, a porté sur une douzaine de projets ayant fourni une information suffisante sur les forages réalisés, les études géophysiques correspondantes et le cadre géologique (photo interprétation). Les principales conclusions sont résumées ici :

- Les directions de "linéament" photographique (étudiées sur 80 sites) coïncident à moins de 20 grades près avec les directions trouvées par des profils géophysiques parallèles, dans 82 % des cas sur granites et 100 % des cas sur pélites cambriennes injectées de dolérites.

- La comparaison entre les profondeurs du socle trouvées en forage et celles déduites des sondages électriques a porté sur 90 cas répartis sur projets - la corrélation est relativement satisfaisante malgré quelques écarts.

- On a analysé 96 données de forages réalisés au point minimum de diverses anomalies électriques conductrices. Le classement par types de roche, et par dimensions de dispositif AMNB comparables, conduit à des échantillons trop peu nombreux (10 individus) pour se prêter à une réelle étude statistique.

Il semble ressortir toutefois de cette analyse que les anomalies étroites (largeur inférieure ou égale à 40 mètres) avec des contrastes de résistivité supérieurs à 1.5, paraissent les plus favorables à l'implantation des forages productifs de plus de 1 m³/h.

- Dans la documentation recueillie, on dispose de 27 cas dans lesquels profils électriques et profils électromagnétiques ont été faits en parallèle. Dans les structures étudiées (qui correspondent à des zones où le socle est à moins de 30 mètres) une anomalie électromagnétique se superpose à l'anomalie électrique dans 89 % des cas.

- 8 cas d'utilisation de la méthode VLF sont disponibles qui correspondent à des zones de faible épaisseur altérée : la méthode donne des anomalies concordantes avec la méthode électrique mais le taux d'échec (75 %) reste élevé.

- La méthode magnétique donne de très bons résultats sur filons de dolérite dans les grès ou les pélites. Elle est à l'essai sur les roches cristallines.

- La méthode sismique, peu employée en raison de sa lourdeur de mise en oeuvre, permet de déterminer avec succès la profondeur du socle et peut être (encore expérimental) de localiser des fractures dans le socle.

- La méthode gravimétrique n'a été utilisée dans aucun des 36 projets recensés.

2.3. Les tests méthodologiques effectués en Haute-Volta

Ils ont été réalisés en 1 mois de terrain sur 3 sites géologiques variés (granite, schistes, roches vertes) avec épaisseurs d'altération différentes, comportant déjà des forages positifs et négatifs, dans le but de tester les réactions des méthodes "nouvelles" et de les comparer aux méthodes "classiques".

Les résultats obtenus ne peuvent évidemment être comparés aux résultats accumulés depuis plus de 20 ans par les différents projets sur l'Afrique de l'ouest, et qui représentent plusieurs centaines de mois de prospection.

Ces tests ont cependant confirmé l'aptitude des méthodes "classiques" à reconnaître les grandes structures d'altération et à localiser le passage de zones fracturées ; ils ont en outre montré l'intérêt présenté par diverses méthodes "nouvelles", en particulier :

- l'aptitude des méthodes électromagnétiques à détecter (dans les zones de faible épaisseur d'altération) les mêmes anomalies que la méthode électrique ;

- la possibilité de découvrir les directions d'anisotropie majeures par le biais de la méthode électrique pluridirectionnelle ;

- la réaction assez systématique de la méthode magnétique à des anomalies liées à la fracturation, à des surépaisseurs d'altération, ou à la présence de filons basiques ;

- l'aptitude de la méthode gravimétrique à localiser des surépaisseurs d'altération et à donner des indications sur la structure.

2.4. Présentation "d'exemples types"

Une vingtaine d'exemples comportant des profils géophysiques, et des forages (de position, coupe et débit connus) sont présentés pour illustrer l'aptitude des différentes méthodes à localiser, dans différents pays et divers contextes géologiques, des structures aquifères discontinues.

Ces exemples d'origine diverse, montrent la difficulté des problèmes posés par les aquifères de fractures, et soulignent l'intérêt du dialogue, à tous les stades de la prospection entre le géophysicien et l'hydrogéologue.

CHAPITRE 3. OPTIMISATION DE L'EMPLOI DES METHODES GEOPHYSIQUES

Optimiser l'emploi des méthodes géophysiques dans la recherche des aquifères discontinus suppose de connaître les coûts de mise en oeuvre, les domaines d'application technique de chaque méthode et les bénéfices que leur emploi peut entraîner (accroissement du taux de succès en forage par exemple).

La connaissance ou l'estimation de tous ces éléments est indispensable pour définir une stratégie de prospection adaptée à chaque projet.

3.1. Les coûts de mise en oeuvre de chaque méthode ont été estimés sur des hypothèses communes, de rythme d'exécution notamment, se référant à un nombre raisonnable de "sites villageois" étudiés par mois (variable selon la méthode).

Le coût de la méthode électrique (la plus couramment utilisée actuellement) étant pris comme base 1, la méthode sismique d'un coût de 2,3, apparaît comme la plus chère. Ensuite vient la combinaison électrique sismique (1,7) et la combinaison électrique-magnétique (1,07). Les moins coûteuses sont les méthodes gravimétriques (0,5) électromagnétique EM-RE (0,36) ou VLF (0,20), suivies par la méthode magnétique seule (0,13) qui reste de loin la moins onéreuse.

Ces coûts incluent, dans l'état actuel, la participation de personnel expatrié spécialisé, chargé de la formation du personnel technique national.

En supposant le personnel national entièrement formé, et en conservant les mêmes rythmes d'exécution, les coûts pourraient être réduits sensiblement de moitié.

3.2. Les limites économiques d'emploi de chaque méthode :

peuvent être déduites de la formule :

$$G \leq F \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \text{ établie au } \S 112$$

On s'aperçoit que :

- la combinaison des méthodes électriques et sismiques n'est économiquement justifiable que dans les zones (ou cas) difficiles : ($r_1 \leq 40\%$) ;

- la méthode sismique ne se justifie également qu'en zone difficile ($r_1 \leq 50\%$) ;

- la méthode électrique (ou électrique et magnétique combinées) est économiquement utilisable dans les zones difficiles ou moyennes ($r_1 \leq 60\%$) ;

- les méthodes électromagnétiques ou magnétiques sont justifiables dans tout le domaine d'application des méthodes géophysiques ($r_1 \leq 70 \%$) ;

- enfin, en supposant le personnel national entièrement formé les domaines d'utilisation économique des méthodes sismique et électrique seraient étendus jusqu'à des valeurs respectives de r_1 , de 60 % et 70 %.

3.3. Champs d'application technique des différentes méthodes

Il va de soi qu'une méthode, fût elle très économique, ne peut être employée que si elle est techniquement adaptée au problème géologique et hydrogéologique posé.

Les résultats présentés en 2.2. et 2.3., et dans ce chapitre précisent les domaines techniques d'application de chaque méthode, tout en notant que dans certaines formations où les taux de réussite sans géophysiques sont déjà élevés (de 70 à 90 %) les études géophysiques offrent a priori peu d'intérêt (schistes birrimiens, certaines zones gréseuses etc...).

3.4. La stratégie de prospection

L'ensemble des données techniques et économiques permettent de définir pour chaque projet une stratégie de prospection ; pour cela 4 stades sont nécessaires :

a) recueil analyse et synthèse des données hydrogéologiques et géophysiques existantes et établissement d'une zonéographie ;

b) choix des contraintes propres au projet (débit minimum recherché, distance au village, profondeur maximale et moyenne des forages) ;

c) choix des taux de réussite en forage que l'on peut espérer sur la zone du projet sans géophysique (r_1) et avec emploi de la géophysique (r_2), d'après a) et b) ci-dessus, et selon l'expérience déjà acquise en Afrique de l'Ouest ou d'autres lieux.

d) optimisation, et choix des méthodes géophysiques à utiliser à partir de l'adaptation technique de chacune aux problèmes de chaque zone, et de la masse financière économiquement acceptable, d'après la formule établie en 1.1. :

$$G \leq F \cdot (1/r_1 - 1/r_2)$$

3 exemples de calcul et de définition d'une stratégie sont présentés pour illustrer l'application de cette formule.

3.5. Conclusions, recommandations et voies de recherche

3.5.1. Toutes les méthodes géophysiques étudiées dans le présent rapport sont susceptibles à un titre ou à un autre d'apporter, si elles sont adaptées, des renseignements utiles sur la structure du sous-sol et du milieu fissuré, et par conséquent de réduire le taux d'échec en forage, d'obtenir des débits plus importants, de mieux maîtriser la profondeur des ouvrages, tous éléments qui concourent à une meilleure économie des projets.

3.5.2. Parmi les méthodes dites "nouvelles" les trois méthodes portables légères (électromagnétisme EM, RE, électromagnétisme VLF, magnétisme) sont à promouvoir et leur expérimentation est à poursuivre - (ainsi que l'emploi de la gravimétrie peu usitée en recherche d'eau).

3.5.3. Les progrès à faire dans l'emploi des méthodes géophysiques doivent surtout porter sur l'interprétation, afin d'améliorer le choix du positionnement optimal du forage sur les anomalies.

Ces progrès concernent également la mise en oeuvre et l'utilisation de dispositifs nouveaux (en électrique ou sismique notamment) ainsi que la normalisation de certaines opérations afin de permettre une analyse statistique de résultats portant sur des projets différents.

3.5.4. La formation du personnel est une priorité pour les états africains. Dans le cas présent, elle doit permettre de réduire fortement, à terme, les coûts de prospection.

Dans un premier temps la formation doit concerner des opérateurs géophysiciens, notamment sur les méthodes qualitatives.

Dans un deuxième temps elle concernera des ingénieurs géophysiciens qui seront chargés notamment, à terme, d'interpréter les résultats des méthodes quantitatives.

CADRE GENERAL DE L'ETUDE

Chapitre I

1.1. INTERET DES ETUDES GEOPHYSIQUES POUR LA RECHERCHE D'EAU DANS LES AQUIFERES DISCONTINUS

1.1.1. Objectifs assignés aux études géophysiques

L'objectif assigné aux études géophysiques pour la recherche d'eau dans les aquifères discontinus est double :

- d'une part, et c'est leur objectif essentiel, elles doivent permettre d'abaisser le coût des ouvrages d'exploitation (échecs inclus) ;

- d'autre part, à coût égal, elles apportent une meilleure connaissance des structures aquifères : il arrive ainsi que certains projets s'autorisent des études géophysiques variées et systématiques dans un but méthodologique ou pour améliorer les connaissances géologiques générales du pays. On peut penser, cependant, que de tels projets resteront généralement limités dans l'espace voire dans le temps, comme c'est le cas actuellement.

On peut regrouper avec ces études fondamentales, les études géophysiques préliminaires, dont le but est la reconnaissance de zones inconnues ou particulièrement difficiles (bordures de bassins sédimentaires, zones à fort recouvrement dunaire, etc...) : ces études régionales, relativement rares en milieu fissuré, sont généralement très instructives pour préciser les grandes structures à l'échelle de plusieurs dizaines, voire centaines de kilomètres, et pour lever les grandes indéterminations sur la nature des ouvrages à réaliser (profondeur, forage rotary, forage marteau fond-de-trou, puits, puits-forages ...). Ces grandes reconnaissances, dont l'intérêt n'est généralement pas discuté, ne font pas explicitement partie de la présente étude.

En fait, l'objectif assigné à la géophysique dans la très grande majorité des projets intéressant les aquifères discontinus d'Afrique de l'Ouest, est l'abaissement du coût des ouvrages, en diminuant le taux d'échecs en forage par le biais d'implantations plus sûres.

Dans ce but, des études géophysiques locales sont réalisées village par village sur des sites de l'ordre du km² et visent à implanter, parfois au mètre près, des forages avec un objectif de débit de l'ordre du m³/h (1).

C'est l'intérêt de ces études géophysiques locales qui fait l'objet essentiel du présent rapport.

(1) Dans l'état actuel de développement de l'hydraulique villageoise, la très grande majorité des forages sont équipés de pompes à main d'un débit moyen de l'ordre de 0,7 m³/h. D'où la stratégie de recherche d'un débit minimum fixé généralement à 1 m³/h (débit d'air lift). Certains projets, rares cependant, donnent pour objectif à la géophysique la recherche du débit maximum, en faisant l'hypothèse d'un développement dans l'avenir des pompes à plus forts débits dans les villages (pompes solaires, pompes à moteur ...). On se trouve alors dans un domaine intermédiaire entre celui de l'hydraulique villageoise classique et celui de l'hydraulique urbaine (recherche des débits maximum, étude des réserves) pour lequel, comme nous l'avons signalé en avant-propos, l'intérêt des études géophysiques est rarement remis en cause.

1.1.2. Impact de la géophysique sur le coût des ouvrages

L'évaluation technique (1) d'un projet d'hydraulique villageoise, pastorale ou urbaine porte généralement sur :

- le nombre d'ouvrages (ou forages d'exploitation) réalisés par rapport aux objectifs initiaux, avec indication du nombre de villages abandonnés après une ou plusieurs tentatives infructueuses ;

- le coût moyen des ouvrages, y compris le coût des études d'implantation, des études géophysiques éventuelles, et des forages négatifs, avec indication :

- . du débit minimum recherché,
- . de la distance maximum autorisée entre le point d'eau et le village ;
- . des contraintes imposées par le marché de forage (profondeur maximale des forages, prix unitaires).

Le coût d'un ouvrage d'exploitation (F_e) peut être calculé à partir des éléments suivants :

E - coût moyen, par ouvrage, des études hydrogéologiques et du contrôle des travaux ;

G - coût moyen, par ouvrage, des études géophysiques éventuelles ;

F^+ - coût moyen d'un forage positif tubé ;

F^- - coût moyen d'un forage négatif abandonné.

Ces derniers coûts dépendent bien sûr des prix unitaires pratiqués, mais aussi, comme paramètre essentiel, de la profondeur moyenne des forages ;

r - taux de réussite final obtenu égal au pourcentage de forages positifs par rapport au nombre total de forages réalisés, pour un débit minimum donné.

Dans ces conditions, on peut écrire : $r F_e = r F^+ + (1 - r) F^- + r (E + G)$

D'où le coût moyen d'un forage d'exploitation :

$$F_e = F^+ + \left(\frac{1 - r}{r} \right) F^- + E + G$$

(1) Cette évaluation technique n'est bien entendu qu'un aspect de l'évaluation générale d'un projet, laquelle intègre en outre des données humaines dont l'influence sur le succès des projets est primordiale, mais hors de notre propos présent.

Ainsi, en l'absence d'études géophysiques, si r_1 est le taux de réussite final obtenu, le coût moyen d'un ouvrage est :

$$F_{e1} = F^+ + \left(\frac{1 - r_1}{r_1} \right) F^- + E$$

Avec étude géophysique systématique, si r_2 est le taux de réussite final obtenu, le coût moyen d'un ouvrage est :

$$F_{e2} = F^+ + \left(\frac{1 - r_2}{r_2} \right) F^- + E + G$$

Les études géophysiques systématiques ne sont alors rentables que si : $F_{e2} \leq F_{e1}$, soit :

$$G \leq F^- \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Cette formule suppose :

- que le coût des études hydrogéologiques et du contrôle des travaux (E) est le même avec ou sans géophysique, ce qui est la règle générale ;
- que les coûts moyens d'un forage positif tubé (F^+) et d'un forage négatif (F^-) sont indépendants de l'emploi de la géophysique.

Cette dernière hypothèse semble justifiée par l'analyse des diverses campagnes étudiées : les consignes d'arrêt des forages (fonction, le plus souvent, de la pénétration dans le socle) sont très généralement fixées a priori, sur la base de l'expérience des campagnes antérieures et normalement d'un souci d'optimisation du coût des ouvrages.

Toutefois, on peut penser que l'emploi de la géophysique et d'une stratégie adaptée puisse permettre de diminuer la profondeur des forages et par conséquent leur coût (F^+ et F^-).

Dans ces conditions, cette formule très générale permet, dans chaque projet, se fixant le coût moyen d'un forage négatif F^- , (sur la base du marché en cause) de déterminer le montant théorique maximum que l'on peut allouer pour chaque site aux études géophysiques pour faire passer le taux de réussite final de r_1 à r_2 . On détermine ainsi, connaissant le coût moyen des prospections géophysiques, le domaine de rentabilité économique de chaque méthode, et l'on peut alors définir une stratégie (cf. § 3.2. du présent rapport).

Dans cette évaluation, les paramètres les moins connus, et surtout les plus variables d'une région à l'autre, sont évidemment les taux de réussite r_1 et r_2 .

C'est pourquoi, pour permettre de préciser les ordres de grandeur, une analyse succincte des résultats globaux obtenus par une trentaine de projets dans différentes régions d'Afrique de l'Ouest est présentée ci-après.

1.2. RESULTATS GLOBAUX D'UNE TRENTAINE DE PROJETS EN AFRIQUE DE L'OUEST

1.2.1. Classement général des données

La présente étude n'est en aucun cas une étude exhaustive. Les documents analysés proviennent dans leur grande majorité des archives du CIEH, et ont été exploités au cours d'un séjour de 15 jours à Ouagadougou.

Ont été également exploités :

- les documents archivés par les chargés d'étude ;
- les données recueillies au cours d'une tournée d'une semaine à Niamey (Direction de l'Hydraulique et BRGM) et à Lomé (BNRM et projet PNUD Togo).

Une grande partie de ces projets a eu recours soit partiellement, soit systématiquement à des études géophysiques. Plusieurs projets, exécutés sans géophysique, ont été retenus pour permettre une comparaison des taux de réussite obtenus avec et sans géophysique.

L'ensemble des documents examinés concerne 36 projets d'hydraulique villageoise - ou exceptionnellement urbaine ou pastorale - dans dix pays d'Afrique de l'Ouest.

Parmi ces projets, dont la liste et les documents de référence sont fournis en tableau 4, p. 16., on distingue :

- des études hydrogéologiques non liées à des travaux : projets N° 12, 13, 25 ;
- des projets pour lesquels les données sur les travaux sont insuffisantes, dans la documentation recueillie : projets N° 2, 17, 18, 20, 22, 24 ;
- des projets d'hydraulique urbaine : projets N° 4, 5, 12, 21, 26, 29, 36 ;
- des projets d'hydraulique villageoise (ou exceptionnellement pastorale) : projets N° 1, 3, 6*, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16*, 19, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35.

L'analyse des résultats a concerné les deux dernières catégories de projets.

Pour les projets d'hydraulique villageoise (environ 5000 forages), l'analyse a porté sur les résultats globaux des campagnes de forages, avec ou sans géophysique, ainsi que sur l'apport technique des méthodes géophysiques, qui sera développé dans le chapitre 2.

* Résultats détaillés disponibles sur certains sites, mais résultats globaux inconnus.

- Les projets d'hydraulique urbaine (150 forages environ sur 6 projets différents) ont été intégrés dans l'analyse de l'apport technique des méthodes géophysiques ; leurs résultats globaux ne sont toutefois pas pris en compte dans l'analyse des résultats des projets, compte tenu du petit nombre de forages réalisés, de la dispersion géographique et géologique des sites et de l'importance des débits recherchés, tous facteurs qui entraînent des taux de réussite non homogènes avec ceux des grands projets d'hydraulique villageoise.

Enfin, ont été éliminés des statistiques, les projets antérieurs à 1974, (dans lesquels les forages, réalisés par la méthode rotary, n'ont pas pénétré dans le socle fissuré) ainsi que les projets pour lesquels le nombre total de forages réalisés est inférieur à 20, (échantillon de taille trop faible, risquant de ne pas être significatif).

1.2.2. Paramètres influençant le taux de réussite en forage

1.2.2.1. L'analyse des coûts d'ouvrages n'a pas été faite dans la présente étude : d'une part les données financières ne sont presque jamais disponibles dans la documentation recueillie ; d'autre part l'objectif de l'étude est axé sur l'intérêt des méthodes géophysiques, qui ne représentent qu'un élément du coût des ouvrages.

La comparaison des résultats des projets porte uniquement sur les taux de réussite des campagnes de forages, presque toujours fournis dans la documentation.

1.2.2.2. On doit remarquer, avant toute chose, que les taux de réussite "bruts" ne sont pas toujours directement comparables entre eux. Ils dépendent en effet de nombreux facteurs, dont les plus importants sont :

a) parmi les critères de "stratégie" choisis ou contrôlés par le projet

- le débit de référence (débit minimum d'abandon),
- la profondeur moyenne des forages,
- la distance maximale autorisée entre le point d'eau et le village,
- le pourcentage de villages abandonnés après une ou plusieurs tentatives ;

b) parmi les critères liés au terrain ou au climat :

- la nature des formations géologiques (pétrographie),
- l'épaisseur moyenne d'altération,
- la pluviométrie moyenne.

* *Le débit de référence* : le seuil de débit pour l'équipement des forages dans les projets recensés est généralement fixé à 1 m³/h (débit d'air lift). Sur certains projets, en zone difficile, la barre est parfois mise à 0,5 m³/h, voire moins.

Par souci d'homogénéité dans la présente comparaison, tous les taux de réussite ont été ramenés au débit de référence de 1 m³/h. (cf. 1.2.3.1.).

* *Profondeur moyenne des forages* : ce facteur joue bien entendu sur le taux de réussite, mais son influence reste nettement secondaire (de l'ordre de quelques % pour 10 m de pénétration supplémentaire) par rapport à la nature des terrains (dont l'influence peut se chiffrer par plusieurs dizaines de %).

Le souci d'optimiser le coût des ouvrages d'exploitation peut d'ailleurs entraîner une limitation volontaire de la profondeur moyenne des forages au détriment du taux de réussite.

Cependant, sur tous les projets étudiés, la profondeur moyenne des forages reste assez homogène et se situe dans une fourchette de 40 à 60 m ; on n'a donc fait aucune correction concernant ce facteur.

* *Distance maximale au village* : elle est rarement mentionnée dans la documentation et n'est de ce fait pas prise en compte dans la comparaison.

Elle a une influence non négligeable, bien que secondaire, dans la mesure où certains projets s'imposent des conditions assez strictes (distance maximale de 200 m, voire 100 m) et d'autres des conditions beaucoup plus souples.

* *Pourcentage de villages abandonnés* : il n'est pas toujours mentionné, lui non plus, et l'on n'en a pas tenu compte. Ce point est cependant à signaler dans la mesure où un grand nombre de projets ont été amenés dans un premier temps à abandonner des villages (sinon des zones) difficiles, pour se cantonner dans des zones plus faciles : d'où une influence qui peut ne pas être négligeable sur le taux de réussite du projet lui-même, puis des projets ultérieurs chargés de régler les problèmes difficiles non résolus.

* On doit signaler enfin que, sur une même zone géologique et climatique, l'expérience acquise par les projets entraîne généralement à terme une amélioration sensible du taux de réussite.

Quoi qu'il en soit les variations de taux de réussite entraînées par ces différences de "stratégies", demeurent mineures face aux variations liées aux conditions géologiques et climatiques.

Ainsi, à titre d'exemple, une statistique faite dans le cadre de la présente étude sur les résultats obtenus dans les granites par plusieurs projets dans différents pays, et qui confirme des observations faites antérieurement au Mali, en Côte d'Ivoire et en Haute-Volta, montre que :

- lorsque l'altération est dénoyée, les taux de réussite à 1 m³/h sont de l'ordre de 30 % ; (1)

- lorsque l'altération est noyée, au moins sur quelques mètres, les taux de réussite à 1 m³/h sont de l'ordre de 70 %.(1)

En conclusion, les taux de réussite à 1 m³/h enregistrés par les différents projets, s'ils sont à considérer comme des ordres de grandeur, restent néanmoins grossièrement représentatifs des formations géologiques et des conditions climatiques rencontrées.

1.2.3. Présentation des résultats des projets et essai de synthèse

1.2.3.1. Pour la présente analyse des résultats globaux des campagnes de forages, seuls les projets d'hydraulique villageoise ayant fourni des données suffisantes dans la documentation recueillie ont été retenus. Il s'agit des projets N° 1, 2, 3, 7, 9, 10, 13, 14, 15, 19, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35.

Les résultats de ces projets sont consignés dans le tableau 1 qui appelle les commentaires suivants :

- à l'intérieur de chaque projet, lorsque les données le permettaient, les résultats sont présentés par formation géologique homogène. D'où parfois dans ce tableau la présence pour un même projet de plusieurs lignes de résultats se rapportant à des formations géologiques différentes, indiquées dans les colonnes 6 à 9.

(1) Ces chiffres concernent 266 forages recensés pour lesquels les débits, épaisseurs d'altération et niveaux statiques sont connus :

- altérites noyées : 209 forages dont 143 positifs - taux de réussite 68 %
- altérites dénoyées : 57 forages dont 19 positifs - taux de réussite 33 %.

TABLEAU 1 - RESULTATS BRUTS DES PROJETS

1	2	3	4	5	6													19	20			
					7				8			9			10					11		
					GEOLOGIE (1)				AVEC GEOPHYS.			SANS GEOPHYS.			ENSEMBLE (2)					(3)		
P	g	S	G	F	F+	%	F	F+	%	F	F+	%	F	F+	%	%						
N°	Projet	Pays	Pluvio (mm)	Alt. (m)														Observations				
27	PNUD (eaux souterraines) 1982-1983	Mali (Gourma)	200 à 400		-	série primaire du Gourma				30	2	7	-	-	-	30	2	7	7			
1	SAHEL 1979-1981	Haute-Volta	400 à 600	11	-	tordif				3	2	66	9	3	33	14	4	28°	[23]	*Q ≥ 0,5 m3/h		
1	SAHEL 1979-1981	Haute-Volta	400 à 600	15	-	rég.				22	14	64	33	15	45	55	29	55°	[44]	*Q ≥ 0,5 m3/h		
1	SAHEL 1979-1981	Haute-Volta	400 à 600	25	-	socio.				26	20	77	49	40	82	76	62	77	[62°]	*Q ≥ 0,5 m3/h		
1	SAHEL 1979-1981	Haute-Volta	400 à 600	28	-	x				?	?	?	?	?	?	35	29	83	[67]	*Q ≥ 0,5 m3/h		
28	NARA EST PRODES0 1980-1982	Mali	500 à 600	18	x	-				17	8	47	-	-	-	17	8	47°	47	*Méthode magnétique seule		
14	1000 FORAGES 1981-1982	Niger Zinder	300 à 500	?	-	x				?	?	?	?	?	?	123	80	65°	[52]	*Q ≥ 0,5 m3/h		
14	1000 FORAGES 1981-1982	Niger Maradi	400 à 500	?	-	x				?	?	?	?	?	?	144	113	69°	[55]	*Q ≥ 0,5 m3/h		
14	1000 FORAGES 1981-1982	Niger Liptako	500 à 700	?	-	x				?	?	?	?	?	?	63	53	84°	[67]	*Q ≥ 0,5 m3/h		
3	LIPTAKO 130 FORAGES 1980	Niger	500 à 700	13	-	x				?	?	?	?	?	?	[90]	49	77°	[64]	*Q ≥ 0,5 m3/h		
3	LIPTAKO 130 FORAGES 1980	Niger	500 à 700	25	-	x				?	?	?	?	?	?	[46]	39	85°	[78]	*Q ≥ 0,5 m3/h		
3	LIPTAKO 125 FORAGES 1983	Niger	500 à 700	20	-	x				76	43	57	-	-	-	76	43	57°	[45]	*Q ≥ 0,5 m3/h		
19	LIPTAKO 125 FORAGES 1983	Niger	500 à 700	28	-	x				7	5	71	-	-	-	7	5	71°	[57]	*Q ≥ 0,5 m3/h		
27	PNUD (eaux souterraines)	Mali (2è région Nord)	500 à 800	10	x	-				143	60	42	65	21	33	208	81	39	39			
9	SUD MARADI 1976-1977	Niger	400 à 700	?	-	x				?	?	?	?	?	?	74	40	54	54			
28	KAYES NORD 1980-1982	Mali	400 à 800	9	-	x				21	7	33	32	6	19	53	13	25	25	Altérites partout dénoyées		
28	KAYES NORD 1980-1982	Mali	400 à 800	7	-	x				19	6	32	30	13	43	49	19	39	39	Altérites partout dénoyées		
28	KAYES NORD 1980-1982	Mali	400 à 800	7	-	x				8	5	62	67	35	53	75	41	55	55	Grès et dolérite Altérites partout dénoyées		
28	KAYES NORD 1980-1982	Mali	400 à 800	8	x	-				-	-	-	-	-	-	47	20	42	42	Altérites partout dénoyées		
30	YATENGA-COMOE 1981-1983	Haute-Volta (Yatenga)	400 à 800	30	-	x				-	-	-	68	31	45	68	31	45	45	Drainage par le Gondo Altérites souvent dénoyées		
30	YATENGA-COMOE 1981-1983	Haute-Volta (Yatenga)	400 à 800	41	-	x				-	-	-	40	25	63	40	25	63	63			
27	PNUD (eaux souterraines)	Mali (2è région sud)	700 à 1000	15 à 20	-	x				446	294	66	270	145	54	716	439	61	61	Grès et dolérites		
31	MALI AQUA VIYA 1976-1978	Mali	700 à 1100	?	-	x				135	86	64	295	176	60	430	262	61	61	Grès		
31	MALI AQUA VIYA 1978-1983	Mali	700 à 1100	?	-	x				-	-	-	723	133	82	723	133	82	82	Grès		
7	A V Y (Nord)	Haute-Volta	900 à 1100	?	-	x				?	?	?	?	?	?	?	?	36 à 57	36 à 57	Faible épaisseur d'altération		
30	YATENGA-COMOE 1981-1983	Haute-Volta (Comodé)	1100	20	-	x				-	-	-	118	74	63	118	74	63	63			
30	YATENGA-COMOE 1981-1983	Haute-Volta (Comodé)	1100	31	-	x				-	-	-	64	46	70	64	46	70	70			
32	ENTENTE BENIN 1982-1983	Bénin	1200	23	-	x				-	-	-	64	48	75	64	48	75	75			
7	A V Y (Sud)	Haute-Volta	1200	?	-	x				?	?	?	?	?	?	?	?	80 à 90	80 à 90			
10	SENEGAL ORIENTAL 1977-1978	Sénégal	400 à 1400	21	-	x				22	15	68	13	11	85	35	26	74	74	(selon rapport final annexe II)		
13	HELVETAS 1978-1981	Mali	1100 à 1500	29	-	x				264	179	67	-	-	-	264	179	67	67			
33	PROJET COTON 1976-1979	Côte d'Ivoire	1100 à 1400	21	-	x				59	39	66	302	206	68	361	245	68°	68°	* 62 à 84 suivent "réseau" géophysique sur zones difficiles		
33	PROJET COTON 1976-1979	Côte d'Ivoire	1100 à 1400	26	-	x				-	-	-	78	67	86	78	67	86	86			
33	PROJET COTON 1976-1979	Côte d'Ivoire	1200	60	-	x				-	-	-	16	4	25	16	4	25	25°	*Limite contractuelle de forage à 60 m		
2	"300 FORAGES" TOGO 1979-1980	Togo	1000 à 1500	10 à 15	(67 % grès)				?	?	?	?	?	?	300	126	42	42	Grès prédominants 75 % réussite donc grès			
15	BOUCLE DU CACAO	Côte d'Ivoire	1200 à 1500	30	-	x				-	-	-	313	972	87	313	272	87	87			
34	28 FORAGES LABE 1982-1983	Guinée	1400		-	x				-	-	-	27	15	55	27	15	55	55	Grès et dolérite		
35	40 FORAGES MANDIANA 1982-1983	Guinée	1500	38	-	x				-	-	-	42	2	95	42	2	95	95			

(1) P = pélite, g = granite, S = schiste, C = grès

(2) F = Nb de forages total F+ = Nb de forages positifs % = taux de réussite brut = $\frac{F+}{F}$

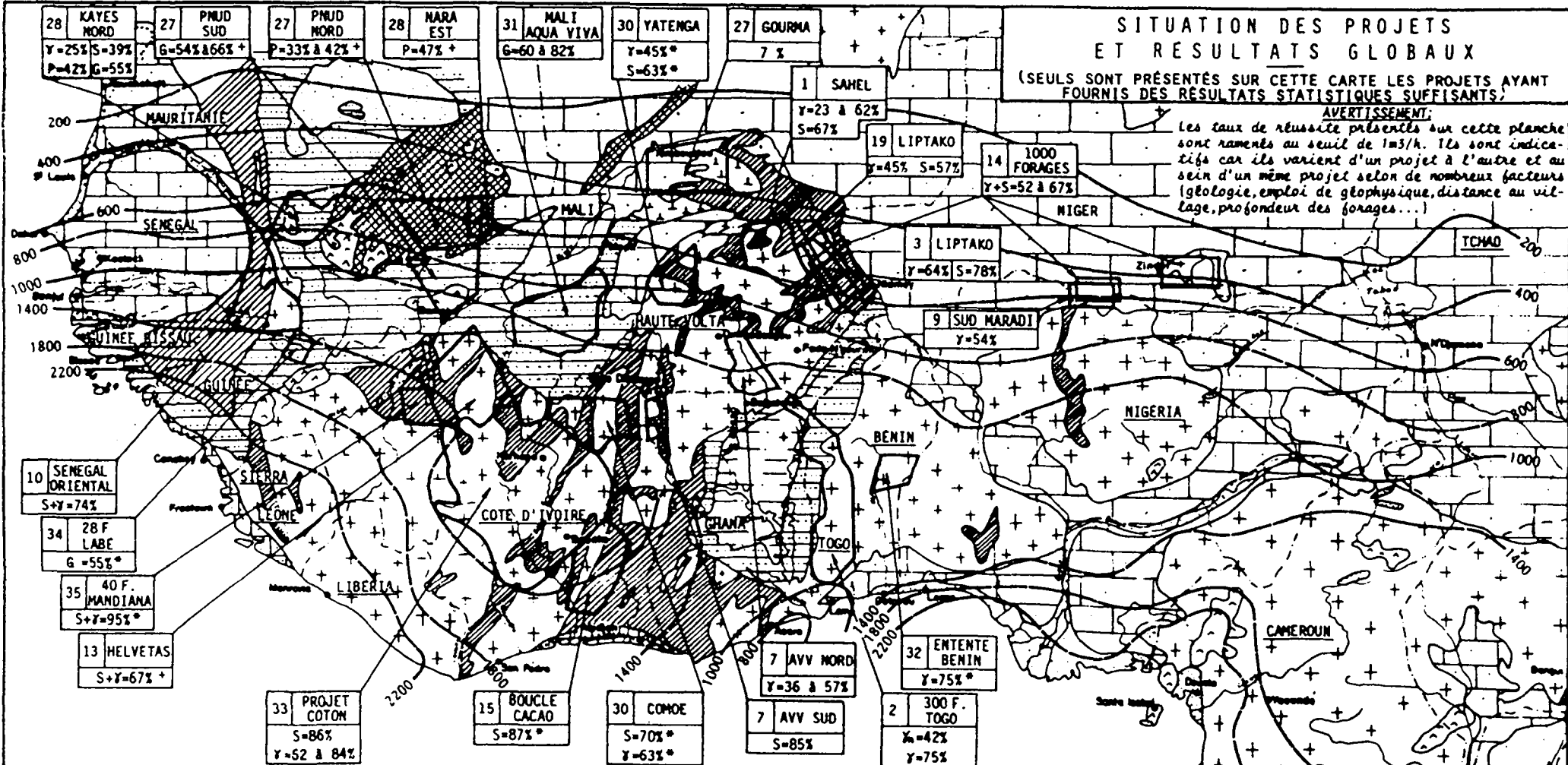
(3) % 1 m3/h = taux de réussite à 1 m3/h (55) estimés

*Alt. = épaisseur d'altération moyenne, en mètre

SITUATION DES PROJETS ET RESULTATS GLOBAUX

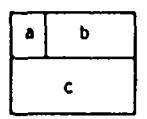
(SEULS SONT PRÉSENTÉS SUR CETTE CARTE LES PROJETS AYANT FOURNIS DES RÉSULTATS STATISTIQUES SUFFISANTS)

AVERTISSEMENT:
Les taux de réussite présentés sur cette planche sont ramenés au seuil de 1m3/h. Ils sont indicatifs car ils varient d'un projet à l'autre et au sein d'un même projet selon de nombreux facteurs (géologie, emploi de géophysique, distance au village, profondeur des forages...)



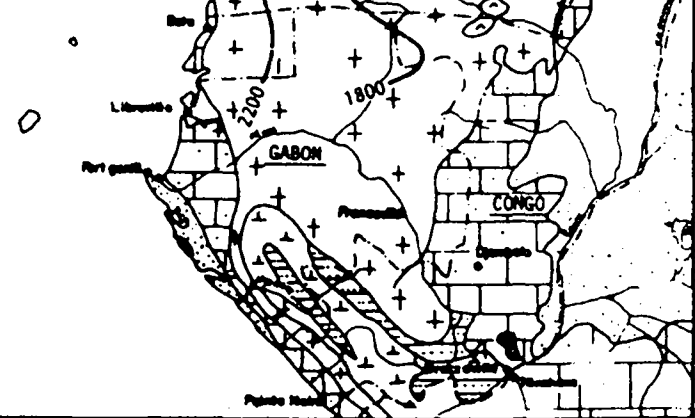
	Dunes, alluvions, sables	Formations superficielles récentes	QUATERNAIRE
	Sables, grès, calcaires	Formations sédimentaires	CONTINENTAL TERMINAL EOCENE PALEOCENE MAESTRICHTIEN
	Basaltes ou dolérites	Roches volcaniques	CONTINENTAL INTERCALAIRE
	Pelites (P) Grès quartzites Faciès carbonatés Faciès argileux	Formations sédimentaires (G)	CAMBRIEN
	Schistes birrimiens (S) Granite et gneiss (Y, W)		INFRACAMBRIEN
		Socle cristallin	PRECAMBRIEN

1000 — Pluviométrie moyenne (mm)



a: N° Projet (cf. tableau 1)
b: Nom du projet
c: % de réussite à 1 m3/h
+ Géophysique systématique
• Sans géophysique

ECHELLE
0 km 100 200 300 400 500 km



- les résultats sont classés par tranches pluviométriques croissantes (colonne 4) ce qui peut entraîner une dispersion des résultats d'un même projet dans le tableau (projet 27 par exemple) ;

- les résultats des campagnes de forages sont indiqués dans les colonnes 10 à 19 et sont présentés comme suit :

- . colonnes 10 à 12, résultats obtenus après étude géophysique systématique (nombre de forages total, nombre de forages positifs, taux de réussite égal au nombre de forages positifs divisé par le nombre total de forages) ;

- . colonnes 13 à 15, résultats obtenus sans étude géophysique ;

- . colonnes 16 à 18, résultats globaux. Il s'agit dans ces 9 colonnes des résultats bruts tels qu'annoncés dans la documentation ;

- . dans la colonne 19 du tableau, sont indiqués les taux de réussite à 1 m³/h (débit d'air lift). Pour certains projets où le seuil d'acceptation des forages était 0,5 m³/h et où le taux de réussite à 1 m³/h n'était pas indiqué, un correctif a dû être adopté par souci d'homogénéisation : le taux de réussite à 1 m³/h a été estimé, dans ce cas, en multipliant par 0,8 (1) le taux de réussite à 0,5 m³/h ; les taux estimés sont figurés entre crochets.

Compte tenu du court délai de l'étude, de la grande dispersion des sources de documentation et du but, axé essentiellement sur les résultats de la géophysique, certaines données partielles n'ont pu être complétées auprès de leurs auteurs : nous prions ces derniers de bien vouloir nous en excuser.

1.2.3.2. Les résultats présentés au tableau 1 (colonne 19) ont été reportés sur une carte de l'Afrique de l'Ouest au 1/14.000.000ème (planche 1) sur laquelle figurent aussi les principales formations géologiques et la pluviométrie moyenne.

L'examen du tableau 1 et de la planche 1 fait ressortir deux points :

a) les taux de réussite sont extrêmement variables

- . Les taux de réussite à 1 m³/h - qui correspondent très fréquemment à des résultats obtenus sans géophysique - varient de 23 % à 95 %, si l'on excepte les résultats obtenus en 1982/83 dans le Gourma (projet 27 - 2 forages positifs sur 30) (2). Ils paraissent dépendre des conditions géologiques et climatologiques.

(1) Ce rapport est de 0,86 pour le projet Liptako 130 forages (n° 3) et de 0,8 pour le projet Sahel Haute-Volta (n° 1).

(2) Le Gourma est en fait une région particulièrement difficile et mal connue, à classer à part : structure plissée et tectonisée complexe, recouvrement dunaire épais masquant les affleurements et les directions de fractures, niveaux statiques pouvant atteindre 80 à 100 mètres de profondeur.

- en fonction des conditions géologiques

. *dans les granites* : les taux de réussite varient de 23 % à 85 % avec une médiane à 55 %. Ils sont fortement liés aux épaisseurs moyennes d'altération qui varient corrélativement de 9 m à 25 m.

Un résultat se singularise : il s'agit de la zone du Yatenga (projet 30) où de fortes épaisseurs d'altération sont dénotées sur plus de 30 m par suite d'un drainage régional vers la dépression du Gondo, ce qui entraîne un taux de réussite plus faible (45 %) que dans d'autres régions à épaisseur d'altération comparable (1).

. *dans les schistes birrimiens*, si l'on excepte la zone de Kayes Nord (projet 28) où l'épaisseur moyenne d'altération est de 7 m (39 % de réussite), les taux de réussite varient de 55 à 95 % sans géophysique avec une médiane à 75 %, pour des épaisseurs moyennes d'altération variant de 20 à 40 m.

Le taux de réussite exceptionnellement bas (25 %) enregistré par le projet N° 33 sur 16 forages le long de la rivière Bagoué doit être mentionné : il n'est cependant pas significatif car il est lié à une limite contractuelle de foration à 60 m dans un secteur où l'épaisseur moyenne d'altération rencontrée par les forages est supérieure à 60 m : le socle fissuré n'a donc pas été atteint.

. *dans les gneiss du Togo et du Bénin*, les taux de réussite sont de l'ordre de 40 % (un seul résultat disponible, projet 34) ;

. *dans les grès infracambriens*, les résultats varient fortement selon la présence défavorable d'intrusions doléritiques (50 à 60 % de réussite sans géophysique) ou en l'absence de ces dernières (60 à 85 % de réussite sans géophysique) ;

. *dans les pélites cambriennes* du Mali et de la Mauritanie, les taux de réussite sont de l'ordre de 30 à 40 % sans géophysique, et de 45 à 55 % avec géophysique ;

- en fonction de la pluviométrie

. les projets étant classés dans le tableau par ordre de pluviométrie croissante, on voit que d'une manière générale, et toutes formations confondues, les taux de réussite sont, statistiquement, légèrement croissants avec la pluviométrie :

- ils varient de 23 % à 78 % autour d'une médiane de 50 % pour les 22 premiers résultats se situant dans la bande pluviométrique 200 à 800 mm ;

- ils varient de 25 % à 95 % autour d'une médiane de 68 % pour les 16 derniers résultats se situant dans la bande pluviométrique 800 à 1.500 mm.

(1) Le paramètre qui dans les granitogneiss donne une excellente corrélation avec les taux de réussite est en fait "l'épaisseur d'altération mouillée" qui permet de s'affranchir de la profondeur du niveau statique sous le sol.

Notons cependant que si l'on calcule globalement le taux de réussite pour chacun des deux groupes de projets ci-dessus précisés, les résultats sont inversés : (56 % et 53 %) ; ce dernier calcul est moins significatif dans la mesure où le poids de quelques gros projets devient prépondérant . Il montre cependant que la pluviométrie a sans doute moins d'influence sur les taux de réussite, que la nature des terrains.

b) L'influence des études géophysiques n'est pas toujours nette

Les taux de réussite à 1 m³/h avec et sans géophysique obtenus par 6 projets sont rassemblés dans le tableau 2, au sein duquel on a pu distinguer 11 "sous projets", par zone géologique homogène.

TABLEAU 2

Taux de réussite à 1 m³/h obtenus avec et sans géophysique par différents projets

Projet	Géologie	AVEC GEOPHYSIQUE			SANS GEOPHYSIQUE			
		Nombre de forages total	Nombre de forages positifs	% réussite	Nombre de forages total	Nombre de forages positifs	% réussite	
1	granite tardif	3	2	(66 %)	9	3	(33 %)	*
1	granite régénéré	22	14	64 %	33	15	45 %	*
1	granite vieux socle	26	20	77 %	49	40	82 %	0
27	pélites	143	60	42 %	65	21	33 %	*
28	granites	21	7	33 %	32	6	19 %	*
28	schistes	19	6	32 %	30	13	43 %	0
28	grès et dolérite	8	5	62 %	67	35	53 %	*
27	grès et dolérite	446	294	66 %	270	145	54 %	*
31	grès	135	86	64 %	295	176	60 %	*
10	schistes grès	22	15	68 %	13	11	85 %	0
33	granite	59	39	66 %	302	206	68 %	0
T O T A L		904	548	61 %	1165	671	58 %	

* résultats meilleurs avec géophysique

0 résultats moins bons avec géophysique

On s'aperçoit que sur les 11 "sous projets" (ou projets) ainsi définis, la géophysique a apporté une amélioration sensible des résultats dans 7 cas, qui regroupent 778 forages soit 86 % de la population "avec géophysique".

Les résultats sont moins bons avec géophysique dans 4 cas, qui regroupent 126 forages, soit 14 % de la population.

Globalement enfin, les taux de réussite obtenus avec géophysique sont légèrement meilleurs (61 % de succès) que sans géophysique (58 %).

On ne peut bien entendu tirer de conclusions hâtives de ces résultats, au demeurant très partiels et disparates. On doit en particulier signaler que dans plusieurs projets les études géophysiques ont été réservées aux cas difficiles, ce qui explique que le taux de réussite final reste analogue, voire inférieur, à celui obtenu sans géophysique sur des cas plus faciles (Notamment le projet 33).

Il n'en demeure pas moins que l'influence des études géophysiques sur le taux de réussite à 1 m³/h n'est pas toujours évidente. Plusieurs auteurs signalent ce fait et l'on peut citer par exemple le rapport de lère campagne du projet 10 qui indique (p. 14) que les résultats obtenus "tendraient à démontrer que si la prospection géophysique n'augmente pas le pourcentage de succès de façon significative, elle permet d'obtenir des débits plus élevés, tout en réduisant les profondeurs des ouvrages".

1.2.3.3. En résumé, bien que l'analyse succincte qui précède soit loin d'être exhaustive, et que chaque cas, ou chaque région, demeure un cas particulier, on peut donner à titre indicatif les ordres de grandeur suivants de taux de réussite à 1 m³/h dans les grandes formations géologiques à aquifères discontinus d'Afrique de l'Ouest (tableau 3), tableau établi à partir des données les plus sûres en notre possession.

TABLEAU 3

ORDRE DE GRANDEUR DES TAUX DE REUSSITE A 1 m³/h DANS DIFFERENTES FORMATIONS GEOLOGIQUES

FORMATIONS GEOLOGIQUES	Taux de réussite à 1 m ³ /h	
	sans géophysique (r ₁)	avec géophysique (r ₂)
Schistes birrimiens moyennement altérés (20 à 40 m)	70 à 90 %	
Granite à forte épaisseur d'altération (> 20 m) (sauf altérites dénoyées)	70 à 85 %	
Granite à épaisseur d'altération moyenne (10 à 20 m)	50 à 65 %	?
Granite avec altérites partout dénoyées	20 à 40 %	40 à 50 % (1)
Gneiss du Togo et du Bénin	40 à 50 %	?
Grès sans intrusions doléritiques	70 à 90 %	
Grès avec intrusions doléritiques	50 à 60 %	65 à 75 % (2)
Pélites cambriennes	30 à 40 %	45 à 55 % (3)

Naturellement on trouvera toujours localement des exceptions, telles que celles déjà rencontrées dans les projets cités : par exemple des taux de réussite plus faible en bordure des grands bassins sédimentaires sahéliens (fossé de Nara, Gourma, Gondo, Détroit Soudanais . . .) par suite d'un enfoncement des niveaux statiques.

La présente étude ne cherche d'ailleurs pas à préciser "outre mesure" -ni à cartographier- les taux de réussite que l'on peut espérer par formation, mais seulement à rationaliser autant que faire se peut la décision d'entreprendre des études géophysiques de détail. Dans ce but, le classement qui précède permet de se faire une première idée de l'ordre de grandeur des taux de réussite que l'on peut espérer dans une région donnée.

