



réflexions sur les principes, domaines de validité  
et applications des méthodes  
de prospection géophysique de surface

B. R. G. M.
31. JUIL. 1986
BIBLIOTHEQUE



réflexions sur les principes, domaines de validité  
et applications des méthodes  
de prospection géophysique de surface

A. Durand

juin 1986  
86 SGN 247 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES  
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL  
Département EAU

B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - Tél. : (33) 38.64.34.34



## AVANT-PROPOS

L'utilisation des méthodes de prospection géophysique de surface en hydrogéologie a subi un essor considérable depuis les années soixante-dix, conjointement à l'utilisation grandissante de la technique de foration appelée "Marteau fond de trou".

L'adoption de ce nouveau mode de foration a constitué un bouleversement total, en raison de sa mobilité, de sa rapidité d'utilisation, conduisant à la réalisation de captages d'eau potable à des cadences croissantes et en particulier dans les régions renfermant des aquifères discontinus et en particulier au droit de l'Afrique de l'Ouest.

En conséquence, le choix des sites d'implantation d'un nombre de forages sans cesse grandissant a dû se faire d'une manière de plus en plus rigoureuse, sans toutefois pouvoir échapper à deux contraintes majeures, à savoir :

- le périmètre à prospecter est la plupart du temps imposé par la présence du village qu'il convient d'alimenter, d'où contrainte de proximité
- pour conserver le bénéfice de la rapidité d'exécution, l'implantation du forage doit se faire dans un temps très bref, parfois réduit à quelques heures d'intervention du géologue.

La géophysique (méthodes électriques, électromagnétiques, magnétiques, sismiques) étant un outil largement expérimenté en milieux aquifères continus, satisfaisait dans une certaine mesure à ces critères. L'absence de sens critique dans son utilisation (notamment à l'occasion d'investigations en profondeur, de la part des utilisateurs) amena toutefois à quelques déconvenues.

Ainsi, lorsque plusieurs forages ont été réalisés et testés, on observe parfois que leurs productivités ne concordent pas avec la distribution des anomalies qui ont été relevées. Certes, la

géophysique est utilisée comme méthode d'appui de la photographie aérienne pour les sites difficiles, mais une réflexion sur les performances que l'on peut en attendre et plus précisément sur le bon emploi des techniques est nécessaire.

Dans le cadre du programme HMF, la présente étude propose une révision des utilisations pratiques qui ont été faites de la géophysique en se référant aux programmes d'hydraulique villageoise conduits par le BRGM depuis 10 ans pour en tirer des guides pour une meilleure adéquation entre les méthodes à choisir et les sites à prospecter.

## AVERTISSEMENT

L'objet du présent rapport n'est pas de procéder à une revue systématique de détail des caractéristiques de l'ensemble des méthodes de prospection géophysique de surface actuellement disponibles au catalogue et par ailleurs largement utilisées dans des domaines d'étude du sous-sol et aussi variées que la prospection minière, pétrolière, à faible profondeur (recherche d'eau, génie civil, etc...).

En effet, un descriptif précis, judicieusement agrémenté d'exemples pratiques souvent très pertinents d'un grand nombre de méthodes de prospection géophysique de surface, occupe une place importante dans la littérature technique existante.

Le lecteur sera ainsi constamment renvoyé à des index bibliographiques insérés dans le texte, de manière à compléter ou à affiner ses propres connaissances théoriques avant de conforter son expérience *d'homme de terrain*.

C'est justement le volet de l'expérience de l'homme de terrain qui va caractériser le thème central de ce rapport.

Ainsi, seul le savoir-faire technique et réfléchi du praticien hydrogéologue ou géophysicien (ou encore mieux de l'hydrogéologue et géophysicien), agrémenté des confrontations incessantes entre le modèle théorique offert par la technologie et le milieu naturel, qu'il s'agit de découvrir et comprendre, nous apparaît être le meilleur fil conducteur lorsqu'il s'agira de définir et de choisir telle ou telle méthode **la plus appropriée au problème posé**.

Ceci indique que la définition la plus élaborée possible de l'objectif à atteindre doit rester la préoccupation majeure du naturaliste, surtout lorsque l'on sait que la cible ne peut être atteinte que d'une manière **analogique** par le biais de **perturbations ponctuelles** créées sur un environnement naturel.

Il est bien évident que dans ce qui va suivre, le praticien se doit de maîtriser à la perfection, la palette des techniques qui lui sont proposées. Par ailleurs et pendant le déroulement de son travail, c'est donc une plus grande place à la réflexion et à la concentration qui sera offerte au naturaliste, ce qui conduira ce dernier à l'élaboration d'un modèle naturel théorique des plus cohérent avec les environnements géologique, géoélectrique et hydrogéologique rencontrés.

Nos réflexions seront plus particulièrement orientées sur l'adoption de méthodes géophysiques de surface dans le cadre des grands projets d'hydraulique villageoise en Afrique sahélienne, tout en gardant à l'esprit la conviction qu'à l'aide de l'expérience acquise d'une part, et de l'amélioration technologique des instruments de mesure, d'autre part, l'utilisation des méthodes de prospection géophysique de surface (électriques, électromagnétiques, magnétiques, sismiques) devra satisfaire impérativement à l'alternative suivante :

- abaisser les coûts d'équipement à résultat égal ;
- offrir un meilleur service pour un coût identique ;

tout en sachant que la masse financière attribuée à la géophysique -et donc correspondant aux économies qu'elle est susceptible d'introduire au niveau des réalisations (réduction du taux d'échec et de la profondeur des forages)-est nettement moins élevée qu'en hydraulique urbaine, pour laquelle les méthodes géophysiques se justifient financièrement et ont depuis longtemps montré leur efficacité.

## SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	1
<b>Première partie : LES PRINCIPALES METHODES GEOPHYSIQUES OPERATIONNELLE SUR L'ETUDE DES MILIEUX FISSURES</b>	<b>3</b>
I - LES METHODES D'APPRECIATION DU PARAMETRE DE RESISTIVITE	6
I.1 - La prospection électrique par courant continu	6
I.2 - Les prospections électriques en courant alternatif : Les méthodes électromagnétiques	12
I.3 - La méthode magnéto-tellurique naturelle	17
II - LES METHODES D'APPRECIATION DU PARAMETRE DE VITESSE DES ONDES DANS LE SOL : LA PROSPECTION SISMIQUE	25
II.1 - La méthode sismique réfraction	26
II.2 - La méthode sismique réflexion	28
II.3 - Conclusions sur la méthode sismique	29
III - LES METHODES D'APPRECIATION DU PARAMETRE DE SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE : LA METHODE MAGNETIQUE	30
IV - LES METHODES D'APPRECIATION DU PARAMETRE DE DENSITE : LA METHODE GRAVIMETRIQUE	31
V - LES METHODES D'APPRECIATION DES PARAMETRES DE POTENTIEL, DE DISPERSION OU D'ACCUMULATION : LES METHODES DE POLARISATION	31
VI - CONCLUSION PARTIELLE : CHAMP D'APPLICATION TECHNIQUE DES DIFFERENTES METHODES	32
VI.1 - Champ d'application de la méthode électrique classique en courant continu	32
VI.2 - Champ d'application de la méthode électromagnétique	33
VI.3 - Champ d'application de la méthode sismique	34
VI.4 - Champ d'application de la méthode magnétique	34
VI.5 - Champ d'application de la méthode gravimétrique	34
<b>Deuxième partie : LES METHODES DE PROSPECTION GEOPHYSIQUES DE SURFACE ILLUSTREES PAR DES EXEMPLES</b>	<b>35</b>
I - PRESENTATION DE "CAS TYPES"	37
II - AUTRES EXEMPLES SUR L'EXPERIENCE ACQUISE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET EN METROPOLE	68
Etude méthodologique par méthodes électriques et électromagnétiques sur le site pilote de Lufiac (Ille-et-Vilaine)	69

	<b>Pages</b>
Poursuite de l'étude géophysique méthodologique sur le site pilote de Lufiac - Commune de Broualan (Ille-et-Vilaine)	83
Projet d'hydraulique villageoise du conseil de l'entretien en Burkina-Faso	87
Programme d'hydraulique villageoise du conseil de l'entente	89
Programme CEAO d'hydraulique villageoise et pastorale dans les 1ère et 2ème régions - Première campagne au Mali	95
Projet CEAO - Campagne marteau-fond-de-trou au Sénégal Oriental	101
Prospection d'aquifères par méthodes électriques et magnétiques dans les 1ère et 2ème régions de la République du Mali	107
Projet d'hydraulique villageoise Usaid - Fac Togo	117
Etude géophysique pour l'hydraulique villageoise dans la région du Nord Borgou	123
Exemples d'association de méthodes électriques et électromagnétiques	129
Exemples d'association de méthodes électriques et magnétiques	131
Exemples d'associations des méthodes électriques et de sismique réfraction	137
 <b>CONCLUSION GENERALE</b>	 151
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	155
 <b>Liste des figures</b>	
Figure 1 - Schéma de principe de la prospection électromagnétique	14
Figure 2 - Lokola (Côte d'Ivoire) - Diorite et roches vertes - Etude du pendage des fractures par profils électriques en double longueur de ligne	38
Figure 3 - Bamassapla (Côte d'Ivoire) - Granite - Etude du pendage des fractures par profils électriques en double longueur de ligne	40
Figure 4 - Région de Nara Est (Mali) - Recherche des épontes de filons de dolérite intrusifs dans les pélites cambriennes (méthode magnétique) a - Profil magnétique P2 site N13 El Greyg b - Profil magnétique site N10 Weuimel	42
Figure 5 - Région de Nara Est (Mali) - Recherche des épontes de filons de dolérite intrusifs dans les pélites cambriennes (méthode magnétique) - Profil magnétique N°9 site N15 Mbeuryeu	44

	<b>Pages</b>
Figure 6 - Route Kiffa-Néma (Mauritanie) - Recherche des épontes de filons de dolérite intrusifs dans les pélites cambriennes (méthode électrique) a - Implantation R.9 b - Implantation R.13 c - Implantation R.29	46
Figure 7 - Route Kiffa-Néma (Mauritanie) - Recherche des épontes de filons de dolérite intrusifs dans les pélites cambriennes (méthode électrique) Implantation R.32	48
Figure 8 - Mankarga (Burkina-Faso) - Birrimien - Comparaison des méthodes électriques et électromagnétiques	50
Figure 9 - (Mali-Deuxième région) - Prospection hydrogéologique dans des zones de grès infracambriens injectés de dolérite, à l'aide des méthodes électriques et magnétiques	52
Figure 10 - (Mali-Deuxième région) - Implantations au contact entre schiste et grès	54
Figure 11 - Mamou (Guinée) - Granites injectés de dolérite	56
Figure 12 - Site de Bolsi-Liptako, Niger	59
Figure 13 - Profils et sondages électriques - Ranch de Leo (Burkina-Faso) - zone 5	61
Figure 14 - Profils et sondages électriques - Ranch de Leo (Burkina-Faso) - zone C	63
Figure 15 - Méthodes électromagnétiques - VLF - Implantation dans les granites - Lolobo F1	65
Figure 16 - Méthodes électrique et électromagnétique - VLF - Sabodala (Sénégal Oriental)	67
Figure 17a - Broualan - Profil 1 - VLF inclinaison et VLEM inclinaison - VLEM (Electromagnétisme à boucle verticale) et VLF mode inclinaison	76
Figure 17b - Broualan - VLF inclinaison - VLF mode inclinaison	78
Figure 17c - Broualan - VLF résistivité - VLF mode résistivité	79
Figure 17d - Broualan - VLF Electromagnétisme à boucles horizontales	80
Figure 18a - Broualan - Plan de situation des profils de résistivités et des forages	81
Figure 18b - Broualan - Trainés simples	82
Figure 19 - Profil de résistivité et sondage électrique	91
Figure 20 - Profils de résistivité et VLF	92

	<b>Pages</b>
Figure 21 - Prospection des aquifères discontinus au sud de Kayes- Programme CEAO - Paramètres caractéristiques d'une anomalie de la résistivité apparente	94
Figure 22 - Prospection des aquifères discontinus au sud de Kayes- Programme CEAO - Répartition des forages en fonction des caractéristiques de l'anomalie géophysique correspondante - Toutes formations géologiques confondues	98
Figure 23 - Prospection des aquifères discontinus au sud de Kayes- Programme CEAO - Répartition des forages en fonction des paramètres de l'anomalie géophysique correspondante - Dans le Birrimien	99
Figure 24 - Prospection des aquifères discontinus au sud de Kayes- Programme CEAO - Répartition des forages en fonction des paramètres de l'anomalie géophysique correspondante - Dans l'Infracambrien	100
Figure 25 - Profil de résistivité - Kono-Banière, Gadiaba, Labidi	114
Figure 26 - Profil et rectangle AB	118
Figure 27 - Schéma logique conduisant à une implantation de forage ou à un abandon du site	122
Figure 28 - Site de Garin Serki Foulani (Niger)	128
Figure 29 - Burkina Faso - Site expérimental de Rapadama	130
Figure 30 - Transvaal et Orange (Afrique du Sud)	132
Figure 31 - Site d'Akpaka (Togo)	133
Figure 32 - Nara - Profil P8	134
Figure 33 - Site de Tikoura	139
Figure 34 - Site de Douentza	140
Figure 35 - Site de Nara - Profil P5	141
Figure 36 - Site de Daamba Tcharkitara - Dinkoulou	143
Figure 37 - Site de Koutiala	144
Figure 38 - Site de Kolokani	146
Figure 39 - Site de Ségué	148
Figure 40 - Piste de Falou	149

## Liste des tableaux

	<b>Pages</b>
Tableau 1 - Principales méthodes géophysiques opérationnelles sur l'étude des milieux fissurés	4
Tableau 2 - Classification des systèmes électromagnétiques usuels opérant dans le domaine fréquentiel - Prospection au sol	15
Tableau 3 - Classification des systèmes électromagnétiques usuels opérant dans le domaine fréquentiel - Prospection au sol - Systèmes électromagnétiques à émetteur fixe	16
Tableau 4 - Classification des systèmes électromagnétiques usuels opérant dans le domaine fréquentiel - Prospection au sol - Systèmes électromagnétiques à émetteur-récepteur mobiles	18
Tableau 5 - Vitesse des ondes sismiques	25
Tableau 6 - Quelques caractéristiques des méthodes de profilage employées	70
Tableau 7 - Volume et localisation des travaux d'implantation	93
Tableau 8 - Recherche de la cible hydrogéologique par leur signature géophysique	108
Tableau 9 - Anomalies électriques rencontrées et leur statistique sommaire	120
Tableau 10 - Résultats globaux obtenus au 30 Juin 1985 à partir de 102 forages réalisés	121



## INTRODUCTION

Les terrains composant le socle cristallin ou cristallophyllien et ceux composant les formations tabulaires de l'Infracambrien couvrent plus de 40 % de la surface occupée par les états de l'Afrique de l'Ouest et sont de nature variée, tout en présentant des caractéristiques pétrographiques ou diagénétiques communes. A l'origine, ces roches sont toutes compactes et imperméables sans porosité d'interstice et n'offrent, au plan hydrogéologique, un intérêt que si elles sont altérées ou fissurées.

Dès les années 1965, l'hydrogéologue sut, à la faveur de nombreuses expérimentations, que la partie fissurée des roches saines pouvait constituer un réservoir aquifère exploitable et disposé sous une couverture d'altération souvent moins perméable.

La coupe géologique classique observable est la suivante :

- en surface, des **formations latéritiques** sous forme d'argiles ou de cuirasses ;
- au-dessous, les **altérites** plus ou moins argileuses ou sableuses, passant progressivement aux altérites à structures conservées ;
- le **socle altéré** où la roche est fortement altérée mais conserve sa cohésion (arènes) ;
- le **socle fissuré** et peu altéré ;
- le **socle sain**, très peu fissuré et altéré.

La démarche de l'hydrogéologue dans le cadre de recherche d'eau en milieux aquifères discontinus, (milieu de socle) comprend les phases d'exécution suivantes :

- **étude des photos aériennes** de manière à repérer tous les linéaments susceptibles de correspondre à un réseau de fractures, d'une part, et à apprécier l'ensemble des critères morphologiques et géomorphologiques pouvant constituer des indices hydrogéologiques intéressants, d'autre part ;
- la **localisation au sol** avec une précision acceptable (de l'ordre de la dizaine de mètres), des linéaments identifiés par la couverture photo-aérienne ;
- l'adoption de **méthodes de prospection géophysique** au sol, tendant à confirmer ou à infirmer les observations faites précédemment et notamment celles concernant la fracturation.

Actuellement, la géophysique est employée d'une façon quasi systématique dans les cas délicats pour lesquels les risques d'échecs sont majorés.

Quant à l'interprétation quantitative de la mesure, elle n'est pas praticable dans bien des dispositifs utilisés du fait de l'inexistence de forages d'étalonnage.

Le cadre de notre réflexion sera volontairement limité aux **techniques d'implantation d'ouvrages** se référant aux méthodes de prospection géophysique de surface. Chaque méthode sera présentée succinctement, puis discutée en ce qui concerne ses domaines d'application, les réserves à émettre et sera largement commentée à l'aide d'exemples choisis dans le cadre de projets d'aménagement en Afrique sahélienne, et d'études de sites en roches dures en métropole.

Retenons que le gain en efficacité des méthodes de surface permettra :

- d'abaisser les coûts d'équipement à résultat égal
- de mieux caractériser les sites à forer en particulier dans la recherche de forts débits en petite irrigation.

**Première partie**

**LES PRINCIPALES METHODES GEOPHYSIQUES OPERATIONNELLES**

**SUR L'ETUDE DES MILIEUX FISSURES**

ECHELLE DE TERRAIN RECONNAISSANCE	0,1	1 m	10	10 <sup>2</sup> (1 hm)	10 <sup>3</sup> (1 km)	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	Paramètre physique considéré	Grandeur mesurée
	2 3 4 5 6 7 8 9	2 3 4 5 6 7 8 9	2 3 4 5 6 7 8 9	2 3 4 5 6 7 8 9	2 3 4 5 6 7 8 9	2 3 4 5 6 7 8 9			
Générale				POLARISATION SPONTANEE (SP)			Potentiel électrochimique et électrocinétique	Différence de potentiel	
				MAGNETISME			Susceptibilité magnétique	Champ magnétique	
				GRAVIMETRIE			Densité	Accélération de la pesanteur	
Dégrossie				ELECTRIQUE-SE. en croix			Résistivité	Différence de potentiel et intensité	
				MICROGRAVIMETRIE			Densité	Accélération de la pesanteur	
				SISMIQUE REFLEXION HTE DEFINITION			Vitesse de propagation d'une onde	Temps de parcours	
Détaillée				ELECTRIQUE-SE. en croix pluridirectionels, profils (trainé électrique, rectangle)			Résistivité	Différence de potentiel et intensité	
				ELECTROMAGNETIQUE (VLF, max-min, Melos, Syscal EM)			Conductivité électrique	Angle d'inclinaison ou rapport des composantes d'un champ magnétique	
				SISMIQUE REFRACTION			Vitesse de propagation d'une onde	Temps de parcours	
				MAGNETOMETRIE			Susceptibilité magnétique	Champ magnétique	
				POLARISATION SPONTANEE (SP)			Potentiel électrochimique et électrocinétique	Différence de potentiel	
				POLARISATION PROVOQUEE (PP)			Dispersion ou accumulation de charges électriques	Effet de fréquence et de chargeabilité	
				MICROGRAVIMETRIE			Densité	Accélération de la pesanteur	
				MAGNETOTELLURIQUE			Résistivité	Champ électrique et magnétique	

Tableau 1 - Principales méthodes géophysiques opérationnelles sur l'étude des milieux fissurés

Suivant les paramètres dont elles permettent la mesure, il peut être fait appel, d'un point de vue théorique, à plusieurs méthodes de prospection géophysique[6]. Ces paramètres sont :

- **la résistivité** (ou son inverse, la conductivité)
- **la vitesse des ondes**
- **la susceptibilité magnétique**
- **la densité**
- **le potentiel électrochimique et électrocinétique**
- **la dispersion ou l'accumulation de charges électriques.**

Au plan pratique, la (ou les) méthode(s) employée(s) doit répondre à un cahier des charges dont les clauses sont dictées par la réalisation dans de bonnes conditions des campagnes d'aménagement d'hydraulique villageoise. Il est en particulier demandé à la géophysique d'être :

- **simple et efficace** au niveau de la réalisation des mesures et de leur interprétation ;
- **peu coûteuse, rapide et simple** à mettre en oeuvre ;
- **adaptée à l'échelle de reconnaissance requise** (décamétrique à hectométrique) ;
- **apte à différencier au mieux la succession lithologique la plus fréquemment rencontrée à l'échelle régionale du projet.**

De nombreuses méthodes d'investigation par prospection géophysique de surface sont à notre disposition, mais toutes ne présentent pas l'ensemble des qualités requises suite à la définition de l'objectif à atteindre. Beaucoup de méthodes sont sélectives, d'autres se complètent. Les principales méthodes géophysiques opérationnelles sur l'étude des milieux fissurés sont regroupées dans le tableau 1.

## **I - LES METHODES D'APPRECIATION DU PARAMETRE DE RESISTIVITE**

Le paramètre mesuré ici est la **résistivité** de la roche ou du terrain[28].

La conductivité électrique ou propriété de conduire le courant électrique varie largement d'une roche à l'autre. Les grandeurs qui l'expriment sont la conductivité - ou son inverse, la résistivité dont l'unité utilisée est l'Ohm.m.

La résistivité d'une roche sera fonction de la quantité d'eau qu'elle contient, donc de sa porosité, et de la minéralisation de l'eau qu'elle renferme. Une zone fissurée, à porosité plus importante que la roche saine, présentera une **résistivité plus faible, d'autant plus faible qu'elle sera plus fissurée**. Le rapport résistivité zones fissurées/résistivité roches saines peut atteindre 10.

**C'est un contraste suffisant pour être accessible à des mesures de surface**. La prospection électrique par courant continu détermine les résistivités à partir des courants conduits (1).

**En général, il y a une meilleure sélectivité des formations résistantes par courant continu.**

### **I.1 - LA PROSPECTION ELECTRIQUE PAR COURANT CONTINU**

Rappelons que selon que l'on s'intéresse aux variations de la résistivité avec la profondeur, ou latéralement, deux techniques sont à mettre en oeuvre :

- les sondages électriques
- les profils de résistivité

---

(1) La méthode de prospection électromagnétique par courant alternatif détermine la résistivité à partir des courants induits (voir paragraphe I.2).

### **I.1.1 - LE SONDAGE ELECTRIQUE**

Un sondage électrique (S.E.) consiste à établir la courbe de variation, en fonction de la profondeur, de la résistivité apparente des terrains et mesurée en surface à l'aide d'un dispositif à 4 électrodes (ou quadripôle) AMNB. La profondeur d'investigation est réglée en faisant varier la distance entre les électrodes d'injection de courant A et B.

La différence de potentiel créée est mesurée entre les électrodes M et N puis reportée sur un graphique pour chaque valeur de  $AB/2$  avec :

- en abscisse : la distance  $AB/2$
- en ordonnée : la résistivité apparente donnée par l'appareil.

Le tout en coordonnées bi-logarithmiques.

La courbe obtenue est alors interprétée soit par abaque, soit par programme sur ordinateur ou calculatrice de poche, en termes de conductance longitudinale ou de résistance transversale des faciès électriques successifs.

Le sondage électrique classique est exécuté selon une seule direction, mais à partir du centre du quadripôle d'autres mesures peuvent être faites dans des directions différentes dans le but de traduire l'anisotropie électrique du milieu.

Les dispositifs carrés sont des dispositifs particuliers d'investigation pluridirectionnelle utiles pour traduire une anisotropie du milieu qui, en l'absence de toutes autres indications, peuvent fournir l'orientation des principales directions de fissuration ou de fracturation et permettre d'orienter les profils de résistivités à entreprendre (voir ci-après).

#### **- Mise en oeuvre [9]**

La réalisation des sondages électriques pour de faibles longueurs de ligne - jusqu'à 600 m - nécessite un matériel relativement simple et peu encombrant :

- un appareillage de mesure (résistivimètre) et ses accessoires ;
- un véhicule.

Par ailleurs, cinq manoeuvres au plus sont nécessaires pour des sondages ne dépassant pas des longueurs de ligne AB de 1000 m.

### - Avantages

Les sondages électriques permettent de faire une interprétation quantitative qui peut être étalonnée sur des forages existants. Cette méthode permet en particulier de **donner une bonne information sur l'importance de l'altération** et sur les principaux accidents qui peuvent affecter le socle.

**Elle est indispensable à la définition des dispositifs du trainé électrique et à son interprétation.**

### - Inconvénients [16]

- nécessite un calage sur forage existant ;
- **son interprétation varie en fonction de l'orientation du sondage par rapport à la direction de fracturation présumée (en milieu anisotrope).**

#### **1.1.2 - LE TRAINÉ ELECTRIQUE OU PROFIL DE RESISTIVITE**

Le profil de résistivité donne pour des stations de mesures alignées et régulièrement espacées, la valeur de la résistivité apparente mesurée à l'aide d'un dispositif où l'écartement AB est constant. Il met donc en évidence **les variations latérales de la résistivité apparente.**

C'est un dispositif rigide qui, tant qu'il est assez court, est déplacé en traînant l'ensemble des câbles d'où son nom de "trainé" électrique.

L'emploi de plusieurs couples de mesure MN, pour chaque position des pôles d'envoi est aussi utilisé sous forme de dispositifs asymétriques, permettant de mieux localiser les causes des à-coups de prise.

Ces dispositifs sont connus sous le nom de [11] :

- trainé à répétition
- trainé combiné (où l'électrode commune d'envoi de courant est éloignée vers l'infini, à une distance supérieure à 5 fois la longueur AB/2 et disposée sur une perpendiculaire à AB).

**- Mise en oeuvre**

La réalisation des mesures nécessite le même matériel que celui du sondage électrique. Toutefois, le personnel doit être un peu plus nombreux, surtout dans le cas du trainé où plusieurs longueurs de lignes AB sont essayées.

**- Avantages**

- . Cette méthode **très largement utilisée** dans des projets d'implantation en hydraulique villageoise, permet le repérage de zones fracturées ou fissurées verticales ou subverticales.
- . C'est une méthode essentiellement **qualitative** qui permet parfois d'estimer le pendage de zones fracturées à condition d'adopter plusieurs longueurs de ligne AB (vrai seulement en milieu tabulaire).
- . Cette technique de prospection est rapide et relativement légère.

**- Inconvénients**

- Ne peut être utilisée seule car doit être obligatoirement dimensionnée sur les caractéristiques d'un sondage électrique voisin (choix de la longueur de ligne sur la branche ascendante du sondage électrique).
- La précision d'une telle méthode est fonction du pas de mesure (longueur MN) et de la dimension du quadripôle (longueur AB).

**1.1.3- CAS PARTICULIER DU SONDAGE ELECTRIQUE PLURI-DIRECTIONNEL**

Déjà évoquée plus haut, cette méthode permet l'étude de l'anisotropie électrique du milieu discontinu à l'aide de 2 dispositifs :

- Le dispositif "carré" où les quatre électrodes A, B, M et N sont disposées suivant un motif géométrique carré de côté **a**, ce dernier étant déterminé par sondage électrique préalable.

On réalise ensuite les mesures suivant 4 ou 6 directions, donc par rotations successives de  $45^\circ$  ou  $30^\circ$ , respectivement.

- Le dispositif rectangle où l'on déplace les électrodes de mesure MN non seulement le long de la ligne d'injection AB, mais aussi latéralement à cette dernière jusqu'à une distance voisine de  $AB/4$ .

La surface explorée couvre une aire égale à  $AB/3 \times AB/2(*)$ , de façon à limiter les effets de proximité d'électrode d'injection.

#### **- Mise en oeuvre**

La mise en oeuvre de cette méthode demande l'équipement de prospection électrique classique utilisé pour le sondage électrique déjà décrit.

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

#### **- Avantages**

- **Dispositif carré**
  - . Permet de déterminer 2 paramètres qui sont liés à la **direction des structures ou des fractures** et à **l'intensité de la fracturation**. Il permet ainsi de décider si un site est favorable ou non à l'implantation.

C'est un dispositif applicable à l'étude de tous les milieux discontinus tant en pays cristallin que karstique, mais présentant toutefois un intérêt limité en hydraulique villageoise.

- **Dispositif rectangle [13]**
  - . Permet la **suppression des à-coups de prise** relatifs aux électrodes d'injection AB pendant l'exécution du rectangle.
  - . Bon rendement dans la prospection quand de très longs AB sont nécessaires.

#### **- Inconvénients**

- **Dispositif carré**
  - Un tel dispositif ne permet pas à lui seul d'implanter un forage.

---

(\*) Rectangle limité du profil central ou configuration "Gradient".

- **Dispositif rectangle [23]**
- La profondeur d'investigation n'est pas rigoureusement constante le long du gradient ; elle est **plus faible** dès que l'on **s'éloigne de l'axe AB** : une anomalie rencontrée **en bordure** de gradient présente une **amplitude plus forte** mais un **niveau plus faible** que si elle était rencontrée au centre du gradient :
- Difficultés de raccorder entre eux deux rectangles voisins (embrayage délicat).
- Calculs du coefficient K longs et ennuyeux.

#### ***1.1.4 - VARIANTE DU DISPOSITIF TYPE "TRAINE" ELECTRIQUE***

Il s'agit de la rosace électrique. Cette méthode sert à préciser la direction des anomalies détectées par trainé électrique et utilise la même configuration électrique que le trainé : l'électrode de potentiel M est centrée sur l'anomalie pré-identifiée et l'autre pôle N tourne sur un cercle concentrique à M.

Lorsque la direction du segment MN coïncide avec celle de l'anomalie, on observe une différence de potentiel minimale très basse.

#### ***- Avantages et inconvénients***

Ce sont les mêmes que ceux exposés à l'occasion de la description de la méthode du trainé électrique.

#### ***1.1.5 - CONCLUSIONS - LIMITES D'APPLICATION DE LA METHODE [7]***

La méthode de prospection électrique en courant continu est utilisée depuis de longues années en Afrique de l'Ouest et ainsi que nous le verrons plus loin par des exemples, quelques données permettent de juger des résultats obtenus.

Initialement, avant l'introduction de la technique de forage au marteau-fond-de-trou, la technique du sondage électrique et celle du profil de résistivité apparente étaient préconisées pour l'implantation des puits et des **forages par battage ou au rotary** et ayant un **faible pouvoir de pénétration dans le socle sain ou fissuré** et **captant la nappe dans les altérites ou le socle altéré**.

Les résultats obtenus étaient dans l'ensemble satisfaisants et la méthode géophysique permettait d'atteindre un taux de réussite de 70 % pour des débits supérieurs à 0,5 m<sup>3</sup>/h.

Les résultats concernant la période suivante, celle de l'introduction du marteau-fond-de-trou, avec pour objectif **le captage de la nappe profonde de fissuration dans la roche saine**, sont moins favorables à la méthode. Le taux de réussite est en général voisin de 55 % pour des débits de 700 l/h.

La prospection électrique, qui constitue une méthode de recherche indirecte puisqu'elle exploite des phénomènes secondaires liés à l'altération des zones fracturées, a en outre une profondeur d'investigation limitée, car **l'origine de l'anomalie se situe dans la majorité des cas à faible profondeur**. Le taux d'échec observé peut donc s'expliquer en partie par des erreurs d'implantation.

Une prospection électrique par courant continu sur un site ne consiste pas à réaliser un profil isolé recoupant une anomalie électrique. Il faut **impérativement définir la direction des axes conducteurs, l'extension de l'anomalie et sa largeur réelle**.

C'est seulement après la réunion de tous ces éléments qu'une décision sera prise sur la sélection des anomalies, d'une part, et sur l'implantation du forage, d'autre part.

Certaines règles à respecter peuvent ainsi être établies à partir de l'expérience acquise, ce qui tend à améliorer l'interprétation des diagrammes obtenus. Nous y reviendrons.

## **I.2 - LES PROSPECTIONS ELECTRIQUES EN COURANT ALTERNATIF : LES METHODES ELECTROMAGNETIQUES**

Les méthodes électromagnétiques ont toujours connu un grand développement dans les pays où les terrains de subsurface sont résistants (Scandinavie, Canada). Elles sont moins utilisées dans les pays à recouvrement plus ou moins conducteur [22].

Il existe un grand nombre de méthodes électromagnétiques liées soit :

- aux paramètres mesurés : champ magnétique ou électrique, sens des vecteurs, champ total, inclinaison, déviation, composantes en phase ou en quadrature, etc...
- à la diversité des sources d'excitation : naturelle ou artificielle, proche ou lointaine, électrique ou magnétique.

Deux types d'investigation sont possibles :

- une investigation **verticale** qui détermine les **variations** des propriétés électriques ou magnétiques du sous-sol avec la **profondeur**.

Il s'agit là d'une équivalence avec le **sondage électrique en courant continu**.

- une investigation **horizontale** où les répartitions de ces mêmes propriétés du sous-sol sont **étudiées pour une même profondeur d'investigation**. On voit immédiatement une analogie avec le trainé électrique en courant continu.

### ***1.2.1 - PRINCIPE DES METHODES ELECTROMAGNETIQUES***

Lorsqu'une onde électromagnétique pénètre dans le sol, elle induit dans tout corps conducteur enfoui **des courants de Foucault** qui engendrent alors un champ magnétique **perturbateur du champ magnétique primaire** de l'émetteur.

Le principe de la méthode consiste à mesurer à la surface du sol les **déformations du champ magnétique primaire**, afin de détecter la présence de conducteurs souterrains (filons ou zones de fractures).

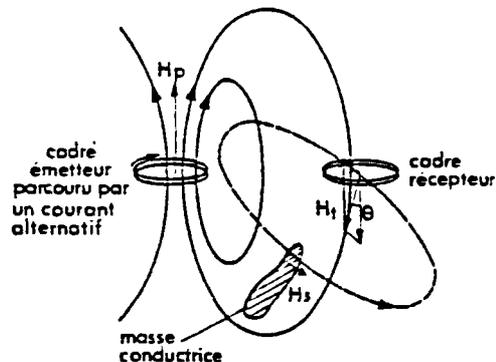
Cette méthode nécessite donc un **émetteur** qui crée le champ primaire et un **récepteur** qui permet de mesurer les paramètres du champ résultant. Le schéma de principe de la prospection électromagnétique est illustré en figure 1.

*Schéma de principe de la prospection électromagnétique.*

$H_p$  : champ primaire engendré par le courant alternatif circulant dans l'émetteur.

$H_s$  : champ secondaire provoqué par les courants induits dans la masse conductrice par le champ primaire.

$H_t$  : champ total.



**Figure 1 - Schéma de principe de la prospection électromagnétique**  
Extrait de : "Géophysique appliquée à l'hydrogéologie"  
par J.L. Astier, p. 81, Masson 1971

**1.2.2 - REVUE DES SYSTEMES ELECTROMAGNETIQUES USUELS OPERANT  
DANS LE DOMAINE FREQUENTIEL ET APPLIQUES A LA  
PROSPECTION AU SOL**

Le tableau 2 inclue l'ensemble des dispositifs existants au catalogue et plutôt que de les décrire chacun à leur tour, nous proposons sous forme de fiches comparatives, les principes, avantages et inconvénients de chaque dispositif proposé.

Ces systèmes de prospection électromagnétique ont été scindés en deux groupes :

- les systèmes électromagnétiques à émetteurs fixes tant lointains que proches (tableau 3 et fiches comparatives A à D) ;
- les systèmes électromagnétiques à émetteurs et récepteurs mobiles et à écartement variable (tableau 4 et fiche comparative E), mesurant les composantes réelles et imaginaires du champ magnétique secondaire.

Dans tous les cas, la profondeur d'investigation est fonction de deux facteurs : la distance émetteur-récepteur et la fréquence du courant inducteur. Elle est, en première approximation, comprise entre 0,5 et 1,5 fois la distance émetteur-récepteur, et d'autant plus grande que la fréquence est basse.

Quantité mesurée	SYSTEMES A EMETTEUR FIXE		SYSTEMES A EMETTEUR RECEPTEUR MOBILES
	EMETTEUR LOINTAIN	EMETTEUR PROCHE	
ANGLE D'INCLINAISON	AFMAG  V.L.F. (*) x	dispositifs à boucle émettrice verticale ou à boucle émettrice horizontale	dispositif "broadside" dispositif "in line"  SHOOTBACK (vert. et hor.)
COMPOSANTES REELLES ET IMAGINAIRES	V.L.F.  $tg\theta \approx Re(Hz)/H_p$  $\epsilon \approx Im(Hz)/H_p$		boucles horizontales coplanaires boucles verticales coplanaires boucles verticales coaxiales MAX-MIN
rapport des AMPLITUDES et différence de PHASE		boucle horiz. rect. TURAM câble long	
COMPOSANTES des CHAMPS ELECTRIQUE et MAGNETIQUE	Dispositif du C.R.G. de GARCHY (traîneau)  EM 16 R  MAGNETO-TELLURIQUE ARTIFICIELLE	MELOS dipôle magn. vert. dipôle magn. vert. EM R 16 dipôle magn. horiz.  dispositif de GOLDSTEIN dipôle élect. horiz.	

Tableau 2 - Classification des systèmes électromagnétiques usuels opérant dans le domaine fréquentiel - Prospection au sol

Quantité mesurée	SYSTEMES A EMETTEUR FIXE	
	EMETTEUR LOINTAIN	EMETTEUR PROCHE
ANGLE D'INCLINAISON	AFMAG  V.L.F.	dispositifs à boucle émettrice verticale ou à boucle émettrice horizontale
COMPOSANTES REELLES ET IMAGINAIRES	V.L.F.  $\text{tg}\theta \approx \text{Re}(\text{Hz})/\text{Hp}$  $\epsilon \approx \text{Im}(\text{Hz})/\text{Hp}$	
rapport des AMPLITUDES et différence de PHASE		boucle horiz. rect. TURAM câble long
COMPOSANTES des CHAMPS ELECTRIQUE et MAGNETIQUE	Dispositif du C.R.G. de GARCHY (traineau)  EM 16 R  MAGNETO-TELLURIQUE ARTIFICIELLE	MELOS dipôle magn. vert. dipôle magn. vert. EM R 16 dipôle magn. horiz.  dispositif de GOLDSTEIN dipôle élect. horiz.

**Tableau 3 - Classification des systèmes électromagnétiques usuels opérant dans le domaine fréquentiel**

**Prospection au sol**

**Systèmes électromagnétiques à émetteur fixe**

### **1.2.3 - CONCLUSIONS - LIMITES D'APPLICATION DE LA METHODE ELECTROMAGNETIQUE**

Les différentes méthodes électromagnétiques à mettre en oeuvre dépendent de la cible à détecter, mais il est déjà important de noter que :

- les méthodes d'inclinaison de champ (VLF inclinaison, TURAM) détectent **toutes sortes de conducteurs**, y compris les conducteurs très minces (failles), aussi bien que des limites de compartiments à résistivité différente ;
- les méthodes de type résistivité (MELOS, VLF résistivité, Max-Min) **mettent en évidence des conductances** (produit résistivité x épaisseur) et ne détectent pas les conducteurs minces.

Ces propriétés, inhérentes au paramètre physique perçu, doivent être présentes à l'esprit de l'hydrogéologue lorsqu'on doit choisir la méthode à employer sur un problème donné.

Nous verrons que dans notre deuxième partie, la technique du VLF mode inclinaison et résistivité, ainsi que l'emploi de la méthode Max-Min ont donné d'excellents résultats, surtout lorsqu'il s'agit d'établir des corrélations avec les méthodes électriques par courant continu telles que le sondage électrique ou le trainé électrique.

### **1.3 - LA METHODE MAGNETO-TELLURIQUE NATURELLE**

Le principe de la méthode magnéto-tellurique naturelle a été exposé par L. Cagniard dans un article publié en 1953.

Un sondage magnéto-tellurique (en abrégé SMT) consiste à déterminer, à l'aplomb d'un point fixe, la variation de la résistivité apparente des terrains en fonction de la période (ou de sa fréquence) des oscillations magnéto-telluriques naturelles.

Tout comme le sondage électrique, il réalise une investigation à profondeur croissante.

Le profil magnéto-tellurique correspond à une série de mesures effectuées à intervalles réguliers le long d'un trajet le plus rectiligne possible, la résistivité des terrains étant déterminée en chaque point pour une seule fréquence qui sera toujours la même. Il permet une investigation latérale à profondeur constante.

Les avantages et inconvénients de cette méthode sont brièvement explicités sur la fiche F.

Nom du dispositif		Fréquences (Hertz)	Distance Emetteur/ Récepteur	Remarques
ABEM	DEMIGUN	880 et 1640 Hz	30 - 60 - 90 150 - 180 m	boucles horizontales
APEX PARAMETRICS	MAX-MIN	222 - 444 - 888 - 1777 et 3555 Hz	30 - 60 - 90 et 120 m	boucles horizontales ou bouc. T horiz. et bouc. R vertic.
GEONIX	EM 17	1600 Hz	30 - 60 - 90 et 120 m	boucles  horizontales
	EM 17 L	817 Hz	50 - 100 - 150 et 200 m	
MAC PHAR	VHEM	6000-2400 Hz	50 - 60 - 90 ou 40 - 80 m	boucles horizontales
SCINTREX	SE 600	1600 Hz	60 ou 90 m	boucles horizontales

**Tableau 4 - Classification des systèmes électromagnétiques usuels opérant dans le domaine fréquentiel**

**Prospection au sol**

**Systèmes électromagnétiques à émetteur-récepteur mobiles**

## SYSTEMES ELECTROMAGNETIQUES USUELS EN PROSPECTION AU SOL

Nom du dispositif : VLF Mode inclinaison

<b>NATURE DU SYSTEME</b>	Système à émetteur fixe, lointain ; fréquence fixe : EM 16 GEONICS ; SYSCAL VLF BRGM.
<b>PRINCIPE ET APPLICATIONS</b>	Mesure des <b>déformations</b> du champ magnétique primaire : tg $\theta$ , Fraser et ellipticité - Recherche d'eaux souterraines en zones de <b>socle cristallin</b> . - Localisation de zones conductrices étroites ou de <b>fractures</b> . - Localisation de filons.
<b>AVANTAGES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût peu élevé.</li> <li>- Rapidité et facilité de mise en oeuvre (1 opérateur).</li> <li>- Permet la reconnaissance rapide d'une zone étendue.</li> <li>- Le traitement des mesures par dérivation et filtrage permet de <b>supprimer le bruit et d'améliorer la résolution des anomalies</b>.</li> <li>- Une interprétation quantitative peut être effectuée dans le cas d'un modèle 2 terrains lorsqu'on connaît la résistivité du premier.</li> </ul>
<b>INCONVENIENTS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Faible profondeur d'investigation</b> (40 m maximum).</li> <li>- Le champ magnétique primaire <b>s'atténue rapidement</b> avec la <b>profondeur</b> dans les zones de conductivité faible ou modérée.</li> <li>- <b>Impossibilité d'évaluer la conductivité</b> dans le cas de <b>conducteurs faibles</b>, les champs secondaires étant fortement déphasés par rapport au champ primaire.</li> <li>- Sensibilité aux conducteurs industriels (lignes électriques, téléphoniques, clôtures, conduites, etc...).</li> <li>- Interprétation <b>quantitative difficile</b> d'une zone fracturée profonde dans le cas d'une couche conductrice superficielle.</li> <li>- Possibilités d'applications <b>réduites</b> par le nombre de stations VLF recevables.</li> <li>- Il n'existe pas toujours d'émetteurs VLF <b>dans la direction de la structure recherchée</b>.</li> <li>- Gêne apportée par les interruptions des émissions.</li> </ul>
<b>EXEMPLES D'APPLICATIONS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vendée, Bretagne, Normandie, Corse.</li> <li>- Afrique occidentale (Bénin, Togo, Niger, Sénégal, Burkina-Faso, etc...).</li> </ul>
<b>OBSERVATIONS</b>	L'émetteur NAA (17,8 kHz) apparaît comme le plus facile à capter en Europe et en Afrique de l'Ouest.

