



HAL
open science

Intervention des propriétés électriques des roches sur les mesures électromagnétiques : application à une méthode de localisation

Carole Silvy

► **To cite this version:**

Carole Silvy. Intervention des propriétés électriques des roches sur les mesures électromagnétiques : application à une méthode de localisation. Pétrographie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1984. Français. NNT: . tel-00756421

HAL Id: tel-00756421

<https://theses.hal.science/tel-00756421>

Submitted on 23 Nov 2012

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

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



UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

SILVY (C.)
EX. n° 1

26 OCT. 1984

THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITE

GEOLOGIE APPLIQUEE

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL (76) 87.46.43

INTERVENTION DES PROPRIETES ELECTRIQUES DES ROCHES
SUR LES MESURES ELECTROMAGNETIQUES : APPLICATION A
UNE METHODE DE LOCALISATION.

par Carole SILVY

α

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

27 AOUT 2003

Soutenue le 24 Octobre 1984, devant la Commission d'Examen

Président : R. MICHEL	Professeur U.S.M. Grenoble
Examineurs : P. ANTOINE	Professeur U.S.M. Grenoble
H. DABROWSKI	Chargé de cours U.S.M. Grenoble
J. POCACHARD	Ingénieur C.E.N./Grenoble
F. ROBACH	Ingénieur C.E.N./Grenoble

26 OCT. 1984

RESUME

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
B 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL (76) 87.48.43

Mise au point d'un dispositif expérimental de mesure des propriétés électriques (partie réelle et imaginaire) d'échantillons rocheux.

Etude d'un dispositif de mesure magnétorésistive à réception basée sur un capteur ferromagnétique à couche mince.

Description d'une méthode de localisation de cavités souterraines par prospection magnétique. En vue de l'extension de cette méthode aux régimes alternatifs, pour un meilleur pouvoir d'investigation, étude, par la modélisation et le calcul, de l'incidence de la conductivité du terrain, encaissant la cavité, sur la mesure électromagnétique. L'intervention de la géologie se traduit par une erreur de localisation. L'étude porte dans un premier temps sur le cas d'un terrain homogène, dans un deuxième temps sur le cas d'un terrain hétérogène, l'anomalie étant figurée par une sphère infiniment conductrice au sein d'un terrain plus résistant. On détermine une valeur du produit Conductivité.Fréquence qui fixe la limite entre le cas statique (théorie magnétique) et le cas alternatif (théorie électromagnétique) au travers de l'étude de la précision de la localisation dans différentes configurations de terrain et de mesure. Une étude sur le terrain vient confirmer les résultats obtenus lors du calcul et permet de définir et tester une chaîne d'appareillage adéquate à la mesure électromagnétique.

MOTS CLES

Electromagnétisme - Résistivité - Magnétorésistivité - Localisation - Dipôle - Courants de Foucault - Induction - Cavités - Spéléologie - Forage.

ERRATA

PAGES	LIRE	AU LIEU DE
16	résistance R'	résistance R
50	$p = \frac{N^+ - N^-}{N}$	$\rho = \frac{N^+ - N^-}{N}$
85	$H_\theta = \frac{\mu_0 M \sin \theta}{4\pi R^3}$	$H_\theta = \frac{\mu M \sin \theta}{4\pi R^3}$
92	$H_r = 2 \frac{M \cos \phi}{4\pi r^3} (1 + kr) e^{-kr}$	$H_r = 2 \frac{M \cos \phi}{4\pi r^3} (1 + Kr) e^{-kr}$
	$H_\theta = \frac{M \sin \phi}{4\pi r^3} (1 + kr + k^2 r^2) e^{-kr}$	$H = \frac{M \sin \phi}{4\pi r^3} (1 + Kr + K^2 r^2) e^{-kr}$
120	la profondeur de peau δ	la profondeur de peau ρ
	$R < 0.6 \delta$	$R < 0.6k\delta$
	k: constante	K: constante
127	$k_a = \sqrt{i\mu\omega}$ $k_a R \leq 1$	$k_a = i\mu\omega$ $K_a R \leq 1$
163	$B = R/\delta$ δ : profondeur de peau	$B = R/S$ S: profondeur de peau
93-127	$\delta = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{i\mu\omega}}$ $R/\delta = R \frac{\sqrt{i\mu\omega}}{\sqrt{2}}$	$\delta = \frac{2}{\sqrt{i\mu\omega}}$ $R/\delta = R \frac{\sqrt{i\mu\omega}}{2}$

inverser les pages 149 et 150 (lire la page 150 avant la page 149)

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

26 OCT. 1984

THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITE

GEOLOGIE APPLIQUEE

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE - GIGNOUX
E 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. (76) 87.46.43

INTERVENTION DES PROPRIETES ELECTRIQUES DES ROCHES
SUR LES MESURES ELECTROMAGNETIQUES : APPLICATION A
UNE METHODE DE LOCALISATION.

par Carole SILVY

2

Soutenue le 24 Octobre 1984, devant la Commission d'Examen

Président : R. MICHEL	Professeur U.S.M. Grenoble
Examineurs : P. ANTOINE	Professeur U.S.M. Grenoble
H. DABROWSKI	Chargé de cours U.S.M. Grenoble
J. POCACHARD	Ingénieur C.E.N./Grenoble
F. ROBACH	Ingénieur C.E.N./Grenoble

10073234

/ AVANT - PROPOS /

Le travail présenté ici s'est déroulé au sein du Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Informatique (CEA/GRENOBLE), Section AGIME (Applications Géophysiques et Interventions en Milieux Extrêmes).

Je remercie Monsieur SALVI et Monsieur LEMERCIER et Madame LEMERCIER de m'avoir accueillie dans leur laboratoire.

C'est grâce à Jacques POCACHARD que j'ai pu y réaliser ma thèse, je le remercie.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Francis ROBACH qui m'a encouragée et guidée tout au long de mon travail.

Monsieur MICHEL m'a honorée de sa confiance en acceptant la direction de ma thèse, je lui en suis reconnaissante.

Monsieur DABROWSKI a suivi avec intérêt mes travaux et a accepté de participer au jury, je l'en remercie.

Je remercie également Monsieur ANTOINE qui a bien voulu examiner mon travail et apporter à ce jury sa compétence.

Merci à toute l'équipe de techniciens et de chercheurs pour leur aide et leur amitié, merci à Catherine qui a tapé mon manuscrit et à Danièle pour son aide dans le "rush final".

/ S O M M A I R E /

INTRODUCTION

GENERALITES

CHAPITRE I : RESISTIVITE EN GEOPHYSIQUE

- I.1. - DEFINITIONS - RAPPELS
- I.2. - POINT DE VUE DU GEOLOGUE
- I.3. - ETUDE EXPERIMENTALE DE LA RESISTIVITE D'ECHANTILLONS ROCHEUX
- I.3.1. - Structure électrique équivalente d'une roche
 - I.3.2. - Mise au point d'un montage expérimental pour la mesure des propriétés électriques d'échantillons rocheux
 - I.3.3. - Préparation de l'échantillon
 - I.3.4. - Résultats expérimentaux
 - I.3.4.1. - Influence de la nature de la roche sur sa résistivité
 - I.3.4.2. - Influence de la teneur en eau
 - I.3.4.3. - Influence de la texture
 - I.3.4.4. - Influence de la température
 - I.3.4.5. - Influence de la pression
 - I.3.4.6. - Influence de la fréquence
- I.4. - CONCLUSION

27 AOUT 2003

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

CHAPITRE II : CHAMPS MAGNETIQUES ASSOCIES A DES COURANTS ET
AIMANTS : MAGNETORESISTIVITE

II.1. - DÉFINITIONS

II.2. - RAPPELS

II.2.1. - Induction produite par un fil rectiligne indéfini

II.2.2. - Champ magnétique associé à un fil rectiligne de longueur finie

II.2.3. - Champ magnétique produit par une spire circulaire en un point de son axe

II.2.4. - Champ magnétique créé par un solénoïde

II.2.5. - Définition du moment magnétique

II.2.6. - Dipôle ou doublet magnétique

II.2.7. - Perméabilité magnétique

II.3. - INTERET DE TOUS CES PHENOMENES POUR LE GEOPHYSICIEN :
LA MAGNETORESISTIVITE

II.4. - TECHNIQUES DE MESURE

II.4.1. - Les magnétomètres directs à couche mince de Fer-Nickel

II.4.1.1. - Principe de fonctionnement

II.4.1.2. - Performances

II.4.2. - Les magnétomètres à Résonance Magnétique Nucléaire (R.M.N.)

II.4.2.1. - Rappels sur la résonance nucléaire

II.4.2.2. - Performances

II.5. - ETUDE EXPERIMENTALE DES EFFETS ASSOCIES A LA
CIRCULATION D'UN COURANT

II.5.1. - Appareillage

II.5.1.1. - Emission

II.5.1.2. - Réception

II.5.2. - Configuration de la manipulation "Montbonnot"

II.5.3. - Rotation du capteur dans le plan horizontal

II.5.4. - Elévation du capteur

II.5.5. - Rotation du capteur dans le plan vertical

II.6. - CONCLUSION

CHAPITRE III : LES METHODES ELECTROMAGNETIQUES

III.1. - PRINCIPE GÉNÉRAL

III.2. - NOTIONS DE BASE ET DEFINITIONS

III.2.1. - Les phénomènes d'induction

III.2.2. - Effet de peau

III.3. - APPAREILLAGE

III.3.1. - Les dispositifs d'émission

III.3.2. - Les dispositifs de réception

III.3.3. - Configuration du système émission/réception

III.4. - TECHNIQUES DE MESURE

III.4.1. - Mesure de phase et d'amplitude

III.4.2. - Mesure d'inclinaison

CHAPITRE IV : LES METHODES DE LOCALISATION PAR MESURE MAGNETIQUE

IV.1. - PRESENTATION D'UNE METHODE ACTUELLE DE LOCALISATION

IV.1.1. - Principe

IV.1.2. - Eléments techniques

IV.1.2.1. - Source magnétique

IV.1.2.2. - Mesure du champ magnétique

IV.1.3. - Technique de mesure

IV.1.3.1. - Dépouillement - Interprétation

IV.1.4. - Résultats

IV.1.5. - Avantages

CHAPITRE V : EXTENSION DE LA METHODE DE LOCALISATION AUX REGIMES ALTERNATIFS

V.1. - INTRODUCTION

V.2. - ETUDE DE L'ANOMALIE ELECTROMAGNETIQUE DANS UN TERRAIN HOMOGENE

V.2.1. - HYPOTHESES DE TRAVAIL

V.2.2. - OBJECTIF

V.2.3. - LE PROGRAMME "DIPMAG"

V.2.3.1. - Données

V.2.3.2. - Résultats

V.2.4. - EFFET DE L'ORIENTATION DU DIPOLE SUR L'ANOMALIE MAGNETIQUE MESUREE EN SURFACE

V.2.4.1. - Dipôle vertical

V.2.4.2. - Dipôle horizontal selon X

V.2.4.3. - Dipôle incliné

V.2.5. - Evolution de l'anomalie de champ magnétique avec la fréquence

V.2.6. - relation entre la fréquence et la précision de la localisation du dipôle dans un terrain homogène

V.2.6.1. - En fonction de l'orientation du dipôle

V.2.6.2. - Fonction de la profondeur du dipôle

V.2.7. - Conclusion

V.3. - ETUDE DE L'ANOMALIE ELECTROMAGNETIQUE DANS UN TERRAIN HETEROGENE

V.3.1. - Champ induit par une sphère conductrice excitée par un dipôle

V.3.2. - Le programme "MARCH"

V.3.3. - Etude de l'évolution avec la fréquence du champ secondaire induit par la sphère

V.3.4. - Etude de la précision de la localisation du dipôle dans un terrain homogène

V.3.4.1. - Cas d'un dispositif symétrique

V.3.4.2. - Cas d'un dispositif assymétrique

V.3.4.3 - Conclusion

V.3.5. - Conclusion

V.4. - ETUDE EXPERIMENTALE SUR LE TERRAIN

V.4.1. Appareillages

V.4.1.1. - Liste du matériel

V.4.1.2. - Caractéristiques du matériel utilisé

V.4.1.3. - Condition de mesure

V.4.2. - Déroulement des mesures

V.4.2.1. - Paramètres mesurés

V.4.2.2. - Conventions de mesure

V.4.3. - Ellipse de polarisation magnétique dans le cas statique

V.4.3.1. - Point de vue théorique

V.4.3.2. - Point de vue expérimental

V.4.4. - Evolution du champ électromagnétique avec la Fréquence : sondage paramétrique

V.4.5. - Evolution du champ électromagnétique avec la distance : sondage géométrique

V.4.6. - Exploitation des résultats

V.4.7. - Conclusion

CONCLUSION - PERSPECTIVES

ANNEXE 1 : PROGRAMME "DIPMAG"

ANNEXE 2 : RESULTATS GRAPHIQUES DU PROGRAMME "DIPMAG"

ANNEXE 3 : PROGRAMME MARCH

INTRODUCTION

Le CEA-LETI développe une instrumentation orientée vers la mesure du champ magnétique terrestre. Les applications géophysiques de ce matériel relèvent principalement de la prospection magnétique et visent à fournir des informations concernant les propriétés magnétiques des matériaux.

L'étude des champs magnétiques associés à des circulations de courants injectés dans le sol, qu'ils soient continus ou variables, joue un rôle non négligeable dans diverses méthodes de prospection : méthodes magnétorésistive, électromagnétique et magnétotellurique dont l'objectif est la description des résistivités électriques des terrains.

Les possibilités géophysiques offertes par ces méthodes dérivées de la magnétométrie ont conduit le laboratoire de magnétométrie à s'intéresser au comportement électromagnétique des matériaux géologiques et autres.

Le travail présenté ici fait partie de cette orientation. Pour aborder l'étude des problèmes d'électromagnétisme notre démarche est la suivante :

- une étude sur la résistivité des roches est présentée dans le premier chapitre,
- un second chapitre regroupe les notions utiles en magnétométrie (théorie et instrumentation) et s'intéresse à la méthode magnétorésistive.

La part la plus importante du travail est axée sur les mesures électromagnétiques avec l'étude d'une méthode de localisation d'une source électromagnétique dont on s'efforce de déterminer la limite d'application. Actuellement la méthode de localisation est utilisée dans des conditions proches du continu pour un repérage en surface de cavités souterraines connues, jusqu'à des profondeurs d'une centaine de mètres, et que l'on cherche à atteindre par forage. Son extension aux régimes alternatifs, pour une plus grande profondeur d'investigation, semble ouvrir des horizons nouveaux quant à son application dans le domaine de la géologie appliquée (mines, génie civil). Nous verrons qu'à partir de certaines conditions de mesure, l'incidence du paramètre résistivité des terrains encaissant la cavité est telle que le dispositif en place pourrait permettre de détecter et localiser des anomalies de conductivité telles que celles produites par des amas de matériaux très conducteurs (eaux salées, minerais) à proximité de la zone de mesure.

GENERALITES

La géophysique doit son existence aux côtés de la géologie au fait que la grande majorité des gisements ou des structures qui intéressent le géologue sont situés sous la surface du sol.

Les techniques géologiques traditionnelles ne permettant pas alors de visualiser de manière certaine la disposition des terrains en profondeur, leur continuité ou leur nature, par la prospection géophysique, on cherche à caractériser, si ce n'est à identifier, ces terrains en étudiant une ou plusieurs de leurs propriétés physiques. Cependant, on doit toujours avoir à l'esprit que la géologie est inséparable de la géophysique, l'une permettant de confirmer l'hypothèse de l'autre et vice versa.

Chaque type de propriété physique donne lieu à un ou plusieurs modes de prospection.

Les propriétés les plus couramment utilisées sont les suivantes :

- la densité utilisée pour la prospection gravimétrique,
- les propriétés mécaniques pour la prospection sismique,
- les propriétés magnétiques à l'origine de la prospection magnétique,
- les propriétés électriques à la base de la prospection électrique.

La prospection électromagnétique à laquelle nous allons nous intéresser fait partie de la famille des méthodes de prospection électrique puisqu'elle permet d'accéder aux caractéristiques électriques d'un terrain.

Bien que les origines de la prospection électrique remontent à plus d'un siècle, on peut considérer que la méthode s'est réellement développée avec le travail de Schlumberger et Wenner (respectivement en 1922 et 1912) qui les premiers ont mis au point des dispositifs standards pour la mesure, au moyen d'électrodes et d'un courant continu, de la résistivité des terrains ainsi que la théorie appropriée.

Ces méthodes très couramment utilisées sont bien adaptées à des investigations subkilométriques d'ensembles moyennement conducteurs. Il faut cependant remarquer que la dimension des dispositifs de mesure et la puissance des générateurs introduisent une certaine limitation du champ d'application.

La naissance et le développement de la méthode de prospection magnéto-tellurique (Cagniard 1953) a permis d'élargir les capacités des méthodes de prospection électrique.

L'idée essentielle est d'exploiter les variations naturelles du champ magnétique terrestre en guise de générateur pour une prospection

électromagnétique d'un milieu conducteur. La profondeur d'investigation est alors liée à la fréquence du fait d'un "effet de peau" classique dans les techniques électromagnétiques.

Depuis les premiers travaux de Cagniard la méthode de prospection magnétotellurique s'est perfectionnée ; couramment utilisée, elle est efficace pour l'étude des résistivités de subsurface dans des gammes de profondeur allant de plusieurs centaines de mètres à quelques dizaines de km, parfois même lors de prospections de grande envergure, plusieurs centaines de km.

Cependant, de même que la prospection électrique en courant continu, la méthode de prospection magnétotellurique souffre de limitations qui l'empêchent d'être la méthode idéale.

La première en importance de ces limitations, réside dans la difficulté de mesure des données et la complexité de leur analyse. En effet, travailler sur des fluctuations électromagnétiques naturelles rend délicate la distinction de l'information utile au sein de ce que l'on pourrait nommer le bruit électromagnétique (parasites industriels...). Il en résulte généralement que l'interprétation ne procure pas des résultats précis dans les délais souhaités pour une prospection géophysique rapide.

Le présent travail traite de la troisième approche possible dans l'étude des propriétés électriques de subsurface : il s'agit de la méthode de prospection électromagnétique.

Cette méthode s'intéresse aux champs électromagnétiques engendrés par les circulations de courant dans le sol, mais contrairement à la prospection magnétotellurique, elle utilise une source électromagnétique contrôlée plutôt qu'un champ magnétique naturel et fluctuant.

Le développement relativement récent des mesures électromagnétiques est lié au progrès de l'électronique (instrumentation) et de la théorie (informatique). La possibilité de mesures aéroportées est particulièrement intéressante.

BREF HISTORIQUE SUR LA PROSPECTION ELECTROMAGNETIQUE

Les méthodes électromagnétiques ont été occasionnellement utilisées en prospection géophysique bien avant que leur théorie ait été tout à fait comprise ; l'application principale étant la recherche de corps conducteurs minéralisés donc le domaine de la prospection minière. La première description d'un appareillage et d'une méthode de prospection électromagnétique remonte à 1913. Dans les années 1920 de nombreux sites miniers furent localisés par prospection électromagnétique, notamment pour la première fois en Suède. En 1933, les premiers travaux traitant de l'utilisation des méthodes électromagnétiques en terrains stratifiés sont publiés aux Etats-Unis. La méthode exposée a soulevé un intérêt considérable parmi les compagnies pétrolières pendant une dizaine d'années ; de cette époque datent de nombreuses publications sur le sujet dans lesquelles l'expérimentation et les résultats priment sur l'analyse et la théorie. De cette méconnaissance de la théorie apparaît un manque de maîtrise des phénomènes

électromagnétiques qui s'oppose à la résolution de problèmes géologiques complexes, d'où une certaine désillusion vis-à-vis des méthodes électromagnétiques qui fait que durant les années 50, elle n'est pratiquement plus utilisée aux Etats-Unis pour la prospection pétrolière. Par la suite apparaissent parallèlement en Russie et aux Etats-Unis les premières théories électromagnétiques se basant sur les équations de Maxwell (Wolf 1946, Wait 1951...). Frischknecht publie en 1967 les premières tables numériques et courbes théoriques pour l'interprétation des sondages électromagnétiques. Au cours des vingt dernières années, Wait, Banos, Bamrister et Vanyan travaillèrent à définir la solution des équations de Maxwell pour un champ électromagnétique dans un demi espace conducteur stratifié. Parallèlement à ces travaux, les applications de la méthode se diversifient de la prospection minière, à la prospection pétrolière, à la recherche de ressources hydrologiques et géothermales, aux problèmes de génie civil, liés au permafrost, notamment en Russie.

De nos jours, le travail en électromagnétisme porte principalement sur la mise au point de théories plus proches des cas concrets de terrain. Les travaux les plus récents des géophysiciens traitent notamment de l'approche du problème tridimensionnel en électromagnétisme à source contrôlée.

CHAPITRE I

RESISTIVITE EN GEOPHYSIQUE

La résistivité d'un milieu est l'une des trois propriétés qui régit le comportement du champ électromagnétique, les deux autres étant la constante diélectrique et la perméabilité magnétique. C'est elle qui détermine l'existence et le comportement des circulations électriques à la base de tout phénomène électromagnétique et en cela constitue un paramètre fondamental pour le géophysicien.

I.1 - DEFINITION - RAPPELS

Voir figure 1.

La loi d'ohm exprime une relation linéaire entre le champ électrique E et la densité de courant J en un point d'un matériau :

E = ρ · J (1)

ρ est la résistivité (Ω.m)

E est le champ électrique (volt/m)

J la densité de courant (A/m²)

Sous sa forme

J = σ · E (2)

elle introduit la conductivité (mho/m)

σ = 1/ρ (3)

Pour un échantillon de longueur l, de section S dont la résistance est définie par

R = ρ l/s (4)

elle prend la forme traditionnelle

V = R.I (5)

V est la différence de potentiel (volt)

R la résistance (Ω)

I le courant (A)

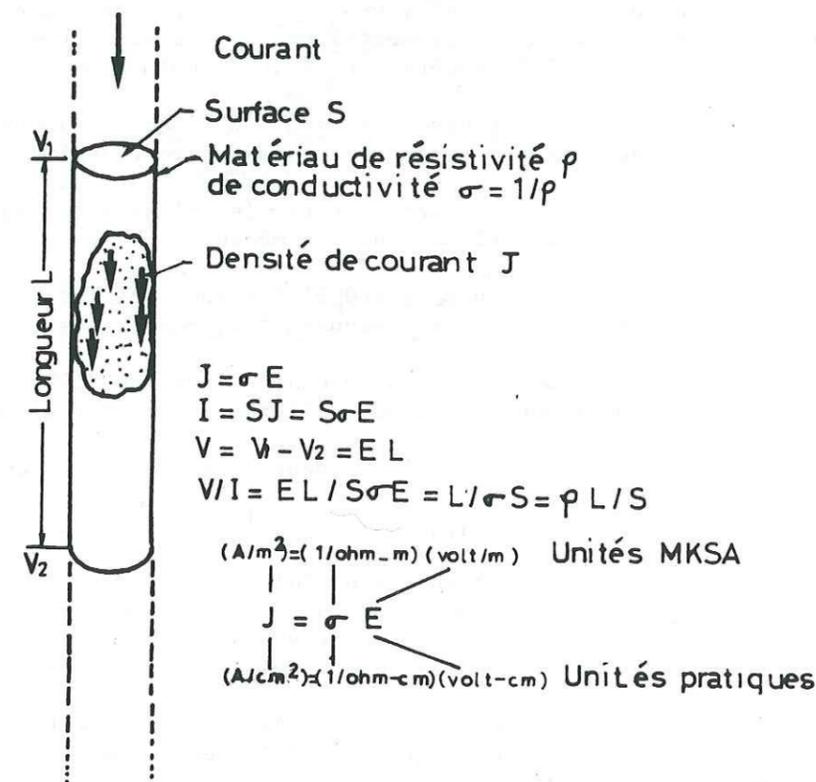


fig 1

Passage du courant dans un conducteur.

I.2 - POINT DE VUE DU GEOLOGUE

Le géologue s'intéressant à des milieux rocheux, il convient de définir ce que représente une roche du point de vue électrique.

Les matériaux solides peuvent être subdivisés en trois groupes, sur la base de l'amplitude et du mécanisme de la conduction électrique :

- conducteurs
- semi-conducteurs
- diélectriques (ou électrolytes solides)

Les plus fortes valeurs de conductivité sont présentes dans les métaux et leurs alliages avec des valeurs allant de 10^3 à 10^6 mho/m. En contraste avec ces matériaux, les électrolytes solides présentent des conductivités inférieures à 10^{-9} mho/m.

Entre ces deux types extrêmes de matériaux, on trouve les semi-conducteurs dont les conductivités vont de 10^4 à 10^{-9} mho/m (fig. 2-3).

La distinction entre les classes est autant basée sur la valeur de la conductivité que sur son mécanisme :

La conductivité électrique dans les métaux et les semi-conducteurs est liée aux mêmes porteurs de charges : les électrons.

Les porteurs de charge dans les diélectriques sont les ions, dont les mouvements sont moins libres que ceux des électrons.

La conductivité peut s'exprimer par une relation du type :

$$(6) \sigma = \sum A_i e^{-U_i/kT}$$

- k : constante de Boltzman
- T : température absolue
- U_i: énergie d'activation
- A_i: constante

La connaissance de A_i permet d'identifier le mécanisme de conduction donc de classer un matériau dans l'un des groupes (conducteur - semi-conducteur - diélectrique).

Roche	A ₁	A ₂	U ₁	U ₂
Granite	5×10^{-4} mho/cm	10^5 mho/cm	0.62 eV	2.5 eV
Gabbro	7×10^{-3}	10^5	0.70	2.2
Basalte	7×10^{-3}	10^5	0.37	2.0
Peridotite	4×10^{-2}	10^5	0.81	2.3
Andesite	6×10^{-3}		0.7	1.6

Figure 4 : Valeurs de A et U pour quelques roches (3)

.../...

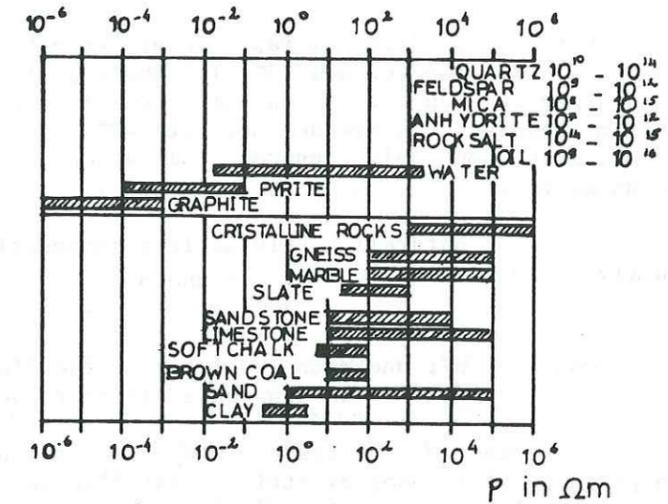


fig 2 Résistivités de quelques roches et minéraux de surface. ref (11)

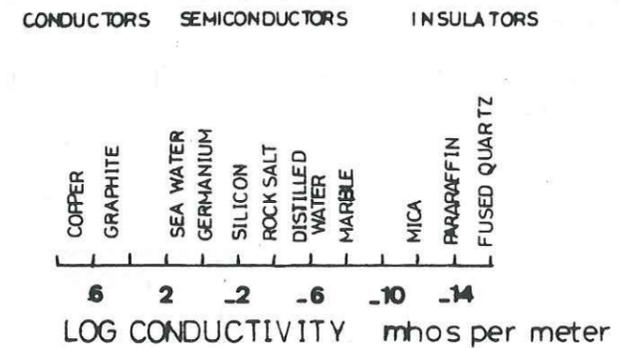


fig 3 Spectre des conductivités. ref (11)

.../...

La conductivité d'une roche dépend en première approximation de sa composition donc :

- des minéraux,
- de la phase aqueuse éventuellement présente.

Certains minéraux se rapprochent des métaux purs (tel le graphite par exemple) très conducteurs ($\sigma = 10^6$ mho/m), d'autres exhibent des propriétés de semi-conducteurs. Bon nombre de minéraux classiques (quartz, mica) sont des isolants presque parfaits ($\sigma = 10^{-10}$ à 10^{-15} mho/m) d'ailleurs utilisés comme tels dans des applications électroniques (condensateurs).

Les eaux naturelles suivant leur composition présentent des conductivités allant de 10^{-3} à 10^2 mho/m.

Pour définir une roche du point de vue électrique, il y a lieu de tenir compte également de la constante diélectrique ou permittivité.

Ce paramètre, qui traduit une polarisation électrique de la matière en présence d'un champ électrique, est d'autant plus important que les études géophysiques couvrent généralement un domaine de fréquences de plus en plus étendu allant du continu à une centaine de MHz.

Le phénomène de polarisation électrique est présent dans tous les matériaux mais surtout remarquable dans ceux qui présentent des résistivités très élevées (diélectriques).

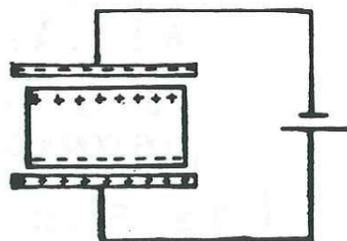
Les traités classiques d'électricité nous fournissent une définition de la constante diélectrique .

L'influence d'un champ électrique sur un matériau diélectrique est équivalente à charger les deux surfaces d'un échantillon de ce diélectrique avec des charges de signe opposé à celles créant le champ.

Si V est la différence de potentiel entre les deux surfaces et Q la charge totale du système on a :

$Q = CV$ (8)

$C = \frac{A \epsilon}{d}$ (9)



C : capacité d'une paire de plaques parallèles de surface A, distantes entre elles de d, et contenant un matériau de constante diélectrique .

La constante diélectrique joue un rôle particulièrement important dans les études de laboratoire portant sur la résistivité des roches car il est d'usage pour faire des études significatives de débarrasser les échantillons de leur contenu en eau. Les résistivités sont alors très fortes et les propriétés diélectriques d'autant plus apparentes.

Cette remarque nous amène à souligner un point fondamental dans l'étude de la résistivité des roches :

L'importance du rôle de l'eau et de la porosité.

La résistivité d'une roche peut s'exprimer par la loi d'Archie (13)

(9) $\rho = \frac{a}{\phi^m} \rho_w$

ρ : résistivité de la roche saturée en eau
 ρ_w : résistivité de l'électrolyte imprégnant la roche
 ϕ : porosité de la roche (Figure 5)
a et m sont des coefficients qui dépendent de la texture des roches. Les valeurs moyennes sont :

$1,3 < m < 2,3$
 $0,5 < a < 1$ (généralement roches sédimentaires)

La porosité intervient souvent par son carré ($m = 2$) et la résistivité de l'électrolyte est largement variable (Figure 6). A titre d'exemple à 0°C une solution à 0,1 g/l de NaCl a une résistivité de $100 \Omega.m$, à 1 g/l celle-ci est de $10 \Omega.m$ et à 10 g/l elle atteint $1 \Omega.m$.

D'une manière générale, la résistivité de la phase aqueuse est largement inférieure à la résistivité de la roche hôte, ce qui permet d'observer lors de mesures sur des roches "humides", l'effet prépondérant de l'électrolyte présent dans les pores, par rapport à la matrice (Figures 7 et 8).

Rock type	Intergranular porosity (%)	Joint porosity (%)
Paleozoic sandstones and shale	5-30	0-1
Paleozoic limestones	2-10	0-2
Paleozoic clastic volcanics	5-30	0-2
Post-Paleozoic sandstones and shale	10-40	0
Post-Paleozoic limestones	4-20	0-2
Post-Paleozoic clastic volcanics	10-60	0
Precambrian sediments and low-rank metamorphosed sediments	1-8	0-2
Precambrian igneous rocks and high-rank metamorphic rocks	0-2	0-2
More recent igneous rocks	0-10	0-2

fig 5 Pourcentage de porosités typiques de quelques roches ref(3)

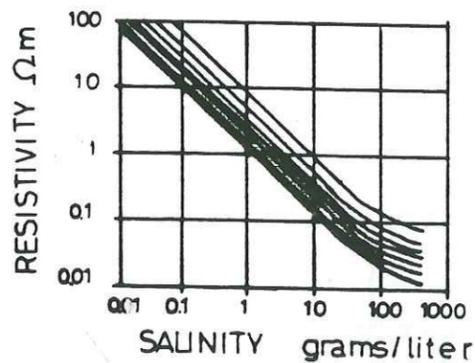


fig 6 Résistivité d'une solution NaCl en fonction de la température et de la concentration

ref(4)

.../...

Rock	Water content, %	Resistivity, Ω-cm	Rock	Water content, %	Resistivity, Ω-cm
Siltstone	0.54	$1.5 \cdot 10^8$	Diorite	0.02	$5.8 \cdot 10^7$
	0.5	$7.3 \cdot 10^7$		0	$6.0 \cdot 10^8$
	0.44	$8.4 \cdot 10^8$	Peridotite	0.03	$2.2 \cdot 10^8$
	0.38	$5.6 \cdot 10^{10}$		0.016	$1.1 \cdot 10^8$
Coarse-grained sandstone	0.34	$9.6 \cdot 10^7$	0	$1.8 \cdot 10^8$	
	0.18	10^{10}	Olivine-pyroxenite	0.028	$0.7 \cdot 10^7$
Medium-grained sandstone	1.0	$4.2 \cdot 10^8$		0.014	$0.39 \cdot 10^8$
	1.67	$3.18 \cdot 10^9$	0	$0.56 \cdot 10^{10}$	
	0.1	$1.4 \cdot 10^{10}$	Basalt	0.95	$4.1 \cdot 10^8$
Pyrophyllite	0.76	$6.1 \cdot 10^8$		0.49	$9.0 \cdot 10^7$
	0.72	$4.0 \cdot 10^9$	0.26	$3.1 \cdot 10^8$	
	0.7	$2.1 \cdot 10^{10}$	0	$1.26 \cdot 10^{10}$	
	0	$\sim 10^{12}$	Peridotite	0.1	$3.07 \cdot 10^8$
Granite	0.31	$4.4 \cdot 10^8$		0.003	$4.0 \cdot 10^8$
	0.19	$1.8 \cdot 10^8$		0	$6.5 \cdot 10^8$
	0.06	$1.3 \cdot 10^{10}$			
	0	10^{12}			

fig 7 Valeur des résistivités de quelques roches imprégnées d'eau ref(8)

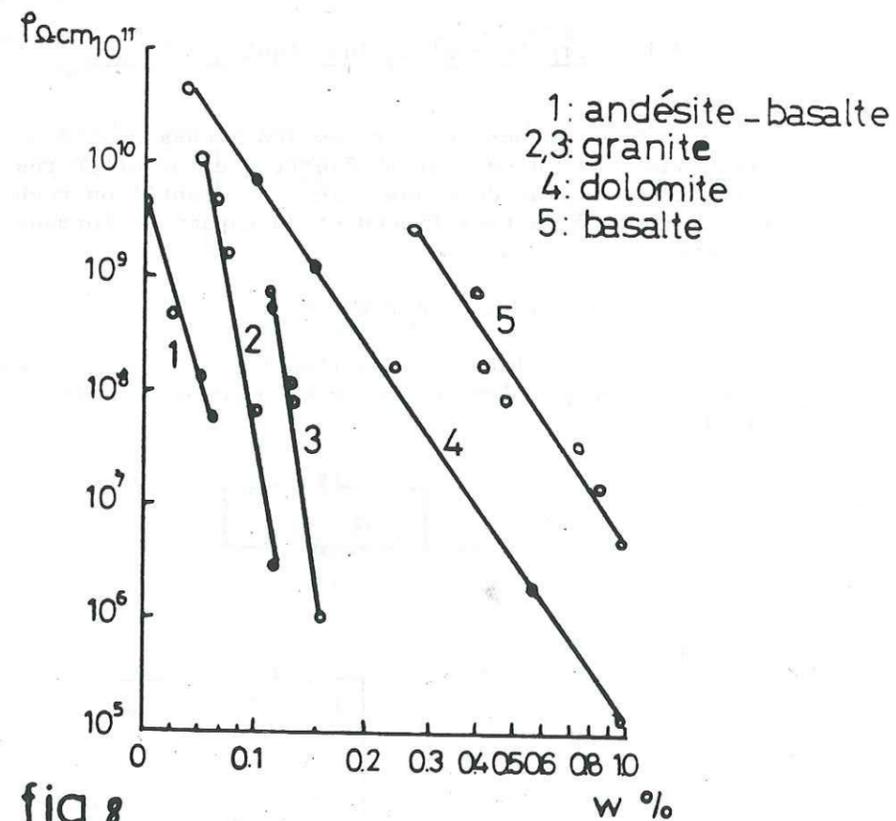


fig 8 Relation entre résistivité et pourcentage en eau

ref(8)

.../...

Dans certains cas, le mécanisme de conduction solide peut s'avérer plus important que la conduction électrolytique :

- si la roche contient un pourcentage très élevé de minéraux conducteurs,
- si elle est complètement gelée ou si elle est suffisamment profonde sous la surface pour que tout l'espace poreux soit fermé par la pression sus-jacente.

Un regard sur la littérature traitant de l'étude des paramètres électriques des roches révèle la très grande richesse dans ce domaine, sur le plan des idées d'une part, et la difficulté de relier les résultats théoriques concernant une roche spécifique aux caractéristiques d'un échantillon réel d'autre part. Cette constatation nous amène à la conclusion qu'il est nécessaire de caractériser soi-même ses échantillons si l'on veut utiliser des valeurs significatives.

Ceci nous a conduit à mettre au point une méthode expérimentale de détermination des propriétés électriques d'une roche dont nous exposons à présent le principe.

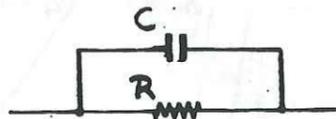
I.3 - ETUDE EXPERIMENTALE DE LA RESISTIVITE D'ECHANTILLONS ROCHEUX

I.3.1 - Structure électrique équivalente d'une roche

Nous venons de voir que les roches sont des matériaux qui présentent, vis-à-vis d'un courant électrique, un effet résistif et un effet capacitif. On peut donc assimiler un échantillon rocheux à un circuit électrique composé de résistances et de capacités formant l'impédance Z du système.

La loi d'ohm s'écrit $V = ZI$

Il est admis, et nos résultats le confirmeront, que les roches se comportent en première approximation comme des circuits R - C parallèles simples.



Pour un tel circuit on a :

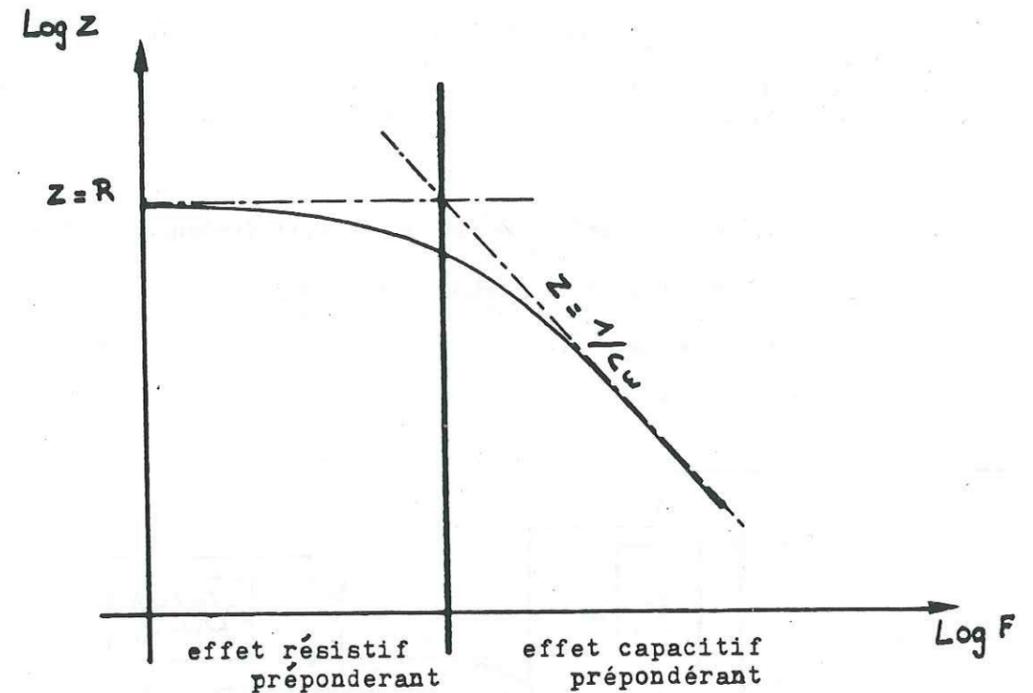
$$1/Z = 1/R + jC\omega$$

$$\omega = 2\pi F$$

F : fréquence

.../...