(1) d'après projets N° 1, 28 et 33

(2) d'après projets n° 27, 28 et 34

(3) d'après projet n° 27 et 28

TABLEAU 4 - LISTE DES PROJETS RECENSES

N° fiche	Nom du projet	Année	Pays	Financement	Contrôle géophysique	Méth. géo. (1)	Nb. forag.	Références
1*	Hydraul.villag.Sahel	1979-81	Hte-Volta	FAC	BRGM	E	190	Rapport BRGM 81 AGE 039
2*	Hydraul.villag.Togo	1978-81	Togo	FED	BRGM	E	300	Rapport BRGM 81 SGN 674 EAU
3*	Hydraul.villag. Liptako	1980	Niger	CCCE/FAC	BRGM	-	136	Rapport BRGM 82 AGE 046 (p. 24 et suivantes)
4*	AEP 10 centres	1982	Hte-Volta	Pays-Bas	IWACO	E,em	36	Rapport final (archives CIEH)
5*	AEP 7 centres (I)	1981	Hte-Volta	RFA/KFW	GAUFF/BRGM BUYOGMI	E	29	Rapport final (archives CIEH)
6*	AVV	1979-80	Hte-Volta		IWACO	E,em	53	Rapport final (archives CIEH)
7*	AVV	1974-78	Hte-Volta		GEOHYDRAU- LIQUE ET CGG	E	(100)	In rapport Engelen CIEH- GEOHYDRAULIQUE vol. 1 1978
8*	Hydrogéol.Hte-Volta	1968	Hte-Volta	ONU	COMTEC	E,S	24	Rapport de fin de travaux (PNUD-COMTEC 1968)
9*	Etude hydro.aud Moradi	1976-77	Niger		I.KRUGER	E	74	Rapport final (archives CIEH)
10*	Sénégal oriental	1977-78	Sénégal		BRGM	E	35	Rapport 1ère campagne (Janvier 1977)
11*	Nord Cameroun	1972-74	Cameroun	UNDP	HYDROGEO	E	12	Rapport final (archives CIEH)
12	Etude Conakry	1957	Guinée	A.O.F.	CGG	S	-	Rapport CGG 1957
13*	Melvétos	1978-81	Mali	Suisse	HELVETAS	E	266	Rapport Melvetos 1981 repris dans rapport BURGEAP R.512
14*	1000 forages	1981-82	Niger	Niger	BRGM	E,em	(436)	In rapport BRGM 82 AGE 046 (p. 53 et p. 36)
15*	Boucle du cacao	1975-77	Côte- d'Ivoire	DOH	GEOHYDRAU- LIQUE	-	313	Rapport final (SAH Côte- d'Ivoire 1977)
16*	PNUD Togo	1982/83	Togo	PNUD	PNUD	E,S, M	59	Rapport technique inédit (PNUD-Togo-75/008-1980)
17*	Togo BOAD	1982	Togo	BOAD	BRGM	E	(21)	Rapport final
18	Nord Dahomey	1968	Bénin	FED	WAKUTI	E	393	Rapport final (archives CIEH)
19*	Hydraul.villag. Liptako	1983	Niger	Cons. Entente	IWACO	E,em	126	Rapport final
20	AEP 9 centres	1975-82	Hte-Volta	FKW	WPN ET BUYOGMI	E	?	Rapport final (archives CIEH)
21*	AEP 20 centres	1965-66	Hte-Volta	FED	BRGM	E	51	Rapport final (archives CIEH)
22	Zone côtière	1972-75	Togo	ONU	PNUD- ITALCONSULT	E	-	Rapport PNUD 1975
23	Prospection Oudalan	1966	Hte-Volta	FAC	CGG-BRGM	E	-	Rapport géophysique
24	Nord Hte-Volta	1970-71	Hte-Volta	PNUD	HYDROGEO	E	-	Rapport final (archives CIEH)
25	HOUNDE ET BOROMO	1963	Hte-Volta		CGG-BRGM	E	5	Rapport CGG
26	AEP NARA	1970	Mali	PNUD	PNUD Mali	E,S	?	Rapport géophysique MLI 76/004
27*	PNUD EAUX SOUTERRAINES	1974-83	Mali	PNUD	PNUD Mali	E,S, M	924	Rapports de fin de campagne de 1982 et 1983
28*	PRODES0 KAYES-NARA	1980-82	Mali	FSD	BURGEAP - CGG	E,M	224	Rapport BURGEAP R 493
29*	Guinée 7 Centres	1982-83	Guinée	BIRO	BURGEAP - CGG	E	51	Rapport BURGEAP R 524
30*	Yotenga-Comé	1981-83	Hte-Volta	FED	BURGEAP	-	292	Rapport de fin de campagne 83
31*	Mali Aqua Viva	1976-83	Mali	ONG-CCCE	MAY	-	153	Documente MAY repris dans rapport BURGEAP R 540
32*	Hydraul.villag. Bénin	1982-83	Bénin	FAC- ENTENTE	BURGEAP - BRGM	-	64	Rapport de fin de campagne 83
33*	Projet Coton	1978-79	Côte	BIRO	BURGEAP REMARDET CGG	E	396	Rapport de synthèse BURGEAP REMARDET ENG. R14 1979
34*	28 forages Labé	1982-83	Guinée	FED	BURGEAP	-	27	Rapport de fin de campagne 83
35*	40 forages Mandiana	1982-83	Guinée	FED	BURGEAP	-	42	Rapport de fin de campagne 83
36*	Route Kiffa-Néma	1974-75	Mauritanie	FED	BURGEAP CGG	E	14	Rapport BURGEAP R 183

* Projets dont les résultats globaux sont présentés sur la planche 1 et dans le tableau 1

o Projets dont les résultats détaillés ont été exploités (analyse "statistique" ou présentation de "cas types")

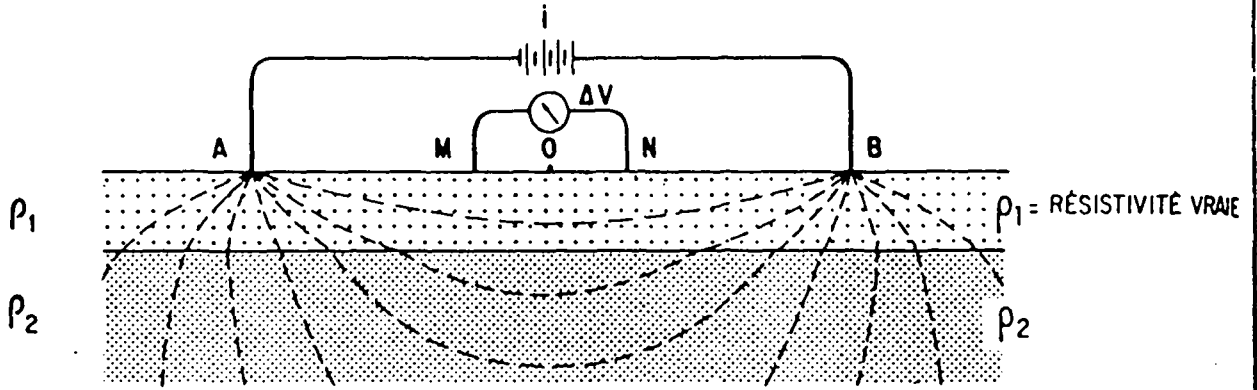
(1) E = électrique S = sismique M = magnétique em = électromagnétique

APPORT TECHNIQUE DES METHODES GEOPHYSIQUES

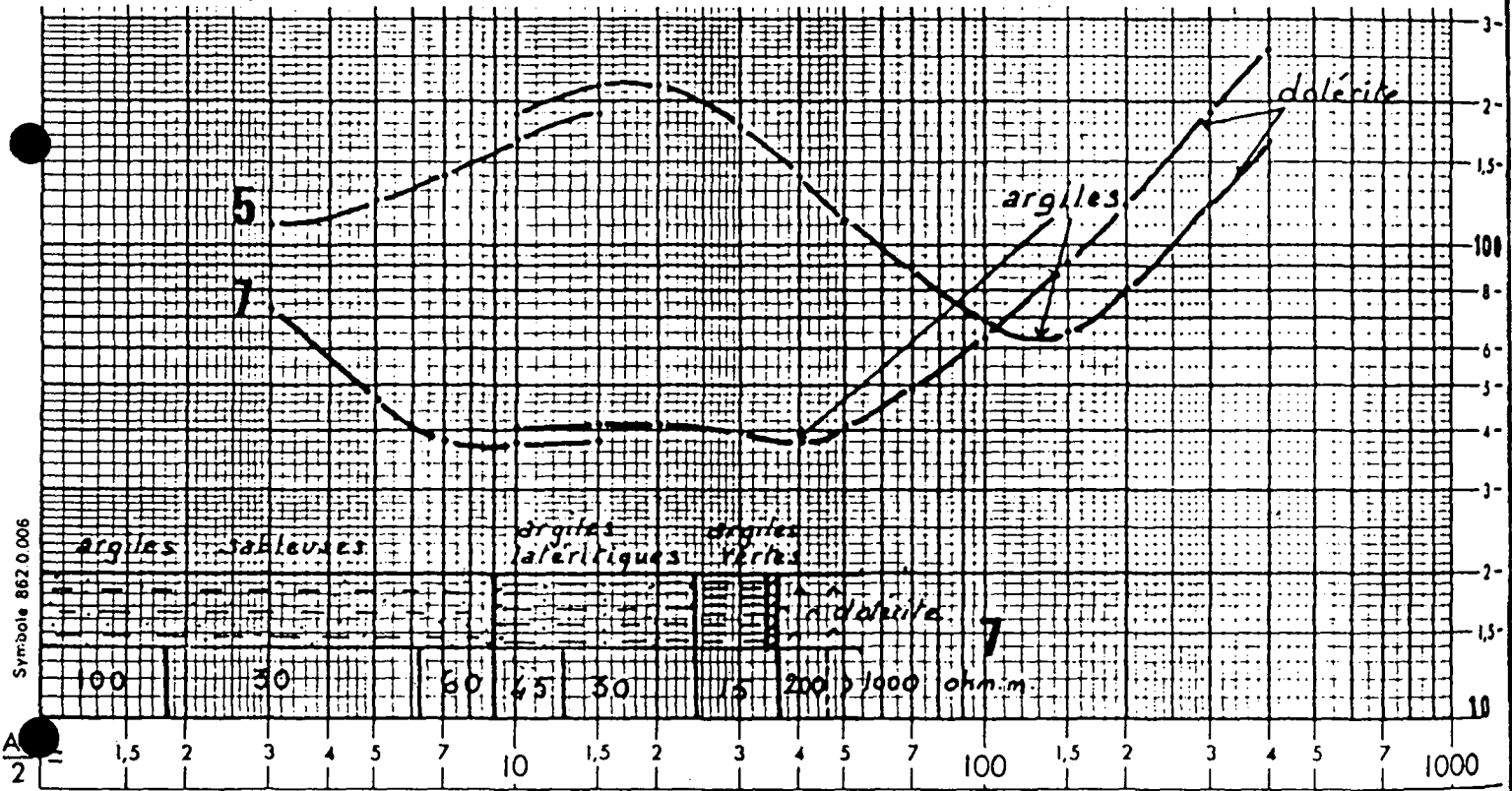
Chapitre II

2.1. REVUE DES DIFFERENTES METHODES GEOPHYSIQUES

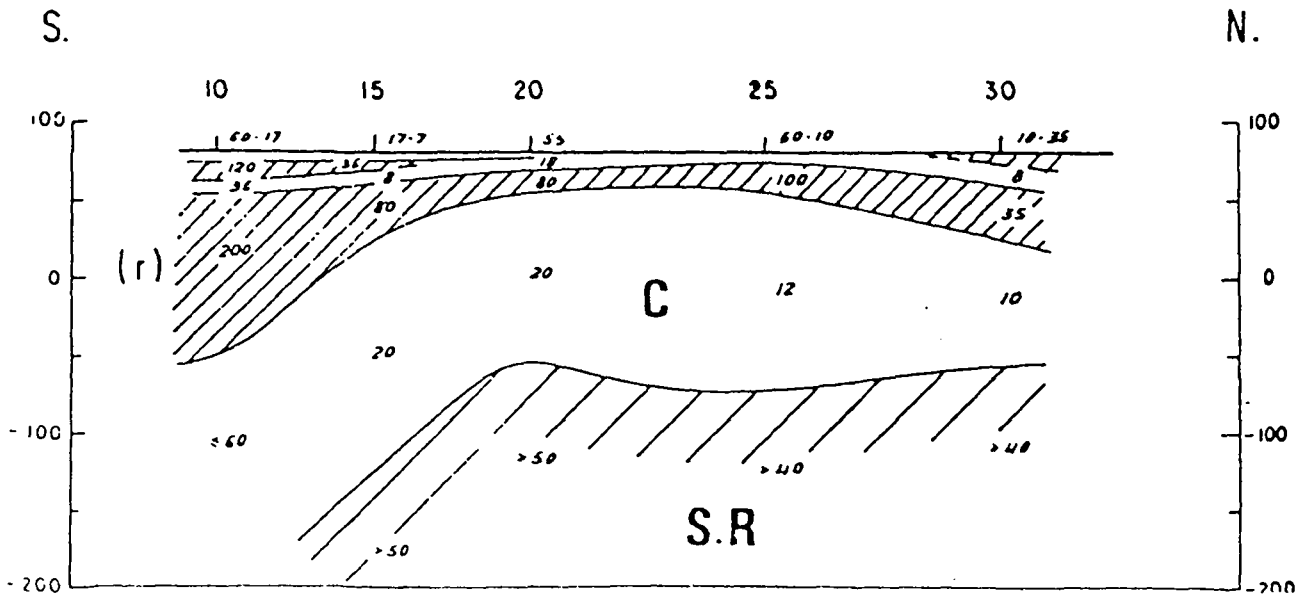
(A) - SCHEMA DU SONDAGE ELECTRIQUE



(B) - DIAGRAMMES DE SONDAGES ELECTRIQUES



(C) - COUPE ELECTRIQUE INTERPRETATIVE



2.1.1. LE SONDAGE ELECTRIQUE

PRINCIPE

Cette méthode permet d'étudier la variation du paramètre "résistivité apparente" du sous-sol à la verticale du point d'investigation.

Pour réaliser les mesures sur le terrain, on envoie dans le sol par l'intermédiaire d'électrodes A et B un courant électrique continu d'intensité i . On mesure avec un potentiomètre la différence de potentiel existant entre deux électrodes impolarisables M et N. La résistivité apparente est donnée par la formule suivante : $\rho_a = K \frac{\Delta V}{i}$ où K est un coefficient, fonction de la disposition des 4 électrodes A, M, N et B. (Pl. 2)

En allongeant la longueur de la ligne AB, on atteint des couches de plus en plus profondes.

Le report des valeurs de la résistivité en fonction de la demi-longueur AB, sur papier bilogarithmique, donne une courbe appelée diagramme électrique qui, après analyse, permet d'apprécier les épaisseurs et les résistivités vraies des formations sous-jacentes.

MISE EN OEUVRE

La réalisation de sondages électriques nécessite un matériel relativement simple et peu encombrant :

- un appareillage de mesure (potentiomètre) et ses accessoires (câbles, électrodes, source d'énergie électrique) ;
- un véhicule.

Trois à cinq manoeuvres sont suffisants pour des sondages ne dépassant pas des longueurs de ligne AB de mille mètres.

AVANTAGES

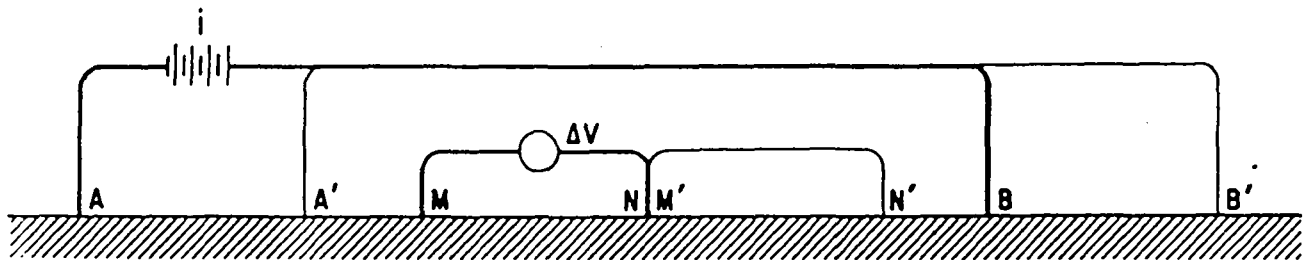
Les sondages électriques permettent de faire une interprétation quantitative qui peut être étalonnée sur des forages lorsqu'il en existe. Elle permet en particulier de donner une bonne information sur l'importance de l'altération et sur les principaux accidents qui peuvent affecter le toit du socle.

Cette méthode permet de reconnaître la structure d'ensemble d'une zone à partir d'un nombre limité de forages de calage. D'autre part elle est indispensable à la définition des dispositifs du trainé électrique et à son interprétation.

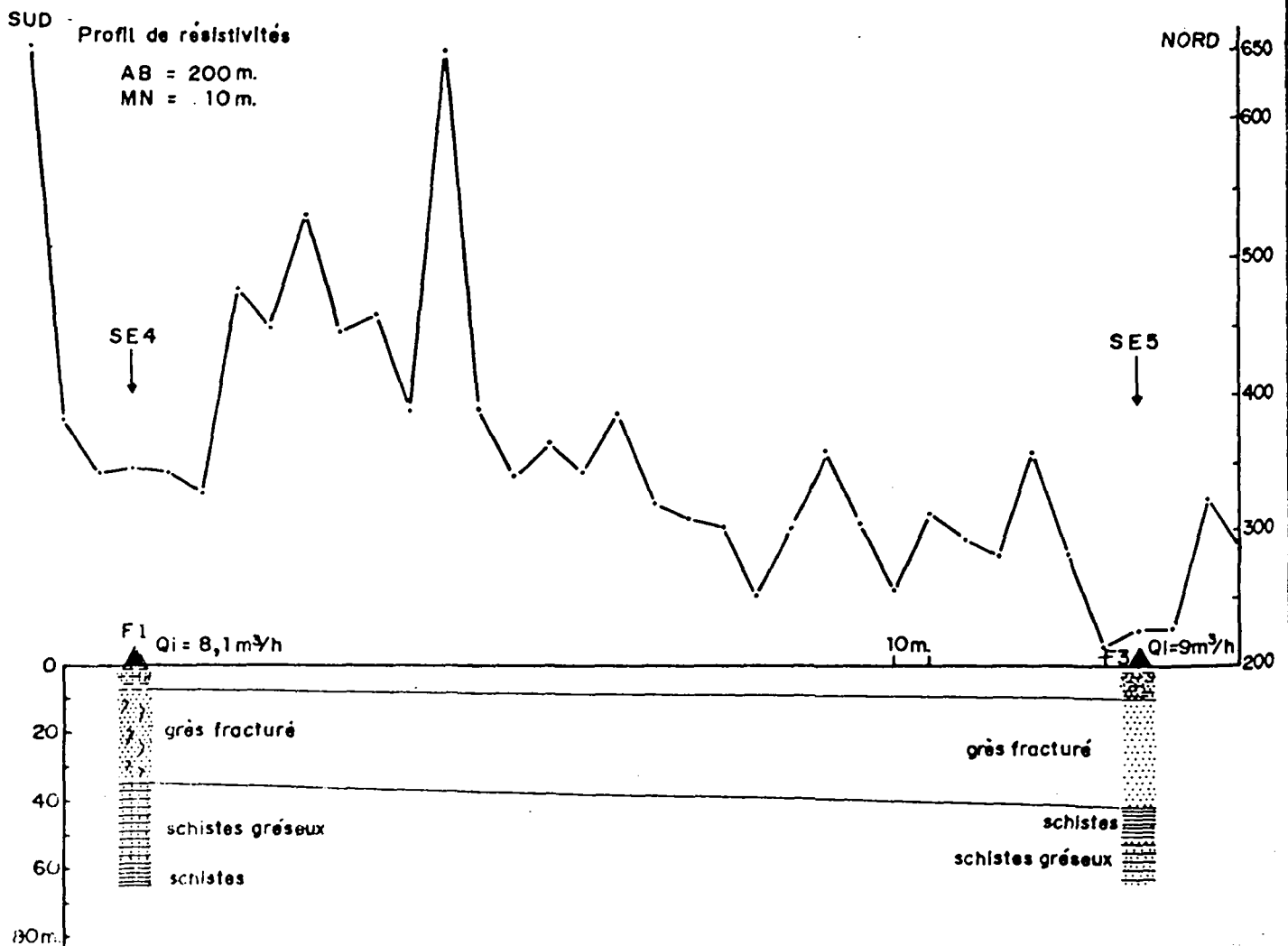
INCONVENIENTS

Compte tenu du problème posé (recherche dans des formations de socle fracturé), cette méthode ne permet pas, seule, de fournir des informations précises sur la présence éventuelle de zones fissurées à l'intérieur du socle.

Ⓐ - SCHÉMA DU TRAINÉ



Ⓑ - REPRÉSENTATION DES MESURES



2.1.2. LE TRAINÉ ELECTRIQUE

PRINCIPE (Pl. 3 A)

Comme en sondage électrique, on mesure le paramètre "résistivité apparente", mais dans ce cas à profondeur quasiment constante, c'est-à-dire avec un dispositif AMNB de dimension constante que l'on déplace le long d'un profil.

Les variations horizontales de résistivité que l'on enregistre permettent de mettre en évidence des changements de faciés, notamment des zones fracturées qui se traduisent le plus souvent par des anomalies conductrices. (Pl. 3 B).

MISE EN OEUVRE

La réalisation des mesures nécessite le même matériel que le sondage électrique. Le personnel doit être un peu plus nombreux, surtout dans le cas de trainé à plusieurs longueurs de ligne.

AVANTAGES

Cette méthode, très utilisée, permet le repérage des zones fracturées ou fissurées verticales ou subverticales.

Cette méthode est essentiellement qualitative et l'on peut parfois estimer le pendage des zones fracturées en adoptant plusieurs longueurs de ligne AB. (Voir planches 11 et 12).

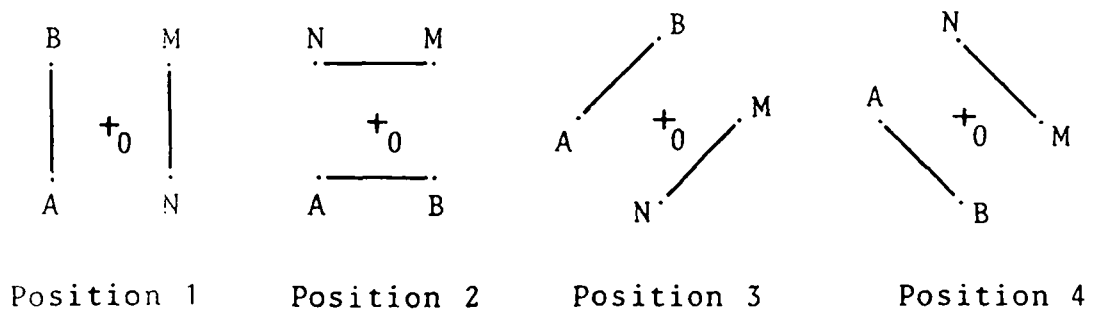
INCONVENIENTS

Le trainé électrique n'est généralement pas utilisé seul. Quelques sondages électriques préalables sont généralement effectués pour choisir la dimension du dispositif et permettre une interprétation ultérieure du trainé.

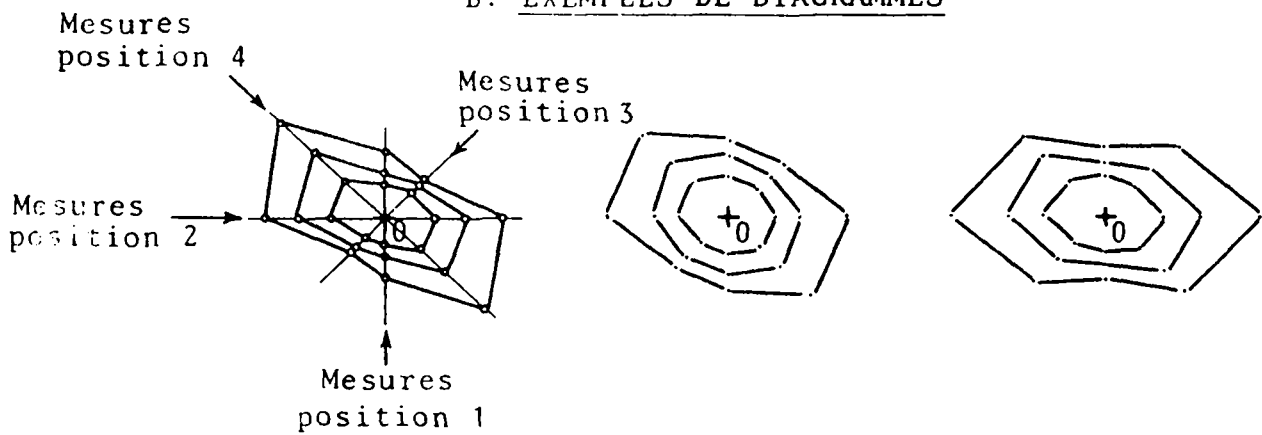
PRINCIPE DE LA MÉTHODE ÉLECTRIQUE
 PLURIDIRECTIONNELLE

LE DISPOSITIF CARRÉ CROISÉ

A: MISE EN OEUVRE



B: EXEMPLES DE DIAGRAMMES



2.1.3. LA METHODE PLURIDIRECTIONNELLE

L'étude de l'anisotropie électrique du milieu discontinu se fait à l'aide de deux dispositifs :

Le dispositif carré

- . mesure de la résistivité moyenne apparente $\rho_m a$;
- . mesure du coefficient d'anisotropie λ ;
- . détermination de la direction des structures θ .

Le dispositif rectangle

Réalisation de deux cartes de résistivité apparente dans deux directions, parallèle et perpendiculaire à la direction d'anisotropie.

Ces deux cartes permettent de cartographier deux familles d'anomalies (fractures) et d'en positionner les intersections.

AVANTAGES

Le dispositif carré permet de déterminer 2 paramètres qui sont liés à la direction des structures ou fractures et à l'intensité de la fracturation ; il permet de décider si un site est favorable ou non à l'implantation.

INCONVENIENT

Le dispositif carré ne permet pas à lui seul d'implanter un forage.

MISE EN OEUVRE

Le dispositif carré se compose de 4 électrodes A,B,M,N disposées en carré. (Pl. 4. A). Il est défini par la longueur de son côté a^* .

Le diagramme obtenu résulte des mesures faites avec 3 valeurs de a (ou plus) et suivant 4 ou 6 directions de ce dispositif (rotation de 45° ou 30°). Les mesures de résistivité faites pour chaque dispositif permettent de construire un diagramme tel que ceux présentés, planche 4 B.

CADENCE D'EXECUTION

La mise en oeuvre de cette méthode demande un équipement de prospection électrique classique.

Pour une exécution rapide (une heure pour un dispositif carré avec 3 longueurs de côté) il nécessite un opérateur et quatre manoeuvres.

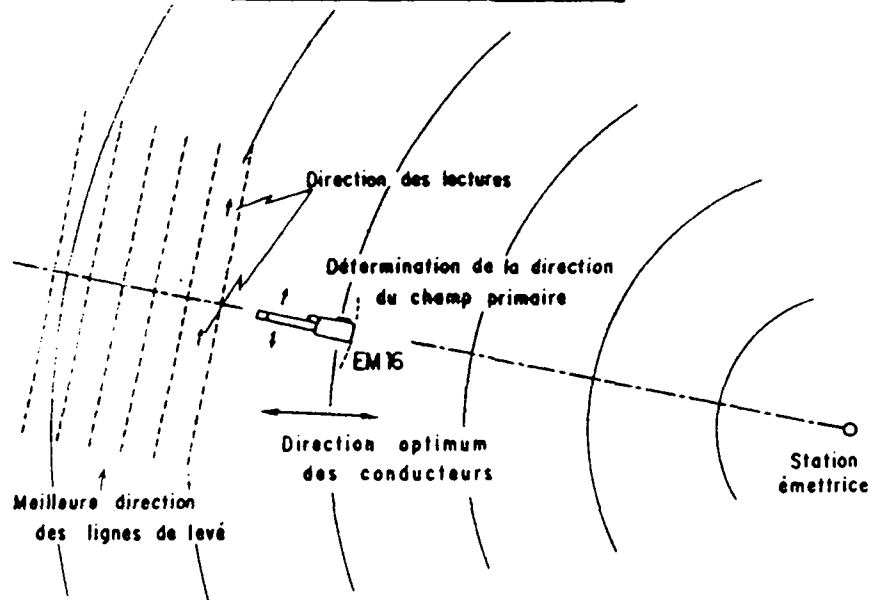
STRUCTURES DES AQUIFERES ETUDIES

Ce dispositif est adapté à l'étude de tous milieux discontinus, failles, horsts, en pays cristallin et karstique.

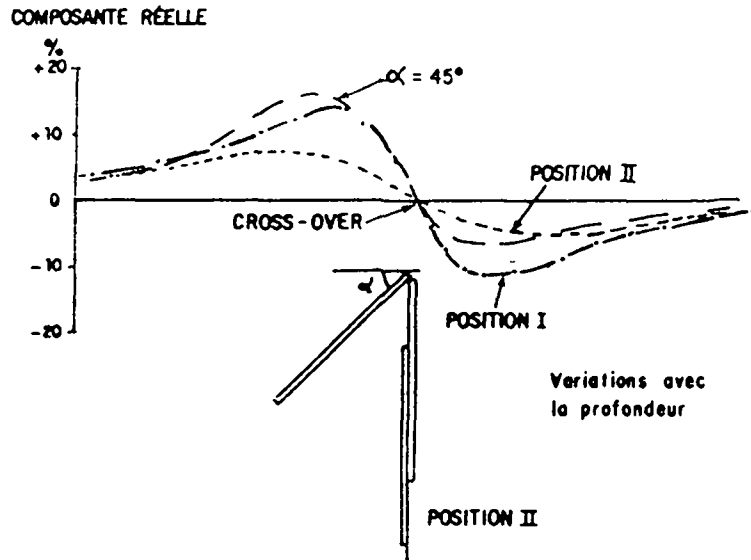
* La longueur d'origine de a est définie à partir d'un sondage électrique préliminaire.

A) ELECTROMAGNÉTISME (VLF - EM16)

SCHÉMA DE MISE EN ŒUVRE

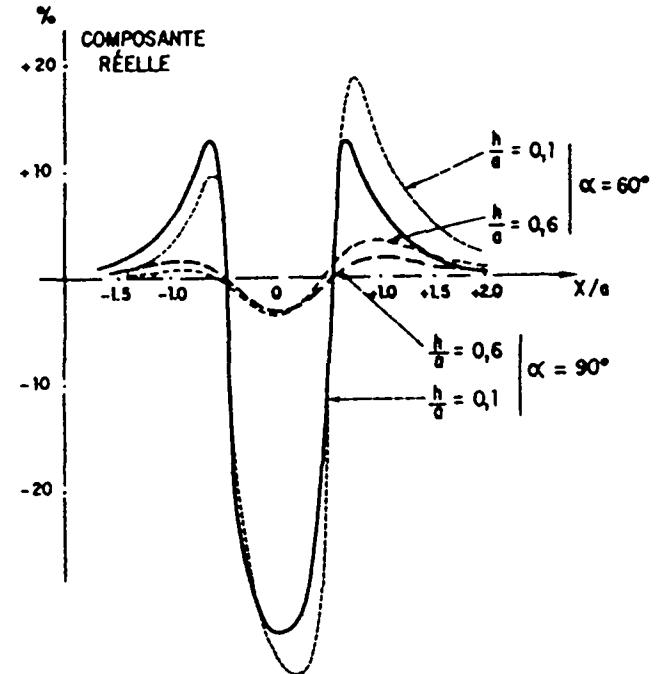


COURBES THEORIQUES

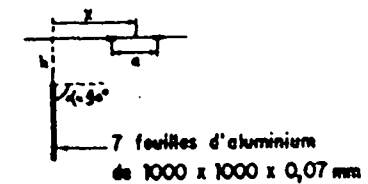


B) ELECTROMAGNETISME (MAX-MIN)

Courbe expérimentale sur modèle réduit
Fréquence = 3600 cps.



PARAMETRES



2.1.4. LES METHODES ELECTROMAGNETIQUES

PRINCIPE

Un champ magnétique alternatif primaire artificiel induit dans un corps conducteur des courants de Foucault. Ceux-ci créent un champ magnétique secondaire s'additionnant au champ initial et c'est le champ résultant qui est comparé au champ primaire. Les paramètres généralement mesurés sont :

- le déphasage des champs résultant et primaire ;
- le rapport de l'intensité des champs en pour cent ;
- le "dip angle" ou "tilt" qui est l'angle d'inclinaison du champ résultant.

MISE EN OEUVRE

Les dispositifs de mesure et les appareillages sont multiples. Les plus fréquemment employés sont le Max Min II d'APÉX à émetteur et récepteur mobiles (EM-RE) et travaillant à très basses fréquences (222 à 3555 Hz) et le VLF EM 16 de GEONICS, à émetteur fixe dont les fréquences sont 15000 à 25000 Hz.

Le Max-Min II (EM.RE)

Deux opérateurs sont nécessaires pour l'exécution des mesures, l'un portant l'émetteur et l'autre le récepteur, les deux étant reliés par un câble dont la longueur est liée à la profondeur du corps cherché. On mesure avec cet appareillage les rapports des composantes en phase et en quadrature des champs résultant et primaire. Les courbes obtenues ont une forme symétrique (planche 5 B).

L'e.m. 16 (VLF)

Un seul opérateur est nécessaire puisque l'émetteur (station radio de guidage des sous marins) est à l'infini. On mesure avec cet appareil le même paramètre qu'avec le Max Min, mais les courbes obtenues ont une allure en S (planche 5 A).

On peut également mesurer la résistivité apparente en adoptant un appareillage complémentaire, l'ensemble devenant l'E M 16 R. Des manoeuvres supplémentaires sont nécessaires car il faut poser une ligne tellurique.

AVANTAGES

Ces méthodes sont relativement légères et rapides (pas de confection de prises de terre, sauf pour l'EM 16 R).

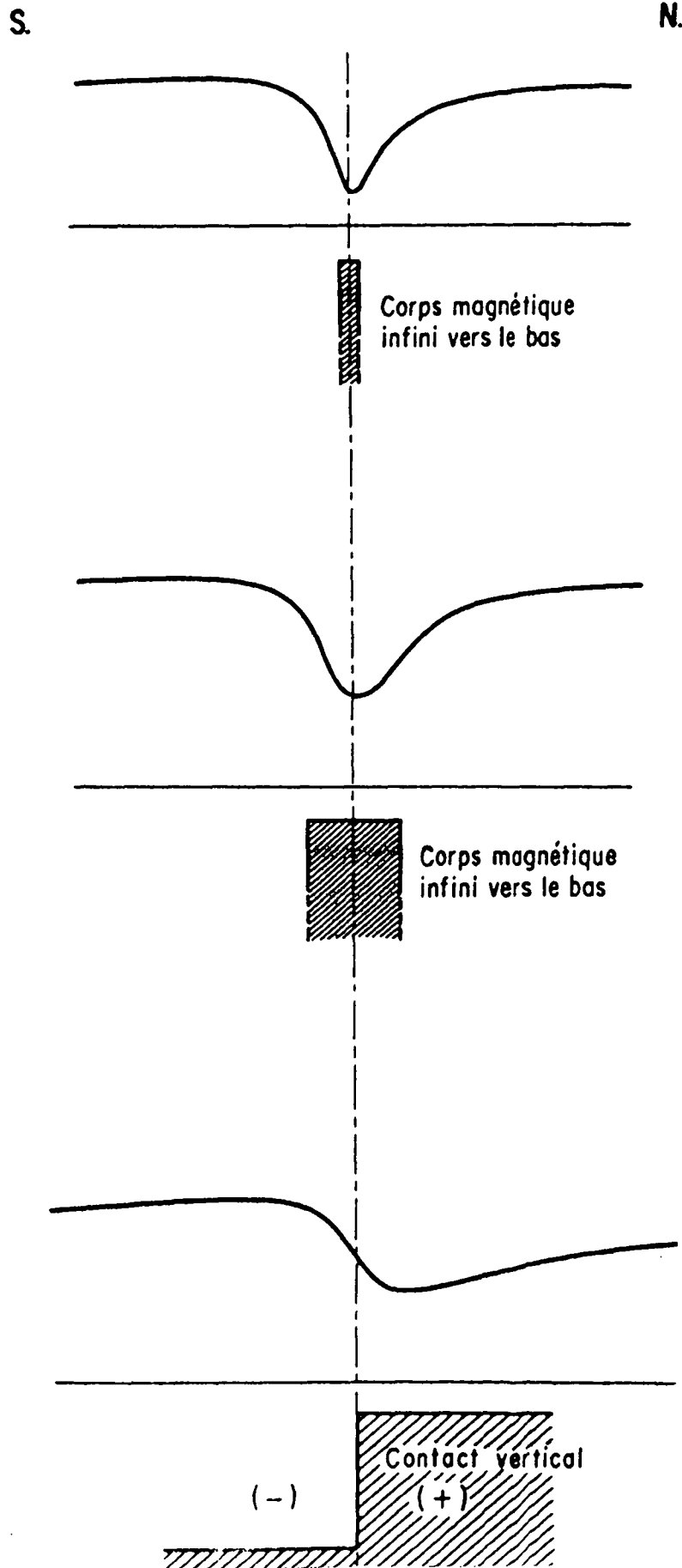
INCONVENIENTS

La profondeur d'investigation, fonction de la fréquence et de la résistivité reste faible par rapport à celle des méthodes électriques classiques et l'existence de couches conductrices en surface est un véritable masque pour les conducteurs inférieurs.

Dans le cas du VLF, les profils ne peuvent être réalisés que dans la direction perpendiculaire à celle de l'émetteur (ce qui limite les prospections aux accidents situés dans sa direction) ; le VLF est en outre tributaire du fonctionnement de l'émetteur, sujet à des interruptions imprévisibles de l'émission, et impose des contraintes horaires d'utilisation.

L'interprétation quantitative est aléatoire car les contrastes de résistivité sont généralement faibles. Les corps doivent être relativement étroits.

ANOMALIES MAGNÉTIQUES DE STRUCTURE A DEUX DIMENSIONS A 10° DE LATITUDE MAGNÉTIQUE



2.1.5. LA METHODE MAGNETIQUE (Pl. 6)

La reconnaissance de sites fracturés par prospection magnétique est d'un très grand intérêt lorsque celles-ci sont injectées par des roches à susceptibilité magnétique élevée telles que la dolérite et les roches basiques en général.

PRINCIPE

On mesure à l'aide d'un magnétomètre à protons le champ magnétique total. La valeur du champ est exprimée en gammas. L'utilisation de cette méthode dans le type de prospection qui nous intéresse est essentiellement qualitative.

MISE EN OEUVRE

La réalisation des mesures ne présente guère de difficultés et un opérateur seul ou aidé d'un manoeuvre suffit.

Les mesures, plus ou moins resserrées suivant la précision désirée peuvent être faites selon des profils de préférence perpendiculaires aux structures étudiées. L'ordre de grandeur des anomalies théoriquement négatives pour les pays de basse latitude peuvent nécessiter des précautions méthodologiques.

AVANTAGES

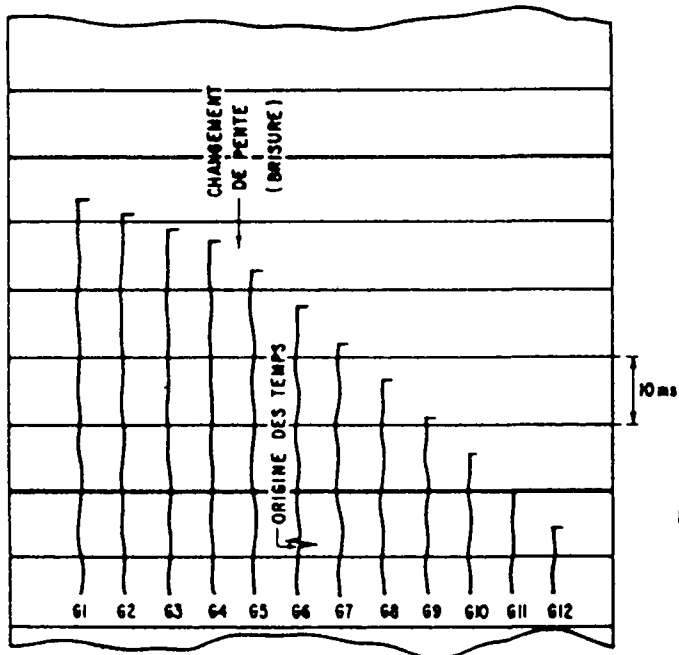
Cette méthode est rapide et légère donc peu coûteuse. Son interprétation qualitative est relativement simple (largeur du corps, pendage . . .). Elle est très efficace pour la mise en évidence de corps magnétiques (roches basiques etc...) et par conséquent des zones fissurées qui les encaissent.

INCONVENIENTS

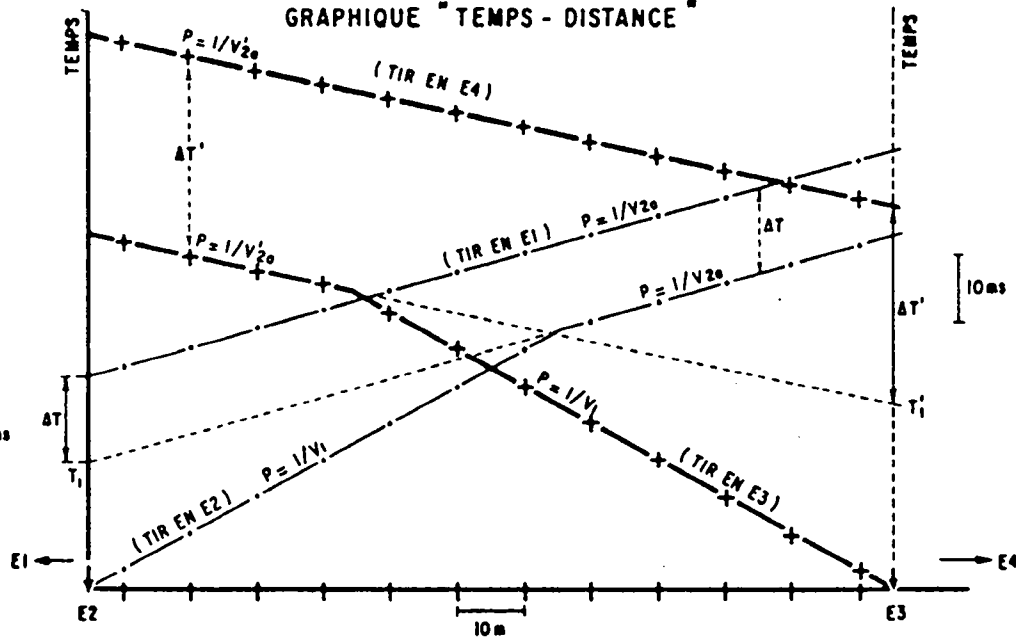
Cette méthode ne découvre en principe que des fractures injectées de roches basiques. Elle peut donc ignorer toutes les autres, non injectées, et peut être intéressantes. Elle ne peut donc généralement pas être utilisée seule.

Une interprétation quantitative est possible mais délicate : l'allure des anomalies varie en particulier selon la direction de la structure étudiée par rapport au Nord magnétique, les meilleurs résultats étant obtenus sur des structures Est-Ouest.

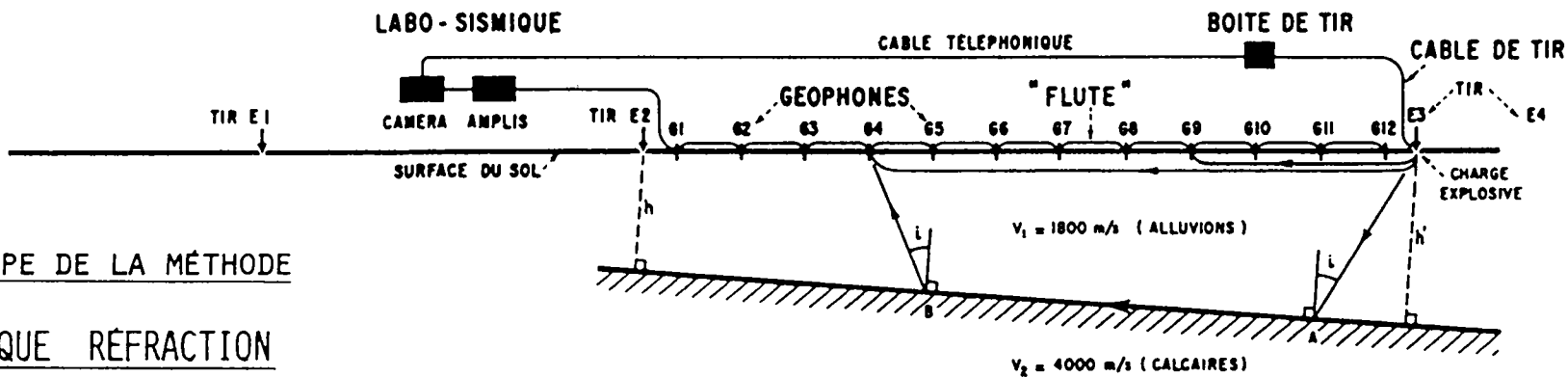
SISMOGRAMME
(OBTENU AU TIR E3)



DROMOCHRONIQUES
GRAPHIQUE "TEMPS - DISTANCE"



COUPE DES TERRAINS



PRINCIPE DE LA METHODE

SISMIQUE REFRACTION

$$i = \text{arc sin } \frac{V_1}{V_2}$$

$$V_2 = \frac{V_1}{\text{arc sin } \frac{V_1}{V_{2a}} + \text{arc sin } \frac{V_1}{V_{2a}}}$$

$$h = \frac{T_1 \cdot V_1}{2 \cos \text{arc sin } \frac{V_1}{V_2}}$$

2.1.6. LA SISMIQUE REFRACTION

PRINCIPE

La sismique réfraction consiste à étudier la propagation dans le sous-sol des ondes élastiques provoquées par des charges d'explosif enterrées à faible profondeur.

L'étude du temps de propagation des ondes circulant à la partie supérieure des couches de terrain de plus en plus compactes et donc de plus en plus "rapides sismiquement" permet de connaître l'épaisseur des terrains altérés, donc la profondeur du socle, et théoriquement, dans des structures simples, de séparer les formations sèches des aquifères.

MISE EN OEUVRE (Pl. 7)

Les arrivées d'énergie transportée par les ondes sismiques sont détectées par des géophones (ou sismographes) régulièrement espacés sur une ligne appelée "base". L'écartement des sismographes est fonction de la profondeur de la structure recherchée. Cette énergie est transformée par le géophone en courant électrique alternatif, lui-même amplifié et enregistré photographiquement.

Le processus de mise en oeuvre est assez lourd, et pour des dispositifs relativement longs, il est nécessaire de disposer d'une source d'énergie puissante.

AVANTAGES

Dans les cas simples, on détermine avec une bonne précision les profondeurs du socle, et de la surface piézométrique. Dans des cas favorables, la méthode peut aider à la mise en évidence de zones fracturées à l'intérieur du socle.

INCONVENIENTS

Cette méthode présente cependant plusieurs inconvénients.

Elle n'est pas applicable partout. Il faut en effet que la succession des vitesses des couches soit croissante avec la profondeur.

La mise en oeuvre, assez lourde ne permet de faire que quelques centaines de mètres de profil par jour (300 à 500 m environ selon l'écartement des géophones).

Le dépouillement des films et l'interprétation des dromochroniques demandent du temps et du personnel compétent, surtout pour la recherche de fissures et fractures.

L'emploi d'explosifs est souvent difficile voire impossible mais d'autres sources d'énergie sont utilisables (chute de poids par exemple).

Le personnel doit être relativement nombreux.

2.17. LA MICROGRAVIMETRIE

PRINCIPE

Il s'agit par cette méthode de connaître s'il existe dans le sous-sol des excès ou des défauts de masse en relation avec la présence de corps denses (minerais par exemple), ou au contraire peu denses (sel, gypse, zones fracturées ou altérées décomprimées) ou même encore de vides francs artificiels ou naturels (carrières, karst).

MISE EN OEUVRE

On mesure donc sur le terrain la valeur g de l'accélération de la pesanteur à l'aide d'un appareillage appelé gravimètre. Ces mesures après un traitement relativement long, permettent de tracer des profils, ou des cartes de "l'anomalie de BOUGUER".

REMARQUE

Cette méthode à notre connaissance est très rarement employée en recherches d'eau. On peut toutefois envisager son emploi pour la mise en évidence de zones fracturées donc de densité plus faible que le socle sain, ou bien de petits bassins d'altérites.

AVANTAGES - INCONVENIENTS

Vis-à-vis du problème posé, cette méthode relativement sophistiquée présente surtout des inconvénients :

- les mesures au gravimètre doivent être faites avec beaucoup de minutie
- une topographie très précise en altimétrie doit être faite ;
- le traitement des mesures conduisant à l'anomalie de BOUGUER est relativement long ;
- toute interprétation quantitative est difficile sur le terrain, en l'absence d'autres données (géophysiques ou forage). Toutefois, l'utilisation d'abaques bilogarithmiques permet d'obtenir sur place un dégrossissage dans le cas de structures simples.

2.2. ENSEIGNEMENTS TIRES DE 450 FORAGES IMPLANTÉS PAR GÉOPHYSIQUE

2.2.1. Cadre de l'analyse

2.2.1.1. Ci-dessous sont présentés quelques résultats qui illustrent la capacité des méthodes géophysiques à mettre en évidence des structures aquifères dans le socle cristallin.

Avant de détailler ces résultats rappelons, au préalable, que les profils géophysiques sont très généralement implantés sur des sites sélectionnés après examen des photos aériennes et levé géologique sur le terrain.

Le problème précis posé à la géophysique est alors :

1) de localiser sur le terrain avec précision le passage d'un linéament repéré sur photos aériennes, dont la largeur est fréquemment de l'ordre de quelques mètres à quelques dizaines de mètres ;

2) de fournir des indications sur les caractéristiques structurales de l'accident : largeur, pendage, épaisseur de recouvrement, fracturation du socle encaissant, présence éventuelle de roches filoniennes injectées dans l'accident ...

Ces éléments doivent permettre à la fois d'implanter au mieux un premier forage au sein de l'accident tectonique lui-même, puis, éventuellement en cas d'échec sur ce premier forage, d'être le mieux armé possible pour implanter un ou plusieurs autres forages sur le même accident ; les indications fournies par la géophysique rendent en effet beaucoup plus sûre l'extrapolation horizontale et verticale des renseignements géologiques obtenus sur le premier forage ;

3) signalons enfin que dans quelques cas très localisés (et relativement rares sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest) où l'examen des photos aériennes ne révèle pas de structures nettes, il peut être demandé aux études géophysiques de mettre en évidence des accidents tectoniques en réalisant "a priori" des séries de mesures dans plusieurs directions, ou sur plusieurs profils parallèles : le cas peut se présenter, par exemple, dans le nord du Sahel lorsque l'épaisseur du recouvrement dunaire est suffisamment forte pour masquer les linéaments structuraux.

2.2.1.2. L'analyse des données recueillies a porté sur :

- a) la comparaison entre les directions de linéaments repérées sur photos aériennes et celles trouvées par les mesures géophysiques ;
- b) la comparaison entre les structures des accidents tectoniques prévues par la géophysique (largeur, pendage, filons, cote du socle ...) et celles reconnues par les forages implantés sur ces accidents ;
- c) enfin, et cela reste finalement le point fondamental, un essai de corrélation entre les débits obtenus en forages, l'allure des anomalies géophysiques et le point précis d'implantation du forage sur l'anomalie.

Les deux premières comparaisons donnent des résultats positifs : cette constatation n'a rien de surprenant, et n'est certes pas nouvelle, dans la mesure où les anomalies enregistrées sur les profils géophysiques correspondent - une fois éliminés les "bruits" de surface - à des causes structurelles de mieux en mieux connues.

La troisième approche est beaucoup plus délicate et donne des résultats encore très partiels au stade de la présente étude : en effet si l'allure générale des anomalies les plus favorables, correspondant à des zones fracturées, commence à être assez bien connue - au moins pour les méthodes couramment employées jusqu'ici - la détermination de la meilleure position du forage sur l'anomalie est encore bien souvent problématique : l'étroitesse, le pendage et le colmatage partiel de certaines zones fracturées - qui peuvent entraîner un décalage entre le minimum de l'anomalie et la position optimale du forage - demeurent la cause de nombreux échecs en forage (1) ; la relation entre ces phénomènes et l'allure des anomalies géophysiques a été encore peu étudiée jusqu'à présent.

2.2.1.3. Les projets retenus pour l'analyse statistique sont ceux pour lesquels la documentation recueillie fournit les profils géophysiques, la position des forages sur les profils et les résultats des forages : projets n° 4, 5, 6, 7, 8, 11, 14, 16, 17, 19, 21, 33. Tous ces projets concernent les formations granitiques ou birrimiennes du socle cristallin.

En outre des illustrations de structures aquifères décelées par géophysique ont été tirées des projets 16, 27, 28, 29, 33, 36.

On doit noter que le projet 27 est le seul qui intéresse les formations gréseuses infracambriennes : il n'a pas de ce fait été inclus dans les statistiques avec les autres projets, mais certains résultats sont présentés à titre d'illustration.

(1) En règle générale on plante le forage pour qu'il recoupe la zone fracturée, présumée aquifère, à une profondeur de l'ordre de 10 à 20 mètres sous le niveau statique.