## SYSTEMES ELECTROMAGNETIQUES USUELS EN PROSPECTION AU SOL

Nom du dispositif : VLF Mode résistivité

<b>NATURE DU SYSTEME</b>	Système à émetteur fixe, lointain ; fréquence fixe : EM 16 R (boitier Radiohm) GEONICS et ligne tellurique ; SYSCAL VLF.
<b>PRINCIPE ET APPLICATIONS</b>	Mesures des <b>composantes horizontales</b> des champs électriques et magnétiques ; résistivité apparente $\rho_a$ et déphasage $\Phi$ entre $E_x$ et $H_y$ . <ul style="list-style-type: none"> <li>- Recherche de zones <b>fracturées</b>.</li> <li>- Evaluation de l'épaisseur d'un recouvrement (alluvions).</li> <li>- Etudes et contrôle de fracturation en zones de socle.</li> <li>- Délimitation de zones à permafrost.</li> </ul>
<b>AVANTAGES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilité et rapidité de mise en oeuvre.</li> <li>- Légèreté de l'équipement (pas d'émetteur).</li> <li>- Utilisation en phase de reconnaissance dans une prospection.</li> <li>- Rendement élevé: 100 stations par jour.</li> </ul>
<b>INCONVENIENTS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible profondeur d'investigation (une dizaine de mètres au maximum).</li> <li>- Pauvreté en fréquences.</li> </ul>
<b>EXEMPLES D'APPLICATIONS</b>	- France : Broualan
<b>OBSERVATIONS</b>	

## SYSTEMES ELECTROMAGNETIQUES USUELS EN PROSPECTION AU SOL

Nom du dispositif : Magnéto-Tellurique Artificielle

<b>NATURE DU SYSTEME</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Système à émetteur fixe, lointain ; <b>2 fréquences d'utilisation en FRANCE</b> (163,8 kHz et 15,1 kHz).</li> <li>- Sondeur MT-VLF du C.R.G. de GARCHY - Dispositif traineau.</li> </ul>
<b>PRINCIPE ET APPLICATIONS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrairement à la M.T. classique, <u>la source du phénomène est ici une excitation artificielle.</u> Pour la mesure du champ électrique, les électrodes résistives sont remplacées par des électrodes capacitives posées sur le sol.</li> <li>- Détection de failles.</li> <li>- Détection de cavité.</li> <li>- Etude de Permafrost.</li> </ul>
<b>AVANTAGES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rapidité de mise en oeuvre.</li> <li>- Mesures ponctuelles ou continues.</li> <li>- Electrodes capacitives intéressantes sur sols résistants.</li> <li>- Bon rendement : 60 à 80 stations/jour.</li> </ul>
<b>INCONVENIENTS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pauvreté en fréquences (deux) entraînant une indétermination de la nature et de la profondeur des anomalies enregistrées.</li> <li>- Sensibilité aux parasites industriels, aux lignes à haute-tension, aux postes émetteurs radio.</li> <li>- Dépendance des fluctuations ou arrêts de l'émission et des conditions atmosphériques.</li> <li>- Difficulté de déplacement des électrodes capacitives en terrain boisé, broussailleux ou clôturé.</li> <li>- Les mesures étant effectuées à des fréquences élevées, la tranche de terrain intéressée <b>est faible.</b></li> </ul>
<b>EXEMPLES D'APPLICATIONS</b>	
<b>OBSERVATIONS</b>	

## SYSTEMES ELECTROMAGNETIQUES USUELS EN PROSPECTION AU SOL

Nom du dispositif : MELOS (Magnéto-Electrique par Ondes de Surface)

<b>NATURE DU SYSTEME</b>	- Système à émetteur fixe, proche ; <b>12 fréquences</b> fixes préaccordées de 17,5 à 35840 Hz (MINIMELOS) ; Fréquences choisies à volonté dans la bande de 1 à 1000 Hz (MAXI MELOS).
<b>PRINCIPE ET APPLICATIONS</b>	- Méthode magnéto-tellurique à source contrôlée ; un émetteur de rayonnement magnétique constitué par un <b>dipôle vertical</b> est disposé à la surface du sol. Un récepteur placé à une distance R de l'émetteur mesure les composantes Hse, Hz et Ey du champ électromagnétique en provenance de l'émetteur transmis au voisinage de la surface. La pénétration plus ou moins grande du rayonnement dans le sous-sol conducteur en fonction de la fréquence permet la réalisation du sondage ; <b>études structurales, détection de failles ou flexures, recherches de cavités et conduits karstiques, application en milieu fissuré calcaire (directions de fissuration, coefficients d'anisotropie).</b>
<b>AVANTAGES</b>	Dans le cas de <b>formations tabulaires</b> , les avantages du sondage MELOS par rapport au sondage électrique sont : - rapidité et facilité de mise en oeuvre, - importance moindre des variations latérales de résistivité ; pas de problème d'injection de courant, - utilise une source artificielle connue, - contrastes de résistivité plus accentués qu'en méthode électrique conventionnelle.
<b>INCONVENIENTS</b>	- Difficulté du <b>choix d'orientation de la ligne tellurique (Ey)</b> par rapport à la direction supposée de la structure recherchée. - La <b>composante Hz</b> mesurée est trop soumise à une influence extérieure à cause de la proximité de la source, à moins d'augmenter la distance émetteur-récepteur. - Difficultés d'utiliser des fréquences très basses dans certains cas, à cause des paramètres géoélectriques du sous-sol.
<b>EXEMPLES D'APPLICATIONS</b>	- Repérage de galeries <b>karstiques</b> (source du Lez dans L'Hérault - France). - Détermination de l'extension d'argiles salées (très basses résistivités). - Etude des <b>200 premiers mètres de sédiments</b> à partir de la surface dans une région très tectonisée.
<b>OBSERVATIONS</b>	Descriptif de l'appareillage en Annexe 3 du rapport 83 SGN 312 GPH

## SYSTEMES ELECTROMAGNETIQUES USUELS EN PROSPECTION AU SOL

Nom du dispositif : APEX MAX-MIN

<b>NATURE DU SYSTEME</b>	- Appareillage émetteur-récepteur mobiles, à écartement variable (6 écartements) et à multifréquences d'opération (5 fréquences).
<b>PRINCIPE ET APPLICATIONS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La boucle d'émission interne horizontale crée un champ magnétique vertical, lequel en présence d'un milieu conducteur induit des <b>courants de Foucault</b> dans le conducteur, ces derniers créant un champ secondaire déphasé. Le récepteur mesure le champ total.</li> <li><b>La présence d'une anomalie conductrice se manifeste sur un profil par 2 pics positifs, en cadrant un pic négatif centré sur l'anomalie.</b></li> <li>- Application de plus en plus importante en hydrogéologie.</li> <li>- Etude de zones faillées <b>larges</b>.</li> <li>- Etude de la fracturation en zones de socle.</li> </ul>
<b>AVANTAGES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilité de mise en oeuvre.</li> <li>- Utilisation de plusieurs fréquences.</li> <li>- Meilleure focalisation de l'anomalie conductrice ; interprétation quantitative possible.</li> <li>- Détermination de la profondeur et du pendage de la structure reconnue.</li> <li>- Utilisation possible sur substratum granitique, avec faible épaisseur d'altération.</li> </ul>
<b>INCONVENIENTS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité de maintenir <b>constante la distance émetteur-récepteur</b> (une erreur de 1 % sur la distance entraîne une erreur de 3 % sur la mesure).</li> <li>- Corrections topographiques, sur la composante réelle, nécessaires en terrains accidentés.</li> <li>- Influence des formations conductrices superficielles sur l'interprétation.</li> </ul>
<b>EXEMPLES D'APPLICATIONS</b>	Pour la prospection au sol, le dispositif à boucles horizontales (HLEM mode MAX) est le plus utilisé. Pour la recherche d'eaux souterraines : Iwaco-Burkina Faso, Mac Donald-Nigeria.
<b>OBSERVATIONS</b>	Descriptif de l'appareillage en Annexe 8 du rapport 83 SGN 312 GPH.

## SYSTEMES ELECTROMAGNETIQUES USUELS EN PROSPECTION AU SOL

Nom du dispositif : Magnéto-Tellurie Naturelle

<b>NATURE DU SYSTEME</b>	Système autorisant la mesure simultanée des amplitudes des variations de 2 composantes d'un champ électromagnétique dans une gamme de fréquence de 2 à 2000 Hz. Possibilité de filtrage à 8 fréquences préréglées. Résistivimètre magnéto-tellurique du CRG de Garchy.
<b>PRINCIPE ET APPLICATIONS</b>	<p>Détermination de la résistivité apparente <math>\rho_a</math> du sous-sol à partir de la mesure de surface, suivant 2 directions perpendiculaires <math>O_x</math> et <math>O_y</math>, des <b>variations simultanées des composantes horizontales des champs telluriques (<math>E_x</math>) et magnétiques (<math>H_y</math>) naturels</b> ; Cagniard (1953) : <math>\rho_a = 1/5F (E_x/H_y)^2</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>Géothermie</u> + Recherches d'eaux chaudes minéralisées. + Recherche structurale, en suivant un marqueur, soit résistant, soit conducteur.</li> <li>- <u>Hydrogéologie</u> + Recherche structurale dans les grands bassins sédimentaires.</li> </ul>
<b>AVANTAGES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en oeuvre relativement simple.</li> <li>- Profondeur d'investigation importante car fonction de la fréquence utilisée : le standard de pénétration est d'autant plus grand, que la fréquence est basse et la résistivité est élevée <math>\left( P = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10}{F} \rho} \right)</math></li> <li>- Méthode en général plus rapide que la méthode électrique classique.</li> </ul>
<b>INCONVENIENTS</b>	<p>La méthode M.T. est spécialement adaptée à la recherche de <b>zones à faible résistivité</b>. Les terrains résistants sont plus difficiles à détecter ; une épaisseur 2 à 3 fois plus grande que celle des terrains encaissants est nécessaire pour qu'un terrain résistant soit discernable sur une courbe de sondage M.T., d'où un <b>manque de précision dans l'interprétation</b>, ce qui est gênant pour les recherches hydrogéologiques.</p> <p>Utilisation conjointe de la prospection électrique et de la prospection M.T. pour lever les ambiguïtés dans l'interprétation quantitative des données.</p>
<b>EXEMPLES D'APPLICATIONS</b>	Arabie saoudite (Projet SAQ)
<b>OBSERVATIONS</b>	Rendement : 4 à 5 sondages magnéto-telluriques par jour. Fiche descriptive en Annexe 1 du rapport 83 SGN 312 GPH.

## II - LES METHODES D'APPRECIATION DU PARAMETRE DE VITESSE DES ONDES DANS LE SOL : LA PROSPECTION SISMIQUE

Si en un point du sol on provoque un ébranlement, ce dernier se propage de proche en proche en s'amortissant ; le temps nécessaire pour qu'il atteigne des récepteurs dépend de la nature et de la disposition des formations géologiques.

La prospection sismique a pour préoccupation l'étude de ce temps de propagation.

L'ébranlement du sol se traduit par une émission d'ondes de déformation ou ondes élastiques, les principales étant [3] :

- les ondes de Rayleigh, qui se propagent uniquement à la surface du sol ;
- les ondes longitudinales ou ondes de compression et de dilatation ;
- les ondes transversales ou ondes de cisaillement (la déformation du terrain est ici perpendiculaire à la direction de la propagation).

La vitesse de propagation des ondes transversales est environ moitié de celle des ondes longitudinales. Les ondes de Rayleigh sont encore plus lentes. La prospection sismique ne s'intéresse qu'aux ondes longitudinales principalement. La vitesse de propagation des ondes élastiques dans le sol est comprise entre de larges limites.

Ainsi et pour un même type de roche, la vitesse de propagation diminue avec le degré d'altération, de fissuration ou de fracturation. On voit immédiatement l'intérêt d'une telle méthode en matière d'hydrogéologie en milieu fissuré.

Le tableau 5 donne les valeurs de propagation des ondes longitudinales les plus fréquemment rencontrées :

Formations	Vitesse (km/s)
Air	0,33
Eau douce	1,45
Vases	0,2-0,6
Couche superficielle meuble et sèche (weathered zone)	0,2-0,6
Alluvions sèches	0,6-1,2
Alluvions humides	1,6-2,4
Argiles	1,8-2,2
Tufs volcaniques	1,8-2,5
Marnes. Craie	2,3
Grès	2-3,5
Laves	2,5-4
Calcaires et dolomies	3-5
Schistes, micaschistes	3-4,5
Gneiss, quartzites	3,5-5
Granite	4-6

Tableau 5  
Vitesse des ondes sismiques

En milieu fissuré et particulièrement dans l'hydrogéologie appliquée à l'étude des milieux fissurés et pour mettre en évidence l'environnement lent dissocié de la roche saine correspondante, c'est la méthode sismique réfraction qui est le plus couramment utilisée et sous forme de deux techniques [27] :

- le sondage ou le profil sismique réfraction,
- le tir en arc.

## **II.1 - LA METHODE SISMIQUE REFRACTION**

### **II.1.1 - LA TECHNIQUE DU SONDAGE ET DU PROFIL SISMIQUE REFRACTION**

Cette méthode a pour objet principal d'étudier les caractéristiques physiques du marqueur sismique profond.

Pour un compartiment fracturé, la vitesse des ondes longitudinales et transversales est plus faible que celle caractérisant le milieu non fracturé.

La présence et la position d'une zone fracturée sont révélées par l'analyse des vitesses obtenues à partir des dromochroniques, correspondant à des tirs en offset, donc à l'arrivée de l'onde réfractée sur le marqueur sismique profond [8].

La détermination de ces vitesses est immédiate.

L'objectif de la méthode n'est pas d'évaluer une vitesse du passage fracturé, mais de le localiser en repérant des "anomalies de vitesses". On peut ainsi délimiter la position et définir la largeur de la zone fracturée au toit du marqueur sismique.

Dans le cas de zones fracturées très étroites, l'intervalle entre géophones doit être réduit à quelques mètres et l'appareillage utilisé doit permettre le pointage des films à la milliseconde près.

La méthode sismique-réfraction constitue une prospection directe des zones fracturées et donne des informations se situant à une profondeur généralement plus importante que celles fournies par la prospection électrique. Eu égard à sa mise en oeuvre lourde, cette technique est toujours utilisée en complément de la prospection électrique.

En règle générale, la reconnaissance d'un site comporte la réalisation d'un ou plusieurs sondages électriques, d'un profil de résistivité apparente disposé perpendiculairement à la direction de fracturation supposée et d'un essai sismique-réfraction au droit de l'anomalie électrique.

De nombreux exemples d'utilisation conjointe de la sismique réfraction et de la prospection électrique classique en courant continu, seront donnés dans la deuxième partie de ce rapport.

### **II.1.2 - LA TECHNIQUE DU TIR EN ARC**

Dans la technique du tir en arc, au lieu d'aligner sismomètres et points de tir, on place les sismomètres suivant un arc centré sur le point de tir ; le rayon de l'arc doit être suffisamment long pour que les ondes arrivant les premières aux sismomètres correspondent à des ondes réfractées au toit du marqueur à étudier. **Les temps de traversée du recouvrement sous le point d'ébranlement, ainsi que le temps de parcours au toit du marqueur à étudier, sont à peu près les mêmes pour tous les sismomètres** : les anomalies de temps mises en évidence par ces derniers sont donc principalement dues aux **variations de profondeur du marqueur** sous l'arc sismique.

Les tirs en arc sont particulièrement indiqués pour **suivre des structures de forme allongée** (vallées fossiles relativement étroites, zones broyées, failles).

### **II.1.3 - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA METHODE SISMIQUE REFRACTION - APPLICATIONS DE LA METHODE [4]**

Le contraste de vitesse entre l'ensemble formé par la couche d'altération et la roche fissurée d'une part, et la roche compacte d'autre part, est **très élevé** et la sismique réfraction **se prête bien à la détermination de la profondeur de la roche compacte**, et ceci quelle que soit l'importance respective de la couche d'altération et de la roche fissurée (condition restrictive rappelons-le dans l'utilisation de la technique du sondage électrique). Cette détermination de profondeur peut toutefois être affectée d'une légère imprécision pour deux raisons :

- les terrains secs lorsqu'ils sont épais forment un écran qui masque sur les dromochrones les terrains imbibés sous-jacents ;

- la vitesse dans le recouvrement imbibé augmente souvent progressivement avec la profondeur et l'on doit **admettre** dans les calculs **une vitesse moyenne approximative**.

Enfin, il est à signaler que les variations de la nature pétrographique de la roche **n'ont généralement pas d'influence sur les vitesses**, ces dernières étant donc essentiellement fonction du degré d'altération et de fissuration de la roche, mais aussi de son imbibition.

Quoiqu'il en soit, la méthode sismique-réfraction doit être considérée actuellement comme **l'outil géophysique le plus précis pour la détermination de l'épaisseur globale des terrains altérés et fissurés et la reconnaissance des dépressions au toit du substratum compact imperméable** et cela tout en tenant compte du prix élevé de la mise en oeuvre de la méthode et de sa faible rentabilité, ces deux derniers facteurs ne constituant guère des éléments favorables à la technique préconisable, lorsqu'il s'agit, par exemple, de constituer un préambule à des projets d'aménagement du type "hydraulique villageoise".

## II.2 - LA METHODE SISMIQUE REFLEXION

Dans ce type de prospection, tout contact entre couches géologiques caractérisées par des vitesses différentes, constitue un **miroir** renvoyant les ondes vers la surface, quelle que soit la position de la couche la plus rapide. La quantité d'énergie réfléchi est d'autant plus grande, que le contraste entre les vitesses des deux couches impliquées est plus fort.

La méthode de prospection géophysique par sismique-réflexion, bien que peu appliquée à l'hydrogéologie actuellement, est celle qui presque toujours peut donner une image du sous-sol la plus complète et la plus précise possible. Toutefois et en ce qui concerne son développement dans des applications hydrogéologiques, on lui préfère la sismique ~~réflexion~~ <sup>réfraction</sup> pour les trois raisons suivantes [3] :

- elle est mal adaptée aux études à petite profondeur et ne donne **en général** de bons résultats, que pour des profondeurs au moins égales à 200 m ;
- elle est beaucoup plus efficace à l'occasion de la mise en oeuvre de grands profils sismiques continus, une telle exécution étant rarement de règle en matière d'hydrogéologie et a fortiori en hydraulique villageoise ;

- enfin, le prix de revient d'une équipe sismique-réflexion, même la plus légère soit-elle, est largement supérieur à celui des équipes sismique-réfraction mobilisées en recherche hydrogéologique.

### **II.3 - CONCLUSIONS SUR LA METHODE SISMIQUE**

La zone fissurée et fracturée se présente, d'un point de vue sismique, comme **une zone lente encastrée dans des formations plus rapides.**

La méthode de prospection géophysique par sismique réfraction est avec ses techniques de sondages, profils et tirs en arc capable de mettre le mieux possible en évidence de telles structures.

Mais comme une telle méthode est au demeurant lourde, chère et nécessitant par là même la mobilisation d'un personnel important, son utilisation ne doit être envisagée qu'en complément des méthodes de résistivité lorsqu'une ambiguïté d'interprétation peut exister.

Par ailleurs, démontrer d'une manière absolue que le socle ne se comporte pas comme un milieu homogène et isotrope, mais comme un milieu caractérisé par une vitesse croissante avec la profondeur paraît difficile.

Il n'en reste pas moins vrai que les possibilités offertes par la méthode résultent de sa profondeur d'investigation importante et de la détermination des accidents tectoniques et de leur pendage à l'aide des coupes profondeurs.

Des exemples d'application tant en France qu'Outre-Mer seront commentés dans la deuxième partie.

### III - LES METHODES D'APPRECIATION DU PARAMETRE DE SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE : LA METHODE MAGNETIQUE

Cette méthode est surtout utilisée en prospection minière et son seul emploi connu en hydrogéologie se rapporte à la détection de dykes de type doléritique. L'aimantation acquise par les roches sous l'effet du champ magnétique terrestre dépend de leur **susceptibilité magnétique** [7].

Les roches à forte susceptibilité magnétique correspondent aux roches basiques et ultra-basiques. Les formations du socle les plus fréquemment rencontrées en Afrique de l'Ouest, telles que gneiss, amphibolites, schistes et migmatites, etc..., sont magnétiques à des degrés divers selon leur caractère plus ou moins basique d'une part, et selon l'importance de certains minéraux (magnétite, amphibole, pyroxènes) d'autre part.

Sous l'effet du champ magnétique terrestre dont la direction et l'intensité sont dépendantes de la latitude du point de mesure, la distribution des susceptibilités magnétiques dans le sous-sol crée des anomalies magnétiques. A la latitude magnétique de l'ensemble des pays de l'Afrique sahélienne, les corps magnétiques tels que dykes ou intrusions doléritiques par exemple, créent des **anomalies magnétiques négatives**.

Pour expliquer d'une part la présence **d'anomalies positives**, et d'autre part leur **corrélation avec les anomalies électriques**, l'hypothèse admise est que l'altération, agissant sur les zones fracturées, détruit les propriétés magnétiques des roches, de sorte que le socle magnétique, constitué par le socle sain, s'approfondit localement au droit des passages fracturés.

La méthode, qui présente **l'avantage d'une très grande rapidité d'exécution**, ne peut être préconisée en reconnaissance systématique car son domaine d'application se limite à un milieu cristallin à tendance basique. Il s'agit en fait d'une méthode d'étude complémentaire.

Bien que l'interprétation en prospection magnétique se limite à une **analyse qualitative des résultats**, la synthèse des résultats des prospections électriques, sismiques et magnétiques révèle que la position du maximum magnétique est très proche, à quelques exceptions près, des retards sismiques correspondant au marqueur profond.

Ces résultats signifient, en particulier, que la **profondeur d'investigation en magnétisme est relativement importante** et donc, supérieure à celle explorée par la prospection électrique.

#### **IV - LES METHODES D'APPRECIATION DU PARAMETRE DE DENSITE : LA METHODE GRAVIMETRIQUE**

Nous la signalons ici pour mémoire, aucun des projets examinés dans le cadre de la présente étude n'ayant mis en oeuvre une telle méthode.

#### **V - LES METHODES D'APPRECIATION DES PARAMETRES DE POTENTIEL, DE DISPERSION OU D'ACCUMULATION : LES METHODES DE POLARISATION**

Ces méthodes respectivement connues sous le nom de **Polarisation Spontanée** et **Polarisation Provoquée** sont citées ici et uniquement pour mémoire.

Leur mise en oeuvre à l'occasion de projets d'aménagement d'hydraulique villageoise ne s'est pas présentée, à notre connaissance.

La méthode de polarisation provoquée a toutefois été développée sur le site expérimental de Broualan (France) dans le cadre du programme d'étude sur l'Hydrogéologie des Milieux Fissurés du département EAU du BRGM.

## **VI - CONCLUSION PARTIELLE : CHAMP D'APPLICATION TECHNIQUE DES DIFFERENTES METHODES**

L'expérience acquise par de nombreux naturalistes en matière de prospection géophysique de surface appliquée à la reconnaissance des aquifères discontinus fracturés au cours de la dernière décennie, permet malgré tout de préciser d'une manière globale le domaine d'application de chaque méthode de prospection, ses performances, ses interdits d'utilisation ou au contraire ses meilleures adaptabilités aux problèmes posés par les aménagements d'hydraulique villageoise notamment.

Ainsi, il apparaît indubitable que certaines zones intéressées par des projets d'hydraulique villageoise offrent a priori peu d'intérêt pour l'application d'une quelconque méthode de prospection géophysique : dans ces cas, les taux de réussite des forages à 1 m<sup>3</sup>/h est compris entre 70 et 90 %. Ces résultats ont été obtenus sans faire appel à la prospection géophysique. Dans la majeure partie des cas rencontrés, ces zones intéressent les formations :

- du Birrimien schisteux sur la majeure partie de son aire d'extension ;
- des grès de l'Infracambrien, comme au Mali, par exemple ;
- de l'Antécambrien granitique à fortes épaisseurs d'altération, notamment en zone forestière, sauf dans le cas où les altérites sont dénoyées.

Dans toutes ces régions, il est vrai très particulières, 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 10 à 30 % d'échecs prévisibles pour y concentrer la prospection géophysique.

Une telle éventualité ne se présente malheureusement que dans de très rares cas.

### **VI.1 - CHAMP D'APPLICATION DE LA METHODE ELECTRIQUE CLASSIQUE EN COURANT CONTINU**

Il s'agit d'examiner ici les techniques du sondage électrique, trainé électrique, cartes de résistivités et de leur variante pluridirectionnelle.

Ces techniques sont actuellement les plus employées et de très loin d'ailleurs, et peuvent être utilisées dans la plupart des cas, en tenant compte de leur profondeur

d'investigation qui peut être importante d'une part, et de leur relative rapidité de mise en oeuvre, d'autre part.

Les renseignements que la méthode électrique classique apporte concernent l'épaisseur, la nature et le degré d'hétérogénéité des couvertures d'altération. Par contre, elle ne semble pas directement permettre l'appréciation physique de la fracturation ou de la fissuration du socle.

Pour cette raison, il reste préférable d'utiliser la méthode électrique classique en **association** avec une autre, de manière à **décider** avec le plus de **précision** possible de l'emplacement d'un forage.

Le cas particulier de la méthode électrique pluridirectionnelle, permet de déterminer ponctuellement des directions d'anisotropie que l'on **admet** être liées à la fracturation du socle.

Utilisée en préliminaire à la méthode électrique classique, la **méthode électrique pluridirectionnelle** permet de définir des directions à donner aux profils électriques. Son utilisation est de plus particulièrement recommandée lorsque l'absence de linéaments tant sur photo-aériennes, que sur le terrain, ne permet pas la définition de la direction du profilage électrique. Il ne faut pas oublier, toutefois, qu'une telle méthode **ne permet pas à elle seule d'implanter un forage**.

## **VI.2 - CHAMP D'APPLICATION DE LA METHODE ELECTROMAGNETIQUE**

Cette méthode donne de très bons résultats lorsque le socle est disposé à faible profondeur : elle procure alors des résultats qualitatifs comparables à ceux du trainé électrique.

Il faut toutefois bien se rappeler que les méthodes d'inclinaison de champ (VLF inclinaison par exemple) détectent toutes sortes de conducteurs, y compris les conducteurs minces ; tandis que les méthodes de résistivité (VLF résistivité, Max-Min, par exemple) mettent en évidence des conductances et ne détectent pas les conducteurs minces.

En zone granitique à faible épaisseur d'altération, l'emploi de la méthode électromagnétique est pleinement justifiée et montre par ailleurs une excellente concordance avec les méthodes électriques par courant continu.

### **VI.3 - CHAMP D'APPLICATION DE LA METHODE SISMIQUE**

Cette méthode est rarement employée seule en recherche d'eau dans les aquifères discontinus ; bien plus lourde à mettre en oeuvre que les techniques électriques, elle ne permet pas la reconnaissance rapide, même partielle, d'un secteur étendu.

Son utilisation pour la localisation de fractures aquifères dans le socle cristallin est de ce fait rare en hydraulique villageoise et reste réservée à des cas difficiles demandant un investissement financier supplémentaire ou dans le cadre d'études d'aménagement d'hydraulique urbaine, par exemple.

### **VI.4 - CHAMP D'APPLICATION DE LA METHODE MAGNETIQUE**

Le domaine d'élection de cette méthode comprend toutes les zones injectées de dolérites ou de roches basiques à ultrabasiques diverses. Eu égard à sa facilité de mise en oeuvre et de son efficacité dans de tels contextes géologiques, cette méthode peut être utilisée seule ou en association.

- seule, elle permet de délimiter les intrusions doléritiques et de localiser leurs épontes parfois aquifères,
- associée à une autre méthode (électrique par exemple ou électromagnétique) elle peut intervenir dans la localisation de fractures en pays basique.

### **VI.5 - CHAMP D'APPLICATION DE LA METHODE GRAVIMETRIQUE**

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. Toutefois, c'est l'importance des corrections topographiques à apporter aux mesures qui restreint considérablement son utilisation en terrain accidenté.

Son domaine d'application actuel paraît se limiter à des aménagements d'hydraulique urbaine.

**Deuxième partie**

**LES METHODES DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE DE SURFACE ILLUSTRÉES**

**PAR DES EXEMPLES**

**I - Présentation de cas-types**

**II - Autres exemples sur l'expérience acquise en  
Afrique de l'Ouest et en Métropole**



## I - PRESENTATION DE "CAS TYPES" (\*)

Le présent sous-chapitre est une illustration de cas réels de reconnaissances de quelques 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 figure.

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

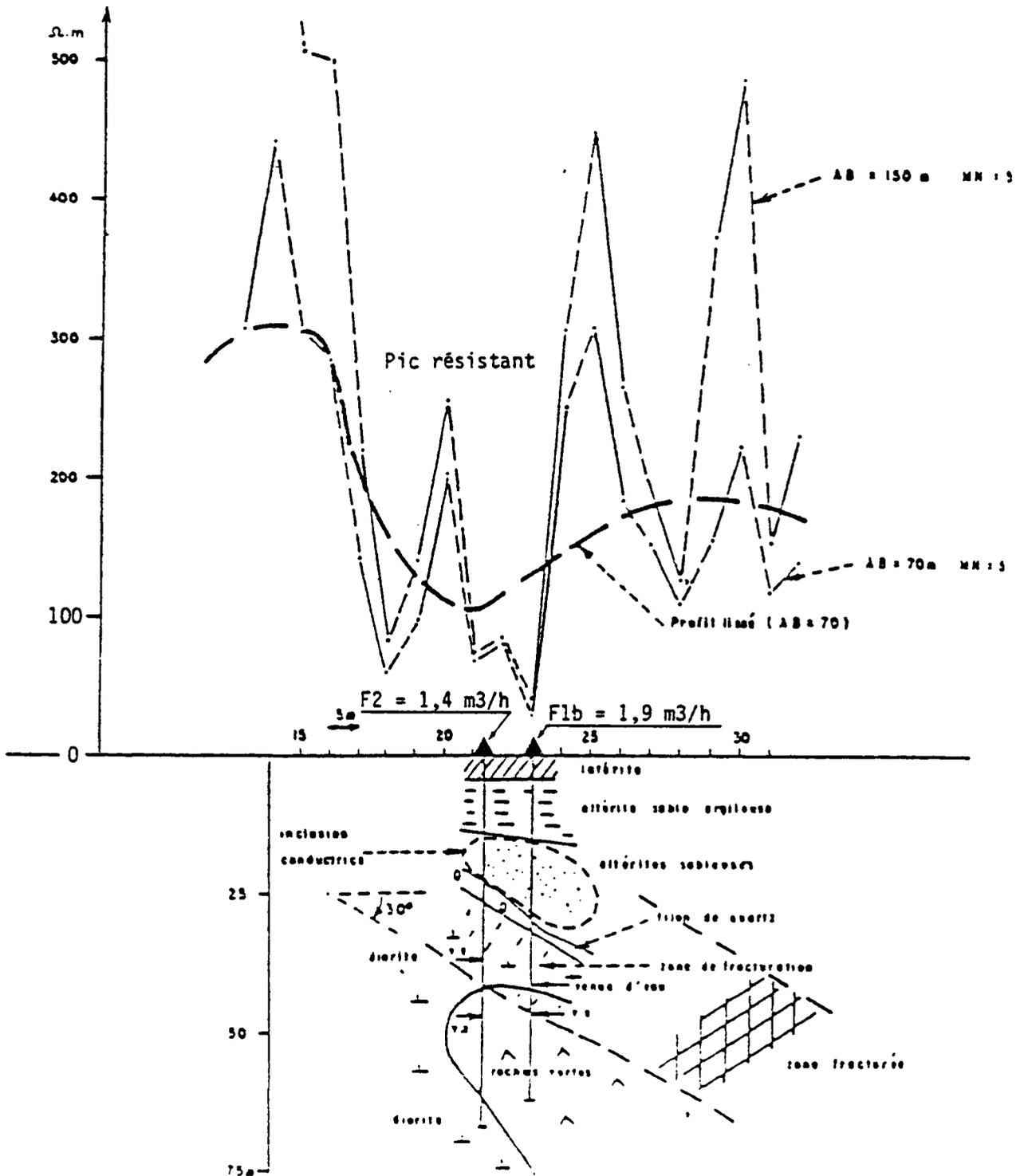
La présentation synthétique de chaque cas type sur une planche unique montrant les profils, coupes, débits et structures présumées, ainsi que les commentaires explicatifs, ont été conçus dans le souci :

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

---

(\*) La totalité de ces "cas types" est extraite du rapport CIEH "Utilisation des méthodes géophysiques pour la recherche d'eau dans les aquifères discontinus" par Burgeap-CGG - Méditerranéenne de Géoélectrique (janvier 1984).

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

Figure 2

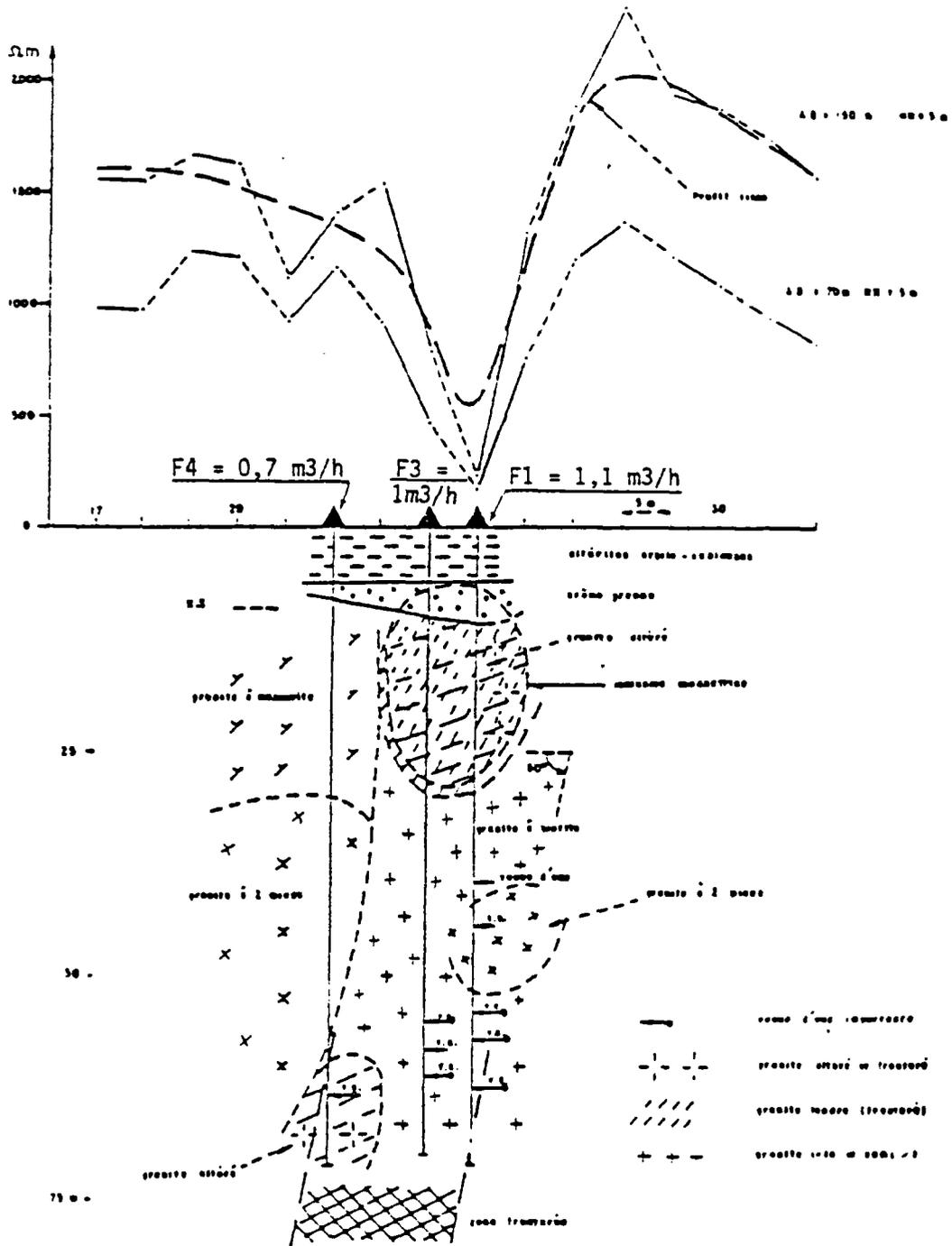
**Figure 2****Lokola (Côte d'Ivoire) - Diorite et roches vertes  
Etude du pendage des fractures par profils électriques  
en double longueur de ligne**

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-RENARDET / CGG DCH COTE D'IVOIRE	

Figure 3

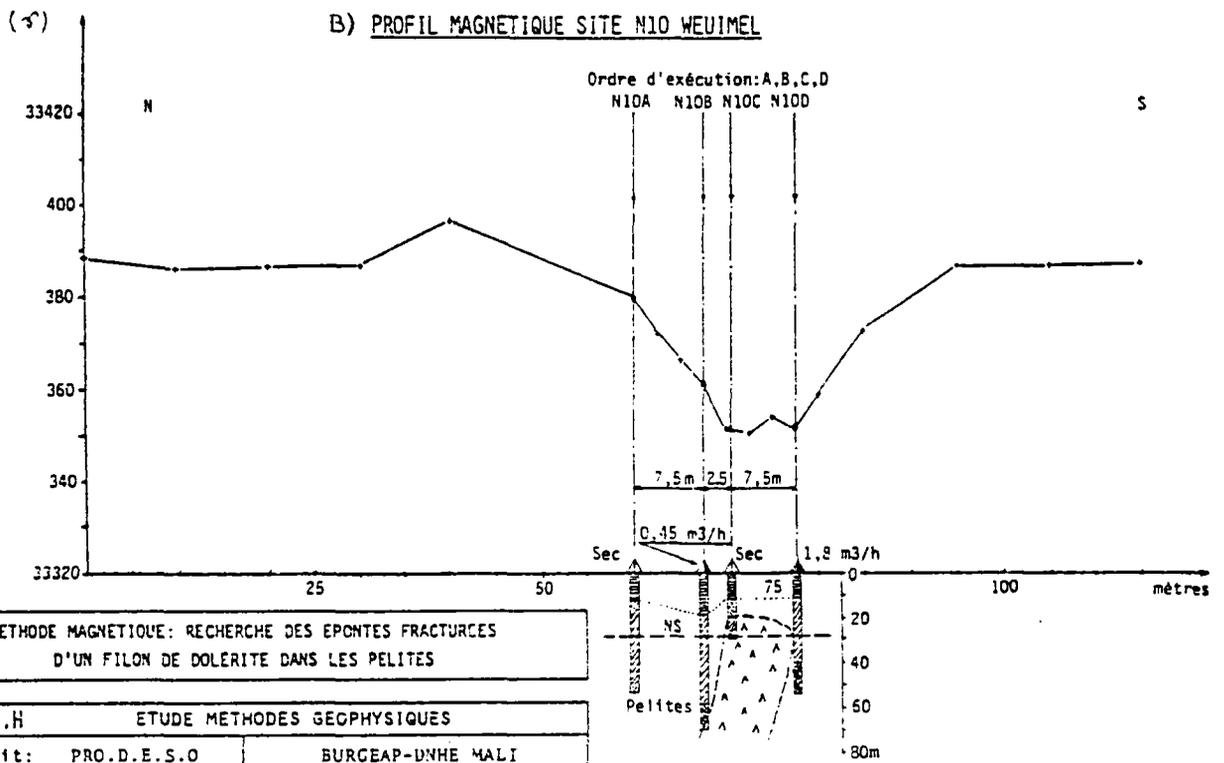
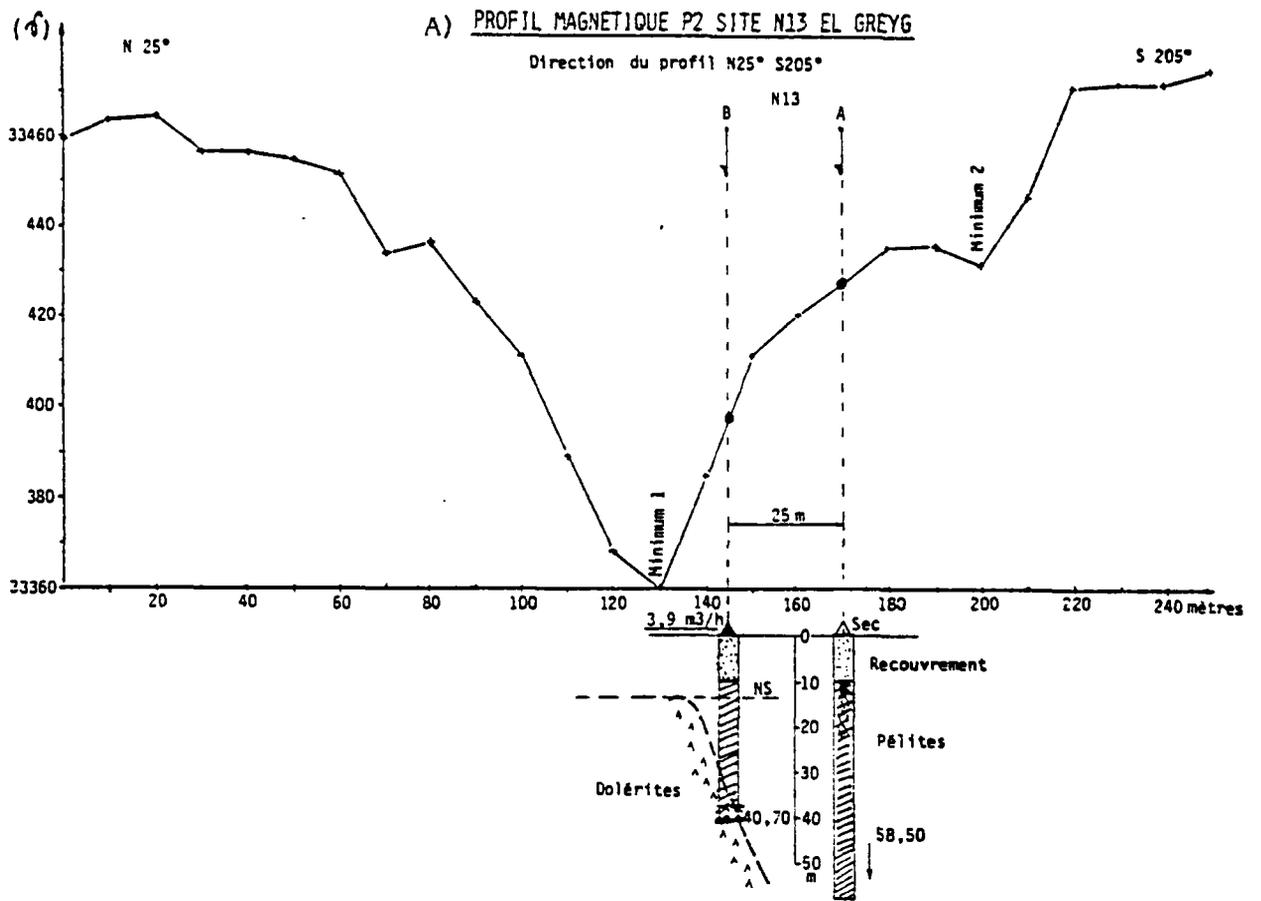
**Figure 3****Bamassapla (Côte d'Ivoire) - Granite  
Etude du pendage des fractures par profils électriques  
en double longueur de ligne**

Les profils électriques montrent une anomalie conductrice à 200  $\Omega$ m de 15 à 20 m de large dans un résistivité supérieure 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 recoupent effectivement une zone fracturée et les venues d'eau plus profondes s'avèrent localisées 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.