L'évolution théorique de l'impédance d'un tel circuit avec la fréquence est la suivante :



- Domaine des basses fréquences $\omega \rightarrow 0$ effet résistif prépondérant pour $\omega = 0$ $1/Z = 1/R + jC\omega$ devient

$$Z = R$$

- Domaine des hautes fréquences effet capacitif prépondérant $jC\omega \gg 1/R$ La partie capacitive de la courbe est linéaire et de pente $a = -1$

$$Z = 1/j\omega C$$

$$\text{Log } Z = - \text{Log } C\omega$$

A partir de ces données, on voit que si l'on peut mesurer l'impédance d'échantillons de roches dans une large gamme de fréquences, on pourra déterminer :

- la valeur maximale de la résistivité de l'échantillon (B.F)
- la valeur de sa constante diélectrique (H.F) connue à partir de sa capacité C

.../...

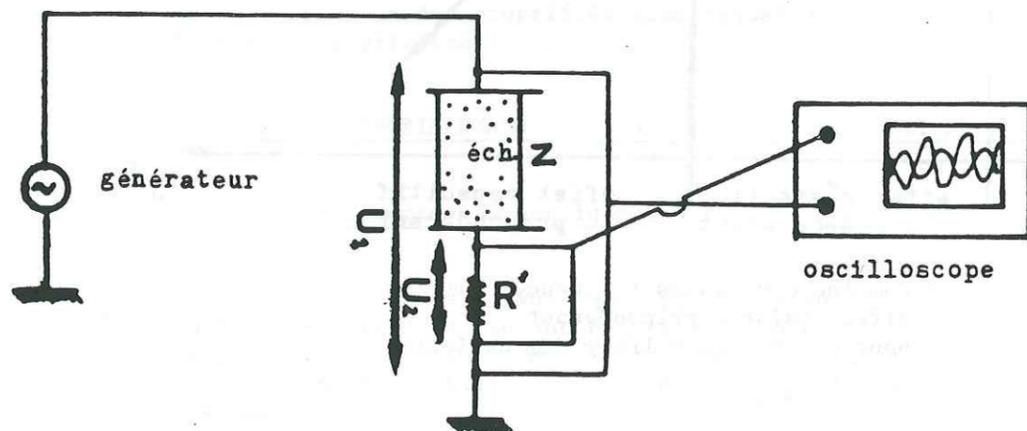
I.3.2 - Mise au point d'un montage expérimental pour la mesure des propriétés électriques d'échantillons rocheux

Il existe sur le marché de l'électronique des impédancemètres, mais dans notre cas, la très forte impédance des matériaux étudiés ne permet pas l'utilisation de tels appareils dans une bande de fréquences assez large. Nous avons donc eu recours à un montage personnel.

L'appareillage se compose :

- d'un générateur de courant alternatif (fréquence : 1Hz - 2MHz)
- d'un oscilloscope (2 voies d'entrées).

Schéma du dispositif



Loi d'ohm : $U_2 = R'I$

$U_1 = (Z + R')I$

$\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z + R'}{R'}$

$\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z}{R'} + 1$

Dans le cas général (roches sèches) Z a une valeur très élevée ($10^6 \Omega$) ; il nous est par conséquent facile de prendre une résistance R' de valeur faible devant Z.

.../...

Si $Z \gg R'$, on peut écrire

$\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z}{R'}$

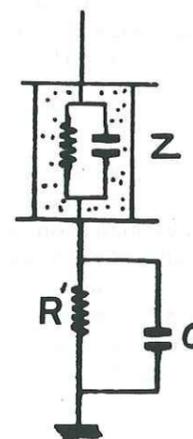
D'où $Z = \frac{U_1}{U_2} \times R'$

R' est la valeur de la résistance en série avec l'échantillon.

U_1 et U_2 se lisent directement sur l'écran de l'oscilloscope, R' est connu, on peut donc calculer l'impédance de l'échantillon à chaque fréquence et tracer la courbe $\text{Log } Z = f(\text{Log (Fréquence)})$

Remarque : Précautions à prendre sur la valeur de la résistance suivant la fréquence.

En réalité le circuit se schématise comme suit :



$\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z}{\frac{1}{1/R' + jC'\omega} + Z}$

C' étant la capacité d'entrée de l'oscilloscope $C' = 30 \text{ pF}$ cette capacité doit être négligeable devant la résistance R en série avec l'échantillon, c'est à dire que l'on doit avoir $1/R' \gg C'\omega$

• en hautes fréquences, on prend donc une résistance faible

$R' = 10^3 \Omega$

• en basses fréquences, le terme $C'\omega$ est négligeable, on augmente la valeur de la résistance qui a tendance à être masquée par l'impédance de l'échantillon, alors maximale.

$R' = 10^5 \Omega$

.../...

A quelle fréquence doit-on changer de résistance ?

$$1/R' \gg C'\omega \leftrightarrow R'C'\omega \ll 1$$

$$\omega \ll \frac{1}{R'C'} \text{ avec } R' = 10^5 \Omega \\ C' = 30 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$\text{Donc } \omega \ll 3 \cdot 10^5 \leftrightarrow f \ll 5 \cdot 10^4 \text{ Hz}$$

Pour $f \ll 50 \text{ KHz}$, on prend $R' = 10^5 \Omega$

$f \ll 50 \text{ KHz}$, on prend $R' = 10^3 \Omega$

1.3.3 - Préparation de l'échantillon

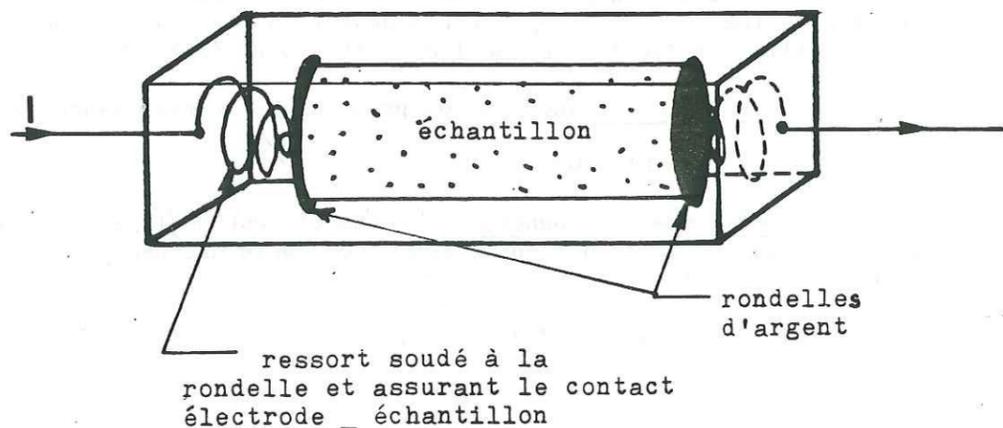
Les échantillons sont carottés puis sciés ; ils se présentent sous forme de cylindres de 25 mm de diamètre par 25 mm de longueur.

Lors des études portant sur les propriétés électriques, un soin vigilant doit être apporté sur le contact électrode-échantillon ; celui-ci doit être tel que la résistance de contact soit minimale. (8) Après quelques essais, nous avons opté pour la solution satisfaisante qui consiste à rendre conductrice chaque section de l'échantillon par un fin revêtement de peinture d'argent (laque d'argent DEMETRON).

Cette peinture conductrice s'applique au pinceau sur la section propre de l'échantillon ; l'ensemble est porté ensuite à 500°C pendant deux heures de manière à ce que le solvant s'évapore. On obtient ainsi un revêtement fin et uniforme présentant une conductivité excellente.

Lors de la mesure, le contact électrique avec le reste du montage est assuré par l'intermédiaire de deux rondelles d'argent qui viennent se plaquer sur chacune de sections de l'échantillon.

Détail du montage



.../...

1.3.4. - Résultats expérimentaux

On mesure dans un domaine de fréquences allant de 5 Hz à 1 MHz l'impédance de l'échantillon.

Reproductibilité et fiabilité des mesures

Pour pouvoir effectuer des comparaisons entre les résultats de divers échantillons, les conditions expérimentales doivent être identiques (T°, degré d'humidité...). On a effectué une série de dix mesures dans des conditions identiques (une tous les quarts d'heure), sur trois types d'échantillons :

1 - une roche éruptive compacte : minéral de sidérite (sidérite, calcite, ankerite)

2 - une roche sédimentaire poreuse : grès

3 - une roche volcanique : basalte

On calcule pour chacun des échantillons :

$$K = \frac{\text{moyenne des écarts entre deux mesures}}{\text{moyenne des valeurs mesurées}} \times 100$$

On trouve :

- $K_1 = 3,1 \%$
- $K_2 = 2,3 \%$
- $K_3 = 1,6 \%$

La précision de la mesure est donc d'environ 2 à 3 %, ce qui est tout à fait compatible avec la précision dans ce domaine.(1)

1.3.4.1. Influence de la nature de la roche sur sa résistivité

On obtient toujours une courbe du type de celle représentée sur la figure 9.

C'est la valeur du palier en basse fréquence et la position de la partie linéaire capacitive qui varie selon les roches.

On trace les asymptotes des deux parties de la courbe.

En basse fréquence, on lit la valeur de la résistance de la roche sur l'axe Log Z.

En haute fréquence, en tout point de l'asymptote on peut calculer C à partir de l'équation $C = 1/Z\omega$.

.../...

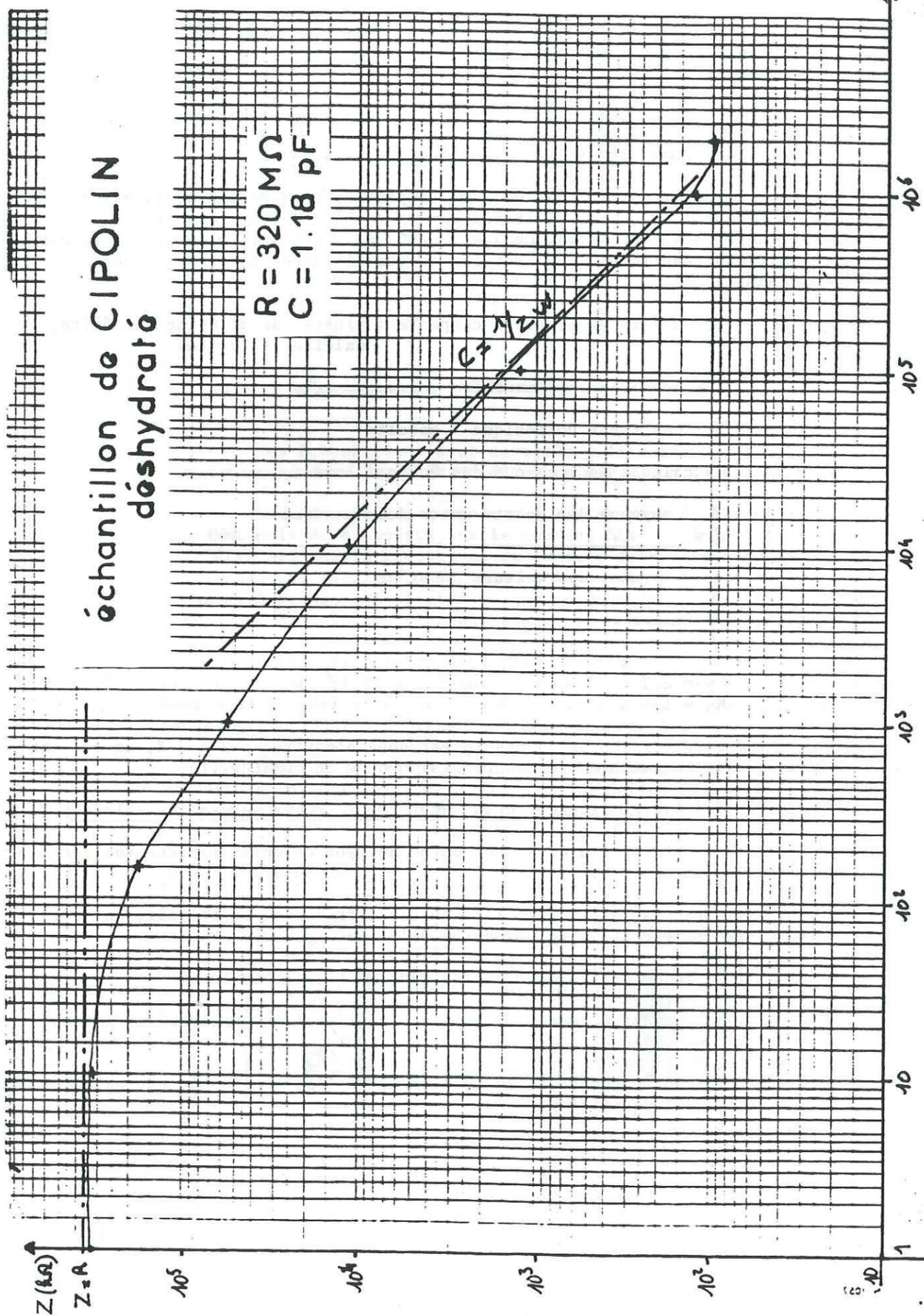


Fig 9 VARIATION DE L'IMPÉDANCE D'UN ÉCHANTILLON AVEC LA FRÉQUENCE (ech. sec.)

Connaissant la géométrie de l'échantillon, on calcule :

$$\rho = R S / l$$

$$\epsilon = C l / S$$

Nous avons travaillé sur neuf échantillons de nature pétrographique différente.

Les résultats sont présentés dans le tableau qui suit :

Mesures sur des échantillons deshydratés

ECHANTILLON	RESISTIVITES (Ωm) ρ_s	$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{éch}}{\epsilon_{vide}}$ ϵ_{rs}
Marbre	$3,4 \cdot 10^8$ ($2,5 \cdot 10^8$)	7,58 (7-9)
Granodiorite	$1,4 \cdot 10^8$	5 (5 - 6,3)
Cipolin	$7 \cdot 10^7$	3,4
Sidérite	$4,5 \cdot 10^7$	8,6
Prasinite	$3,3 \cdot 10^7$ ($3,2 \cdot 10^6$)	5,5
Basalte	$2,1 \cdot 10^7$ ($1,3 \cdot 10^7$)	4,5
Marne	$1,17 \cdot 10^7$	9,2
Argile	$9,36 \cdot 10^6$ ($6 \cdot 10^6$)	6,6 (4-7)
Marne sableuse	$1,22 \cdot 10^5$ ($3,5 \cdot 10^4 - 1,4 \cdot 10^5$)	7,6 (5-7)

Les échantillons ont été maintenus deux heures à 500° C (deshydratation) puis redescendus à température ambiante à l'intérieur du four. Ils sont ensuite conservés en ambiance sèche. Les valeurs parenthésées sont les résultats publiés par Parkhomenko (8) sur des échantillons de même nature que les nôtres et mesurés dans des conditions à peu près similaires. La cohérence des résultats intervient en faveur de la méthode expérimentale mise au point.

On peut constater les faits suivants :

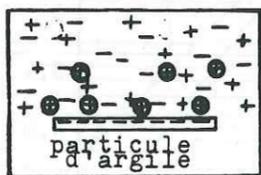
- les roches cristallines sont les plus résistantes
- les roches sédimentaires les plus conductrices.

Au sein des roches cristallines la résistivité a tendance à décroître des roches acides aux roches basiques à ultrabasiques ; Parkhomenko explique ce phénomène par la composition minéralogique des différentes roches :

. le marbre et le cipolin sont constitués presque uniquement de calcite ; la granodiorite de quartz et feldspaths, (micas amphiboles). Or la majorité de ces minéraux sont "clairs" et résistants ; la structure dense de ces roches nuit à l'éventuelle présence d'impuretés plus conductrices. Tout contribue donc à une forte résistivité.

. A l'opposé le minerai de sidérite, la prasinite et le basalte sont des roches contenant très peu ou pas de quartz mais plutôt des minéraux ferromagnésiens. Ces roches seront donc moins résistantes que les premières.

La faible résistivité des roches sédimentaires est due à la présence d'argiles. L'origine de la conductivité élevée des minéraux argileux s'explique par l'existence d'une double couche de cations adsorbés autour de la particule argileuse. Cette double couche consiste en une couche fixe



+ cations
● cations adsorbés
- anions

immédiatement adjacente à la particule et une couche diffuse. La couche diffuse est libre de mouvement ; sous l'influence d'un champ électrique les cations s'ajoutent aux ions et ainsi accroissent la densité des porteurs de charge. Le résultat est une augmentation de la conductivité. (11)

1.3.4.2. - Influence de la teneur en eau

Une série d'échantillons est restée immergée soixante dix heures dans l'eau.

On effectue les mesures après un léger égouttage de l'eau de surface.

Remarque sur le mode expérimental de mesure d'échantillons humides

On a affaire à des valeurs d'impédances beaucoup plus faibles qu'auparavant. De ce fait la valeur de la résistance en série avec l'échantillon est diminuée :

Pour $F \ll 50 \text{ KHz}$ $R' = 10^4 \Omega$ (au lieu de $10^5 \Omega$)

Pour la même raison, on ne peut plus négliger dans les calculs cette valeur, même amoindrie, de R' devant Z .

.../...

On ne simplifie plus la formule :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z + R'}{R'}$$

On calcule donc à présent Z à partir de la formule suivante :

$$Z = \frac{U_1}{U_2} \times R' - R'$$

La courbe $\text{Log}Z$ en fonction de Log (Fréquence) obtenue à partir de ces échantillons est modifiée quelle que soit la nature de la roche on obtient une courbe telle que celle représentée sur la figure 10

C'est la position de la courbe par rapport à l'axe des ordonnées qui varie suivant les roches.

- L'effet résistif est toujours mesurable sur l'axe des Z .

- par contre l'effet capacitif n'est plus lisible graphiquement, on procède différemment :

à très haute fréquence (1 MHz) on lit en abscisse sur l'oscilloscope le décalage entre les deux sinusoides U_1 et U_2 ainsi que la valeur de la période U_1 .

on calcule le déphasage = $\frac{\text{décalage} \times 360}{\text{Période de } U_1}$

on a $\text{tg} \phi = RC\omega$

donc $C = \frac{\text{tg} \phi}{R\omega}$

à partir de C on calcule ϵ .

RESULTATS

Les valeurs trouvées pour chaque échantillon sont présentées dans le tableau qui suit :

.../...

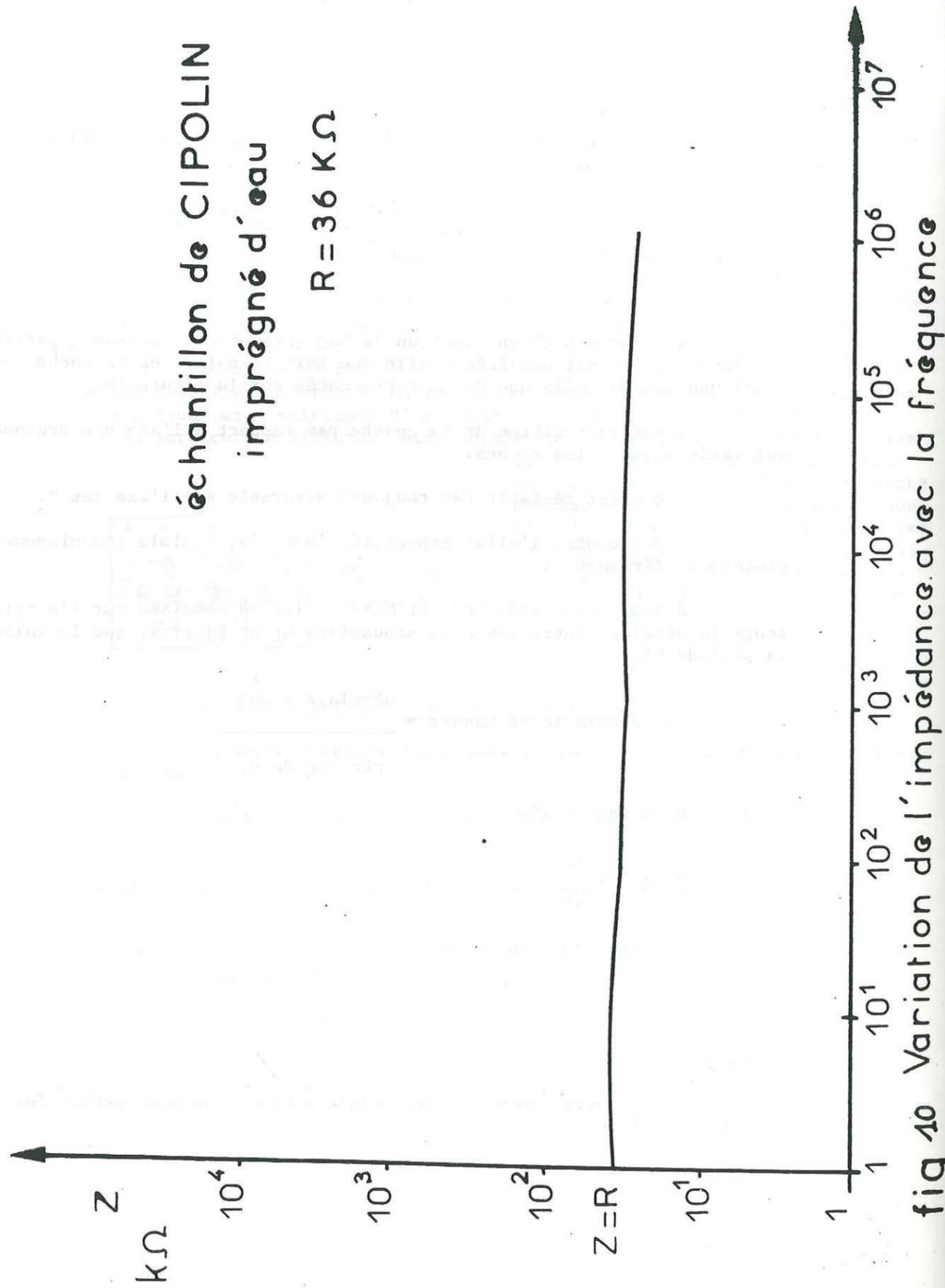


fig 10 Variation de l'impédance avec la fréquence

Mesure sur des échantillons imprégnés d'eau

ECHANTILLONS	RESISTIVITES ρ_w m	CONSTANTES DIELECTRIQUES ϵ_{rw}
Marbre	$2,2 \cdot 10^5$ ($10^4 - 10^{10}$)	7,2
Prasinite	$7 \cdot 10^3$	5,46
Basalte	$4 \cdot 10^3$ ($10^3 - 10^4$)	9,42
Sidérite	$3,5 \cdot 10^3$ ($7 \cdot 10^3$)	4,82
Granodiorite	$3 \cdot 10^3$ ($10^3 - 2 \cdot 10^4$)	7,5
Cipolin	$1,5 \cdot 10^3$	4,65
Marne	$1,1 \cdot 10^3$ ($10^2 - 10^5$)	9,9
Marne sableuse	$1,5 \cdot 10^2$	16
Argile	décomposée ($10 - 100$)	

Les résistivités ont toutes diminué quelle que soit la nature de la roche.

Le classement par ordre décroissant de résistivité, des roches cristallines vers les roches sédimentaires est conservé, mais, au sein des premières, les roches basiques sont maintenant plus résistives que les roches acides (exception faite du marbre).

Si l'on s'intéresse pour chaque échantillon à la variation de résistivité entre l'état sec (ρ_s) et l'état humide (ρ_w) en calculant le rapport ρ_s / ρ_w ainsi qu'à la variation de constante diélectrique en calculant $\Delta \epsilon_r = \epsilon_{rw} - \epsilon_{rs}$ et que l'on classe les valeurs par ordre décroissant on obtient les deux listes suivantes :

ρ_s / ρ_w	$\epsilon_{rw} - \epsilon_{rs}$
	Marne sableuse (8,4)
Granodiorite ($4,6 \cdot 10^4$)	Granodiorite (2,5)
Cipolin ($1,3 \cdot 10^4$)	Cipolin (1,2)
Sidérite ($1 \cdot 10^4$)	Sidérite (0,8)
Marne ($5,2 \cdot 10^3$)	Marne (0,7)
Basalte ($15 \cdot 10^3$)	Basalte (0,3)
Marbre ($8 \cdot 10^2$)	Marbre (0)
Marne sableuse ($4,2 \cdot 10^2$)	Prasinite (0)

Les échantillons dont la résistivité a le plus diminué depuis la valeur à l'état sec, sont ceux dont la constante diélectrique a le plus augmenté.

Ces deux résultats sont tout à fait compatibles quand on sait que :

- la résistivité de l'eau est faible,
- sa constante diélectrique relative est élevée (≈ 80)

Dans nos échantillons imprégnés d'eau la conductivité électrolytique par le biais de la phase aqueuse est nettement supérieure à la conductivité ionique de la matrice rocheuse (d'autant plus que l'on n'a pas de minerais). La présence, même infime, d'eau, qui forme des films fins et plus ou moins continus autour des grains, suffit donc à faire considérablement diminuer la résistivité, la chute étant d'autant plus forte que la valeur initiale de la résistivité de l'échantillon sec est élevée, ce qui explique que le rapport ρ_s/ρ_w de la marne sableuse soit l'un des plus faibles.

D'autre part, quand on sait que la constante diélectrique relative de l'eau est nettement supérieure à celle de la plupart des minéraux, on peut interpréter la valeur de $\Delta\epsilon$ entre l'état humide et l'état sec comme un indice sur la quantité d'eau emmagasinée par la roche, c'est à dire la perméabilité de la roche.

Il n'existe pas actuellement de modèles simples sur la relation constante diélectrique/porosité. Un fait est établi : en début d'imbibition d'une roche on observe toujours un $\Delta\epsilon$ important. (Figures 11-12)

Pour nos échantillons, on peut remarquer que :

- la marne sableuse est l'échantillon le plus perméable (structure détritique peu compacte),
- la perméabilité des roches acides est supérieure à celle des roches basiques (y compris le basalte, poreux mais d'une porosité fermée),
- la marne n'est pas très perméable mais présente toujours des résistivités faibles (matériaux argileux).

D'une manière générale :

La composition minéralogique ne joue quasiment plus sur les propriétés électriques des roches en présence d'eau (exception faite des roches argileuses ou contenant des minerais) ; c'est la texture et la structure de la roche qui interviennent par le biais de sa perméabilité :

- . plus la roche est perméable, plus sa résistivité est faible, et sa constante diélectrique élevée.

.../...

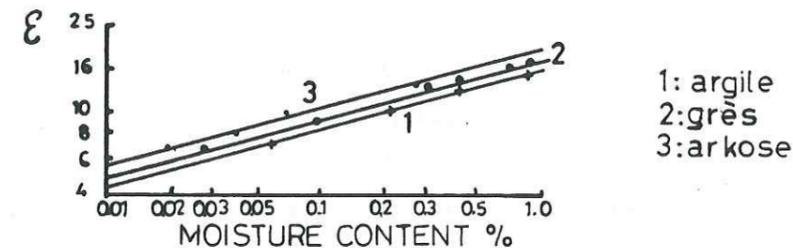


fig 11 Relation permittivité / présence d'eau dans des roches sédimentaires

ref (8)

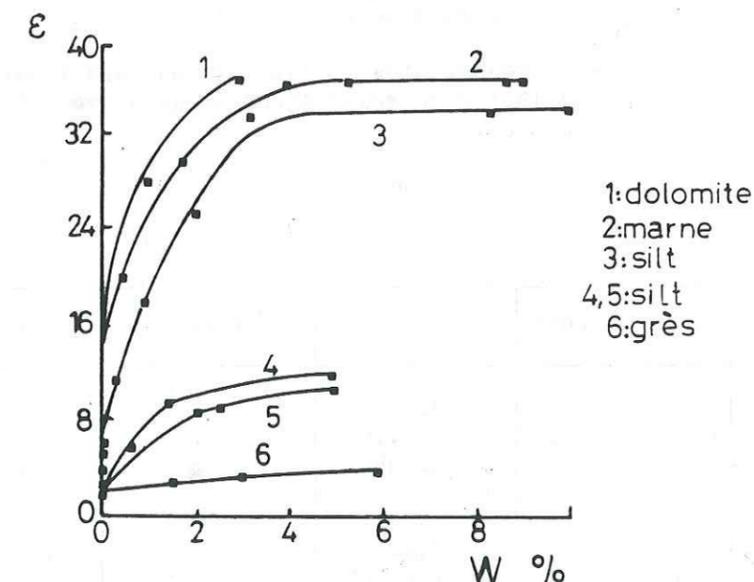


fig 12

Relation permittivité / présence d'eau dans des roches sédimentaires

ref (8)

.../...

I.3.4.3. - Influence de la texture

Nous avons travaillé sur deux séries d'échantillons provenant de deux types de roches différentes :

. un grès du trias marocain,

ce grès est oxydé (couleur rose) et présente un litage en micro-chenaux entrecroisés, souligné par les oxydes.

. un conglomérat schisteux graphiteux (Val d'Aoste)

intercalations successives de lits quartzo-feldspathiques avec de fins lits graphiteux (< 1 mm).

On prépare sur chacun de ces blocs 3 échantillons taillés selon trois directions perpendiculaires et définies comme suit :

- Echantillon 1 : taillé perpendiculairement au litage,

- Echantillon 2 : taillé parallèlement au litage,

- Echantillon 3 : taillé parallèlement au litage et perpendiculairement à l'échantillon 2

On effectue les mesures électriques, selon la technique définie précédemment dans deux états :

- à l'état sec (2 heures à 500°C, redescende à la température ambiante dans le four)

- imprégnés d'eau : les grès ont été immergés quatre heures (au delà ils se désagrègent progressivement) les "schistes" 20 heures.

RESULTATS

ECHANTILLONS		ρ sec	ϵ_r sec	ρ humide	ϵ humide
GRES	1	$3 \cdot 10^6$	15	$1,9 \cdot 10^2$	25
	2	$2,1 \cdot 10^6$	8,5	$1,6 \cdot 10^2$	20
	3	$2 \cdot 10^6$	8,6	$1,5 \cdot 10^2$	19
CONGL. SCHISTEUX	1	$8,4 \cdot 10^6$	3,6	$3,3 \cdot 10^3$	7,3
	2	$1,4 \cdot 10^6$	5,4	$1,9 \cdot 10^3$	8,0
	3	$1,6 \cdot 10^6$	4,5	$2 \cdot 10^3$	8,2

.../...

Dans le cas d'échantillons secs on note :

la résistivité mesurée transversalement au litage de la roche est supérieure à la résistivité mesurée dans le plan de ce litage.

On calcule le coefficient d'anisotropie $\lambda = \frac{\rho_{\text{litage}}}{\rho_{\text{//litage}}}$

pour le grès $\lambda = 1,5$

le conglomérat schisteux $\lambda = 5,6$

L'anisotropie est nettement plus forte dans les conglomérats schisteux que dans le grès, ce que l'on explique de la manière suivante : dans le cas des premiers on a une alternance entre des niveaux très conducteurs (graphite) et des niveaux très résistants (quartz + feldspaths). Ce contraste n'intervient pas dans le mode de conduction à l'intérieur de l'échantillon 2 ou 3 : le courant emprunte les lits graphiteux continus, la résistivité est faible, par contre dans le cas de l'échantillon 1 la circulation est entravée par des barrières isolantes, de quartz et de feldspath, est tortueuse et difficile, donc la résistivité élevée.

Dans le grès, ce phénomène est beaucoup moins accentué, la roche est beaucoup plus homogène avec seulement une concentration plus forte d'oxydes soulignant les microchenaux donc une conduction meilleure le long de ce litage (échantillons 2 et 3) cependant inférieure à celle du conglomérat schisteux.

Dans le cas d'échantillons imprégnés d'eau :

Pour tous les échantillons la valeur de la résistivité a diminué celle de la constante diélectrique augmenté.

Le coefficient d'anisotropie est beaucoup moins élevé. L'écart entre le grès et le conglomérat est beaucoup moins sensible :

$\lambda_{\text{grès}} = 1,25$

$\lambda_{\text{congl.}} = 1,65$

Les grès sont plus perméables que le conglomérat schisteux, leur résistivité est donc plus faible et leur constante diélectrique plus élevée.

Dans les deux cas, la conductivité est sensiblement la même que le courant circule perpendiculairement ou parallèlement au litage (bien que l'anisotropie de structure se fasse encore un peu sentir, surtout dans le cas du conglomérat ou le contraste des structures est plus accentué).

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, la conductivité électrolytique prédomine sur la conductivité ionique d'où un amoindrissement important de l'influence de la structure orientée des roches sur la circulation du courant.

.../...

On retiendra de ces mesures que la résistivité d'un même matériau peut varier jusqu'à un rapport cinq suivant la direction selon laquelle on la mesure. Cette variation est atténuée par la présence d'eau dans le matériau. C'est un phénomène à ne pas négliger pour un travail de terrain sur des structures orientées (stratification, schistosité).

I.3.4.4. - Influence de la température

Il est important de bien connaître la relation entre la résistivité et la température, ne serait-ce que pour interpréter toutes les données de sondages électromagnétiques profonds. Pour cela, on trouve dans la littérature de nombreuses études portant sur le comportement de la résistivité de différentes roches en fonction de la T°. (8) (7) (Fig. 13).

De notre côté nous nous sommes contentés de faire sur trois roches différentes des mesures de résistivités à 18°C et à 25°C.

Les résultats sont déjà significatifs de l'erreur qui peut être introduite dans les résultats si les échantillons ne sont pas maintenus tous à une même température (container thermostaté).

	Sidérite	Grès	Basalte
T° = 25°	$\rho = 3,6 \cdot 10^4 \text{ K}\Omega\text{m}$	$\rho = 1,1 \cdot 10^2 \text{ K}\Omega\text{m}$	$\rho = 9,5 \cdot 10^4 \text{ K}\Omega\text{m}$
T° = 18°	$\rho = 5 \cdot 10^4 \text{ K}\Omega\text{m}$	$\rho = 1,9 \cdot 10^2 \text{ K}\Omega\text{m}$	$\rho = 12,5 \cdot 10^4 \text{ K}\Omega\text{m}$
soit un écart de	26 %	39 %	23,5 %

Parkhomenko (8) a étudié le comportement des roches imprégnées d'eau en fonction de la T°. A des T° inférieures à 0°C la résistivité décroît avec la T° (Fig. 14). A des T° comprises entre 0° et 100°, la résistivité décroît avec la T° (Fig. 15) ; c'est dans ces conditions que nos mesures ont lieu. Au delà de 100°, la résistivité croît jusqu'à un seuil (environ 200°) pour lequel toute l'eau s'est évaporée, puis diminue de nouveau pour de plus fortes T°.

I.3.4.5. - Influence de la pression

Cette étude nécessitant un matériel sophistiqué dont nous ne disposons pas et de nombreux résultats ayant déjà été publiés nous rappelons que la résistivité varie peu avec la pression (figure 16) :

$$\Delta (\log \sigma / \Delta p) \approx 10^{-2} \text{ à } 10^{-3} / \text{kbar} \quad (13)$$

Au delà d'un certain seuil de pression l'effet de la pression est irréversible.

.../...

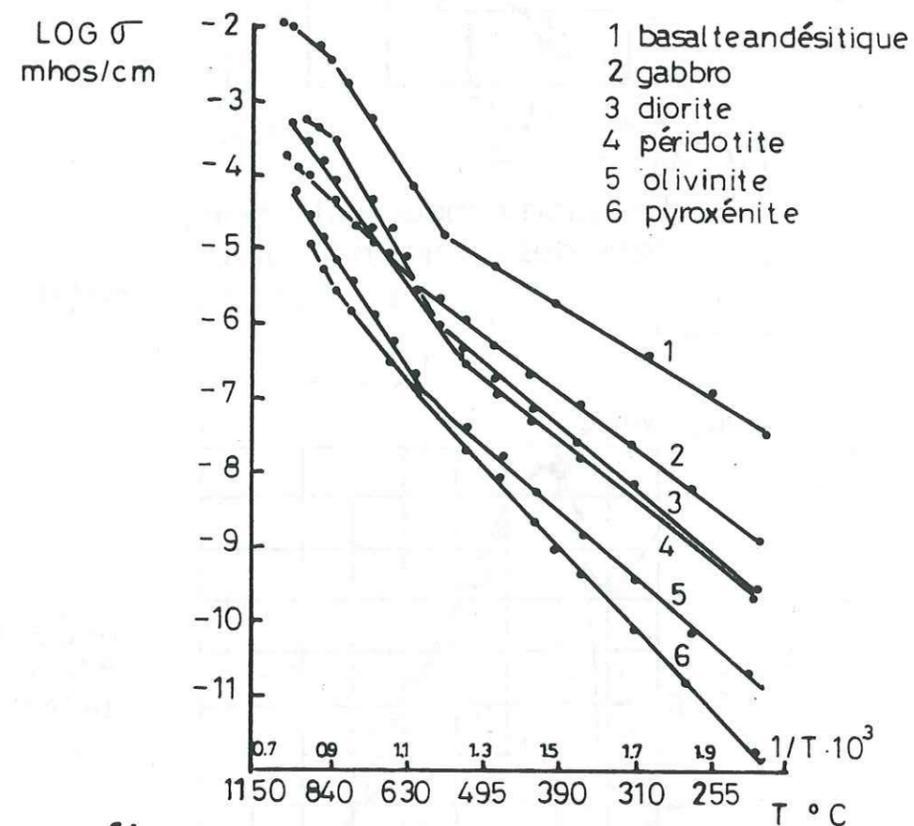


fig 13

Relation conductivité / température dans des roches ignées

ref (8)

.../...

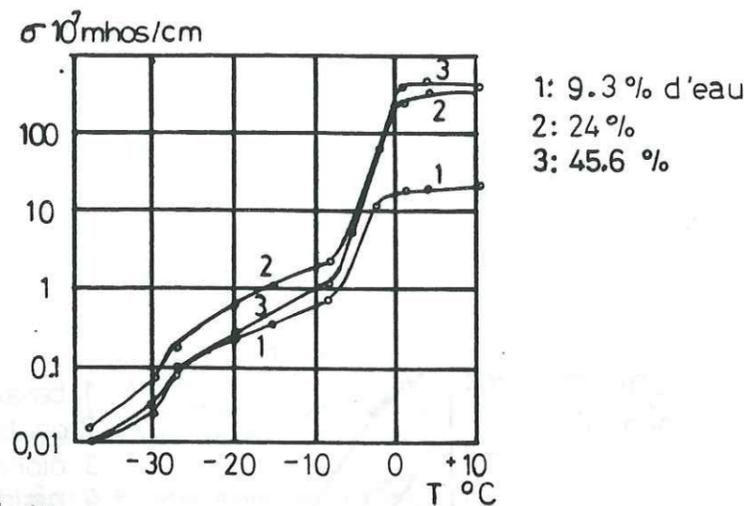


fig 14
Relation conductivité / température
dans des argiles humides
ref (8)

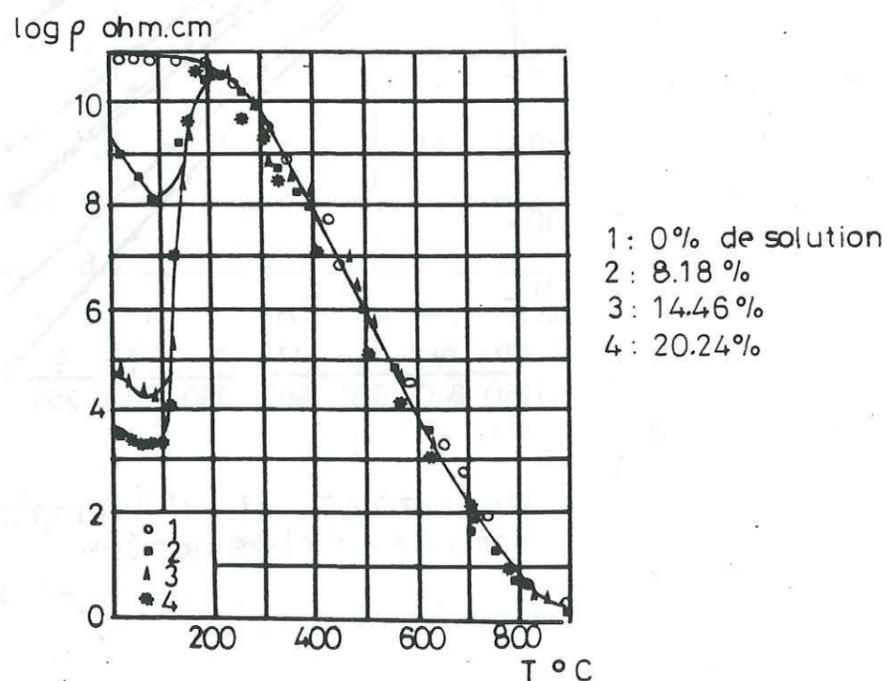


fig 15
Relation résistivité / température
dans des échantillons de charbon
imprégné d'une solution à 10% de NaCl
ref (8)

.../...