Le dépouillement des mesures et anomalies géophysiques et des caractéristiques des forages qui leur correspondent, est fourni dans des tableaux qui ne sont pas joints au présent rapport mais qui ont été remis au CIEH. Ces données concernent :

- 11 projets dans 5 pays différents (Haute-Volta, Cameroun, Niger, Togo, Côte d'Ivoire) ;
- 294 sites ;
- 459 forages dont 226 positifs (49 %) à 1 m³/h ;
- 296 trainés électriques ;
- 105 sondages électriques ;
- 45 profils électromagnétiques (Max Min) ;
- 8 profils VLF ;
- 9 bases sismiques ;
- 4 profils magnétiques ;

Une approche statistique n'a pu être tentée que pour la méthode électrique la plus employée jusqu'à présent. Les résultats des méthodes électromagnétiques encore peu nombreux, ont été analysés par comparaison avec les résultats des méthodes électriques.

2.2.2. Comparaison entre les directions de linéament repérées sur photos aériennes et celles trouvées par trainé électrique

Les directions de linéament - qu'il s'agisse des linéaments photos ou, surtout, des axes conducteurs mis en évidence par géophysique - sont rarement indiquées dans la documentation recueillie, si bien qu'il n'est pas possible de fournir une statistique générale.

A titre d'illustration, cependant, le tableau 5 ci-contre présente les résultats obtenus sur 80 sites dans trois projets différents suivis par les auteurs du présent rapport.

L'examen de ce tableau montre qu'à moins de 20 grades près la concordance est très bonne : 82 % dans les granites de Côte d'Ivoire et 100 % dans le cas des filons de dolérite intrusif dans les pélites cambriennes.

Ces observations appellent deux commentaires :

- les résultats meilleurs obtenus dans le cas des filons de dolérite, s'expliquent aisément par le fait que les filons que l'on rencontre dans le nord du Sahel se marquent très nettement sur la photo aérienne par des alignements de végétation verdoyante que l'on retrouve souvent à l'oeil sur le terrain.

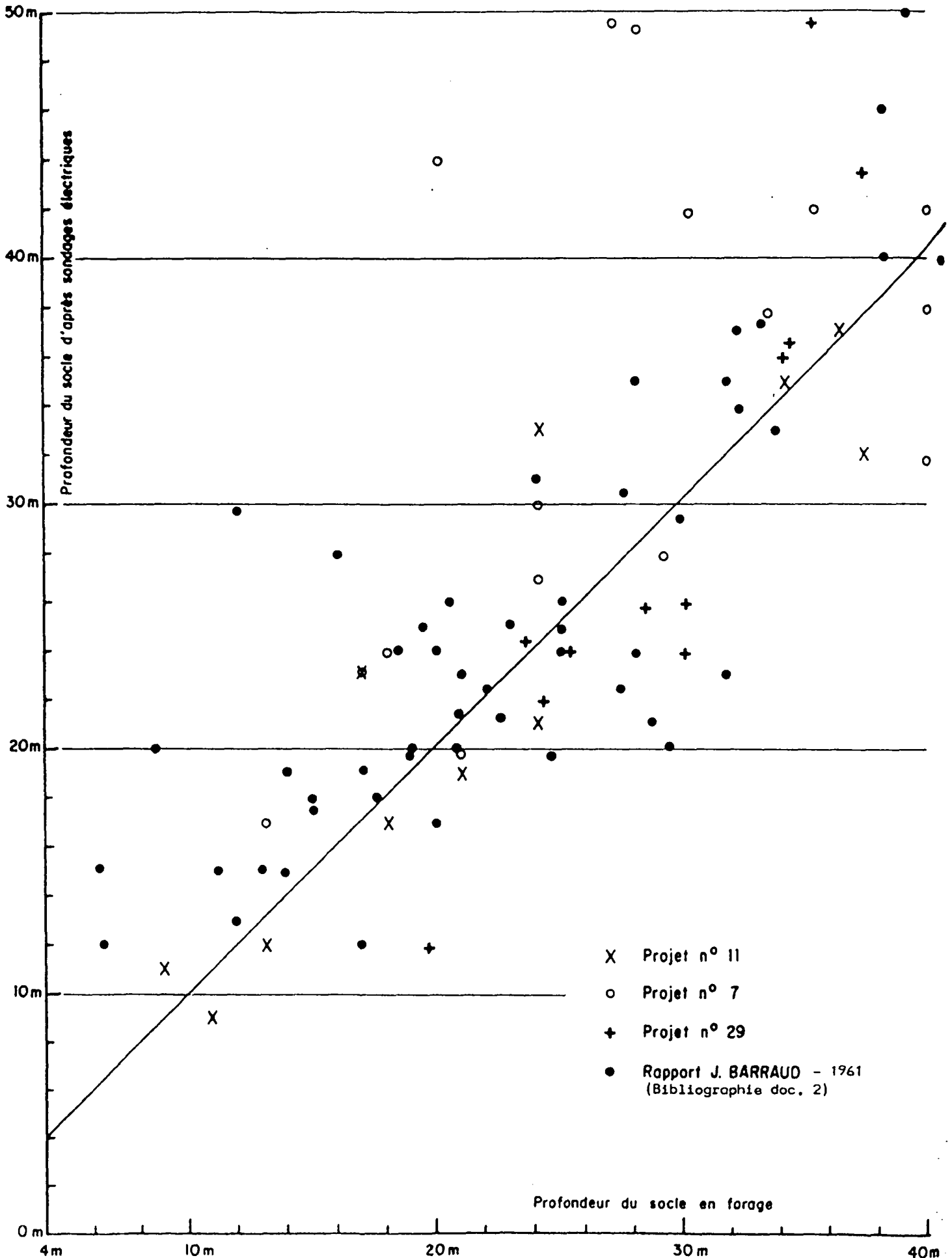
Les linéaments dans les granites sont souvent plus flous, en particulier dans les zones d'altérites épaisses que l'on cherche à capter ; des écarts de 20 grades n'ont donc rien d'étonnant dans la mesure où la "direction photo" intègre le linéament sur plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs km, alors que la direction trouvée en géophysique, qui concerne un segment du linéament de 20 à 50 mètres de long au maximum (distance entre deux profils de trainé électrique parallèles recoupant le linéament) peut être influencé par une distorsion locale (1).

(1) Il peut d'ailleurs arriver que des profils géophysiques très courts mettent en évidence une structure secondaire de direction nettement différente de celle du linéament principal recherché.

TABLEAU 5
COMPARAISON ENTRE LES DIRECTIONS DE LINEAMENTS
VUES EN PHOTO INTERPRETATION ET CELLES DES ANOMALIES
TROUVEES PAR PROFILS GEOPHYSIQUES

Pays Projet	Région	Roche	Méthode géophysique	Nb total de cas	Concordance linéament/géophysique			
					< 5 gr	5 à 10 gr	10 - 20 gr	Non concord.
Nord Côte d'Ivoire (Projet 33)	Séguélo	granite	électrique	44	10	11	15	8
	Odienné	granite et gneiss	électrique	11	3	6	0	2
			TOTAL	55	13	17	15	10
					23,5	31	27,5	18
				%	54,5 %			
					82 %			
Mauritanie (Projet 36)	Timbédra	Dolérite dans Pélite	électrique	15	10	3	2	0
Mali (Projet 28)	Nara	Dolérite dans Pélite	magnétique	10	10		0	0
			TOTAL	25	23		2	0
				%	92 %		8 %	0
					100 %			

CORRELATION ENTRE PROFONDEUR DU SOCLE SAIN EN SONDAGES ELECTRIQUES ET EN FORAGES



2.23. Profondeur du socle granitique sain en sondages électriques et en forages.

Dans les granites, l'existence de grandes épaisseurs d'altération est généralement liée à la fracturation du socle sous jacent et constitue donc indirectement un indice essentiel de succès en forage.

La détection des zones à fortes épaisseurs d'altération est fréquemment effectuée par sondages électriques.

Une corrélation entre les épaisseurs d'altération (ou "profondeur du socle") déduites des sondages électriques et celles trouvées par forages dans 90 cas issus de projets différents est fournie sur la planche 8.

On note un assez bon regroupement des points autour d'une droite dont la pente est voisine de 45° , ce qui indique une bonne corrélation.

La dispersion des points autour de la droite reste généralement inférieure à 5 mètres, mais peut atteindre exceptionnellement 10 mètres et plus.

On peut conclure de l'examen de ce graphique que :

a) les sondages électriques permettent de déterminer statistiquement avec une bonne précision, la profondeur du socle granitique ;

b) ponctuellement des écarts importants peuvent être obtenus.

Ces écart peuvent résulter :

- soit de difficultés d'interprétation des sondages électriques, en l'absence de tout étalonnage ;

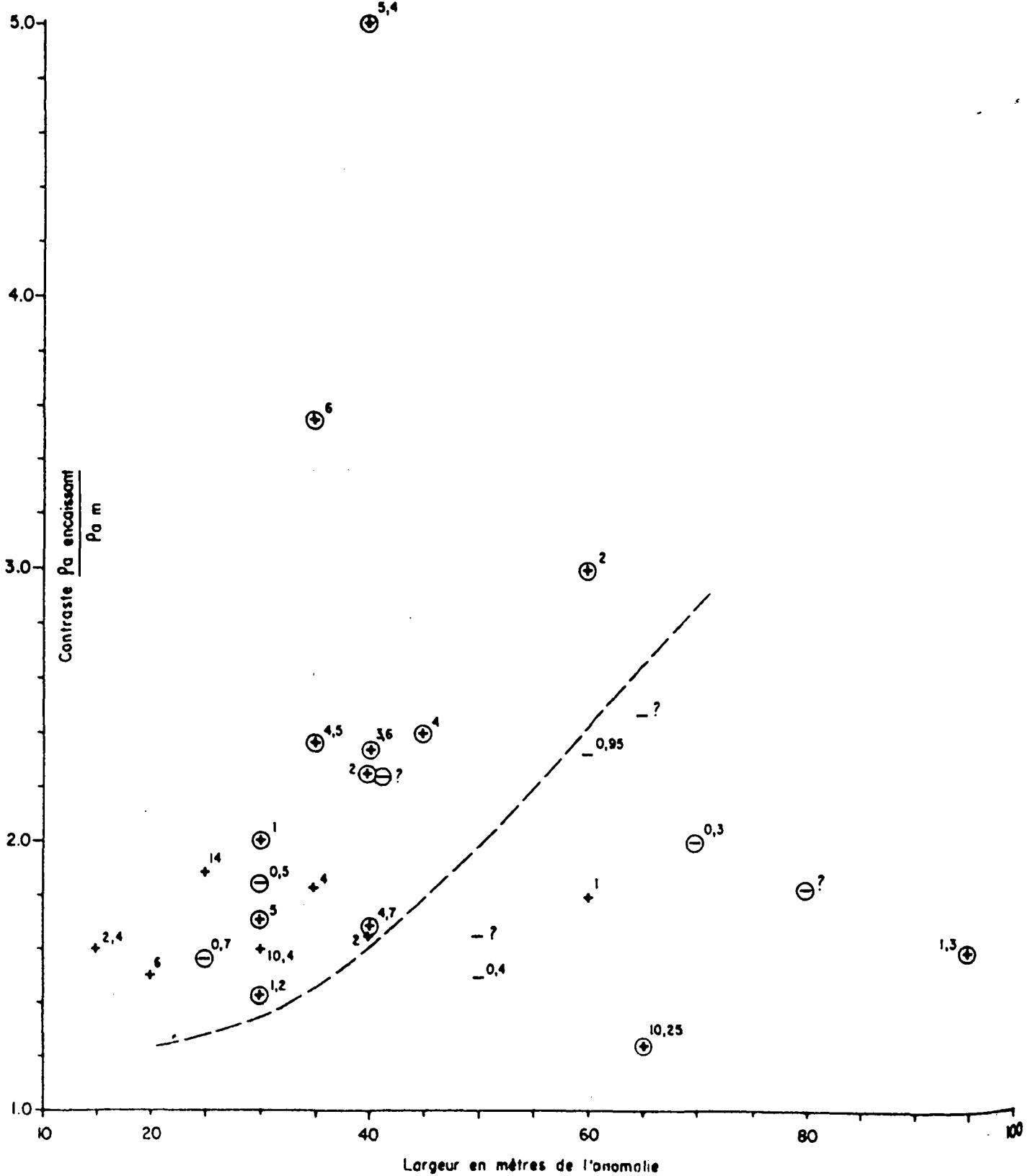
- soit de différences d'interprétation dans la définition du "socle" par le géophysicien et par le foreur.

On a remarqué par exemple dans le projet 33 que les sondages exécutés à la tarière Calweld, c'est-à-dire avec une technique permettant de forer seulement dans l'altération, sont généralement arrêtés dans l'arène granitique grenue déjà consolidée, si bien que le "socle" indiqué par la tarière Calweld se rencontre généralement quelques mètres avant la profondeur du socle déduite des sondages électriques, et plusieurs mètres avant le "socle" trouvé en forage au marteau.

TRAINÉ ELECTRIQUE
 INFLUENCE COMPAREE DE LA LARGEUR D'ANOMALIE
 ET DU CONTRASTE DE RESISTIVITE
 SUR LA REUSSITE DES FORAGES

—

+ ou - forages dans les granites
 ⊕ ou ⊖ forages dans les gneiss
 3 ————— production horaire en m³



2.2.4. Essai de corrélations entre l'allure des anomalies électriques et les débits de forage dans les terrains de socle cristallin (granite et gneiss)

Parmi l'ensemble des trainés électriques suivis de forages recueillis dans la documentation, 96 seulement sont susceptibles d'une analyse statistique ; les autres, qui présentent des lacunes dans les données (données de forages absentes, distances AB et MN inconnues, position de forage incertaine sur le profil), ont été éliminées.

Les 96 trainés retenus pour l'analyse statistique présentent malheureusement des caractéristiques variées au plan :

- de la géologie : (granites, gneiss, roches vertes, schistes) ;
- du type d'anomalies : (anomalies conductrices, palier conducteur, contact, anomalies résistantes) ;
- des dimensions du dispositif de mesure : (AB variant de 120 à 300 m et MN variant de 10 à 100 m.

De ce fait il a été nécessaire de scinder la population de 96 cas en des sous groupes homogènes plus réduits, par longueurs de AB et MN comparables, puis par types de roches, enfin par types d'anomalies. Chaque sous groupe homogène ne contient plus alors qu'une dizaine de cas sur lesquels on ne peut faire qu'une approche qualitative. Signalons enfin que la quasi totalité des forages ont été implantés au minimum de l'anomalie et qu'il n'a donc pas été possible d'étudier le facteur "position du forage sur l'anomalie".

Les caractères des anomalies pris en considération sont :

- la largeur (distance entre points d'inflexion de l'anomalie)
- la résistivité apparente du minimum (ρ_{am})
- le contraste de résistivité (rapport de la valeur du ρ_a encaissant sur ρ_{am}).

2.2.4.1. Corrélation contraste/largeur

Sur le graphique de la planche 9 sont reportés en abscisse la largeur de l'anomalie exprimée en mètres et en ordonnée le contraste ρ encaissant/ ρ_{am} .

Chaque point qui correspond à un forage, réalisé sur le minimum de l'anomalie est affecté du signe + pour les positifs (1) et du signe - pour les forages négatifs -

(1) Les forages + ont un débit ≥ 1 m³/h.

Ce graphique englobe des forages réalisés dans du granite et dans des gneiss. Il est possible en outre que soient mélangés sur ce graphique des forages dont la production est liée à des fractures étroites, à des zones d'altération relativement homogènes (faible contraste avec anomalie large, et effet de "nappe" possible) ou à des poches d'altération peu épaisses sur un socle assez tourmenté (contraste faible, anomalie étroite).

Malgré l'erreur que l'on peut commettre de ce fait, il semble ressortir de cette analyse que la majorité des forages positifs sont situés au-dessus de la courbe tracée. Ceci revient à admettre que pour des contrastes de 1,5 à 2,5, les anomalies relativement étroites (inférieures ou égales à 40 mètres) paraissent préférables.

L'augmentation de la largeur de l'anomalie devrait, pour être favorable, s'accompagner d'un accroissement du contraste.

2.2.4.2. Corrélation contraste/minimum de résistivité

En introduisant la valeur du minimum de résistivité apparente dans la comparaison débit/contraste, on replace l'anomalie dans son contexte électrique.

Aucun des essais réalisés n'a fait apparaître de corrélation nette ; il semble seulement que les forages positifs se situent plutôt dans une fourchette de minimum allant de 50 à 120 Ω m,

En résumé, bien que chaque anomalie constitue un cas particulier lié à son contexte géologique propre, et que les données dont on dispose soient, en nombre trop réduit pour se prêter à une réelle analyse statistique, il semble ressortir de cette étude que dans les granites et gneiss, des anomalies de largeur inférieure à une cinquantaine de mètres, de contraste supérieur à 1,5, avec un minimum de résistivité compris entre 50 et 120 ohms représentent les sites les plus favorables.

2.2.5. Comparaison des méthodes électriques et électromagnétiques

2.2.5.1. Les 45 profils électromagnétiques dont nous disposons ont été réalisés à l'aide d'un appareil "Max-Min" avec une distance émetteur-récepteur généralement égale à 50 mètres.

27 de ces profils ont été doublés par des profils électriques en AB 120 ou 200 et MN 40 : dans 24 cas sur 27, soit 89 % des cas, une anomalie électrique se superpose à l'anomalie électromagnétique.

Cette bonne corrélation est liée :

- au fait que ces deux méthodes sont sensibles au même paramètre physique (la résistivité des terrains) ;

- à la similitude de taille des dispositifs de mesure : les anomalies électromagnétiques (enregistrées avec une distance émetteur-récepteur de 50 m) et les anomalies électriques (mesurées avec une distance MN de 40 m) ayant de ce fait sensiblement la même largeur.

2.2.5.2. On doit cependant émettre plusieurs réserves sur la similitude apparente de réponse entre ces deux méthodes :

a) les sites étudiés par les deux méthodes se répartissent en :

- . 18 forages sur schistes avec une profondeur du socle de 35 mètres en moyenne, ce qui peut être considéré comme une épaisseur d'altération habituelle dans ce type de formation en Afrique de l'Ouest.

12 forages sur 18 sont positifs, ce qui représente un taux de réussite de 66 %. Mais il faut noter que ce taux est très couramment obtenu, sans géophysique, dans les schistes birrimiens : ce résultat ne paraît donc pas significatif.

- . 9 forages sur granites, avec un socle peu profond (15 m en moyenne - sauf 2 cas > à 40 m et qui ont été prospectés en AB 300 et MN 100).

6 forages sur 9 sont positifs, soit un taux de réussite de 66 %, probablement meilleur que celui qui aurait pu être obtenu sans géophysique.

On ne peut, bien entendu, tirer de conclusions très générales de ces échantillons réduits, mais on doit signaler qu'ils correspondent à des épaisseurs d'altération "moyennes" sur schistes et plutôt "faibles" sur granites.

b) Dans le cas d'étude de structures relativement profondes (30 à 60 m), la corrélation entre les réponses des deux méthodes serait certainement beaucoup moins bonne :

Les tests méthodologiques effectués dans le cadre de la présente étude ont montré que la "profondeur d'investigation" des méthodes électromagnétiques est limitée à environ une trentaine de mètres pour une distance émetteur-récepteur de l'ordre de 100 mètres, ces méthodes restant très sensibles aux phénomènes superficiels.

Pour gagner sur la profondeur d'investigation on devrait augmenter la distance émetteur-récepteur, mais la définition des structures fracturées recherchées, dont la largeur réelle est souvent de quelques mètres seulement, est alors très médiocre.

Au contraire, la méthode du trainé électrique permet d'avoir à la fois une bonne profondeur d'investigation (en augmentant la distance AB jusqu'à 200 ou 300 mètres, ou plus) et une bonne définition des anomalies (en réduisant la distance MN et le pas de mesure à 5 ou 10 m).

Une structure conductrice verticale de 10 m de large "vue" par la méthode électrique en AB 200, MN 10 et pas de 10, ou par la méthode électromagnétique en E-R = 100, donnera donc lieu à des anomalies d'allure assez différentes.

2.2.6. Réponse des autres méthodes

2.2.6.1. Méthode VLF

Nous ne disposons, dans la documentation recueillie, que de sept profils VLF, réalisés en zone granitique sahélienne à faible épaisseur d'altération (région de Zinder au Niger, projet 14). Cinq de ces profils sont doublés d'un profil électrique.

8 forages ont été réalisés : ils sont tous implantés, conformément à la théorie, sur une intersection de la courbe VLF avec l'axe des abscisses, point qui coïncide, sur les 5 profils de résistivité correspondants, avec un "creux" d'anomalies conductrices.

2 de ces forages seulement sont positifs et 6 sont négatifs, soit un taux de réussite de 25 %, tout à fait analogue à celui auquel on peut s'attendre - sans géophysique - sur des granites à altérites dénoyées.

Sans prétendre tirer d'enseignements généraux de cet exemple, on doit constater que :

a) la corrélation entre "anomalies" VLF et anomalies électriques est bonne dans les cinq cas présentés qui se rapportent à de faibles épaisseurs de recouvrement.

On sait toutefois que cette méthode a une profondeur d'investigation d'autant plus faible que la fréquence est plus élevée, et ceci d'autant plus que les terrains de surface sont plus conducteurs.

b) l'anomalie enregistrée n'est généralement pas directement liée à l'aquifère, mais à des phénomènes en relation ou non avec l'aquifère (tête de fracture argileuse, sur-épaisseur d'altération ou phénomène de surface).

- la position optimale du forage sur l'anomalie reste à définir

2.2.6.2. Méthode magnétique

Là encore, on ne dispose pas d'exemples homogènes en nombre suffisant pour pouvoir établir une statistique. Il est cependant possible de signaler deux cas d'utilisation de cette méthode :

a) elle a été utilisée, notamment par les projets 27 et 28 pour localiser des intrusions de dolérite sous forme de filons, de "sills" ou de massifs, au sein de grès infracambriens et de pélites cambriennes. Ces intrusions doléritiques, stériles dans la masse, sont très généralement aquifères le long de leurs épontes fracturées et leur localisation précise est un important facteur de réduction du taux d'échec en forage.

Dans tous les cas observés, les profils magnétiques ont permis de localiser les intrusions doléritiques sans ambiguïté et avec précision.

Quelques exemples sont fournis à titre d'illustration au § 2.4 (Pl. 13 et 14).

b) Des tests méthodologiques ont été réalisés au sein du projet PNUD(1) Togo 75/008 pour étudier la réaction de la méthode magnétique sur des zones fracturées - dépourvues de dolérite - dans des granito-gneiss.

Les résultats confirmeraient des observations antérieures concernant la réponse magnétique dans des "granites basiques", de petites anomalies de l'ordre de la dizaine de gammas pouvant se superposer aux anomalies électriques ; cette méthode très légère, a déjà par le passé été utilisée avec succès comme méthode d'appoint.

(1) Rapport encore inédit

2.2.6.3. Méthode sismique

Cette méthode est moins employée dans des études de ce genre compte tenu de sa lourdeur de mise en oeuvre ; on peut signaler cependant deux types d'utilisation signalés dans la documentation dépouillée.

a) en appui aux sondages et trainés électriques elle a été parfois utilisée avec de bons résultats pour rechercher des sur-épaisseurs d'altération, notamment dans les granites (projet n° 8) ;

b) sa mise en oeuvre pour la localisation de fractures dans le socle a été utilisée dans les grès infracambriens et pélites cambriennes au Mali (projet 27). Plus récemment des tests méthodologiques ont été réalisés au sein du projet PNUD Togo 75/008 : ces résultats sont encore inédits. Il semblerait cependant, selon les auteurs, que la méthode soit très prometteuse car elle permet d'étudier directement et avec précision, la fracturation du socle, c'est-à-dire le gîte aquifère, et non plus seulement l'altération qui lui est superposée.

2.2.6.4. Méthode gravimétrique

Nous la signalons ici pour mémoire, aucun des projets recensés n'ayant mis en oeuvre cette méthode ; toutefois les tests méthodologiques réalisés dans le cadre de la présente étude et exposés ci-après montrent que cette méthode pourrait probablement être développée utilement dans certains cas.

2.3. RESULTATS DES TESTS METHODOLOGIQUES EFFECTUES EN HAUTE-VOLTA

Les tests méthodologiques ont été effectués en Haute-Volta sur cinq structures aquifères réparties dans trois sites villageois (Pl. 10).

- le site de Yaoua-Mera regroupant les mesures effectuées dans les deux villages voisins de Yaoua et Mera ;
- le site de Gourcy ;
- le site de Rapadama regroupant les mesures effectuées sur les "plateformes" R 8 et R 2.

Le but de ces tests était de comparer la réaction de différentes méthodes géophysiques - et en particulier de méthodes encore peu employées en recherche d'eau - sur des structures aquifères simples, variées, déjà reconnues et circonscrites par des forages positifs et négatifs.

Les résultats que l'on peut attendre de tels tests sont bien entendu limités et avant tout qualitatifs dans la mesure où les travaux de terrain limités à 1 mois, sur un champ d'expérience restreint (3 sites sur le socle cristallin de Haute-Volta) ont été effectués "a posteriori" sur des forages existants.

Les résultats obtenus au cours de ces tests ne peuvent donc en aucune manière être comparés aux résultats fondamentaux qui ont été apportés à la longue :

a) par les projets à vocation méthodologique (projets n° 6, 16, 27, 33 ...) dont les résultats ont été obtenus sur une ou plusieurs campagnes de 10 mois et sur des champs d'expérience très variés ;

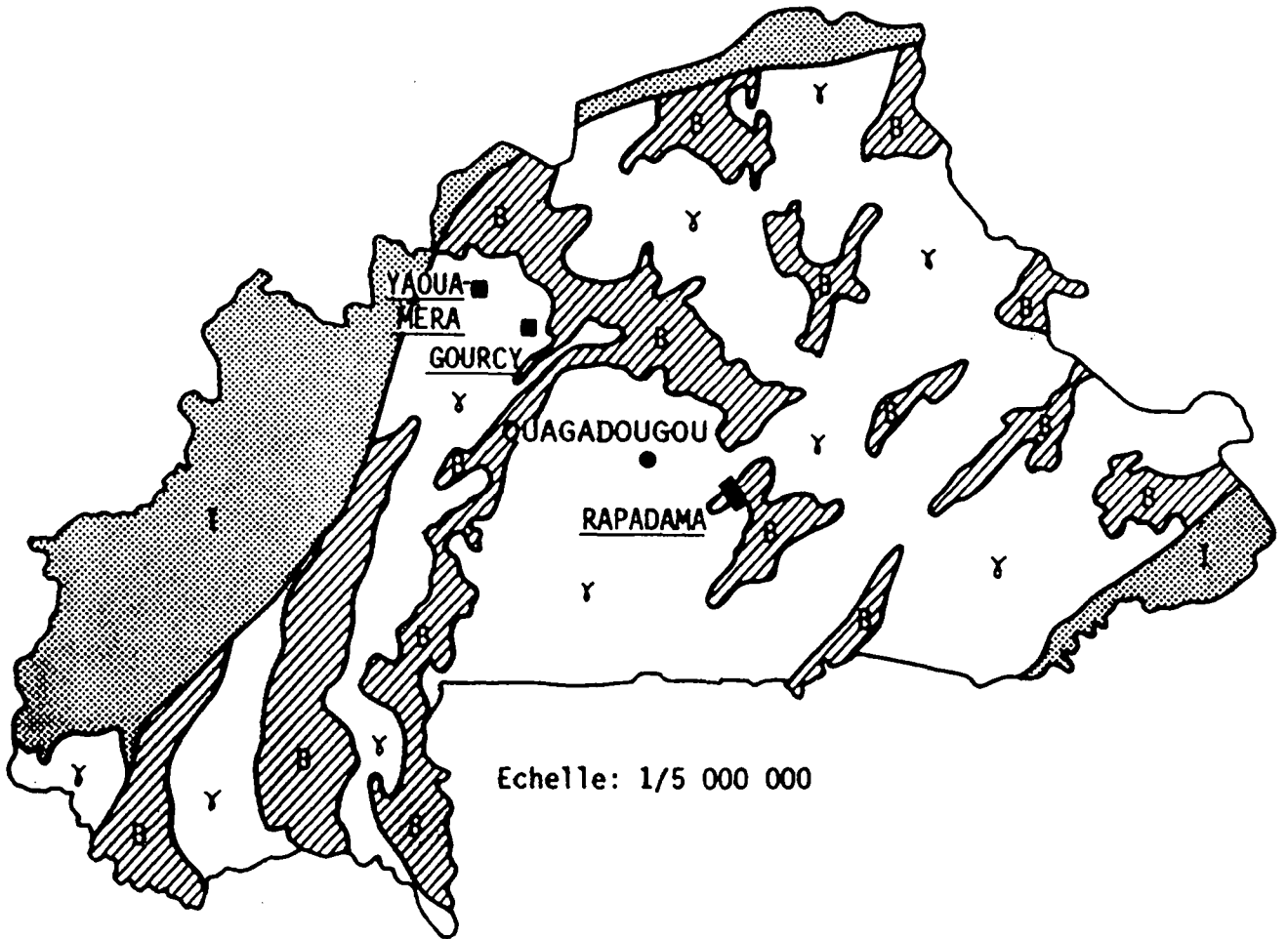
b) par l'ensemble des projets ayant mis en oeuvre de la géophysique depuis plus de 20 ans en Afrique de l'Ouest, et dont les résultats concernent plusieurs centaines de mois de prospection (géophysique et forages).

Le détail des objectifs visés, des mesures effectuées et de l'analyse des résultats pour chacun des sites est fourni en Annexe au présent rapport.

Un résumé succinct est présenté ci-après.

TESTS EN HAUTE VOLTA

PLAN DE SITUATION



Echelle: 1/5 000 000

LÉGENDE

- GOURCY ■ Site ayant fait l'objet d'un test
- Grès et schistes infracambriens
- ▨ Birrimien
- ⌘ Granites

2.3.1. Site de Yaoua-Mera (planches 27 à 32 en annexe)

2.3.1.1. Les forages existants avaient été réalisés sans géophysique sur simple interprétation des photos aériennes.

Le socle granitique affleure çà et là dans la partie nord du site.

Les forages YF 1 et MF 2 implantés dans le secteur où le socle est subaffleurant sont secs, bien que situés à proximité de linéaments.

Les forages YFO et YF2 positifs sont situés dans une zone de forte épaisseur d'altération (42 m) noyée sur 7 mètres à la base, et à proximité de linéaments probables. Les venues d'eau se sont produites dans le socle à moins de 10 mètres sous la base de l'altération.

Le forage MF 3 négatif est situé dans une zone où l'épaisseur d'altération, bien qu'encore importante (32 m), est dénoyée.

2.3.1.2. Les profils nord-sud recoupant la grande structure d'enfoncement du socle granitique vers le sud confirment cette structure, notamment : pl. 28)

- les profils de sondages électriques ;
- les profils magnétiques ;
- le profil gravimétrique ;
- le profil sismique.

L'interprétation du profil gravimétrique, et sa comparaison avec les autres profils, permet de supposer l'existence dans le socle sain d'une structure inclinée moins dense (zone broyée ?)

Au sein de cette structure générale, les trainés électriques, cartes de résistivité et sondages pludirectionnels, et de façon moins nette les profils électromagnétiques ont mis en évidence une direction privilégiée de moindre résistivité 110° Est, sur laquelle un forage est conseillé au SE 12.

Sur le profil P3 l'allure du trainé électrique laisse penser à la présence d'un filon résistant (dû à une roche basique d'après le profil magnétique) penté vers le sud, que l'on pourrait atteindre par forage à 70 m au sud ouest du MF3 (sec). (Pl. 31).

Les valeurs de résistivité moyennes apparentes issues des sondages pludirectionnels confirment les résultats des sondages électriques.

Les terrains sont globalement plus résistants au droit des forages stériles.

A noter pour finir que la direction majeure d'anisotropie 110° E confirmée par la carte de résistivité apparente en profils P 7 à P 9 ne semble pas correspondre avec la direction majeure des linéaments photos (70° E). (Pl. 27)

2.3.2. Site de Gourcy (Planches 33 à 35 en Annexe)

2.3.2.1. La structure du site est celle d'un môle granitique dans des schistes birrimiens.

Tous les forages avaient été implantés par géophysique :

- G 101 (campagne CGG 1974) sur une zone conductrice à 50 m;
- les 3 autres par IWACO (1981/82) : SG 3 (positif) et SG 2 (négatif) dans deux grandes zones conductrices (60 Ω m), et SG 4 (négatif) sur une zone plus résistante.

2.3.2.2. La géophysique réalisée au titre de la présente étude a été implantée sans tenir compte de ces études géophysiques antérieures.

L'orientation Est-Ouest des 5 profils réalisés a été choisie pour recouper, en passant par les forages existants, un grand accident Nord Sud vu sur photo satellite d'une part, et les linéaments majeurs de direction Sud Ouest - Nord Est d'autre part.

Cette dernière direction de linéament (45° Est) correspond à l'une des directions d'anisotropie mise en évidence par les sondages pluridirectionnels.

Par contre la direction du linéament satellite ne se retrouve pas sur les profils ni sur les sondages pluridirectionnels réalisés. Tout au plus peut-on remarquer sur la carte de résistivité apparente que ce linéament est tangent à la limite Est du môle granitique.

Les forages SG 3 - SG 6 (positifs) sont situés au creux d'anomalies conductrices sur les profils électriques et électromagnétiques (visible sur les 4 fréquences), qui confirment les structures trouvées par les profils antérieurs d'IWACO.

- le forage SG 2 (sec à 60 m) situé dans les mêmes conditions géophysiques est peut être insuffisamment profond ;

- le forage SG 4 (0,4 m³/h) aurait probablement été mieux situé à 60 (ou 100) mètres plus à l'est ;

- le forage G 101 (positif) est situé sur un palier de résistivité à 50 Ω m, ce qui semble être une situation généralement favorable dans les schistes birrimiens.

2.3.3. Site de RAPADAMA (planches 36 à 39, en Annexe)

2.3.3.1. "Plateforme" R8

Le granite est subaffleurant sur l'ensemble du site.

Les anciens profils électriques (CGG 1977) montrent de très fortes résistivités (800 à 1000 Ω m en moyenne) avec quelques rares points en dessous de 400 Ω m sur lesquels il n'y a pas eu de forages.

Curieusement les 3 forages situés au Nord du site et dont les résultats diffèrent (SR 11 : 2 m³/h, SR 35 : 0,4 m³/h, SR 10 : sec) sont situés sur les anciens profils sur des anomalies électriques équivalentes avec un minimum à 500 - 600 Ω m dans un fond résistant à 1000 - 1500 Ω m.

Les profils électriques réalisés dans le cadre des présents tests ont retrouvé l'allure des profils antérieurs.

Par ailleurs sur les profils 3, 4, 5 : on note une très bonne corrélation entre les profils électriques parallèles situés à 30 m les uns des autres, ainsi qu'une bonne corrélation avec les profils VLF et magnétique.

Les meilleurs emplacements de forage sur ces profils seraient sur le profil P3 par exemple, à 75 m au Nord Ouest du SR 11 ou à 50 m au Sud Est du SR 11.

- le forage SR 40 est bien situé sur le profil VLF ;

- on retrouve enfin, sur les sondages pluridirectionnels effectués sur les forages positifs (SR 11 et SR 40) une direction d'anisotropie (40° E environ) conforme à l'une des deux directions générales de linéaments.

Cette direction ne se retrouve pas au SR 10 négatif.

2.3.3.2. "Plateforme" R 2

Très proche de Rapadama R 8, le site de Rapadama R 2 est cependant très différent : il s'agit en effet d'un site sur roches vertes sur lequel on disposait de 3 forages dont 1 seul positif implantés après géophysique (profils électriques IWACO).

Les profils électriques réalisés dans le cadre de la présente étude sont assez plats et apportent peu d'information sur la structure aquifère.

On doit noter que d'après les sondages pluridirectionnelles et les profils de résistivité il apparaît préférable d'implanter le forage sur un "résistant" à $100 \Omega \text{ m}$ que sur un conducteur à $50 \Omega \text{ m}$.

2.3.4. Conclusions : enseignements apportés par les résultats des tests

De l'ensemble des résultats obtenus sur les 3 sites de tests, et qui sont présentés ci-dessus, on peut tirer plusieurs enseignements.

2.3.4.1. Méthodes "classiques"

Les tests ont confirmé à titre d'étalonnage, l'intérêt des méthodes "classiques" pour étudier les structures aquifères et notamment :

- a) les sondages électriques, les bases sismiques pour déterminer la profondeur du socle sain dans les granites (Yaoua-Mera) ;
- b) la méthode électrique (trainés, sondages, cartes de résistivité) pour localiser :
 - des axes conducteurs liés à la fracturation du socle (Yaoua, Mera, Gourcy) ;
 - des contacts géologiques (par exemple contact schistes/ granite à Gourcy).

2.3.4.2. Méthodes "nouvelles"

Les tests ont apporté des indications sur les performances de plusieurs méthodes "nouvelles" en recherche d'eau :

a) méthode électrique pluridirectionnelle

Les sondages électriques pluridirectionnels ont donné des résultats cohérents avec ceux des sondages électriques et ceux des cartes de résistivité effectuées sur les mêmes points.

Les directions d'anisotropie mises en évidence par les sondages pluridirectionnels ne correspondent pas toujours aux directions de linéaments photos, notamment dans le cas des granites à forte épaisseur d'altération (Yaoua-Mera) ;

b) méthode électromagnétique EM-RE

Cette méthode montre des anomalies ponctuelles que l'on retrouve la plupart du temps sur les trainés électriques (Yaoua SE 12, Mera PT2 et PT3, Gourcy).

Elle ne permet cependant pas d'étudier des structures profondes (enfouissement du socle à Yaoua et Mera). En effet, les anomalies les plus nettes s'observent pour les fréquences les plus élevées (3555 Hz et 1777 Hz) et s'atténuent rapidement quand la fréquence diminue.

c) méthode électromagnétique VLF

Testée sur un site à faible épaisseur d'altération (RAPADAMA R8), elle donne des anomalies nettes se corrélant bien avec les anomalies électriques. (EM 16 R ou trainé classique).

On sait par ailleurs que sa profondeur de pénétration reste faible et que son utilisation est soumise à des contraintes particulières (voir 2.1.4.) ;

d) méthode magnétique

Elle donne des résultats qualitatifs intéressants :

une illustration est fournie par les profils de Yaoua, Mera, Rapadama R8, (profil P3), tous situés, au demeurant, dans les granites : on constate que dans ces trois cas les zones à faible épaisseur d'altération se marquent par de faibles valeurs du champ magnétique, alors que les zones à forte épaisseur d'altération se marquent par des valeurs plus fortes du champ magnétique. ;

e) méthode gravimétrique

Elle a été employée sur le site de Yaoua.

Le profil gravimétrique montre nettement la structure d'enfoncement du socle indiquée par plusieurs autres méthodes ; il permet en outre de préciser la structure profonde, qui a pu ainsi être modélisée sous forme d'une zone broyée "en coin" inclinée vers le sud (en utilisant les cotes du socle, connues aux forages, comme points de calage).

2.4. PRESENTATION DE "CAS TYPES"

Le présent sous-chapitre est une illustration de cas réels de reconnaissances de structures aquifères discontinues par des études géophysiques suivies de forages.

Les exemples présentés ont été extraits de différents projets, ou fournis par des auteurs auxquels il est fait référence dans le titre de chaque planche.

La plupart de ces exemples très "parlants" ont été soigneusement sélectionnés parmi ceux pour lesquels on disposait de plusieurs forages positifs et négatifs, localisés en différents points d'un même profil.

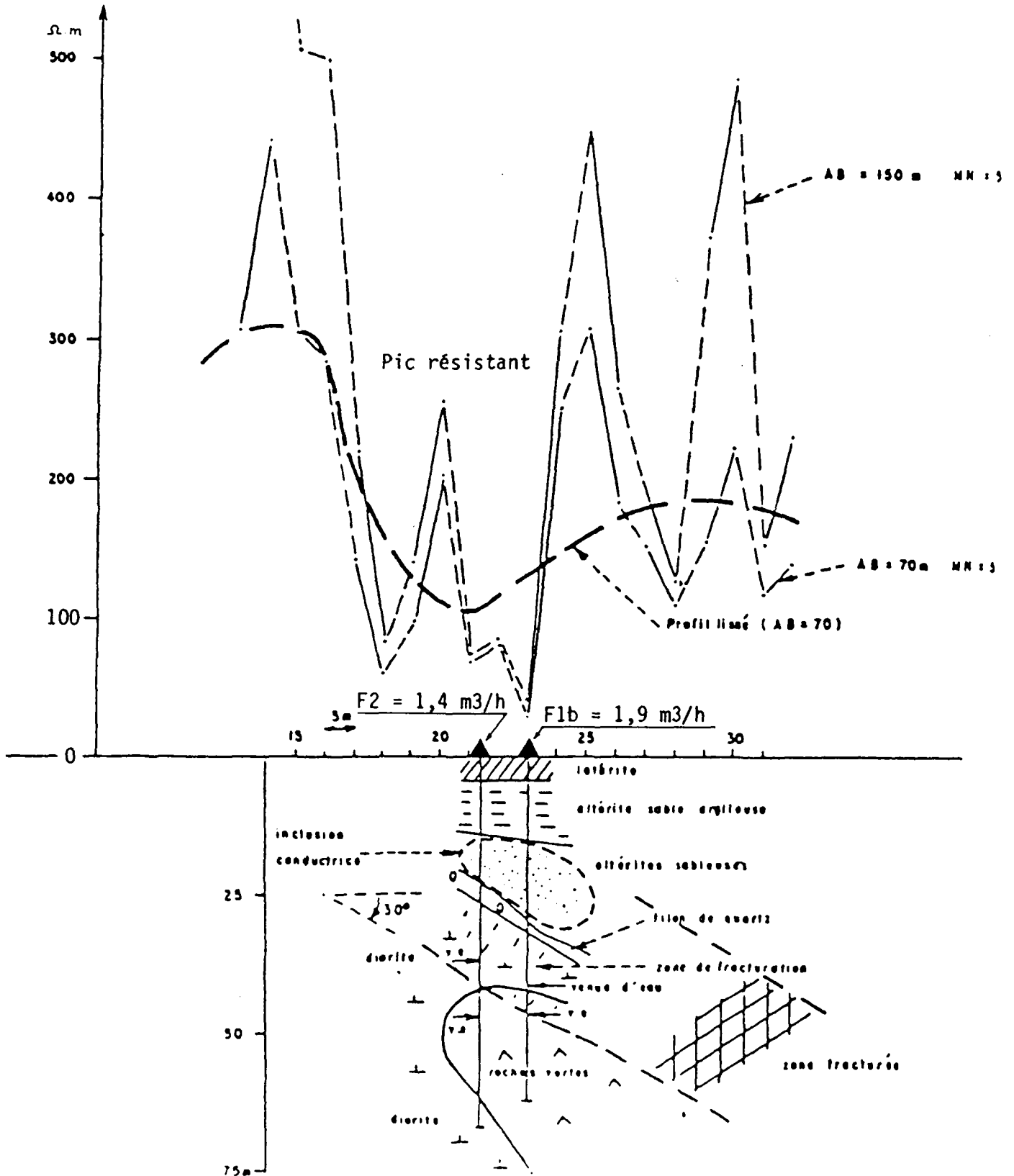
La présentation synthétique de chaque cas type sur une planche unique montrant les profils, coupes, débits et structures présumées, ainsi que les commentaires explicatifs, ont été conçus dans le souci :

- de montrer la "difficulté" des problèmes posés par les aquifères de fracture ;

- de faire apparaitre la logique qui a présidé à leur prospection à l'aide de la géophysique ;

- de souligner l'intérêt du dialogue à tous les stades, entre le géophysicien et l'hydrogéologue.

335. LOKOLA (P1)



PROFILS ELECTRIQUES EN DOUBLE LONGUEUR DE LIGNE
(ETUDE DU PENDAGE DES FRACTURES)

C.I.E.H		ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES	
Extrait: PROJET COTON 1980		BURGEAP-RENADET / CGG DCH COTE D'IVOIRE	

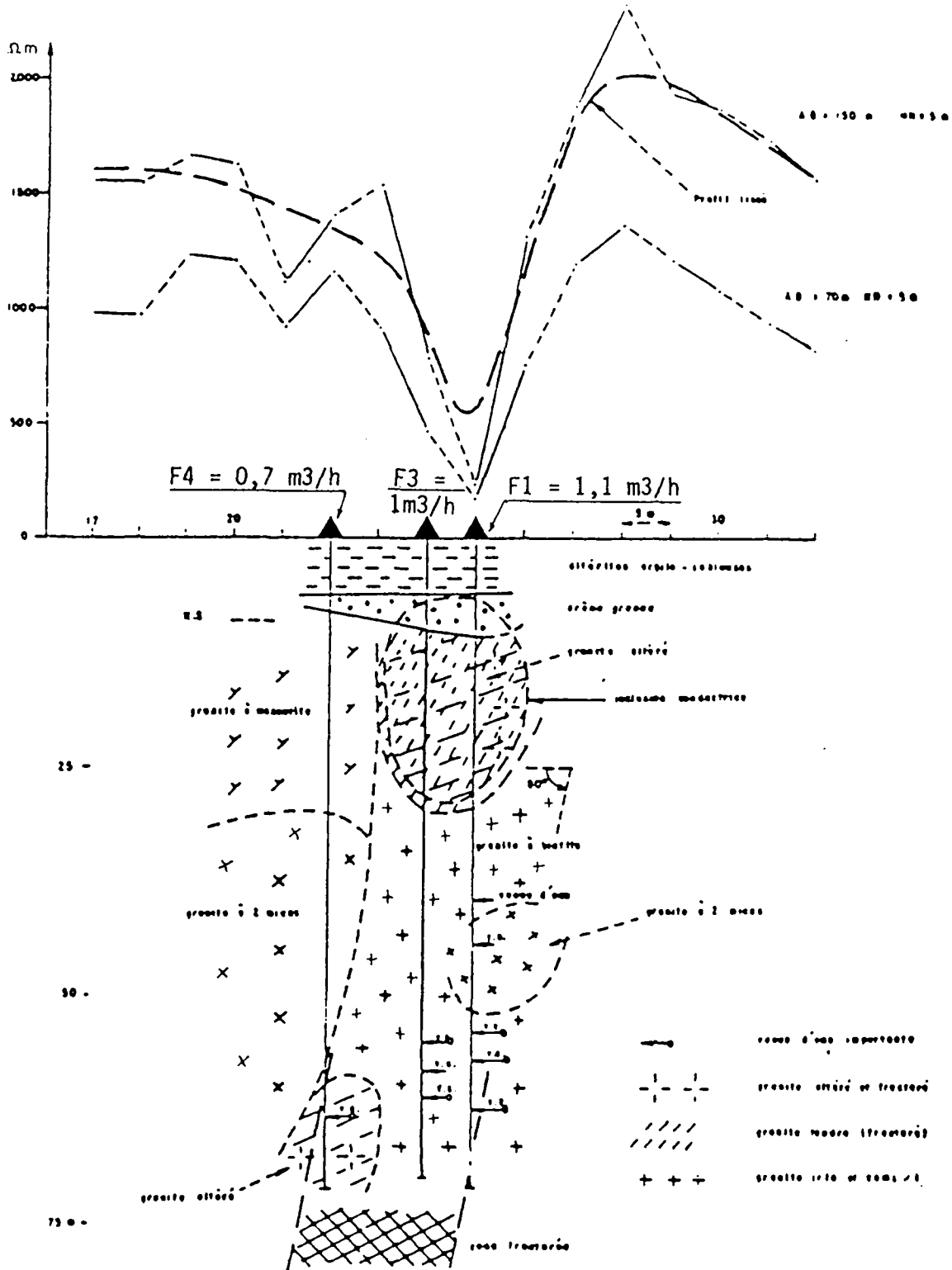
PLANCHE 11
LOKOLA (Côte d'Ivoire) - DIORITE ET ROCHES VERTES
ETUDE DU PENDAGE DES FRACTURES PAR PROFILS ELECTRIQUES
EN DOUBLE LONGUEUR DE LIGNE

Les profils de résistivité en deux longueurs de ligne, extrêmement comparables, montrent une anomalie conductrice complexe d'environ 35 m de largeur.

Le faible pendage de la zone fracturée par rapport à l'horizontale peut être pressenti par le fait que la dissymétrie est analogue pour les 2 longueurs de ligne (70 et 150 m) utilisées. Le profil lissé souligne cette dissymétrie.

Le pendage a été confirmé par les forages. Le petit pic résistant au milieu de l'anomalie est peut être dû à la présence du filon de quartz.