METHODE MAGNETIQUE: RECHERCHE DES EPONTES FRACTURCES 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-UNHE MALI D.N ELEVAGE MALI

Figures 4A et 4B

## Figures 4 et 5

### Région de Nara Est (Mali) Recherche des épontes de filons de dolérite intrusifs dans les pélites cambriennes (méthode magnétique)

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 m.

#### - Figure 4A (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 58,5 m a été déplacé de 25 m vers le minimum le plus marqué où il s'est révélé positif ( $3,9 \text{ m}^3/\text{h}$ ) au contact pélite/dolérite entre 32 et 40 m.

#### - Figure 4B (Weuimel)

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 m.

Le second forage, déplacé de 7 m 50 vers le minimum a trouvé le contact dolérite/pélite faiblement aquifère ( $0,45 \text{ m}^3/\text{h}$ ) à 70 m.

Le troisième forage, à 2,5 m 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 7,5 m du troisième, et qui visait à rencontrer l'éponte sud du filon, a effectivement trouvé un débit de  $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$  dans la pélite fracturée.

La largeur présumée du filon d'après les forages est d'environ 7,5 m.

PROFIL MAGNÉTIQUE N°9 SITE N15 MBEURYEU

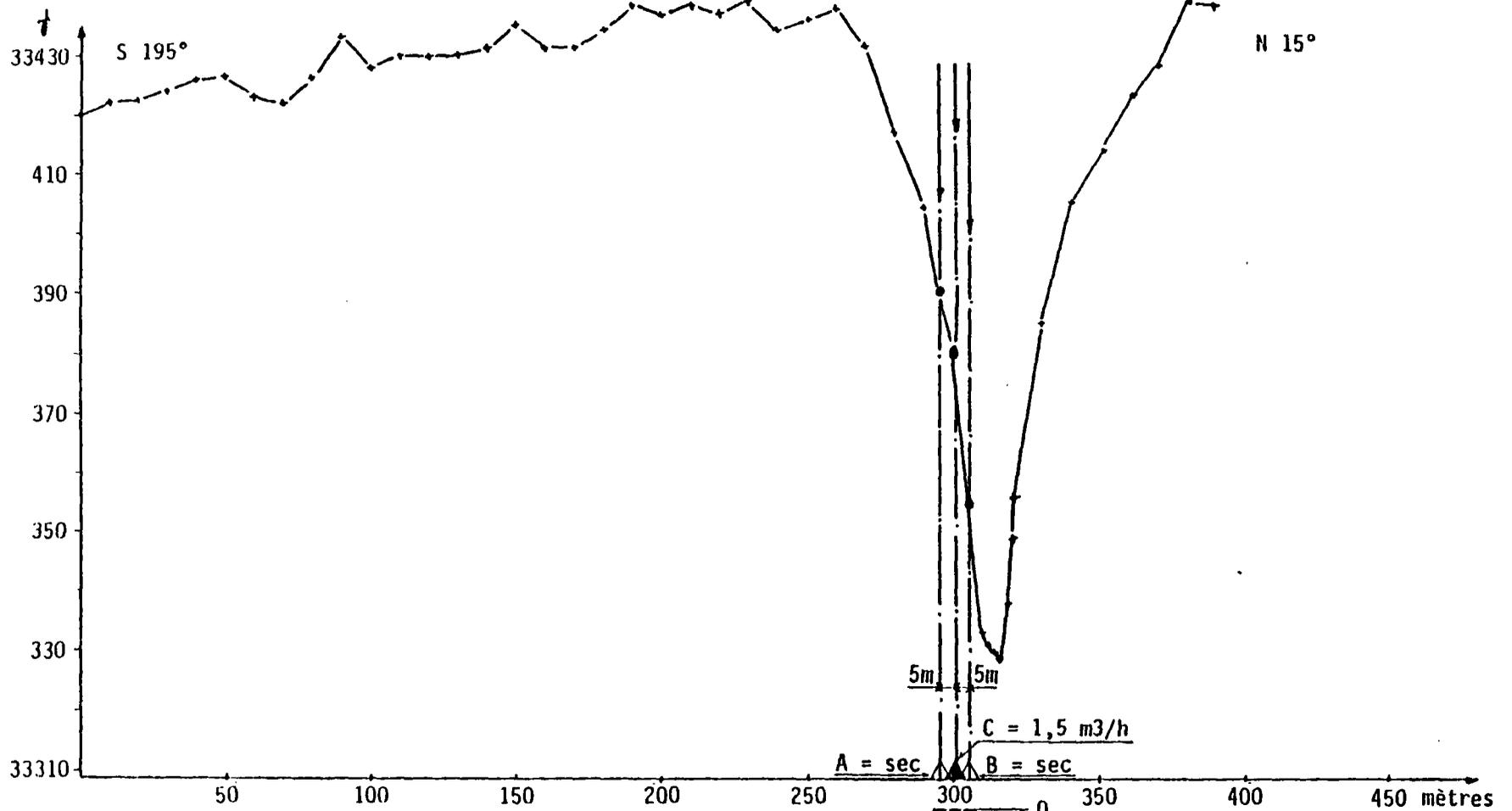


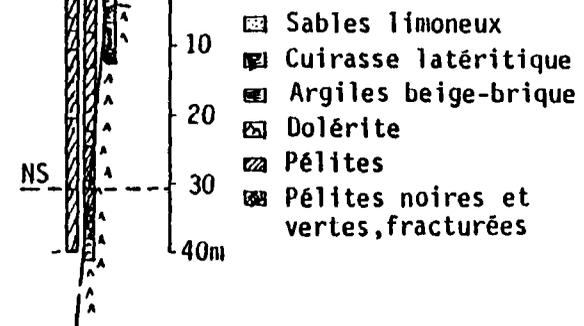
Figure 5

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



**Figure 5 (Mbeuryeu)**

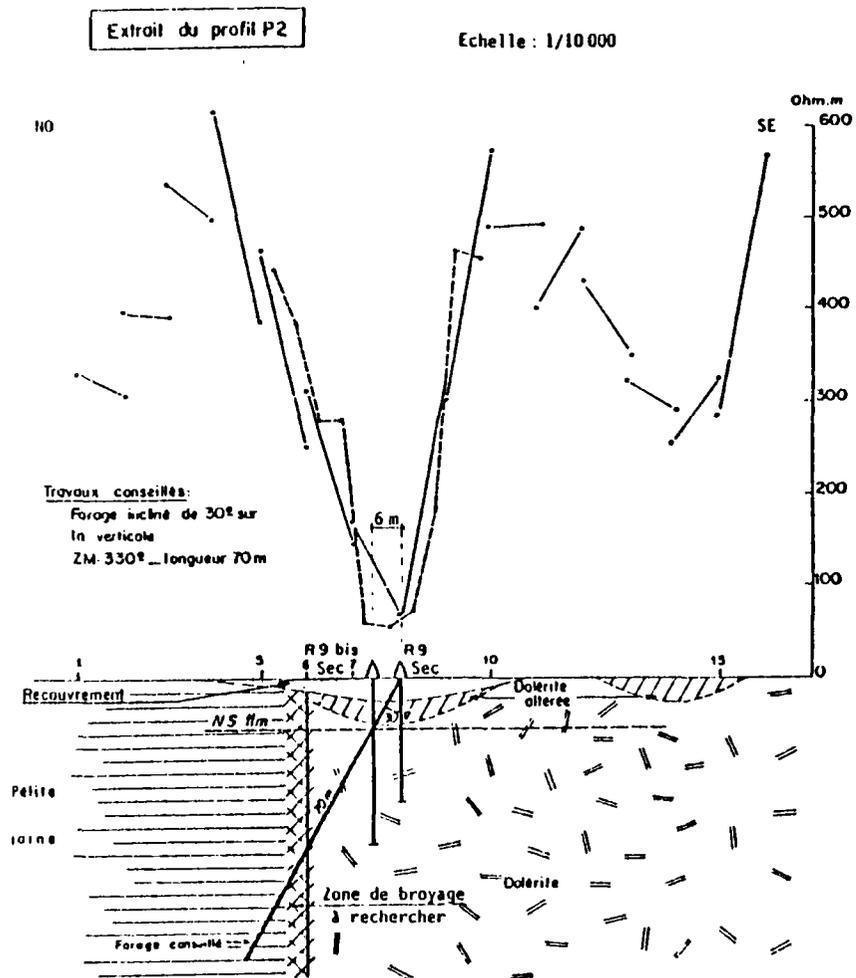
En l'absence de tout linéament sur photo-aériennes, 10 profils magnétiques ont été réalisés le long des pistes quittant le village dans plusieurs directions. Le neuvième profil, représenté sur la figure 5 a finalement révélé une très forte anomalie, sur laquelle les forages ont été implantés.

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 pélite 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 m<sup>3</sup>/h).

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

A) IMPLANTATION R.9



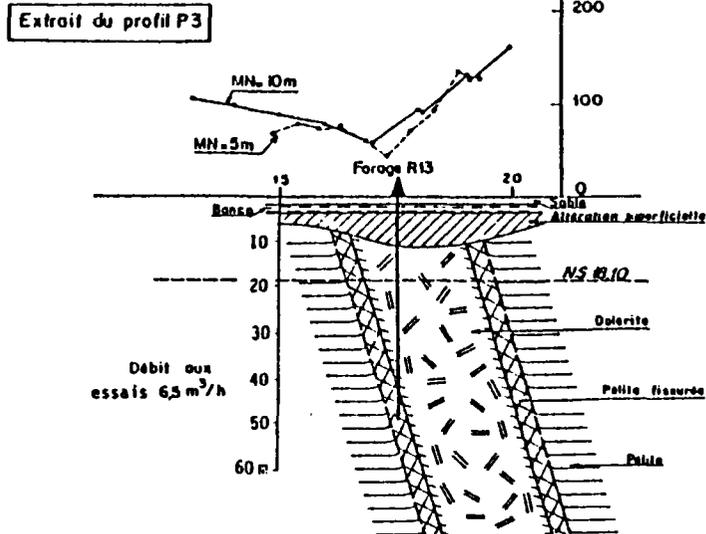
METHODE ELECTRIQUE: RECHERCHE DES EPONTES FRACTUREES  
D'UN FILON DE DOLERITE DANS LES PELITES

C.I.E.II ETUDE METHODES GEOPHYSIQUES

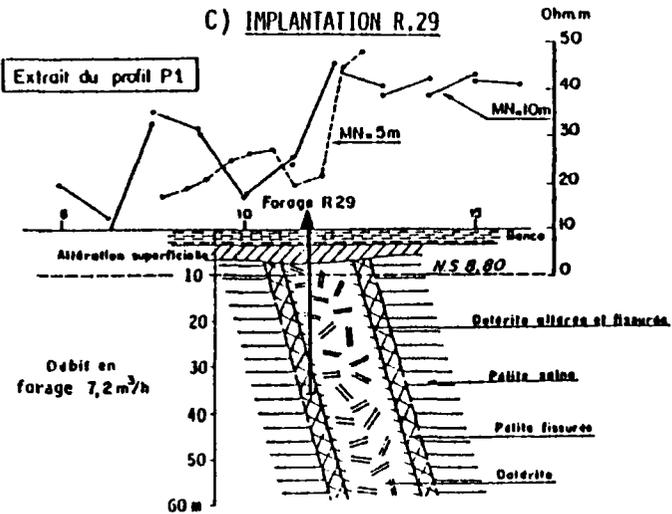
Extrait:  
ROUTE KIFFA NEMA

BURGEAP-CGG 1974  
MINIST. EQUIP. MAURITANIE

B) IMPLANTATION R.13



C) IMPLANTATION R.29



**Figures 6 et 7**

**Route Kiffa-Néma (Mauritanie)**  
**Recherche des épontes de filons de dolérite intrusifs**  
**dans les pélites cambriennes (méthode électrique)**

**- Figure 6A (Site R 9)**

Le profil électrique a été réalisé en travers d'un linéament important de direction N 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  $\Omega$ 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.

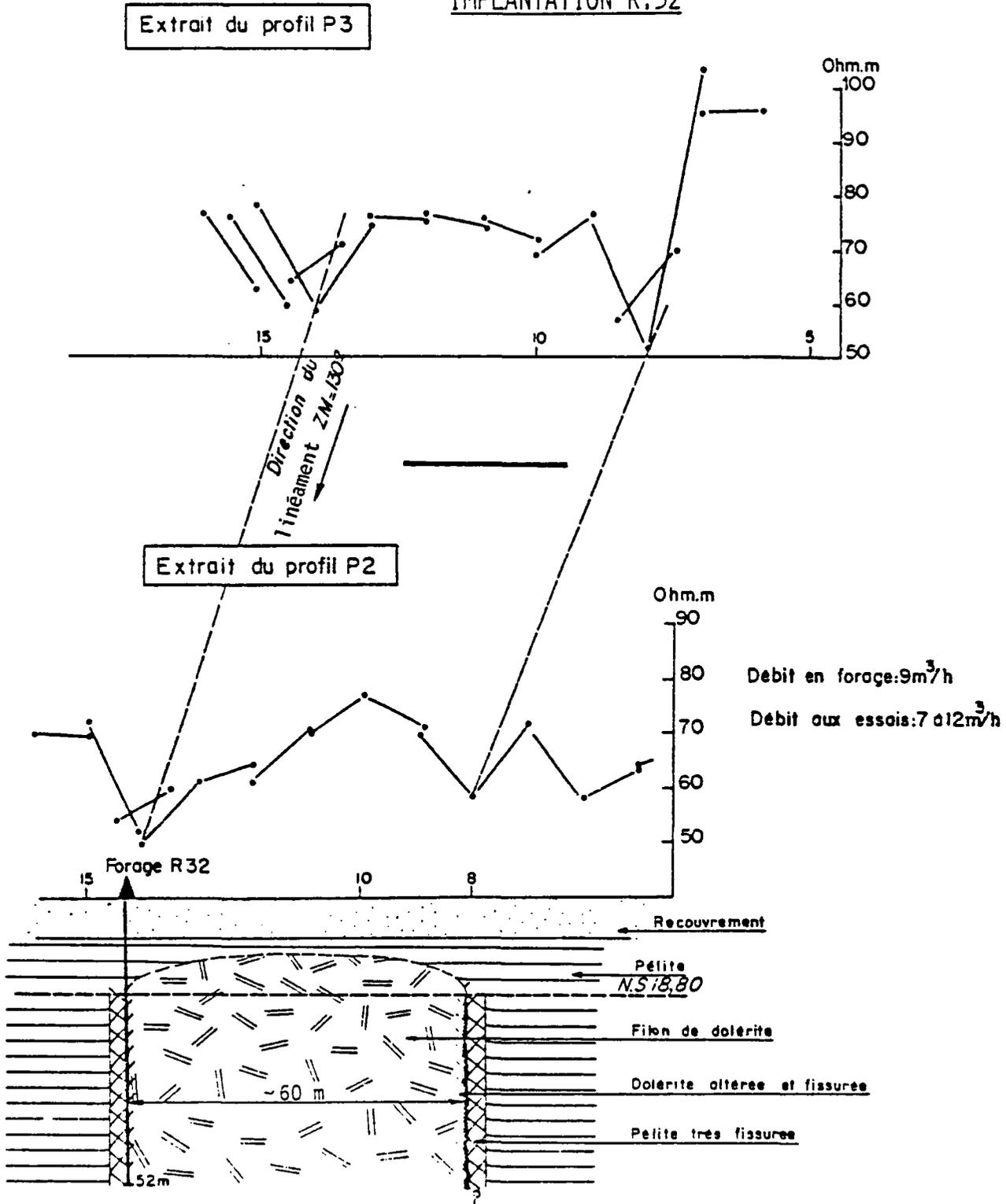
**- Figures 6B et C (Sites R 13 et R 29)**

Les deux exemples présentés 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 péliste sous le filon.

IMPLANTATION R.32



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

Figure 7

**- Figure 7 (Site R 32)**

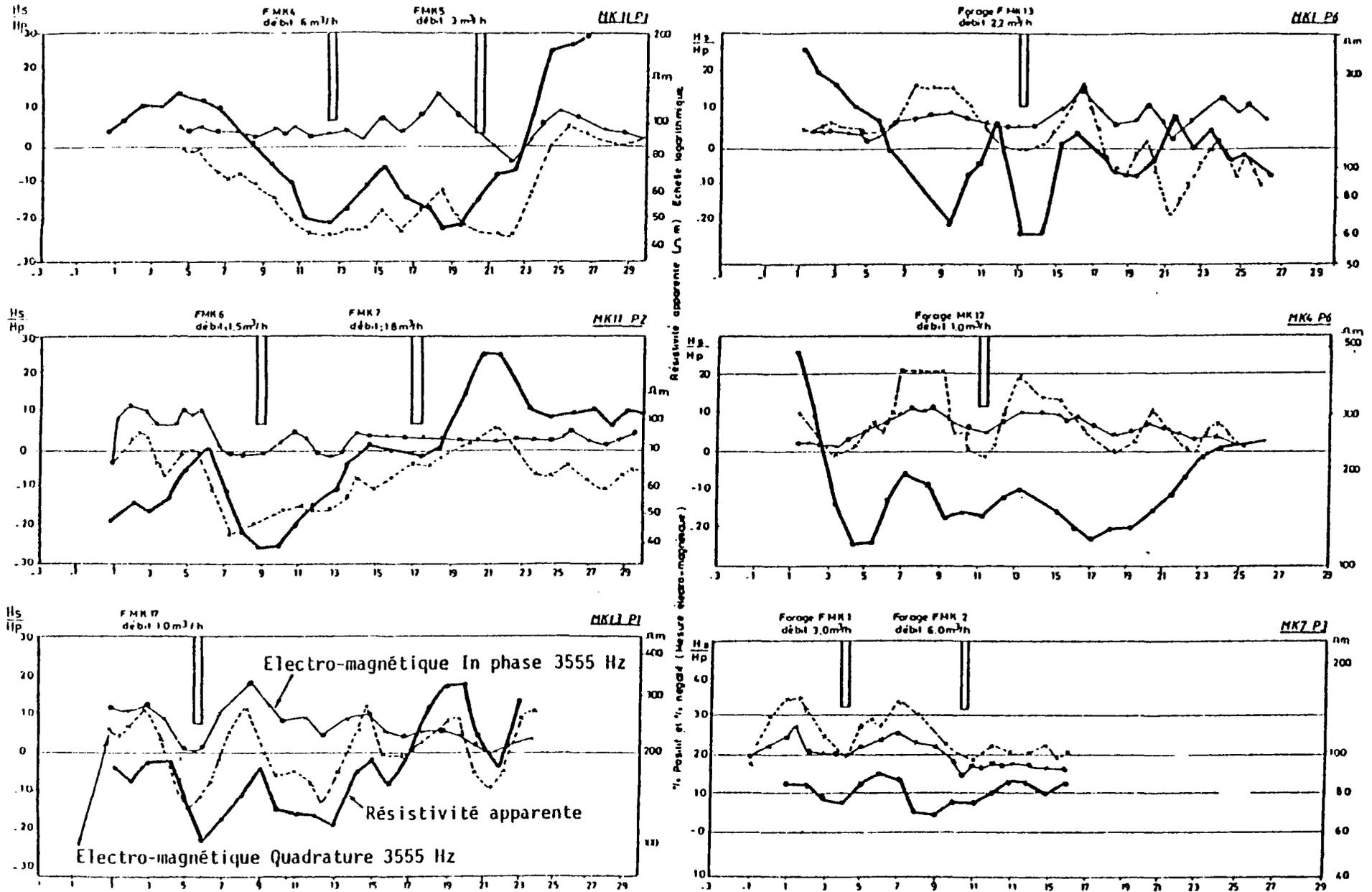
Une direction d'accident peu nette sur photo aérienne, se matérialise sur le terrain par un large alignement d'arbres verts peu différenciés de la zone boisée environnante.

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 m<sup>3</sup>/h**.

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

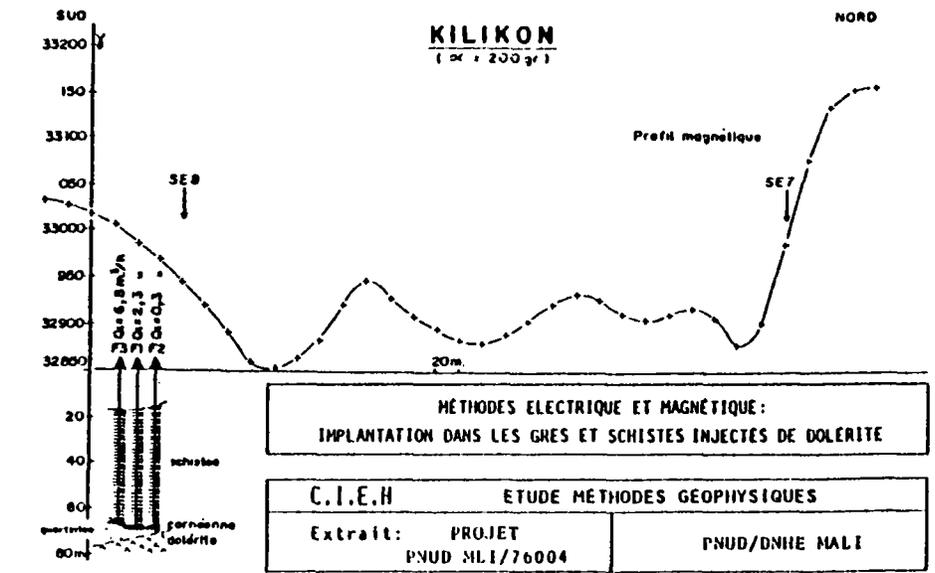
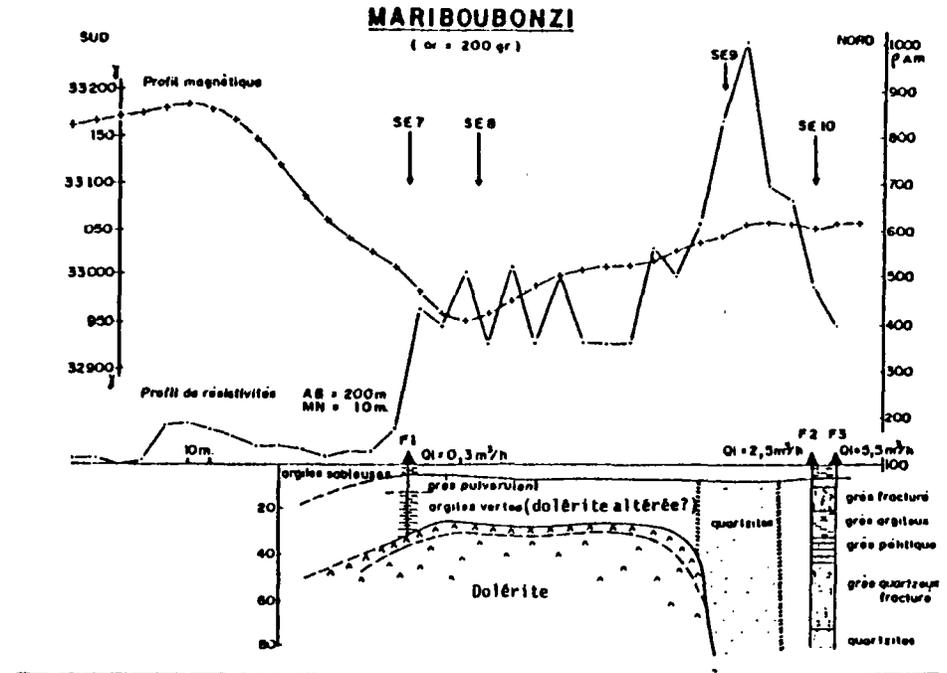
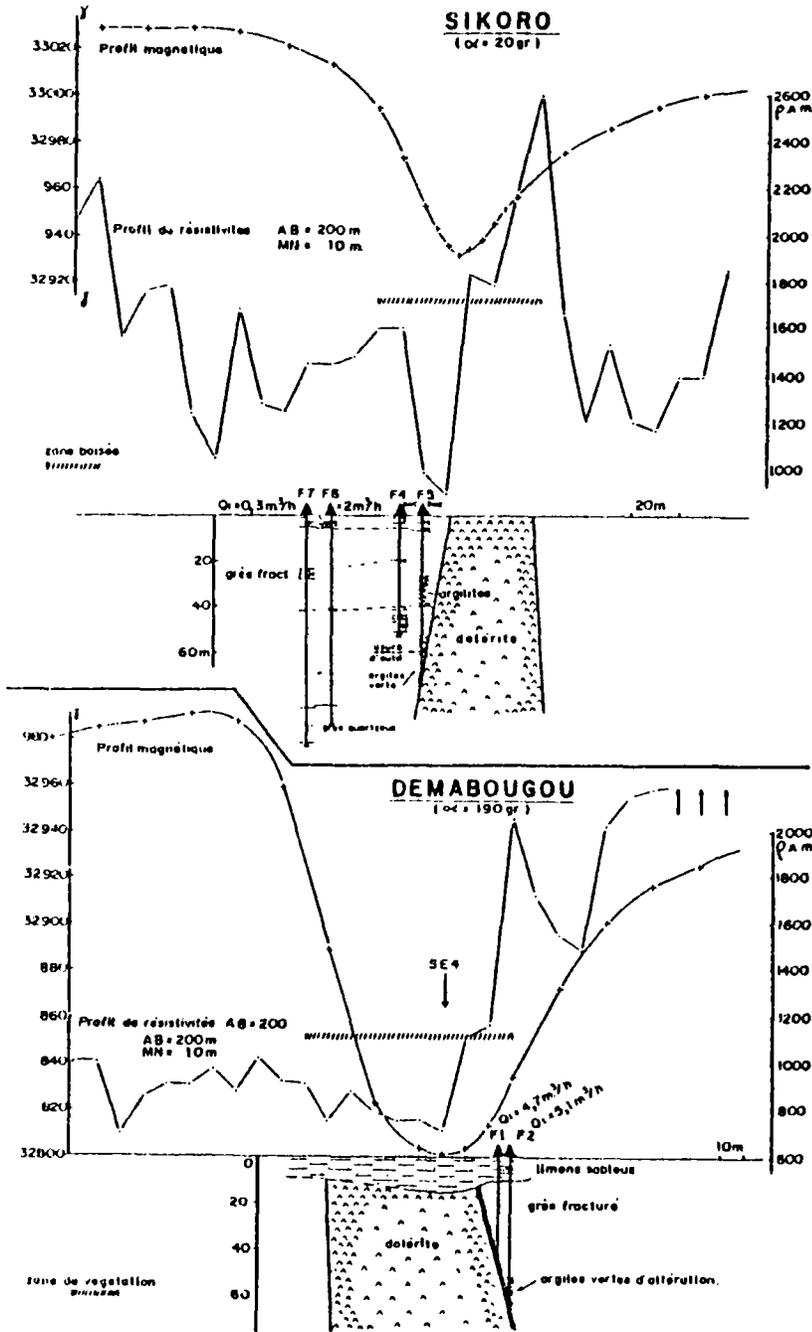
Figure 8



**Figure 8****Mankarga (Burkina-Faso) - Birrimien  
Comparaison des méthodes électriques et électromagnétiques**

Cette figure 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). La corrélation entre les deux méthodes, apparaît ici évidente. Elle nous apparaît quant à nous recommandable chaque fois que cela est possible.

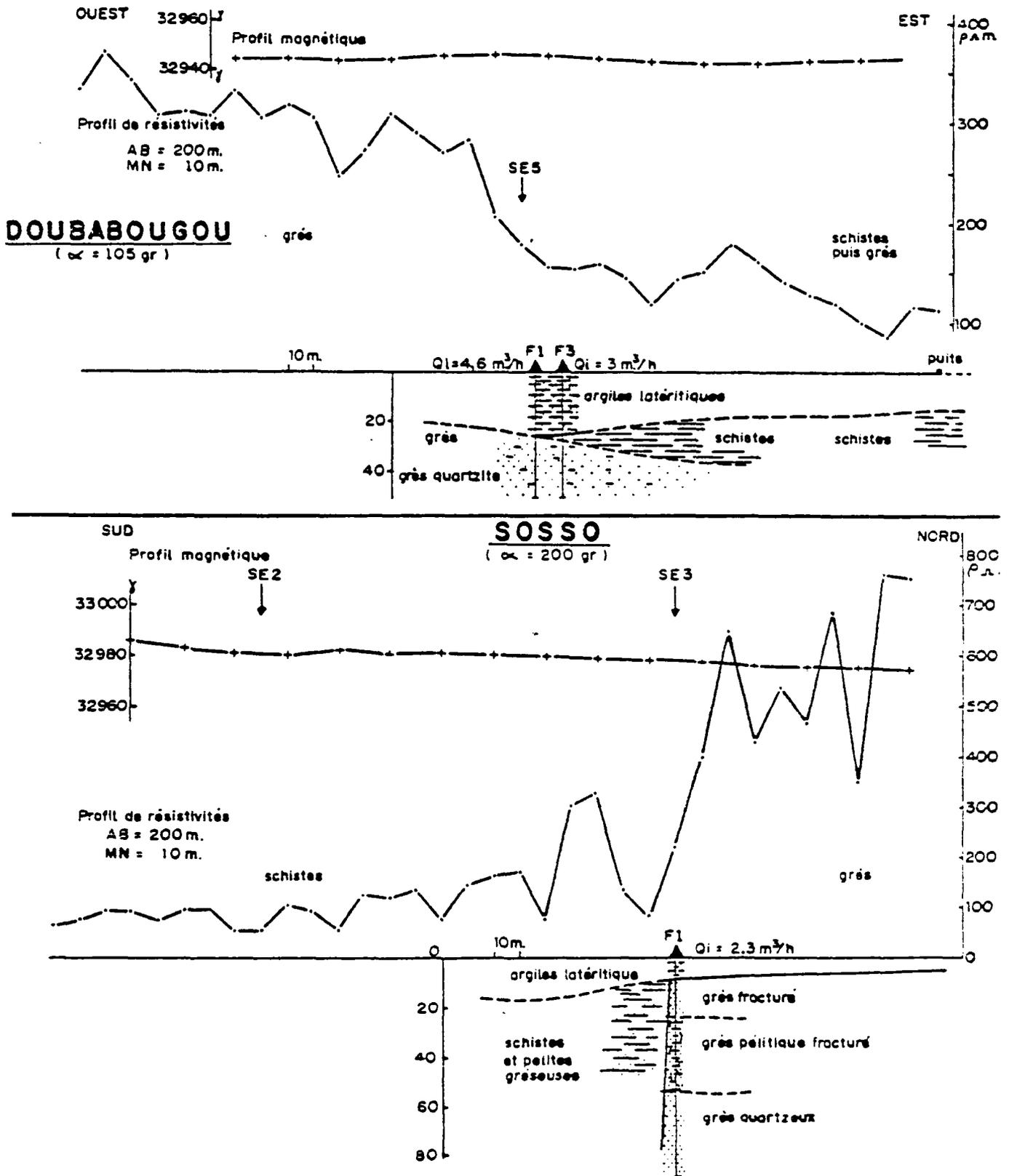
Figure 9



**Figure 9****(Mali-Deuxième région)****Prospection hydrogéologique dans des zones de grès  
infracambriens injectés de dolérite, à l'aide des  
méthodes électriques et magnétiques**

On peut retenir à l'examen de ces figures 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/DNHE MALI	
PNUD MLI/76004			

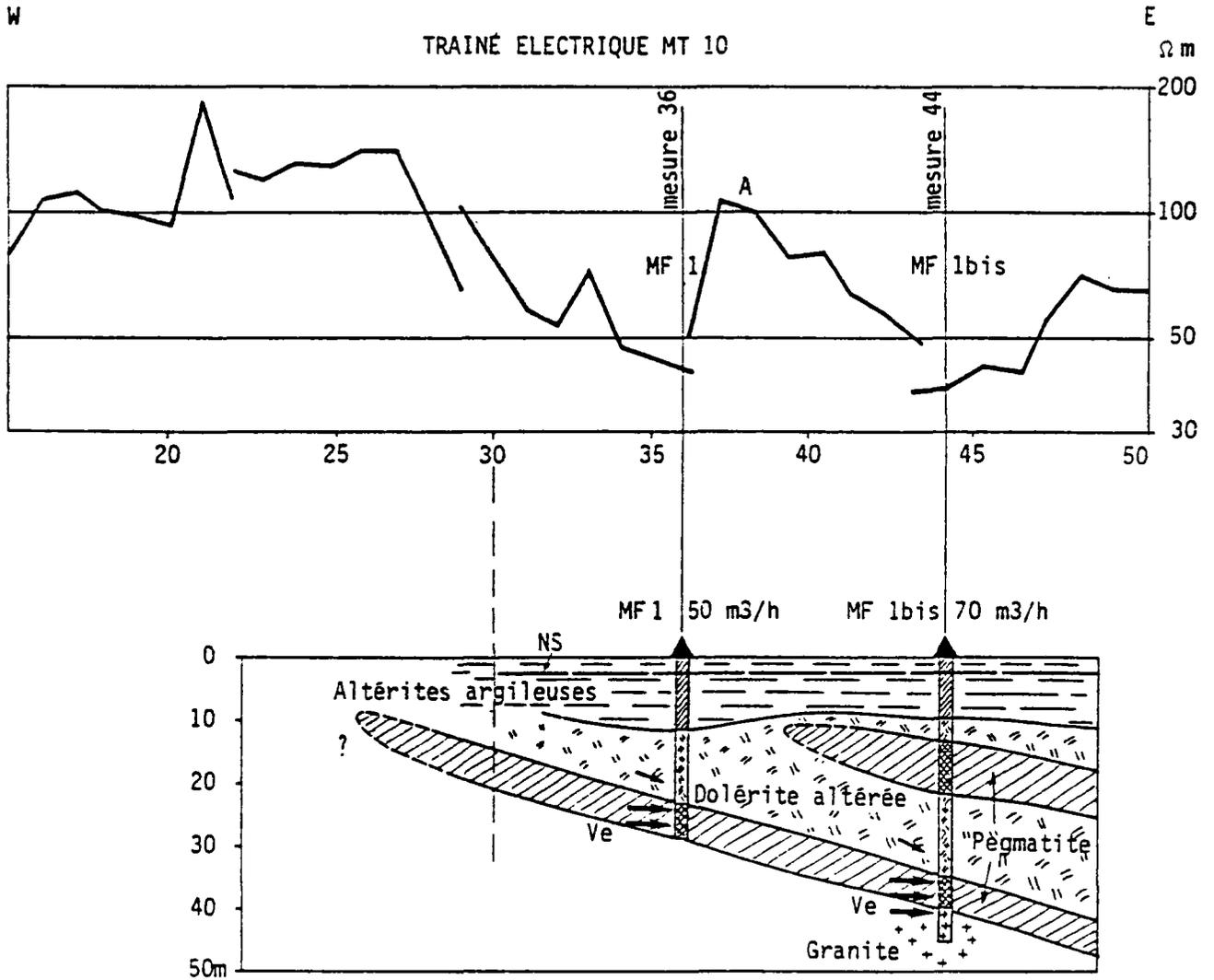
Figure 10

**Figure 10****(Mali-Deuxième région)****Implantations au contact entre schiste et grès**

Cette figure 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 INJECTES DE DOLÉRITE

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

Figure 11

**Figure 11****Mamou (Guinée)  
Granites injectés de dolérite**

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 1,5 km, non représentés sur la figure.

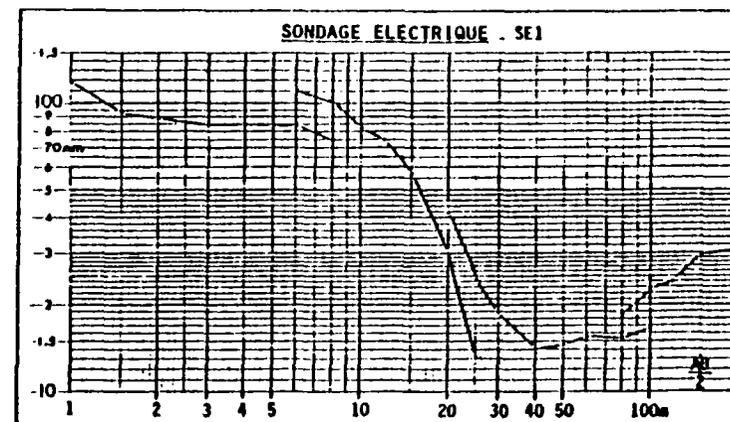
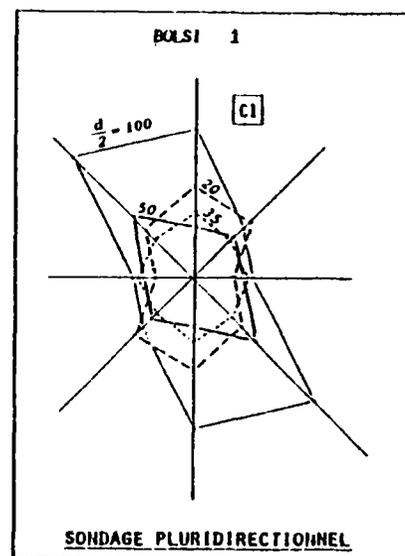
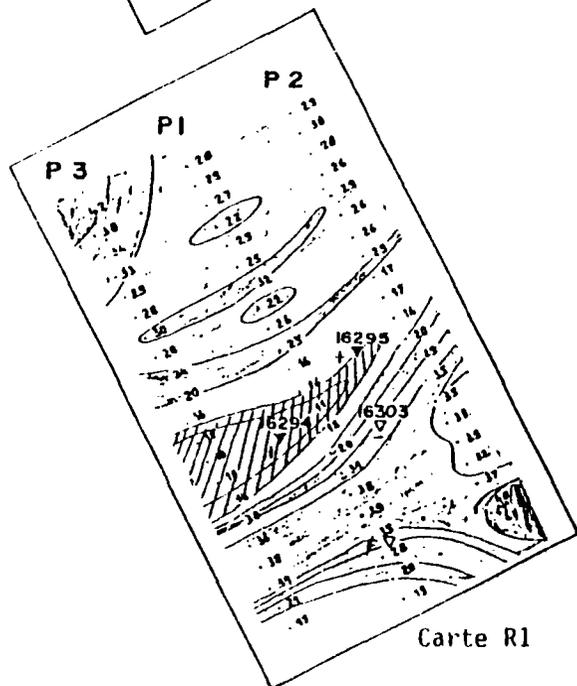
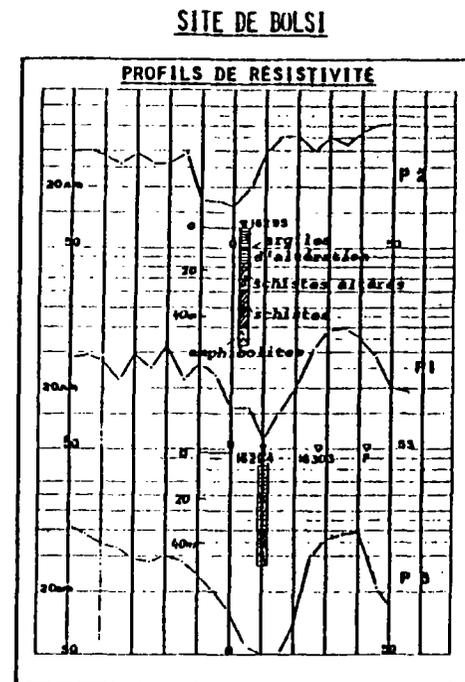
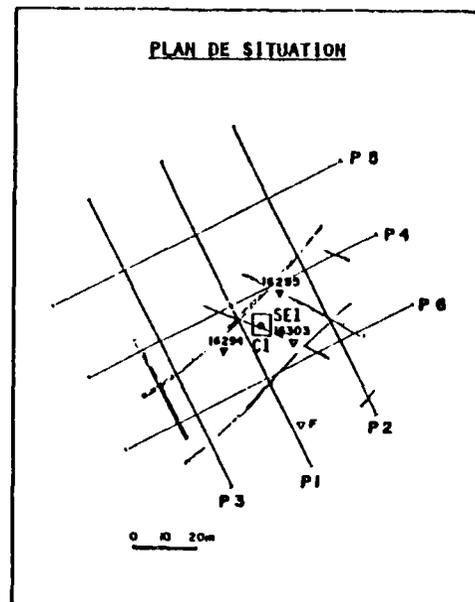
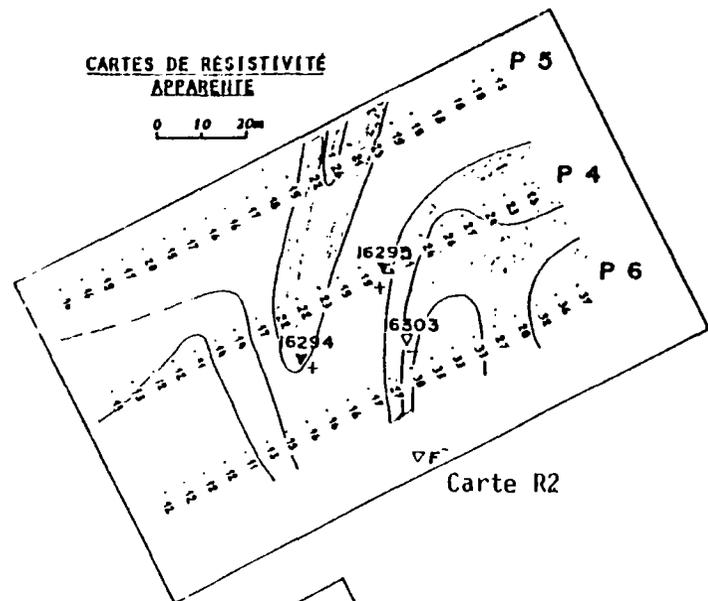
Le forage MF1 a rencontré de la dolérite altérée argileuse, puis à 22 m un filon de pegmatite fracturé et fortement aquifère (50 m<sup>3</sup>/h). Ce forage s'est éboulé.