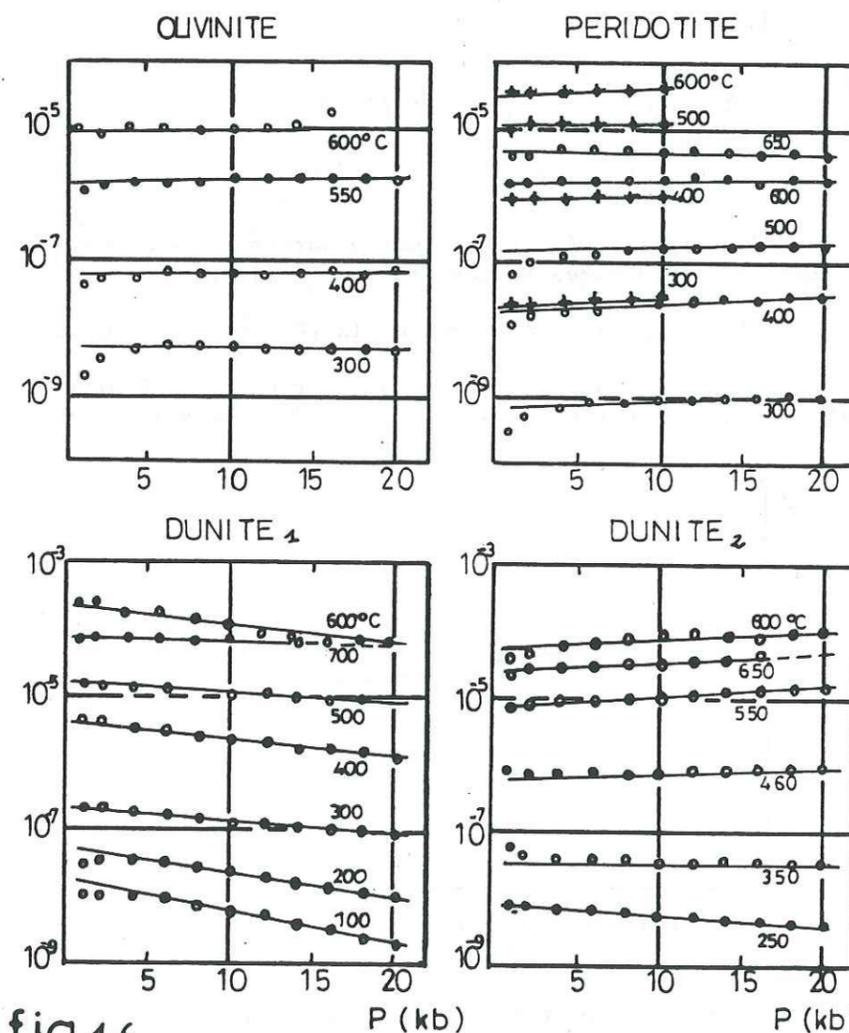


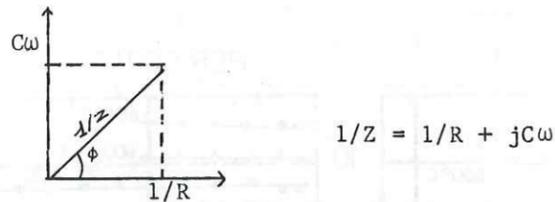
fig 16
Variation de la conductivité avec la
pression en fonction de la température
• 1^{er} chauffage
+ 2^{ème} chauffage
ref (13)

.../...

I.3.4.6. - Influence de la fréquence

Pour mettre en évidence ce phénomène, nous avons employé une méthode expérimentale différente de celle exposée précédemment. Un impédancemètre nous donne, dans le domaine des moyennes fréquences (de 1 kHz à 1MHz), la valeur de l'impédance Z de l'échantillon et le déphasage de l'intensité par rapport à la tension aux bornes de l'échantillon.

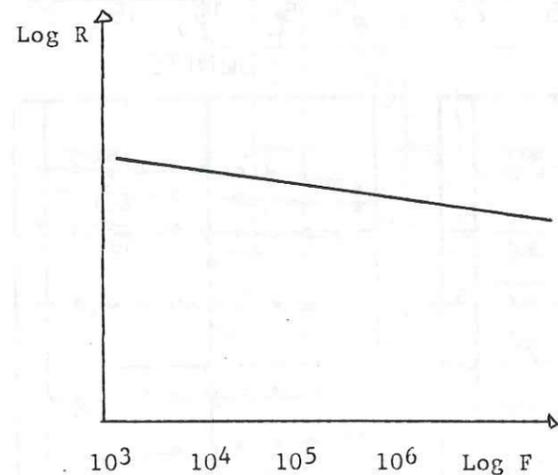
Comme nous l'avons vu précédemment l'équivalence électrique d'une roche est un circuit Résistance-Capacité en parallèle. Le diagramme de Fresnel d'un tel circuit se présente comme suit :



Connaissant 1/Z et φ on peut à partir de ces coordonnées polaires calculer les coordonnées rectangulaires : 1/R et Cω

d'où l'on tire la valeur de la résistance à chaque fréquence.

Quelle que soit la nature de la roche (à l'état sec), on trouve une courbe Log R en fonction de la fréquence du type suivant :



La résistance décroît avec la fréquence. On note que cette décroissance est d'autant plus rapide (pente de la courbe plus forte) que l'échantillon est résistant.

Dans le cas d'échantillons imprégnés d'eau, la résistivité est constante vis-à-vis de la fréquence, du fait d'une conduction par phase liquide. Un électrolyte ne présentant pas de variation de résistivité avec la fréquence, il est donc normal que les propriétés de l'électrolyte soient conservées au sein de la roche qu'il imprègne.

Keller (3) a observé un tel phénomène (figure 17) qu'il a étudié notamment en fonction de la T°. Il l'explique de la manière suivante :

Le terme R englobe deux phénomènes :

- . la conduction purement ohmique,
- . les phénomènes de perte diélectrique.

Le premier ne varie pas avec la fréquence. Le second est fonction de la fréquence puisqu'il est lié à la relaxation des dipôles dans le matériau ; en haute fréquence la relaxation est naturelle, par contre en basse fréquence on fait intervenir plutôt des mécanismes liés à la présence d'une couche d'eau entre les grains de la matrice.

Plus la roche est résistante plus elle se comporte comme un diélectrique donc plus les pertes diélectriques prédominent sur la conduction ohmique ce qui explique la variation du terme R avec la fréquence pour de tels matériaux.

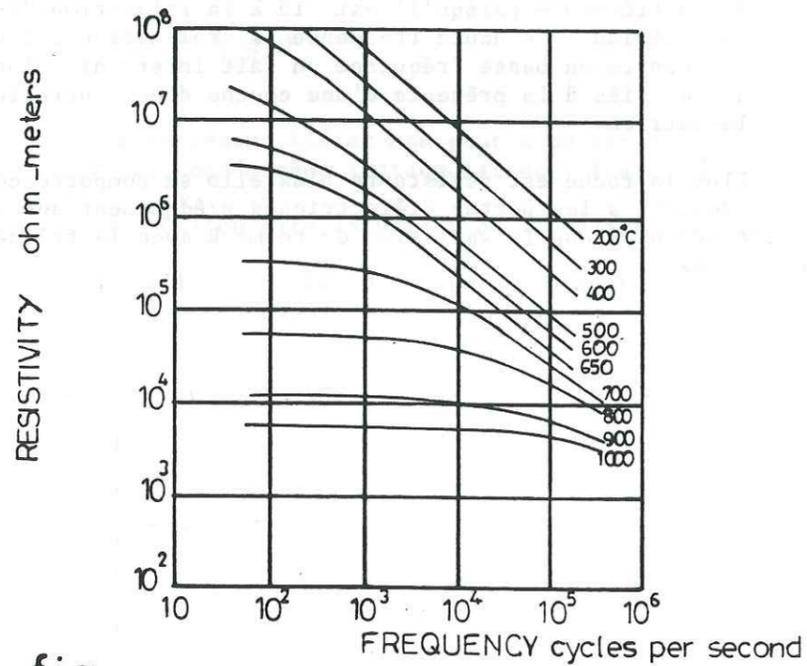


fig 17 Résistivité d'un échantillon de granodiorite mesurée en fonction de la fréquence pour différentes températures

ref (3)

I.4. - CONCLUSION

La résistivité électrique d'un milieu est la propriété fondamentale qui conditionne la circulation d'un courant et par là-même toutes les méthodes basées sur l'utilisation d'un champ électrique ou électromagnétique.

Les mesures de propriétés électriques des roches vont beaucoup plus loin que la géophysique ; cependant, au terme de ce chapitre, on peut avancer les conclusions suivantes :

- Il est possible d'étudier, en laboratoire, de manière relativement rapide et fiable, des échantillons rocheux dans une plage de fréquence étendue,

La technique mise au point ne demande pas de trop grands moyens (au niveau instrumentation et théorie). Elle est donc abordable dans le cadre d'un laboratoire non spécialisé.

Le problème délicat des contacts électriques avec l'échantillon a été réglé de manière satisfaisante.

Les résultats obtenus sont comparables à ceux de la littérature spécialisée sur le sujet.

Les améliorations envisageables porteraient essentiellement sur la rigueur des conditions de mesures (T°, humidité). Ceci nécessite un matériel plus sophistiqué.

D'un point de vue théorique, nous retiendrons principalement de cette exploration la sensibilité de la résistivité vis à vis de facteurs internes, tels que la composition minéralogique, la texture, la perméabilité, l'anisotropie des structures, et externes, tels que la température, la présence d'eau et la fréquence.

CHAPITRE II

CHAMPS MAGNETIQUES ASSOCIES A DES COURANTS

MAGNETORESISTIVITE

Nous venons de voir que la résistivité d'une roche et par extension d'un terrain est une grandeur physique à laquelle on accède au moyen d'une mesure de tension ou d'intensité.

Une autre manière de procéder consiste à étudier les effets magnétiques associés à la circulation du courant. C'est cette technique qu'emploient les méthodes magnétorésistives.

Dans le présent chapitre, nous rappelons les relations existant entre les phénomènes électriques et phénomènes magnétiques dans le cas statique (courant continu). Une étude de la méthode magnétorésistive, méthode dont la source d'émission est une circulation de courant entre deux électrodes ou le long d'un câble, vient ensuite illustrer la théorie.

II.1 - DEFINITIONS

La circulation d'un courant électrique dans un milieu est due au déplacement de charges électriques.

La force qu'exercent ces charges sur une charge ponctuelle q placée en un point M de l'espace est la somme de deux termes :

l'un indépendant de la vitesse v de cette charge, l'autre qui en dépend.

- le premier, appelé force électrique s'exprime sous la forme $q\vec{E}$. q étant la charge mobile, E le champ électrique au point considéré,

- le deuxième terme, appelé force magnétique, s'écrit sous la forme $q\vec{v} \times \vec{B}$,

- la force totale subie par la charge q est donc de la forme :

$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

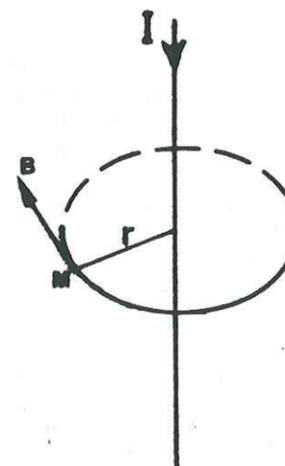
E est appelé champ électrique au point considéré ; quand les charges agissantes sont immobiles il s'identifie au champ électrostatique.

B est appelé induction magnétique. Il n'existe que si les charges sont en mouvement.

Donc un courant électrique circulant dans un milieu conducteur engendre à l'extérieur de celui-ci un champ magnétique.

II.2 - RAPPELS

II.2.1. - INDUCTION PRODUITE PAR UN FIL RECTILIGNE INDEFINI



La mesure de l'induction magnétique \vec{B} produite par un fil rectiligne indéfini montre que les lignes d'induction sont des cercles ayant le fil pour axe.

- Le sens de \vec{B} se définit par l'intermédiaire du bonhomme d'Ampère : pour un observateur ayant le courant qui le traverse des pieds à la tête, la rotation s'effectue de sa droite vers sa gauche c'est-à-dire dans le sens qui pour lui est trigonométrique.

- Sa valeur à distance r du fil est proportionnelle au courant I qui parcourt le fil et inversement proportionnelle à r

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r\pi} \quad (10) \text{ (Biot et Savart)}$$

μ_0 est une constante qui dans le système MKSA a pour valeur $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

On introduit le vecteur \vec{H} , appelé champ magnétique, et défini en tous points de l'espace par :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (11)$$

D'après les relations (10) et (11), le long d'un cercle d'induction de rayon r on a :

$$\int_r \vec{H} d\vec{l} = I \quad (12) \text{ Théorème d'Ampère}$$

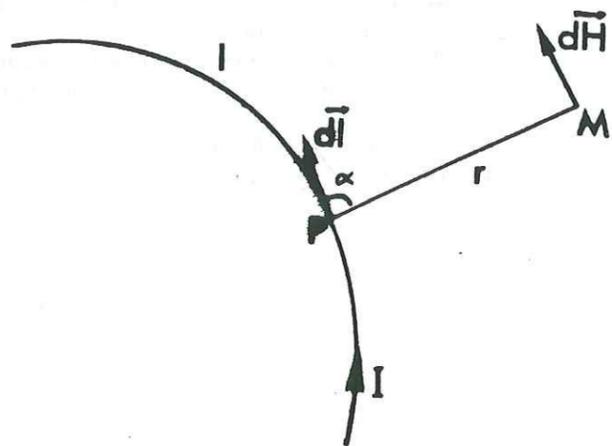
Unité de champ magnétique

L'écriture du théorème (12) conduit à prendre pour unité l'Ampère par mètre A/m

Propriété de l'induction magnétique

L'induction magnétique produite par des courants quelconques a un flux conservatif.

Loi de Laplace



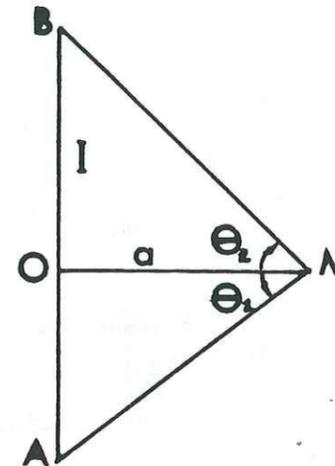
Si nous considérons la circulation d'un courant I le long de l (voir schéma ci-contre) on peut attribuer à tout élément de circuit dl , parcouru par un courant continu I et placé au voisinage d'un point P , un champ magnétique $d\vec{H}$ qui, au point M , est défini comme suit :

- $d\vec{H}$ est perpendiculaire au plan défini par dl et M ,
- il est orienté de la droite vers la gauche du bonhomme d'ampère regardant vers M .

son intensité est : $dH = \frac{Idl \sin \alpha}{4\pi r^2} \quad (13)$

.../...

II.2.2. - Champ magnétique associé à un fil rectiligne de longueur finie



Considérons la circulation d'un courant entre deux points A et B (voir schéma ci-contre), en faisant la somme de tous les champs magnétiques partiels, que l'on obtient en appliquant la loi de Laplace, on a :

$$H = \frac{I}{4\pi a} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \quad (14)$$

Il en résulte que :

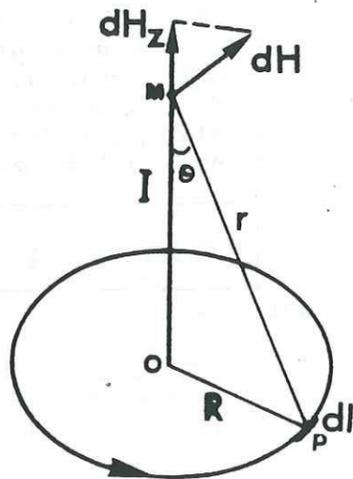
. quand le point M s'éloigne du fil conducteur, le champ magnétique en ce point tend vers zéro puisque a tend vers l'infini.

. si la distance a est négligeable vis-à-vis de OA et OB , les angles θ_1 et θ_2 sont respectivement égaux à $-\pi/2$ et $+\pi/2$ et le champ produit est celui d'un fil rectiligne indéfini :

$$H = \frac{I}{2\pi a}$$

.../...

II.2.3. - Champ magnétique produit par une spire circulaire en un point de son axe



Pour des raisons de symétrie, il est évident que le champ \vec{H} est dirigé suivant l'axe.

Or le champ $d\vec{H}$ associé à l'élément $d\vec{l}$ est perpendiculaire à MP et vaut :

$$dH = \frac{I dl}{4\pi r^2}$$

Sa composante sur l'axe de la spire vaut

$$dH_z = \frac{I dl \sin \theta}{4\pi r^2}$$

Le champ total est donc

$$H = \frac{2 IR \sin \theta}{4\pi r^2}$$

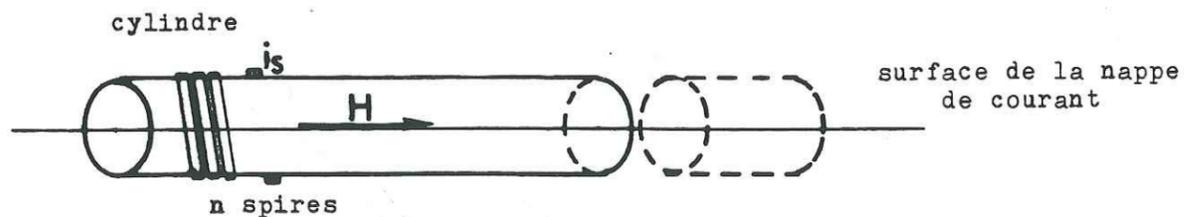
qui peut s'écrire :

$$H = \frac{I}{2} \frac{R^2}{r^3}$$

En particulier au centre de la spire, le champ a pour valeur

$$H = \frac{I}{2R}$$

II.2.4. - Champ magnétique créé par un solénoïde



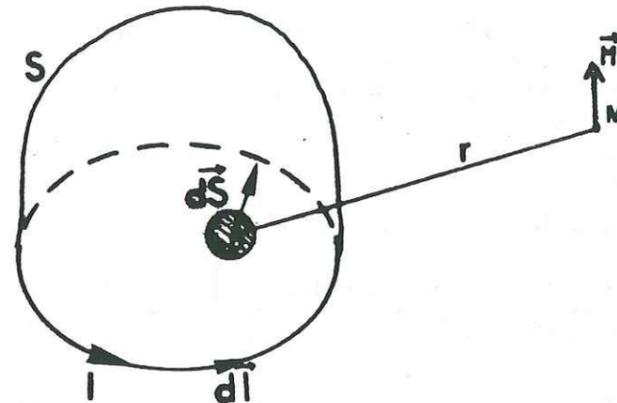
Le champ magnétique H est parallèle à l'axe du cylindre et uniforme à l'intérieur de la nappe. Il est orienté dans un sens tel que les lignes de courant tournent positivement autour de lui.

Sa valeur est égale à $H = nI$ (15)

Dans le système MKSA, H en A/m
 I : intensité du courant en A
 n : nombre de spires par mètre

II.2.5. - Définition du moment magnétique

Soit un circuit filiforme parcouru par un courant I



S est une surface quelconque qui s'appuie sur le contour du circuit

Un tel circuit peut être caractérisé par un moment magnétique M

$$M = I \iint_S \vec{s} \, dS \quad (16)$$

ce vecteur ne dépend que du contour du circuit.

Si ce contour est plan et que l'on choisit comme surface S , la portion de plan qu'il limite, M est alors perpendiculaire au plan du circuit et numériquement égal à IS .

Son sens est tel que le courant circule dans le sens positif de rotation autour de M .

II.2.6. - Dipôle ou doublet magnétique

Un circuit peut être appelé dipôle magnétique quand des dimensions sont assez faibles pour que l'induction B , produite sur lui par d'autres circuits, puisse être considérée comme constante en tout point d'une surface S qui s'appuie sur lui.

II.2.7. - Perméabilité magnétique

Un corps quelconque placé dans un champ magnétique \vec{H} devient un dipôle magnétique d'aimantation J .

On constate d'une manière générale que J a la même direction que H et que leurs grandeurs sont proportionnelles.

$$\vec{J} = \chi \vec{H}$$

χ est la susceptibilité magnétique de la substance.

Le vecteur induction magnétique à l'intérieur d'un corps aimanté est donné par la relation :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J})$$

$$\text{soit } \vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}$$

μ_0 : perméabilité magnétique du vide.

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

μ est la perméabilité magnétique de la substance et est égale au rapport constant de l'induction au champ.

On introduit souvent le coefficient sans dimension μ_r ,

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{perméabilité relative}$$

Dans le cas des roches, la perméabilité magnétique est négligeable excepté dans de rares cas et principalement quand la roche contient une forte concentration de minéraux ferromagnétiques.

La perméabilité magnétique relative de quelques uns de ces minéraux est égale à :

$$\mu_r = 5 \quad \text{Magnétite}$$

$$\mu_r = 2,55 \quad \text{Pyrrhotite}$$

$$\mu_r = 1,55 \quad \text{Ilménite}$$

$$\mu_r = 1,05 \quad \text{Hématite}$$

$$\mu_r = 1 \quad \text{Pyrite}$$

De tous ces minéraux, le seul que l'on trouve en suffisamment grande concentration pour pouvoir modifier de manière significative la perméabilité d'une large masse de roches de la perméabilité du vide, est la magnétite.

Le diagramme suivant situe la perméabilité magnétique de quelques roches en fonction du % volumique de magnétite.

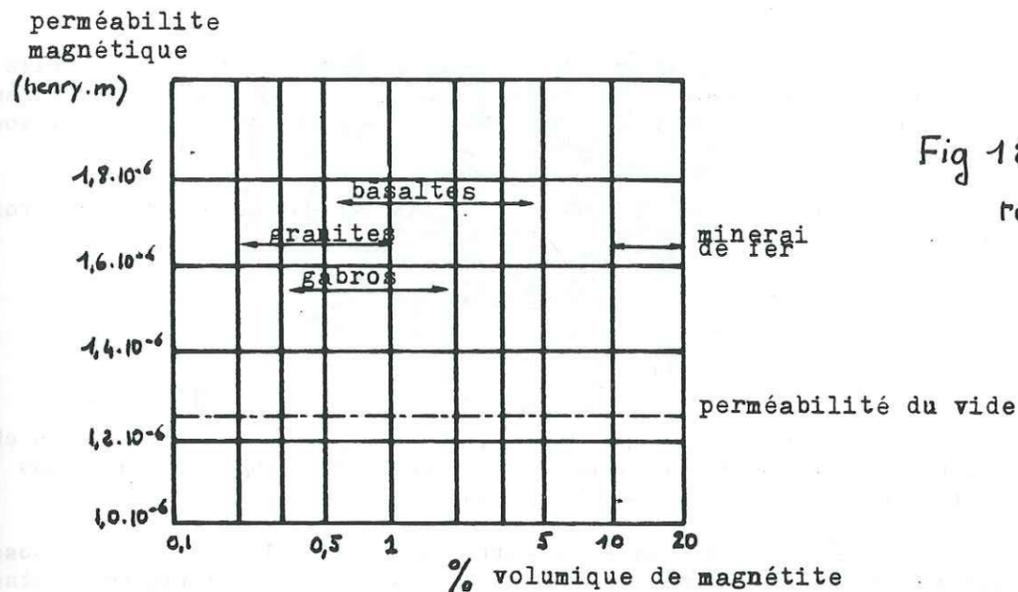


Fig 18
ref (11)

D'une manière générale, pour les roches, $\mu = \mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ en MKA
Donc $B = \mu_0 H$

II.3. - INTERET DE TOUS CES PHENOMENES POUR LE GEOPHYSICIEN : LA
MAGNETORESISTIVITE

En injectant dans le sol un courant électrique, la circulation de celui-ci, à travers le volume de terrain concerné, va engendrer un champ magnétique mesurable en surface.

Ce champ magnétique est fonction :

- . de l'intensité du courant (Formule 14),
- . de la distance entre le point de mesure et le lieu de passage du courant (Formule 14)).

Ainsi les mesures de champ magnétique au-dessus du terrain fournissent-elles au géophysicien des renseignements sur la configuration du sous-sol : distribution des résistivités, anomalies, hétérogénéités. Cette technique est celle de la prospection magnétorésistive.

En prospection électrique classique un courant est injecté dans le sol en deux points A et B et la tension résultante est mesurée entre deux points M et N (Schlumberger).

En prospection magnétorésistive, la mesure porte sur la distribution du champ magnétique associée à la circulation de courant entre deux points A et B.

Proposée dès 1933 cette méthode a connu un développement significatif après 1976 (14)(16) .

Elle semble particulièrement appropriée dans le cas difficile de recouvrements conducteurs hétérogènes masquant les objectifs intéressants. La mesure n'imposant aucun contact avec le sol, cette technique est souvent employée pour des mesures dans les forages (hydrogéologie) .

La méthode a fait l'objet d'une investigation théorique approfondie.

La relation de base est la suivante :

$$B(x,y,z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \nabla V \nabla \sigma \, d\tau$$

Les anomalies au point P (x,y,z) s'expriment en fonction du champ électrique (∇V) et de la conductivité électrique (∇σ) évaluée dans l'élément de volume dτ situé à une distance r de P.

Une des conséquences de cette formule est l'absence de composante verticale du champ magnétique au dessus-d'un sol de résistivité constante et plus généralement au dessus d'une structure tabulaire.(15)(16)

La méthode décèle bien les hétérogénéités de conductivité dans un terrain.

Elle requiert une instrumentation de haute sensibilité pour les mesures du champ magnétique ; de ce fait elle s'inscrit naturellement dans les objectifs du CEA/LETI.

II.4 - TECHNIQUES DE MESURES

Nous parlerons de deux appareils de mesure du champ magnétique, fabriqués au laboratoire de magnétométrie du LETI ; les mesures d'induction magnétique seront développées dans un autre chapitre.

II.4.1. - Les magnétomètres directs à couche mince de Fer-Nickel (photos 1 et 2)

Ces magnétomètres ont l'avantage d'être peu encombrants, directs, et de fonctionner dans un domaine de fréquence étendue.

II.4.1.1. - Principe de fonctionnement (Chiron 1979)

L'élément sensible de ces capteurs est une couche mince ferromagnétique cylindrique, à anisotropie uniaxiale, orientée C et monodomaine.

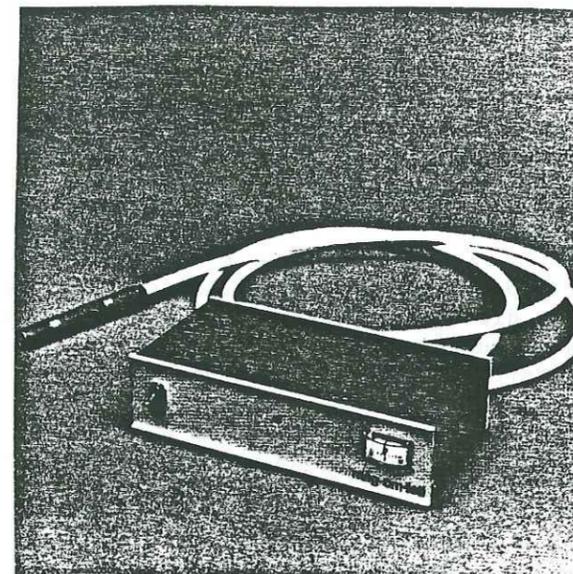
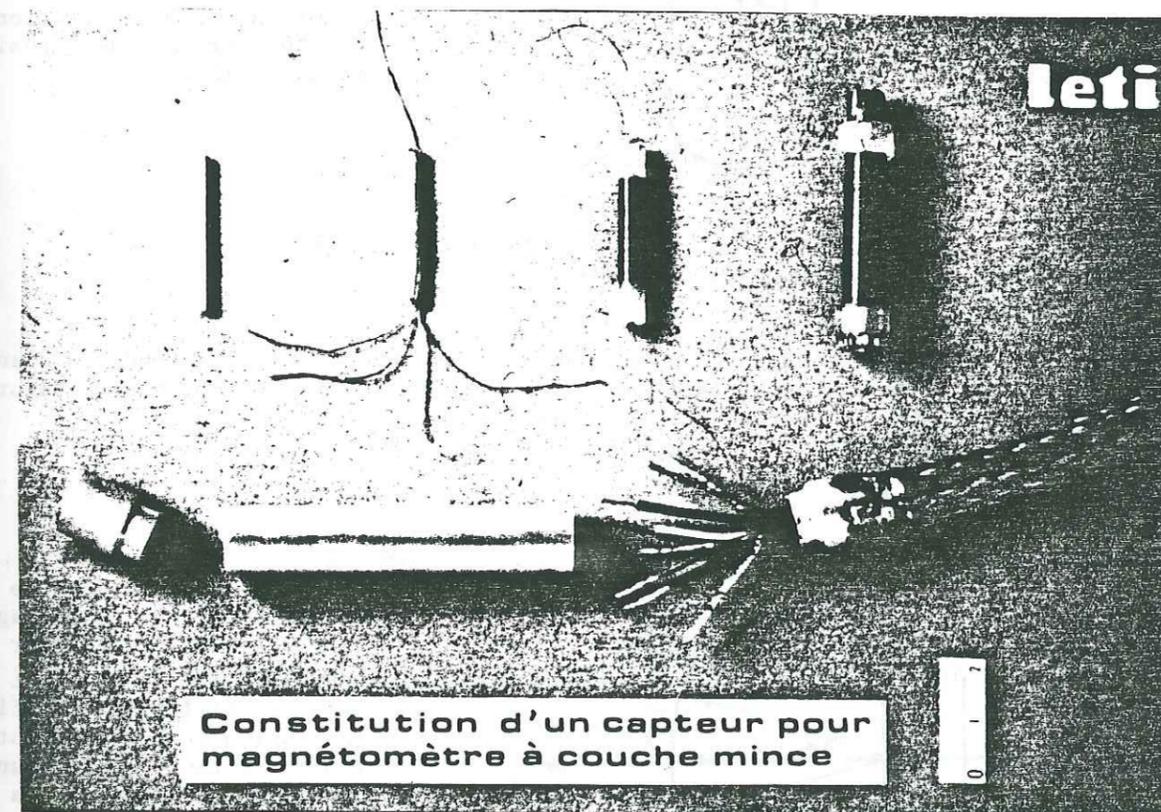


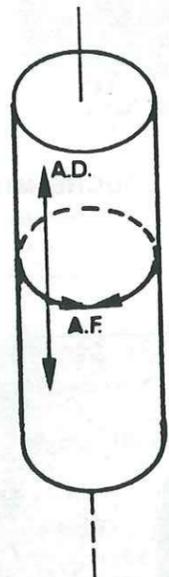
PHOTO n°1 MAGNETOMETRE A COUCHE MINCE



Constitution d'un capteur pour magnétomètre à couche mince

PHOTO n°2

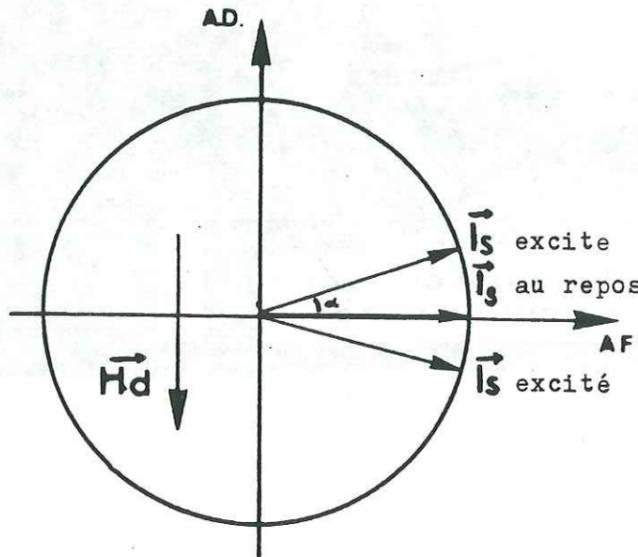
Un matériau ferromagnétique possède une aimantation représentée par un vecteur. Le matériau se présente sous forme de couche mince si ce vecteur reste, quel que soit le point du matériau considéré, parallèle à la surface du matériau, sous l'action de champs démagnétisants. L'épaisseur d'une couche ne dépasse pas quelques milliers d'Angstrom. Sur cette surface, il existe des directions préférentielles d'alignement du vecteur d'aimantation (A.F). D'autres directions demandent beaucoup d'énergie et ce sont des axes de difficile aimantation (A.D).



Pour une couche mince préparée sous certaines conditions, il existe dans sa surface un seul axe facile et un seul axe difficile. On parle alors d'anisotropie uniaxiale.

Les axes d'anisotropie ne sont pas orientés, l'aimantation peut donc prendre deux positions stables.

En l'absence de tout champ magnétique extérieur l'énergie d'anisotropie de la couche fait que le vecteur intensité d'aimantation à saturation, I_s , est dirigé suivant l'axe facile.



mouvements de l'aimantation

L'application au niveau de cette dernière, d'un champ magnétique H_d faible (inférieur au champ d'anisotropie H_k) et dirigé suivant l'axe de difficile aimantation entraîne la rotation du vecteur I_s , d'un angle déterminé par rapport à sa position au repos, dans le sens d'un alignement sur le champ.

.../...

Si le champ d'excitation H_d est sinusoïdal, les oscillations de I_s seront symétriques par rapport à l'axe de facile aimantation. Par une boucle de prélèvement d'axe parallèle à l'axe facile, on peut capter ces oscillations et les transformer en variations de tension. Les variations de tension induite se font à une fréquence double de celle du champ d'excitation.

Si un champ continu, ou lentement variable, se superpose au champ d'excitation, la symétrie des oscillations est rompue et l'on voit apparaître une composante à la fréquence fondamentale dans la tension recueillie. La détection de cette dernière nous donne la valeur du champ extérieur dans la direction de l'axe difficile du capteur.

En résumé, un capteur magnétique de type couche mince, en présence d'un champ magnétique (champ géomagnétique, électromagnétique...) nous délivre une tension dont :

- La valeur est proportionnelle ($10 \gamma / mv$) à la valeur de la projection du vecteur champ magnétique sur la direction de l'axe du capteur
- Le signe nous renseigne sur le sens de ce vecteur.

II.4.1.2. - Performances

Les caractéristiques essentielles du magnétomètre à couche mince LETI sont :

- dans le domaine 0,01 - 1 Hz bruit < 0,05 γ
100 - 50000 Hz bruit de 0,2 γ eff.
- consommation : 10 mV
- une bande passante importante (10 KHz)
- un encombrement et un poids faible : 100 cm³ pour le capteur
Le capteur + l'électronique pèsent environ 1,2 kg

II.4.2. - Les magnétomètres à Résonance Magnétique Nucléaire (R.M.N.) (photo 3)

Ce sont des capteurs qui mesurent le champ magnétique total grâce à une équivalence entre champ et fréquence donnée par le rapport gyromagnétique du proton.

Ces appareils permettent de mettre en évidence de très faibles variations de champ (10^{-7} Oersted soit 0,1 γ) avec une bande passante de 1Hz au continu.

.../...

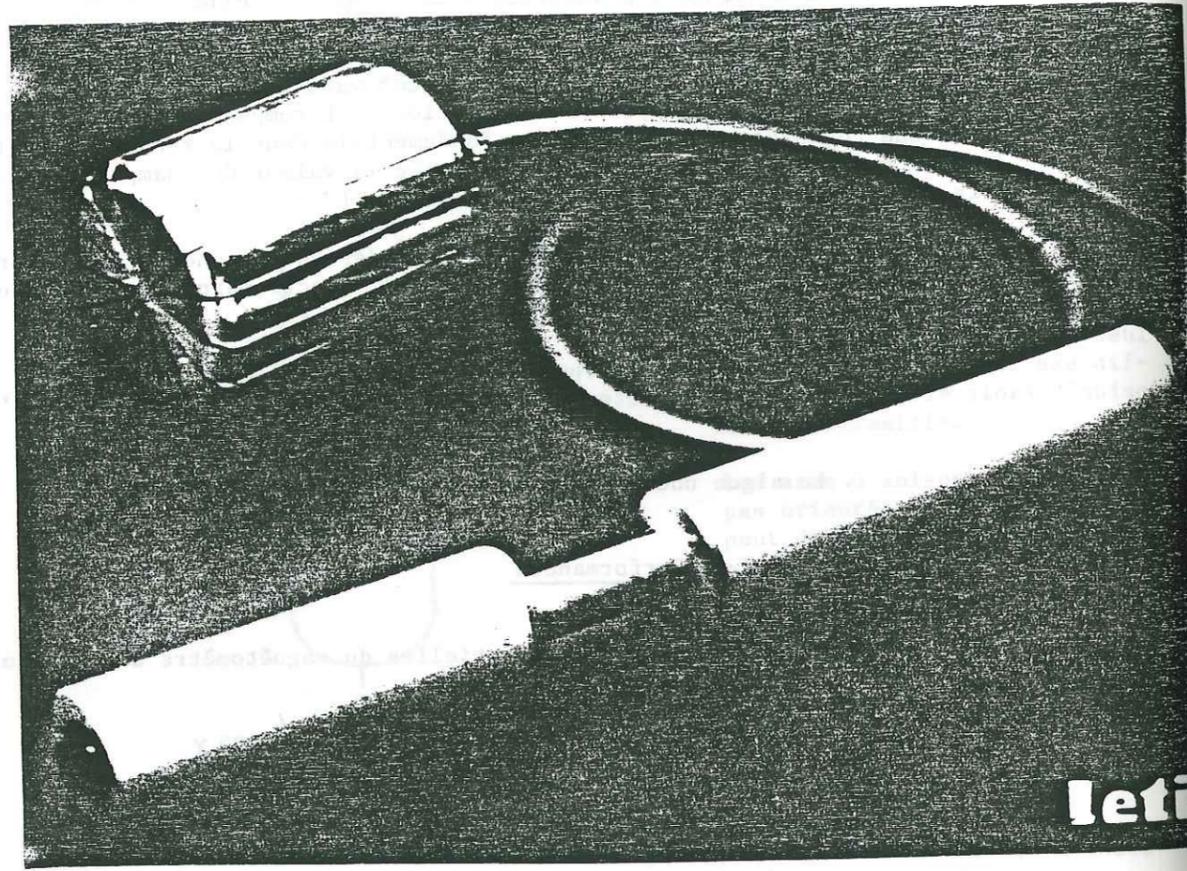


PHOTO n°3 MAGNETOMETRE A R.M.N

II.4.2.1. - Rappels sur la résonance nucléaire

Un noyau isolé possède un moment cinétique \vec{T} et un moment magnétique $\vec{\mu}$, colinéaires entre eux.

γ est le rapport gyromagnétique $\gamma = \frac{\vec{\mu}}{\vec{T}}$

Soumis à l'action d'un champ \vec{H}_0 , le moment magnétique peut prendre deux positions d'équilibre :

- . parallèle au champ,
- . anti-parallèle au champ.

Si l'on a N noyaux soumis au champ magnétique on aura :

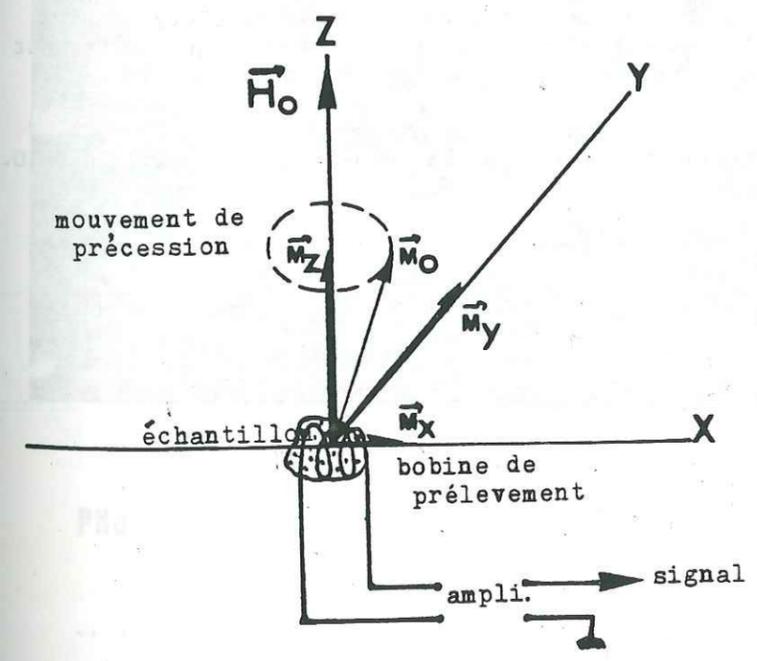
- . N+ noyaux parallèles
- . N- noyaux anti-parallèles

Le rapport $\rho = \frac{N+ - N-}{N}$ exprime la polarisation qui est proportionnelle à H_0

La résultante macroscopique N+ - N- possède :

- . un moment cinétique de spin $\vec{\Sigma}$
- . un moment magnétique

avec toujours $\gamma = \frac{M_0 \vec{\mu}}{\vec{\Sigma} \vec{T}}$



Si, par une perturbation artificielle, on déplace M_0 de sa position initiale d'équilibre dans le champ H_0 , champ ambiant, on observe la précession du moment M_0 autour de l'axe de ce champ.

La fréquence de cette précession est donnée par la relation de Larmor.

$$F_p = \frac{\gamma H_0}{2\pi} \text{ avec } \gamma = 2,675 \cdot 10^{-4} \text{ Gauss}$$

Une bobine, placée suivant un axe perpendiculaire à la direction du champ, est le siège d'une f.e.m., induite par la précession de Mo (composante suivant l'axe des x).