254 BAMASSAPLA (P2)



PROFILS ELECTRIQUES EN DOUBLE LONGUEUR DE LIGNE
(ETUDE DU PENDAGE DES FRACTURES)

C.I.E.H		ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES	
Extrait: PROJET COTON 1980		BURGEAP-RENADET / CGG DCH COTE D'IVOIRE	

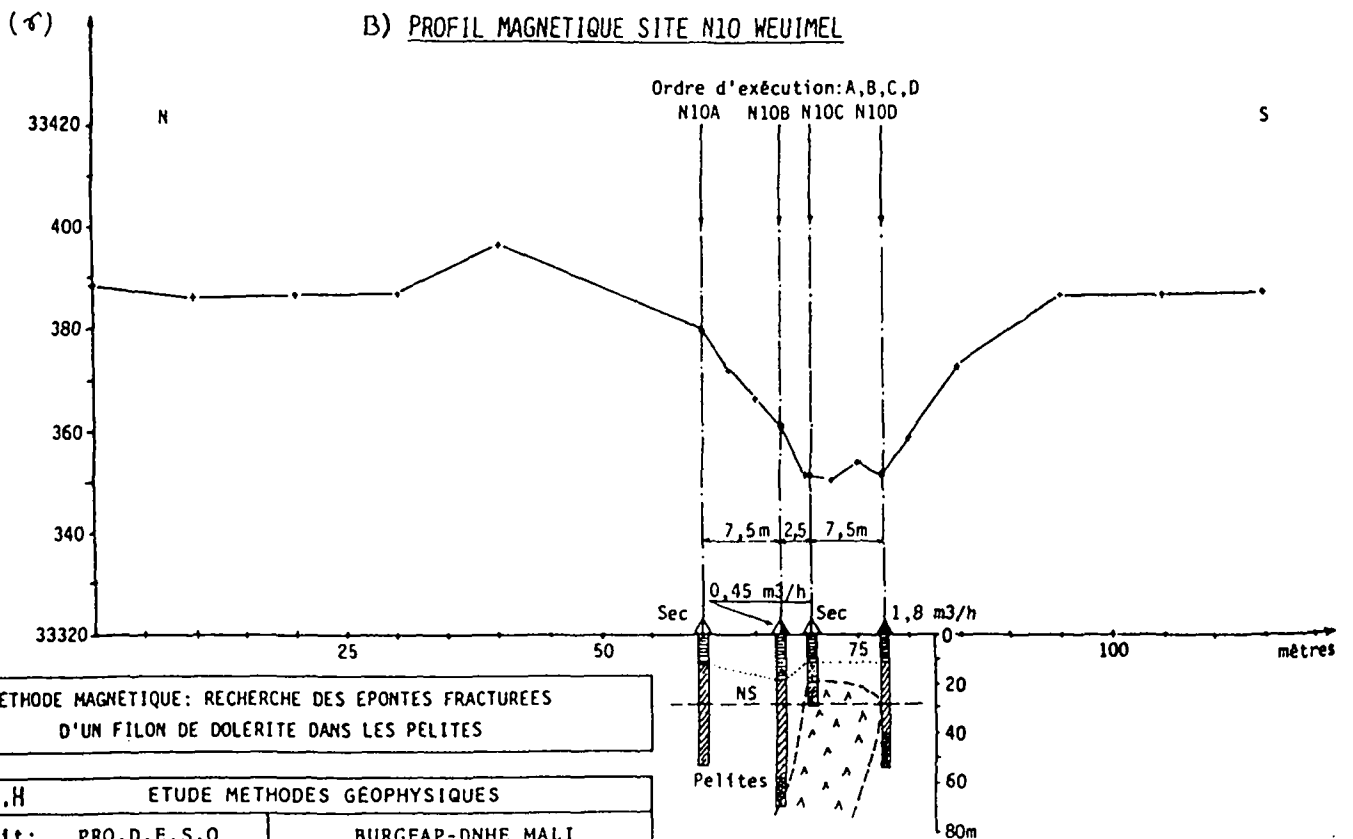
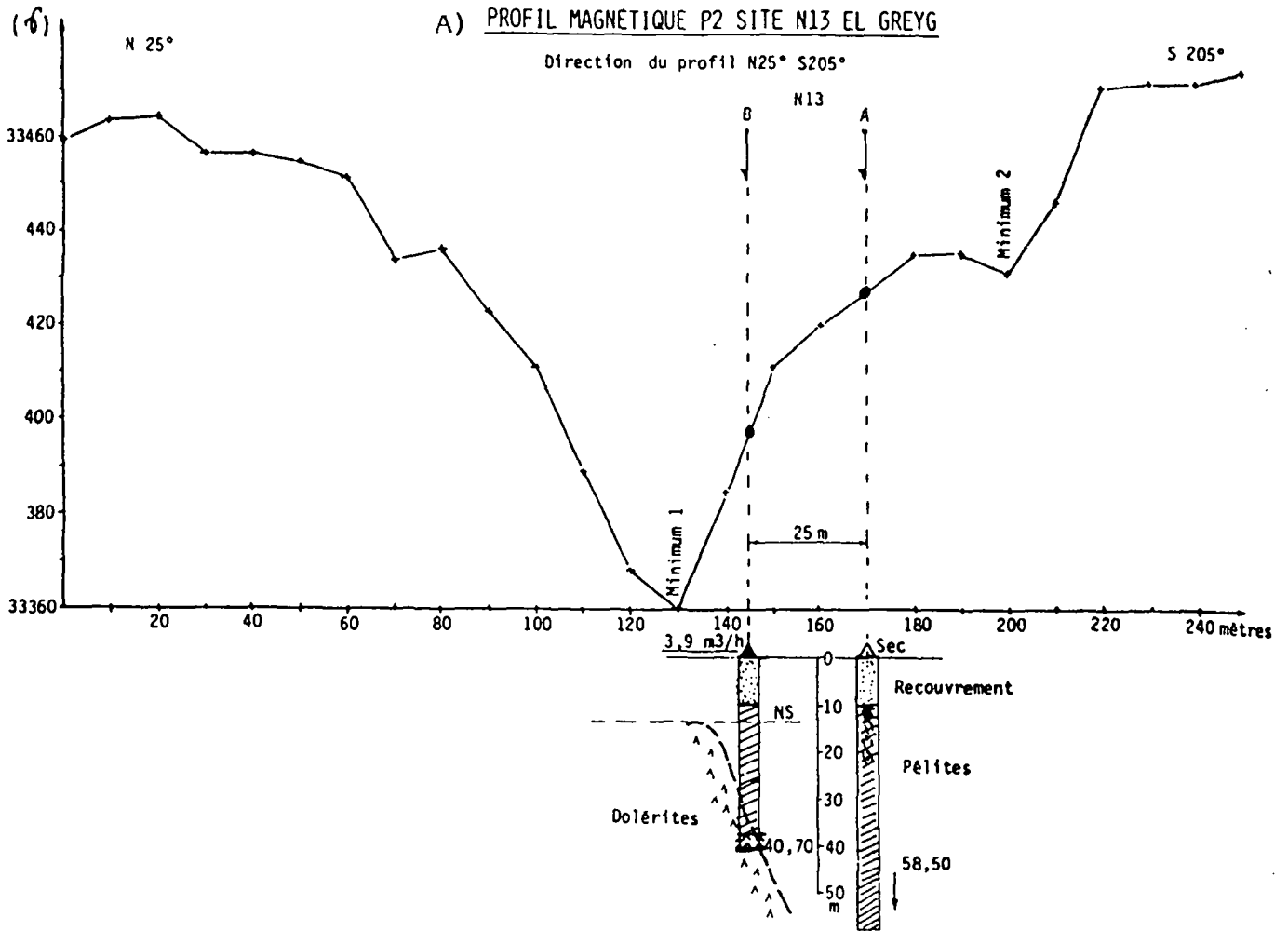
PLANCHE 12BAMASSAPLA (Côte d'Ivoire) - GRANITEETUDE DU PENDAGE DES FRACTURES PAR PROFILS ELECTRIQUESEN DOUBLE LONGUEUR DE LIGNE

Les profils électriques montrent une anomalie conductrice à $200 \Omega m$ de 15 à 20 m de large dans un résistif supérieur à $1000 \Omega m$.

Le profil en AB 70 est symétrique. En plus grande longueur de ligne (AB 150) apparaît une dissymétrie qui permet de supposer un très fort pendage sur l'horizontale.

Les forages retrouvent bien une zone fracturée et des venues d'eau plus profondes dans le sens du pendage.

Les coupes géologiques laissent penser que cette zone fracturée correspond à un contact entre du granite à 2 micas et du granite à biotite.



REGION DE NARA EST (Mali)
RECHERCHE DES EPONTES DE FILONS DE DOLERITE INTRUSIFS
DANS LES PELITES CAMBRIENNES (METHODE MAGNETIQUE)
(Pl. 13 et 14)

Ces trois exemples illustrent la facilité d'emploi de la méthode magnétique pour le repérage des contacts fracturés entre la pélite et la dolérite qui l'a injectée. Rappelons que la largeur de ces épontes fracturées, seules zones aquifères, dépasse rarement 2 mètres.

PLANCHE 13A (EL. GREYG)

Le profil magnétique a été réalisé en travers d'un linéament dont la direction a été confirmée ensuite par un 2ème profil parallèle.

Le premier forage (A) a été implanté entre le minimum 1 et le minimum 2 dans l'espoir de trouver une zone bien fissurée entre deux filons de dolérite. Le forage étant resté sec dans la pélite à 58 m 50 a été déplacé de 25 m vers le minimum le plus marqué où il s'est révélé positif (3,9 m³/h) au contact pélite/dolérite entre 32 et 40 m.

PLANCHE 13B (WEUMEL)

Le profil magnétique a été réalisé en travers d'un linéament dont la direction a été confirmée ensuite par un 2ème profil parallèle.

Le premier forage effectué trop loin du minimum de l'anomalie est resté sec dans la pélite à 50 mètres.

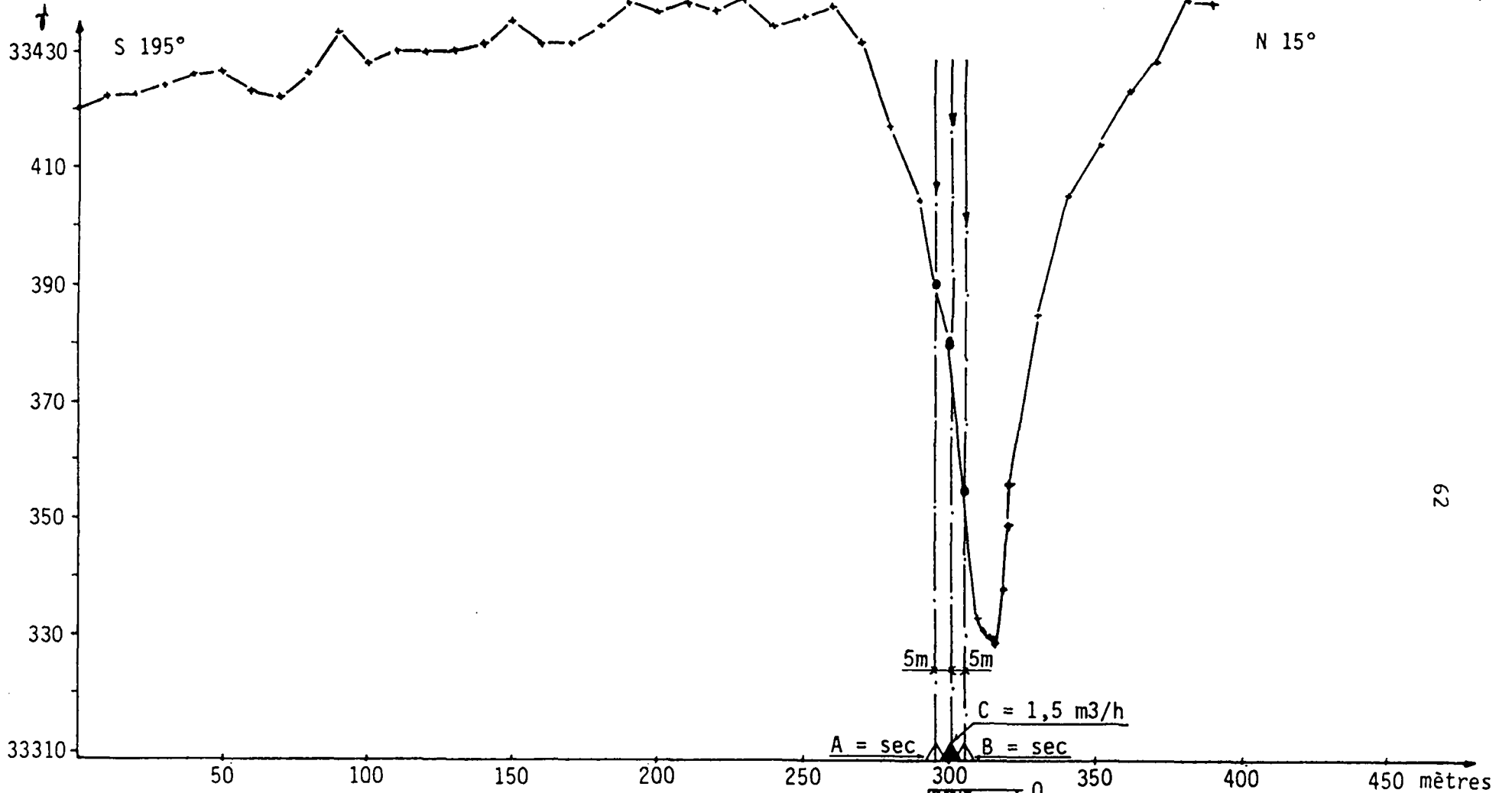
Le second forage, déplacé de 7 m 50 vers le minimum a trouvé le contact dolérite/pélite faiblement aquifère (0,45 m³/h) à 70 m.

Le troisième forage, à 2 m 50 du second, sur le minimum, a rencontré à 20 m de profondeur la tête dénoyée du filon de dolérite ; il a donc été arrêté volontairement dès 30 m.

Le quatrième forage enfin, implanté à 7 m 50 du troisième, et qui visait à rencontrer l'éponte sud du filon, a effectivement trouvé un débit de 1,8 m³/h dans la pélite fracturée.

La largeur présumée du filon d'après les forages est d'environ 7 m 50.

PROFIL MAGNÉTIQUE N°9 SITE N15 MBEURYEU



62

METHODE MAGNETIQUE: RECHERCHE DES EPONTES FRACTUREES
D'UN FILON DE DOLERITE DANS LES PELITES

C.I.E.H ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES

Extrait: PRO.D.E.S.O
KAYES N.-NARA E. 1981

BURGEAP-DNHE MALI
D.N ELEVAGE MALI

- Sables limoneux
- Cuirasse latéritique
- Argiles beige-brique
- Dolérite
- Pélites
- Pélites noires et vertes, fracturées

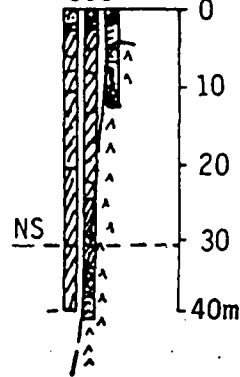


PLANCHE 14 (MBEURYEU)

En l'absence de tout linéament sur photos aériennes, 10 profils magnétiques ont été réalisés le long des pistes quittant le village dans plusieurs directions. Le dernier profil, représenté sur la planche 14 a finalement trouvé une très forte anomalie, sur laquelle les forages ont été implantés.

Ce dernier exemple illustre bien, dans ce contexte géologique spécial, l'intérêt tout particulier de la méthode magnétique, légère et efficace (1 jour $\frac{1}{2}$ d'opérateur dans ce cas particulièrement difficile). Les 3 forages distants de 5 m les uns des autres ont trouvé :

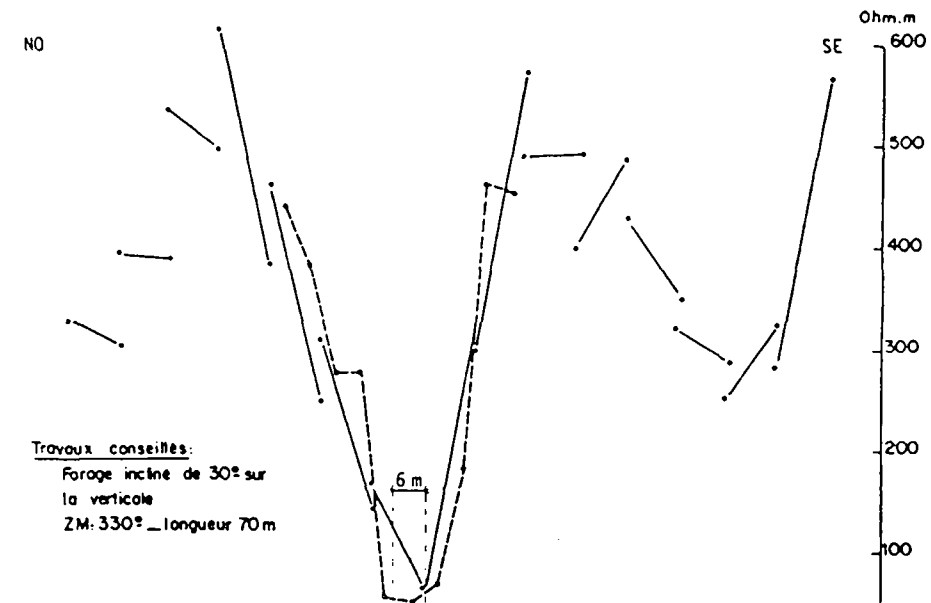
- le premier, de la péliste sèche jusqu'à 40 m ;
- le second, la dolérite saine (tête de filon) vers 10 m ;
- le troisième, entre les deux premiers a trouvé le contact aquifère vers 30 m (1,5 m³/h).

Le pendage présumé est de l'ordre de 80° sur l'horizontale.

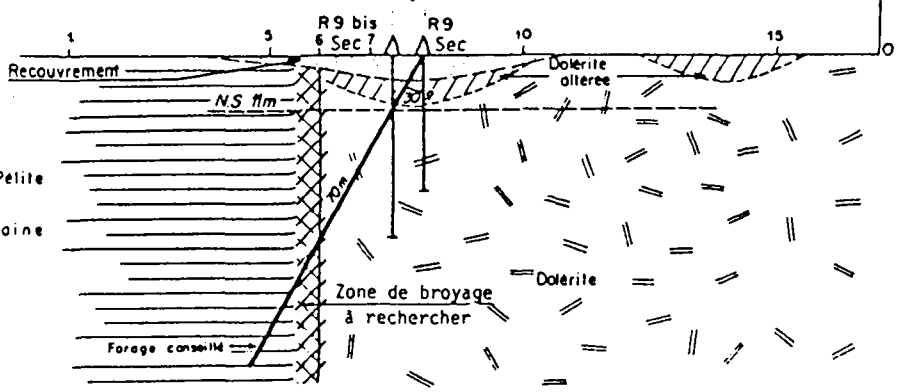
A) IMPLANTATION R.9

Extrait du profil P2

Echelle: 1/10 000



Travaux conseillés:
Forage incliné de 30° sur la verticale
ZM: 330° - longueur 70 m



METHODE ELECTRIQUE: RECHERCHE DES EPONTES FRACTUREES D'UN FILON DE DOLERITE DANS LES PELITES

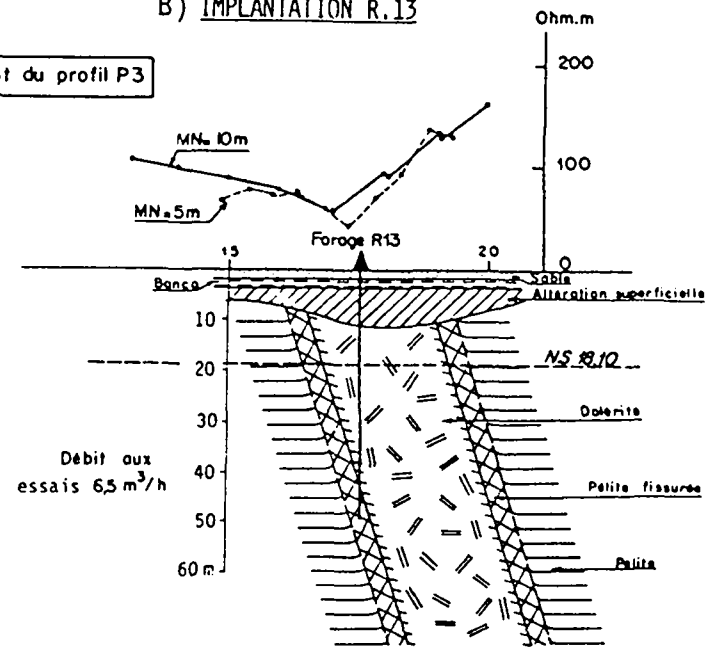
C.I.E.H ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES

Extrait: ROUTE KIFFA NEMA

BURGEAP-CGG 1974
MINIST. EQUIP. MAURITANIE

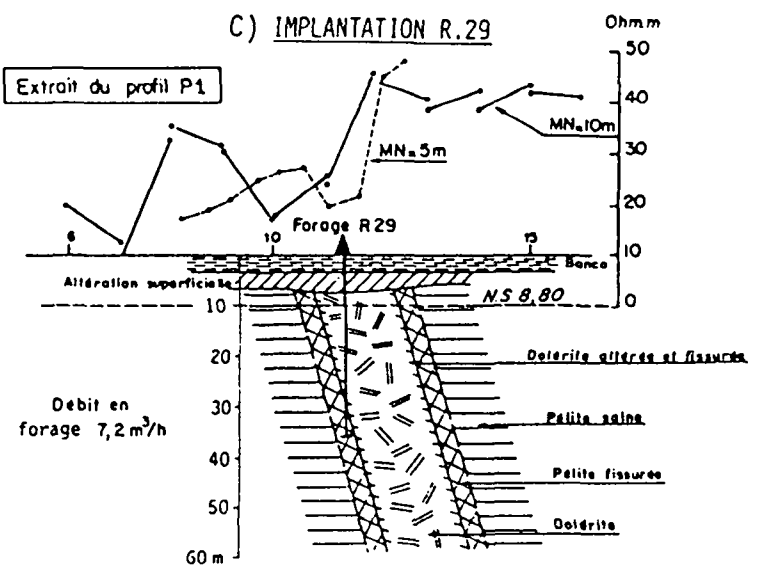
B) IMPLANTATION R.13

Extrait du profil P3



C) IMPLANTATION R.29

Extrait du profil P1



ROUTE KIFFA-NEMA (Mauritanie)RECHERCHE DES EPONTES DE FILONS DE DOLÉRITE INTRUSIFSDANS LES PELITES CAMBRIENNES, (METHODE ELECTRIQUE)

(Pl. 15 et 16)

PLANCHE 15A (SITE R 9)

Le profil électrique a été réalisé en travers d'un linéament important de direction 70° E très fortement marqué par une ligne d'arbres. Les pélites affleurent à une trentaine de mètres au nord du linéament.

Les deux sondages réalisés sur le minimum d'anomalie à 50 Ω m ont trouvé avant 10 m le toit altéré d'un massif de dolérite compact dans lequel ils sont restés secs jusqu'à 25 et 35 m.

Pour recouper la zone broyée présumée à 25 m environ sous le niveau statique, un forage incliné a été conseillé. Il n'a pas encore à notre connaissance été réalisé.

Actuellement une telle prospection serait certainement reprise à l'aide d'un magnétomètre.

PLANCHE 15 B et C (SITES R 13 et R 29)

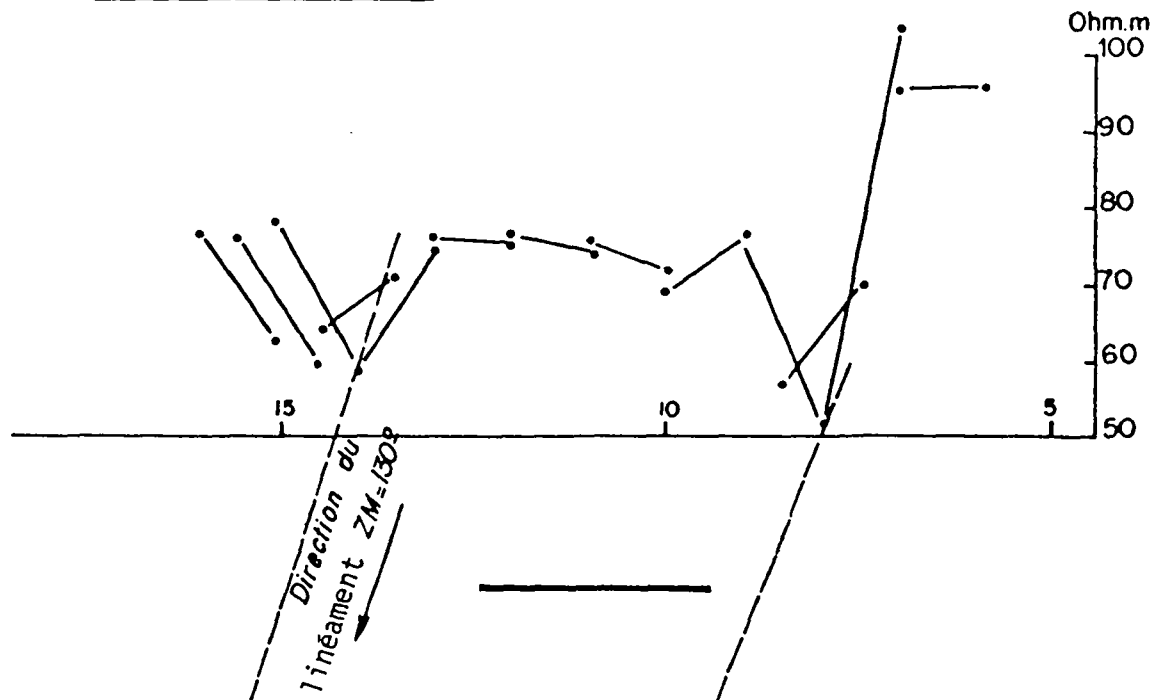
Les deux exemples présentés sur la planche 15 en B et C sont extrêmement voisins :

- l'anomalie conductrice correspond à la tête altérée du filon de dolérite (altération argileuse de la dolérite plus conductrice que les pélites encaissantes) ;
- le pendage du filon (résistant en profondeur) se marque par la dissymétrie du profil ;

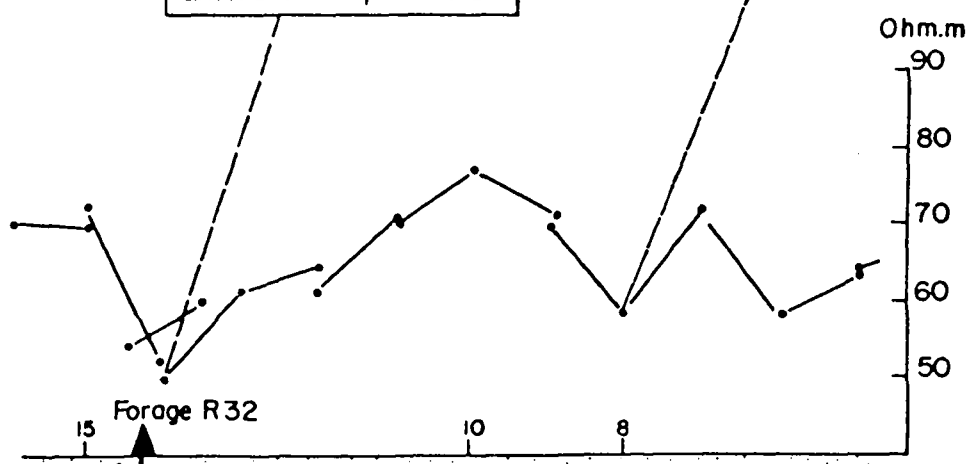
Dans les deux cas, les forages très productifs ont trouvé l'eau au contact fissuré de la pélite sous le filon.

IMPLANTATION R.32

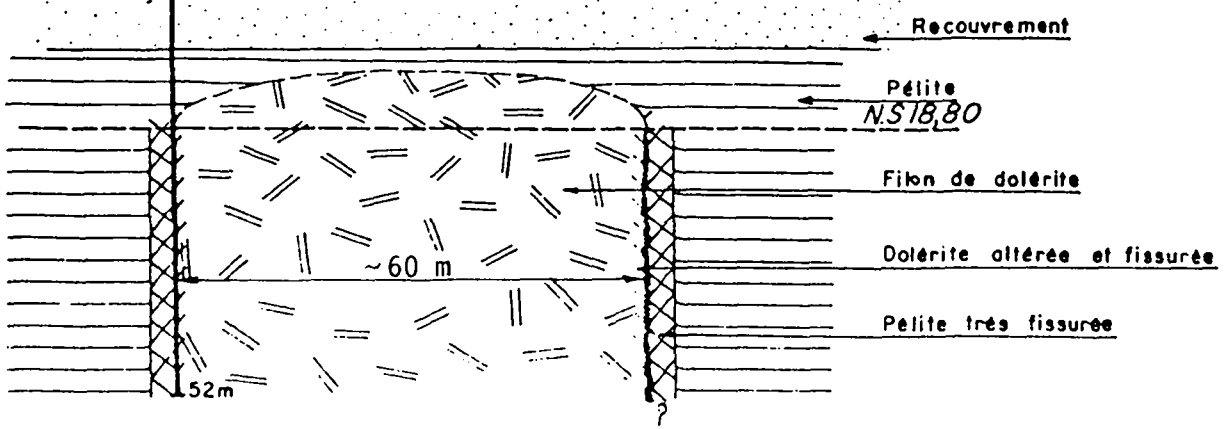
Extrait du profil P3



Extrait du profil P2



Debit en forage: $9\text{m}^3/\text{h}$
 Debit aux essais: $7\text{ à }12\text{m}^3/\text{h}$



MÉTHODE ELECTRIQUE: RECHERCHE DES EPONTES FRACTURÉES
 D'UN FILON DE DOLÉRITE DANS LES PELITES

C.I.E.H ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES

Extrait:
 ROUTE KIFFA NEMA

BURGEAP-CGG 1974
 MINIST. EQUIP. MAURITANIE

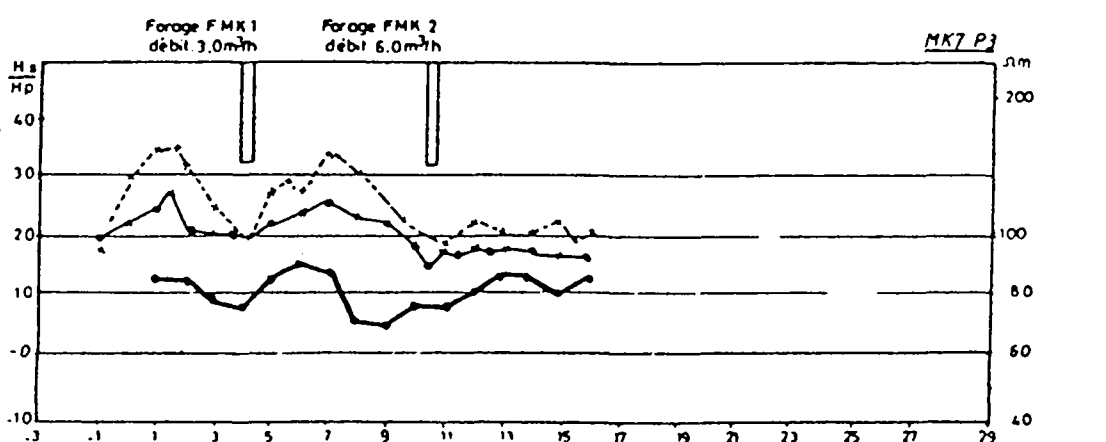
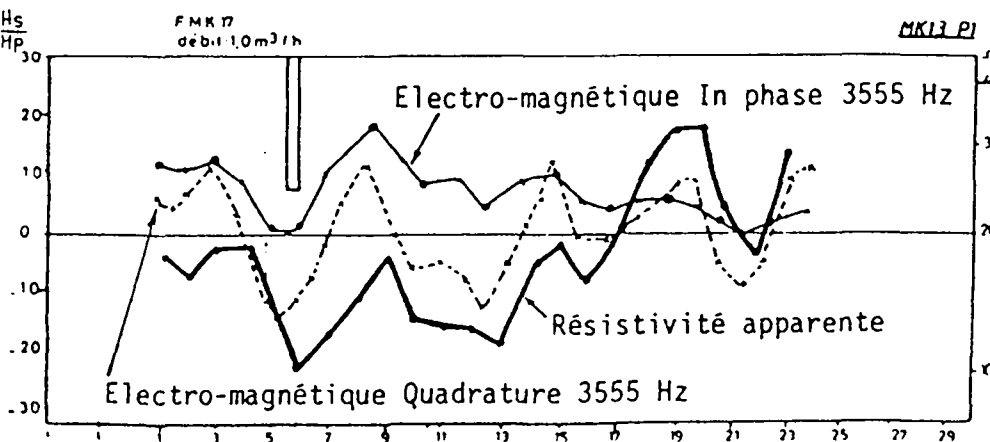
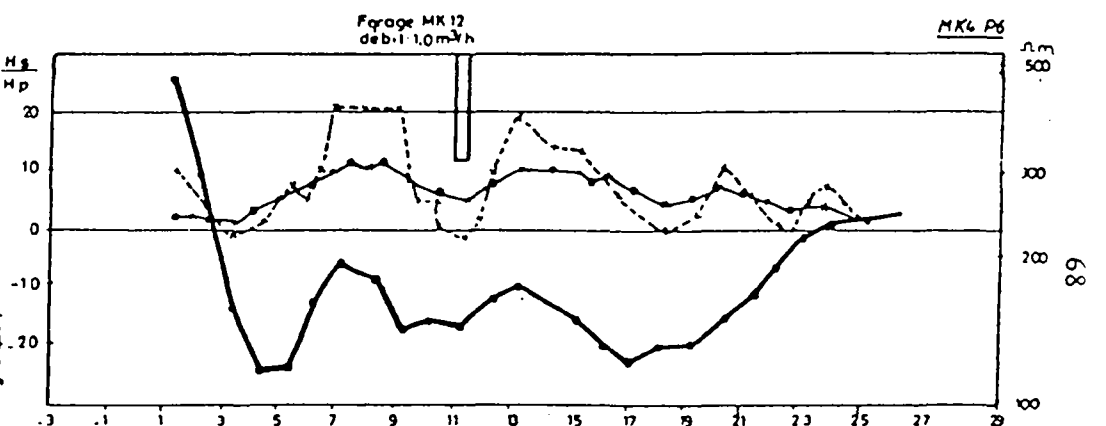
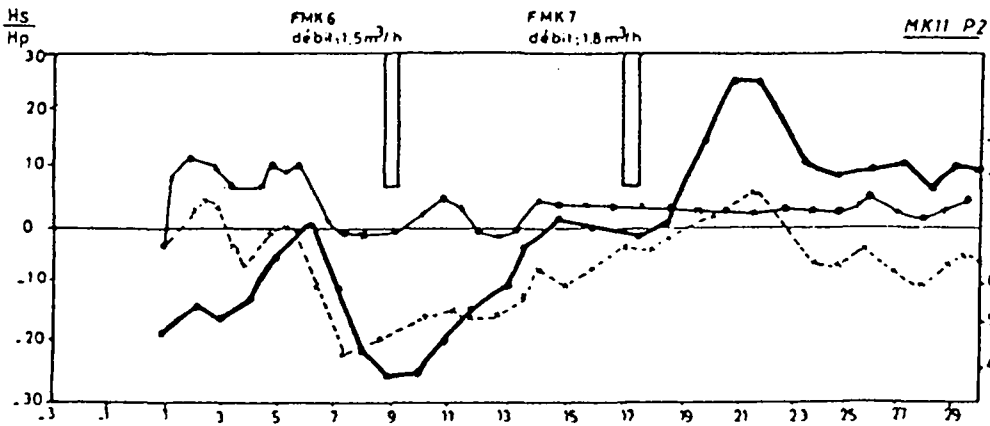
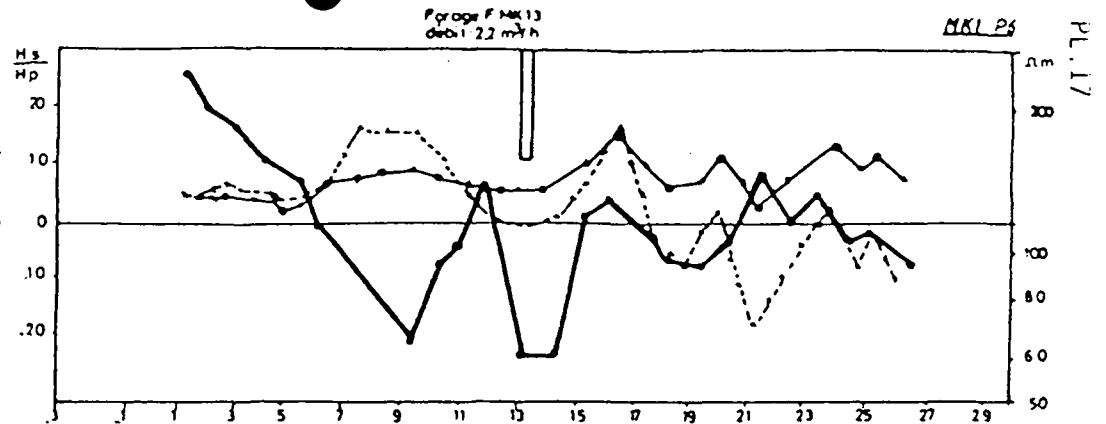
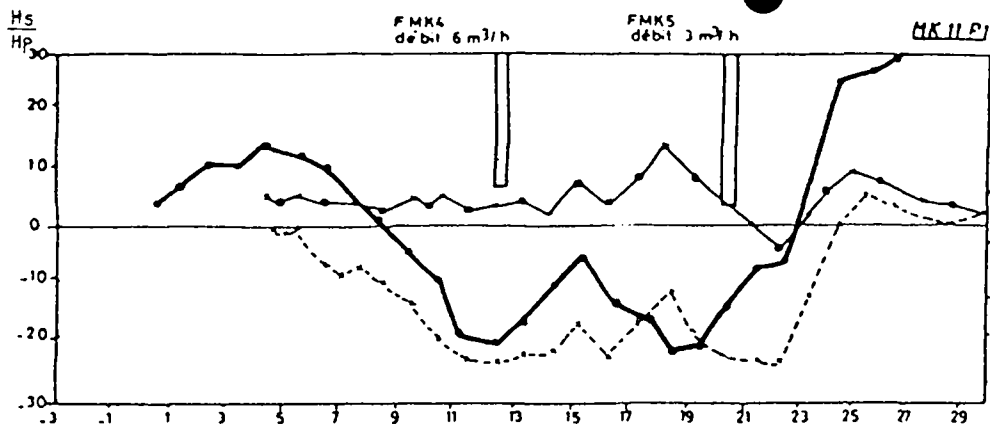
PLANCHE 16 (SITE R 32)

Une direction d'accident peu nette sur photo aérienne, se matérialise sur le terrain par un large alignement d'arbres verts peu différenciés de la zone boisée environnante.

Le trainé électrique fait apparaître deux axes conducteurs que l'on retrouve d'un profil à l'autre, et qui sont parallèles à la direction relevée sur photo aérienne.

Un sondage de reconnaissance, foré sur l'axe conducteur Sud, a rencontré sous 10 m de pélite peu altérée, un contact pélite-dolérite vertical très fissuré, avec un débit en fin de forage de 9 m³/h.

A noter que la tête du filon, recouverte de pélites, n'est pas altérée : le filon marque donc comme résistant.

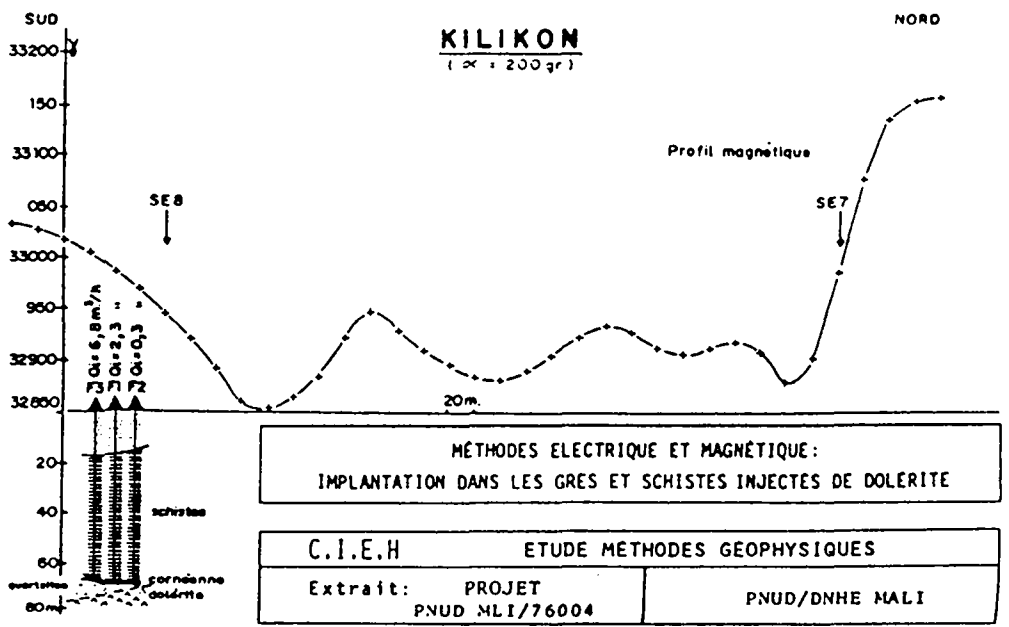
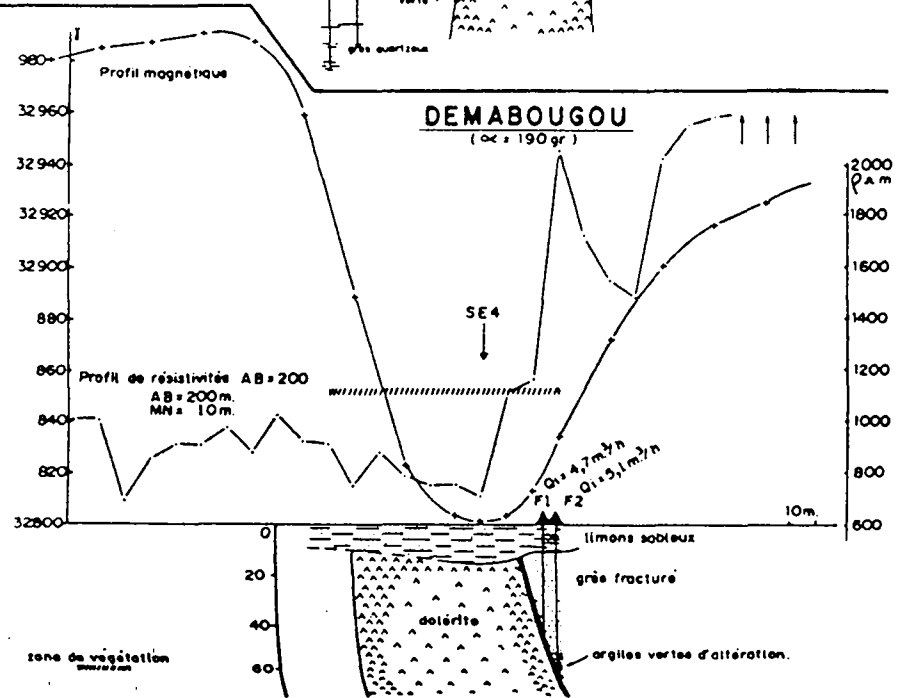
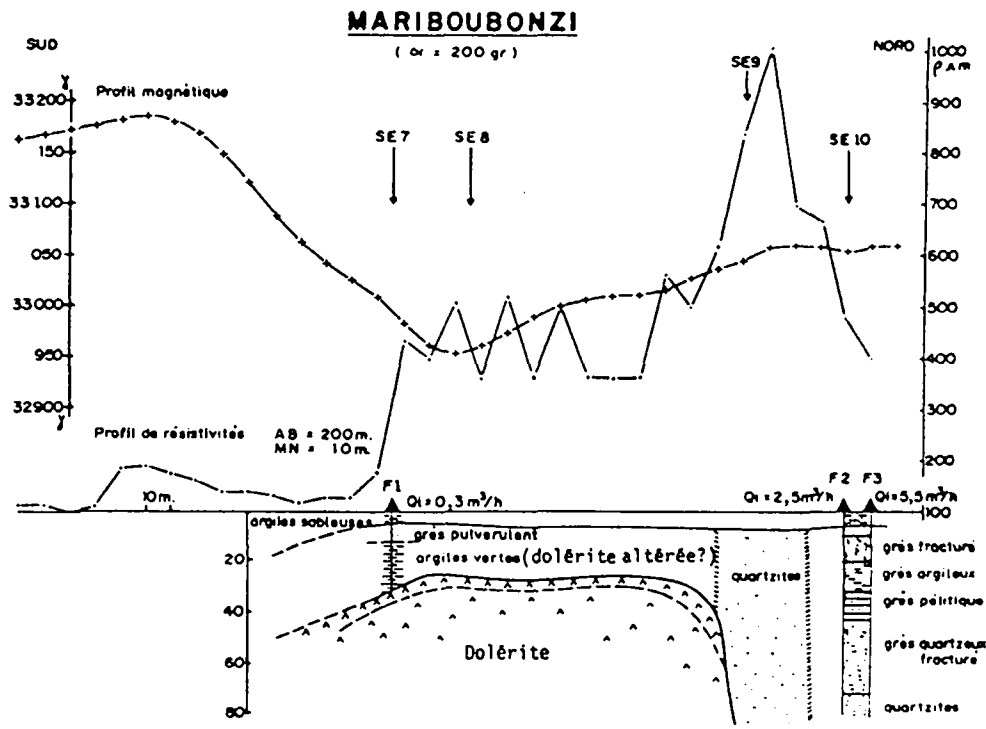
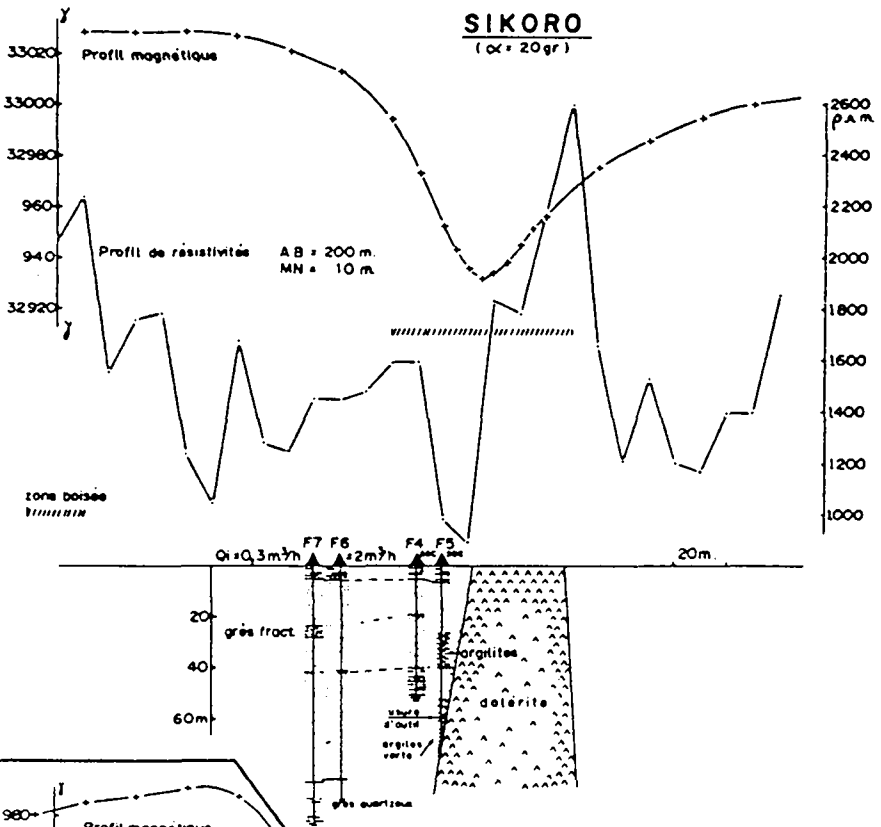


QUELQUES EXEMPLES DE PROFILS GEO-ELECTRIQUES ET ELECTRO-MAGNETIQUES
SUR SUBSTRATUM BIRIRMEN DANS LE BLOC DE MANKARGA

PL. 17
68

PLANCHE 17MANKARGA (Haute Volta) - BIRRI MIENCOMPARAISON DES METHODES ELECTRIQUES ET ELECTROMAGNETIQUES

Cette planche montre que, dans les exemples présentés, les profils électromagnétiques à 3555 Hz (distance émetteur-récepteur de 50 m) reproduisent assez fidèlement l'allure générale des profils de résistivité apparente (trainés électriques AB = 200 MN = 40).



MÉTHODES ELECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE :
IMPLANTATION DANS LES GRES ET SCHISTES INJECTES DE DOLERITE

C.I.E.H ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES

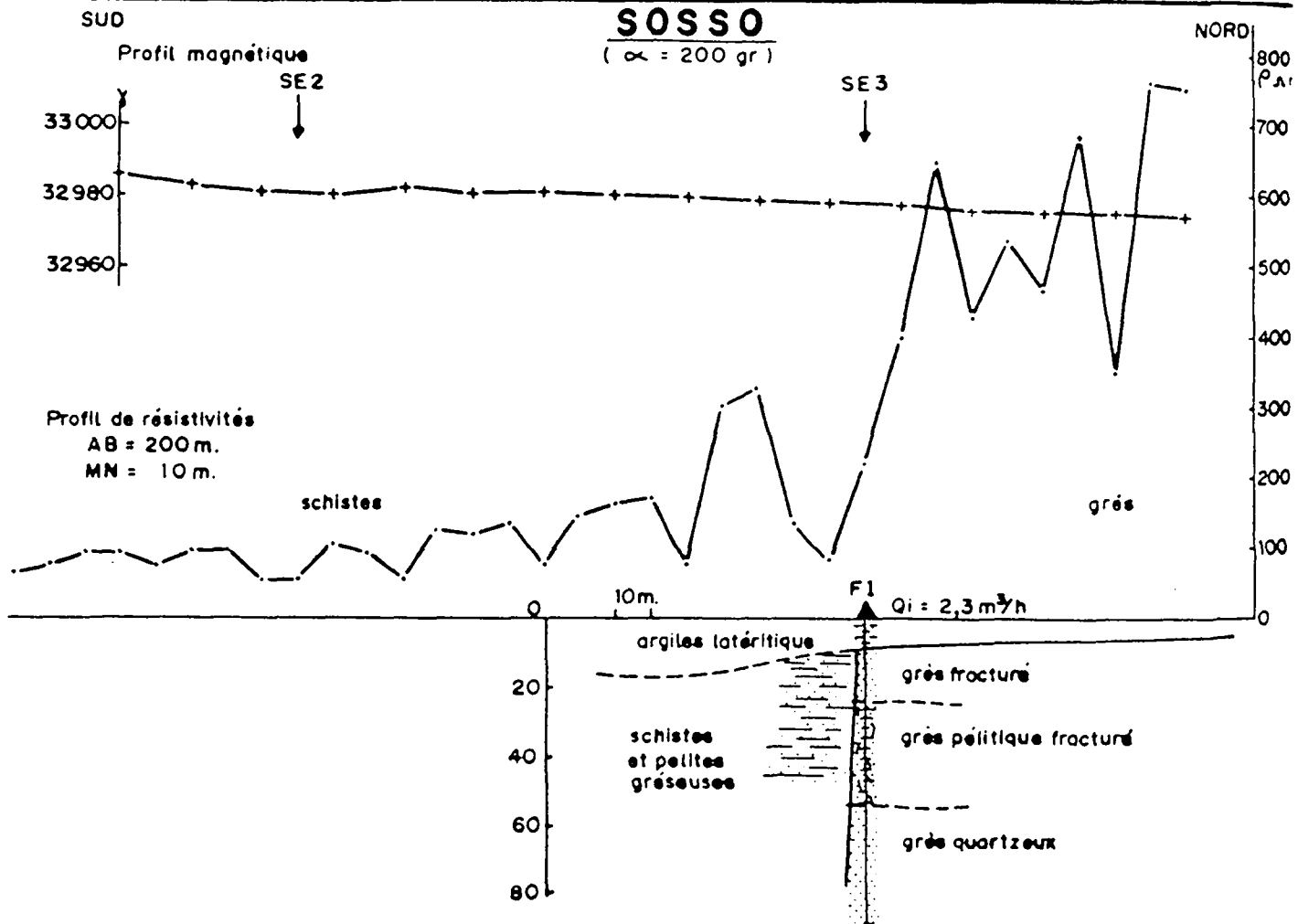
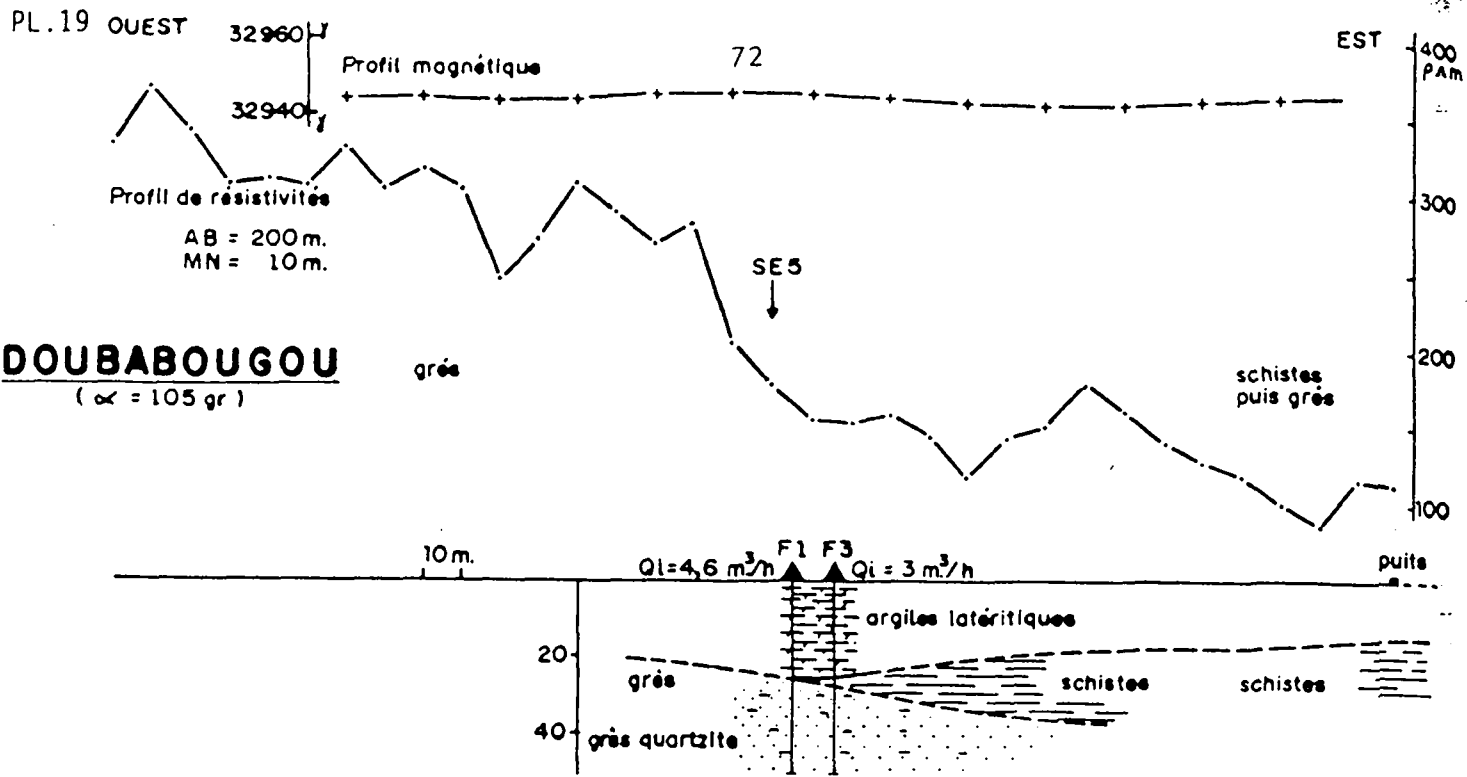
Extrait: PROJET PNUD MLI/76004	PNUD/DNHE MALI
-----------------------------------	----------------

PLANCHE 18
(MALI 2ème REGION)

PROSPECTION HYDROGEOLOGIQUE DANS DES ZONES DE GRES
INFRACAMBRIENS INJECTES DE DOLERITE, A L'AIDE DES
METHODES ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES

On peut retenir de ces planches que dans les grès infracambriens, contrairement au cas des pélites injectées de dolérite, on a souvent intérêt à s'éloigner du contact entre les grès et la dolérite.