L'allure du profil (dissymétrie) conduit à considérer 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 m<sup>3</sup>/h à l'air lift.

Figure 12



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

**Figure 12****Site de Bolsi - Liptako, Niger**

Documents aimablement communiqués par  
M. le Professeur **Ousmane Boureima** (Université 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 m<sup>3</sup>/h chacun pour ces derniers).

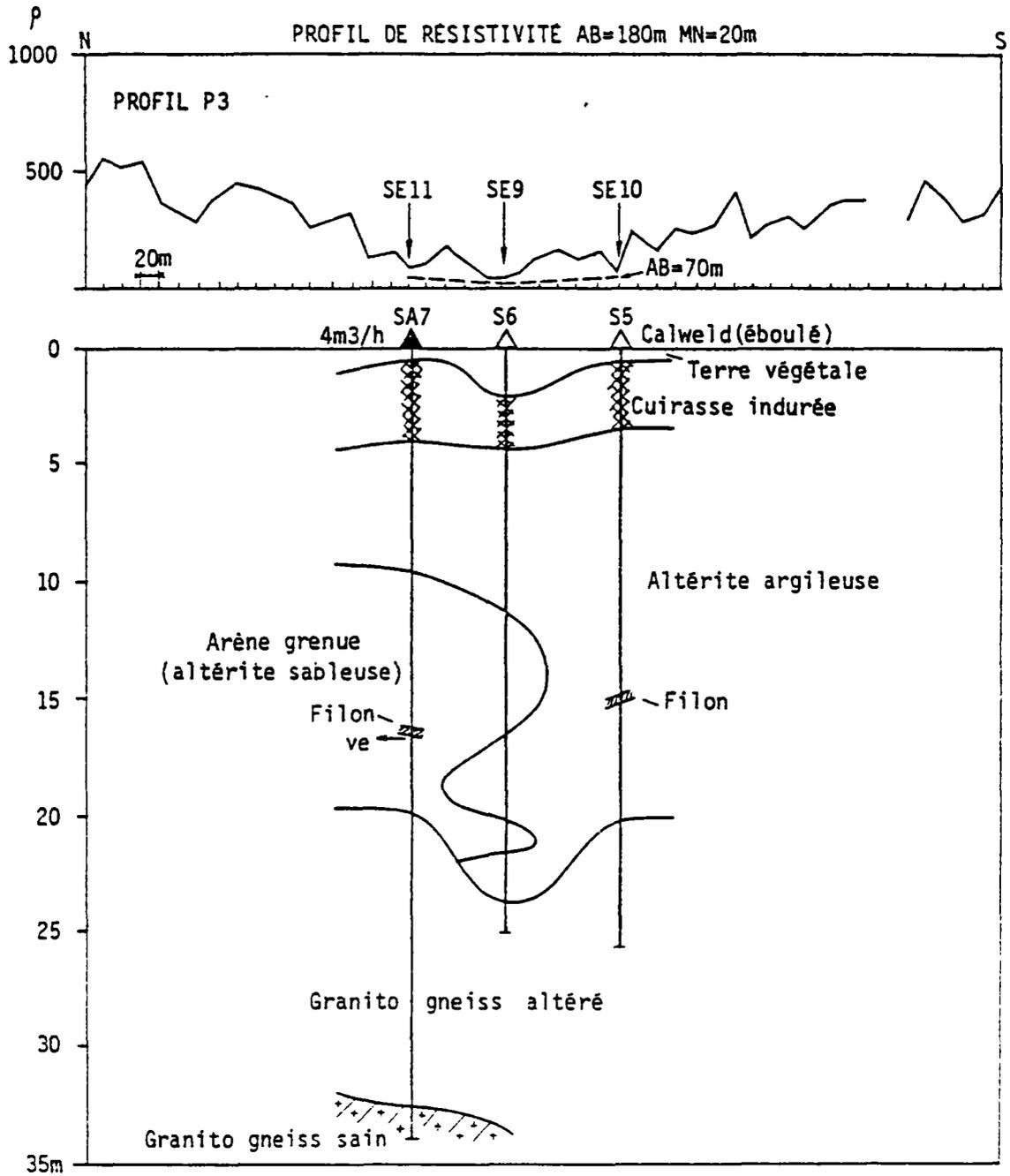
Le sondage pluridirectionnel, qui intègre les caractéristiques des terrains traversés par les 4 forages montre une anisotropie faible en courte longueur de ligne (terrains d'altération), mais très marquée pour la grande longueur de ligne ( $d/2 = 100$  m) correspondant par conséquent à une fracturation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

LCHF-GEOHYDRAULIQUE-CGG  
DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE  
ET DE L'AMEN. DE L'ESPACE RUR.

figure 13

**Figure 13****Ranch de Leo (Burkina-Faso) - zone 5  
Profils électriques et sondages électriques  
sur le profil n° 3**

Documents aimablement communiqués par  
Le Laboratoire Central d'Hydraulique de France et Géohydraulique

Le profil électrique réalisé montre la présence de 3 anomalies conductrices, de résistivité inférieure à  $90 \Omega\text{m}$  de 30 à 60 m de largeur, grossièrement allongées E-W, 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  $500 \Omega\text{m}$ .

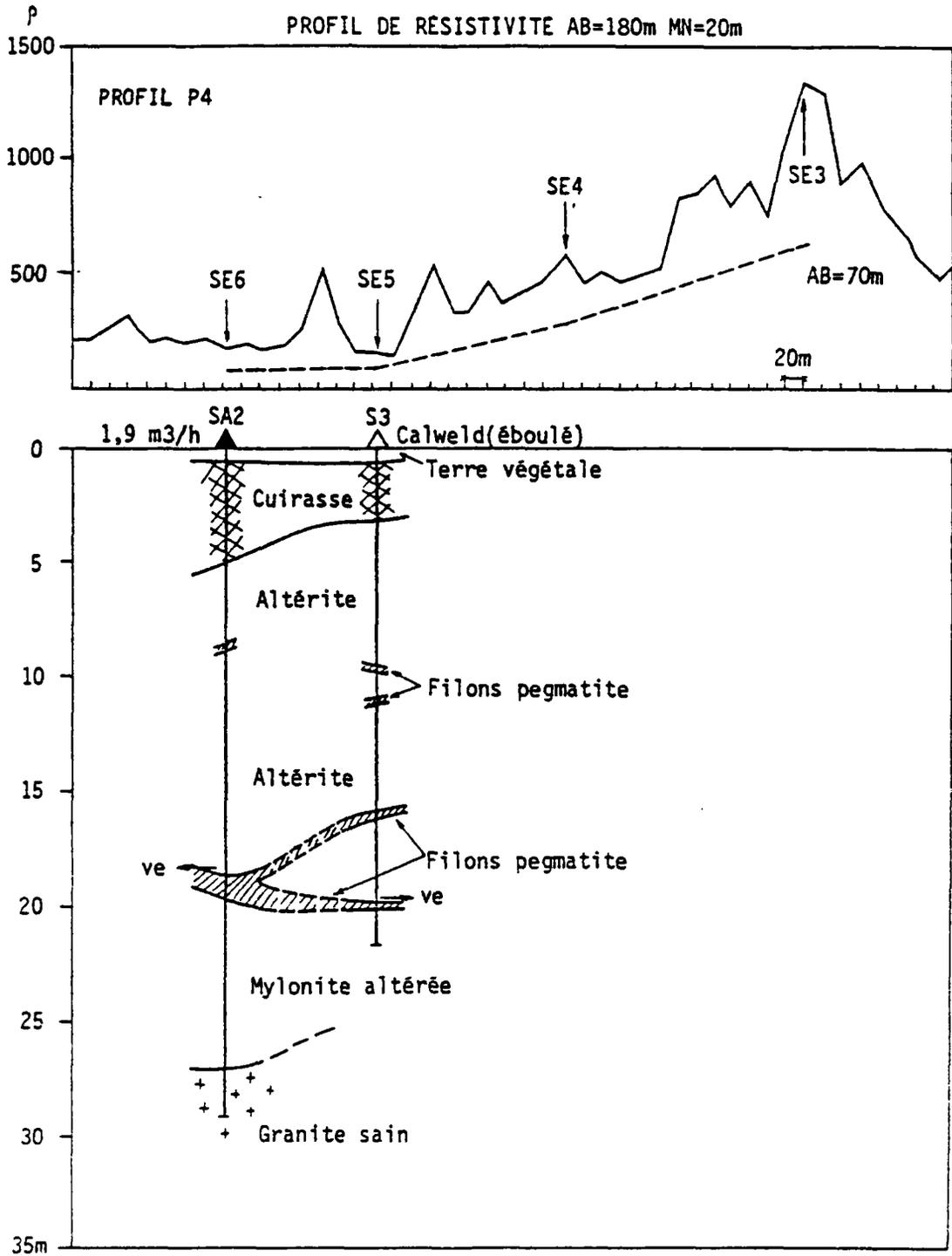
Trois forages de reconnaissance ont été réalisés sur chacune des trois anomalies (SA 7 - S 6 - S 5), à l'emplacement de 3 sondages électriques (Se 11 - Se 9 - Se 10).

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 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

LCHF-GEHYDRAULIQUE-CGG  
DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE  
DE LA REGION DE LEO ET DE L'AMEN. DE L'ESPACE RUR.

Figure 14

**Figure 14****Ranch de Leo (Burkina-Faso) - zone C  
Profils électriques et sondages électriques  
sur le profil n° 4**

Documents aimablement communiqués par  
Le Laboratoire Central d'Hydraulique de France et Géohydraulique

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  $\geq 400 \Omega\text{m}$ .

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-W).

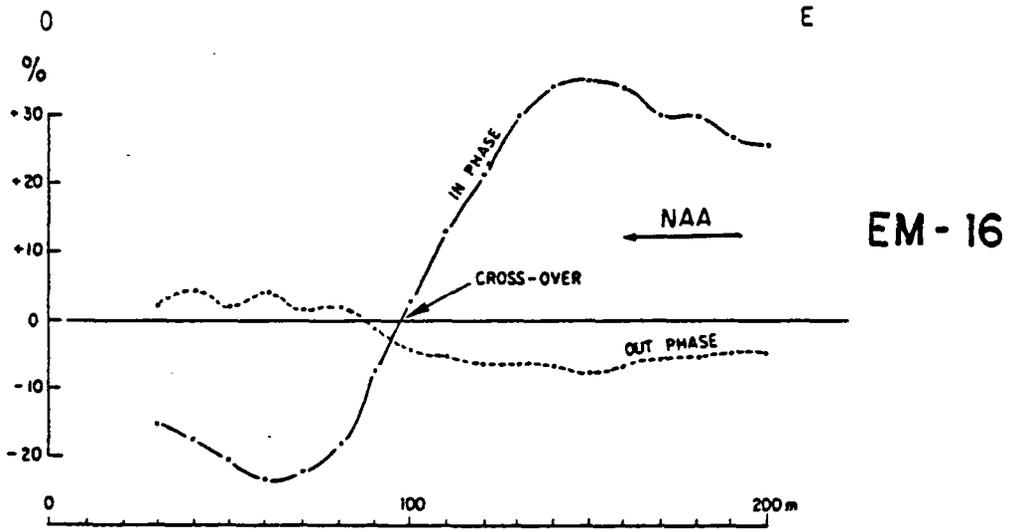
Le sondage de reconnaissance S 3 réalisé sur SE 5 n'a pu être descendu assez profondément par suite d'éboulements. Toutefois la conductivité observée est probablement liée à la présence d'arènes très altérées.

Le deuxième forage SA 2 réalisé sur SE 6 montre un passage de mylonite altérée avec filon de pegmatite, sur le socle, entre 15 et 27 m de profondeur.

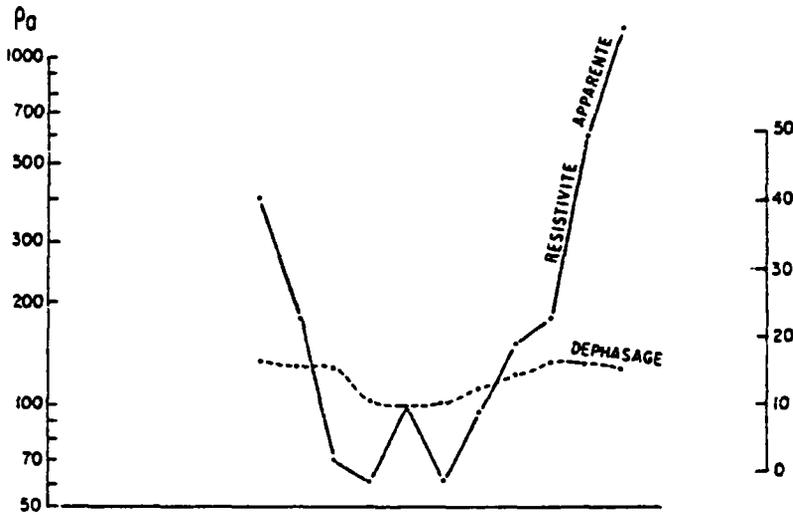
Sur ces 2 sondages, les arrivées d'eau sont liées à la présence de filons de pegmatite entre 18 et 20 m de profondeur.

L'examen du profil de résistivité montre bien que les deux forages ont été placés dans des zones d'altération maximale, correspondant à des minimums de résistivités.

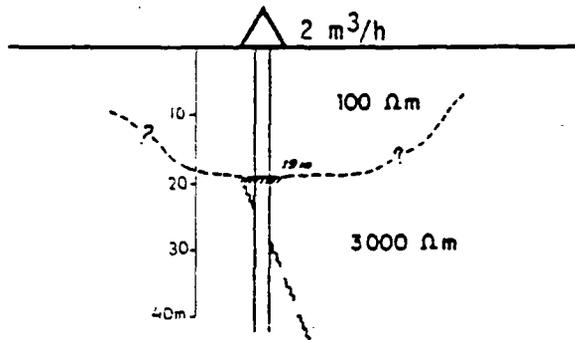
# LOLOBO F.1.



EM-16



EM-16-R



METHODS ELECTROMAGNETIQUES - VLF  
IMPLANTATION DANS LES GRANITES

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

Figure 15

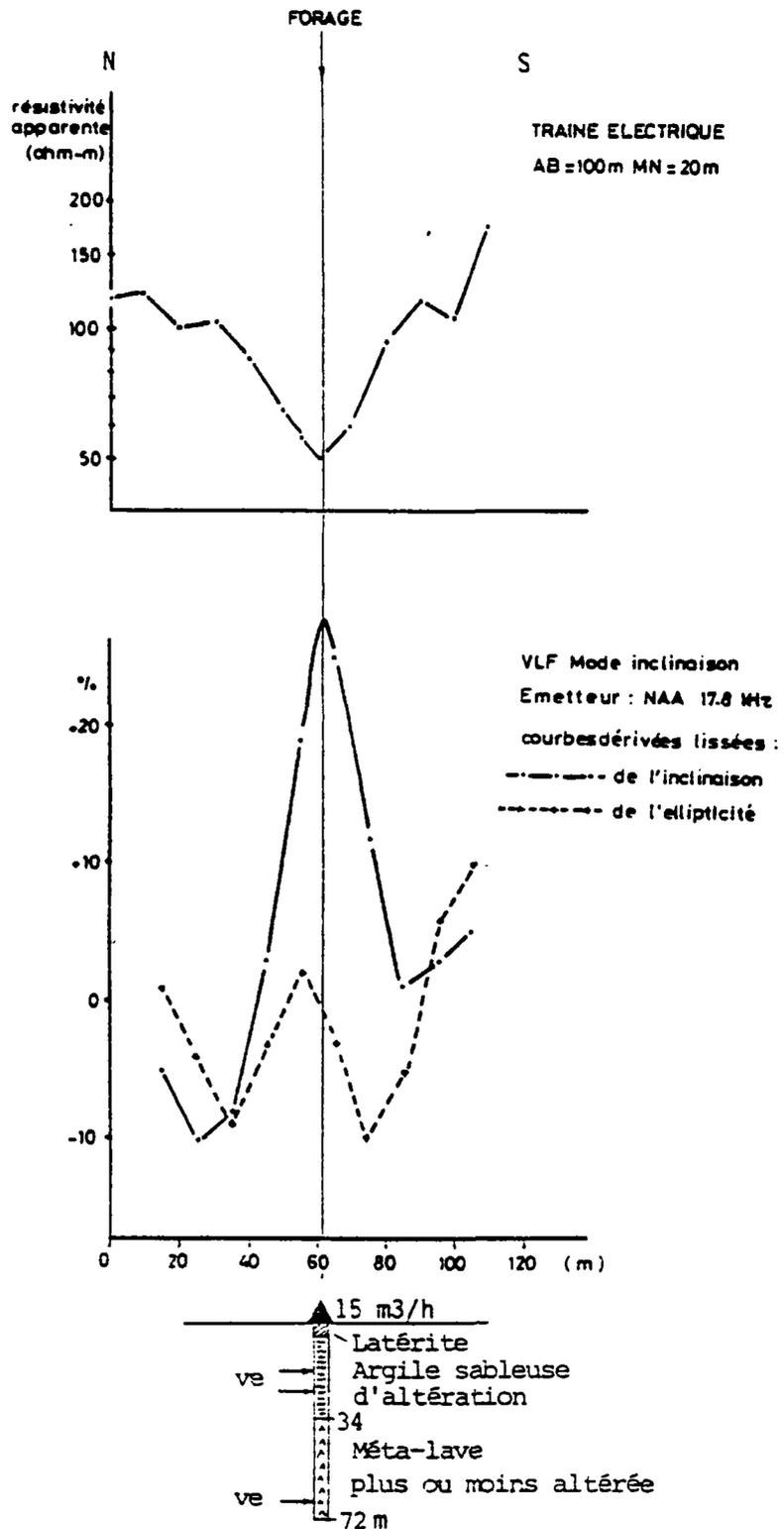
**Figure 15****Lolobo F1****Emploi de la méthode électromagnétique**

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 m<sup>3</sup>/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	

Figure 16

**Figure 16****Sabodala (Sénégal Oriental)**

Implantation sur les laves métamorphisées par profil  
électrique et VLF  
(Document du 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 m de largeur, présentant un minimum à 50  $\Omega$ 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, subvertical, correspondant à une zone faillée étroite ;

- le forage, positif, avec un débit instantané de forage de 15 m<sup>3</sup>/h a donné 10,5 m<sup>3</sup>/h en exploitation avec 34,5 m de rabattement après 6 h (niveau statique à 8,2 m sous le sol).

## II - AUTRES EXEMPLES SUR L'EXPERIENCE ACQUISE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET EN METROPOLE

Dans ce chapitre, la parole va aussi être laissée au Géophysicien et à l'Hydrogéologue dont les expériences ont permis d'ajuster au mieux l'emploi de différentes méthodes de prospection, tant par l'utilisation d'une technique d'identification unique, que par la combinaison de plusieurs dispositifs d'investigation.

Les réflexions qui vont suivre de la part des différents intervenants ont été le fruit d'un travail soit en mission à l'étranger dans le cadre de projets d'aménagement du type hydraulique villageoise, soit à l'occasion d'importantes études à caractère méthodologique déclenchées sous l'impulsion du Département Eau du BRGM dans le cadre du programme d'Hydrogéologie des Milieux Fissurés.

Suite à de tels travaux méthodologiques, une comparaison des techniques entre elles a ainsi permis de mettre en évidence **une complémentarité entre les méthodes électriques et électromagnétiques** pour proposer ensuite un certain nombre de **combinaisons de méthodes** dont l'adéquation à la reconnaissance des milieux fissurés discontinus suivant le **type de problème posé**, n'est plus à démontrer.

Ainsi, nous examinerons de nombreuses expérimentations réalisées tant en Afrique de l'Ouest qu'en Métropole, que ce soit par des équipes BRGM ou de la part d'autres organismes (CGG, Méditerranéenne de Géoélectrique, Burgeap) et révélant l'intérêt de l'utilisation de méthodes de prospection géophysique en association entre elles dans la plupart des cas.

Un premier point sur l'expérience acquise dans l'utilisation de diverses méthodes de prospection géophysique de surface sera opéré par des réflexions condensées à partir d'études réalisées en Afrique de l'Ouest et en France par des équipes du BRGM.

Puis nous nous référerons à la pratique associative de quelques techniques géophysiques entreprise par d'autres auteurs.

L'ensemble de ces réflexions est proposé avec un nombre important d'exemples qui se veulent les plus pédagogiques possibles, mais aussi des plus réalistes, car empruntés au milieu naturel. En effet, la présentation d'exemples si magnifiques soient-ils au cours de leur communication au grand public se doit d'être la plus objective possible, de manière à ne pas dérouter l'opérateur et l'hydrogéologue une fois sur le terrain en confrontation avec la dure réalité du milieu naturel.

**ETUDE METHODOLOGIQUE PAR METHODES ELECTRIQUES ET  
ELECTROMAGNETIQUES SUR LE SITE PILOTE DE LUFAC  
(Ille-et-Vilaine)**

Rapport BRGM 83 SGN 877 GPH  
par G. Chevalier-Lemire

Dans le cadre de la fiche programme "Appui à l'hydrogéologie", le département Géophysique du BRGM a réalisé des travaux méthodologiques sur le site pilote de Lufiac - Commune de Broualan (Ille-et-Vilaine), dans le cadre du programme d'hydrogéologie des milieux fissurés du département EAU du BRGM.

L'objectif de ces travaux était l'étude des possibilités et des limites de certaines méthodes électromagnétiques pour la recherche d'eau en zones fissurées. Les méthodes EM(\*) utilisées sont le VLF (Very Low Frequency) mode inclinaison et résistivité et l'électromagnétisme à boucles horizontales mobiles (type Max-Min), appuyées sur des sondages électriques et des profils de résistivité (trainé électrique et rectangle) dans un but de comparaison.

Les méthodes mises en oeuvre ont été analysées en dégageant à chaque fois leurs avantages et leurs inconvénients et en donnant des recommandations d'utilisation.

Voici donc les principaux résultats de cette étude.

---

(\*) EM : Electromagnétique

Rubrique	Trainé électrique	Rectangle de résistivité	V.L.F. mode inclinaison	V.L.F. mode résistivité	Max-Min
repérage des conducteurs	bien adapté	bien adapté	ambiguïté dans l'interprétation	bien adapté	ambiguïté dans l'interprétation
repérage des conducteurs	mal adapté	mal adapté	bien adapté	bien adapté	assez bien adapté
interprétation	qualitative	qualitative	qualitative	qualitative et quantitative (modèle 2 terrains)	qualitative et quantitative
coulage avec le sol	électrodes	électrodes	inductif	inductif + électrodes	inductif
adaptation de la profondeur d'investigation	facile (modification de la longueur entre électrodes d'injection)		impossible (une fréquence) pénétration faible	impossible (une fréquence) pénétration faible	assez difficile (distance E-R limitée, 5 fréquences)
rendement (titre indicatif)	80 mesures en 4 h	90 mesures par jour	100-200 mesures par jour	100 mesures par jour	40 à 50 mesures par jour
personnel (titre indicatif)	1 opérateur + 1 ouvrier par électrode	1 opérateur + 1 ouvrier par électrode	1 opérateur	1 opérateur + 1 ouvrier	1 opérateur + 1 ou 2 ouvriers

**Tableau 6 - Quelques caractéristiques des méthodes de profilage employées**  
Remarque : les données sur le rendement et le personnel sont susceptibles de varier sensiblement suivant les difficultés d'accès du terrain, la nécessité de faire du layonnage et de la topographie.

## ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTES METHODES

Le tableau 6 résume un certain nombre de caractéristiques de chacune des méthodes de profilage utilisées à Lufiac.

Les conclusions du chapitre précédent sur les méthodes de profilage montrent que :

- les méthodes électriques courant continu et les méthodes EM sont toutes sensibles aux formations conductrices superficielles, particulièrement le VLF du fait de la fréquence élevée utilisée ;
- l'adaptation de la profondeur d'investigation selon le problème posé est facile dans le cas du profilage électrique (modification de la longueur d'injection), difficile dans le cas du Max-Min (choix limité de distances émetteur-récepteur et de fréquences) et impossible dans le cas du VLF (une seule fréquence) ;
- l'interprétation de toutes ces méthodes est facilitée quand on connaît les résistivités vraies des formations rencontrées dans la région (par sondage électrique par exemple) ;
- les méthodes EM (Max-Min, VLF inclinaison) sont très efficaces pour le repérage des conducteurs minces (verticaux ou subverticaux) et beaucoup moins précises dans le cas de conducteurs larges où il subsiste une ambiguïté entre conducteurs larges ou conducteurs minces rapprochés. Le couplage avec le VLF résistivité peut lever cette ambiguïté. Les méthodes de profilage électrique (trainé, rectangle) sont bien adaptées au repérage de conducteurs larges et beaucoup moins au repérage de conducteurs minces.
- les méthodes EM ont une efficacité maximale dans le cas de **recouvrement résistant**. Ceci joint au **couplage inductif** en fait des méthodes toutes indiquées dans le cas de prospection sous cuirasse latéritique.
- les méthodes EM sont toutes handicapées par la présence de conducteurs industriels (lignes électriques et téléphoniques, tuyaux métalliques).

Pour répondre plus efficacement au problème posé, il est souvent intéressant de réaliser une **combinaison de plusieurs méthodes complémentaires** suivant le type de problème posé (débit faible ou important, ...) et suivant les données géologiques (couverture de faible ou de forte épaisseur, ...).

- Dans le cas de recherche de fissures **sous faible recouvrement**, la **combinaison du VLF mode inclinaison et mode résistivité** est toute indiquée. Le VLF mode inclinaison va permettre de positionner avec précision les conducteurs minces et les contacts subverticaux et le VLF mode résistivité de faire la différence entre les deux et d'esquisser éventuellement une interprétation quantitative.
- Le **VLF mode inclinaison**, du fait de la rapidité des mesures, peut toujours être utilisé pour réaliser une reconnaissance rapide de la zone à prospector (surtout dans le cas où la photogéologie est de mauvaise qualité). A l'issue de cette reconnaissance, la prospection par **sondage électrique et trainés électriques** se trouve facilitée car les zones de faible intérêt sont nettement délimitées.
- A la suite d'une étude par **sondages électriques et trainés électriques**, on peut ajouter un complément de **Max-Min** qui aura pour but de détecter les conducteurs minces que les trainés auraient mal discernés et qui permettra une **interprétation quantitative** de la qualité des conducteurs (conductance) et de leurs caractéristiques géométriques (profondeur, épaisseur, pendage).
- Dans le cas où une campagne de prospection par seule méthode **Max-Min** est envisagée, il faut lui ajouter du **VLF mode résistivité** de façon à préciser les variations latérales éventuelles dans la conductivité des terrains superficiels et ainsi préciser l'interprétation des anomalies Max-Min. Des sondages électriques peuvent également être utilisés, les résultats étant plus précis (résistivité vraie du recouvrement) mais l'investigation latérale n'est pas continue comme dans le cas du VLF résistivité et le temps passé à réaliser suffisamment de sondages s'en trouve augmenté.

## CONCLUSION

Les premiers travaux géophysiques méthodologiques qui ont eu lieu sur le site pilote choisi pour l'application du programme d'hydrogéologie des milieux fissurés du département Eau (Lufiac, commune de Broualan) ont permis une étude critique de l'intérêt des méthodes EM dans la prospection des zones fissurées en milieu de socle.

Les méthodes EM utilisées ont été : le VLF mode inclinaison et résistivité et le Max-Min (électromagnétisme à boucle horizontale mobile).

Les méthodes électriques en courant continu utilisées furent : le sondage électrique et le profil de résistivité (trainé électrique et rectangle de résistivité).

Une analyse méthodique a permis de mettre en relief les avantages et les inconvénients propres à chaque méthode et de donner dès à présent un certain nombre de recommandations d'utilisation.

Une comparaison des méthodes entre elles a déjà permis de mettre en évidence une **complémentarité entre les méthodes électriques et électromagnétiques** et de proposer un certain nombre de combinaisons de méthodes suivant le type de problème posé comme par exemple l'utilisation conjointe du VLF mode inclinaison et résistivité dans le cas de prospection sous faible couverture, ou l'utilisation du VLF mode inclinaison comme préliminaire à une étude plus poussée par sondages électriques et trainés électriques ou par VLF mode résistivité et Max-Min.

L'interprétation des résultats sera révisée au fur et à mesure que des informations seront acquises sur la nature, les caractéristiques physiques et hydrodynamiques du milieu fissuré.

Les premières tendances se dégageant de l'étude sont représentées ci-après avec quelques exemples d'associations de méthodes de prospection, étant entendu que ce type d'expérience s'avère être très éloigné des conditions de travail difficiles rencontrées à l'occasion de l'exécution de projets d'aménagement à l'étranger.



### **ASSOCIATION DE METHODES ELECTROMAGNETIQUES**

- VLF Inclinaison
- VLF Max-Min Inclinaison (VLEM)<sup>(\*)</sup>
- VLF Résistivité

### **EXEMPLES DE PROFILS ELECTRIQUES OBTENUS PAR TRAINES**

- simple
- à répétition
- combiné

### **EXEMPLE DE PROFIL ELECTROMAGNETIQUE**

MAX-MIN Mode MAX (HLEM)<sup>(\*\*)</sup>

(\*) Vertical Loop Electromagnetism

(\*\*) Horizontal Loop Electromagnetism

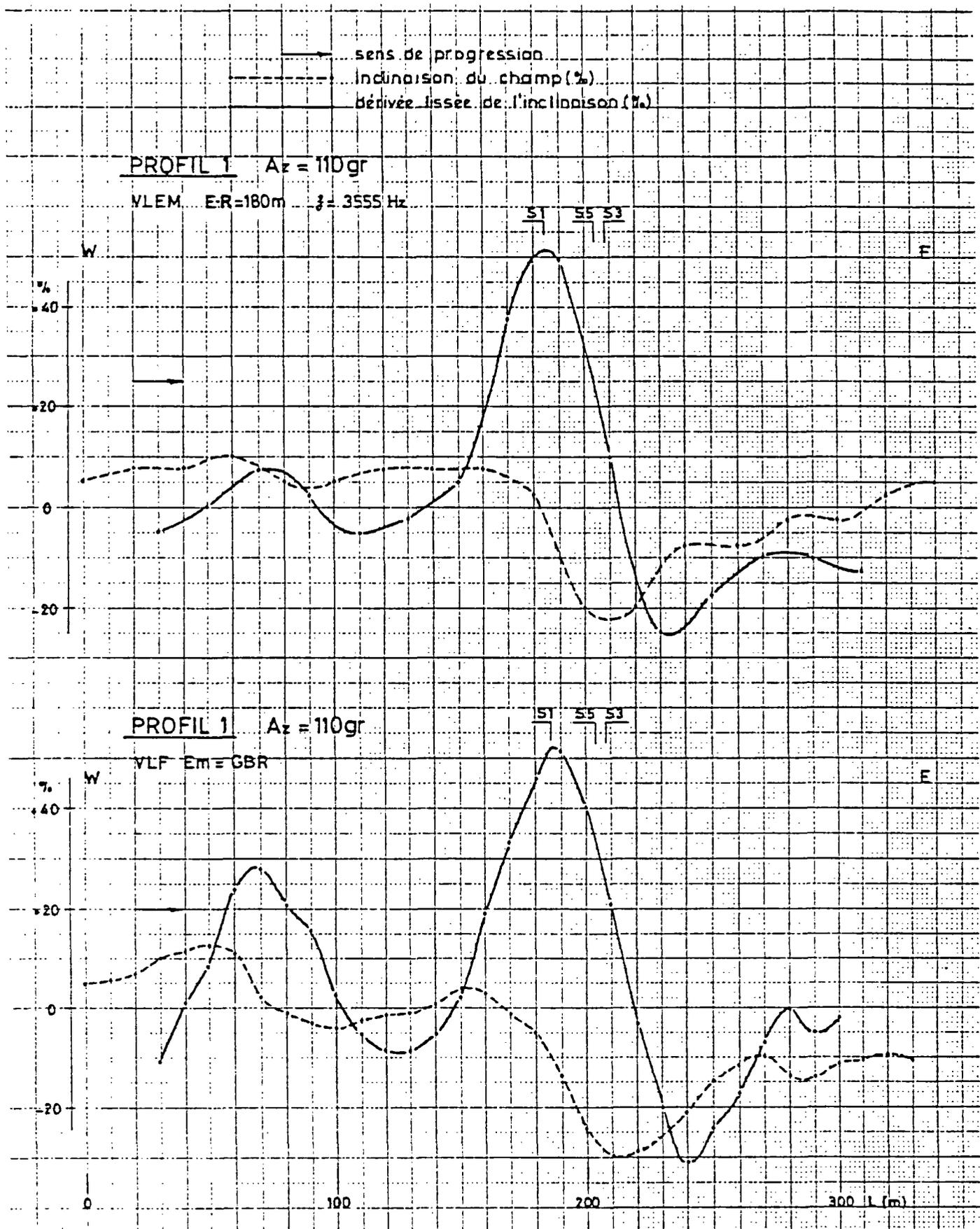


Figure 17a - Broualan - Profil 1 - VLF inclinaison et VLEM inclinaison -  
 VLEM (Electromagnétisme à boucle verticale) et  
 VLF mode inclinaison

Extrait de J. VALENTIN : Rapport BRGM 85 SGN 037 GPH

**METHODOLOGIE GEOPHYSIQUE SUR LE SITE EXPERIMENTAL DE  
BROUALAN (Ile-et-Vilaine - France)**

Les méthodes électromagnétiques VLF et Max-Min ont été mises en oeuvre sur ce site.

Sur la figure 17a sont représentés les profils obtenus par procédé Max-Min inclinaison (VLEM) et par VLF inclinaison. **Les deux profils sont semblables et présentent une anomalie conductrice bien marquée au forage S1.**

Sur la figure 17b sont étudiés les effets de l'inclinaison des profils par rapport à l'axe de l'anomalie pour le procédé VLF inclinaison. On peut remarquer que le signal recueilli est le mieux marqué sur les profils (P1 et P2) perpendiculaires à la direction de fracturation et que ce signal s'amortit puis se déforme au fur et à mesure que le profil est plus oblique (P3 et P4).

Sur la figure 17c sont reportés les profils obtenus par VLF résistivité, qui peuvent être comparés aux profils de résistivité des figures 18a et 18b présentées à la suite. **Les mêmes anomalies sont obtenues aux mêmes endroits quelle que soit la méthode utilisée.**

De plus, comme pour les profils en courant continu, on remarque une détérioration du signal en fonction de l'inclinaison du profil par rapport à l'axe de l'anomalie.

Enfin, la figure 17d concerne l'électromagnétisme à boucles horizontales (Max-Min mode Max). Les anomalies obtenues, en particulier à l'est (forages S1, S5 et S3) sont plus larges que celles données par les autres méthodes de résistivité mises en oeuvre, rendant plus délicat le positionnement des zones fissurées. Comme pour les autres méthodes l'incidence du profil par rapport à l'axe de la discontinuité est importante et modifie très sérieusement l'allure du signal.