La principale difficulté provient de ce que le magnétisme des protons est extrêmement faible et en pratique inobservable dans le champ terrestre. Plusieurs procédés ont été proposés pour augmenter ce magnétisme. La prépolarisation est le plus utilisé. En excitant convenablement les électrons d'un radical libre on a montré qu'il est possible d'augmenter considérablement le magnétisme des protons. C'est ainsi que A. SALVI (48)(49)(50) a étudié un capteur de magnétométrie très performant.

Les mécanismes qui décrivent l'interaction entre des protons et des électrons dans un liquide sont très complexes. Nous nous bornerons à une explication succincte du phénomène. Si l'on prend un liquide contenant à la fois des protons et des électrons et si l'on fournit de l'énergie à ces électrons, il peut exister des transferts d'énergie entre les électrons et les protons. Si ces transferts existent, ils se traduisent par une modification du magnétisme des protons. Leurs moments magnétiques se trouvent alors multipliés par un coefficient appelé facteur de polarisation. L'énergie est fournie aux électrons par l'excitation de l'une de leurs raies de résonance. Les facteurs de polarisation obtenus sont, pour certains liquides, considérables (jusqu'à 4000) ; ces facteurs peuvent être positifs ou négatifs.

Le capteur CEA/LETI utilise deux liquides différents. Ces liquides sont choisis de façon qu'une raie à polarisation positive du premier liquide coïncide avec une raie à polarisation négative du second liquide. Chaque liquide est contenu dans un flacon, lui-même entouré d'un bobinage ; le tout est placé à l'intérieur d'une cavité coaxiale V.H.F. (Very High Frequency) (photo 4 et figure 19). Un générateur HF de quelques watts est relié à cette cavité et sert à exciter les électrons des deux liquides.

Le schéma électrique de la sonde est représenté sur la figure 20.

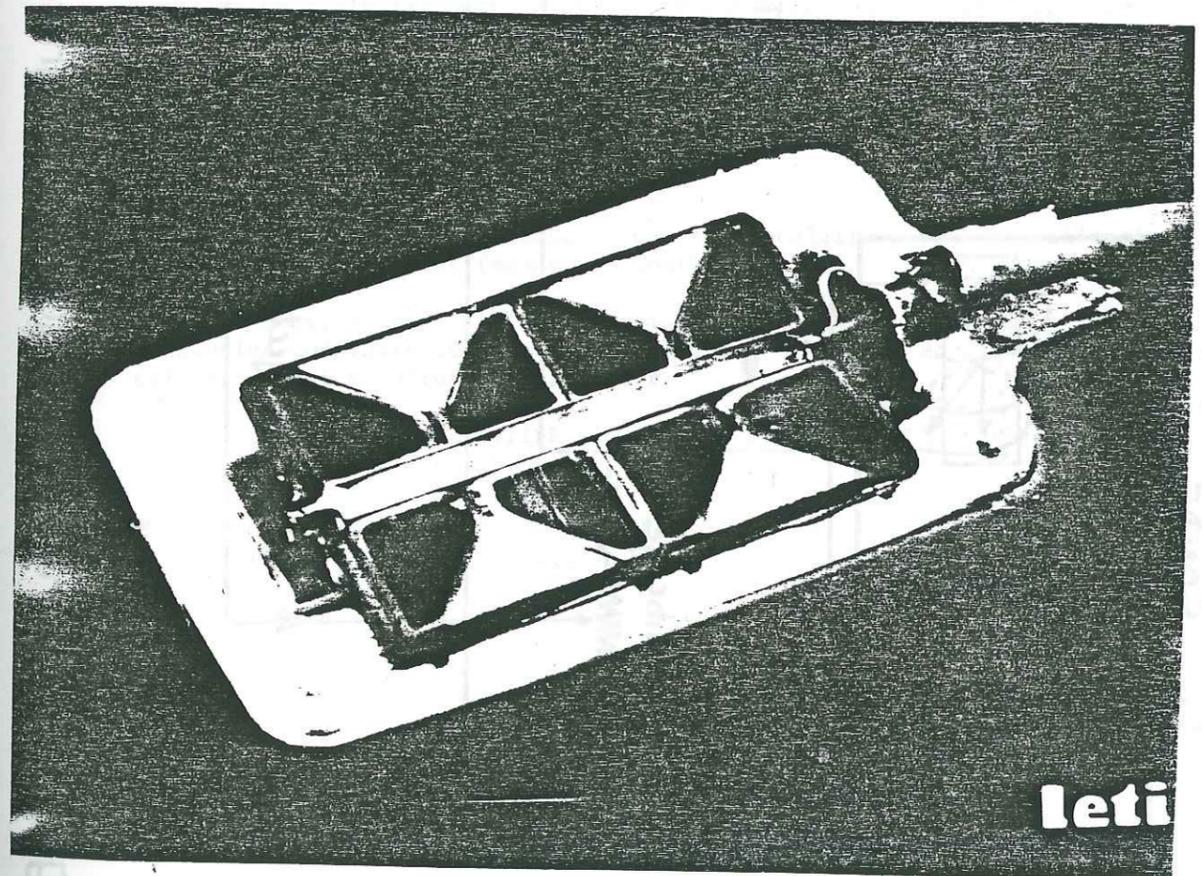
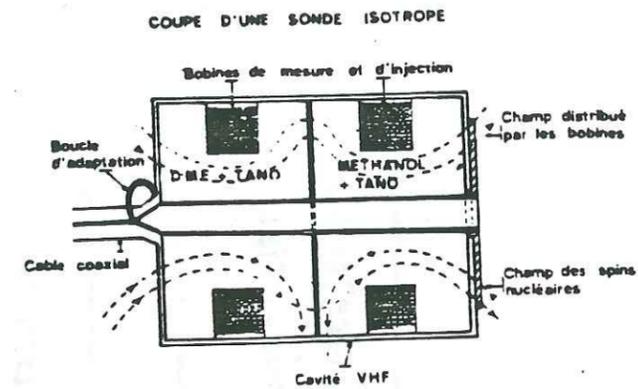


PHOTO n°4 COUPE DE LA TETE D'UNE SONDE

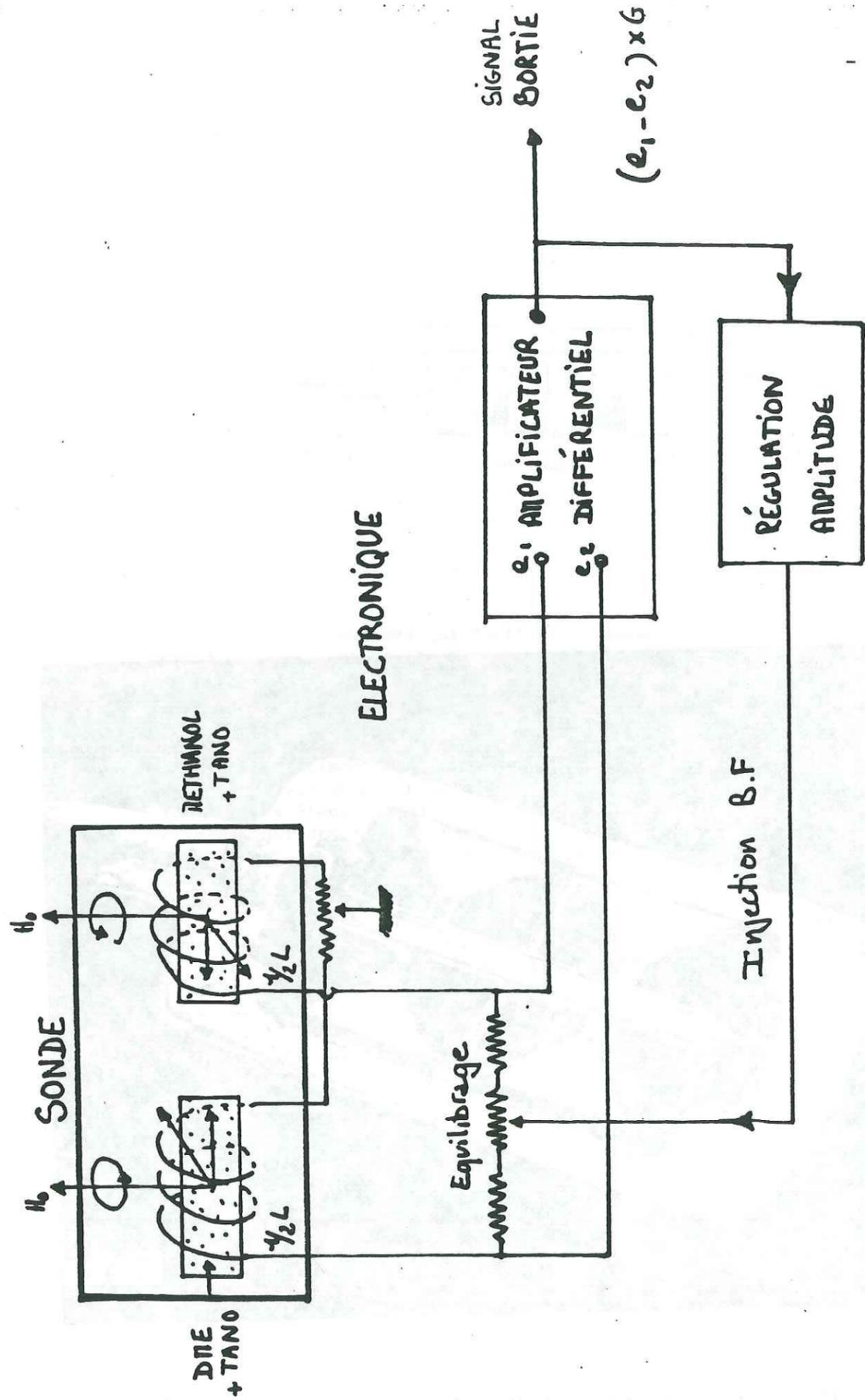


fig 20 Schéma synoptique du magnétomètre à R.M.N (l.g.t.i)

ref (8)

Les bobines sont montées en opposition, servant à la fois pour l'injection du champ H_1 (excitation de la résonance nucléaire) et à capter les signaux induits par la précession des spins.

L'injection du champ H_1 s'effectue par l'intermédiaire d'un potentiomètre d'équilibrage qui permet d'égaliser les deux tensions induites dans les bobines afin que leur différence soit nulle en l'absence de résonance nucléaire.

Dès que, par polarisation, le phénomène apparaît, les deux tensions correspondantes induites dans les bobines s'ajoutent dans l'amplificateur différentiel puisque déphasées de π entre elles (raies inversées). Un système de régulation permet de maintenir constante l'amplitude de la tension d'injection.

La forme des deux bobines est calculée pour que le champ excitant la précession, H_1 , ait toujours une composante utile, quelque soit la direction du champ que l'on mesure H_0 . L'ensemble forme une boucle, le réglage de la valeur du gain (G) permet d'entretenir la précession. C'est donc un oscillateur nucléaire dont la fréquence est directement liée à la valeur du champ (H_0) auquel est soumis l'ensemble des spins.(8)

II.4.2.2. - Performances

La mesure d'une fréquence quantité scalaire permet l'utilisation du capteur en mouvement (mesure en continu).

Ceci, joint à son faible poids, sa faible consommation et une conception modulaire le rend très adapté non seulement en prospection au sol mais aussi en aéroporté et en mer.

Enfin, la sensibilité ($0,01 \gamma$) le classe dans la catégorie des magnétomètres à haute sensibilité.

II.5 - ETUDE EXPERIMENTALE DES EFFETS ASSOCIES A LA CIRCULATION D'UN COURANT

Pour nous familiariser pratiquement avec le comportement des phénomènes électromagnétiques nous avons effectué une étude de terrain ainsi que quelques mesures en laboratoire. Le travail a été réalisé avec un capteur magnétique à couche mince ; cet appareil relativement récent n'avait encore jamais été utilisé sur le terrain en géophysique. Il s'agissait aussi d'étudier son comportement.

II.5.1. - APPAREILLAGE

II.5.1.1. - Emission

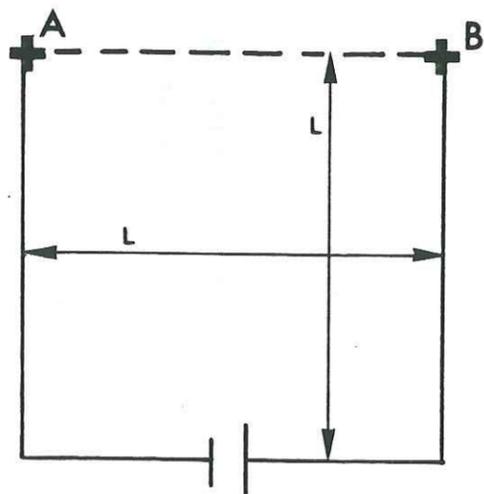
Le signal est fourni par 2 piles de 12 V associées à un onduleur et un redresseur de courant. La tension délivrée est de 300 volts.

Deux électrodes en cuivre assurent l'injection du courant dans le sol (jusqu'à 300 mA pour un sol bon conducteur).

On émet un signal carré en inversant par un interrupteur le sens de circulation du courant environ toutes les 3 secondes, ceci pour minimiser la polarisation des électrodes et améliorer la lecture de l'anomalie mesurée.

Le câble reliant les électrodes à l'émission doit être très long pour pouvoir s'éloigner au maximum du capteur afin d'éviter les effets parasites.

La configuration idéale est le dispositif carré représenté ci-dessous :



II.5.2. - Réception (Photo 5)

Le capteur, un magnétomètre à couche mince disposé sur un trépied avec table orientable (verticalement et horizontalement),

Un petit enregistreur graphique (Minigor) qui trace les variations du champ électromagnétique dans le temps,

Entre les deux, un compensateur qui permet d'annuler le signal du au champ magnétique terrestre et un filtre pour améliorer le signal à la réception (passe bas 0,5 Hz puisque l'on travaille à environ 0,3 Hz).

II.5.2. - Configuration de la manipulation "Montbonnot"

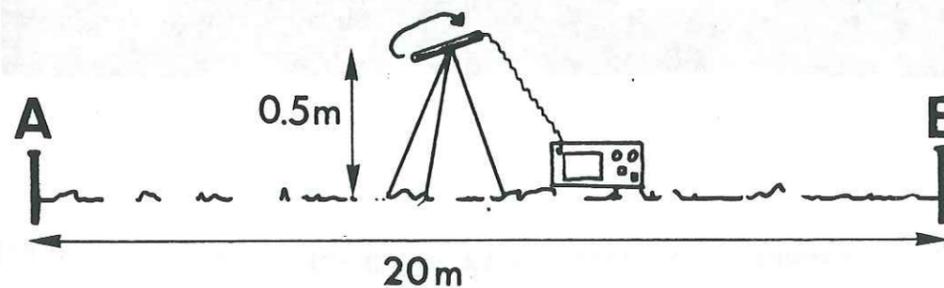
Il nous fallait un terrain relativement calme du point de vue magnétique (fils électriques, voie ferrée, clôture à proscrire...) et proche de Grenoble.

Un champ relativement isolé a été choisi vers Montbonnot.

Le terrain légèrement humide (époque : mars) permettait de faire circuler un courant de 250 mA sans épuiser trop rapidement les piles.

Une mesure du bruit magnétique donne une valeur moyenne de 1 , ce qui est tout à fait acceptable pour les mesures à effectuer. (Figure 21).

II.5.3. - Rotation du capteur dans le plan horizontal



La mesure du champ magnétique au centre du dispositif AB, capteur en rotation dans le plan horizontal nous permet de tracer la courbe de la figure 22.

Lors d'une simulation en laboratoire les résultats de la figure 23 avaient été obtenus.

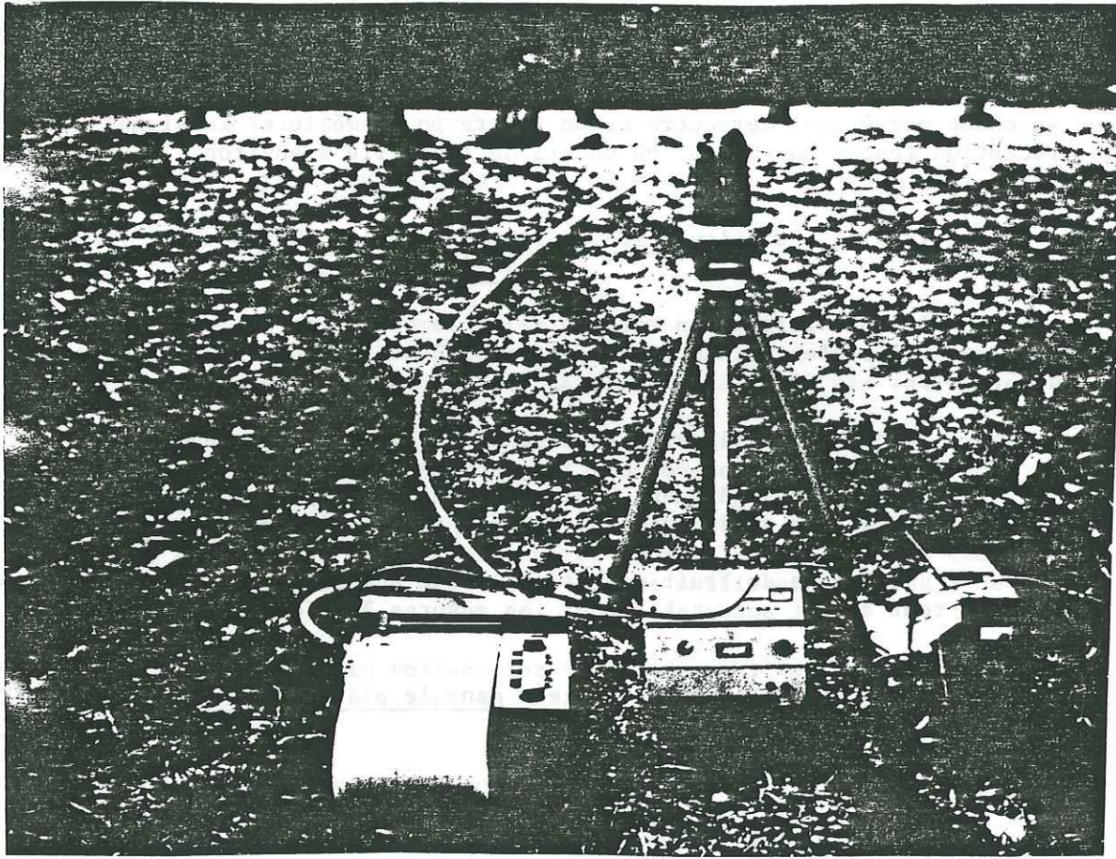
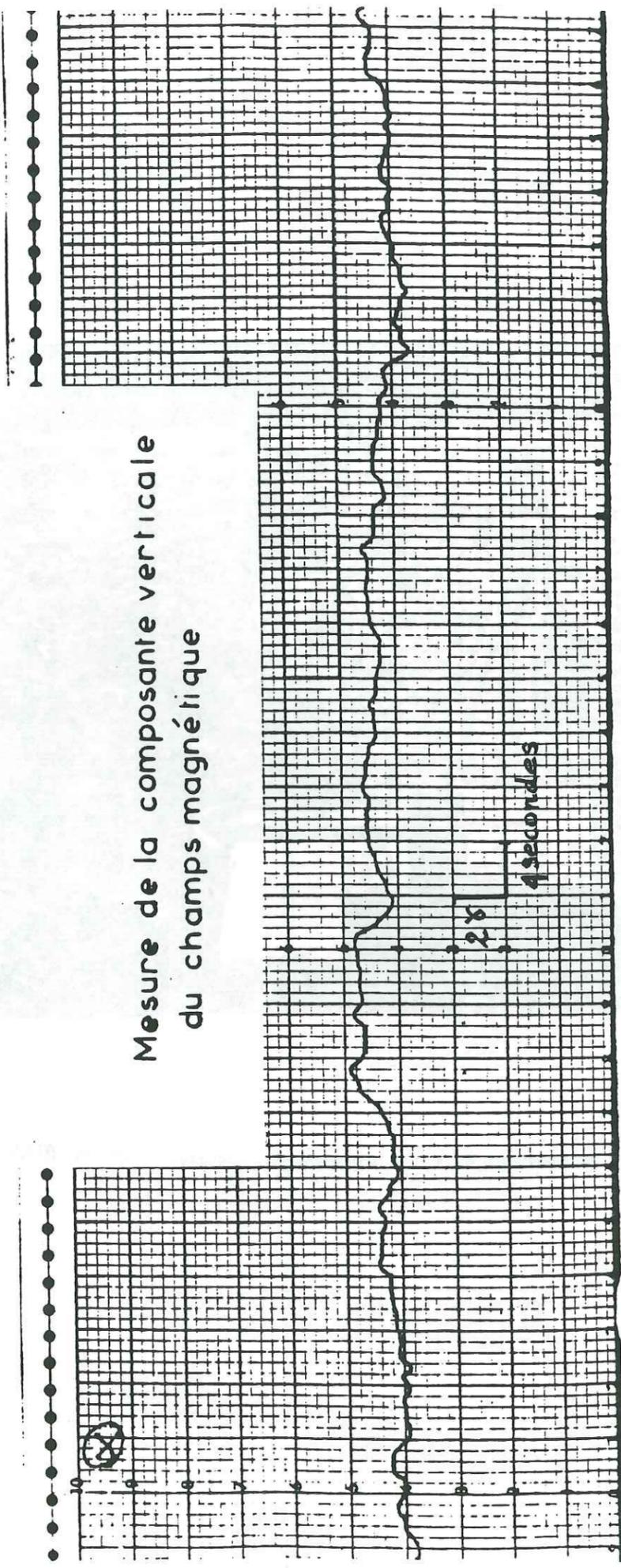


PHOTO n° 5 CHAINE D APPAREILS A LA RECEPTION

PHOTO n° 5 CHAINE D APPAREILS A LA RECEPTION

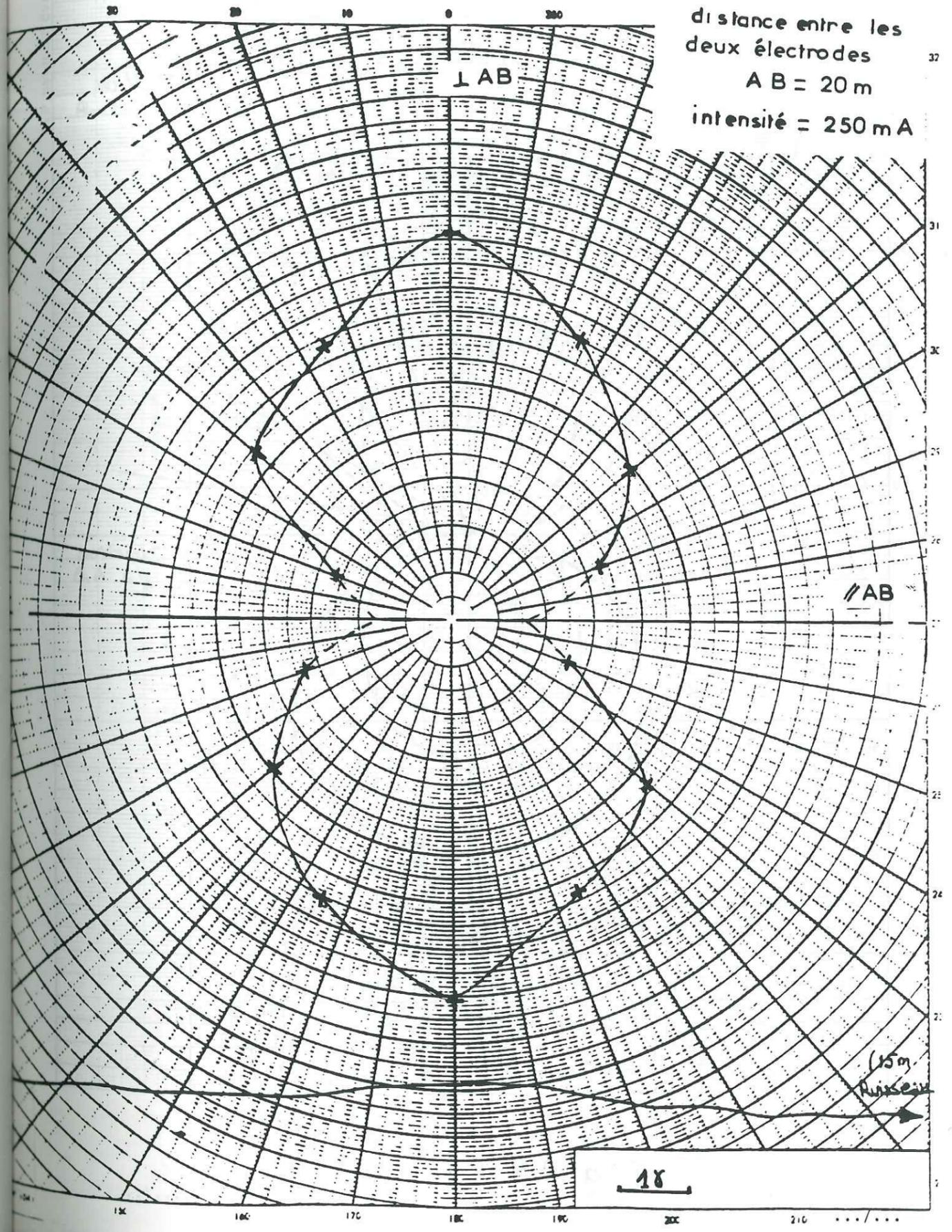


Mesure de la composante verticale
du champs magnétique

Bruit magnétique
MONBONNOT
15 heures

fig 21

fig 22 Rotation du
capteur dans le
plan horizontal



distance entre les
deux électrodes
AB = 20 m
intensité = 250 mA

18

MESURE DU CHAMP MAGNÉTIQUE

CAPTEUR EN ROTATION DANS LE PLAN HORIZONTAL

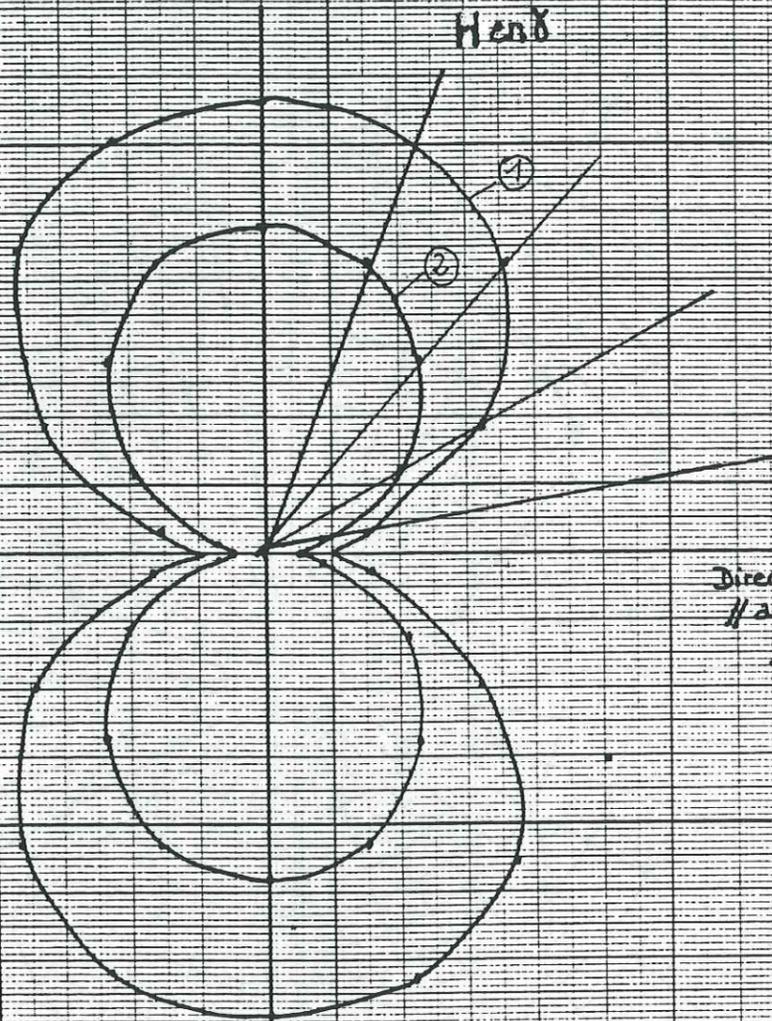
Au dessus d'un fil de cuivre (1)

d'une plaque de cuivre (2)

$H = 14 \text{ cm}$

$I = 60 \text{ mA}$

$H \sin \delta$



Direction // à A-B

Direction \perp à A-B

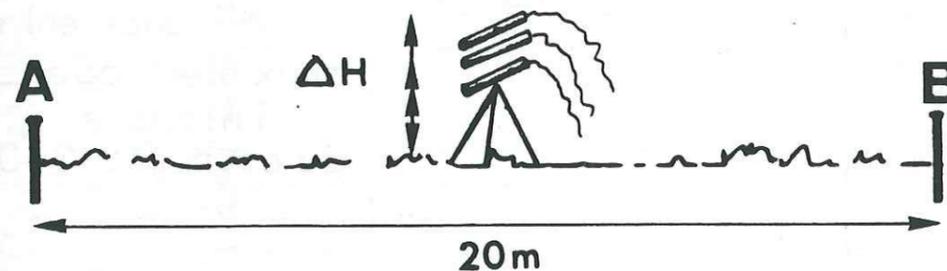
25 cm

Fig 23

.../...

La similitude des résultats permet de supposer que le terrain entre les deux électrodes est homogène d'où une circulation préférentielle du courant le long du plus court chemin allant de A à B. L'effet électromagnétique est alors comparable à celui d'un fil conducteur et vérifie la loi de Biot et Savart (formule (10)) : le champ électromagnétique est bien représenté par une indicatrice circulaire tangente au fil avec des valeurs maximales dans une direction perpendiculaire à la ligne reliant les deux électrodes et des valeurs minimales selon la direction de la ligne A-B.

II.5.4. - Élévation du capteur



Une mesure du champ magnétique à différentes hauteurs par rapport au sol nous a permis de tracer la courbe de la figure 24.

Si l'on compare avec celle obtenue en laboratoire au dessus d'un fil conducteur (Figure 25) on remarque cette fois une dissemblance.

Dans le cas d'un fil conducteur la décroissance du champ est sensiblement de type $1/Z$;

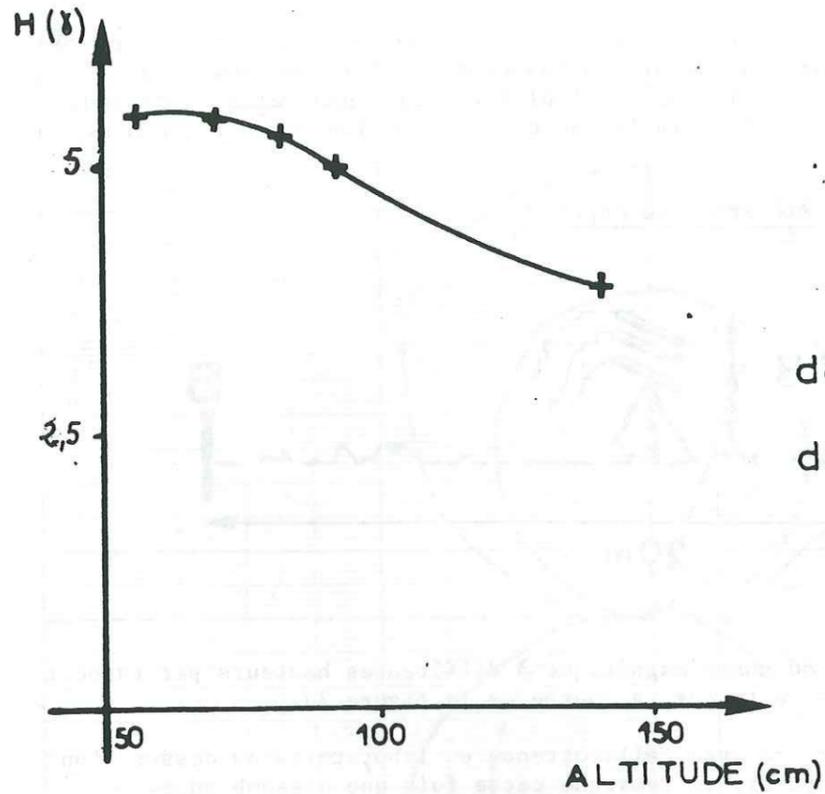
Dans le cas de terrain on peut remarquer que le champ magnétique décroît avec l'éloignement du capteur par rapport au sol. Cette décroissance est faible, la variation d'altitude du capteur est probablement négligeable devant la profondeur du conducteur et la distance A-B

II.5.5. - Rotation du capteur dans un plan vertical

Le capteur est orienté dans un plan perpendiculaire à la ligne AB

En portant pour chaque angle la valeur du champ magnétique on obtient la courbe de la figure 26.

.../...



distance entre les
deux électrodes = 20 m
intensité
du courant = 250 mA

fig 24 Mesure de la composante horizontale
du champs magnétique en fonction de
l'altitude par rapport au conducteur

Fig 25 MESURE DU CHAMP MAGNÉTIQUE

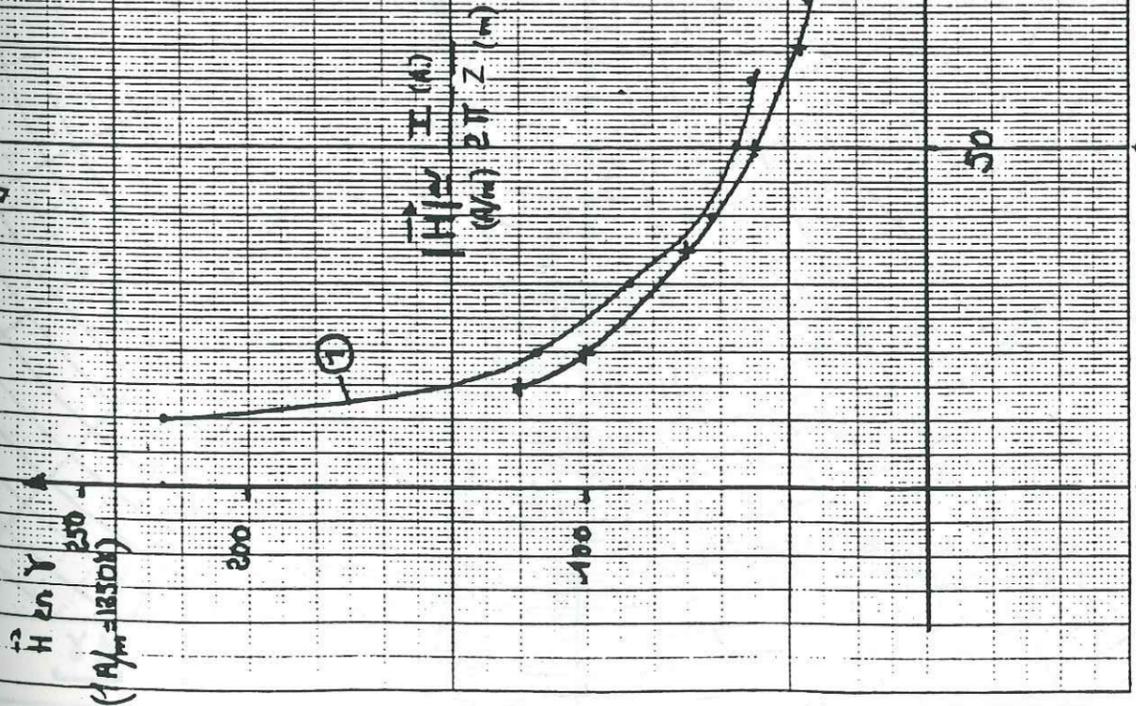
ELEVATION DU CAPTEUR

Au-dessus d'un fil de cuivre (longueur 80 cm) ①

au-dessus d'une plaque de cuivre (80 cm x 80 cm) ②

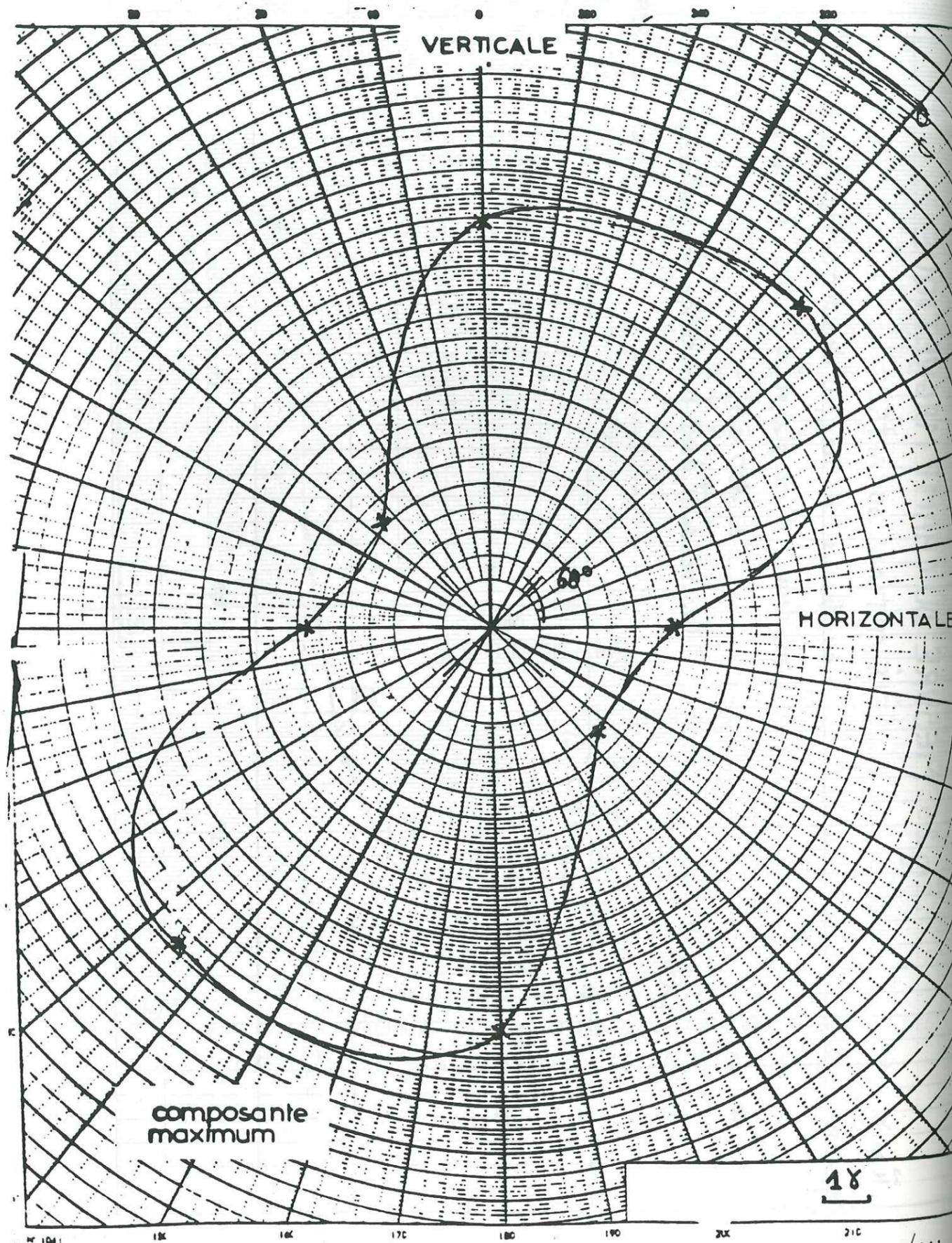
I = 100 mA

Mesure de H dans la direction horizontale perpendiculaire à
la ligne A.B

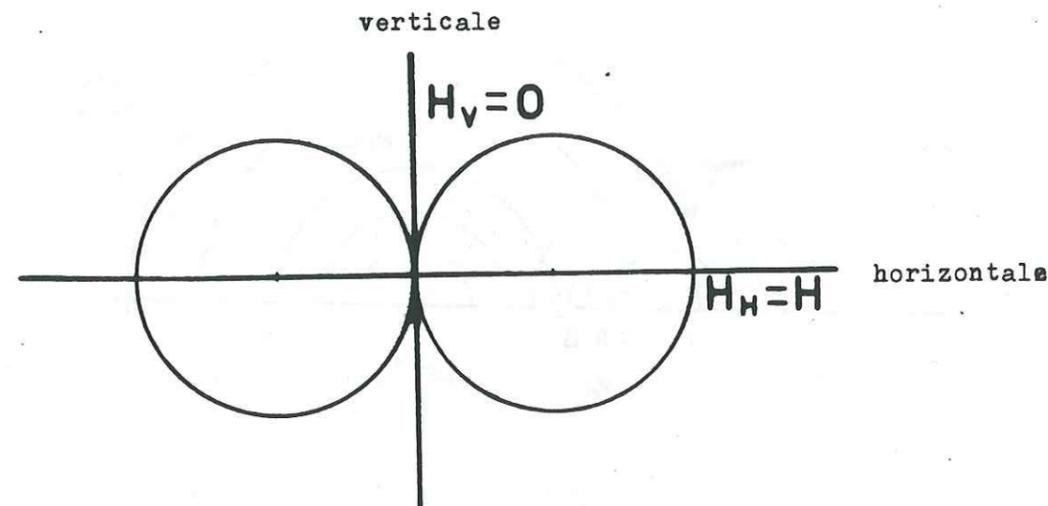


LES PAPIERS CANSON F 114 N 1

fig 26 Rotation du capteur dans le plan vertical perpendiculairement à la ligne A.B



Théoriquement, au-dessus d'un terrain homogène dans lequel circule un courant de direction AB, la composante maximum du champ magnétique doit être horizontale et perpendiculaire à AB et la composante verticale doit donc être nulle. D'où une indicatrice de la forme suivante.



