

50 376  
1 976  
110

N° d'ordre : 593

50376  
1976  
110

# THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE TROISIÈME CYCLE

SPECIALITE : GEOLOGIE APPLIQUEE

par

Jean-Luc CARNEZ

LA PROSPECTION MAGNETO-TELLURIQUE  
ADAPTEE AUX PROBLEMES DU GENIE CIVIL.

(Capteur capacitif, étalonnages, exemples d'application)



030 034048 9



Soutenue le 1er Juillet 1976, devant la COMMISSION D'EXAMEN

Membres du Jury :	MM. A. BONTE	Président
	P. DEBRABANT	Rapporteur
	J.P. DUBUS	Examineur
	A. DUPIS	Invité
	M. RAT	Invité

20376  
1976  
110

N. d'ordre : 593

# THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE

SPECIALITE : GEOLOGIE APPLIQUEE

par

Jean-Luc CARNET

LA PROSPECTION MAGNETO-TELLURIQUE  
ADAPTEE AUX PROBLEMES DU GENIE CIVIL.

(Capteur capacitif, étalonnages, exemples d'application)



Soutenu le 1er juillet 1976, devant la COMMISSION D'EXAMEN

Membres du jury		MM.	A.	BONTE	Président
		P.	DEBRABANT	Rapporteur	
		J.P.	DUBUS	Examinateur	
		A.	DUPIS	Invité	
		M.	RAT	Invité	

A MA FEMME,

A MES PARENTS.

A MA TERRE.

A MES PARENTS.

## A V A N T - P R O P O S

A Monsieur Le Professeur DEBRABANT de l'Université des Sciences et Techniques de Lille I (U.S.T.L. I), je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour la confiance qu'il a bien voulu m'accorder en me proposant ce sujet d'un genre tout à fait nouveau dans le cadre de ses recherches. Son esprit critique m'a amené à considérer certains points avec une attention toute particulière. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma plus profonde reconnaissance.

J'associerai à ces remerciements Monsieur DUPIS, Chargé de Recherches au Centre de Recherches Géophysiques (C.R.G.) de Garchy (Nièvre) où j'ai mené à terme ce travail. Son aide précieuse m'a permis pendant près de 18 mois de surmonter bien des obstacles et ses encouragements tout comme ses conseils m'ont été d'un grand secours. Qu'il veuille bien accepter mes remerciements les plus chaleureux.

Je remercie également Monsieur MOSNIER, Directeur du Centre de Recherches Géophysiques, pour m'avoir autorisé à disposer de toutes les possibilités du Centre. Qu'il me soit permis de lui exprimer ici ma profonde gratitude.

Il m'est particulièrement agréable que Monsieur le Professeur BONTE de l'U.S.T.L. I préside le Jury comme il l'a déjà fait lors de mon D.E.A.. Qu'il accepte de trouver ici l'expression de mes plus respectueux remerciements.

Je remercie aussi Monsieur DUBUS pour l'aide qu'il a apportée à la réalisation de ce mémoire. Qu'il soit remercié d'avoir en outre accepté de faire partie du Jury.

Les Laboratoires des Ponts et Chaussées ont contribué pour partie à l'élaboration de ce travail, et je suis particulièrement honoré que Monsieur RAT ait accepté de faire partie du Jury. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma respectueuse gratitude. Je remercie également Monsieur LONGERE du Laboratoire Régional d'Autun pour la qualité des documents qu'il a bien voulu me communiquer.

Je ne saurais oublier Monsieur AUROUSSEAU de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes (E.N.S.A.R.) avec lequel l'étude sur le Morvan a été menée à bien. Qu'il trouve ici l'expression de toute ma sympathie.

Qu'il me soit permis d'adresser mes remerciements à tout le personnel du C.R.G. qui a participé de près ou de loin à mes travaux, et tout spécialement à Messieurs CAVOIT et HUGON dont la jovialité et la compétence apportent ambiance, sympathie et dynamisme dans l'équipe.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce mémoire et qui n'ont épargné ni leur temps, ni leur peine. Je pense en particulier à Madame DUJARDIN qui a frappé ce travail, à Madame BREBION pour le tirage des figures, à Monsieur CARPENTIER pour les photos et à Monsieur DELVINQUIER pour la mise sous presse.

VII

TABLE DES MATIERES

	Pages
INTRODUCTION .....	1
Chapitre I - PRESENTATION DE LA METHODE MAGNETO-TELLURIQUE ARTIFICIELLE	.
A - GENERALITES .....	5
B - RAPPELS FONDAMENTAUX .....	5
I - HISTORIQUE .....	5
II - THEORIE .....	6
II-1 Les équations de Maxwell .....	6
II-2 Onde plane .....	8
II-3 Skin effect - Calcul de la résistivité .....	9
II-4 Remarques .....	12
II-4-a Résistivité vraie - Résistivité apparente .....	12
II-4-b Profondeur de pénétration - Profondeur d'investigation .....	12
II-5 Conclusion .....	14
C - ASPECT EXPERIMENTAL DE LA METHODE .....	14
I - GENERALITES .....	14
II - APPAREILLAGE .....	15
II-1 Capteurs électriques .....	17
II-2 Capteurs magnétiques .....	19
II-3 Traitement du signal .....	20
II-4 Conclusion .....	20
Chapitre II - ETALONNAGE DE L'APPAREILLAGE	
I - GENERALITES .....	25
I-1 Paramètres à étalonner .....	25
I-2 Mode opératoire .....	25
I-2-a Principe .....	25
I-2-b Technique de mesure des coefficients d'amplification	25
I-2-c Technique de mesure de la sensibilité des capteurs magnétiques .....	26
I-3 Précautions à prendre pour les étalonnages .....	28
I-3-a Le système de traitement électronique .....	28
I-3-b Les capteurs magnétiques .....	29

VIII

	Pages
II - RESULTATS .....	29
II-1 Etalonnage des voies .....	29
II-1-a Risques de saturation .....	29
II-1-b Détermination des gains fixes C .....	31
II-1-c Détermination des gains variables .....	33
II-1-d Réponse des filtres .....	34
II-2 Sensibilité des capteurs magnétiques .....	36
II-2-a Risques de saturation .....	36
II-2-b Résultats .....	36
II-3 Coefficients d'étalonnage pour le calcul des résistivités .....	38
II-4 Mesure de l'impédance des électrodes .....	40
II-5 Discussion sur les limites d'utilisation en station .....	44
II-5-a Variation de la tension de détection en fonction de la longueur de la ligne tellurique .....	44
II-5-b Variation de la tension de détection en fonction de l'orientation de l'appareil dans le champ électromagnétique .....	47
II-5-c Remarques sur la stabilité de la puissance des émetteurs .....	50
Chapitre III - APPLICATIONS DE LA METHODE M.T.A.	
INTRODUCTION .....	55
A - STRUCTURES NATURELLES SIMPLES .....	56
I - SONDAGE MAGNETO-TELLURIQUE .....	56
I-1 Rappels .....	56
I-2 Comparaison M.T.A. - Sondage électrique .....	57
I-2-a Présentation géologique .....	57
I-2-b Sondage électrique - Sondage M.T.A. ....	58
I-2-c Interprétation - Comparaison .....	61
I-2-d Validité de la méthode des conductances équivalentes .....	63
I-3 Complémentarité entre M.T.A. et M.T.M. ....	64
I-4 Conclusion .....	67
II - RECHERCHE D'UNE FAILLE .....	69
II-1 Généralités .....	69
II-2 Mise en station .....	70
II-3 Rappels théoriques .....	70
II-4 Mesure de $H_y/E_x$ , $H_x/E_y$ , $E_y$ .....	72



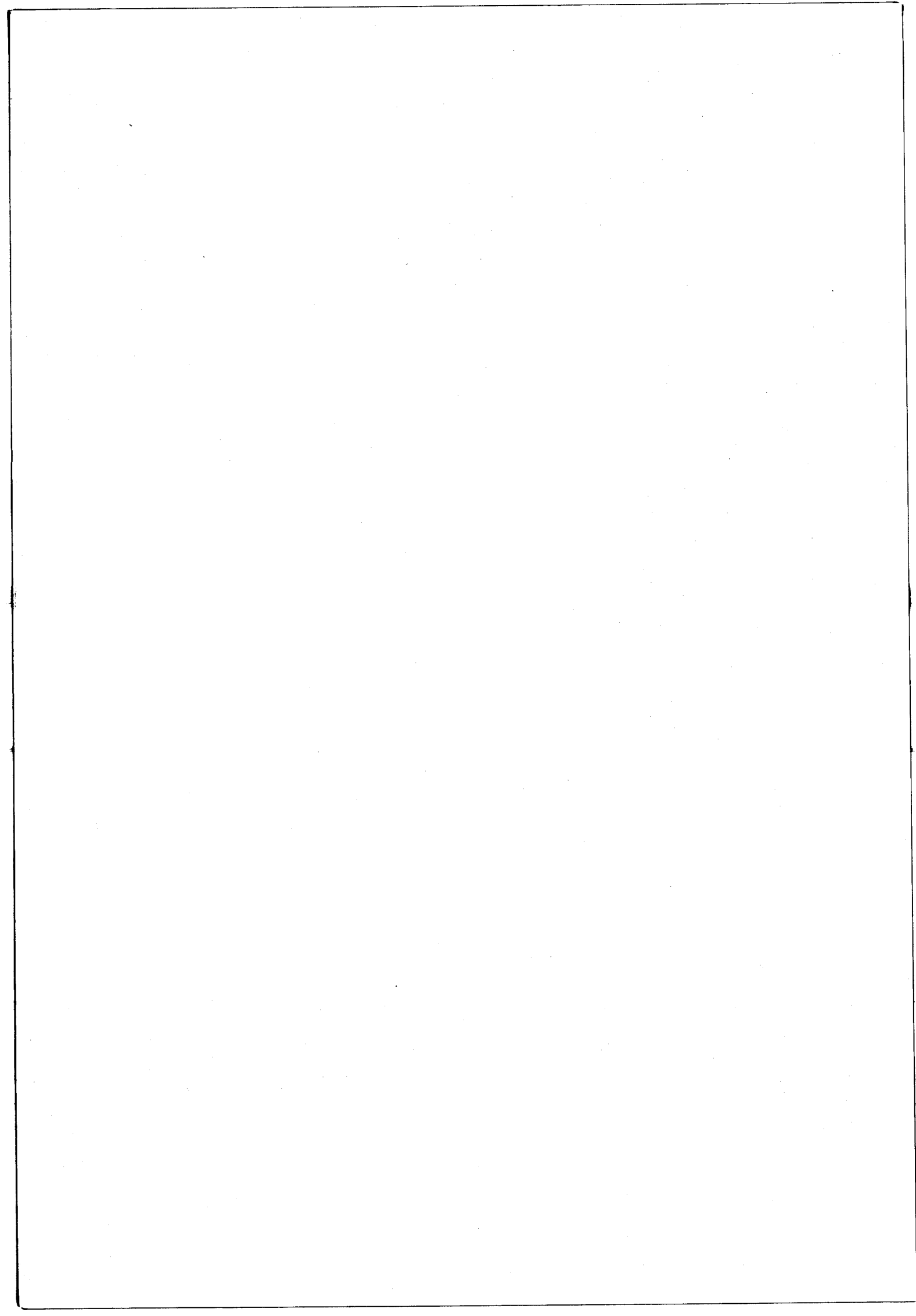
II-4-a Etude du paramètre $H_y/E_x$ .....	72
II-4-b Etude du paramètre $H_y$ .....	77
II-4-c Etude du paramètre $E_y$ .....	77
II-5 Conclusion .....	78
III - RECHERCHE STRUCTURALE DANS LA REGION DE CLUNY (SAONE ET LOIRE)	78
III-1 Généralités .....	78
III-2 Mise en station .....	78
III-3 Les mesures .....	80
III-3-a Profil 1 .....	80
III-3-b Profil 3 .....	80
III-3-c Profil 4 .....	82
III-3-d Profil 5 - Comparaison avec le Mélos .....	82
III-4 Conclusion .....	85
IV - ETUDE PEDOLOGIQUE DANS LE MORVAN .....	86
IV-1 Généralités .....	86
IV-2 La M.T.A. et les autres méthodes d'investigation .....	89
IV-3 Les mesures .....	91
IV-3-a Sondage M.T.M. ....	91
IV-3-b Traîné électrique .....	91
IV-3-c La M.T.A. ....	93
IV-4 Interprétation .....	93
IV-5 Conclusion .....	100
B - PROSPECTION SUR DES STRUCTURES ARTIFICIELLES : LES CAVITES .....	101
I - GENERALITES .....	101
II - QUELQUES METHODES GEOPHYSIQUES DE DETECTION DES CAVITES .....	102
II-1 La prospection électrique .....	102
II-2 La prospection sismique .....	102
II-3 La prospection gravimétrique .....	103
II-4 La prospection électromagnétique .....	104
II-4-a La télédiagraphie .....	104
II-4-b Méthodes électromagnétiques de surface .....	105
II-4-c La M.T.A. ....	106
III - PROSPECTION PAR LA M.T.A. DE QUELQUES CAVITES GEOMETRIQUEMENT SIMPLES .....	106
III-1 Structure cylindrique allongée : le "tunnel de Gimouille"	106
III-1-1 Généralités .....	106

Pages		Pages
75	..... III-1-2 Mise en station .....	107
77	..... III-1-3 Mesures et interprétations .....	107
77	..... III-1-3-a Etude des paramètres $H_y/E_x$ , $H_x/E_y$ et $E_x/E_y$ .....	107
78	..... III-1-3-b Etude du paramètre $E_y$ .....	114
78	(ENJOI) III-1-4 Conclusion .....	118
78	.. III-2 Structure sphérique : "Le Caveau" .....	119
78	..... III-2-1 Généralités .....	119
80	..... III-2-2 Mise en station .....	120
80	..... III-2-3 Les Mesures .....	120
80	..... III-2-3-a Première phase : parasitage des données ...	120
82	..... III-2-3-b Deuxième phase : mesure du rapport H/E ....	122
82	..... III-2-3-c Remarque sur la forme de l'anomalie du caveau	129
82	..... III-2-4 Conclusion .....	129
86	.. III-3 Les "catiches" .....	131
86	..... III-3-1 Généralités .....	132
89	..... III-3-2 Mise en station .....	132
91	..... III-3-3 Etude d'une catiche .....	134
91	..... III-3-4 Recherche de catiches .....	147
91	..... III-3-4-a Présentation du site .....	147
92	..... III-3-4-b Les enregistrements .....	147
93	..... III-3-5 Conclusion .....	149
100	.....	
101	CONCLUSION GENERALE .....	153
102	.....	
102	BIBLIOGRAPHIE .....	157
102	.....	
102	LISTE DES FIGURES .....	161
103	.....	
104	LISTE DES TABLEAUX .....	165
104	.....	
105	ANNEXE .....	167
106	.....	
106	.....	
106	.....	
106	.....	

XI

E R R A T U M

- p. 15 : dernière ligne, lire "... dans une gamme de fréquences ...".
- p. 80 : lire "III-3 Les mesures" et non "II-3 Les mesures".
- p. 95 : tableau 9 lire 200 m et non 250 m.
- p. 161 : figure 15 lire "BELLARY" et non "FORET DE BELLARY".



## I N T R O D U C T I O N

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Centre de Recherches Géophysiques (C. R. G.) de Garchy (Nièvre). Ce centre est principalement spécialisé dans la recherche sur la méthode de prospection magnétotellurique (M. T.) et la mise au point d'appareils adéquats.

Après la réalisation d'une M. T. pétrolière par Y. BENDERITTER (1968) et A. DUPIS (1970), la recherche s'est orientée vers la M. T. minière (A. JOLIVET, 1969). Parallèlement, P. MORAT développait la M. T. marine et A. TABBAGH l'électromagnétisme pour la recherche archéologique.

Récemment, dans l'équipe de A. DUPIS, une nouvelle variante de la M. T. naquit et prit nom de M. T. de subsurface ; son but était d'utiliser et d'appliquer les principes de la M. T. au génie civil. Le présent travail concerne cette dernière phase.

A mon arrivée au C. R. G., l'appareil, conçu sur plan, était en cours de réalisation. Par ailleurs, suite à quelques essais sur le terrain, on savait que la méthode pouvait donner des résultats satisfaisants. Mais la prospection proprement dite n'était pas encore envisageable.

Ma première démarche fut donc d'apporter mon aide à la réalisation technologique de l'appareillage (en collaboration avec B. GUINEAU) et à le rendre opérationnel. L'actuelle fiabilité mécanique du matériel est en fait le résultat d'une amélioration constante.

Une fois le matériel rendu opérationnel, j'ai pu étalonner avec le maximum de précision les différents paramètres de la méthode. Dès lors, avec une idée assez précise des limites de fonctionnement de l'équipement, j'ai pu le mettre à l'épreuve de la prospection de subsurface, en le confrontant à six cas précis, particulièrement choisis pour leur diversité et leurs propriétés géométriques bien connues.

Lors de la description de l'appareillage, on constatera que sa mise en oeuvre n'exige qu'un personnel réduit. C'est la raison pour laquelle j'ai le plus souvent travaillé seul. Si cela présente l'avantage évident de n'être tributaire de personne pour élaborer un plan de travail, cela pose néanmoins certains problèmes, d'ordre pratique. En effet, s'il est facile de traîner l'appareil sur la neige ou sur une herbe drue, il est souvent pénible de se déplacer sur un champ labouré humide, non pas du fait du poids de l'équipement,

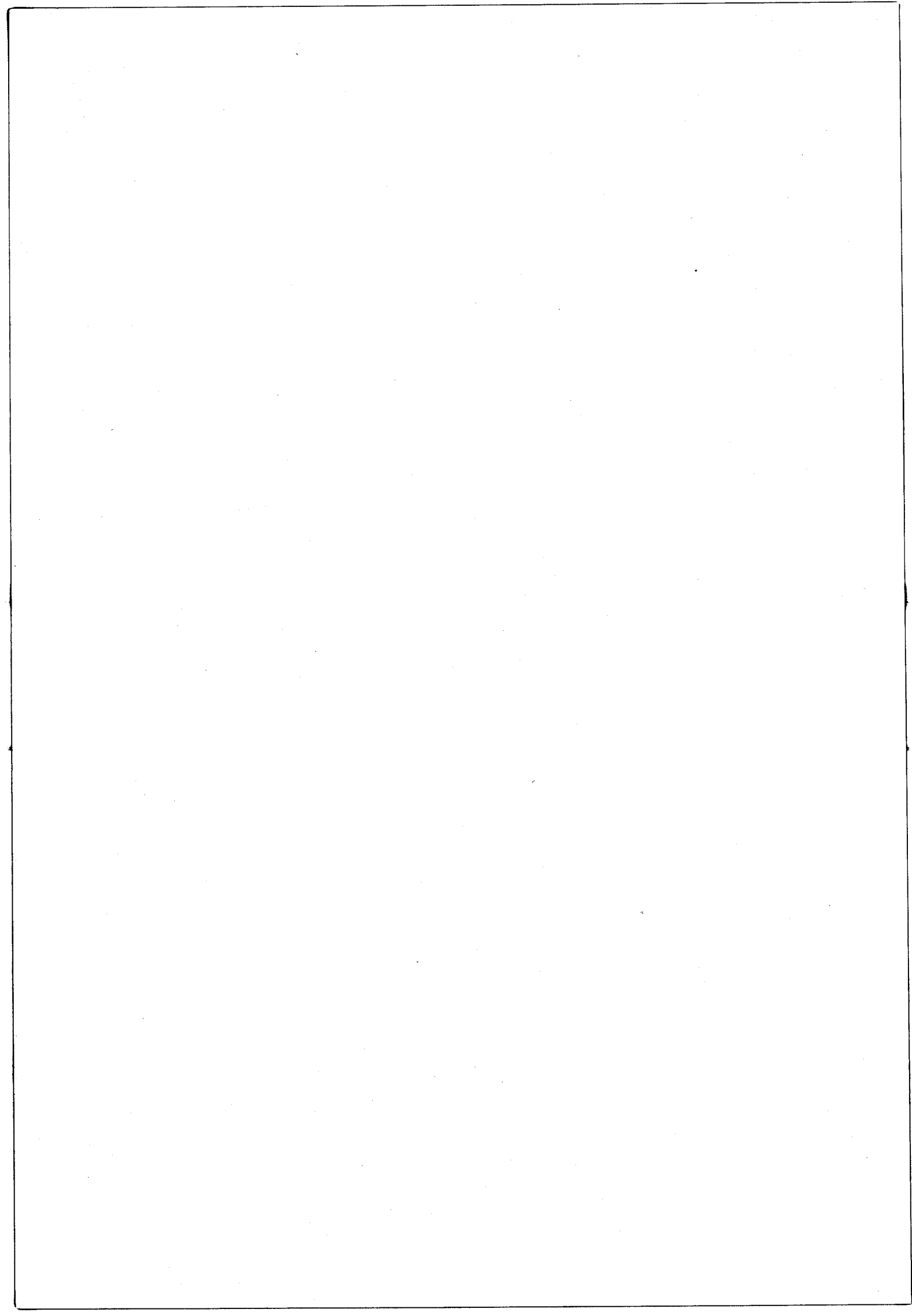
mais plutôt de sa large surface frottante. J'ai parfois dû abandonner provisoirement un site car il m'était impossible, seul, de faire glisser l'appareillage. Ma seule ressource était alors d'attendre une amélioration météorologique.

Le but de ce travail est simple : la méthode est nouvelle, son domaine d'application est celui du génie civil. J'ai essayé de montrer qu'elle était utilisable et applicable dans ce domaine. Les pages qui suivront devraient convaincre le lecteur de l'intérêt qu'offre cette méthode pour la détection de structures à faible profondeur. J'insisterai en particulier sur le problème des cavités et je rappellerai à cet effet qu'on a répertorié (PROUST J.-N., 1972) 3 185 hectares sous minés pour la ville de Paris, les départements des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne, auxquels s'ajoutent 1 500 hectares pour les Yvelines, le Val-d'Oise et l'Essonne (J. du MOUZA, 1975). Dans le Nord de la France, c'est par centaines d'hectares que l'on compte les zones de carrières souterraines, et l'histoire dit que l'on pouvait se rendre de Lezennes à Tournai en Belgique (15 km) uniquement par des galeries. C'est évidemment exagéré mais témoigne de l'importance du réseau de galeries.

Orienter une méthode M. T. vers ce genre de préoccupation est donc un choix judicieux et l'on montrera qu'il porte ses fruits. En effet, les différentes applications envisagées de ce travail apportent, dans l'ensemble, des résultats probants, et je souhaiterais qu'il contribue à mieux faire connaître la nouvelle méthode mise au point au C. R. G. sous la direction de MM. MOSNIER et DUPIS.

**C H A P I T R E I**

**PRESENTATION DE LA METHODE MAGNETO-TELLURIQUE DE SUBSURFACE**





## A - G E N E R A L I T E S

Les développements mathématiques qui vont suivre ci-dessous ne sont qu'un bref aperçu de l'ensemble de la démonstration de la théorie. L'aspect le plus important de ce travail n'est pas le fait du théoricien. Il existe d'ailleurs bon nombre de documents qui, ayant pour point de départ les équations de Maxwell, développent les cas particuliers de cette méthode. On insistera davantage sur l'aspect expérimental des nouveaux matériels mis en oeuvre.

Cependant, on essaiera dans la mesure du possible, de donner une idée assez précise du phénomène magnétotellurique pour aboutir aux formules fondamentales de la méthode.

## B - R A P P E L S F O N D A M E N T A U X

I - HISTORIQUE

On sait depuis déjà longtemps que le sol est l'objet de champs électriques périodiques, dus à des courants dits telluriques, puisque Hertz et Maxwell aboutissaient à la théorie électromagnétique dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle.

On recherchera l'origine de ces courants alternatifs dans les orages atmosphériques pour les phénomènes à courte période ( $T < 1$  sec), dans les perturbations ionosphériques et dans l'activité solaire pour les phénomènes à longue période ( $T$  de l'ordre de la minute, voire même de l'heure).

On sait également qu'un champ magnétique associe ses oscillations à celles des courants telluriques (MAXWELL, 1873). Cependant, jusqu'aux années 50, on ne mesurera que les courants telluriques, qui offraient l'avantage sur les sondages électriques d'avoir une profondeur d'investigation théoriquement sans limites. Mais les pétroliers ne s'y sont pas particulièrement intéressés car on n'obtenait alors que des résultats purement qualitatifs (méthode tellurique).

Il fallut attendre 1953 pour que L. CAGNIARD jette les fondements d'une nouvelle méthode, la méthode magnétotellurique. Celle-ci est basée sur la comparaison des "composantes horizontales du champ électrique et du champ magnétique liés à la circulation des courants telluriques". Elle permet d'accéder directement aux conductibilités électriques  $\sigma$  du sous-sol.

Ce sont les grandes étapes de sa démonstration que l'on va rappeler ci-après.

## II - THEORIE

### II-1 Les équations de Maxwell

Il existe à la surface du globe un champ électromagnétique naturel, qui se propage aussi bien dans l'atmosphère que dans le sol et ce jusqu'à de grandes profondeurs.

C'est Maxwell qui a démontré en 1873 que le champ magnétique dans lequel s'oriente la boussole s'accompagne nécessairement d'un champ électrique, et que tous deux sont liés par les relations :

$$-\frac{\delta \vec{B}}{\delta t} = \overrightarrow{\text{rot } \vec{E}}$$

$$\vec{J} + \frac{\delta \vec{D}}{\delta t} = \overrightarrow{\text{rot } \vec{H}}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

avec  $\vec{B}$  : induction magnétique

$\vec{D}$  : induction électrique ou courant de déplacement

$\vec{J}$  : densité de courant

$\vec{H}$  : champ magnétique

$\vec{E}$  : champ électrique

$\mu$  : perméabilité électrique du milieu

$\epsilon$  : constante diélectrique du milieu

$\sigma$  : conductibilité électrique

$\mu$ ,  $\epsilon$  et  $\sigma$  sont des constantes caractéristiques du milieu considéré. Ce sont donc des tenseurs. Les expressions ci-dessus sont inutilisables telles quelles et l'on doit se placer dans des conditions d'exploitation particulières pour justifier leur simplification.

Aussi considère-t-on l'atmosphère et les roches comme des milieux isotropes dans lesquels les tenseurs se réduisent à de simples constantes.

- dans l'atmosphère

$$\epsilon = \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ F/m}$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$$

Unités MKSA

$\sigma$  en S/m

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \text{ en } \Omega\text{m}$$

- dans les roches

$$2\epsilon_0 < \epsilon < 80\epsilon_0$$

$$\mu = \mu_0$$

$$0,2 < \rho < 10\,000 \text{ } \Omega\text{m}$$

Si la nappe électromagnétique est harmonique et uniforme, il existe toujours un vecteur  $\vec{\pi}$ , appelé vecteur potentiel de Hertz, dont on peut faire dériver les vecteurs  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$ . Il faut pour cela que  $\vec{\pi}$  vérifie l'équation d'onde de Laplace :

$$\Delta \vec{\pi} + k^2 \vec{\pi} = 0 \quad (1)$$

avec :  $k^2 = i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon)$  en régime sinusoïdal (2)

$$k^2 = \mu\left(\sigma + \epsilon \frac{\delta}{\delta t}\right) \frac{\delta}{\delta t} \text{ en régime quelconque}$$

$\vec{E}$  et  $\vec{H}$  sont alors reliés à  $\vec{\pi}$  par :

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \text{grad div } \pi - \Delta \vec{\pi} \\ \vec{H} &= \left(\sigma + \epsilon \frac{\delta}{\delta t}\right) \text{rot } \vec{\pi} \end{aligned}$$

## II-2 Onde plane

Une onde, quelque soit son origine, provient d'un émetteur. Si autour de cet émetteur considéré comme ponctuel, on appelle surface d'onde, tous les points de l'espace atteints en phase en un instant donné par l'onde émise, les surfaces d'onde sont sphériques lorsque l'émetteur est placé dans un milieu homogène et infini. Mais, plus on s'éloigne de la source, plus le rayon de la sphère grandit et plus la courbure des surfaces d'onde s'aplatit.

A la limite, la surface d'onde est un plan perpendiculaire à la direction de propagation. C'est apparemment une onde plane.

Supposons une onde incidente dans l'atmosphère sur la surface de la terre. Les deux milieux sont caractérisés par leurs constantes de propagation  $k_0^2$  et  $k_1^2$  définies précédemment dans l'équation de Laplace (1).

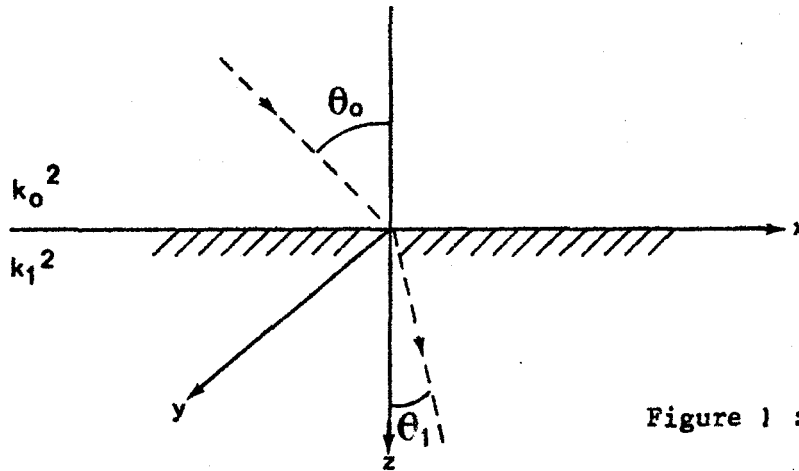


Figure 1 : Incidence d'une onde à la surface du sol.

Comme en optique, les lois de la réfraction d'une onde plane à l'interface air-sol nous donnent :

$$k_0^2 \sin \theta = k_1^2 \sin \theta_1$$

or

$$k^2 = i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon)$$

en régime harmonique (2)

- dans l'air, la conductibilité électrique  $\sigma$  est nulle.

$$k_0^2 = -\omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \text{ (nombre réel)}$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ F/m}$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$$

- dans le sol, considérons un terrain moyennement conducteur :

$$\sigma = 0,01 \text{ S/m} \quad (\rho = 100 \text{ } \Omega\text{m})$$

Pour une fréquence maximum de  $10^6$  Hz, on a :

$$\omega = 6 \cdot 10^6 \text{ rd/s}$$

Avec un  $\epsilon$  moyen égal à 10 fois  $\epsilon_0$  on obtient :

$$\omega\epsilon = 5 \cdot 10^{-4}$$

$\omega\epsilon$  est donc négligeable devant  $\sigma = 10^{-2}$  S/m, et d'autant plus que l'on s'intéresse à des fréquences plus basses.

Donc dans le sol :

$$k_1^2 \neq i\omega\mu\sigma \text{ (nombre imaginaire)}$$

En pratique, la constante de propagation est beaucoup plus grande dans le sol que dans l'air, on estime en général que  $|k_1|^2 \neq 100|k_0|^2$ , ce qui revient à dire que

$$|\sin \theta_1| = \frac{|\sin \theta_0|}{100}$$

L'angle entre l'onde réfractée et la verticale est par conséquent pratiquement nul. Une onde plane, quelle que soit son incidence, se réfracte toujours perpendiculairement au sol ( $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  sont contenus dans le plan xOy).

Les trois conditions : onde plane, propagation perpendiculaire au sol, distance à l'émetteur très grande, caractérisent le phénomène magnétotellurique.

### II-3 Skin effect - Calcul de la résistivité

On démontre (GABILLARD R., 1969) que, dans le sol, l'expression de l'intensité du vecteur tellurique s'exprime par :

$$E_x = E_0 e^{-z/p} e^{j(\omega t - z/p)} \quad \text{avec } p = \frac{1}{\sqrt{2\pi\omega\sigma}}$$

ce qui, si l'on ne s'intéresse qu'à la partie réelle, devient :

$$E_x = E_0 e^{-z/p} \cos(\omega t - z/p) \quad (3)$$

Cette formule traduit le skin effect, c'est-à-dire la "difficulté" croissante de pénétration dans le sol d'un courant alternatif en fonction de sa fréquence : quand  $z$  augmente,  $E_x$  diminue exponentiellement en fonction de  $z$ .

On désigne par  $p$ , profondeur de pénétration, la profondeur à laquelle l'amplitude de  $E_x$  est réduite à la fraction  $1/e$  de ce qu'elle est en surface.

$$(E_x)_p = \frac{(E_x)_0}{e}$$

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi\omega\sigma}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\rho T} \quad \text{uem CGS} \quad (4)$$

A la surface du sol ( $z = 0$ ), le vecteur tellurique n'existe que par sa composante horizontale  $E_x$  sous la forme :

$$E_x = E_0 \cos \omega t \quad (5)$$

D'autre part, d'après l'une des équations de Maxwell, on a :

$$-\mu \frac{\delta \vec{E}}{\delta t} = \text{rot } \vec{E}$$

Dans le cas présent (variations sinusoïdales), l'expression précédente devient :

$$-j\omega\mu \vec{E} = \text{rot } \vec{E}$$

Avec  $E_y = E_z = 0$ , et en ne considérant que les variations suivant  $z$ ,

( $\frac{\delta}{\delta x} = \frac{\delta}{\delta y} = 0$ ), seule la composante suivant  $y$  du rotationnel n'est pas nulle,

et est égale à :  $\frac{\delta E_x}{\delta z}$ .

En conséquence, la composante magnétique liée au vecteur tellurique se trouve dans le plan horizontal, perpendiculairement à  $E_x$ . Son expression est :

$$-j\mu\omega H_y = \frac{\delta E_x}{\delta z}$$

Dans le système d'unité électromagnétique CGS et avec  $\mu = 4\pi$ , on a :

$$H_y = -\frac{1}{j\omega} \frac{\delta E_x}{\delta z}$$

$$E_x = E_0 e^{-z/p} e^{j(\omega t - z/p)}$$

D'où :

$$H_y = \frac{E_0(1+j)}{j\omega p} e^{-z/p} e^{j(\omega t - z/p)} \quad (6)$$

Les composantes sont déphasées de  $\frac{\pi}{4}$ .

Le rapport  $\frac{E_x}{H_y}$  s'exprime par :

$$\frac{E_x}{H_y} = \frac{E_0 e^{-z/p} e^{j(\omega t - z/p)} j\omega p}{E_0(1+j) e^{-z/p} e^{j(\omega t - z/p)}}$$

Ce qui se réduit à :

$$\frac{E_x}{H_y} = \frac{j\omega p}{1+j}$$

En module on a :

$$\left| \frac{E_x}{H_y} \right| = \frac{\omega p}{\sqrt{2}} = \frac{\omega}{\sqrt{4\pi\sigma\omega}} = \sqrt{\frac{\omega p}{4\pi}} = \sqrt{\frac{\rho}{2T}} \quad (7)$$

On définit la résistivité  $\rho$  :

$$\rho = 2T \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \text{uem CGS} \quad (8)$$

et la conductivité  $\sigma$  :

$$\sigma = \frac{1}{2T} \left| \frac{H_y}{E_x} \right|^2 \quad \text{uem CGS} \quad (9)$$

Si l'on passe en unités pratiques pour les géophysiciens, avec les correspondances suivantes :

1 $\gamma$	=	$10^{-5}$	uem CGS
1 mV/km	=	1	" "
1 km	=	$10^5$	" "
1 $\Omega\text{m}$	=	$10^{11}$	" "

Les formules (4) et (8) deviennent :

$$p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10pT} \quad (\text{km}, \Omega\text{m}, \text{s}) \quad (10)$$

$$\rho = 0,2 T \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (\Omega\text{m}, \text{s}, \text{mV/km}, \gamma) \quad (11)$$

#### II-4 Remarques

##### II-4-a Résistivité vraie - Résistivité apparente

La résistivité exprimée par (11) est celle d'un terrain théoriquement homogène et illimité vers le bas. Dans la réalité, le sous-sol est macroanisotropique. Chacune des couches qui le composent, si on les considère homogènes et isotropes, a sa propre résistivité.

Les différentes résistivités vraies de tous les terrains intéressés par le skin effect interviennent dans la résistivité calculée en fonction des conditions de propagation des champs E et H, eux-mêmes reflétés du sous-sol. On parle de résistivité apparente  $\rho_a$  et on substitue dans (11)  $\rho_a$  à  $\rho$ .

##### II-4-b Profondeur de pénétration - Profondeur d'investigation

La profondeur de pénétration a été définie arbitrairement comme étant la profondeur à laquelle le champ électrique est égal à la fraction  $1/e$  de ce qu'il est en surface.

La profondeur d'investigation est la profondeur limite jusqu'à laquelle un corps perturbateur peut provoquer une anomalie de mesure décelable. Elle est toujours (et parfois fortement) inférieure à la précédente. Tout dépend des paramètres de ce corps (volume, résistivité, profondeur). C'est en fait le



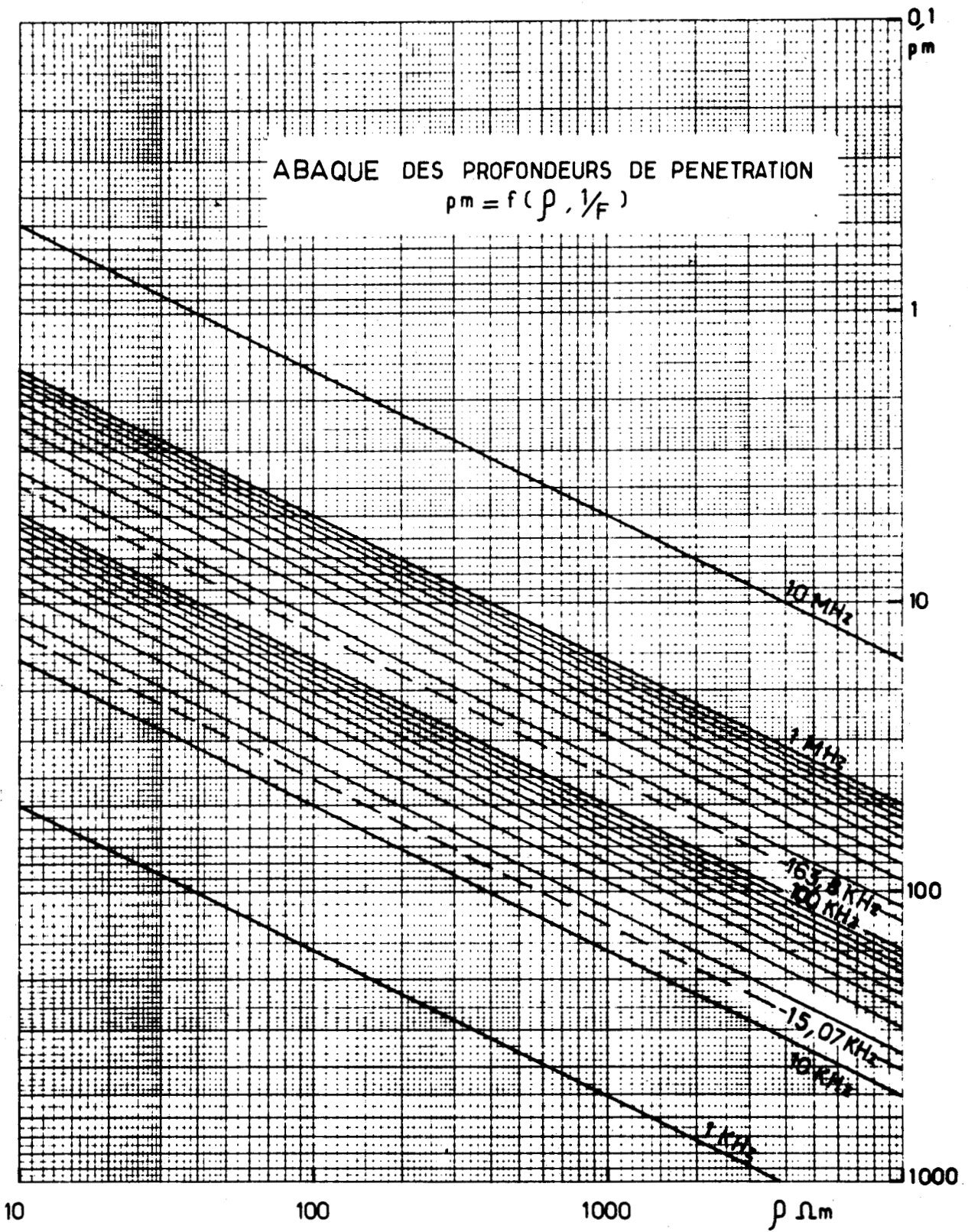


figure 2



contraste de résistivité qui est le facteur prépondérant dans cette détection, mais les caractéristiques des terrains qui se trouvent au-dessus, et, dans une certaine mesure, au-dessous de ce corps, peuvent avoir une influence non négligeable.

L'abaque (figure 2) des profondeurs de pénétration a été calculé d'après (10) pour diverses valeurs de T. Il permet d'accéder rapidement à l'un des trois paramètres : p,  $\rho$ , T connaissant les deux autres.

#### II-5 Conclusion

Voici donc brièvement résumés les principes fondamentaux de la méthode magnétotellurique. Il n'était certes pas question de présenter ici une étude théorique exhaustive. Mais il paraissait utile de rappeler les hypothèses sur lesquelles reposent la méthode ; on a montré aussi que les approximations faites au sujet de l'onde plane étaient parfaitement autorisées. Elles réduisent les champs tellurique et magnétique à leur composante horizontale, respectivement  $\vec{E}_x$  et  $\vec{H}_y$ , simplifiant, par cela même, les calculs.

### C - A S P E C T E X P E R I M E N T A L D E L A M E T H O D E

#### I - GENERALITES

\* L'appareillage magnétotellurique concerné par ce travail a été construit dans le but d'étudier et de rechercher des structures (souterraines naturelles ou artificielles) à faible profondeur.

Or, comme le montre l'expression de la profondeur d'investigation d'une onde :

$$p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10\rho T},$$

ceci ne peut être réalisé que si l'on est capable d'enregistrer des hautes fréquences. Malheureusement, comme on l'a sous-entendu précédemment, ces hautes fréquences (entre 10 KHz et 200 KHz) sont fort mal représentées dans le spectre naturel ; aussi le constructeur s'est-il attaché à la réception de signaux artificiels. La méthode est donc schématiquement intermédiaire entre la méthode naturelle et la méthode électromagnétique.

---

\* B. GUINEAU - C. R. G.

En fait, il convient dès à présent de bien définir ce que l'on entend par électromagnétisme et magnétotellurisme.

On appelle méthode magnétotellurique (méthode M. T.) toute méthode mesurant des signaux dont la source se trouve suffisamment éloignée du point de mesure pour considérer que l'onde électromagnétique est plane.

On appelle en général méthode électromagnétique (méthode E. M.) la méthode qui utilise une source dont on contrôle la puissance d'émission ainsi que la fréquence.

La méthode décrite dans ces pages est de type intermédiaire. Tout comme pour l'électromagnétisme, on y utilise des signaux artificiels choisis dans les hautes fréquences. Les émetteurs se situent dans la bande des grandes ondes. Ce sont :

- l'émetteur de Radio France Inter (163,84 KHz) situé à Allouis près de Bourges (Cher) ;
- l'émetteur militaire (15,10 KHz) servant aux télécommunications avec les sous-marins nucléaires français et situé près de Châteauroux ;
- l'émetteur du réseau de radionavigation OMEGA (10,2 KHz) situé à Bratland (Norvège).

Cependant, à la différence des méthodes E. M. classiques, ces sources ne peuvent être contrôlées soit en puissance, soit en fréquence, soit dans leur situation géographique. D'autre part, les émetteurs sont suffisamment éloignés pour que l'on puisse considérer (cela a d'ailleurs été vérifié) que l'onde est plane.

C'est donc une méthode électromagnétique mais dont les caractéristiques sont telles (il n'y a pas de dispositif émetteur, seulement un récepteur) qu'il est possible d'utiliser les formules de la M. T..

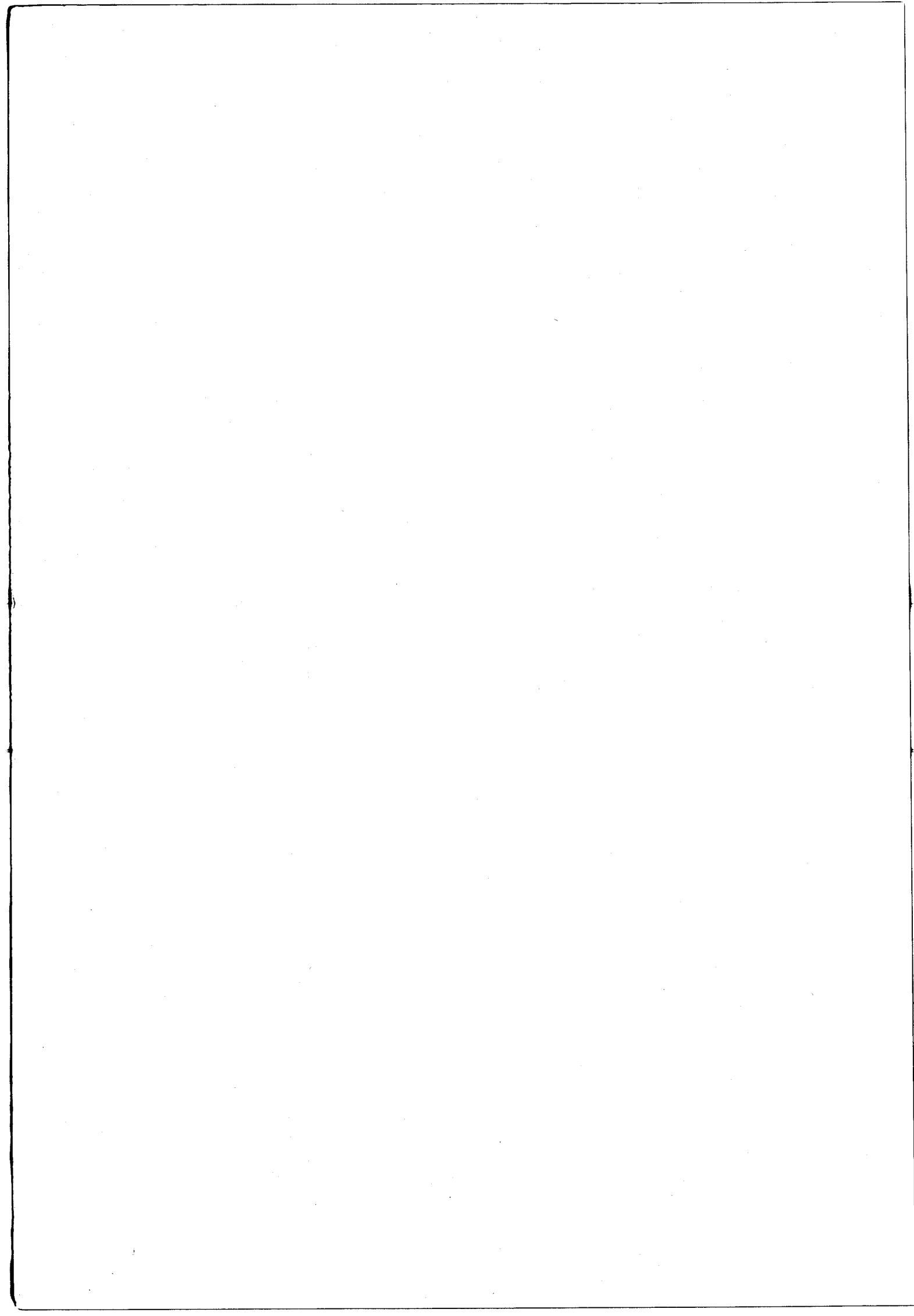
Aussi parle-t-on de méthode magnétotellurique artificielle (M. T. A.).

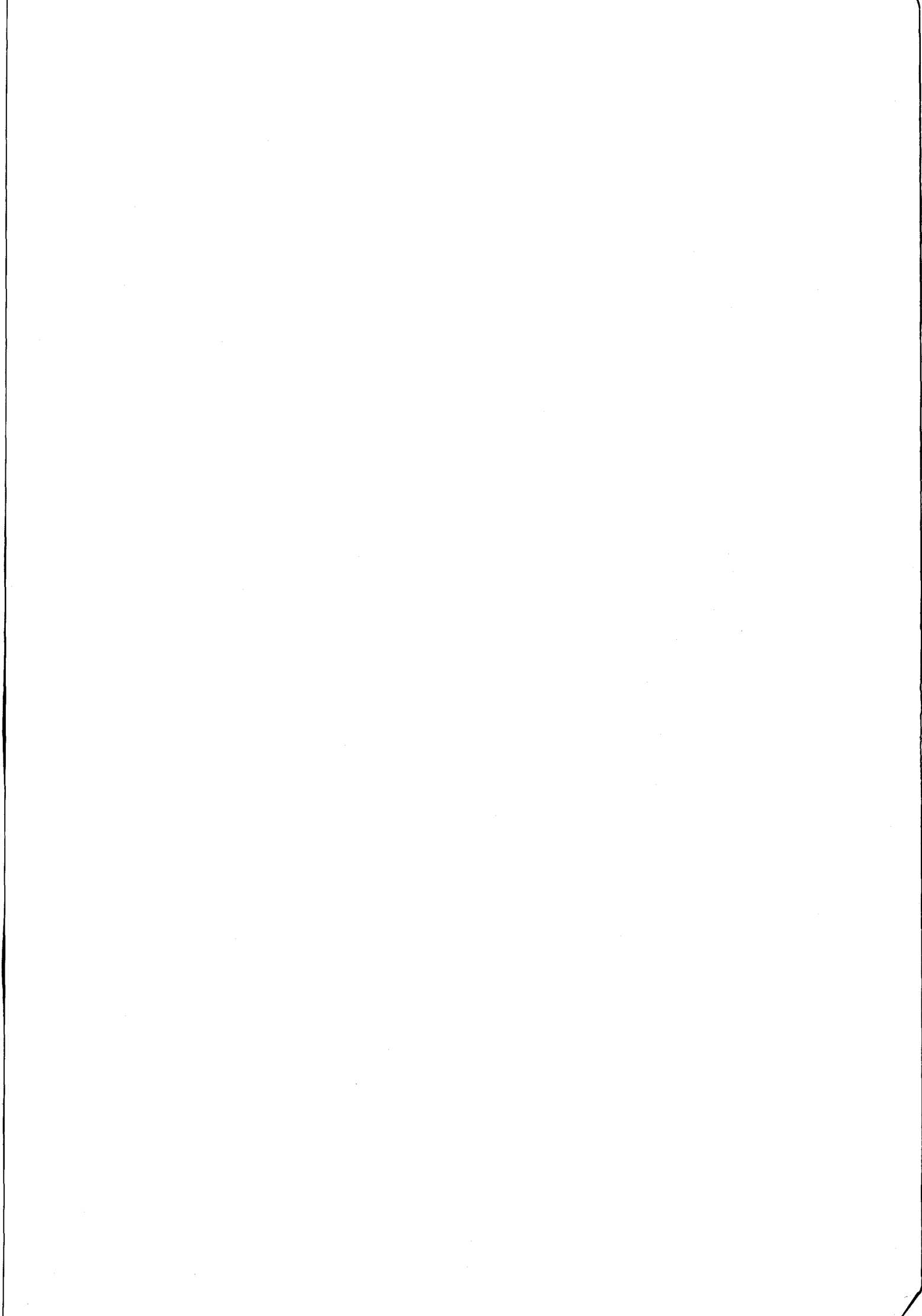
## II - APPAREILLAGE

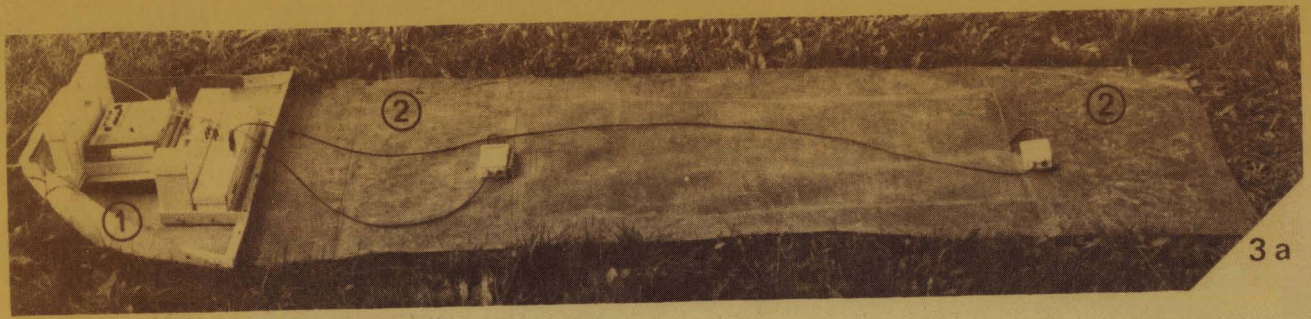
L'originalité de la méthode n'est pas tant l'utilisation de phénomènes créés par des émetteurs déjà existants (la méthode VLF\* les exploite également), mais réside dans les capteurs mis en jeu. Si le capteur magnétique est du type classique à induction, il est néanmoins spécialement adapté à la détection des phénomènes dans une gamme de fréquences de 10 à 200 KHz. Par contre,

---

\* V. L. F. : Very Low Frequency.

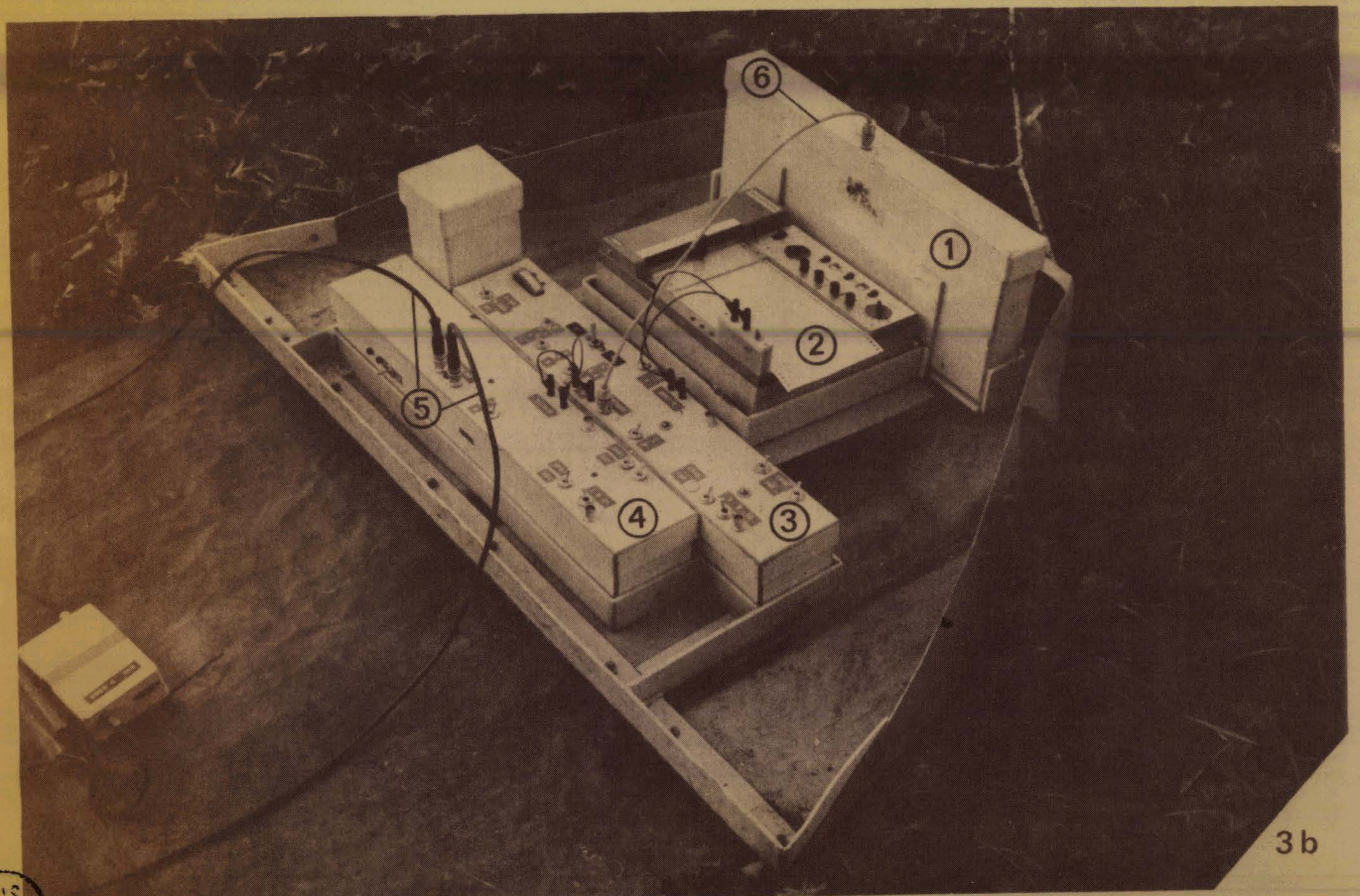






3 a

- ① Traîneau.
- ② Electrode avec boîtier.



3 b

BNS  
LILLF

Figure 3 : Appareil en station.

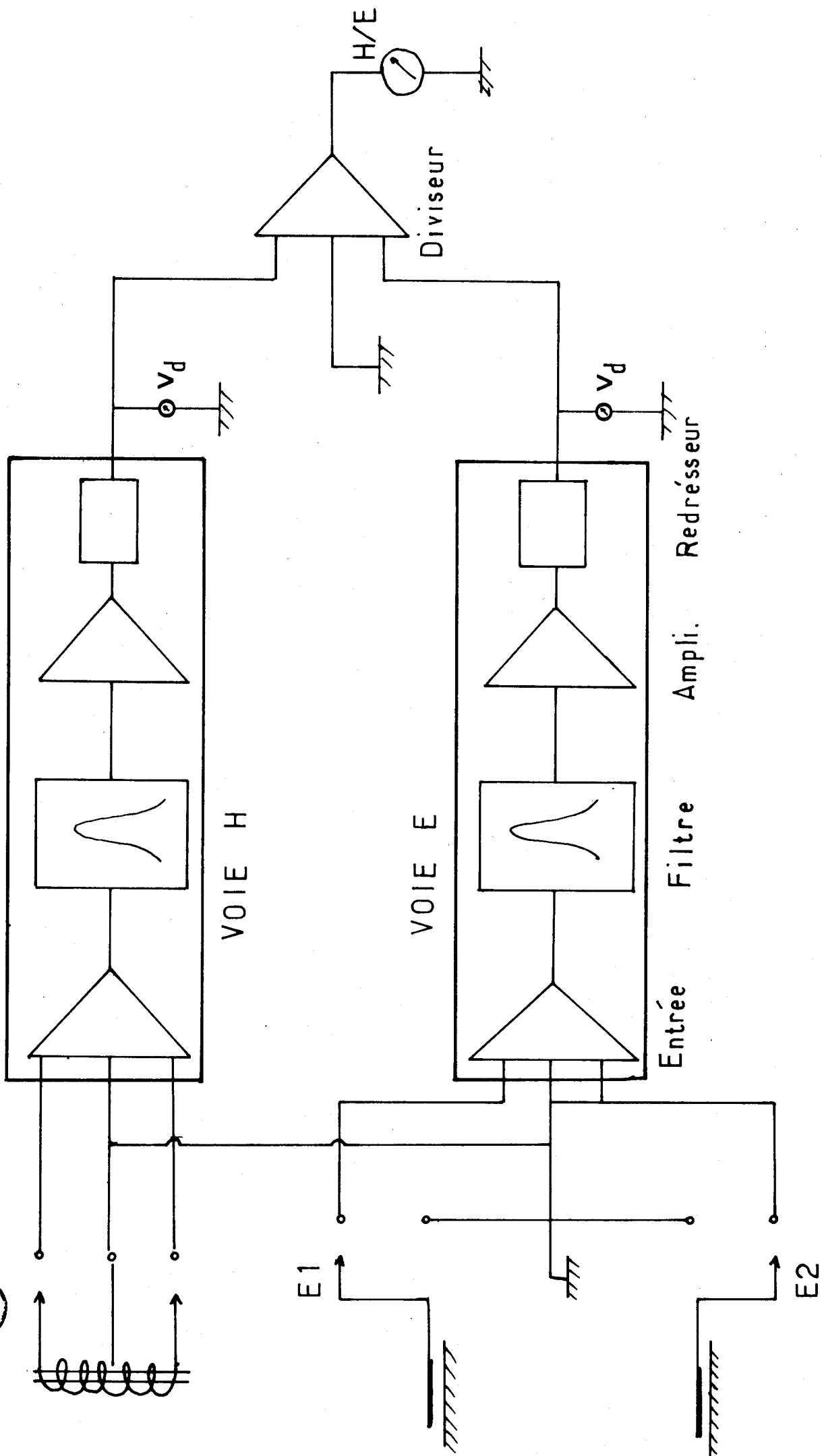


Figure 4 : Schéma synoptique de l'appareillage.

le capteur électrique qui lui est associé est véritablement original (Brevet ANVAR) puisqu'il substitue aux prises de terre classiques une réception capacitive.

La figure 3a présente l'appareil en station. Il est composé :

- d'un traineau (1) dans lequel se trouvent les instruments de mesures ;
- d'un tapis en caoutchouc (2) souple et dense dans lequel sont noyées les deux électrodes en laiton.

La disposition des différents éléments dans le traineau est la suivante (figure 3b) :

- à l'avant, le boîtier aux capteurs (163,84 KHz et 15,10 KHz) (1),
- derrière, l'enregistreur autonome fonctionnant sur batteries (2),
- puis, flanquée de sa tourelle, l'électronique de la voie H (3),
- enfin, le système du traitement du signal de la voie E (4).

Tous les câbles sont branchés, on aperçoit notamment les deux câbles provenant des électrodes capacitatives sur la gauche (5), ainsi que le câble de liaison des capteurs magnétiques à l'entrée du circuit électronique de la voie H (6).

Notons que la sortie de l'élément tellurique est reliée à l'élément magnétique. En effet, un diviseur permet d'y effectuer le rapport H/E, et c'est directement ce rapport que l'on enregistre.

#### II-1 Capteurs électriques

La mesure du champ électrique ( $E_x$ ) s'est toujours faite jusqu'ici en plantant dans le sol des électrodes en cuivre, en fer ou en plomb, etc ... Ceci présente évidemment un caractère contraignant, et en limite l'utilisation notamment dans le cas de terrains très durs (dalles de calcaires, granites sains, routes, ...).

Aussi ces électrodes résistives sont-elles remplacées par des électrodes capacitatives simplement posées sur le sol (figure 3a).

Chaque électrode forme avec le sol un condensateur entre les armatures duquel l'onde électromagnétique crée une tension. Les deux éléments capacitifs sont reliés par l'intermédiaire de circuits à haute impédance ( $Z_e \gg 10 \text{ M}\Omega$ ) aux entrées différentielles du montage électronique de la voie E (figure 4).

On peut tracer un schéma équivalent au système d'électrodes capacitatives tel que le montre la figure 4bis.



Dans ce schéma on a :

$C$  est la demi capacité de chaque électrode ;

$V_M$  est le champ électrique ;

$V_e$  est la ddp mesurée à l'entrée de l'étage d'amplification ;

$R_e$  est l'impédance d'entrée de cet étage.