L'exemple de DEMABOUGOU montre cependant que la zone de contact grès/dolérite est parfois aquifère.



METHODES ELECTRIQUE ET MAGNETIQUE:
IMPLANTATION SUR UN CONTACT SCHISTES/GRES

C.I.E.H

ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES

Extrait: PROJET
PNUD MLI/76004

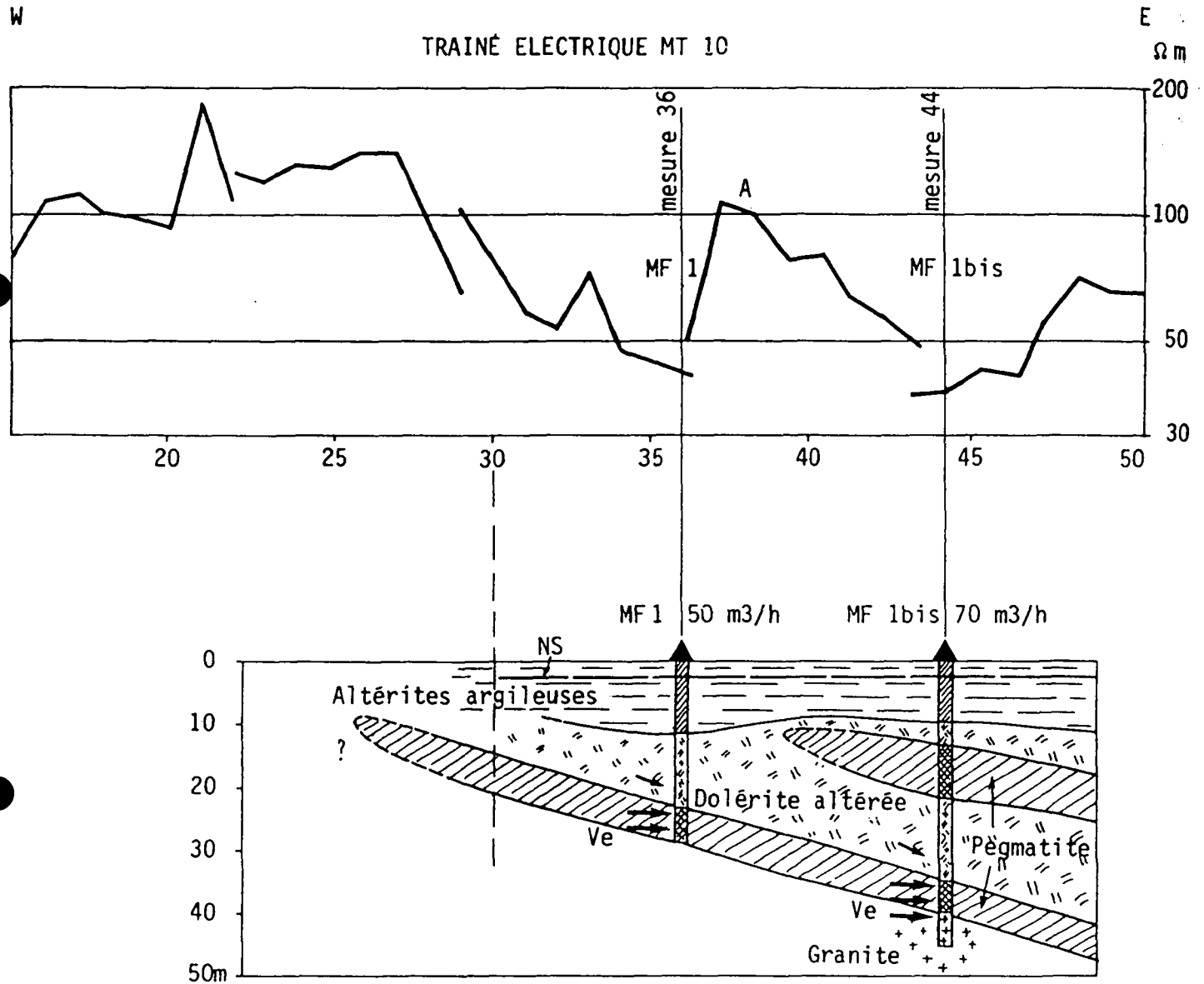
PNUD/DNHE MALI

PLANCHE 19(MALI 2ème REGION)IMPLANTATIONS AU CONTACT ENTRE SCHISTE ET GRES

La planche 19 présente, en l'absence de dolérite (profils magnétiques plats), deux cas de contact entre schistes et grès.

Le contact biseauté schistes sur grès de DOUBABOUGOU est curieusement plus aquifère que le contact faillé de SOSSO.

M A M O U



MÉTHODE ELECTRIQUE:
IMPLANTATION DANS LES GRANITES INJECTÉS DE DOLÉRITE

C.I.E.H ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES	
Extrait: PROJET A.E.P 7 VILLES GUINÉE	BURGEAP-CGG-BRIAN COLQUHOUN MINIST.ENERGIE GUINÉE

PLANCHE 20MAMOU (Guinée)GRANITES INJECTES DE DOLERITE

Le trainé électrique de Mamou dans une zone de granites roses injectés de sills de dolérite montre un résistant encadré par deux conducteurs.

L'allure du trainé se retrouve, d'ailleurs, presque identique à elle même sur 4 profils parallèles étalés sur 1 km 500, non représentés sur la planche 20.

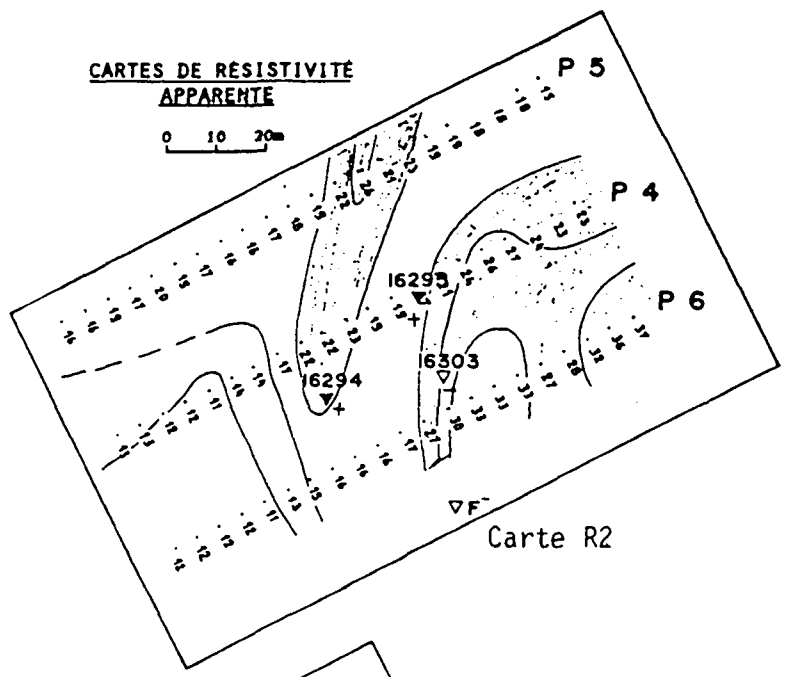
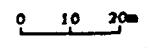
Le forage MF1 a rencontré de la dolérite altérée argileuse, puis à 22 m un filon de pegmatite fracturé et fortement aquifère (50 m³/h). Ce forage s'est éboulé.

L'allure du profil (dissymétrie) a conduit à penser à un pendage vers l'Est conforme à la structure générale de la région.

Le forage MF1 bis a été réalisé à 45 m du premier sur la seconde anomalie dans l'espoir de retrouver cette pegmatite plus profonde. Ce second forage a retrouvé effectivement le même filon de pegmatite à 32 m de profondeur.

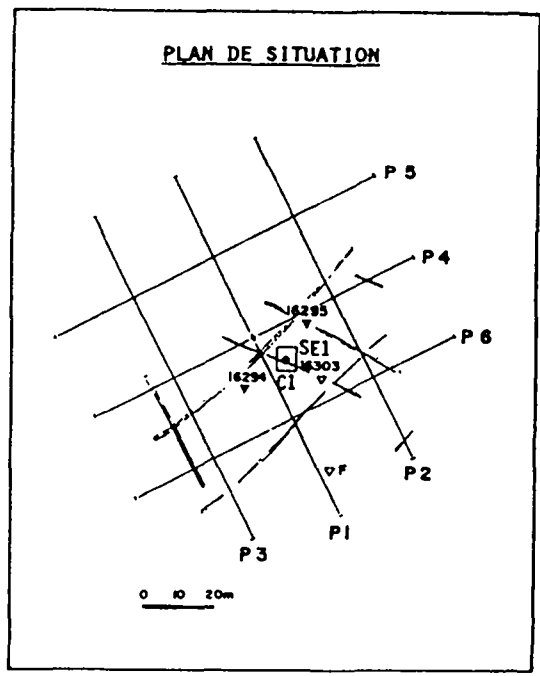
Il a recoupé de 12 à 21 m un autre filon de pegmatite qui permet peut être d'expliquer la bosse résistante A du profil. Ce dernier forage a donné 70 m³/h à l'air lift.

CARTES DE RESISTIVITE APPARENTE



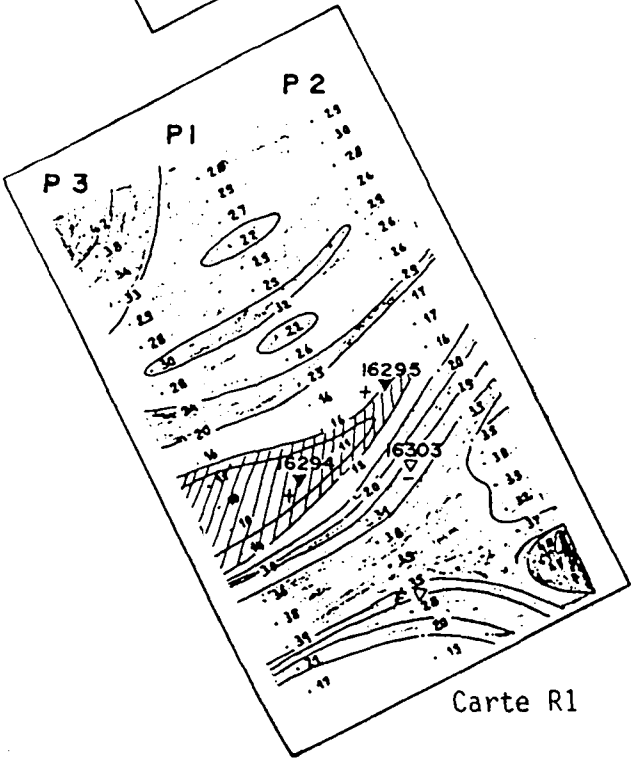
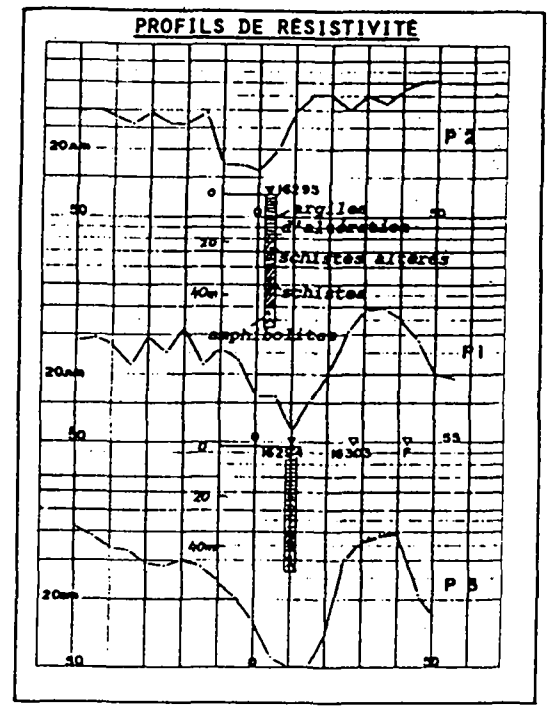
Carte R2

PLAN DE SITUATION



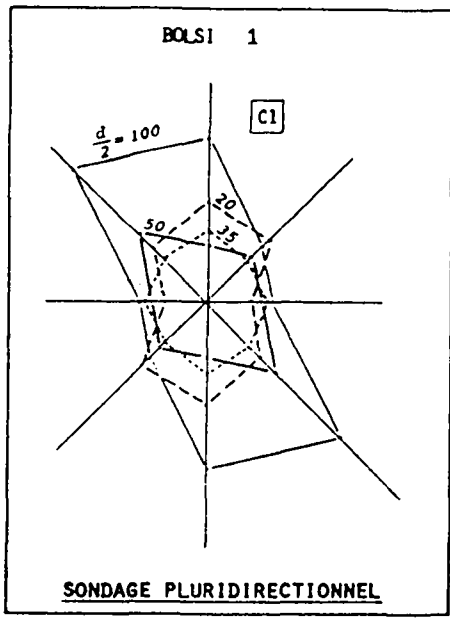
SITE DE BOLSI

PROFILS DE RESISTIVITE



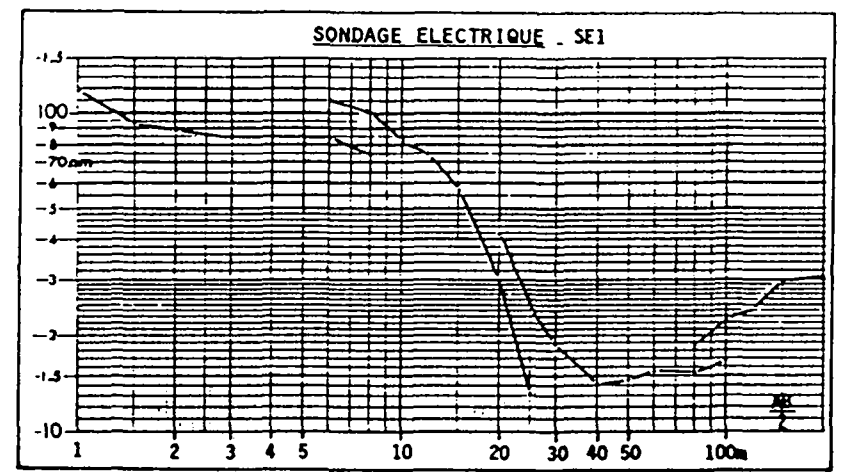
Carte R1

BOLSI 1



SONDAGE PLURIDIRECTIONNEL

SONDAGE ELECTRIQUE SE1



C.I.E.H ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES	
Extrait: DOCUMENT INEDIT	Prof. OUSMANE BOUREIMA
(These en cours)	UNIV. NIAMEY-MEDITER. GEOELEC.

PLANCHE 21SITE DE BOLSI 1 (LIPTAKO, NIGER)

(Planche et texte aimablement communiqués par M. le professeur
OUSMANE BOUREIMA, Univ. de Niamey)

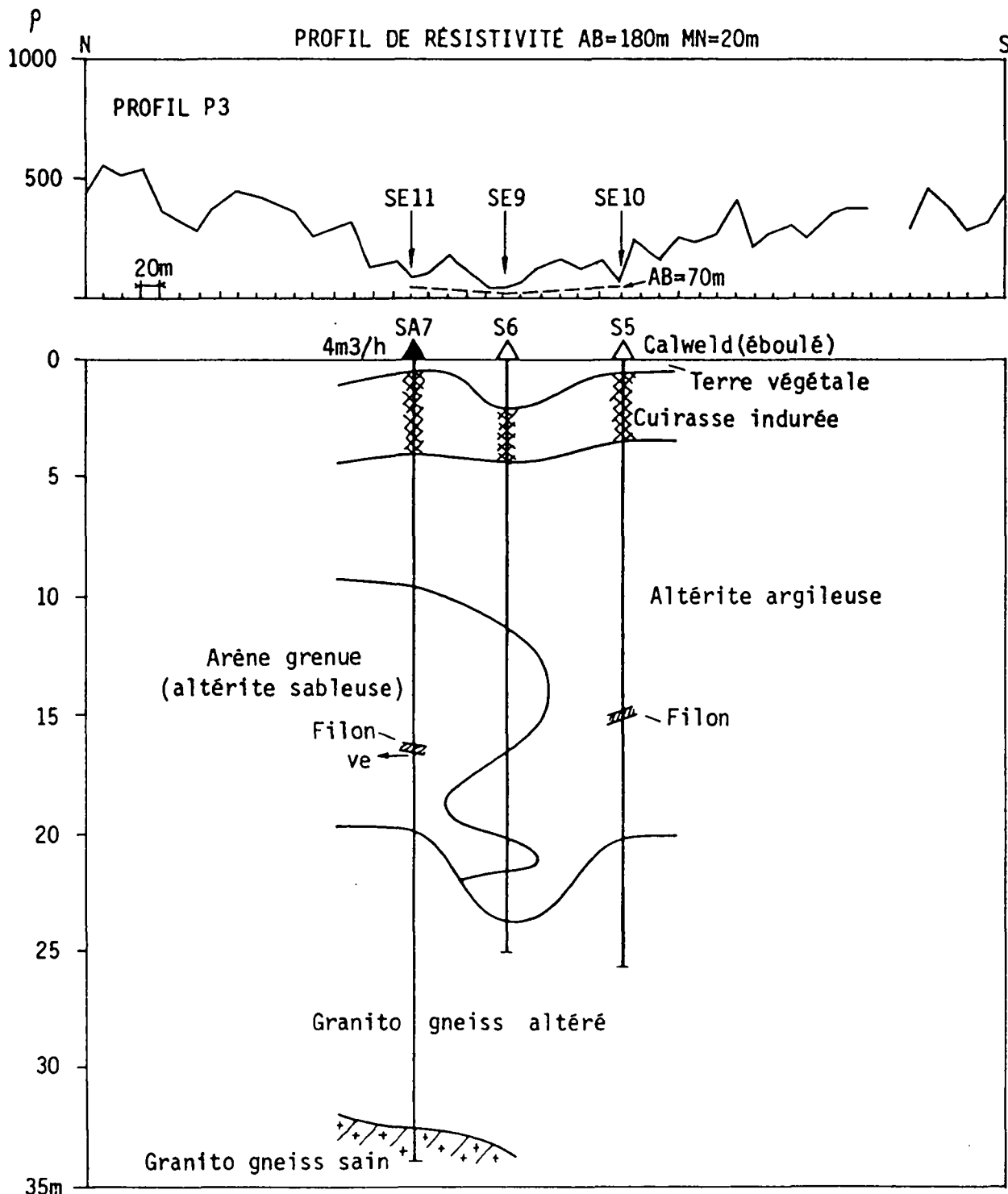
Les mesures géophysiques ont été réalisées a posteriori après exécution des 4 forages distants d'une vingtaine de mètres les uns des autres dont 2 négatifs et 2 positifs (4 m³/h chacun pour ces derniers).

Le sondage pluridirectionnel, qui intègre les caractéristiques des terrains traversés par les 4 forages montre une anisotropie faible en courte longueur de ligne (terrains d'altération), mais très marquée pour la grande longueur de ligne ($d/2 = 100$ m) correspondant par conséquent à une fracturation du substratum résistant.

Deux cartes de résistivité⁽¹⁾ ont été réalisées selon les directions d'anisotropie. La carte R1 (profils P1 P2 P3) fait apparaître un axe conducteur (10 à 15 Ω m) de direction 70 gr, sur lequel les 2 forages positifs sont implantés. Les forages négatifs sont situés en dehors de cet axe sur un palier plus "résistant" (30 à 40 Ω m).

(1) Il s'agit de deux "dispositifs rectangles" croisés.

RANCH DE LEO . ZONE 5



PROFILS ET SONDAGES ELECTRIQUES

C.I.E.H	ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES	
Extrait:	ETUDES HYDROGEOLOGIQUES DE LA REGION DE LEO	LCHF-GEOHYDRAULIQUE-CGG DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'AMEN' DE L'ESPACE RUR.

PLANCHE 22RANCH DE LEO (Haute-Volta) ZONE 5PROFILS ELECTRIQUES ET SONDAGES ELECTRIQUESSUR LE PROFIL N° 3

(Planche et texte aimablement communiqués par LCHF - GEOHYDRAULIQUE)

Le profil électrique réalisé montre la présence de 3 anomalies conductrices, de résistivité inférieure à $90 \Omega \text{ m}$ de 20 à 60 m de largeur, grossièrement allongées Est-Ouest, d'après les profils électriques parallèles voisins.

Les zones résistantes montrent une résistivité assez faible, supérieure ou égale à $200 \Omega \text{ m}$, avec un maximum supérieur à $500 \Omega \text{ m}$.

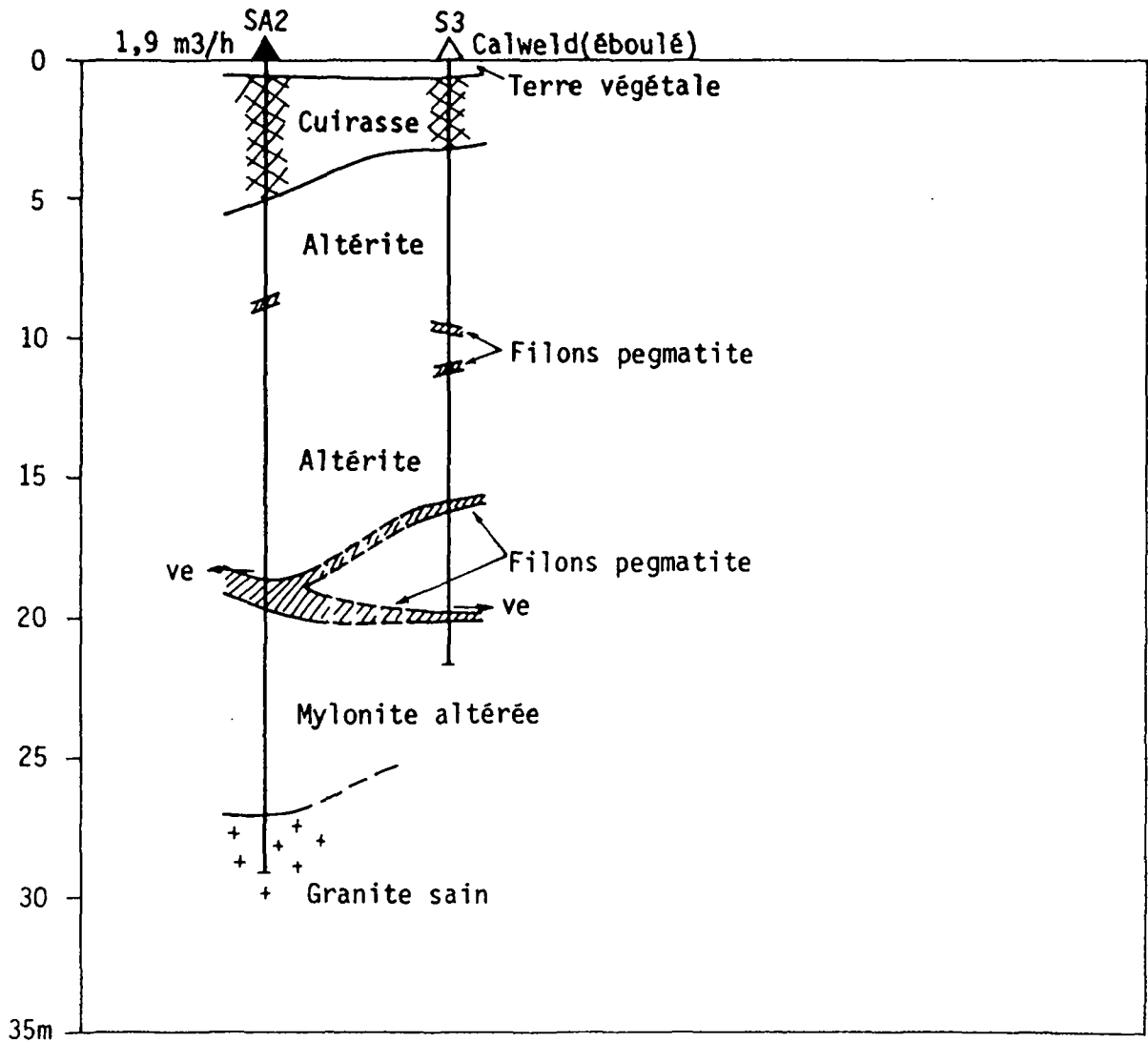
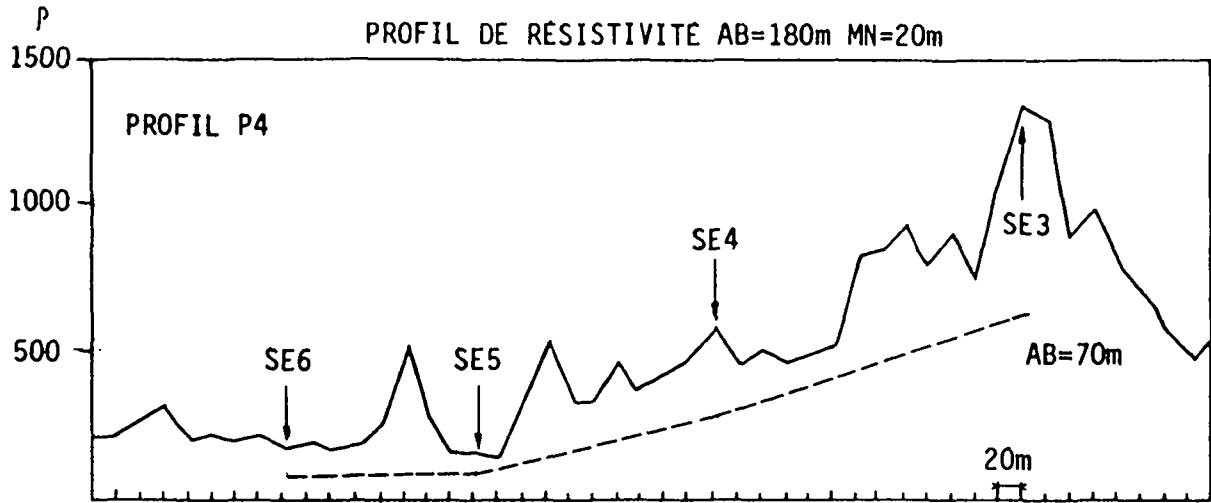
3 forages de reconnaissance ont été réalisés sur chacune des trois anomalies (SA 7 - S 6 - S 5), à l'emplacement de 3 sondages électriques (Se 11 - Se 9 - Se 10).

Le premier forage (SA 7), traverse 10,5 m d'arènes grenues reposant sur 13 m de granito-gneiss altéré au-dessus d'un socle sain granito gneissique, trouvé à 32 m.

La présence d'un filon dans les arènes est responsable de l'arrivée d'eau constatée. La faible résistivité observée est probablement liée à l'ensemble du recouvrement d'arènes et d'altérites.

Les 2 autres sondages (S 6 et S 5) réalisés à la calweld n'ont pu être poussés assez profondément par suite d'éboulements. Toutefois les faibles résistivités observées sur le profil semblent liées à des épaisseurs et qualités comparables du recouvrement altéré.

RANCH DE LEO . ZONE C



PROFILS ET SONDAGES ELECTRIQUES

C.I.E.H ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES

Extrait: ETUDES HYDROGEOLOGIQUES DE LA REGION DE LEO	LCHF-GEOHYDRAULIQUE-CGG DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'AMEN. DE L'ESPACE RUR.
--	---

PLANCHE 23
RANCH DE LEO (Haute-Volta) ZONE C
PROFILS ELECTRIQUES ET SONDAGES ELECTRIQUES
SUR LE PROFIL N° 4

(Planche et texte aimablement communiqués par LCHF-GEOHYDRAULIQUE)

Le profil électrique réalisé montre la présence de 2 anomalies conductrices inférieures à $200 \Omega \text{ m}$, de 80 et 60 m de largeur, au milieu d'un résistant \geq à $400 \Omega \text{ m}$.

Dans la partie sud du profil le résistant s'élève progressivement au-delà de $1000 \Omega \text{ m}$.

Un sondage électrique a été réalisé sur chacune des 2 anomalies (qui sont orientés E.O).

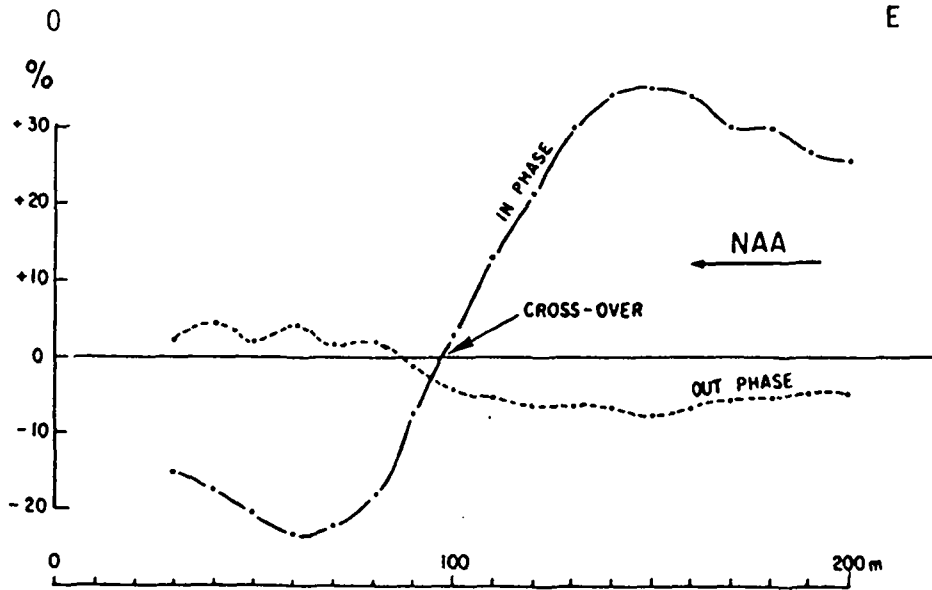
Le sondage de reconnaissance S 3 réalisé à la calwed sur Se 5 n'a pu être descendu assez profondément par suite d'éboulements. Toutefois la conductivité observée est probablement liée à la présence d'arènes très altérées.

Le 2ème forage SA 2 réalisé à l'Acker sur Se 6 montre un passage de mylonite altérée avec filon de pegmatite, sur le socle, entre 15 et 27 m de profondeur.

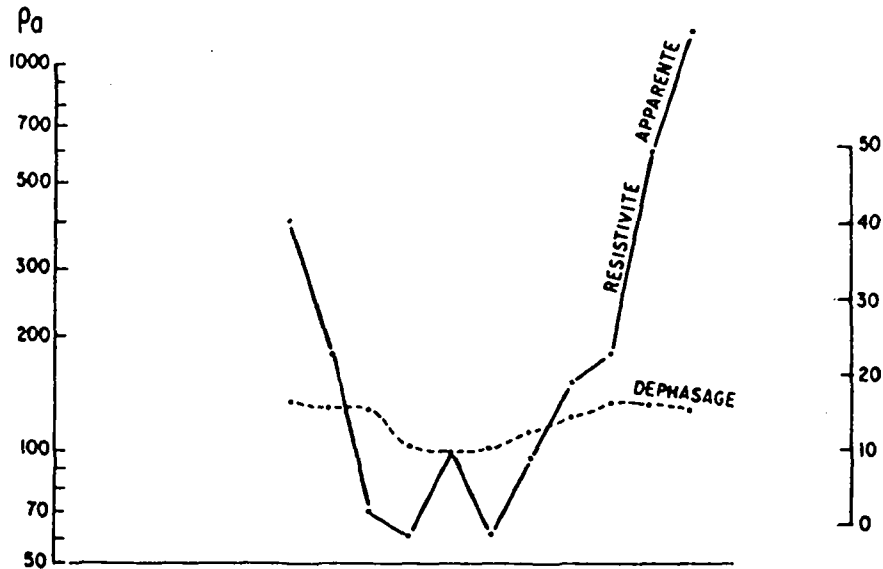
Sur ces 2 sondages, les arrivées d'eau sont liées à la présence de filons de pegmatite entre 18 et 20 m de profondeur.

L'examen du profil de résistivité montre bien que les deux forages ont été placés dans des zones d'altération maximum.

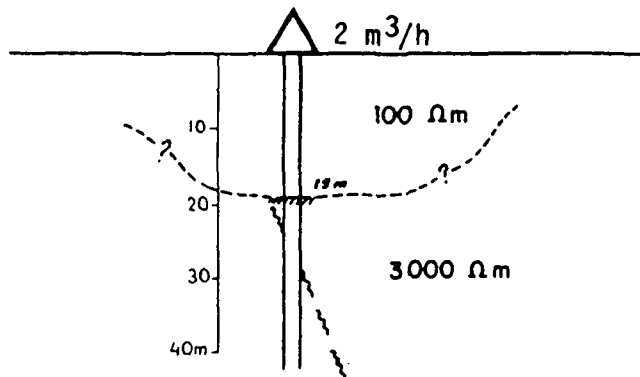
LOLOBO F.I.



EM - 16



EM - 16 - R



METHODES ELECTROMAGNETIQUES - VLF
 IMPLANTATION DANS LES GRANITES

C.I.E.H	ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES
Extrait : METHODES DE PROSPECTION EM	GEOMINES JANVIER 1979

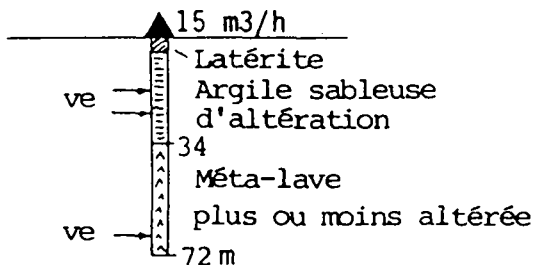
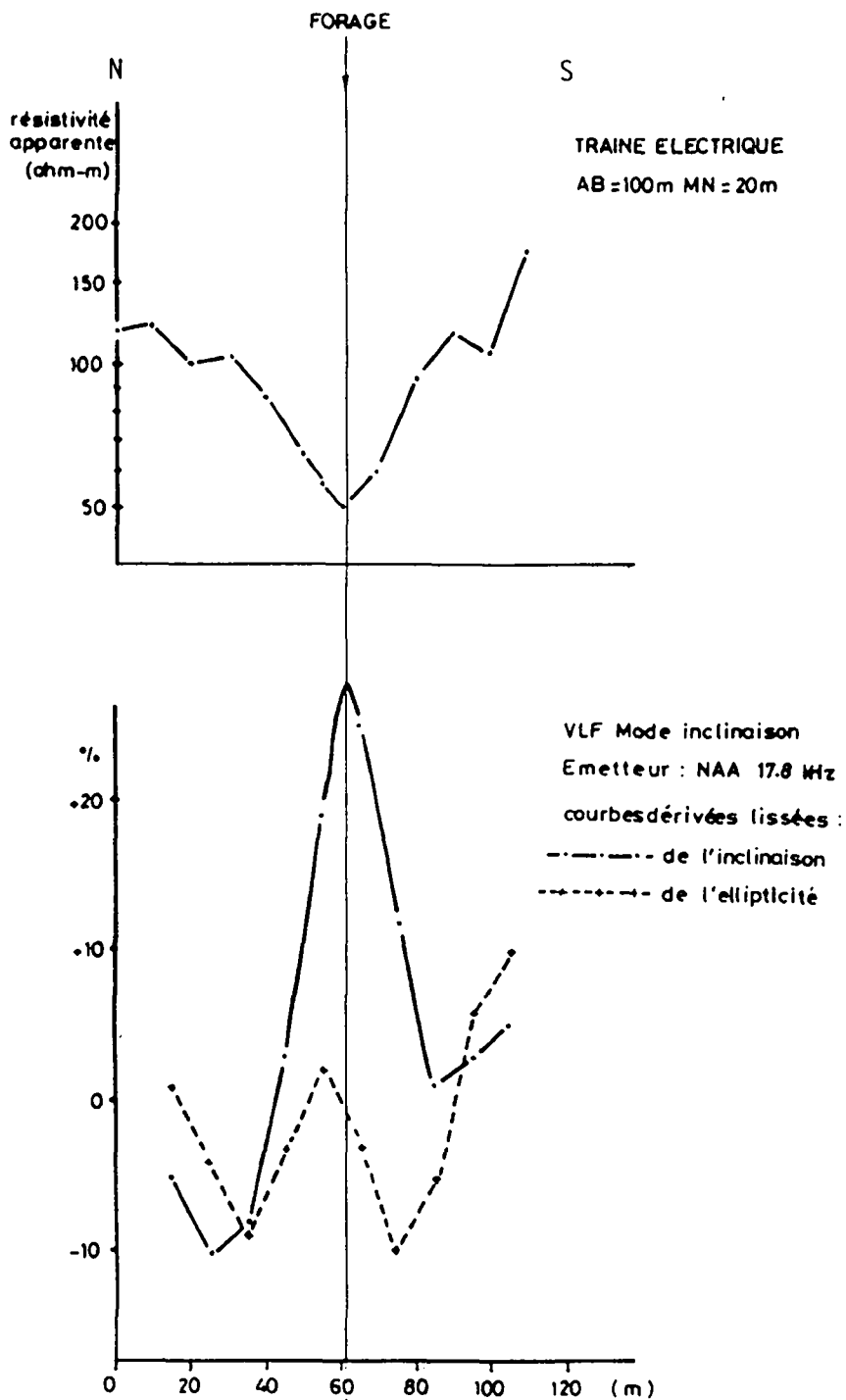
PLANCHE 24LOLOBO F1EMPLOI DE LA METHODE ELECTROMAGNETIQUE

Exemple extrait de "méthodes de prospection électromagnétique appliquées à la recherche hydrogéologique" par J.M HUBERT, GEOMINES, Ltd, janvier 1979.

Le forage fut implanté uniquement d'après le levé EM-16, le levé EM-16R ayant été effectué après la foration. Le levé EM indique un conducteur à une profondeur de 22 m et l'asymétrie du profil EM indique un pendage vers l'est.

Le profil de résistivité confirme la présence d'une zone conductrice. Le forage a atteint le socle à 19 m et la zone fracturée à 22 m. Le débit air-lift obtenu fut de 2.0 m³/h. Il y aurait peut-être un intérêt à forer à quelques mètres plus à l'est de façon à atteindre la zone fracturée à une plus grande profondeur.

SAB 3 SABODALA



METHODES ELECTRIQUE ET ELECTROMAGNETIQUE VLF
(Application des courbes VLF dérivées lissées)

C.I.E.H	ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES	
Extrait: Rapport BRGM 83AGE035	BRGM/Société minière de SABODALA/SENEGAL	

PLANCHE 25

SABODALA (Sénégal Oriental)

Implantation sur laves métamorphisées par profil
électrique et VLF

(Exemple aimablement communiqué par le BRGM)

- Le forage de Sabodala a été implanté dans un contexte de métalaves, après étude photo interprétative sur un profil géophysique de direction N 5° E,

- le trainé électrique montre une anomalie de 30 mètres de largeur, présentant un minimum à 50 Ω m et un contraste de 2 par rapport aux bordures ;

- le profil VLF a été traité par la dérivée lissée de l'inclinaison (+ 28 %) qui montre un maximum étroit, en concordance parfaite avec l'anomalie du trainé électrique ;

- l'origine de l'anomalie est attribuée à un conducteur mince, sub vertical, correspondant à une zone faillée étroite ;

- le forage, positif, avec un débit instantané de forage de 15 m³/h a donné 10,5 m³/h en exploitation avec 34,5 m de rabattement après 6 heures (niveau statique à 8,2 s/sol).

OPTIMISATION DE L'EMPLOI DES METHODES GEOPHYSIQUES

Chapitre III

L'optimisation de l'emploi des méthodes géophysiques suppose la connaissance pour chaque méthode :

- de ses coûts de mise en oeuvre ; (3.1. - 3.2)
- de ses domaines d'application technique. (cf. 3.3)
- de l'économie qu'elle est susceptible d'entraîner sur la campagne de forages (notamment réduction du taux d'échec). Cette économie, comparée au coût de mise en oeuvre permet de définir le domaine de rentabilité "économique" de chaque méthode, dans chaque cas.

La connaissance de l'ensemble de ces éléments est nécessaire pour définir une stratégie de prospection.

3.1.ELEMENTS DE COUTS

Les coûts de prospection varient fortement selon :

- l'objectif visé (hydraulique villageoise ou urbaine, par exemple ...)
- la région (accès, éloignement ...)
- la durée de la campagne de prospection (nombre de sites à étudier ...)
- etc ...

Il n'est donc pas possible de donner un coût standard de prospection.

Néanmoins pour fixer les idées et surtout permettre une comparaison entre les différentes méthodes, une estimation de coût unitaire de prospection par site a été faite pour 8 méthodes ou groupes de méthodes (tableau 6), en se basant sur les hypothèses suivantes :

- le site est défini comme un village à alimenter en eau par un forage productif de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ minimum.

On admet que sur chaque site 2 à 3 linéaments en moyenne sont étudiés de la même manière pour chaque méthode (mêmes longueurs de profils, mêmes pas de mesures ...) afin de parvenir au moins à un emplacement de forage reconnu comme le plus favorable.

TABLEAU 6 - ORDRE DE GRANDEUR DU COUT DES PROSPECTIONS GEOPHYSIQUES (A TITRE INDICATIF)

Méthode	Personnel national				Matériel géophysique			Véhicules		Campt matériel unité	Formation du personnel *	Nombre de sites étudiés par mois	Coût par site (y compris la formation) FCFA	Objectif de coût par site (personnel formé rythme identique) FCFA
	IG *	OG *	M *	C *	Type	Coût 1000 FCFA	durée de vie (an)	LR *	CAM * (option)					
Électrique	1	2	5	2	potentiometre et accessoires type GEOSTUDI	4.000	3	1	(1)	4	1 I.G expatrié + campement	10	700.000	325.000
Sismique	1	3	5	3	enregistreur sismique type RS 44	11.000	5	2	1	5	1 I.G expatrié + campement	5	1.600.000	880.000
Électrique + sismique	1	3	5	3	cf. ci-dessus	15.000		2	1	5	1 I.G. expatrié + campement	7	1.200.000	700.000
Electrique + magnétique	1	2	5	2	Idem (Elec.) + magnétomètre portatif	4.000 2.500	3 5	1	(1)	4	1 I.G expatrié + campement	9	750.000	350.000
Electromagnétique (EM RE)	-	2	1	1	EM-RE	6.500	5	1	-	3	1 OG expatrié + campement	18	250.000	80.000
Electromagnétique (VLF)	-	1	1	1	EM 16	3.500	5	1	-	2	1 OG expatrié + campement 5 mois/10	20	140.000	60.000
Magnétique	-	1	1	1	magnétomètre portatif	2.500	5	1	-	2	1 OG expatrié + campement 2 mois/10	25	90.000	45.000
Microgravimétrique (en complément)	1	1	2	1	gravimètre microgul LACOSTE-ROMBERT	11.500	5	1	-	2	1 I.G expatrié + campement	(15) (Compl.)	350.000 en complément d'une autre méthode	100.000

* IG = Ingénieur géophysicien - OG = opérateur - M = manoeuvre - C = chauffeur - LR = type land rover - CAM = camion

- Le fonctionnement des véhicules nécessaires a été calculé sur la base de 3000 km/mois pour les land rover et 1500 km/mois pour le camion ;

- la durée adoptée par campagne est de 10 mois de terrain par an ;

- les équipes ont été supposées constituées par un géophysicien expatrié, assisté d'un géophysicien local en cours de formation (colonne coût par site, y compris la formation) ;

- les rythmes de prospection (nombre de sites étudiés par mois) ont été estimés sur la base des prospection actuellement réalisées à l'entreprise ; la dernière colonne, qui concerne l'objectif de coût, avec uniquement du personnel national convenablement et complètement formé, suppose que les mêmes rythmes soient conservés.

Si l'on prend comme base 1 le coût de la méthode électrique, la plus usitée, on peut voir, qu'à prospection comparable (tableau 6) :

a) - la méthode la plus chère est la méthode sismique (2,3)* suivie de la combinaison méthode électrique + méthode sismique (1,7) ;

- viennent ensuite les méthodes électromagnétiques EM-RE (0,36) puis VLF (0,20) ;

- enfin la méthode magnétique (0,13) reste, de loin, la moins chère ;

- la méthode microgravimétrique est indiquée pour mémoire : elle doit être considérée comme une méthode complémentaire dont le coût (0,5) doit être rajouté à celui de la méthode associée ;

- la combinaison des méthodes électriques et magnétiques (1,07) est à peine plus chère que la méthode électrique seule.

b) En supposant que les méthodes soient mises en oeuvre par du personnel national entièrement formé, et en conservant les mêmes rythmes d'exécution, les coûts pourraient à terme être réduits de moitié (dernière colonne du tableau 6). Un tel objectif ne paraît pas pouvoir être atteint avant plusieurs années (cf. 3.5.4).

* Les coûts indiqués entre parenthèse sont exprimés en prenant comme base le coût de la méthode électrique supposé égal à 1.

3.2. LIMITES ECONOMIQUES D'EMPLOI DE CHAQUE METHODE

On a démontré au § 1.1.2. que les études géophysiques ne sont justifiables que si leur coût G est tel que :

$$G \leq F^- \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

où F⁻ est le coût moyen d'un forage négatif.

r₁ le taux de réussite sans géophysique

r₂ le taux de réussite avec géophysique

Les valeurs de $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}$ sont fournies dans le tableau 7, sur lequel est aussi représenté en hachures le domaine pratique d'emploi des méthodes géophysiques tel qu'il ressort de l'expérience acquise par les projets étudiés (cf. § 1.2.3).

TABLEAU 7 - VALEURS DE $\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

r₂ = avec géophysique

r ₂ \ r ₁	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
30%		0,83	1,33	1,66	1,9	2,08	2,22	2,33
40%			0,5	0,83	1,07	1,25	1,39	1,5
50%				0,33	0,57	0,75	0,89	1
60%					0,24	0,42	0,56	0,67
70%						0,18	0,32	0,43
80%							0,14	0,25
90%								0,11

Domaine pratique d'emploi des méthodes géophysiques

Le calcul des limites économiques d'emploi d'une méthode géophysique est alors très simple :

prenons à titre d'exemple F⁻ = 1,5 million FCFA (ce qui est vraisemblablement un coût minimum pour un forage d'une profondeur moyenne de l'ordre de 50 mètres). Toute méthode géophysique qui permet de faire passer le taux de réussite de 50 % à 70 % peut théoriquement être utilisée jusqu'à concurrence de 0,57 x 1.500.000 = 855.000 FCFA par site. En se référant au tableau 6 on s'aperçoit que la méthode sismique serait trop chère dans ce cas, mais que toutes les autres méthodes sont théoriquement utilisables.

Le domaine économique d'emploi de chaque méthode est tel que

$$\frac{G}{F^-} \leq \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Sur la base de F⁻ = 1,5 MFCFA, on obtient à partir du tableau 6 les valeurs de $\frac{G}{F^-}$ suivantes, présentées dans le tableau 8.

TABLEAU 8 - VALEURS DE $\frac{G}{F}$

Méthode	$\frac{G}{F}$ (y compris la formation)	$\frac{G}{F}$ (personnel formé)
électrique	0,47	0,22
sismique	1,067	0,59
électrique + sismique	0,8	0,47
électrique + magnétisme	0,5	0,23
électromagnétisme EM -RE	0,17	0,05
électromagnétisme VLF	0,09	0,04
magnétisme	0,06	0,03
microgravimétrie	0,23	0,07

La comparaison des valeurs du tableau 7 et du tableau 8 permet alors de délimiter le domaine économique d'emploi de chaque méthode (planche 26), ceci en dehors de toute considération technique.