En position horizontale : mesure du champ maximal

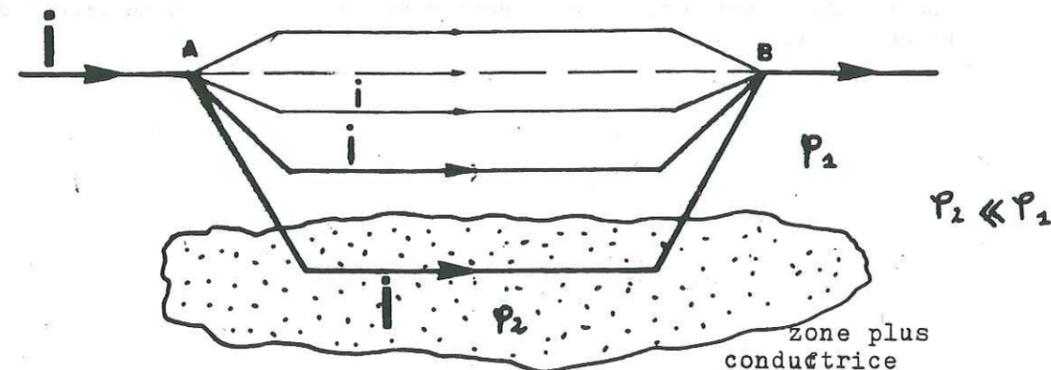
En position verticale : composante nulle

Entre ces deux directions : on mesure la projection de la composition horizontale

Dans la pratique, nous trouvons une composante maximale qui fait un angle de 60° par rapport à l'horizontale, donc un champ magnétique d'inclinaison 60° .

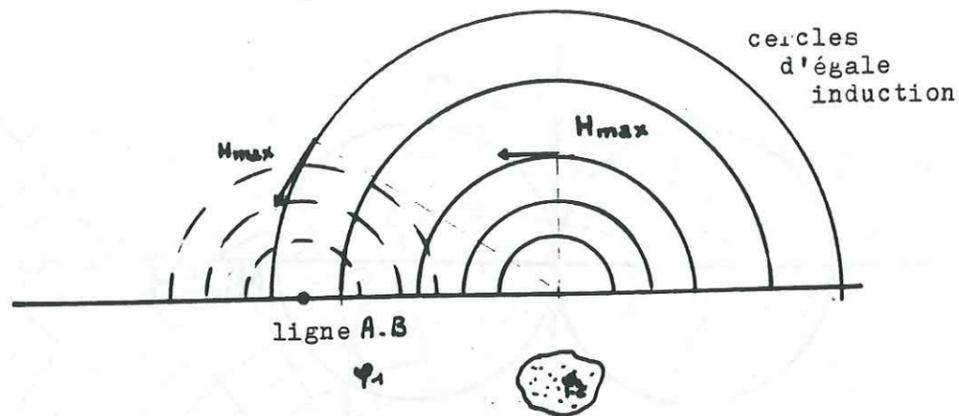
On peut en conclure que le terrain n'est pas homogène en conductivité. Ceci nous porte à croire que le capteur ne se situe pas au-dessus de la circulation préférentielle de courant. Nous ne disposons pas d'assez d'éléments pour faire une interprétation vraiment rigoureuse ; on peut cependant proposer un modèle qui expliquerait cette anomalie :

En carte :



.../...

En coupe transversale perpendiculairement à la ligne AB



II.6. - CONCLUSION

De cette étude de terrain nous pouvons déjà tirer quelques enseignements pour le futur : la magnétorésistivité est une méthode de prospection d'emploi relativement simple ; elle nécessite essentiellement un bon niveau dans l'appareillage de réception.

A ce sujet, on peut faire les remarques suivantes :

Le magnétomètre à couche mince s'est révélé agréable d'emploi par son faible encombrement et son poids minime. La sensibilité de l'appareil est bonne mais des problèmes de dérive (en température principalement) nuisent encore à la précision des résultats et à l'utilisation automatique de l'appareil (surveillance nécessaire).

La commutation du courant gagnerait à être automatique pour travailler en courant alternatif à de très basses fréquences et ainsi utiliser en sortie du magnétomètre une détection synchrone pour un meilleur traitement du signal.

CHAPITRE III

LES METHODES ELECTROMAGNETIQUES

L'objectif des méthodes électromagnétiques est le même que celui des méthodes magnétorésistives : exploiter les mesures du champ magnétique engendré par une circulation de courant dans un milieu conducteur mais c'est la nature de la source qui diffère d'une méthode à l'autre.

La magnétorésistivité utilise un signal électrique continu ou très basse fréquence (< 1 Hz).

Les méthodes électromagnétiques quant à elles, travaillent avec une source de courant alternatif. Ce courant peut être obtenu de deux manières différentes :

- dans le cas des méthodes électromagnétiques conductives un générateur de courant alternatif débite dans le sol au travers de deux électrodes (procédé similaire à celui de la magnétorésistivité, excepté la fréquence).

- dans le cas des méthodes électromagnétiques inductives le courant est induit dans le sol par le champ magnétique variable d'une bobine disposée au dessus du terrain.

C'est à cette deuxième technique que nous nous intéresserons, elle offre un éventail important et se situe parfaitement dans le cadre du laboratoire LETI/CEA (émission + réception magnéto-métrique).

Les méthodes électromagnétiques inductives présentent l'avantage considérable de supprimer la nécessité du contact entre les appareils et le sol ; la disparition des électrodes entraîne avec elle celle des problèmes de polarisation et de résistance de contact dont elles étaient le siège ; la prospection peut être menée à partir d'avions ou d'hélicoptères.

III.1 - PRINCIPE GENERAL DE LA METHODE

Une bobine ou un cadre isolé sont parcourus par un courant alternatif (en général les fréquences employées sont de l'ordre de 100 à 5 000 Hz). Bobine et cadre sont à proximité plus ou moins grande du sol ; le courant qui les parcourt génère dans le terrain un champ magnétique. Les milieux conducteurs en présence de ce champ sont alors le siège de courants électriques induits appelés courants de Foucault ; la répartition de ces courants est bien sûr fonction de la structure du sous-sol.

Ces courants induits vont à leur tour créer un champ magnétique, appelé champ secondaire, qui va s'ajouter au champ primaire émis à la source. L'étude du champ résultant grâce à une seconde bobine, bobine de réception, permet donc de détecter les hétérogénéités de conductivité du terrain et par là, d'atteindre la structure du sous-sol.

Le champ primaire subit en présence d'un conducteur un changement d'amplitude et/ou de phase ; les mesures se font sur l'une ou l'autre de ces valeurs, quelquefois sur les deux.

Nous avons étudié dans le chapitre précédent la création d'un champ magnétique à partir d'une circulation de courant continu ; dans le cas d'un courant alternatif, le phénomène existe toujours mais les équations qui le décrivent sont plus complexes. Il nous reste à expliquer le phénomène inverse, c'est à dire la création d'un courant électrique dans un milieu conducteur soumis à un champ magnétique alternatif.

III.2 - NOTIONS DE BASE ET DEFINITIONS

III.2.1. - Les phénomènes d'induction

Les travaux de Faraday ont montré que :

Si l'on déplace une masse conductrice dans un champ magnétique, ou si cette masse est fixe dans un champ magnétique variable, elle est le siège de courants électriques induits : les courants de Foucault.

La loi de Lenz donne le sens de ces courants :

"le sens du courant induit est tel que le flux qu'il produit, à travers la masse conductrice qu'il parcourt, tend à s'opposer à la variation de flux qui lui donne naissance".

"l'intensité des courants induits dans un conducteur est proportionnelle à la vitesse de variation du flux à travers ce conducteur".

Le flux d'un champ magnétique \vec{B} à travers un conducteur de section S est ϕ :

(13) $\phi = BS$

si ϕ varie, et c'est le cas en courant alternatif, il y a création

D'une force électromotrice e , à l'intérieur du conducteur qui subit la variation de flux, $d\phi$

(19) $e = -\frac{d\phi}{dt}$

donc un courant $i = \frac{e}{R}$

R résistance du milieu

(20) $i = -R \frac{d\phi}{dt}$

Les phénomènes d'induction sont assez complexes et relèvent d'équations qui le sont autant. Nous n'avons pas voulu ici les détailler au delà de ce qui est utile pour le géologue/géophysicien. Pour cette raison les équations de Maxwell ne sont pas exposées, le lecteur peut se référer à ce sujet à tous les ouvrages classiques de physique ou d'électromagnétisme (19)(21).

III.2.2. - Effet de peau

Les équations de Maxwell, qui décrivent le comportement des ondes électromagnétiques, ont mis en évidence l'effet de peau (skin effect) c'est-à-dire la décroissance exponentielle de l'amplitude du champ électromagnétique avec la profondeur.

$|i| = |i| \exp\left(-\frac{R}{\delta}\right)$

i représente l'amplitude de la densité de courant à la profondeur R .

δ a les dimensions d'une longueur et est appelée pénétration

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

δ en km
 ρ en Ωm
 T en secondes

On voit que la pénétration des ondes électromagnétiques est d'autant plus faible que la fréquence est plus élevée et que la conductivité est forte (Tableaux 27, 28).

Dans le choix de la fréquence on tient compte de la profondeur d'investigation désirée en ne négligeant pas cependant le phénomène suivant :

Plus la fréquence est élevée plus la densité de courants induits dans le conducteur sera forte donc meilleure sera la détection du champ secondaire à la bobine réceptrice.

Tableau 27 (12)

PROFONDEURS DE PENETRATION EXPRIMEES EN KILOMETRES						
	ρ	T				
		1 sec	30 sec	1 min	5 min	30 min
Eau de mer	0,2	0,225	0,712	1,74	3,90	9,54
Sables salés	1	0,503	1,59	3,90	6,72	21,4
Marnes	5	1,13	3,56	8,72	19,5	47,7
Argiles	10	1,59	5,03	12,3	27,6	67,5
Calcaires	50	3,56	11,3	27,6	61,6	151
	250	7,95	25,2	61,6	138	336
Granite, basalte	1 000	15,9	50,3	123	276	675
	5 000	35,6	113	276	616	1 510
	20 000	71,2	226	552	1 232	3 020

.../...

Tableau 28 (12)

Tableau 1 : Atténuation des ondes EM

f	ρ	$ H_y/H_0 $ z = 100 ft	$z \rightarrow H_y/H_0 = 0,1$
1 000 Hz	$10^{-4} \Omega_m$	0.00	0 ft
1 000	10^{-2}	0.00	0
1 000	1	0.15	120
1 000	10^2	0.83	1 200
1 000	10^4	0.98	12 000
10	10	0.94	3 800
10^2	10	0.83	1 200
10^4	10	0.15	120
10^6	10	0.00	12

Tableau 2 : Variation de la profondeur de peau z_s avec la fréquence f et la résistivité ρ

	$\rho = 10^{-4} \Omega_m$	$10^{-2} \Omega_m$	$10^0 \Omega_m$	$10^2 \Omega_m$	$10^4 \Omega_m$
f(Hz)	$z_s(m)$	$z_s(m)$	$z_s(m)$	$z_s(m)$	$z_s(m)$
10^{-3}	160	1 600	1.6×10^4	1.6×10^5	1.6×10^6
10^{-2}	50	500	5 000	5×10^4	5×10^5
10^{-1}	16	160	1 600	1.6×10^4	1.6×10^5
1	5	50	500	5 000	5×10^4
10	1.6	16	160	1 600	1.6×10^4
10^2	0.5	5	50	500	5 000
10^3	0.16	1.6	16	160	1 600
10^4	0.05	0.5	5	50	500
10^5	0.005	0.05	0.5	5	50
10^6	-	0.005	0.05	0.5	5

.../...

En résumé, le paramètre δ détermine l'intervalle de fréquence optimal pour la profondeur d'investigation désirée ; au sein de cet intervalle il est souhaitable d'utiliser la fréquence la plus haute.

Il apparaît, à la suite de ces considérations, que le type de prospection envisagé détermine les conditions de l'étude, tant au niveau de la qualité et de la puissance des appareils, capteur et émetteur, que de la fréquence de travail.

III.3. - APPAREILLAGE

La base de l'instrumentation en prospection électromagnétique consiste en une source, créant un champ magnétique alternatif, et une ou plusieurs bobines de réception mesurant la résultante du champ en terme de voltage induit.

Ordinairement, on a la chaîne suivante :

- . une alimentation en courant alternatif,
- . une boucle ou une bobine d'émission,
- . une ou plusieurs boucles ou bobines de réception,
- . un amplificateur récepteur réglé sur la fréquence émise,
- . un enregistreur.

Dans certains cas on a, en plus, un circuit de compensation à la réception qui sert à annuler le signal du champ primaire, ou à le comparer à celui du champ secondaire.

La composition du matériel varie peu, qu'il soit utilisé à terre ou aéroporté, si ce n'est, que dans le dernier cas, il est plus élaboré et plus volumineux.

On peut distinguer deux catégories dans les techniques de prospection, selon que le champ primaire est créé par une source fixe, ou que cette source se déplace avec appareil de réception.

Dans le premier cas, l'émetteur est fixe, la bobine de réception, mobile, explore le terrain alentour. Ce sont par exemple, la méthode Turam, la méthode de Mac Phar, et la "dip angle method".

Dans le deuxième cas, l'émetteur et le récepteur se déplacent ensemble, la distance entre eux étant généralement maintenue constante et comprise entre 30 et 200 m. Les plus utilisées de ces méthodes sont notamment la méthode de Slingram et Ronka, l'ore locator (ensemble émetteur-récepteur indéformable), le gun d'A.b.e.m...

Le choix entre ces deux types de prospection se fait en général à partir des considérations d'ordre pratique ; d'une part, le temps et l'effort nécessaires à mettre en place le dispositif fixe, lourd et encombrant

mais puissant sont souvent supérieurs à ceux nécessaires pour mettre en route une prospection mobile. C'est la nature du terrain, son accessibilité et la topographie des lieux qui entrent là en ligne de compte. D'autre part, il faut considérer la profondeur d'investigation propre à chacun de ces deux procédés : l'émetteur fixe peut se permettre d'être plus lourd et encombrant, donc plus puissant qu'un émetteur mobile qui se doit d'être aisément transportable, donc petit et léger. Donc, dans un cas on peut effectuer une exploration profonde du terrain (sondage) alors que dans l'autre on procède plutôt à des travaux de reconnaissance superficiels (profilage).

III.3.1. - Les dispositifs d'émission

Leur nature, leur taille et leurs caractéristiques varient avec le type de prospection envisagé. La source de champ magnétique peut être :

- . une grande boucle, rectangulaire, circulaire ou carrée, d'une centaine de mètres au plus et formée d'une seule spire de fil isolé et flexible posée sur le sol (axe de la bobine vertical),
- . une boucle verticale, triangulaire rectangulaire ou carrée, simple ou multiple (jusqu'à cinquante spires) et qui couvre une surface de quelques m². L'orientation de l'axe de la bobine peut varier,
- . les émetteurs mobiles utilisent souvent des petites bobines portables multispères. Les bobines à air sont constituées d'une centaine de spires ou plus, enroulées sur des cadres isolants circulaires, d'environ un mètre de diamètre. Quelquefois la bobine peut n'avoir qu'un tour d'un très bon conducteur.

Actuellement, on utilise comme bobines, dans de nombreux appareillages, des solénoïdes à noyaux de ferrite ou autre matériau de forte perméabilité magnétique. On réussit ainsi, si l'enroulement des spires est correct et les dimensions de la bobine judicieuses, à créer le même champ que celui d'une bobine à air enroulée sur un cadre de diamètre supérieur car la valeur de l'induction magnétique augmente avec la perméabilité du noyau et compense la petite taille de la surface de la bobine. (1*)

Beaucoup de chaînes d'émission possèdent une capacité en série avec la bobine : la valeur choisie correspond à la résonance de l'inductance de la bobine à la fréquence de sortie. La bobine ayant une résistance faible, on peut y faire circuler un courant maximal, donc engendrer un champ magnétique plus intense.

III.3.2. - Les dispositifs de réception

Pour être entièrement portatives les bobines de réception sont souvent de petite taille (diamètre de 1 m au plus).

Semblables d'apparence aux bobines d'émission elles sont constituées d'un nombre supérieur de spires de fil fin et léger et accordées à la

fréquence de la bobine d'émission.

Le champ magnétique est mesuré en terme de voltage induit dans la bobine :

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

Pour les mesures en basses fréquences l'utilisation de noyau de matériau à haute perméabilité magnétique (μ) est fréquente. On accroît ainsi la f.e.m induite d'un facteur $K = \mu / \mu_0$.

Il convient cependant de tenir compte des champs démagnétisants dans le noyau qui sont liés à la géométrie de la bobine. Pour bénéficier d'un facteur K avantageux il faut respecter un rapport longueur/diamètre du noyau précisé par la figure 29.

Les paramètres inductance et capacité parasite de la bobine doivent être pris en considération pour la détermination de la plage de fréquence de mesure.

III.3.3. - Configuration du système émission/réception

A la réception, la bobine va capter les effets du champ primaire et du champ secondaire ; le premier ayant tendance à masquer le second, on s'emploie généralement à l'annuler. Pour ce faire, on peut, soit jouer sur la géométrie du dispositif capteur-émetteur, soit utiliser un procédé électronique.

Dans le premier cas, on oriente la bobine de réception de manière à avoir un couplage minimal avec la bobine d'émission ; de la sorte, au-dessus d'un milieu neutre le voltage induit à la réception par le signal de la source est nul (ou minimal). En effet, le couplage mutuel ou impédance mutuelle, Z, de deux bobines entre elles est défini par :

$$Z = V/I \quad \begin{array}{l} V : \text{voltage induit à la réception} \\ I : \text{intensité d'alimentation de la bobine d'émission} \end{array}$$

Sa valeur varie avec la configuration des bobines entre elles et par rapport au sol (Figures 30 et 31).

Les configurations des dispositifs émetteur-récepteur ne sont pas toutes représentées sur cette planche mais celles décrites sont les plus répandues et les plus utilisées en prospection électromagnétique.

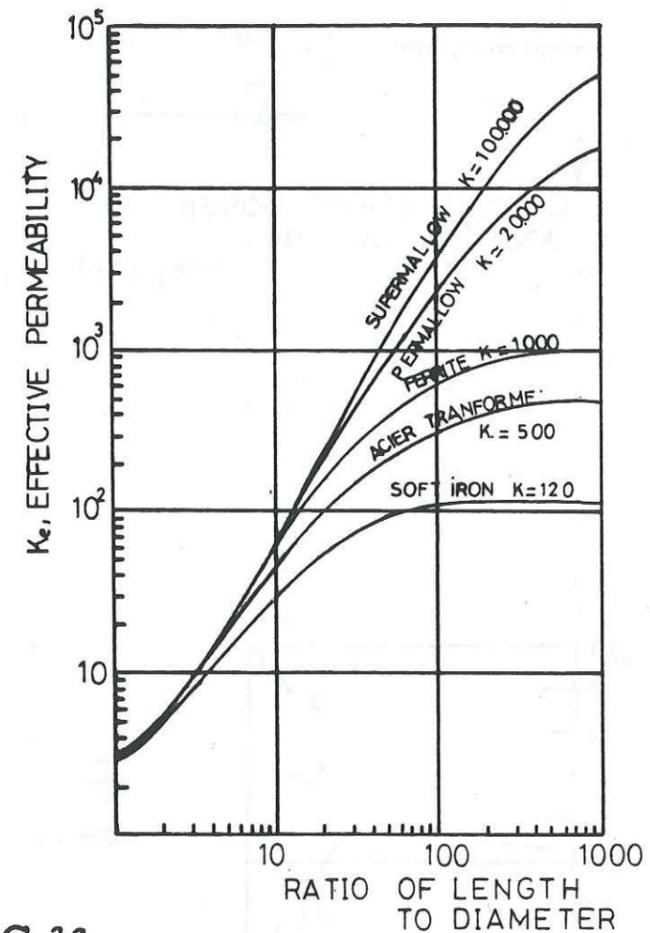


fig 29

Perméabilité effective de matériaux supra perméables (barreaux) en fonction du rapport longueur du barreau/diamètre

ref (36)

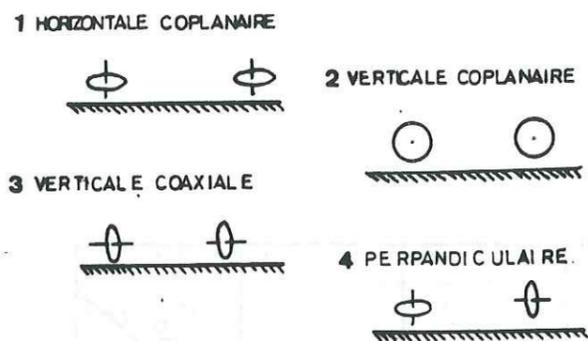


fig 30

Configurations possibles pour les bobines ref (36)

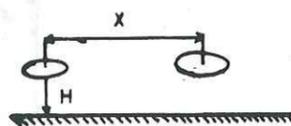
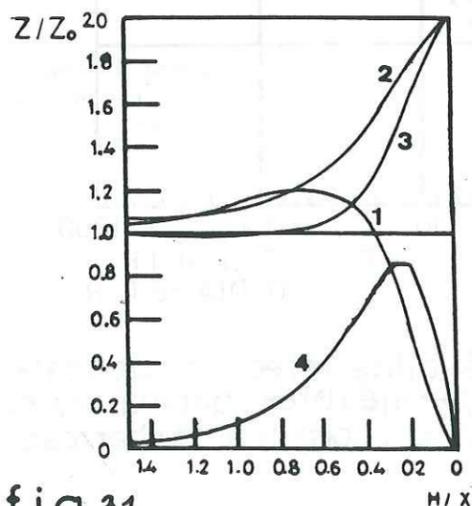
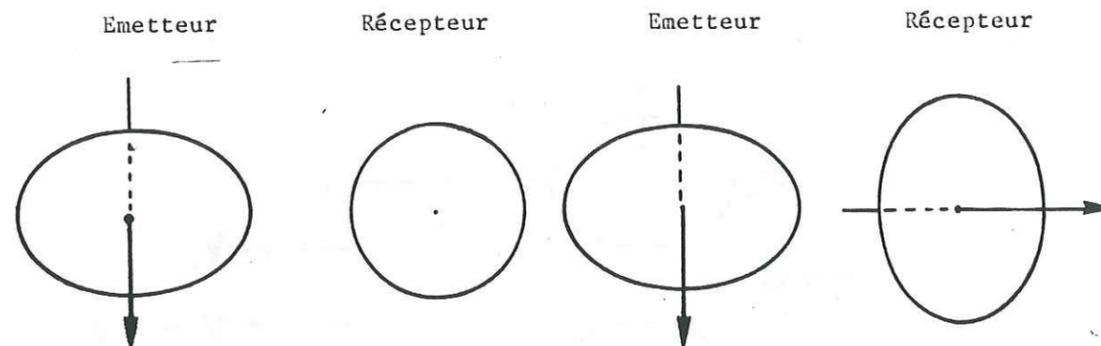


fig 31

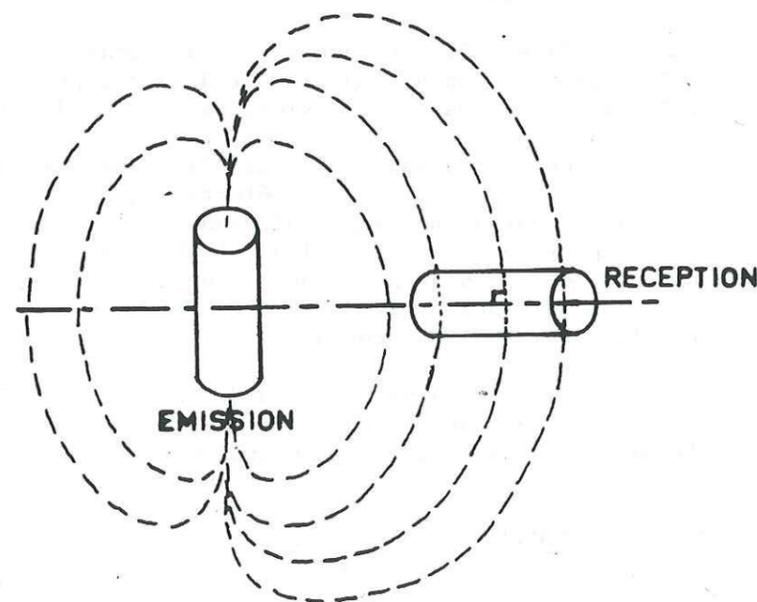
Couplage mutuel entre deux bobines au-dessus d'un milieu parfaitement conducteur ref (36)

ref (36)

Nous voyons que le dispositif idéal est celui des bobines perpendiculaires.



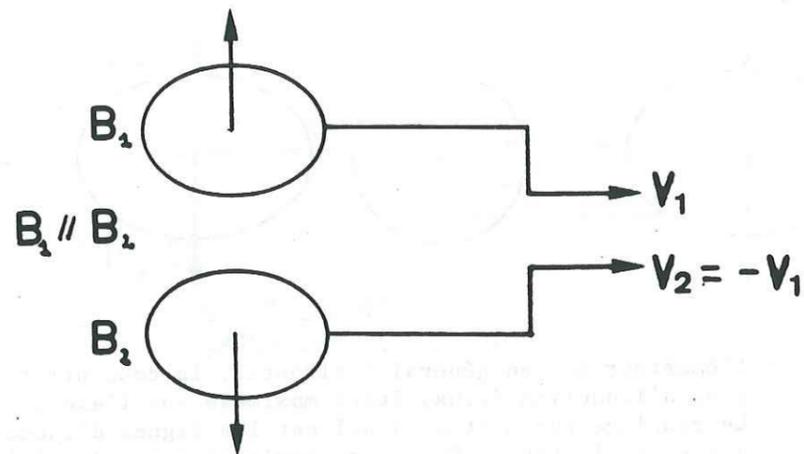
Remarque : L'émetteur est en général horizontal, la concentration des lignes d'induction (flux) étant maximale sur l'axe de la bobine. Le couplage est minimal à nul car les lignes d'induction créées autour de la bobine émettrice arrivent perpendiculairement à l'axe de la bobine réceptrice, donc aucune résultante de champ magnétique n'est mesurée à l'intérieur de cette bobine.



.../...

.../...

Une autre possibilité consiste à monter, à la réception, deux bobines en opposition pour obtenir une mesure différentielle. Dans un milieu neutre (absence de conducteur) on a alors un signal nul à la réception.



Le gros problème avec les procédés utilisant la géométrie des bobines, est la précision de l'orientation de celles-ci. En chaque point de mesure, la configuration doit être identique, ce qui n'est pas toujours aisé sur le terrain.

Il est évident que le moindre écart par rapport à la configuration idéale entraîne un voltage induit à la réception, du fait du couplage. Ce voltage ne doit pas être assimilé à l'effet du champ secondaire.

On peut aussi minimiser l'influence du champ primaire à la réception au moyen d'un dispositif électronique approprié. On introduit à l'entrée du récepteur un signal alternatif artificiel de même fréquence et de même amplitude que le signal d'émission, mais en opposition de phase. La résultante de ces deux signaux, l'un artificiel, l'autre créé par la source, est alors nulle, le voltage mesuré dans la bobine est uniquement celui induit par le champ secondaire.

Dans certains systèmes de prospection, il est nécessaire de déterminer la direction du champ, on équipe alors la bobine de réception d'un dispositif de mesure de l'inclinaison de l'axe et de son azimut.

III.4. - TECHNIQUES DE MESURE

Elles sont nombreuses et variées mais on peut dégager deux grands groupes : les techniques de mesure de phase et d'amplitude et les techniques de mesure d'inclinaison.

III.4.1. - Mesure de phase et d'amplitude

Pour définir complètement le champ magnétique à la réception il faut pouvoir mesurer trois de ses composantes vectorielles et son déphasage par rapport au champ primaire généré à la source. En général, aucune méthode de prospection électromagnétique ne définit aussi précisément le champ. Quelquefois on mesure uniquement l'amplitude d'une composante du champ (quelques fois verticale, d'autres fois horizontale). On peut aussi exprimer cette même composante vectorielle en terme de fraction en phase avec le champ à l'émission : composante réelle, et fraction déphasée de 90° : composante imaginaire.

III.4.2. - Mesure d'inclinaison

On s'intéresse là à la direction du vecteur champ magnétique à la réception. De telles mesures sont très sensibles et nécessitent une instrumentation simple. On monte sur la bobine de réception un inclinomètre qui mesure l'angle entre le plan de la bobine et le plan horizontal. On oriente la bobine de telle manière que le signal soit minimal, le champ magnétique est alors dans le plan perpendiculaire à la direction de l'axe de la bobine.

CHAPITRE IV

LES METHODES DE LOCALISATION PAR MESURE MAGNETIQUE

Au sein du LETI/CEA, l'équipe chargée des travaux de recherche sur les applications pratiques du magnétisme a mis au point un certain nombre de techniques originales de prospection géophysique visant plus spécialement à résoudre les problèmes de localisation.

Les deux pôles principaux de travail portent sur :

- la localisation de cavités souterraines (grottes, galeries, tunnels),
- la localisation d'objets métalliques enfouis sous terre (matériel de sondage, conduites...) ou sous mer (pipes, câbles...).

C'est sur le premier problème que nous avons travaillé. La méthode mise au point et actuellement utilisée a eu l'occasion de faire ses preuves, tant du point de vue pratique que théorique. On cherche à accroître ses possibilités et en connaître les limites.

Le principe de la méthode de localisation est le suivant :

Un dipôle magnétique (source) est positionné dans la cavité à localiser, il crée un champ magnétique que l'on cartographie en surface. Les mesures obtenues sont fournies à un programme de calcul qui détermine les coordonnées du dipôle dans l'espace donc de la cavité.

Dans de bonnes conditions (bruit faible) la profondeur maximale d'investigation est d'une centaine de mètres. Le capteur est un magnétomètre RMN.

Dans la configuration actuelle on travaille en très basses fréquences (période environ 20 sec) et on néglige totalement toute part d'intervention du terrain sur le signal émis par le dipôle. La théorie relève donc du cas statique.

On aimerait utiliser cette méthode à plus haute fréquence, avec les conséquences suivantes :

- simplification du magnétomètre (bobine)
- pouvoir d'investigation du dispositif accru (plusieurs centaines de mètres)

mais aussi

- risque d'erreur dans la localisation due à l'influence de la résistivité des terrains. Intervention du paramètre géologie jusqu'alors non pris en compte.

.../...

Il s'agit donc pour nous d'essayer de déterminer la nature et l'ampleur des phénomènes apparaissant avec l'augmentation de fréquence afin d'apprécier chacune des deux méthodes.

IV.1. - PRESENTATION D'UNE METHODE ACTUELLE DE LOCALISATION

Il est souvent utile de localiser avec précision en surface des cavités, grottes ou réservoirs souterrains d'intérêt hydrogéologique, archéologique... et fréquemment il s'avère que leur positionnement par des procédés classiques in situ est fastidieux et imprécis voire impossible. Une méthode de localisation a été mise au point par A. SALVI et utilisée pour la première fois en 1969 pour repérer une cavité connue près de Marseille dans le cadre d'une étude hydrogéologique de recherche de réservoirs souterrains.(7)

Depuis, avec quelques améliorations, elle a été utilisée à l'occasion de nombreuses campagnes.(2*), (3*), (4*), (5*), (6*).

IV.1.1. - Principe

Un dipôle magnétique est placé, par des spéléologues ou des scaphandriers autonomes suivant l'environnement, au point que l'on souhaite localiser. Cette "source" magnétique crée un champ magnétique dont l'expression mathématique est connue. Ce champ s'additionne vectoriellement au champ magnétique terrestre et, en surface, en mesurant le champ magnétique total, on note une anomalie qui traduit la présence de la source magnétique.

La connaissance de l'anomalie du champ magnétique terrestre qui est une fonction $H(x, y, z)$, la connaissance de la direction du champ magnétique terrestre dans le trièdre Oxyz permettent de résoudre le problème de détermination du dipôle magnétique à partir des mesures.

Ainsi un problème de topographie souterraine délicat se transforme en un problème de mesure de champ magnétique terrestre et en topographie de surface.

La précision de la méthode est liée :

- à la précision de la mesure de l'anomalie de champ créée par le dipôle,
- à la précision de la topographie associée aux points de mesure,
- à la connaissance de la direction du champ magnétique terrestre dans la région étudiée,
- au nombre de points de mesure.

.../...

IV.1.2. - Eléments techniques

IV.1.2.1 - Source magnétique

La source magnétique est un bobinage contenant un noyau de fer parcouru par un courant périodique à très basse fréquence (période # 20s). L'énergie est fournie par des piles. Le champ créé est périodique.

La source employée est étanche, elle est prévue pour des actions à moins de 100 m de la surface.

IV.1.2.2 - Mesure de champ magnétique

Le capteur utilisé pour la mesure du champ magnétique est basé sur la résonance magnétique nucléaire avec polarisation dynamique. Il mesure l'intensité du champ magnétique (champ total) avec une résolution de 10⁻⁷ Oerstedt, soit un centième de gamma.

Pour aboutir au maximum de résolution, il faut s'affranchir des fluctuations naturelles du champ magnétique terrestre. On emploie une technique de mesure différentielle, basée sur le fait que les fluctuations du champ magnétique terrestre sont les mêmes à l'échelle de quelques kilomètres.

Un premier capteur qui effectue la mesure de l'anomalie opère en surface au voisinage de la source. Un second capteur est placé à poste fixe, à quelques centaines de mètres du premier, dans une zone où l'effet de la source, qui décroît rapidement avec la distance, est négligeable.

Par mesure différentielle, on élimine les fluctuations indésirables et on conserve complètement l'anomalie recherchée.

IV.1.3. - Technique de mesure

Dans la zone où on recherche la source on définit un maillage régulier avec des intervalles de 10 m environ. Les points de ce maillage sont matérialisés par de la peinture sur le sol et un numéro.

Pendant l'établissement du réseau de points le matériel de magnétométrie qui comporte deux capteurs pour une mesure différentielle est mis en place. L'un des capteurs est disposé au centre du réseau, l'autre au loin à l'extérieur de la surface. La différence de champ magnétique apparaît sur un enregistreur graphique.

La source magnétique, étanche, dotée de piles neuves est placée par les spéléologues au point à localiser.

En surface on enregistre l'anomalie de champ magnétique qui se présente comme une courbe périodique sur l'enregistreur graphique. La durée

de l'enregistrement en un point est de deux, trois minutes ce qui permet de définir avec une bonne précision l'amplitude de l'anomalie créée par la source. Le capteur est déplacé sur le réseau, de point en point, et en chaque point on note l'heure, et l'amplitude de l'anomalie. Périodiquement, on revient au point de départ, on constate que pour ce point, on ne retrouve pas la valeur mesurée initiale mais des valeurs en diminution. Cette diminution linéaire de l'ordre de 1 % à 2 % par heure, est liée à l'usure de la pile qui alimente la source ; on en tiendra compte dans le dépouillement.

Ainsi, on parvient à établir un tableau, associant aux points du maillage une amplitude de l'anomalie.

Il convient pour effectuer le calcul de la position de la source de faire un lever topographique des points du maillage, dont le positionnement initial est assez approximatif.

La technique préconisée consiste à repérer le point central du maillage par rapport à des repères topographiques avec précision. Ensuite il convient de repérer par rapport à une direction de référence, à partir du point central, l'angle et la distance des divers points du maillage. Un nivellement par rapport au point central est également nécessaire.

La précision de la détermination topographique doit être cohérente avec la précision du positionnement du capteur sur le point du maillage. Celle-ci s'effectue à mieux que 10 cm en général. Il est donc souhaitable d'obtenir une précision de cet ordre de grandeur au moins dans le lever topographique.

IV.1.3.1. - Dépouillement - Interprétation

Partant des enregistrements, on effectue, pour chaque point, la moyenne des amplitudes de l'anomalie à partir des mesures crête-crête. Ces mesures sont ensuite corrigées de l'effet de dérive lié à l'usure de la pile. La précision peut être limitée par le bruit. Le processus de moyenne réduit ce bruit aléatoire. Le résultat final est lié à la durée de la mesure.

La topographie est exprimée en coordonnées polaires avec une orientation des angles dans le sens des aiguilles d'une montre, à partir du point central du site en général. On exprime en coordonnées cartésiennes les points du maillage dans un trièdre Ox, y, z direct. L'axe Oz vertical dans ce système est donc positif en s'élevant vers le sol.

La connaissance de l'anomalie TM (x,y,z) et de la direction du champ permet le calcul de la position de la source. (La direction du champ magnétique est repérée directement sur le terrain).

Ces données sont fournies à un programme qui détermine la position de la source par une méthode de moindre carré. La position de la source est celle qui correspond au minimum de :

$$C = \sum_{l=1}^n (TM - TCAL)^2$$

TM étant la valeur mesurée en un point
 TCAL étant la valeur calculée au même point (Figure 32)
 n le nombre de points de mesure

Les coordonnées de l'optimum sont fournies (X0, Y0, Z0) correspondant au milieu de la source, de même que la direction du barreau magnétique par AMX, AMY, AMZ. Les coordonnées des divers points ainsi que les valeurs TM mesurées et TCAL calculées sont imprimées.

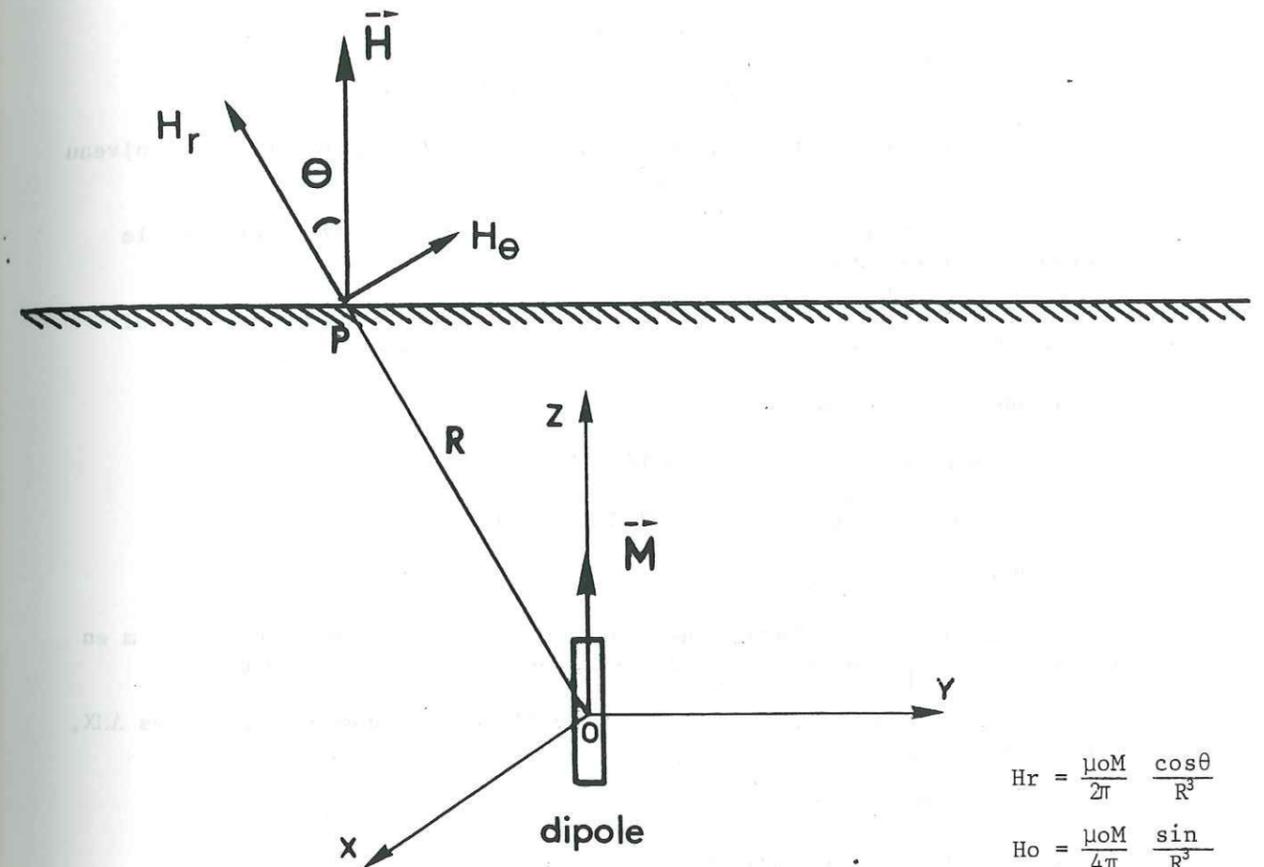
La qualité du résultat s'exprime par deux nombres :

$$\text{PER 1} = \frac{\sqrt{\sum_1^n (TM - TCAL)^2}}{\sum_1^n |TM|}$$

$$\text{PER 2} = \frac{\sqrt{\sum_1^n (TM - TCAL)^2}}{\sqrt{\sum_1^n TM^2}}$$

.../...