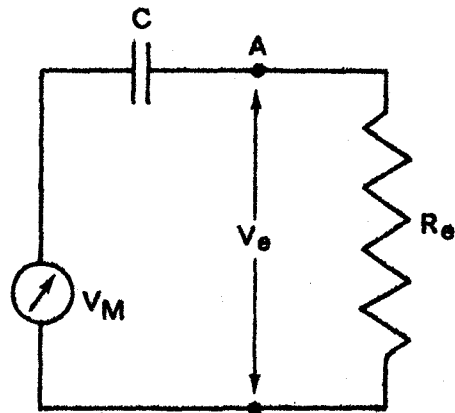


Figure 4bis

$$V_e = \frac{V_M R_e}{R_e + \frac{1}{j\omega C}} \quad \text{soit} \quad |V_e| = \frac{|V_M| R_e}{\sqrt{R_e^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}$$

Si l'on admet une capacité de 2 000 pF pour chaque électrode, l'impédance de l'ensemble capacitif sera, à 163,84 KHz :

$$\frac{1}{\omega C} \# 1\,000 \, \Omega$$

A 15,1 KHz on a :

$$\frac{1}{\omega C} \# 10 \, K\Omega$$

Avec une impédance d'entrée  $R_e > 10 \, M\Omega$ , on peut considérer que la tension mesurée  $V_e$  est égale au champ électrique, puisque  $\frac{1}{\omega C} < \frac{R_e}{1\,000}$  dans le moins bon des cas.

L'avantage évident de ce système est que les électrodes capacitives sont totalement indépendantes du sol. On montre aussi que les mesures du champ électrique tellurique exécutées avec les électrodes capacitives s'insèrent bien dans la fourchette des écarts constatés lors de l'utilisation des différents types d'électrodes classiques.

#### II-2 Capteurs magnétiques

Les barreaux en ferrite, encombrants, fragiles et de faible perméabilité magnétique, ont été remplacés ici, dans un souci de légèreté, par des barreaux ferromagnétiques en Perminphy 3\*, de perméabilité très

---

\* PERMINPHY 3 : 77 % Ni, 19 % Fe, 4% Mo, résistivité :  $58 \, \mu\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$ .

élevée. Ceci a permis de réduire considérablement leur taille et, par suite d'augmenter leur résistance aux chocs :

- 30 cm pour le 163,84 KHz,
- 40 cm pour le 15,10 KHz,
- 80 cm pour le 10,20 KHz.

Les deux premiers se trouvent dans le même boîtier, à l'avant du traineau (figure 3b) perpendiculairement à la ligne tellurique (figure 3a).

Chaque capteur est aperiodique dans une gamme de fréquences donnée (de 100 à 500 KHz). Chaque barreau est pourvu d'un enroulement à point milieu adapté à la fréquence utilisée.

### II-3 Traitement du signal

Les voies tellurique et magnétique sont construites sur le même modèle. Elles comprennent les étages suivants (figure 4) :

- deux entrées différentielles,
- un étage assurant une élimination des parasites, notamment le 50 Hz et ses premières harmoniques,
- une amplification avec gains commutables,
- des filtres passe bande très aigus accordés sur les fréquences utilisées,
- un étage, redresseur des tensions filtrées, produisant un signal proportionnel à la valeur moyenne du signal d'entrée.

Les fréquences 15,1 KHz et 163,84 KHz sont couplées ; une simple commutation permet de passer de l'une à l'autre. Le caractère particulier du signal à 10,2 KHz (émission d'une seconde toutes les 10 secondes) a nécessité une adaptation spéciale et un traitement particulier (stockage des valeurs par charge d'un condensateur).

Les chaînes électroniques des voies E et H des deux fréquences les plus élevées sont directement reliées à un diviseur opérationnel intégré dans le boîtier de l'élément magnétique.

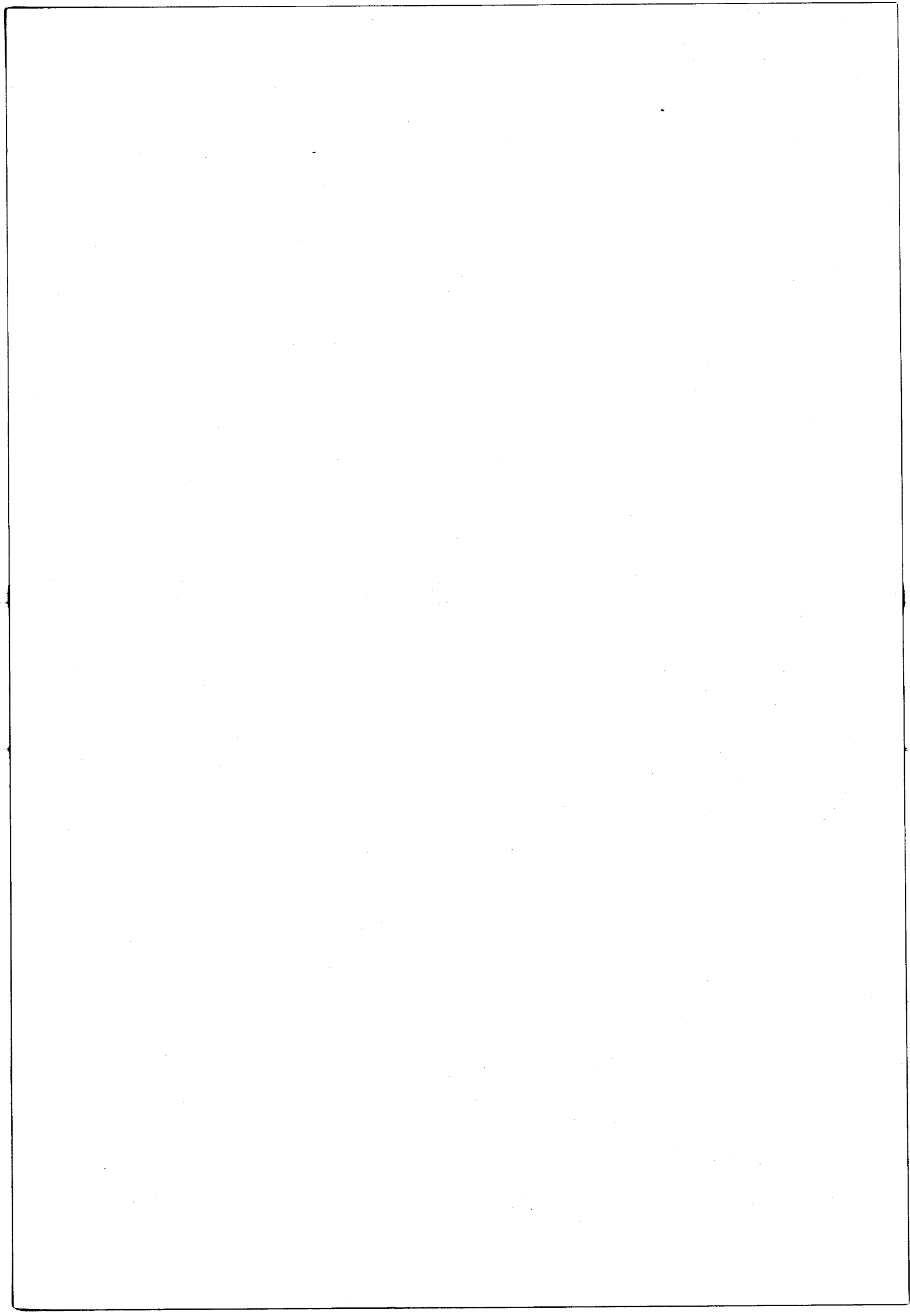
On peut donc mesurer en sortie des tensions proportionnelles aux valeurs de E, H, et H/E. Un millivoltmètre incorporé permet de contrôler E ou H par commutation pendant la mesure de H/E.

### II-4 Conclusion

Cet appareil est, dans sa conception, particulièrement apte au travail sur le terrain. Il ne pèse pas plus de 20 kg lorsqu'il est en service et on peut aisément le ranger dans le coffre d'une voiture légère.

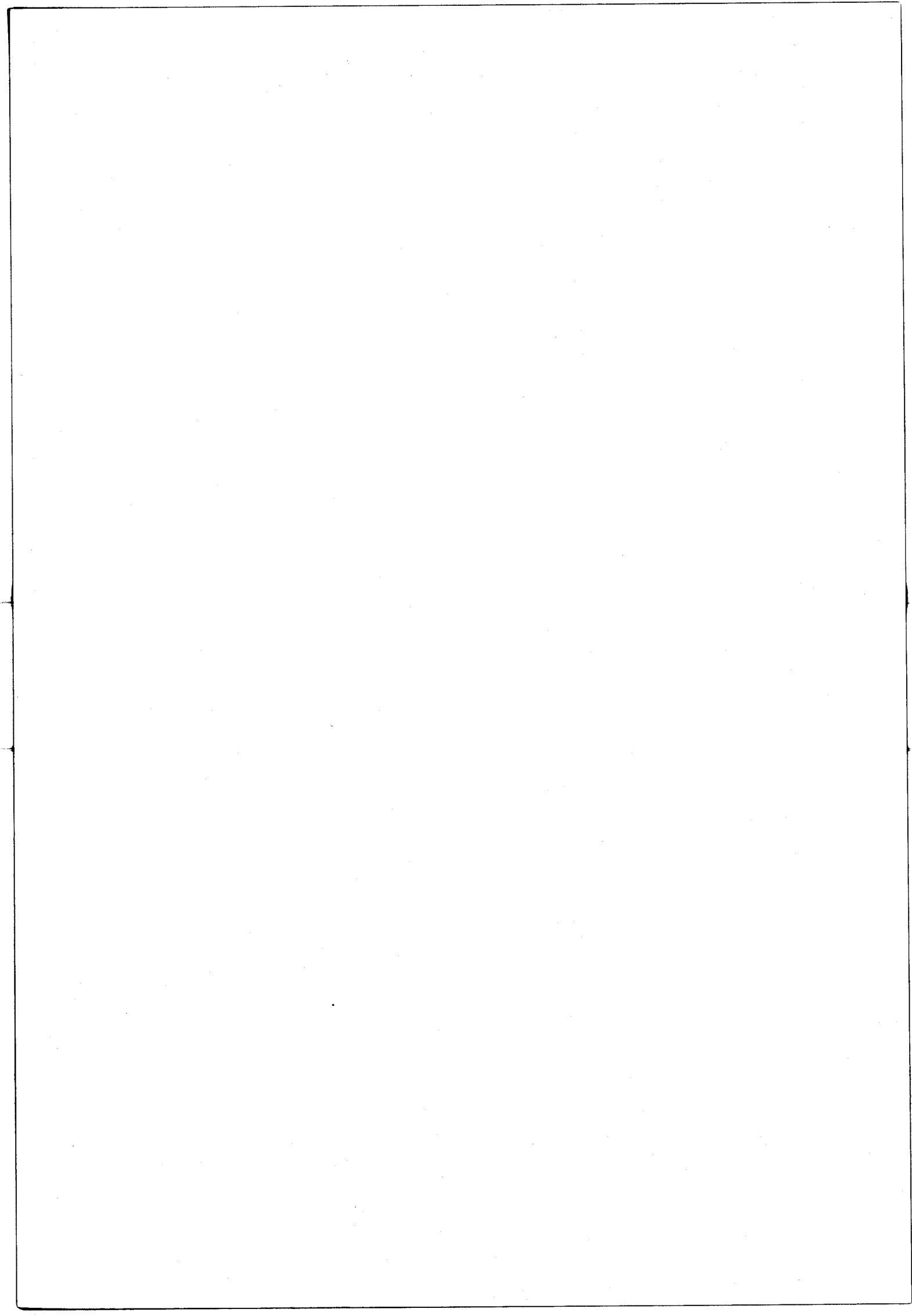
Sa maintenance est réduite :

- quelques amplificateurs opérationnels de rechange,
- une trousse d'électricien pour réparer les conducteurs qui peuvent s'endommager,
- un oscilloscope,
- des rouleaux de papier d'enregistrement et des encriers en réserve pour l'enregistreur,
- un chargeur de batteries à courant constant spécialement adapté pour permettre une charge rapide (quelques heures) de toutes les batteries Cadmium-Nickel (il y en a 6).



**C H A P I T R E II**

**ETALONNAGE DE L'APPAREILLAGE**



## I - GENERALITES

### I-1 Paramètres à étalonner

Le prototype étant constitué de plusieurs éléments, une série d'étalonnages complémentaires les uns des autres est nécessaire. On peut les diviser en deux :

- d'une part, tous les paramètres susceptibles de dériver quelque peu dans le temps. Ce sont tous ceux qui ont un rapport avec les montages électroniques : gains fixes et variables, réponse des filtres, sensibilité des capteurs magnétiques.

- d'autre part les conditions limites d'utilisation de l'appareil. On ne parlera que des exigences inhérentes aux modalités de réception des signaux.

### I-2 Mode opératoire

#### I-2-a Principe

On envoie à l'entrée de la chaîne électronique à étalonner, un signal sinusoïdal de fréquence et d'intensité connues. On mesure à la sortie la tension d'un signal continu. Ceci permet d'accéder immédiatement au gain de la voie en effectuant un simple rapport.

Les gains commutables ont été initialement calculés pour avoir les valeurs : 3, 5, 10, 15, 50. Mais il est exceptionnel que l'on trouve des résistances électriques permettant d'accéder à la valeur exacte voulue. Aussi doit-on étalonner ces gains pour connaître leur valeur réelle. Pour cela il suffit de les commuter un par un après avoir déterminé le gain fixe C.

En ce qui concerne les capteurs magnétiques, le principe est de les placer dans un champ magnétique contrôlé et connu, de mesurer la tension à la sortie de la voie magnétique H, et, connaissant le coefficient de l'électronique, d'en déduire la sensibilité des capteurs.

#### I-2-b Technique de mesure des coefficients d'amplification

Pour étalonner chaque chaîne de traitement, on substitue aux entrées, c'est-à-dire aux électrodes capacitatives d'un côté, au capteur magnétique de l'autre, un générateur HF.

Pour être parfaitement maître du signal d'entrée et pour qu'il soit le plus précis possible, on utilise un synthétiseur ADRET qui permet d'obtenir exactement la fréquence demandée, ici 163,84 KHz, 15,10 KHz et 10,20 KHz. Afin d'être encore plus proche des conditions normales de fonction-

nement des voies sur le terrain, on a conservé les boîtiers d'adaptation d'impédance et les câbles BNC 50  $\Omega$  entre la chaîne E et le synthétiseur, ainsi que le câble de raccordement des capteurs à la chaîne F.

Un millivoltmètre alternatif Philips HF est monté en parallèle avec l'ADRET et permet de connaître la tension efficace du signal sinusoïdal à l'entrée de la voie.

A la sortie un multimètre numérique Schlumberger donne la tension amplifiée et redressée, donc continue.

Si on le désire, on peut contrôler la qualité du signal à l'oscilloscope avant et après filtrage. Un exemple est donné sur la figure 5 : à la partie supérieure de la photo se trouve le spectre naturel des fréquences captées par le barreau ; à la partie inférieure, seule la fréquence sélectionnée traverse le filtre.

#### I-2-c Technique de mesure de la sensibilité des capteurs magnétiques

On se place en boucle d'Helmholtz. Le signal artificiel est amplifié afin d'obtenir une certaine puissance d'émission, et envoyé dans la boucle de résistance  $r$  connue pour créer un champ magnétique.

Un voltmètre mesure la tension alternative  $V$  aux bornes du dispositif d'Helmholtz, ce qui permet de connaître l'intensité  $I$  du courant parcourant le circuit ( $V = RI$ ). De là découle la valeur du champ induit grâce à la formule :

$$H = \frac{1,4 nI}{2R}$$

$R$  = rayon de la boucle,

$n$  = nombre de tours par boucle,

$I$  = intensité du courant.

Les unités sont :

$I$  en ampères efficaces,

$H$  en ampères par mètre (A/m),

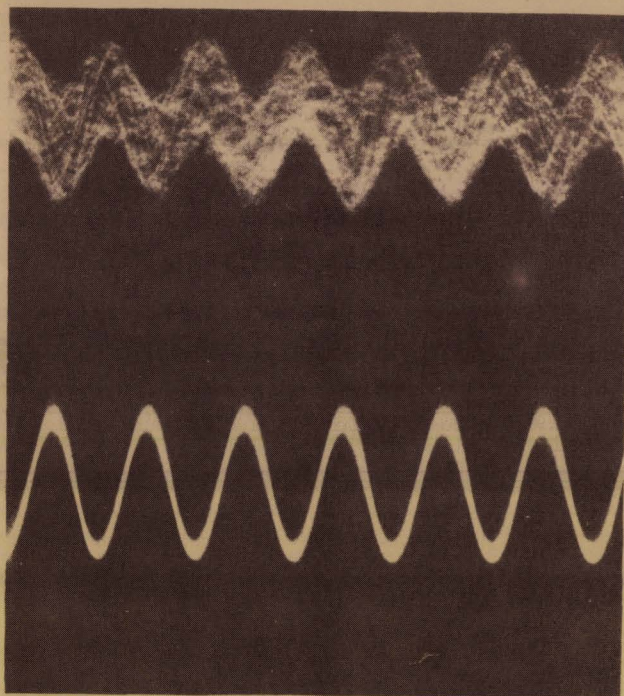
$R$  en mètres.

$$\text{Or : } 1 \text{ A/m} = 400\pi\gamma^*$$

---

\*  $\gamma$  : le gamma est une unité de champ magnétique valant  $10^{-5}$  uem CGS.





spectre naturel

fréquence sélectionnée

Figure 5 : Contrôle de la qualité du signal après filtrage.



$$H = \frac{2\sqrt{2} \cdot 1,4 \cdot 400\pi n}{2R} I$$

$$H = 2\,488 \frac{nI}{R}$$

H en mγ

I en mA<sub>eff</sub>.

Dans le cas présent, le système d'Helmholtz est constitué de deux boucles d'une spire chacune ( $n = 1$ ) et de rayon  $R = 2,58$  m. On en déduit l'expression :

$$H = 964 I$$

Le capteur est relié au montage électronique. On lie la tension continue de sortie  $V_s$  qui donne la tension alternative d'entrée  $V_e$  grâce au coefficient d'étalonnage de la voie H. Il suffit de faire le rapport d'intensité du champ sur la tension d'entrée pour connaître la sensibilité du capteur.

### I-3 Précautions à prendre pour les étalonnages

Les deux émetteurs des fréquences les plus élevées, c'est-à-dire Allouis et Châteauroux, sont très proches du CRG. C'est dire que l'intensité du signal reçu y est particulièrement élevée. Or, si cela constitue un avantage très appréciable lorsque l'on travaille sur le terrain dans toute la région avoisinante, c'est, en ce qui concerne les étalonnages, un réel handicap. En effet, il faut absolument s'affranchir des signaux extérieurs naturels et artificiels qui deviennent alors des signaux perturbateurs pouvant amener des battements avec le signal artificiel synthétisé.

#### I-3-a Les systèmes de traitement électronique

C'est pourquoi les voies telluriques et magnétiques sont testées en cage de Faraday.

Cependant, une difficulté qui ne peut être entièrement résolue, est l'alimentation des différents organes de mesure et de contrôle. Il est inutile de chercher à les placer dans la cage car le câble du secteur y conduit tous les parasites dont on veut s'isoler.

Aussi utilise-t-on un voltmètre numérique fonctionnant sur batteries pour mesurer la tension redressée de sortie. Celui-ci est installé dans la cage et ne perturbe pas les mesures.

Mais le synthétiseur et le millivoltmètre alternatif restent à l'extérieur de l'enceinte. Un seul câble, dont le blindage est à la terre, traverse la cage et y pénètre : c'est celui qui relie les entrées à l'Adret. Sa longueur est réduite autant que faire se peut afin que les champs naturels y induisent un courant perturbateur suffisamment faible pour qu'il soit considéré comme négligeable.

Ces précautions sont inutiles pour l'étalonnage du 10,2 KHz : d'une part, l'émetteur est situé fort loin (Bratland, Norvège) ; l'intensité du champ est donc faible ; d'autre part, on a dit le caractère particulier du signal (émission d'une seconde toutes les dix secondes).

On peut donc effectuer l'étalonnage tout en sachant que toutes les dix secondes la valeur aberrante est due à la période d'émission de l'émetteur.

### I-3-b Les capteurs magnétiques

De même que pour l'étalonnage des systèmes de traitement électronique, il faut s'affranchir des signaux des émetteurs et faire en sorte que le champ naturel capté par le barreau soit négligeable devant le champ créé dans la boucle d'Helmholtz (I-2-c).

Le problème est simple à résoudre : il suffit de reproduire un champ exactement perpendiculaire aux champs de tous les émetteurs. Leurs vecteurs magnétiques sont contenus dans le plan horizontal, le vecteur H de la boucle d'Helmholtz sera donc vertical. C'est la raison pour laquelle les deux boucles du dispositif sont horizontales et superposées. Il ne reste qu'à placer le capteur vertical pour ne plus mesurer qu'une composante infime, théoriquement nulle, du champ extérieur.

## II - RESULTATS

### II-1 Etalonnage des voies

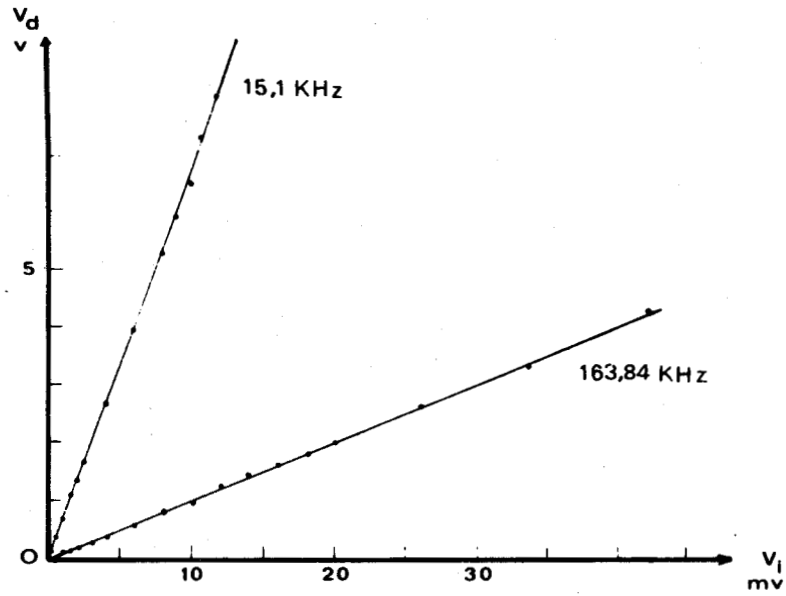
#### II-1-a Risques de saturation

Afin d'effectuer des mesures correctes et cohérentes, il convient de bien connaître les limites acceptables en tension, aussi bien à l'entrée qu'à la sortie des voies. Théoriquement, les amplificateurs opérationnels produisent un signal amplifié linéairement en fonction du signal d'entrée.

Encore ne faut-il pas dépasser leurs possibilités en les saturant, et, au contraire, permettre leur fonctionnement normal en leur fournissant un courant suffisamment élevé.



a - voie E aux 3 fréquences.



b - voie H aux 3 fréquences.

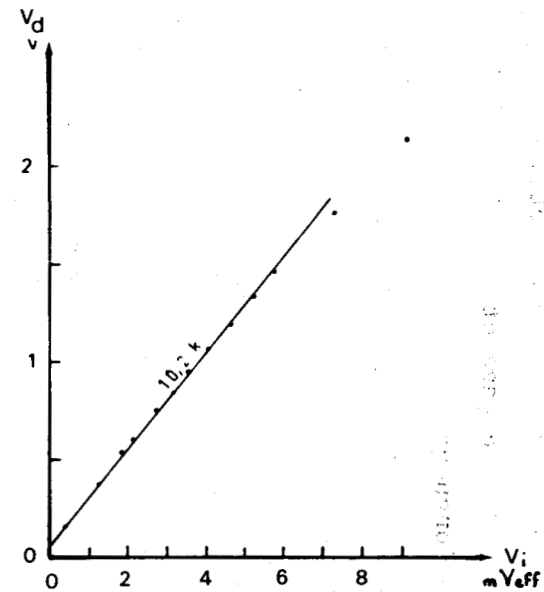
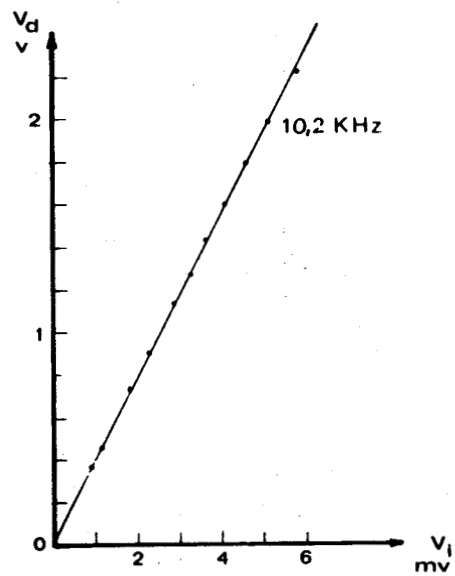
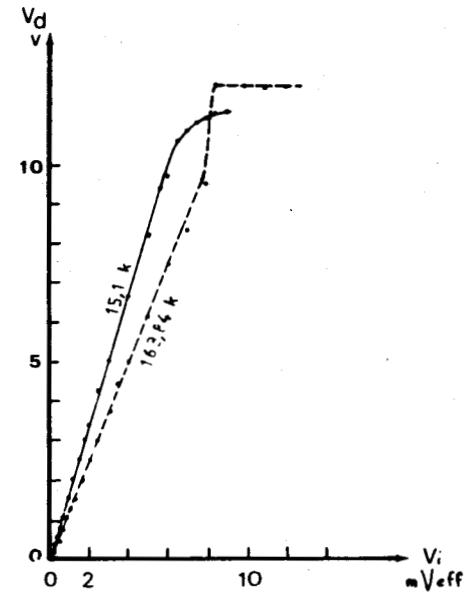


Figure 6 : Risques de saturation : réponse des chaînes électroniques en fonction de la tension d'entrée en cage de Faraday.

Les études (figure 6) montrent que les amplificateurs HARRIS 2625 répondent toujours linéairement jusqu'à des tensions au moins égales à celles des batteries d'alimentation (12 V). En fait, ce sont les suiveurs (LM 310)\* situés immédiatement à l'entrée qui risquent de se saturer si le signal est trop fort.

En pratique, on se limite à une tension de sortie  $V_s$  égale à 2 volts pour parer à toute éventualité de ce genre.

#### II-1-b Détermination des gains fixes C

On appelle gain fixe C le gain minimum de la chaîne d'amplification.

Toutes les mesures et coefficients sont exprimés en mV = (mV continu) et  $mV_{c.c.}$  (mV crête-crête ; c'est la somme des valeurs maximales de deux alternances par opposition au mV efficace qui est la somme de la valeur moyenne de deux alternances). On obtient de la sorte l'amplitude réelle des oscillations des signaux.

Différents étalonnages sont regroupés dans le tableau 1.

---

\* Suiveur LM 310, composant dont l'entrée est à haute impédance et la sortie à basse impédance, servant à séparer deux étages.

TABLEAU 1 : Etalonnage des gains fixes C

Fréquence	Date	VOIE E		VOIE H	
		$C$ $mV = /mV_{c.c.}$	Variation par rapport à juillet	$C$ $mV = /mV_{c.c.}$	Variation par rapport à juillet
163,84 KHz	02-75	39,834	- 1,3 %	244,1	-38,6 %
	05-75	39,376	- 2,4 %	409,3	+ 2,9 %
	06-75	40,100	- 0,6 %	398,2	+ 0,2 %
	07-75	40,357	-	397,6	-
	12-75	39,914	- 1,1 %	449,4	+13 %
15,10 KHz	02-75	229,16	- 1,7 %	574,04	+ 2,6 %
	05-75	233,50	+ 0,1 %	572,00	+ 2,3 %
	06-75	237,46	+ 1,8 %	560,40	+ 0,2 %
	07-75	233,17	-	559,20	-
	12-75	236,27	+ 1,3 %	574,32	+ 2,7 %
		$mV_{eff}/mV_{c.c.}$		$mV_{eff}/mV_{c.c.}$	
10,2 KHz	06-75	137,6		92,6	

Le 10,2 KHz n'a été étalonné qu'une seule fois pour une étude en collaboration avec la SNPA\* en Ardèche. Par la suite les conditions pénibles du travail eu égard à la fragilité de la construction du prototype, n'ont plus permis l'utilisation de cette fréquence.

Les gains fixes C utilisés pour tous les calculs de résistivité des différentes phases de terrain sont ceux de juillet 75. C'est un choix arbitraire mais, comme on peut s'en apercevoir, les variations notées d'un étalonnage à l'autre sont très faibles et toujours inférieures à 3 %, ce qui peut être attribué à la finesse de ce genre de mesures.

\* SNPA : Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine.

Remarques :

Dès que l'appareil fut terminé, en février, il s'est avéré nécessaire de vérifier le bon fonctionnement de la voie F à 163,84 KHz. Les valeurs de résistivité calculées à partir de la valeur de C ne coïncidaient que très peu avec celles obtenues par d'autres méthodes géophysiques. Une réparation immédiate a permis d'obtenir de bien meilleurs résultats.

Une très légère modification (remplacement d'amplificateurs opérationnels 2625) de la voie H a augmenté le coefficient d'amplification à 163,84 KHz peu avant le dernier étalonnage de décembre 75. Désormais, c'est cette valeur qu'il faut utiliser pour les futures études.

II-1-c Détermination des gains variables

Les deux chaînes électroniques E et H possèdent des gains commutables, par l'opérateur, en station. Leurs valeurs théoriques sont : 1 - 3 - 5 - 10 - 15 - 50. Les valeurs réelles sont obtenues très simplement de la même manière que pour les gains fixes. Le détail d'un calcul est donné en exemple dans le tableau n° 2, il s'agit de la voie H à 163,84 KHz.

TABLEAU 2 : Détail d'un calcul des gains commutables

gain théorique	$V_s$	$V_e$	$V_e$	$C = V_s/V_e$ au gain 1	$V_s/V_e$	gain réel
	mV=	mV <sub>eff</sub>	mV <sub>c.c.</sub>	mV=/mV <sub>cc</sub>	mV=/mV <sub>cc</sub>	
	(1)	(2)	(3)= $2\sqrt{2}(2)$	(4)=(1)/(3)	(5)=(1)/(3)	(6)=(5)/(4)
1	: 450	: $4 \cdot 10^{-1}$	: 1,132	: 397,60	:	: 1
3	: 450	: $1,3 \cdot 10^{-1}$	: 0,369	:	: 1217,37	: 3,06
5	: 450	: $7,8 \cdot 10^{-2}$	: 0,221	:	: 2039,73	: 5,13
10	: 450	: $3,58 \cdot 10^{-2}$	: 0,101	:	: 4435,22	: 11,15
15	: 452	: $2,42 \cdot 10^{-2}$	: 0,068	:	: 6607,41	: 16,62
50	: 448	: $6,58 \cdot 10^{-3}$	: 0,018	:	: 25054,80	: 60,50

Le tableau 3 livre, selon le même principe de calcul, la valeur réelle de tous les gains commutables.

TABLEAU 3 : Valeur réelle des gains commutables

Fréquence	Voie	1	3	5	10	15	50
163,84 KHz	E	1	3,07	5,06	10,70	16,40	51,6
	H	1	3,06	5,13	11,15	16,62	60,5
15,10 KHz	E	1	3,00	5,00	10,10	15,26	51,2
	H	1	2,90	5,00	10,20	14,97	55,0
10,20 KHz	E	1	-	-	9,86	-	39,9
	H	1	-	-	8,82	-	38,4

Les différences de valeur obtenues d'un étalonnage à l'autre n'étant fonction que du gain C, les pourcentages de variation sont là aussi très faibles.

#### II-1-d Réponse des filtres

Chaque fréquence est sélectionnée par un filtre passe bande très aigu. Il faut bien sûr que chaque voie E et H soit accordée sur la même fréquence afin que les amplitudes mesurées en sortie, correspondent à l'onde électrique et à l'onde magnétique du même signal.

Les six filtres (2 par fréquence) sont testés en cage de Faraday. On applique à l'entrée de la voie une tension alternative connue mais dont on contrôle la fréquence. On mesure la tension redressée en sortie en faisant varier la fréquence du signal. C'est ainsi que sont tracés les graphiques des fonctions  $V_s = f(F)$  (figure 7).

Ces graphiques montrent l'étroitesse de la bande passante des filtres. Leur allure caractéristique leur a valu leur nom : filtre en "sombbrero". On remarque que l'accord sur chaque fréquence n'est pas parfait d'une voie à l'autre. Mais la construction des filtres est l'opération qui a certainement procuré le plus de difficultés lors de la mise au point de l'appareillage.



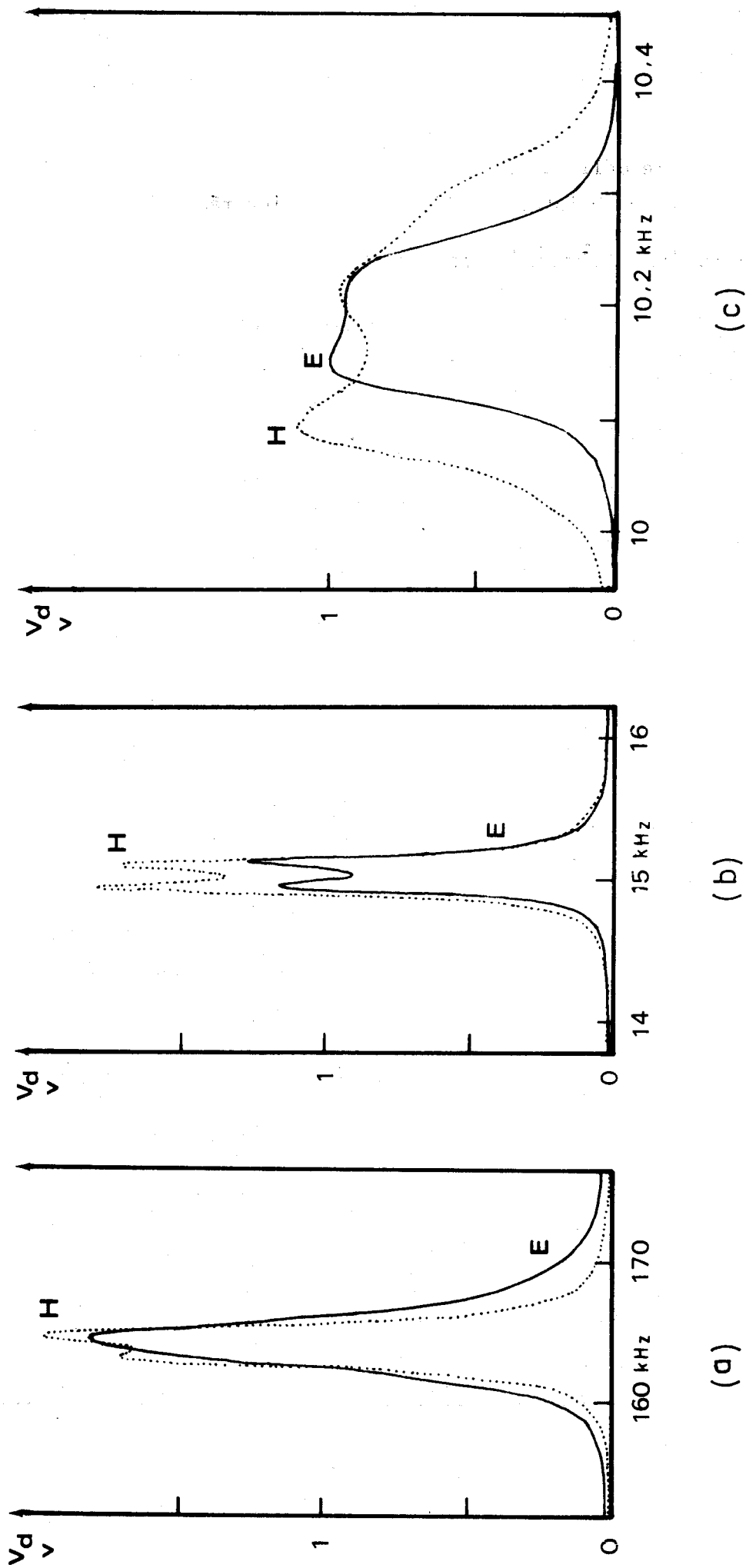


Figure 7 : Réponse des filtres à un signal de fréquence variable.

- a - à 163,84 KHz.
- b - à 15,1 KHz.
- c - à 10,2 KHz.



En tenant compte de l'extrême délicatesse d'un accord parfait entre deux filtres, on peut estimer, sans crainte, que l'accord est bien réalisé.

## II-2 Sensibilité des capteurs magnétiques

### II-2-a Risques de saturation

Tout comme en cage de Faraday, on teste le champ maximum et le champ minimum que tolèrent et nécessitent les montages électroniques. On détermine ainsi directement les limites inférieure et supérieure du courant injecté dans la boucle.

Les graphiques des fonctions  $V_s = f(V_I)^*$  sont reportés sur la figure 8. On peut de la sorte repérer les portions linéaires des courbes. C'est d'après ces droites que l'on calcule la sensibilité des capteurs magnétiques dans le paragraphe suivant.

### II-2-b Résultats

La résistance du dispositif d'Helmholtz est déterminée de façon qu'elle soit une résistance de charge adaptée à l'amplificateur d'injection. Différents réglages sont évidemment possibles. Le premier a donné 41  $\Omega$  pour les fréquences de 15,10 et 163,84 KHz. Le second, effectué à un autre moment, a donné 90  $\Omega$  pour 10,2 KHz.

Pour un courant de 0,244 mA<sub>eff</sub> ( $V_s = 10$  mV<sub>eff</sub>,  $R = 41 \Omega$ ) le champ magnétique créé est de 235 mγ.

Cela peut paraître faible comme valeur d'un champ induit qui doit masquer le champ naturel des émetteurs voisins. En fait, le courant injecté est 100 fois plus fort et un diviseur par 100 est introduit à l'entrée des électroniques pour les protéger.

Le détail du calcul des sensibilités des capteurs est donné dans le tableau 4.

---

\*  $V_I$  : tension injectée dans la boucle.

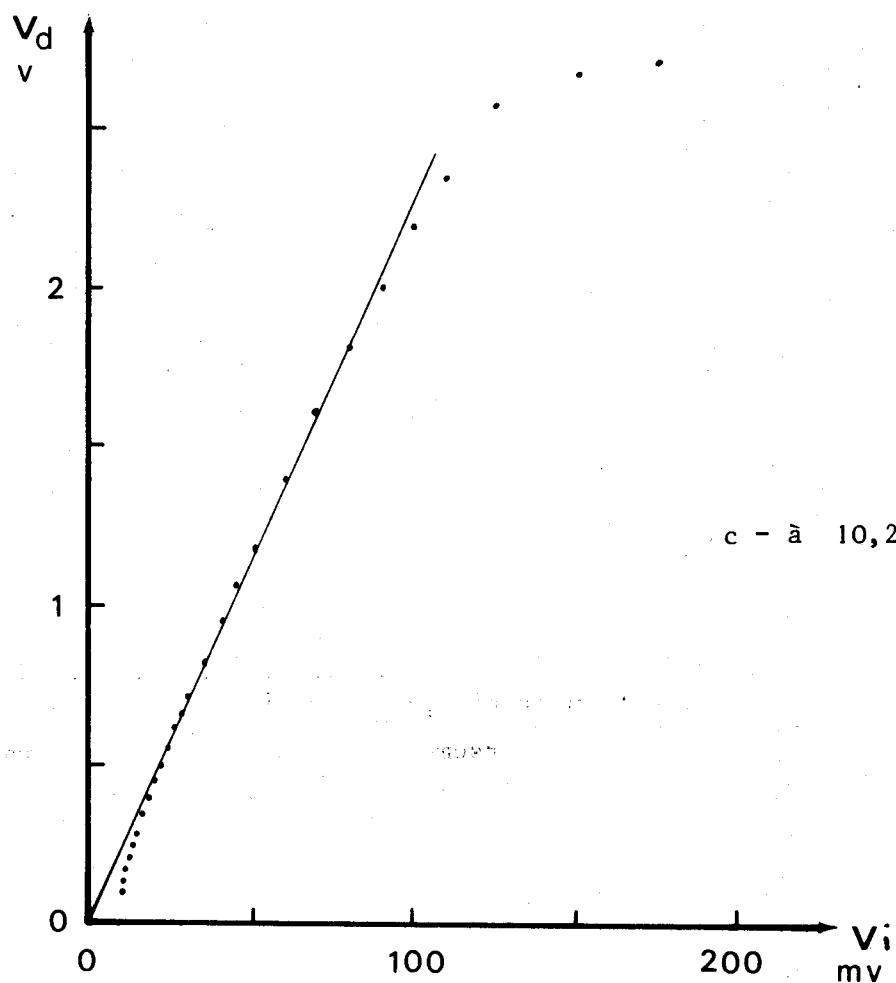
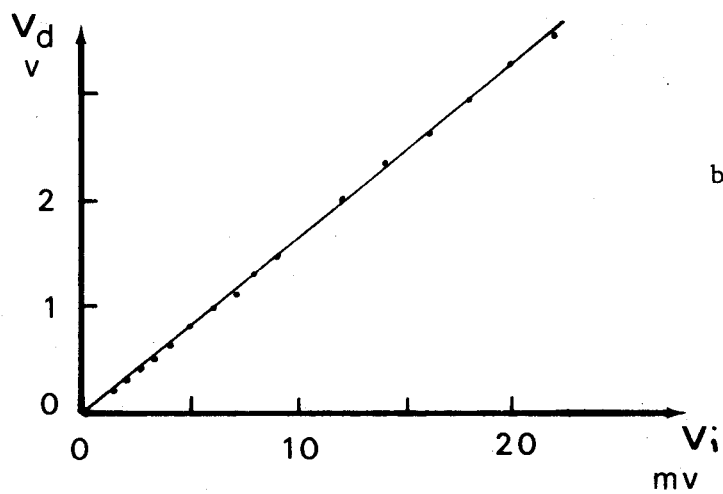
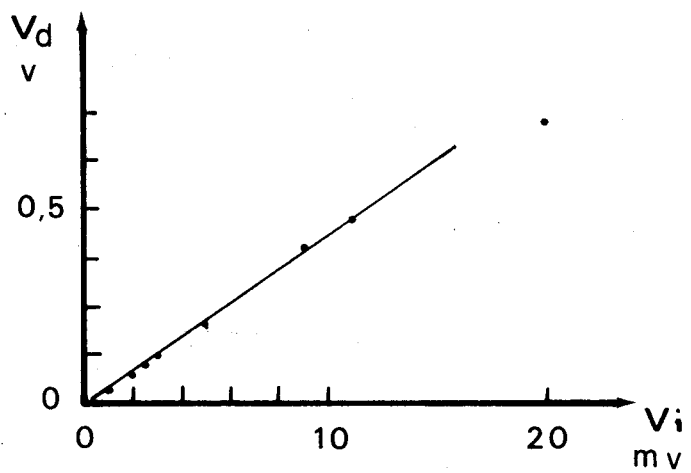


Figure 8 : Risques de saturation : réponse des chaînes électroniques magnétiques en fonction de la tension d'injection en boucle d'Helmholtz.

TABLEAU 4 : Calcul des sensibilités des capteurs

Fréquence	$V_I$	$r$	$I = \frac{V_I}{r}$	$H = 964I$	$V_s$	$C$	$V_e = \frac{V_s}{C}$	Sensibilité = $\frac{V_e}{H}$
KHz	mV <sub>eff</sub>	$\Omega$	mA <sub>eff</sub>	mγ <sub>cc</sub>	mV=	mV=/mV <sub>cc</sub>	mV <sub>cc</sub>	mV/mγ
163,84	10	41	0,244	235,2	306	397,6	0,7696	$3,27 \times 10^{-3}$
15,10	10	41	0,244	235,2	1620	559,2	2,897	$12,3 \times 10^{-3}$
	-	-	-	-	mV <sub>eff</sub>	mV <sub>eff</sub> /mV <sub>cc</sub>	-	mV/mγ
10,2	50	90	0,555	535,5	1178	92,6	12,72	$23,7 \times 10^{-3}$

Ce tableau montre que la sensibilité des capteurs varie selon l'émetteur que l'on désire capter.

En effet, il faut se souvenir que la vocation des émetteurs diffère pour chacun d'eux : il n'existe qu'un seul émetteur de Radio France Inter sur 163,84 KHz, et il se trouve au centre de la métropole. Il est donc inutile de posséder un capteur très sensible ( $3,27 \cdot 10^{-3}$  mV/mγ). En France, il saturerait les voies ; à l'étranger, il ne capterait que du bruit de fond car la portée de l'émetteur est insuffisante.

Par contre, les deux autres capteurs sont respectivement 4 fois et 7 fois plus sensibles. C'est qu'en effet existent à la surface du globe des réémetteurs aux mêmes fréquences. On est donc susceptible de pouvoir utiliser ces réseaux partout, à condition que la sensibilité des capteurs soit suffisante pour capter un signal dans les zones particulièrement éloignées des émetteurs. Ceci explique que l'appareillage a pu être expérimenté au Canada.

### II-3 Coefficients d'étalonnage pour le calcul des résistivités

Lorsque l'appareil est en station, on enregistre en sortie le rapport H/E, c'est-à-dire une valeur inversement proportionnelle à la racine carrée de la résistivité.

$$\frac{H}{E} = \sqrt{\frac{0,2T}{\rho}} \quad (\gamma, \text{mV/km}, s, \Omega\text{m})$$

Compte tenu des gains commutables affichés, des gains fixes, de la sensibilité des capteurs magnétiques, et bien sûr de la fréquence sélectionnée, il est donc aisé de calculer un coefficient pour lequel il suffira simplement de multiplier le carré du rapport enregistré H/E pour avoir la conductivité apparente du sous-sol, ou la résistivité en prenant son inverse.

Les coefficients des différents éléments de l'appareillage permettent d'introduire une nouvelle valeur,  $C_{H/E}$ , par laquelle il faudra multiplier le rapport H/E lu ou enregistré, sans unité, pour avoir le rapport des deux champs en  $\gamma/\text{mVkm}^{-1}$ . Ces valeurs sont :

- à 163,84 KHz,  $C_{H/E} = 3,17 \cdot 10^{-4} \gamma/\text{mVkm}^{-1}$
- à 15,1 KHz,  $C_{H/E} = 3,47 \cdot 10^{-4} \gamma/\text{mVkm}^{-1}$
- à 10,2 KHz,  $C_{H/E} = 6,40 \cdot 10^{-4} \gamma/\text{mVkm}^{-1}$

Ces coefficients sont calculés pour une ligne tellurique de 10 m.

Donc :

$$\rho = \frac{0,2T}{(C_{H/E})^2 (H/E)^2} \quad (\Omega\text{m}, s, \gamma/\text{mVkm}^{-1})$$

Aux trois fréquences, le calcul de  $\rho$  est immédiat et les trois formules nécessaires sont données dans le tableau 5.

TABLEAU 5 : Formulations utilisées pour le calcul de  $\rho$ 

Fréquence :	0,2 T	:	$\rho$ en $\Omega\text{m}$
:	:	:	:
163,84 KHz:	$1,22 \cdot 10^{-6}$ s	:	$\rho = \frac{12,147}{(H/E)^2}$
:	:	:	:
15,10 KHz:	$1,32 \cdot 10^{-5}$ s	:	$\rho = \frac{110}{(H/E)^2}$
:	:	:	:
10,20 KHz:	$1,96 \cdot 10^{-5}$ s	:	$\rho = \frac{47,9}{(H/E)^2}$
:	:	:	:
:	:	:	:

Ce tableau ne tient pas compte des gains commutés au gré de l'opérateur. Pour ce faire, il suffit de ramener le rapport H/E lu au gain de 1 uniquement. Par exemple, si le gain de 3 est affiché sur la voie H à 163,84 KHz, le rapport H/E est 3,06 fois (valeur réelle du gain) trop fort. Il faut donc diviser le rapport H/E par 3,06. De même, si le gain de 5 est affiché sur la voie E, le rapport H/E est 5,06 fois (valeur réelle du gain) trop faible. Il faut alors multiplier le rapport H/E par 5,06.

D'autre part, si la ligne tellurique n'a pas 10 m de longueur, il faut multiplier E, c'est-à-dire diviser H/E par le coefficient approprié pour ramener la ligne à 10 m. En particulier, avec la ligne tellurique de 2 m, le champ tellurique est 5 fois plus faible qu'avec une ligne de 10 m. Il faut donc diviser le rapport H/E par 5 pour ramener la ligne à 10 m et pouvoir utiliser l'expression de  $\rho$ .

Ces quelques corrections faites, on se rend compte de la simplicité du travail quand il s'agit de transformer une donnée purement électronique en une autre donnée, représentative du sous-sol.

#### II-4 Mesure de l'impédance des électrodes

Outre le caractère purement scientifique, la connaissance de l'impédance des électrodes représente un grand intérêt pour l'avenir. En effet, on s'est peut-être déjà rendu compte que ce type d'électrodes permettait d'accéder à n'importe quel terrain. En particulier, elles sont parfaitement utilisables là où l'on a de grandes difficultés de pénétration mécanique d'électrodes. Il serait donc extrêmement intéressant de généraliser

l'emploi de ce type et de l'étendre aux fréquences plus basses. Encore faut-il que l'impédance à ces fréquences ne soit pas trop élevée. C'est ce que l'on cherche à connaître.

On utilise la méthode dite de comparaison. Cette opération a été menée à bien en collaboration avec M. GODEAU de la SNPA.

$|Z|$  est l'impédance recherchée d'une électrode.

$R$  est une résistance variable.

En module, on a :

$$|I| = \frac{|V_2|}{R} = \frac{|V_3|}{|Z|} = \frac{|V_1|}{|R + Z|}$$

Si, en faisant varier  $R$ , on a :

$$|V_2| = |V_3|, \text{ alors on a : } R = |Z|.$$

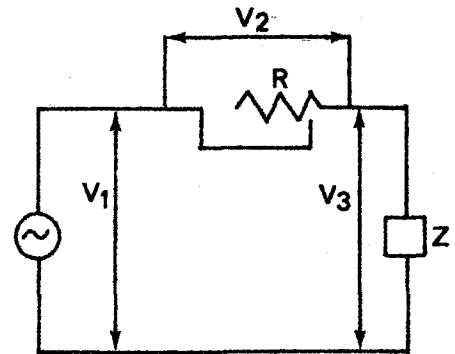


Figure 9 : Schéma du circuit

La figure 10 présente la courbe  $Z = f(\frac{1}{f})$  pour un terrain de résistivité égale à 1 000 m.

A 15,1 KHz,  $Z = 8\ 000\ \Omega$   $C = 1\ 300\ \text{pF}$ .

A 163,84 KHz,  $Z = 1\ 000\ \Omega$   $C = 1\ 000\ \text{pF}$ .

En fait, les valeurs de la capacité et de l'impédance sont des valeurs apparentes.

On suppose en première approximation que le schéma équivalent du capteur capacitif est celui représenté figure 9bis.

On imagine un générateur en série avec une résistance  $R$  qui représente la résistance du sol compris entre deux électrodes ( $R$  doit être une fonction de  $\rho$ , la résistivité), une capacité  $C_2/2$  (capacité des deux électrodes en série). Une capacité  $C_1$  représentant les pertes avec le sol est montée en parallèle.

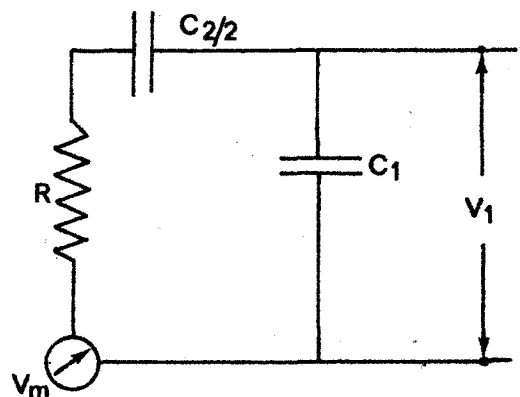


Figure 9bis : Schéma équivalent au capteur tellurique

L'admittance de sortie du générateur équivalent au capteur est :

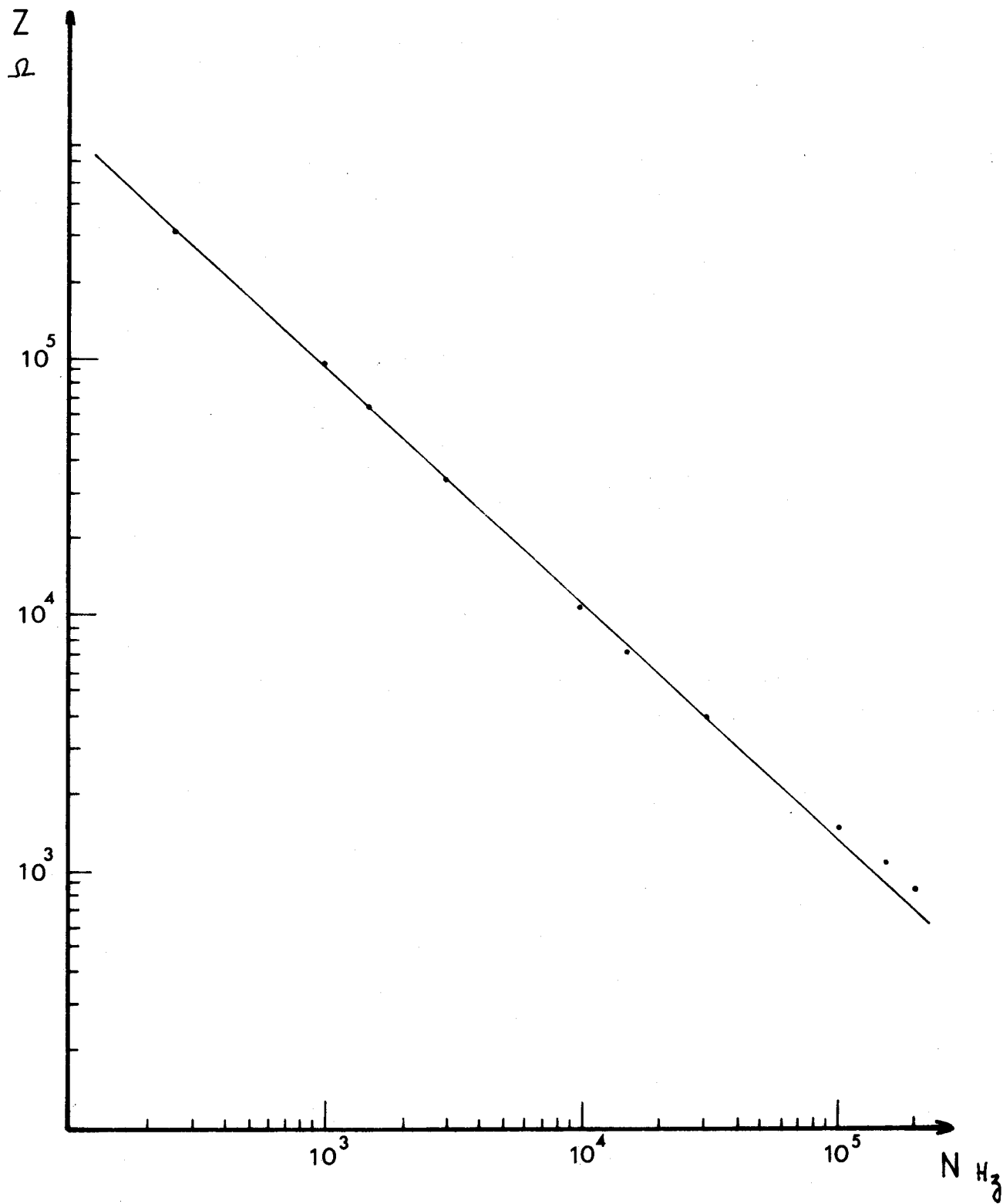


Figure 10 : Courbe  $Z = f(\frac{1}{N})$  - Variation de l'impédance d'une électrode capacitive en fonction de la fréquence sur un terrain de 1 000  $\Omega m$ .





$$y = j\omega C_1 + \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C_2}}$$

$$y = j\omega C_1 + \frac{j\omega C_2}{R\omega C_2 + 1}$$

$$\text{Soit : } y = j\omega C_1 + \frac{2j\omega C_2 + R\omega^2 C_2^2}{4 + R^2 \omega^2 C_2^2}$$

Si, comme c'est fortement probable, la capacité  $C_1$  est négligeable devant  $C_2$ , on a :

$$y \approx \frac{R\omega^2 C_2^2}{4 + R^2 \omega^2 C_2^2} + j\omega \frac{2C_2}{4 + R^2 \omega^2 C_2^2}$$

Le terme  $\frac{2C_2}{4 + R^2 \omega^2 C_2^2}$  correspond à la capacité apparente effectivement mesurée, et dont la valeur dépend de la fréquence et de la résistivité  $R$  (fonction de la résistivité du sol).

Ainsi, à 163,84 KHz, on a :

$$\text{si } R = 100 \Omega \quad C_{app} = \frac{2C_2}{4 + 0,042} \quad \text{variation de } -0,1\%$$

$$\text{si } R = 200 \Omega \quad C_{app} = \frac{2C_2}{4 + 0,17} \quad \text{variation de } -0,4\%$$

$$\text{si } R = 400 \Omega \quad C_{app} = \frac{2C_2}{4 + 0,67} \quad \text{variation de } -0,17\%$$

$$\text{si } R = 1000 \Omega \quad C_{app} = \frac{2C_2}{4 + 4,2} \quad \text{variation de } -105\%$$

On ne dispose pas suffisamment de mesures pour permettre d'infirmer ou de confirmer ce résultat théorique. Cependant, selon toute vraisemblance, il faut s'attendre à ce que la capacité apparente diminue si la résistivité du sol augmente.

## II-5 Discussion sur les limites d'utilisation en station

### II-5-a Variation de la tension de détection en fonction de la longueur de la ligne tellurique

Il est dit plus haut que, pour rendre plus léger et plus maniable l'ensemble des éléments de l'appareil MT, la ligne tellurique a été réduite à 2 m. Ceci apporte l'avantage considérable de pouvoir se déplacer sur pratiquement n'importe quel terrain. Les deux électrodes capacitatives sont noyées dans la même feuille de caoutchouc.

On a cherché à vérifier en forêt de Bellary, à proximité du C.R.G. que l'intensité de la tension de détection était simplement proportionnelle à la longueur de la ligne tellurique.

Pour cela, on dispose de deux électrodes capacitatives construites sur le même modèle que le tapis de 2 m, mais indépendantes l'une de l'autre; on peut donc les séparer à volonté.

Pour chaque valeur de l'intervalle entre les deux plaques, on a mesuré la tension de sortie  $V_s$  à chaque fréquence. Les données sont regroupées dans le tableau 6. Dans ce tableau figurent également les dérivées de la tension par rapport à la distance à chaque point de mesure. Ce sont ces dérivées qui sont reportées sur la figure 11.

La linéarité du champ est respectée à partir d'une longueur de ligne de 7 à 8 m, distance en deçà de laquelle les valeurs ne respectent plus le coefficient de proportionnalité. Il s'agit d'un effet de la dimension des plaques.

En effet, contrairement aux électrodes résistives, les plaques ont une grande surface ( $1 \text{ m}^2$ ). Toute la surface de l'électrode se trouve donc au même potentiel, et affecte, par cela même, le champ électrique dans le sol. La mesure de la distance du centre d'une électrode au centre de l'autre électrode n'est valable que si cette distance est supérieure à 7 m.

Pour des dimensions plus courtes de la ligne tellurique, l'influence de la surface des plaques se fait sentir.

Aussi est-il nécessaire de calculer un coefficient de correction pour le tapis de 2 m, coefficient qui ne dépend que de la géométrie des capteurs et de leurs surfaces.

Cette correction est donnée dans le tableau 7.

TABLEAU 6 : Evolution de la tension de détection en fonction de la longueur de la ligne tellurique.

Longueur de ligne d	15,1 KHz	Dérivée = $V_s/d$	163,84 KHz	Dérivée = $V_s/d$
	$V_s$ mV		$V_s$ mV	
2	250	125	740	370
3	382	127,3	1 148	382,66
4	543	135,75	1 574	393,5
5	685	137	2 000	400
6	837	139,5	2 400	400
7	987	141	2 880	411,4
8	1 152	144	3 320	415
9	1 300	144,4	3 690	410
10	1 435	143,5	4 120	412
12	1 743	145,25	5 010	417,5
14	2 050	146,4	5 800	414,28
16	2 350	146,875	6 200	387,5
18	2 600	144,4		
20	2 920	146		Saturation





Figure 11 : Variation du paramètre  $V_s/d$  en fonction de la longueur de la ligne tellurique.

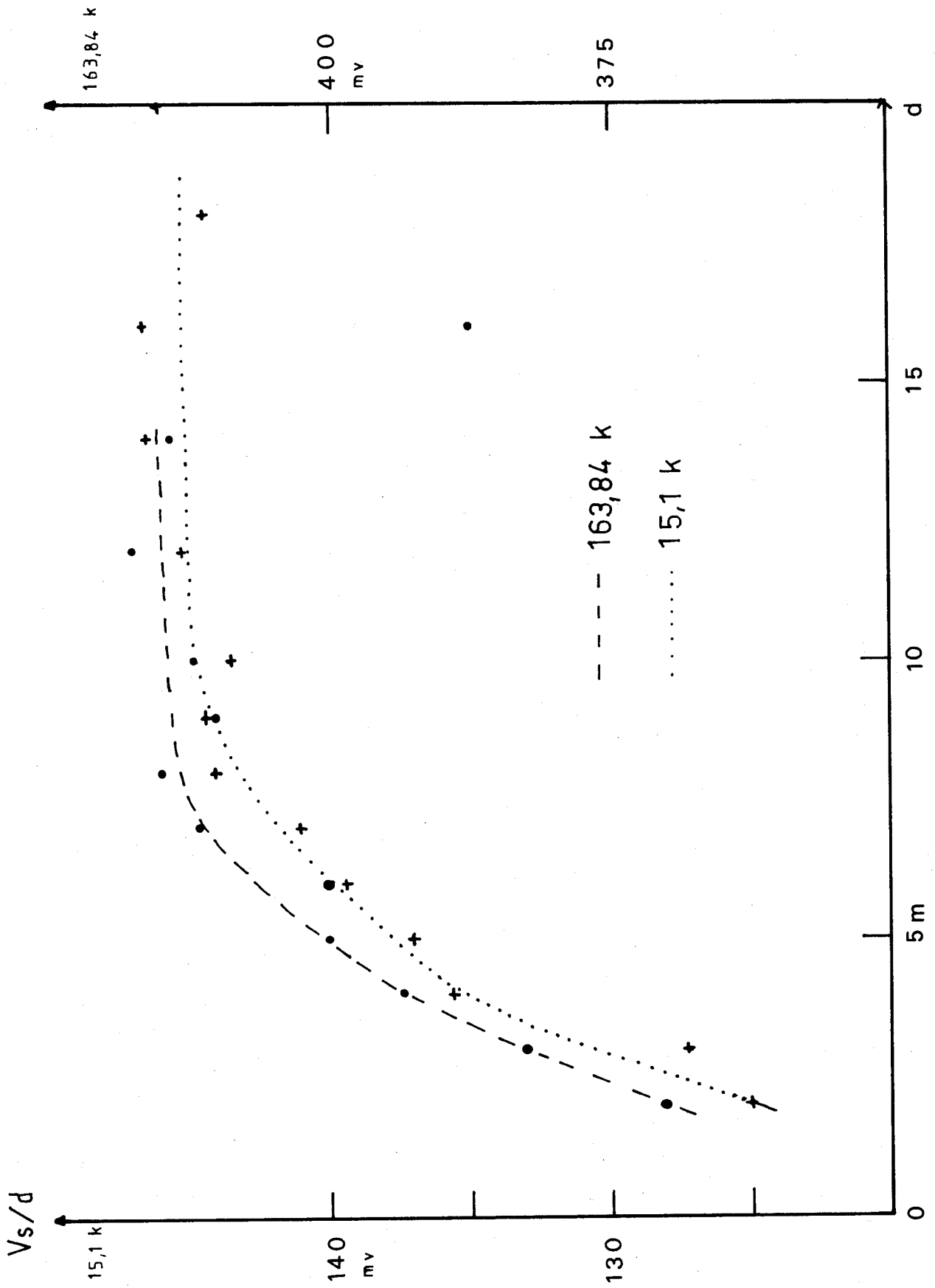


TABLEAU 7 : Correction à apporter sur E à Bellary

Fréquence KHz	Moyenne des dérivées (de 8 à 20m)	Valeur théorique de E avec d = 2 m	Valeur mesurée avec d = 2 m	% d'erreur
15,10	145,10	290,2 mV	275 mV	- 5,2 %
163,84	413,38	826,8 mV	815 mV	- 1,4 %

On admet que les rectifications à apporter sont suffisamment faibles pour ne pas les faire entrer en ligne de compte. En effet 5 % sur E correspondent à 10 % sur  $\rho$ . C'est-à-dire que si l'on calcule une résistivité de 50  $\Omega$ m, elle peut en fait être comprise entre 45 et 55  $\Omega$ m, différence sans gravité dans une interprétation géophysique.