On s'aperçoit sur la planche 26 que :

- la combinaison des méthodes électrique et sismique n'est économiquement justifiable que dans des zones (ou cas) difficiles ($r_1 \leq 40\%$);

- la méthode sismique seule ne se justifie également qu'en zone difficile (jusqu'à $r_1 \leq 40\%$);

- la méthode électrique (ou électrique et magnétique combinée) est économiquement utilisable dans les zones difficiles ou moyennes ($r_1 \leq 60\%$);

- les méthodes électromagnétiques ou magnétiques sont justifiables dans tout le domaine pratique d'emploi des méthodes géophysiques ($r_1 \leq 70\%$);

- enfin, en supposant le personnel national entièrement formé, les domaines d'utilisation économique des méthodes sismique d'une part et électrique d'autre part seraient étendus jusqu'à des valeurs respectives de r_1 de 50 % et 70 %.

3.3. CHAMPS D'APPLICATION TECHNIQUE DES DIFFERENTES METHODES

Pour incomplets et disparates qu'ils soient, les résultats présentés en 2.2 et 2.3. permettent malgré tout de préciser dans les grandes lignes le domaine d'application de chaque méthode, ses performances, et les voies de recherche, en particulier dans l'optique de l'hydraulique villageoise.

3.3.1. Zones où la géophysique offre a priori peu d'intérêt

Dans certaines formations géologiques les taux de réussite à 1 m³/h obtenus sans faire appel à la géophysique sont de l'ordre de 70 à 90 %. Il s'agit :

- des schistes birrimiens sur la majeure partie de leur zone d'extension ;
- de certaines régions gréseuses (Mali sud notamment) ;
- de zones granitiques à fortes épaisseurs d'altération (sauf altérites dénoyées), notamment en zone forestière.

Dans ces régions, très particulières mais désormais bien cernées, une étude géophysique réalisée a priori n'offrirait d'intérêt que si l'on savait isoler, à l'avance, les secteurs difficiles où l'on risque de rencontrer les 10 à 30 % d'échecs prévisibles, afin d'y concentrer les moyens géophysiques ; tel est loin d'être le cas général.

3.3.2. Méthode électrique classique (sondages électriques, trainés, cartes de résistivité)

La méthode électrique classique actuellement la plus employée, et de loin, peut être utilisée dans tous les cas, compte tenu de sa grande profondeur de pénétration et de sa relative rapidité de mise en oeuvre.

Les renseignements qu'elle apporte concernent l'épaisseur, la nature et les hétérogénéités des terrains d'altération, mais ne semblent pas indiquer directement la "fracturation du socle". De ce fait, il est préférable d'utiliser cette méthode en association avec une autre, afin de déterminer avec plus de précision les emplacements favorables au forage.

3.3.3. Méthode sismique

Cette méthode est rarement employée seule en recherche d'eau dans les aquifères discontinus : elle est en effet plus lourde à mettre en oeuvre que la méthode électrique et ne permet pas de "dégrossir" rapidement un grand secteur.

Son utilisation pour la localisation de fractures aquifères dans le socle cristallin est de ce fait rare et réservée à des cas difficiles, ou à l'hydraulique urbaine.

3.3.4. Méthodes électriques et sismiques

Ces deux méthodes peuvent être utilisées conjointement :

La méthode électrique renseigne sur des anomalies de structure des terrain d'altération qui sont généralement en liaison avec la fracturation du socle sous jacent.

La méthode sismique permet elle, de préciser les profondeurs du socle trouvées par la méthode électrique et d'y localiser, éventuellement, les zones fracturées.

La lourdeur de mise en oeuvre de ces deux méthodes combinées tend cependant actuellement à les faire réserver à l'hydraulique urbaine et aux cas difficiles en hydraulique villageoise.

3.3.5. Méthode électrique pluridirectionnelle

Cette méthode qui est un cas particulier de mise en oeuvre de la méthode électrique permet de déterminer ponctuellement des directions d'anisotropie que l'on peut supposer liées à la fracturation du socle.

Utilisée en préliminaire à la méthode électrique classique, elle permet de définir des directions à donner aux profils électriques.

Elle est par conséquent utile lorsque, la photo interprétation n'ayant pas permis de mettre en évidence de linéaments, on ignore dans quelle direction tirer les profils. C'est le cas par exemple en présence d'un recouvrement dunaire épais masquant les structures, ou lorsque les linéaments sont flous (par exemple zones granitiques à fortes épaisseurs d'altération).

3.3.6. Méthode magnétique

Le domaine d'élection de cette méthode comprend toutes les zones injectées de dolérite, ou de roches basiques diverses.

Les filons de dolérite se marquent en effet sur les profils magnétiques par des anomalies pouvant atteindre plusieurs dizaines à plusieurs centaines de gammas au sein des roches encaissantes sur lesquelles les profils sont monotones.

Compte tenu de sa facilité de mise en oeuvre et de son efficacité, cette méthode peut être utilisée seule ou en association :

- seule, elle permet de délimiter les intrusions doléritiques (généralement stériles), soit pour localiser leurs épontes parfois aquifères (ex. pélites cambriennes), soit pour les éviter (ex. grès infracambriens du Mali).

- associée à une autre méthode (électrique, sismique, électromagnétique) elle peut intervenir alors au titre de premier dégrossissage (intrusions) ou localisation de fractures, par exemple dans des granites basiques.

3.3.7. Méthode électromagnétique EM-RE

Cette méthode s'applique bien lorsque le socle est à faible profondeur ; elle donne alors des résultats qualitatifs comparables à ceux du trainé électrique.

Son domaine d'élection est le granite à faible épaisseur d'altération qui constitue, de surcroît, une formation qui est difficile du point de vue hydrogéologique et où sont enregistrés les taux d'échec les plus élevés (≥ 70 %).

Cette méthode devrait théoriquement donner des résultats dans les grès infracambriens peu altérés, mais on ne dispose d'aucun exemple d'application à ce type de formation.

Les résultats seront cependant moins complets que ceux fournis par la méthode électrique, cette dernière donnant en plus (sondages électriques) des indications sur la stratigraphie (alternances schistes/grès).

La méthode électromagnétique qui paraît donner des anomalies nettes dans les schistes birrimiens ne semble pas plus utile, sur ces terrains, que les méthodes électriques classiques dans la mesure où, comme il a déjà été signalé, les taux de réussite enregistrés sans géophysique dans ces formations dépassent déjà couramment 70 % ; on pourrait toutefois la tester dans les secteurs, rares, où de très faibles épaisseurs d'altération (moins de 10 mètres) sont pressenties.

Enfin, la méthode électromagnétique EM-RE perd de son intérêt lorsque les épaisseurs d'altération conductrices deviennent supérieures à une trentaine de mètres (diminution du pouvoir de pénétration).

3.3.8. Méthode électromagnétique VLF

La méthode VLF a sensiblement le même domaine d'application que la méthode EM-RE : toutes les zones présentant de faibles épaisseurs d'altération ;

cependant, compte tenu de l'effet directionnel des ondes VLF reçues en Afrique de l'Ouest (à partir d'émetteurs placés en France, Grande Bretagne ou Canada), la méthode VLF ne s'applique de manière satisfaisante qu'à la recherche de linéaments fracturés dont la direction est située dans le quart Nord-Ouest.

3.3.9. Méthode gravimétrique

Cette méthode n'est jamais appliquée seule, mais associée à d'autres. Elle permet de préciser des grandes structures mais n'est pas adaptée à la recherche de fractures très étroites.

Sa grande profondeur de pénétration la rend théoriquement applicable partout.

Cependant compte tenu de l'importance des corrections topographiques, elle n'est pas conseillée en terrain accidenté où elle risquerait de devenir relativement lourde.

Son domaine d'application - très restreint actuellement - paraît devoir être limité à l'hydraulique urbaine.

Les possibilités de modélisation pour l'aide à l'interprétation en font une méthode qui pourrait être plus souvent envisagée.

3.4. STRATEGIE DE PROSPECTION

3.4.1. L'état actuel des connaissances ne permet pas de définir une stratégie optimale de prospection pour la recherche d'eau dans les aquifères discontinus : l'emploi des méthodes géophysiques pour l'implantation de forages villageois est en effet en évolution constante et en "expérimentation permanente" comme cela apparaît dans la présente étude et comme en témoignent les divers projets méthodologiques récents ou actuels en Afrique de l'ouest.

Cette évolution et notamment la recherche de méthodes plus légères et plus rapides, est commandée par la nécessité de s'adapter aux cadences rapides de forages introduites depuis une dizaine d'années en Afrique par la technique du marteau fond de trou, et l'emploi de pression d'air croissantes.

Dans ce contexte évolutif, les éléments de stratégie indiqués ci-dessous restent très généraux. Ils visent à :

- proposer quelques recommandations concernant les prospections actuellement pratiquées ;
- orienter la réflexion et la recherche en cours sur les différentes méthodes.

3.4.2. Pour définir une stratégie de prospection géophysique, quatre stades sont nécessaires :

3.4.2.1. premier stade : recueil, analyse et synthèse de toutes les données géologiques, hydrogéologiques et géophysiques concernant la zone du projet.

Cette phase comporte :

- l'examen des résultats des campagnes antérieures sur la zone du projet ou sur des régions voisines analogues ;
- l'examen des photos aériennes, photos satellites, cartes topographiques et cartes géologiques.

La synthèse de ces données doit aboutir à une zonéographie hydrogéologique, c'est-à-dire à la définition de zones homogènes à grande échelle permettant de séparer :

- a) les différentes formations géologiques (schistes, granites jeunes, granites anciens, gneiss, roches vertes, grès, pélites...) ;

b) les grands types de réseaux hydrographiques (surtout dans les régions de socle cristallin) ;

c) les variations d'épaisseurs d'altération que l'on peut pressentir d'après a) et b) ;

d) les particularités géologiques (injections de dolérite, bordures de bassin sédimentaire...).

3.4.2.2. Deuxième stade : détermination des contraintes propres au projet :

- fixation du débit minimum recherché en forage (1) ;

- distance maximum à respecter entre le forage et le village ;

- choix de la profondeur moyenne des forages dans chaque zone : ce paramètre peut être soit déduit de l'expérience des campagnes antérieures, soit imposé par le marché de forage, soit encore choisi en vue d'optimiser le coût des ouvrages d'exploitation (une profondeur moyenne plus faible et un taux d'échec plus fort pouvant être acceptés si ce choix entraîne une réduction du coût final des ouvrages, échecs inclus).

3.4.2.3. Troisième stade : choix de r 1 et r 2.

L'ensemble de ces éléments permet, à partir de l'expérience acquise en Afrique de l'ouest, d'estimer (cf. tableau 3) :

- un taux de réussite r 1 sans géophysique pour chaque zone. On devra tenir compte, s'il en existe, des zones ou villages isolés abandonnés lors de campagnes antérieures, et adopter pour ces sites un taux de réussite plus faible ;

- un objectif raisonnable de taux de réussite r 2 avec géophysique. Ce paramètre est généralement le moins bien connu. Il devra être estimé avec soin, en évitant de fixer un objectif trop ambitieux qui risquerait de ne pas être atteint et d'entraîner des dépenses inutiles de prospection géophysique (une augmentation de 10 à 20 points entre r 1 et r 2 est un objectif qui paraît raisonnable dans la plupart des cas, et déjà significatif sur le plan économique).

(1) Dans le cas où l'optique du projet est la recherche du débit maximum (hydraulique urbaine par exemple), on doit tout de même fixer un débit minimum d'abandon des forages : c'est ce paramètre que nous retenons pour la programmation.

Connaissant pour une zone donnée le coût moyen d'un forage négatif F^- , déduit du marché de forage (ou estimé), on obtient le montant maximal G que l'on peut attribuer par site aux études géophysiques en vue de réduire le coût des ouvrages :

$$G \leq F^- \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Se fixant enfin le nombre de sites n à étudier (totalité du projet, ou zone particulièrement difficile), on parvient ainsi à définir une masse financière $M = n G$ qui peut être attribuée à la prospection géophysique dans la zone considérée.

d) quatrième stade : optimisation et choix des méthodes

Le coût par site G ainsi calculé est alors comparé au coût de mise en oeuvre de chaque méthode et notamment de la ou des méthodes a priori les plus adaptées au problème spécifique de chaque zone.

- Si dans une zone donnée le coût par site G ainsi calculé est insuffisant pour utiliser la méthode géophysique pressentie (lors de l'estimation de r_2), on peut refaire le calcul pour cette zone en se basant sur une autre méthode géophysique en adoptant le taux de réussite r_2 qui lui correspond, compte tenu des conditions de la zone.

- On peut aussi chercher à équilibrer les masses financières au sein du projet en conservant les méthodes pressenties initialement, parce que a priori les plus adaptées ; ceci nécessite alors, du point de vue économique d'utiliser les méthodes les plus simples (si elles sont adaptées), ou de ne pas faire de géophysique sur les zones faciles, ce qui permet alors, en limitant l'emploi, de réserver les méthodes plus complexes, donc plus chères, aux régions ou au cas difficiles, voire au seul traitement des échecs.

On a donc intérêt à définir dès la conception du projet, une zonéographie aussi fine que possible dont la maille peut éventuellement descendre jusqu'au niveau du village.

3.4.3. Exemples de calcul

Plaçons nous par exemple dans le cas des grès infracambriens injectés de dolérite. Adoptons toujours la valeur $F^- = 1,5$ MFCFA.

* cas n° 1 : 100 villages sont à étudier. On cherche un débit minimum de 1 m³/h.

Les taux de réussite raisonnables déduits de l'expérience acquise, notamment au Mali, sont les suivants :

a) sans géophysique $r_1 = 50 \%$

b) avec la méthode magnétique seule $r_2 = 60 \%$

D'où (tableau 7) $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = 0,33$, ce qui conduit à :

$$G = 0,33 \times 1500000 = 495.000 \text{ FCFA}$$

L'ordre de grandeur du coût de mise en oeuvre de la méthode magnétique étant de 90.000 FCFA par site (tableau 6), on conclut que cette méthode est parfaitement rentable.

Si l'on fait le calcul à l'envers en partant du coût de mise en oeuvre de la méthode magnétique (90.000 FCFA), on s'aperçoit qu'elle est encore rentable si le taux de réussite final r'_2 est tel que :

$$\frac{1}{r'_2} \leq \frac{1}{r_1} - \frac{G}{F}$$

$$\text{soit } \frac{1}{r'_2} \leq \frac{1}{0,5} - \frac{0,09}{1,5}$$

$$\text{soit } r'_2 = 51,5 \% \text{ seulement !}$$

c) avec les méthodes électrique et magnétique combinées :

$$r_2 = 70 \%$$

D'où (tableau 7) $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = 0,57$, ce qui donne, pour G :

$$G = 0,57 \times 1500000 = 855000 \text{ FCFA.}$$

On s'aperçoit dans le tableau 6 que l'ordre de grandeur des coûts de mise en oeuvre de ces méthodes combinées est de 750.000 FCFA.

Leur justification serait donc, dans ce cas, assurée.

* cas n° 2 : 100 villages sont à étudier parmi lesquels 30 villages ont été abandonnés après échecs en forages au cours d'une campagne antérieure, on cherche toujours un débit minimum de 1 m³/h.

a) Pour les 70 villages inconnus, on a la même stratégie que précédemment.

Par exemple : r₁ = 50 %, r₂ = 70 %, méthodes électrique et magnétique justifiées.

b) Pour les 30 villages difficiles, les taux de réussite à prévoir sont plus faibles.

Par exemple : r₁ = 30 %
r₂ = 40 %

d'où (tableau 7) $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = 0,83$, et l'on obtient :

$$G = 0,83 \times 1.500.000 = 1.245.000 \text{ FCFA.}$$

On constate sur le tableau 6 que toutes les méthodes sont utilisables, sauf la méthode sismique seule pour étudier ces villages difficiles.

* cas n° 3 : 100 villages à étudier avec un objectif de débit minimum de 3 m³/h.

L'expérience acquise, notamment au Mali, montre que r₁ ≠ 30 % (taux de réussite à 3 m³/h).

Si l'on se fixe r₂ = 40 %, on trouve à nouveau G = 0,83 x 1.500.000 = 1.245.000 FCFA et toutes les méthodes sont théoriquement utilisables, sauf la méthode sismique seule.

Ces exemples, nous le répétons, sont donnés à titre purement démonstratif, y compris les valeurs des paramètres pris en compte.

Chaque projet doit refaire dans chaque cas son propre calcul à partir de l'expérience déjà acquise sur la zone d'action et de ses critères propres.

3.4.4. En conclusion, loin de définir "la stratégie" optimale et passe partout - qui assurément n'existe pas - la méthode ci-dessus décrite fournit à chacun un moyen simple et général, permettant de déterminer rapidement, dans un contexte géologique donné, l'éventail économiquement acceptable des méthodes géophysiques utilisables, et de définir la stratégie adaptée à chaque projet.

3.5. CONCLUSIONS, RECOMMANDATIONS ET VOIES DE RECHERCHE

3.5.1. Les points acquis

L'ensemble des méthodes géophysiques étudiées dans le présent ouvrage apportent des renseignements utiles sur la structure du sous-sol en milieu fissuré, qui permettent généralement :

- de réduire le taux d'échec en forage ;
- d'obtenir des débits plus importants (intéressants dans le cas de l'hydraulique urbaine notamment) ;
- de mieux maîtriser la profondeur à donner aux forages en cours de campagne.

Elle permettent en particulier :

a) de rechercher des structures fracturées masquées sur les photos aériennes, notamment :

- . à proximité immédiate des villages (moins de 200 m) dans la zone où la végétation a généralement complètement disparu et où les linéaments ne sont plus visibles. Ce point est fondamental en hydraulique villageoise ;
- . dans les régions où les linéaments sont flous et les taux d'échec cependant élevés (fortes épaisseurs d'altérites granitiques dénoyées par exemple) ;
- . dans les régions à fort recouvrement dunaire ;

b) de positionner précisément sur le terrain le passage d'un linéament vu sur les photos aériennes, et de trouver au sein de ce linéament la zone la plus favorable au forage ;

c) de prévoir la coupe géologique des terrains afin de mieux conduire la campagne de forages :

- . cote du socle dans les granites ;
- . alternances schistes/grès/quartzites dans les séries sédimentaires infracambriennes ;

d) de délimiter des zones a priori stériles afin de les éliminer des reconnaissances (massifs doléritiques, argilites au sein des séries gréseuses, socle granitique très proche ...)

Les recommandations que l'on peut faire au terme de la présente étude comprennent deux aspects essentiels :

- l'orientation des recherches méthodologiques à poursuivre, qu'il s'agisse des méthodes "nouvelles" ou "classiques" ;
- la formation du personnel national.

3.5.2. Développement des méthodes "nouvelles"

Il apparaît que l'un des apports essentiels de la géophysique qualitative soit de repérer au sol des "anomalies" a priori favorables dans les zones où l'hydrogéologue est démuné (pas de linéaments) où lorsque la précision des photos au 1/50.000 n'est plus suffisante (linéaments très étroits) : c'est souvent le cas en hydraulique villageoise lorsqu'on se place à proximité immédiate du village.

Parmi les méthodes que l'on peut qualifier de "nouvelles", en matière de recherche d'eau, on retiendra :

- la méthode magnétique très légère et efficace dans les zones injectées de roches magnétiques ;
- les méthodes électromagnétiques (EM-RE et VLF), légères aussi, qui donnent des résultats qualitatifs intéressants dans les zones de faible épaisseur d'altération (< 30 m) ;
- la méthode électrique pluridirectionnelle assortie de dispositifs rectangles pour les zones dépourvues de linéaments photos ;
- la méthode gravimétrique.

Il apparaît donc indispensable de poursuivre les expérimentations entreprises pour permettre :

- une analyse statistique des résultats obtenus en forages sur anomalies électromagnétiques ou magnétiques ;
- de préciser les modalités optimales de mise en oeuvre pour la méthode EM-RE (distance émetteur-récepteur, fréquences appropriées) ;
- d'améliorer l'interprétation quantitative pour la méthode magnétique, notamment dans le cas de filons de dolérite intrusifs (largeur des filons, pendage, profondeur de la tête du filon sous le sol ...).

Ces méthodes permettront indubitablement de réduire dans une certaine mesure le taux d'échec en forage, du moins dans les domaines où leur réponse est significative.

3.5.3. Amélioration des méthodes géophysiques en général

a) Pour améliorer encore les résultats, il est nécessaire de parvenir à une plus grande précision dans le choix de la position optimale des forages sur tel et tel type d'anomalie, c'est-à-dire d'étudier les structures plus en détail avant d'implanter les forages.

Or l'étude détaillée d'un gîte aquifère discontinu nécessite généralement l'emploi de plusieurs méthodes qualitatives et quantitatives avec des profondeurs d'investigation variées afin de préciser la structure par approximations successives, et de positionner le forage de manière optimale. Cette approche est cependant très coûteuse et doit de ce fait être réservée à la recherche de forts débits (hydraulique urbaine, petite irrigation ...) ou aux cas très difficiles de l'hydraulique villageoise (villages abandonnés après plusieurs échecs en forages).

En hydraulique villageoise et dans l'optique d'implanter des forages donnant 1 m³/h minimum à moins de 200 m des villages, on devra généralement se contenter dans la plupart des cas des méthodes qualitatives (trainé électrique, méthodes électromagnétiques, méthode électrique pluridirectionnelle, méthode magnétique). Celles-ci permettent de repérer des "anomalies" (dont l'expérience montre qu'elles sont fréquemment aquifères).

b) Le problème majeur qui subsiste actuellement pour toutes les méthodes qu'elles soient classiques ou nouvelles, reste celui de déterminer, sur l'anomalie, l'endroit le plus favorable à la réalisation du ou des forages positifs.

Des progrès importants restent à faire sur ce point. Ils nécessitent encore une importante réflexion qui devrait être axée dans les voies suivantes :

- une approche statistique (corrélation entre position du forage, débit et caractéristiques des anomalies) portant sur des "populations d'anomalies homogènes" aussi importantes que possible ;

- une amélioration des techniques de mise en oeuvre : par exemple, l'utilisation plus systématique de la double longueur de ligne, en trainé électrique, pour préciser le pendage des fractures ;

- une comparaison des structures aquifères suspectées par les méthodes qualitatives avec un certain nombre de structures "types" étudiées par plusieurs méthodes et reconnues par forages (positifs et négatifs).

c) Par conséquent, on exprimera ici deux souhaits :

- le premier est que soit donnée la plus large diffusion possible à tous les résultats acquis ou en cours d'acquisition dans ce domaine par les divers projets existants en Afrique ;

- le deuxième serait de normaliser autant que faire se peut un certain nombre d'opérations pour permettre une analyse statistique : nous pensons par exemple au trainé électrique qui est la méthode la plus utilisée actuellement, mais qui est exécutée avec des longueurs de ligne et des pas de mesures extrêmement variés.

Nous pensons qu'il serait utile de recommander, dans chaque cas, l'emploi de longueurs de ligne standard (par exemple AB 120 et AB 200) qui permettraient la comparaison directe entre les profils de diverses origines. Ceci n'excluerait naturellement pas la possibilité pour l'opérateur de choisir, en plus, une autre longueur de ligne mieux adaptée à son problème.

Seule une telle normalisation permettrait d'obtenir très rapidement (en une ou deux campagnes) plusieurs centaines de résultats statistiquement exploitables.

3.5.4. Formation du personnel

La formation de personnel technique à tous les niveaux est une voie indispensable au développement, dans tous les domaines.

Dans le cas particulier du développement de l'hydraulique villageoise, l'économie réalisable (50 % environ) sur le coût des méthodes géophysiques, lorsqu'elles sont mises en oeuvre par du personnel national convenablement formé et travaillant au même rythme, vient démontrer, s'il en était besoin, l'intérêt d'une telle formation qui devrait être considérée par les pays africains comme une priorité.

Dans un premier temps il apparaît donc souhaitable de former un grand nombre d'opérateurs géophysiciens, en allant des méthodes les plus simples aux méthodes les plus complexes, car la qualité des mesures de terrain et leur repérage topographique précis ont une influence primordiale sur les résultats obtenus et sur le positionnement optimal des forages.

Cette formation devrait durer de l'ordre de 2 à 5 mois pour les méthodes de mise en oeuvre simple (magnétisme, VLF, EM-RE), et de l'ordre de 2 à 3 ans pour les méthodes plus complexes (électrique, sismique et éventuellement gravimétrie).

Simultanément (ou dans un deuxième temps) la formation concernera des ingénieurs géophysiciens qui seront chargés par la suite de l'interprétation des mesures, notamment pour les méthodes électriques, sismiques et gravimétriques.

La formation de ces ingénieurs sera certainement plus longue compte tenu de la complexité de certaines opérations et du rôle essentiel de l'expérience dans les travaux d'interprétation.

DEROULEMENT ET RESULTATS DES TESTS EN HAUTE-VOLTA

ANNEXE

DEROULEMENT ET RESULTATS DES TESTS EN HAUTE-VOLTA1 - OBJECTIF DES TESTS

Il s'agit d'effectuer un début d'expérimentation de méthodes potentielles en faisant appel à des appareillages récents et/ou à des méthodes employées dans d'autres domaines et aisément vulgarisables. Les résultats seront comparés à ceux donnés par les méthodes classiques (électrique essentiellement).

Les méthodes retenues pour ces tests sont les suivantes :

- méthodes électriques (trainés et sondages électriques) permettant de déterminer :

- . l'épaisseur d'altération et sa nature,
- . la fracturation du socle.

- méthodes électriques pluridirectionnelles, permettant d'orienter les profils en fonction de la direction des anomalies (failles).

- méthode magnétique pouvant réagir en fonction des variations de pétrographie ou d'épaisseur d'altération, liées à des contacts géologiques ou à des failles.

- méthodes électromagnétiques :

- . V.L.F. pour étudier les zones à faible épaisseur d'altération,
- . Max-Min, pouvant donner des anomalies comparables à celles de la méthode électrique.

TABLEAU 9.

SITES RETENUS ET DONNES PREEXISTANTES

SITE	Nb. forages	Distance entre forages extrêmes	Distance moyenne entre forages	Nb. forages +	Nb. forages -	GEOPHYSIQUE		Roche	Prof. socle (m)	Linéaments	Structure	Observations
						E	E.M					
YAOURA-MERA (Projet Yatenga-Comoé)	5	Y 740 M 460	300	2 (dont 1 aban- donné)	3			granite	6/46	peu nets	Cuvette d'al- tération, avec remontée de socle et N.S. profond.	Possibilité forage par Projet à MERA.
RAPADAMA R 8	4	180	80	2	2	+		granite	8	oui	Socle à faible profondeur al- térites à la limite du dénoyage.	
RAPADAMA R 2	3	250	80/150	1	2	+		roches vertes	20/26	oui	Forte épaisseur d'altération probablement dénoyée.	
GOURCY	3	680	300	2	1	+	+	contact schistes- granite	23/42	oui	Forte épais- seur d'alté- ration noyée.	
	3	500	250	1	2	+	+					

- microgravimétrie pour étudier les variations de densité en relation avec des contacts géologiques, ou liées aux variations rapides de l'épaisseur d'altération.

- sismique réfraction, pour préciser la cote du socle ou localiser le passage des fractures.

Les principales caractéristiques des sites sont résumées dans le tableau 9 . Les critères de choix des sites ont été les suivants :

- structures géologiques variées,
- nombreux forages existants et rapprochés, dont des forages négatifs et des forages positifs,
- absence d'infrastructure gênante pour la réalisation des profils géophysiques (bâtiments, pompes, clôtures...),
- qualité des documents hydrogéologiques et géophysiques.

2. PROGRAMME DES MESURES PROPOSEES INITIALEMENT SUR CHAQUE SITE

2.1 - SITE DE YAOUA-MERA

2.1.1 - Objectifs

Cinq forages ont été réalisés par le Projet Yatenga-Comoé, dont 2 sont positifs, mais un seul (YF 2 à Yaoua) tubé et crépiné pour l'exploitation, le deuxième (YF 0) ayant été abandonné par suite d'incidents techniques au moment de sa réalisation.

Le village de MERA manque toujours d'eau et des forages complémentaires pourraient être réalisés par le Projet, immédiatement après la réalisation de l'étude géophysique proposée ici.

Il s'agit d'étudier une cuvette d'altération dans les granites se caractérisant par :

- une forte épaisseur d'altération (30 à 42 mètres) ;
- un niveau statique profond (35 m au YF 2) si bien que l'altération est largement dénoyée ;
- une remontée du socle très rapide au Nord ;
- Les deux forages positifs sont situés dans un secteur où l'altération est très épaisse (plus de 40 m) et noyée sur quelques mètres à sa base, les forages négatifs étant tous en situation d'altération dénoyée, épaisse ou non.

Dans ce contexte, on doit rechercher pour le village de MERA :

- soit une zone où l'épaisseur d'altération dépasse 40 mètres ;
- soit une fracture majeure dans le socle sous-jacent, ces deux structures pouvant être combinées.

2.1.2 - Programme proposé

a) dix sondages électriques en deux profils :

- P1 passant par YF 1 et YF 2,
- P3 passant par MF 2 et MF 3.

b) trois profils électromagnétiques :

- P 1 (idem),
- P 2 passant par YF 2 et MF 3,
- P 3 (idem).

c) deux dispositifs pluridirectionnels centrés sur YF 2 et MF 3.

d) trainés électriques avec $MN = 10$ m, sur 1 à 3 km selon les résultats de c). Un de ces trainés devra être effectué sur le profil P 2 de toute façon.

e) 1 à 2 bases sismiques pour déterminer la cote du socle et éventuellement la position du niveau statique.

f) profils magnétiques sur les anomalies électriques.

g) profils gravimétriques sur la zone de plongement du socle entre YF 1 et YF 0.

2.2 - SITE DE GOURCY

2.2.1 - Objectifs

Il s'agit d'étudier une zone de contact schistes/granites à proximité d'un important linéament Nord-Sud repéré sur la photo "satellite". Le site se caractérise en outre par une forte épaisseur d'altération (22 à 42 m) noyée.

2.2.2 - Programme proposé

On étudiera la zone des forages SG 2, SG 3, SG 4 et G 101.

a) Réalisation de 5 trainés électriques Est-Ouest de 500 m de longueur environ passant respectivement par les forages SG 2, SG 4, SG 3 (ou SG 6), G 101, ainsi qu'entre SG 2 et SG 4 pour le dernier profil, et recoupant largement le "linéament satellite" à l'Est.

b) 5 profils électromagnétiques doublant les profils précédents.

c) Profils magnétiques sur les anomalies repérées en électrique au passage de l'accident en particulier, en le traversant sur toute sa largeur.

d) 3 dispositifs pluridirectionnels sur les forages SG 2, SG 3 (ou SG 6) et G 101.

e) 3 sondages électriques sur les trois forages précédents.

2.3 - SITE DE RAPADAMA R 8

2.3.1 - Objectifs

Il s'agit de comparer les réponses de différentes méthodes sur une fracture dans le socle granitique à faible profondeur, avec un niveau statique proche du sol.

Un trainé électrique, réalisé antérieurement à la campagne de forages, avait mis en évidence des anomalies, peu contrastées cependant : ces résultats seront réinterprétés après réalisation des présents tests.

2.3.2 - Programme proposé

a) Deux dispositifs pluridirectionnels centrés sur les forages SR 11 (positif) et SR 10 (négatif).

b) 4 sondages électriques sur les forages SR 11, SR 35, SR 10, SR 40.

c) Selon les directions mises en évidence en a), faire deux profils VLF dans deux directions perpendiculaires.

d) Faire des profils magnétiques en travers de l'accident principal défini en a).

2.4 - SITE DE RAPADAMA R 2

2.4.1 - Objectifs

Il s'agit de comparer les réponses de différentes méthodes sur une fracture dans des roches vertes sous une couverture d'altération épaisse (20 à 26 mètres) probablement dénoyée.

Deux trainés électriques, réalisés antérieurement à la campagne de forages, avaient mis en évidence des anomalies, peu contrastées cependant : ces résultats seront réinterprétés après réalisation des présents tests.

2.4.2 - Programme proposé

a) 3 dispositifs pluridirectionnels centrés sur les forages SR 5 (négatif) et SR 7 (positif) voisins.

b) 3 sondages électriques sur les forages SR 5, SR 6, SR 7.

c) Trainés électriques et électromagnétiques dans la direction indiquée en a) : soit 2 à 3 profils parallèles distincts espacés de l'ordre de 50 à 100 mètres, soit un dispositif rectangle avec AB fixe pour les 3 profils (50 à 100 m entre profils).

d) Profils magnétiques sur les anomalies électriques au passage de failles (accidents) mises en évidence par a).

3 - ESSAIS REALISES ET RESULTATS OBTENUS EN HAUTE VOLTA

3.1 - ESSAIS REALISES

Deux missions ont été effectuées, la première du 12 Mai au 13 Juin, la seconde du 23 Juin au 7 Juillet. Le détail des travaux réalisés est donné ci-dessous.

3.1.1 - YAOUA-MERA

a) - YAOUA : profil P1 orienté Nord-Sud

- 7 sondages électriques (SE 6 à SE13) dont 3 en croix
- 1 trainé électrique (AB = 150 m, MN = 10 m, pas de 10 m)
- 1 profil électromagnétique MAX-MIN (4 fréquences-Ecartement E.R = 100 m - Pas de mesure = 10 m.)
- 1 profil microgravimétrique entre SE8 et SE10
- 5 dispositifs pluridirectionnels C1 à C4 et C6
- 2 dispositifs rectangles (AB = 300 m, MN = 10 m, pas = 5 m) comprenant 12 profils P1 à P12
- 3 bases sismiques superposées sur le profil gravimétrique
- un sondage électrique SE 11 et un dispositif pluridirectionnel C3 réalisé sur le forage YF0.

b) - MERA : profil P3 orienté Nord-Sud

- 5 sondages électriques SE1 à SE5
- 1 trainé électrique entre le SE3 et le SE5 en AB = 200 m - MN = 10 m, pas de mesure = 10 m.
- 1 profil électromagnétique Max Min (4 fréquences. Ecartement E-R = 100 m - Pas de 10 m)

- 1 profil magnétique superposé au trainé électrique
- 1 dispositif pluridirectionnel C5
- 1 base sismique

3.1.2 - GOURCY

a) - 5 profils Est Ouest P1 à P5 comportant :

- 5 trainés électriques (AB=200 m, MN=20 m, pas de 20 m)
- 5 profils électromagnétiques Max Min, (4 fréquences. Ecartement E-R = 100 m, pas de 20 m)
- 3 profils magnétiques sur les P1, P3 et P5.

b) - En outre ont été réalisés :

- Sur le profil P1 :

- . 1 sondage électrique, situé sur le forage G101
- . 1 dispositif pluridirectionnel C1
- . 1 dispositif rectangle (AB=300 m, MN=10 m, pas de 5 m) comprenant 6 profils P1 à P6.

- Sur le profil P2 :

- . 1 sondage électrique (situé sur le forage SG6)
- . 1 dispositif pluridirectionnel C2
- . 1 dispositif rectangle (AB=300 m, MN=10 m, pas de 5 m) comprenant 6 profils P1 à P6

- Sur le profil P3 :

- . 1 sondage électrique au droit du forage SG4
- . 1 dispositif pluridirectionnel C4

- Sur le profil P5

- . 1 sondage électrique au droit du forage SG2
- . 1 dispositif pluridirectionnel C3
- . 1 dispositif rectangle (AB=300 m, MN=10 m, pas de 5 m)
comprenant 6 profils.

3.1.3 - RAPADAMA R8a) - Sur le forage SR 11 (positif)

- . 1 sondage électrique SE2
- . 1 dispositif pluridirectionnel C5
- . 1 dispositif rectangle (AB=300 m, MN=10 m, pas de mesure 5 m)
comprenant 5 profils P1 à P5
- . 3 profils de trainé (P3-P4-P5)
- . 3 profils VLF EM 16 (P3-P4-P5) - Pas de 10 m
- . 3 profils VLF EM 16 R (P3-P4-P5) - Pas de 10 m
- . 1 profil magnétique (P3)

b) - Sur le forage SR 35 (négatif)

- . 1 sondage électrique SE3

c) - Sur le forage SR 10 (négatif)

- . 2 sondages électriques en croix (SE1a et SE1b)
- . 1 dispositif pluridirectionnel C4
- . 1 profil VLF EM 16 (P9 - Pas de mesure = 10 m)
- . 1 profil magnétique (P9 - Pas de mesure = 10 m)

d) - Sur le forage SR40 (positif)

- . 1 sondage électrique (SE4)
- . 1 dispositif pluridirectionnel C6
- . 3 profils EM16 (P10, P11, P12 - Pas de mesure = 10 m)
- . 1 profil magnétique P10.

3.1.4 - RAPADAMA R2a) - Sur le forage SR7 (positif)

- . 1 sondage électrique SE1
- . 1 dispositif pluridirectionnel C1
- . 1 dispositif rectangle AB 300 - MN10, pas de 5 m comprenant 7 profils P3 à P9

b) - Sur le forage SR5 (négatif)

- . 1 sondage électrique SE2
- . 1 dispositif pluridirectionnel C2

c) - Sur le forage SR6 (négatif)

- . 1 sondage électrique SE3
- . 1 dispositif pluridirectionnel C3

d) - En outre deux trainés électriques (AB = 170m, MN 10, pas de mesure 10 m)

- . P1 passant par le SR7 et SR5
- . P2 passant par le SR5 et SR6

3.2 - RESULTATS OBTENUS3.2.1 - Zone de YAOUA-MERA

Les tests réalisés dans la région de YAOUA et MERA concernent une zone où six forages avaient été implantés sans l'aide des méthodes géophysiques. Un seul de ces ouvrages, situé à la limite Sud Est du village de YAOUA (YF2) est productif. (voir plan de situation - Pl. 27)

SITES DE YAQUA - MERA

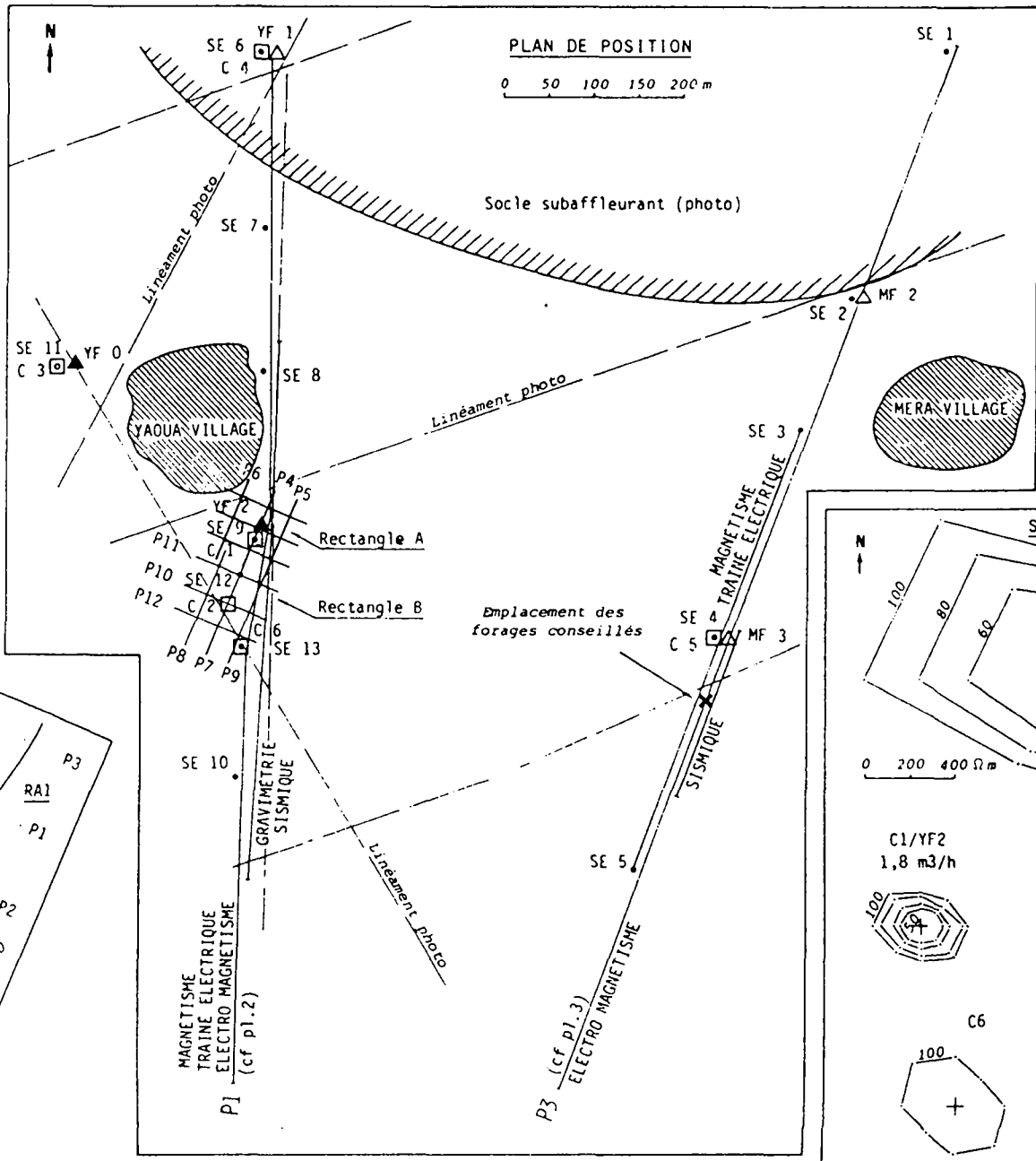
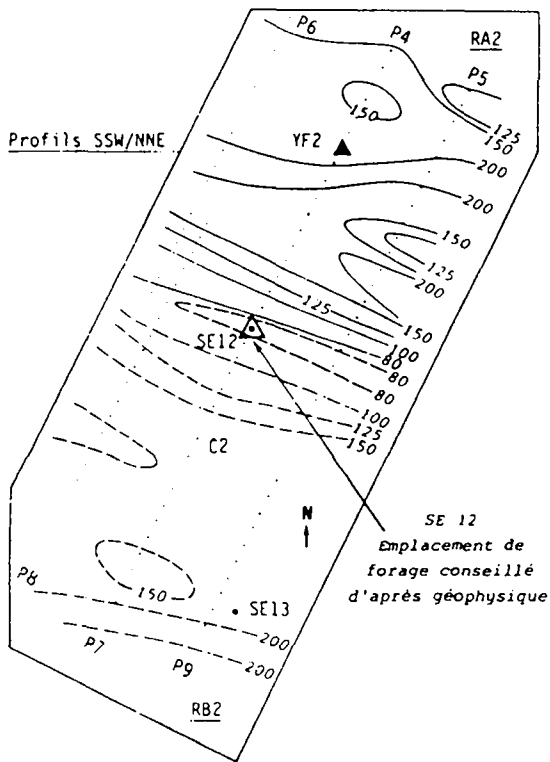
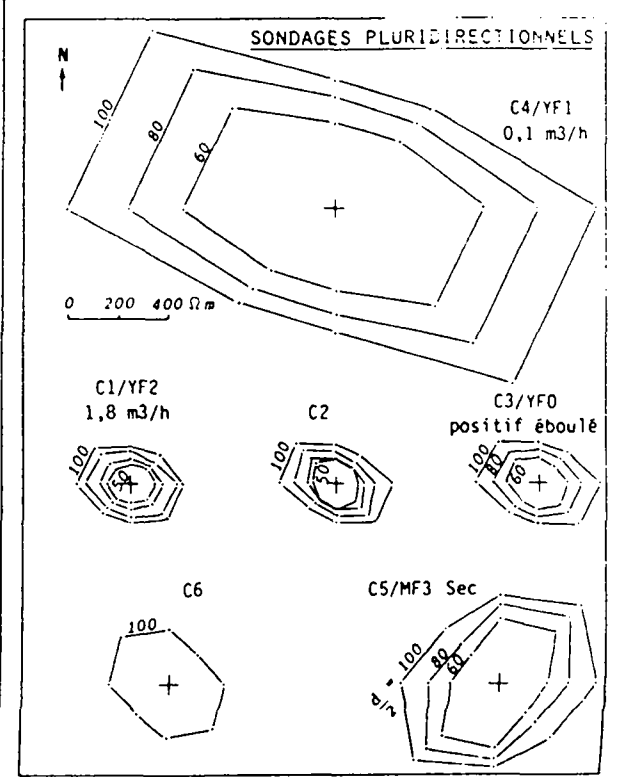
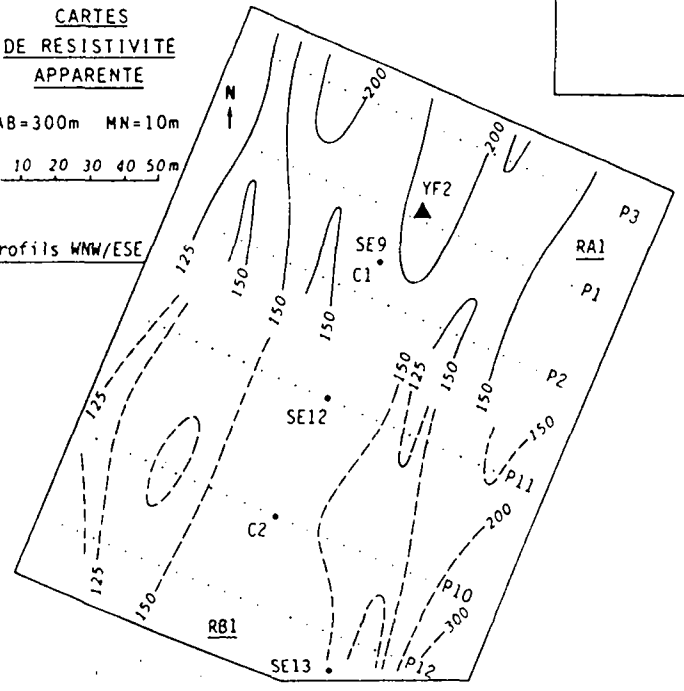


Photo interprétation réalisée avant implantation des foranes



Les informations recueillies à la suite des forages montrent que le substratum granitique peu profond vers le Nord (9 mètres au MF2) s'approfondit sérieusement vers le Sud pour atteindre 42 mètres au YF2, 32 mètres MF3 et 36 mètres au YFo.

La demande en eau demeurant permanente dans cette région et afin d'implanter judicieusement de nouveaux forages, il devenait indispensable de mieux connaître la structure du sous-sol. Pour aboutir à ce but, toute la panoplie des méthodes géophysiques a été utilisée. Ces essais devraient permettre pour l'avenir d'appliquer les méthodes adéquates en les appliquant en fonction des conditions géologiques locales.

Deux profils ont donc été étudiés appelés P1 et P3 concernant respectivement les villages de YAOUA et de MERA. La planche 1 représente la position de ces profils et celles des forages.

A - ZONE DE YAOUA (Planche 28)

Le profil P1 a été réalisé de façon à passer par les forages YF1, au Nord et YF2 au Sud Est du village pour permettre ainsi un calage correct de la géophysique. L'implantation du forage YF2 a été décidée sur le passage d'un linéament vu par photo aérienne.

A1. Analyse des résultats

A1.1 - Dispositifs pluridirectionnels

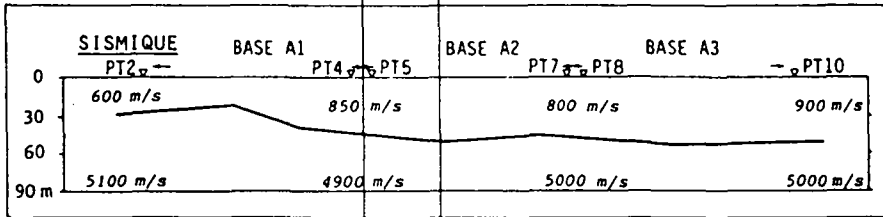
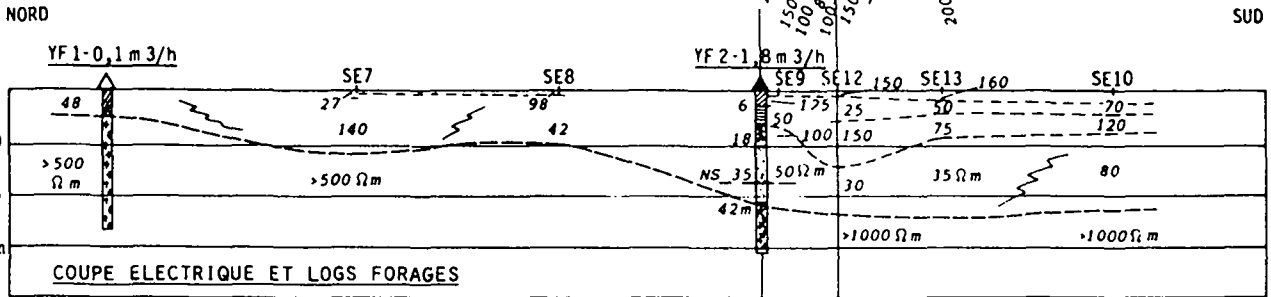
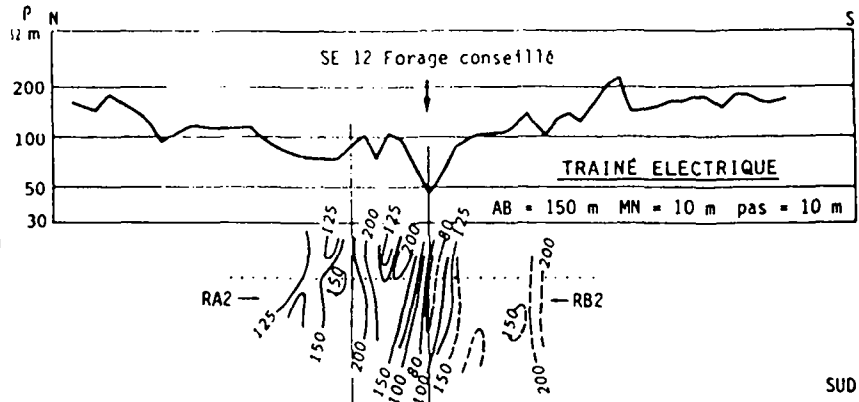
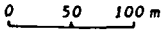
Quatre dispositifs CARRE ont été effectués sur des forages positif et négatif, deux sur des zones anomaliques. Ils signalent tous :

SITE DE YAOUA

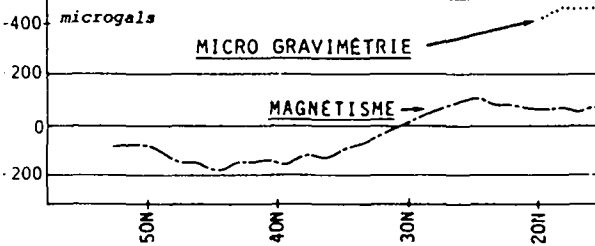
PROFIL P1

Méthodes : .électrique (trainé,SE)
.sismique
.microgravimétrique
.magnétique
.électro magnétique (max-min)

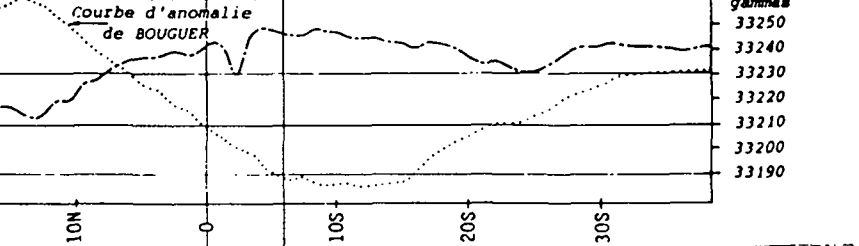
Echelle horizontale



Echelle gravimétrie

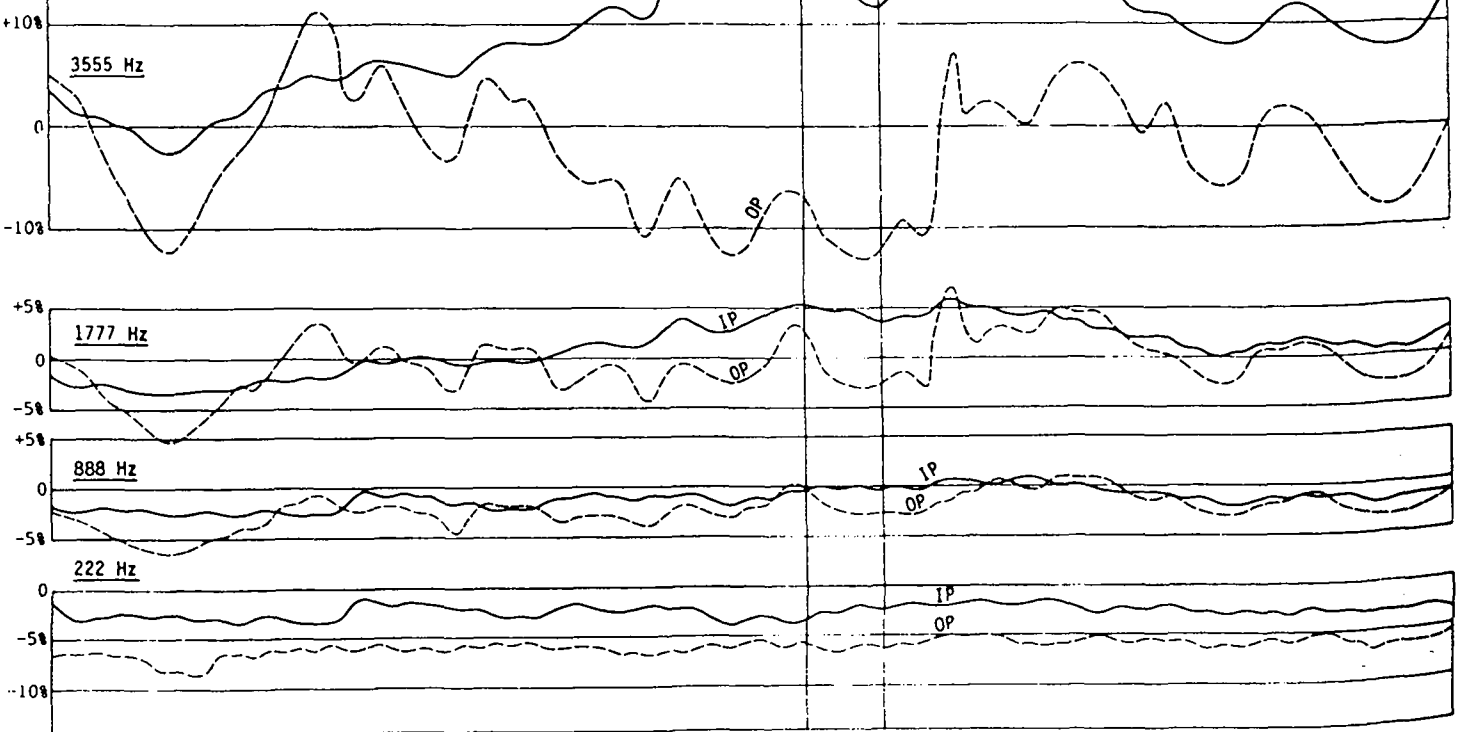


Echelle magnétisme



ELECTRO MAGNETISME (max-min)

Emetteur Récepteur 4 fréquences
100 m



- une anisotropie moyenne sur les zones d'altération épaisse, et très forte sur faible épaisseur d'altération.
- les variations des valeurs de résistivités moyennes apparentes sont très importantes
- la direction des structures est identique sur toute la zone, sauf au forage MF3 où elle tourne de 100 grades.