Figure 32 : Calcul du champ magnétique TCAL en chaque point du maillage



$$H_r = \frac{\mu_0 M}{2\pi} \frac{\cos\theta}{R^3}$$

$$H_\theta = \frac{\mu_0 M}{4\pi} \frac{\sin\theta}{R^3}$$

M : moment magnétique du dipôle = $I \int \int dS$
 R : distance dipôle point d'observation
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$
 R et θ varient en chaque point du maillage.
 A la verticale du dipôle R minimum et on a $\theta = 0$
 $H = H_r = \frac{\mu_0 M}{2\pi R^3}$ champ maximum et vertical

T cal est la projection de H sur la direction de mesure du champ magnétique (direction du champ terrestre avec les magnétomètres RMN).

.../...

IV.1.4. - Résultats

Exemple : (Figure 33)

Le trièdre Oxyz est placé au point 44.

On choisit la direction de l'axe Ox.

Oy est orienté à 100 grades, sensiblement vers l'ouest.

La référence des altitudes est prise à 22 m par rapport au niveau de la mer.

La déclinaison magnétique est : $(\vec{Ox}, \vec{ON}) = - 224.5$ grades, le carroyage est orienté NS, EW.

La lecture du listing issu de l'ordinateur au terme du calcul (figure 34) fournie :

Coordonnées de l'aimant :

X = - 14.16 m r = 16.27
 Y = - 8.02 m $\theta = 232.81$ grades
 Z = 39.68 m

L'aimant se trouve donc pratiquement à une profondeur de 40 m en un point, à une distance de 16,27 et un angle de 232.81 grades.

Le vecteur \vec{AM} dirigé le long de l'aimant a comme composantes ΔMX , ΔMY , ΔMZ .

$\Delta MX = 0.300 \cdot 10^4$
 $\Delta MY = 0.460 \cdot 10^5$ en unité CGS - UEM
 $\Delta MZ = 0.102 \cdot 10^7$

Ces nombres sont comme :

$\Delta MX \# 3$ $\Delta MY \# 4$ $\Delta MZ \# 102$

On remarquera que l'aimant est sensiblement vertical. La différence ($\# 3$ degrés) avec la position réelle est liée aux diverses causes d'erreur évoquées.

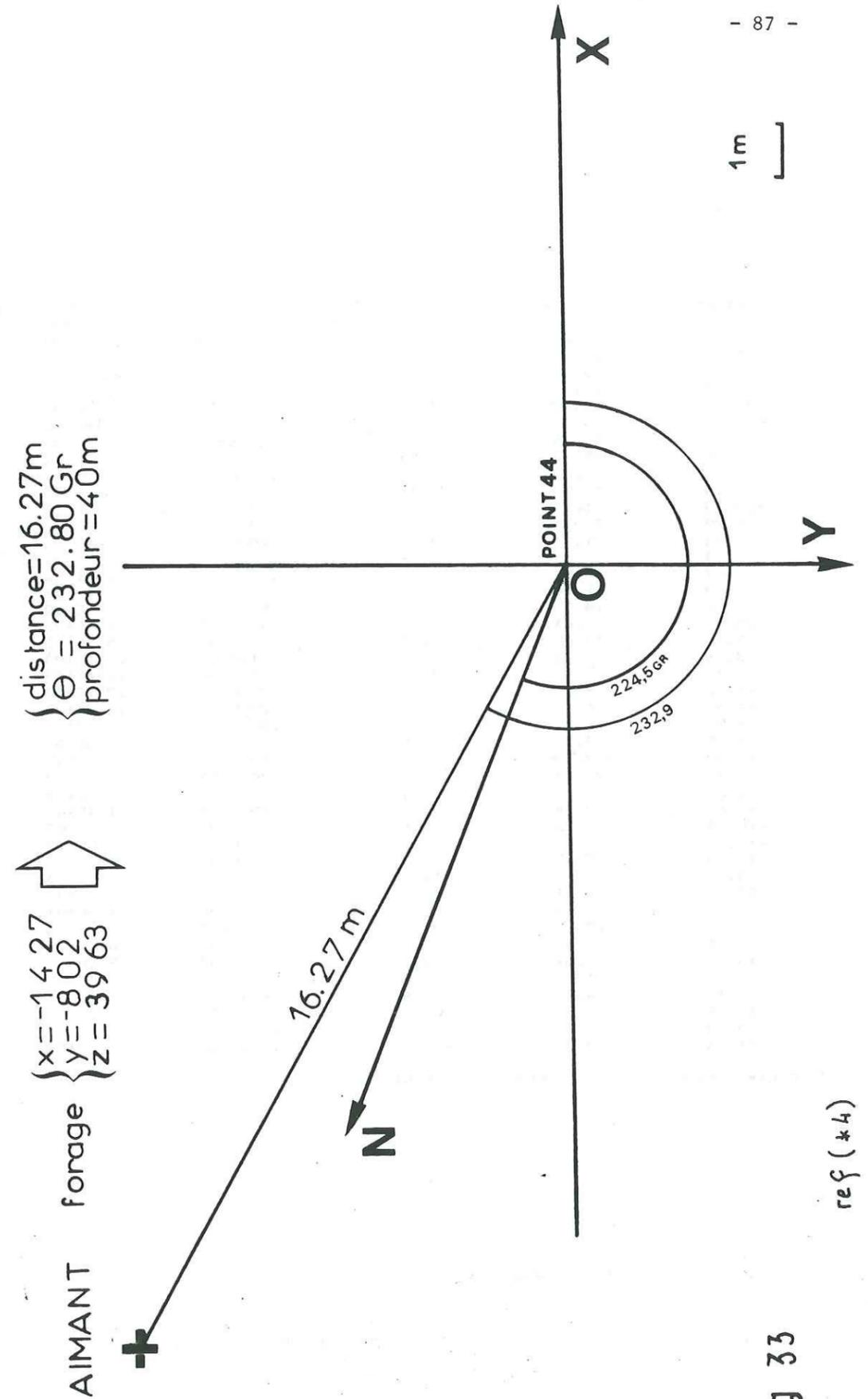


fig 33

ref (*4)

X = -14.16 Y = - 8.02 Z = 39.68
 AMX = .300E+05 AMY = .460E+05 AMZ = .102E+07EN UEMCBS

XM EN METRES	YM EN METRES	ZM EN METRES	TM EN GRAMMA	TCAL EN GRAMMA
10.21	24.92	-0.57	.435E+02	.428E+02
10.77	-5.79	-0.78	.143E+03	.141E+03
5.44	11.01	-0.45	.136E+03	.134E+03
11.31	-22.77	-0.97	.080E+02	.037E+02
-7.39	18.50	-0.71	.114E+03	.113E+03
-16.53	14.52	-0.40	.118E+03	.120E+03
-10.69	-25.08	-0.77	.107E+03	.114E+03
-25.84	10.78	-0.48	.004E+02	.027E+02
-27.60	-11.75	-0.35	.754E+02	.777E+02
-31.87	-2.66	-0.52	.01E+02	.540E+02
-24.15	-20.97	-0.36	.622E+02	.661E+02
-22.95	1.44	-0.66	.143E+03	.138E+03
-4.97	-36.33	-0.32	.530E+02	.501E+02
2.34	-31.91	-0.44	.805E+02	.801E+02
7.54	-18.53	-0.42	.147E+03	.149E+03
2.09	20.90	-0.42	.978E+02	.949E+02
17.30	-15.16	-0.57	.113E+03	.106E+03
13.24	14.97	-0.30	.932E+02	.920E+02
22.35	-2.63	-1.00	.700E+02	.865E+02
27.80	11.28	-0.28	.523E+02	.517E+02
3.66	-9.41	-0.54	.214E+03	.212E+03
-5.31	-12.96	-0.37	.232E+03	.236E+03
-9.12	-4.10	-1.00	.253E+03	.247E+03
41.51	6.37	-0.30	.298E+02	.269E+02
-36.87	-15.45	-0.55	.000E+01	-.214E+01
-27.55	-33.74	-0.36	-.142E+02	-.945E+01
-15.39	-39.75	-0.24	.145E+02	.147E+02
-35.17	6.73	-0.50	.288E+02	.204E+02
0.00	0.00	-0.64	.228E+03	.228E+03
-1.66	-22.94	-0.35	.157E+03	.151E+03
-18.34	-7.97	-0.36	.188E+03	.188E+03
-15.07	-17.37	-0.42	.167E+03	.167E+03
-12.94	5.35	-0.36	.125E+03	.203E+03
3.73	3.26	-1.09	.181E+03	.175E+03
21.94	1.61	-0.39	.541E+02	.897E+02
9.27	3.74	-0.78	.159E+03	.154E+03
22.79	19.51	-0.30	.557E+02	.514E+02
26.61	-11.54	-0.27	.722E+02	.675E+02
18.51	7.57	-0.73	.919E+02	.936E+02
37.04	15.10	-0.30	.316E+02	.290E+02
36.34	-4.93	-0.56	.434E+02	.394E+02
18.44	28.43	-0.37	.435E+02	.401E+02
-20.70	-20.67	-0.29	.391E+02	.357E+02
31.33	23.22	-0.30	.334E+02	.298E+02

PER1 = .615E-01

PER2 = .515E-01

Fig 34

ref (*4)

Le tableau de chiffres donne les coordonnées des points de mesure, la valeur mesurée TM et la valeur calculée TCAL.

PER 1 = 6,1 % (0.615 . 10⁻¹)

PER 2 = 5,1 % (0.515 . 10⁻¹)

Ceci signifie que l'écart entre valeur mesurée et calculée est de l'ordre de 6 %. (5*)

IV.1.5. - Avantages

A l'occasion de nombreuses campagnes de terrain, cette méthode a prouvé qu'elle donnait de bons résultats. Son énorme avantage est de ne pas tenir compte de la géologie des terrains environnant le dipôle d'où une simplification de l'interprétation.

L'inconvénient du travail en continu est la limitation du pouvoir d'investigation ; au delà d'une centaine de mètres le dispositif n'est plus assez puissant pour une localisation précise.

CHAPITRE V

EXTENSIONS DE LA METHODE DE LOCALISATION AUX REGIMES ALTERNATIFS

V.1. - INTRODUCTION

On sait que l'on est capable de localiser correctement un dipôle magnétique enterré dans un terrain à une profondeur inférieure à 100 m en travaillant dans des conditions très proches du continu ; la méthode est exposée dans le chapitre précédent.

On envisage d'améliorer cette technique en utilisant à l'émission un signal alternatif à des fréquences moyennes ; ceci nécessite une étude au niveau des conséquences sur tous les paramètres intervenant dans la mesure.

Une recherche bibliographique portant sur les problèmes de localisation traités par électromagnétisme se révèle peu fructueuse. Les quelques publications que l'on trouve se rapportent à l'utilisation des ondes électromagnétiques pour la recherche de mineurs de charbon enfouis dans les galeries lors d'accidents. En effet, il y a une vingtaine d'années, le "US Bureau of Mines" encourageait les recherches à ce sujet, essayant de mettre au point une méthode de sauvetage efficace pour faire face aux nombreux accidents miniers.

J.R. Wait (59), spécialiste en électromagnétisme s'était penché sur la question, ainsi que, un peu plus tard, Olson R.G et Farstad A.J. (42), puis T.W. Caffey et L. ROMERO (23). Ils étudient tous la configuration suivante : une petite bobine horizontale enterrée dans le sol est parcourue par un courant alternatif ; une deuxième bobine de réception mesure en surface le champ magnétique créé. Le travail est considéré comme homogène et aucun de ces auteurs n'envisage l'intervention des courants induits liés à l'utilisation de courants alternatifs.

Plus récemment, R.J. Greenfield et C.H. Stoyer (27) se sont penchés sur les effets d'un changement latéral de conductivité du terrain sur la précision de la localisation. Hill et Wait (29) ont étudié l'effet d'anomalies de conductivité sur les champs magnétiques (au moyen de modèles). (60)

La consultation de tous ces articles nous amène aux remarques suivantes :

Tant que l'on prend pour hypothèse que l'on travaille dans des conditions statiques, on néglige les phénomènes d'induction dans les terrains ce qui rend la compréhension des mécanismes beaucoup plus intuitive et l'interprétation des résultats plus facile aux dépens de la précision et quelquefois la validité de la mesure.

Par contre, dès que l'on procède de manière plus rigoureuse en prenant en compte l'influence du terrain sur le signal du dipôle (cas alternatif) les mécanismes et les équations qui les régissent deviennent très complexes et pas toujours expliqués (jusqu'à présent).

Au vu de tout cela nous avons adopté la démarche progressive suivante :

Tout d'abord nous avons étudié l'effet d'une augmentation de fréquence sur le champ magnétique émis par un dipôle enfoui dans un terrain de conductivité homogène. Nous avons procédé par modélisation ; la mise au point d'un programme de calcul permet de simuler plusieurs configurations de mesure.

Dans un deuxième temps on complique le modèle pour se rapprocher du cas géologique général, en étudiant le cas d'un terrain hétérogène du point de vue des conductivités. Cette hétérogénéité est modélisée par une sphère infiniment conductrice au sein d'un milieu plus résistant. L'élaboration d'un deuxième programme nous permet d'étudier différentes configurations.

Pour compléter notre étude, des mesures sur le terrain ont été effectuées qui visent principalement à cerner les problèmes pratiques d'instrumentation et de mesure apportés par l'emploi du courant alternatif.

A partir de toutes ces observations nous concluons sur les possibilités d'extension et d'amélioration de la méthode actuelle.

V.2. - ETUDE DE L'ANOMALIE ELECTROMAGNETIQUE DANS UN TERRAIN HOMOGENE

Comme nous l'avons vu au cours du chapitre sur les phénomènes d'induction, si l'on travaille avec de la fréquence, le champ magnétique émis par le dipôle va créer dans le milieu des courants induits dont l'intensité est fonction de la résistivité des terrains et de la fréquence. Ces courants vont à leur tour engendrer des champs magnétiques "secondaires" opposés aux variations de flux qui leur ont donné naissance.

Les champs résultants que l'on pourra mesurer à la réception seront perturbés ; c'est l'importance de cette perturbation que l'on veut évaluer puisque c'est d'elle que vont provenir les éventuelles erreurs de localisation.

V.2.1. - HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

- . Fréquence non nulle
- . Milieu homogène et infini de conductivité
- . Approximation d'un rayonnement à courte distance.

Dans une telle configuration le champ magnétique est décrit par les équations suivantes :

$$H_r = 2 \frac{M \cos \phi}{4\pi r^3} (1 + Kr) e^{-kr}$$

$$H = \frac{M \sin \phi}{4\pi r^3} (1 + Kr + K^2 r^2) e^{-kr}$$

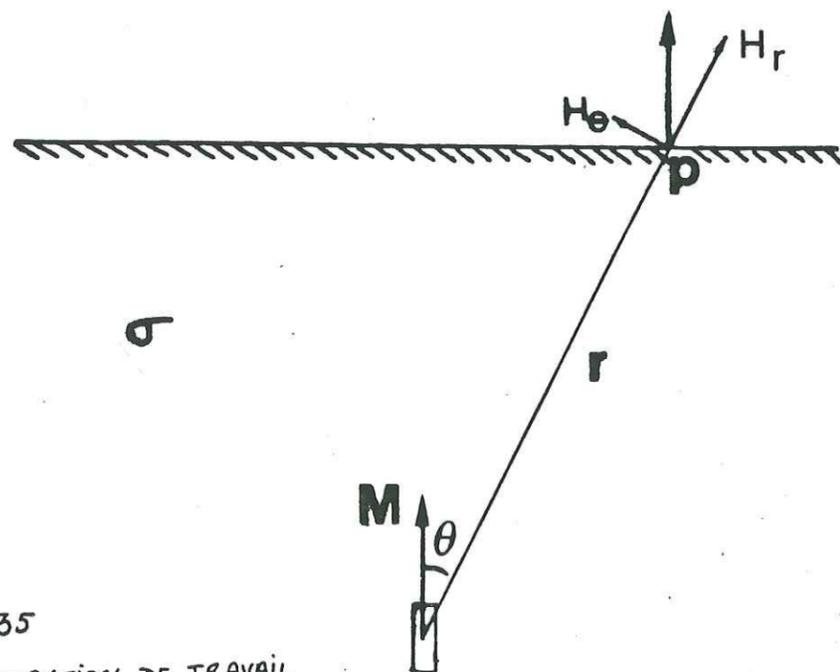


Fig 35
CONFIGURATION DE TRAVAIL

.../...

k : constante de propagation

$$k^2 = i\omega\mu\sigma \quad \text{soit } k = (1 + i) \frac{1}{\delta}$$

avec : δ profondeur de pénétration $\delta = \frac{2}{\sqrt{\sigma\mu\omega}}$

σ étant la conductivité du terrain ou de la lère couche dans le cas d'un milieu stratifié (mho/m) (Figure 35)

M est le moment magnétique du dipôle

r est la distance du dipôle au point d'observation

a) - On définit le paramètre B : nombre d'induction

$$B = \frac{\sqrt{\sigma\mu\omega} \cdot r}{2} = r/\delta$$

B caractérise la distance entre la source et le point d'observation exprimée en unité de profondeur de peau.

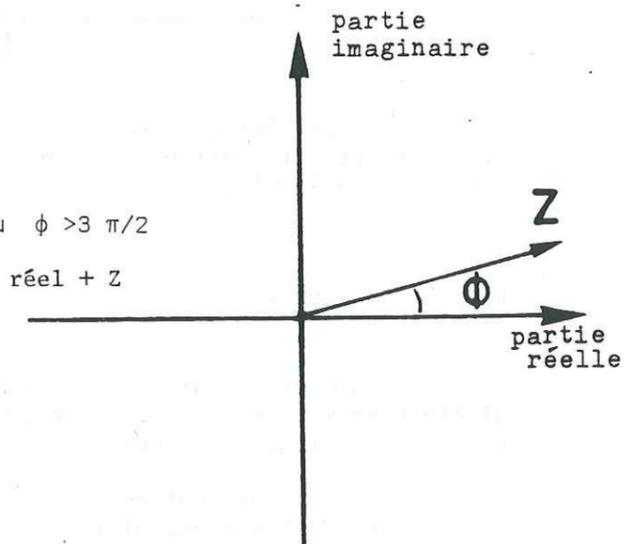
b) - L'étude du cas alternatif introduit des grandeurs complexes. On transforme ces nombres complexes en des nombres réels pour être compatible avec le programme de localisation CERCL qui travaille avec des valeurs réelles.

On pose l'approximation de calcul suivante :

Soit un nombre complexe :

- . d'amplitude Z
- . de déphasage $\phi < \pi/2$ ou $\phi > 3\pi/2$

Ce nombre est assimilé au réel + Z



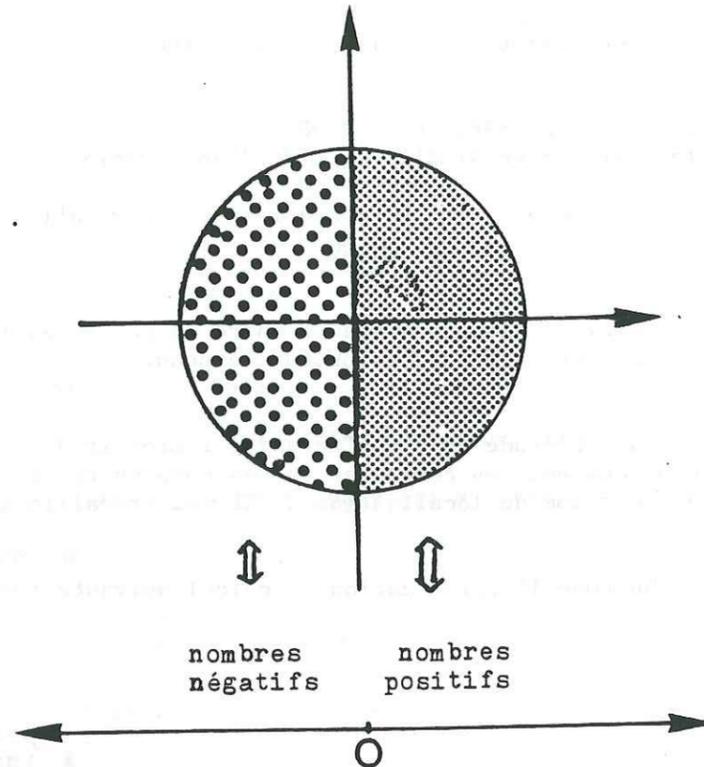
Le nombre complexe

- . d'amplitude Z
- . de déphasage $\pi/2 \leq \phi \leq 3\pi/2$

est assimilé au réel - Z

.../...

Ce qui revient à transformer une amplitude et une phase en une amplitude et un signe.



Il est évident que cette approximation est d'autant plus correcte que la partie imaginaire du nombre est faible c'est-à-dire pour des phases proches de 0 à 90°.

V.2.2. - OBJECTIF

On veut pouvoir connaître en tous points le champ magnétique d'un dipôle enfoui dans un terrain homogène et alimenté par une source de courant alternatif (en respectant les hypothèses posées auparavant).

Les valeurs obtenues pourront être transmises au programme de localisation CERCL qui calculera la position du dipôle. L'écart entre cette position et la position réelle (connue au départ, pour les calculs) permettra de situer la limite de validité de la méthode de localisation utilisée lors de mesures électromagnétiques.

Pour étudier différentes configurations, il faut pouvoir faire varier chacun des paramètres suivants :

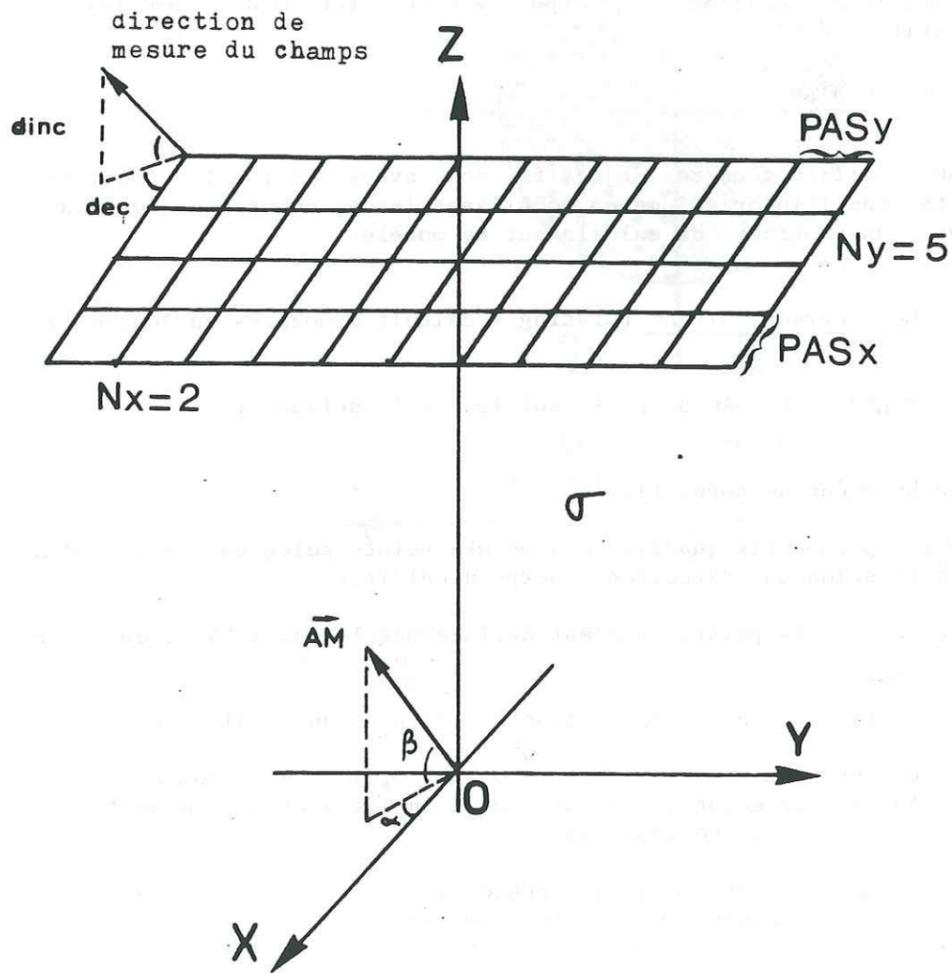
- la conductivité du terrain : pratiquement elle peut varier entre des valeurs élevées (4 mhos/m dans le cas de mesures en milieu marin) et des valeurs très faibles (mesures dans des calcaires karstiques résistants)
- la profondeur du dipôle : actuellement d'une centaines de mètres au maximum elle doit pouvoir atteindre quelques centaines de mètres, ce paramètre est limité dans la pratique par des problèmes d'accessibilité aux cavités lors de la mise en place du dipôle
- l'orientation du dipôle : elle peut être quelconque bien que dans la pratique on essaie de positionner le dipôle vertical (suspendu) pour avoir un dispositif symétrique,
- la fréquence du signal.

Pour réaliser tous ces objectifs, nous avons utilisé les possibilités offertes par l'informatique en modélisant le cas concret de terrain et en écrivant un programme de calculs sur ce modèle.

V.2.3. - Le programme DIPMAG (Listing + calculs commentés en Annexe 1)

Le programme DIPMAG s'appuie sur le modèle suivant :

- un terrain homogène de conductivité σ
 - une surface à prospector quadrillée avec NPX points selon une direction X et NPY points selon une direction Y perpendiculaire.
- La distance entre les points en X est définie par le pas : PASX, en Y par PASY.
- L'altitude de la surface de prospection par rapport au dipôle est Z.
- un dipôle au centre du repère OXYZ ($Z = 0, X = 0, Y = 0$), de moment magnétique AM et d'orientation définie par 2 angles α et β (α dans le plan XOY, β dans le plan horizontal),
 - la mesure du champ magnétique à une fréquence F selon une direction définie par la déclinaison DEC et l'inclinaison DINC.



V.2.3.1. - Données

Les données à fournir au programme sont les suivantes :

NX	$(NX = \frac{NPX}{2} - 1)$	DEC	en degrés
		DINC	
NY	$(NY = \frac{NPY}{2} - 1)$	sigma	en mhos/m
PASX	en mètres	F	en Hertz
PASY			
ALT	en mètres		
alpha	en degrés		
beta			
AM	en A/m		

V.2.3.2. - Résultats

On a le choix entre deux types de représentation des résultats (voir sous programme CSORT annexe 1)

- un tableau qui fait correspondre à chaque point l'amplitude et le déphasage du champ mesuré

- des courbes qui représentent l'amplitude et la phase du champ magnétique le long d'un profil (selon X ou Y)

Commentaire d'une courbe (Figure 36)

Valeurs fournies sur chaque courbe :

- Fréquence F
- Conductivité
- PASX PASY
- n° du profil
- NX NY
- Altitude Z
- Moment AM
- alpha, beta
- DEC DINC
- Amplitude max
- Ivar (paramètre fixé par l'utilisateur et définissant la nature des courbes : 1 : amplitude et phase du champ
2 : rapport amplitude alternatif et phase amplitude continu)

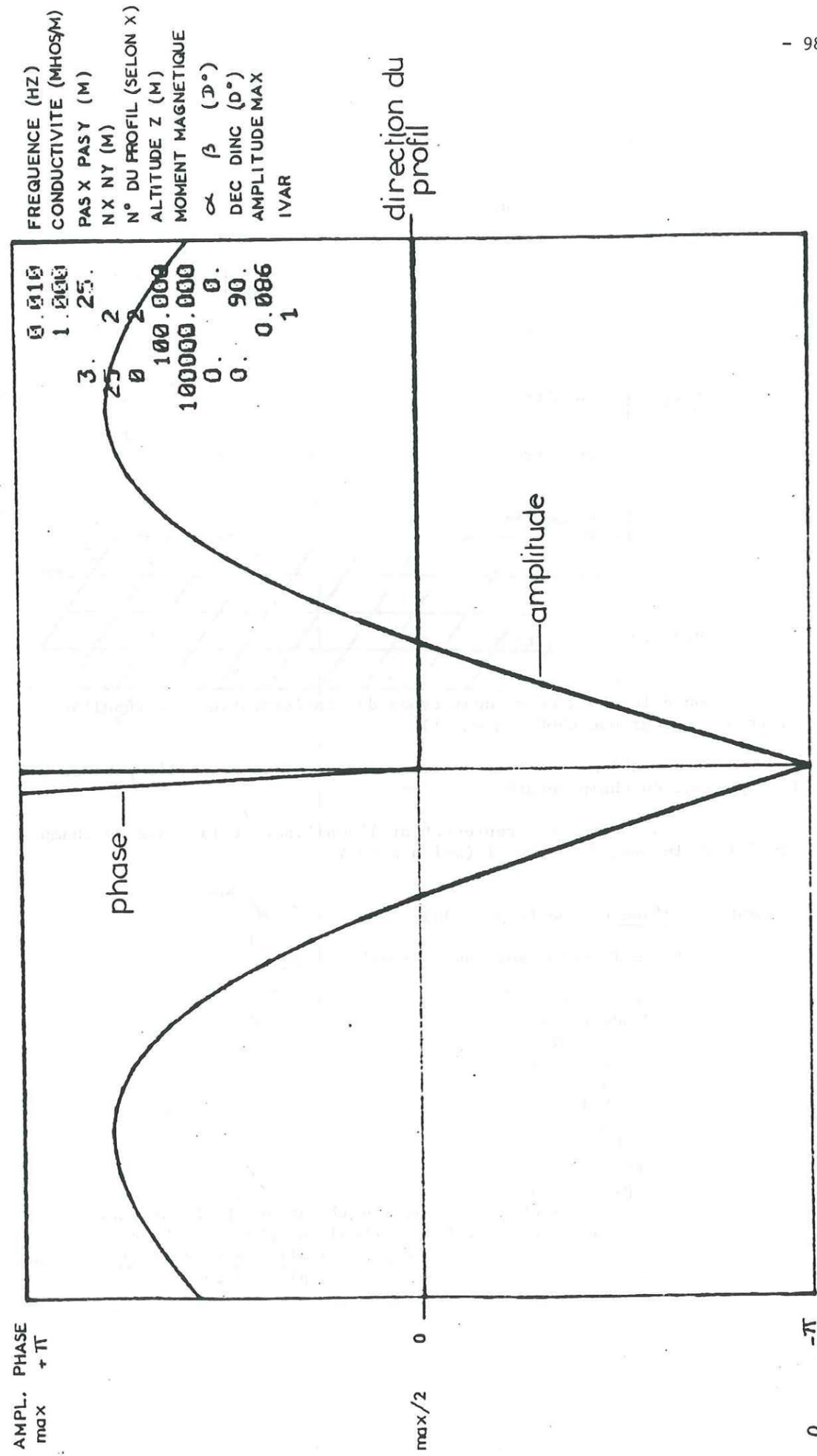
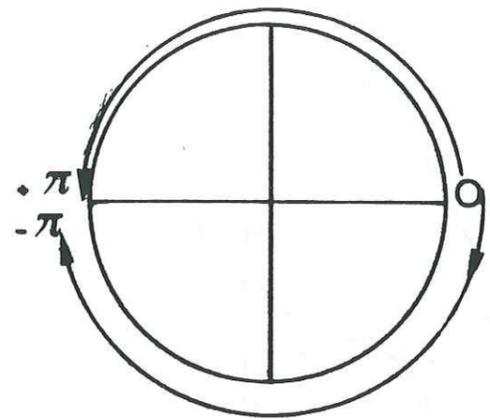


fig36 Exemple de résultat graphique du programme DIPMAG

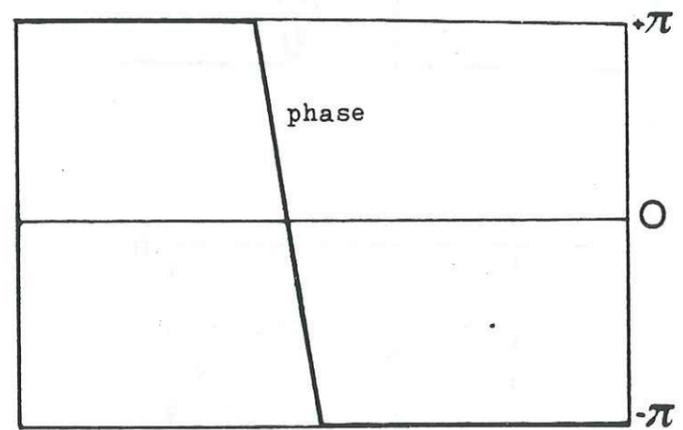
Lecture des courbes

La phase :

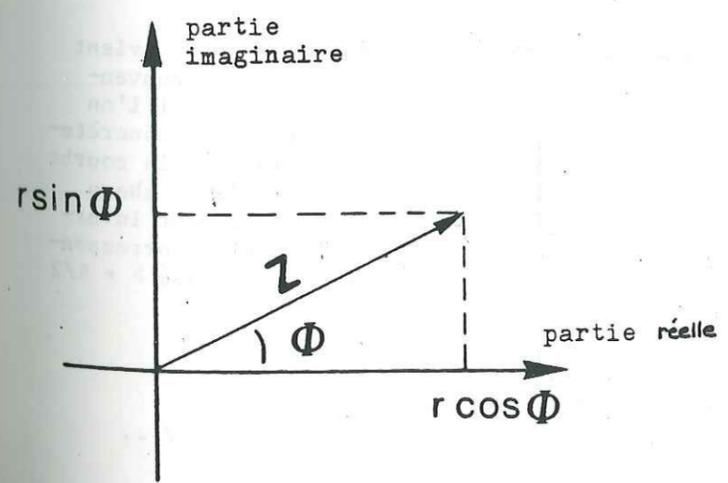


elle varie de $+\pi$ à $-\pi$ en repassant par zéro

Ce qui se traduit sur nos courbes par



Pour les valeurs mesurées qui sont de la forme



$$Z = r e^{i\phi} \quad r \text{ toujours positif}$$

$$= r (\cos \phi + i \sin \phi)$$

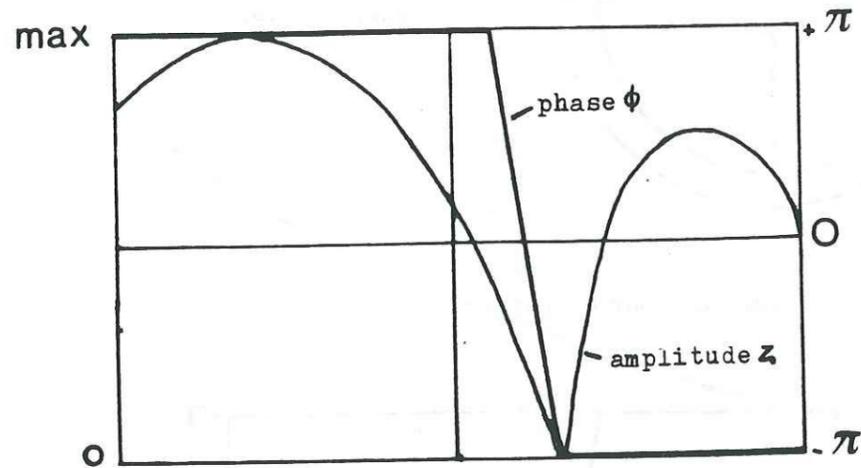
.../...

Quand $\phi = 0$ $\cos \phi = 1$ l'amplitude est positive $Z = r$
 Quand $\phi = \pi$ $\cos \phi = -1$ l'amplitude est négative $Z = -r$

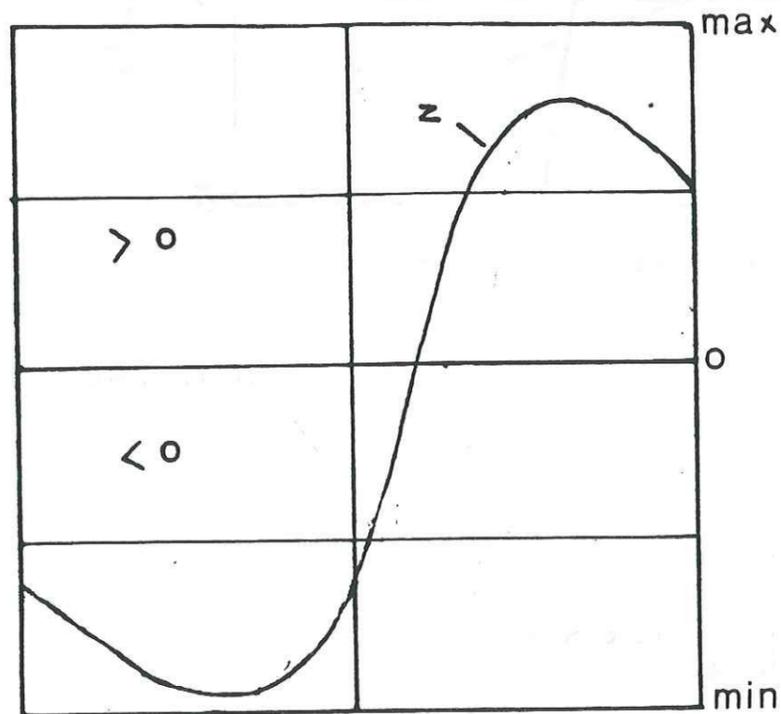
On pose les conditions suivantes pour avoir le signe des amplitudes suivant le déphasage :

- si $-\pi/2 < \phi < \pi/2$ L'amplitude est positive
- si $\pi/2 < \phi < 3\pi/2$ L'amplitude est négative

L'amplitude



elle va de zéro à la valeur maximum normée par rapport à l'ensemble des résultats



Après ce que l'on vient de voir sur les conventions de signe, si l'on veut représenter concrètement l'allure de la courbe de l'amplitude du champ magnétique il faut inverser les parties correspondantes à une phase $> +\pi/2$ ou $< -\pi/2$

On choisira la représentation sous forme de tableau pour transmettre des résultats au programme de localisation CERCL.

Par contre, toutes les observations sont faites à partir des documents graphiques beaucoup plus explicites.

V.2.4. - Effet de l'orientation du dipôle sur l'anomalie magnétique mesurée en surface

On travaille à une fréquence de 0,01 Hz dans un terrain très conducteur $\sigma = 1$ mho/m. Le dipôle est enterré à une profondeur de 100 m et on mesure la composante verticale du champ.

Nous avons étudié trois orientations différentes du dipôle :

- vertical $\alpha = 90^\circ$ $\beta = 90^\circ$
- horizontal $\alpha = 0^\circ$ $\beta = 0^\circ$
- incliné $\alpha = 45^\circ$ $\beta = 45^\circ$

Pour chaque configuration on obtient 5 profils selon X distants de 25 m entre eux. Ces résultats sont réunis dans l'annexe 2.

Nous commentons chacun des cas à partir du profil en $Y = 0$ (à la verticale du dipôle).

V.2.4.1. - Dipôle vertical (Figure 37)

L'anomalie magnétique est positive (déphasage nul) et symétrique par rapport à la verticale du dipôle.

On trouve le maximum d'amplitude le long du profil qui passe à l'aplomb du dipôle (Profil 3).

On a un dispositif géométriquement symétrique donc une courbe symétrique. La localisation est aisée dans ce cas particulier puisque le dipôle se situe à la verticale du point d'amplitude maximale, la localisation en profondeur s'obtient elle moins directement.