Il semble donc que l'on soit parfaitement autorisé à négliger cette correction. Cependant, il peut parfois être utile de connaître la valeur la plus précise possible de la résistivité. Il faut se souvenir alors qu'existe une correction sur E.

#### II-5-b Variation de la tension de détection en fonction de l'orientation de l'appareil dans le champ électromagnétique

Lorsqu'au cours d'un trainé ou d'une série de mesures, on est contraint de suivre un chemin sinueux, la ligne tellurique d'une part, le capteur magnétique d'autre part, changent constamment d'orientation dans le champ électromagnétique.

Or il est évident que les émetteurs étant directionnels, l'intensité de la composante mesurée varie. Le problème est de savoir si le rapport H/E varie, bien qu'il ne le devrait pas.

Pour cela, on a simplement fait tourner le traineau sur lui-même. La figure 12 a montre l'évolution des champs  $E_x$  et  $H_y$  et du rapport  $H_y/E_x$  en fonction de l'azimut. L'émetteur d'Allouis est au N 110 gr.

On voit que si l'on enregistre séparément le champ tellurique et le champ magnétique, les données ne sont plus cohérentes ni comparables entre elles car la tension de détection diminue fortement de part et d'autre de la direction à l'émetteur.

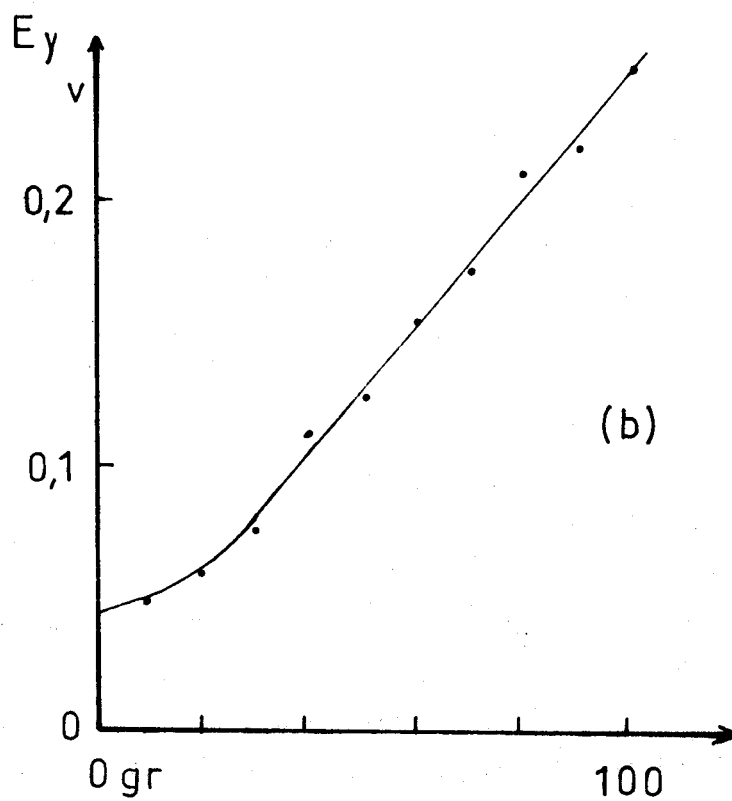
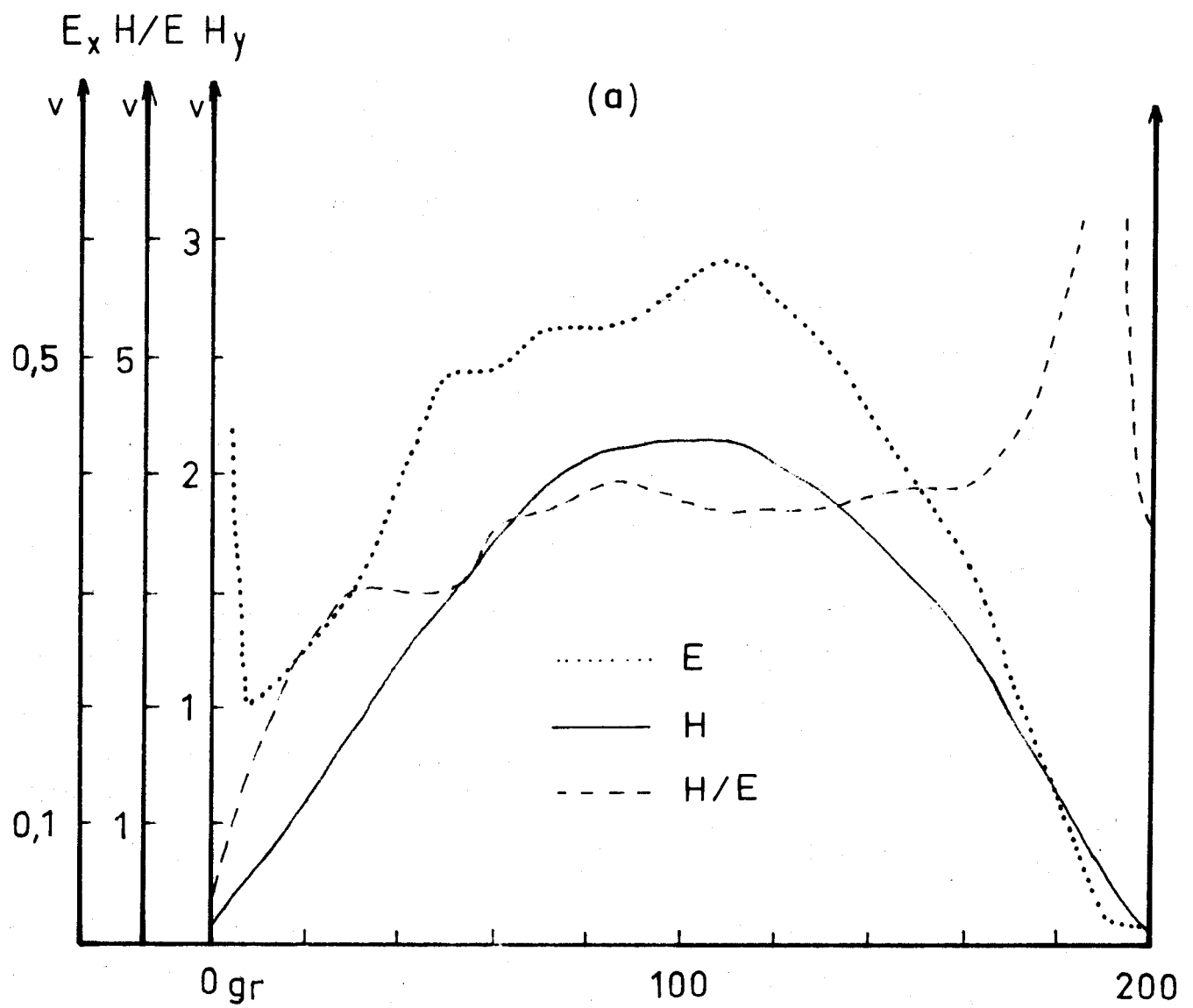


Figure 12 : Influence de la rotation de l'appareillage sur la détection.

a -  $E_x, H_y, H_y/E_x$ .

b -  $E_y$ .

Par contre, le rapport H/E, qui est fonction des conditions de propagation des ondes à travers l'air et le sol et nullement de l'intensité intrinsèque de ces ondes, reste quasiment constant entre N60 et N160 gr. C'est dire qu'il n'est pas à craindre de variations notables du rapport H/E jusqu'à 50 gr environ de part et d'autre de la direction à l'émetteur.

Le tapis, dont on a encore que très peu parlé, capable de capter la composante tellurique perpendiculaire au sens du déplacement ( $E_y$ ) alors que le tapis de 2 m capte la composante parallèle au déplacement ( $E_x$ ), est schématisé figure 13.

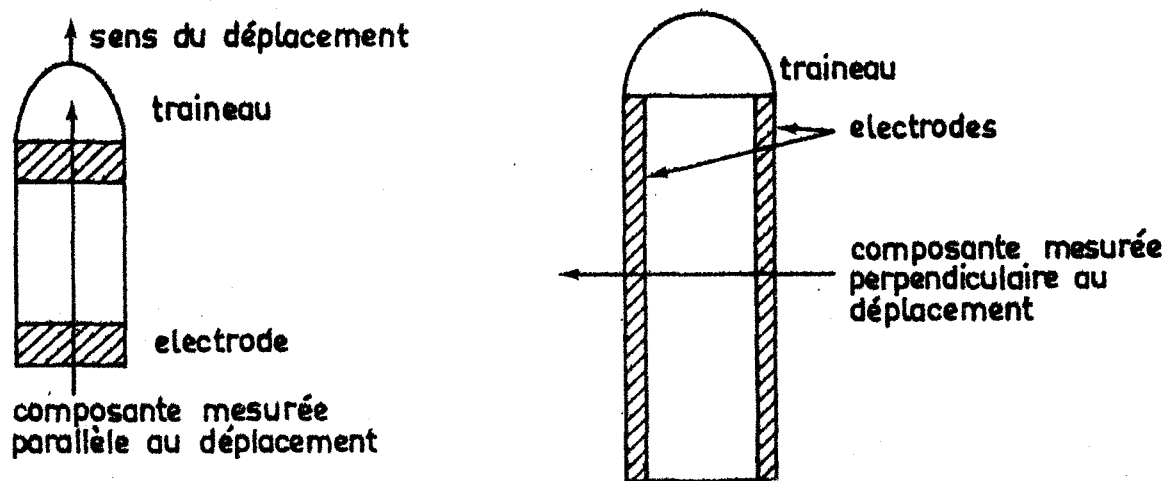


Figure 13 : Schéma comparatif des deux capteurs telluriques

L'un a une longueur de ligne de 2 m, on l'appellera tapis de 2 m, l'autre une longueur d'1 m, on l'appellera tapis de 1 m.

En ce qui concerne la détection de la composante tellurique par le tapis de 1 m (figure 12b), on note que la tension de sortie varie fortement même pour un faible changement d'orientation. Ceci implique que de légères oscillations du tapis de part et d'autre de sa direction de déplacement amèneront des fluctuations non négligeables dans la tension de détection. Les études seront, avec ce capteur, délicates et on évitera de l'utiliser comme seul moyen de prospection.

L'expérience a montré que, lorsqu'on s'éloigne des émetteurs, l'angle à l'intérieur duquel les mesures sont correctes, s'élargit de façon appréciable. Dans les Landes, avec le tapis de 2 m, on peut même effectuer des mesures du rapport H/E dans n'importe quelle direction sans que la valeur soit notablement affectée. Ceci dépendant en grande partie de l'éloignement à l'émetteur, il convient, dès l'arrivée sur un site, de faire rapidement un contrôle afin de connaître les limites dans lesquelles il est nécessaire de travailler.

#### II-5-c Remarques sur la stabilité de la puissance des émetteurs

Lors de la phase de terrain de ce travail, différents problèmes, inexplicables a priori, se sont posés ; entre autres, des difficultés de réception du signal 15,10 KHz, et des variations d'amplitude rapides et importantes.

L'enregistrement en continu (station fixe) de l'amplitude du champ magnétique de l'émetteur de Châteauroux a été réalisé sur le site du CRG. Comme le montre la figure 14, les variations à la réception sont très importantes. A 11 h, la tension de sortie est de 1,8 volt, à 16 h elle n'est plus que de 0,8 V, soit une baisse de puissance de près de 60 %. Ce phénomène se répète avec encore plus d'acuité par la suite.

Quelques jours plus tard, une expérience identique a été tentée pendant la matinée ; les résultats sont comparables. Et on verra par la suite que lors de l'étude du caveau sur le territoire du CRG, ce phénomène est encore apparu.

Quelles que soient les raisons, par ailleurs obscures, de ces fluctuations, on comprend l'intérêt d'une telle remarque et les enseignements que l'on peut en tirer.

Tout d'abord, cela explique que lorsqu'on s'éloigne de plusieurs centaines de kilomètres de l'émission, une série de mesures puisse être interrompue, faute de recevoir un signal suffisamment puissant. Cela implique également l'impossibilité de corrélérer des valeurs de E ou de H mesurées à des moments différents.

Il en résulte donc, lorsqu'on utilise la fréquence 15,1 KHz, qu'on ne peut compter avoir de résultats comparables d'un moment à l'autre, voire d'un site à l'autre qu'avec le rapport H/E. Encore faut-il, à grande distance, que la détection du signal puisse se réaliser, ce qui n'est pas toujours le cas.



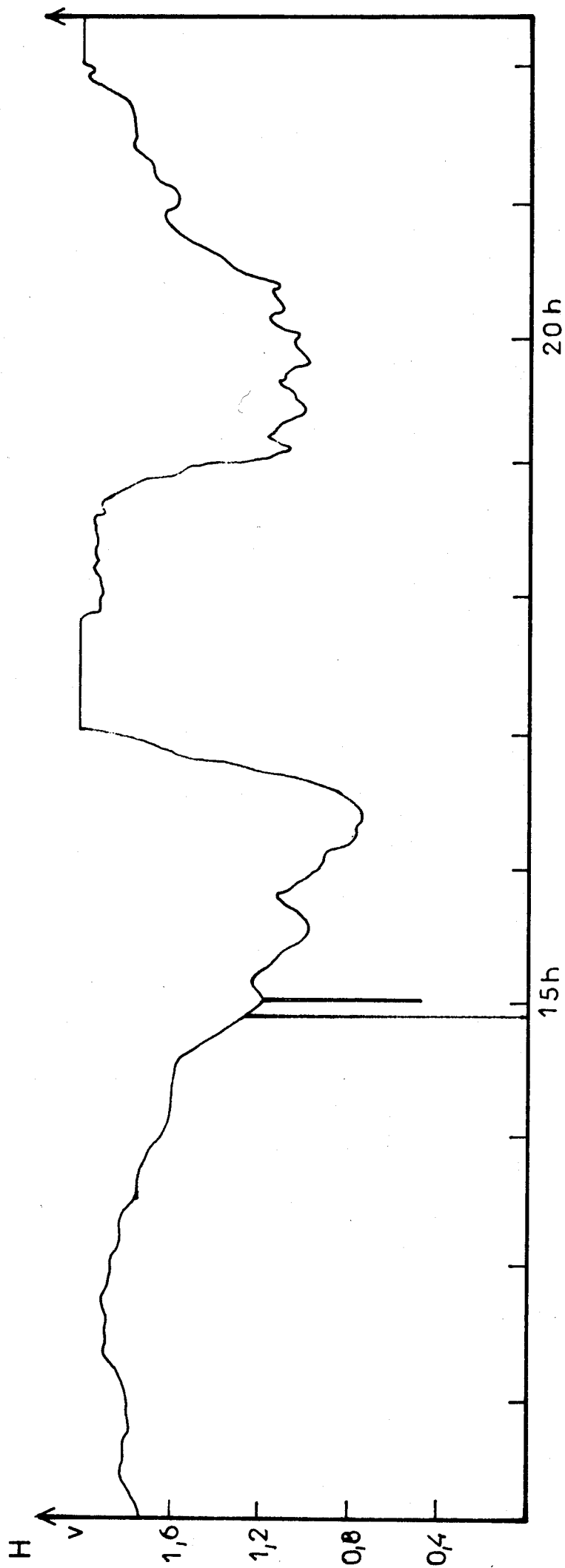
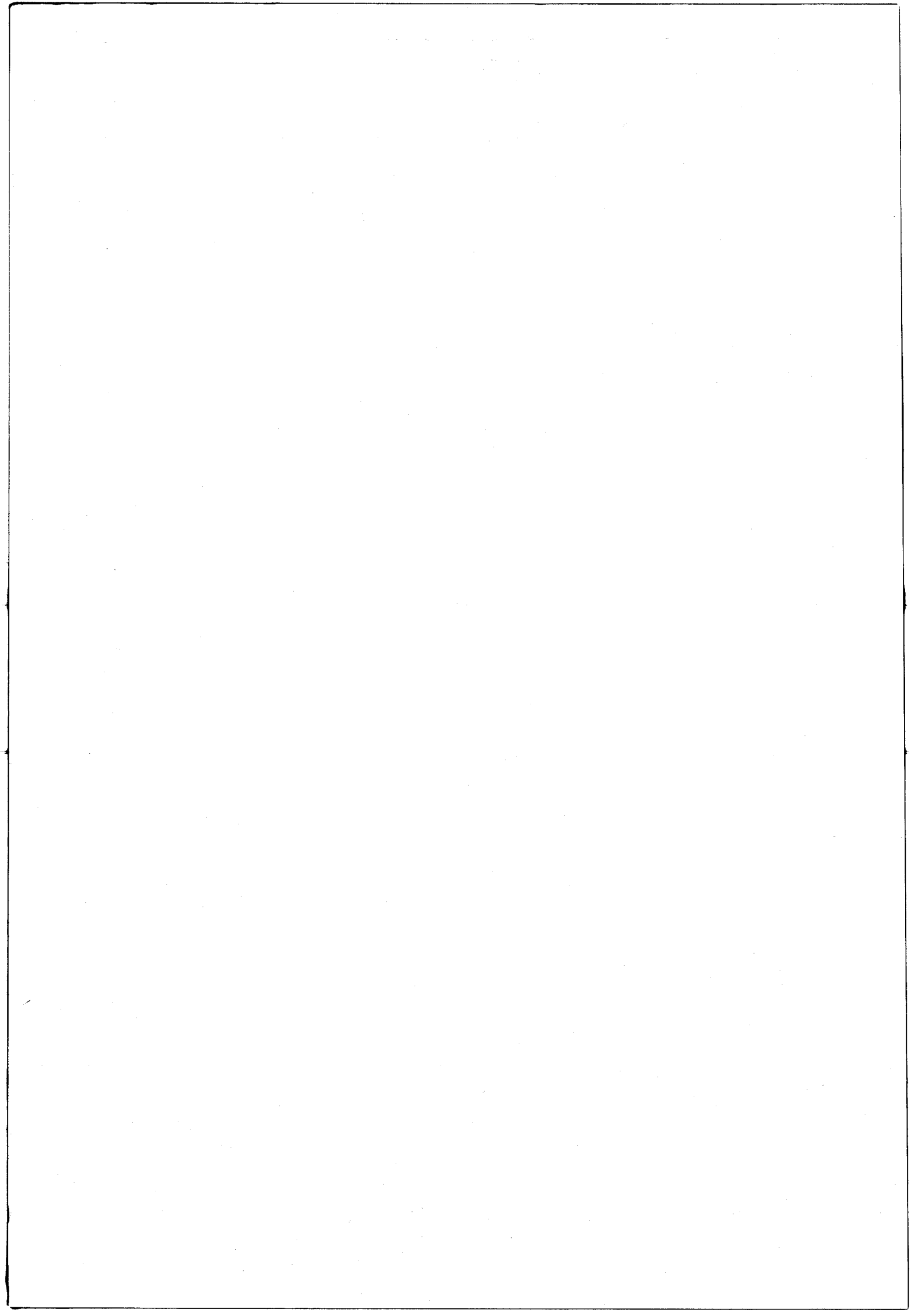


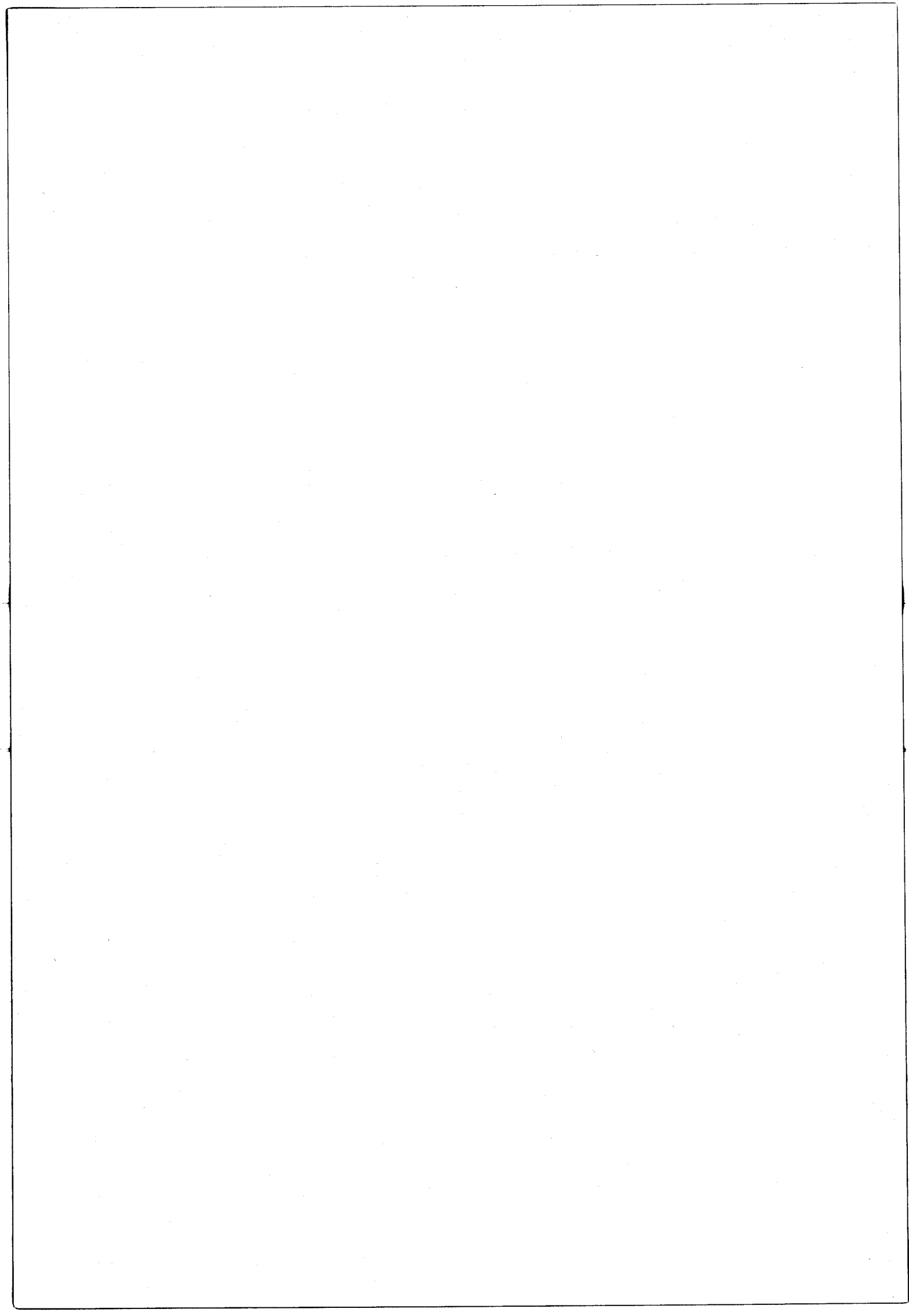
Figure 14 : Enregistrement en continu (station fixe) du champ magnétique à  
15,1 KHz. (C.R.G.).





CHAPITRE III

APPLICATION DE LA METHODE M. T. DE SUBSURFACE



## INTRODUCTION

Depuis CAGNIARD (1953), différents appareils MT ont été mis au point. Le CRG a notamment développé ses recherches de façon à ce qu'une large gamme de profondeurs puisse être étudiée.

On a vu que la profondeur de pénétration d'une onde EM est donnée par :

$$p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10\rho T} \quad (\text{km, } \Omega\text{m, s})$$

Elle est donc fonction de la résistivité apparente du sol, mais aussi de la période du signal qui est analysé.

C'est dire qu'un appareil adapté à l'enregistrement des phénomènes dont la période est de l'ordre de la seconde, est destiné à l'étude des terrains situés à grande profondeur. C'est le domaine de préoccupation de la prospection pétrolière. Différentes applications au cours desquelles le socle est facilement atteint dans des bassins sédimentaires ont été présentées par Y. BENDERITTER et A. DUPIS (1969) et A. DUPIS (1970).

Une grande épaisseur de terrains, en particulier les premières centaines de mètres, ne sont pas intéressées par cette M.T. pétrolière, les fréquences des signaux ( $N < 30$  Hz) étant trop basses.

Un autre appareil, utilisant des fréquences de 8 à 1 700 Hz permet d'obtenir une profondeur de pénétration plus faible et de s'intéresser plus précisément aux terrains superficiels. A titre d'exemple, pour un terrain dont la résistivité est de 100  $\Omega\text{m}$  et à une fréquence de 370 Hz, la pénétration de l'onde est de l'ordre de 250 m. Cet appareil est particulièrement adapté aux recherches minières et la méthode a reçu le nom de magnétotellurique minière (M.T.M.). Différentes applications ont été traitées par Y. BENDERITTER (1971) et C. HERRISSON (1975).

Mais, toujours pour un terrain de résistivité égale à 100  $\Omega\text{m}$ , la pénétration minimale (à 1 700 Hz) est encore de 120 m.

Il reste donc un domaine purement superficiel à étudier. Les signaux naturels de fréquence supérieure à 1 700 Hz ont un caractère trop aléatoire, quand ils existent, pour servir de base à l'élaboration d'un autre type d'appareil.

C'est pourquoi l'on utilise des émetteurs grandes ondes, comme Radio France Inter, comme source de phénomènes à haute fréquence. A 163,84 KHz (pour un terrain de résistivité de 100  $\Omega\text{m}$ ), la pénétration de l'onde n'est plus que de 12 m.

A l'aide d'exemples concrets, on présentera dans ce chapitre un inventaire des applications possibles, sur le terrain, de notre matériel M.T.

Bien évidemment, il existe une quasi infinité de structures naturelles. Il serait hors de question de les envisager toutes et de les traiter ici. Par contre, on peut sélectionner certaines formes structurales connues et étudier leur détection. C'est ainsi que plusieurs sites ont été soumis à une prospection détaillée.

Nous verrons successivement dans ce qui suit :

- un essai de sondage magnétotellurique et sa comparaison au sondage électrique ;
- une recherche de contact anormal par faille entre une roche éruptive saine et résistante (la rhyolite), et un complexe sédimentaire et conducteur (les marno-calcaires du Lias inférieur) ;
- un essai de localisation rapide de failles entre granite et grès ou marnes triasiques dans un secteur particulièrement complexe ;
- la réalisation d'un profil pédologique continu de 200 m de long avec, comme étalonnage, quatre forages mécaniques ;
- l'étude de l'anomalie provoquée par une structure cylindrique allongée creuse ;
- la recherche de cavités particulières aux régions crayeuses du Nord de la France : les catiches.

On entendra par structures naturelles simples, les contacts normaux (limites de couches) ou anormaux (failles) que l'on oppose aux structures artificielles creuses que sont : tunnel, caveau, catiche. On traitera séparément ces deux types fondamentaux.

## A - S T R U C T U R E S   N A T U R E L L E S   S I M P L E S

### I - SONDAGE MAGNETO-TELLURIQUE

#### I-1 Rappels

Le sondage électrique (SE) consiste à injecter un courant continu dans le sol par deux électrodes A et B et à mesurer la différence de potentiel créée artificiellement, par deux électrodes de mesure M et N, situées au voisinage du centre du dispositif appelé quadripôle. La d.d.p. mesurée est fonction des résistivités  $\rho_1$  du sol et des dimensions du quadripôle : plus l'injection est éloignée du centre du quadripôle, plus l'épaisseur des terrains intéressés est grande. On obtient, par augmentations successives

de la longueur du dispositif, une série de valeurs de résistivités apparentes, dont l'exploitation par abaques conduit à une certaine connaissance de la coupe du sous-sol à l'aplomb du centre du dispositif de mesure.

C'est une méthode pratique, rapide, de précision moyenne mais qui devient lourde lorsqu'on cherche à atteindre des profondeurs de plusieurs centaines de mètres. Les longueurs de ligne deviennent prohibitives (un ou plusieurs km) ; l'intensité du courant d'injection nécessaire est alors importante : un groupe électrogène doit être utilisé, de simples batteries ne suffisant plus.

La méthode magnétotellurique permet de soustraire à ces contraintes.

Les méthodes utilisant les basses fréquences ont des profondeurs de pénétration grandes. L'appareil utilisé présentement, accordé sur les hautes fréquences, vient en complément de ces méthodes.

Ce que l'on cherchera à montrer dans ce chapitre est que les résultats de la M.T.A., d'une part, concordent avec ceux des méthodes plus anciennes, tel le sondage électrique, et d'autre part, complètent avantageusement ceux de la M.T.M. qui peut parfois pécher par son imprécision dans la recherche de structures de subsurface.

#### I-2 Comparaison M.T.A. - Sondage électrique

Le but est de comparer les résistivités apparentes données par les deux méthodes.

Cette étude a été réalisée dans la forêt de Bellary où de nombreux sondages électriques ont été exécutés. Ce site sert très souvent de base d'essai étant donné la bonne connaissance que l'on a de ses caractéristiques.

##### I-2-a Présentation géologique

D'après la carte géologique de Nevers au 1/80 000, la coupe géologique du site est schématisée figure 15.

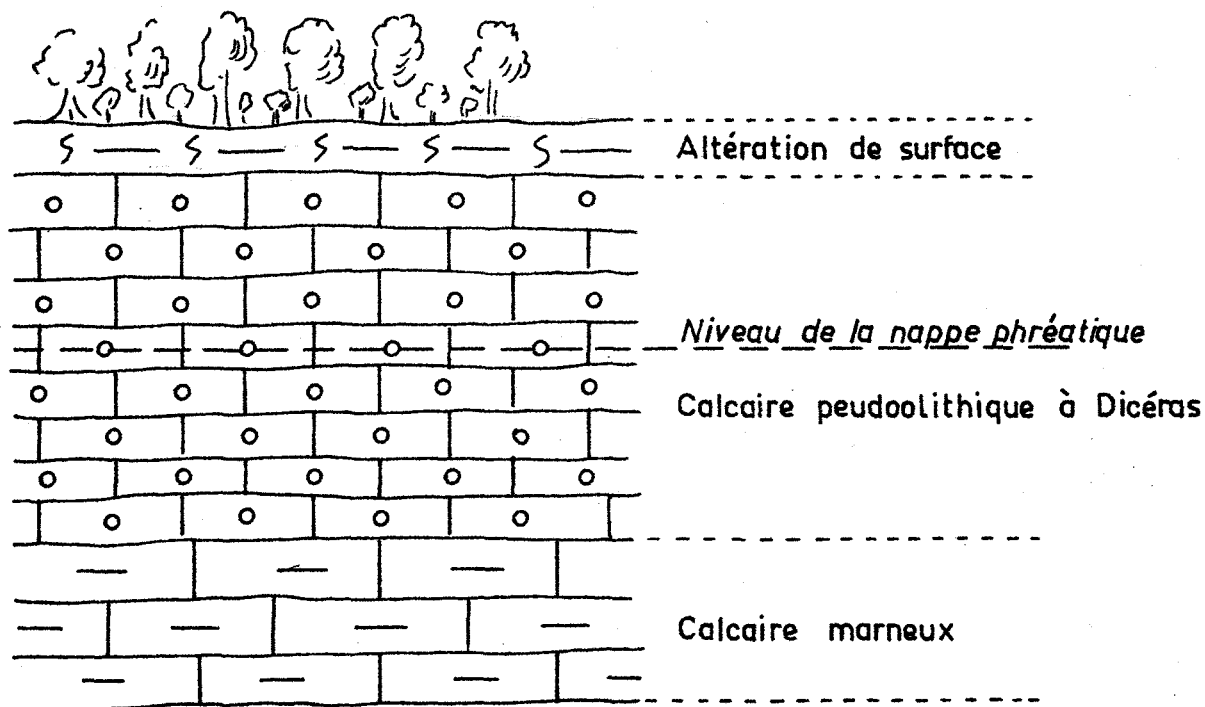


Figure 15 : Coupe stratigraphique du Rauracien (Bellary)

La situation géographique est reportée sur la carte de la région (figure 16).

I-2-b Sondage électrique - Sondage M.T.A.

Fait et refait à maintes reprises lors de stages d'étudiants en géophysique, le SE conduit aux caractéristiques suivantes : (Interprétation par la méthode des points auxiliaires et par ordinateur - figure 17) :

- 1<sup>er</sup> terrain :  $e_1 = 5,20$  m       $\rho_1 = 235 \Omega\text{m}$
- 2<sup>ème</sup> terrain :  $e_2 = 6,20$  m       $\rho_2 = 24 \Omega\text{m}$
- 3<sup>ème</sup> terrain :  $e_3 = 91$  m       $\rho_3 = 97 \Omega\text{m}$
- 4<sup>ème</sup> terrain :                       $\rho_4 = 18 \Omega\text{m}$

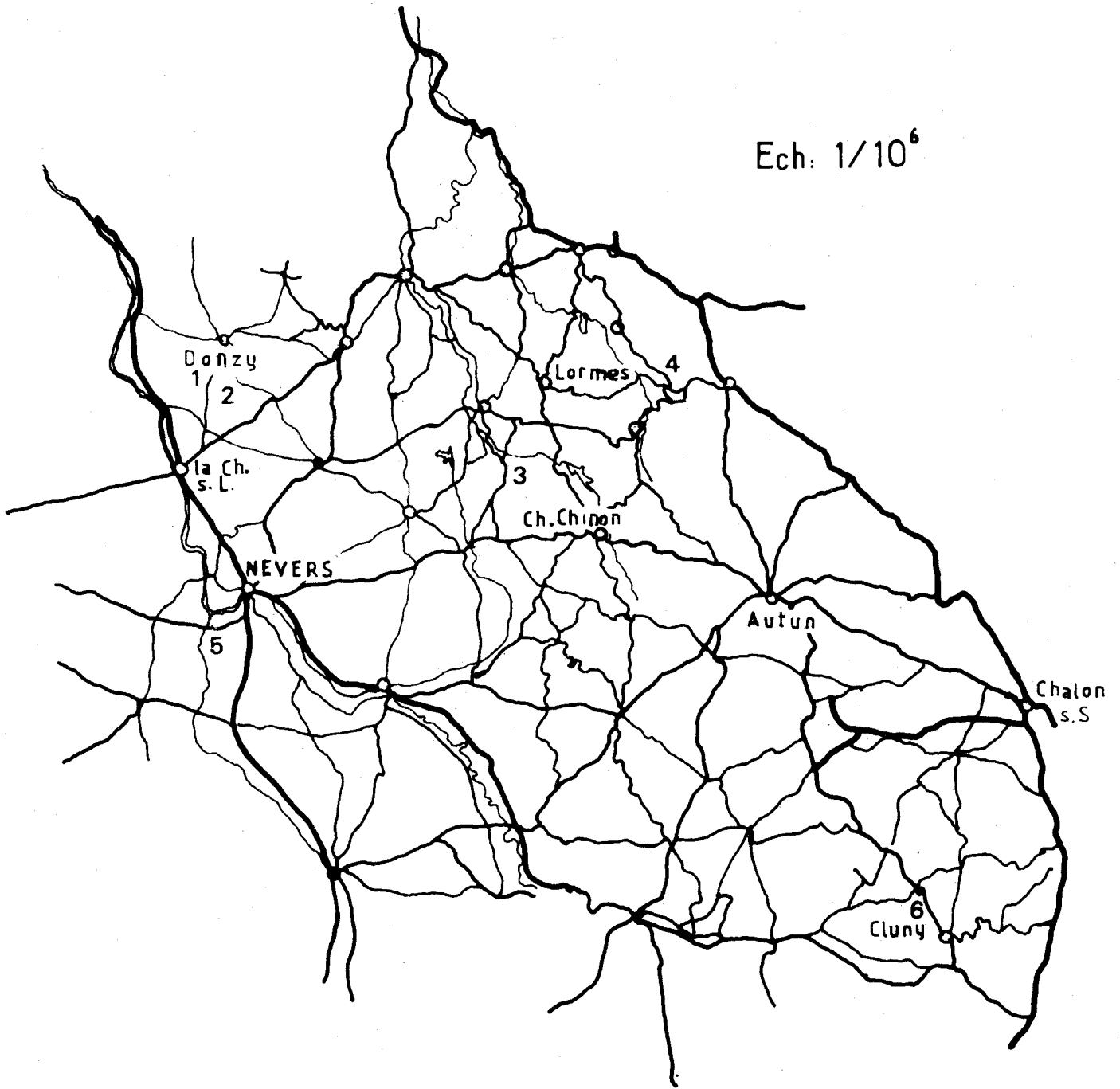
La M.T.A. quant à elle donne comme valeurs de résistivités apparentes :

- à 163,84 KHz     $\rho_a = 40 \Omega\text{m}$        $p_1 = 8$  m
- à 15,10 KHz     $\rho_a = 68 \Omega\text{m}$        $p_2 = 33,7$  m

mais elle ne donne aucune épaisseur.



Ech: 1/10<sup>6</sup>



- 1 C. R. G.
- 2 BELLARY
- 3 LA TOUR VAUBAN
- 4 LE MORVAN
- 5 GIMOUILLE
- 6 LE BOIS CLAIR



Figure 16 : Carte d'implantation des sites.

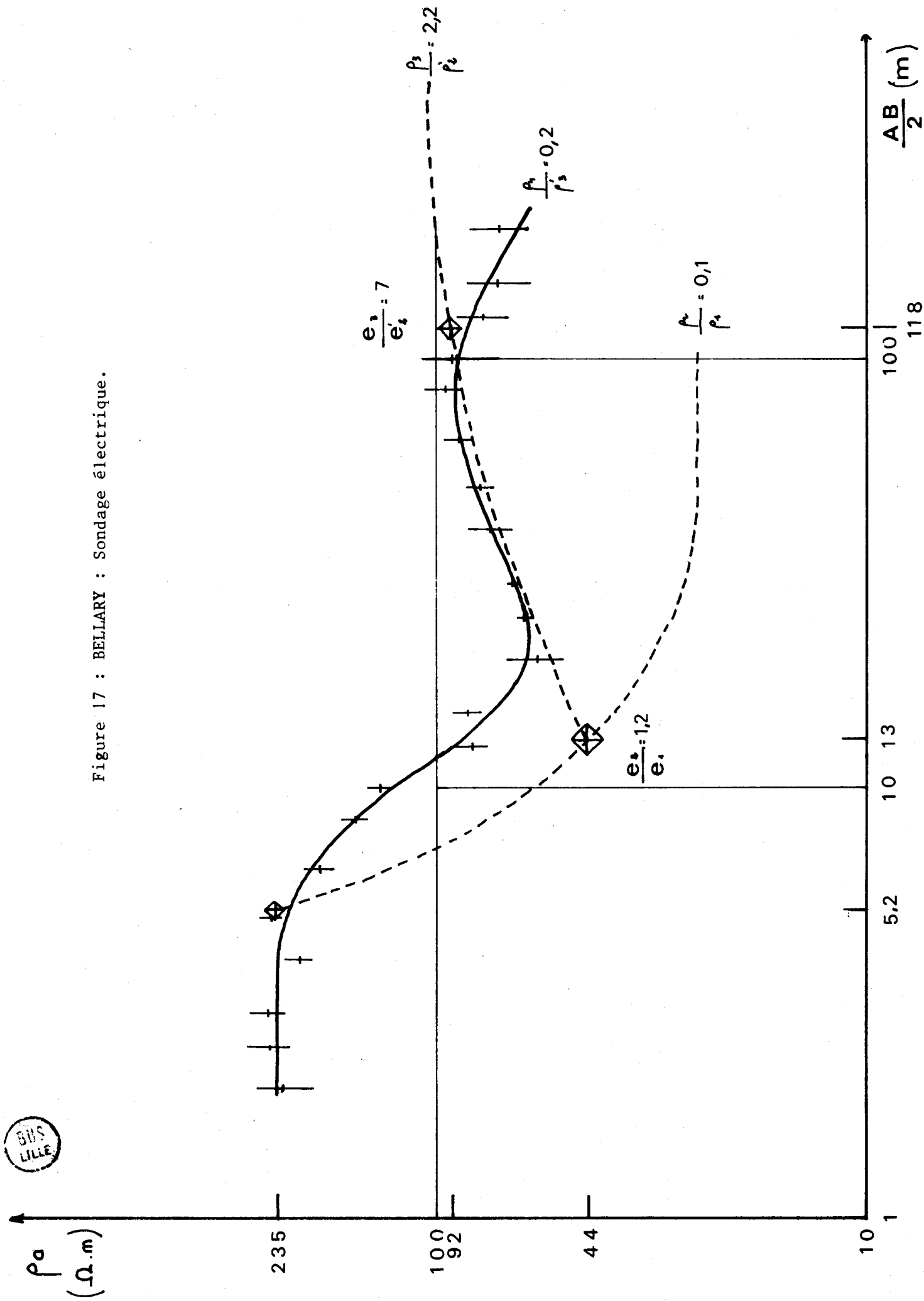


Figure 17 : BELLARY : Sondage électrique.

I-2-c Interprétation - Comparaison

Pour pouvoir comparer les deux séries de résultats, il faut passer par la méthode dite de conductance équivalente (M. N. BERDICHEVSKY, 1965).

On appelle conductance le rapport

$$S = \frac{h}{\rho}$$

avec  $h$ , l'épaisseur de terrain et  $\rho$  la résistivité.

Soit une série de  $n$  terrains définis par les paramètres  $(p_1, h_1)$ ,  $(p_2, h_2)$ , ...  $(p_n, h_n)$ , la conductance  $S$  équivalant aux  $(n-1)$  premiers terrains est égale à la somme des conductances de chaque terrain soit :

$$S = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{h_i}{\rho_i} = \frac{H_e}{\rho_e}$$

On peut tirer de cette formule la résistivité équivalente correspondant aux  $(n-1)$  premiers terrains d'épaisseur

$$H_e = \sum_{i=1}^{i=n-1} h_i :$$

$$\rho_e = \frac{H_e}{S}$$

Si  $\rho_e$  est calculé d'après les valeurs du SE, on peut déduire alors la profondeur  $p$  à laquelle une onde M.T. de fréquence donnée pénètre dans un terrain de résistivité  $\rho_e$  grâce à la formule :

$$p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10\rho_e T}$$

Si la résistivité apparente  $\rho_a$  mesurée en M.T. est égale à la résistivité équivalente  $\rho_e$  calculée d'après les données du SE, alors  $p = h_e$  et réciproquement.

On s'arrange donc, par approches successives, pour que  $p$  soit égal à  $h_e$ .

Prenons l'exemple du cas présent à 163,84 KHz.

235 $\Omega\text{m}$	5,20 m	$S = \frac{h}{\rho}$
24 $\Omega\text{m}$	6,20 m	
97 $\Omega\text{m}$	91 m	
18 $\Omega\text{m}$		

- Première approche

Considérons le premier terrain :

$$\rho = 235 \Omega\text{m} \quad p = 19 \text{ m}$$

L'onde pénètre de 19 m dans un terrain de 235  $\Omega\text{m}$  de résistivité. Or, cette première couche n'a que 5,20 m d'épaisseur. Donc, l'onde pénètre aussi dans le deuxième terrain, et, de ce fait, la résistivité apparente qu'elle va mesurer n'est plus 235  $\Omega\text{m}$ , tout comme sa profondeur de pénétration ne sera plus 19 m.

- Deuxième approche

Considérons le premier terrain + 2 m du deuxième terrain :

$$S = \frac{5,2}{235} + \frac{2}{24} = 0,105 = \frac{H_e}{\rho_e}$$

$$\rho_e = \frac{H_e}{S} = \frac{7,2}{105} = 68,27 \Omega\text{m}$$

$$p = 10,27 \text{ m}$$

La profondeur de pénétration de l'onde est encore plus importante que l'épaisseur de terrain considérée.

- Troisième approche

Considérons le premier terrain + 3,80 m du second :

$$S = \frac{5,2}{235} + \frac{3,8}{24} = 0,1804 = \frac{H_e}{\rho_e}$$

$$\rho_e = \frac{H_e}{S} = \frac{9}{0,1804} = 49,8 \Omega\text{m}$$

$$p = 8,8 \text{ m}$$

Avec  $H_e = 9 \text{ m}$  et  $p = 8,8 \text{ m}$ , on peut estimer l'approximation correcte ce qui conduit normalement à une résistivité apparente  $\rho_a = 50 \Omega\text{m}$ .

A 15,10 KHz, en procédant de la même façon, il faut considérer une épaisseur de terrain  $H_e$  de 33,40 m constituée de la manière suivante :

$$e_1 = 5,20 \text{ m} \quad \rho_1 = 235 \Omega\text{m}$$

$$e_2 = 6,20 \text{ m} \quad \rho_2 = 24 \Omega\text{m}$$

$$e_3 = 22 \text{ m} \quad \rho_3 = 97 \Omega\text{m}$$

$$S = \frac{5,2}{235} + \frac{6,2}{24} + \frac{22}{97} = 0,507 = \frac{H_e}{\rho_e}$$

$$\rho_e = \frac{H_e}{S} = \frac{33,4}{0,507} = 65,84$$

$$p = 33,25 \text{ m}$$

Avec  $H_e = 33,40 \text{ m}$  et  $p = 33,25 \text{ m}$ , on peut considérer l'approximation correcte, ce qui conduit normalement à une résistivité apparente  $\rho_a$  de 66  $\Omega\text{m}$ .

Les mesures MT à 163,84 KHz et à 15,10 KHz sont respectivement de 40 et 68  $\Omega\text{m}$ .

Les valeurs sont donc fortement semblables en électrique et en MTA. A 163,84 KHz, cependant, la résistivité mesurée est un peu faible ; cela peut être attribué au fait que le sondage MT, pour des raisons d'orientation, est réalisé dans une laie forestière, donc sur de l'humus, alors que le SE, pour des raisons de longueur de ligne, l'est en bordure d'un chemin à quelques mètres, et dans la direction perpendiculaire à la laie.

#### I-2-d Validité de la méthode des conductances équivalentes

Pour savoir si cette méthode est correcte, il suffit de rechercher la profondeur de pénétration réelle.

Pour cela, on va calculer la profondeur  $p_r$  à laquelle l'intensité du champ tellurique n'est plus égale qu'à la fraction  $1/e$  de ce qu'elle est en surface.

On sait que :

$$E_x = E_o e^{-z/p} \quad \text{avec } p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10\rho T}$$

A 15,1 KHz, on aura :

$$E = \frac{E_o}{e^{244z\sqrt{\rho^{-1}}}}$$

D'après la distribution stratigraphique du SE, on calcule les valeurs suivantes :

- à  $h_1 = 5,2 \text{ m}$  ( $\rho_1 = 235 \Omega\text{m}$ ) :  $E_x = 0,92 E_o$

- à  $h_1 + h_2$  ( $h_2 = 6,2 \text{ m}$  ;  $\rho_2 = 24 \Omega\text{m}$ ) :  $E_x = 0,675 E_o$

La profondeur  $h_1 + h_2 + h_3$  ( $\rho_3 = 97 \Omega\text{m}$ ) est obtenue par la relation :

$$\frac{0,675 E_o}{e^{244h_3\sqrt{\frac{1}{97}}}} = \frac{E_o}{e^1}$$

D'où  $h_3 = 24,5 \text{ m}$  et  $p_r = 36 \text{ m}$ .

La profondeur de pénétration  $p_r$  (36 m) et celle calculée par la méthode des conductances équivalentes (33,25 m) sont très voisines.

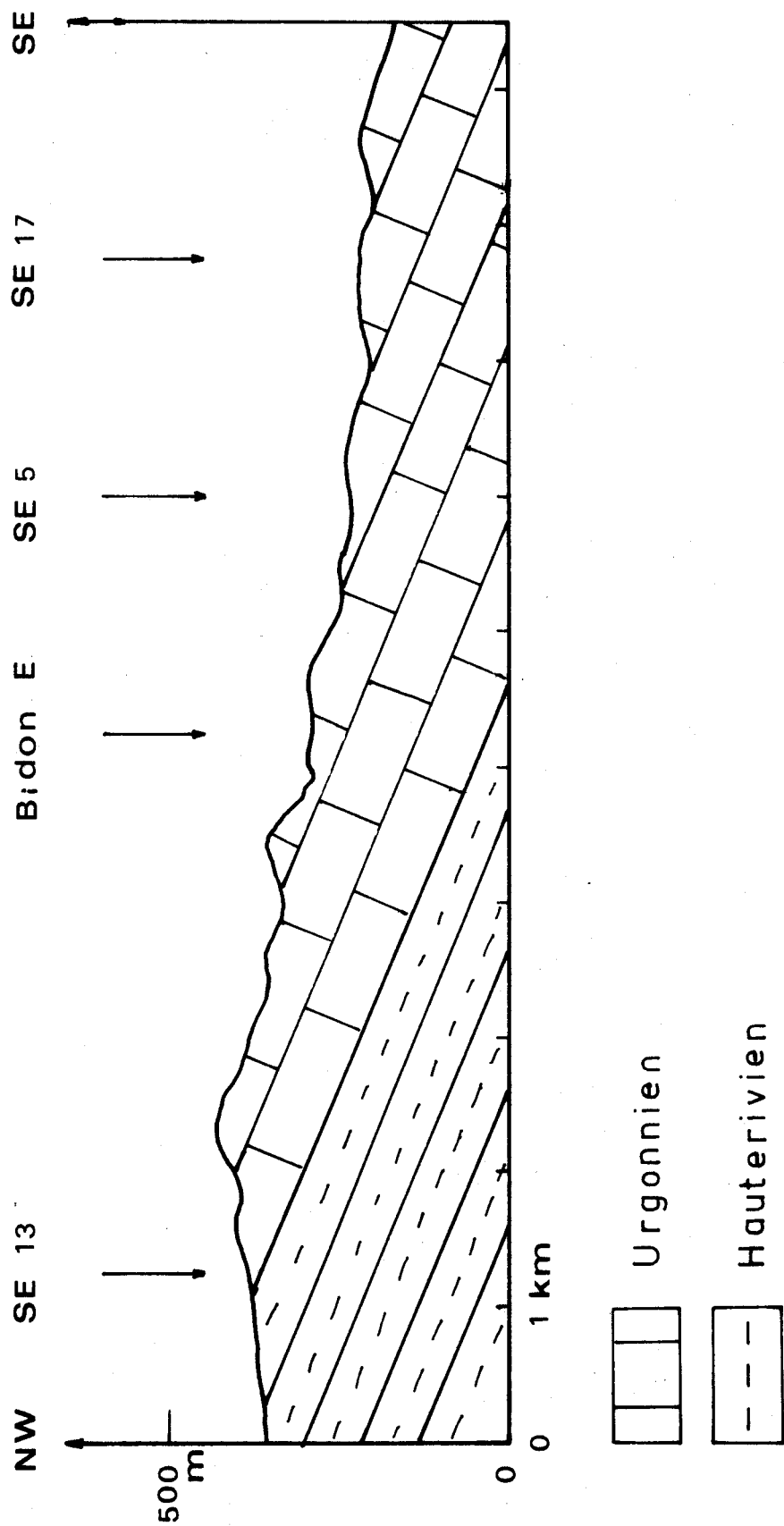
On peut donc considérer, dans la mesure où les contrastes de résistivités ne sont pas trop forts, que le calcul d'une résistivité apparente à une fréquence donnée à partir d'un SE, conduit à un résultat crédible.

On s'autorise, en tout état de cause, à admettre que les valeurs de  $\rho$  calculées en M.T. sont équivalentes à celles de la méthode de prospection électrique.

### I-3 Vérification de la complémentarité entre M.T.A. et M.T.M.

Lorsqu'en un site, la couche superficielle est très conductrice, les filets de courant  $y$  sont fortement focalisés ; son influence est prépondérante sur la profondeur d'investigation, alors particulièrement réduite, de l'onde. Inversement, si le premier terrain est très résistant, l'intensité de l'onde ne s'atténuera que lentement et pénétrera à de grandes profondeurs.

Figure 18 : BIDON (Ardèche) : Coupe géologique.



BIS  
LILLE

Il s'avèrera utile, alors, de pouvoir recourir à la M.T.A.. Le but de ce paragraphe est de montrer, par quelques mesures simples, que la M.T.A., basée exactement sur le même principe que la M.T.M., mais captant un signal artificiel par des électrodes capacitives, complète avantageusement le sondage M.T.M. dans les hautes fréquences. Pour montrer la complémentarité des deux méthodes, on utilisera un sondage minier réalisé à Bidon, en Ardèche, près de Bourg-St-Andéol.

La coupe (figure 18) montre que la barre urgonienne repose sur les marnes hauteriviennes en plongeant régulièrement (pendage de 6° environ) vers le SE. Ce sont des sondages électriques (SE 5, SE 13 et SE 17) qui ont permis de connaître ce pendage.

Si l'on reporte les valeurs de  $\rho_a$  données par la M.T.A. sur une courbe de sondage minier, on pourra toujours faire passer cette courbe par les trois points supplémentaires, sans que l'on puisse conclure à une complémentarité des deux méthodes.

On tracera plutôt la courbe de l'évolution de la conductance en fonction de la fréquence, car, quelles que soient les caractéristiques du sous-sol, la forme de cette courbe est constante. Si donc les valeurs données par la M.T.A. se placent sur cette courbe, on peut conclure à la complémentarité des deux méthodes.

Le calcul de la conductance en fonction de la fréquence est reporté dans le tableau 8.



TABLEAU 8 : Calcul de la conductance  $\frac{H}{E}$  en fonction de  $\sqrt{T}$ 

Fréquence	T	0,2 T	$\rho_a$	$H/E = \sqrt{\frac{0,2T}{\rho}}$	$\sqrt{T}$
Hz	$10^{-4} s$	$10^{-4} s$	$\Omega m$	$10^{-4}$	$10^{-2} s^{1/2}$
17	588	117	1 020	34	24,2
37	270	54	720	27,4	16,4
80	125	25	1 168	14,6	11,2
170	58,8	11,7	1 920	7,8	7,66
370	27	5,4	2 400	4,74	5,2
800	12,5	2,5	5 000	2,24	3,5
1 700	5,88	1,17	2 600	2,12	2,42
10 200	0,98	0,196	7 894	0,498	0,99
15 100	0,662	0,132	5 776	0,478	0,814
163 840	0,061	0,0122	3 374	0,019	0,247

Ce tableau permet de tracer le graphique de la conductance en fonction de la racine carrée de la fréquence :  $H/E = f(\sqrt{T})$  (figure 19).

Sur cette courbe sont reportés deux types de valeurs :

- d'une part, celles fournies par un appareil captant des signaux artificiels par des électrodes capacitives ;
- d'autre part, celles fournies par un appareil captant des signaux naturels par des électrodes classiques.

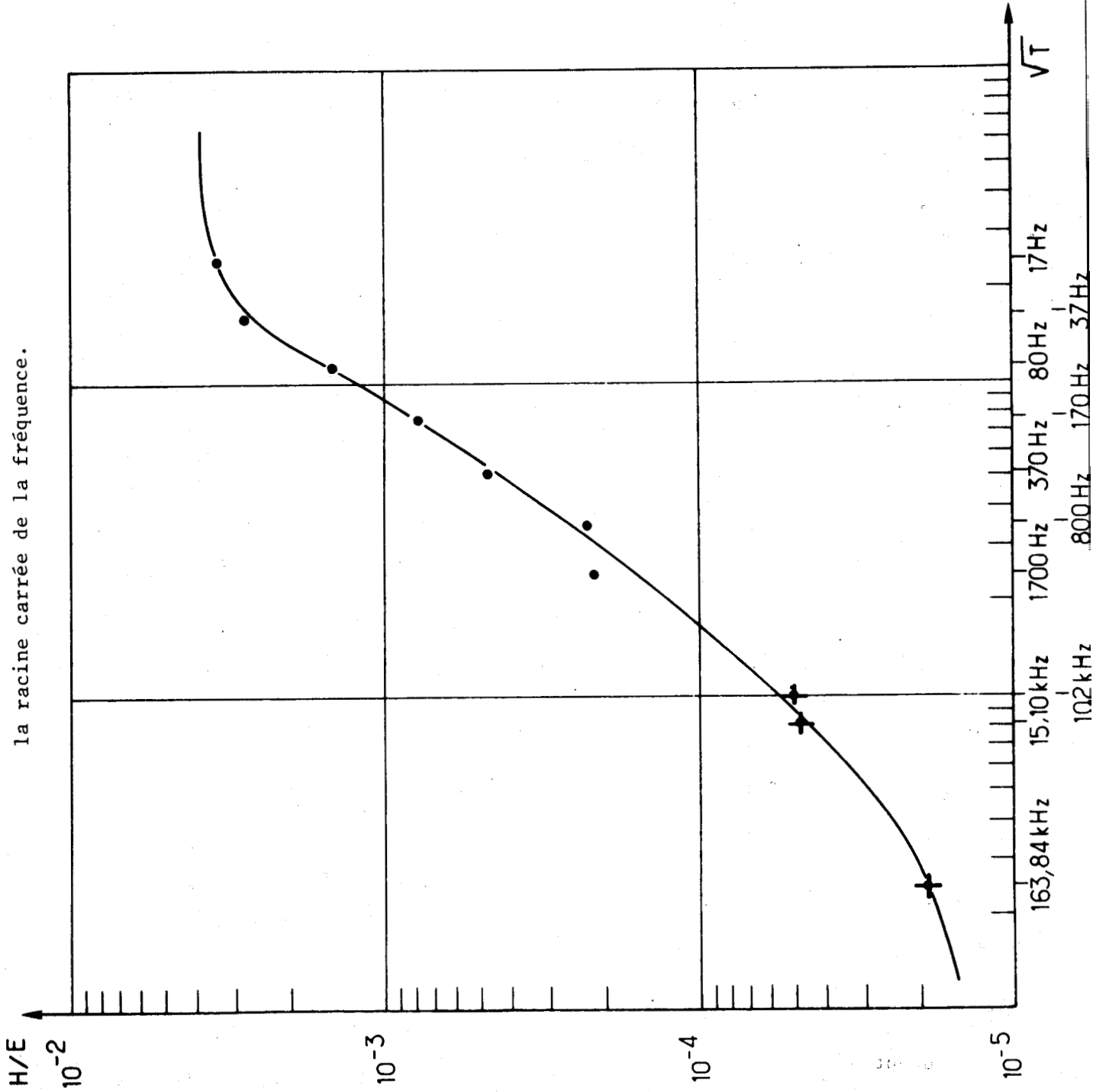
Il est clair que les données s'intègrent correctement sur la même courbe et que, partant, les deux méthodes comparées sont complémentaires.

#### I-4 Conclusion

Le premier exemple ci-dessus a montré que les résistivités fournies par la M.T.A. étaient identiques à celles du SE. On pourra par conséquent utiliser conjointement ces deux méthodes et comparer leurs résultats.

Le deuxième exemple a, quant à lui, montré que la M.T.A., originale par son capteur électrique et par les émetteurs, pouvait cependant compléter avantageusement, vers les hautes fréquences, la M.T.M..

Figure 19 : BIDON : Courbe de l'évolution de la conductance en fonction de la racine carrée de la fréquence.



31/5  
LILLE

Ceci est important pour la suite des études car la M.T.A. pêche par sa pauvreté en fréquences. Il est donc particulièrement intéressant de savoir que l'on pourra, le cas échéant, parfaire une étude M.T.A. en utilisant une autre méthode de prospection géophysique.

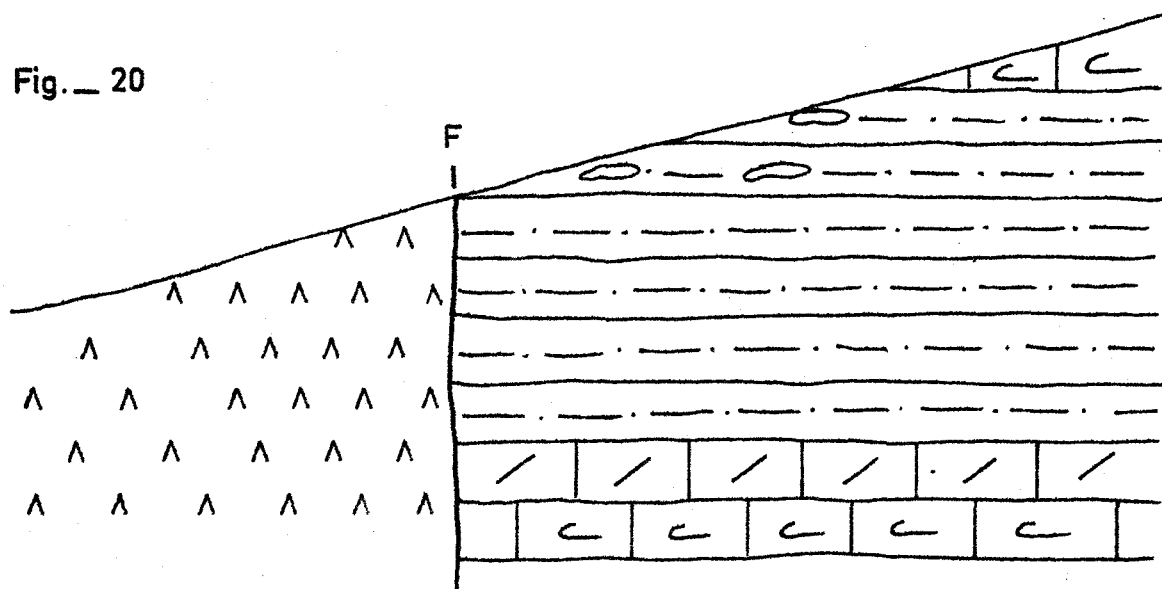
## II - RECHERCHE D'UNE FAILLE

### II-1 Généralités

Le site se trouve au lieu dit "La Tour Vauban", près d'Epiry (Nièvre), sur la route du Massif de St-Saulge (carte topographique au 1/50 000 de Corbigny - latitude 52 gr 421 ; longitude 1 gr 548).

La géologie déterminée d'après la carte de Château-Chinon au 1/80 000 s'interprète de la manière suivante : une faille met en contact une rhyolite saine (la rhyolite de Montreuillon) avec les sédiments du Lias moyen (Pliensbachien). La coupe du site est représentée figure 20.

Fig. - 20



- 1 - Domérien sup. (3 à 10 m) : Calcaire à Gryphées géantes.
- 2 - Domérien inf. (60 m) : Marnes micacées (a) avec nodules calcaires à l'affleurement (b).
- 3 - Pliensbachien inf. (6 m) : Calcaires et marnes à Bélemnites.
- 4 - Sinémurien (5 à 10 m) : Calcaire à Gryphées.

A l'endroit étudié, la rhyolite est en contact avec les marnes plienschbachiennes.

Tous les azimuts utiles sont regroupés sur la figure 21. On notera deux détails essentiels :

- d'une part, le cheminement est normal à la faille, ce qui est particulièrement favorable à l'étude ;
- d'autre part, la direction des émetteurs est voisine de la bissectrice de l'angle formé par la faille et la route ; on se trouve donc dans le créneau angulaire autorisé (chapitre II - II-5-b). De plus, il existe une composante des champs électrique et magnétique parallèle et une perpendiculaire à la route.

Avec le tapis de 2 m, on enregistre la composante  $E_x$  normale à la faille en déplaçant le traîneau le long de la route ; tandis que le tapis d'un mètre permet, dans la même direction, d'enregistrer la composante  $E_y$  parallèle à la faille.