Le site caractérise bien les réponses du dispositif CARRE. Les paramètres obtenus montrent qu'en présence d'une anisotropie régulière sur une même région, il est important de tenir compte des valeurs de résistivités apparentes et des directions d'anisotropie.

A1.2 - Les rectangles

Deux rectangles (RA-1,2, RB-1,2) ont été réalisés sur le site de YAOUA, le premier centré sur le forage YF2, le second au sud-est de celui-ci, avec une large zone de recouvrement des profils.

- RECTANGLES A

. RA1. Les valeurs de la résistivité apparente varient faiblement. Les anomalies observées sont bien perpendiculaires à l'anisotropie déterminée par le dispositif CARRE.

Le forage a la particularité d'être implanté sur l'anomalie résistante.

. RA2. Cette carte montre des anomalies d'amplitudes plus importantes qu'au RA1. Une forte anomalie conductrice s'amorce au Sud des profils.

Mission

YAOUA

Date

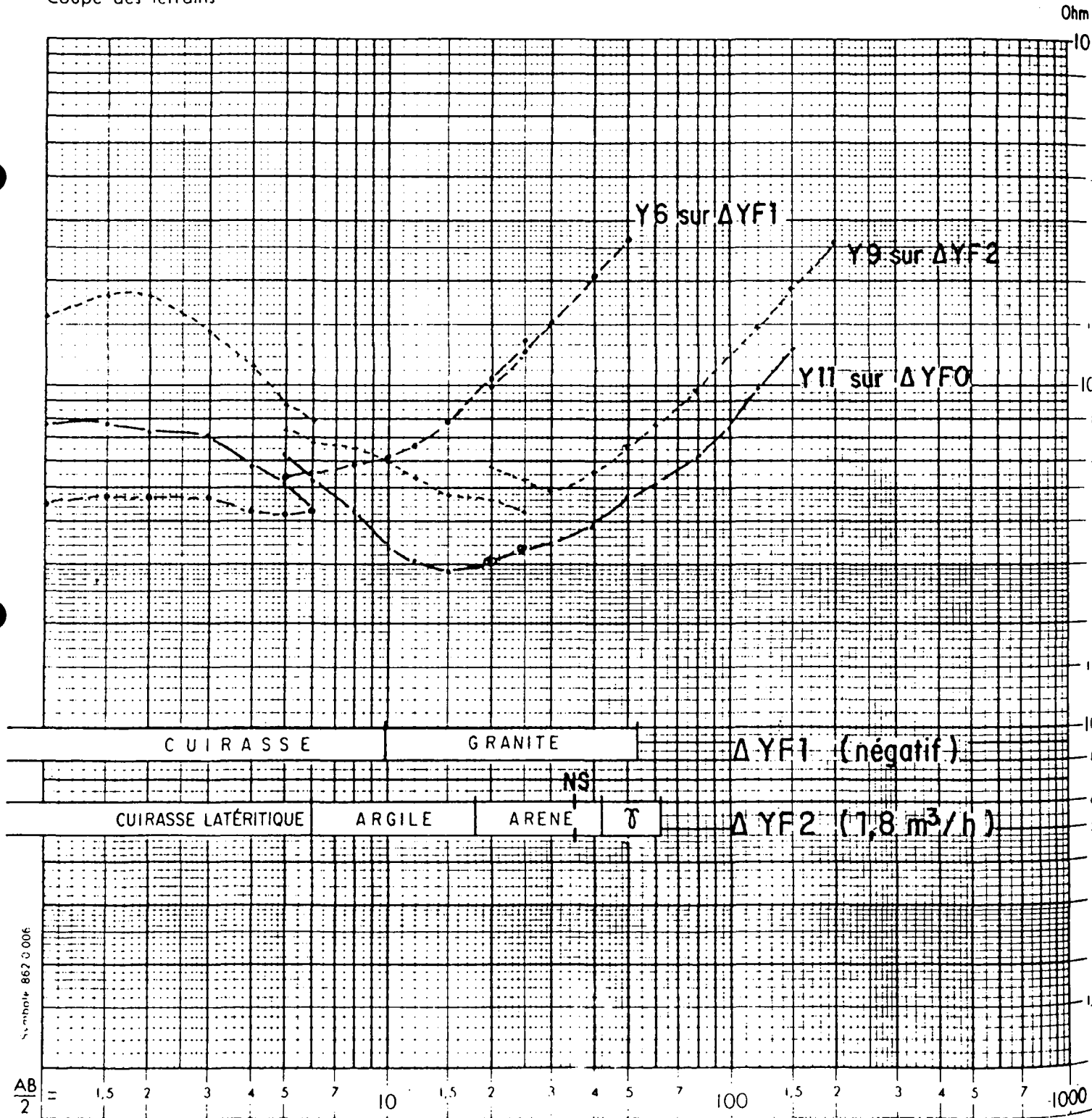
1983

Interprétation

Azimut de AB

Cote de surface

Coupe des terrains



Le forage est proche d'une anomalie conductrice.

Le forage YF2 correspond aux valeurs de résistivité suivantes :

	RA1	RA2
YF2	208 ohm.m	180 ohm.m

- RECTANGLES B

. RB-1. Nous obtenons une carte de résistivité semblable à la carte RA1, ce qui peut s'expliquer par des structures assez homogènes. Ces cartes confirment la direction 25 grades obtenue par le dispositif CARRE.

. RB-2. Le rectangle montre la bonne corrélation avec les valeurs de la résistivité obtenues par RA2.

Le tracé d'une carte unique (RA2 et RB2) positionne parfaitement l'accident conducteur qui affecte avec la même importance les 3 profils. Cette anomalie mérite un contrôle par une investigation verticale.

A1.3 - Méthode du sondage électrique (pl. 29)

Sept sondages électriques ont été réalisés le long du profil P1. Ceux-ci ont permis l'établissement d'une "coupe électrique" que l'on peut corréler ensuite avec la coupe géologique déduite des forages.

Cette coupe montre bien l'approfondissement du socle du Nord vers le Sud. Ainsi le socle qui se trouve à 10 mètres au SE n° 6, serait à 23 m au SE7, et à 21 m au SE8 pour atteindre 42 mètres au forage YF2 et une cinquantaine aux SE 12, 13 et 10.

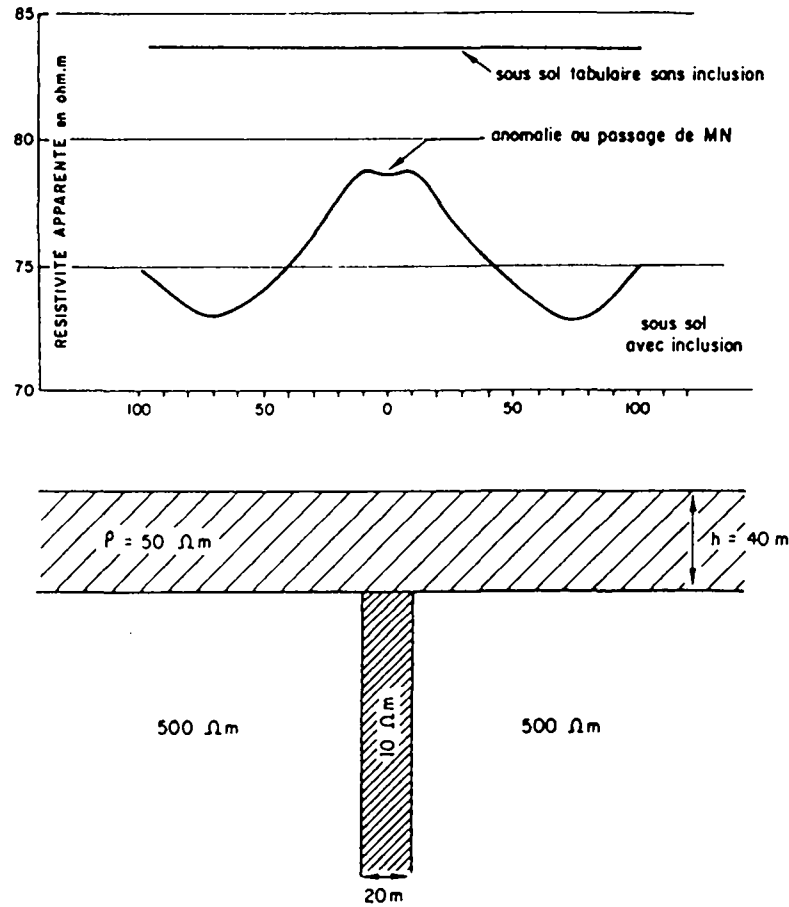
Les résultats d'une telle coupe sont suffisants dans un premier temps pour avoir une idée relativement précise de la "structure" (épaisseur d'altération et allure du toit du socle sain) d'une zone assez étendue, et donc de décider de l'emploi d'autres méthodes complémentaires.

A) TRAINÉ ÉLECTRIQUE

MODELE MATHÉMATIQUE

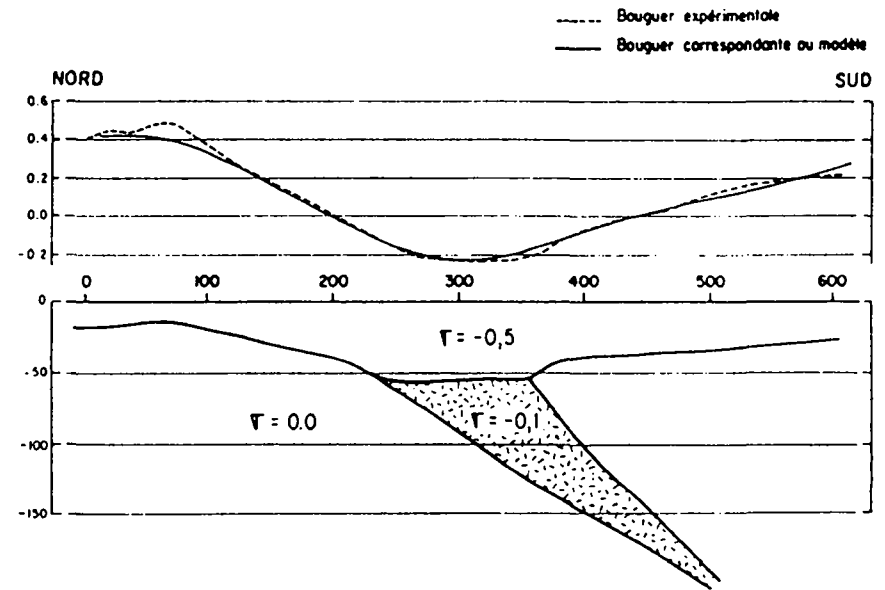
AB = 150 m

MN = 10 m



B) MODELE GRAVIMÉTRIQUE
DU SITE DE YAOUA

(Profil P1)



A1.4 - Méthode du trainé électrique (pl. 28)

La courbe obtenue entre les points 22 Nord et 34 Sud montre des résistivités relativement hautes vers le Nord et vers le Sud. Les valeurs sont supérieures à 100 ohm.m jusqu'au point 8N. D'après les sondages électriques, ces résistivités sont en relation avec l'existence d'un socle peu profond.

Puis les valeurs s'abaissent jusqu'à un niveau de 70 ohm.m (atteint de 1 à 5 Nord).

On observe ensuite vers le Sud, deux anomalies :

- une faible en 2 Sud (et sur 1 seul point),
- une plus intense et large d'une vingtaine de mètres, le minimum se situant au droit du SE12.

Nous retrouvons ensuite vers le Sud des valeurs supérieures à 100 ohm.m (palier vers 150 ohm.m à partir de 19 S). Le SE n° 10 montre que le recouvrement y est plus épais et aussi plus résistant que vers le centre du profil.

Les SE et le trainé sont donc deux méthodes complémentaires, l'une permettant d'avoir une idée de la structure de la région, l'autre de mettre en évidence des variations latérales qui peuvent être interprétées à l'aide des S.E. qui permettent de leur donner une signification.

On a calculé à l'aide de l'ordinateur les valeurs de la résistivité apparente au dessus d'une structure théorique (planche 30 A) pouvant se rapprocher de celle de YAOUA. On observe surtout que l'inclusion verticale ne se marque sur les profils que par une très faible anomalie au passage de MN, mais qu'elle pourrait se faire sentir plus fortement au passage des sources A et B. Ceci est dû à la forte épaisseur de recouvrement conducteur. Ce genre de modélisation demande beaucoup de temps-machine pour arriver à une précision correcte, et n'est pas envisageable pour une exploitation courante.

A1.5 - Méthode sismique

Trois bases sismiques ont été réalisées, chacune étant composée de 12 points d'enregistrement (sismo) équidistants de 15 m. La longueur totale étudiée est donc de 510 m. La base A1 est vers le nord du profil, A3 vers le Sud. L'embranchement entre A1 et A2 se situe au niveau du forage YF2.

La présence d'une couche rapide en surface complique l'interprétation des données.

La coupe sismique fait ressortir un recouvrement lent à 700/900 mètres/seconde et un socle rapide de vitesse égale environ à 5000 mètres/seconde.

L'approfondissement du socle est visible au niveau de la base A1 mais on voit surtout l'existence d'un seuil vers le point 11 Nord.

On observe aussi que l'allure du toit du socle profond est constitué par des segments de plans faiblement inclinés.

A1.6 - Méthode magnétique

Les mesures du champ magnétique total réalisées à l'aide d'un magnétomètre à protons sur 1200 mètres de profil permettent de tracer une courbe sur laquelle on observe :

- des paliers horizontaux assez larges
- des anomalies ponctuelles + étroites.

Les paliers correspondraient à des niveaux différents de profondeur du socle, les valeurs les plus faibles indiquant un socle peu profond.

Les anomalies étroites et négatives par rapport au niveau du palier seraient dues,

- soit à des blocs de socle étroits et surélevés,
- soit à la présence de filons de roches plus magnétiques telles que dolérite...

On peut donc voir sur ce profil :

- 1°) - un compartiment profond qui irait du point 0 à l'extrémité sud du profil, puis vers le nord deux gradins,
- 2°) - une anomalie type filon centrée sur le point 3 Sud
 - une anomalie relativement large et peu intense située entre les points 20 Sud et 30 Sud. Elle pourrait indiquer l'existence d'un bloc relativement élevé ou d'un filon profond.

A1.7 - Méthode microgravimétrique

Cette méthode permet de mettre en évidence des zones qui, dans un contexte régional, sont anormales parce qu'elles présentent soit des défauts, soit des excès de masse.

Le profil réalisé ici qui s'étend des points 21N au point 41S montre clairement une anomalie négative vers le centre, le maximum se situant entre les points 6 Sud et 16 Sud.

L'anomalie de Bouguer calculée avec une densité de 2,7 atteint 75 centièmes de milligals par rapport aux valeurs des points situés au nord.

Cette anomalie négative signifie que le socle s'enfonce vers le sud et qu'il est recouvert par des formations plus légères ($d \leq 2,0$).

Vers le sud, l'anomalie diminue, soit à cause d'une remontée du socle, soit en raison de l'existence dans le recouvrement de formations plus denses (boules de granite par exemple). D'ailleurs il est à noter que le niveau non anomalique sud est inférieur à celui du Nord.

L'interprétation quantitative de l'anomalie de Bouguer (Pl. 30 B) fait clairement ressortir (compte tenu des densités utilisées) l'allure du toit du socle sain. Cependant le seul effet de l'épaississement de l'altération n'est pas suffisant pour justifier l'amplitude de l'anomalie négative. Le modèle montre qu'il est indispensable d'introduire, à l'intérieur du socle, une zone légèrement moins dense (- 0,1) que celui-ci. Celle-ci pourrait représenter un léger changement de faciès de ce dernier, soit une variation de ses caractéristiques mécaniques (zone plus fissurée par exemple).

Dans un cas comme celui-ci, on note que l'apport de la gravimétrie est intéressant car elle fournit une indication (qui si elle est vérifiée risque d'être importante pour une recherche d'eau) qu'elle est la seule à percevoir.

A1.8 - Méthode électromagnétique

Cette méthode doit permettre de mettre en évidence la présence de conducteur étroit se situant à l'intérieur de terrains encaissants résistants. Elle est d'autant plus efficace que le recouvrement est peu épais et peu conducteur. On peut dire qu'aucune anomalie significative n'apparaît si ce n'est au point 50 Nord et en fréquence 3555 HZ, mais due probablement à une structure de très superficielle.

Il en serait de même en 32 Sud, 46 Sud et 5S. Ce sont de toute façon de très mauvais conducteurs.

En 222 Hz, les valeurs "In Phase" et "Out Phase" sont relativement constantes. Les variations sont de l'ordre de grandeur du "bruit". L'"In Phase" en 888 Hz montre des paliers pouvant être refléter quelques variations de profondeur du toit du socle.

Il faut noter surtout l'influence de la résistivité du recouvrement qui se marque par l'écartement des courbes IP et OP. Ainsi en 3555 Hz, on remarque à partir du point 22N l'écartement progressif et rapide des courbes vers le sud puis un changement en diminution vers 10 Sud.

L'interprétation des courbes dans les hautes fréquences est délicate à cause des perturbations nombreuses dues à des causes superficielles.

A2 - Comparaisons et corrélations entre les méthodes

Les anomalies conductrices vues en trainé au niveau du SE 12 (point 6S) et en 2 Sud, pourraient se "voir" en MAX-MIN en 1777 Hz et 3555 Hz. Celles-ci sont difficiles à positionner (séparation de 40 m et câble de 100 mètres).

Ces anomalies correspondraient d'autre part, à l'anomalie MAG vue en 3 Sud et à quelques valeurs plus basses centrées en 6S et 8S.

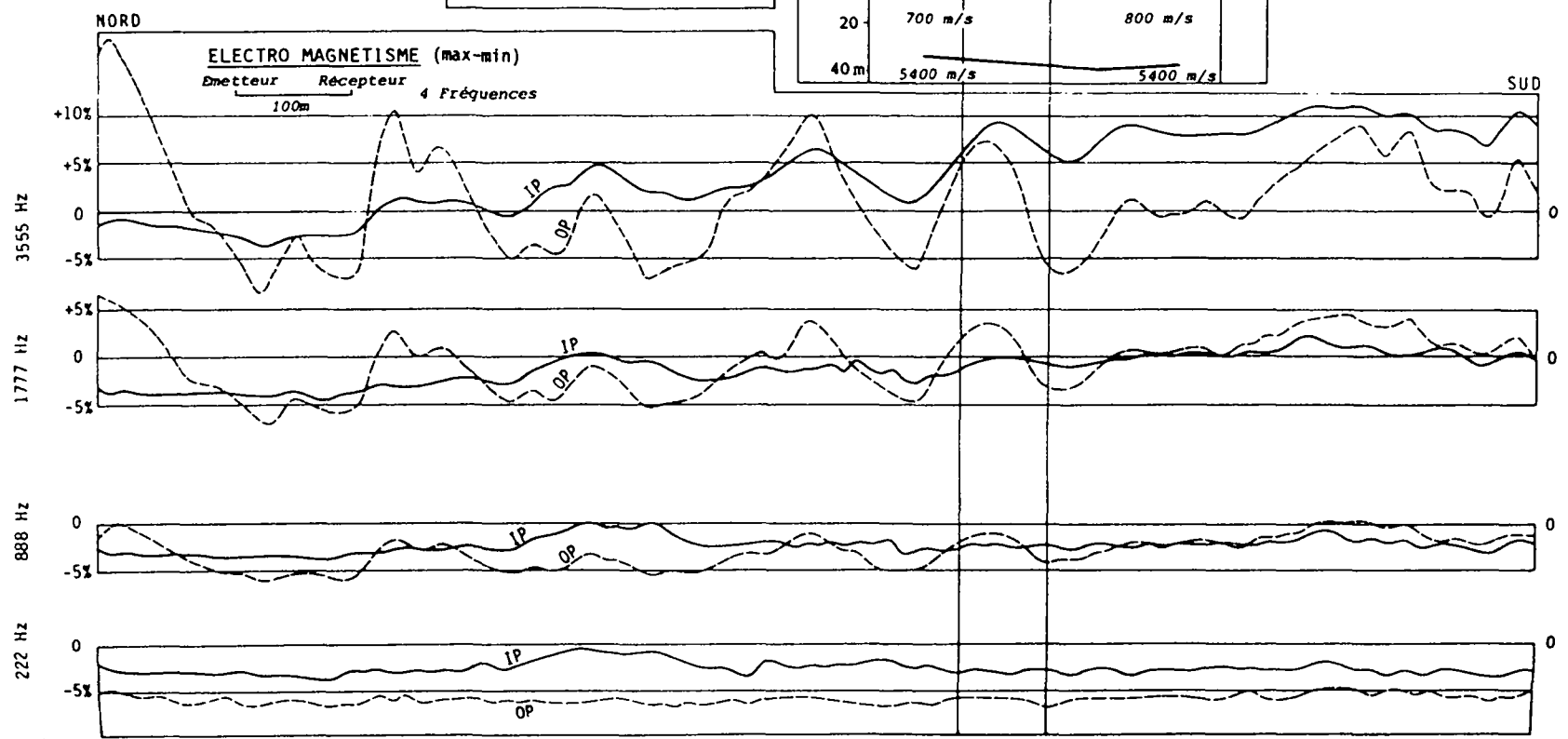
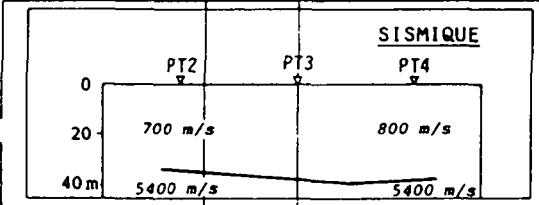
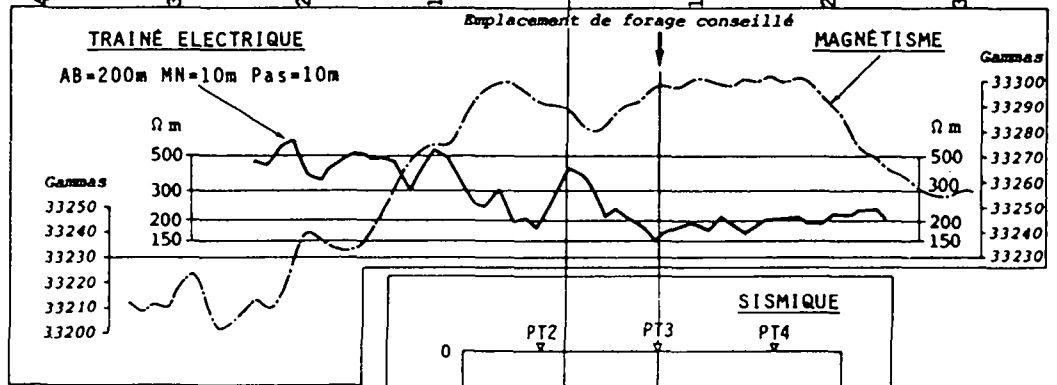
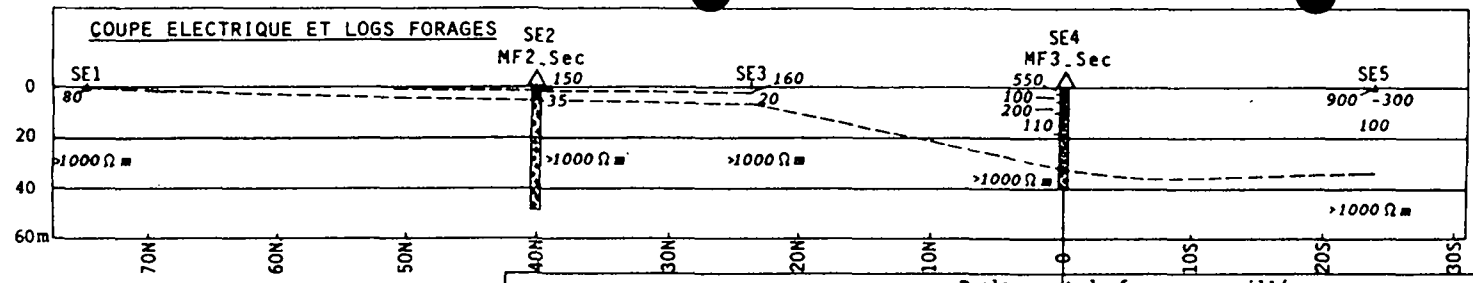
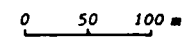
L'anomalie magnétique relativement importante centrée en 25S, qui ne se marque par rien de bien particulier en trainé, pourrait, si l'on admet qu'elle est due à un filon de roches vertes type dolérite (roche à susceptibilité magnétique supérieure à celle du granite) expliquer le renflement de la courbe de l'anomalie de Bouguer situé entre 16 Sud et 24 Sud, car la roche est plus dense qu'un granite. L'électromagnétisme ne montre pas de bons conducteurs au niveau de ce filon.

SITE DE MERA

PROFIL P3

Méthodes: .électrique(trainé)
 .sismique
 .magnétique
 .électro magnétique(max-min)

Echelle horizontale



B - ZONE DE MERA (Planche 31)

Les mêmes méthodes, sauf la gravimétrie, ont été appliquées sur le profil P3 de MERA passant par les forages MF2 et MF3. Le forage MF3 sert de point de base pour la numérotation des points de mesure sur le profil.

La structure déduite des logs des deux forages montre comme à YAOUA un enfoncement du socle granitique du Nord vers le Sud. Il est à 6 mètres de profondeur au MF2 et à 32 mètres au MF3.

B1. Résultats

B1.1 - Méthode des sondages électriques (planches 31 et 32)

La coupe électrique réalisée après l'analyse des diagrammes des SE est tout à fait représentative de l'allure du socle.

Elle montre parfaitement le plongement du toit du niveau de résistivité supérieure à 1000 ohm mètre correspondant au granite.

B1.2 - Méthode du trainé électrique

Un trainé de 500 mètres de long a été réalisé entre les points 24 Nord et 25 Sud. La longueur du AB était de 200 mètres, celle du MN de 10 mètres et le pas de progression de 10 mètres.

Du point 24 Nord au point 9 Nord, on observe un palier où les résistivités apparentes sont de l'ordre de 500 ohm.m. La résistivité apparente sur le SE n° 3 situé au 24 Nord est de 600 ohm mètre pour la même longueur de AB, et la profondeur du socle est estimée en ce point à 8 mètres. On peut donc extrapoler en disant que ce palier indiquerait la présence du socle à faible profondeur.

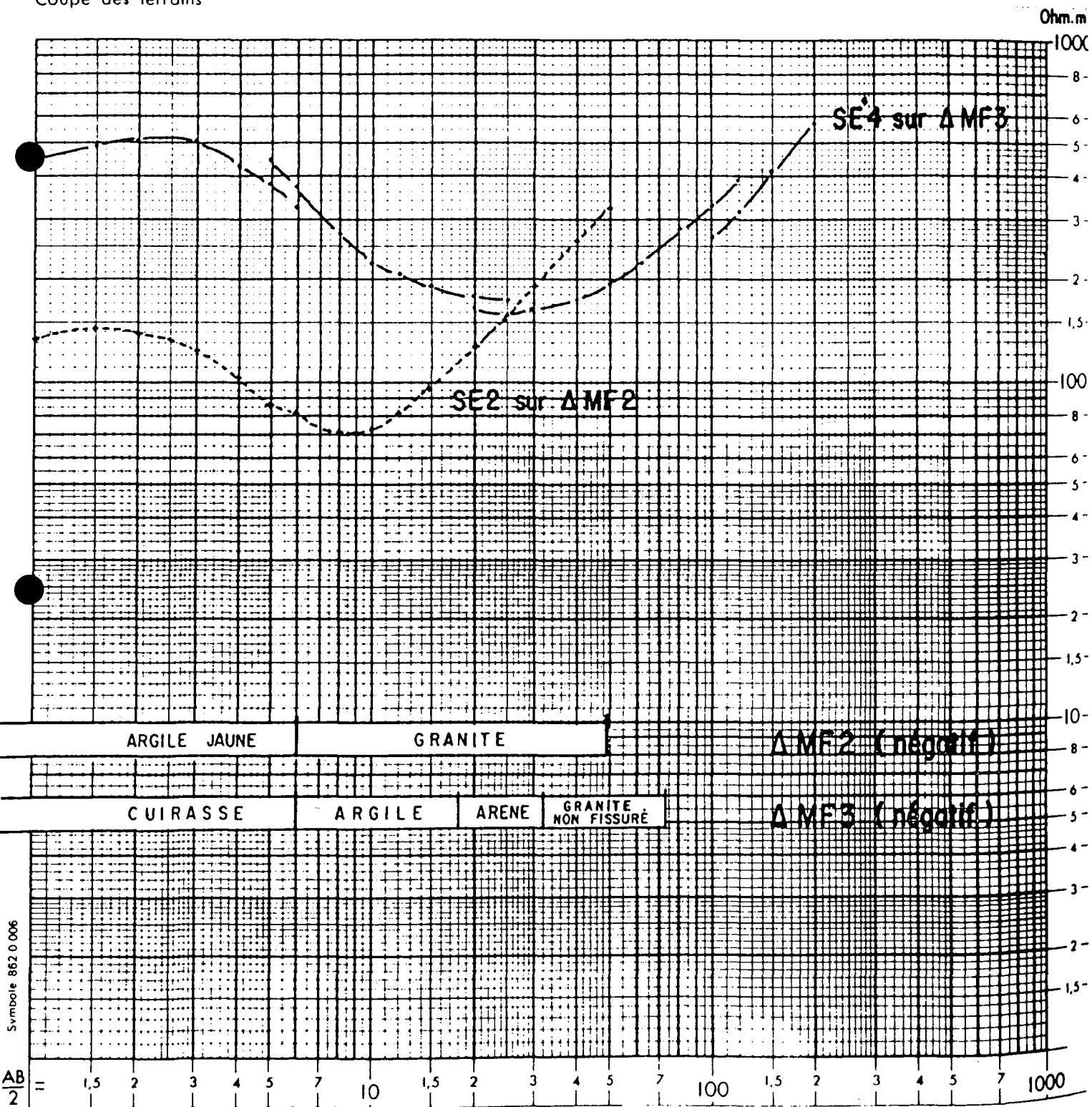
Mission
Date

MERA
1983

Interprétation

Azimet de AB
Cote de surface

Coupe des terrains



Les résistivités baissent ensuite brutalement sur une distance de 20 mètres jusqu'à 250 ohm.m, puis demeurent comprises entre 180 et 230 ohm.m jusqu'au bout du profil. Ceci serait lié à l'épaisseur importante du recouvrement.

Il apparait sur ce niveau régulier une anomalie positive (à 400 ohm mètre) entre les points 1 Nord et 3 Sud. Le forage MF3 se trouve exactement sur cette anomalie.

B1.3 - Méthode sismique

L'unique base sismique tirée sur ce profil passe par le forage MF3.

Elle est en accord parfait avec les profondeurs vues en forage et en "électrique".

Le toit du granite semble relativement horizontal. Les dromochroniques ne montrant aucune anomalie dans le substratum.

B1.4 - Magnétisme

La courbe obtenue le long du profil P3 présente la forme d'une cloche à sommet plat. Ce palier subhorizontal se situe à une valeur de 33300 gammas et s'étend du point 6 Nord à 19 Sud.

Vers le sud les valeurs s'abaissent vers un nouveau palier à 33250 gammas, atteint au point 28 Sud.

Vers le Nord, les valeurs diminuent aussi mais moins régulièrement en présentant une succession de paliers et de redents. Elles atteignent un palier moyen à 33 210 gammas au point 24 Nord (au droit du SE n° 3).

Ces larges variations pourraient être en relation avec un compartimentage du socle. Vers le Nord, des anomalies beaucoup plus ponctuelles type filon se superposeraient à chaque contact entre deux compartiments.

Une anomalie négative assez large (de 4 Nord à 6 Sud) apparait dans le palier haut. Elle est du type corps magnétique infini vers le bas. Sa largeur peut laisser penser que nous sommes en présence de plusieurs corps, leur positionnement devenant ainsi très aléatoire.

Le forage MF3 est implanté sur cette anomalie complexe.

B1.5 - Electro-magnétisme

L'appareillage MAX-MIN a été utilisé sur ce profil avec un écartement émetteur - récepteur égal à 100 mètres.

Les courbes IP en fréquence 222 Hz et 888 Hz sont absolument plates, les valeurs ne variant que de quelques fractions de %.

En 1777 et 3555 Hz, deux faibles anomalies apparaissent de part et d'autre du forage (vers 4/5 NORD et 8 SUD.)

B2 - Comparaisons et corrélations entre les méthodes

L'utilisation du trainé électrique a permis de mettre en évidence l'existence d'un élément résistant isolé dans un ensemble de résistivités basses. On sait par les SE qui ont été réalisés auparavant que ces basse résistivités observées sont dues à une forte épaisseur de formations conductrices au-dessus du socle.

L'observation de la courbe "MAG" montre au même endroit sur le profil, l'existence d'une anomalie négative de 20 gammas causée probablement par un corps à susceptibilité magnétique plus forte que le socle encaissant.

Cette coïncidence entre les deux phénomènes conduit à penser que l'on a peut être affaire à un bloc étroit de socle (ou plusieurs si l'on regarde le trainé) ou bien à un filon de roches plus basiques que le granite.

Il est à noter que la coupe du forage indique seulement du granite sous le recouvrement.

La sismique de son côté, ne voit pas de pointements de socle à ce niveau, mais cette méthode n'est pas à MERA dans les meilleures conditions d'exploitation.

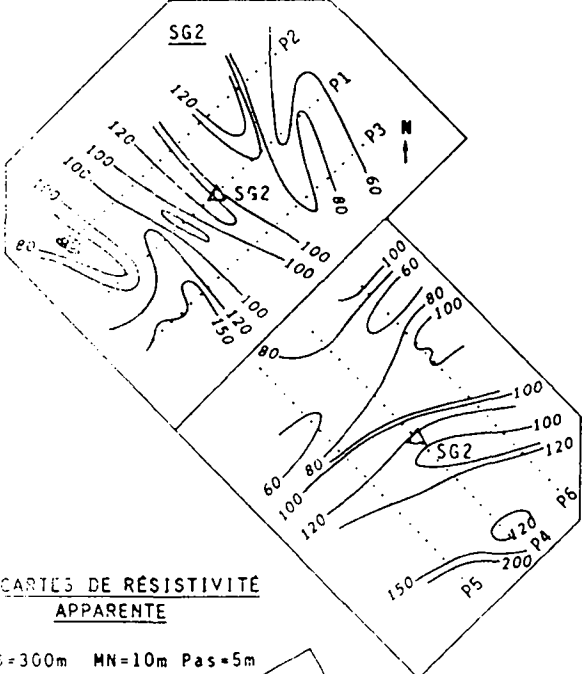
Les deux faibles anomalies montrées en électromagnétisme indiqueraient l'existence de deux corps conducteurs, ceux-ci pouvant peut-être correspondre à des épontes conductrices autour du filon ou un remplissage de faille de part et d'autre d'un bloc résistant.

3.2.2 - ZONE de GOURCY (Pl. 33, 34, 35)

Le sous-sol de cette zone est connu grâce à de nombreux forages implantés à la suite de mesures géophysiques.

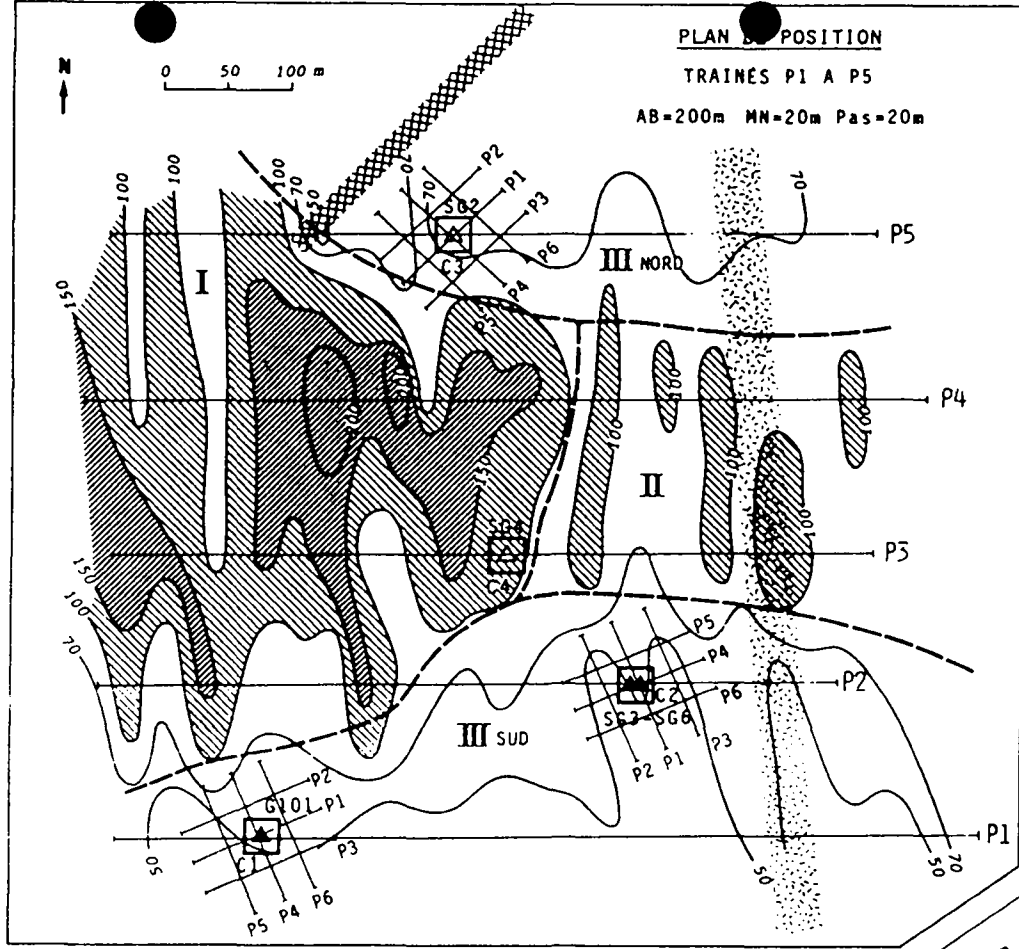
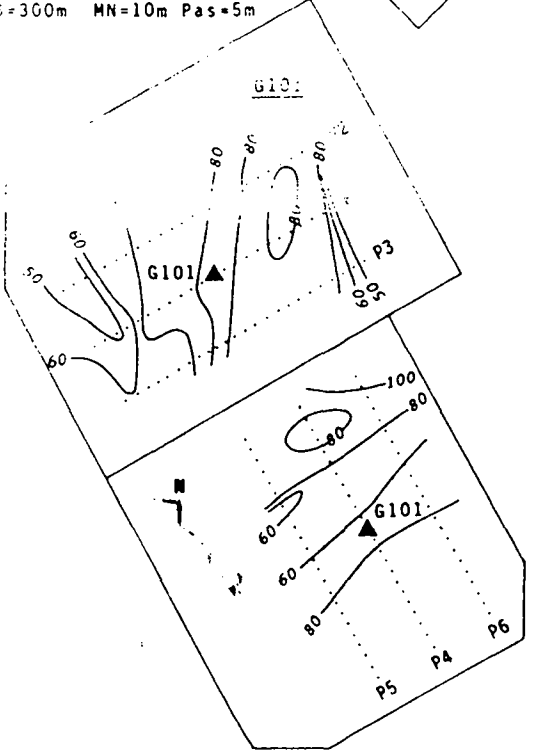
Sous un recouvrement plus ou moins épais, on rencontre des micaschistes souvent noirs et des granito gneiss. Nous sommes donc dans un contexte métamorphique où l'on peut trouver tous les termes de passage de schistes à granite.

Cinq profils parallèles longs de 500 mètres ont été testés par les méthodes électriques (SE, trainé), magnétiques et électromagnétiques (MAX-MIN). Leur représentation est figurée sur les planches n° 33 et 35.



CARTES DE RÉSISTIVITÉ APPARENTE

AB=300m MN=10m Pas=5m



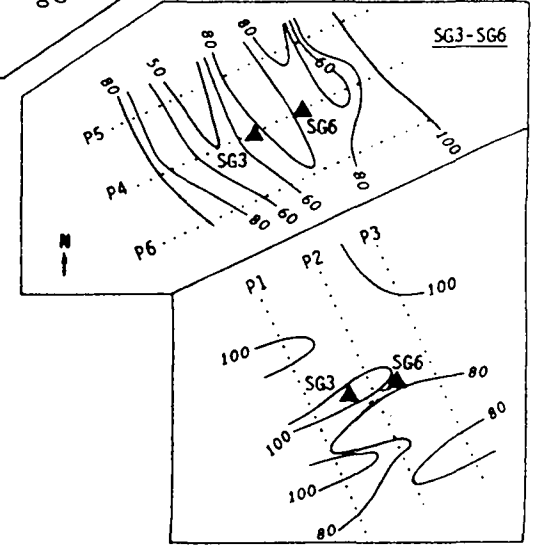
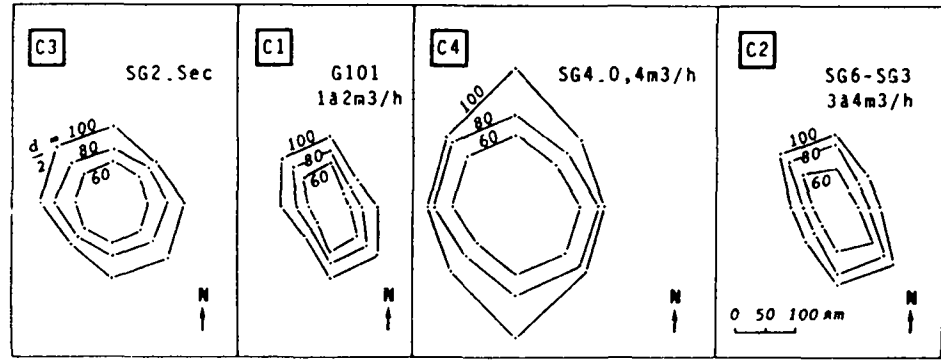
PLAN DE POSITION TRAINES P1 A P5
AB=200m MN=20m Pas=20m

SITE DE GOURCY
CARTES DE RÉSISTIVITÉ

- Résistivité apparente > 150 Ωm
- Résistivité apparente entre 100 et 150 Ωm
- Linéament satellite (5°W)
- Linéament photo (45°E)
- Domaine I : Granite
- Domaine II : Intermédiaire
- Domaine III : Schistes

Echelle des cartes de résistivité
0 20 40 60 80 100 m

SONDAGES PLURIDIRECTIONNELS



RESULTATS OBTENUSA - Dispositifs pluridirectionnels :

Les dispositifs CARRE signalent :

- Anisotropie : - importante aux SG6, 3 et G101.
 -- faible aux SG2 et SG4.
- Direction d'anisotropie : 75 gr aux SG6, SG3 et G101
 50 gr aux SG2 et SG4.

Le SG4 indique une direction de 100 gr pour la plus grande valeur du côté du carré.

B - Les Rectangles :

- SG6 - SG3 : R1 perpendiculaire à la direction de l'anisotropie signale une décroissance régulière de résistivité vers le 175 gr.

R2 parallèle à la direction de l'anisotropie montre deux accidents d'orientation 160-360 gr dont les minimums ne sont pas situés sur les forages.

Les deux forages positionnés sur le profil P4 sont implantés dissymétriquement sur les deux accidents :

SG6 à la rupture de pente	(4,5 m3/h)
SG3 sur le sommet	(3,4 m3/h)

- G101 : R1. Les valeurs de résistivité apparente sont très monotones, et décroissent régulièrement vers le 175 gr.

R2. Ne montre pas d'anomalie caractéristique sauf une à l'extrémité Sud-Ouest des profils P1 et P2.

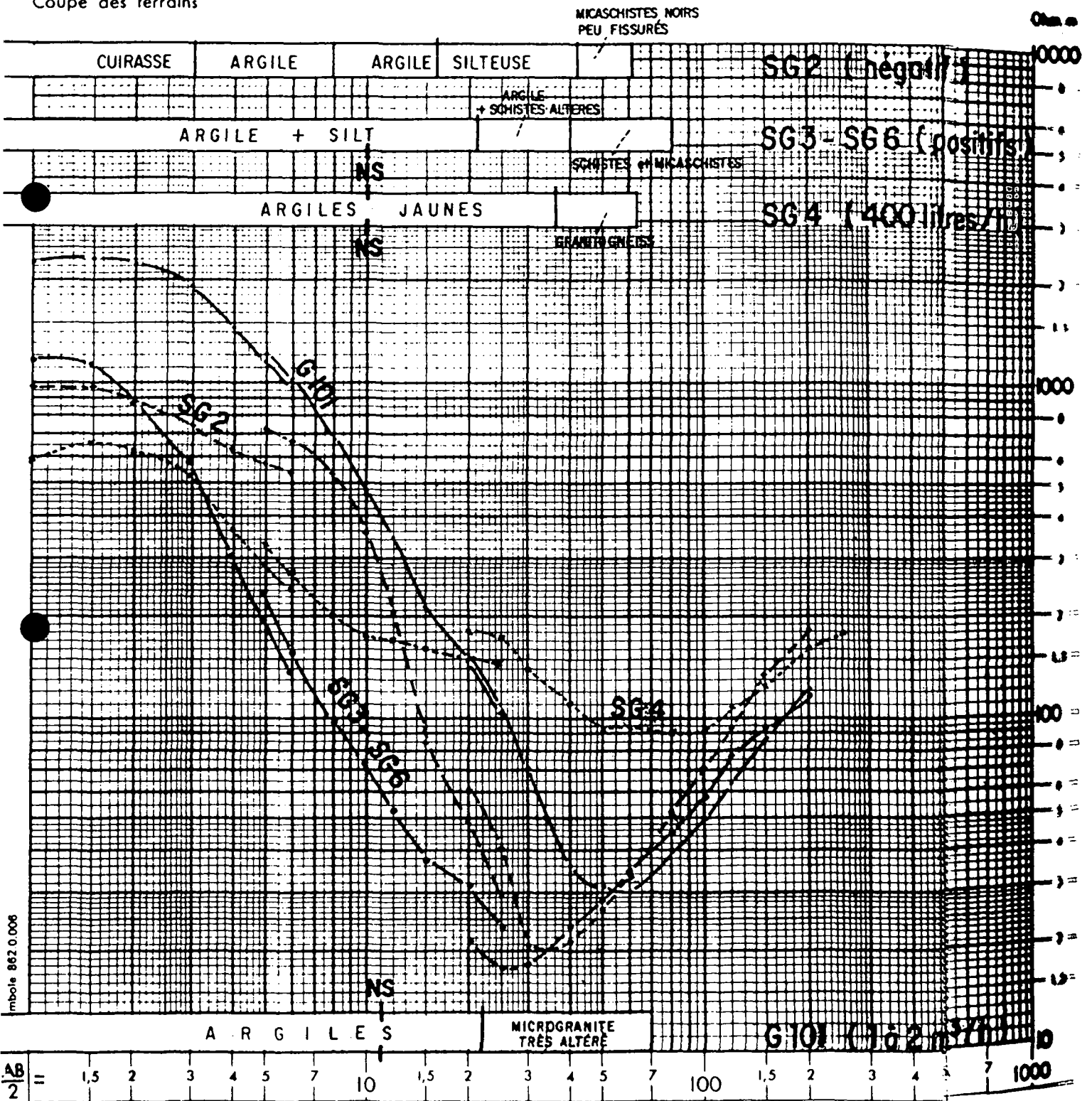
Mission
Date

GOURCY 1983

Interprétation :

Azimut de AB
Cote de surface

Coupe des terrains



Le forage G101 n'est pas positionné sur un point particulier.