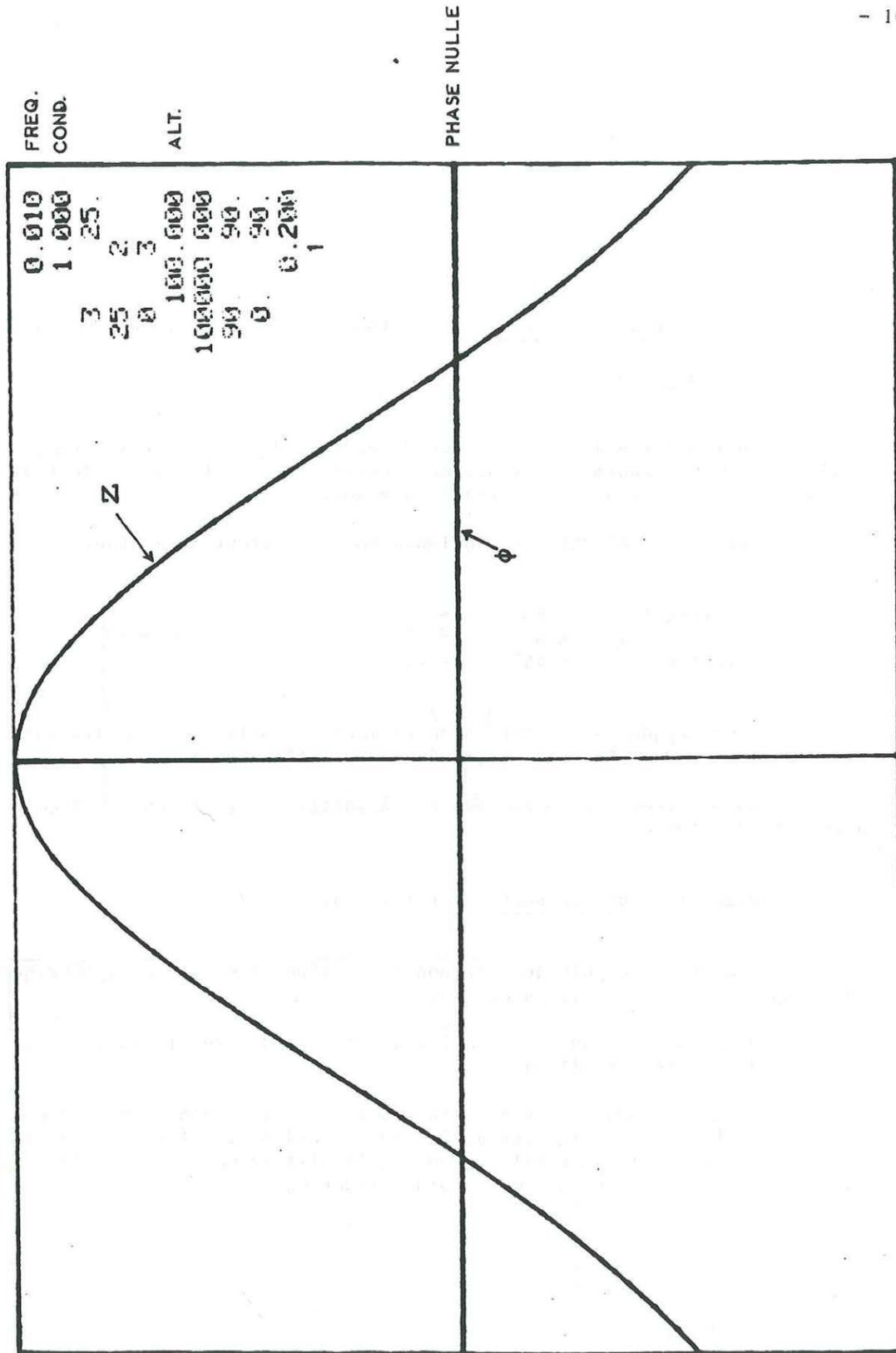
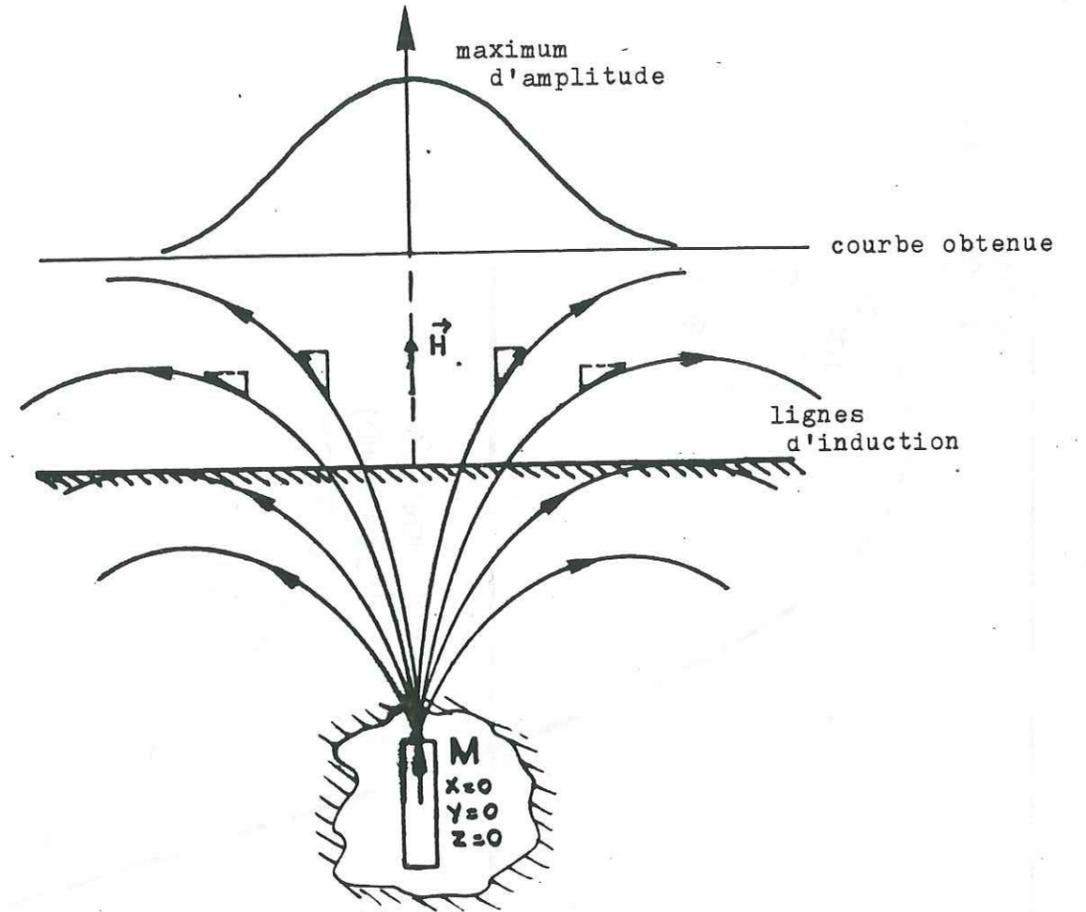


fig 37 Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle VERTICAL



V.2.4.2. - Dipôle horizontal selon X (Figure 38)

Là encore on a un dispositif symétrique donc une localisation aisée. La composante verticale du champ magnétique est nulle à la verticale du dipole. De part et d'autre de ce point l'anomalie est de signe opposée (la phase passe de π à 0). L'anomalie maximale est rencontrée sur le profil 3 qui passe à l'aplomb du dipôle. Latéralement la forme de la courbe reste la même mais avec des amplitudes qui vont décroissant avec la distance

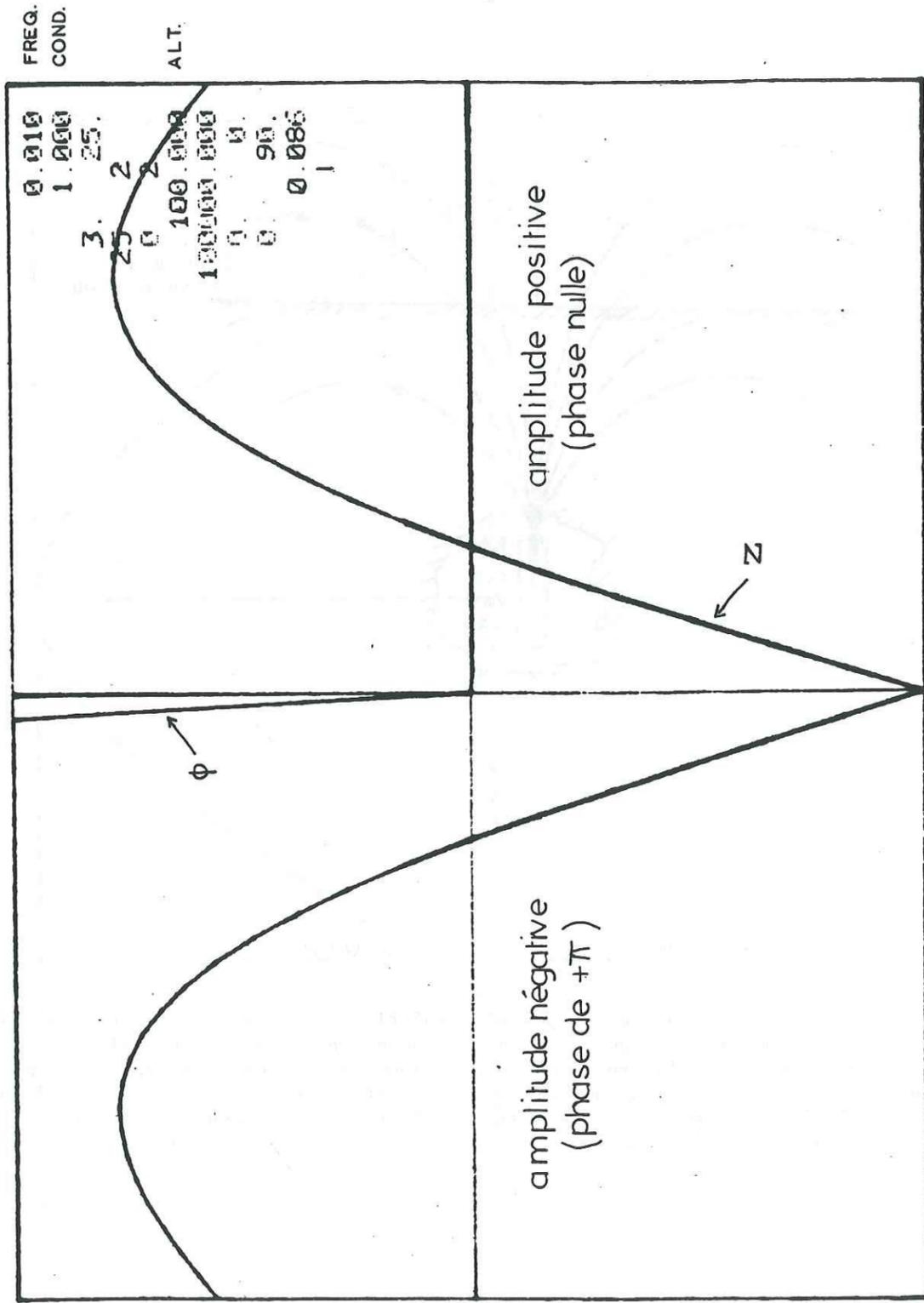
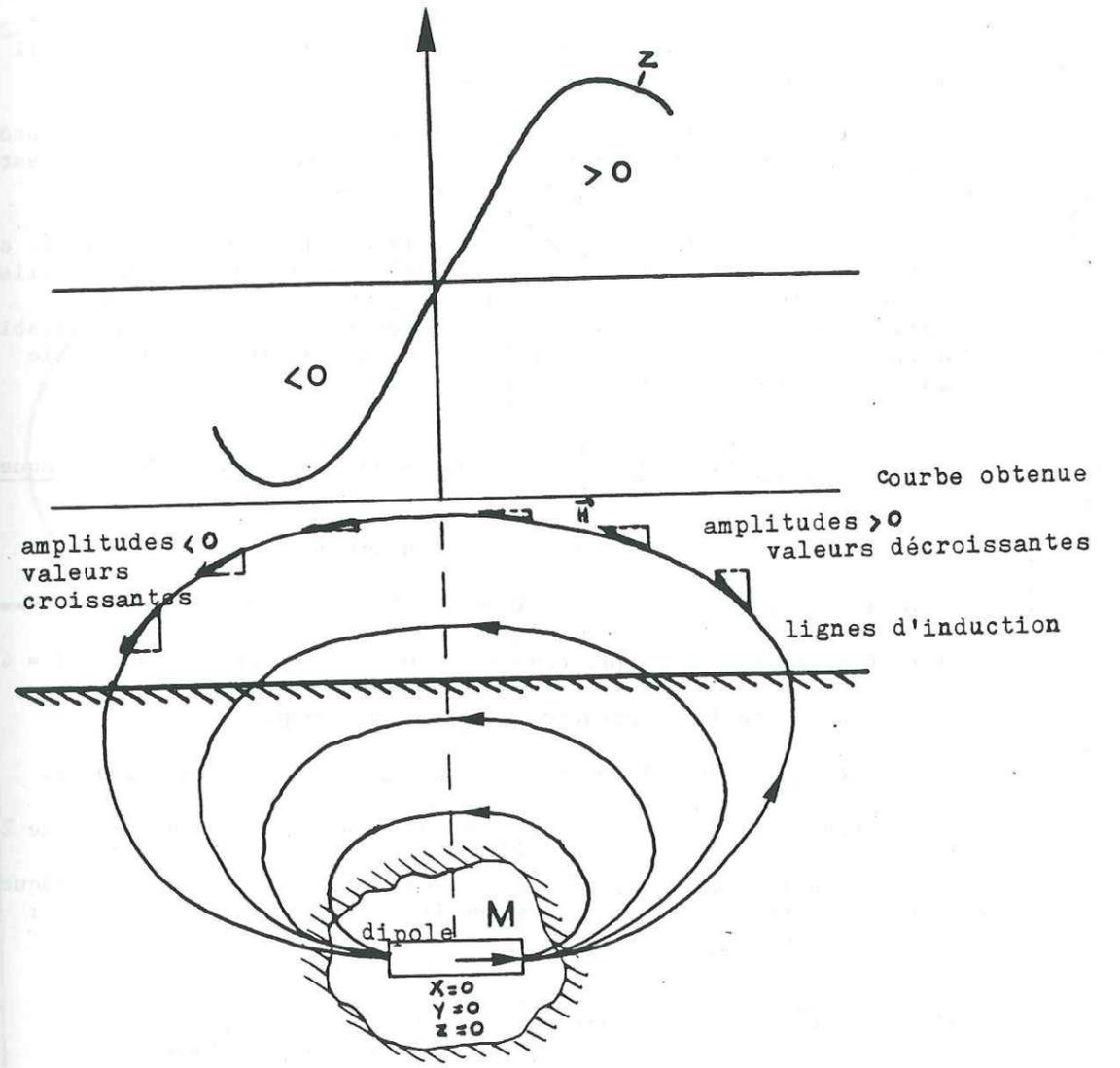


fig 38 Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle horizontal



V.2.4.3. - Dipôle incliné $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$ (Figure 39)

Dès que l'on perd la symétrie du dispositif et que le dipôle est orienté de manière quelconque, l'interprétation des résultats ne peut plus se faire intuitivement.

Les courbes sont dissymétriques, leur forme varie d'un profil à l'autre (en amplitude comme en phase).

On ne rencontre plus les plus fortes amplitudes le long du profil qui passe à l'aplomb du dipôle mais le long du profil 4. Ce maximum est décalé par rapport au dipôle sur toutes les courbes.

Au vu de résultats obtenus dans le cas d'une dipôle incliné, cas le plus général, il apparaît que même à très basse fréquence la localisation avec un dispositif non symétrique ne peut se faire de manière intuitive. Quand cela est possible pratiquement, il est donc préférable d'orienter le dipôle selon la verticale ou encore selon l'horizontale pour simplifier l'interprétation.

V.2.5. - Evolution de l'anomalie de champ magnétique avec la fréquence

On se place dans la configuration suivante :

- un milieu de conductivité $\sigma = 1$ mho/m
- un dipôle enterré à une profondeur de 100 m et incliné ($\alpha = 45^\circ, \beta = 45^\circ$)

On mesure la composante verticale du champ.

On étudie une plage de fréquence allant de 0,1 Hz à 100 Hz.

Les résultats sont figurés par des courbes réunies en annexe 2.

A partir de l'observation du profil n° 2, à différentes fréquences, on peut constater que l'allure des courbes change avec la fréquence : (Figures 40, 41, 42, 43, 44).

- l'amplitude diminue (amplitude maximale : $0,0127 \rightarrow 0,00653$)
0,1 Hz 100Hz
- les changements de phase deviennent de moins en moins francs.

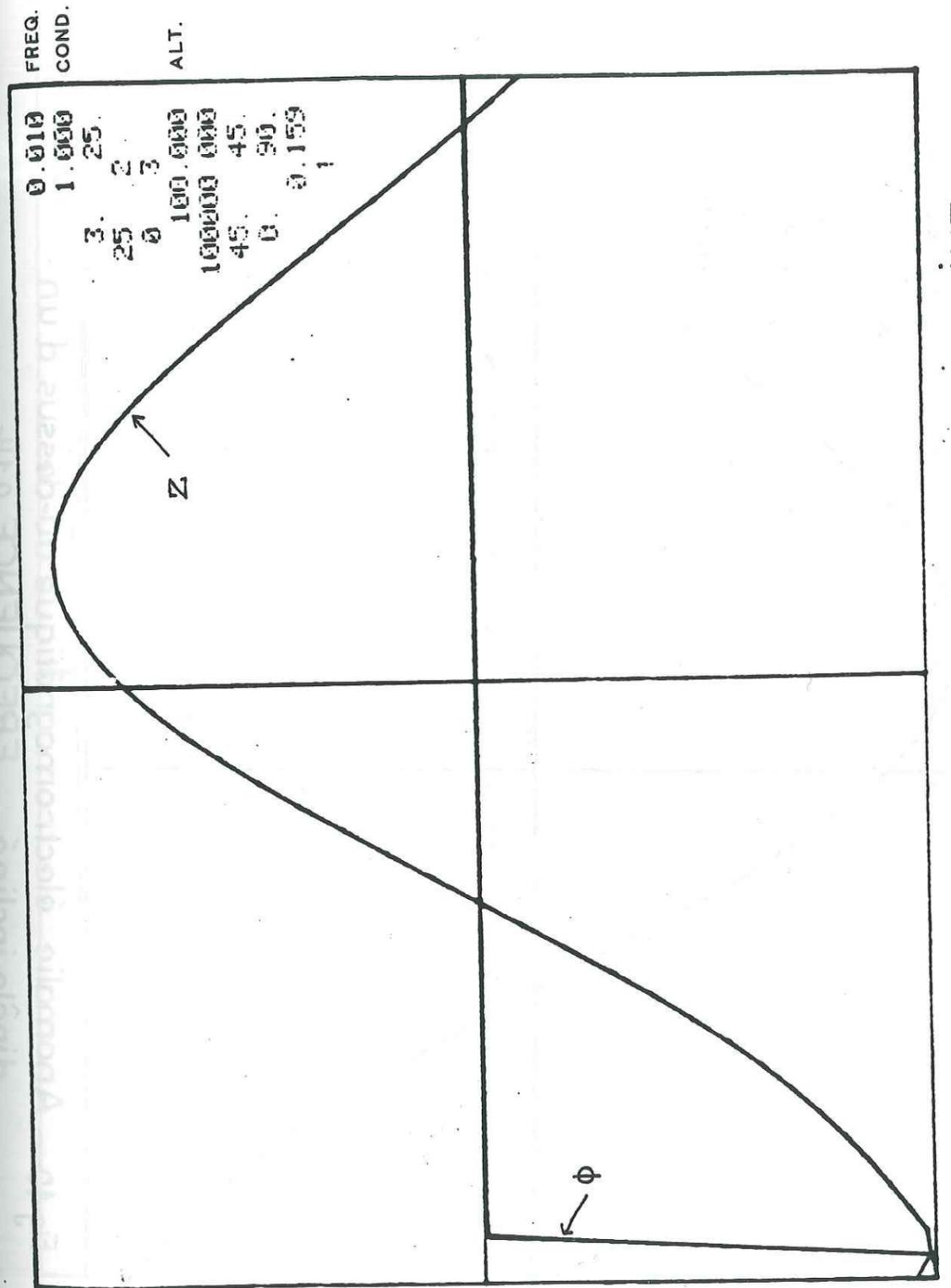


fig 39 Anomalie électromagnétique au-dessus dipôle INCLINE

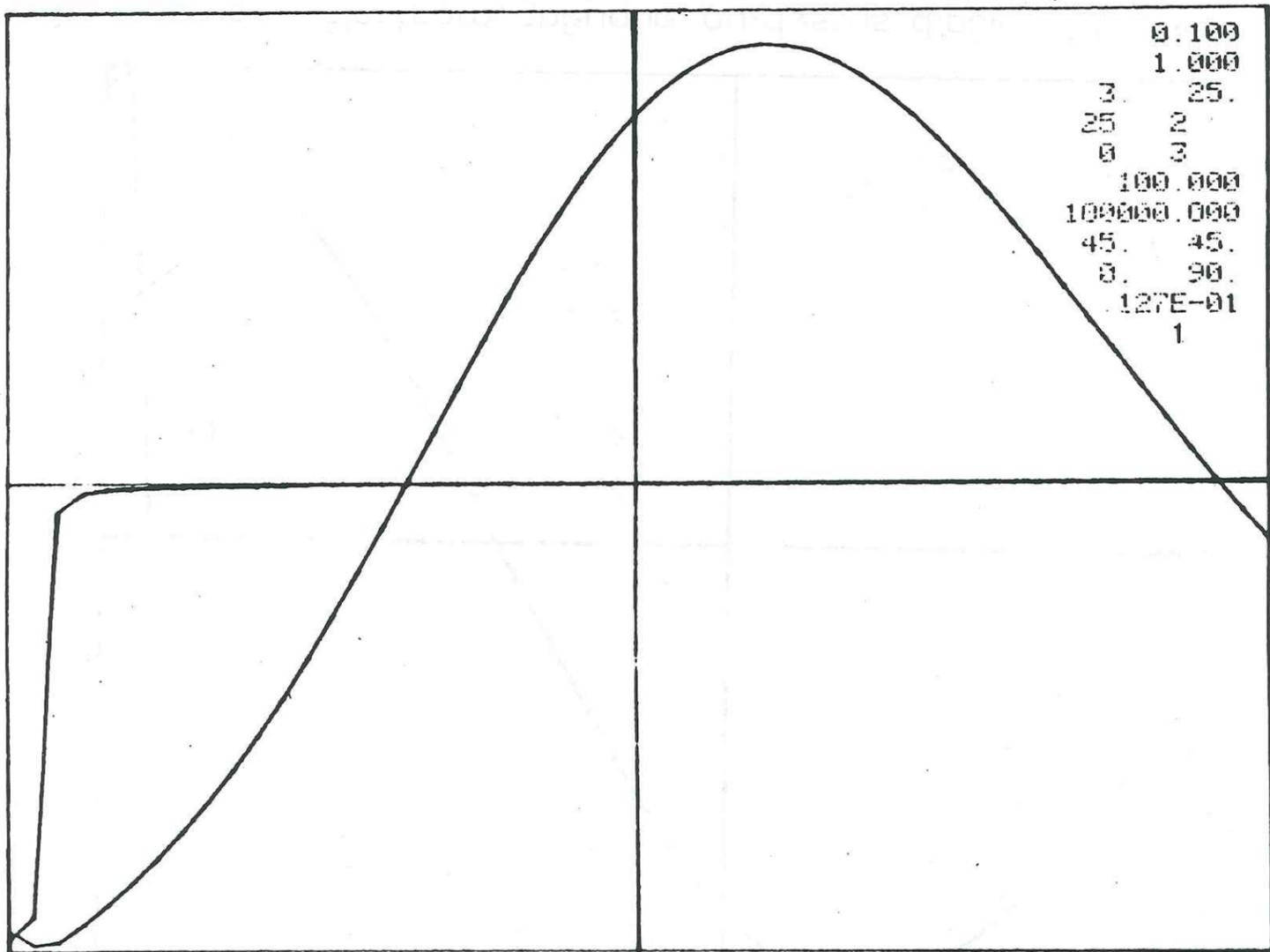


Fig 40 Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle incliné. FREQUENCE 0.1Hz

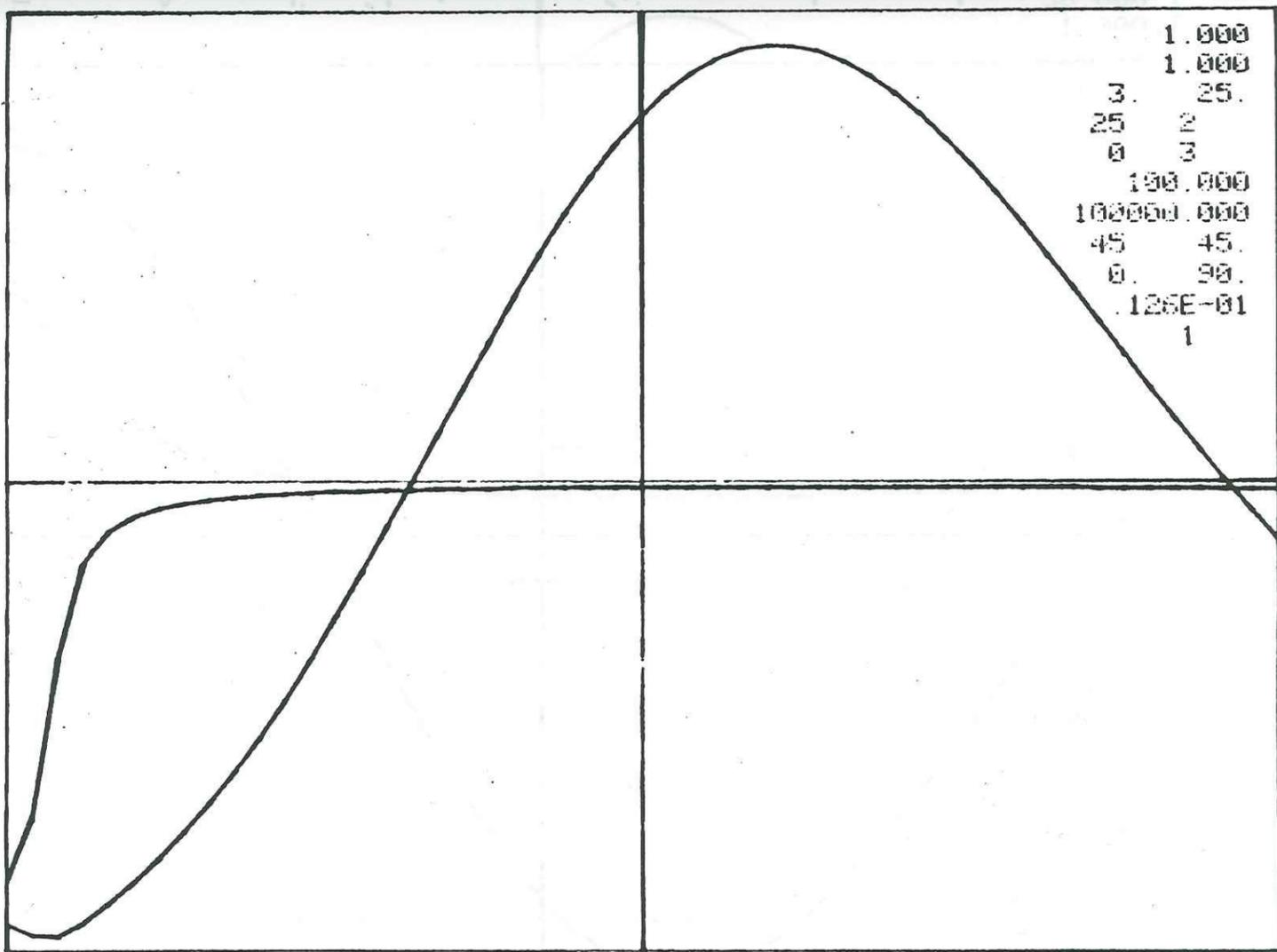


Fig 41 Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle incliné. FREQUENCE 1Hz

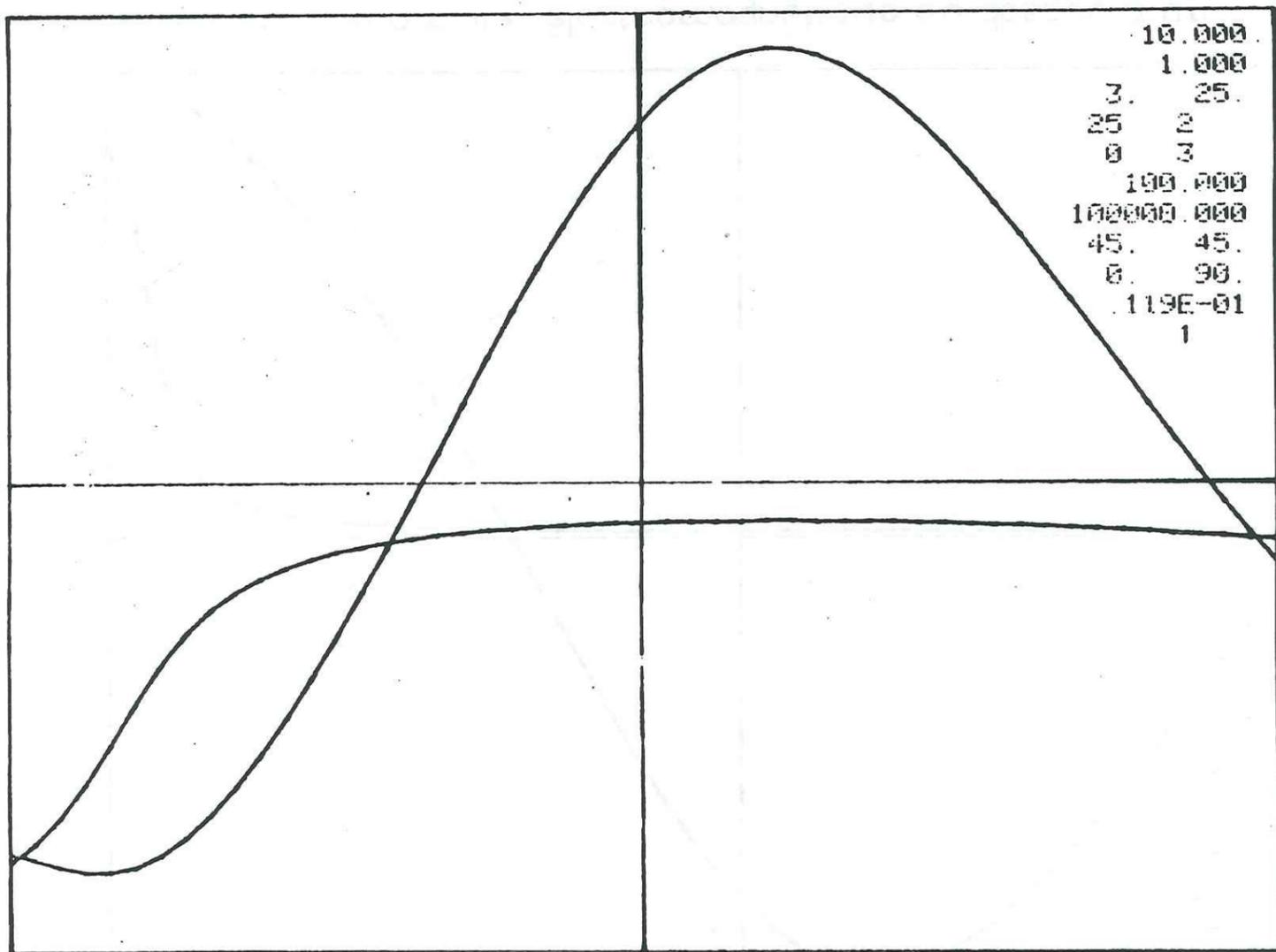


Fig 42 Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle incliné. FREQUENCE 10 Hz

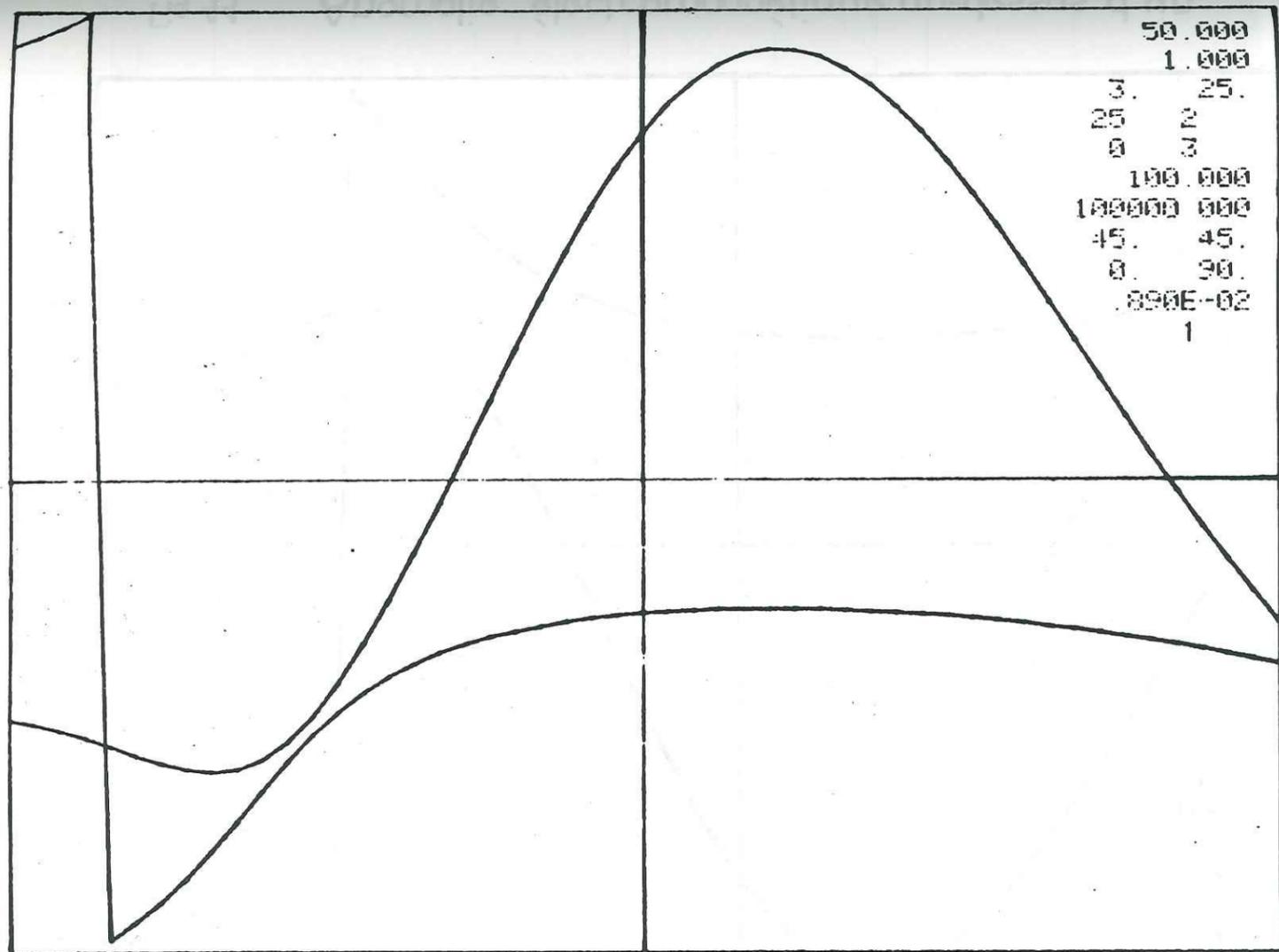


Fig 43 Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle incliné. FREQUENCE 50 Hz

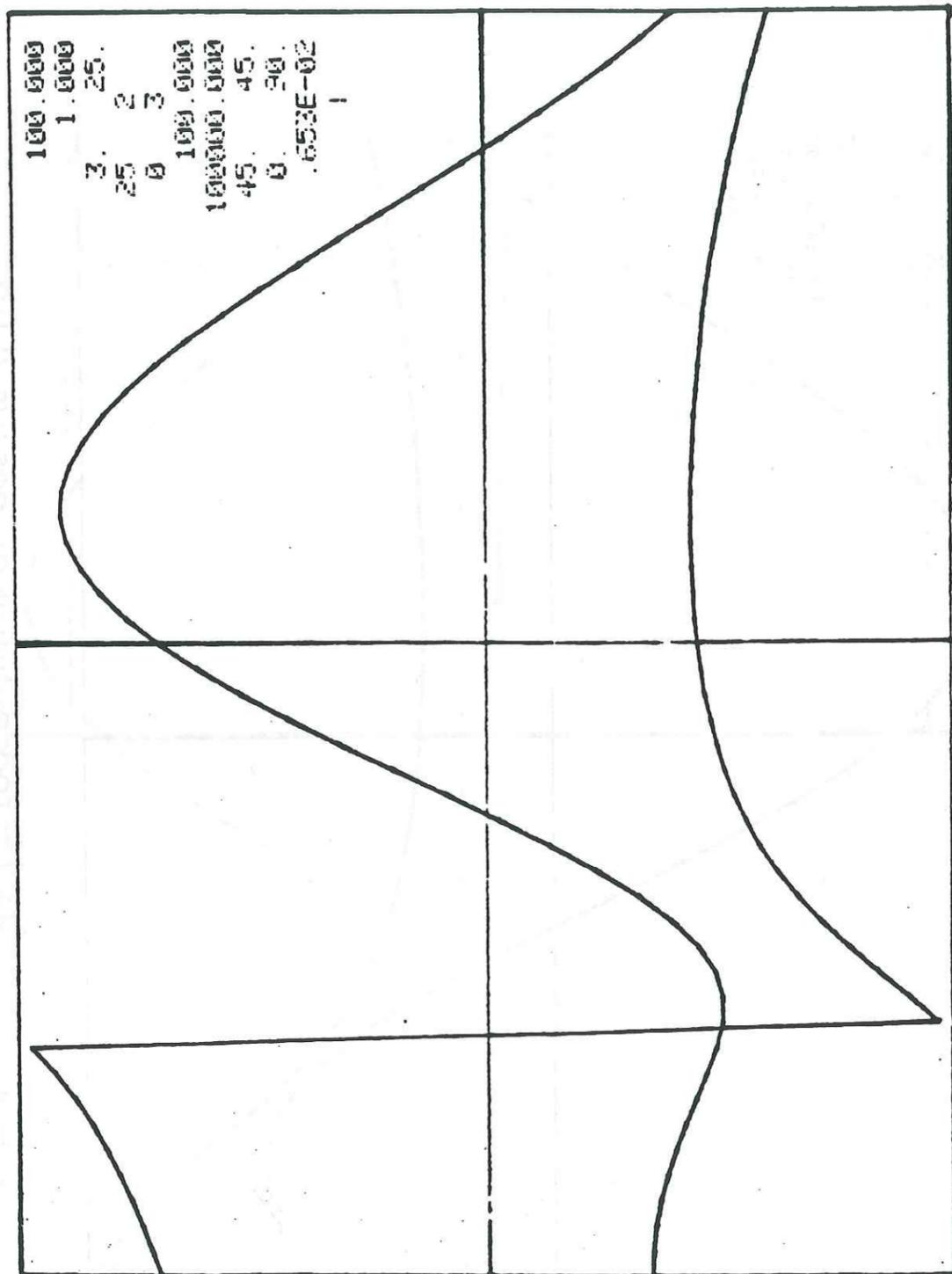


Fig 44 Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle incliné. FREQUENCE 100 Hz

La diminution de l'amplitude est un phénomène tout à fait normal sachant que le champ magnétique est calculé en chaque point à partir des formules suivantes :

Composante radiale

$$H_r = \frac{2 AM \cos \theta}{R^3} \left[1 + R/\delta + i \frac{R}{\delta} \right] e^{-r/\delta} e^{-i R/\delta}$$

Composante transversale

$$H = \frac{AM \sin \theta}{R^3} \left[1 + R/\delta + iR/\delta (1 + 2R/\delta) \right] e^{-R/\delta} e^{-iR/\delta}$$

La seule variable est le terme R/δ c'est à dire le nombre d'induction B :

$$B = R/\delta = \frac{\sqrt{\mu\omega\sigma}}{2} \times R$$

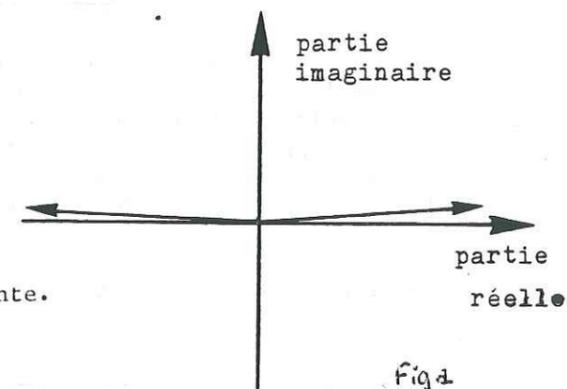
B varie en fonction du produit $\sigma \times F$. Une augmentation du produit $\sigma \cdot F$ (par variation de conductivité ou de fréquence au choix) entraîne une augmentation du terme R/δ donc une diminution des composantes du champ magnétique. Concrètement, ce sont les courants induits qui prennent naissance dans le milieu soumis à une variation de flux qui s'opposent au champ primaire. Ces courants sont d'autant plus intenses que la conductivité du terrain ou la fréquence du champ sont élevées et ils font chuter l'amplitude du champ primaire et introduisent en déphasage du champ résultant.

Le comportement de la phase est lui aussi significatif.

Franchement nulle ou égale à $-\pi$ en basse fréquence elle prend ensuite une valeur intermédiaire.

Ce comportement fixe la limite de validité de nos approximations.