Il n'est malheureusement pas possible d'agir de même pour le champ magnétique. En effet, les barreaux sont fixés au traîneau. De ce fait, ils ne peuvent capter que la composante normale à la direction du déplacement ; dans le cas présent, l'étude ne portera que sur la résistivité apparente  $\rho_a$  avec le rapport  $H_y/E_x$ , et sur les composantes  $H_y$  et  $E_y$ .

### II-2 Mise en station

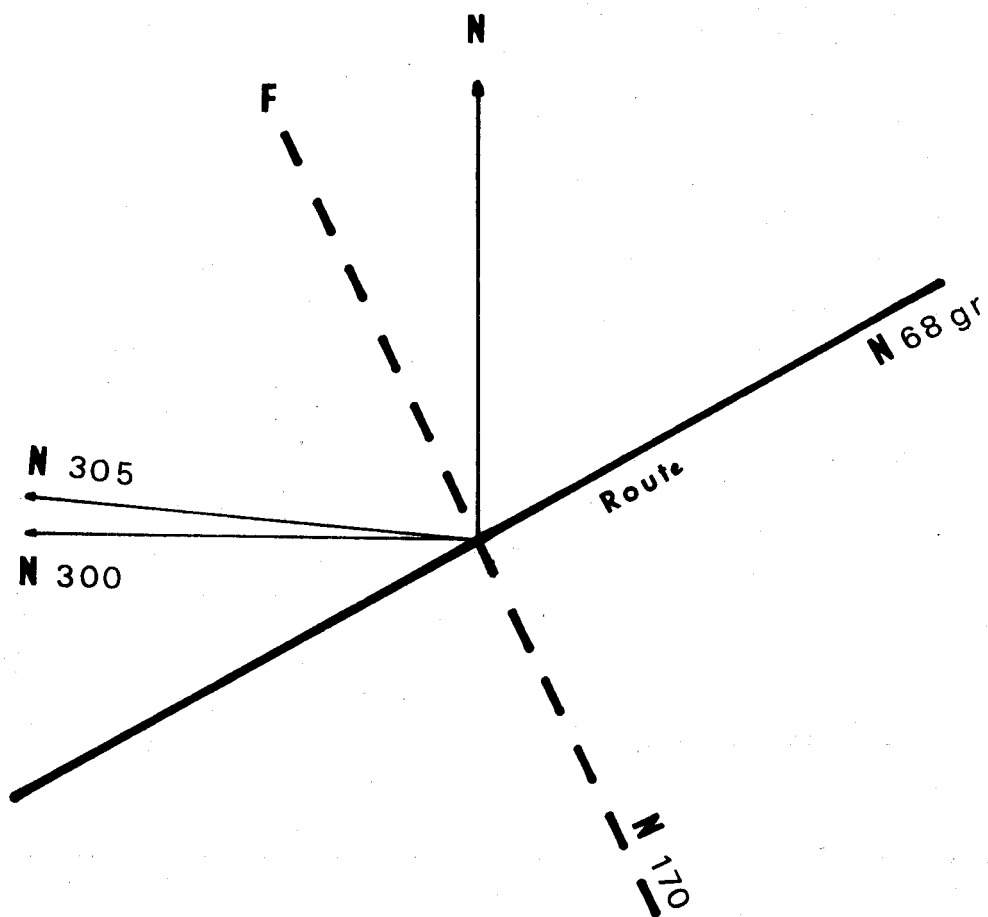
Le plan de la prospection a été le suivant :

- à chacune des deux fréquences (163,84 KHz et 15,1 KHz) on a effectué un aller et retour en enregistrant le rapport  $H_y/E_x$ .
- il en a été de même avec les paramètres  $H_y$  et  $E_y$ .
- de plus une série de mesures ponctuelles (équidistantes de 5 m) vient compléter l'étude du rapport  $H_y/E_x$  aux deux fréquences.
- enfin,  $H_y$  et  $E_y$  ont également été mesurés ponctuellement tous les 5 m. Toutefois, ceci n'a pu se faire qu'à 163,84 KHz, étant donné le caractère trop aléatoire déjà exposé du 15,1 KHz.

### II-3 Rappels théoriques

Plusieurs solutions théoriques du problème concernant l'anomalie provoquée par une faille verticale ont déjà été données, notamment par d'ERCEVILLE et G. KUNETZ (1962), puis par D. BOYER et PHAM VAN NGOC (1971), chacun de ces groupes d'auteurs recourant à des solutions différentes. On choisira de préférence celle de HOANG NGOC THACH (1973) qui a bénéficié des deux expériences précédentes.

Figure 21 : "LA TOUR VAUBAN" : Azimuts utiles sur le site.



Selon cet auteur, la forme de l'anomalie due à une faille dépend du type de la nappe tellurique : les différents cas sont regroupés figure 22

#### II-4 Mesure de $H_y/E_x$ , $H_y$ , $E_y$

##### II-4-a Etude du paramètre $H_y/E_x$

La figure 23 montre l'anomalie captée par l'appareil M.T. à deux fréquences : 163,84 KHz et 15,1 KHz. Le 10,2 KHz encore à l'état de prototype peu maniable n'a pas été utilisé à l'époque.

L'analogie entre toutes les courbes est nette. Qu'il s'agisse de mesures ponctuelles ou d'enregistrements continus, la position de la faille est toujours clairement déterminée.

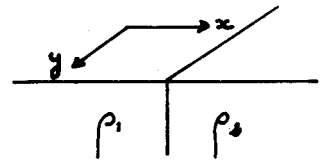
On la place à 53 m environ du point de départ d'après les mesures ponctuelles. Cependant, d'après les enregistrements, on la placerait plutôt vers 62 m. C'est un phénomène que l'on retrouvera à maintes reprises dès que la vitesse de traction du traîneau deviendra un peu élevée. En effet, la réponse électronique est assujettie à une certaine constante de temps. Elle est d'au moins deux secondes sur chaque voie\*. Si, en effectuant le rapport des deux champs, la valeur de cette constante diminue, elle n'en disparaît pas pour autant et on peut encore l'estimer à environ une seconde. Cela a pour effet de déplacer l'anomalie dans le sens de l'avancement, d'un écart fonction de la vitesse. Cependant, la constante de temps n'apporte pas que des désagréments. C'est elle en effet, qui permet le lissage des courbes obtenues par un enregistrement continu par rapport aux courbes issues des mesures ponctuelles. La vitesse, quant à elle, a aussi pour effet d'étaler l'anomalie. D'où la nécessité de connaître le phénomène lors des interprétations.

La chute brutale de la résistivité en passant du compartiment résistant au compartiment conducteur correspond bien à la courbe théorique (figure 22a) établie par HOANG NGOC THACH.

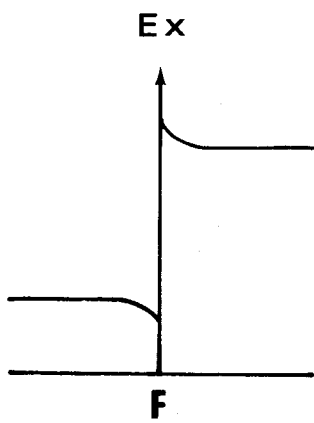
---

\* Le signal mesuré comprend la porteuse (HF) et les modulations d'amplitudes (BF). C'est pour intégrer la BF et prendre la valeur moyenne du signal qu'une constante de temps de 2 secondes est nécessaire.

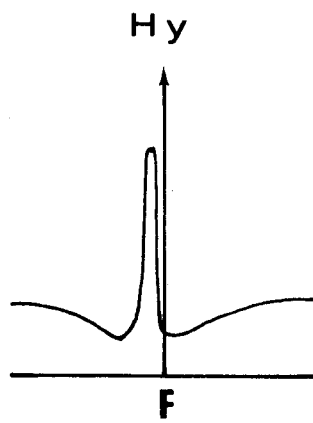
Figure 22 : Anomalies théoriques dues à une faille verticale.



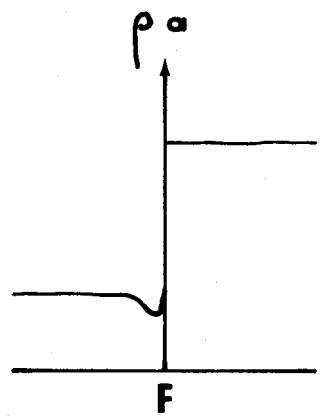
(a)



$$\rho_1 < \rho_2$$

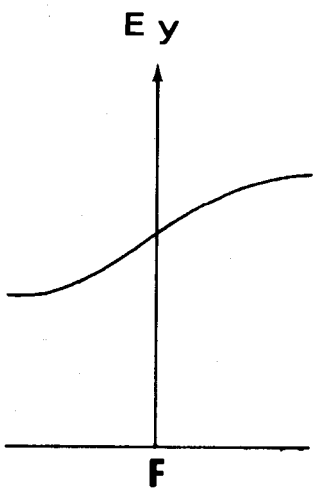


$$\rho_1 < \rho_2$$

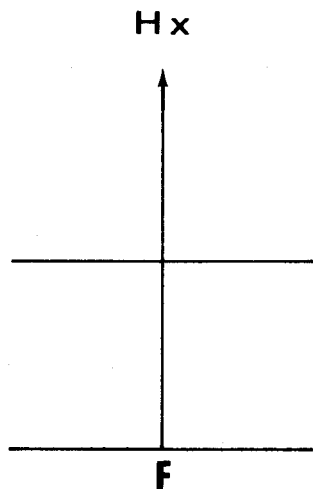


$$\rho_1 < \rho_2$$

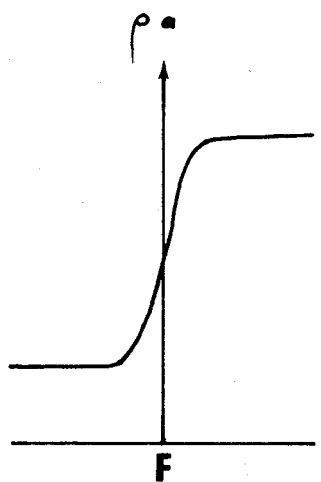
(b)



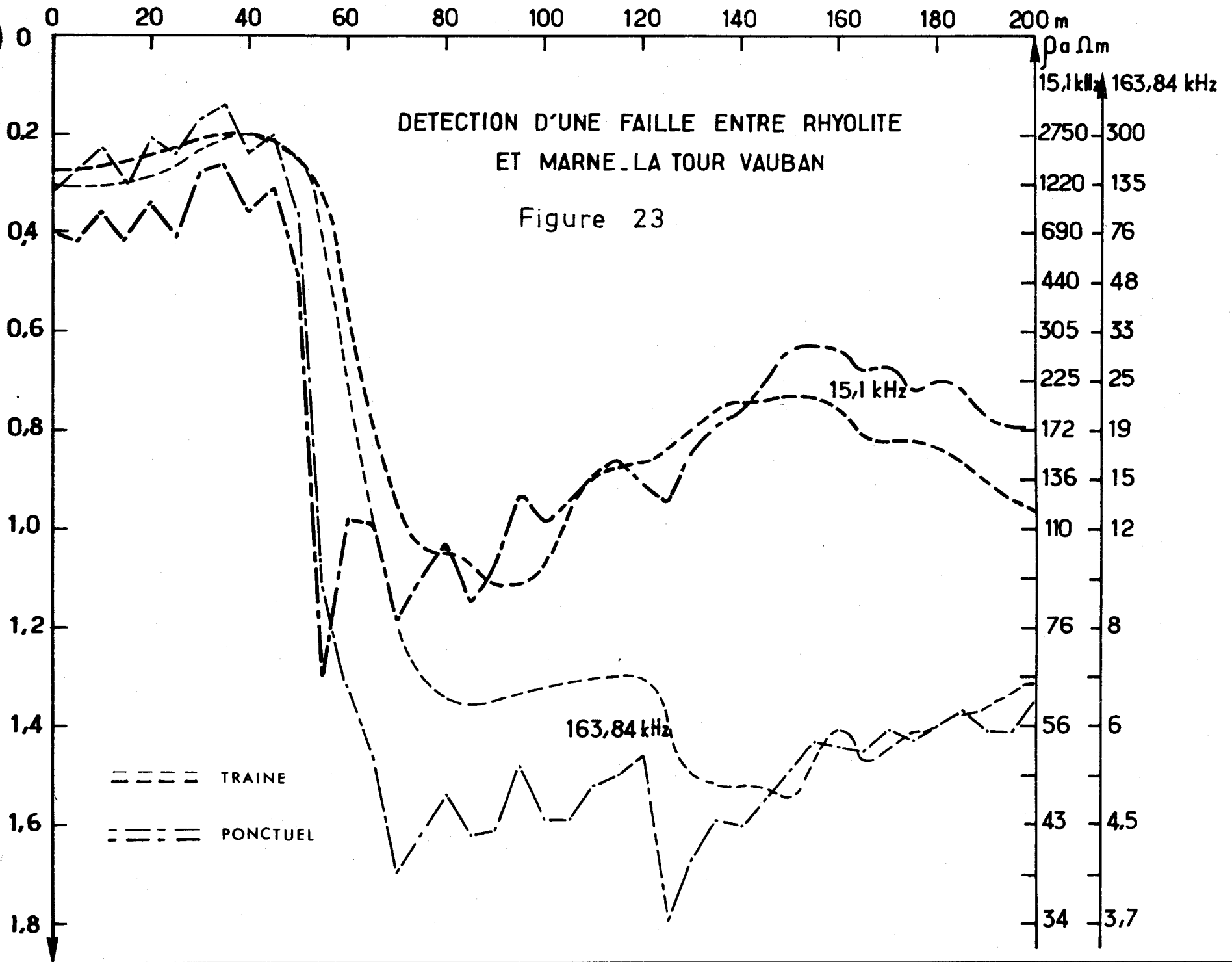
$$\rho_1 < \rho_2$$



$$\rho_1 < \rho_2$$



$$\rho_1 < \rho_2$$





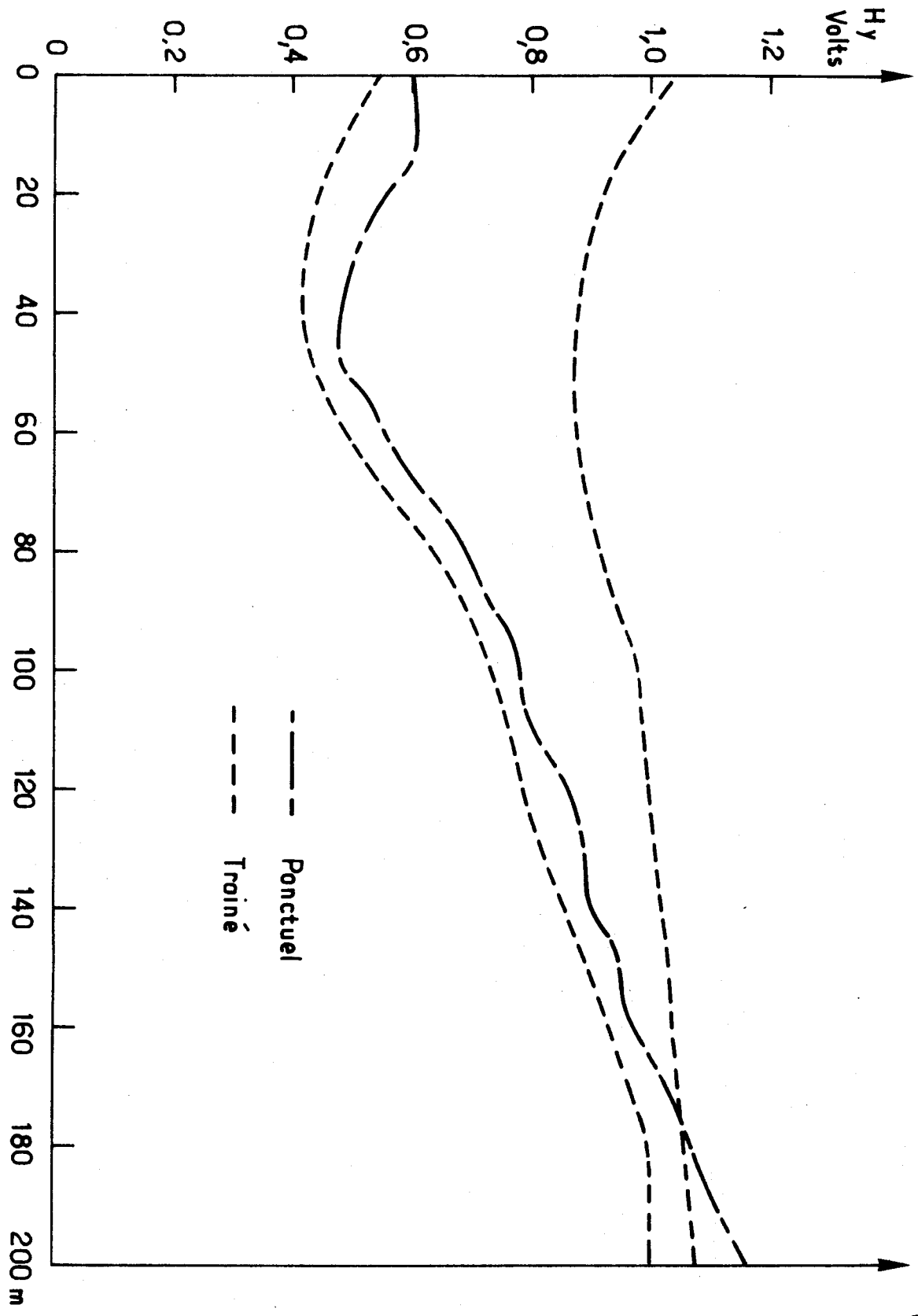
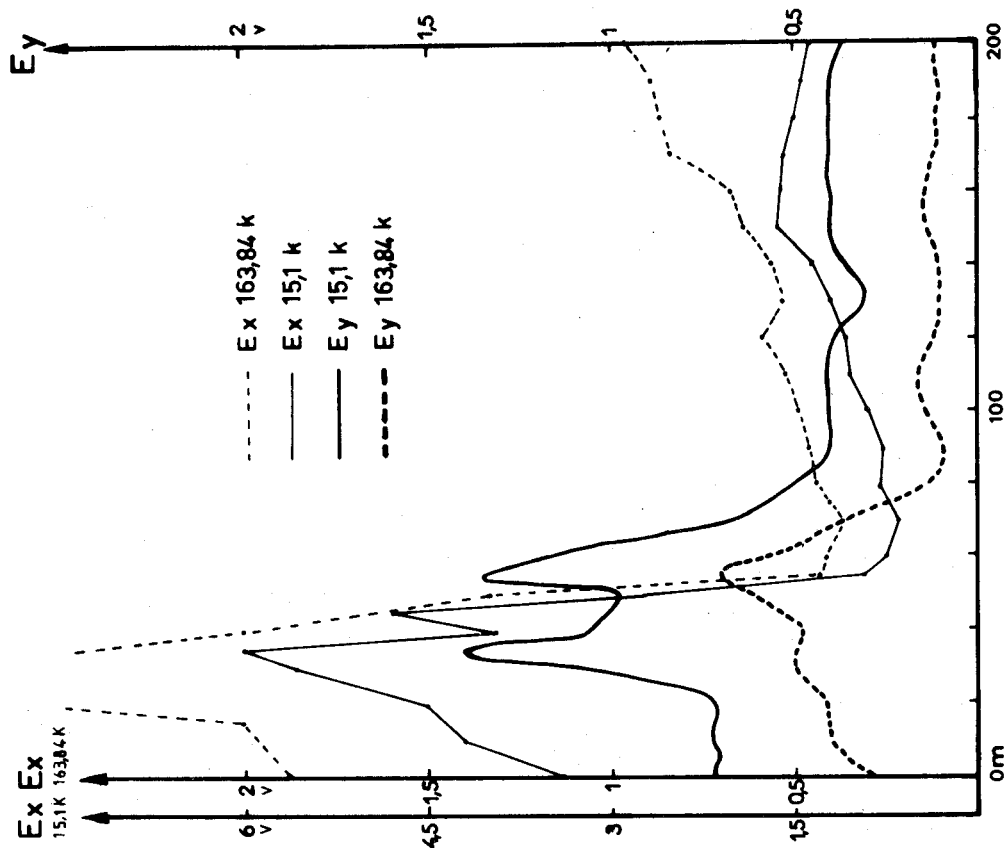
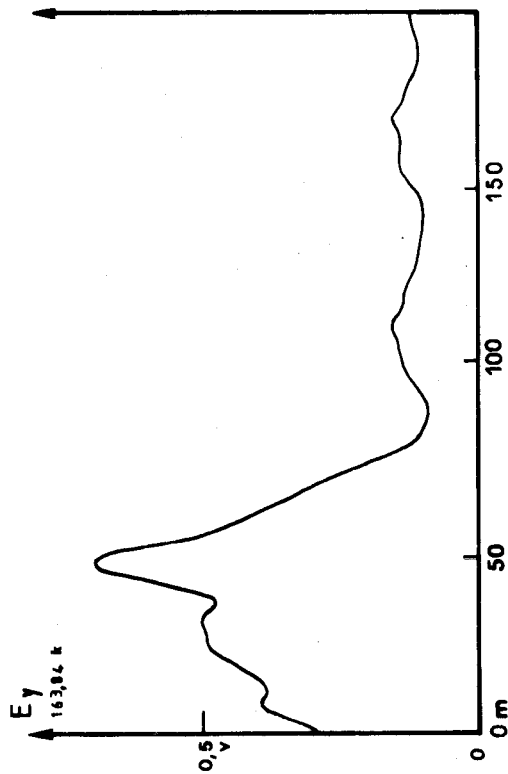
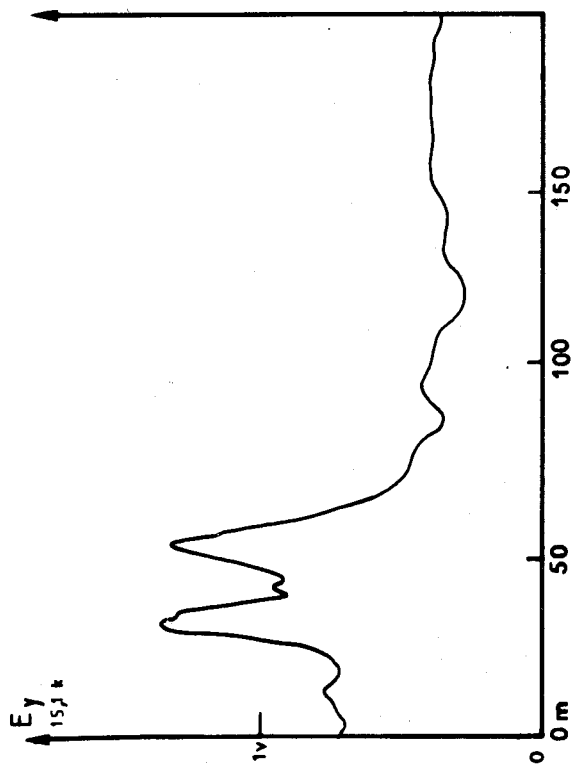


Figure 24 : EVOLUTION DE HY AU DESSUS D'UNE FAILLE ENTRE RHYOLITE ET MARNE. LA TOUR VAUBAN.



a - Evolution de la composante  $E_y$  en fonction de la distance. b - Comparaison des paramètres  $E_x$  et  $E_y$ .

Figure 25 : "LA TOUR VAUBAN"

#### II-4-b Etude du paramètre $H_y$

La figure 24 montre l'évolution de la composante  $H_y$  du champ magnétique en fonction de la distance.

On n'observe pas de forme en doigt de gant telle que l'a calculée HOANG NGOC THACH (1973) (figure 22a) mais son calcul est maintenant discuté. Cependant on note une diminution du champ près de la faille du côté résistant. Cette baisse, par rapport au point de départ ( $0_m$ ) est de l'ordre de 15 % sur chaque courbe.

Le champ magnétique de l'émetteur d'Allouis subit une forte augmentation au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la faille sur les marnes pliensbachiennes. Or, le champ magnétique devrait être très peu sensible aux variations de la résistivité du sous-sol en dehors des structures très nettes. Il faut voir là vraisemblablement une modification des conditions de propagation du signal dans l'atmosphère, beaucoup plus qu'une influence de la structure.

#### II-4-c Etude du paramètre $E_y$

Le tapis de 1 m, dont les électrodes bordent chaque côté, permet d'enregistrer le champ électrique perpendiculaire à la direction d'avancement.

Les courbes correspondantes sont présentées figure 25 a et b.

Elles coïncident assez peu avec ce que l'on était en droit d'attendre de la théorie, c'est-à-dire avec une forme évasée (figure 22b). Au contraire, elles sont aussi précises que les courbes en  $E_x$  (figure 25b).

En fait, cette manipulation démontre que l'on peut parfaitement utiliser le tapis de 1 m, pour étudier la résistivité ou plus exactement pour traiter la composante  $E_y$ . En effet, il pourrait très bien arriver que la seule possibilité d'analyse d'une structure soit d'enregistrer les variations de  $E_y$ . Or, d'après la théorie, ces variations paraissent assez vagues et ne permettent pas, en tout état de cause, de localiser une faille avec précision.

La pratique montre, qu'à haute fréquence, cela n'est plus vrai.

Une transformation dans la construction actuelle du traîneau qui permettrait de placer les capteurs magnétiques dans des directions normale ou parallèle au tapis serait des plus profitables. Les problèmes techniques de réalisation sont malheureusement importants.

## II-5 Conclusion

L'étude effectuée sur le site de "La Tour Vauban" a montré la rapidité et la précision avec laquelle il est possible de localiser une faille.

Cependant, cet endroit bénéficie d'un contraste de résistivités important de part et d'autre de la structure.

Aussi, bien que l'essai paraisse très probant, il faut préciser que la faille avait été sélectionnée en fonction de ses caractéristiques très favorables à la prospection.

Un des avantages importants de cette méthode est la grande maniabilité qu'autorise la simple traction de l'appareil en enregistrant directement sur papier les variations de E, H ou H/E. On peut tout simplement attacher l'appareil derrière un véhicule automobile, puis rouler lentement à 4 ou 5 km/h. L'appareillage prouve alors tout son intérêt dans la reconnaissance rapide sur des profils de grande longueur. Il est donc particulièrement adapté à des reconnaissances sommaires sur de larges surfaces.

## III - RECHERCHE STRUCTURALE DANS LA REGION DE CLUNY (SAONE ET LOIRE)

### III-1 Généralités - Géologie

Le col du "Bois Clair" se trouve dans le Mâconnais, près de Cluny, à la limite des terrains sédimentaires et cristallins.

La structure de cette zone est complexe : elle se présente comme une série de blocs monoclinaux séparés par des failles orientées N-S ou NE-SW, nombreuses et rapprochées. Chaque compartiment se compose du socle granitique recouvert par les grès et les marnes du Trias. Il peut y avoir une lacune des grès. Les couches plongent dans l'ensemble vers l'Est suivant un pendage de 25° (CARNEZ J.-L., DUPIS A., 1976).

Le but de l'essai au Bois Clair est de repérer les failles, d'en préciser la position, et de comparer les résultats obtenus avec ceux du procédé Mélos\* (DUROUX J., 1967) qui, lui aussi, a été expérimenté sur ce site.

### III-2 Mise en station

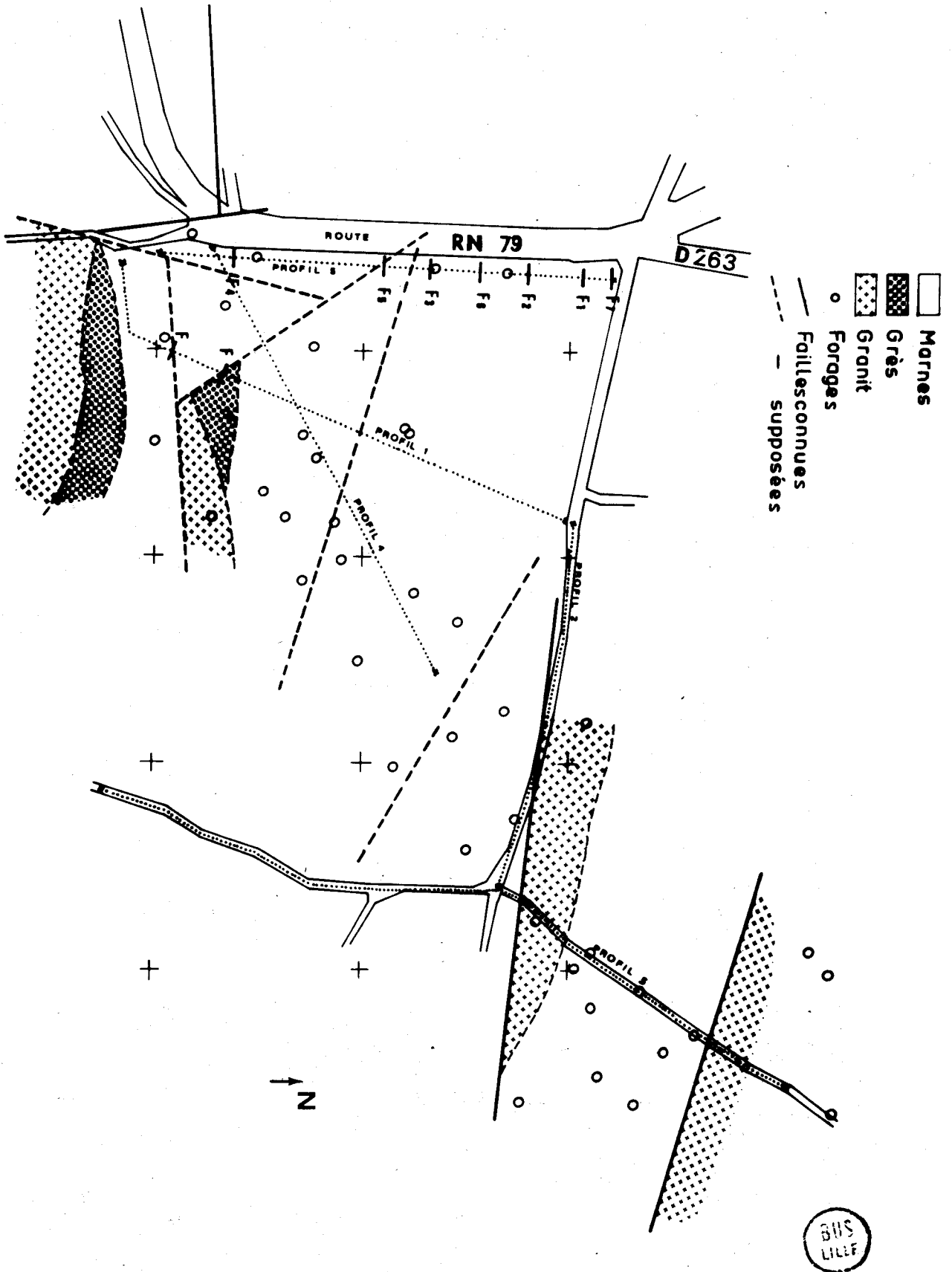
Les profils ont été disposés de façon à recouper les failles déjà connues ou supposées. Le tracé de ces profils est reporté sur la carte (figure 26).

Les profils 1, 2, 3 et 5 ont été réalisés à 15,1 KHz. Le profil 2 n'a pas conduit à des résultats interprétables à cause de sa mauvaise orientation par rapport à l'émetteur (N 120 gr - figure 26).

---

\* MELOS : Méthode électromagnétique par onde de surface.

Figure 26 : "LE BOIS CLAIR" : Carte de situation et d'implantation des profils.



Enfin, du fait d'une panne de l'émetteur de Châteauroux, seul Allouis fonctionnait lors de l'étude des profils 4 et 3 (ce dernier bénéficie donc d'une étude aux deux fréquences).

### II-3 Les mesures

#### III-3-a Profil 1 (figure 27)

Ce premier profil cherche à retrouver les failles supposées et la couche gréseuse.

De 25 à 60 m du point de départ, la résistivité apparente diminue régulièrement : l'épaisseur des marnes sur le grès affleurant se fait de plus en plus grande au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la limite entre les deux niveaux ; le socle s'enfonce vers l'Est. A partir de 60 m,  $\rho_a$  est constant et égal à environ 30  $\Omega\text{m}$ .

A cette brusque stabilisation de la résistivité à une valeur donnée, 3 explications sont possibles :

- la profondeur des grès devient trop grande en regard de la profondeur de pénétration de l'onde (ici 22 m) et la résistivité apparente devient la résistivité vraie des marnes (35  $\Omega\text{m}$ ) ; le pendage nécessaire est alors de plus de 30° ;
- ou le pendage devient brutalement horizontal ;
- ou l'épaisseur des marnes augmente à la suite d'un rejeu de faille.

Cette dernière hypothèse semble la plus vraisemblable, mais elle n'est pas certaine. Remarquons que la position de cette éventuelle faille correspond à celle tracée sur la carte d'après les forages.

Entre 75 et 82 m, l'évolution brutale de la résistivité impose la présence d'une faille. Entre 90 et 105 m, par contre, il s'agit d'un approfondissement du socle, car la pente du graphique est égale à celle de la portion de la courbe entre 25 et 60 m.

La fin du traîné ne permet pas de mettre en évidence de structure bien définie. Entre 105 et 140 m, la résistivité apparente augmente régulièrement de 50 à 120  $\Omega\text{m}$ . Ceci est en contradiction avec le pendage vers l'Est, mais néanmoins conforme à certains résultats du Mélos. Aucune interprétation n'a pu être donnée.

#### III-3-b Profil 3 (figure 27)

Sur ce profil, on possède des données aux deux fréquences. On peut remarquer la parfaite similitude entre les deux courbes. Si l'on

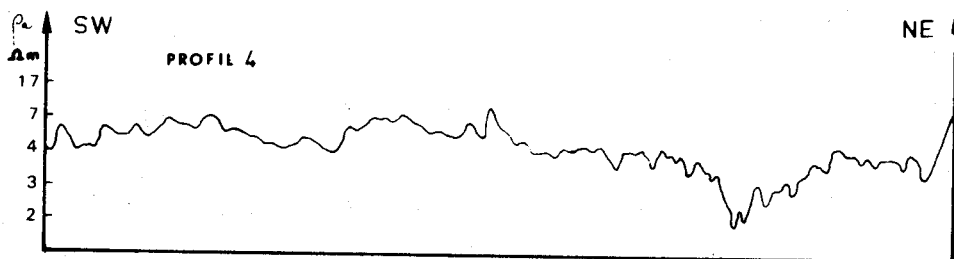
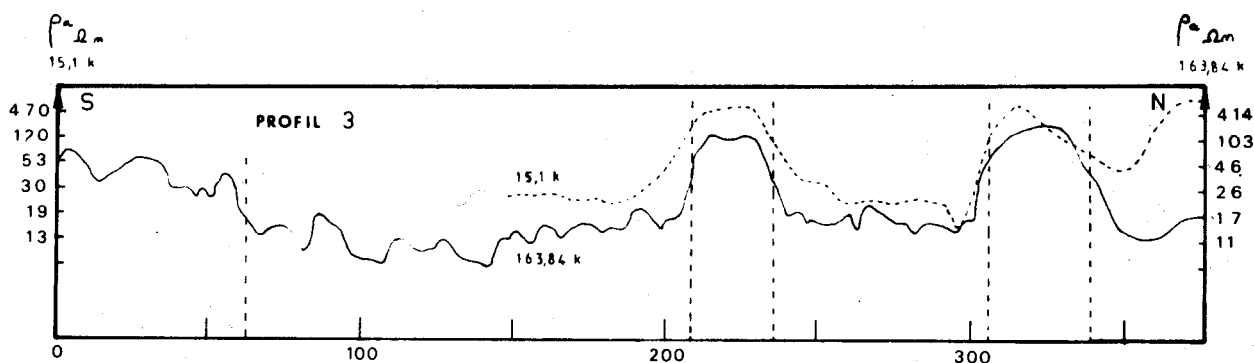
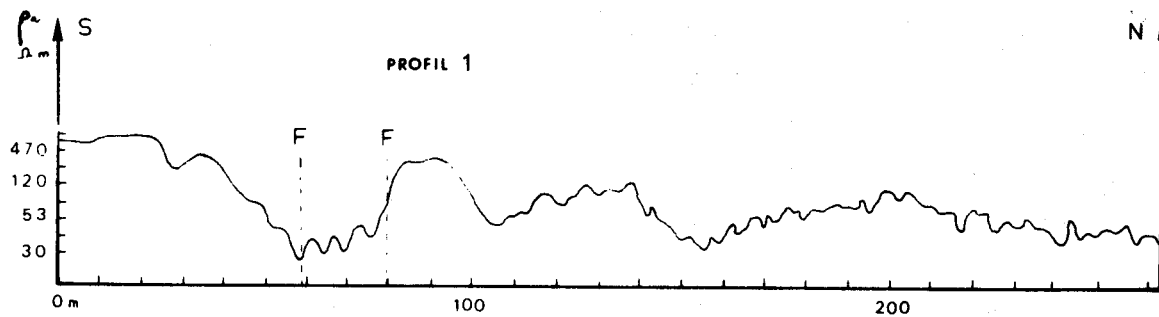


Figure 27 : "LE BOIS CLAIR" : Evolution de la résistivité le long des profils 1, 3 et 4.



compare avec la carte établie d'après les forages et les affleurements, on s'aperçoit que chaque compartiment est bien individualisé. De l'Est vers l'Ouest, on retrouve : le socle granitique, de résistivité apparente élevée ( $> 1\ 500\ \Omega\text{m}$ ) ; les marnes ( $\rho_a = 25\ \Omega\text{m}$ ) ; le granite ( $\rho_a \approx 1\ 500\ \Omega\text{m}$ ) ; puis à nouveau les marnes. Avec la fréquence d'Allouis, il est probable que l'on accède à la résistivité vraie des marnes (environ  $15\ \Omega\text{m}$ ) car la profondeur d'investigation est très faible ; la profondeur de pénétration n'est elle-même que de 5 m. Les valeurs calculées à partir de la fréquence de Châteauroux sont plus fortes étant donnée la profondeur d'investigation plus grande.

A l'extrémité E, la résistivité faible indique l'existence non pas des marnes triasiques, mais d'un placage d'argile sur le granite. Seule l'observation directe sur le terrain permet cette information. Tout au plus peut-on supposer, par l'étroitesse de la lentille conductrice sur les traînés qu'il ne s'agit pas d'une couche mais simplement d'une formation d'altération locale.

Le prolongement du traîné vers l'W est intéressant car il sort de la zone prospectée et interprétée.

La résistivité augmente régulièrement de 10 à 60  $\Omega\text{m}$ . Ceci est certainement en rapport avec l'existence d'un pendage vers l'Est qui fait remonter le socle. Ce socle doit être recouvert des grès triasiques car la valeur de  $\rho_a$  atteinte est trop faible pour correspondre au granite.

De sorte que si l'on se reporte à la carte, le prolongement des failles ne semble pas assuré, à moins que FI ne change de direction, vers le SW. Alors, on aurait, comme pour le profil 1, marnes sur grès sur granite. Ca n'est là qu'une supposition que seule une étude plus poussée pourrait confirmer ou infirmer ...

### III-3-c Profil 4 (figure 27)

Par ce profil, on cherche à savoir si le grès triasique n'existe pas un peu plus au NE de la limite indiquée.

Les valeurs de la résistivité apparente sont particulièrement faibles. On ne remarque aucune variation significative. Le grès n'existe donc qu'à une profondeur supérieure à 4 m (profondeur de pénétration à 163,84 KHz pour  $\rho_a = 10\ \Omega\text{m}$ ) ou pas du tout.

### III-3-d Profil 5 - Comparaison avec le procédé Mélos (figure 28)

La figure 28 représentant l'évolution de la résistivité en fonction de la distance est établie à partir de l'enregistrement continu du rapport H/E.



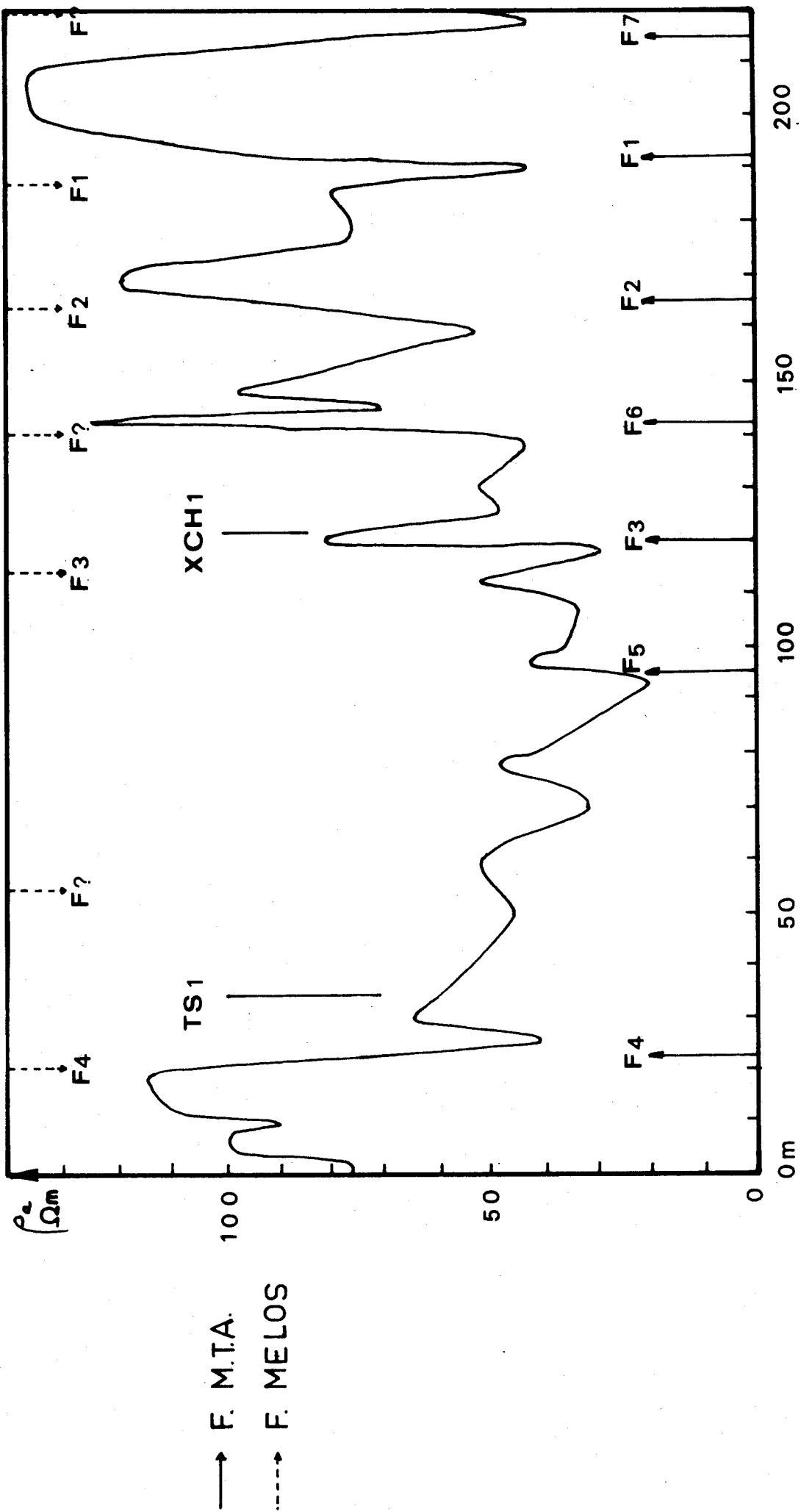


Figure 28 : "LE BOIS CLAIR" : Evolution de la résistivité le long du profil 5. Position supposée des failles.



Les failles  $F_1, F_2, F_3, F_4$  sont connues. Leurs positions exactes sont susceptibles d'être légèrement modifiées, vu l'imprécision relative de l'exploitation des sondages mécaniques.

Le profil M.T.A. détermine la position de ces failles ; son allure en dents de scie permet de dire qu'elles sont nombreuses. D'une manière générale, elles sont marquées par un pic fortement prononcé.

C'est ainsi que du départ jusqu'à 120 m la diminution globalement régulière de la résistivité traduit un enfoncement général du socle cristallin.

A 22 m cependant, la chute brutale de la résistivité indique la présence d'une faille.

De même la baisse de  $\rho_a$  est régulière jusqu'à 95 m, puisqu'elle diminue de 65 à 20  $\Omega\text{m}$ . Mais  $\rho_a$  remonte ensuite à 35  $\Omega\text{m}$  entre 95 et 115 m. On place une faille à 95 m.

A partir de cet endroit, la résistivité augmente par compartiments successifs : de 125 à 140, de 145 à 160, de 175 à 190, de 195 à 210 m.

A l'intérieur de chaque compartiment, on suppose que la résistivité baisse de la gauche vers la droite, c'est-à-dire de W vers l'E, selon la tendance générale d'un pendage de  $25^\circ$  vers l'E. D'autre part, la résistivité moyenne augmente vers l'E.

On en déduit que le socle est découpé en étroits compartiments qui le rapprochent de la surface et à l'intérieur desquels la couverture triasique garderait son pendage vers l'Est.

La position des failles est assez précise pour  $F_1, F_3, F_4, F_6, F_7$ . Elle est plus floue pour  $F_2$ , douteuse pour  $F_5$ .

Sur la figure 28, on a également reporté la position des failles détectées par le Mélos (DE SAMBUCY-LONGERE-FOSSEY, 1973).

Les données sont fortement semblables. A 10 m près au plus elles confirment nos résultats. Seule la faille  $F_5$  n'est pas corroborée par le Mélos ; cette méthode a par contre situé une autre faille au point 65. Pour  $F_5$ , il est difficile de se prononcer. On peut l'invoquer pour la raison explicitée plus haut, à savoir la baisse régulière de la résistivité de 30 à 95 m. S'il y a faille au point 65, elle ne doit avoir qu'un rejet très faible.

Il apparaît que la méthode M.T.A. conduit à des résultats comparables à ceux du procédé Mélos, du point de vue qualitatif. La localisation des failles s'avère être identique, la seule différence est que la réalisation du traîné en M.T.A. a demandé 5 minutes alors que le Mélos demande plusieurs heures.

Là encore, la rapidité de la méthode M.T.A. est de beaucoup supérieure à celle d'une autre méthode. Mais les résultats ne sont toujours que qualitatifs. Dans le cas présent, le Mélos n'a pas pu être utilisé à plein rendement et seule une partie du spectre de fréquence a permis des mesures. L'exploitation par sondages s'avère donc impossible. Mais, dans des conditions favorables, le procédé Mélos offre l'avantage de donner des résultats quantitatifs.

En définitive, dans l'état actuel de l'appareillage, le procédé Mélos semble surtout être un moyen qualitatif de reconnaissance. La méthode magnétotellurique est donc plus favorable à ce genre d'étude puisque plus rapide.

#### III-4 Conclusion

L'ensemble des traînées a duré quelques heures seulement. Sans doute n'est-il pas inutile de préciser que le sol était recouvert de neige. L'importante surface portante de l'appareil lui permet de glisser en ne s'enfonçant que d'environ 2 cm dans la neige.

Cependant, l'épaisseur de la neige (qui représente le diélectrique) joue un rôle important.

On sait que la valeur d'un condensateur est inversement proportionnelle à l'épaisseur du diélectrique et proportionnelle à la variation de permittivité.

On prendra 2 000 pF comme valeur moyenne d'une électrode capacitive (II - II-4).

Si l'on estime à  $10 \epsilon_0$  la permittivité du caoutchouc et à  $2 \epsilon_0$  celle de la neige, la capacité va être divisée par 5 dès que l'épaisseur du diélectrique-neige sera grande devant celle du diélectrique-caoutchouc.

Le chemin qu'emprunte le profil 3 était couvert d'environ 15 cm de neige, ce qui représente une épaisseur de diélectrique 10 fois supérieure à celle obtenue sans neige (environ 1,5 cm).

La capacité sera donc 50 fois plus faible avec 15 cm de neige et l'impédance 50 fois plus forte.

A 163,84 KHz l'impédance sera de 25 K $\Omega$  et de 250 K $\Omega$  à 15,1 KHz, ce qui représente respectivement 0,25 % et 2,5 % de l'impédance d'entrée ( $Z_e > 10 M\Omega$ ) du boîtier d'adaptation d'impédance connecté à chaque électrode.

Mais pour les traînées effectués dans le pré où l'épaisseur de la neige atteignait 40 cm, les impédances de chaque électrode étaient à 163,84 KHz et à 15,1 KHz respectivement de 65 K $\Omega$  et de 650 K $\Omega$ , ce qui correspond à

0,65 % et à 6,5 % de l'impédance d'entrée. La fréquence de Châteauroux est fortement affectée par l'épaisseur de la neige. Cependant, les résultats obtenus sont exploitables. Il semblerait que l'on ait eu la chance de travailler sur un tapis de neige uniformément épais, ce qui aurait modifié quantitativement les valeurs de la résistivité, mais aurait laissé intactes ses évolutions horizontales.

Les résultats sont très cohérents avec ceux du Mélos et avec l'exploitation qui a été faite d'après les forages piézométriques et les affleurements.

Le seul inconvénient réel est l'obligation de se déplacer dans une direction à moins de 45° de celle de l'émetteur. C'est la raison pour laquelle le profil 2, N-S n'a permis aucune exploitation.

Si cette étude n'a pas été faite, il faut cependant préciser qu'elle est réalisable. En effet, il suffit de diriger l'appareil vers l'émetteur, c'est-à-dire perpendiculairement au chemin, et faire des mesures ponctuelles à maille de 10 m par exemple. C'est long, fastidieux et mal commode, mais cela permet d'obtenir des valeurs du rapport H/E dans une direction perpendiculaire à l'émetteur. Notons qu'une étude aurait également pu être tentée avec le tapis de 1 m qui aurait permis d'obtenir un enregistrement du vecteur tellurique ( $E_x$ ), mais pas du rapport H/E.

En conséquence, si cette direction N-S pose quelques problèmes, ceux-ci peuvent néanmoins être résolus.

De toute façon, lorsqu'on connaît les exigences, par ailleurs réduites, de la M.T.A., on peut le plus souvent concevoir un plan de travail qui permette de résoudre un problème dans les meilleures conditions possibles.

#### IV - ETUDE PEDOLOGIQUE DANS LE MORVAN

##### IV-1 Généralités

Cette étude a été menée à bien en collaboration avec M. P. AUROUSSEAU\* (1976).

Le problème était de déterminer les variations d'un recouvrement d'altération sur substratum granitique, donc d'effectuer un travail comparable à un profil de résistivité mettant en oeuvre un "bicouche" de type milieu conducteur sur milieu résistant.

---

\* Assistant à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes (ENSAR).

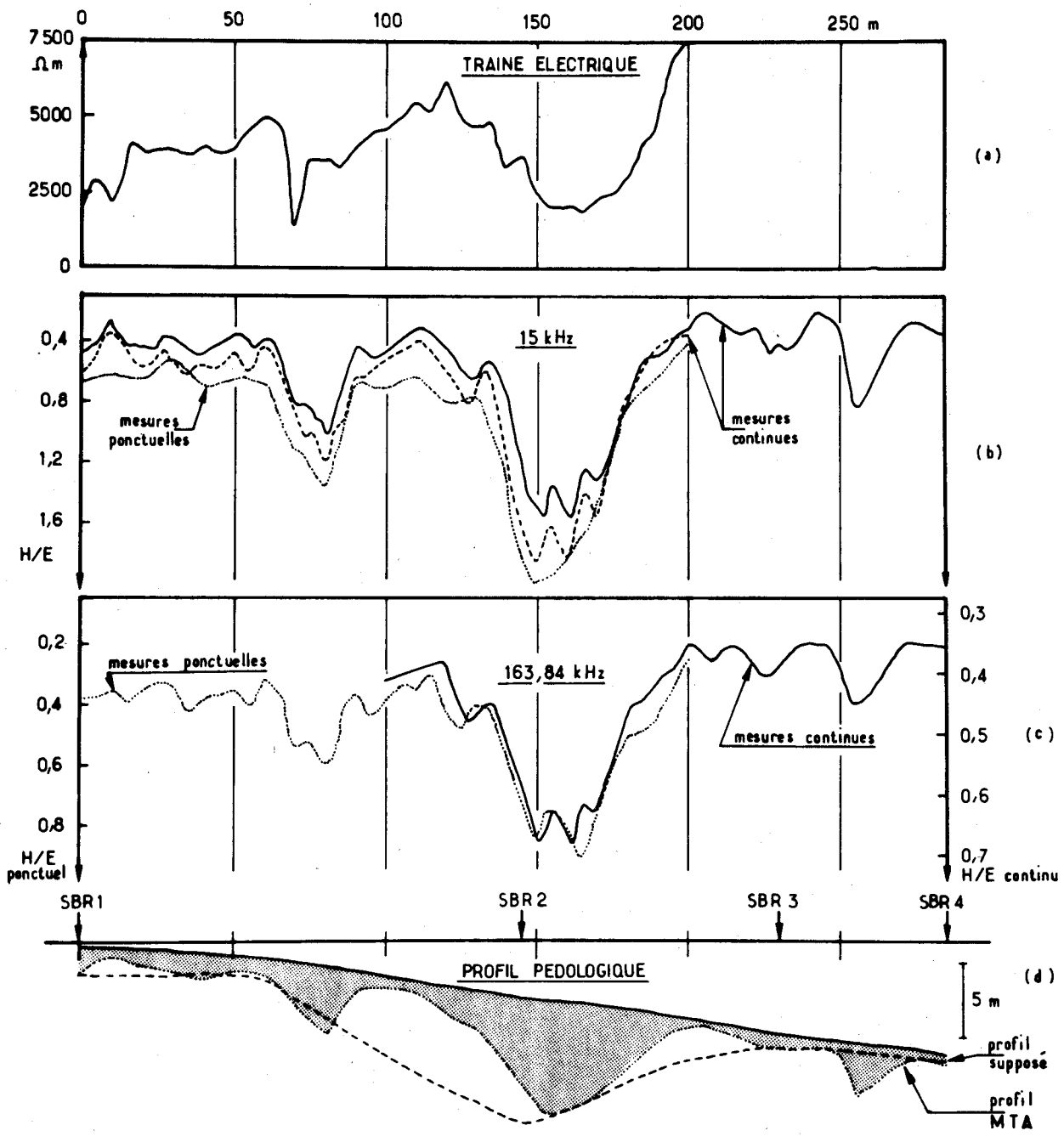


Figure 29 : "LE MORVAN" : Profil pédologique supposé et interprété d'après les trainées M.T.A. et électriques.

On pourra repérer le site sur la carte au 1/50 000 de Saulieu 1-2 d'après les coordonnées suivantes :

- latitude :  $Y = 257,4$ ,
- longitude :  $X = 731,75$ .

Le long d'une laie forestière, située en plein coeur de la forêt du Parc National du Morvan, plusieurs fosses ont été creusées à la pelle mécanique. Leur profondeur est d'environ 3 m et donne ainsi accès directement aux coupes pédologiques. Ces coupes montrent que le sous-sol est constitué de granite à gros cristaux feldspathiques ; cette roche dure et saine s'altère à proximité de la surface, pour laisser place à une arène pouvant contenir quelques intercalations argileuses quand elle est épaisse. La hauteur de cette zone altérée varie beaucoup d'une fosse à l'autre (de 2 à 8 m).

La topographie du site donne a priori une idée du profil pédologique. En effet, au niveau où l'arène est mince (2 m d'après la fosse SBR 1), le sol est horizontal. Une brusque rupture de pente mène à la fosse SBR 2 où l'arène est par contre très épaisse (environ 8 m) ; enfin, au niveau de SBR 3, la zone altérée est inférieure à 2 m. Ce sont ces renseignements élémentaires qui ont d'abord conduit au tracé supposé du profil pédologique (figure 29).

Mais, si hypothétique que soit ce tracé, il n'en est pas moins extrêmement important et utile pour la suite de ce travail, car trois fosses nous donnent une côte absolue de l'interface.

Parallèlement à la M.T.A., on utilisera un dispositif de Wenner pour effectuer un traîné électrique. Comme on le verra, les profils sont qualitativement identiques, mais différents quantitativement, ce qui irait à l'encontre du paragraphe I (on y a démontré que les résistivités apparentes en M.T.A. et en SE correspondaient).

En fait, la M.T. sensu stricto est directement comparable au sondage électrique. Les deux méthodes permettent d'obtenir des épaisseurs et des résistivités vraies. Les courbes de résistivités apparentes  $\rho_a$  ont la même allure, bien que l'une soit en fonction de la longueur  $L$  du dispositif et l'autre en fonction de la racine carrée de la période du signal  $T$ .

Notre méthode est totalement différente. En M.T.A., on ne dispose que de trois fréquences (le plus souvent 2 seulement). C'est évidemment trop peu pour réaliser un sondage qu'on traiterait par abaques. Etant donné que l'on n'utilise qu'une fréquence à la fois, tirer l'appareillage sur le sol revient à étudier les variations horizontales de la résistivité. L'esprit

de la méthode est donc le même que le traîné électrique. Il existe cependant une différence très importante : la géométrie d'un dispositif de traîné électrique ainsi que le contraste de résistivité détermine la profondeur d'investigation de la méthode ; en gardant toujours le même paramètre  $a$  (en Wenner), on étudie donc bien les variations latérales de la résistivité apparente pour une épaisseur donnée de terrain fonction de  $a$  et de  $\rho_2/\rho_1$ . En M.T.A., la profondeur de pénétration d'une onde est fonction de sa fréquence, en plus de la résistivité et la profondeur d'investigation du contraste de résistivité. De telle sorte que, en déplaçant l'appareil sur le sol, on ne prospecte pas toujours la même épaisseur de terrain. Au contraire, elle diminue lorsque la résistivité baisse et augmente lorsque la résistivité devient plus forte. Ceci a pour effet de contraster les résultats M.T.A. par rapport au traîné électrique. Le schéma de la figure 30 explicite ce phénomène. On note, en particulier, que le traîné électrique, choisi de façon qu'il ait la même profondeur de pénétration dans le milieu résistant qu'en M.T.A. à 163,84 KHz, ne donnera pas la résistivité vraie du milieu conducteur. Cette valeur est pourtant obtenue en B avec la fréquence d'Allouis du fait de la diminution de la profondeur de pénétration et a fortiori de la profondeur d'investigation en fonction de la résistivité.

Evidemment, on ne peut déterminer la profondeur de l'interface ; tout au plus peut-on dire qu'il se trouve entre 12 et 57 m.

Dans le cas présent, cependant, il est possible d'accéder à l'épaisseur de l'arène granitique. On connaît l'importance de cette zone altérée au niveau des fosses. On connaît par ailleurs la valeur du rapport H/E au niveau de ces repères. On peut donc "étalonner" chaque valeur de H/E par rapport à l'épaisseur de l'altération. Ainsi, on trace la limite arène-granite, simplement d'après la forme du profil H/E et d'après l'amplitude de ses variations.

#### IV-2 La M.T.A. et les autres méthodes d'investigation

En M.T.A., pour réaliser des enregistrements continus du rapport H/E, on s'est servi du tapis de 2 m. Parallèlement, d'autres méthodes géophysiques ont été utilisées, toujours dans le but d'une étude comparative des résultats. Aussi deux sondages ont été effectués en M.T. minière ainsi qu'un profil de résistivité réalisé à l'aide d'un dispositif de Wenner. Pour permettre de l'étalonner, on a fait un sondage électrique perpendiculairement au chemin au niveau de la fosse SBR 2 (dans le sens du chemin, les effets de bord dus aux parois de la fosse auraient perturbé les mesures). Malheureusement, la

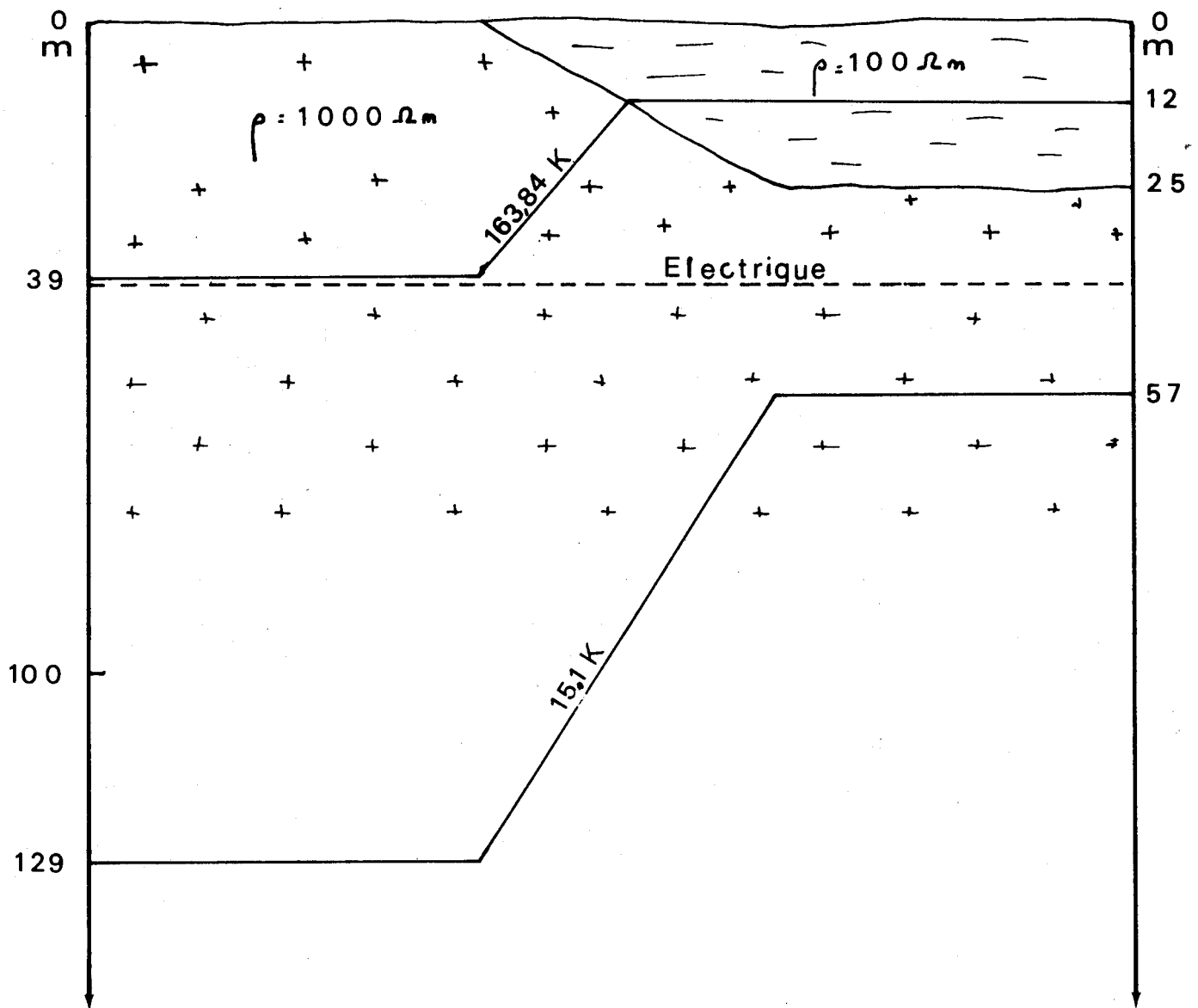


Figure 30 : Evolution latérale de la profondeur de pénétration d'une onde.  
 Comparaison avec le trainé électrique.





végétation nous a empêché de dépasser un AB de 30 m. On a donc été obligé de faire une hypothèse sur la profondeur d'investigation et de choisir un AB en estimant que la profondeur atteinte est égale à AB/4 (BERTRAND Y., 1967). De plus, pour des raisons de commodité et de rapidité, on a pris un AB égal à 15 m (a = 5 m).

La longueur des profils est d'environ 200 m.

#### IV-3 Les mesures

Tous les profils enregistrés, graphiques réalisés à partir des données ponctuelles (tableau 9) et interprétations sont regroupés sur la figure 29.