	R1	R2
G101	86 ohm.m	76 ohm.m

- SG2 : R1 signale deux accidents conducteurs et de bonne amplitude. Le forage SG2 est situé à 10 m au Nord-Ouest du plus proche.

R2 présente quatre accidents conducteurs dont le point d'intersection serait au Sud-Est de la zone prospectée.

Le forage est positionné sur un point résistant.

	R1	R2
SG2	110 ohm.m	120 ohm.m

C - Sondages électriques (planche 34)

Quatre sondages électriques ont été déroulés au droit des forages, chacun portant le numéro du forage. Leur disposition ne permet pas de tracer une coupe électrique.

Ils montrent surtout la présence d'argiles d'altération très conductrices (environ 10 ohm.m) surmontant les micaschistes sur les forages G101, SG3-SG6 et SG2.

Le SG4 montre une couverture plus épaisse et aussi plus résistante (30 à 50 ohm.m). Le forage a rencontré en profondeur des granitogneiss.

Les remontées finales de SE ne permettent pas de faire la distinction entre granite ou schistes.

LOGS FORAGES

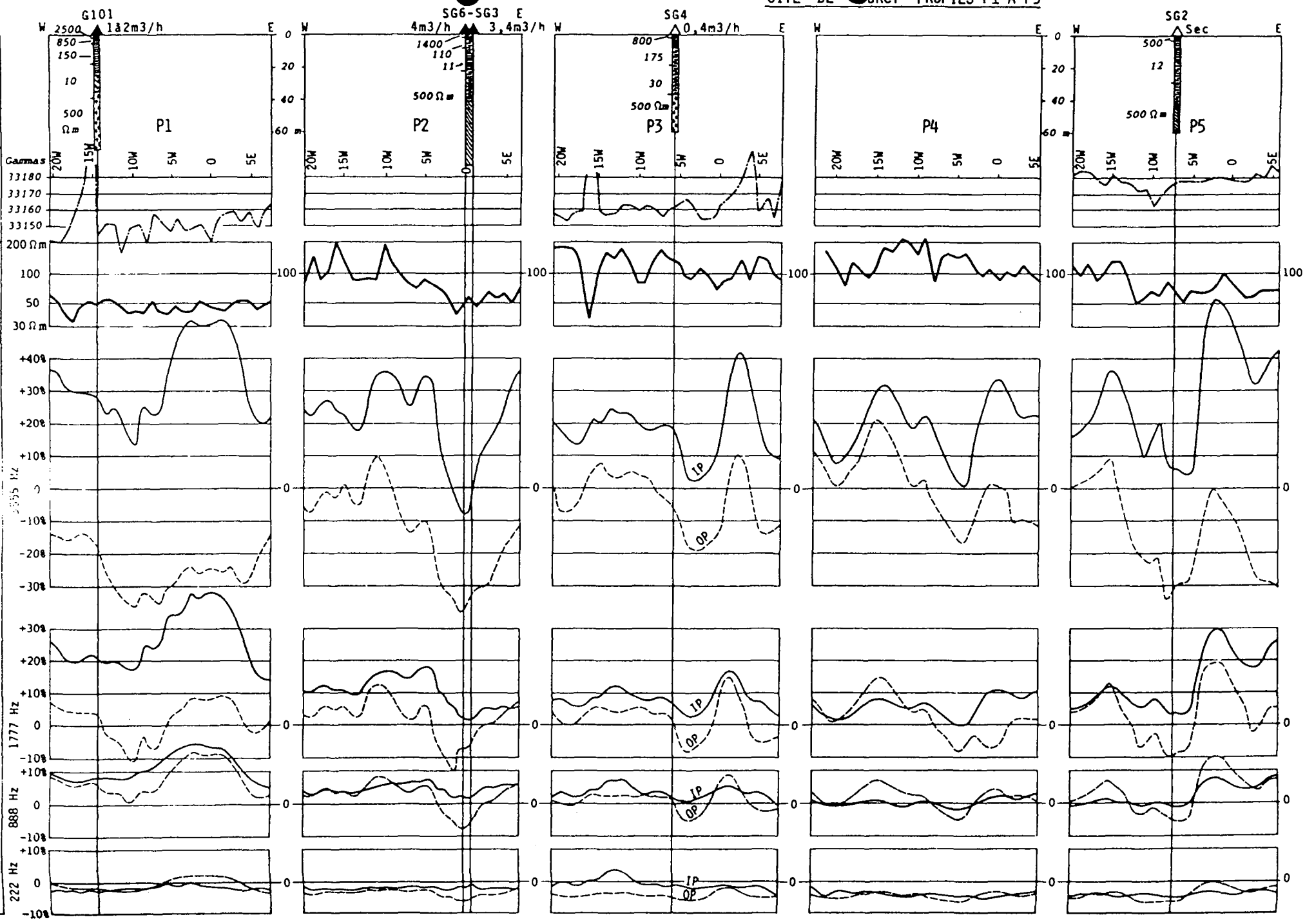
MAGNETISME

TRAINE ELECTRIQUE

Emetteur Récepteur 100m

Frequences

PROFILS ELECTRO MAGNETIQUES (max-min)



D - Trainé électrique (P1. 35)

Les mesures des résistivités apparentes de ces profils sont perturbées par des zones de cuirasse latéritique affleurante.

Les cinq profils de trainé ont été réalisés avec un AB=200 mètres, un MN de 20 m et un pas de 20 mètres. Cette longueur de ligne correspond bien à la branche remontante des SE G101, SG2 et SG3, là où le substratum n'est pas trop profond. Les SE donnent respectivement les résistivités apparentes suivantes 50, 70 et 57 ohm.mètres. Par contre, sur SG4 où le "socle" semble plus profond et la couverture plus résistante, nous sommes encore au fond de la courbe avec une résistivité apparente de 95 ohm.mètres.

Les corrélations entre ces courbes ne sont pas faciles, mais nous pouvons toutefois reconnaître 3 niveaux de résistivités :

- 1 niveau à 40-50 ohm.mètres que l'on rencontre sur tout le profil P1, le côté est du P2 et la majeure partie du P5.

- 1 niveau à 150-200 ohm.m situé à l'Ouest des profils P1, P2, P3 et P4.

- 1 niveau intermédiaire de résistivité allant de 90 à 110 ohm.m.

Le tracé d'une carte à partir des valeurs du trainé (voir planche 33) permet de mettre en évidence les différents domaines de résistivité.

- un domaine, appelé I sur la carte, très résistant. Nous n'avons malheureusement ni SE, ni forage pour conclure mais il est probable que la couverture a beaucoup diminué d'épaisseur et soit devenue plus résistante à cause d'un substratum devenu plus "cristallin".

- un domaine III (subdivisé en III Sud et III Nord) il existe des argiles très conductrices au dessus des micaschistes.

- un domaine II intermédiaire (zone du forage et du SE SG4) coincé entre III N et III Sud et faisant donc transition vers les "granites" situés vers l'Ouest.

Le passage d'un domaine à l'autre est progressif sans possibilité de tracer des accidents sauf peut-être sur P5 vers le point 13 Ouest.

Nous constatons que le forage SG2 pour lequel les données électriques sont identiques à celles de G101 et SG3 est le seul à ne pas produire.

E - Magnétisme (Pl. 35)

Seuls les profils P1, P3 et P5 ont été mesurés. Les valeurs y sont assez homogènes, c'est-à-dire qu'elles n'indiquent pas de grandes variations régionales. Par contre elles montrent des variations rapides allant de quelques gammas à une vingtaine de gammas. Les amplitudes de ces "à coups" sont plus fortes à l'extrémités Est du profil P3 (zone intermédiaire de résistivité).

Sur le profil P5 il apparaît une anomalie négative de type filon dont la valeur minimum est située au point 10 Ouest, c'est à dire située à l'Ouest du forage SG2. La cause de cette anomalie est géographiquement proche du contact entre les domaines I et III Nord mentionnés plus haut.

Les anomalies fortement positives observées sur les profils P3 et P1 sont dues à des causes artificielles (château d'eau en béton armé et moteur de pompe à eau).

F - Electromagnétisme

Les 5 profils ont été étudiés par la méthode électromagnétique avec un appareillage MAX-MIN. (Pl. 35).

L'écartement émetteur récepteur était de 100 mètres.

Cette méthode doit permettre la mise en évidence de conducteurs étroits et subverticaux en liaison avec la présence de filons.

Les résultats sont d'autant meilleurs que l'encaissant est résistant et que le recouvrement est peu épais et surtout non conducteur. Or on a vu par les SE et la carte des résistivités apparentes que le recouvrement atteint souvent 20 mètres et plus et qu'il est constitué par des argiles ayant environ 10 ohm.mètre de résistivité apparente.

Quelques anomalies apparaissent sur les profils :

- Profil 1 : on ne voit rien sur ce profil où le recouvrement est très conducteur.
- Profil 2 : une anomalie existe au point 0, soit au niveau de l'axe de l'étude et des forages SG3 et SG6. La largeur du "corps" serait de 15 mètres, sa profondeur inférieure à 10 mètres, et sa conductance très faible.

Ces chiffres sont à prendre en compte avec beaucoup de prudence, car le contexte n'est pas du tout favorable à une interprétation quantitative.

L'anomalie apparaît sur la fréquence 888 Hz, la 222 Hz étant pratiquement plate. Les fréquences 1777 et 3555 sont très perturbées.

- Profil P3 : (passant par le forage SG4) Une anomalie apparait à 60 m à l'Ouest de l'axe et 40 m à l'Est du forage SG4 (visible en 888 et 1777 Hz). Le corps aurait 35 mètres de large, serait à une vingtaine de mètres de profondeur et aurait une conductance égale à 3 (mauvais conducteur). Il présenterait peut être un pendage vers l'Ouest (courbe non symétrique) mais l'angle d'intersection de ce corps peut ne pas être le plus favorable ?

- Profil 4 : On observe une anomalie du même type que précédemment centrée sur le point 4 Ouest, à 85 m à l'ouest de l'axe. C'est aussi un mauvais conducteur proche de la surface.

- Profil 5 : L'anomalie est large et complexe présentant deux minimum :
 - l'un au niveau du forage SG2
 - l'autre à 220 mètres à l'Est de l'axe.

Cette 2ème anomalie coïnciderait assez bien avec le contact Résistant/Conducteur vu en trainé.

La fréquence 3555 Hz montre deux courbes IP et OP très écartées dues à l'effet du fort conducteur superficiel.

3.2.3 - ZONE DE RAPADAMA 8 (Pl.36)

Les forages montrent que le socle granitique est en général peu profond. Il se trouve à 8 m au forage SR 35.

Les tests géophysiques ont été réalisés au dessus des forages SR10, SR40, SR35 et SR11.

RESULTATS OBTENUS

A - Dispositif pluridirectionnel

Trois dispositifs CARRE réalisés sur les forages SR10 - SR11 et SR40, nous indiquent :

- . une anisotropie forte : de 1,62 à 1,81
- . Des valeurs de résistivités moyennes apparentes fortes :
 - 1017 ohm.m et 1011 ohm.m aux forages positifs
 - 1372 ohm.m au forage négatif.
- . Des directions d'anisotropie variables
 - 55 gr, 255 gr au SR 11 forage positif
 - 30 gr, 230 gr au SR 40
 - 100 gr, 300 gr au SR 10 forage négatif

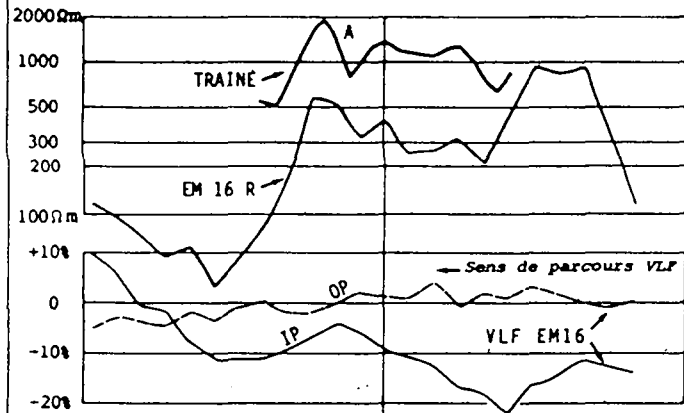
B - Les rectangles

Un rectangle a été implanté sur le forage SR11 suivant des directions données par le CARRE.

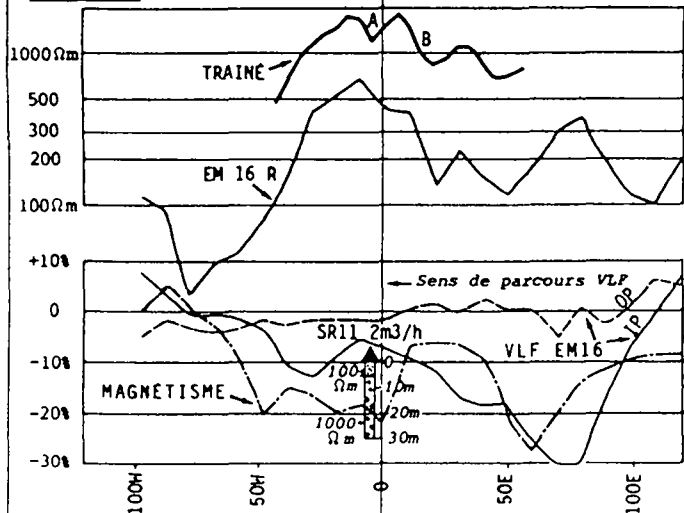
Rectangle R1 : perpendiculaire à la direction d'anisotropie met en évidence une structure très résistante (> 1200 ohm.m) bordée de chaque côté par deux conducteurs, un au Nord-Ouest à 500 ohm.m, l'autre au Sud Est à 600 ohm.m. Le forage SR11 est situé à l'extrémité d'une petite anomalie conductrice du bloc résistant.

Rectangle R2 : orienté parallèlement à la direction d'anisotropie, il n'a pu être réalisé qu'un profil et demi, ce qui ne nous permet pas de définir des structures. Dans cette direction, nous observons des valeurs de résistivité moins élevées (au maximum 1000 ohm.m) avec quelques anomalies conductrices, dont une de 700 ohm.m à 5 mètres à l'Est du forage SR11.

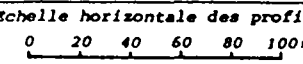
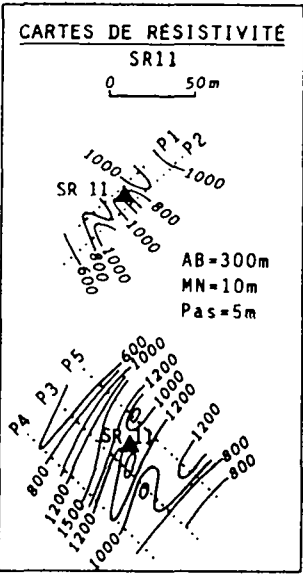
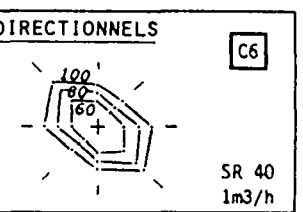
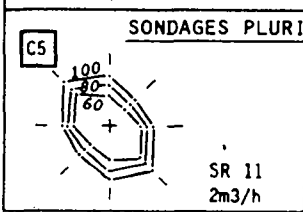
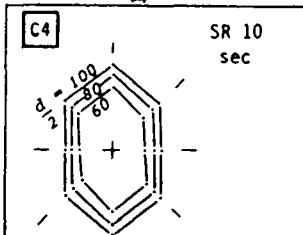
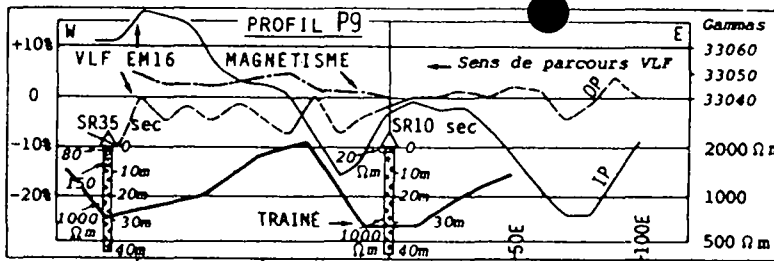
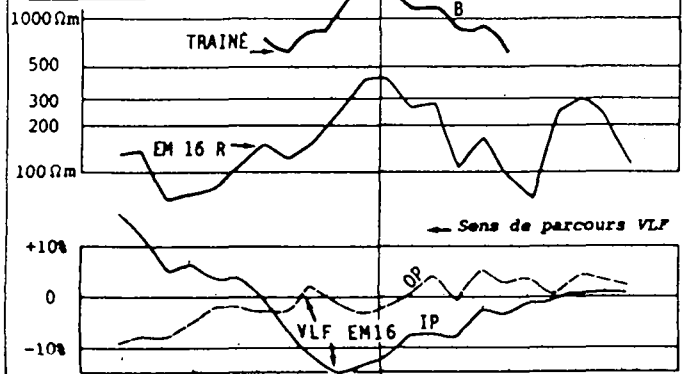
PROFIL P5



PROFIL P3

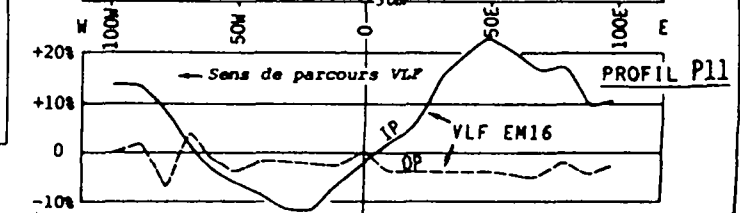
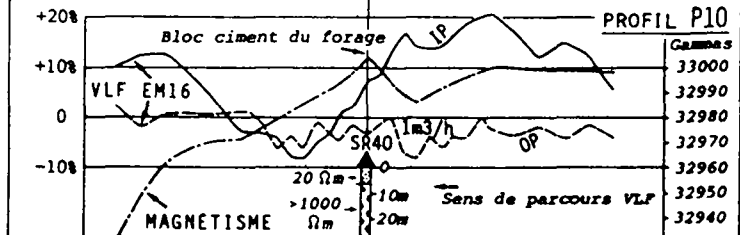
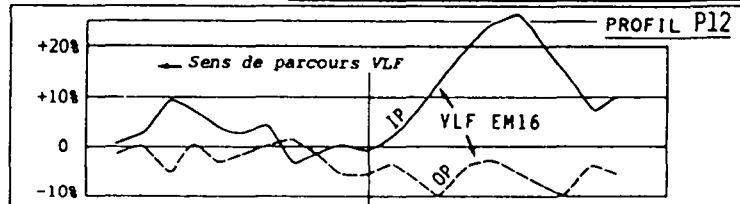
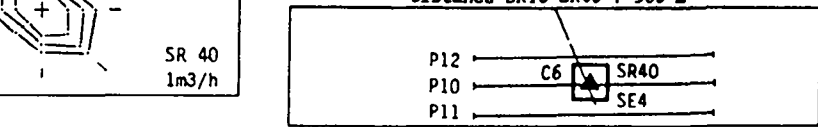
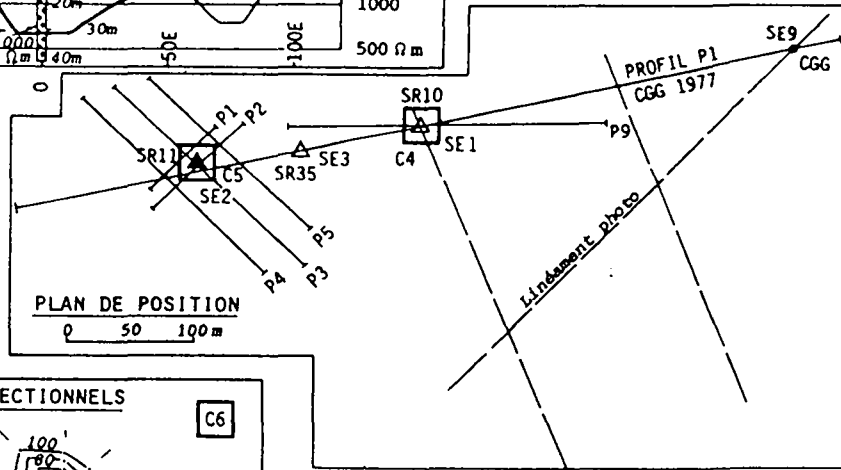


PROFIL P4



SITE RAPADAMA R8

Méthodes: .Trainée électrique
 AB=300m MN=10m,SE
 .VLF EM16/EM 16R
 .Magnétisme



C - Les sondages électriques (Pl. 37)

Les sondages électriques réalisés sur cette zone indiquent bien la faible profondeur du socle granitique très résistant. Au-dessus de celui-ci nous pouvons voir des formations d'altération dont les résistivités varient de 20 à 100 ohm.mètres suivant que l'on a affaire à des argiles ou à des éléments plus grossiers.

D - Trainé électrique

Trois profils courts ont été réalisés aux environs du forage SR11.

Ils sont orientés NO.SE selon le grand axe de l'ellipse et appelés P5 - P3 et P4.

La grande longueur de ligne utilisée (AB = 300 m) permet de se dégager de l'influence des terrains de recouvrement d'une part et d'autre part de pénétrer profondément dans le granite. Nous savions toutefois, à partir du SE, que l'épaisseur du recouvrement était inférieure à 10 mètres. Le pas de 5 m permet un bon positionnement des anomalies.

On observe sur les profils NO-SE des valeurs basses qui peuvent se corréler :

- entre les profils P5 et P3 on peut dessiner un axe A reliant des valeurs basses (800 ohm.m) par rapport au fond des valeurs courantes situées entre 1100 et 1700 ohm.m.

- un deuxième axe B passant par les points 20 E sur P3 et 30E sur P4 se dessine. Les valeurs basses sont également de 800 ohm.m.

Aux extrémités des profils les valeurs de résistivités sont plus basses (400 à 600 ohm.m).

Mission

RAPADAMA 8

Date

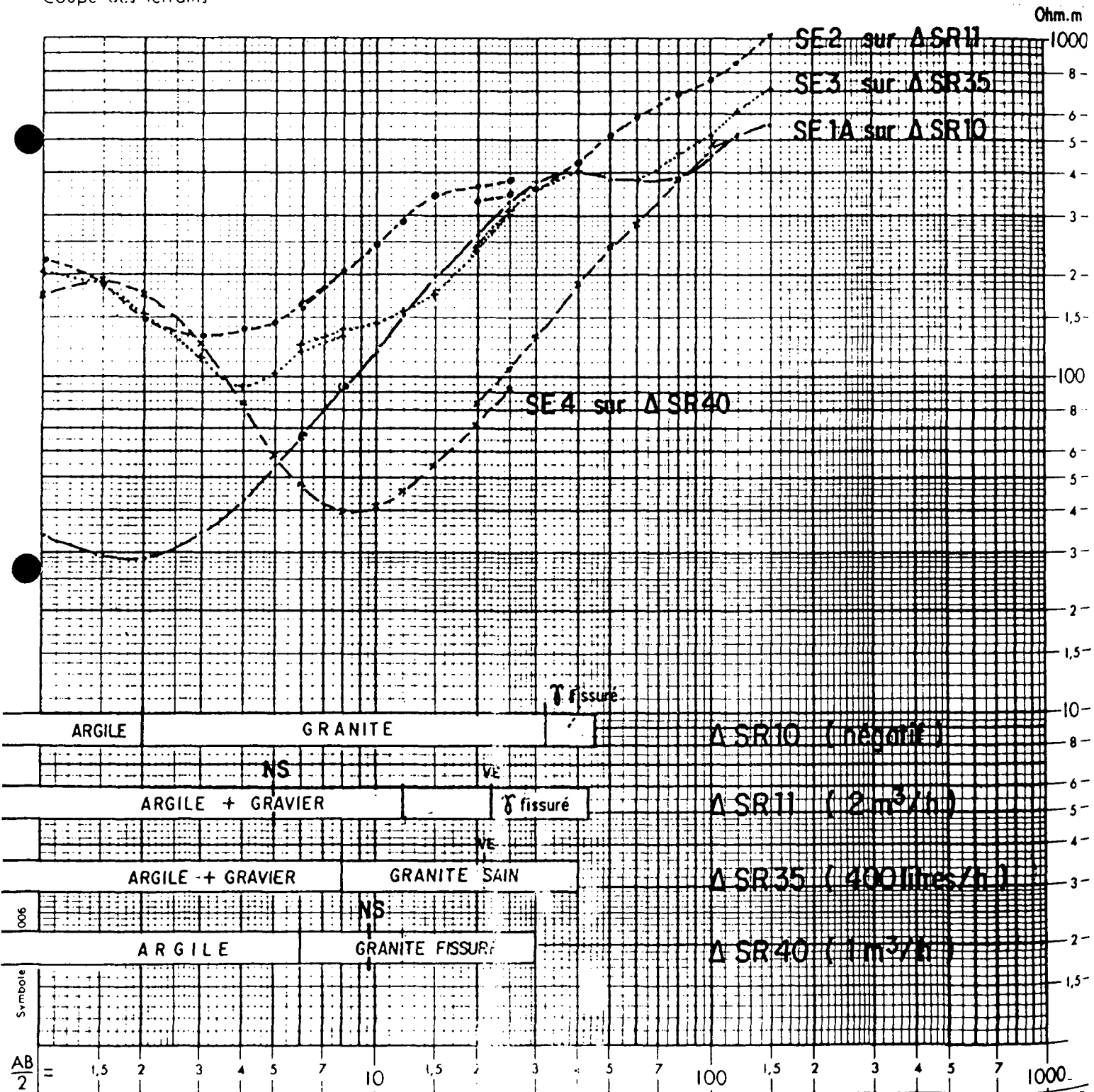
1983

Interpretation

Azimut de AB

Cote de surface

Coupe des terrains



MN =

Les largeurs des "anomalies" observées sur A sont faibles (une dizaine de mètres), plus importante sur B (15 mètres).

E - Magnétisme

E.1 - Profil P3 (forage SR11)

Le profil P3 de 220 m a été couvert avec une mesure tous les 10 mètres.

Les anomalies "négatives" par rapport au niveau moyen de référence situé vers 32 280 et 32 290 gammas indiquent l'existence de compartiments granitiques proches de la surface. (ce que nous savions par le SE n° 2).

Deux blocs surélevés apparaissent donc, l'un (Bloc I) situé entre les points 65 NO et 05 SE, l'autre (Bloc II) plus étroit entre les points 45 SE et 75 SE. Entre ces blocs, le socle se trouve à une profondeur plus grande sous un remplissage plus important.

Il est à noter que le SE n° 2 ainsi que le forage sont situés à la limite Sud-Est du Bloc I.

E.2 - Profil P9 (SR 10)

Ce court profil, long de 100 mètres réalisé avec un pas de mesure de 10 mètres est orienté Ouest-Est. Il ne montre aucune anomalie significative.

E.3 - Profil P10 (SR 40)

Ce profil orienté Ouest-Est montre une anomalie dont l'axe se situe sur le point 0 du profil c'est-à-dire au droit du forage. Cette anomalie pourrait avoir pour origine une cause artificielle liée au forage.

F - Electromagnétisme (EM 16) (Pl. 36)

Les mesures électromagnétiques sur cette zone ont été réalisées avec un appareil EM 16 de GEONIC'S. Cet appareil VLF utilise comme source de champ primaire des stations émettrices servant à guider les sous-marins. La station utilisée ici est celle de Rugby en Grande Bretagne travaillant sur la fréquence de 16 000 Hz.

Elle doit permettre de détecter des corps conducteurs allongés dans la direction de l'émetteur, c'est-à-dire environ Nord-Sud par la réalisation de lignes de mesure orientées Ouest-Est. L'angle formé par la direction des profils avec l'axe du corps doit se rapprocher au mieux de 90° pour obtenir une réponse maximum.

La courbe caractéristique au passage au-dessus d'un corps conducteur est une courbe en S avec une partie positive lorsqu'on va vers le corps et une partie négative lorsqu'on l'a dépassé, la valeur de l'"In Phase" étant nulle à l'aplomb du corps.

Comme avec le MAX-MIN, l'existence de plusieurs corps rapprochés conduit à des courbes complexes.

F.1 - Zone du SR 11

Les 3 profils P3, P4, p5 ont été étudiés. Le profil P4 présenterait une très forte anomalie vers le point 110 S.E en extrémité de profil (mais courbe incomplète) et une autre entre les points 0 et 20 N.O.

F.2 - Zone du SR 10

Une anomalie existerait dans la zone du forage, mais là encore la définition pouvant être obtenue par cette méthode rend l'interprétation très aléatoire.

F.3 - Zone du SR 40

Les profils P11 et P10 (passant sur le forage) donnent d'assez belles réponses.

Sur P11 un corps conducteur se situerait au point 5 Est alors qu'il serait vers 5 Ouest sur le P10. La partie positive est très large.

Sur P12, la partie positive de l'anomalie est normale, par contre le négatif est pratiquement inexistant.

G - Résistivité avec l'EM 16 R

IL est possible, en adaptant un élément supplémentaire au boîtier de l'EM 16, de mesurer des résistivités apparentes et d'obtenir des courbes de résistivités semblables à celles obtenues en trainé électrique classique.

Cette méthode a été appliquée sur les profils P3, P4 et P5 (zone du forage SR 11).

Les valeurs des résistivités obtenues dépendent ici beaucoup de la profondeur d'investigation et de la fréquence.

Or si la fréquence elle même qui est propre à chaque émetteur intervient relativement peu, la profondeur d'investigation liée à la fréquence et aux résistivités des roches concernées est primordiale dans la valeur de la résistivité lue.

La profondeur d'investigation d'un courant alternatif de fréquence F est donnée par la formule $p = 500 \sqrt{\frac{\rho}{F}}$

avec p en mètres et ρ en ohm.m et F en Hertz.

Dans le cas présent, nous savons que la station émettrice anglaise travaille à 16 000 Hz. Donc pour une résistivité de surface de 100 ohm.m, la profondeur pouvant être théoriquement atteinte est de 40 mètres. Celle-ci n'est plus que de 18 mètres pour un recouvrement à 20 ohm.mètre. Nous voyons que cette profondeur est suffisante ici.

Les résistivités lues sont des résistivités apparentes. Elles tendent vers une résistivité vraie lorsque l'épaisseur du recouvrement devient supérieure à la profondeur d'investigation.

Nous constatons sur les profils P5, P3 et P4 que les résistivités apparentes sont beaucoup plus basses qu'en trainé classique car l'influence de la surface est plus grande. Les courbes sont similaires à celles du trainé.

Nous retrouvons l'axe A que l'on peut suivre jusque sur le profil P4. Il coïncide assez bien avec l'axe A du trainé : les minimum vont de 250 à 400 ohm. m.

L'axe B s'observe sur les 3 Profils (mini à 120 ohm.m sur P3 et 100 sur P4).

Un axe C situé plus au Sud-Est correspondrait à l'axe que l'on présentait à l'extrémité du profil trainé.

Il est à remarquer que des pas de mesures différents (5 m en trainé et 10 m en EM 16 R) entraînent des décalages sensibles dans la position des minimum.

On observe au Nord Ouest, un axe D constitué par des valeurs atteignant 25 et 30 ohm.m. Ces valeurs basses peuvent s'expliquer par un épaissement important du recouvrement pouvant approcher la profondeur d'investigation.

Si nous reportons sur plan tous ces minimum nous observons une bonne concordance des axes en trainé et en EM 16 R, que la direction de ces axes est plutôt N.NE- S.SO pour A, B et C, tandis que D est O.SO E.NE avec un élargissement certain sur le profil P4.

2.2.4 - ZONE DE RAPADAMA 2 (Pl. 38)

Le substratum de cette zone est constitué par des roches variées rassemblées sous le terme de "roches vertes".

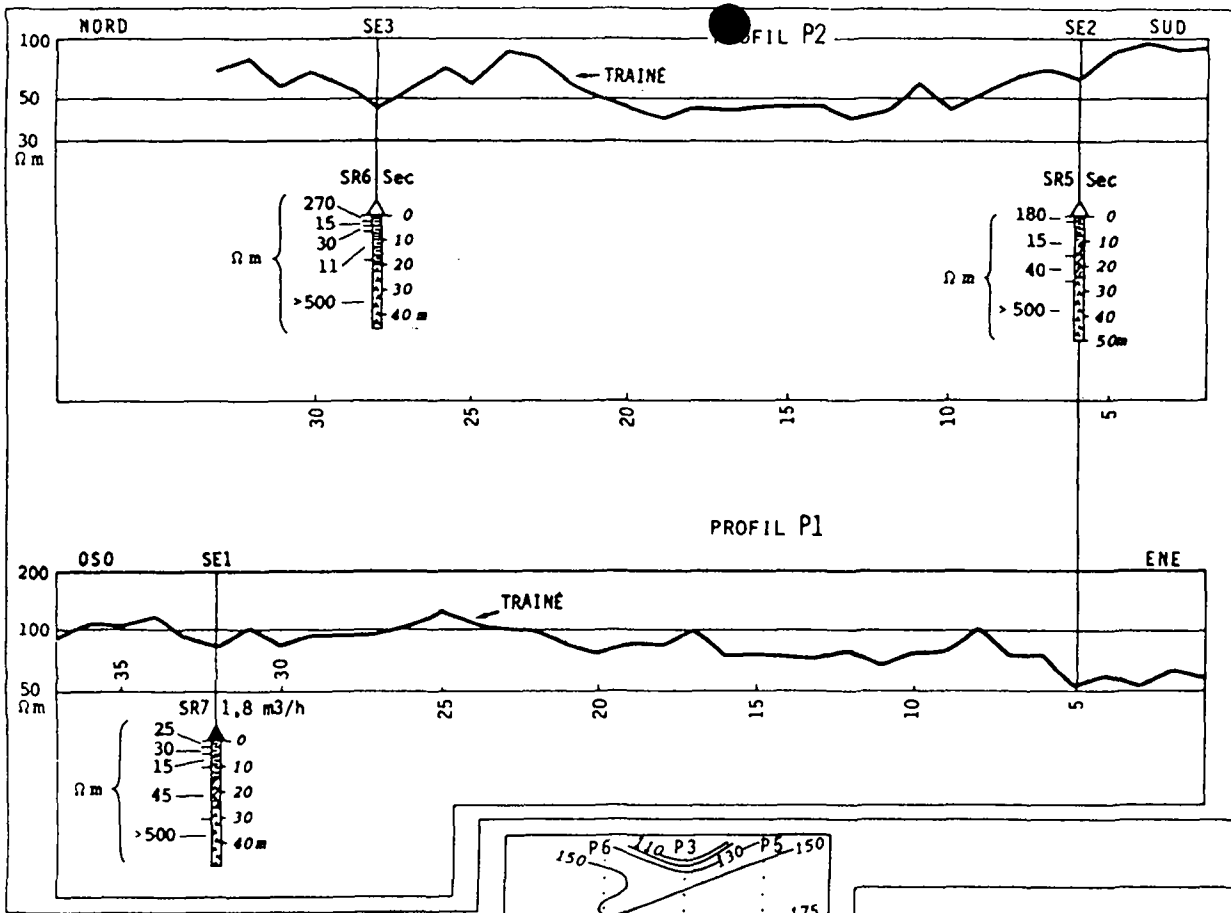
Les forages nous montrent qu'il existe des formations d'altération pouvant atteindre 20 mètres d'épaisseur.

RESULTATS OBTENUS

A - Dispositif pluridirectionnel

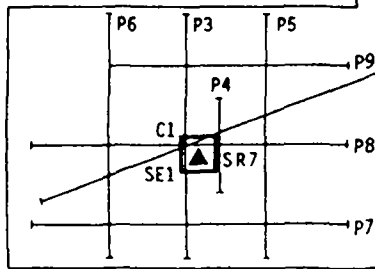
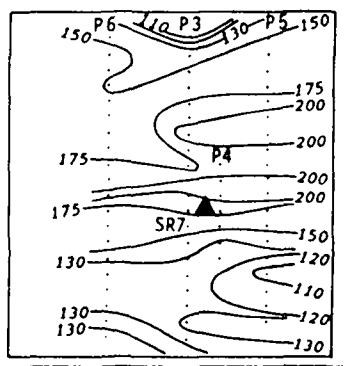
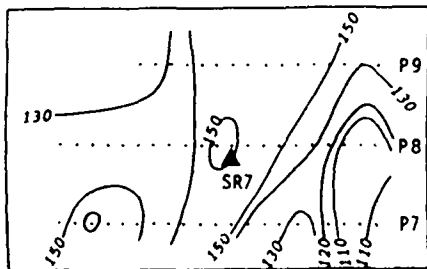
Trois dispositifs CARRE réalisés sur chaque forage nous indiquent :

- . une anisotropie moyenne de 1,35 à 1,41.
- . des valeurs de résistivités moyennes apparentes différentes :
 - fortes au SR7 (forage positif)
 - faibles aux SR5 et SR6 (forages négatifs).
- . des directions d'anisotropie variables :
 - 100 gr, 300 gr au SR7
 - 135 gr, 335 gr au SR5
 - 85 gr, 285 gr au SR6

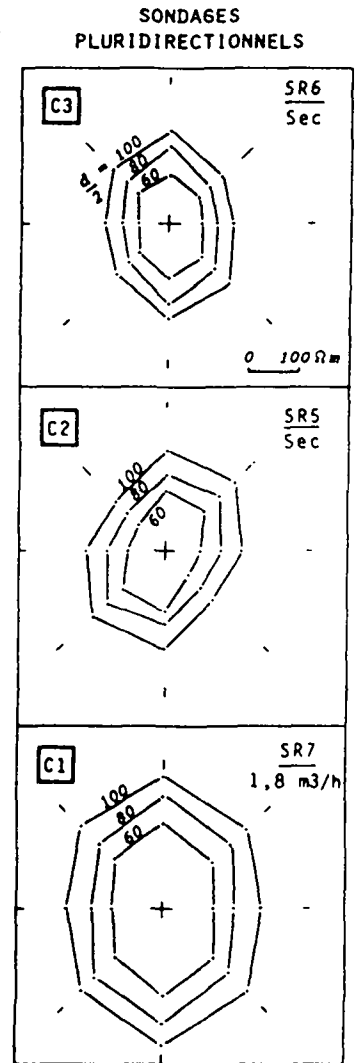
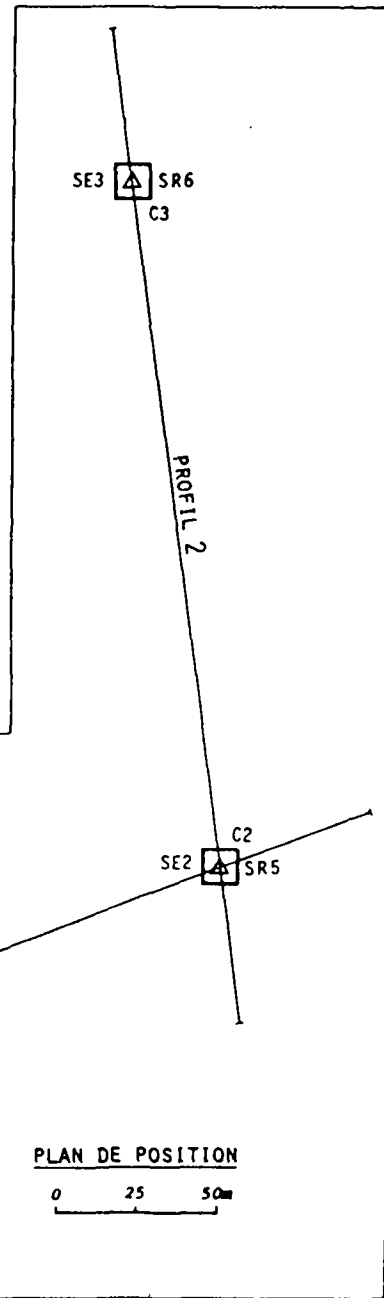


CARTES DE RESISTIVITE APPARENTE

AB=170m MN=10m Pas=10m



SITE DE RAPADAMA R2



Nous constatons que le forage positif correspond à une zone de fortes valeurs de résistivités apparentes et à une direction de structure Est-Ouest.

B - Les Rectangles

Deux rectangles R1 et R2 sont implantés sur le SR7, suivant les directions données par le CARRE.

Rectangle R1 : perpendiculaire à la direction d'anisotropie, il montre une structure résistante, d'une dizaine de mètres de large, orientée Est-Ouest, sur laquelle est situé le forage SR7. Un compartiment conducteur, régulier, borde au Sud cette structure. Au Nord, le compartiment est plus confus, mais laisse entrevoir une deuxième structure résistante qui ne traverse pas le périmètre étudié.

Rectangle R2 : orienté parallèlement à la direction d'anisotropie, il donne une carte plus homogène. Seule l'extrémité Est indique un conducteur.

Cet exemple illustre la nécessité de définir parfaitement au géophysicien la structure à rechercher : conducteur ou résistant, direction.... etc.

C - Les sondages électriques (Pl. 39)

Trois SE ont été effectués sur les 3 forages de la zone. On retrouve une bonne concordance entre les coupes électriques et la lithologie observée dans les forages.

Le SE n° 3 réalisé sur le forage SR6 montre la succession suivante :

- une couche superficielle résistante dont l'épaisseur est inférieure à 1 mètre.

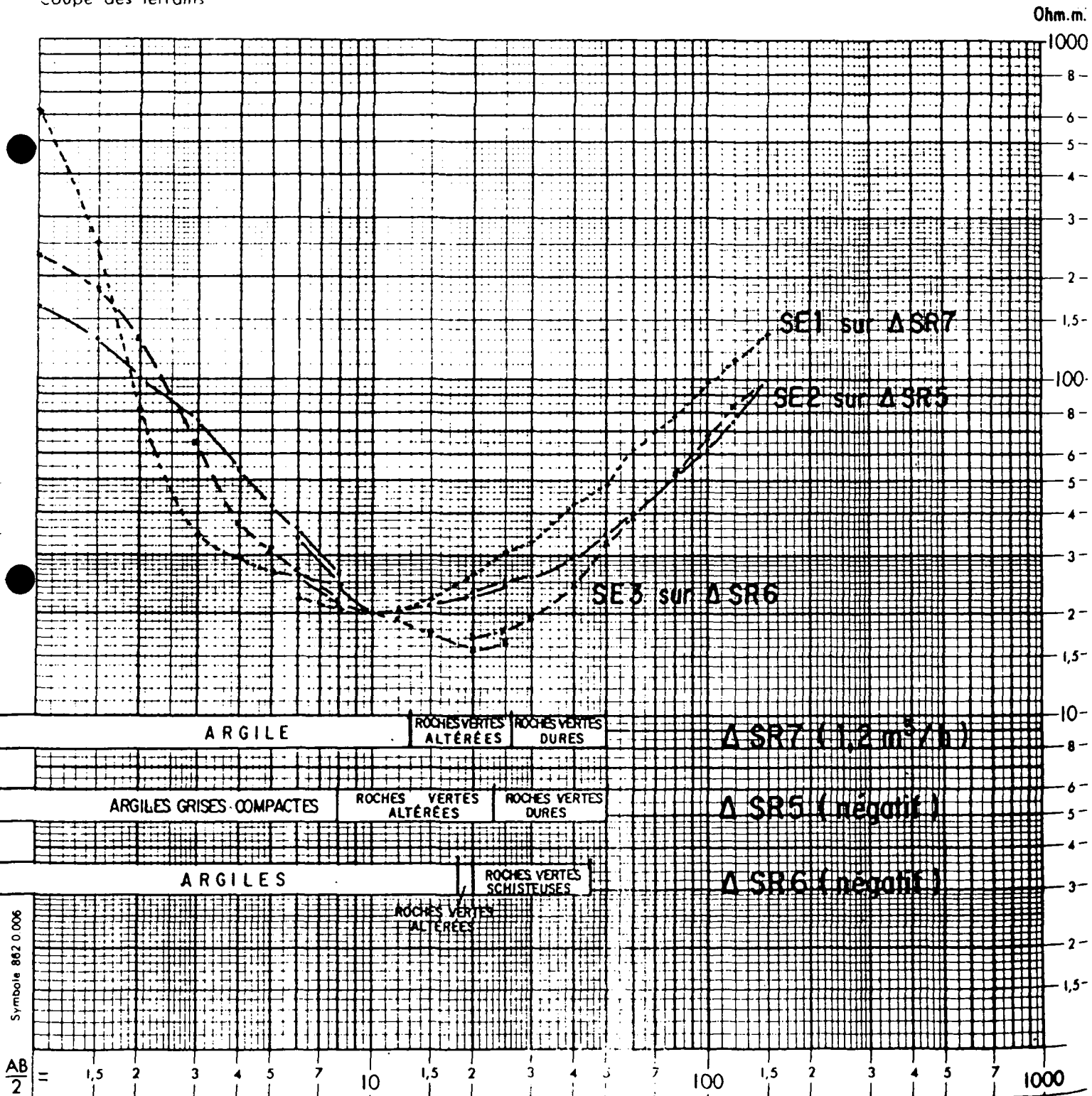
Mission
Date

RAPADAMA 2 1983

Interpretation

Azimet de AB
Cote de surface

Coupe des terrains



MN=

- un niveau conducteur jusqu'à une profondeur de 4,3 m, de résistivité voisine à 15 ohm.m.

- un niveau plus résistant (30 ohm.m) marquant la présence probable d'éléments plus grossiers (graviers, sable).

- une formation très conductrice (11 ohm.m) correspondant à des argiles jusqu'à 20 mètres.

- le substratum qui apparaît très résistant (remontée à 45°).

- les SE 1 et 2 sont un peu différents du n° 3. A la suite des argiles, nous voyons sur les diagrammes l'apparition d'un "terrain intermédiaire" situé au-dessus du socle. Sa résistivité peut être estimée entre 40 et 50 ohm.mètres. Cette formation devrait correspondre à l'altération du socle.

D - Trainé Electrique (Pl. 38)

La longueur utilisée (AB=170 m) correspond sur les diagrammes à la branche montante (substratum résistant). Les résistivités sont respectivement de 55 ohm.m pour SE 2 et SE 3 (tirés selon les petits axes des carrés C2 et C3) et de 81 ohm.m pour SE1 (tiré selon le petit axe). Le pas utilisé est de 10 mètres.

- Le profil P1 orienté à 75 gr passe par les forages SR7 et SR5. (SE1-SE2).

Les résistivités varient très peu allant de 120 à 50 ohm.m. Le niveau moyen varie entre 100 et 75 ohm.m à l'Ouest du profil jusqu'au niveau du forage SR5. Là, nous observons une descente nette sur un niveau situé entre 52-60 ohm.m. Le forage SR5 est situé sur ce palier bas.

- Le profil P2 axé sur les SE3 et SE2, est donc orienté selon le grand axe du carré C3 (180 gr).

Le palier bas se dessine sur le profil entre les points 10 et 20.

Les valeurs de résistivité sont du même ordre de grandeur que sur P1.

Le forage SR5 se trouve situé sur le gradient compris entre le palier à 90 ohm.m situé au Sud du forage et le palier à 45 situé au Nord (entre les points 10 et 20). Le forage est sur un point à 62 ohm.m.

Vers le Nord, nous notons des valeurs plus fortes atteignant 85 ohm.m au point 23. Le forage SR6 se situe au fond d'une large "anomalie", pouvant signifier peut être une plus forte épaisseur d'altération, ou bien des résistivités plus basses dans le recouvrement.

Les valeurs relativement homogènes montrent seulement quelques variations de résistivité dans le recouvrement. Aucune anomalie genre filon conducteur ne peut être mise en évidence.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- 1 R. DEGALLIER Prospection géophysique appliquée à la recherche d'eau.
Notes du BRGM n° 5 (seconde partie), Dakar 1959.
- 2 J.P. BARRAUD Reconnaitances hydrogéologiques en arènes granitiques
par sondages électriques en moyenne côte d'Ivoire.
BRGM/CIEH Paris 1961.
- 3 J.P. MATHIEZ et
G. HUOT Prospection géophysique et recherches d'eaux souterraines -
Exemples d'application en Afrique occidentale - CIEH,
Paris Juin 1966.
- 4 J.L. ASTIER Géophysique appliquée à l'hydrogéologie - MASSON et CIE,
Paris 1971.
- 5 A. BERNARDI
J. MOUTON Recherche d'eaux souterraines dans les formations
cristallines et métamorphiques du socle africain - Possibilités
et limites de la géophysique - International congress of
hydrogeology, Porto Alegre, Mars 1975.
- 6 G. BRESSON Utilisation de la méthodologie V.L.F. en résistivité pour
la localisation des zones faillées. La Technique de l'Eau
et de l'Assainissement, n° 384 et 385 (1978-79).
- 7 M. BRO et
C. HUBERT Synthèse sur l'emploi des techniques géophysiques appliquées
aux recherches d'eau dans les fractures au Mali - CGG/
CATEES, Bamako, 1978.
- 8 M. ENGALENC,
J.C. GRILLOT,
J.L. LACHAUD Méthodes d'études et de recherches d'eau souterraine des
roches cristallines d'Afrique de l'ouest. Vol. 2. Août 1979.
- 9 A. DUPRAT La géophysique appliquée à la recherche d'eau. CGG,
Technical séries n° 523-82-08. Paris 1980.
- 10 A. BERNARDI
J. MOUTON Les recherches d'eau dans le socle africain. Apport de
la géophysique. Bull. BRGM section III n° 4.1980-81.

- 11 L. BOURGUET,
J. CAMERLO,
J.C. FAHY,
Y VAILLEUX
Méthodologie de la recherche hydrogéologique en zone de socle cristallin. Bull. BRGM - section III N° 4. 1980-81.
- 12 M. BRO,
C. HUBERT,
P. MOULLARD
Recherche des aquifères de fracture dans des séries schisto-gréseuses au Mali à l'aide de techniques géophysiques. Bull. BRGM - section III N° 4. 1980-81.
- 13 J.C. SCHMIDT
Utilisation des ondes VLF avec le matériel EM 16 R de GEONICS - Méthode électromagnétique - SVER, Luçon, Mars 1981.
- 14 S.J. DE JONG,
F.J.H. DIRKS et AL.
Expérimentations de méthodes électromagnétiques appliquées à la recherche des eaux souterraines en terrain de socle cristallin en Haute-Volta. Bulletin CIEH n° 44, Mars 1981.
- 15 G.J. PALACKY,
I.L. RITSEMA and
S.J. DE JONG
Electromagnetic prospecting for groundwater in precambrian terrains in the Republic of upper Volta. Geophysical prospecting 1981. 29. pp 932-955.
- 16 GEOMINES
Manuel pratique de géophysique à l'usage de l'hydraulique villageoise - Tome 1 - 1982.

On se reportera également au tableau N° 4, page 16 du présent rapport, qui récapitule les rapports de projets recensés et exploités.