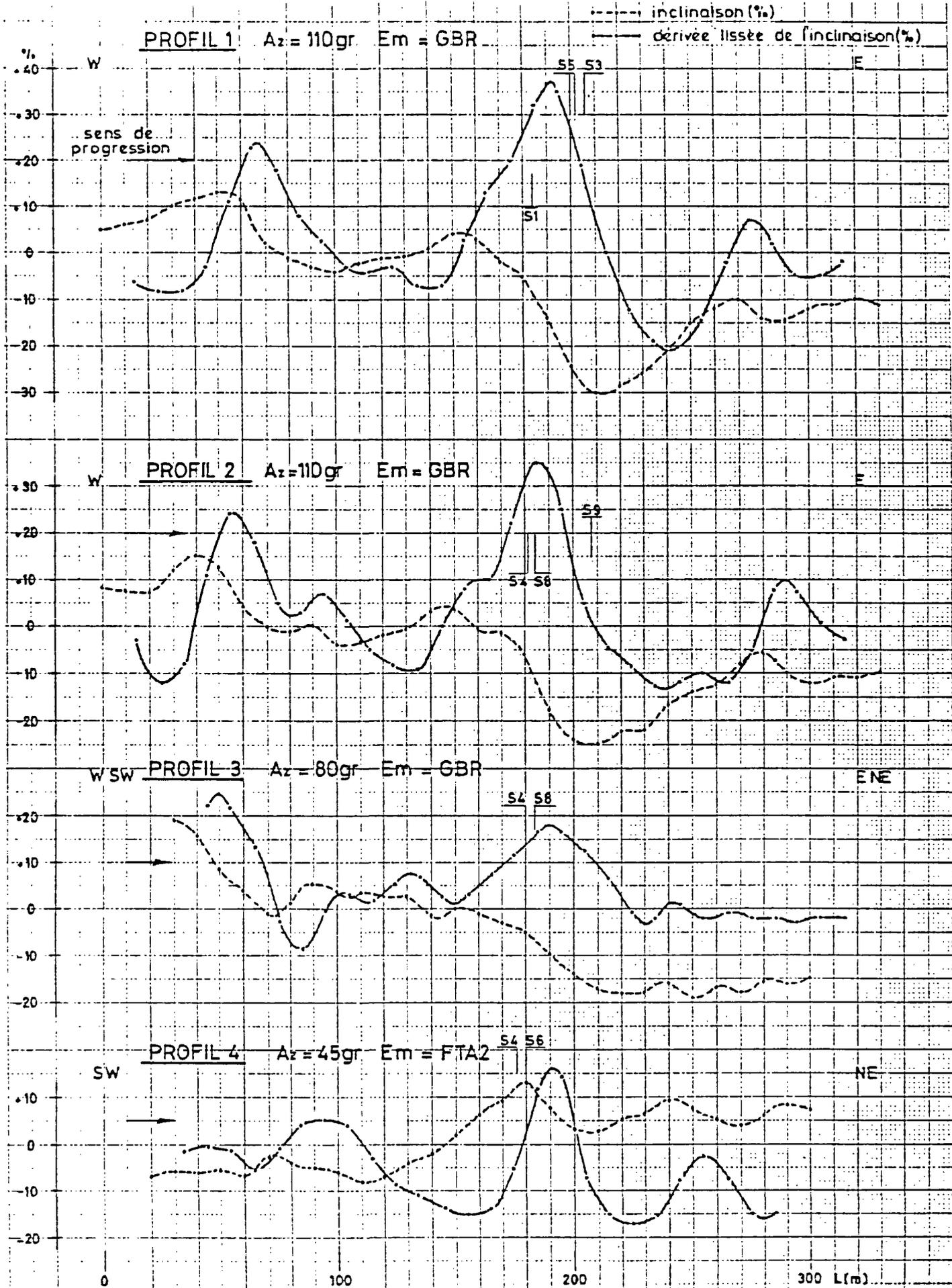


Figure 17b - Broualan - VLF inclinaison - VLF mode inclinaison

Extrait de J. VALENTIN : Rapport BRGM 85 SGN 037 GPH

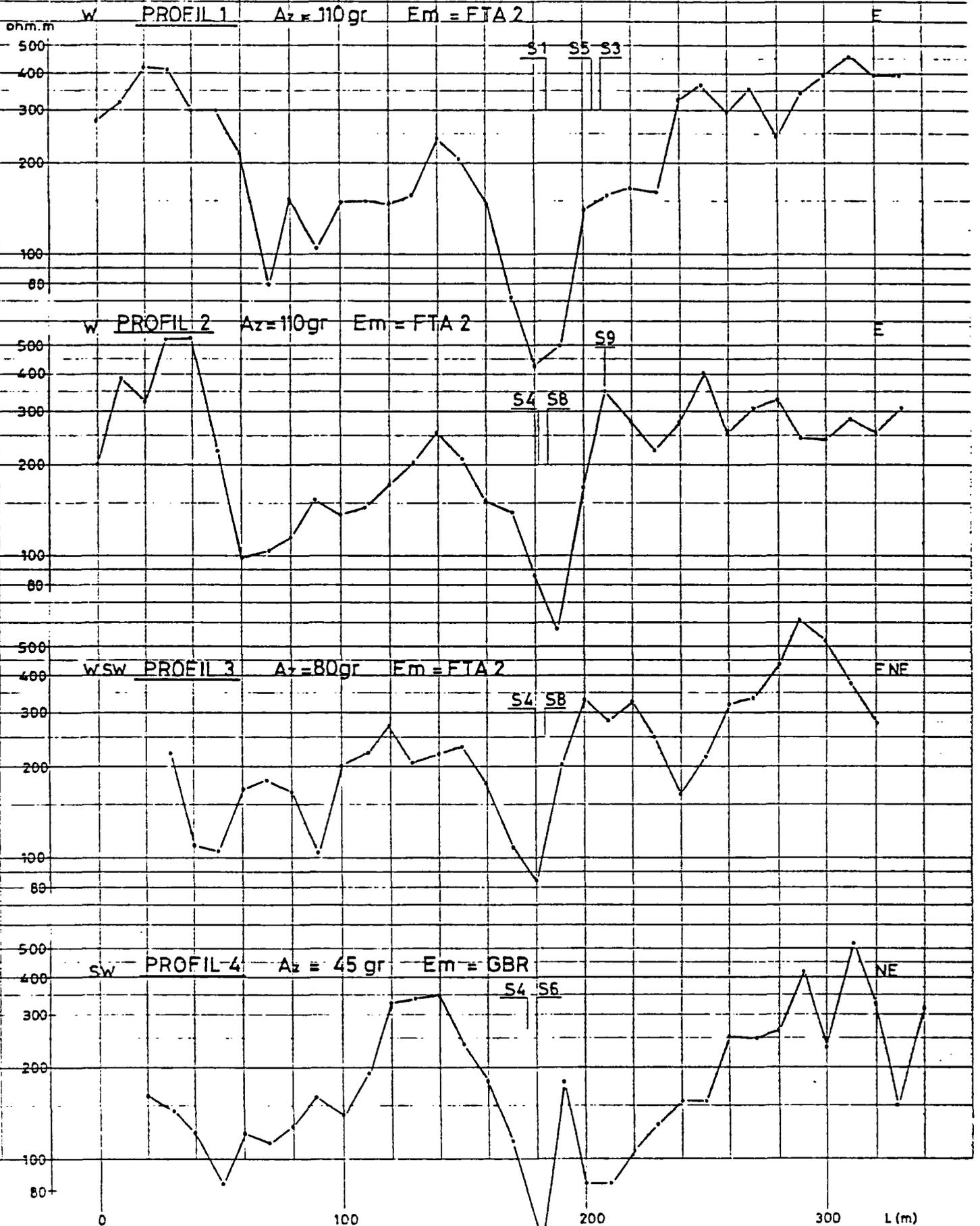


Figure 17c - Broualan - VLF résistivité - VLF mode résistivité

Extrait de J. VALENTIN : Rapport BRGM 85 SGN 037 GPH

E.R. = 100m  $f = 3555 \text{ Hz}$

IP = Composante en phase  
OP = Composante en quadrature

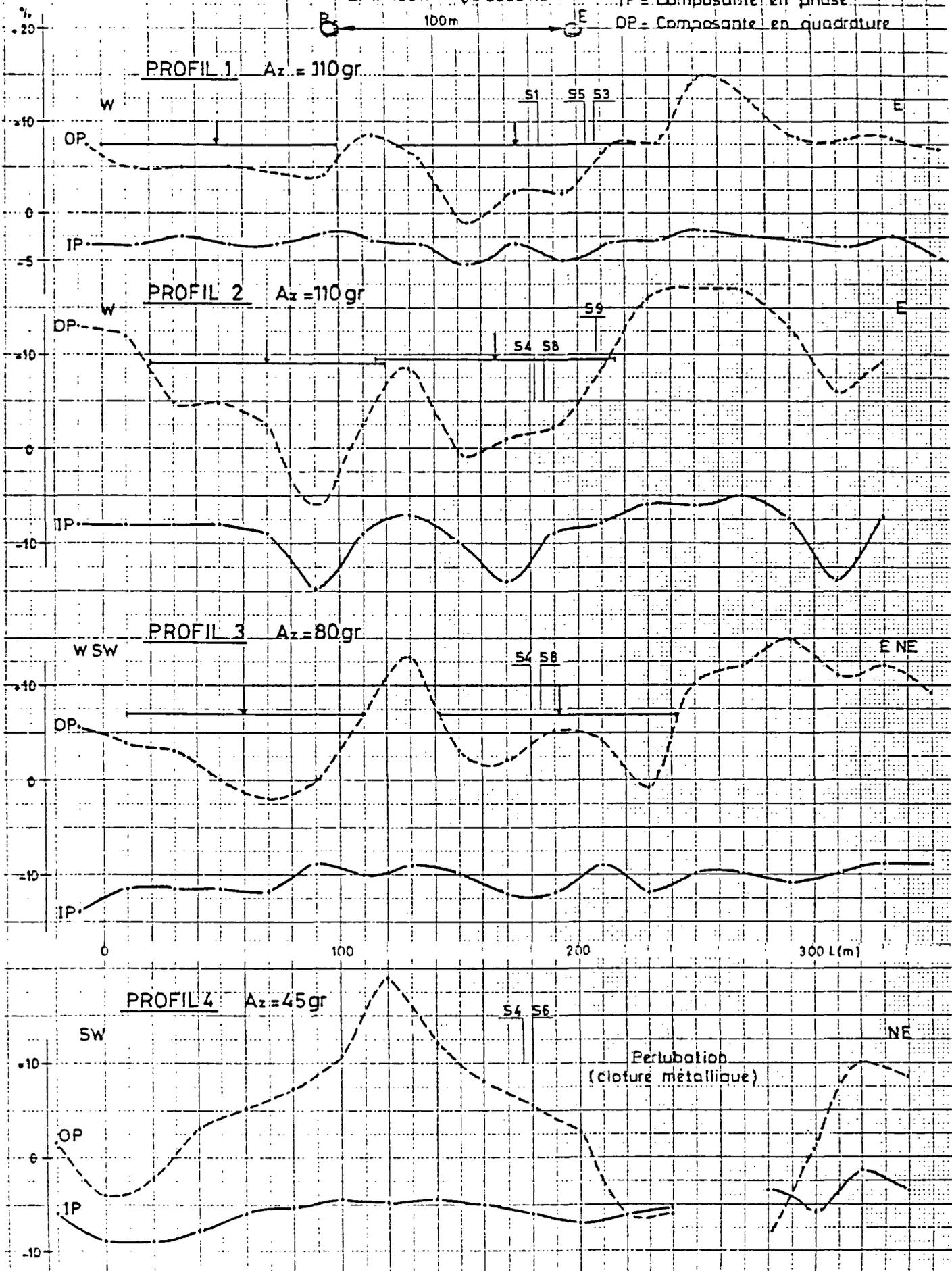


Figure 17d - Broualan - HLEM Electromagnétisme à boucles horizontales

Extrait de J. VALENTIN : Rapport BRGM 85 SGN 037 GPH

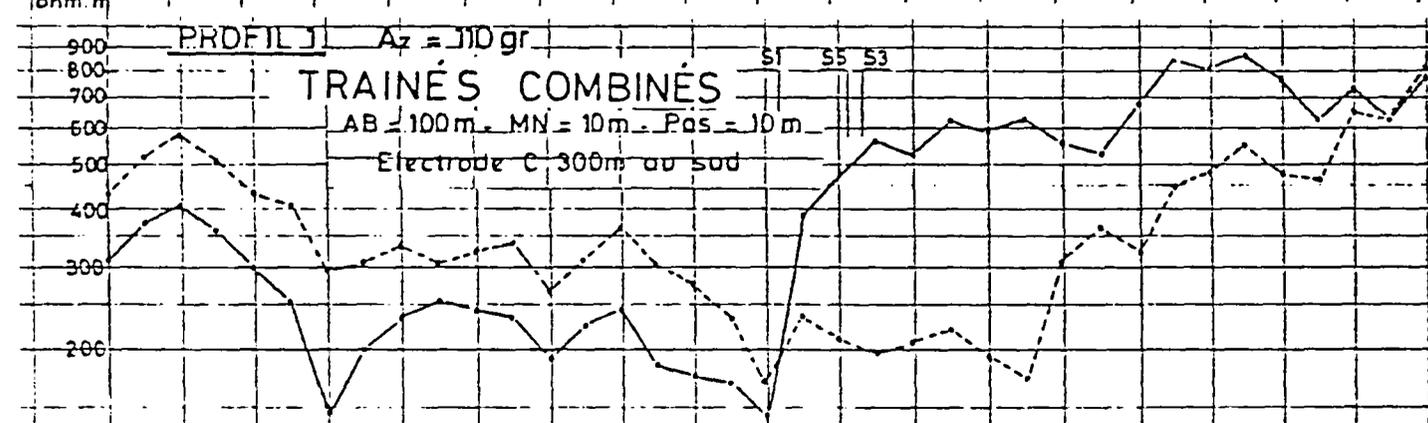
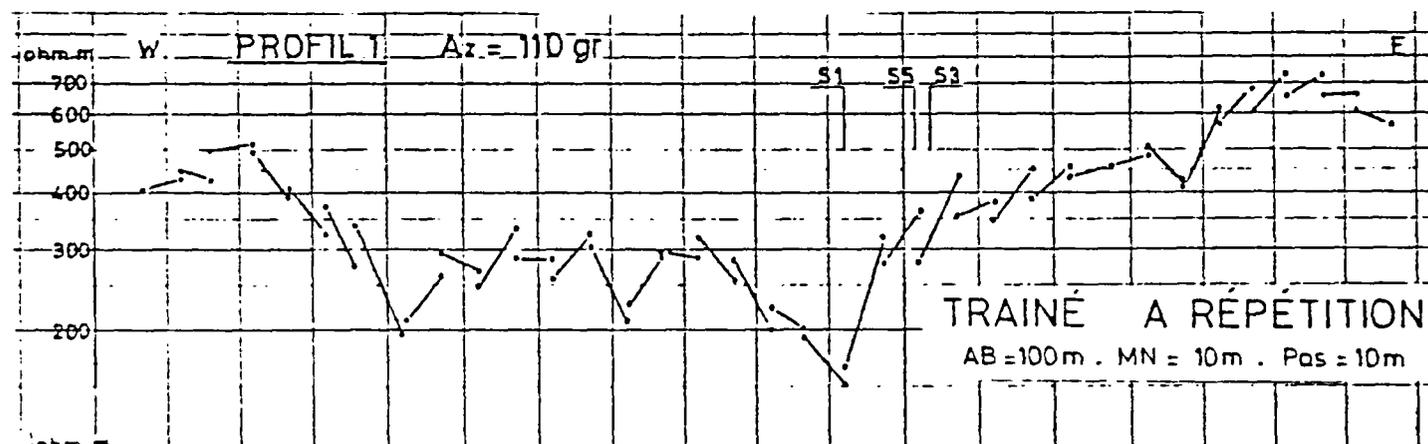
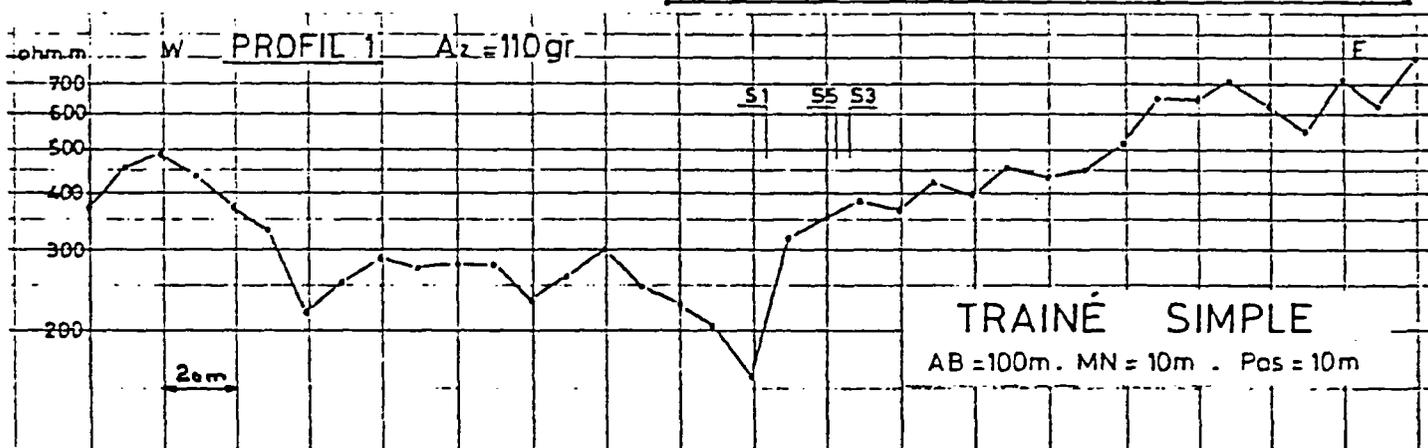
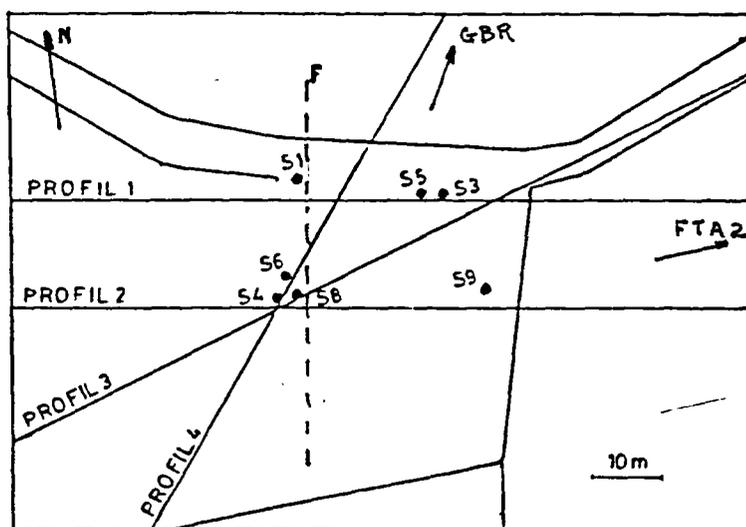


Figure 18a - Broualan - Plan de situation des profils de résistivités et des forages

Extrait de J. VALENTIN : Rapport BRGM 85 SGN 037 GPH

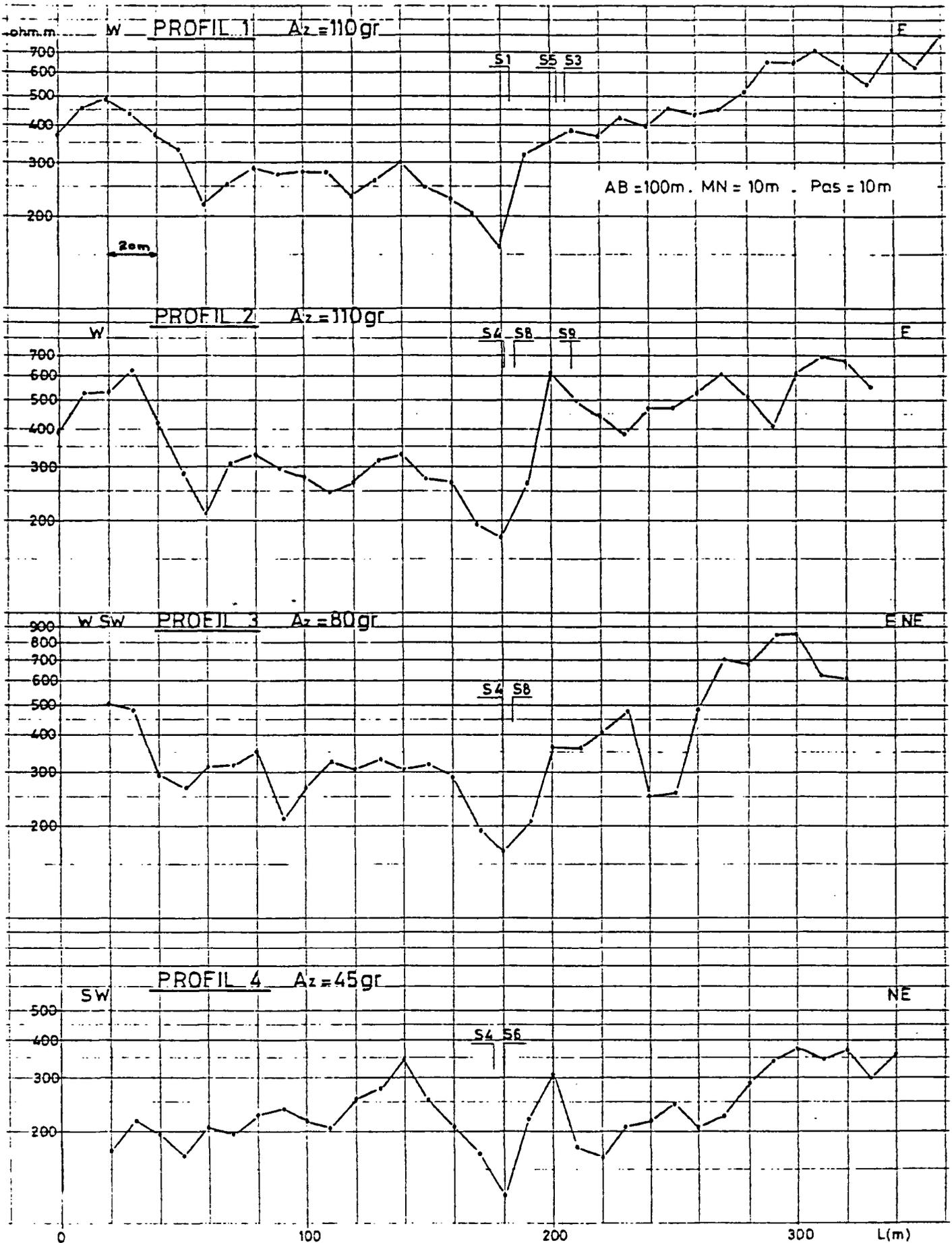


Figure 18b - Broualan - Trainés simples

Extrait de J. VALENTIN : Rapport BRGM 85 SGN 037 GPH

**POURSUITE DE L'ETUDE GEOPHYSIQUE METHODOLOGIQUE  
SUR LE SITE PILOTE DE LUFAC**

**Commune de Broualan  
(Ille-et-Vilaine)**

**par**

**G. Chevalier - Lemire**

**Rapport BRGM 84 SGN 321 GPH**

Dans le cadre de la fiche programme "Appui à l'Hydrogéologie", le département Géophysique du BRGM a poursuivi les travaux méthodologiques sur le site pilote choisi dans le cadre du programme d'étude de l'Hydrogéologie des Milieux Fissurés du Département Eau et situé à Lufiac.

L'objectif de ces travaux était une étude comparative des diverses méthodes de prospection applicables à la recherche d'eau en zones fissurées (électriques, électromagnétiques, sismique réfraction).

Si les méthodes de profilage électrique se révèlent être l'outil essentiel pour la prospection de telles zones, les méthodes électromagnétiques permettent de lui apporter une aide précieuse dans bien des cas. Le couplage inductif permet de prospecter des zones où le travail en électrique serait difficile et lent, voire impossible (terrain de surface sableux, cuirasse latéritique, etc.), la rapidité d'exécution des mesures permet une mise en évidence accélérée de zones anomaliques, la réalisation de profils parallèles (suivie de l'extension latérale de fissures) ou du maillage d'un secteur (mise en évidence de plusieurs directions de fissuration). L'interprétation des mesures est facilitée par la combinaison des deux méthodes sur les zones retenues car elle permet de préciser le type de structure à laquelle on s'adresse (conducteur étroit ou large, contact électrique).

La méthode sismique réfraction employée conjointement avec des méthodes électriques permet d'améliorer sensiblement la qualité de l'interprétation mais n'est pas très employée à cause de la nécessaire utilisation de tirs d'explosifs comme source d'ébranlement.

La prospection des milieux fissurés par géophysique exige dans tous les cas de bien définir les objectifs ainsi que les contraintes d'utilisation de façon à déterminer la méthodologie de prospection à employer.

## CONCLUSION SUR LES METHODES ELECTRIQUES

Les méthodes de trainé électrique employées à Lufiac ont permis de positionner avec précision la position de la tête de la structure conductrice responsable des anomalies électriques (ici bordure d'un palier conducteur). Seule la méthode du trainé combiné nous a permis de donner une indication grossière de pendage pour cette structure.

L'emploi du trainé à répétition en prospection des milieux fissurés peut se révéler intéressante si des à-coups d'injection ou de réception risquent de perturber l'interprétation d'un profil par trainé simple.

L'emploi du trainé combiné peut se justifier sur une structure déjà reconnue par d'autres méthodes où l'on souhaiterait préciser le passage de la structure. L'interprétation en terme de pendage est peu précise et nécessiterait le calcul de courbes types.

Les essais menés sur des profils obliques par rapport à la direction transverse idéale nous ont montré également que jusqu'à 30 gr par rapport à la direction idéale transverse l'anomalie reste repérable mais qu'elle se détache moins de son environnement (contraste atténué). Pour des obliquités plus importantes, la réponse de la structure est complètement changée et on ne retrouve plus les conducteurs responsables des anomalies repérées sur les profils transverses.

## CONCLUSION SUR LA METHODE SISMIQUE

La méthode sismique réfraction employée à Lufiac nous a permis de définir l'existence de trois terrains : recouvrement, arènes et substratum et de déterminer leurs vitesses respectives (450, 1500, 3500 et 5200 m/s), ainsi que leur épaisseur. Cela a abouti au tracé de coupes sismiques. Les retards observés sur les courbes relatives aux arrivées réfractées au toit du marqueur rapide semblent être dus à une surépaisseur d'arènes.

Les tirs en arc constituent le complément des dispositifs linéaires, permettant de suivre avec un dispositif allégé l'allongement d'une zone fissurée repérée précédemment. L'analyse des amplitudes donne une indication sur l'atténuation de l'onde.

L'emploi de la sismique réfraction (dispositif linéaire) en prospection des milieux fissurés se justifie sur une structure déjà reconnue par d'autres méthodes pour préciser l'épaisseur d'altération sur le substratum : l'interprétation permet alors de dresser une coupe du toit du substratum rapide. Dans la mesure où l'épaisseur des terrains de recouvrement est sensiblement constante, les retards observés sur les arrivées réfractées au toit du marqueur rapide peuvent alors s'interpréter comme la manifestation des zones localisées du substratum à vitesse plus faible donc à fissuration. Cette méthode permet bien sûr de repérer les zones fissurées présentant une largeur importante et ne convient pas aux zones fissurées étroites.

## CONCLUSION GENERALE

Les travaux géophysiques méthodologiques menés à Lufiac sur le site pilote des milieux fissurés, ont permis de compléter les enseignements déjà dégagés lors des travaux réalisés en 1983.

A la suite des forages réalisés par le Département Eau (janvier 1984), un certain nombre de profils ont été réalisés avec plusieurs méthodes de prospection de surface (électrique, électromagnétique et sismique).

En prospection des milieux fissurés aquifères, les méthodes de profilage électrique doivent constituer l'outil essentiel du fait de leur grande adaptabilité (profondeur d'investigation modulable facilement).

Les méthodes de profilage électromagnétiques présentent des avantages (couplage inductif par exemple) qui permettent d'apporter une aide précieuse à la prospection électrique dans bien des cas :

- travail difficile ou impossible en électrique,
- mise en évidence rapide des zones anomaliques,
- réalisation rapide de profils parallèles (suivi de l'extension latérale de conducteurs) ou du maillage d'un secteur (mise en évidence de structures de directions variables).

La combinaison électromagnétique-électrique, même sur des portions de profil, permet d'aider l'interprétation et l'implantation de forages en précisant le type de structure que l'on observe (conducteur étroit ou large, contact électrique).

Le repérage des fissures par ces méthodes est parfois direct (recouvrement faible) mais le plus souvent indirect (recouvrement important) les variations latérales de conductance étant mieux mises en évidence dans les terrains de recouvrement qu'au niveau du socle.

La méthode sismique réfraction n'est plus très utilisée en prospection des milieux fissurés du fait de sa mise en oeuvre nécessitant l'emploi d'explosifs, mais elle permet d'affiner les informations apportées par les autres méthodes (réalisation de coupes qui définissent bien les variations d'épaisseur du recouvrement et permettent parfois de repérer directement la zone fissurée).

**PROJET D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE DU CONSEIL DE L'ENTENTE EN  
BURKINA-FASO**

par  
**H. Favin**

Rapport BRGM 83 GPH 073

Au cours de cette étude, deux méthodes destinées à localiser des zones fissurées ont été mises en oeuvre :

- la méthode électrique par sondage électrique et profil de résistivité ;
- la méthode électromagnétique VLF dans les zones de faible recouvrement.

**TRAVAUX REALISES**

- 87 sites répartis dans 70 villages ont été étudiés ;
- 157 sondages électriques effectués avec des lignes AB variant de 100 à 800 m ;
- 64 150 m de profils de résistivité mesurés au pas de 10 m avec des lignes d'injection de courant comprises entre 100 et 400 m ;
- 3 490 m de profils VLF.

**RESULTATS OBTENUS**

- Dans certains villages où aucune anomalie électrique n'a été mise en évidence, aucun site n'a été proposé.
- Dans d'autres sites où les résultats sont peu marqués (anomalie de résistivité peu contrastée), une proposition de forage a néanmoins été faite, mais un complément d'étude devient souhaitable de manière à définir un site plus propice.
- Une proposition de forage a été faite pour tous les autres sites.
- Au 15 juin 1983, 18 sites proposés par géophysique ont été reconnus par foration au marteau-fond-de-trou.

Sur ces dix-huit forages, dont **aucun** n'a été sec, on distingue :

- *3 ont un débit inférieur à 0,5 m<sup>3</sup>/h*
  - . un a été implanté sur une anomalie conductrice à proximité d'un contact conducteur/résistant ; le forage réalisé semble avoir été implanté trop loin de la zone éventuellement favorable.

- . un autre a été implanté sur une anomalie conductrice étroite, trop peu étendue pour être intéressante d'un point de vue hydrogéologique.
  - . le troisième a été implanté au contact de deux paliers de résistivités peu marqués.
- *3 ont un débit compris entre 0,5 et 1 m<sup>3</sup>/h*
- . un forage implanté sur une anomalie conductrice a trouvé de l'eau dans une fracture à 49 m.
  - . deux autres forages ont été implantés sur des paliers conducteurs à proximité d'un palier résistant. Le faible débit trouvé s'explique par le trop grand éloignement (100 mètres) du contact de ces deux paliers.
- *12 forages ont un débit supérieur à 1 m<sup>3</sup>/h*

Ces forages étaient implantés dans des zones favorables (contact résistant/conducteur) des profils de résistivités ou sur des sondages électriques montrant la présence d'une arène granitique.

Tous les forages réalisés ont recoupé des zones arénitisées avant d'atteindre le socle sain.

Mais ceci ne peut servir de guide de prospection, étant entendu que les sondages électriques sont souvent perturbés par l'anisotropie du milieu.

## CONCLUSION

La plupart des forages ont été implantés à proximité du contact conducteur/résistant sur des profils de résistivités. Ces contacts se sont révélés intéressants car ils sont révélateurs de zones perturbées favorables à la présence d'eau.

Néanmoins, l'implantation d'un forage par rapport à un contact, reste un problème délicat, car se placer trop proche du contact c'est peut-être se situer en amont-pendage et se déplacer trop loin du contact risque de révéler la roche saine peu perméable.

**PROGRAMME D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE DU CONSEIL DE L'ENTENTE****Rapport final de la 1ère phase****Au Burkina-Faso****par****M. Ricolvi****Rapport BRGM 84 AGE 040****PRECISION SUR L'ESTIMATION DE L'ÉPAISSEUR D'ALTERATION**

Un échantillonnage de 75 forages réalisés sur sondages électriques, permet d'indiquer que la précision sur l'estimation de l'épaisseur d'altération par méthode géophysique est satisfaisante pour des profondeurs de socle situées autour de 30 m.

Au-delà, la géophysique surestime la profondeur, en-deçà elle la sous-estime. D'une manière générale, la profondeur du socle donnée par sondage électrique est donc en moyenne surestimée.

Cela semble dû au fait que le géologue fixe le toit du socle à la première apparition de roche cohérente, alors que le sondage électrique définit le socle comme un résistant infini qui correspond au socle sain.

La différence entre les deux profondeurs représente l'épaisseur de la frange fissurée-altérée, c'est-à-dire la zone la plus aquifère.

Il est donc logique de constater une différence entre les deux profondeurs plus importante pour les forages producteurs que pour les forages secs. Par ailleurs et toujours à l'échelle de la population des 75 forages étudiés, la précision sur la profondeur du toit du socle donnée par géophysique est maximale (98 %) pour une tranche de terrains traversée variant de 0 à 25 m. Cette précision n'est plus que de 34 % pour des tranches de 25 à 50 m et atteint seulement 20 % pour les tranches de terrains supérieures à 50 m.

## RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES ELECTRIQUES DU SONDAGE ELECTRIQUE ET LE RESULTAT DU FORAGE

### a - Paramètres du sondage électrique

On constate que le taux de succès d'un forage est maximal lorsque les sondages électriques sur lesquels il est implanté présente un terrain intermédiaire épais et de résistivité moyenne.

Ce schéma correspond à un ensemble arène grenue - frange très altérée bien développée.

A l'inverse, l'association résistivité élevée - faible épaisseur est défavorable : les altérations argileuses reposent directement sur un socle peu altéré.

### b - Paramètres de l'anomalie électrique

Le taux de succès est d'autant plus élevé que l'anomalie est plus large et le contraste de résistivité plus élevé.

## CONCLUSIONS

La prospection électrique de surface permet de connaître avec une précision acceptable, l'épaisseur du recouvrement et d'estimer la puissance de l'ensemble arènes grenues - frange fissurée, facteurs déterminants du succès du sondage.

La probabilité maximale de réussite est atteinte lorsque :

- l'anomalie négative du profil est la plus large possible (> 100 m) et présente un contraste de résistivité élevé (> 2).
- le sondage électrique effectué à la verticale de l'anomalie met en évidence un terrain intermédiaire épais (> 40 m) et moyennement résistant (100 à 200  $\Omega$ m).

A noter enfin qu'il n'a pas été possible d'établir des corrélations entre les débits des forages positifs et les paramètres électriques fournis par la méthode employée.

### - Exemples d'interprétation

**Village de Sarana** - La figure 19 reproduit le profil et le sondage électrique de contrôle réalisés dans le village de Sarana, secteur de granites subaffleurants sans accidents majeurs visibles.

Trainé électrique

AB = 100m

MN = 20m

pas = 10m

azimut : 0°

n° IRII : 429

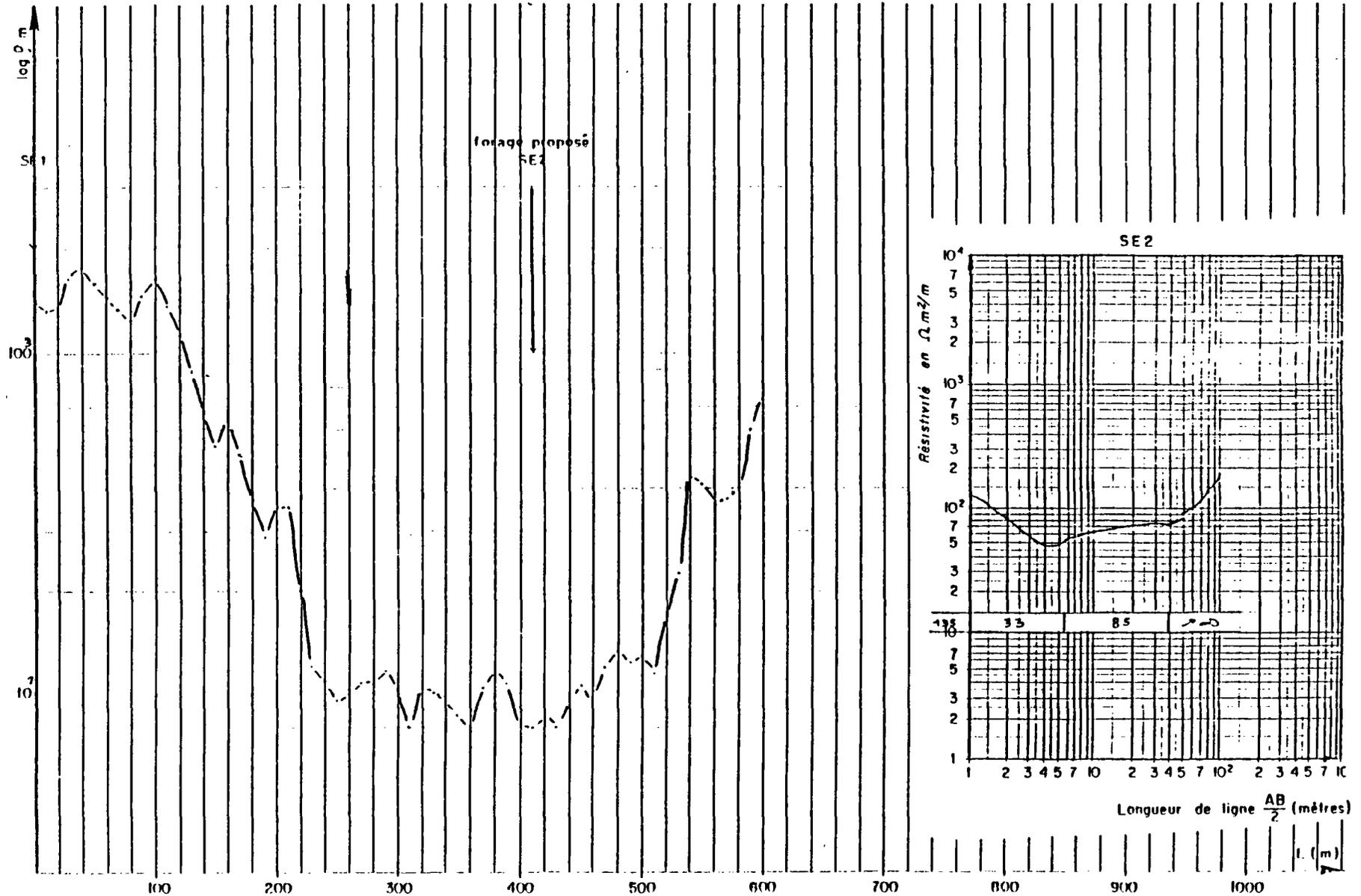


Figure 19 - Profil de résistivité et sondage électrique

Extrait de M. RICOLVI : Rapport BRGM 84 AGE 040

NAGARIN

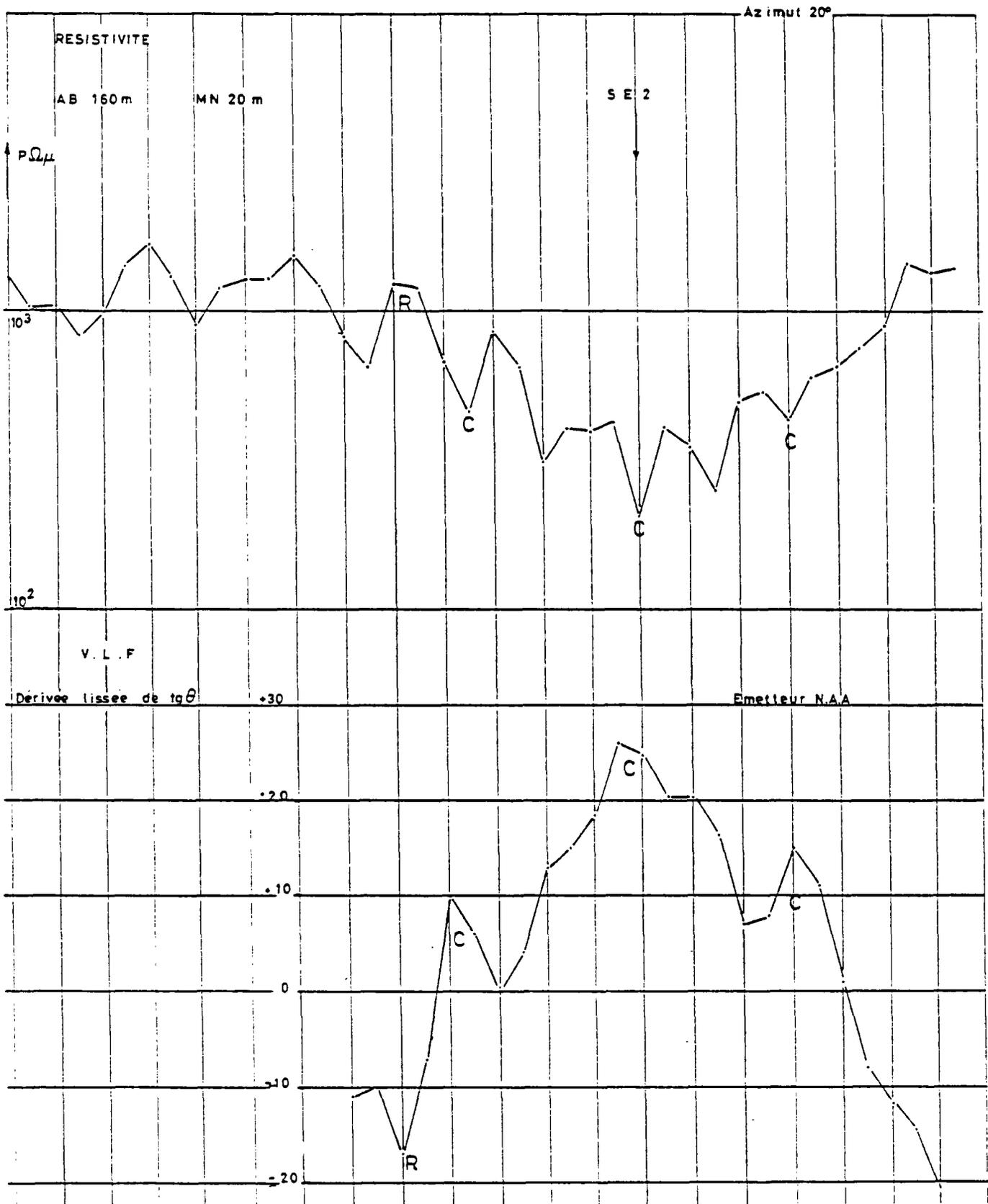


Figure 20 - Profils de résistivité et VLF

Extrait de M. RICOLVI : Rapport BRGM 84 AGE 040

Le profil montre une anomalie négative très importante que l'on interprète comme une zone d'effondrement du socle. Le sondage électrique n° 2 réalisé au centre de l'anomalie confirme que le socle subaffleurant sur les bords de l'anomalie est rejeté à 40 m de profondeur.

La résistivité du terrain sus-jacent (85 ohm.m) permet de prévoir une formation non argileuse. Le forage réalisé confirme les données de la prospection : un bon débit (5 m<sup>3</sup>/h) est obtenu dans les quartzites qui surmontent le socle granitique sain.

**Village de Nagarin (fig. 20)** - Les profils de résistivité et VLF sont parfaitement concordants. Ils mettent en évidence une anomalie conductrice due probablement à l'épaississement de la couverture altérée au niveau d'une zone fissurée. Le forage positionné en SE 1 confirme cette hypothèse ; il a recoupé une zone fissurée de 14 m d'épaisseur sous 30 m d'altérations argileuses. La zone fissurée est très productive (2,4 m<sup>3</sup>/h pour 10 m de rabattement).

#### *- Efficacité de la géophysique*

La géophysique a été utilisée pour l'implantation de 74 forages. On compte 61 forages positifs ; le taux de succès est de 82 %. Il faut remarquer que parmi les 13 forages négatifs, 8 forages ont été réalisés alors que les résultats de la géophysique indiquaient des conditions défavorables. Le diagnostic géophysique a donc été fiable ici à 93 %.

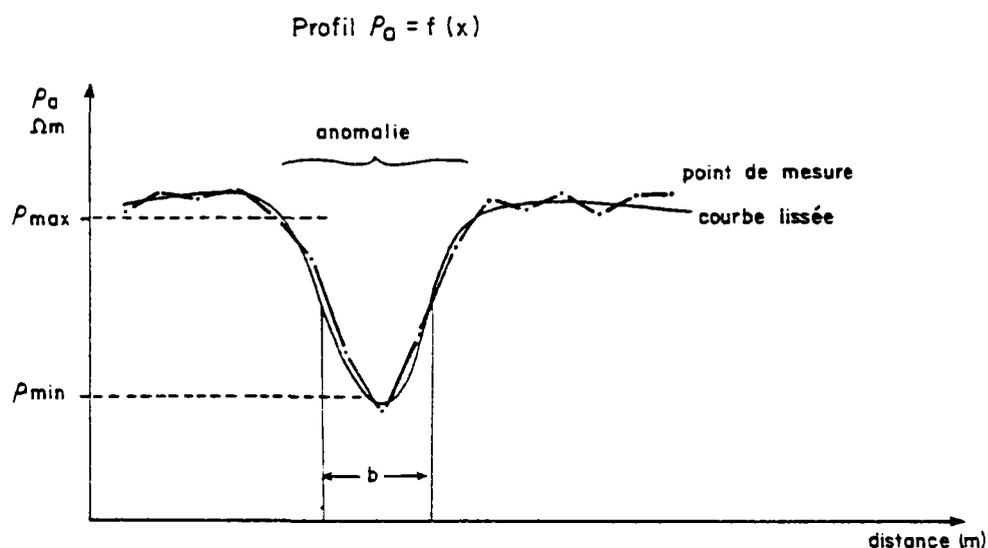
### **VOLUME DES TRAVAUX**

Le volume et la localisation des travaux d'implantation sont résumés dans le tableau 7.

Provinces	Implantations réalisées	Etudes Géophysiques		
		Longueur profils résistivité (m)	Nbre SE	Longueur profils VLF (m)
Oubritenga	240	53 460	120	3 410
Passore	61	7 670	18	0
Burkina	90	9 580	25	700
Sissili	68	1 720	7	0
<b>Total</b>	<b>459</b>	<b>72 430</b>	<b>170</b>	<b>4 110</b>

**Tableau 7 - Volume et localisation des travaux d'implantation**

PROSPECTION DES AQUIFERES DISCONTINUS AU SUD DE KAYES - PROGRAMME CEAO  
PARAMETRES CARACTERISTIQUES D'UNE ANOMALIE DE LA  
RESISTIVITE APPARENTE (méthode du trainé électrique)



Les paramètres sont :

1)  $\rho_{\min}$  : résistivité minimum apparente

2)  $C : \frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}}$  : contraste de résistivité

$b$  : distance entre les deux points d'inflexion de la courbe lissée

3)  $B : \frac{b}{MN} \times 10m$  : largeur corrigée

Conditions à réaliser

$$C \geq 1,7$$

$$40 \Omega m \leq \rho_{\min} \leq 150 \Omega m$$

$$B \leq 60 m$$

On définit :

Anomalie favorable :

3 conditions réalisées

Anomalie passable :

2 conditions réalisées

Anomalie médiocre :

1 condition réalisée

**Figure 21 -**  
Rapport BRGM 84 AGE 029

**PROGRAMME CEAO D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE  
ET PASTORALE DANS LES 1ère ET 2ème REGIONS  
PREMIERE CAMPAGNE AU MALI**

Résultats et Recommandations

par **G. Zamolo**

BRGM 84 AGE 029

**PROSPECTION GEOPHYSIQUE**

Etant donné les difficultés rencontrées dans la zone par les projets antérieurs, la **prospection géophysique a été réalisée systématiquement** sur tous les sites. La technique du trainé électrique a été réalisée dans le cas de la recherche d'aquifères discontinus; celle du sondage électrique pour l'étude des aquifères continus (alluvions).