Celle-ci met en évidence la concordance quasi parfaite entre les diverses courbes. Qu'il s'agisse de prospection électrique ou magnétotellurique, d'enregistrements continus ou de mesures ponctuelles, toutes les déformations significatives se superposent.

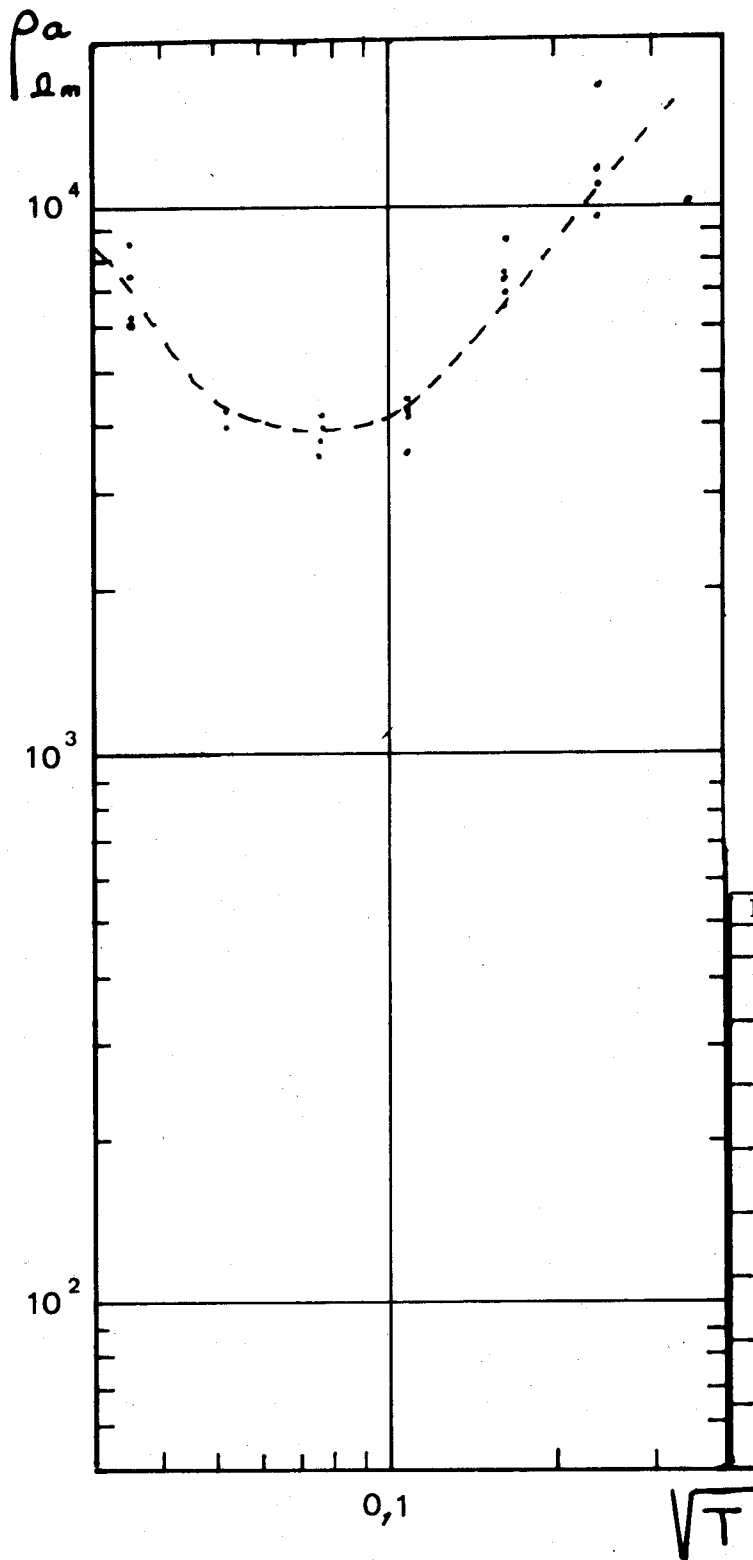
##### IV-3-a Sondages M.T.M.

Deux sondages M.T.M. ont été tentés, comme il a été dit plus haut, afin d'avoir une meilleure connaissance, si possible, de la séquence stratigraphique du site. Malheureusement, cet essai de sondages n'a pas conduit à des résultats directement exploitables pour le problème qui nous intéresse. On sait en effet que la profondeur de pénétration d'une onde est fonction de la résistivité du sol ( $p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10\rho T}$ ) Or, celle-ci atteint des valeurs assez élevées, comme on peut le voir sur la figure 31. Ainsi, à 800 Hz, pour une résistivité apparente de 6 000  $\Omega m$ , la profondeur de pénétration atteint 1 400 m. Ces résultats sont évidemment inutilisables pour une recherche de surface.

##### IV-3-b Trainé électrique

La prospection électrique avec le dispositif de Wenner se prête beaucoup mieux que le dispositif de Schlumberger à ce genre de problème, parce que l'on a la possibilité de l'adapter spécialement au cas étudié.

Rappelons très succinctement le principe de cette méthode. La façon de procéder pour accéder à la résistivité apparente a déjà été exposée plus haut. C'est la mise en oeuvre qui est spécifique. On s'arrange pour que les quatre électrodes soient équidistantes. L'importance de la ligne de mesure rend le dispositif plus sensible que celui de Schlumberger. Dans ce cas là,  $\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$  où a est la distance entre deux électrodes voisines.



Fréquence Hz	ρ Ω.m		
	8	10 000	
17	9 500	16 500	16 750
	11 000	11 500	11 250
37	6 500	7 500	8 625
	7 425	6 950	
80	4 500	4 300	3 550
	4 200	4 350	
170	3 500	4 200	3 750
	4 000		
370	4 000	4 250	4 000
	4 250		
800	7 500	7 500	6 125
	6 150	8 750	
1 700	6 000	6 625	3 000
	3 500	3 875	3 000



Figure 31 : "LE MORVAN" : Sondage M.T.M. au point 110.

Lorsque les mesures de  $\Delta V$  et  $I$  sont terminées, on déplace l'électrode d'injection A pour l'amener de l'autre côté de B. Le rôle des électrodes change. M se retrouve à l'extrémité de la ligne et devient l'électrode d'injection A. N reste électrode de mesure mais devient l'électrode gauche M ; B ne sert plus à l'injection, mais à la mesure et remplace N. Quant à A, elle prend le rôle de B. Ainsi, en ne déplaçant qu'une seule électrode, tout le dispositif subit une translation vers la droite, obligatoirement égale à  $a$ , et peut fournir une nouvelle mesure. Si  $a$  est faible, la profondeur d'investigation l'est aussi, mais la fréquence des mesures est élevée. Si  $a$  est grand, le profil est moins précis, mais la profondeur de pénétration est plus grande. C'est un compromis que l'on a choisi en prenant  $a = 5$  m.

#### IV-3-c La M.T.A.

Quelques soient les mesures, on a utilisé systématiquement le gain de 1. Le niveau des signaux étant suffisamment puissant, aucun gain commutable n'est nécessaire. Si l'on désire effectuer un calcul de résistivité apparente, on se reporte aux formules ci-dessous, établies en tenant compte de tous les paramètres :

$$- \text{à } 163,84 \text{ KHz, } \rho_a = \frac{336,8}{(H/E)^2} \Omega\text{m}$$

$$- \text{à } 15,10 \text{ KHz, } \rho_a = \frac{2\ 814,5}{(H/E)^2} \Omega\text{m}$$

Les courbes ponctuelles de  $\rho_a$  (figure 32) sont tracées d'après le tableau de mesures (tableau 9).

Si l'on compare ces courbes de résistivités aux courbes du rapport  $H/E$  (figure 29), on s'aperçoit que ces dernières sont plus lisses et plus homogènes. C'est la raison pour laquelle on préfère le plus souvent le rapport  $H/E$  pour les interprétations qualitatives définitives.

#### IV-4 Interprétation

Toutes les courbes conduisent aux mêmes conclusions, à savoir qu'à 60 m du point de départ, la rupture de la pente correspond effectivement à une chute de résistivité : il y a augmentation de l'épaisseur de l'arène (figure 29). Mais, alors qu'on supposait une géométrie progressive permettant d'atteindre régulièrement la profondeur maximale au niveau de la fosse SBR 2, il est évident qu'il ne s'agit là en fait que d'une fosse de peu d'amplitude, n'ayant pas réellement l'importance qu'on lui accordait. En fait, elle n'a

BUS  
LILLE

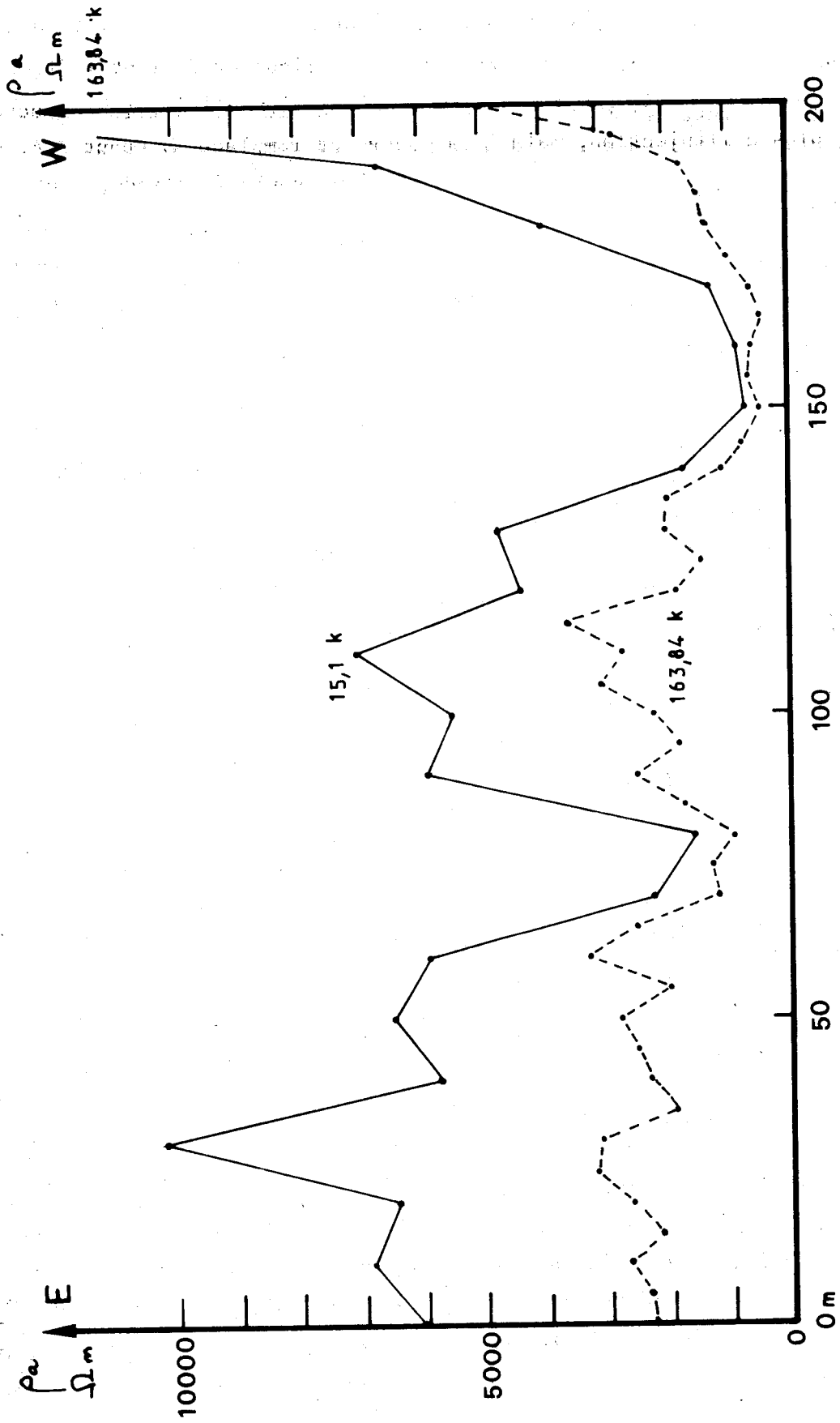


Figure 32 : "LE MORVAN" : Courbe de résistivités apparentes ponctuelles.

TABLEAU 9 : Calcul des résistivités apparentes dans le Morvan à partir des données ponctuelles en M.T.A..

163,84 KHz

$$\rho = 336,835 \times \frac{1}{(H/E)^2}$$

Distance m	H/E	$\rho_a$ $\Omega m$
250	0,253	5 262
	0,347	2 797
190	0,439	1 748
	0,486	1 426
180	0,508	1 305
	0,592	961
170	0,766	574
	0,902	414
160	0,803	522
	0,743	610
150	0,830	489
	0,722	646
SBR2 ) 140 )	0,575	1 019
	0,416	1 946
130	0,404	2 064
	0,480	1 462
120	0,430	1 822
	0,300	3 660
110	0,352	2 718
	0,332	3 056

Distance m	H/E	$\rho_a$ $\Omega m$
100	0,387	2 249
	0,433	1 797
90	0,364	2 542
	0,440	1 740
80	0,600	936
	0,524	1 227
70	0,533	1 186
	0,366	2 515
60	0,316	3 373
	0,405	2 054
50	0,343	2 863
	0,363	2 556
40	0,376	2 383
	0,420	1 909
30	0,329	3 112
	0,320	3 229
20	0,354	2 689
	0,390	2 215
10	0,354	2 688
	0,374	2 408
SBR1 ) 0 )	0,380	2 333



TABLEAU 9 (suite)

15,1 KHz

$$\rho = 2\,814 \times \frac{1}{(H/E)^2}$$

Distance m	H/E	$\rho_a$	$\Omega m$
200	0,43	15 222	
190	0,65	6 662	
180	0,84	3 989	
170	1,5	1 251	
160	1,86	814	
150	1,99	711	
SBR2 )			
140 )	1,28	1 718	
130	0,77	4 747	
120	0,80	4 398	
110	0,63	7 091	
100	0,71	5 583	
:	:	:	:

Distance m	H/E	$\rho_a$	$\Omega m$
90	0,69	5 912	
80	1,35	1 544	
70	1,12	2 244	
60	0,69	5 912	
50	0,66	6 461	
40	0,70	5 744	
30	0,53	10 020	
20	0,66	6 461	
10	0,64	6 871	
SBR1 )			
0 )	0,68	6 087	
:	:	:	:



qu'une trentaine de mètres de largeur et vers 90 m, la résistivité est redevenue ce qu'elle était au début du profil. Le granite est donc proche de la surface. Ce fait est nouveau et change l'interprétation initiale du pédologue. La résistivité décroît à nouveau vers 130 m pour ne remonter ensuite que vers 180 m.

Les profils définissent non pas une large fosse d'arène, mais deux fosses plus étroites séparées par un bloc de granite peu altéré.

On remarquera que le traîné électrique donne, au niveau de SBR 2, une résistivité apparente de  $2\ 500\ \Omega\text{m}$  ; si l'on accepte l'hypothèse d'une profondeur d'investigation  $AB/4 \neq 4\ \text{m}$ , cette valeur de  $\rho_a$  est en fait la résistivité vraie de l'arène. Par contre, la M.T.A. donne comme valeurs de  $\rho_a$ ,  $800\ \Omega\text{m}$  à 15,1 KHz et  $500\ \Omega\text{m}$  à 163,84 KHz, ce qui correspond respectivement à 110 m et 28 m de profondeur de pénétration. Si l'on considère que la résistivité vraie du granite est de  $8\ 000\ \Omega\text{m}$  (valeur atteinte par le traîné et le 15,1 KHz à 200 m, là où l'arène n'existe pratiquement plus), et que l'épaisseur de la zone altérée est de 8 m en SBR 2, la méthode des conductances équivalentes nous donne une résistivité vraie de l'arène d'environ  $100\ \Omega\text{m}$ .

La différence avec le traîné électrique ( $\rho = 2\ 500\ \Omega\text{m}$ ) est considérable, mais très riche d'enseignements.

Il faut savoir en effet, que les mesures M.T.A. ont été faites au mois de juin ; ce mois a été particulièrement pluvieux et les mesures ont été interrompues à trois reprises par des averses. Ces détails, sont d'une grande importance, car dès que l'arène est gorgée d'eau, sa résistivité décroît considérablement. D'ailleurs, dans le fond de la fosse SBR 2 affleurerait le niveau de la nappe phréatique. Sur les 8 m d'altération, 5 étaient complètement saturés en eau. Il va de soi que l'arène était devenue un sol conducteur (environ  $100\ \Omega\text{m}$ ).

Le traîné électrique, au contraire, a été réalisé au mois d'août, pendant une longue période de sécheresse. L'eau de l'arène (dans laquelle le pourcentage de minéraux argileux est faible) s'est écoulée vers la rivière à quelques centaines de mètres et a quitté ainsi la fosse SBR 2. La résistivité de la zone altérée était donc celle d'un sol peu cohérent et c'est la raison pour laquelle elle est élevée ( $2\ 500\ \Omega\text{m}$ ).

Ainsi, la différence considérable entre les résistivités proposées par les deux méthodes s'explique par la présence de l'eau, et c'est pourquoi, lorsque l'épaisseur arénisée est très faible (vers 200 m), les résultats sont cohérents.

Une application des possibilités de la M.T.A. serait donc d'éclaircir les voies de circulation de l'eau dans les régions granitiques. On peut très bien imaginer, sur un site granitique, de réaliser deux études identiques de résistivités apparentes, mais l'une par temps sec, l'autre par temps pluvieux. La confrontation des deux séries de données devrait pouvoir conduire à une meilleure compréhension de la circulation de l'eau dans la zone altérée ...

Quelle que soit la méthode géophysique, il devient possible de rectifier le profil pédologique. En M.T.A., on a dit que l'arène était très conductrice (100  $\Omega$ m). On peut donc considérer que le substratum (8 000  $\Omega$ m) est infiniment résistant par rapport à la couche superficielle.

Dans ce cas précis, le rapport des champs s'exprime sous la forme :

$$\left| \frac{H_y}{E_x} \right| = 2 \sqrt{\frac{T}{\rho_1} \frac{h}{\rho_1}} \quad (\text{CAGNIARD, 1953})$$

avec  $\rho_1$  : résistivité de la couche superficielle,

$T$  : période du signal,

$p_1$  : profondeur de pénétration de l'onde,

$h$  : épaisseur du recouvrement (il faut que  $h \ll p_1$ ).

C'est pourquoi l'on peut déduire du rapport  $\frac{H}{E}$ , l'épaisseur de l'arène granitique puisqu'elle lui est simplement proportionnelle.

Les trois fosses SBR 1, SBR 2 et SBR 3, nous donnent les côtes absolues  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  de l'interface arène-granite :

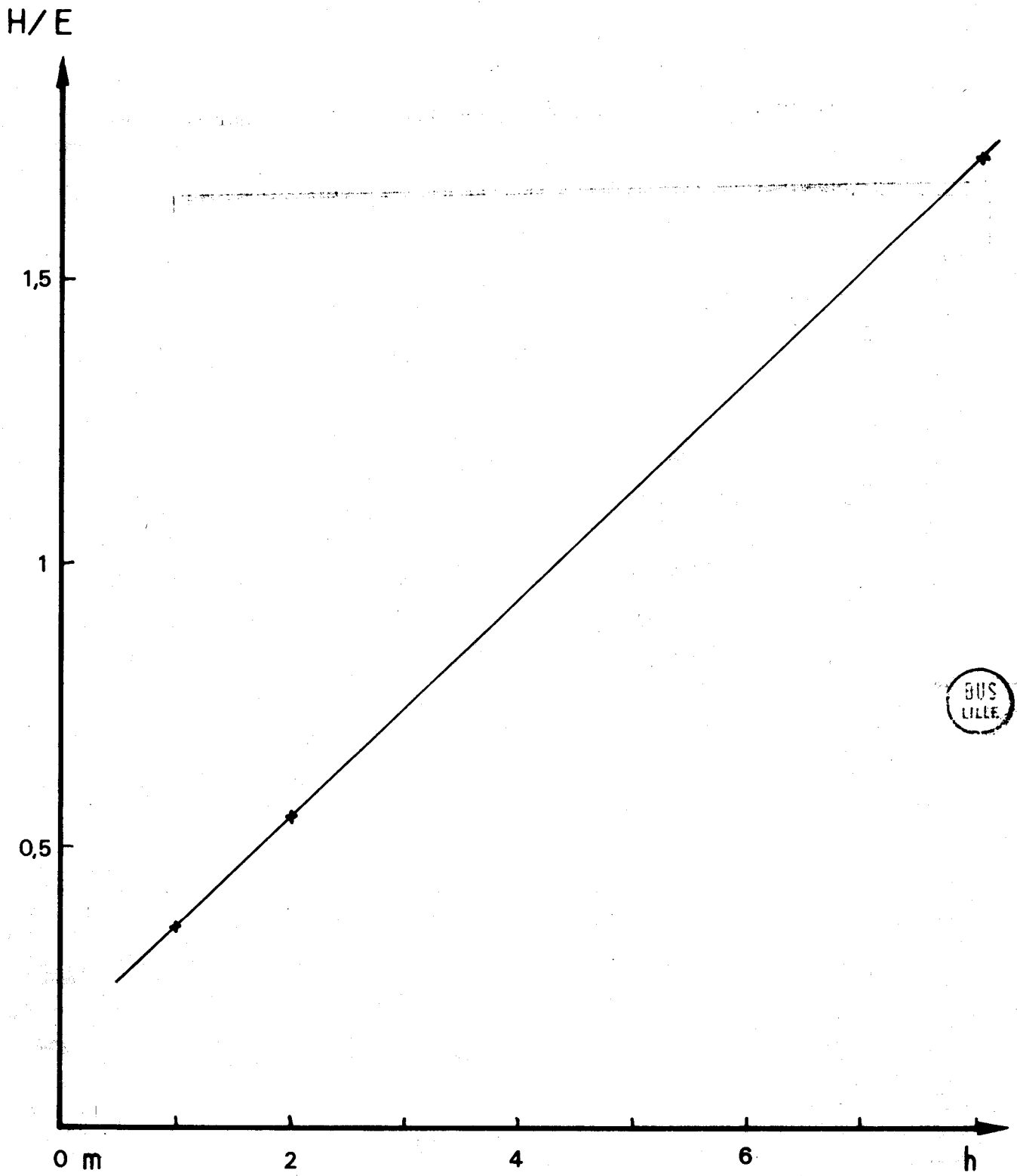
$$h_1 = 2 \text{ m,}$$

$$h_2 = 8 \text{ m,}$$

$$h_3 = 1 \text{ m.}$$

On peut donc tracer la courbe  $H/E = f(h)$  à 15,10 KHz (figure 33). (On prendra le profil continu pour éviter les éventuelles erreurs de mesures ponctuelles). De là, on déduit les valeurs du tableau 10.





BUS  
LILLE

Figure 33 : "LE MORVAN" : Courbe  $H/E = f(h)$  à 15,1 KHz.

BUS  
LILLE



Est-il besoin d'ajouter que les mesures avec le dispositif de Wenner ont nécessité 5 h de travail pour une seule géométrie du dispositif de mesure. Les mesures M.T.A. ponctuelles durent plus d'une heure par fréquence, alors qu'en six minutes environ, on termine un traîné en continu, apparemment de meilleure qualité que le traîné électrique.

Il est inutile d'insister davantage sur les possibilités qu'offrent cet appareil dans le cadre de recherches pédologiques à condition toutefois (et c'est la restriction essentielle) que le contraste des résistivités mises en jeu soit important. Les résultats seront d'autant meilleurs que les contrastes seront plus importants. Il est également nécessaire d'avoir un forage d'étalonnage.

## B - PROSPECTION SUR DES STRUCTURES ARTIFICIELLES : LES CAVITES

### I - GENERALITES

Dans le domaine du génie civil ou du génie rural, il arrive fréquemment que l'art de l'ingénieur soit confronté au problème du repérage et de la définition de cavités : fondation de structures lourdes, tracé de voies importantes, stabilité des sols, réouverture de carrières anciennes, étude hydrogéologique et spéléologique de karst. D'une manière générale, toutes les régions crayeuses (Bassin Parisien, Nord de la France) sont confrontées avec ce genre de problème. De même, l'archéologie est largement intéressée par le développement des techniques de repérage des cavités souterraines pour pouvoir, le cas échéant, percer les puits d'accès à partir de la surface.

Ces différentes éventualités nous ont conduit à étudier trois cas de structures creuses types : ce sont des structures in situ. Elles présentent l'avantage de considérer des cas géométriques idéaux, ce qui simplifie évidemment l'étude.

Les trois structures envisagées seront successivement :

- un tunnel désaffecté de la SNCF, que l'on identifiera à une inclusion cylindrique horizontale, image par exemple d'une galerie préhistorique ou d'une galerie d'accès de carrière souterraine ;

- un caveau anciennement destiné à des mesures magnétométriques et qui se rapproche d'une forme sphérique ;

- enfin, des puits d'extraction de la craie, les catiches, assimilables à des formes également sphériques.

## II - QUELQUES METHODES GEOPHYSIQUES DE DETECTION DES CAVITES

Depuis longtemps déjà, on essaye d'appliquer les méthodes géophysiques à la recherche des cavités, mais à l'heure actuelle, aucune technique n'est encore universelle. On citera néanmoins les méthodes :

- électrique,
- sismique,
- gravimétrique,
- électromagnétique

en donnant les limites de leurs possibilités.

### II-1 La prospection électrique

On peut citer trois façons de traiter le problème :

- On peut utiliser un dispositif de Schlumberger et l'on recherche en augmentant progressivement la longueur de la ligne d'injection, une anomalie quelconque due à l'intervention d'une structure creuse. E. DILMANN (1968) en donne un exemple : il a localisé de la sorte certaines galeries lors de la construction de la rocade Ouest de Strasbourg (Autoroute A 35).

- On peut également calculer la profondeur d'une cavité en augmentant la taille d'un dispositif de Wenner. Dès qu'une valeur de  $\rho_a$  diffère de la logique des précédentes, on estime que la cavité est atteinte à la profondeur  $AB/4$ . Cette méthode, proche de la précédente car basée sur le sondage, a été développée par PALMER (1954) et TAGG (1964).

- Dans le même ordre d'idée, BRISTOW (1966) développe une technique ratiométrique en utilisant un quadripôle dont il fixe l'électrode B à l'infini (en pratique, elle est reportée à quelques centaines de mètres). Il déplace alors son dipôle de mesure de l'électrode A vers l'électrode B, effectuant un aller-retour avec permutation des électrodes d'injection et comparant les deux profils obtenus.

De ces deux dernières méthodes, D. P. CREEDY and J. FREMAN (1974) pensent que la seconde donne les meilleurs résultats.

Cependant, toutes ces techniques apportent des renseignements souvent très approximatifs.

### II-2 La prospection sismique

L'influence d'une cavité dans le sol sur la propagation d'une onde sismique se traduit par :

- une diffraction des ondes incidentes,

- une diminution des vitesses de propagation,
- des atténuations anormales de ces ondes.

Différentes méthodes sont utilisées, la plus répandue étant la sismique réfraction dans laquelle on porte sur un graphique les temps d'arrivée d'un ébranlement provoqué par une source en fonction de la distance à la réception du signal. De la courbe obtenue (dromochronique), on déduit la vitesse de propagation des premières couches de terrain ainsi que leurs épaisseurs.

Une cavité est détectée par l'allure irrégulière d'une portion de la dromochronique. Cette méthode est également aléatoire étant donné qu'une ondulation d'une interface peut provoquer un phénomène identique.

Une autre technique utilise un vibreur lourd, transmettant dans le terrain une onde de fréquence donnée (entre 10 et 300 Hz). On compare les signaux émis et reçus en étudiant :

- le déphasage en fonction de l'éloignement à la source de différentes stations réparties le long du profil ;
- les amplitudes reçues.

En terrain théoriquement homogène, la courbe de phase serait rigoureusement droite, et la décroissance de l'amplitude serait régulière. Une cavité va se comporter comme une deuxième source dont l'onde ne sera pas en phase avec l'onde principale. La courbe de phase de la cavité sera une hyperbole dont le sommet est à l'aplomb de la cavité. La profondeur d'investigation limite est fonction de la fréquence car on ne peut penser détecter les anomalies que jusqu'à une profondeur voisine de la demi-longueur d'onde. Si 1 000 m/s est la vitesse de propagation de l'onde dans un terrain donné, il faudra, pour que l'on voie des cavités à 20 m de profondeur, que l'on ait :

$$F = \frac{V}{\lambda} = \frac{1\ 000}{40} = 25\ \text{Hz}$$

### II-3 La prospection gravimétrique

Fortement préconisée par un grand nombre d'auteurs, elle donne de bons résultats pour certaines recherches.

R. NEUMANN (1973), dans le Nord de la France, a détecté avec précision, d'une part des carrières, d'autre part des puits d'extraction (les catiches) en développant la technique microgravimétrique. C'est en particulier une excellente méthode pour distinguer les zones suspectes (à anomalies négatives dues aux galeries et chambres d'extraction) des zones saines.

Citons encore les travaux de F. GOELEN (1973) qui s'est appliqué à la recherche de zones de cavités par la microgravimétrie dans la région de Nivelles (Belgique), ainsi que de M. ARNOULD (1964) lors des travaux de l'autoroute Paris Nord, à l'antenne de Bagnolet.

Nous retiendrons que, d'une manière générale, la microgravimétrie se prête bien à la détection des vides situés à moins de 20 m de profondeur. Cependant, elle donne le plus souvent, d'un groupement de cavités, une anomalie globale. En théorie, la diminution de la taille des mailles de mesure permet une définition plus précise, mais elle augmente considérablement le coût de la prospection.

Une étude comparative, réalisée par le B.R.G.M. (MILLON R., 1963) sur des cavités de types bouteilles présentes sous l'aéroport de Lille-Lesquin, concluait au classement suivant :

- 1 - gravimétrie ;
- 2 - magnétisme, les résultats inattendus donnés par cette méthode étant sans doute le fait de circonstances fortuites extrêmement favorables, en l'occurrence la fermeture des puits par plaques de tôle ;
- 3 - résistivité ;
- 4 - sismique-réfraction.

#### II-4 La prospection électromagnétique

Elle est à la base de multiples méthodes artificielles qui toutes utilisent l'émission d'un champ EM contrôlé. Les hétérogénéités du sous-sol et en particulier les cavités (très résistantes) perturbent ce champ provoquant des modifications dans les conditions de sa réception.

On a rassemblé un certain nombre de ces techniques en deux groupes

- celles dont l'émetteur est à la surface du sol mais dont le récepteur est descendu dans un forage ; c'est la télédiagraphie ;

- celles dont l'émetteur et le récepteur se trouvent à la surface.

##### II-4-a La télédiagraphie

Cette méthode a été créée par l'équipe de Géopropagation de l'U.S.T.L. I\* sous la direction de R. GABILLARD. Elle "est basée sur la mesure de la conductivité apparente du terrain compris entre deux électrodes d'émission du courant, situées par exemple à la surface du sol, et deux électrodes de réception descendues dans un forage à une certaine profondeur". Elle permet "la détection d'un gisement sphérique situé à une profondeur bien supérieure à celle permise par les procédés classiques, à condition toutefois que la distance séparant ce gisement de l'axe du forage ne soit pas trop importante (pas plus de quatre fois le diamètre du gisement" (M. CAUTERMAN, 1971).

\* U.S.T.L. I : Université des Sciences et Techniques de Lille I.

#### II-4-b Méthodes électromagnétiques de surface

Le champ EM est créé dans le sol, soit au moyen d'un dipôle électrique horizontal (DEH), soit au moyen d'une boucle posée sur le sol (dipôle magnétique vertical DMV) (J. P. DUBUS, 1974).

L'une des techniques consiste à se placer tout près de l'émetteur.

On injecte dans le sol un courant sinusoïdal au moyen d'un DEH et on mesure dans son prolongement la décroissance de la différence de potentiel entre deux électrodes (M et N) en fonction de la distance (r) séparant l'émetteur du récepteur. La distance NM étant petite, on peut confondre la différence de potentiel avec le champ électrique.

Si le terrain est homogène, du point de vue résistivité, l'intensité du champ électrique décroît régulièrement en fonction de l'inverse du cube de la distance r. La présence d'une cavité résistive se traduit par une remontée du champ à l'aplomb de celle-ci due à l'accroissement de la densité de courant en surface (R. GABILLARD, J. P. DUBUS, M. CAUTERMAN, 1971).

Une autre variante est proposée par DUBUS (1974). Cet auteur place sur le sol une boucle émettrice et mesure le déphasage entre les composantes radiale  $H_r$  et verticale  $H_z$  du champ magnétique, en fonction de la fréquence du signal émis.

C'est un sondage "qui consiste à découvrir successivement les caractéristiques des diverses couches de terrains. Cela permet plus facilement de mettre en évidence la présence d'une hétérogénéité isolante telle qu'une carrière souterraine profonde située dans l'une des couches".

Dans le procédé Mélos (M. de SAMBUCY, M. LONGERE, M. FOSSEY, 1973, J. DUROUX, 1971), le récepteur est plus éloigné de la source. Malgré son caractère artificiel (puisque la source est contrôlée), cette technique se place dans les conditions de l'onde plane : le récepteur se trouve suffisamment éloigné de l'émetteur pour que l'on puisse utiliser les relations fondamentales de la M.T.

$$\rho = 0,2T \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad (\Omega m, s, mV/km, \gamma)$$

$$p = \frac{1}{2} \sqrt{10\rho T} \quad (km, \Omega m, s).$$

Dans cette méthode, le champ électromagnétique est produit par une boucle (de diamètre  $d$ ) posée sur le sol ; on mesure à une distance  $r > 4d$  les composantes  $F_y$ ,  $H_x$  et  $H_z$ . La connaissance du champ magnétique  $H_z$  sert parfois à effectuer certaines corrections sur le calcul des résistivités lorsqu'on ne peut plus raisonnablement admettre que la source est située à l'infini. Notons que la distance  $r = 4d$  est inférieure à la distance minimale  $m$  définie par STEFANESCO (1932).

$$m = 2\pi r \sqrt{\frac{F}{\rho}}$$

$r$  = distance du point de mesure à l'injection,

$m = 10,5$  pour un DMV.

Il est probable que cette distance  $r$  est trop faible pour que l'onde soit plane, ce qui expliquerait les résultats parfois incohérents du Mélos.

#### II-4-c La M.T.A.

La différence fondamentale avec toutes les autres méthodes citées plus haut est qu'elle s'affranchit complètement de la distance émetteur-récepteur. Le récepteur se trouve suffisamment éloigné de l'émetteur pour que l'on puisse utiliser les relations fondamentales de la M.T.

$$\rho = 0,2T \left(\frac{E}{H}\right)^2 \quad (\Omega m, s, mV/km, \gamma)$$

$$p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10 T} \quad (km, \Omega m, s)$$

et que les problèmes inhérents à l'injection n'existent pas.

### III - PROSPECTION PAR LA M.T.A. DE QUELQUES CAVITES GEOMETRIQUEMENT SIMPLES

#### III-1 Structure cylindrique allongée : le tunnel de Gimouille

##### III-1-1 Généralités

Nous avons pris comme exemple un tunnel désaffecté de la SNCF situé à Gimouille au SW de Nevers (feuille géologique au 1/80 000 de St Pierre-le-Moutier). On trouvera ce tunnel à 9 km au SW de Nevers par la RN 76.



L'ouvrage est creusé dans l'Aalénien (figure 34a) où alternent calcaires à entroques et marnes argileuses. Ce complexe argileux repose sur les argiles bleues du Toarcien : l'ensemble mesure environ 70 m d'épaisseur. Des calcaires un peu plus résistants du point de vue électrique (Bajocien) affleurent à une dizaine de mètres vers le SE. Les couches géologiques sont horizontales.

La longueur totale du tunnel est de 360 m. Il est orienté au N 150 gr W (figure 34b). En section transversale, la hauteur est de 7 m et la largeur de 14 m (figure 34c). Il est parfaitement horizontal et la surface topographique a une faible pente régulière, de telle sorte que le recouvrement varie d'épaisseur et augmente du SW vers le NE.

Deux profils perpendiculaires à l'axe du tunnel sont réalisés. Le premier (A) à 70 m du bord SW, le second (B) à 225 m. A ces niveaux, les recouvrements sont respectivement de 9,25 m et 14 m (figure 34c).

### III-1-2 Mise en station

Par rapport à la structure étudiée, les émetteurs de Châteauroux et d'Allouis sont grossièrement orientés vers l'W. Les profils sont à 45° des émetteurs (figure 34b), ce qui permet, comme dans le cas de la Tour Vauban, d'enregistrer les composantes  $E_x$ ,  $E_y$  et  $F_y$ .

Sur chaque profil, l'appareil est passé huit fois permettant :

- des mesures ponctuelles de  $E_x$ ,  $F_y$  et  $F_y/E_x$  aux deux fréquences,
- des mesures ponctuelles de  $E_y$  aux deux fréquences,
- des enregistrements du rapport  $F_y/E_x$  aux deux fréquences,
- des enregistrements de  $E_y$  aux deux fréquences.

### III-1-3 Mesures et interprétations

#### III-1-3-a Etude des paramètres $H_y/E_x$ , $H_y$ et $E_x$

Les valeurs de ces rapports ont été reportées avec une échelle croissante vers le bas de façon à ce que la courbe soit une image de la résistivité et non de la conductivité (figures 35 et 36).

Les anomalies ainsi mises en évidence ont grossièrement la forme d'un M. Lors d'une précédente étude, un traîné électrique avec un dispositif Schlumberger a donné la même anomalie (figure 37) (J. P. ESTEVE, 1972).

Il paraît curieux a priori que l'aplomb de l'axe du tunnel soit marqué par une anomalie conductrice, alors que deux pics résistants sont situés de part et d'autre de l'axe (à environ 8 m). C'est en fait l'allure typique de l'anomalie due à une poche affleurante, de faible résistivité, dans un encaissant résistant.

BMS  
LILLE

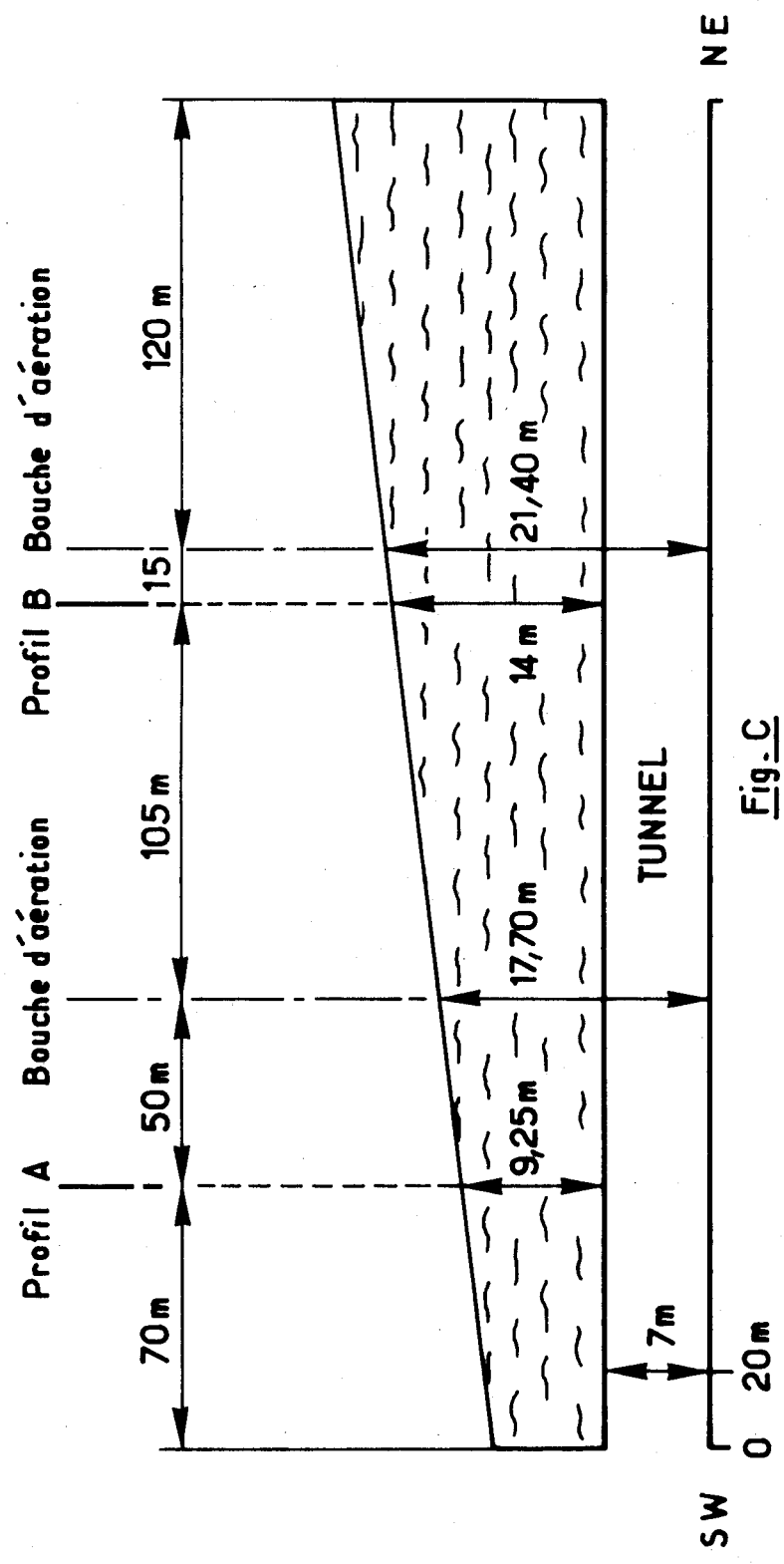
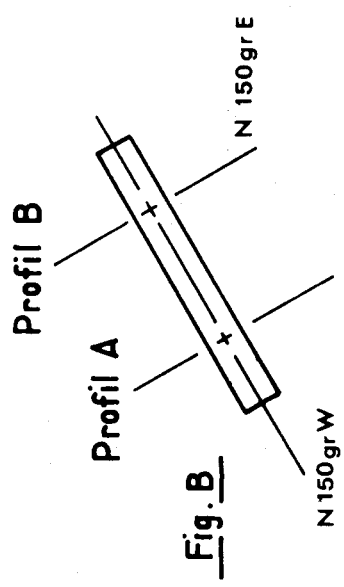
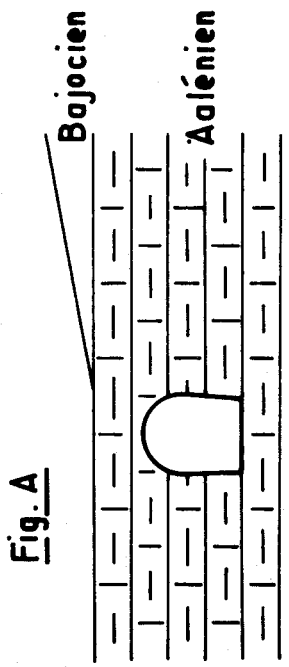


Figure 34 : "GIMOUILLE".

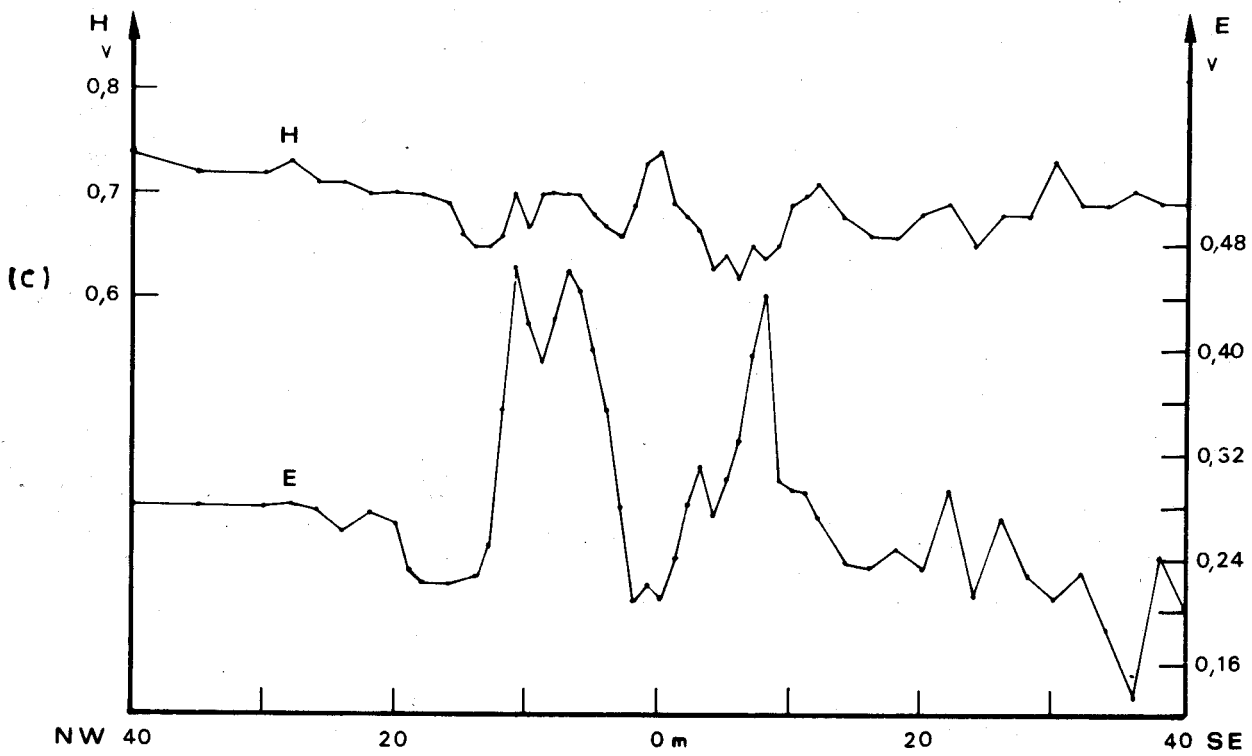
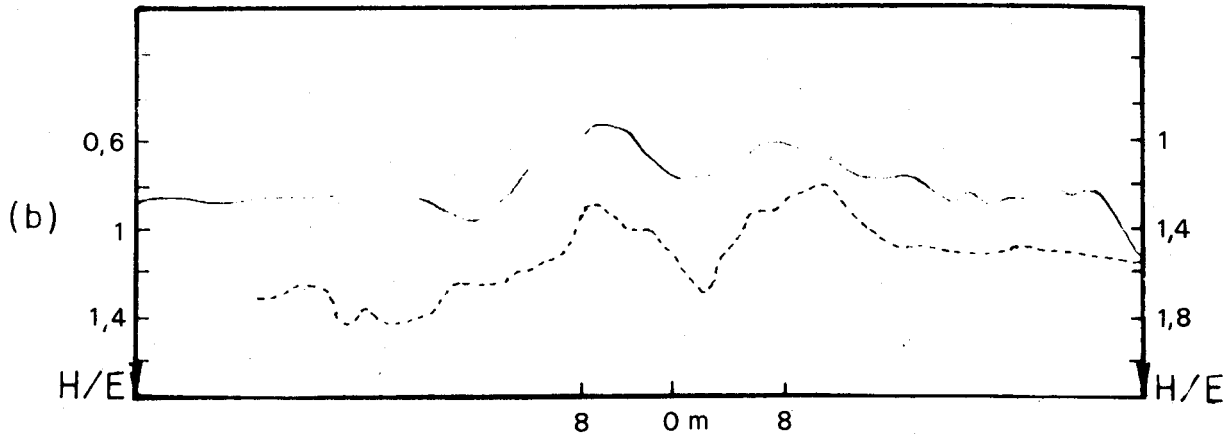
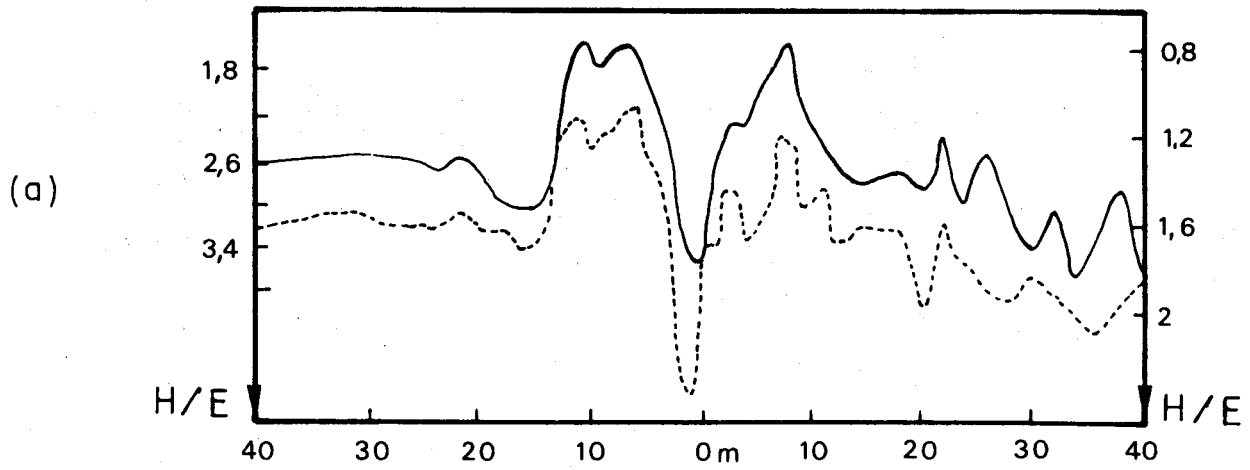
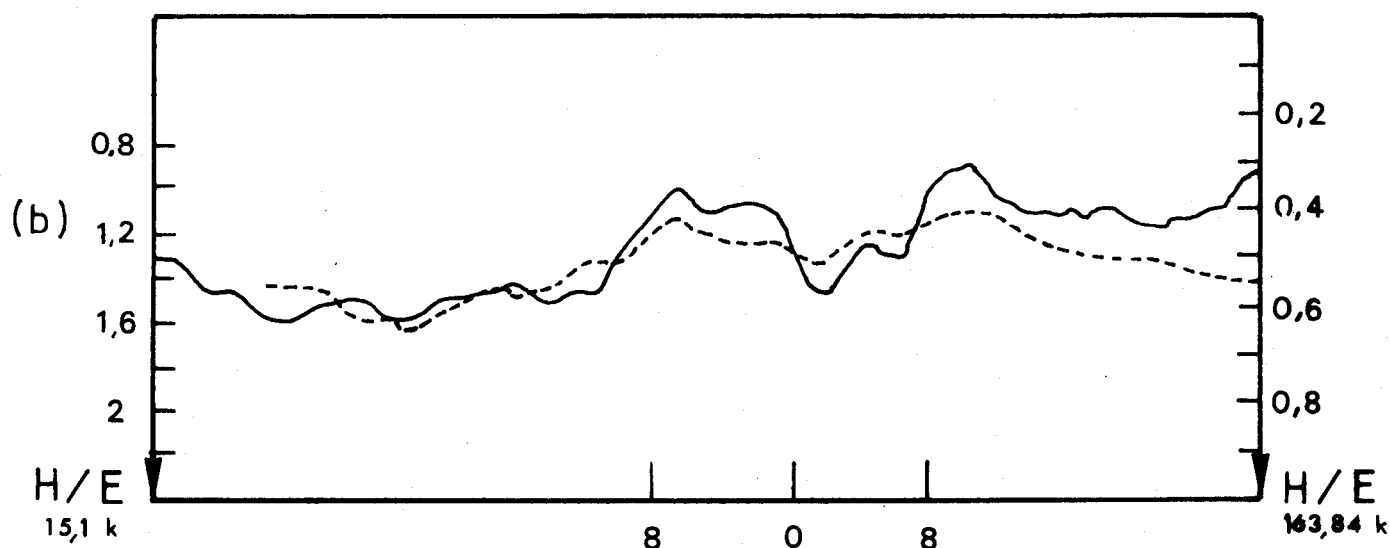
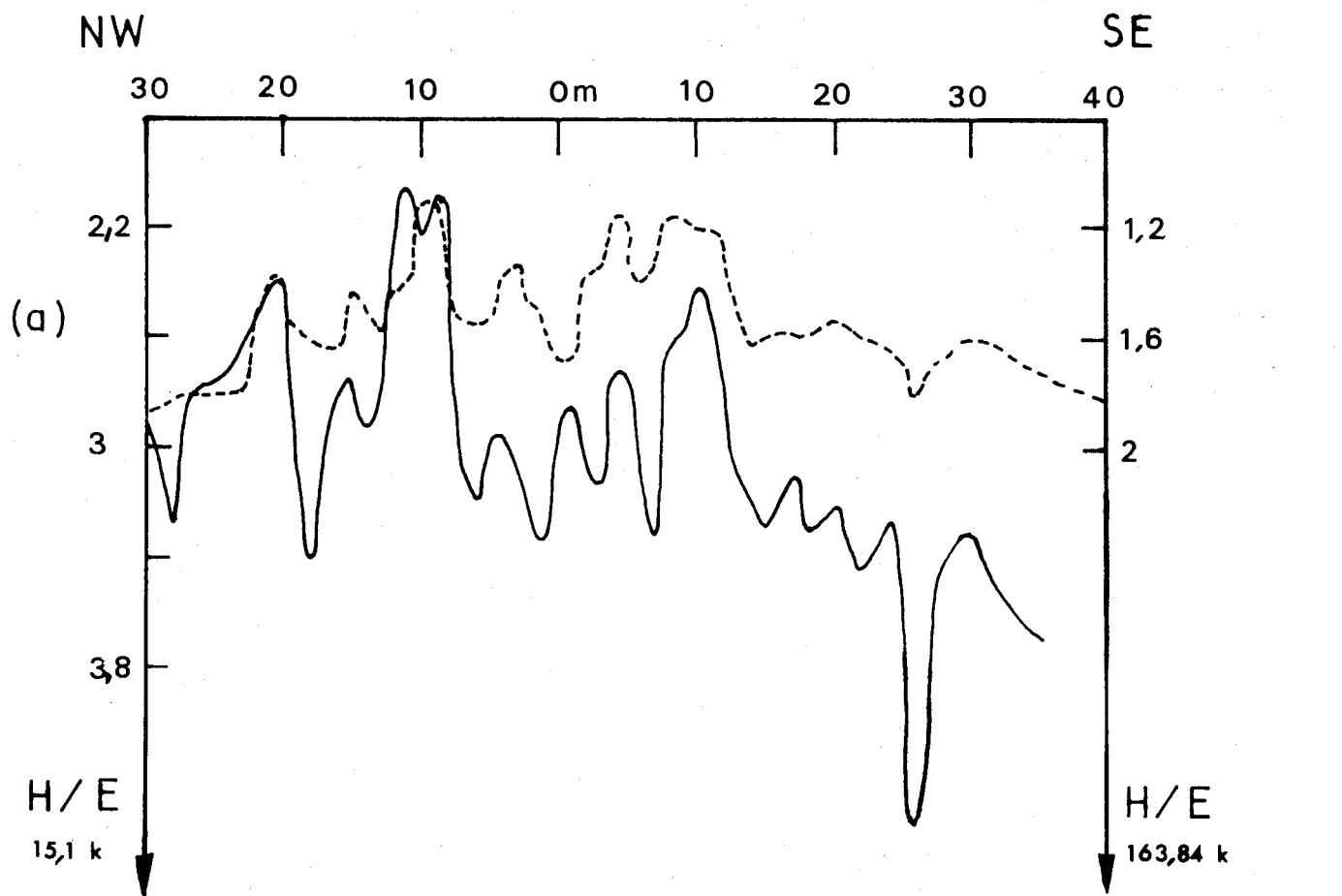


Figure 35 : "GIMOUILLE" : Profil A ( $H_y/E_x$ ).  
 a - mesures ponctuelles ( $H_y/E_x$ ).  
 b - enregistrements continus.  
 c - mesures ponctuelles  $E_x$  et  $E_y$ .





----- 163,84 k

————— 15,1 k



Figure 36 : "GIMOUILLE" : Profil B ( $H_y/E_x$ ).

a - mesures ponctuelles.

b - enregistrements continus.

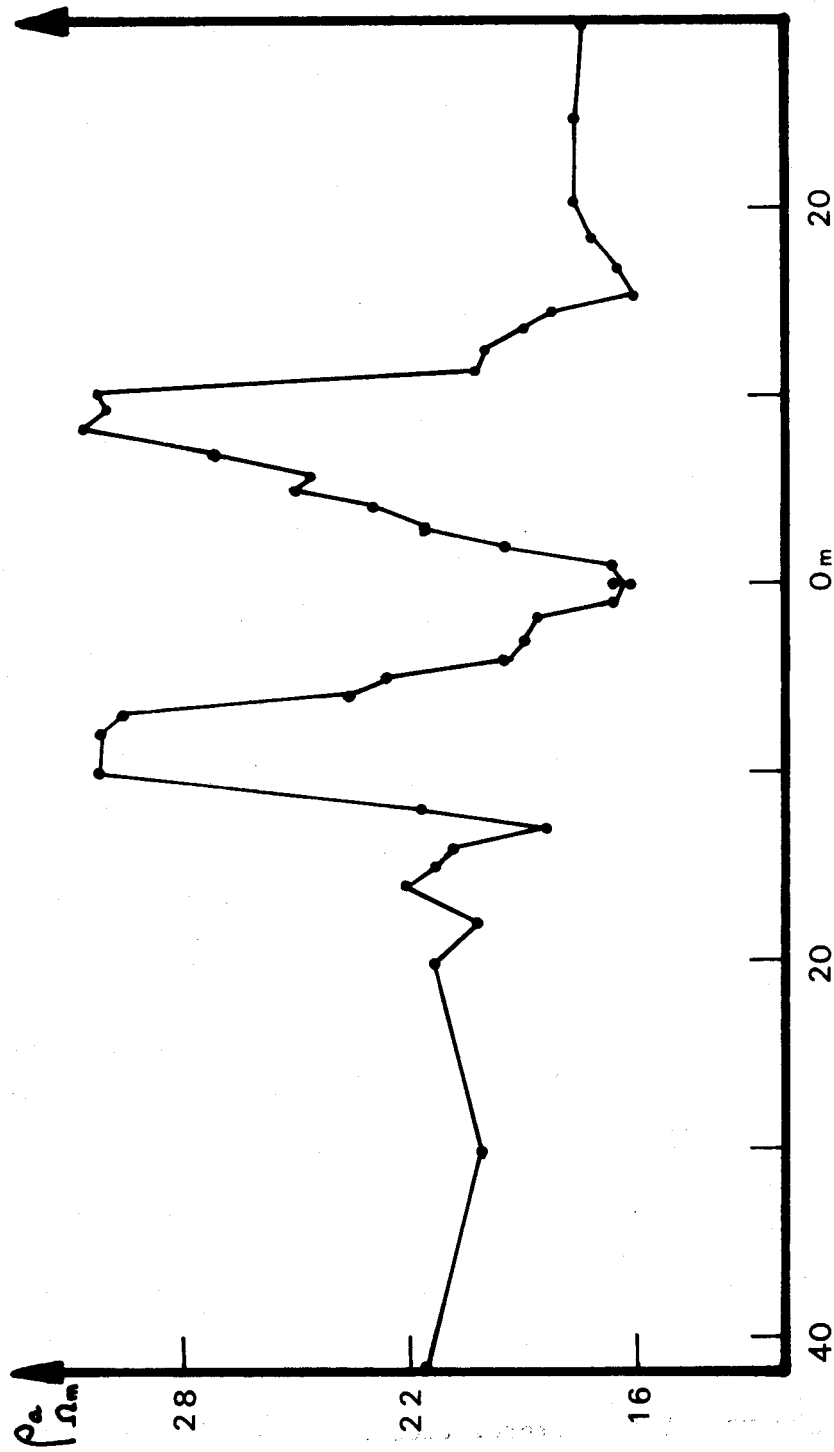


Figure 37 : "GIMOUILLE" : Trainé électrique.



On a tenté d'expliquer ce phénomène figure 38.

En ce qui concerne le dispositif électrique (BERTRAND Y., 1967), on a figuré les trois cas de positions du dispositif par rapport à la structure permettant d'obtenir les trois pics A, B et C (figure 38a). En A, la présence du tunnel résistant "repousse" les filets de courant et les équipotentiels se concentrent sur B. La ddp entre M et N est alors faible ; c'est le pic A. En B, l'électrode d'injection ayant dépassé la structure, la forme des filets de courant fait converger les équipotentiels vers N. La ddp entre M et N est forte, on obtient le pic de résistivité B. En C, enfin, le dispositif est à cheval sur la structure. La divergence des lignes équipotentiels au sein de la structure conduit à une faible ddp entre M et N. De sorte que l'aplomb d'une structure résistante enfouie est marquée par un pic conducteur, à condition, bien sûr, que la longueur du dispositif soit supérieure à la taille et à la profondeur de la structure (ici, AB de 80 m). La courbe obtenue est identique à celle que l'on aurait si la structure était affleurante et moins résistante que l'encaissant.

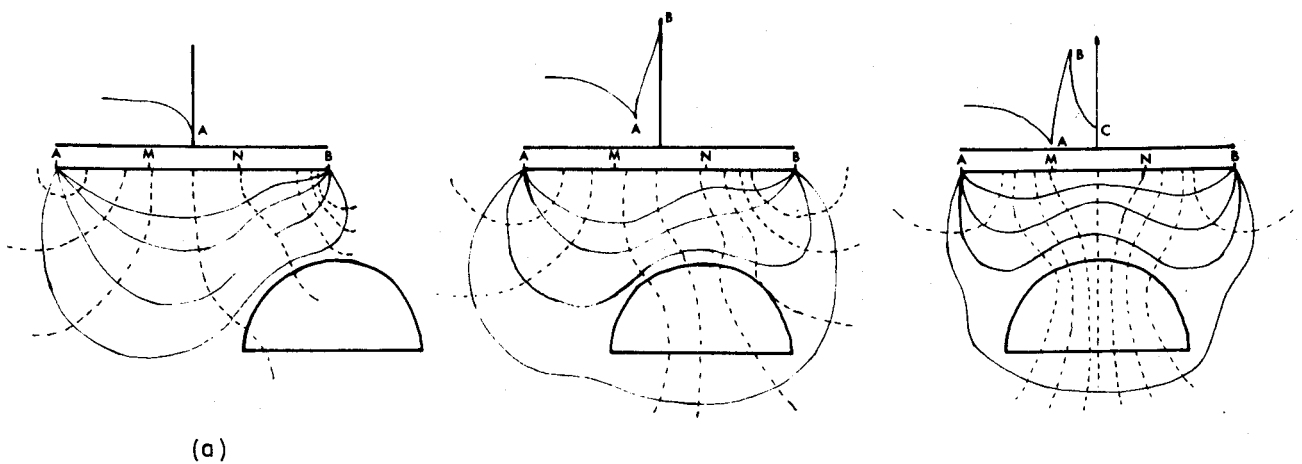
En ce qui concerne la nappe électromagnétique, le phénomène est identique. Sur la figure 38b, on voit que la déviation des filets de courant due à la structure résistante est plus importante au-dessus qu'en dessous. Ceci tient au fait que le tunnel est un demi-cylindre. Dès lors la convergence des équipotentiels se fait de part et d'autre de l'axe du tunnel. Il va de soi que lorsque la structure est plus proche de la surface, la divergence se fera moins sentir et que les deux pics de résistivité tendront à se rapprocher, voire même à fusionner. Inversement, il y aura desserrement des pics au fur et à mesure de l'approfondissement de la structure.

La figure 35b indique clairement que le vecteur magnétique est peu sensible à la cavité. Par contre le vecteur tellurique subit deux augmentations fortes comme le prévoyait la figure 38b.

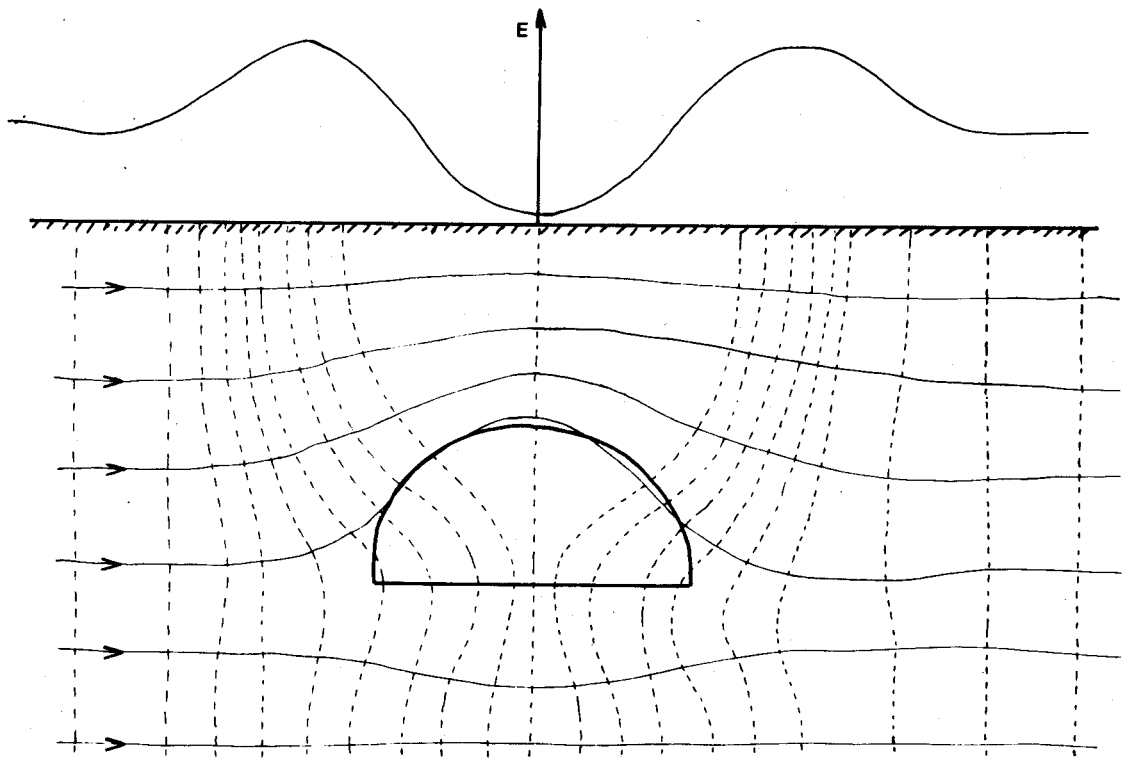
Les deux maxima de la résistivité se trouvent à 8 m de chaque côté de la verticale de l'axe du tunnel.

Les enregistrements continus (figure 35b) conduisent aux mêmes conclusions. Cependant, ici encore, l'anomalie est décalée par rapport aux mesures ponctuelles, dans le sens du déplacement de l'appareil. C'est un phénomène déjà observé et l'interprétation en a été donnée (II-4-a).

Sous un recouvrement de 9 m (profil A), la variation de l'amplitude de l'anomalie atteint 40 % et 35 % respectivement pour 15,1 KHz et 163,84 KHz.



(a)



(b)

Figure 38 : "GIMOUILLE" : Tracé schématique des équipotentiels et des filets de courant dans un sol homogène.

a - dispositif électrique.

b - nappe électromagnétique.

Si l'on appelle  $\frac{E_0}{H_0}$  le rapport des champs loin de la structure et  $\frac{E}{H}$  le rapport au niveau de l'anomalie, on a :  $\frac{E}{H} = 1,4 \frac{E_0}{H_0}$

$$\rho = 0,2T \left(\frac{E}{H}\right)^2 = 0,2T - 1,4^2 \left(\frac{E_0}{H_0}\right)^2 = 1,96 \rho_0$$

La résistivité apparente double donc sous l'effet d'une structure cylindrique dont la profondeur\* (12,75 m) est égale à 1,8 fois son diamètre (7 m).

Les courbes issues du profil B (figure 36) sont moins faciles à interpréter et les résultats sont un peu plus confus.

En mesures ponctuelles (figure 36a) les valeurs du rapport sont assez sujettes à des fluctuations perturbatrices. En effet, le recouvrement étant plus important (14 m), l'influence des hétérogénéités de surface est proportionnellement plus grande sur la valeur du rapport H/E.

Cet inconvénient relatif est évité en mettant à profit la légère constante de temps de l'appareil : si on se déplace, celle-ci intégrera les fluctuations dues aux petites anomalies de surface très localisées et n'en donnera qu'une valeur moyenne. Seules les anomalies profondes de grande amplitude représentatives de structures plus amples seront enregistrées. C'est la raison pour laquelle les traînés sont le plus souvent meilleurs que les profils ponctuels (figure 36b).

On observe ici que les pics de résistivité se trouvent à environ 10 m de l'axe du tunnel. Il est donc exact que l'approfondissement d'une structure est suivi d'un éloignement respectif des pics ainsi que de la diminution de leur amplitude.

### III-1-3-b Etude du paramètre $E_y$

Puisque la "direction de propagation" de la nappe magnétotellurique fait un angle avec la structure, il existe, parallèlement au tunnel, une composante  $E_y$  non nulle.

On a mesuré ponctuellement et d'une façon continue l'évolution de son amplitude lorsque l'on passe d'un côté à l'autre du tunnel.

---

\* En M.T., comme en électricité, la profondeur d'une cavité est prise en son centre et non au toit.



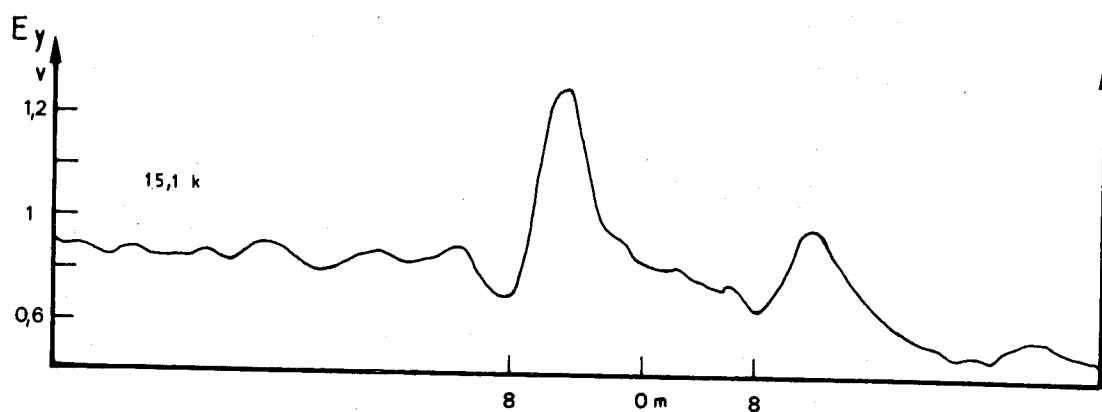
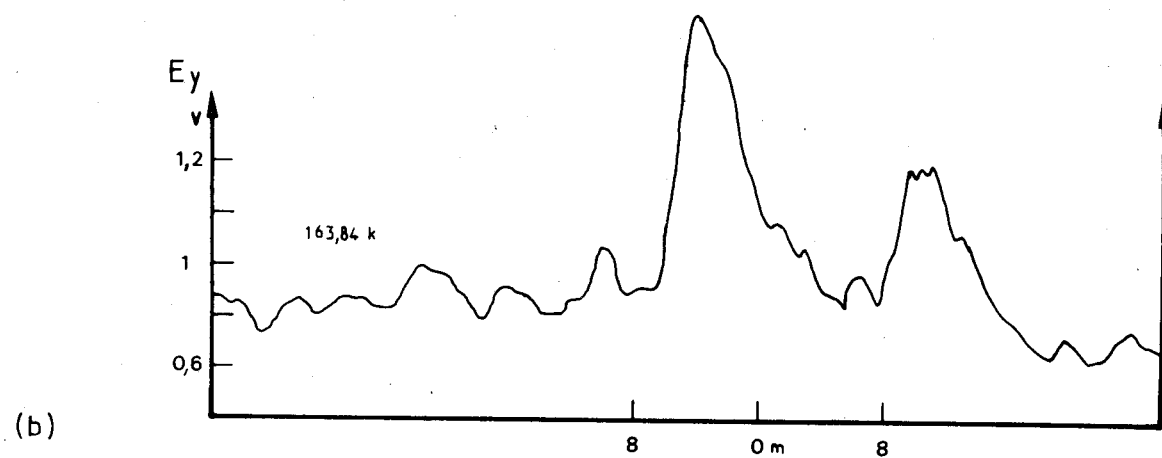
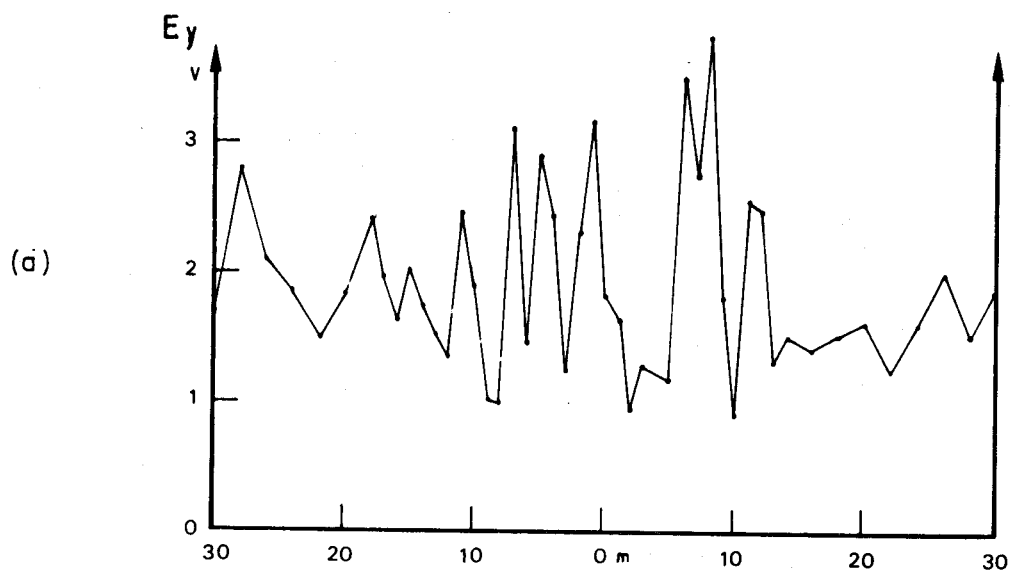


Figure 39 : "GIMOUILLE" : Profil A ( $E_y$ ).

a - mesures ponctuelles à 15,1 KHz.

b - enregistrements continus aux 2 fréquences.



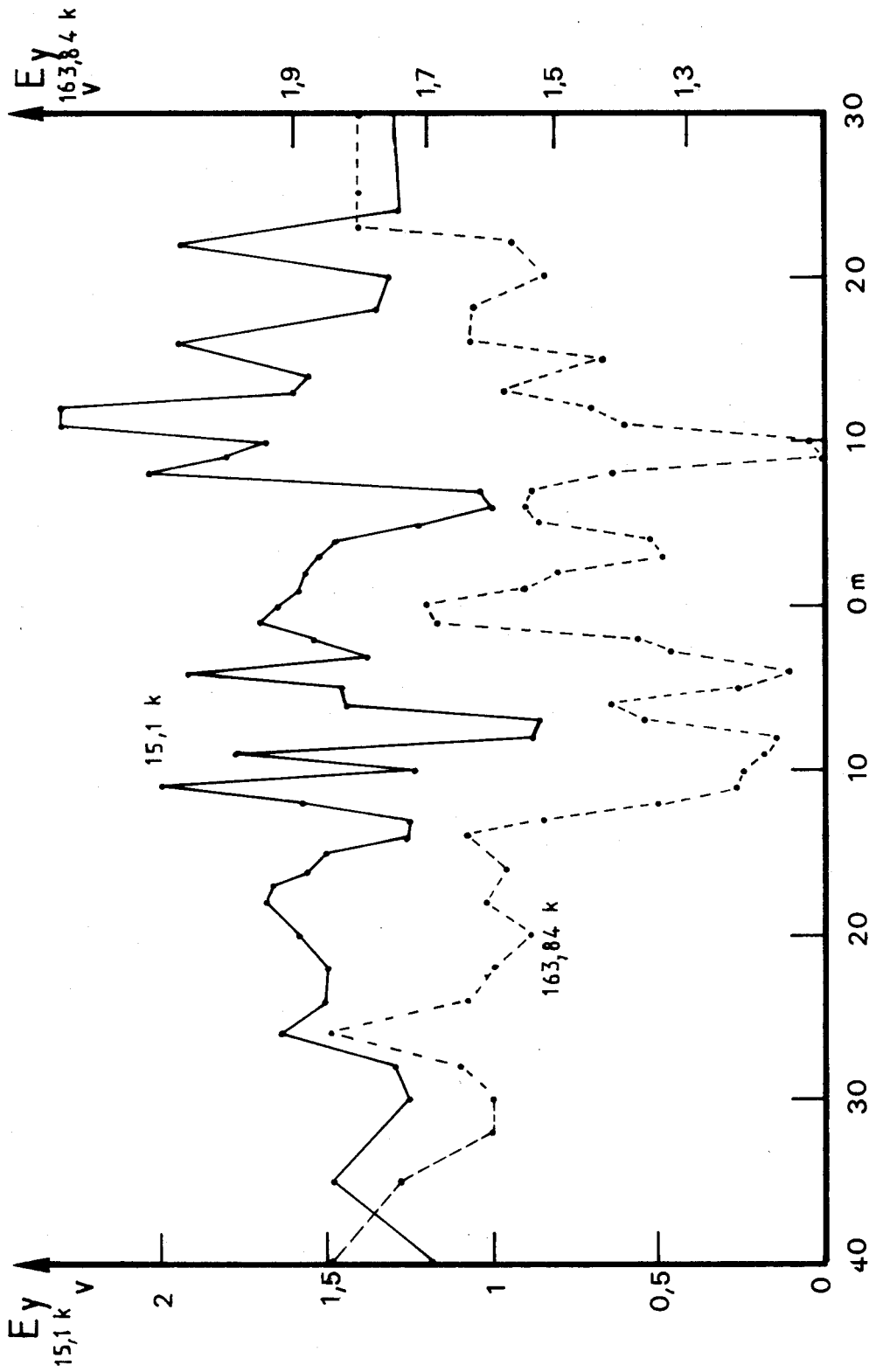


Figure 40 : "GIMOUILLE" : Profil B ( $E_y$ ) : mesures ponctuelles aux deux fréquences.

Mais, présentement, on obtient des résultats moins probants que dans le cas de la faille (figure 39 et 40) (chap. III, A, II-4-c).

Le profil ponctuel A à 164 KHz ainsi que les enregistrements continus sur le profil B ne sont pas donnés car ils ne sont pas totalement interprétables. De tous les passages, seuls les enregistrements sur le profil A (figure 39b) nous livrent des courbes compréhensibles : le vecteur  $E_y$ , (au décalage dû à l'avancement près) subit deux brusques augmentations d'amplitude à 8 m de part et d'autre de la structure. Cela est tout-à-fait conforme aux profils de résistivité obtenus avec le rapport  $H_y/E_x$ .

Hormis ce cas précis, on est bien obligé d'admettre que l'étude de  $E_y$  pose encore des problèmes. On sait qu'une faible oscillation de l'orientation du tapis amène une variation de la tension de sortie appréciable. Mais il y a probablement aussi un problème de capteur.

La figure 41 ci-contre montre en effet que dans le cas où la direction de progression fait un angle avec la direction de l'émetteur, il existe une composante  $E_y$  que l'on mesure par les deux électrodes longues de 4 m, larges de 10 cm, et distantes d'1 m. Mais cette longueur très importante des électrodes pose le problème de savoir si on ne mesure pas en fait un champ  $E$ , composante des champs  $E_y$  et  $E_x$ . Pour résoudre ce problème, il faudrait augmenter la distance entre les deux électrodes et diminuer leur longueur, ce qui rendrait le capteur plus sensible à  $E_y$  et moins à  $E_x$ . Mais il serait alors mal commode de tracter un tapis mesurant 2 voire 3 m de largeur et cela nuirait beaucoup à la maniabilité de l'appareil.

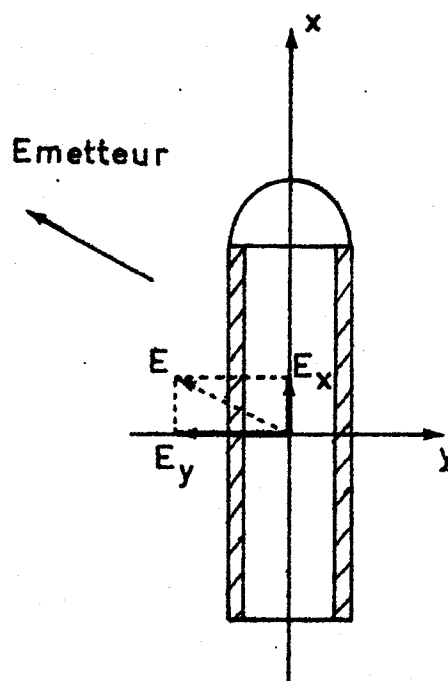


Figure 41 : Capteur 1 m

De toute façon, dans la quasi-totalité des cas, le tapis de 2 m suffit à l'étude d'un site. Il n'est donc utile de chercher à améliorer la détection de E que dans la mesure où elle apporterait une contribution aux études théoriques concernant le comportement des différentes composantes électromagnétiques au voisinage d'une structure.

### III-1-4 Conclusion

On trouve dans M. N. BERDICHEVSKY (1965) et G. V. KELLER (1966) la solution mathématique du problème de l'inclusion cylindrique horizontale dans un milieu homogène. Le vecteur magnétique, comme on l'a d'ailleurs vérifié, ne subit que de très faibles variations, difficilement imputables à la structure. C'est pourquoi les auteurs n'étudient que le vecteur  $E_x$ . Les variations de ce vecteur sont calculées en pourcentage par rapport à une station de référence éloignée de la structure. La formule est la suivante :

$$E = 100 \sqrt{1 + 8 \sum_{m=1}^{\infty} \beta^m \frac{\gamma^{2m} \left[ 1 + \left(\frac{a}{H}\right)^2 \right] \left[ 1 - \left(\frac{a}{H}\right)^2 - \frac{(1 - \gamma^{2m})^2 x^2}{(1 + \gamma^{2m})^2 H^2} \right]}{(1 + \gamma^{2m})^2 \left[ 1 - \left(\frac{a}{H}\right)^2 + \frac{(1 - \gamma^{2m})^2 x^2}{(1 + \gamma^{2m})^2 H^2} \right]^2}}$$

$$\text{avec : } \beta = \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_0 + \rho_1}$$

$\rho_0$  : résistivité du cylindre  
(ici celle de l'air)

$$\gamma = \frac{H}{a} - \sqrt{\left(\frac{H}{a}\right)^2 - 1}$$

$\rho_1$  : résistivité du terrain encaissant  
a : rayon du cylindre  
H : profondeur du centre du cylindre

Un programme dont l'organigramme est donné en annexe permet de calculer les variations du champ E, et donc du rapport H/E si on considère H constant, au-dessus du tunnel avec a = 7 m et H = 14 m.

Les valeurs de  $\Delta E$  sont données dans le tableau 11 pour un terrain de résistivité moyenne 100  $\Omega m$ .

TABLEAU 11

Distance à la structure	0	1	2	4	6	8	10	12	15	20	25	30
Variations de E en %	138,1	136,6	132,5	120,2	108,3	100,4	93,3	94,6	94,2	95,3	96,4	97,3

On n'obtient pas, d'après cette théorie, l'anomalie en forme de M. A cela, trois explications sont possibles sans qu'aucune d'elles soit cependant satisfaisante :

- on a montré précédemment la déformation des équipotentiellles et des filets de courant d'une nappe électromagnétique en présence d'une structure cylindrique. En mesurant une différence de potentiel entre deux électrodes suffisamment éloignées, on peut donc obtenir une anomalie en M telle que celle enregistrée. Cependant, il n'est pas évident qu'une ligne tellurique de 2 m permette de percevoir ce phénomène ;

- il se peut aussi que, lors de la construction du tunnel, l'aplomb de l'ouvrage ait été recouvert d'un matériau conducteur en remblai. Mais cette explication est peu probable car d'une part le tunnel a été percé dans la roche en place sans nécessité de soutènement, d'autre part un dispositif de prospection électrique de 80 m de long a mis en évidence cette anomalie (et l'explication en a été donnée), enfin, lorsque le tunnel est plus profondément enfoncé, l'amplitude du centre de l'anomalie diminue, ce qui ne devrait pas être si son origine était superficielle ;

- enfin, comme on ne peut nier les mesures, peut-être faut-il considérer que la théorie doit être repensée sur de nouvelles bases. Une étude théorique approfondie est en cours au C.R.G..

L'anomalie en M enregistrée n'est donc pas, pour l'instant, raisonnablement expliquée.

### III-2 Structure sphérique : "Le Caveau"

#### III-2-1 Généralités

Cette structure est située sur le domaine même du C.R.G.. Il s'agit d'une ancienne fosse aménagée, ayant initialement servi à des enregistrements magnétoétriques

Ses dimensions ( $L = 3$  m,  $l = 1,50$  m,  $H = 2,50$  m) autorisent en grossière approximation à considérer cette cavité comme étant sphérique car elle ne possède pas d'allongement vraiment important dans une direction privilégiée.

Le recouvrement est constitué de terre rapportée, identique au terrain encaissant. Son épaisseur est d'environ 0,30 m.

En cet endroit, l'émetteur d'Allouis est orienté à l'W (N 100 gr W) tandis que l'émetteur de Châteauroux se trouve à l'WSW (N 125 gr W).

### III-2-2 Mise en station

Le secteur du caveau est sillonné par une série de profils parallèles entre eux, équidistants de deux mètres, orientés d'W en E afin de mesurer les composantes  $E_x$  et  $H_y$  des champs électromagnétiques.

En effet, la composante  $E_y$  du champ émis par Allouis est nulle et celle du champ émis par Châteauroux est très faible.

La longueur des profils est de 23 m, dont 10 se trouvent à l'E du centre du caveau et 13 à l'W. Une portion du quadrant NE est tronquée par la présence d'un bois.

Les mesures sont effectuées tous les mètres.

Ce site a fait l'objet d'une étude comprenant deux phases :

- la première phase, réalisée au début de 1975, met en évidence la structure mais montre qu'une étude plus rigoureuse est nécessaire. Deux anomalies parasitant les résultats ont été mises en évidence :

- dans une deuxième phase, on a repris l'étude après avoir éliminé dans la mesure du possible les éléments parasites.

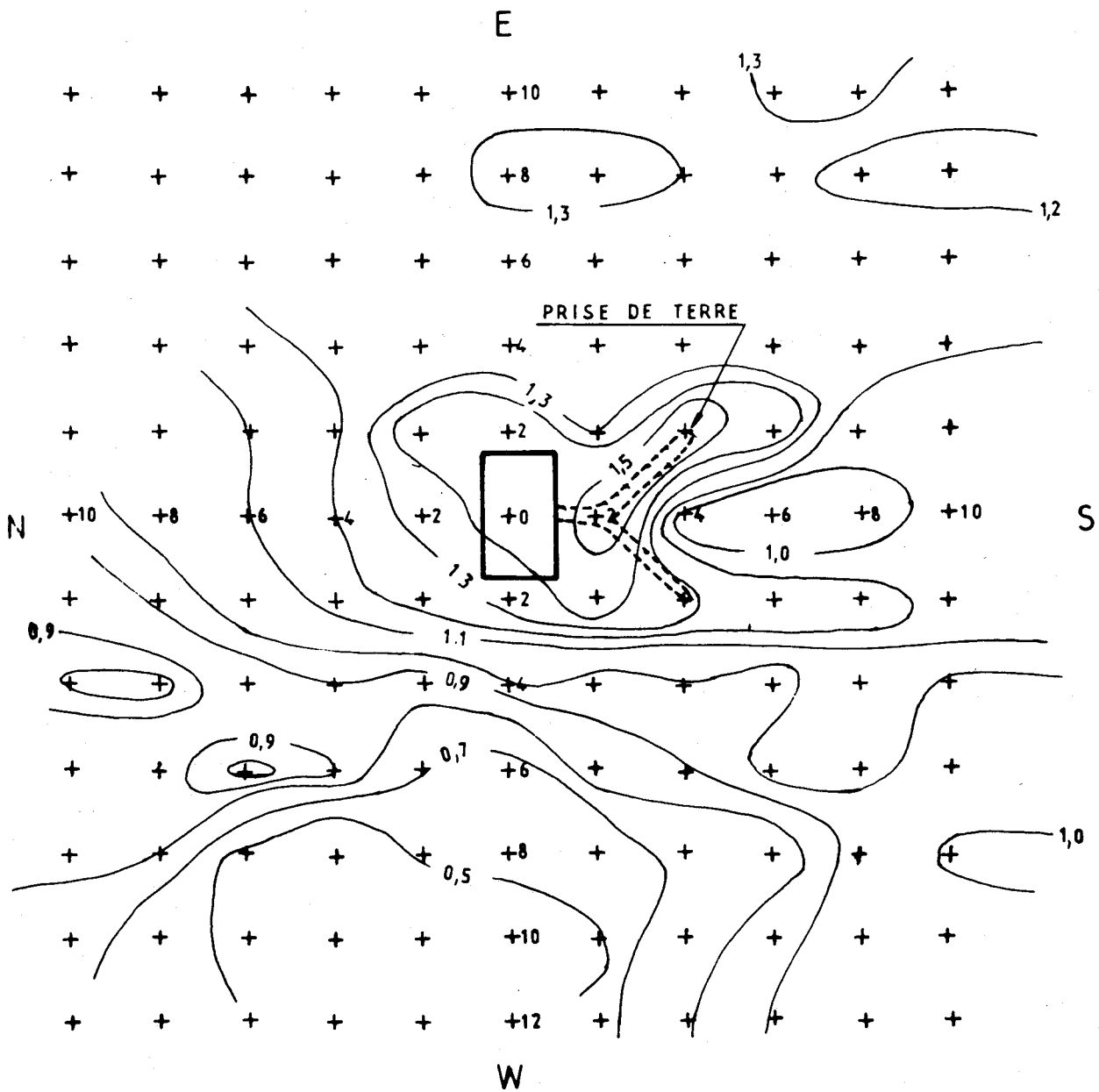
### III-2-3 Les mesures

#### III-2-3-a Première phase : parasitage des données

En janvier 1975, seule la partie tellurique de l'appareillage fonctionnait. Les mesures ont été effectuées à 163,84 KHz en point par point.

La figure 42a a montré la carte d'isovaleur de  $E_x$ . On y a dessiné les isocourbes obtenues avec le tapis de 1 m se déplaçant du S vers le N.

Les courbes de valeur  $\geq 1,3$  V se referment autour du caveau. La structure est donc bien décelée. Mais on note qu'au Sud se trouve une anomalie curieuse absolument imprévisible. Il s'agit d'une lentille con-



LE CAVEAU

Figure 42a : "CAVEAU CRG" : Structures parasites (163,84 KHz).



ductrice (E faible = 0,9 V) entourée à l'E et à l'W par les isocourbes 1,1 V à 1,5 V. Cette forme tout à fait particulière nous a conduits à en rechercher la cause dans un corps perturbateur enfoui dans le sol. On s'est alors rendu compte que, lors de la construction du caveau, on avait enfoui à environ trente centimètres de profondeur, une prise de terre en cuivre ayant la forme d'un Y (figure 42a). Dès que cette prise de terre fût ôtée, les courbes se sont centrées sur le caveau comme on va le voir.

Une deuxième anomalie perturbatrice est située à l'W du caveau. En effet, les courbes isovaleurs semblent se refermer autour d'une zone conductrice (E faible à 10 m à l'W). On a incriminé alors un autre câble électrique qui amenait auparavant le courant du secteur au caveau. Il s'est avéré par la suite qu'une fois le câble supprimé, l'anomalie persistait.

Notons que les mesures ponctuelles au SGD\* (Source Grande Distance) effectuées du N au S à 10 m à l'W du caveau ont, elles aussi, montré l'existence de cette structure perturbatrice à faible profondeur (figure 42b).

### III-2-3-b Deuxième phase : mesure du rapport H/E

L'étude précédente a été reprise une fois que l'on a eu à notre disposition les deux voies E et H et le diviseur H/E.

On a reporté sur le quadrillage représentant le secteur étudié les différentes valeurs du rapport H/E. La carte obtenue est donc représentative de la conductibilité du terrain. On accède à la résistivité apparente  $\rho_a$  en utilisant les relations suivantes, compte tenu des gains d'amplification commutés sur les chaînes électroniques et de la longueur de la ligne tellurique :

$$\begin{aligned} \text{à } 163,84 \text{ KHz} \quad \rho_a &= \frac{32,2}{(H/E)^2} \Omega\text{m} \\ \text{à } 15,10 \text{ KHz} \quad \rho &= \frac{110}{(H/E)^2} \Omega\text{m} \end{aligned}$$

Les cartes élaborées aux deux fréquences (figure 43 a et b) sont très semblables et les isocourbes coïncident de façon tout à fait satisfaisante. On peut déjà affirmer que les structures engendrant les anomalies sont des structures majeures en regard des fréquences puisque suffisamment importantes pour qu'elles soient toutes deux affectées. Cependant, chacune des deux cartes montre, outre l'anomalie résistante (due de toute évi-

\* SGD : appareil mis au point par A. TABBAGH (1971) assurant la mesure de la composante magnétique verticale Hz réémise par la structure. Il fonctionne sur les fréquences d'Allouis (163,84 KHz) et d'Europe 1 (180 KHz).



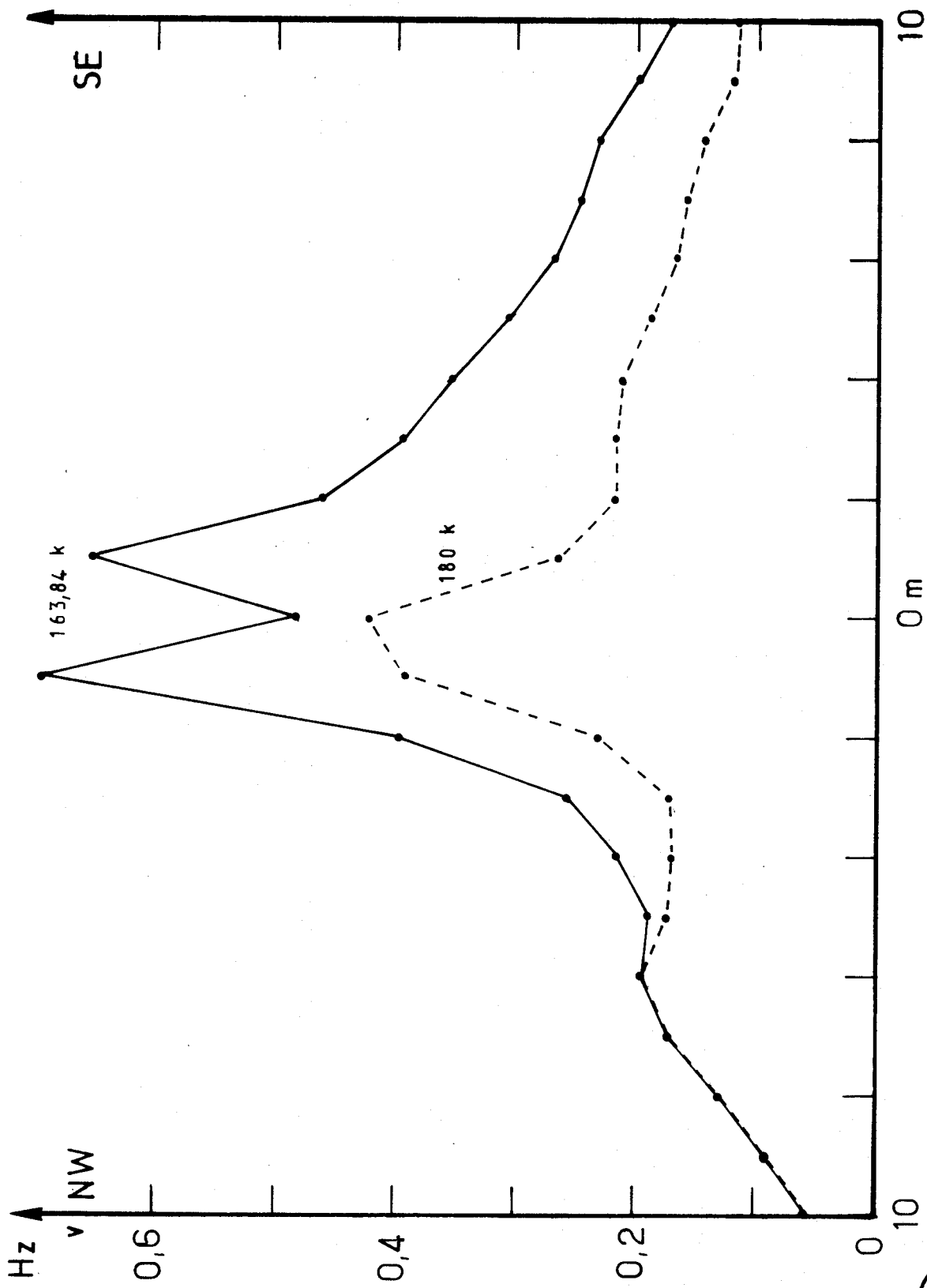
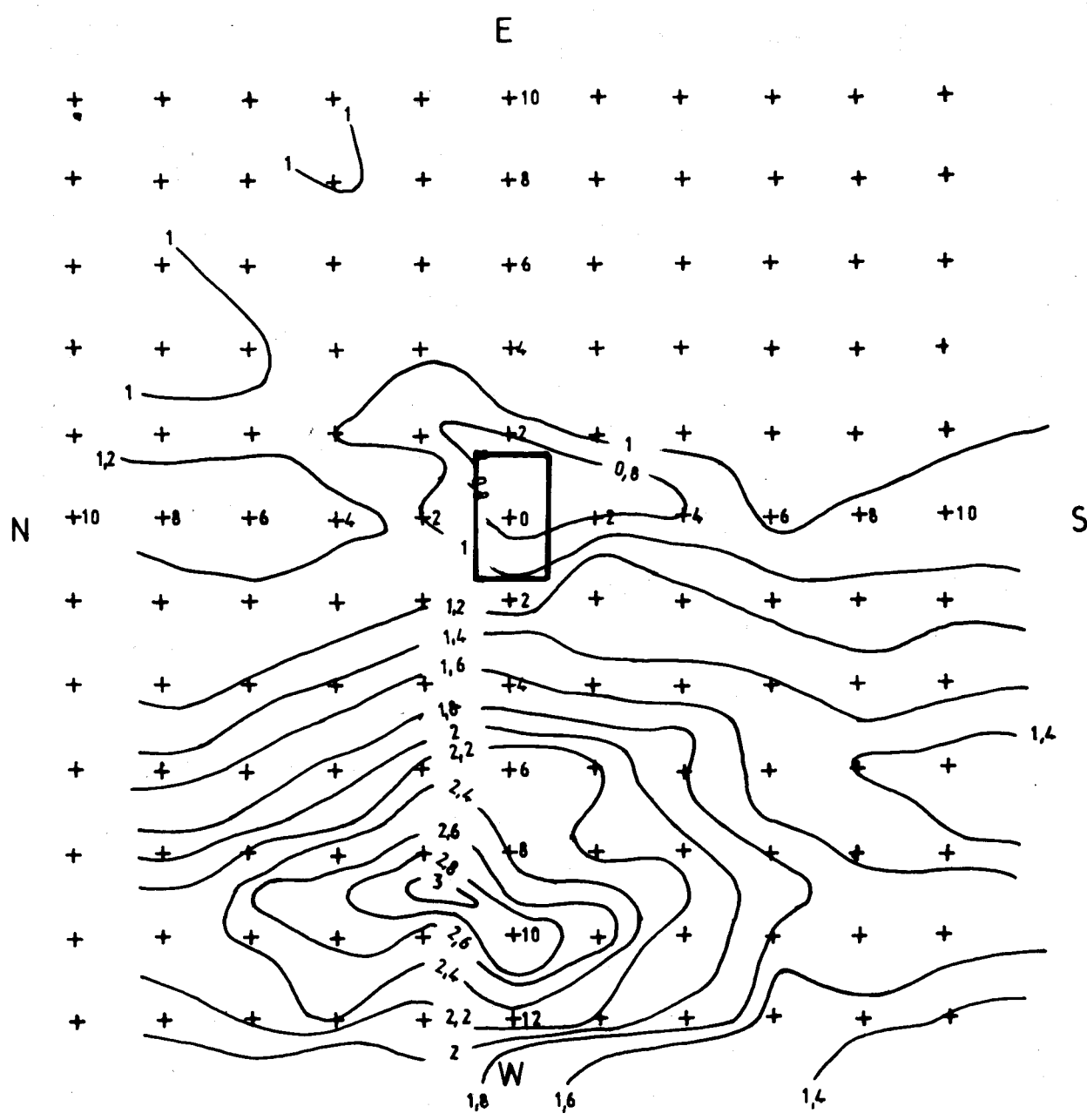


Figure 42b : "CAVEAU CRC" : Mesures au SGD.

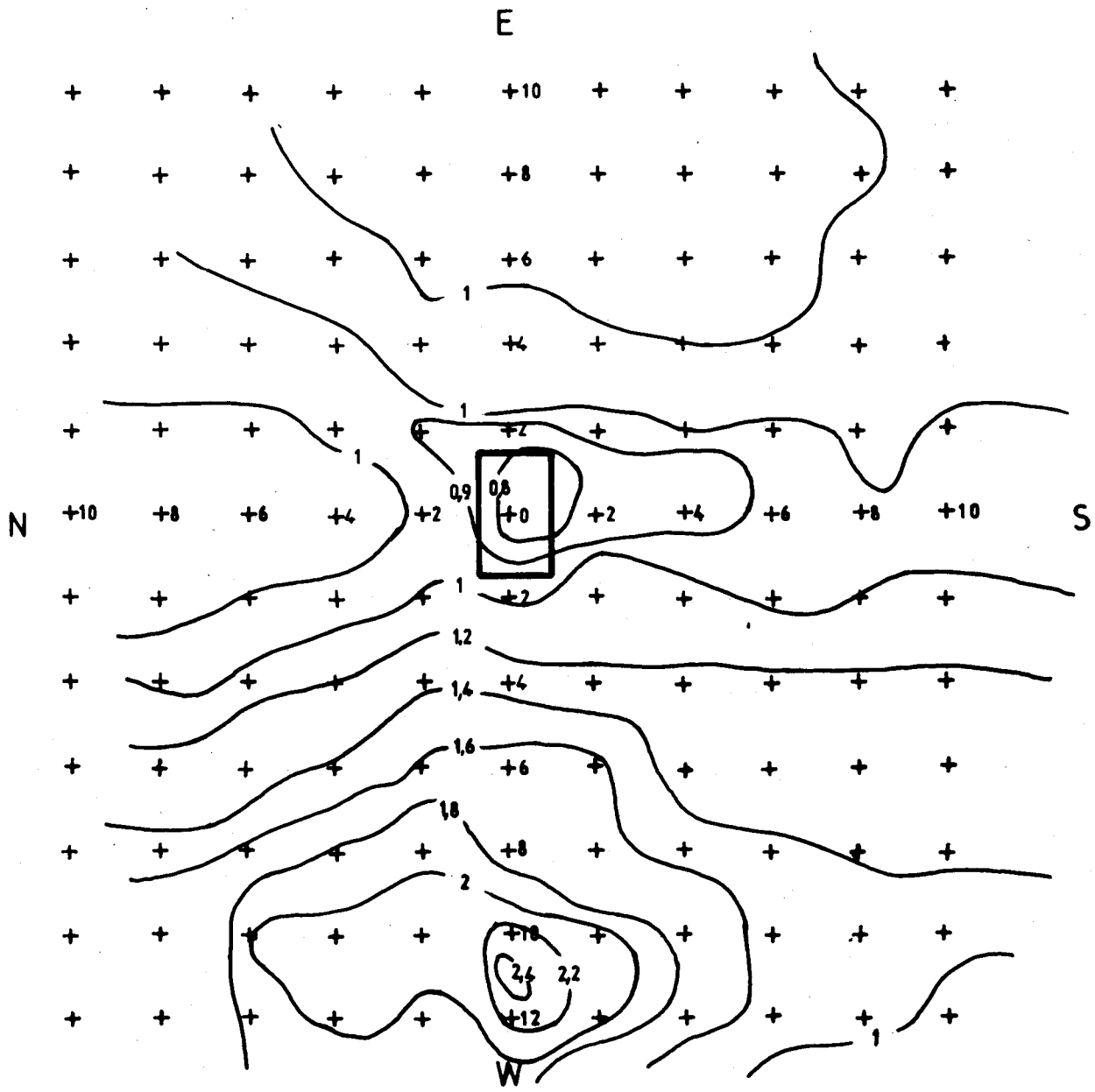




LE CAVEAU



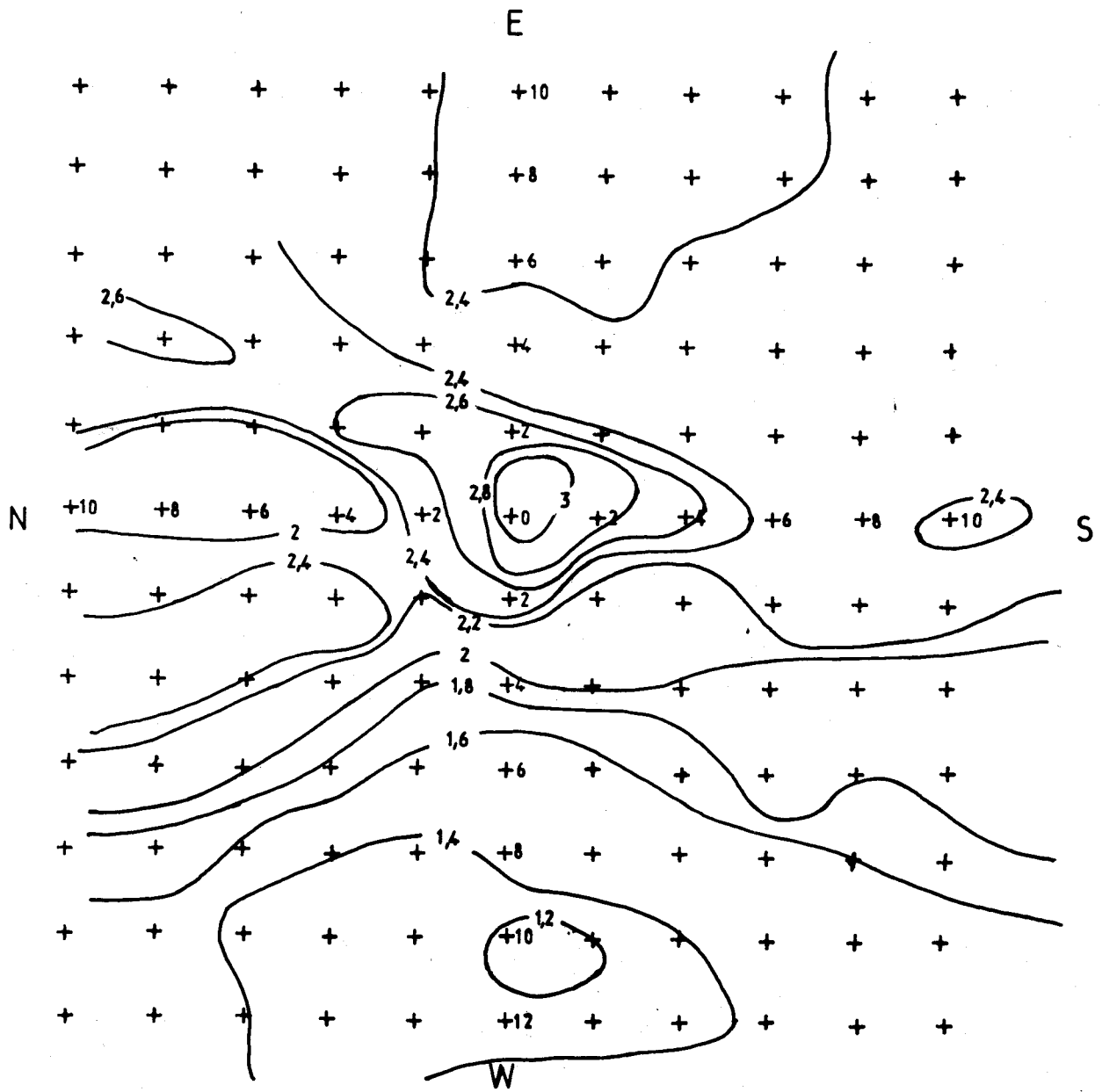
Figure 43a : "CAVEAU CRG" : Carte d'isanomales de H/E à 15,1 KHz.



LE CAVEAU

Figure 43b : "CAVEAU CRG" : Carte d'is anomalies de H/E à 163,84 KHz.





LE CAVEAU



Figure 43c : "CAVEAU CRG" : Carte d'isanomales de  $E_x$  à 163,84 KHz.

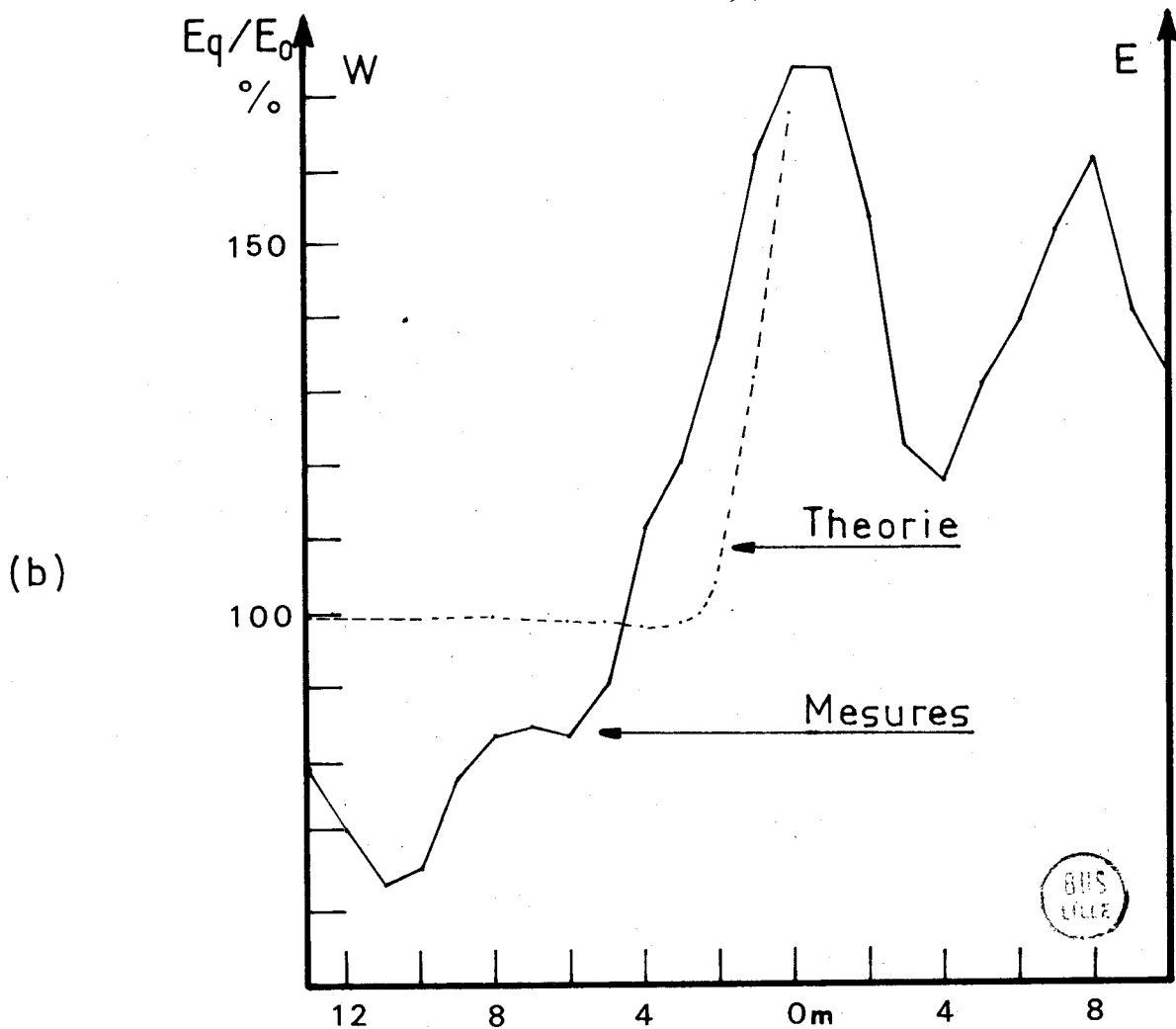
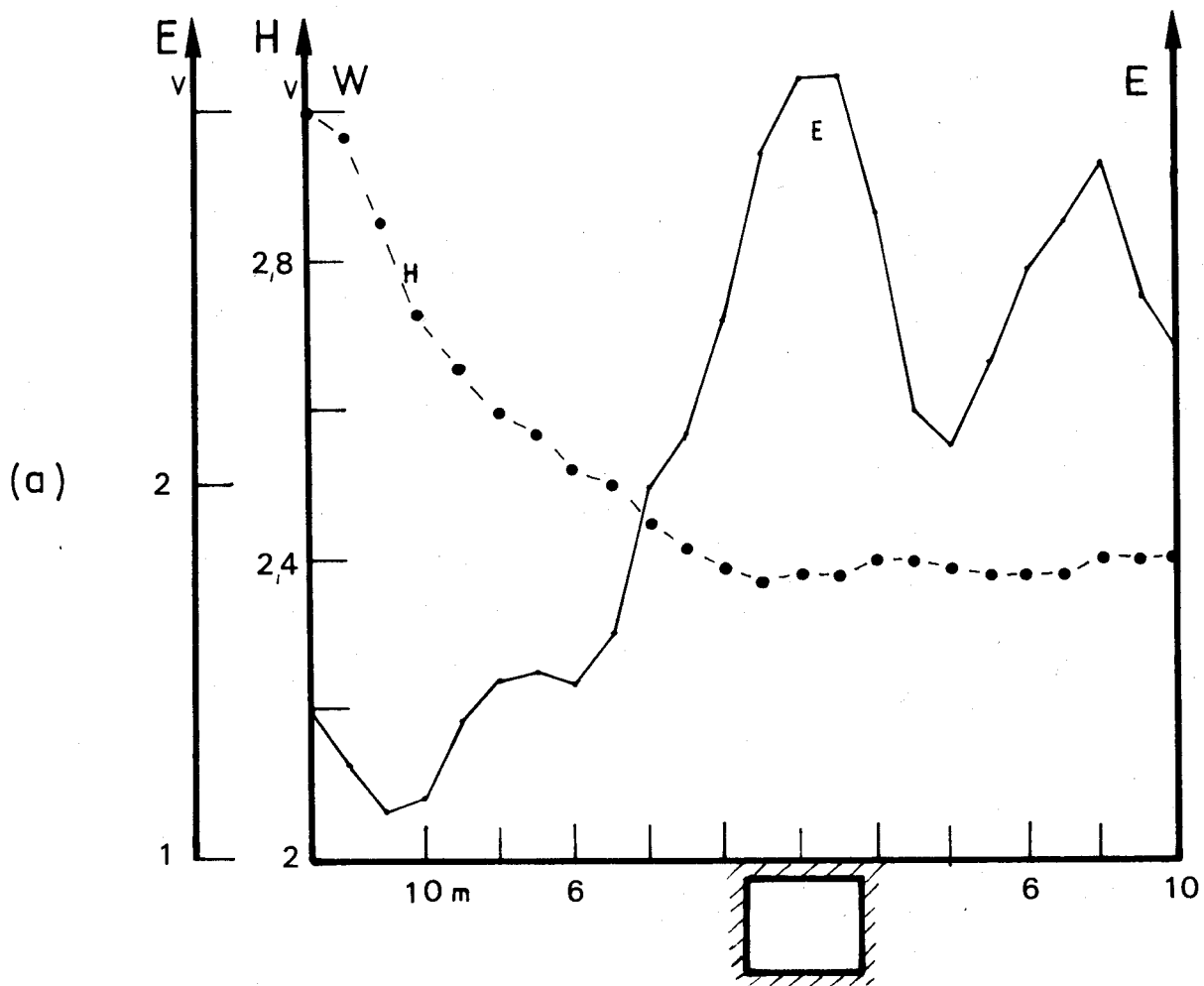


Figure 44 : "CAVEAU CRG" :

a - évolution de  $H_y$  et  $E_x$  à 163,84 KHz en fonction de la distance.  
 b - comparaison entre courbe théorique et expérimentale.

dence au caveau) dont on étudiera la forme par la suite, une autre anomalie à l'W. Déjà décelée lors de la première phase, on voit qu'elle représente une zone très faiblement résistante, ( $4 \Omega\text{m}$  à 163,84 KHz et  $18 \Omega\text{m}$  à 15,1 KHz) et sans rapport avec la structure étudiée.

D'autre part, on a également tracé la carte des isovalues de  $E_x$  pour Allouis (figure 43c). On note que le vecteur tellurique est affecté par la structure perturbatrice (mais qu'il est sensible aussi au caveau). Or, il a été dit que la composante verticale Hz du champ réémis indiquait ici une très forte anomalie puisqu'il y avait même saturation des chaînes électroniques du SGD. C'est pourquoi l'on est obligé de se reporter sur le vecteur magnétique pour expliquer les fortes valeurs du rapport H/E. La figure 44a présente les graphiques de l'évolution de  $H_y$  et de  $E_x$  en fonction de l'emplacement de la station le long du profil axial. Aucune variation sensible pour H n'apparaît au niveau de la fosse.

L'accroissement du vecteur tellurique au-dessus du caveau tout comme à 8 m vers l'E est donc significatif d'un terrain globalement plus résistant. Mais le paramètre H subit une forte augmentation d'intensité à l'W du secteur.

Une étude détaillée des plans de construction a permis de s'apercevoir que deux câbles électriques, distants l'un de l'autre d'environ 1 m et enterrés à 30 cm de profondeur parvenaient jusqu'à quelques mètres du caveau. Seule leur extrémité a été coupée et ôtée lors de l'aménagement du caveau pour cette étude.

On a donc retiré les câbles jusqu'à plus de 15 m vers l'W ; de récentes mesures au SGD montrent que l'anomalie parasite n'existe plus là où elle avait été décelée. Par contre, on en trouve une similaire à plus de 20 m du caveau, là où sont encore enterrés les câbles.

Il n'est donc pas douteux que les câbles soient à l'origine de l'anomalie parasite.

Remarquons que l'étude séparée de la composante magnétique  $H_y$  et de la composante électrique  $E_x$  n'a pu être entreprise à 15,10 KHz, étant donné le caractère aléatoire de la puissance d'émission. A titre d'indication le vecteur magnétique a augmenté de 15 % en l'espace d'une demi-heure à la même station sur ce site lors des mesures. La seule méthode serait d'adopter une base comme en gravimétrie et d'y revenir très souvent.

### III-2-3-c Remarques sur la forme de l'anomalie du caveau

On a vu que, dans le cas d'une structure cylindrique horizontale (théoriquement infiniment allongée), la seule possibilité qui s'offrait aux filets de courant était de passer au-dessus et au-dessous de la structure (III-1-3-a). On a vu aussi que, dans le cas d'un demi-cylindre tel un tunnel, la déformation des filets était beaucoup plus forte au-dessus qu'au-dessous, ce qui expliquait la divergence des équipotentiels par rapport à l'axe et leur concentration de part et d'autre de cet axe.

Dans le cas d'une sphère, le phénomène se pose différemment : les filets de courant peuvent passer au-dessus et en-dessous de la structure, mais aussi de chaque côté. Il se forme ainsi une sorte d'enveloppe autour de la sphère. Cette enveloppe serait sphérique si la structure était dans un milieu homogène et isotrope. Présentement, le caveau se trouve dans un terrain théoriquement homogène et isotrope latéralement et vers le bas, mais non vers le haut, puisqu'il est très proche de l'interface sol-air. L'enveloppe des filets de courant est donc extrêmement aplatie au-dessus de la pseudosphère, et sa déformation est telle que les équipotentiels convergent vers l'aplomb de la cavité où l'on enregistre alors à la fois un accroissement de la densité de courant et une concentration des équipotentiels. Ce phénomène s'accompagne évidemment d'un desserrement des équipotentiels de part et d'autre de la sphère dans la direction de l'émetteur. Ceci est effectivement observé à 15,1 et 163,84 KHz (figure 43 a et b) où l'on obtient un maximum du rapport H/E à 4 m à l'E, respectivement 1,25 et 1,14. Le symétrique à l'W est masqué par l'influence perturbatrice de la structure conductrice.

### III-2-4 Conclusion

BERDICHEVSKY donne une solution à l'influence d'une sphère creuse sur le champ tellurique dans un milieu homogène. Elle a l'avantage de ne faire intervenir que des longueurs dans les paramètres définissant la sphère :

$$E = 100 \sqrt{\left(1 + \frac{a^3}{r^3}\right) \left(1 + \frac{a^3}{r^3} - \frac{3a^3 t^2}{r^5}\right)}$$

$a$  = rayon de la sphère,

$$r = \sqrt{t^2 + H^2},$$

$H$  = profondeur du centre de la sphère,

$$t = \sqrt{x^2 + y^2}$$

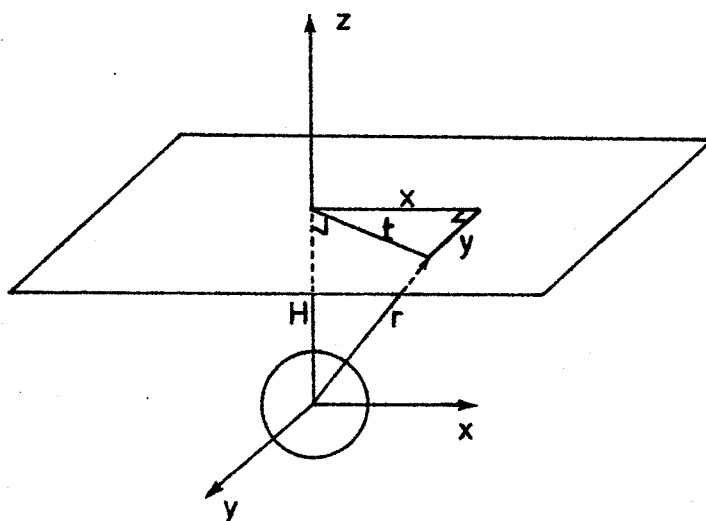


Figure 45 : Inclusion sphérique dans un milieu homogène - paramètres

Cette formule indique que le maximum de  $E$  est obtenu à l'aplomb de la cavité. Compte tenu de ces paramètres, le pourcentage maximum de variation de  $E$  par rapport à une station de base est de 167 %.

Sur la figure 44b ont été reportées la courbe théorique et la courbe expérimentale du rapport  $E/E_0$ ,  $E_0$  étant une station de base choisie du fait de ses perturbations minimales.

La coïncidence entre les deux courbes est correcte. On ne pouvait s'attendre à obtenir de résultats bien probants étant donné la grande influence de la structure perturbatrice.



En conclusion générale, ce caveau avait été initialement sélectionné pour être bien connu du point de vue de ses paramètres. Il devait normalement être à l'origine d'une importante anomalie. Or, s'il s'est avéré que cette pseudosphère engendre effectivement une forte anomalie, on a également observé qu'une importante perturbation à l'W rendait difficile l'interprétation. On pouvait malgré tout conclure à la sensibilité de l'appareillage à une cavité sphérique ce qui était évidemment nécessaire si l'on voulait, comme on va le voir, rechercher des catiches.

### III-3 Les catiches

Jusqu'à présent, on a vu deux cas d'utilisation de l'appareil, ayant rapport à des structures parfaitement géométriques.

Dans ce chapitre, il s'agira de cavités artificielles irrégulièrement creusées, les catiches. Pour la commodité des calculs et des interprétations, on assimilera les catiches, qui ont une forme de bouteille, à des sphères (R. NEUMANN, 1973), dont le rayon  $R$  est le demi-diamètre de la base  $R$ . SCHERPEREEL (1974) a estimé  $R$  à 4 m pour ses mesures gravimétriques. Cette valeur correspond plus à une exploitation en bouteille comme à Loos qu'à l'exploitation en chambres et en piliers de Lezennes. On donnera donc à  $R$  une valeur moyenne :  $R = 3,50$  m (figure 46).

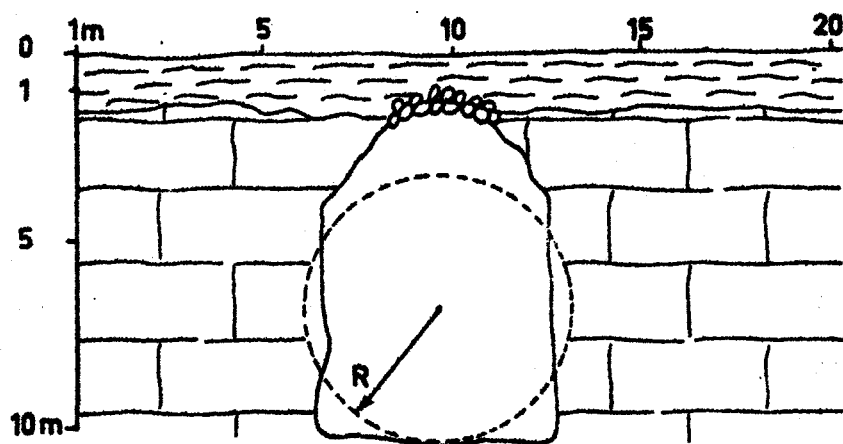


Figure 46 : Assimilation d'une catiche à une sphère.

### III-3-1 Généralités

Dans le Nord de la France, la craie est une formation géologique bien développée et occupant de grandes surfaces ; la structure peu géologique de certains niveaux, sa composition chimique font qu'elle a été utilisée pendant très longtemps comme principale pierre à bâtir, mais aussi pour la fabrication des chaux et comme source de calcium et de phosphore pour l'agriculture (pratique du marnage) (J. LEPLAT, 1973).

Dans la région lilloise, les constructeurs, à la recherche de matériaux, ont disséminé autour des agglomérations d'importantes carrières souterraines (afin de conserver la surface cultivable mais aussi et surtout pour extraire des pierres non altérées). La mise en exploitation de ces carrières débutait par le creusement d'un puits vertical d'environ 1,5 m de diamètre à la surface, s'élargissant jusqu'à 5 ou 6 m, parfois même 8 m, en atteignant la craie compacte. La roche était alors extraite en creusant le puits à diamètre constant jusqu'à la surface piézométrique de la nappe aquifère (entre 10 et 15 m de profondeur). On rebouchait la cavité inutilisable par une voûte en pierre recouverte de 1,5 m à 3 m de matériau de remblai. Un nouveau puits était alors entamé non loin de là et ainsi de suite. Ces puits, appelés catiches, communiquent par leur base par un réseau de chambres et de piliers, l'ensemble constituant une carrière souterraine (figure 47).