Au total **54 villages** ont fait l'objet d'une prospection électrique. Les travaux se répartissent comme suit :

**1 - Aquifères discontinus (Birrimien et Infracambrien - 47 villages)**

- 129 sondages électriques
- 11 profils "gradient" totalisent 3090 m
- 17 profils trainé électrique en AB400/MN40 totalisent 6 370 m
- 94 profils trainé électrique en AB200/MN20 totalisent 34 250 m
- 75 profils trainé électrique en AB100/MN10 totalisent 23 280 m

se répartissent sur 101 sites étudiés et représentant 122 jours de prospection.

**2 - Zones alluvionnaires (aquifères continus - 7 villages)**

- 49 sondages électriques totalisent 10 jours de prospection.

**LES PRINCIPALES CONCLUSIONS DE CETTE ETUDE SONT LES SUIVANTES :**

Dans le Birrimien (granites essentiellement) et l'Infracambrien (grès), les anomalies correspondant à des forages positifs ont le plus souvent :

- . une fourchette de résistivité minimale apparente allant de 40 à 150  $\Omega$ m ;
- . un contraste d'au moins 1,7 ;
- . une largeur corrigée inférieure à 60 m.

- il existe une relation statistique entre le résultat d'un forage et le type d'anomalie qui lui est associé, ce qui revient à dire qu'à chaque anomalie correspondrait une probabilité de succès ;
- il apparaît possible de définir pour un type de roche donné dans un contexte régional donné, une forme de l'anomalie à priori capable d'augmenter les chances de succès dans l'implantation du forage.

Ainsi, le nombre relativement moins élevé d'anomalies favorables trouvées sur les sites non encore forés risque d'entraîner une baisse du taux de succès dans les quelques villages restant à aménager.

Quoiqu'il en soit, il est confirmé dans de tels contextes que la prospection géophysique se doit d'être complète et systématique.

L'analyse statistique des données de cette première campagne laisse apparaître, malgré le faible nombre d'échantillons traités, une corrélation entre forage positif et l'appartenance à certaines plages de valeurs des paramètres caractéristiques de l'anomalie observée par trainé.

Comme nous l'avons vu plus haut ces paramètres définis comme caractéristiques sont :

- le contraste de résistivité apparente
- la résistivité apparente minimale
- la largeur de l'anomalie

La figure 21 présente, pour la méthode du trainé électrique, les paramètres caractéristiques d'une anomalie de la résistivité apparente.

Les figures 22 à 24 synthétisent la répartition des forages tant positifs que négatifs dans les cas où :

- les trois conditions caractérisant l'anomalie et définies précédemment sont réunies et satisfaites ;
- deux des trois conditions sont réunies et satisfaites.

**Ainsi il apparaît que dans l'aquifère du Birrimien :**

- entreprendre une foration sur une anomalie passable, est très risqué (1 succès sur 8) ;
- forer sur une anomalie favorable est bien sûr préférable, mais cela ne représente qu'une garantie assortie de réserves (3 succès sur 6). Ces résultats sur les 14 forages effectués dans le Birrimien confirment la difficulté à l'échelle régionale d'assurer une fourniture en eau dans de telles formations.

**En ce qui concerne l'aquifère de l'Infracambrien, l'implantation du forage sur anomalie favorable semble justifiée puisque 7 forages sur 8 ont été positifs contre 4 sur 9 seulement, sur anomalie jugée passable (2 conditions réunies au lieu de 3).**

La définition de ces classes reste toutefois **statistique** et gagnerait à être précisée pour un plus grand nombre de données, ce qui permettrait peut-être de quantifier le taux de succès probable d'après la géophysique, fournissant ainsi un élément essentiel de la **prise de décision**.

Pour ce qui concerne les aquifères continus en formations alluviales, le forage fut implanté là où l'interprétation du sondage électrique a donné **l'épaisseur d'alluvions la plus forte**.

## **CONCLUSIONS**

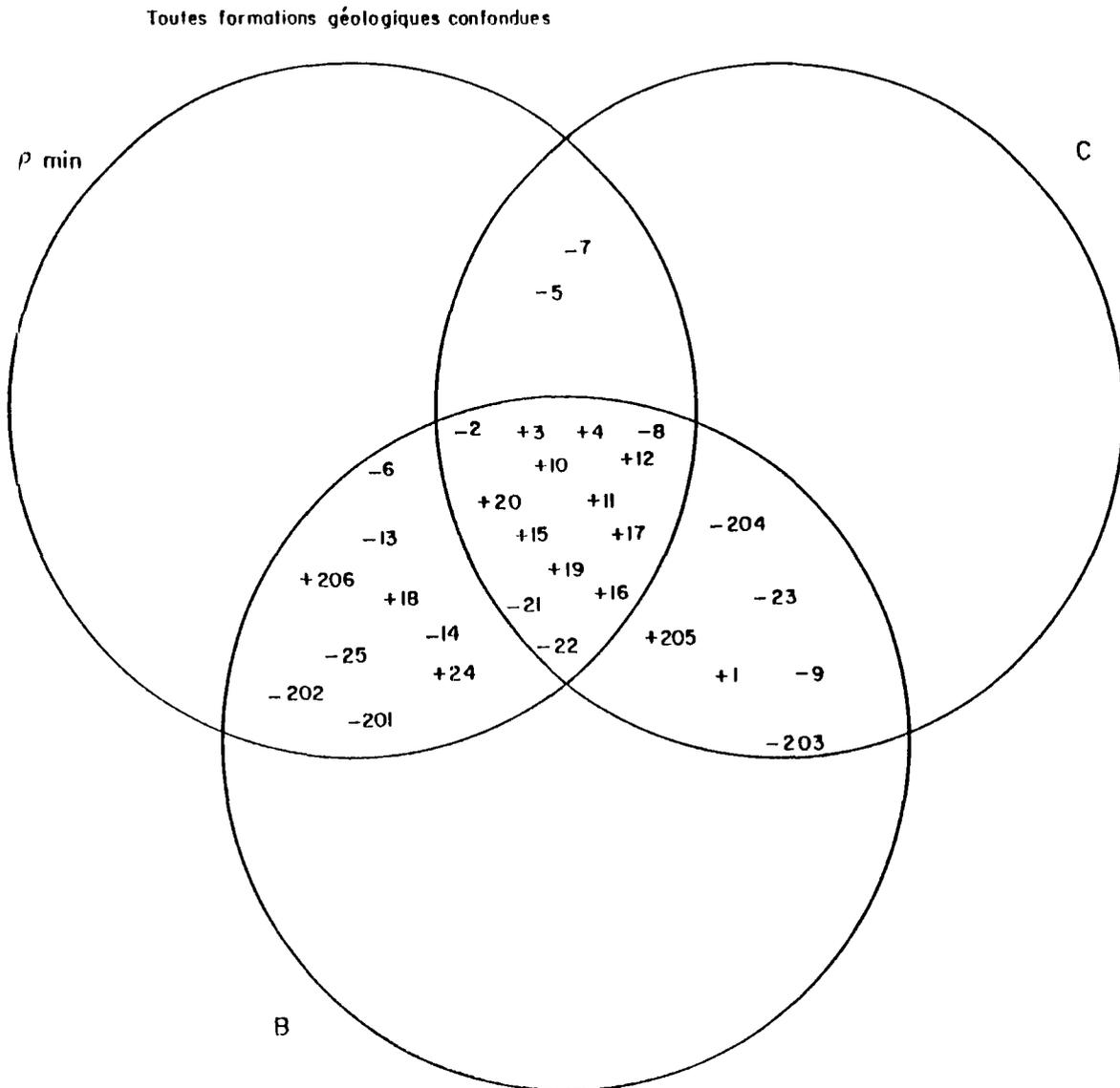
**Dans la région Sud de Kayes (Arrondissement de Sadiola), on peut définir des classes d'anomalies géophysiques associées à des taux de réussite des forages. Il apparaît ainsi comme une condition nécessaire mais non suffisante que le forage soit effectué sur une anomalie favorable ;**

**Pour les sites non encore forés, l'étude fait observer un nombre relativement moins important de cibles intéressantes, ceci étant vraisemblablement imputable à l'absence de linéaments bien marqués sur photo-aériennes et sur le terrain.**

**L'intérêt des profils parallèles ne concerne que l'indication sur la direction de l'anomalie, mais dans tout état de cause, l'intérêt des profils parallèles concernant l'implantation d'un forage n'est pas démontré.**

PROSPECTION DES AQUIFERES DISCONTINUS AU SUD DE KAYES - PROGRAMME CEA0

REPARTITION DES FORAGES EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES DE  
L' ANOMALIE GEOPHYSIQUE CORRESPONDANTE



- + Forage positif et n? ( $Q \geq 1\text{m}^3/\text{h}$ )
- Forage négatif et n? ( $Q < 1\text{m}^3/\text{h}$ )

STATISTIQUES: nombre de forages positifs / nombre de forage du sous-ensemble

Pour l'intersection des 3 ensembles 10/14 = 71% de réussite (sur anomalie favorable)

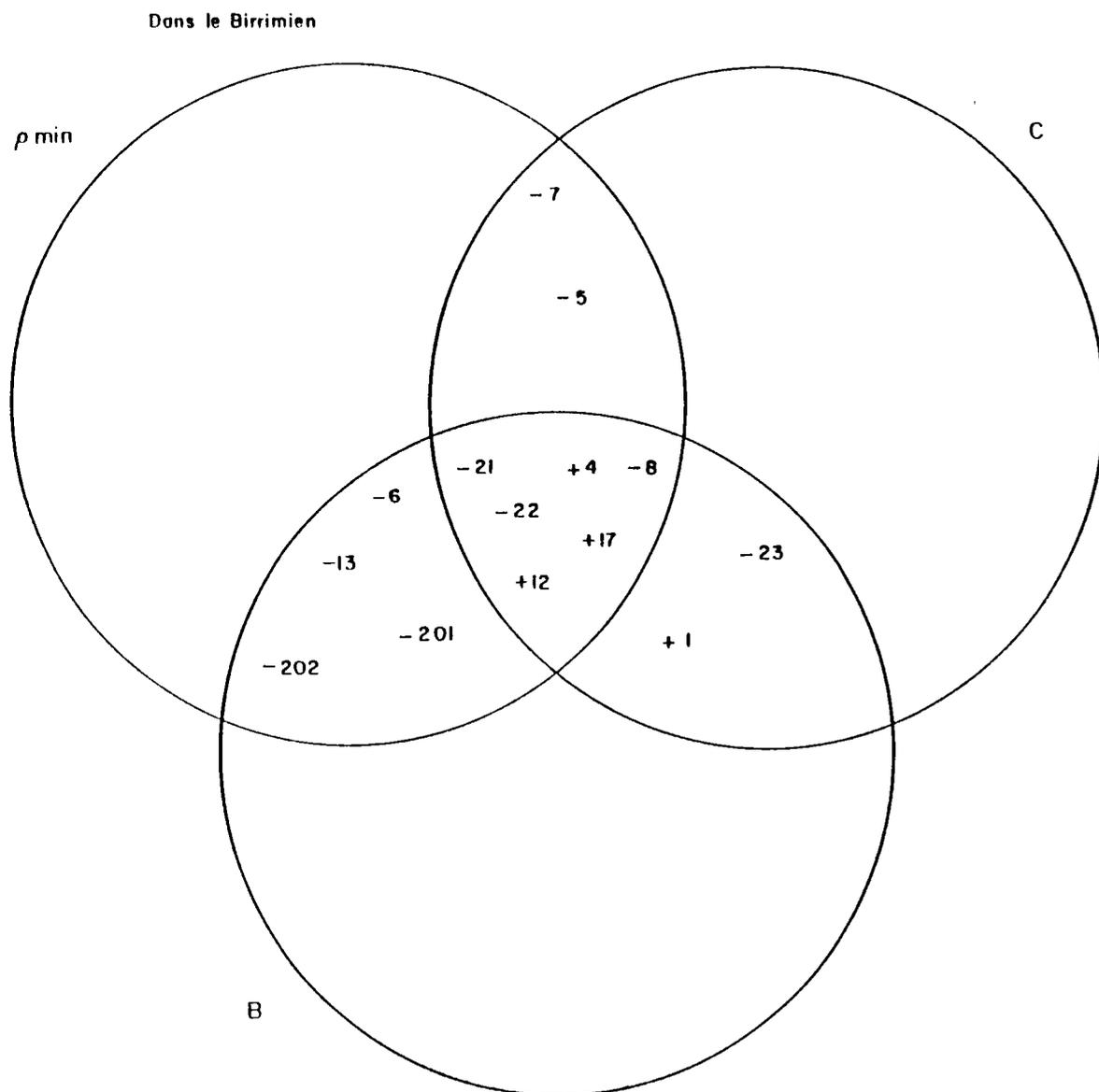
Pour l'intersection des 2 ensembles 5 / 17 = 29% de réussite (sur anomalie passable)

Définitions :

- C Ensemble des anomalies dont le contraste est égal ou supérieur à 1,7
- rho min Ensemble des anomalies avec  $40\Omega\text{m} \leq \rho_{\text{min}} \leq 150\Omega\text{m}$
- B Ensemble des anomalies dont la largeur corrigée est inférieure ou égale à 60 m

**Figure 22**  
Rapport BRGM 84 AGE 029

REPARTITION DES FORAGES EN FONCTION DES PARAMETRES DE  
L' ANOMALIE GEOPHYSIQUE CORRESPONDANTE



+ Forage positif et n°

- Forage négatif et n°

STATISTIQUES: nombre de forages positifs / nombre de forages  
du sous-ensemble

Pour l'intersection des 3 ensembles  $3/6 = 50\%$  de réussite  
(sur anomalie favorable)

Pour l'intersection des 2 ensembles  $1/8 = 12,5\%$  de réussite  
(sur anomalie passable)

Définitions:

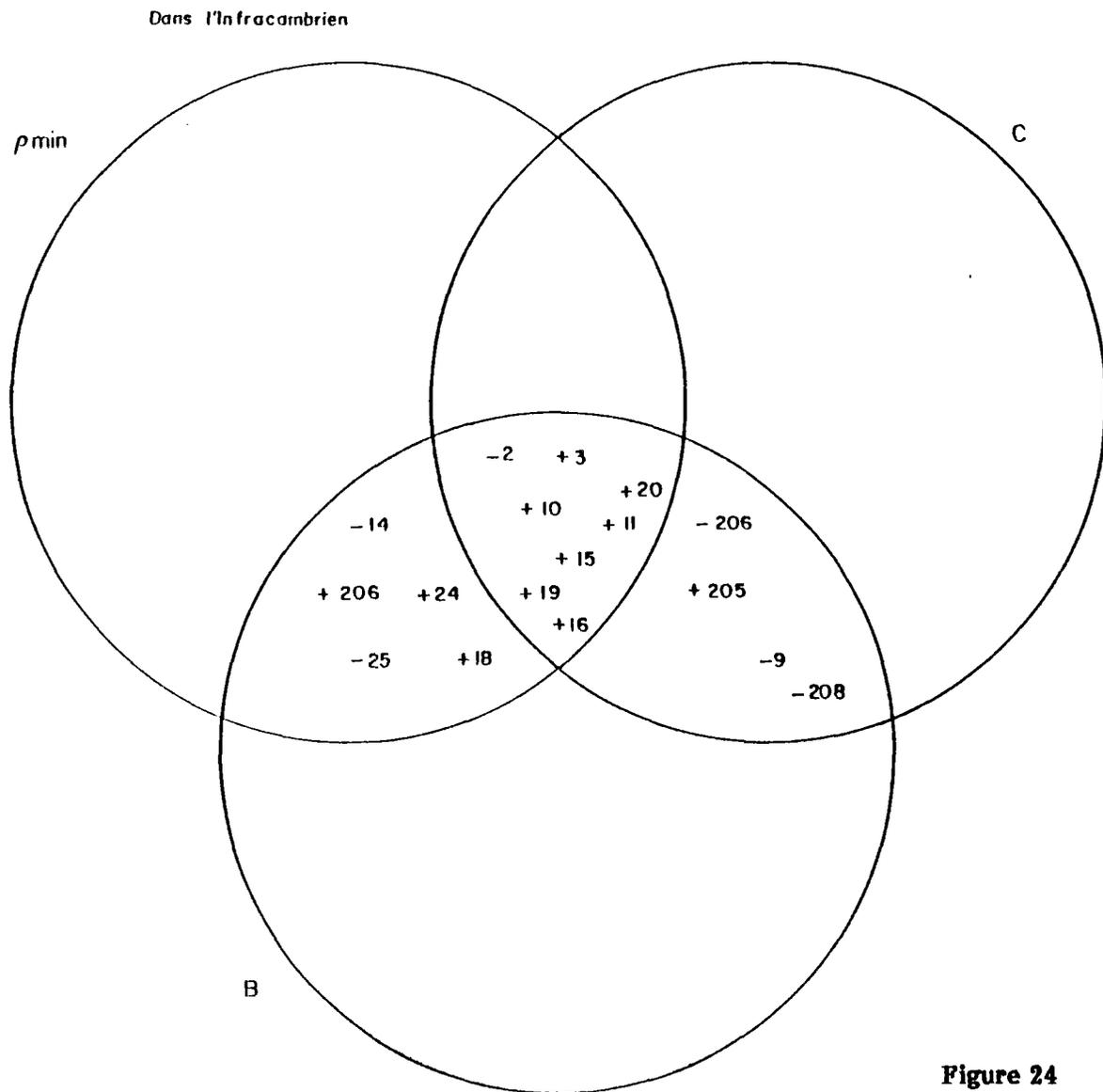
C Ensemble des anomalies telles que  $C \geq 1,7$

$\rho \min$  Ensemble des anomalies telles que  $40\Omega m \leq \rho \min \leq 150\Omega m$

B Ensemble des anomalies telles que  $B \leq 60m$

Figure 23  
Rapport BRGM 84 AGE 029

PROSPECTION DES AQUIFERES DISCONTINUS AU SUD DE KAYES - PROGRAMME CEAO  
 REPARTITION DES FORAGES EN FONCTION DES PARAMETRES DE  
 L' ANOMALIE GEOPHYSIQUE CORRESPONDANTE



+ Forage positif et n°

- Forage négatif et n°

STATISTIQUES : nombre de forages positifs / nombre de forages  
 du sous-ensemble

Pour l'intersection des 3 ensembles  $7/8 = 87\%$  de réussite  
 (sur anomalie favorable)

Pour l'intersection des 2 ensembles  $4/9 = 44\%$  de réussite  
 (sur anomalie passable)

Définitions :

C Ensemble des anomalies dont le contraste est  
 $C \geq 1,7$

$\rho_{min}$  Ensemble des anomalies telles que  $40\Omega m \leq \rho_{min} \leq 150\Omega m$

B Ensemble des anomalies telles que  $B \leq 60m$

Figure 24  
 Rapport BRGM 84 AGE 029

**PROJET CEAO**  
**CAMPAGNE MARTEAU-FOND-DE-TROU AU SENEGAL ORIENTAL**

Analyse statistique des résultats obtenus par prospection électrique

**G. Chevalier-Lemire - février 1985**

Rapport BRGM 85 GPH 024

**RESUME**

Le département Géophysique du BRGM a réalisé une analyse des résultats de forages implantés par géophysique au Sénégal oriental, de janvier à mars 1984 (projet CEAO, 98 forages marteau fond de trou). **Les aquifères recherchés étaient discontinus (zones fissurées du socle) et la méthodologie employée consistait en la réalisation de profils VLF inclinaison et/ou électriques.** L'analyse statistique, qui a porté sur une **population de forages assez faible (68 forages)**, a cependant permis de donner quelques indications intéressantes :

- **La méthode électromagnétique VLF inclinaison a donné un taux de succès en tout point comparable aux implantations par profilage électrique**, ce qui confirme tout l'intérêt de cette méthode dans la mesure où l'hypothèse qu'une anomalie conductrice au niveau du recouvrement se corrèle bien avec la présence d'une zone fissurée aquifère au niveau du socle, ce qui semble être le cas au Sénégal oriental.
- **Il ne s'est pas dégagé d'éléments statistiques en ce qui concerne des critères de sélection et de qualité des anomalies électriques ou VLF inclinaison.** La géophysique très succincte réalisée au Sénégal oriental semble donc se borner à la mise en évidence et au repérage d'hétérogénéités latérales de résistivité que l'on contrôle par forage.

**Un forage a été considéré comme positif si son débit d'exploitation a été supérieur ou égal à 1 m<sup>3</sup>/h.**

## **REMARQUES GENERALES**

Un taux de succès de 70 % a été rencontré en ce qui concerne la population des 68 forages, parmi lesquels on a enregistré des débits supérieurs ou égaux à 1 m<sup>3</sup>/h.

76 % d'entre eux fournissent un débit compris entre 1 et 10 m<sup>3</sup>/h. Les statistiques d'implantation globales font apparaître un taux de succès de 66 %, que les implantations aient été réalisées par VLF mode inclinaison ou par profilage électrique.

Dans le cas du VLF inclinaison, 58 % des forages positifs ont un débit supérieur à 5 m<sup>3</sup>/h contre 40 % pour les implantations par profilage électrique.

**Les taux de succès sont donc équivalents mais l'emploi du VLF mode inclinaison semble permettre d'obtenir des débits plus élevés.**

"Ceci pourrait s'expliquer assez simplement par le fait que le VLF mode inclinaison permet de couvrir une zone étendue rapidement et de sélectionner ainsi les zones les plus favorables à l'implantation d'un forage compte-tenu du faible temps de prospection que l'on peut accorder à un village".

## **RELATION POURCENTAGE D'ECHECS - TYPE DE PROSPECTION - TYPE DE FORMATION**

Les résultats indiquent que les pourcentages d'échecs sont équivalents en VLF inclinaison et profilage électrique, et ceci quelque soit le type de formation rencontré.

## **RELATION POURCENTAGE D'ECHECS - TYPE D'ANOMALIE ETUDIE - TYPE DE FORMATION**

Le pourcentage d'échecs entre les deux types d'anomalie électrique rencontrés (compartiment conducteur ou contact électrique), est équivalent.

## **ANALYSE GENERALE DES RESULTATS**

Le succès obtenu par VLF inclinaison indique que les zones fissurées du substratum schisteux ou pélitique, peuvent être repérées indirectement par l'intermédiaire de zones conductrices superficielles, ces dernières se développant préférentiellement au sein du recouvrement à l'aplomb des zones fissurées du substratum (altération préférentielle).

La combinaison des méthodes VLF inclinaison et profilage électrique n'a pas apporté d'amélioration du taux de succès : les deux anomalies se confirment mutuellement dans la plupart des cas.

### **. Analyse des anomalies VLF inclinaison**

C'est la dépendance des paramètres amplitude de l'anomalie - profondeur du substratum - taux de succès, qui a été étudiée.

On retient :

- **il n'y a pas de relation simple entre profondeur du substratum et taux de succès**, alors que la profondeur d'investigation limitée du VLF aurait pu laisser présager une augmentation du taux d'échec avec la profondeur du substratum.

Les implantations se sont donc faites en général sur des anomalies conductrices superficielles se trouvant pour la plupart à l'aplomb de zones fissurées aquifères.

- **il n'y a pas de relation entre amplitude de l'anomalie et le taux de succès**. Il n'est donc pas nécessaire de rechercher systématiquement des anomalies très fortes pour implanter des forages, **mais le guide consistant à implanter sur la plus forte anomalie d'un secteur donné se révèle être efficace**, dans le cas bien évidemment où aucun autre critère de choix de l'implantation n'est disponible.

- **il n'y a pas de relation simple entre débit d'une part et amplitude d'anomalie - profondeur du substratum, d'autre part**. Le VLF se révèle donc, dans ces formations, un **outil efficace**, sans qu'il soit possible d'améliorer ses résultats en fonction de l'amplitude de l'anomalie ou de la profondeur du substratum.

**. Analyse des anomalies de profilage électrique**

Sont prises en compte :

- les anomalies type compartiments conducteurs ;
- les anomalies type contacts électriques.

**Il y a pratiquement autant de chance de succès en implantant sur contact électrique que sur compartiment conducteur dans le cas de roches du Paléozoïque et du Birrimien schisteux.**

**a - Implantation sur compartiment conducteur :**

On peut semble-t-il améliorer légèrement le taux de succès en n'implantant que sur des anomalies dont le contraste est supérieur ou égal à 1,5.

**b - Implantation sur contact électrique :**

Il ne se dégage pas de contraste, ni de largeurs particulières significatives.

Toutes les implantations semblent intéressantes.

**Il n'a pas été possible de dégager une relation simple entre contraste des anomalies et profondeur du substratum.**

**RELATION ENTRE FORMATION GEOLOGIQUE ET RESISTIVITE GEOELECTRIQUE**

L'interprétation des sondages électriques en termes de coupes géoélectriques dans le cas de programme de recherches de zones fissurées aquifères en milieu de socle est difficile. Les raisons sont les suivantes :

- le milieu ne vérifie en général pas les hypothèses de milieu tabulaire nécessaires à l'interprétation.
- la méconnaissance des résistivités vraies des formations est en général totale (absence de calage géologique par forage ou diagraphie).
- la taille de la zone prospectée et la variété des formations géologiques rencontrées, rendent de toute façon illusoire la réalisation d'une échelle des résistivités par type de formation ou d'altération.

A l'inverse, l'analyse des sondages électriques peut porter sur **deux paramètres accessibles sans risque d'erreur trop important, à savoir :**

- **la résistivité estimée du substratum résistant ;**
- **la conductance globale du recouvrement sur un substratum en général infiniment résistant.**

Ainsi, on retiendra que :

- **Pour les résistivités du substratum :**
  - . 84 % des sondages électriques réalisés sur les formations schisteuses ou pélitiques du Paléozoïque et du Birrimien, **ont rencontré un substratum de résistivité inférieure à 1000  $\Omega$ m.**
  - . 75 % des sondages électriques réalisés sur les formations granitiques ont rencontré un **substratum de résistivité supérieure à 1000  $\Omega$ m.**
- **Pour la conductance totale du recouvrement :**
  - . Tous les sondages électriques réalisés sur les formations granitiques ont montré **une conductance de recouvrement inférieure à 1 mho ;**
  - . sur les formations schisteuses et pélitiques, seuls 45 % de sondages électriques exécutés ont trouvé **une conductance du recouvrement supérieure à 1 mho.**

**Dans le cadre de la présente étude,** il semblerait donc que l'examen critique de la résistivité estimée du substratum puisse aider l'opérateur à déterminer avec une certaine assurance la nature lithologique de ce substratum.

A l'inverse, l'observation de la conductance totale du recouvrement, ne semble pas permettre de dégager un fil conducteur quant à la nature des formations supportées par le substratum résistant.



**2 - La prospection géophysique par la méthode magnétique s'est par ailleurs révélée très utile, du fait de la présence fréquente de batholites et de filons doléritiques -dont la caractéristique est d'avoir une forte susceptibilité magnétique - et donc de manière à compléter la prospection électrique.**

**3 - La technique du rectangle de résistivité a été rapidement abandonnée au profit exclusif du trainé simple, pour les raisons suivantes :**

- faible rendement du fait de l'installation de longues lignes AB ;
- obligation de travailler uniquement dans le tiers-central de la ligne AB, ce qui limite bien évidemment la portée des profils et les possibilités d'investigations ;
- la recherche d'anomalies conductrices a souvent conduit à entreprendre les trainés électriques sur des longueurs bien supérieures à 1000 m, ce qui rendit la technique du rectangle de résistivité non adaptée.

#### **CRITERES D'IMPLANTATION RETENUS**

**1 - La cible hydrogéologique recherchée par les méthodes utilisées peut être de 3 sortes et avoir les signatures géophysiques suivantes :**

Type de cible	Signature			
	sur photo-aérienne	sur trainé électrique	sur profil magnétique	sur sondage électrique
Zone fracturée dans le substratum	linéament	anomalie conductrice étroite	-	-
Filon de dolérite	linéament	anomalie électrique	anomalie magnétique	-
Alluvions	-	-	-	à définir

**Tableau 8 - Recherche de la cible hydrogéologique par leur signature géophysique**

L'expérience a montré que chaque type de cible possédait une signature géophysique, mais la réciproque n'est pas vraie car à une anomalie géophysique ne correspond pas nécessairement une cible hydrogéologique potentielle et donc susceptible d'être mise en valeur.

Ainsi :

- S'il est vrai qu'une zone fracturée dans le substratum se traduit dans la majorité des cas par une anomalie géophysique conductrice, cette dernière peut avoir une autre cause comme, par exemple, une zone plus conductrice dans le recouvrement ;
- le principe de l'équivalence indique qu'il est possible de donner plusieurs interprétations valables et cohérentes à un sondage électrique, en l'absence de tout forage existant nécessaire à un calage du modèle déterminé par l'interprétation ;
- lorsqu'une anomalie magnétique est interprétée comme étant due à la présence d'un filon mince, il ne faut pas oublier que par principe il existe une infinité de solutions à l'interprétation ;
- la signature géophysique est très souvent fonction de la géométrie du dispositif de mesure utilisé : en trainé électrique, la longueur de ligne AB et l'angle d'incidence du profil par rapport à l'axe de l'anomalie supposée ont une influence que l'on tente de minimiser en adaptant la longueur de ligne AB (après avoir connaissance de l'épaisseur du recouvrement suite à un sondage électrique préalable) et en orientant la direction du profil perpendiculairement à celle des linéaments repérés sur photo-aérienne ;
- les contraintes d'avancement d'un projet d'aménagement villageois impliquent un minimum de temps de prospection, donc la fourniture d'un minimum de données et l'on doit donc a priori émettre l'hypothèse qu'à une anomalie conductrice étroite bien marquée correspond une zone fracturée que l'on espère aquifère.

Par contre, la bijectivité anomalie magnétique-filon apparaît plus vraisemblable et favorable du fait que :

- les profils magnétiques sont toujours perpendiculaires à la structure (la direction de celle-ci est déterminée par plusieurs profils sériés) ;
- dans les zones prospectées, la cause d'une anomalie magnétique isolée et recoupée sur plusieurs profils est à coup sûr un filon doléritique.

Toutefois, il ne faut jamais ignorer que **zone fracturée et filon peuvent ne pas être aquifères.**

**LA RELATION ANOMALIE GEOPHYSIQUE-FORAGE POSITIF est donc HASARDEUSE et sans fondement d'un point de vue statistique**

## **2 - Critères d'implantation sur trainé électrique seul**

Il semble exister des tendances concordantes associant la qualité de l'anomalie électrique à la qualité de la cible, cette dernière étant simplement reflétée par le taux de réussite du forage implanté (rapport BRGM 84 AGE 029 précédemment commenté).

La sélection entre plusieurs anomalies favorables a priori, s'est effectuée en tenant compte de critères inhérents au cadre géographique et à savoir :

- facilité d'accès sur le site choisi pour les machines de forage
- proximité du village à aménager.

C'est l'absence d'anomalie favorable en fin de prospection qui justifiait une implantation sur anomalie "passable".

## **3 - Critères d'implantation sur anomalie magnétique seule**

Les cas où seule une prospection magnétique a permis l'implantation d'un forage sont **peu nombreux.**

Seules les anomalies **isolées et bien dessinées** et dont l'interprétation indiquait la présence d'un **filon mince et peu profond** ont fait l'objet d'une implantation située **en aval pendage** du filon de manière à le recouper sous le niveau statique présumé.

## **4 - Critères d'implantation sur sondages électriques seuls**

Les cibles mises en évidence sont peu nombreuses et les échecs enregistrés n'ont pas permis de définir le critère d'implantation sur sondage électrique pour la recherche d'alluvions aquifères.

A l'inverse, on a pu définir un critère de non-implantation chaque fois qu'une épaisseur importante d'argilite était rencontrée.

##### 5 - Critères d'implantation combinant plusieurs méthodes :

###### - *Combinaison sondage électrique-trainé électrique*

L'information très ponctuelle offerte par les sondages électriques et le fait que chaque site ne comporte que peu d'expérimentations nous conduit à indiquer que d'une manière très générale, les résultats obtenus sur les sondages électriques n'ont pas influencé l'implantation décidée après observation de l'anomalie géoélectrique décelée sur trainé électrique.

###### - *Combinaison trainé électrique-profil magnétique*

L'association d'anomalies magnétiques et d'anomalies électriques a été enregistrée :

- . dans le cas de filon doléritique par le couplage anomalie conductrice et anomalie magnétique de type "filon" ;
- . dans le cas de structures en "marche d'escalier" où le gradient électrique est associé à une anomalie magnétique de type "faille". Ce type de structure a été confirmé par la technique du sondage électrique, **mais n'a jamais fait l'objet d'implantation.**

## CONCLUSION ET RESULTATS

L'implantation des forages s'est principalement articulée sur les résultats des profils exécutés par trainé électrique (AB 200 ; MN 20 et pas 20 m resserré à 10 m au droit des anomalies) et reflétant des anomalies de type **compartment conducteur étroit**, c'est-à-dire présentant :

- une largeur inférieure à 120 m, dans le cas d'une longueur AB égale à 200 m et une largeur inférieure à 60 m pour une ligne AB portée à 100 m de longueur ;
- un fort contraste de résistivité, si possible supérieur à 1.7 ;
- une résistivité minimale comprise entre 40  $\Omega$ m et 150  $\Omega$ m.

### **1 - Les types de faciès géophysiques rencontrés d'après les trainés électriques :**

- Dans l'ensemble, les trainés électriques présentent des résistivités apparentes comprises entre 60 et 150  $\Omega\text{m}$  ;
- les trainés réalisés présentent une allure relativement continue tout en reflétant par des mouvements de grande longueur d'onde, les variations de l'épaisseur du recouvrement d'une part, et par des oscillations plus courtes (anomalies électriques) les parties conductrices étroites au sein du recouvrement et/ou dans le socle, d'autre part ;
- la plupart des anomalies sont plutôt plus conductrices que la courbe moyenne lissée ;
- le bruit de fond des trainés électriques est dans l'ensemble tolérable par rapport à la "taille" des anomalies sélectionnées servant de cible. Si le cas contraire se présentait (nombreuses anomalies rapprochées) le choix d'une cible ne pourrait pas être proposé.

### **2 - Les types de faciès géophysiques rencontrés d'après les sondages électriques :**

La succession trois terrains courante (résistant/conducteur/résistant) est généralement observée et elle correspond à la succession recouvrement superficiel mince/recouvrement (altérite) / roche saine.

### **3 - Les types de faciès géophysiques rencontrés sur profilages magnétiques :**

Les levés magnétiques on présenté trois aspects soit distincts, soit associés et à savoir :

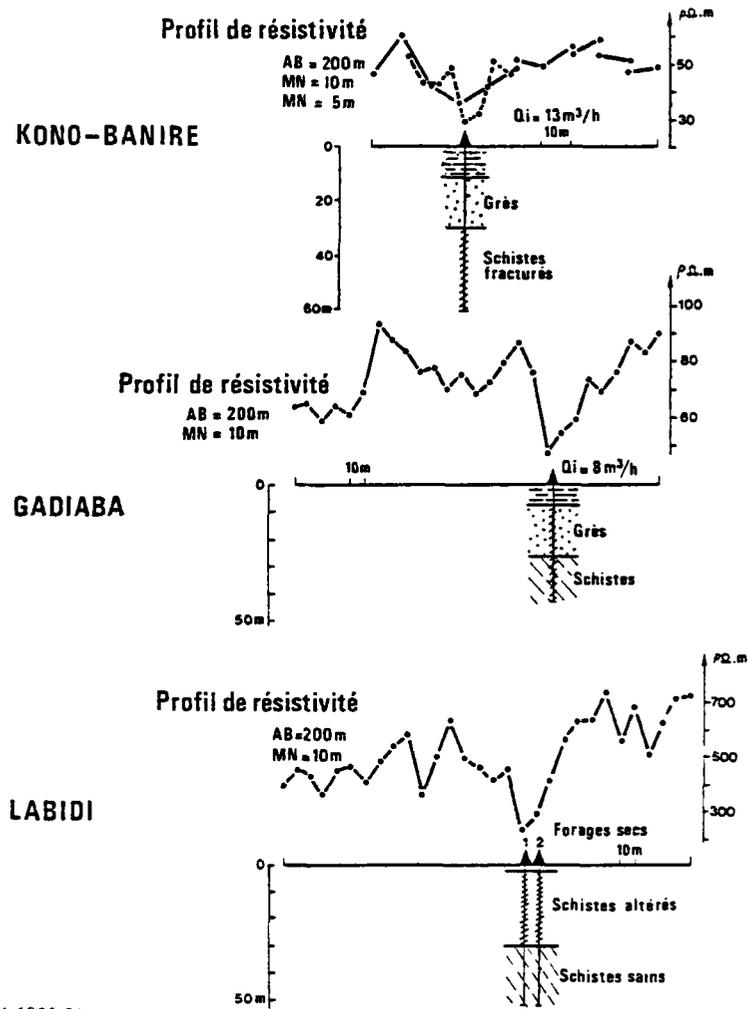
- une évolution plate traduisant une inactivité magnétique, donc une absence de masse doléritique ;
- une configuration également monotone mais présentant des anomalies magnétiques isolées révélatrices de la présence de petits filons ou de masses ponctuelles doléritiques ;
- des évolutions très perturbées comprenant de nombreuses anomalies magnétiques généralement ininterprétables d'une manière simple et traduisant la présence d'un batholite doléritique plus ou moins tectonisé.

Enfin, et en ce qui concerne les 183 forages effectués après implantations géophysiques et cela toutes méthodes de prospection et critères d'implantation confondus, le taux global de succès dans l'entreprise se monte à 54 % à l'échelle du projet.

Ce taux de réussite concernant les forages essentiellement implantés par méthode géophysique est comparable à celui obtenu sur d'autres projets dans des environnements hydrogéologiques comparables et dans les mêmes conditions d'exécution.

Il demeure toutefois vrai que la prospection géophysique est justifiée par le fait qu'elle majore d'environ 20 % le nombre de forages jugés positifs par rapport au nombre total de forages entrepris et souhaités par le cahier des charges.

L'économie ainsi réalisée couvre largement les frais de la prospection géophysique proprement dite.



BULL. B.R.G.M. (2) III, 4-1980-81

Figure 25 - Kono-Banière, Gadiaba, Labidi

Extrait du Bull. BRGM (2), III, 4, 1980-81

**PROSPECTION D'AQUIFERES PAR METHODES ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES  
DANS LES 1ère ET 2ème REGIONS DE LA REPUBLIQUE DU MALI**

par

Y. Dolle - juin 1985

Rapport BRGM (à paraître)

**PROSPECTION GEOPHYSIQUE**

**LE VOLUME DES TRAVAUX DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE EST LE  
SUIVANT :**

- 132 villages prospectés
- 419 sondages électriques réalisés
- 249 780 m de trainés électriques ont été entrepris
- 238 860 m de profils magnétiques effectués.

Les faibles précipitations sur la zone étudiée, ainsi que le type d'aquifère recherché (milieu aquifère discontinu et fissuré) ont conduit à entreprendre la prospection géophysique d'une manière systématique sur tous les sites.

**LE PROBLEME POSE A LA PROSPECTION GEOPHYSIQUE ETAIT :**

- de confirmer ou d'infirmier les conclusions de la photo-interprétation et notamment celles concernant la fracturation,
- de rechercher les zones de fractures ou de contacts dans les secteurs où la géologie de surface ne fournit pas d'indications.

**1 - Le levé de profil de la résistivité apparente par la méthode électrique du trainé est bien adapté à résoudre ce type de problème car :**

- les zones fracturées sont généralement plus conductrices que l'environnement non perturbé,
- la rapidité d'exécution des mesures permet l'investigation de larges zones par l'intermédiaire de profils relativement longs.

## EXEMPLE DE RECHERCHE D'AQUIFERES DE FRACTURE PAR LA TECHNIQUE DU TRAINÉ ELECTRIQUE AU MALI

### Etude des sites de Kono-Banière, Gadiaba et Labidi

Ces trois localités maliennes sont situées sur les schistes gréseux de la série de Naza, d'âge probablement précambrien.

Quatre sondages ont été implantés suite à des opérations de trainé électrique simple ou à répétition (fig. 25), chaque implantation correspondant à un minimum de résistivité apparente. Dans les quatre cas, l'anomalie conductrice est relativement étroite et bien contrastée, mais le minimum de résistivité révélé sur le site de Labidi se situe toutefois vers des valeurs élevées (300  $\Omega\text{m}$ ), alors que les autres minima oscillent autour de 30 à 40  $\Omega\text{m}$ . Au droit des localités de Kono-Banière et Gadiaba, les deux forages prévus sont positifs et disposent d'une bonne productivité dans les schistes et grès fracturés.

A Labidi, les deux sondages tentés sont restés secs dans des schistes altérés mais non fracturés.

Comment expliquer un tel échec sur ce site ?

La forme dissymétrique de l'anomalie conductrice pourrait corroborer une zone fracturée à fort pendage. Les sondages implantés pourraient donc se situer en amont pendage de la structure, ce qui expliquerait l'échec. Par ailleurs, la valeur relativement élevée de la résistivité apparente minimale à cet endroit semble également contribuer à l'échec enregistré.



**PROJET D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE USAID - FAC TOGO****3ème Phase****Travaux géophysiques d'implantation  
région des Savanes et des Plateaux****par****G. Chevalier-Lemire - octobre 1985**

32 villages ont été étudiés dans la région des Savanes et 82 dans la région des Plateaux.

Le substratum sain dans la région des Plateaux est toujours rencontré à faible profondeur sous un recouvrement variant entre 5 et 20 m d'épaisseur.

**BUT DES TRAVAUX**

Recherche des zones fissurées aquifères du substratum, la nappe liée au recouvrement altéré étant pratiquement inexistante.

Compte-tenu des difficultés d'implantation d'ouvrages antérieurs, l'association photogéologie-géophysique a été employée systématiquement dans cette région.

**METHODE GEOPHYSIQUE UTILISEE**

La prospection a été uniquement réalisée par la méthode électrique. Dans la région des plateaux, la réalisation préalable de sondages électriques d'étalonnage a été le plus souvent éliminée pour les raisons suivantes :

- nécessité impérative de réaliser les implantations rapidement pour suivre la cadence d'exécution des forages ;
- la région étudiée ayant fait l'objet de nombreux travaux géophysiques antérieurs et les conditions géologiques étant favorables (affleurements nombreux).

- Méthode employée

Rectangle de résistivité, à savoir profils de résistivité avec une ligne AB fixe, la configuration la plus utilisée étant le gradient (rectangle limité au profil central).

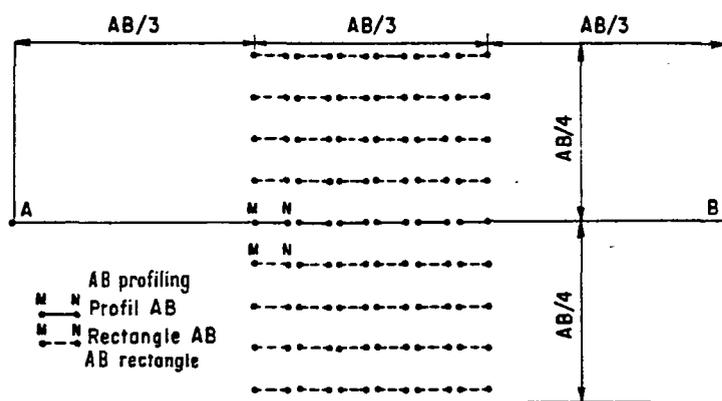


Figure 26 - Profil et rectangle AB

Cette méthode de profilage doit être comparée à celle du trainé simple. Un avantage théorique important est la suppression des à-coups relatifs aux prises AB pendant l'exécution d'un rectangle donné. Entre deux rectangles embrayés, l'à-coup de prise AB est parfaitement estimé par l'écart entre les résistivités apparentes mesurées en bout de dispositif et son influence est éliminée.

Un inconvénient théorique est que la profondeur d'investigation n'est pas rigoureusement constante le long du gradient : elle est plus faible dès que l'on s'éloigne du centre de AB, ce qui amène l'introduction de coefficients correcteurs pour les points de mesure les plus éloignés du quadripôle classique.

Cette correction n'a pas été appliquée dans le cadre de l'étude, l'interprétation étant ici uniquement qualitative.

**Il suffit simplement de se rappeler qu'une anomalie rencontrée en bordure de gradient présente une amplitude plus forte mais un niveau plus faible que si elle était rencontrée au centre du gradient.**

D'un point de vue pratique, le profilage avec une ligne AB fixe, présente de nombreux avantages par rapport au trainé simple :

- les électrodes d'injection AB étant implantées pour plusieurs mesures, on peut soigner les résistances de prise de manière à opérer avec un courant élevé et donc une tension  $V_{MN}$  élevée (mesure plus aisée, plus précise et possibilité de travailler avec des dipôles MN petits, ce qui augmente la précision du positionnement).
- Il est aisé de réaliser des profils parallèles destinés à vérifier l'extension latérale d'une anomalie, puisque la ligne d'injection est maintenue sur le profil principal.

#### - Interprétation des résultats

L'interprétation est uniquement qualitative. Elle repose sur les deux hypothèses suivantes :

- les zones de fissuration maximum du socle se trouvent à l'aplomb des zones d'anomalies conductrices repérées sur profil électrique.
- dans une zone fissurée donnée, la fissuration maximale se trouve à l'aplomb de l'axe conducteur défini par l'anomalie.

On définit ainsi 3 types d'anomalies :

- compartiment conducteur,
- contact,
- palier.

Les mesures électriques de surface ne permettent pas de définir le pendage éventuel d'une zone fissurée, ni de se prononcer de façon certaine sur la présence effective de fissures aquifères puisque leur repérage est indirect.

Les implantations de forage d'eau ont été jugées favorables, quand il y avait concordance entre les éléments suivants :

- résultats photogéologiques,
- aspect morphologique du terrain,
- résultats géophysiques.

**- Analyse critique des données**

Sur les 184 implantations réalisées dans la région des Plateaux, les trois types d'anomalies électriques rencontrées se répartissent ainsi :

Type d'anomalie	Nombre d'implantations	%
Compartiment Conducteur	101	55
Contact	49	27
Palier	11	6
Implantations abandonnées	23	12
<b>Total</b>	<b>184</b>	<b>100</b>

**Tableau 9 - Anomalies électriques rencontrées et leur statistique sommaire**

Les critères d'implantation conduiront par types d'anomalies à une implantation d'autant meilleure que :

**. Pour l'anomalie type compartiment conducteur**

- le contraste est élevé,
- la largeur de l'anomalie est au moins supérieure à la longueur MN,
- la conductance est élevée (valeurs des résistivités apparentes assez basses).

**. Pour l'anomalie type contact**

- le contraste est élevé,
- faible largeur de l'anomalie, mais jamais inférieure à la longueur MN,
- la conductance est élevée (basse résistivité apparente du palier bas).

**. Pour l'anomalie de type palier**

- la conductance du palier doit être assez élevée, donc sa résistivité apparente doit être assez basse.

## - Bilan de l'étude

Programme	Forages proposés	Forages réalisés	Forages équipés	Forages non équipés	Taux de succès par projet
Villageois	106	50	32	18	64 %
CEB	78	52	17	35	33 %
<b>Totaux</b>		<b>102</b>	<b>49</b>	<b>53</b>	
Taux de succès tous forages confondus			48 %	52 %	

Tableau 10 - Résultats globaux obtenus au 30 juin 1985 à partir de 102 forages réalisés

**CONCLUSIONS**

L'analyse critique des données géophysiques nous a montré que dans la plupart des cas nous ne pouvions vérifier la validité des hypothèses nécessaires avant toute analyse statistique de données, à savoir :

- homogénéité et isotropie globale du milieu,
- perpendicularités des profils sur les structures électriques.

Dans le cas présent et eu égard à la faible population de l'échantillonnage, toute analyse statistique devient illusoire.

Les faibles taux de succès rencontrés dans les formations étudiées ne pouvaient que justifier l'emploi systématique de la prospection électrique.

La figure 27 ci-après montre les étapes décisionnelles du raisonnement adopté conduisant à l'acceptation ou à l'abandon du site prospecté.

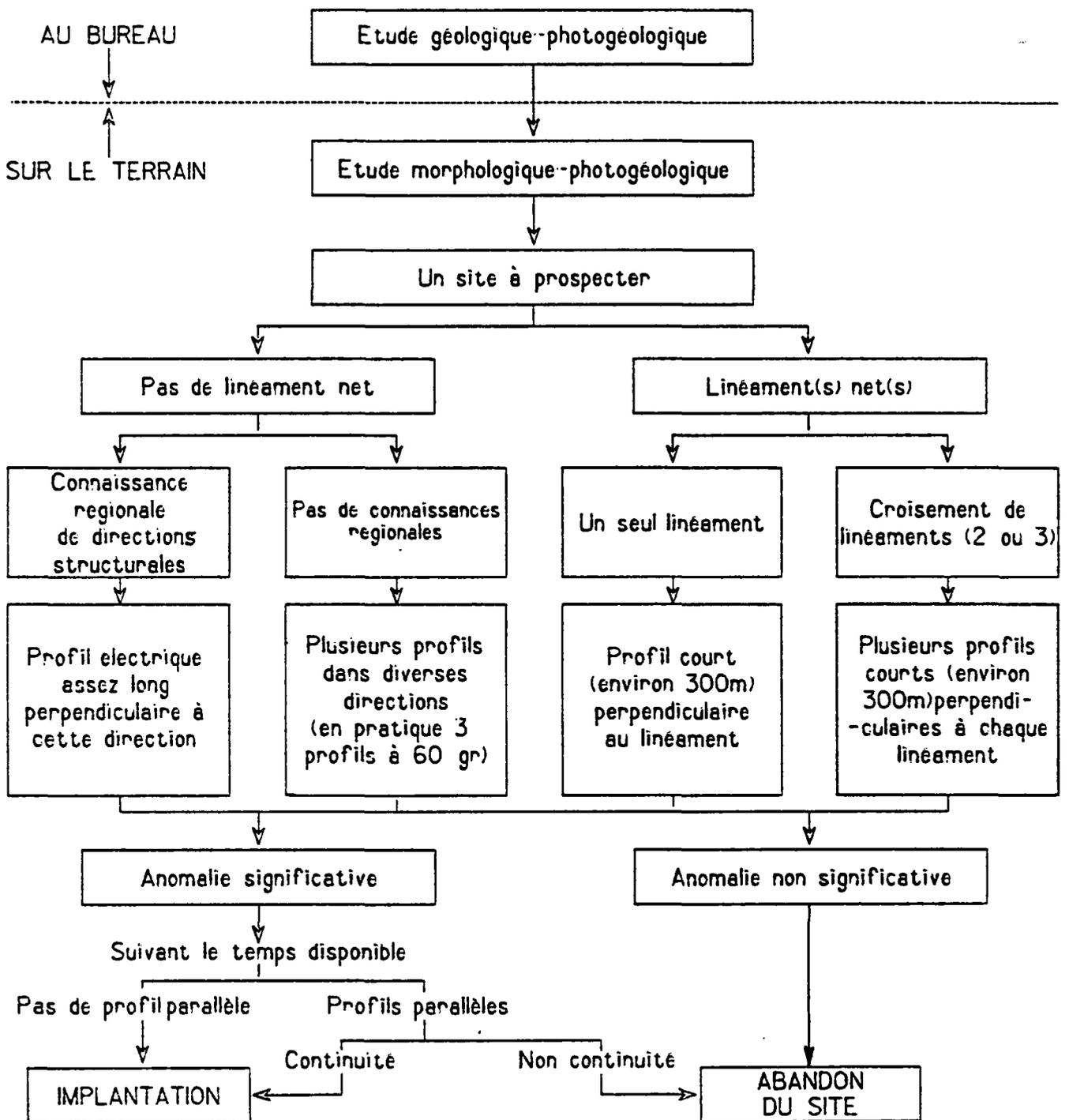


Figure 27 - Schéma logique conduisant à une implantation de forage ou à un abandon du site

**ETUDE GEOPHYSIQUE POUR L'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE  
DANS LA REGION DU NORD BORGOU  
(République populaire du Benin)**

par

**B. Madelaine - novembre 1985**

**Population :** 75 forages répartis dans 72 villages.

**Méthode de prospection :** Electriques et électromagnétiques (sondages électriques, trainés et VLF).

**Objectifs :**

- Recherche de zones fracturées dans le socle.
- Recherche dans des formations argilo-gréseuses ou gréseuses.
- Recherche d'un approfondissement de l'altération du socle.

**Travaux réalisés :**

- 75 sites étudiés,
- 74 sondages électriques,
- 50 000 m de trainé électrique,
- 2 460 m de mesures de gradient,
- 2 800 m de profil VLF.

**RECHERCHE DE ZONES FRACTUREES DANS LE SOCLE**

Cette recherche intéresse le plus grand nombre de sites, à savoir 63 sur 75.

**- Technique de mise en oeuvre :**

- . exécution d'un sondage électrique dans le cas où l'altération est peu ou mal connue (à l'exception de 5 villages où les résultats antérieurs ont permis une implantation directe).
- . réalisation d'un ou plusieurs profils de résistivité en dispositif trainé ou gradient moyen en adaptant la longueur de ligne d'injection de manière à mesurer des résistivités apparentes le long de la branche ascendante à 45° du sondage électrique.
- . des profil d'électromagnétisme VLF ont été réalisés en début de campagne, mais cette méthode a été abandonnée par la suite en raison de la faiblesse du signal émetteur transmis et rendant la mesure peu fiable.

## **FORMATION DE BORDURE DES GRES DE KANDI ET GRES DE KANDI PROPREMENT DITS**

Aucune stratégie générale n'a pu être mise au point. Chaque village constitue un cas particulier.

La zone de contact des grès de KANDI s'est révélée comme être une zone à taux de réussite très élevé.

Toutefois :

- un forage réalisé sur une anomalie bien conductrice s'est révélé négatif,
- un forage s'est révélé positif à l'intérieur d'une zone plus conductrice dans un milieu électrique où tous les ouvrages implantés antérieurement s'étaient révélés négatifs.

### **ZONE D'ALTERATION DE SOCLE**

En règle générale, un forage réalisé sur une altération de socle de l'ordre de 30 m, donne un débit suffisant.

### **ETUDE STATISTIQUE DES ANOMALIES RENCONTREES**

Les anomalies ayant toujours été mesurées par des profils uniques pour des raisons de délai d'exécution, il n'est jamais certain que ces profils soient perpendiculaires aux structures sources.

Dans ces conditions, les valeurs attribuées à ces paramètres peuvent être entachées d'erreurs non négligeables.

**On constate cependant que :**

- au-delà d'un contraste d'anomalie de 2,2, les forages sont positifs à une exception près (350 l/h).
- En-deçà d'un minimum d'anomalies de 60  $\Omega$ m, les forages sont positifs à une exception près (0,1 l/h).

Ces tranches favorables ne correspondent malheureusement pas à un nombre important d'anomalies. Ces résultats ne doivent donc pas être considérés comme représentatifs de la zone prospectée.

- Certaines formes d'anomalies (U et W) donnent un taux de réussite sensiblement supérieur à la moyenne. La forme de l'anomalie, en dehors de tout élément quantitatif, est le critère le moins influencé par une mauvaise orientation du profil.

## CONCLUSION

Cette campagne de géophysique a permis l'implantation de 67 forages productifs pour 100 exécutés.

Une étude statistique de la forme des résistivités semble indiquer, réserve faite sur la faible proportion de sites étudiés, que les anomalies révélatrices d'une zone productrice sont plutôt de forme arrondie (U) ou doubles en forme de W.

Il reste toutefois préférable d'exécuter la campagne géophysique conjointement aux forages, ceci offrant beaucoup d'avantages malgré la difficulté d'organisation, car :

- il y a alors possibilité de modifier rapidement un programme en fonction des résultats inattendus obtenus par forage,
- le résultat du forage permet au géophysicien d'adapter la méthode immédiatement,
- les échecs peuvent être traités rapidement à condition toutefois, que les distances entre sites ne soient pas trop importantes.

Il reste que la contrainte majeure à une productivité accrue, est représentée par l'obligation de trouver l'eau à moins de 200 m du village.



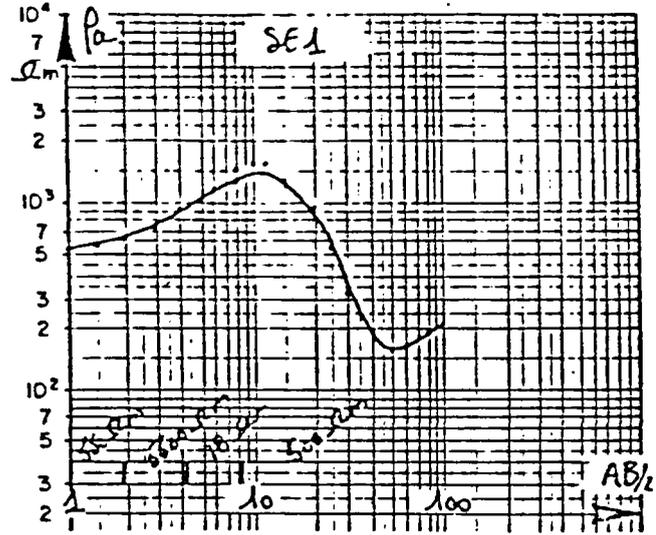
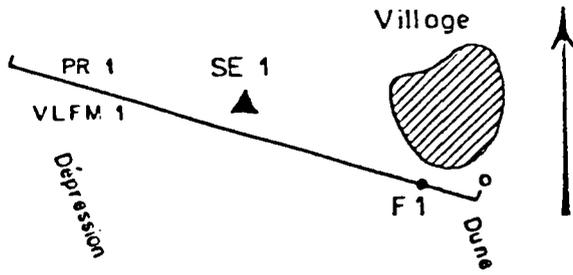
**EXEMPLE D'ASSOCIATION METHODE ELECTRIQUE  
ET METHODE ELECTROMAGNETIQUE**

- Sondage électrique
- Profil de résistivité par trainé simple
- VLF mode inclinaison

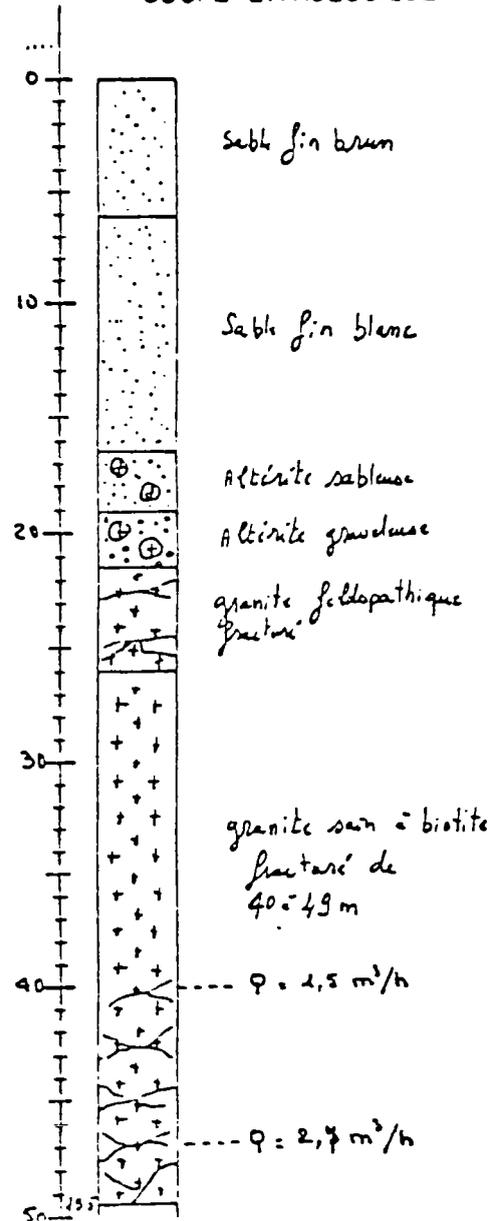
**Socle granitique. Garin Serki Foulani (Niger) (fig. 28)**

A Garin Serki Foulani, une reconnaissance VLF-EM, le long d'un profil, a mis en évidence une zone conductrice qui a été confirmée par un profil de résistivité en AB = 200 m. Le forage implanté près du village a traversé du granite fracturé sous les altérites de 21 à 26 m mais surtout entre 40 et 49,5 m d'où provient la plus grosse partie du débit estimé à 3 m<sup>3</sup>/h.

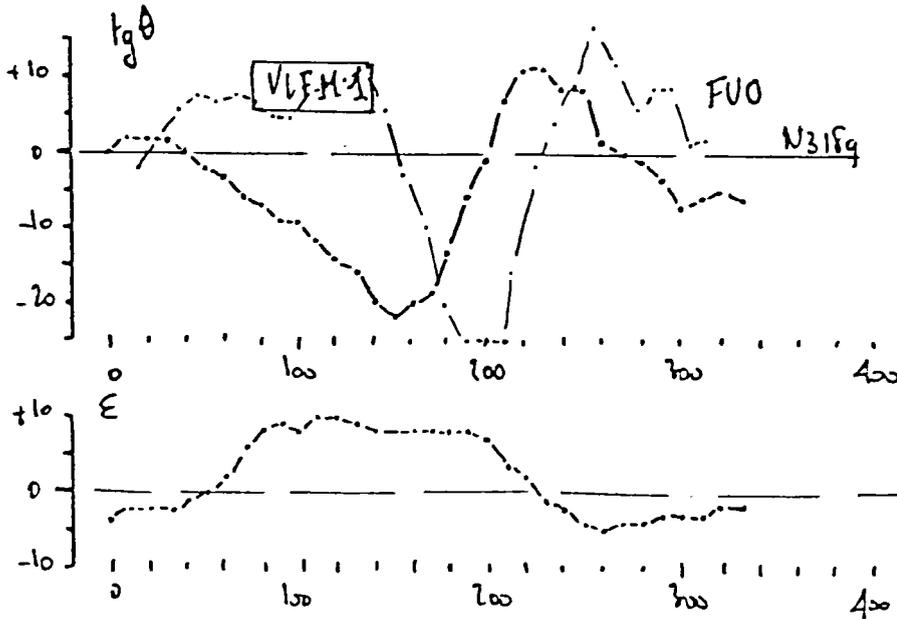
PLAN DE SITUATION  
ECHELLE : 1/5000



COUPE LITHOLOGIQUE



PROFIL V.L.F.



PROFIL DE RESISTIVITE

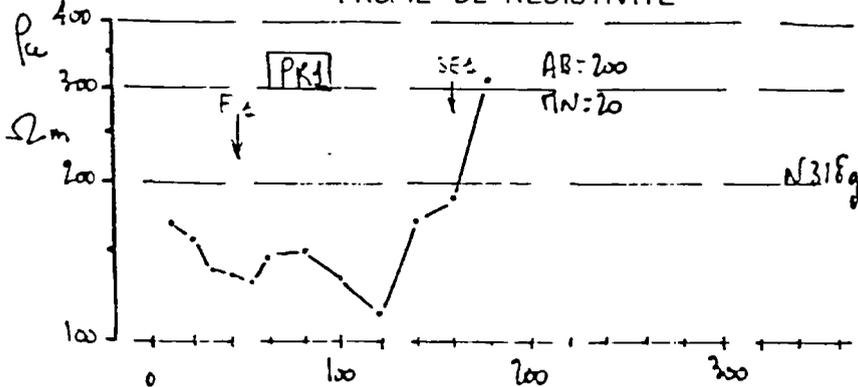


Figure 28 - Site de Garin Serki Foulani (Niger)

### **EXEMPLE D'ASSOCIATION DE METHODES ELECTRIQUES ET ELECTROMAGNETIQUES**

- Profil électrique par trainé
- VLF inclinaison
- MAX-MIN mode MAX (HLEM)

#### **Précambrien C. Région de Rapadama (Burkina Faso) (fig. 29)**

Sur cette zone d'essais, diverses méthodes géophysiques ont été mises en oeuvre : profils de résistivité, VLF, et Max-Min. Des tests ont été menés pour déterminer en Max-Min la meilleure distance émetteur-récepteur et les fréquences compte tenu de la couverture d'altérites. La distance de 25 m était trop faible pour les objectifs fixés, par contre la distance 50 m a fourni des résultats plus satisfaisants que celle de 100 m.

Les fréquences retenues sont les deux plus hautes, 3555 et 1777 Hz. Pour les fréquences plus basses, on note un écrasement des anomalies et même leur disparition.

Deux exemples sont présentés sur la figure 29. On remarquera que chacune des méthodes utilisées présente une anomalie, parfois importante, mais se pose le problème de l'implantation du forage par rapport à l'anomalie, bien illustré par l'exemple de la figure de gauche, où trois forages espacés de 5 m ont été exécutés. Le pas de mesure de 20 m en profil de résistivité fournit une anomalie relativement large. Elle apparaît déjà plus étroite selon les profils VLF et Max-Min où le pas de mesure est de 10 m. La profondeur des puits est de 40 m avec environ 20 m d'altérations. Le niveau d'eau était à 28 m.

Situation de l'étude

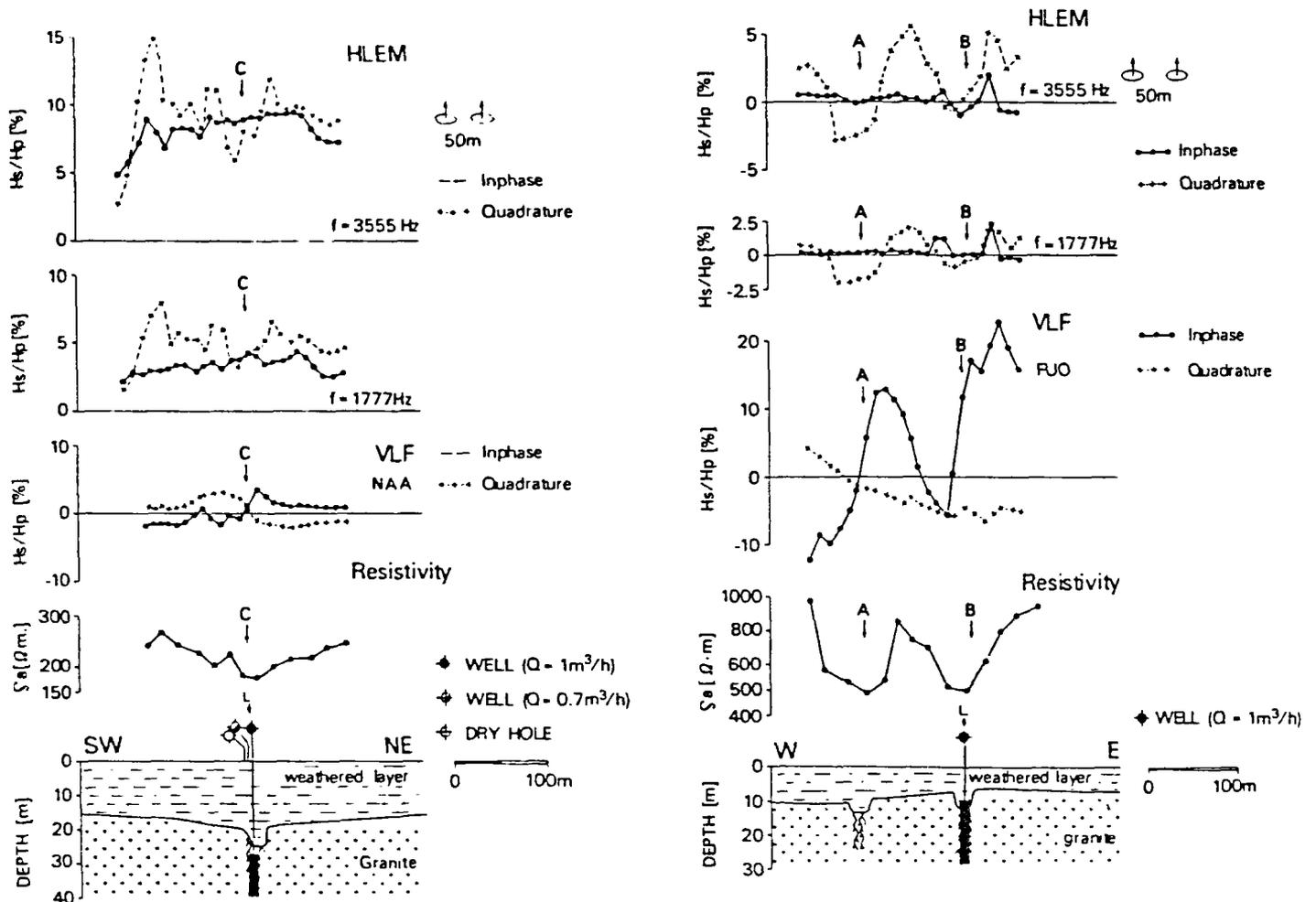
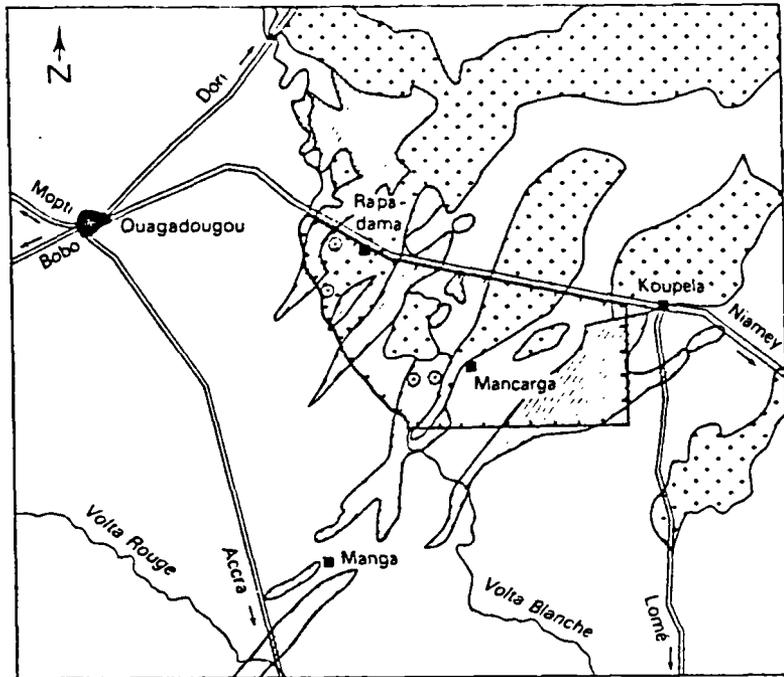


Figure 29 - Burkina Faso - Site expérimental de Rapadama  
 Extrait de : "Electromagnetic prospecting for Groundwater" par G.J. Palacky, J.L. Ritsema et S.J. De Jong

**EXEMPLES D'ASSOCIATION DE METHODES ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES**

- Profilage électrique
- Magnétisme

Transvaal et Orange (Afrique du Sud) (fig. 30)

Les chances de trouver des eaux souterraines dans les formations de Karoo sont faibles, spécialement lorsque ces formations sont argileuses sauf dans les zones indurées au contact avec des dykes de dolérites. Les limites de ces dykes sous le recouvrement sont recherchées par méthode magnétique. Différents exemples où sont combinées méthodes magnétiques et électriques sont présentés sur la figure 30.

GEOLOGICAL SECTIONS AND GEOPHYSICAL ANOMALIES ACROSS DOLERITE DYKES IN THE ODENDAALSRSUS AREA

C.S.T. - Constant separation traverse.  
 E.S. - Electrode separation  
 C<sub>1</sub>C<sub>2</sub> - Distance between current electrodes  
 P<sub>1</sub>P<sub>2</sub> - Distance between potential electrodes

$\Delta Z$  - Vertical magnetic anomaly ( $\Delta Z$ )  
 $\Delta H$  - Horizontal magnetic anomaly ( $\Delta H$ )  
 ↓ - Peak of  $\Delta Z$   
 I - Current

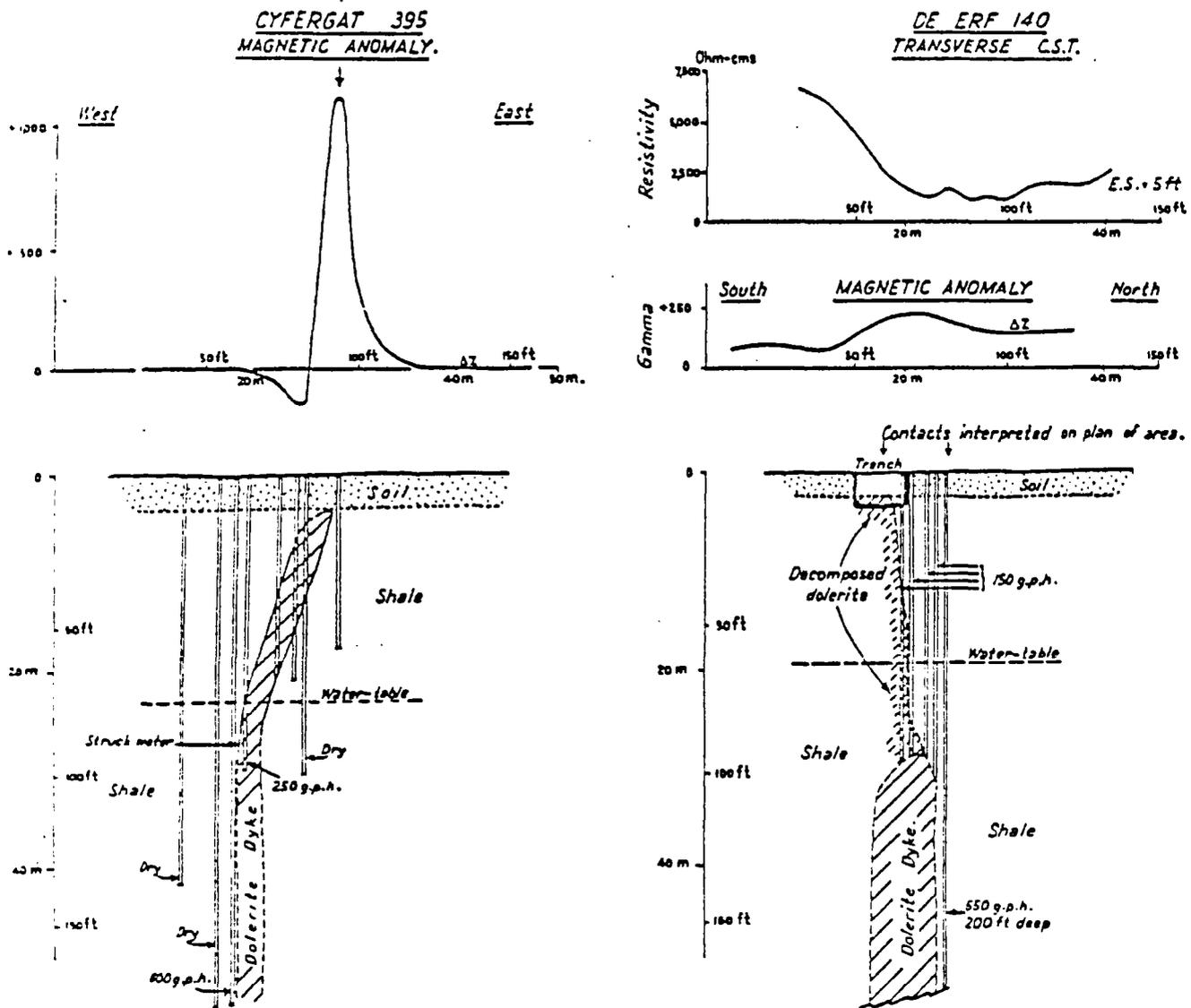
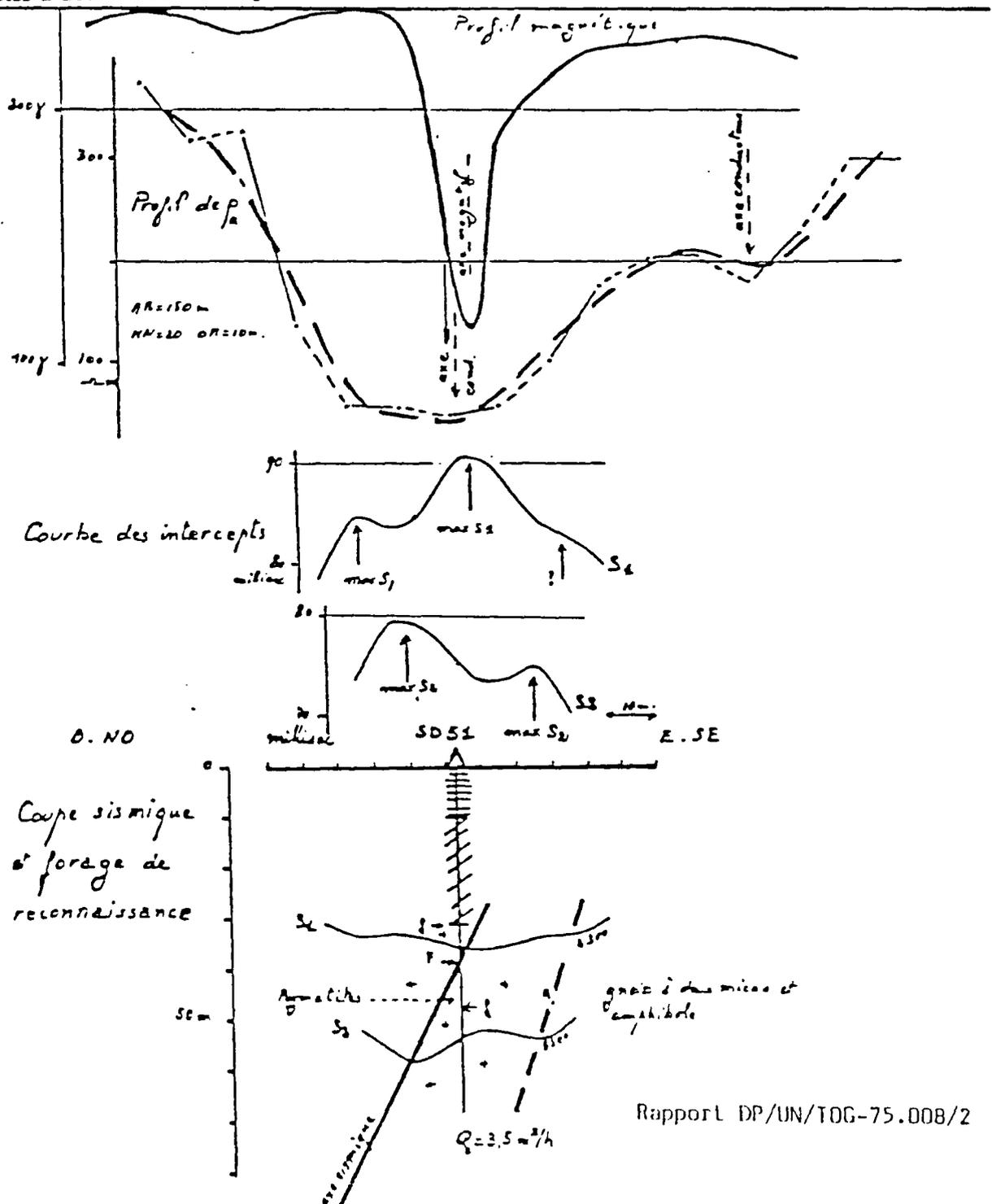


Figure 30

Akpaka (Togo) (fig. 31)

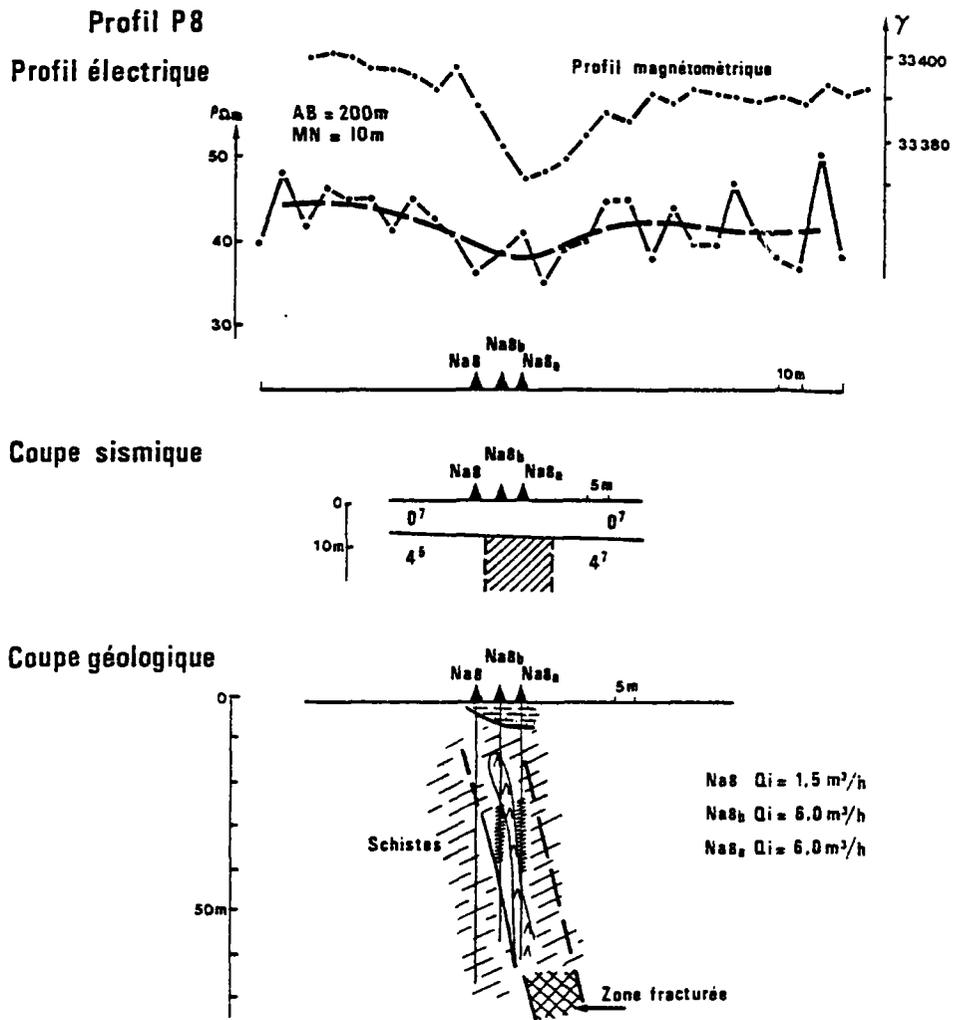
Ici, des dykes de roches vertes viennent recouper les formations anciennes et leur mise en place crée dans l'encaissant des fissurations et fracturations.

Une nette anomalie magnétique de près de 100 gammas a été mise en évidence à Akpaka au centre d'une anomalie conductrice et correspondant aussi à des anomalies sismiques. Le forage implanté sur ces anomalies est productif dans des gneiss à deux micas et amphibole.



Rapport DP/UN/TOG-75.008/2

Figure 31 - Site d'Akpaka (Togo)



BULL. B.R.G.M. (2) III, 4-1980-81

Figure 32 - Nara - Profil P8

### Exemple de fractures associées à des dykes de dolérite : site de Nara au Mali

Pour différencier des structures de type intrusif basique ou ultra-basique, la prospection magnétique a été également utilisée sur le site de Nara au Mali (fig. 32).

A cet endroit, une zone fracturée, siège d'une intrusion doléritique mince a été repérée par l'association des méthodes électriques et magnétiques d'une part, mais aussi timidement révélée par la méthode sismique réfraction.

Ainsi on observe :

- une anomalie électrique peu contrastée en mesure brute, au demeurant, mais acceptable tout de même après filtrage, bien que l'amplitude reste faible ;
- un compartiment sismique qualifiable de "lent" ;
- une anomalie magnétique malheureusement de faible amplitude (20 gammas).

Deux forages implantés sur les flancs opposés de l'intrusion ont donné des débits acceptables (6 m<sup>3</sup>/h en débit "instantané"), tandis que le troisième ouvrage déjà éloigné d'une vingtaine de mètres de l'axe de la structure n'a donné que 1,5 m<sup>3</sup>/h à la foration.

La zone fracturée associée à l'inclusion doléritique s'est avérée extrêmement étroite mais son repérage est demeuré possible par la concordance des réactions du milieu discontinu aux trois méthodes de prospection utilisées. Il est bien évident qu'un tel site eût été écarté, a priori, si la technique de prospection électrique avait seule été utilisée, surtout au regard de la faible amplitude et du contraste médiocre de l'anomalie individualisée.



**EXEMPLES D'ASSOCIATIONS DES METHODES ELECTRIQUES  
ET DE SISMIQUE REFRACTION**

Dans les exemples qui vont suivre et localisés à l'intérieur du Sahel malien où le recouvrement sableux, souvent important, atténue ou masque les linéaments a priori observables sur photo-aériennes, la géophysique a fait l'objet d'une programmation dès la première phase des travaux d'aménagement. Les zones fracturées du sous-sol ont été reconnues par les anomalies physiques tant électriques que sismiques qu'elles induisent dans le milieu souterrain. La plupart des tests méthodologiques associant les techniques électriques en courant continu et la sismique-réfraction ont pu être réalisés à l'occasion du Projet des Nations Unies "Recherche et mise en valeur des eaux souterraines au Mali" (n° 76 004).

Les formations étudiées au Mali sont principalement constituées de grès et grès quartzites, de schistes pélitiques ou argileux, et de rares niveaux calcaréo-dolomitiques et de jaspes.

Cette série épaisse de plusieurs centaines de mètres est attribuable au Précambrien. Localement, de nombreuses inclusions doléritiques se sont intradisposées dans la série sous forme de dykes, sills ou batholites.