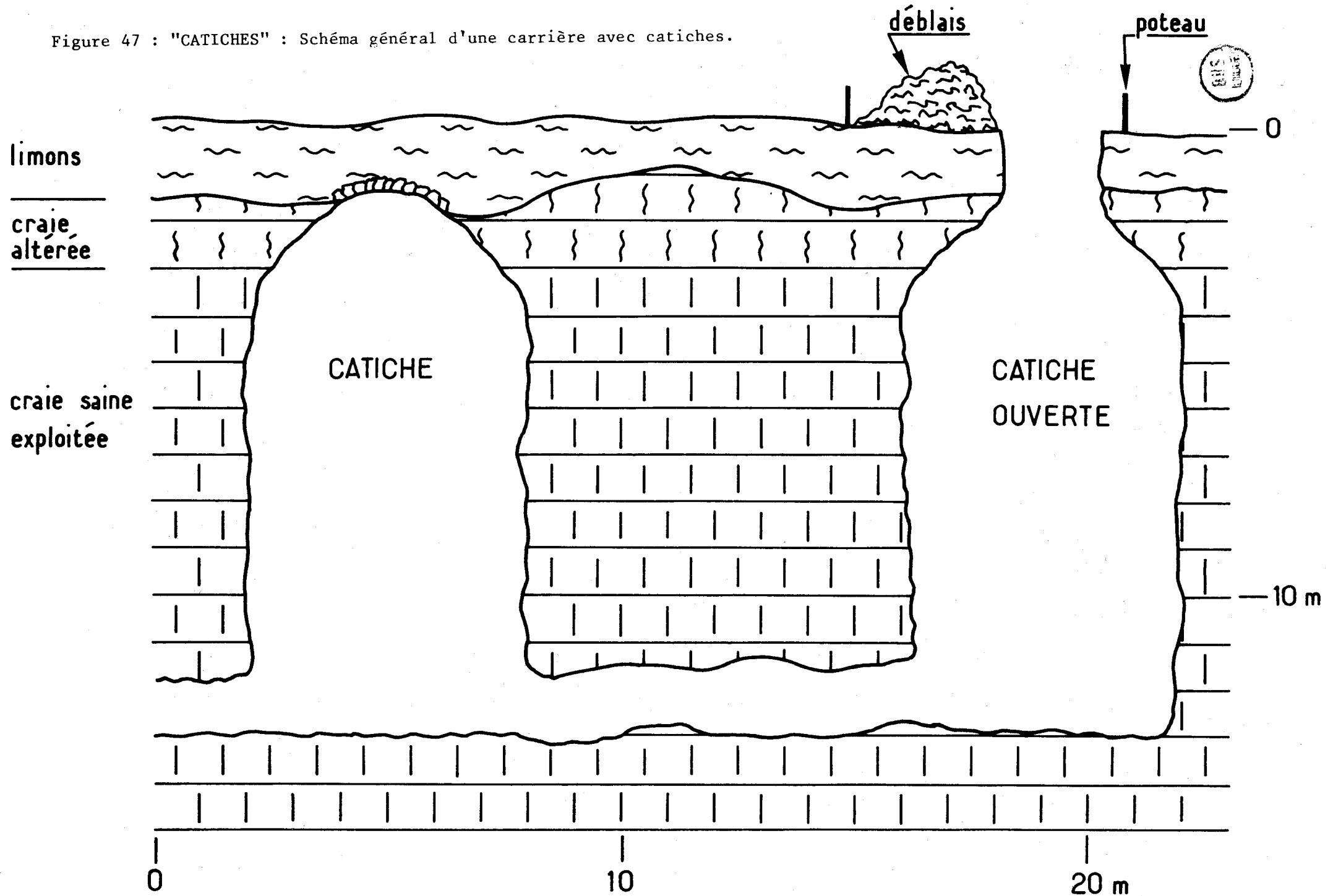
Les dangers d'effondrement que représente ce système de cavité font qu'il est nécessaire de connaître parfaitement leur localisation et principalement celle des catiches avant d'entreprendre d'importants travaux de génie civil.

L'extension de la ville de Lille vers l'Est amène urbanistes, promoteurs et ingénieurs à travailler de plus en plus près de ces zones (village de Lezennes). Aussi l'intérêt de la M.T.A. a-t-il été testé sur un emplacement bien connu de cette région.

### III-3-2 Mise en station

Le travail s'oriente dans deux directions : d'une part il s'agit de connaître les avantages et les inconvénients de l'appareil lors d'une recherche de catiches et d'avoir une idée précise des mesures et pourcentages de variations obtenus dans le cadre de cette étude, d'autre part de rechercher systématiquement aux deux fréquences, par profils parallèles, toutes les catiches pouvant exister dans un champ pour lequel on possédait déjà une carte d'implantation de carrière.

Figure 47 : "CATICHES" : Schéma général d'une carrière avec catiches.



Deux profils expérimentaux n'ayant d'autre but que celui de tester les deux fréquences ont été réalisés figure 48. Or, il s'est tout de suite avéré que l'éloignement aux émetteurs est un sérieux handicap.

D'autre part, le secteur est proche d'une grande zone industrielle sillonnée de lignes à hautes tensions. Les parasites sont puissants et occupent un large spectre de fréquences.

Les conditions de travail ont donc été, dans l'ensemble, assez médiocres.

Cependant, en avril 75, une première série de résultats a pu être obtenue. La fréquence 163,84 KHz a toujours été captée de manière fort acceptable, mais le 15,1 KHz était sujet à d'importantes variations, selon l'heure, les conditions climatiques et les signaux parasites. Ce site n'a pu être réexploité qu'après les récoltes, soit cinq mois plus tard.

Malheureusement, la réception des émissions d'Allouis mais surtout de Châteauroux a été particulièrement difficile, étant donné le temps orageux et la forte électrisation de l'air. De plus, un puissant parasite industriel (environ 1,4 MHz d'après l'oscilloscope ; il s'agit de Radio-Lille) a provoqué avec le 15,1 KHz un battement de tension de sortie, empêchant toute mesure. On ne pourra donc présenter de résultats complets qu'à la fréquence d'Allouis. Cependant, on conservera les mesures qui, faites avec la fréquence de Châteauroux, se sont révélées significatives.

### III-3-3 Etude d'une catiche

Seule la plus haute fréquence est utilisée. La première phase consiste à effectuer des mesures ponctuelles.

La catiche est préalablement repérée au décimètre et à la boussole grâce à un plan.

On suit alors six profils parallèles distants les uns des autres de 0,50 m et situés de part et d'autre de la verticale de la catiche supposée. Ces profils sont orientés vers les émetteurs afin de travailler avec le maximum d'intensité de champ électromagnétique.

Le rapport des champs  $H_y/E_x$  est noté tous les 0,25 m sur une distance de 10 m. On réalise donc là un maillage très fin qui doit permettre d'aboutir à une carte de résistivité très précise. C'est un maillage de recherche expérimentale et non de prospection comme on le verra par la suite.

Compte tenu des différents paramètres d'étalonnage et de réglage, on obtient la résistivité par la relation :

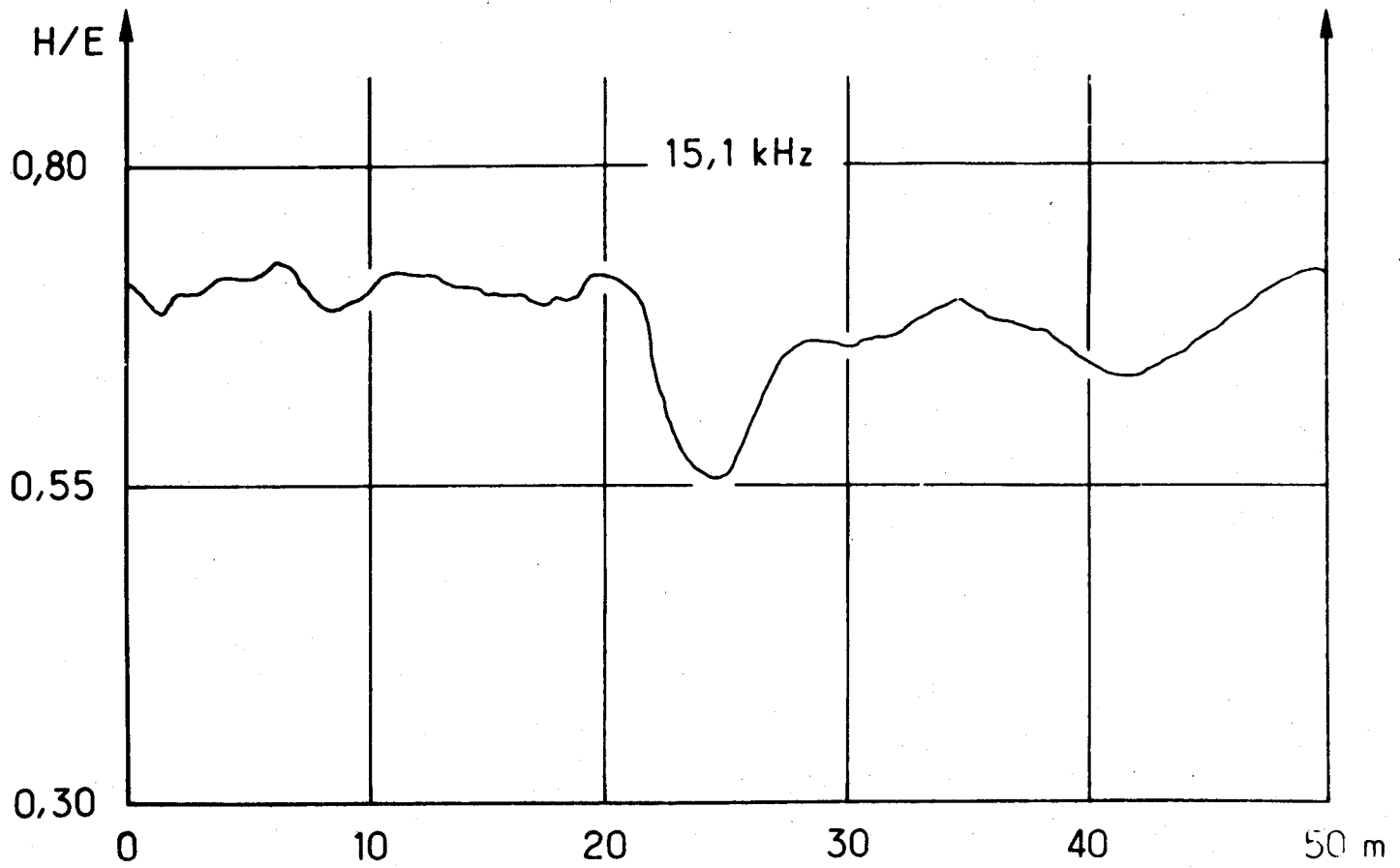
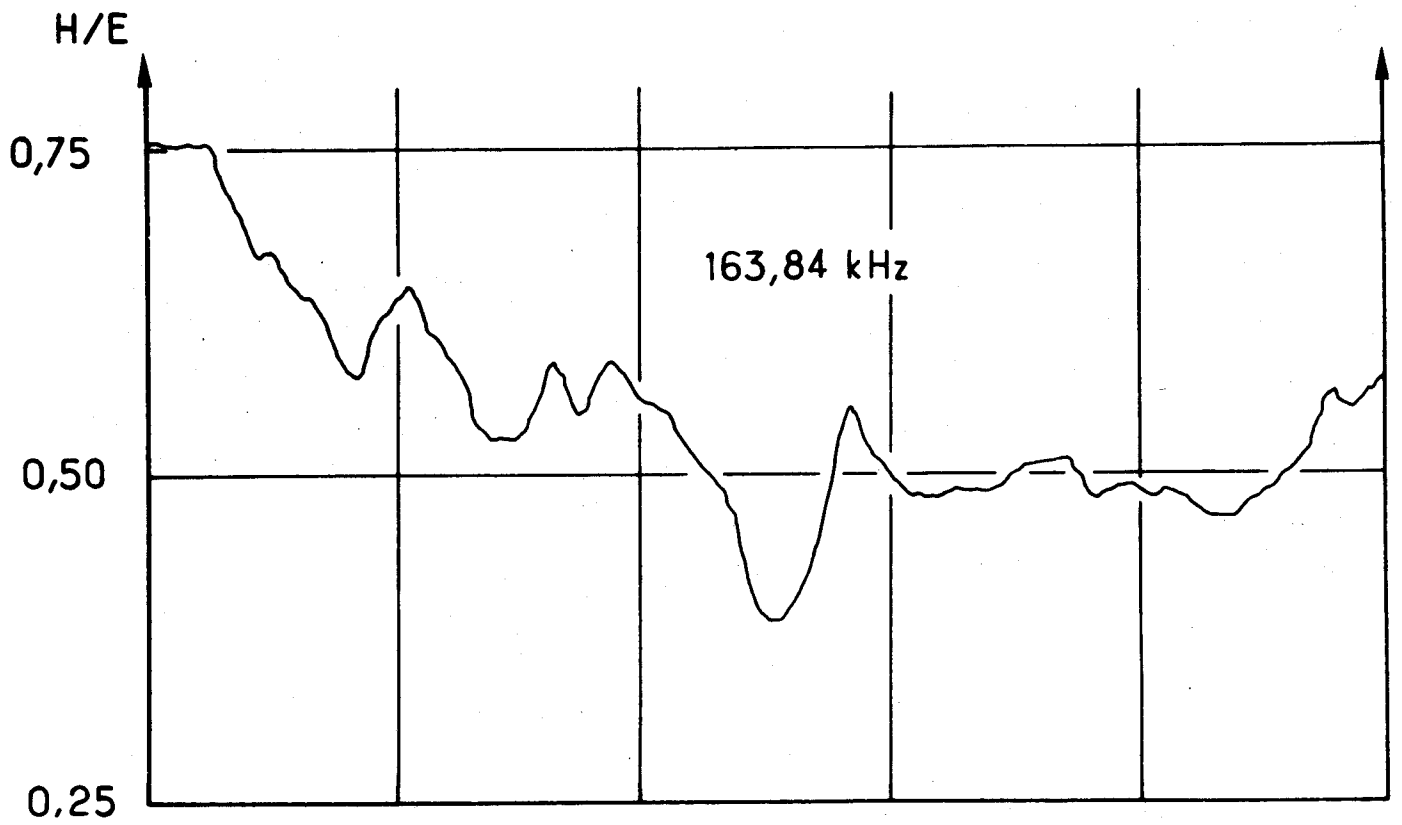


Figure 48 : "CATICHES" : Exemples de détection d'une catiche.

$$\rho_a = \frac{86,55}{(H/E)^2} \Omega\text{m à } 163,84 \text{ KHz}$$

Châteauroux n'a pu être capté dans des conditions acceptables. Signalons que la tension de sortie de la voie H pour Allouis à Garchy est de 2,02 V, et qu'à Lezennes, elle est de 0,2 V. D'après la sensibilité du capteur ( $3,27 \cdot 10^{-3}$  mV/mV) et l'amplification de la voie (397,6 mV/m) ceci nous conduit respectivement à 1,55  $\gamma$  et 0,154  $\gamma$  pour l'intensité de la porteuse  $H_0$  du champ. C'est dire qu'à 450 km de l'émetteur, l'intensité des champs n'est plus égale qu'au dixième de la valeur mesurée au C.R.G..

C'est bien souvent suffisant mais pour peu que les parasites industriels soient importants, on comprend qu'il soit difficile, voire impossible, de travailler dans des conditions satisfaisantes.

La carte de résistivités (figure 49a) a été établie en reportant aux points de station toutes les valeurs du tableau 12 de calcul des résistivités apparentes. Pour plus de clarté, seule une valeur sur deux est indiquée. On a rejoint les points par des courbes isanomales pour dessiner l'anomalie provoquée par la catiche.

Notons d'abord que la résistivité apparente de l'ensemble craie saine, craie altérée et limons est de l'ordre de 80  $\Omega\text{m}$  à 163,84 KHz. Cette valeur peut sembler un peu élevée, mais il faut se rappeler qu'une longue période de sécheresse a précédé cette phase de terrain, et surtout que l'on se trouve sur une carrière : entre 8 et 10 m de profondeur, il y a un grand nombre de galeries qui augmentent très sensiblement la résistivité apparente  $\rho_a$ . Hors de la carrière,  $\rho_a$  est pratiquement divisée par deux, ce qui est conforme aux études antérieures.

Au niveau de la carrière, la profondeur de pénétration de l'onde électromagnétique est égale à :

$$p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10\rho_a T} \quad \text{soit } p = 11 \text{ m}$$

En fait, c'est la profondeur d'investigation qui est importante à connaître, mais elle n'est pas chiffrable. On estime donc que la fréquence est ici à peu près adaptée à la perception des catiches car la profondeur de leur centre se trouve toujours à moins de 8 m dans la zone étudiée.

La carte montre que les courbes d'isorésistivités de 150  $\Omega\text{m}$  à 90  $\Omega\text{m}$  se referment concentriquement autour de la catiche. Cela corrobore bien le fait que le sol a une résistivité apparente de moins de 90  $\Omega\text{m}$ .

TABLEAU 12 : Calcul des résistivités apparentes au-dessus de la catiche expérimentale.

Profil à 0,5 m à l'E du profil axial

d	H/E	$\rho_a$	d	H/E	$\rho_a$
5	1,22	58		1,06	77
	1,22	58	3	1,20	60
4,5	1,17	63		1,01	84
	1,25	55	3,5	1,02	83
4	1,22	58		1,06	77
	1,25	55	4	1,07	76
3,5	1,21	59		1,05	78
	1,19	61	4,5	1,03	81
3	1,22	58		1,01	85
	1,19	61	5	1,01	85
2,5	1,16	64			
	1,15	66			
2	1,12	69			
	1,10	71			
1,5	1,03	73			
	1,07	76			
1	1,05	78			
	1,03	82			
0,5	1,05	78			
	1,06	77			
0	1,06	77			
	1,12	69			
0,5	1,12	69			
	1,12	69			
1	1,19	61			
	1,17	63			
1,5	1,29	52			
	1,18	62			
2	1,17	63			
	1,18	62			
2,5	1,20	60			

Profil axial

d	H/E	$\rho_a$	d	H/E	$\rho_a$
5	0,97	92	2,5	1,08	74
	0,99	88		1,09	73
4,5	0,99	88	3	1,08	74
	0,99	88		1,07	76
4	0,98	89	3,5	1,05	79
	0,99	88		1,07	76
3,5	0,96	93	4	1,1	72
	0,87	115		1,1	74
3	0,95	96	4,5	1,08	74
	0,95	96		1,05	79
2,5	0,82	128	5	1,05	79
	0,86	117			
2	0,87	118			
	0,83	126			
1,5	0,80	134			
	0,74	158			
1	0,76	148			
	0,79	138			
0,5	0,79	137			
	0,81	132			
0	0,82	129			
	0,88	111			
0,5	0,92	102			
	0,98	91			
1	1,02	89			
	1,06	77			
1,5	1,09	73			
	0,97	92			
2	1,08	74			
	1,05	78			



TABLEAU 12 (suite)

Profil à 0,50 m à l'W du profil axial

Profil à 1 m à l'W du profil axial

d	H/E	$\rho_a$	d	H/E	$\rho_a$
5	0,95	96		1,16	64
	0,95	96	1,5	1,15	65
4,5	0,94	98		1,10	72
	0,96	94	2	1,12	69
4	0,96	94		1,05	79
	1,09	73	2,5	1,05	79
3,5	1,10	72		1,04	81
	1,07	76	3	1,05	79
3	1,04	81		1,03	82
	0,95	96	3,5	1,04	80
2,5	0,95	96		1,04	81
	0,94	98	4	1,04	81
2	0,88	112		1,06	78
	0,85	120	4,5	1,04	80
1,5	0,76	150		1,05	79
	0,82	128	5	1,04	80
1	0,81	131			
	0,80	134			
0,5	0,83	127			
N	0,85	120			
O	0,89	109			
S	0,95	97			
0,5	0,98	90			
	1,03	82			
1	1,12	69			

d	H/E	$\rho_a$	d	H/E	$\rho_a$
5	1,12	69	0,5	0,94	98
	1,06	77		1,07	76
4,5	1,08	74	1	1,15	64
	1,14	67		1,21	59
4	1,07	76	1,5	1,22	58
	1,16	63		1,26	55
3,5	1,18	62	2	1,24	55
	1,04	80		1,10	72
3	1,02	82	2,5	1,18	62
	1,01	85		1,18	62
2,5	1,06	77	3	1,17	62
	0,99	88		1,19	61
2	0,92	103	3,5	1,18	62
	0,90	104		1,17	62
1,5	0,86	112	4	1,05	79
	0,85	120		1,04	80
1	0,83	126	4,5	1,03	82
	0,82	129		1,14	67
0,5	0,85	120	5	1,13	68
N	0,87	116			
O	0,89	108			
S	0,91	105			





TABLEAU 12 (suite)

Profil à 1,50 m à l'W du profil axial

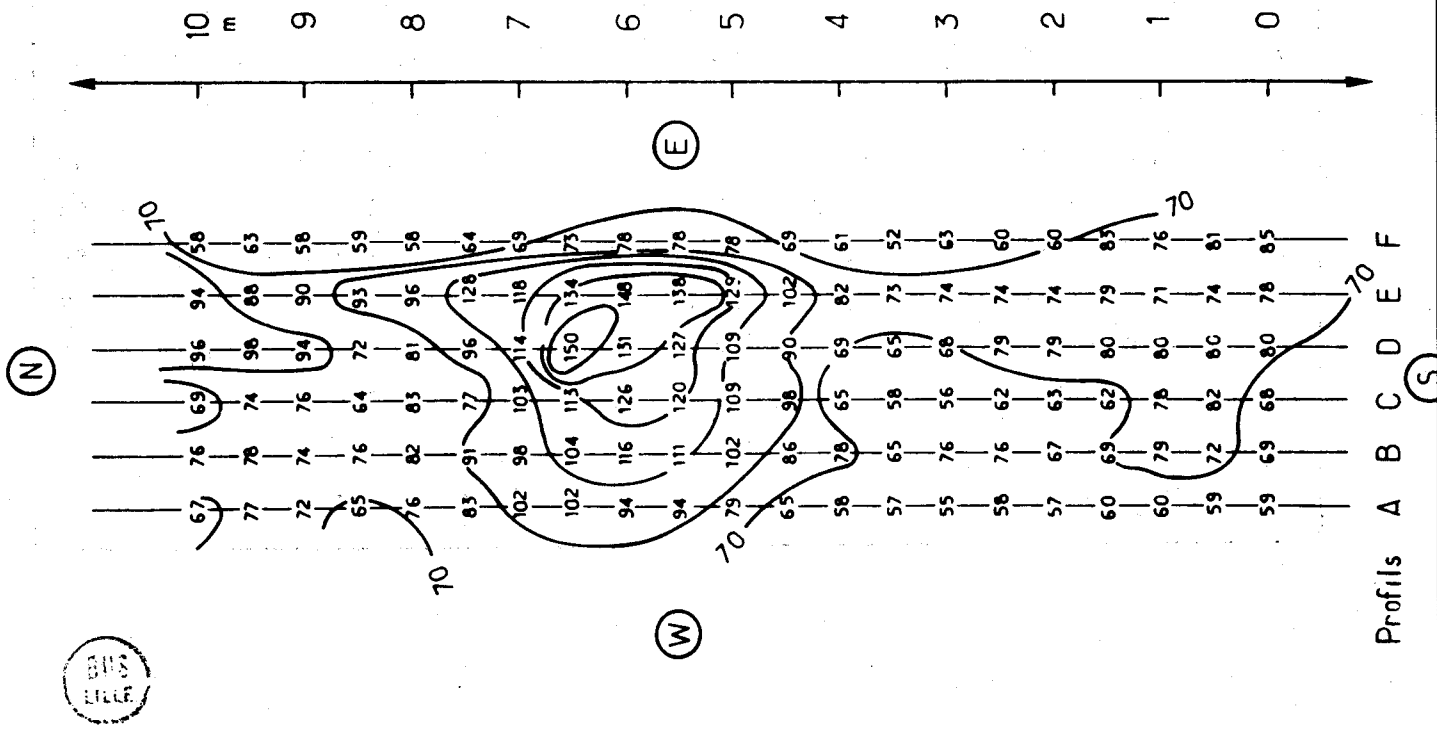
d	H/E	$\rho_a$	d	H/E	$\rho_a$
5	1,07	76	0,5	1,01	86
	1,04	81		0,99	88
4,5	1,06	78	1	1,05	79
	1,03	82		1,11	70
4	1,09	74	1,5	1,16	65
	1,05	79		1,12	69
3,5	1,07	76	2	1,07	76
	1,08	73		1,05	79
3	1,03	82	2,5	1,07	76
	1,01	85		1,14	67
2,5	0,96	90	3	1,14	67
	0,96	94		1,15	64
2	0,94	98	3,5	1,12	69
	0,90	108		1,04	80
1,5	0,87	113	4	1,05	79
	0,87	113		1,07	76
1	0,85	115	4,5	1,10	72
	0,80	131		1,09	73
0,5	0,87	111	5	1,12	69
N	0,90	107			
0	0,92	101			
S	0,96	94			

Profil à 2 m à l'W du profil axial

d	H/E	$\rho_a$	d	H/E	$\rho_a$
5	1,14	67	0,5	1,15	63
	1,06	77		1,18	62
4,5	1,06	77	1	1,22	58
	1,16	63		1,23	56
4	1,10	72	1,5	1,24	57
	1,09	73		1,25	53
3,5	1,16	65	2	1,25	53
	1,11	69		1,23	57
3	1,07	75	2,5	1,23	57
	1,02	82		1,23	57
2,5	1,02	82	3	1,23	57
	1,00	87		1,19	61
2	0,92	101	3,5	1,20	59
	0,90	107		1,19	61
1,5	0,92	101	4	1,20	59
	0,94	97		1,16	63
1	0,95	94	4,5	1,21	59
	0,94	96		1,24	57
0,5	0,96	94	5	1,21	59
N	1,00	87			
0	1,05	79			
S	1,07	76			



a - carte de résistivité.



b - évolution de  $\rho_a$  le long du profil D.

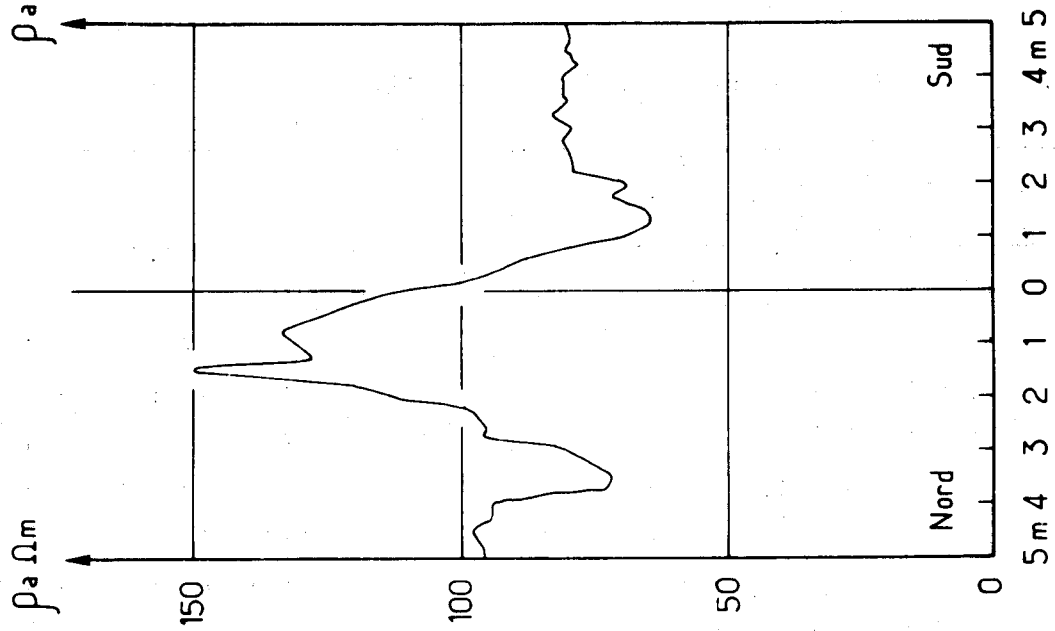


Figure 49 : "CATCHES" :

D'autre part, d'après le maillage d'étude, on peut évaluer l'influence latérale de la catiche sur  $\rho_a$  à 1,50 m du centre de l'anomalie ; au-delà de cette distance, il semble difficile de déceler l'existence d'un puits.

La figure 49b montre l'évolution de  $\rho_a$  le long du profil D. On remarque que l'anomalie est parfaitement symétrique par rapport au pic de résistivité.

On a expliqué, dans le cas du caveau, la forme de l'anomalie (chap. III, B, III-2-3-c). Les deux minima de  $\rho_a$  sont ici nets sur le profil D à environ 2,50 m de chaque côté du pic de résistivité, c'est-à-dire de l'axe de la catiche. Il va de soi que, d'après la forme des lignes de courant et des équipotentiels, ces deux minima ne seront nets que sur le profil passant par l'axe de la cavité et dans la direction à l'émetteur. La carte de résistivité (figure 50a) montre en effet que le desserrement des équipotentiels (conduisant à un minimum de résistivité) n'est pratiquement plus sensible sur les profils C et E soit à 0,50 m seulement du profil D. Une conclusion immédiate s'impose : lorsqu'un traîné présente de part et d'autre de l'anomalie deux minima de  $\rho_a$  (ou deux maxima du rapport  $H/E$ ), on peut dire qu'il est effectué exactement au centre de la catiche.

Comme dans le cas du caveau, on a calculé le rapport  $E_q/E_o$  ( $E_o$  en station de référence,  $E_q$  en station de mesure) en assimilant une catiche à une sphère de 7 m de diamètre et dont le centre se trouve à 6 m de profondeur. Les variations de  $E_q/E_o$  sont élevées au carré car :

$$\frac{\rho}{\rho_o} = \frac{(E/H)^2}{(E_o/H_o)^2} = \left(\frac{E}{E_o}\right)^2$$

La figure 50 montre l'évolution de  $\rho_a/\rho_o$  et de  $(E_q/E_o)^2$  en fonction de l'éloignement au centre de la catiche.

L'amplitude de l'anomalie est du même ordre. Cependant, la courbe expérimentale donne une forme moins évasée que la théorie. Ceci est dû au fait, d'une part, que l'on mesure une ddp et non le vecteur E, d'autre part, que l'assimilation d'une catiche à une sphère est relativement grossière.

On peut néanmoins prendre en considération cette approximation pour calculer les paramètres d'une catiche en fonction des données expérimentales. On donne en annexe un essai de résolution par l'informatique de ce problème, et l'on en donne aussi les difficultés d'utilisation non encore résolues.

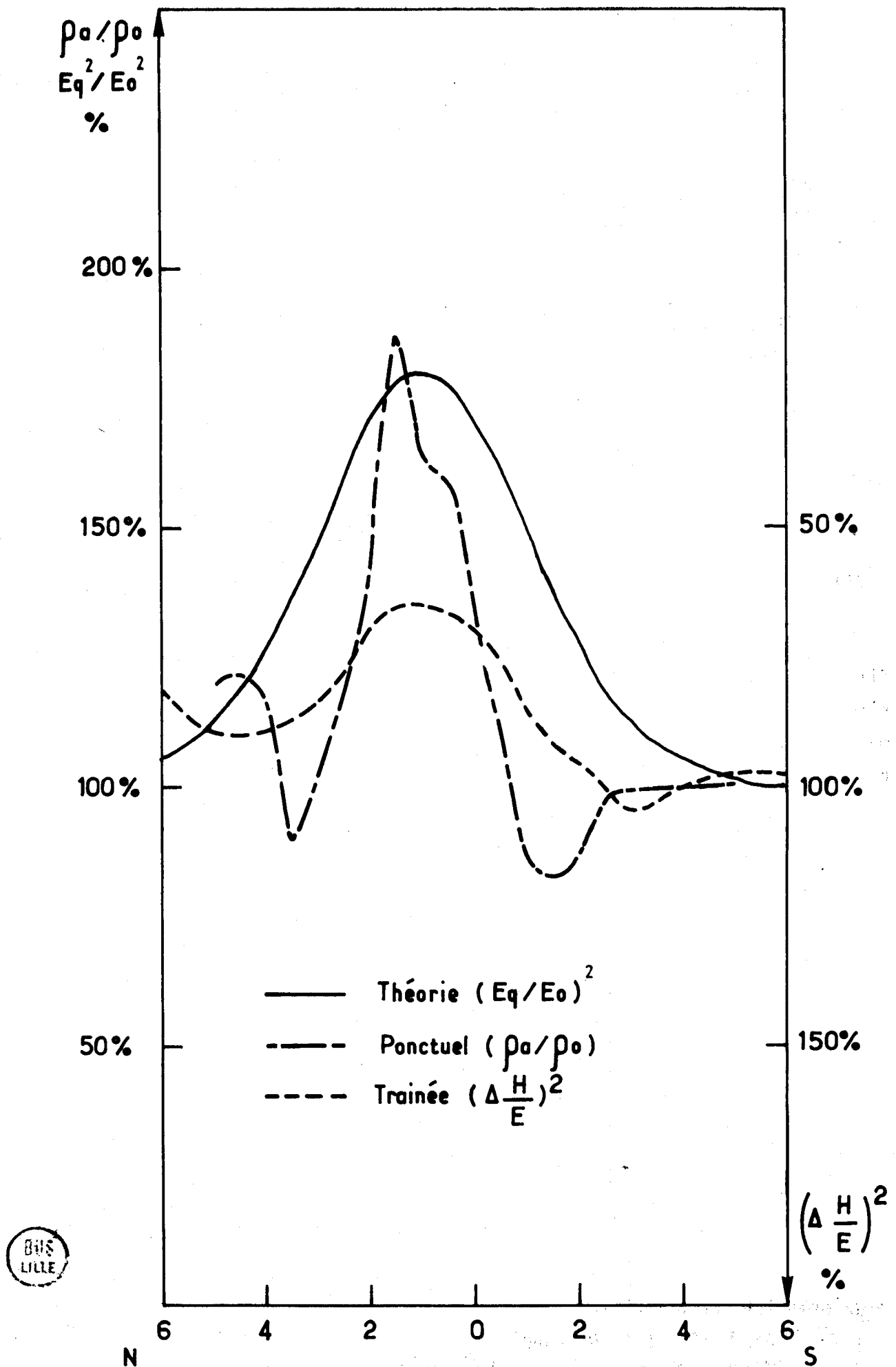


Figure 50 : "CATICHES" : Comparaison entre la courbe expérimentale et la courbe théorique.

Il faut noter que les mesures ponctuelles sont particulièrement longues : 252 points sur une surface de 10 m sur 2,50 m. Si on gagne beaucoup en précision, on perd énormément en rapidité d'exécution et en rentabilité par rapport aux enregistrements continus.

C'est pourquoi un traîné a été exécuté le long d'un des six profils. La forme de cette courbe est identique au profil de résistivité (figure 51). Mais il y a trois remarques à faire :

- les maxima du rapport P/E (correspondant aux minima de la résistivité) sont faibles ;
- l'amplitude de l'anomalie est moins élevée qu'en mesures ponctuelles ;
- l'anomalie est étalée, puisque les deux minima se trouvent à environ 3,50 m du centre de la catiche.

Toutes ces observations relèvent de la constante de temps de l'appareillage ; ce phénomène est donc normal.

La figure 51 montre le résultat d'un traîné réalisé du S vers le N, puis du N vers le S. Le premier profil (S-N) montre un décalage de l'anomalie d'environ 1 m vers le N. Le deuxième profil quant à lui (N-S) montre un décalage de même importance mais vers le Sud, donc dans le sens du déplacement. Lorsqu'on fait la synthèse des deux profils, la catiche se trouve entre les deux anomalies, au point d'intersection des deux profils.

Cela oblige à passer deux fois sur une catiche pour la localiser mais cet inconvénient est largement compensé par l'extrême rapidité du traîné comparé aux mesures ponctuelles.

Aussi la méthode de travail pour une recherche systématique de catiches sera-t-elle la suivante : tout d'abord, on localise par traînés parallèles et aux deux fréquences, les catiches possibles. On revient ensuite aux endroits où une anomalie a été enregistrée pour situer avec plus de précision par quelques mesures ponctuelles ou quelques aller-retour l'emplacement de la catiche.

Une limitation aux possibilités de l'appareil est de savoir si l'anomalie enregistrée est bien engendrée par un puits. Il peut, en effet, s'agir tout simplement d'une variation de l'épaisseur des limons, ce qui arrive fréquemment pour cette région.

C'est pourquoi l'on a calculé quelle devrait être la variation d'épaisseur des limons pour provoquer une telle anomalie à 163,84 KHz.

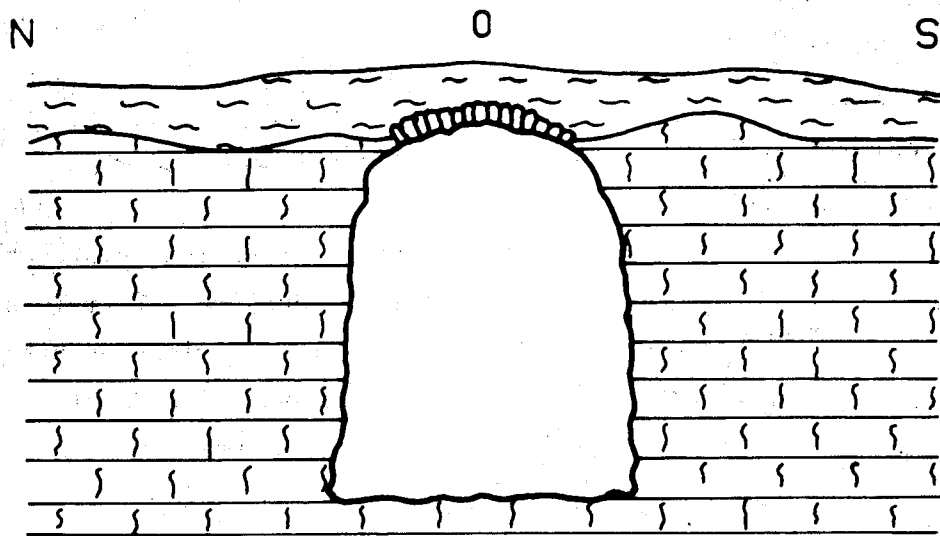
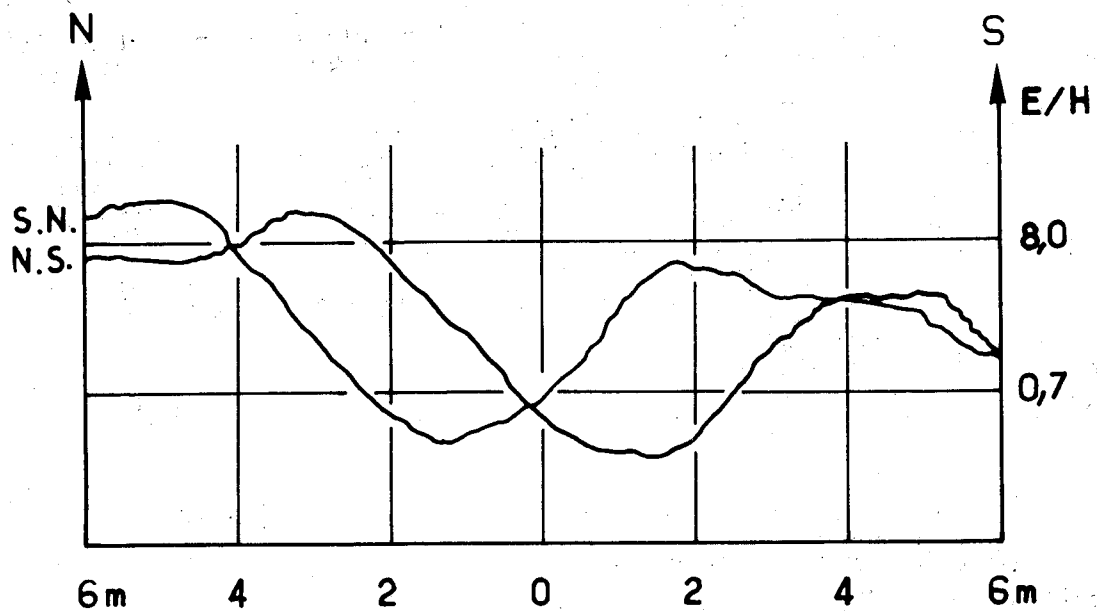


Figure 51 : "CATICHES" : Etude de l'ampleur du déplacement de l'anomalie lors d'un trainé.

Pour cela, on prendra comme résistivités vraies des limons et de la craie respectivement 25  $\Omega\text{m}$  et 68  $\Omega\text{m}$  pour une zone hors carrière, 15  $\Omega\text{m}$  et 83  $\Omega\text{m}$  pour une zone sur carrière (J. P. DUBUS, 1974). La résistivité apparente plus forte de la craie sur carrière correspond en fait à une augmentation des vides dûs aux galeries souterraines.

La M.T.A. donne  $\rho_a = 40 \Omega\text{m}$  hors carrière. D'après la loi des conductances équivalentes, l'épaisseur des limons est :

$$\frac{7,8}{40} = \frac{x}{25} + \frac{10,2 - x}{68} \quad \Rightarrow \quad x = 1,80 \text{ m}$$

Une catiche, à 1,25 m de son axe augmente la résistivité apparente d'au moins 20 %.

La résistivité apparente serait alors :

$$40 \Omega\text{m} + 20 \% = 48 \Omega\text{m}$$

L'épaisseur de limon conduisant à une anomalie identique est :

$$\frac{8,6}{48} = \frac{x}{25} + \frac{10,2 - x}{6x} \quad \Rightarrow \quad x = 1,20 \text{ m}$$

Sur carrière, d'après les profils continus, la résistivité apparente devient égale à 48  $\Omega\text{m}$ , ceci étant dû à l'existence des galeries.

L'épaisseur de limon est alors :

$$\frac{8,6}{48} = \frac{x}{15} + \frac{11,3 - x}{83} \quad \Rightarrow \quad x = 0,80 \text{ m}$$

La résistivité apparente sous l'influence d'une catiche à 1,25 m de son axe est :

$$48 \Omega\text{m} + 20 \% = 57,6 \Omega\text{m}$$

L'épaisseur de limon conduisant à une anomalie identique est :

$$\frac{9,44}{57,6} = \frac{x}{15} + \frac{11,3 - x}{83} \quad \Rightarrow \quad x = 0,50 \text{ m}$$

Dans un cas comme dans l'autre, il suffit que l'épaisseur des limons diminue de 35 % environ pour que l'anomalie ainsi engendrée soit comparable à celle d'une catiche moyenne à 1,25 m de son axe.

BHS  
LILLE

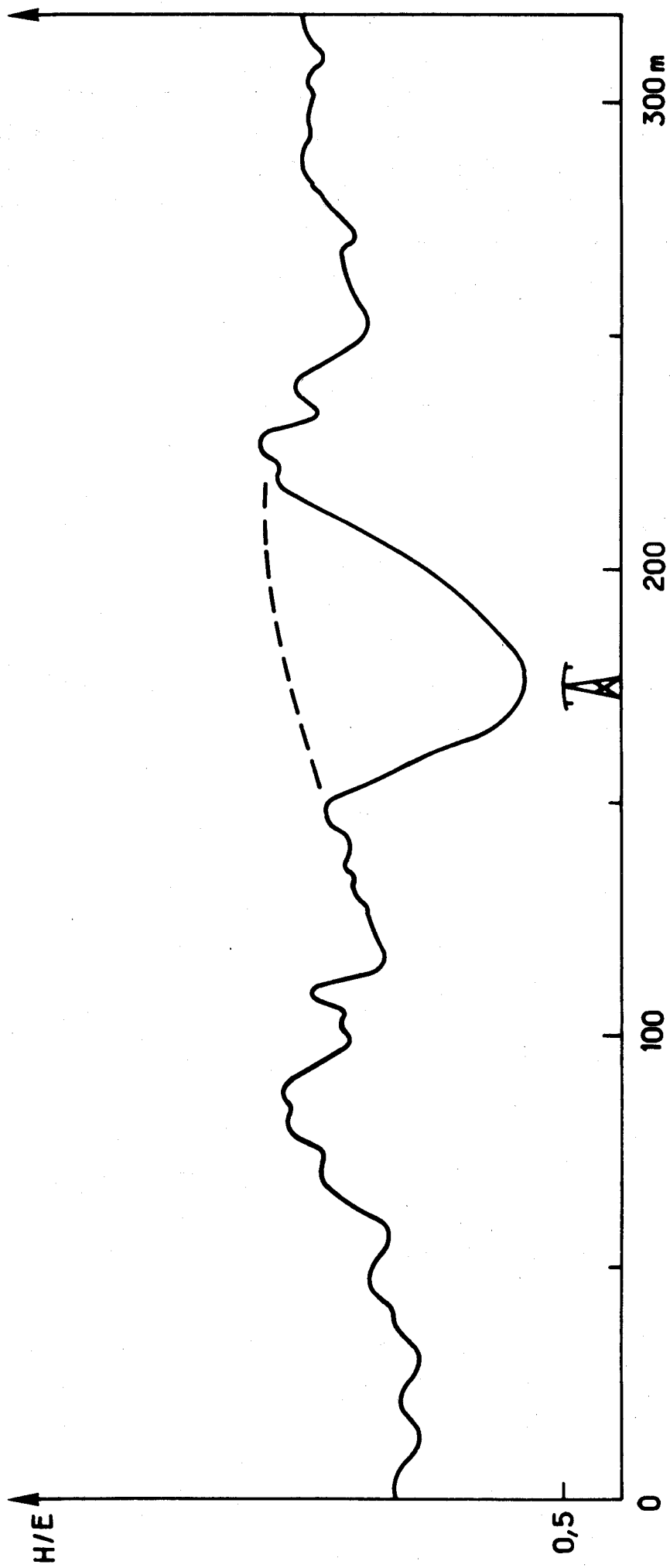


Figure 52 : INFLUENCE D'UNE LIGNE A HAUTE TENSION SUR LE RAPPORT H/E



Cela constitue une limitation sérieuse. Cependant, la profondeur d'investigation du 15,1 KHz est mieux adaptée à la perception d'une anomalie type catiche que celle du 163,84 KHz. Réciproquement, les anomalies superficielles seront plus évidentes à 163,84 KHz qu'à 15,1 KHz. La superposition des résultats à 163,84 KHz et à 15,1 KHz permet dans la plupart des cas d'isoler les anomalies dues aux variations de l'épaisseur des limons (J. P. DUBUS, 1974).

Inversement, si l'on considère qu'une variation de 20 % de la résistivité apparente est nécessaire pour que l'anomalie engendrée par la structure soit détectable, le rayon de la cavité doit être de l'ordre de la profondeur du toit (d'après BERDICHEVSKY).

### III-3-4 Recherche de catiches

#### III-3-4-a Présentation du site

Le site à étudier est un champ à environ 200 m duquel passe une forte ligne à haute tension parallèle à la direction aux émetteurs.

Un test a donc été fait sur l'influence des lignes à haute tension. La figure 52 montre l'anomalie parasite importante qu'une ligne à 300 KV provoque. En pratique, on ne peut espérer travailler à moins d'une quarantaine de mètres d'une telle ligne. On se trouve donc ici suffisamment éloigné pour n'être perturbé, peut-être, que par le 50 Hz.

L'implantation de la carrière a déjà fait l'objet de relevés souterrains exécutés par des géomètres. On a donc à notre disposition un plan précis de situation des catiches. Quelques unes d'entre elles sont ouvertes et permettent de se repérer exactement.

Il a été dit précédemment que la détection d'un puits devenait sujette à caution à plus de 1,50 m de son centre.

Aussi les profils parallèles qui sillonnent le secteur étudié seront-ils espacés de 2,50 m. Une catiche se trouvant exactement au milieu de deux lignes ne sera qu'à 1,25 m de chaque traîné (figure 53).

#### III-3-4-b Les enregistrements

Deux traînés d'un même profil ont déjà été montrés à titre d'exemple sur la figure 48. Les deux fréquences utilisées (Allouis et Châteauroux) apportent des résultats assez sensiblement différents dans le détail. Certes, l'anomalie principale est aussi déterminante sur les deux tracés, et c'est, somme toute, ce qui est recherché ; mais le rapport F/E subit des fluctuations importantes à 163,84 KHz. En effet, la profondeur de pénétration est assez faible en regard des structures, puisque du même ordre que leurs dimensions ; les hétéro-



- Catiche connue
- Catiche enregistrée à 163,84 kHz
- + Catiche enregistrée à 15,10 kHz

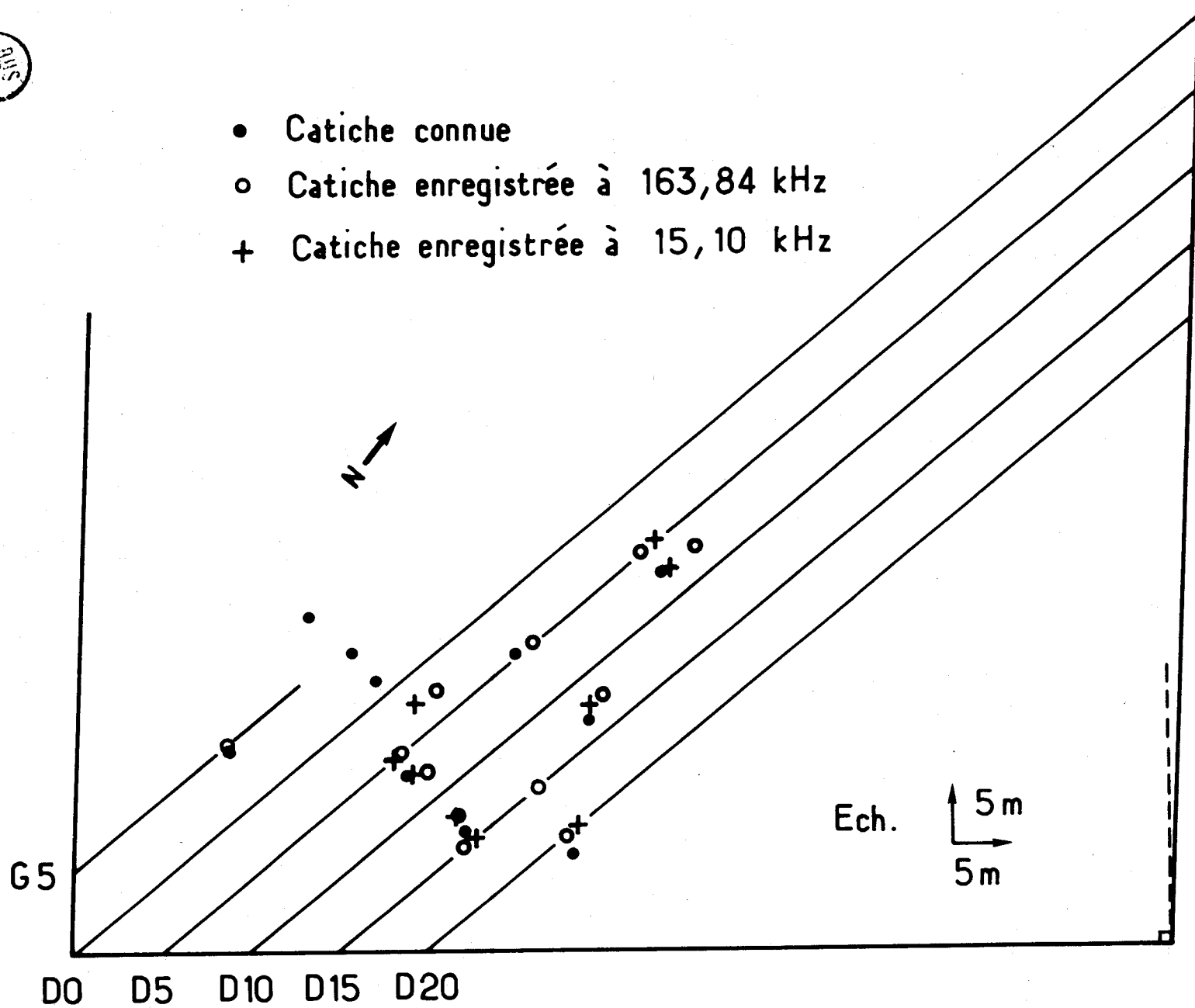


Figure 53 : "CATICHES" : Plan de situation.

généités de surface, liées aux variations anarchiques de l'épaisseur des limons entrent pour une part appréciable dans la valeur du rapport H/E. Par contre, à 15,10 KHz, la profondeur d'investigation est trois fois plus importante. Il est bien connu, que plus cette profondeur est grande, moins la mesure est influencée par les effets de surface ; le 15,1 KHz sera moins sensible aux variations très superficielles que le 163,84 KHz, car il intègre dans sa mesure un volume beaucoup plus grand de terrain ; il lisse les anomalies. La fréquence d'Allouis est bien adaptée à la recherche des catiches, mais celle de Châteauroux est plus commode à utiliser car elle procure des enregistrements plus nets.

Le schéma (figure 53) indique l'emplacement des catiches connues par le relevé souterrain. On y a ajouté la position des fortes anomalies pouvant être significatives de la présence d'un puits. On constate que les anomalies enregistrées aux deux fréquences sont pratiquement situées aux mêmes endroits. Mais, comme le laissaient présager les conclusions des paragraphes précédents, elles se trouvent légèrement derrière les catiches, dans le sens de la marche (déplacement du S vers le N).

Toutes les catiches recensées ont été découvertes aux deux fréquences ; il y a cependant deux exceptions :

- sur le profil G5, la fréquence de Châteauroux n'a pas pu être utilisée à cause de très mauvaises conditions de réception. Le résultat est donc incomplet, mais non erroné ;

- sur le profil D2,5, une anomalie importante a été enregistrée aux deux fréquences ; elle semble signifier la présence d'un puits alors qu'aucune catiche n'a été repérée par les géomètres.

De toute façon, quelle que soit la méthode géophysique utilisée, toutes les zones non saines qu'elle délimite seront vérifiées par forages. L'essentiel, c'est qu'elle n'en laisse pas échapper.

### III-3-5 Conclusion

Il semble que le choix d'un écartement de 2,50 m entre les profils soit judicieux et réponde bien aux exigences des structures mises en cause. Un espacement plus réduit n'apporterait qu'une précision supplémentaire assez dérisoire en comparaison du surcroît de travail nécessaire pour couvrir la même superficie (6 profils à 2 m pour 5 profils à 2,50 m).

Il n'est peut-être pas inutile de préciser que des traînées de 120 m durent ici cinq minutes d'après la vitesse de progression adoptée. Il est difficile de dire si cette méthode est rentable. Cependant, pour des opé-

rateurs entraînés, connaissant l'appareil et sachant exploiter immédiatement les résultats, il est possible de couvrir 1 ha en deux jours.

Par ailleurs, cette méthode ne nécessite pratiquement aucun dépouillement en laboratoire (correction, lissage de courbes, ...) ce qui réduit considérablement son coût. Elle est donc, par son extrême rapidité, supérieure à toute autre méthode.

Bien entendu, les possibilités de l'appareillage sont limitées. L'un de ses inconvénients est la sensibilité aux objets métalliques particulièrement aux grillages. Sur le site qui nous intéresse, à Lezennes, certaines catiches sont ouvertes, et leur entrée est protégée par un grillage maintenu au-dessus du trou par des piquets en bois. Or cela constitue une excellente antenne qui perturbe le champ électromagnétique à son voisinage immédiat. C'est pourquoi, à moins de 3 m du grillage, il ne faut pas compter obtenir de résultats crédibles. La figure 54 montre l'influence d'un grillage sur le rapport H/E lorsqu'on passe à proximité. Une deuxième contrainte est, comme on l'a vu, l'impossibilité de travailler à moins de 40 m d'une ligne à haute tension d'environ 300 KV.

Enfin, on peut citer le cas des orages atmosphériques au cours desquels l'activité électrique est très importante, perturbant de la sorte la réception des émissions d'Allouis et de Châteauroux au point de rendre impossible toute mesure. Cela est certes tout à fait indépendant de l'opérateur, mais n'en est pas moins réel et fréquent.

BUS  
LILLE

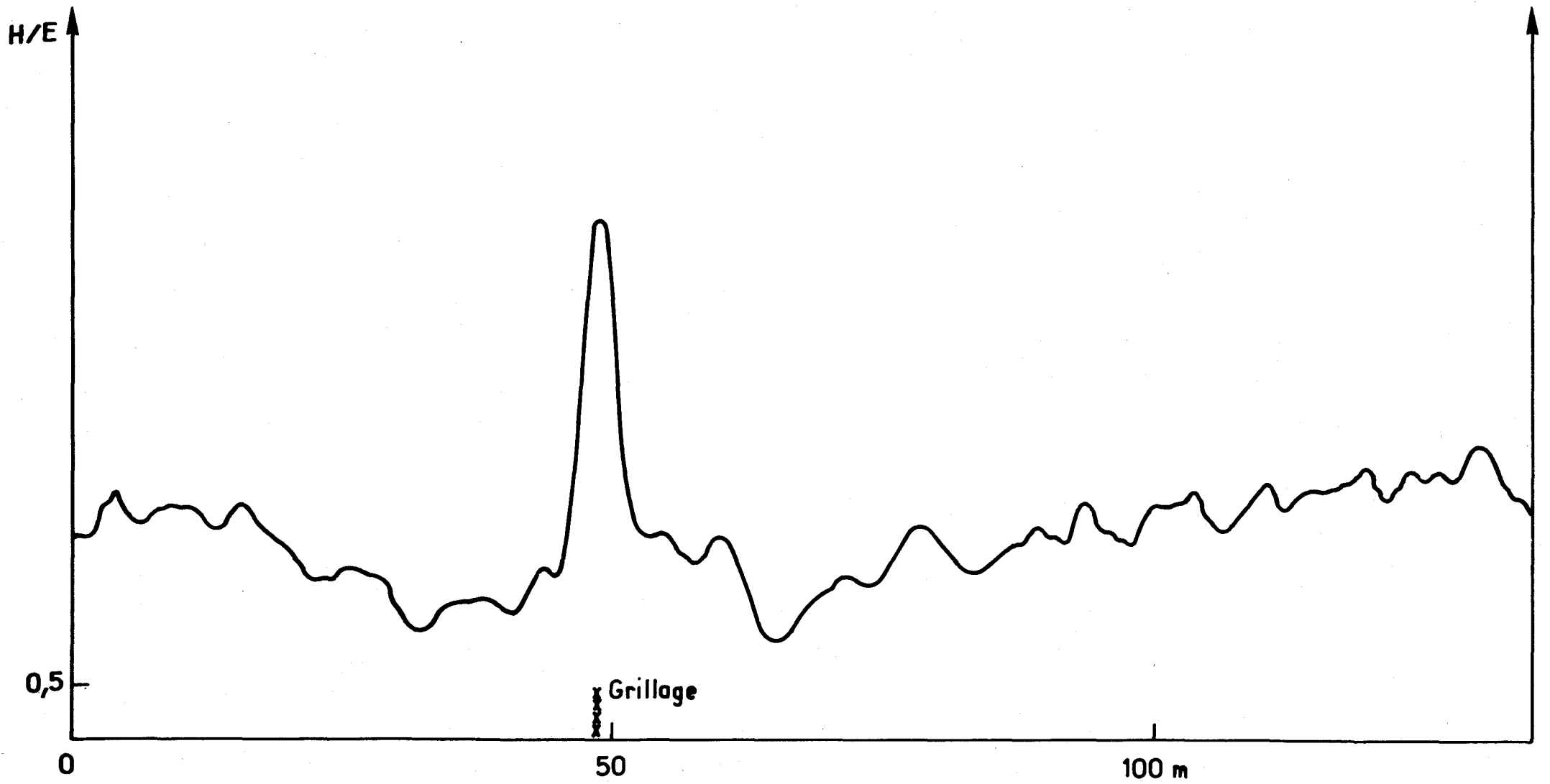
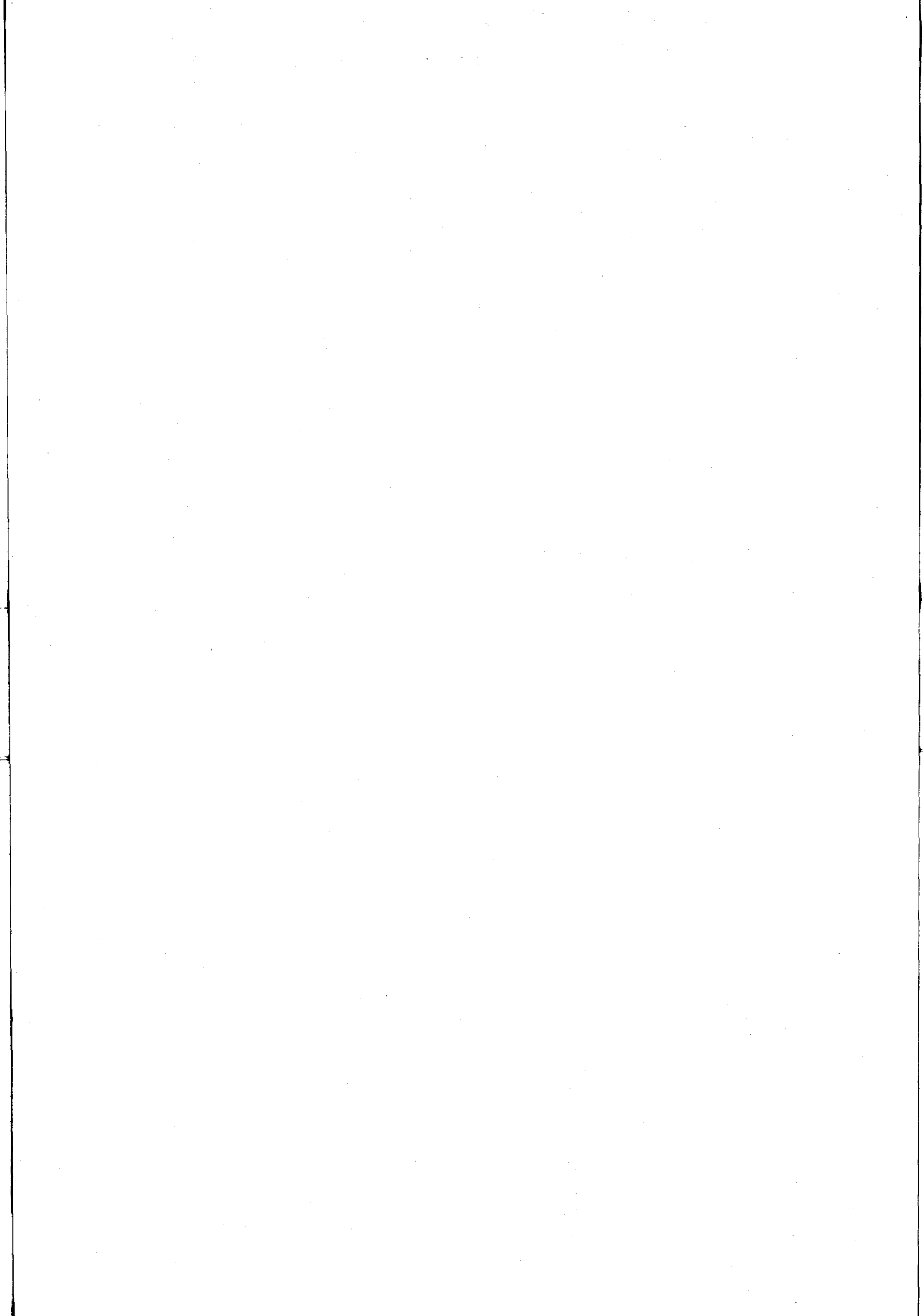


Figure 54 : INFLUENCE D'UN GRILLAGE SUR LE RAPPORT H/E



## C O N C L U S I O N

Voici maintenant un an qu'existe l'appareil décrit dans ces pages, son originalité résidant dans son capteur tellurique. Le but de ce travail était de tester non pas tant la méthode électromagnétique elle-même, mais plutôt la technique de mesure.

Aussi les tests ont-ils portés sur des sites variés sélectionnés pour leurs intérêts directement applicables au génie.

On a vu que, si le contraste de résistivité est suffisant (rapport de 2), les failles sont aisément mises en évidence. Encore faut-il, bien entendu, que l'épaisseur des terrains au-dessus de l'accident ne soit pas trop importante (cette nécessité étant d'ailleurs vraie quelle que soit la méthode de prospection géophysique (chap. III, A, II-5 et III-4).