En ce qui concerne les résultats obtenus, différents types d'aquifères sièges de fracturations à des degrés divers ont été mis en évidence.

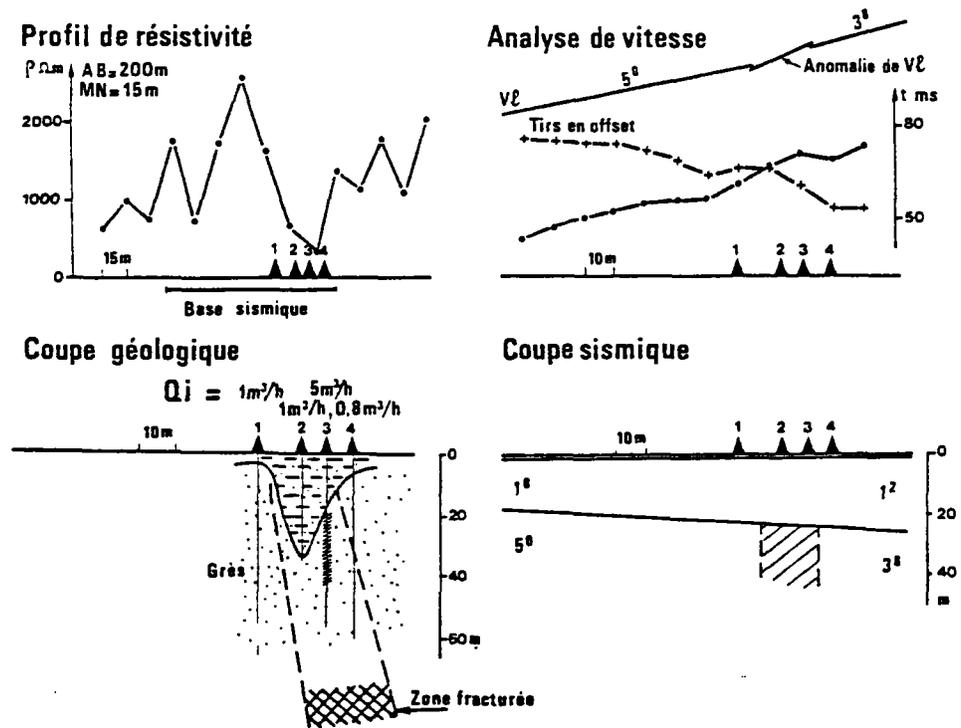
Les principales discontinuités géologiques engendrées par une activité tectonique a posteriori sont finalement de trois sortes :

- fractures au sein des formations gréseuses et schisteuses ;
- fracturation résultat d'une dynamique de type intrusif comme par exemple immixtion de corps basiques (dolérites essentiellement) ;
- contacts anormaux par accidents cassants du type faille, au sein de matériaux compétents, à très compétents.

## **1 - ETUDE DE FRACTURES DANS LES GRES ET SCHISTES**

### **a - Site de Tikoura**

Au droit d'un linéament repérable au sol par la végétation, la prospection géophysique a détecté une anomalie conductrice par trainé électrique et une anomalie de vitesse longitudinale par sismique réfraction intéressant un compartiment étroit au toit du marqueur sismique profond (fig. 33).



BULL. B.R.G.M. (2) III, 4-1980-81

Figure 33 - Tikoura

L'analyse de vitesse et la construction de la coupe sismique indiquent une largeur de la zone fracturée de l'ordre de 20 m.

Quatre forages de reconnaissance ont été tentés au droit du sous-sol fracturé :

- le premier forage situé en bordure du contact sismique a donné un très faible débit ;
- le deuxième ouvrage implanté dans le compartiment lent, mais ayant traversé des altérations argileuses en tête des fractures sur 34 mètres, a donné un résultat équivalent au premier ;
- le troisième captage, à seulement 7,50 m du précédent et toujours dans le compartiment sismiquement lent, a rencontré des horizons très altérés et fracturés pour délivrer 5 m<sup>3</sup>/h.
- Enfin, le quatrième sondage implanté en limite de fracturation et en dehors du compartiment lent, s'est révélé très peu productif avec un débit instantané de l'ordre de 800 l/h.

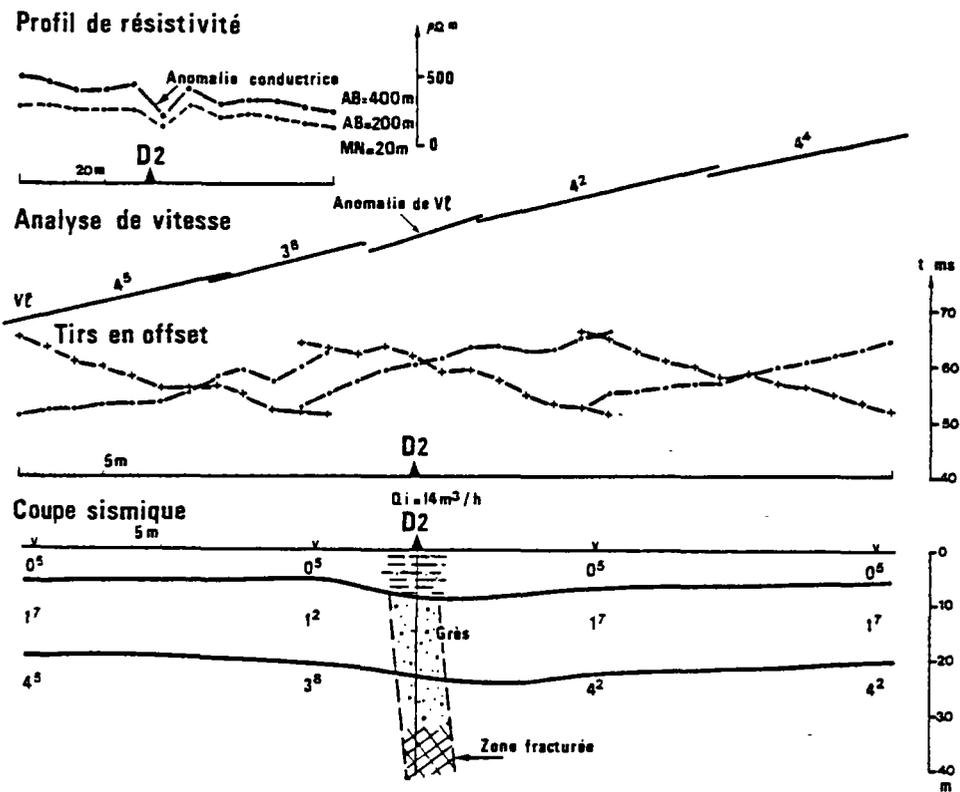
Dans cet exemple, ce que l'on peut retenir est constitué par le fait que le noyau argilo-sableux disposé en tête de fracture semble responsable de l'anomalie conductrice d'une part, et que d'autre part l'intérêt de la méthode par sismique réfraction (quand le projet le permet) est démontré ici d'autant plus que l'anomalie sismique de vitesse longitudinale se situe au droit du sondage le plus productif.

**b - Site de Douentza (fig. 34)**

Un forage très productif ( $14 \text{ m}^3/\text{h}$ ) capte une zone fracturée dans les grès de Bandiagara.

Le choix de l'emplacement du forage a été déterminé par la **présence conjuguée** d'une anomalie conductrice étroite et contrastée (révélée par deux trainés électriques en AB 400 et AB 200 pour MN 20) et d'une anomalie de vitesse longitudinale bien tranchée correspondant à un compartiment fracturé relativement étroit (une dizaine de mètres).

Cet environnement géophysique correspond comme à Tikoura à une zone fracturée et productrice dans les grès dont le remplissage, jusqu'à une trentaine de mètres de profondeur, est constitué de sables et de graviers quartzeux. Le sondage productif a été exactement centré sur l'anomalie sismique repérée, cette dernière semblant par ailleurs être le prolongement d'une fracture visible sur photo-aérienne.



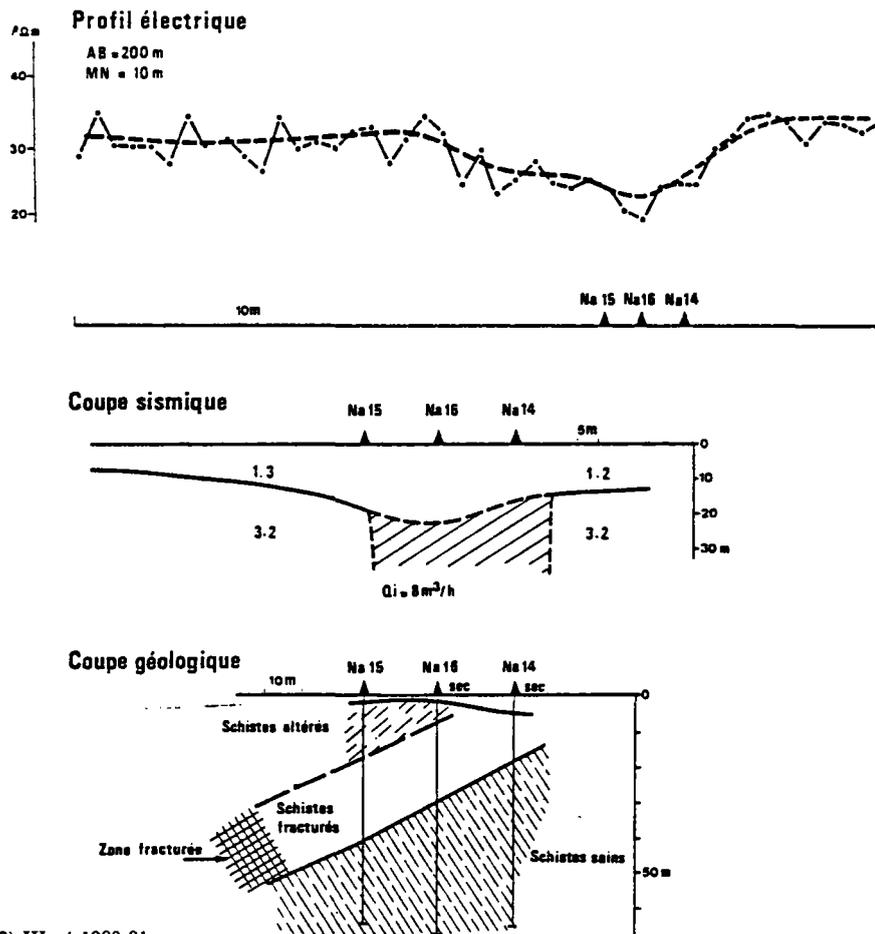
**Figure 34 - Douentza**

**c - Site de Nara (fig. 35)**

Cet exemple illustre parfaitement le cas d'une fracture ou d'un réseau de fractures inclinées.

Trois sondages de reconnaissance ont été réalisés au droit d'une anomalie conductrice de faible amplitude (une dizaine d'Ohm.m) et légèrement dissymétrique mais confirmée par un passage sismique lent relativement large.

Le seul forage productif est celui situé en aval-pendage et il est fort probable que l'apex de la zone fracturée soit colmaté par des produits d'altération, là où justement furent implantés les deux autres sondages de reconnaissance.



**Figure 35 - Nara - Profil P5**

## 2 - ETUDE DE FRACTURES ASSOCIEES A DES INTRUSIONS DOLERITIQUES

### a - Site de Damba-Tcharkitara (fig. 36)

Ce site se localise dans un massif dunaire à végétation clairsemée et où aucun linéament n'est visible par photo-aériennes.

Le profilage électrique en AB 200 et MN 10, laisse apparaître une anomalie conductrice de type contact avec un important contraste dans les résistivités apparentes.

Par ailleurs, la sismique-réfraction fait apparaître une très nette variation des vitesses longitudinales au droit de la décroissance brusque des résistivités apparentes.

Sur les trois forages réalisés à cet endroit, seul celui implanté exactement sur le contact schistes-intrusion doléritique fournit une productivité acceptable. Les deux autres sondages implantés au droit du corps doléritique produisent peu à très peu (0,8 à 0,4 m<sup>3</sup>/h) ce qui semble révéler une intrusion pratiquement stérile.

Ainsi, si l'anomalie électrique contribue à découvrir la structure favorable, c'est l'anomalie sismique qui définit avec la meilleure précision le critère décisif d'implantation du forage, ce dernier étant dans le cas présent le contact encaissant-intrusion doléritique.

### b - Site de Dinkoulou (fig. 36)

Voici un autre exemple d'intrusion doléritique stérile dans un environnement schisteux, surmontée par un noyau d'argile d'altération.

Sur ce site, une anomalie conductrice bien contrastée est associée à une discontinuité de vitesse, ainsi qu'à des retards sismiques caractéristiques de la présence d'un noyau d'argile d'altération.

La structure intrusive apparaît relativement large sur la coupe sismique (de l'ordre de 50 m) et seul le forage implanté sur le flanc est, au droit du contact schistes-dolérite, s'avère productif avec un débit acceptable.

Dans cet exemple, le compartiment sismique "lent" se localise exactement au droit de la zone fracturée, i.e. du contact précis entre schistes et dolérite, alors que la prospection électrique laissait observer un minimum conducteur au droit de l'inclusion doléritique.

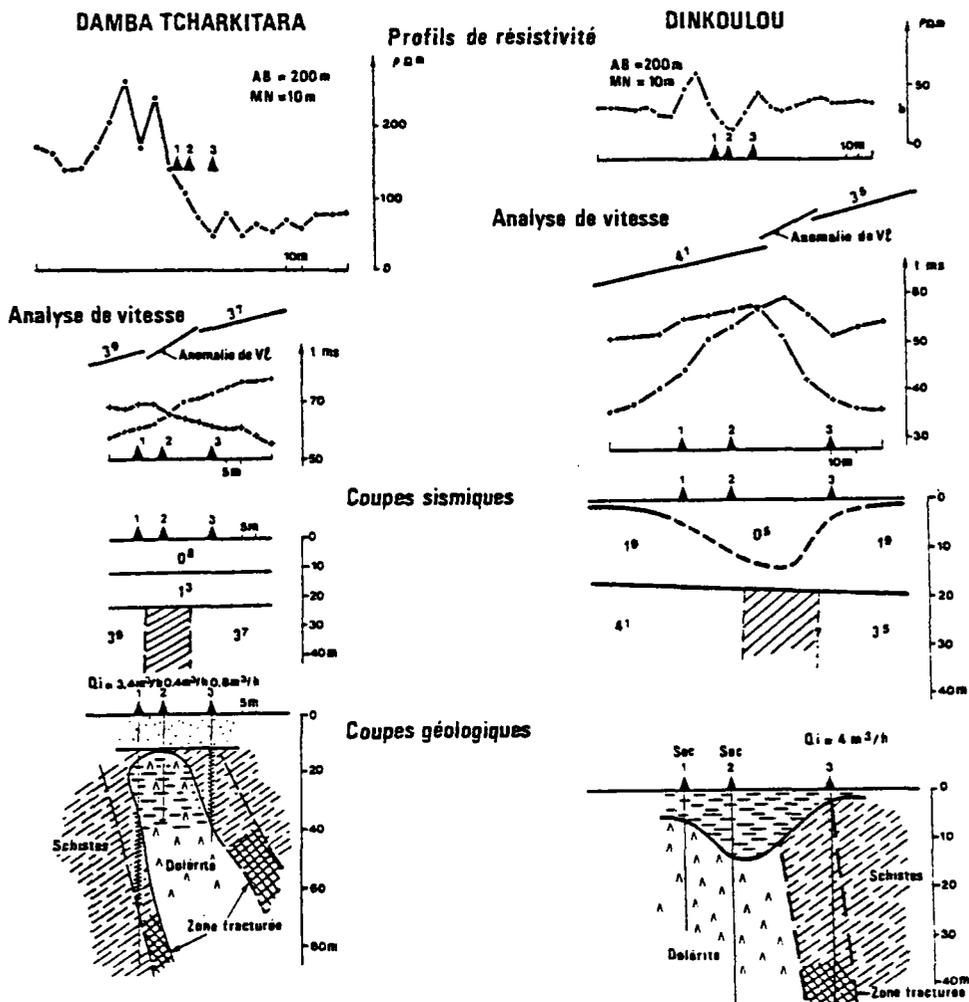


Figure 36 - Damba Tcharkitara - Dinkoulou

BULL. B.R.G.M. (2) III, 4-1980-81

### c - Le site de Koutiala (fig. 37)

La structure aquifère découverte à Koutiala correspond à une intrusion doléritique profonde sous recouvrement argileux épais (30 m) dont aucun indice sur photo-aérienne ne révèle l'existence.

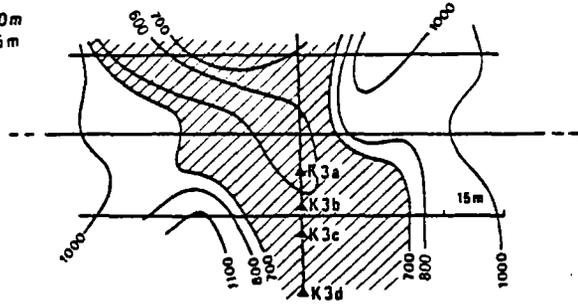
Comme le montreront trois des quatre sondages de reconnaissance effectués, cette structure est également stérile à cet endroit.

L'anomalie électrique reportée sur la carte de résistivité apparente s'avère peu caractéristique en contraste et la valeur minimale de résistivité reste élevée (600  $\Omega$ m).

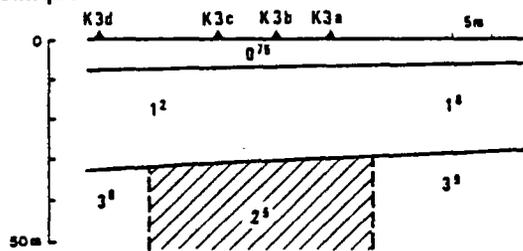
Par contre, le dyke correspond à un environnement sismique lent. Ainsi c'est le dernier forage, implanté exactement au droit du contact entre les grès et le corps basique, qui s'est révélé productif et de surcroît avec un excellent débit instantané, ce qui permet d'envisager une exploitation à environ 30 m<sup>3</sup>/h.

Carte de résistivité apparente

AB = 300m  
MN = 15m



Coupe sismique



Coupe géologique

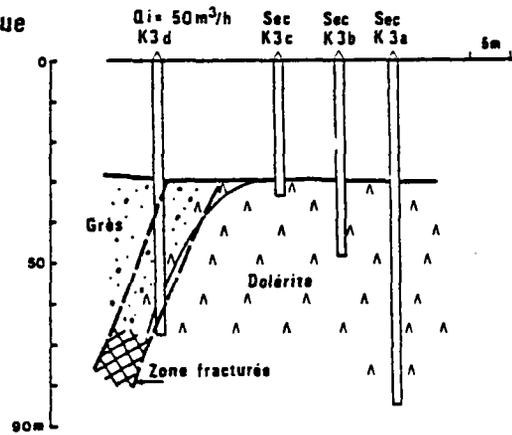


Figure 37 - Koutiala

### 3 - ETUDE DE STRUCTURES FAILLEES COMPLEXES

Les études réalisées sur les sites de Kolokani, Ségué et de la piste de Falou révèlent des anomalies électriques de type contact anormal par faille associées ou non à des interstratifications de corps doléritiques plus ou moins altérés ou étendus.

Dans le premier endroit, le contact électrique est associé à un compartiment sismiquement lent, ou à un changement de vitesse du marqueur sismique. A Ségué, la reconnaissance sismique ne fut réalisée qu'a posteriori et elle a permis de constater la présence d'un compartiment lent au droit des forages productifs.

Un autre cas de figure a été rencontré sur la piste de Falou où conjointement à une large anomalie conductrice indiquant la présence d'un contact géologique, l'étude sismique révèle une diminution des vitesses du socle le long du profil et par là même, traduit l'existence de deux compartiments lents.

#### a - Le site de Kolokani (fig. 38)

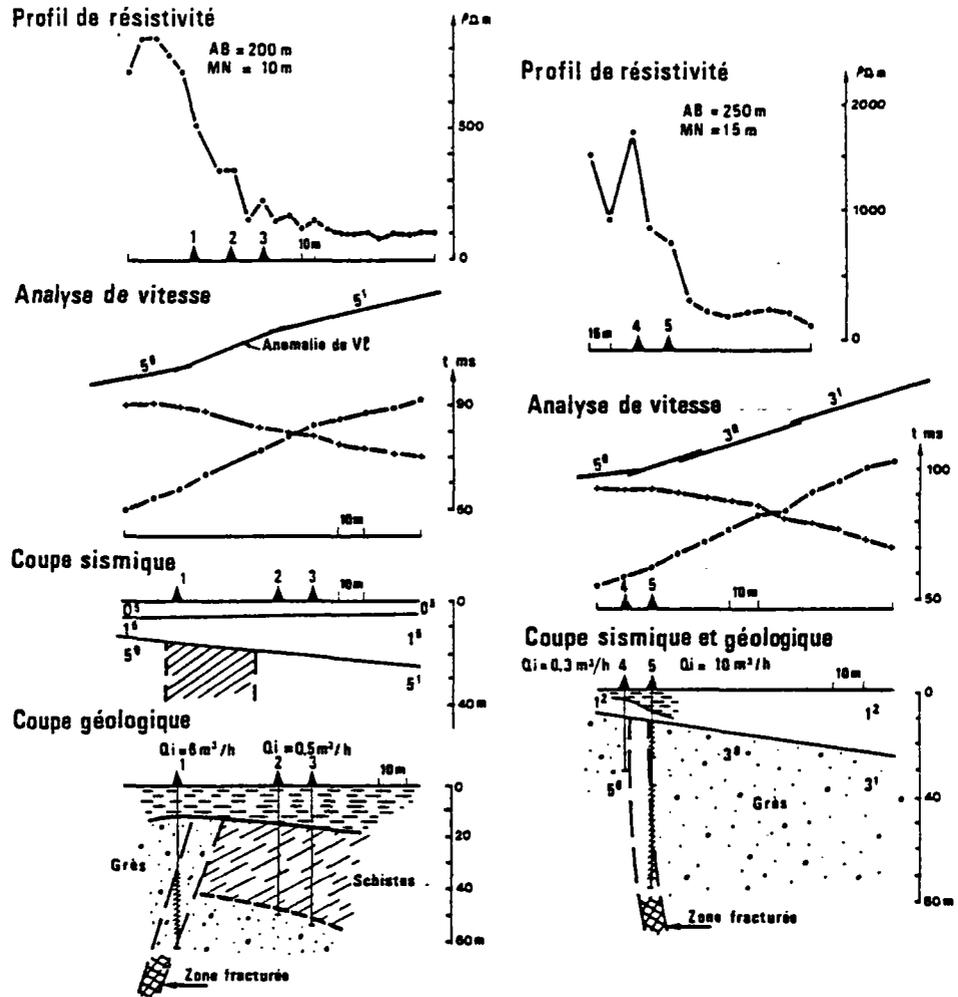
Deux zones ont été étudiées ici et sur un même contact géologique découvert par la méthode électrique, sans qu'aucun indice par photo-interprétation ne permette d'orienter a priori la prospection.

L'anomalie électrique de type "contact électrique" révèle la présence de deux compartiments de résistivités très différentes et dont le contraste est élevé (1 à 8).

Le premier forage implanté très précisément au droit du contact grès ou grès-quartzites avec des schistes pélitiques s'est avéré productif à raison d'un débit instantané de l'ordre de 6 m<sup>3</sup>/h. Dans ce cas, l'anomalie électrique est en excellente corrélation avec la discontinuité sismique à faible vitesse longitudinale.

Pour les deux autres forages, déjà plus éloignés de la zone fracturée, et donc du contact géologique anormal, les débits n'atteignent malheureusement que quelques centaines de litres par heure.

Les quatrième et cinquième forages également implantés pour partie sur anomalie électrique mais aussi sur anomalie sismique réfraction indiquant un changement de vitesse, se sont révélés respectivement quasi-sec (300 l/h) à très intéressant (10 m<sup>3</sup>/h). Dans ce cadre, il n'a pas été possible d'identifier la présence d'un compartiment sismiquement lent. A noter tout de même que le quatrième forage



BULL. B.R.G.M. (2) III, 4-1980-81

Figure 38 - Kolokani

(le moins productif) est implanté sur un marqueur qualifiable de rapide (5 000 m/s), tandis que le dernier sondage, distant seulement de 10 m du précédent est installé dans des grès fracturés bien moins rapides sismiquement (3 000 m/s).

**b - Site de Ségué (fig. 39)**

Nous sommes ici dans le même contexte géophysique que celui observé plus haut à Kolokani. Toutefois la structure mise en évidence par contact électrique correspond à la présence d'un batholite doléritique profond, qu'il fut par ailleurs impossible de localiser par photo-aérienne classique.

Une fois de plus, les forages positifs sont distribués sur une zone aquifère située sur le flanc du corps intrusif et à proximité du contact grès-dolérite. Tandis que deux autres sondages de reconnaissance implantés au droit de l'intrusion basique se sont révélés improductifs.

**c - Zone située près de la piste de Falou (fig. 40)**

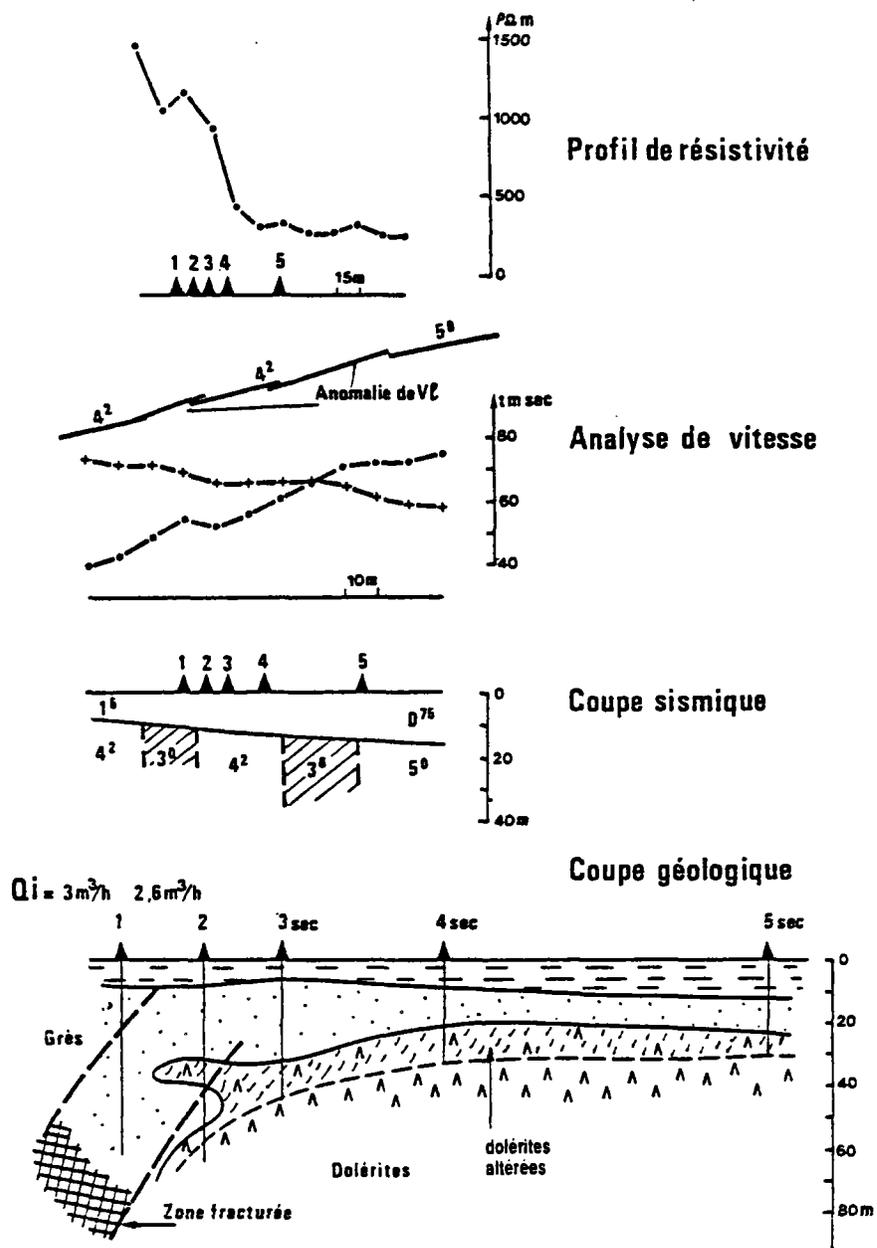
Ici, un batholite profond de nature doléritique est interstratifié dans les schistes, l'ensemble de la structure se disposant sous un recouvrement sableux relativement épais.

Le profil de résistivité en AB 200 et MN 20 obtenu par trainé à répétition laisse découvrir une large anomalie conductrice assez bien contrastée et révélatrice d'un contact géologique anormal.

Conjointement, l'étude sismique (analyse de vitesse) et la coupe sismique qui s'ensuit, indique une diminution des vitesses du socle le long du cheminement choisi et l'existence associée de deux compartiments lents. Six sondages de reconnaissance ont été réalisés dans cette région et la moitié seulement s'est avérée intéressante d'un point de vue productivité.

Cela tient au fait que les trois premiers sondages, bien qu'ayant traversé des schistes fracturés installés sur le corps doléritique, n'ont malheureusement pas rencontré le niveau hydrostatique établi dans les dolérites à 45 m de profondeur.

Les autres captages disposés sur le flanc de la structure à l'aplomb pratiquement minimum des résistivités apparentes se sont avérés producteurs à des débits voisins du m<sup>3</sup>/h.



BULL. B.R.G.M. (2) III, 4-1980-81

Figure 39 - Ségué

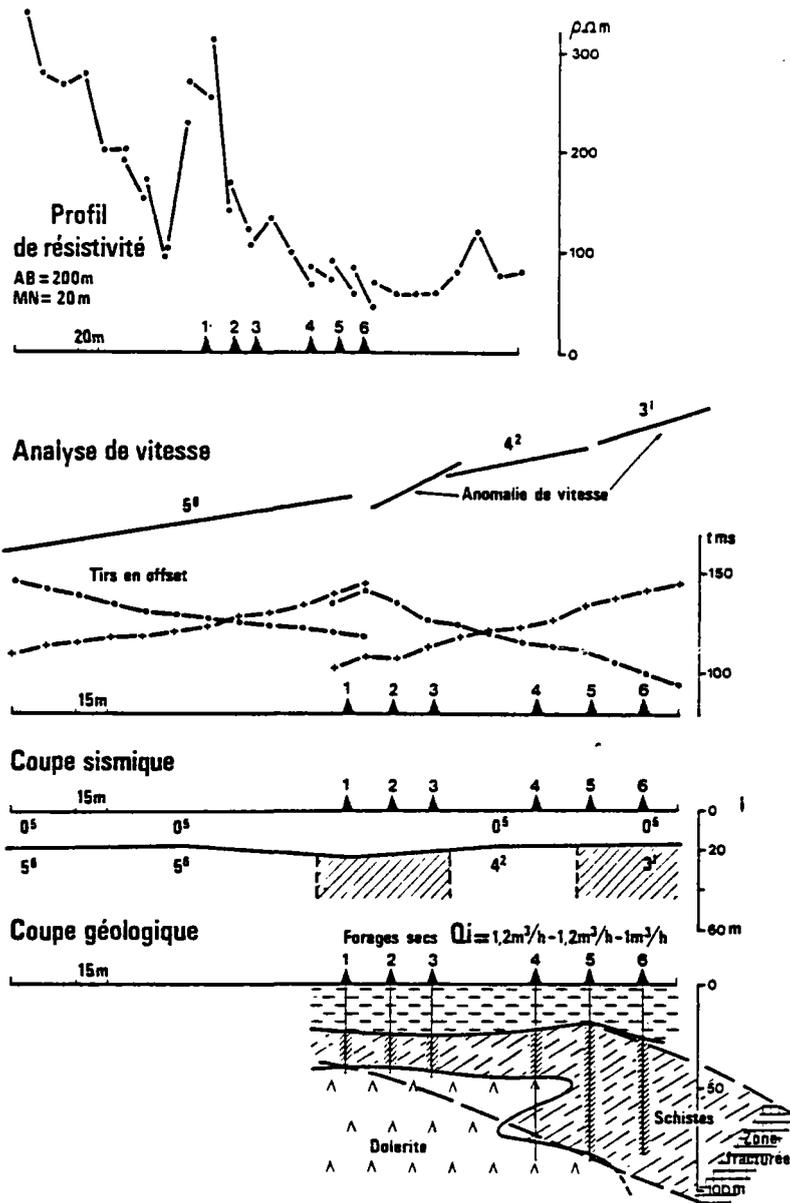


Figure 40 - Piste de Falou



**CONCLUSION GENERALE**



L'ensemble des méthodes de prospection géophysique de surface étudiées et commentées dans le présent texte apporte incontestablement une information nouvelle sur la structure du sous-sol en milieu fissuré discontinu, en particulier au droit des terrains constituant le bouclier Ouest-Africain en zone sahélienne.

De nombreuses études réalisées par des organismes divers, dont le BRGM, ont été prises en compte à l'occasion de l'élaboration de ce rapport.

Beaucoup d'auteurs ont de même été cités et la plupart du temps nous avons laissé libre cours à leur expérience de la pratique des méthodes de prospection géophysique de surface en milieu fissuré discontinu, tout en essayant de dégager les domaines de validité, avantages et inconvénients des différentes techniques expérimentées.

Ainsi et au terme de ce travail essentiellement bibliographique, il s'avère que chaque méthode de prospection géophysique prise individuellement ne présente qu'un intérêt réduit quant à son application sur le terrain : l'information en général obtenue présente en effet trop d'ambiguïté sur la détermination la plus précise possible de la **cause** induisant le phénomène observé.

De même, la bijectivité milieu naturel fissuré - zone aquifère n'est jamais vraie et les échecs enregistrés dans les productivités des ouvrages implantés restent une triste réalité, la zone fissurée n'étant pas forcément aquifère.

Il ne nous appartient pas ici d'entrer dans la polémique et de dénigrer systématiquement l'emploi des techniques de prospection géophysique de surface à la reconnaissance des milieux fissurés. Nous pouvons affirmer que notre démarche fut tout à fait contraire à cela.

De même, nous ne sommes pas de l'avis de ceux qui, suite à des études statistiques a priori très élaborées, considèrent que la géophysique apporte peu ou pas d'amélioration du taux de succès des forages implantés par géophysique comparé à celui obtenu par implantation classique sur photo-aérienne.

Des études statistiques de ce genre sont sans fondement logique, d'autant que dans la plupart des cas, les échantillonnages pris en compte représentent des populations trop faibles et par conséquent reflètent très partiellement l'environnement hydrogéologique local.

Il est bien évident cependant, qu'une méthode de prospection géophysique utilisée seule contribuera bien souvent à plonger le naturaliste dans le vague le plus total.

Malheureusement et dans la plupart des cas de projets d'aménagements type "hydraulique villageoise", une seule méthode de prospection géophysique est utilisée et cela suite à des contraintes évidentes de temps, de mobilisation de personnel et par conséquent de budget qu'il convient de mettre à disposition. Ainsi, bien que l'adéquation de plusieurs méthodes de prospection associées entre elles, à la reconnaissance du milieu fissuré ne soit plus à démontrer maintenant, il s'avère que des campagnes de terrain utilisant ce type de combinaisons, sont peu nombreuses.

C'est pourquoi, il nous a paru intéressant, voire indispensable de présenter de telles associations au lecteur, sans toutefois prendre parti pour une quelconque d'entre elles.

Le lecteur jugera en fonction du type de problème devant lequel il sera amené à être confronté.

En fait, nous arrivons ici sur la question de fond que tout géophysicien ou hydrogéologue se pose, préalablement à une campagne de terrain proprement dite : quel **choix** opérer sur la méthode à utiliser, sachant que **la nature de la cible** recherchée et que **l'échelle** du milieu à étudier ne sont pas forcément connues. En conséquence, la rédaction du présent texte n'a pas été opérée dans le souci de fournir des "trucs" ou des "recettes" plus ou moins élaborés. Nous n'avons pu que constater au demeurant, qu'il existe des associations de méthodes qui "marchent bien", y compris dans les cas où l'environnement hydrogéologique qu'il s'agit de comprendre n'est que partiellement connu.

Nous laissons maintenant la porte ouverte à toute discussion, tout en insistant à nouveau sur le fait que tout ce que pourra nous révéler la prospection géophysique de surface ne sera que la **conséquence indirecte** d'un phénomène naturel mal compris.

\*            \*  
\*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Remarque :** Cette bibliographie est loin d'être exhaustive et elle est proposée dans l'ordre alphabétique des auteurs consultés pour la rédaction du présent texte.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Andreini (J.C.), Biais (E.), Bourguet (L.), Guerbois (M.) 1984.- Contribution à l'implantation des forages d'eau dans le socle cristallin par la méthode VLF.-Bulletin du BRGM (2), III, n° 4, p. 377-381.
- [2] Archambault (J.) 1960.- Les eaux souterraines de l'Afrique Occidentale. A l'initiative du Service de l'Hydraulique de l'AOF.
- [3] Astier (J.L.) 1971.- Géophysique appliquée à l'Hydrogéologie.- Paris, Masson.
- [4] Bernardi (A.), Mouton (J.) 1980-81.- Les recherches d'eau dans le socle africain. Apport de la géophysique.- Bulletin du BRGM, (2), III, n° 4, p. 293-309.
- [5] Birch (F.S.) 1984.- Bedrock depth estimates from ground magnetometer profiles.- Groundwater, vol. 22, n° 4, p. 427-432.
- [6] BRGM 1982.- Etude sur l'utilisation des méthodes géophysiques. (Première phase, étude HG2/1). Réponse à la consultation du 8 novembre 1982.- CIEH, Ouagadougou.
- [7] Bro (M.) 1975.- Rapport géophysique du Togo. Convention DP/UN/TOG-75-008/2.
- [8] Bro (M.), Hubert (C.), Moullard (P.) 1980-81.- Recherche des aquifères de fracture dans les séries schisto-gréseuses du Mali à l'aide des techniques géophysiques.- Bulletin du BRGM, (2), III, n° 4, p. 311-324.
- [9] Burgeap, CGG, Méditerranéenne de Géoélectricité 1984.- Utilisation des méthodes géophysiques pour la recherche d'eau dans les aquifères discontinus.- CIEH, Ouagadougou.
- [10] Chevalier-Lemire (G.) 1983.- Etude méthodologique par méthodes électrique et électromagnétique sur le site pilote de Lufiac. Commune de Broualan (Ille et Vilaine).- Rapport BRGM 83 SGN 877 GPH.
- [11] Chevalier-Lemire (G.) 1984.- Poursuite de l'étude géophysique sur le site pilote de Lufiac. Commune de Broualan (Ille et Vilaine).- Rapport BRGM 84 SGN 321 GPH.

- [12] **Chevalier-Lemire (G.)** 1985.- Projet CEAO. Campagne marteau fond-de-trou au Sénégal Oriental. Analyse statistique des résultats obtenus par prospection géophysique.- Rapport BRGM 85 GPH 024.
- [13] **Chevalier-Lemire (G.)** 1985.- Projet d'hydraulique villageoise USAID-FAC au Togo - 3ème phase. Travaux géophysiques d'implantation. Région des savanes et des plateaux.- Rapport BRGM (non numéroté).
- [14] **Degallier (R.), Plote (H.)** 1959.- Prospection électro-magnétique aéroportée appliquée à la recherche d'eau en région saharienne à substratum cristallin.- AIH. Mémoires, t. 3, réunion de Madrid, p. 87-93.
- [15] **Degallier (R.)** 1960.- Question actuelles d'hydrogéologie en Afrique Occidentale et méthodes d'étude. Deuxième partie : prospection géophysique appliquée à la recherche d'eau.- BRGM notes n° 5, Dakar.
- [16] **Diluca (C.), Muller (V.)** 1985.- Evaluation hydrogéologique des projets d'hydraulique en terrains cristallins du bouclier ouest africain. Coopération technique.- Projet n° 82.2060.0, CIEH, Ouagadougou. BGR, Hannovre.
- [17] **Dollé (Y.)** 1985.- Prospection d'aquifères par méthodes électrique et magnétique dans les 1ère et 2ème régions de la République du Mali.- Rapport BRGM (à paraître).
- [18] **Favin (H.)** 1983.- Projet d'hydraulique villageoise du Conseil de l'Entente au Burkina-Faso.- Rapport BRGM 83 GPH 073.
- [19] **Frignet (B.)** 1979.- Possibilité et exemple d'utilisation du "MAX-MIN" en prospection minière.- Bulletin du BRGM (2), II, 2-3, p. 241-247.
- [20] **Frignet (B.), Millon (R.)** 1979.- Utilisation des paramètres résistivité apparente et déphasage en électromagnétisme VLF-EM 16 R.- Bulletin du BRGM (2), II, 2-3, p. 263-274.
- [21] **Madelaine (B.)** 1985.- Etude géophysique pour l'hydraulique villageoise du Nord Borgou, République Populaire du Bénin. Rapport BRGM (non numéroté).

- [22] Maillard (J.), Valentin (J.) 1983.- Possibilités des méthodes électromagnétiques dans le domaine de l'hydrogéologie.- Rapport BRGM 83 SGN 312 GPH.
- [23] Mathiez (J.P.), Huot (G.P) 1966.- Prospection géophysique et recherches d'eaux souterraines. Exemples d'application en Afrique Occidentale.- CIEH, Ouagadougou.
- [24] Ricolvi (M.) 1984.- Programme d'hydraulique villageoise du Conseil de l'Entente. Rapport final de la 1ère phase au Burkina-Faso.- Rapport BRGM 84 AGE 040.
- [25] Schneider (J.L.) 1983.- Programme d'hydraulique villageoise en République Gabonaise. Etude et synthèse des résultats des forages. Premier rapport intérimaire, campagne 1982.- Rapport BRGM 83 AGE 021.
- [26] Schneider (J.L.) 1984.- Programme d'hydraulique villageoise en République Gabonaise. Etude et synthèse des résultats des forages. Deuxième rapport intérimaire. Campagne 1983-84.- Rapport BRGM 83 AGE 035.
- [27] Valentin (J.) 1983.- Utilisation des méthodes géophysiques en hydrogéologie.- Rapport BRGM 83 GPH 011.
- [28] Valentin (J.) 1985.- Prospection et exploitation d'eau souterraine en roches fissurées.- Rapport BRGM 85 SGN 037 GPH.
- [29] Zamolo (G.) 1984.- Programme CEAO d'hydraulique villageoise et pastorale dans les 1ère et 2ème régions. Première campagne au Mali. Résultats et recommandations.- Rapport BRGM 84 AGE 029.

réalisation  
service  
reprographie  
du BRGM