Une autre application des possibilités de l'appareillage serait l'étude des voies de circulation de l'eau dans les régions granitiques. La confrontation de deux séries de mesures, l'une par temps sec, l'autre par temps pluvieux, devrait pouvoir conduire à une meilleure compréhension de la circulation de l'eau dans la zone altérée. Les pédologues sont, d'ores et déjà, fortement intéressés par cet aspect (chap. III, A, IV-5).

Mais ces deux exemples n'ont réellement d'intérêt que parce que l'accent a été mis sur l'exceptionnelle rapidité et la facilité de mise en oeuvre de la technique. La mise en station et le maniement de l'appareil ne demandent pas de formation particulière, et son poids est réduit ; il tient aisément, ainsi que sa maintenance, dans le coffre d'une voiture légère ; on peut l'attacher à l'arrière d'un véhicule et obtenir sans discontinuité des enregistrements en tous points comparables aux résultats obtenus en mesures ponctuelles, et aussi longtemps que le permettent les batteries (au moins une dizaine d'heures par temps doux et sec). Bien entendu, la vitesse doit alors être faible, de l'ordre de celle d'un homme en marche, car elle a pour effet d'absorber et d'étaler les anomalies (chap. III, A, II-4-a).

Bien qu'alors soumis à rude épreuve, le matériel n'a subi jusqu'à présent que des dommages mécaniques sans grande gravité. L'absence d'injection à mettre en place et d'électrodes de mesures à planter, facilitent grandement l'emploi de cet appareil. Il est particulièrement intéressant que, grâce à ce capteur tellurique capacitif, l'on puisse utiliser la méthode indifféremment sur du granite, des marnes, du sable, des calcaires compacts, des limons, et même sur route goudronnée et dans une certaine mesure sur la neige !

Par ailleurs, les problèmes de plus en plus importants posés par l'existence de carrières souterraines, nous ont amenés à tester la technique sur des cavités. Après avoir mis en évidence sa sensibilité sur des structures artificielles (chap. III, B, III-1 et III-2), on a choisi le site de Lezennes comme zone expérimentale (chap. III, B, III-3). On a montré que la détection des catiches ne posait guère de problèmes. Deux opérateurs, l'un tractant l'appareil, l'autre surveillant les évolutions du rapport H/E sur l'enregistreur autonome, suffisent pour déterminer sur place la position des catiches. Cependant, une variation relativement faible (35 %) de l'épaisseur des limons, suffit à provoquer une anomalie qui serait identique à celle d'une catiche si l'on passait à plus de 1,25 m de son axe.

En effet, si cette technique est supérieure à toute autre par la rapidité des mesures, nous n'aurions cependant garde de la décrire comme une panacée.

Son domaine d'application est limité par plusieurs faits :

- sa pauvreté en fréquence ;
- sa sensibilité aux parasites industriels ainsi qu'aux postes émetteurs de radio-diffusion très proches, malgré les filtres sélectifs aigus (toutes les méthodes ne produisant pas elles-mêmes leur injection et captant des signaux non contrôlés ont le même problème) ;
- sa sensibilité à l'éloignement à l'émetteur. Il faut savoir que, selon les service techniques de l'O.R.T.F., l'onde "est susceptible de brusques rotations de phase et variations d'amplitude", ce qui n'interviendrait "qu'au-delà d'une distance de 500 km de l'émetteur" (A. TABBAGH, 1974). L'appareillage ne peut donc être utilisé sur la fréquence d'Allouis qu'en France métropolitaine ;
- sa complète dépendance des caprices des émissions (variations de puissance, arrêt, panne, ...) ainsi que des conditions atmosphériques (orages) ;
- sa robustesse mécanique, qui, cependant, demande encore à être améliorée.

De ces cinq inconvénients, la pauvreté en fréquences est certainement le plus important. Dans la décennie à venir, l'électronique aura fait de tels progrès que l'on pourra disposer d'ordinateurs facilement transportables. Si l'appareil était doté d'une très haute fréquence, on pourrait accéder, sur n'importe quel sol, à la résistivité vraie de la couche superficielle ; ceci serait d'un grand secours car, grâce à l'ordinateur, nous aurions immédiatement le traitement des données.



La technologie a rendu possible la réalisation de circuits à très haute impédance d'entrée ( $Z_e > 10 \text{ M}\Omega$ ), permettant l'utilisation d'électrodes capacitives ; elle n'est cependant pas encore suffisamment développée pour permettre la réalisation d'un tel ordinateur.

Aussi le C.R.G. s'orientait-il actuellement vers un contrôle de l'injection, ce qui permettrait d'avoir un spectre de fréquences très élargi. Mais on connaît les problèmes au niveau de l'injection (puissance nécessaire élevée, donc matériel lourd et encombrant) si l'on désire se placer dans les conditions de l'onde plane. C'est pourquoi la méthode utilisée sera la détection synchrone dont on rappelle brièvement le principe : on émet un signal codé alternatif de forme carrée, dont la fréquence est fonction de celle injectée dans le sol. Au niveau du récepteur, on mesure le signal injecté dans le sol, de la même façon que dans ce travail. Mais on adjoint aux capteurs tellurique et magnétique un récepteur qui reçoit le signal codé émis dans l'air. Un système de comparaison (qui est la détection synchrone) permet de ne détecter et de n'amplifier que l'onde en phase ou en opposition de phase avec le signal de référence codé et dont la fréquence est exactement semblable. Ceci rend possible la séparation entre un signal injecté de très faible puissance et un bruit de fond d'intensité supérieure.

Cette nouvelle variante n'en est encore qu'à ses débuts, mais d'ores et déjà, les résultats sont prometteurs : à Sainte Colombe, près du C.R.G., on détecte le signal à plus de 500 m avec une injection de 10 W. Le but recherché est d'injecter la plus faible puissance possible et de pouvoir effectuer des mesures jusqu'à quelques kilomètres.

La distance minimale  $r$  du point de mesure au dipôle d'injection pour considérer l'onde comme étant plane est donnée par la relation :

$$\eta = \frac{r}{\delta} \geq 7 \quad \text{avec } \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (\text{J. P. DUBUS, 1974})$$

Elle correspond à la formule de STEFANESCO (1932) :

$$m = 2\pi r \sqrt{\frac{F}{\rho}}$$

On doit avoir  $m \geq 10,5$ , si l'on mesure  $E_x$  et  $H_y$  dans l'axe du dipôle électrique horizontal émetteur (BEAUSILLON R., BENDERITTER Y., CHIBA J., 1973).

Pour un terrain de résistivité moyenne  $100 \Omega\text{m}$ ,  $r$  est égal à 90 m à 163,84 KHz. On passe à 350 m à 10 KHz et à 1 100 m à 1 000 KHz.

La distance  $r$  devenant grande vers les basses fréquences, seule la détection synchrone permettra d'injecter des puissances qui ne deviendront pas prohibitives.

La méthode sera plus lourde et plus difficile de mise en oeuvre (problème de l'impédance des prises de terre) que l'actuelle technique, mais aura l'avantage d'offrir un très large spectre de fréquences, et donc une grande variété de profondeurs d'investigation. D'autre part, à l'échelle d'un site, il est vraisemblable que le traîneau pourra toujours être utilisé en enregistrements continus.

La technique de mesure du champ électrique par électrodes capacitatives s'est donc révélée être particulièrement adaptée au domaine du génie civil où les profondeurs d'investigation étant faibles, les fréquences mises en jeu sont élevées. Sa rapidité, sa facilité de mise en station, et donc son coût réduit, font que son utilisation devrait se développer dans un proche avenir. Les modifications en perspective en feront une des méthodes les plus complètes puisqu'elle permettra des sondages M.T., des traînés en enregistrements continus à la fréquence désirée.

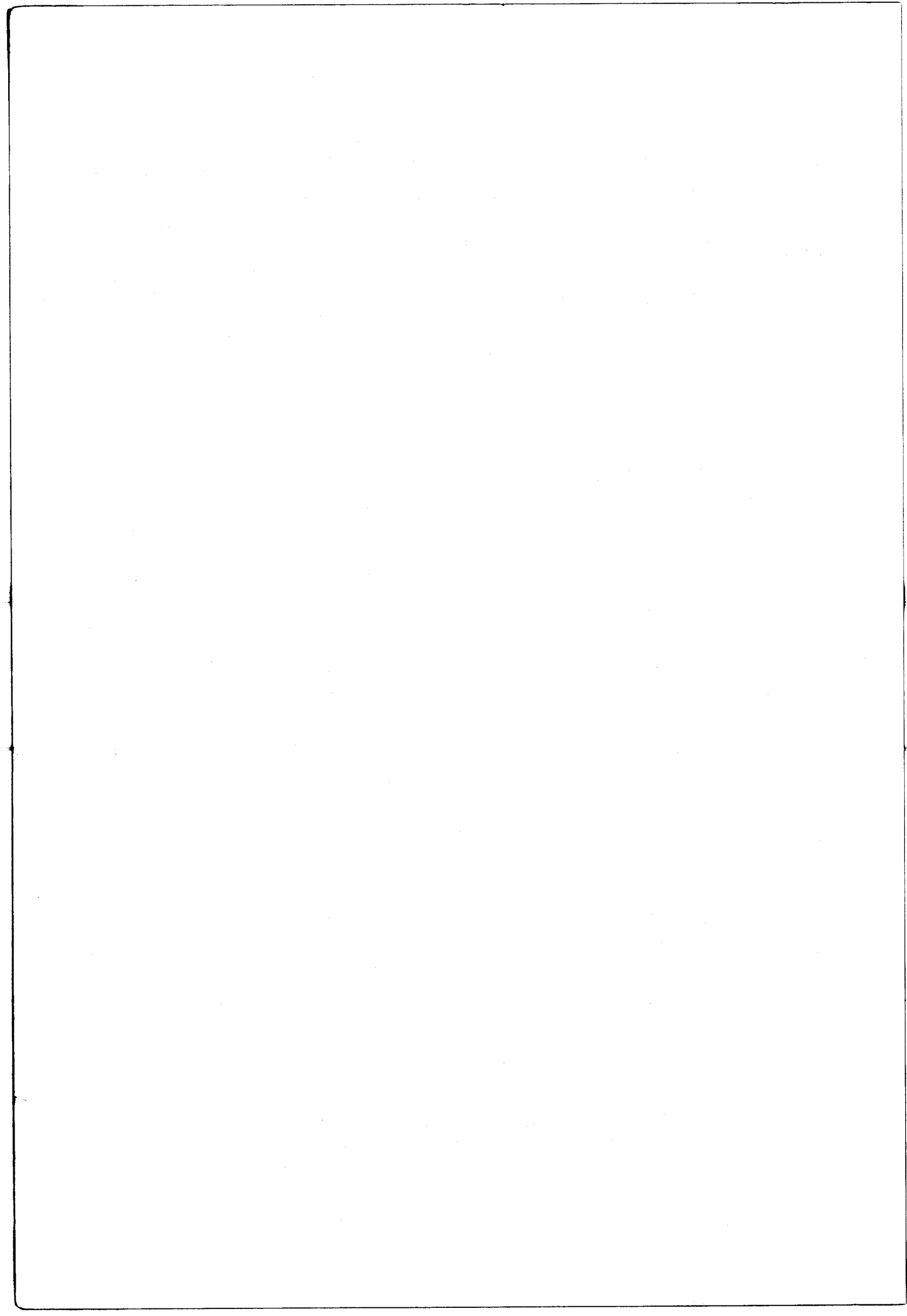
## B I B L I O G R A P H I E

- (ANVAR . 1973) .- "Dispositif pour la prospection magnétotellurique de sub-surface". Agence Nationale de Valorisation et de la Recherche. Brevet n° 73 - 11 - 573.
- ARNOULD M. 1964 .- La recherche de cavités souterraines sur les tracés autoroutiers. *Bull. Liaison P. et C.*, nov.-déc. 1964, n° 10.
- AUROUSSEAU P. 1976 .- Morphologie et genèse des sols sur granite du Morvan. Thèse Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de Rennes, juin 1976.
- BEAUSSILLON R., BENDERRITER Y., CHYBA J. 1973 .- Utilisation d'une source artificielle pour les mesures magnétotelluriques. European Geophysical Society, Zurich 25-29 sept. 1973.
- (BENDERITTER Y. 1968) .- Enregistrement des phénomènes magnétotelluriques pour la prospection géophysique. Thèse Doctorat d'Etat, Faculté des Sciences de Paris, janv. 1968.
- BENDERITTER Y., DUPIS A. 1969 .- Prospection géophysique par la méthode magnétotellurique ; mises à jour. 1969, tome 4, p. 252-274.
- BENDERITTER Y. 1971 .- La méthode magnétotellurique. Colloque de Géophysique minière. B.R.G.M., Orléans, 1971.
- BERDICHEVSKY M.-N. 1965 .- Electrical prospecting with the telluric current method. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 1965, vol. LX, n° 1.
- BERTRAND Y. 1967 .- La prospection électrique appliquée aux problèmes des Ponts-et-Chaussées. *Bull. Liaison Laboratoires routiers*, juillet 1967.
- BOYER D., PHAM VAN NGOC 1971 .- Structure hétérogène en magnétotellurique. Cas d'une faille verticale. Colloque Géoph. minière, Orléans, 1971.
- BRISTOW C. 1966 .- A new graphical resistivity technique for detecting air filled cavities. *Studies in Speleology*, 1966, vol. I, part. 4, p. 204-226.
- CAGNIARD L. 1953 .- Principe de la méthode magnétotellurique, nouvelle méthode de prospection géophysique. *Ann. géophys.*, 1953, n° 9, p. 95-125.
- CARNEZ J.-L., DUPIS A. 1976 .- Applications d'une méthode magnétotellurique à la reconnaissance des sites. *Bull. Liaison P. et C.*, mai-juin 1976, n° 84.

- CAUTERMAN M. 1971 .- Etude théorique et expérimentale de l'influence d'une inclusion sphérique sur la distribution du courant dans un milieu conducteur homogène. Applications à des méthodes de prospection géophysique . Thèse 3ème cycle, Faculté des Sciences de Lille, sept. 1971.
- CREEDY D.-P., FREEMAN J. 1974 .- Some preliminary observations relating to the use of earth resistivity measurements for cave detection. *Trans. British Cave Research Association*, déc. 1974, vol. I, n° 4, p. 215-222.
- DILMAN E. 1968 .- Recherche des galeries souterraines par la méthode des résistivités. *Bull. Liaison P. et C.*, mars-avril 1969, n° 37, p. 18-21.
- DUBUS J.-P. 1974 .- Théorie et mise en application d'une méthode de sondage électro-magnétique utilisable en prospection géophysique à faible profondeur. Thèse Doctorat d'Etat, Faculté des Sciences de Lille, mai 1974.
- DUPIS A. 1970 .- Premières applications de la magnétotellurique à la prospection pétrolière, géologique ou minière de diverses régions métropolitaines. Thèse Doctorat d'Etat, Faculté des Sciences de Paris, mai 1970.
- (DUROUX J. 1967) .- Caractères de l'onde électromagnétique de surface engendrée par un dipôle magnétique. Application à l'investigation en profondeur de la résistivité électrique du sous-sol. *Geophysical prospecting*, vol. XV, n° 4, 1967, p. 564-583.
- DUROUX J. 1971 .- Note sur l'essai de détection pour sondage Mélos du conduit karstique de la source du Lez. Juin 1971, B.R.G.M..
- ERCEVILLE I. D', KUNETZ G. 1962 .- The effect of a fault on the earth's natural electromagnetic field. *Geophysics*, 1962, n° 27, p. 651-665.
- ESTEVE J.-P. 1972 .- Résultats d'une prospection électrique et magnétotellurique. D. E. A. de Géophysique appliquée, Faculté des Sciences de Paris, juillet 1972.
- GABILLARD R. 1969 .- Vibrations et phénomènes de propagation. Dunod, 1969.
- GABILLARD R., DUBUS J.-P., CAUTERMAN M. 1971 .- Campagne de détection de carrières souterraines dans la région lilloise par une méthode de prospection électrique. *Bull. Liaison P. et C.*, août-sept. 1971, n° 54, p. 101-108.

- GOELEN E. 1973 .- Expériences et essais réalisés sur le tracé d'autoroutes dans des zones où la présence de cavités souterraines était suspectée, plus particulièrement en vue de la recherche de ces cavités. Symp. Hanovre, sept. 1973, 6 p.
- HERRISSON C. 1975 .- Méthode magnétotellurique dans la reconnaissance du socle cristallin sans recouvrement sédimentaire : quatre exemples dans le Massif Central. Thèse 3ème cycle, Faculté des Sciences d'Orléans, juin 1975.
- HOANG NGOC THACH M. 1973 .- Etudes théorique et expérimentale de structures hétérogènes pour la méthode magnétotellurique de prospection géophysique. Thèse Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de Paris VI, juillet 1973.
- (JOLIVET A. 1969) .- Etude d'un équipement léger pour la prospection M.T. de subsurface. Thèse Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de Paris, 1969.
- KELLER G.-V., FRISCHKNECHT F.-C. 1966-1970 .- Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press, Oxford.
- LEPLAT J. 1973 .- Les cavités souterraines de la craie dans le Nord de la France. *Bull. Liaison P. et C.*, janv.-févr. 1973, n° 63.
- MOUZA J. DU 1975 .- Les cavités souterraines de la région parisienne - Classification - Conditions d'existence - Méthodes de détection. Thèse de 3ème cycle, Faculté des Sciences de Paris VI, déc. 1975.
- NEUMANN R. 1973 .- Prospection gravimétrique appliquée à la localisation des cavités souterraines. Symp. Hanovre, sept. 1973, 12 p.
- PALMER L.-S. 1954 .- Location of subterranean cavities by geolotrical methods. *Mining Mag.*, vol. 91, p. 137-141.
- (PROUST J.-N. 1972) .- Les carrières. *Travaux*, n° 444, mars 1972, p. 31-36.
- SAMBUCY M. DE, LONGERE M., FOSSEY M. 1973 .- Essai d'une nouvelle méthode géophysique - Procédé Mélos. *Bull. Liaison P. et C.*, juillet-août 1973, n° 66.
- STEFANESCO S. 1932 .- Etudes théoriques sur la prospection électrique du sous-sol. Vol. II, Bucaresti, 1932.
- TABBAGH A. 1971 .- Méthodes de prospection électromagnétique applicables aux problèmes archéologiques. Thèse 3ème cycle, Faculté des Sciences de Paris VI, 1971, *Archaeo Physica*, n° 5, 1973.
- TAGG G.-F. 1964 .- Earth resistances. Georg Newnes, London, p. 52-55.

Les auteurs placés entre parenthèses n'ont pas été consultés. Ils servent de référence au lecteur éventuellement intéressé.



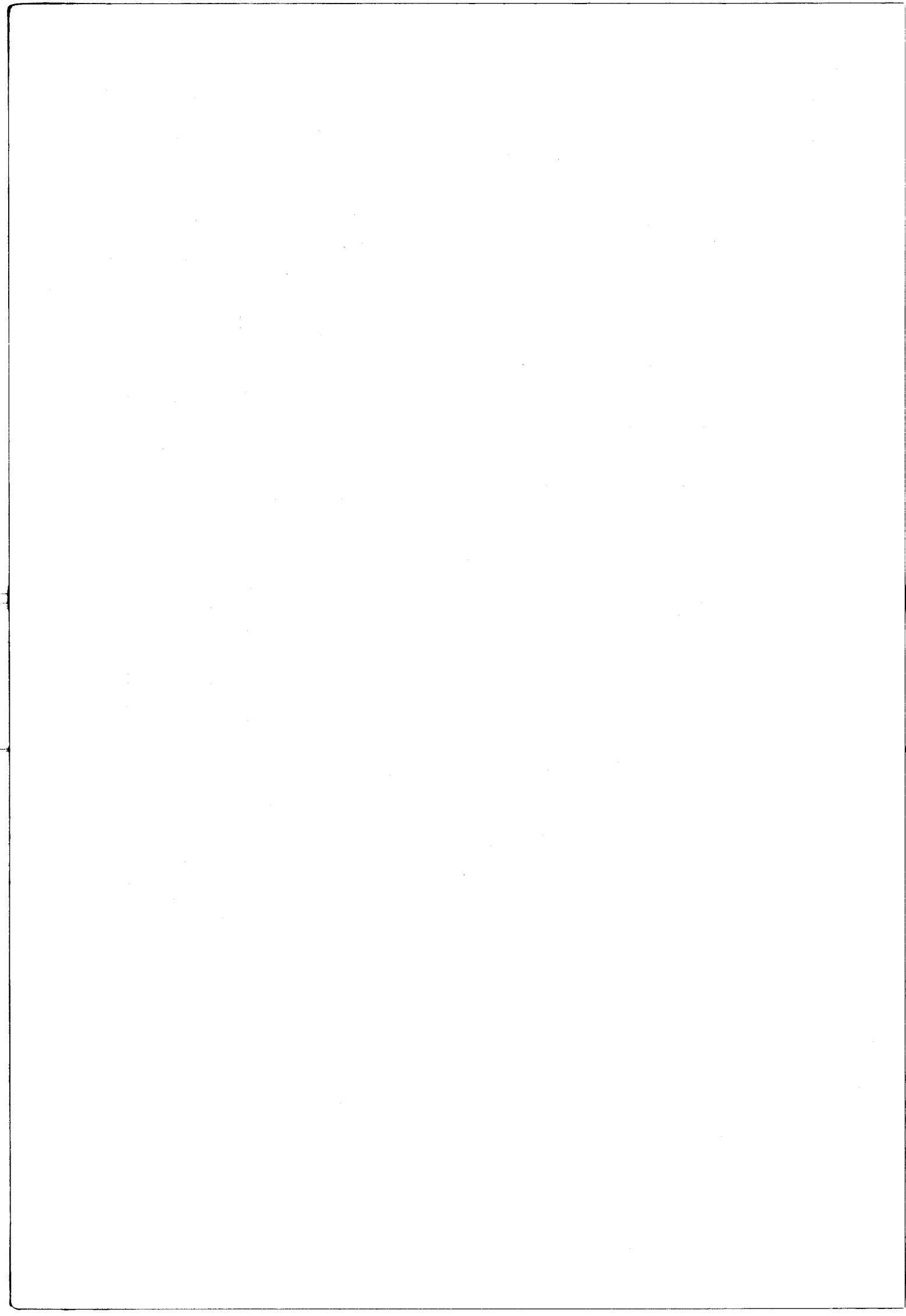
## LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1 : Incidence d'une onde à la surface du sol. ....	8
2 : Abaque des profondeurs de pénétration. ....	13
3 : Appareil en station. ....	16
a - vue d'ensemble.	
b - détail du traîneau avec capteurs magnétiques, chaînes de traitement du signal tellurique et magnétique, enregistreur autonome.	
4 : Schéma synoptique de l'appareillage. ....	18
4 bis : Schéma équivalent au système d'électrodes capacitives. ..	19
5 : Contrôle de la qualité du signal après filtrage. ....	27
6 : Risques de saturation : réponse des chaînes électroniques en fonction de la tension d'entrée en cage de Faraday. ....	30
7 : Réponse des filtres à un signal de fréquence variable. ....	35
8 : Risques de saturation : réponse des chaînes électroniques magnétiques en fonction de la tension d'injection en boucle d'Helmholtz. ....	37
9 : Schéma de la méthode dite de comparaison. ....	41
9 bis : Schéma équivalent au capteur tellurique. ....	41
10 : Courbe $Z = f\left(\frac{1}{N}\right)$ - Variation de l'impédance d'une électrode capacitive en fonction de la fréquence sur un terrain de 1 000 $\Omega$ m. ....	42
11 : Variation du paramètre $V_s/d$ en fonction de la longueur de la ligne tellurique. ....	46
12 : Influence de la rotation de l'appareillage sur la détection. ....	48
a - $E_x, H_y, H_y/E_x$ .	
b - $E_y$ .	
13 : Schéma comparatif des deux capteurs telluriques. ....	49
14 : Enregistrement en continu (station fixe) du champ magnétique à 15,1 KHz (C.R.G.). ....	51
15 : "FORET DE BELLARY" : Coupe stratigraphique. ....	58
16 : Carte d'implantation des sites. ....	59
17 : "BELLARY" : Sondage électrique. ....	60
18 : "BIDON" (Ardèche) : Coupe géologique. ....	65
19 : "BIDON" : Courbe de l'évolution de la conductance en fonction de la racine carrée de la fréquence. ....	68
20 : "LA TOUR VAUBAN" : Coupe stratigraphique du site. ....	69
21 : "LA TOUR VAUBAN" : Azimuts utiles sur le site. ....	71

	Pages
Figure 22 : Anomalies théoriques dues à une faille verticale. ....	73
23 : "LA TOUR VAUBAN" : Enregistrements et mesures ponctuelles du rapport $H_y/E_x$ aux deux fréquences. ....	74
24 : "LA TOUR VAUBAN" : Evolution de la composante $H_y$ en fonction de la distance. ....	75
25 : "LA TOUR VAUBAN" : Evolution de la composante $E_x$ en fonction de la distance - Comparaison des paramètres $E_x$ et $E_y$ . ....	76
26 : "LE BOIS CLAIR" : Carte de situation et d'implantation des profils. ....	79
27 : "LE BOIS CLAIR" : Evolution de la résistivité le long des profils 1, 3 et 4. ....	81
28 : "LE BOIS CLAIR" : Evolution de la résistivité le long du profil 5. Position supposée des failles. ....	82
29 : "LE MORVAN" : Profil pédologique supposé et interprété d'après les traînés M.T.A. et électriques. ....	87
30 : Evolution latérale de la profondeur de pénétration d'une onde. Comparaison avec le traîné électrique. ....	90
31 : "LE MORVAN" : Sondage M.T.M. au point 110. ....	92
32 : "LE MORVAN" : Courbe de résistivités apparentes ponctuelles. ....	94
33 : "LE MORVAN" : Courbe $H/E = f(h)$ à 15,1 KHz. ....	99
34 : "GIMOUILLE". ....	108
a - coupe géologique.	
b - orientations.	
c - dimensions.	
35 : "GIMOUILLE" : Profil A ( $H_y/E_x$ ). ....	109
a - mesures ponctuelles ( $H_y/E_x$ ).	
b - enregistrements continus.	
c - mesures ponctuelles $E_x$ et $E_y$ .	
36 : "GIMOUILLE" : Profil B ( $H_y/E_x$ ). ....	110
a - mesures ponctuelles.	
b - enregistrements continus.	
37 : "GIMOUILLE" : Traîné électrique. ....	111
38 : "GIMOUILLE" : Tracé schématique des équipotentiels et des filets de courant dans un sol homogène. ....	113
a - dispositif électrique.	
b - nappe électromagnétique.	
39 : "GIMOUILLE" : Profil A ( $E_y$ ) ....	115
a - mesures ponctuelles à 15,1 KHz.	
b - enregistrements continus aux deux fréquences.	



	Pages
Figure 40 : "GIMOUILLE" : Profil $R(E_y)$ : mesures ponctuelles aux deux fréquences. ....	116
41 : Tapis de 1 m : Problème de la composante mesurée du champ électrique. ....	117
42 : "CAVEAU CRG" :	
a - structures parasites (163,84 KHz). ....	121
b - mesures au SGD. ....	123
43 : "CAVEAU CRG" :	
a - carte d'is anomalies de H/E à 15,1 KHz. ....	124
b - carte d'is anomalies de H/E à 163,84 KHz. ....	125
c - carte d'is anomalies de $E_x$ à 163,84 KHz. ....	126
44 : "CAVEAU CRG" . ....	127
a - évolution de $H_y$ et $E_x$ à 163,84 KHz en fonction de la distance.	
b - comparaison entre courbes théorique et expérimentale.	
45 : Inclusion sphérique dans un milieu homogène. Paramètres de BERDICHEVSKY. ....	130
46 : "CATICHES" : Assimilation d'une catiche à une sphère. ....	131
47 : "CATICHES" : Schéma général d'une carrière avec catiches. ..	133
48 : "CATICHES" : Exemples de détection d'une catiche. ....	135
49 : "CATICHES". ....	140
a - carte de résistivité.	
b - évolution de $\rho_a$ le long du profil D.	
50 : "CATICHES" : Comparaison entre la courbe expérimentale et la courbe théorique. ....	142
51 : "CATICHES" : Etude de l'ampleur du déplacement de l'anomalie lors d'un trainé. ....	144
52 : Influence d'une ligne à haute tension. ....	146
53 : "CATICHES" : Plan de situation. ....	148
54 : "CATICHES" : Influence d'un grillage sur le rapport H/E. ...	151



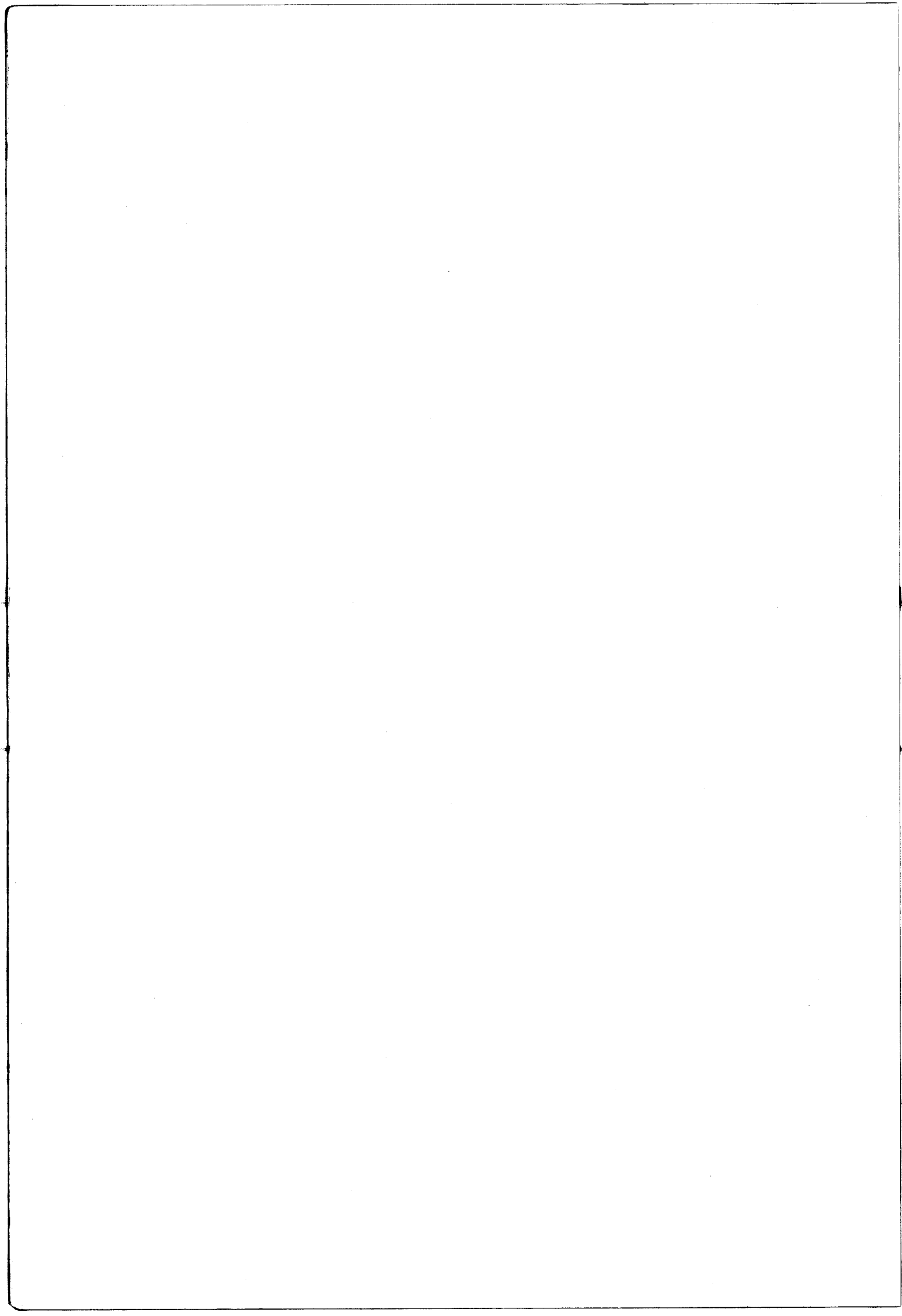
## L I S T E D E S T A B L E A U X

	Pages
Tableau 1 : Etalonnage des gains fixes C. ....	32
2 : Détail d'un calcul des gains commutables. ....	33
3 : Valeur réelle des gains commutables. ....	34
4 : Calcul des sensibilités des capteurs. ....	38
5 : Formulations utilisées pour le calcul de $\rho$ . ....	40
6 : Evolution de la tension de détection en fonction de la longueur de la ligne tellurique. ....	45
7 : Correction à apporter sur E. ....	47
8 : Calcul de la conductance en fonction de la fréquence. ....	67
9 : Calcul des résistivités apparentes à partir des données ponctuelles en M.T.A.. ....	95-96
10 : Correspondance entre H/E et l'épaisseur de l'arène. ..	100
11 : Variations théoriques de E au-dessus d'un cylindre. ..	119
12 : Calculs de $\rho_a$ au-dessus de la catiche expérimentale. .	137 à 139

17

82

A N N E X E (Programmes)



## PROGRAMME CYLINDRE

Il est destiné à calculer l'anomalie théorique due à une structure cylindrique horizontale infiniment allongée. La formule utilisée est celle de Berdichevsky.

L'anomalie est calculée au pas de 0,50 m de 0 à 5 m, puis au pas de 1 m jusqu'à 30 m de l'axe du cylindre.

Les résultats sortent sous la forme d'un tableau où sont regroupés les distances à la cavité, l'anomalie théorique de E en pourcentage et l'anomalie théorique de  $\rho$ , considérée comme étant égale au carré de E (H étant pratiquement constant).

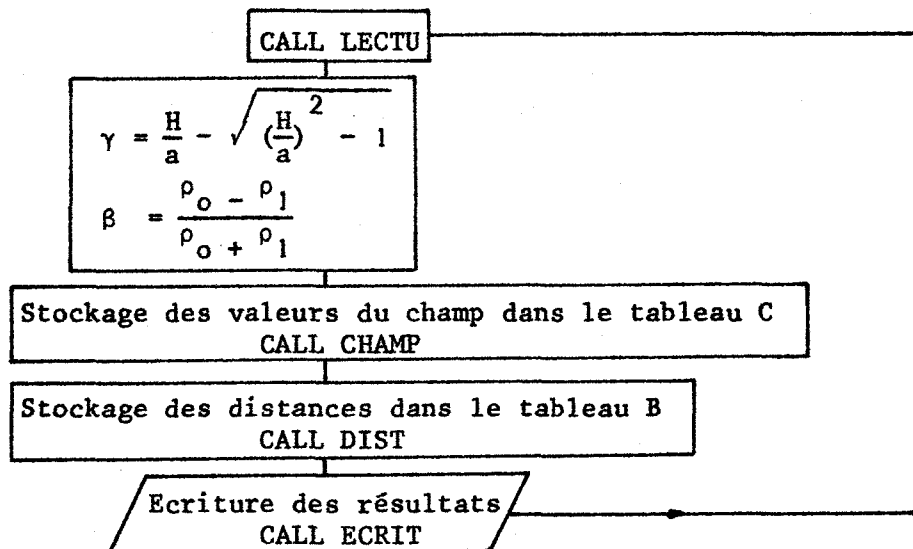
Toutes les données sont fournies par une seule carte ; elles sont introduites de la manière suivante :

- colonne 1 à 5 : rayon de la structure avec deux chiffres après la virgule (colonne 3).
- colonne 6 à 10 : profondeur du centre de la structure avec deux chiffres après la virgule (colonne 8).
- colonne 11 à 19: résistivité de la structure avec un chiffre après la virgule (colonne 18).
- colonne 20 à 28: résistivité du milieu encaissant avec un chiffre après la virgule (colonne 27).

Chaque carte comporte sa série de données ; le programme traite autant de cas qu'il y a de cartes de données.

début

Déclaration des tableaux C(36), B(36), RESI(36)



END

SUBROUTINE LECTU

Lecture du rayon A, de la profondeur H du centre de la cavité,  
des résistivités

STOP

RETURN

SUBROUTINE CHAMP

Tableaux en commun avec le PP

Boucle des données de 1 à 36

$$C(L) = \text{sspog } E_x$$

$$\text{RESI}(L) = \frac{C(L)}{100}$$

RETURN

FUNCTION  $E_x$ Evaluation de la formule de  
BERDICHEVSKY sur 20 itérations

RETURN

SUBROUTINE DIST

Tableaux en commun avec le PP

Stockage des distances dans le tableau B

RETURN





## SUBROUTINE ECRIT

Tableaux en commun avec le PP

Ecriture du rayon A, de la profondeur H,  
des résistivités  $\rho_0$  et  $\rho_1$

Ecriture des distances à la cavité (tableau B)  
Ecriture du rapport des champs (tableau C)  
Ecriture des variations de  $\rho$  (tableau RESI)

RETURN



```

1. C
2. C
3. C EVOLUTION DE LA COMPOSANTE TELLURIQUE AU DESSUS D'UNE CAVITE
4. C DE FORME CYLINDRIQUE DONT L'AXE EST PERPENDICULAIRE
5. C A LA DIRECTION DE PROPAGATION DU CHAMP
6. C
7. C
8. C COMMON C(36),B(36),RESI(36)
9. C LEC=105
10. C IMP=109
11. C
12. C LECTURE DES RESISTIVITES
13. C
14. C CALL LECTU(LFC,R0,RI,A,H)
15. C AMH=A/H
16. C BETA=(R0-R1)/(R0+R1)
17. C AH=(A/H)**2
18. C GAM=1/A-SQRT((4/A)**2-1)
19. C
20. C STOCKAGE DES VALEURS DU CHAMP DANS LE TABLEAU C
21. C
22. C CALL CHAMP(GAM,H,AH,BETA)
23. C
24. C STOCKAGE DES DISTANCES DANS LE TABLEAU B
25. C
26. C CALL DIST
27. C
28. C ECRITURE DES TABLEUX DE VALEURS CALCULEES DU CHAMP,
29. C PAR LE SSPROG ECRIT
30. C
31. C CALL ECRIT(A,H,R0,RI, IMP)
32. C GO TO 1
33. C END

```

```

1. SUBROUTINE LECTU(LFC,R0,RI,A,H)
2. READ(LFC,10,END=9) A,H,R0,RI
3. 10 FORMAT(2F9.2,2F9.1)
4. RETURN
5. C STOP
6. C END

```

```

1. SUBROUTINE CHAMP(GAM,H,AH,BETA)
2. COMMON C(36),B(36),RESI(36)
3. DO I L=1,36
4. Y=L-6.
5. IF(K.F7.1.AND.N.F0.11) X=(L-1)/2.
6. C(L)=FX(GAM,X,H,AH,BETA)
7. RESI(L)=C(L)**2/100
8. 1 CONTINUE
9. RETURN
10. C END

```

```

1. FUNCTION EX(GAM,X,H,AH, BETA)
2. REAL NUM
3. F=7.
4. DO 3 H=1,20
5. MM=2*H
6. Z=((1-GAM**MM)**2*X**2)/((1+GAM**MM)**2*H**2)
7. NUM=(1-AH)*(1-AH-R)
8. DEN=(1-AH*R)**2
9. RAP=(NUM/DEN*GAM**MM)/((1+GAM**MM)**2)*BETA**M
10. 3 F=B*RAP+E
11. IF(1+F)10,12,12
12. 12 FX=100*SQRT(1+E)
13. RETURN
14. 10 FX=(-100)*SQRT(ABS(1+E))
15. RETURN
16. C END

```

```

1. SUBROUTINE DIST
2. COMMON C(36),B(36),RESI(36)
3. DO I L=1,36
4. B(L)=L-6
5. IF(L.LT.12) B(L)=(L-1)/2.
6. 1 CONTINUE
7. RETURN
8. C END

```

```

1. SUBROUTINE ECRIT(A,H,R0,RI, IMP)
2. COMMON C(36),B(36),RESI(36)
3. WRITE(IMP,30) A,H,R0,RI
4. 30 FORMAT(14I/3X,6I(' '),3X,'*',59X,'*/3X,'* RAYON DE LA CAVITE',
5. *23X,F4.1,' METRES',6X,'*/3X,'*',59X,'*/3X,'* PROFONDEUR DU CENTR
6. * F DE LA CAVITE',
7. * 8X,F4.1,' METRES',6X,'*/3X,'*',59X,'*/3X,
8. *',59X,'*/3X,'* RESISTIVITE DE LA CAVITE',12X,F9.1,' OHMS-METRES */3X,
9. *',59X,'*/3X,'* RESISTIVITE DU TERRAIN',16X,F7.1,' OHMS-METRES *
10. *',3X,'*',59X,'*/3X,6I(' ')////)
11. DO 25 K=1,36,9
12. H=K+H
13. 25 WRITE(IMP,40)(B(L),L=K,N),(C(L),L=K,N),(RESI(L),L=K,N)
14. 40 FORMAT(8I(' '))' DISTANCE A LA CAVITE',5X,9F7.2//
15. *' RAPPORT DES CHAMPS',7X,9F7.0/
16. *' VARIATION DE R0',10X,9F7.0)
17. RETURN
18. C END

```

## PROGRAMME SPHERE

Il est destiné à calculer l'anomalie théorique due à une structure sphérique enfouie dans le sol. La formule utilisée qui ne dépend que des paramètres de la structure est celle de Berdichevsky.

L'anomalie est calculée sur le profil passant par l'axe de la structure, et sur ceux situés à 0,50 m, 1 m, 1,50 m et 2 m de l'axe. Sur chaque profil, les stations sont espacées de 0,25 m de 0 à 2 m et de 0,50 m de 2 à 10,5 m.

Les résultats sortent sous la forme d'un tableau par profil, avec les données en rappel.

Chaque tableau comprend les distances à la sphère, les variations théoriques de E en pourcentage et celles de  $\rho$ .

Toutes les données sont fournies par une seule carte, exactement semblable à celle utilisée dans le programme cylindre.

Notons que les résistivités sont ici données pour mémoire et non pour le calcul.

Chaque carte comporte sa série de données ; le programme traite autant de cas qu'il y a de cartes de données.

début

Déclaration des tableaux E(26), F(26), G(26)

CALL LECTU

Ecriture du rayon  $a$ , de la profondeur  $h$   
et des résistivités de l'encaissant et de la cavité

Boucle des profils :  $y = 0,50$  m de 0 à 2 m

CALL DIST

Ecriture des distances à la sphère  
Ecriture des variations de  $E$   
Ecriture des variations de  $\rho$

END

S.P.1

SUBROUTINE LECTU

Lecture du rayon  $a$ , de la profondeur  $h$   
et des résistivités

STOP

RETURN

S.P.2

SUBROUTINE DIST

Tableaux en commun avec le programme principal

Boucle des stations :  $x = 0,25$  m de 0 à 2 m  
 $x = 0,50$  m de 2 à 10,5 m

Evaluation de la formule de BERDICHEVSKY

Stockage dans le tableau F de la valeur de  $E_q$   
Stockage dans le tableau F de  $\rho = E_q^2$  en %  
Stockage dans le tableau E de la distance  $x$

RETURN



```

1. C
2. C
3. C
4. C
5. C
6. C
7. C
8. C
9. C
10. C
11. C
12. C
13. C
14. C
15. C
16. C
17. C
18. C
19. C
20. C
21. C
22. C
23. C
24. C
25. C
26. C
27. C
28. C
29. C
30. C
31. C
32. 40
33. C
34. C
35. C
36. C
37. C
38. C
39. C
40. C
41. C
42. C
43. C
44. C
45. C
46. C
47. C
48. C
49. C
50. C
51. C
52. C
53. C
54. C
55. C
56. 1
57. C
58. 2
59. C
60. 3
61. C
62. 4
63. C
64. 5
65. C
66. 51
67. 52
68. 53
69. 54
70. 55
71. C
72. C
73. C
74. 6
75. C
76. C
77. 60
78. C
79. 11
80. 100
81. C
82. C

1. C
2. C
3. 10
4. C
5. 8
6. C

1. C
2. C
3. C
4. C
5. C
6. C
7. C
8. C
9. C
10. C
11. C
12. C
13. C
14. C
15. 2
16. 3
17. C
18. 1
19. C
20. C

```

EVOLUTION DU CHAMP TELLURIQUE AU DESSUS D UNE CAVITE DE FOMPE  
SPHERIQUE PARALLÈLEMENT A LA DIRECTION A L EMETTEUR (AXE DES X),  
POUR DIFFERENTS ELOIGNEMENTS (AXE DES Y) AU PROFIL CENTRAL, ET EN  
FONCTION DE LA STATION SUR LE PROFIL

SIGNIFICATION DES VARIABLES DANS LES FORMULES  
Y EST L ABSCISSE DE LA STATION SUR LE PROFIL  
Y EST L ELOIGNEMENT DU PROFIL ETUDIE AU PROFIL CENTRAL  
A EST LE RAYON DE LA SPHERE  
H EST LA PROFONDEUR DU CENTRE DE LA SPHERE

COMMON E(26),F(26),G(26)  
IMP=109  
IEC=105

INTRODUCTION DES RESISTIVITES

INTRODUCTION DU RAYON DE LA SPHERE

INTRODUCTION DE LA PROFONDEUR DU CENTRE DE LA SPHERE

CALL LECTU(LEC,RO,RI,A,H)

ECRITURE DES PARAMETRES INTRODUITS

WRITE(IMP,40) A,H,RO,RI  
FORMAT(1H1/3X,61(' ')/3X,'\*',59X,'\*/3X,'\* RAYON DE LA CAVITE',  
\*23X,F4,2,' METRES',6X,'\*/3X,'\*',59X,'\*/3X,'\* PROFONDEUR DU CENTRE  
\*F DE LA CAVITE',  
\* 8X,F4,2,' METRES',6X,'\*/3X,'\*',59X,'\*/3X,  
\* RESISTIVITE DE LA CAVITE',12X,F9,0,' OHMS-METRES \*/3X,  
\* \*,40X,'\*/3X,'\* RESISTIVITE DU TERRAIN',16X,F7,0,' OHMS-METRES \*  
\*/3X,'\*',59X,'\*/3X,61(' ')/3X//)

BOUCLE DES PROFILS, DU RAPPORT DES CHAMPS ET DU RAPPORT DES RESISTIVITES

DO 100 K=2,6  
ENTR 0METRE ET 2METRES, LES MESURES SONT EQUIDISTANTES DE 0.25METRE  
V=FLOAT(K)/2-1  
I=1  
M=0  
N=8  
CALL DIST(L,M,N,H,Y,A)  
ENTR 2 METRES ET 10.50 METRES, LES MESURES SONT EQUIDISTANTES DE 0.50 M  
I=2  
M=10

N=42  
CALL DIST(L,M,N,H,Y,A)  
KK=K-1  
GO TO (1,2,3,4,5) KK  
WRITE(IMP,51)  
GO TO 6  
WRITE(IMP,52)  
GO TO 6  
WRITE(IMP,53)  
GO TO 6  
WRITE(IMP,54)  
GO TO 6  
WRITE(IMP,55)  
GO TO 6  
FORMAT( //15X,'PROFIL AXIAL'//)  
FORMAT( //15X,'PROFIL A 0.5 M DU PROFIL AXIAL'//)  
FORMAT(1H1 //15X,'PROFIL A 1 M DU PROFIL AXIAL'//)  
FORMAT( //15X,'PROFIL A 1.5 M DU PROFIL AXIAL'//)  
FORMAT( //15X,'PROFIL A 2 M DU PROFIL AXIAL'//)

ECRITURE DES VARIATIONS DE E EN X

DO 11 I=1,26,13  
I=I+12  
WRITE(IMP,60):(F(I),L=1,J),(E(L),L=1,J),(G(L),L=1,J)  
FORMAT(104,'\*/' DISTANCE A LA SPHERE',5X,13F6.2//  
\* VARIATIONS DE F',10X,13F6.0/' VARIATIONS DE RO',9X,13F6.0)

CONTINUE  
CONTINUE  
GO TO 7  
END

SUBROUTINE LECTU(LFC,RO,RI,A,H)  
READ(IEC,10,END=8) A,H,RO,RI  
FORMAT(2F5.2,2F9.1)  
RETURN  
STOP  
END

SUBROUTINE DIST(L,M,N,H,Y,A)  
COMMON E(26),F(26),G(26)  
DO 1 I=M,N,L  
X=FLOAT(I)/4  
H2=H\*\*2  
Y2=Y\*\*2  
T=SQRT(X\*\*2+Y2)  
R=SQRT(T\*\*2+H2)  
A3=A\*\*3  
AR=A\*(R\*\*3)  
FQ=100\*SQRT((1+AR)\*(1+AR-(3\*AR\*T\*\*2/(R\*\*2))))  
IF(I.GT.8) GO TO 2  
I=I+1  
GO TO 3  
I=(I-M)/2+H  
F(J)=X  
F(J)=FQ  
R(J)=(EQ/100)\*\*2\*100  
RETURN  
END

## PROGRAMME PARAMETRES

Ce programme est destiné à rechercher, à partir de données expérimentales fournies à l'ordinateur, des paramètres tels que l'anomalie théorique provoquée par une structure ayant ces paramètres soit identique à l'anomalie mesurée.

Les valeurs expérimentales pouvant être entachées d'erreur, on leur affecte un pourcentage d'erreur minimum  $L$  ; chaque valeur théorique doit donc être égale à la valeur mesurée à  $\pm L\%$ .

Le calcul théorique se fait pour un rayon et une profondeur donnés. Si la comparaison à 1 % près n'est pas bonne, le calcul est refait pour une autre profondeur. Si ces comparaisons sont mauvaises quelle que soit la profondeur  $H$  envisagée, on change de rayon  $A$  et on fait varier de nouveau  $H$ . Si les comparaisons sont mauvaises pour toutes les valeurs de  $A$  et de  $H$ , on augmente le pourcentage  $L$  à 2 % et on recommence le cycle des variations de  $H$  puis de  $A$ . Si aucun des cas envisagés n'a conduit à une comparaison correcte avec moins de 15 % d'erreur, le calcul théorique n'est plus évalué sur le profil axial mais à 0,5 m de ce profil et le cycle des calculs reprend au départ.

Lorsque la comparaison est jugée satisfaisante, on sort les différents paramètres qui ont conduit à cette conclusion.

On aura ainsi :

- le libellé du jeu de données ;
- le numéro du jeu de données ;
- le rappel des valeurs expérimentales introduites ;
- le tableau des distances à la catiche ;
- le tableau des variations des valeurs expérimentales par rapport à la station de base  $E_0$  (dont la valeur est elle aussi rappelée) ;
- la distance au profil axial ;
- le tableau des valeurs théoriques calculées ;
- le pourcentage d'erreur minimum nécessaire à la comparaison ;
- le rayon de la sphère, ces trois derniers paramètres ainsi que la distance au profil axial ayant servi au calcul des valeurs théoriques.

INTRODUCTION DES DONNEES

Les valeurs expérimentales du rapport H/E sont mesurées tous les 0,50 m à partir du centre de l'anomalie. On en introduit autant que l'on veut, à raison d'une mesure par carte. Le format est F6.3, c'est-à-dire que la valeur est comprise entre la 1ère et la 6ème colonne, la virgule se situant à la 3ème colonne; la dernière donnée est la valeur  $E_0$ , station de base prise loin de l'anomalie. Chaque jeu de données est terminé par une carte vierge. La première carte du jeu n'est pas comptée.

DISCUSSION SUR L'UTILISATION DU PROGRAMME

Suivant le jeu de données, on a de bons résultats (un exemple en est donné) ou de très mauvais résultats. Ce dernier cas est malheureusement fréquent et la correspondance entre les valeurs théoriques et les mesures expérimentales n'est souvent qu'à 10 % près, ce qui est trop.

Ceci vient du fait de la difficulté d'une interprétation ponctuelle précise d'un enregistrement continu. En effet, il est mal commode de positionner avec précision sur un enregistrement des stations ponctuelles de mesures espacées de 0,50 m à partir du centre de l'anomalie. Pour cela, il faudrait que la vitesse de progression soit rigoureusement constante, ce qui ne peut être le cas sur de longs profils lorsque l'opérateur est à pied.

Les mesures ponctuelles du rapport H/E sont en fait relatives à des stations dont on ignore exactement la position. De là découlent des incertitudes qui sont importantes.

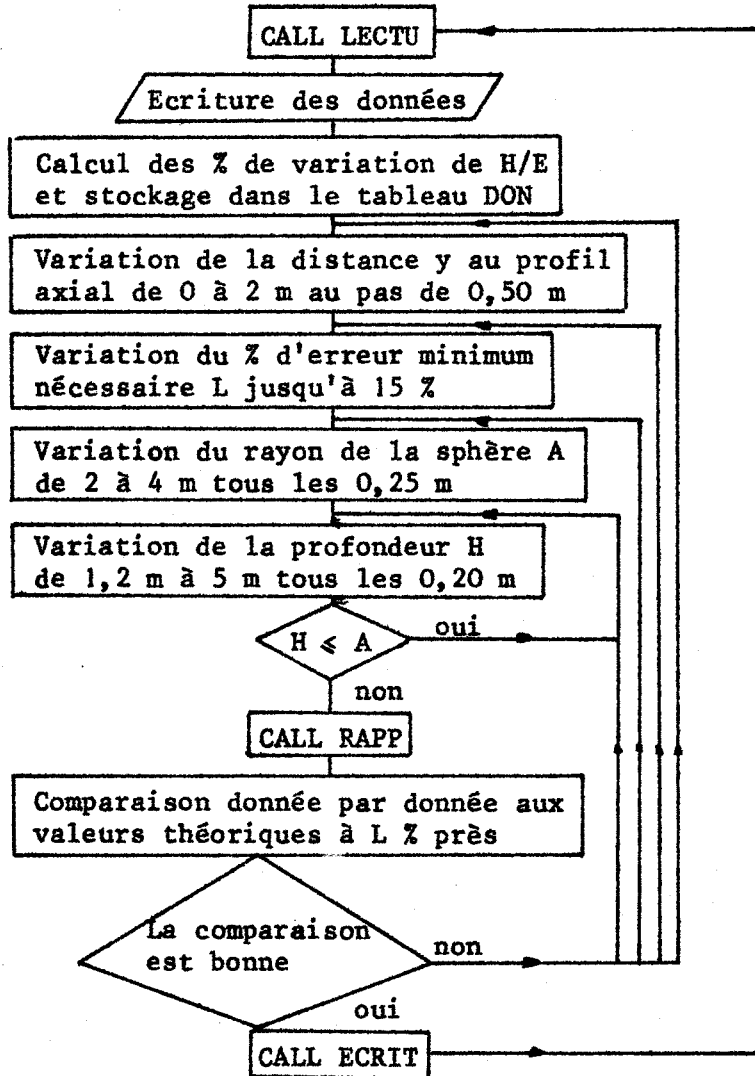
Pour résoudre ce problème, et permettre une réelle utilisation du programme, il faudrait que les mesures soient effectuées ponctuellement, ou que la vitesse de progression soit lente mais surtout régulière (ce qui nécessite de courts traînés) ou qu'un système de repérage élaboré puisse être mis en place.

Il semble donc que cette difficulté ait sa solution.



début

Déclaration des tableaux de données (DON)  
 Déclaration des tableaux de valeurs théoriques (E)  
 Déclaration des tableaux de distances (DIST)



## SUBROUTINE LECTU

Tableaux en commun avec le PP

Lecture de l'intitulé du jeu de données  
et lecture des donnéesSTOP si plus  
de donnéesComptage des données ; la station de  
base E est la dernière donnée

RETURN

## SUBROUTINE RAPP

Tableaux en commun avec le PP

Boucle des distances x  
jusqu'à la fin des donnéesEvaluation de la formule de  
BERDICHEVSKY pour une sphèreStockage de E dans le tableau E  
Stockage de  $x^q$  dans le tableau DIST

RETURN

## SUBROUTINE ECRIT

Tableaux en commun avec le PP

Ecriture du tableau des distances, de la station  
de base E, du tableau des variations expérimen-  
tales de  $\hat{H}/E$ , du tableau des variations théoriques,  
du % d'erreur minimum nécessaire, du rayon et de  
la profondeur calculés

RETURN

CATICHÉ 163,84 KHZ 0 2.5

JEU DE DONNÉES NO 1

\*\*\*\*\*  
\* TABLEAU DES VALEURS EXPERIMENTALES DE H/E \*  
\*\*\*\*\*

.625	.630	.640	.655	.670	.680	.720	.760	.798	.800	.820
.0	.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

\*\*\*\*\*  
\* ELOIGNEMENT A LA CATICHÉ EN M \*  
\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
\* TABLEAU DES VARIATIONS DE H/E PAR RAPPORT \*  
\* A LA STATION DE BASE (EO = .850) \*  
\*\*\*\*\*

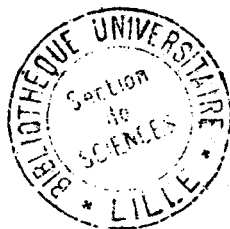
136.0	134.9	132.8	129.8	126.9	125.0	118.1	111.8	106.5	106.2	103.7
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

PROFIL AXIAL

\*\*\*\*\*  
\* TABLEAU DES MESURES THEORIQUES \*  
\*\*\*\*\*

136.4	135.6	133.1	129.5	125.2	120.6	116.3	112.5	109.2	106.6	104.6
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

\* D'ERREUR MINIMUM NECESSAIRE 4 %  
PROFONDEUR DU CENTRE DE LA SPHERE 2.8 M  
RAYON DE LA SPHERE 2.00 M



```

1. C
2. C RECHERCHE DES PARAMETRES D'UNE CATIQUE D'APRES LES MESURES EXPERIMENTALES
3. C ON INTRODUIT LES VALEURS DE H/E TOUS LES 0.50 METRES A PARTIR
4. C DE L'AXE DE LA STRUCTURE
5. C
6. C
7. COMMON DDM(16),E(15),DIST(15),IA(80)
8. DATA (FC,IMP,105,108,1,JEU,0/
9. DATA LM/15/
10. C
11. C LECTURE DES VALEURS MESUREES DU RAPPORT H/E SUR 5 METRES ET DE LA
12. C STATION OF BASE EN
13. C
14. C CALL FCTU (LEC,N,FO)
15. C
16. C ECRIRE DU TABLEAU DE DONNEES
17. C
18. IEH=JFU+1
19. NREN=1
20. WRITE(IMP,20) IA
21. FORMAT(IH1,80A1)
22. 20
23. WRITE(IMP,10) JEH,DDN(1),I(1),N(1)
24. FORMAT(///3X,'JFU DE DONNEES NO',I3,///3X,AS(' '),3X,
25. *' TABLEAU DES VALEURS EXPERIMENTALES DE H/E *'
26. *3X,AS(' ')// 15P8.1)
27. C
28. C STOCKAGE DES POURCENTAGES DE VARIATION DU RAPPORT EG/ED
29. C
30. DO 1 I=1,N1
31. DDN(I)=100*EG/DDN(I)
32. C
33. C VARIATION DE LA DISTANCE Y AU PROFIL AXIAL
34. C
35. DO 7 J=1,5
36. Y=(FLOAT(J)-1)/2
37. C
38. C RECHERCHE DU POURCENTAGE MINIMUM NECESSAIRE
39. C
40. DO 2 L=1,LM
41. AL=FLOAT(L)/100
42. AL1=AL
43. AL2=AL
44. C
45. C CALCUL DE L'ANOMALIE THEORIQUE
46. C
47. C POUR UN % D'ERREUR DONNE L'ON FAIT VARIER LES RAYONS-LE RESULTAT SORTANT
48. C SERA AINSI CALCULÉ AU PLUS JUSTE S-LE RAYON MINI EST DE 2 M-LE MAXI DE 4 M
49. C
50. C LE RAYON EST AUGMENTE DE 0.25 M A CHAQUE PASSAGE.
51. C
52. DO 3 IR=1,9
53. R=FLOAT(IR)/4+1.75
54. C
55. C
56. C
57. C
58. C
59. C
60. C
61. C COMPARAISON DONNEES-THEORIE A L & PRES
62. C
63. DO 4 K=1,N1
64. DI=DDN(K)*AL1
65. D2=DDN(K)*AL2
66. IF(DI-OT,E(K),OR,F(K),OT,C2) GO TO 6
67. 4
68. CONTINUE
69. CALL ECRTIEQ,N1,L,M,A,IMP,Y1
70. C
71. C RENVOI A L'ORDRE DE LECTURE.
72. C
73. DO TO 5
74. 6
75. CONTINUE
76. 3
77. CONTINUE
78. 2
79. CONTINUE
80. 7
81. CONTINUE
82. END

```

```

1. SUBROUTINE LECTU(LFC,N,FO)
2. COMMON DDM(16),E(15),DIST(15),IA(80)
3. READ(LEC,10) IA
4. 10
5. FORMAT(80A1)
6. DO 1 I=1,50
7. READ(FC,100,FND=6) DDN(I)
8. 100
9. FORMAT(F6.3)
10. IF(DDN(I)-EQ,0.) GO TO 2
11. 1
12. CONTINUE
13. 2
14. DDN(MIN)
15. RETURN
16. 6
17. STOP
18. END

```

```

1. SUBROUTINE RAPP(Y,M,A,VAL,RAD)
2. COMMON DDM(16),E(15),DIST(15)
3. INTEGER VAL
4. M2=M**2
5. M3=M**3
6. A3=A**3
7. C BOUCLE DES STATIONS
8. DO 1 I=1,VAL
9. W=FLOAT(I)-1/2/A
10. T=ASORT(I**2+M2)
11. R=ASORT(T**2+M2)
12. AR=AT/(R**3)
13. RAD= ((1+AR)*((1+AR)-(3+AR**2)/(R**3)))
14. IF(RAD,LT,0.) RT=RN
15. R=MIN(SORT(RAD))
16. DIST(I)=FLOAT(I)-1/2
17. 1
18. F(I)=FO
19. RETURN
20. END

```

```

1. SUBROUTINE ECRTIEQ(N1,L,M,A,IMP,Y1)
2. COMMON DDM(16),E(15),DIST(15)
3. N2=N1**2
4. N3=N1**3
5. WRITE(IMP,20) (DIST(I),I(1),N(1))
6. WRITE(IMP,30) ED,DDN(1),I(1),N(1)
7. DO 1 I=1,50
8. WRITE(IMP,51) KK
9. DO TO 6
10. 2
11. WRITE(IMP,52)
12. DO TO 6
13. 3
14. WRITE(IMP,53)
15. DO TO 6
16. 4
17. WRITE(IMP,54)
18. DO TO 6
19. 5
20. WRITE(IMP,55)
21. 6
22. WRITE(IMP,40) E(1),I(1),N(1)
23. WRITE(IMP,50) (L,M,A)
24. 20
25. FORMAT(///3X,33(' '),3X,'* ELOIGNEMENT A LA CATIQUE EN M *'
26. *3X,33(' ')// 15P8.1)
27. 30
28. FORMAT(///3X,AS(' '),3X,
29. *' TABLEAU DES VARIATIONS DE H/E PAR RAPPORT *'//3X,
30. *' A LA STATION OF RASP(ENH',F5.3,' '),12X,'*//3X,AS(' ')//
31. *// 15P8.1)
32. 40
33. FORMAT(///3X,34(' '),3X,'* TABLEAU DES MESURES THEORIQUES *'
34. *3X,34(' ')// 15P8.1)
35. 50
36. FORMAT(
37. *//3X,'% D'ERREUR MINIMUM NECESSAIRE',I10,' %'//3X,
38. *'PROFONDEUR DU CENTRE DE LA SPHERE',F10.1,' M'//
39. *'R-RAYON DE LA SPHERE',15X,F10.2,' M')
40. 51
41. FORMAT( //15X,'PROFIL AXIAL'//)
42. 52
43. FORMAT( //15X,'PROFIL A 0.5 M DU PROFIL AXIAL'//)
44. 53
45. FORMAT( //15X,'PROFIL A 1 M DU PROFIL AXIAL'//)
46. 54
47. FORMAT( //15X,'PROFIL A 1.5 M DU PROFIL AXIAL'//)
48. 55
49. RETURN
50. END

```