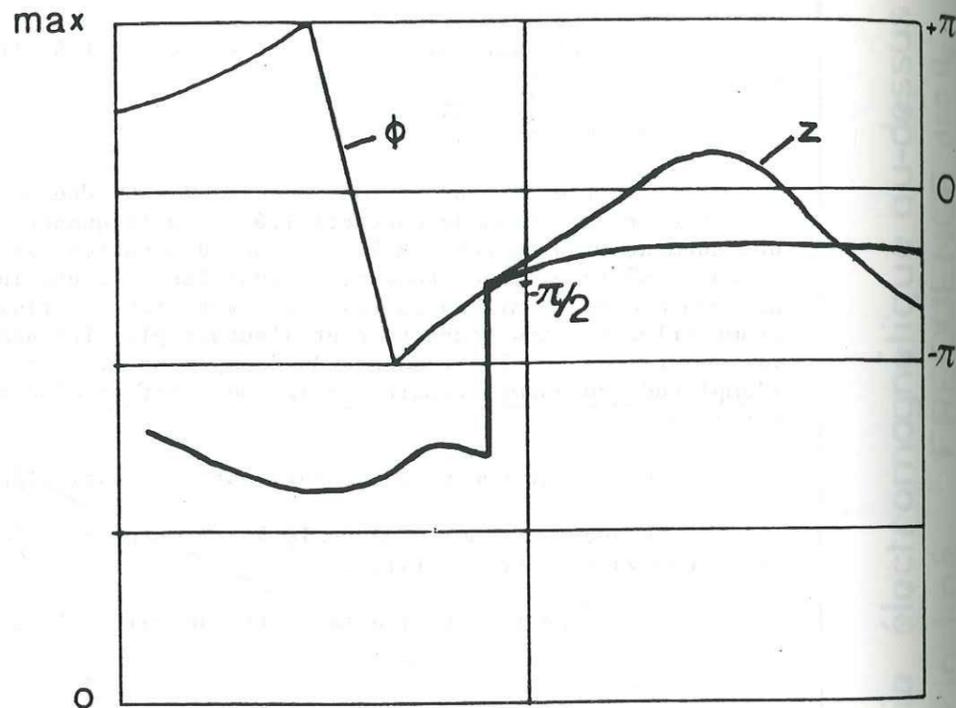
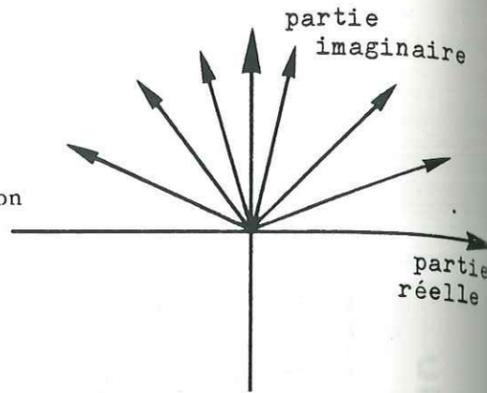
Tant que la valeur de la phase est proche de 0 ou $-\pi$ c'est à dire que le vecteur champs est représenté comme ci-contre fig.a



Le passage d'un nombre complexe à un nombre réel positif ou négatif est acceptable donc l'approximation cohérente.

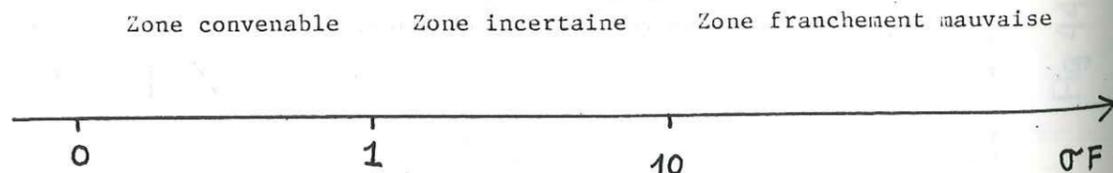
Fig 4

Par contre quand la phase prend des valeurs intermédiaires l'assimilation du nombre complexe à un réel positif ou négatif n'a plus guère de signification. L'interprétation du signe de l'amplitude donne des résultats non acceptables (voir figure b).



Ex : 50 Hz

Considérant que le passage par $\pm\pi/2$ détermine le changement de signe de l'amplitude, (voir figure ci-dessus), à partir de ces considérations il semble que l'on peut déjà distinguer trois zones fonction de la validité des approximations choisie pour étudier le cas alternatif. Ces zones sont délimitées par la valeur du produit σF (dans le cas étudié, égal à F , pour une conductivité de 1 mho).



.../...

CONCLUSION

L'étude en fréquence du champ d'un dipôle dans un milieu homogène permet de cerner un seuil entre le comportement statique et le comportement alternatif. Au-dessus de ce seuil caractérisé par une valeur du produit $\sigma \times F$, les effets dus au terrain sont suffisamment importants pour entraîner de fortes perturbations sur le comportement classique des grandeurs mesurées. Les résultats ne sont plus alors interprétables au moyen des approximations du cas alternatif.

Dans une première estimation, on trouve la fréquence limite égale à 10 Hz dans le cas d'un terrain très conducteur (1 mho/m cas extrême), donc un seuil correspondant à $\sigma F = 10$

Par exemple, pour un terrain classique de résistivité environ $10 \Omega M$, la fréquence limite serait de 100 Hz ce qui est déjà très élevé.

Remarque : Par son rôle et son comportement avec la fréquence, on peut tout à fait comparer le terrain à un blindage qui entoure le dipôle.

V.2.6. - RELATION ENTRE LA FREQUENCE ET LA PRECISION DE LA LOCALISATION DU DIPOLE DANS UN TERRAIN HOMOGENE

On vient de voir l'effet de la fréquence sur le signal électromagnétique notamment du point de vue de l'amplitude et de la phase du champ magnétique.

Il est nécessaire maintenant d'étudier les répercussions de ce phénomène sur la précision de la localisation du dipôle. Pour cela on assimile les valeurs du champ magnétique calculées par le programme DIPMAG aux résultats d'une mission sur le terrain. Selon le procédé classique on fournit donc ces données au programmes CERCL qui va calculer les coordonnées du dipôle et son orientation en se basant sur les équations du continu, à savoir l'expression suivante de H_r et H_θ

$$H_r = \frac{2 AM \cos \theta}{R^3} \quad H = \frac{AM \sin \theta}{R^3}$$

Connaissant déjà les coordonnées du dipôle ($X = 0, Y = 0, Z = 0$) qui définissent le trièdre de référence de tous nos calculs, on pourra estimer quantitativement l'influence de la fréquence au vue de l'erreur sur les coordonnées fournies par le programme CERCL.

Notre but est de déterminer dans quelles conditions limites il est encore possible d'appliquer la méthode "classique" d'interprétation en continu pour des mesures en alternatif sans souffrir d'erreur dans la localisation.

On étudie d'abord, à une profondeur donnée assez faible, l'erreur de localisation en fonction de la fréquence pour différentes orientations possibles du dipôle.

27 AOUT 2003

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

On étudie ensuite de manière plus approfondie le cas d'un dipôle incliné car c'est celui le plus proche de la réalité et le plus général du fait de l'absence de toute symétrie dans le dispositif.

Les données à fournir au programme CERCL sont les suivantes :

NPN : nombre total de points de mesure,
 UL : unité de longueur
 DEC : déclinaison de la composante du champ mesurée
 DINC : Inclinaison
 α, β : éventuelle anomalie magnétique régionale

XM, YM, ZM : Coordonnées des points
 TM : valeur de la composante du champ en chaque point

XE, YE, ZE : première estimation des coordonnées du dipôle

V.2.6.1. - En fonction de l'orientation du dipôle

On se place dans les conditions suivantes :

- . Terrain de conductivité 1 mho/m
- . Dipôle à une profondeur de 50 m

On mesure la composante verticale du champ sur un quadrillage de 70 m x 70 m.

Pour différentes orientations du dipôle on fait varier la fréquence de 0,1 Hz à 100 Hz.

Les résultats sont représentés sur le tableau 45.

X, Y, Z Coordonnées en mètres de l'aimant

AMX, AMY, AMZ Coordonnées du vecteur moment magnétique

Si l'on se fixe une précision maximale pour la localisation de 1 % à 2 % par rapport à la profondeur, on constate que :

. pour un dipôle vertical ou incliné la localisation du dipôle est satisfaisante jusqu'à un produit $\sigma \times F = 10$,

. pour un dipôle horizontal la localisation est correcte jusqu'à $\sigma \times F = 50$.

Au dessus de ces valeurs, les résultats ne sont plus assez précis ;

.../...

TABLEAU 45

Fréquence Hz	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = 90^\circ$	$\alpha = 90^\circ$ $\beta = 0$	$\alpha = 45^\circ$ $\beta = 45^\circ$	$\alpha = 45^\circ$ $\beta = 30$	$\alpha = 45^\circ$ $\beta = 60$	
0,1 Hz	X = 0 Y = 0 Z = 0 AMX = 0,88 AMY = 0,95 AMZ = 10 ⁶	X = 0 Y = 0 Z = 0 AMX = 10 ⁵ AMY = 0,34 AMZ = 135	X = 0 Y = 0 Z = 0 AMX = 500 AMY = 500 AMZ = 707	X = 0 Y = 0 Z = 0 AMX = 505 AMY = 503 AMZ = 674	X = -1,63 Y = -1,64 Z = 2,51 AMX = 561.10 ⁴ AMY = 561.10 ⁴ AMZ = 378.10 ⁴	X = -1,66 Y = -1,66 Z = 2,21 AMX = 37.10 ⁴ AMY = 37.10 ⁴ AMZ = 665.10 ⁴
10 Hz	X = 0 Y = 0 Z = 0,52 AMX = 0,37 AMY = -0,63 AMZ = 9,6 . 10 ⁶	X = 0 Y = 0 Z = 0,03 AMX = 224.10 ⁴ AMY = 997.10 ⁴ AMZ = 24,1	X = -0,333 Y = -0,34 Z = -0,44 AMX = 505 AMY = 503 AMZ = 674	X = -0,94 Y = -0,94 Z = 1,92 AMX = 561.10 ⁴ AMY = 561.10 ⁴ AMZ = 378.10 ⁴	X = -1,63 Y = -1,64 Z = 2,51 AMX = 485 AMY = 482 AMZ = 251	X = -1,66 Y = -1,66 Z = 2,21 AMX = 37.10 ⁴ AMY = 37.10 ⁴ AMZ = 665.10 ⁴
50 Hz	X = 0 Y = 0 Z = 2,51 AMX = 5,7 AMY = 4,4 MAZ = 7,87.10 ⁶	X = 0 Y = 0 Z = 0,47 AMX = 224.10 ⁻³ AMY = 952.10 ⁴ AMZ = 43,1	X = -1,63 Y = -1,64 Z = 2,51 AMX = 485 AMY = 482 AMZ = 251	X = -0,94 Y = -0,94 Z = 1,92 AMX = 561.10 ⁴ AMY = 561.10 ⁴ AMZ = 378.10 ⁴	X = -1,63 Y = -1,64 Z = 2,51 AMX = 485 AMY = 482 AMZ = 251	X = -1,66 Y = -1,66 Z = 2,21 AMX = 37.10 ⁴ AMY = 37.10 ⁴ AMZ = 665.10 ⁴
100 Hz	X = 0 Y = 0 Z = 4,13 AMX = 0,09 AMY = 0,019 AMZ = 64	X = 0 Y = 0 Z = 1,2 AMX = 107.10 ³ AMY = 875.10 ⁴ AMZ = 29,5	X = -2,41 Y = -2,41 Z = 6,02 AMX = 419 AMY = 419 AMZ = 349	X = -0,94 Y = -0,94 Z = 1,92 AMX = 561.10 ⁴ AMY = 561.10 ⁴ AMZ = 378.10 ⁴	X = -1,63 Y = -1,64 Z = 2,51 AMX = 485 AMY = 482 AMZ = 251	X = -1,66 Y = -1,66 Z = 2,21 AMX = 37.10 ⁴ AMY = 37.10 ⁴ AMZ = 665.10 ⁴

.../...

notamment l'orientation du dipôle elle aussi est erronée (AMX, AMY, AMZ).

On remarque que pour des dispositifs symétriques (dipôle vertical ou horizontal) l'erreur de localisation porte uniquement sur la profondeur (Z) d'où l'intérêt déjà mis en évidence d'essayer, quand cela est possible, de positionner le dipôle avec une telle orientation.

V.2.6.2. - En fonction de la profondeur du dipôle

On se place dans les conditions suivantes :

- . un terrain de conductivité 1 mho/m
- . un dipôle incliné ($\alpha = \beta = 45^\circ$)

On mesure la composante verticale du champ sur une surface variable proportionnelle à la profondeur.

On fait varier la fréquence de 0,1 Hz à 40 Hz pour différentes profondeurs du dipôle.

Les résultats sont représentés sur le tableau 46.

On constate que plus la profondeur croît, plus la valeur du produit F pour une localisation correcte diminue.

Puisque l'on fait varier la distance et la fréquence pour une conductivité donnée, le terme le plus approprié pour décrire les phénomènes est le nombre d'induction

$$B = R/\delta = \frac{\sqrt{\mu_0 \sigma \omega}}{2} \times R$$

Les résultats suivent la règle suivante :

Si l'on se fixe une marge d'erreur de 2 % un rapide calcul de la valeur de B pour chaque fréquence à chaque profondeur permet de remarquer la chose suivante :

La précision de localisation est bonne dans toutes les configurations tant que B est inférieur à 0,6 c'est à dire tant que la profondeur du dipôle est d'environ la moitié (ou moins) de la profondeur de pénétration.

Fréquence Hz	Z = 50 m	Z = 100 m	Z = 125 m	Z = 150 m	Z = 200 m
0,1 $\sigma.F = 0,1$	X = 0 Y = 0 Z = 0 AMX = 5 000 AMY = 5 000 AMZ = 7 070	X = 0,01 Y = 0,01 Z = 0,01 AMX = 5 000 AMY = 5 000 AMZ = 7 070	X = 0,02 Y = 0,02 Z = 0,04 AMX = 5 000 AMY = 5 000 AMZ = 7 060	X = 0,04 Y = 0,04 Z = 0,07 AMX = 5 000 AMY = 5 000 AMZ = 7 050	X = 0,1 Y = 0,1 Z = 0,2 AMX = 5 000 AMY = 5 000 AMZ = 7 040
0,5 $\sigma.F = 0,5$			X = 0,2 Y = 0,2 Z = 0,28 AMX = 5 010 AMY = 5 010 AMZ = 6 980	X = 0,39 Y = 0,39 Z = 0,53 AMX = 5 010 AMY = 5 010 AMZ = 6 930	X = 1,03 Y = 1,04 Z = 1,4 AMX = 5020 AMY = 5 010 AMZ = 6 790
1 $\sigma.F = 1$	X = 0,02 Y = 0,02 Z = 0,02 AMX = 5 000 AMY = 5 000 AMZ = 7 050		X = 0,49 Y = 0,49 Z = 0,66 AMX = 5020 AMY = 5 020 AMZ = 6 870	X = 0,89 Y = 0,90 Z = 1,19 AMX = 5020 AMY = 5020 AMZ = 6760	X = 2,56 Y = 2,56 Z = 3,75 AMX = 5 010 AMY = 5 010 AMZ = 6 390
1,5 $\sigma.F = 1,5$				X = 1,54 Y = 1,38 Z = 2,04 AMX = 5 020 AMY = 5 000 AMZ = 6 550	X = 3,95 Y = 3,95 Z = 5,22 AMX = 5 010 AMY = 5 010 AMZ = 6 070
2,5 $\sigma.F = 2,5$		X = 0,67 Y = 0,67 Z = 0,87 AMX = 5 020 AMY = 5 020 AMZ = 6 270	X = 1,33 Y = 1,33 Z = 1,71 AMX = 5 020 AMY = 5 020 AMZ = 6 500		
5 $\sigma.F = 5$		X = 1,36 Y = 1,36 Z = 1,72 AMX = 5 010 AMY = 5 010 AMZ = 6 340			
10 $\sigma.F = 10$	X = 0,33 Y = 0,34 Z = 0,44 AMX = 5 050 AMY = 5 030 AMZ = 6 740	X = 2,47 Y = 2,47 Z = 3,02 AMX = 4 930 AMY = 4 920 AMZ = 5 740			
40 $\sigma.F = 40$	X = 1,23 Y = 1,23 Z = 1,51 AMX = 4 930 AMY = 4 930 AMZ = 5 720				

V.2.7. - CONCLUSION

Avec les hypothèses que nous avons posées en début de ce chapitre, à savoir : un terrain homogène et infini de résistivité ρ , une étude du champ à courte distance et les simplifications de calculs exposées précédemment, on peut tirer, des observations effectuées, la conclusion suivante :

pour utiliser la méthode actuelle de localisation avec une précision de 1 à 2 % et en travaillant dans des conditions électromagnétiques il faut respecter la règle suivante :

$$R \ll 0,6 k \delta$$

c'est à dire travailler avec un dipôle enfoui à une profondeur (R) inférieure ou égale à la moitié de la profondeur de peau.

La profondeur de peau ρ étant la fonction de la fréquence et de la conductivité du milieu ceci revient à dire que la profondeur d'investigation autorisée pour une bonne précision est définie par

$$R \ll 0,6 k (\sigma \times F) \quad K : \text{constante}$$

Au delà de telles limites l'intervention du milieu est telle qu'il n'est plus possible de la négliger sans risque d'erreur conséquente dans la localisation.

V.3. - ETUDE DE L'ANOMALIE ELECTROMAGNETIQUE DANS UN MILIEU HETEROGENE

Avec le programme DIPMAG, nous avons pu simuler le cas d'un terrain de conductivité homogène, il s'agit maintenant de se rapprocher du cas concret en étudiant un milieu hétérogène.

Nous avons choisi d'introduire cette notion d'hétérogénéité par le biais d'une sphère très conductrice.

Il existe dans la littérature quelques articles traitant de l'influence de sphères ou de cylindres conducteurs sur les champs électromagnétiques (28)(29)(33)(38)(39)(40)(41)(56)(58). Les phénomènes apparaissant autour d'un cylindre étant les plus complexes nous avons choisi de travailler avec un modèle de sphère. D'un point de vue géologique la présence d'une sphère très conductrice dans un terrain peut correspondre à un amas minéralisé ou à un réservoir karstique...

Nous avons plus particulièrement travaillé à partir d'un article de H.W. March (40) qui traite du champ électromagnétique créé par une sphère infiniment conductrice excitée par un dipôle.

Le calcul général fait intervenir des équations complexes (Fonctions de Bessel) qui se simplifient relativement si l'on respecte les hypothèses suivantes :

Une sphère de rayon "a" tel que

$$\sigma \mu a \ll 1 \quad (\text{petit rayon})$$

de conductivité très élevée par rapport au terrain encaissant

Des distances dipôle - sphère : b et sphère point de mesure : r telles que

$$\sigma \mu b \ll 1 \quad \text{et} \quad \sigma \mu r \ll 1$$

Dans ces conditions March donne les composantes du champ secondaire induit par la sphère en présence d'un dipôle radial et d'un dipôle transversal de moment unité.

Nous travaillerons à partir de ces formules donc en respectant les hypothèses citées plus haut.

Avec le programme DIPMAG on obtient les composantes du champ électromagnétique créé par un dipôle ; à partir des formules de March on pourra calculer le champ secondaire induit par la sphère. En combinant ces deux champs on connaîtra le champ résultant.

V.3.1. - Champ induit par une sphère conductrice excitée par un dipôle

La configuration adoptée par March est représentée sur la figure suivante :

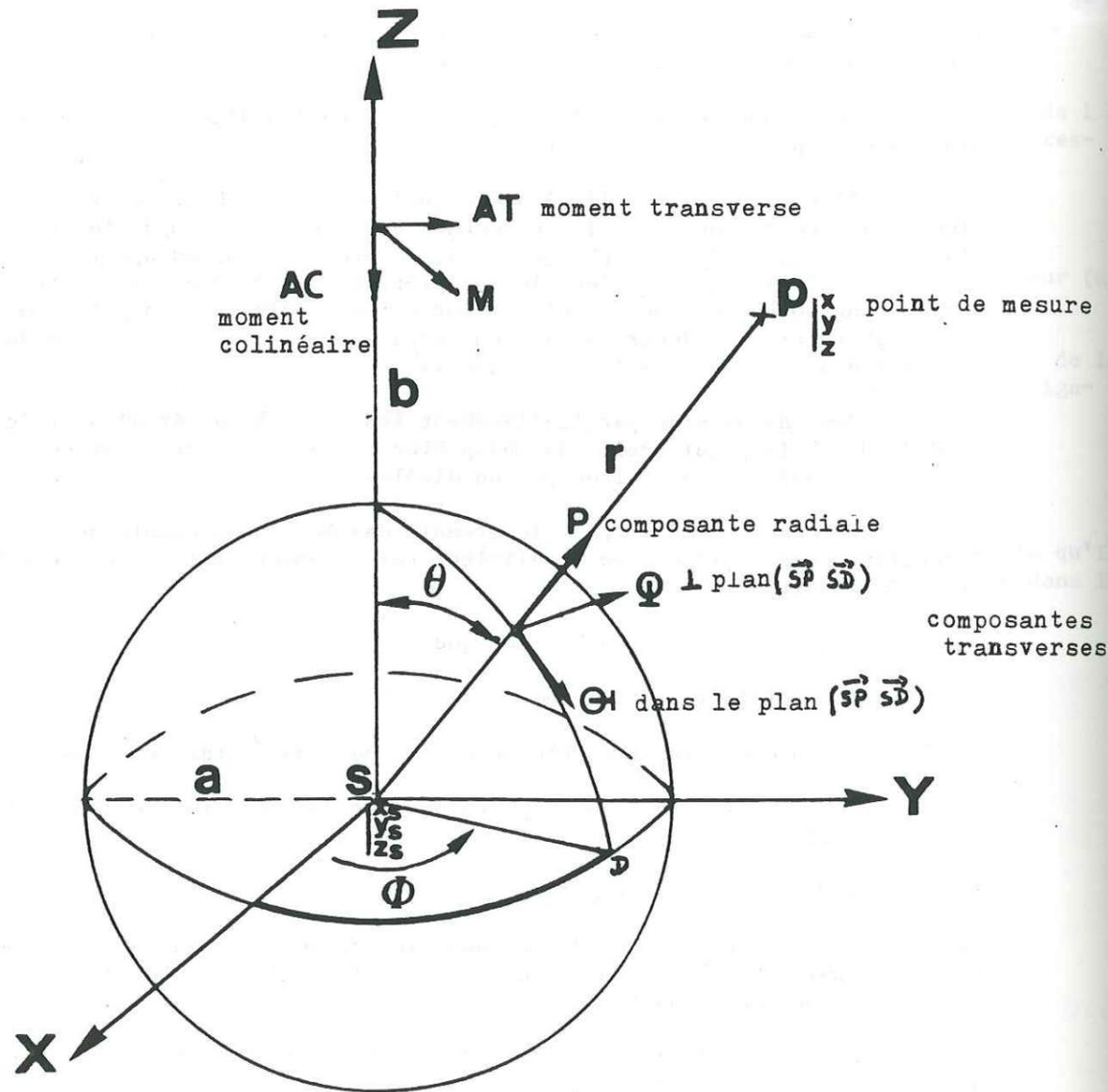


Figure 47 : Repère associé aux calculs de March (Réf. 40)

Le trièdre de base de March est centré au centre de la sphère.

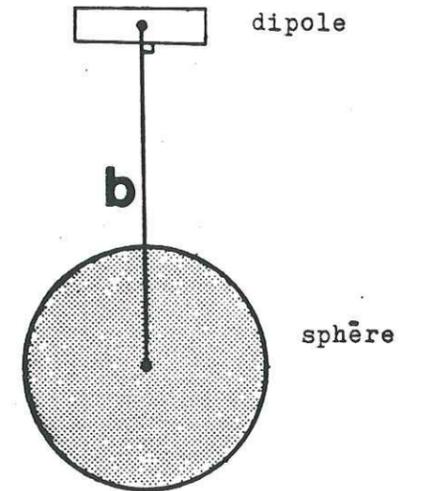
.../...

Formules du champ secondaire associé à un dipôle transverse

Le calcul permet de connaître les composantes du champ : P , ϕ et Θ induit par la sphère excitée par le dipôle.

Dipôle transversal

Les composantes sont les deux solutions d'une équation



1ère solution

$$P_{1a} = 0$$

$$\Theta_{1a} = k_a^2 \cos \phi (a^3/b^2 r^2) \left[1 + (3a^2/4br) \cos \theta + (a^4/6b^2 r^2) (5 \cos^2 \theta - 11) \cos \theta \right]$$

$$\Phi_{1a} = -k_a^2 \sin \phi (a^3/b^2 r^2) \left[\cos \theta + (3a^2/4br) \cos 2\theta + (a^4/6b^2 r^2) (15 \cos^2 \theta - 11) \cos \theta \right]$$

2ème solution

$$P_{2a} = \cos \phi \sin \theta (a^3/b^3 r^3) \left[1 + (6a^2/br) \cos \theta + (9a^4/2b^2 r^2) (5^2 \cos \theta - 1) \right]$$

$$\Theta_{2a} = -\cos \phi (a^3/2b^3 r^3) \left[\cos \theta + (4a^2/br) \cos 2\theta + (9a^4/4b^2 r^3) (15 \cos^2 \theta - 11) \cos \theta \right]$$

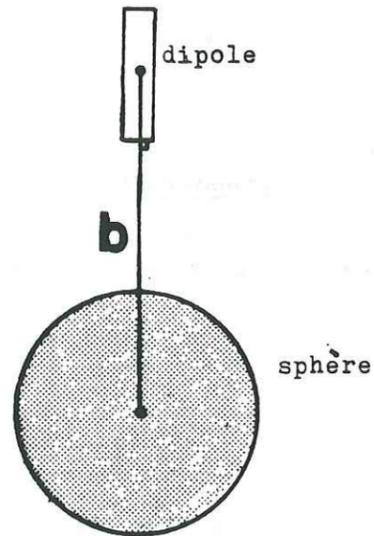
$$\Phi_{2a} = \sin \phi (a^3/2b^3 r^3) \left[1 + (4a^2/br) \cos \theta + (9a^2/4b^2 r^2) (5 \cos^2 \theta - 1) \right]$$

Les composantes du champ secondaire total créé par la sphère dans le cas d'un dipôle transverse sont obtenues en combinant les composantes des deux champs partiels données par les équations précédentes.

.../...

Formules du champ secondaire associé à un dipôle radial

Dipôle radial



$$P_{2a} = - (2a^3/b^3r^3) [\cos \theta + (3a^2/2br)(3 \cos^2\theta - 1) + (3a^4/b^2r^2)(5 \cos^2\theta - 3) \cos \theta]$$

$$\Theta_{2a} = -(a^3 \sin \theta / b^3 r^3) [1 + (6a^2/br) \cos \theta + (9a^4/2b^2r^2)(5 \cos^2\theta - 1)]$$

$$\Phi_{2a} = 0$$

avec $Ka = \sqrt{i\mu\omega\sigma}$ terme imaginaire, introduit un déphasage

Le coefficient qui intervient pour le calcul des composantes du champ est un terme en a^n

$$b^n r^n$$

Au vue de ces formules, on peut déjà faire les remarques suivantes :

Influence du rayon de la sphère : a

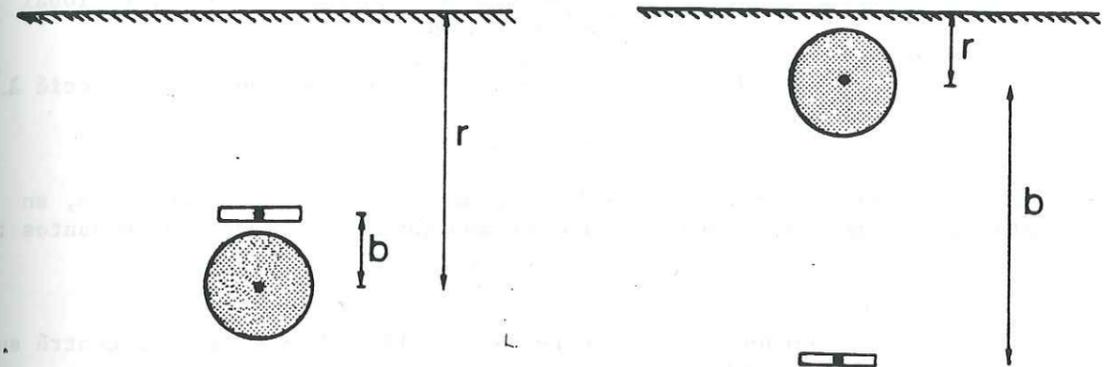
Les effets varient en fonction du volume de la sphère (terme en a^3).

Par exemple : une sphère de 1 m de rayon a un effet 1000 fois plus petit qu'une sphère de 10 m de rayon

Influence de la distance dipôle-sphère : b et de la distance sphère-point de mesure : r

Le rapport a/b est inférieur à un (développement fini avec convergence des formules)

b apparaît au cube et au carré et associé à r à la même puissance.



Ainsi dans les deux configurations ci-dessous les effets seront identiques.

Les vecteurs P, Φ et Θ sont exprimés dans un système de coordonnées ox,y,z, centré sur la sphère.

Tous les paramètres qui entrent en jeu dans DIPMAG sont exprimés par rapport à un repère centré sur le dipôle.

On choisit de conserver ce repère, il faut donc redéfinir les vecteurs P, Φ et Θ par rapport au dipôle. Toutes ces opérations sont détaillées en Annexe 3 ainsi que le programme résultant : MARCH

V.3.2. - Le programme MARCH (listing + calculs - Annexe 3)

March est un sous-programme rattaché à DIPMAG. L'utilisateur du programme DIPMAG peut travailler de quatre manières différentes suivant la valeur qu'il donne à la variable IVAR

- Hypothèse terrain homogène
 - IVAR = 1 Calcul amplitude et phase du champ
 - IVAR = 2 Calcul du rapport des amplitudes alternatif/continu et phases
- Hypothèse terrain hétérogène
 - IVAR = 3 Calcul amplitude et phase de l'effet global sphère et milieu conducteur
 - IVAR = 4 Calcul amplitude et phase du champ associé à la sphère

Dans le cas ou IVAR = 3 ou 4, on doit fournir au programme, en plus des données habituelles définies auparavant, les valeurs suivantes :

- Xs]
- Ys] Coordonnées du centre de la sphère dans le repère centré sur
- Zs] le dipôle
- A Rayon de la sphère

Les résultats sont toujours fournis au choix, par l'intermédiaire, d'un tableau donnant les amplitudes et les phases du champ magnétique en chaque point ou de courbes des amplitudes et des phases le long des profils.

V.3.3. - Etude de l'évolution avec la fréquence du champ secondaire induit par la sphère

- Dans les conditions suivantes :
- $\sigma = 1$ mho/m
 - AM = 100 000 A/m
 - Alt = 50 m
 - DEC = 0°
 - DINC = 90°
 - NX = 3
 - NY = 3
 - PAS X = 10 m
 - PAS Y = 10 m

On introduit une sphère de rayon A = 10 m centrée en Xs = 0, Ys = 0, Zs = 25

On étudie l'évolution avec la fréquence de l'effet associé à la sphère (uniquement) dans les deux cas suivants :

- un dipôle radial (résultats figure 48)
- un dipôle transversal (résultats figure 49)

Commentaire des courbes

Dans le cas d'une sphère excitée par un dipôle radial le champ magnétique induit est constant avec la fréquence. Ce qui est normal, les formules des termes radiaux P_2^r , Θ_2^a , Φ_2^a ne faisant pas intervenir la quantité $k_a = i\mu\sigma\omega$ qui introduit la fréquence.

On remarque que la phase est égale à $\pm \pi$ donc, vue nos conventions, l'amplitude du champ est négative.

Dans le cas d'une sphère excitée par un dipôle transversal, le champ produit par la sphère varie en phase et en amplitude avec la fréquence, ceci du fait de la présence du paramètre k_a dans les formules des termes transversaux

Θ_{1a} et Φ_{1a}

C'est à partir de 100 Hz que l'effet de la fréquence se fait sentir de manière significative.

Remarque :

Dans ces hypothèses de départ H.W. March pose la condition suivante :

$k_a \times R \ll 1$
 C'est à dire $\sqrt{\mu\sigma\omega} \times R \ll 1$
 ce qui équivaut à $R/\delta \ll 0,5$

ce qui veut dire par exemple que si l'on travaille avec un dipôle enterré à une profondeur de 50 m cette équation est respectée pour :

$\sigma F \ll 10$

Le modèle dipôle + sphère ne peut être interprété avec les équations de March que si l'on travaille dans des conditions telles que

$R/\delta \ll 0,5$

fig 48 Effets engendrés par une sphère à différentes fréquences. Cas d'un dipole RADIAL

fréquence: 1 hz
10 hz
100 hz

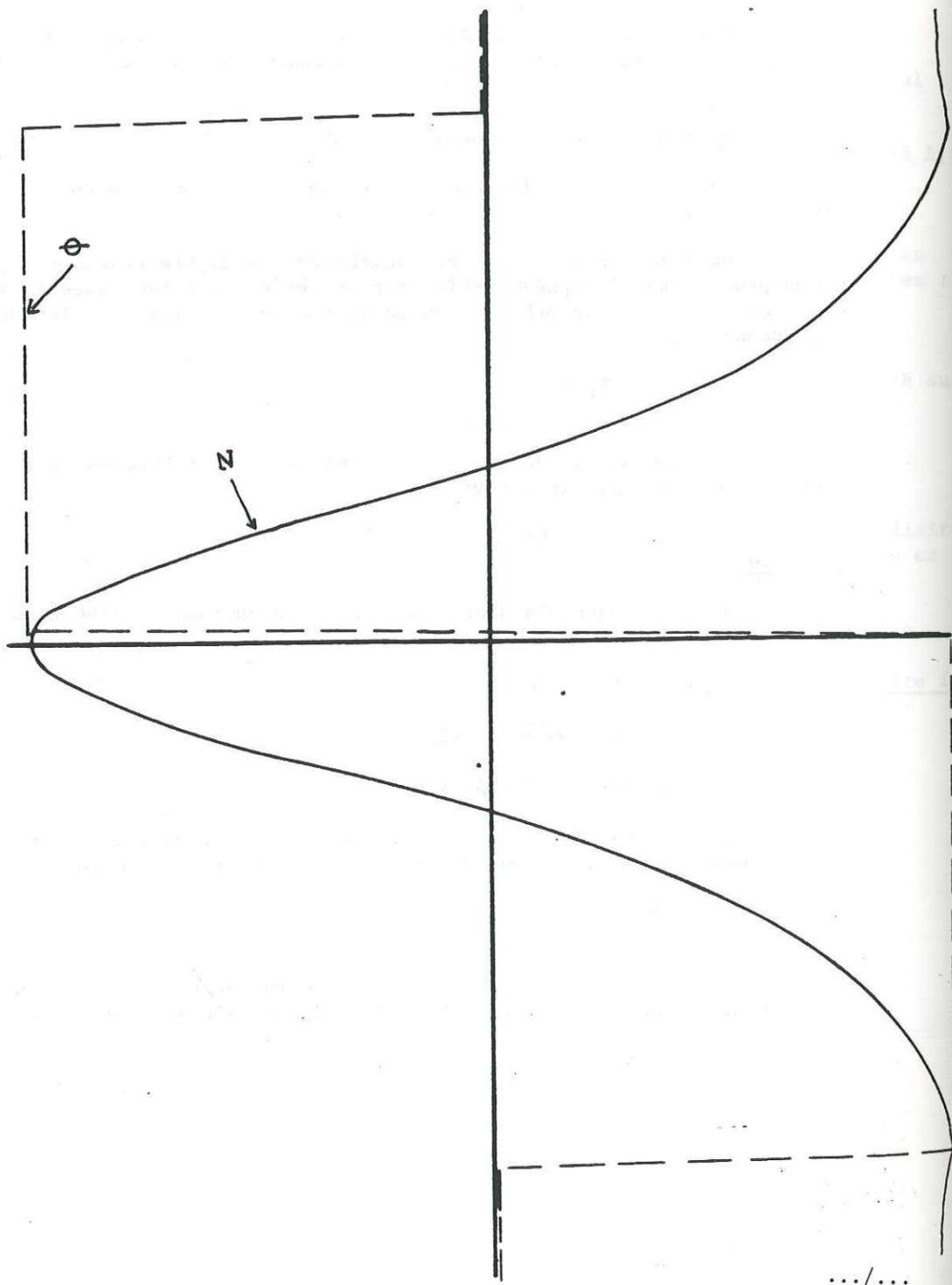
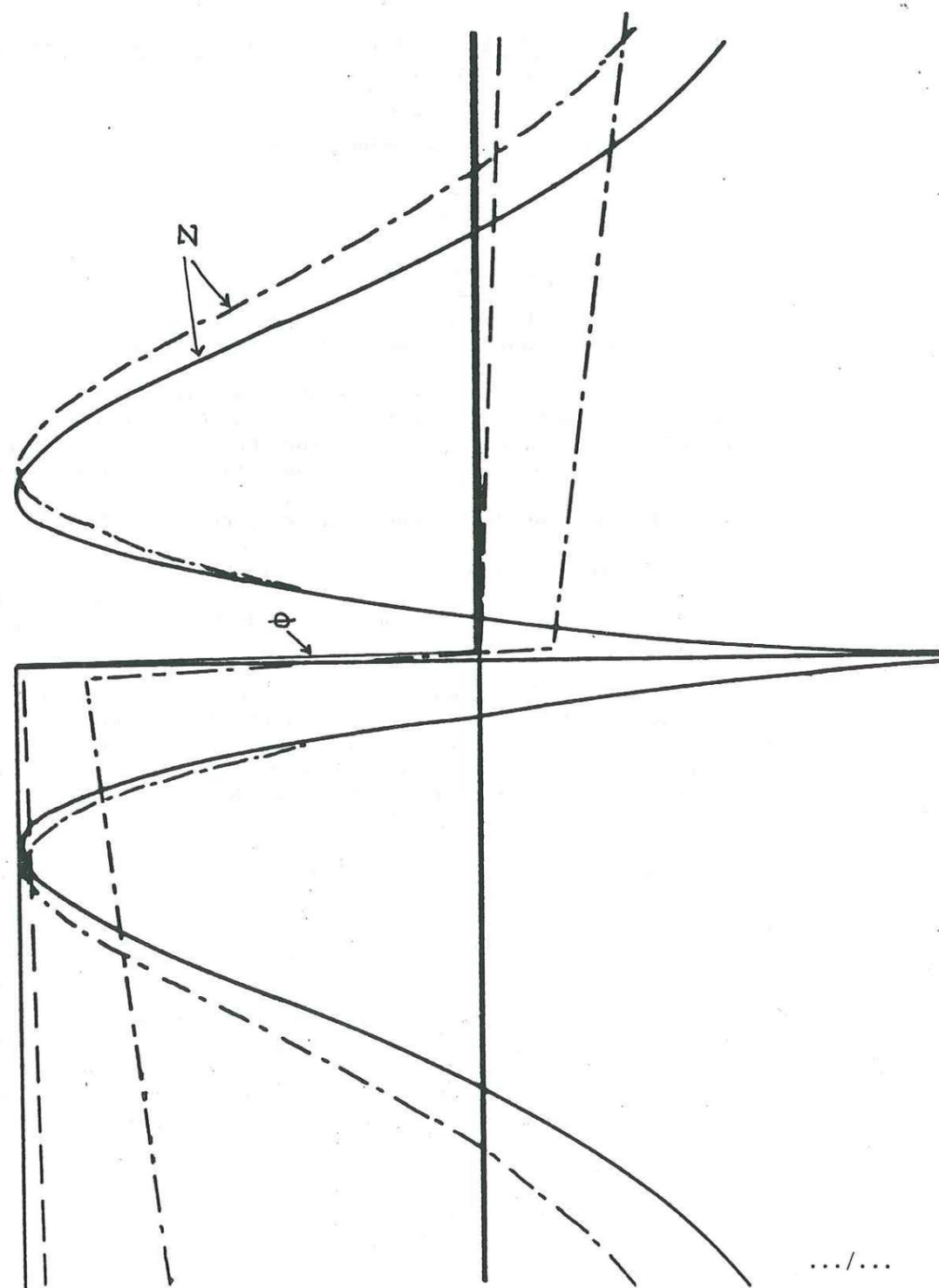


fig 49 Effets engendrés par une sphère à différentes fréquences. Cas d'un dipole TRANSVERSAL

Fréquence 1 hz ———
10hz - - - -
100hz - · - · -



Cette condition est la même que celle à laquelle nous sommes parvenue au cours de l'étude d'un terrain homogène pour que les approximations des calculs de DIPMAG soient valables il faut que $(R/\delta \leq 0,6)$.

Les hypothèses de DIPMAG et MARCH sont donc tout à fait compatibles. Nous travaillerons donc dans une plage de fréquence telle que $R/\delta \leq 0,5$.

V.3.4. - Etude de la précision de la localisation du dipôle dans un terrain hétérogène

On se place dans les conditions suivantes :

- $\sigma = 1 \text{ mho/m}$
- Alt = 50 m
- AM = 100 000 A/m
- DEC = 0°
- DINC = 90°
- F = 1 Hz
- Surface prospectée : 70 m x 70 m

On étudie successivement pour un dipôle vertical et un dipôle horizontal la perturbation apportée par une sphère infiniment conductrice, à travers la précision de la localisation. On choisit d'introduire une hétérogénéité assez importante en prenant pour la sphère un rayon $A = 10 \text{ m}$.

La position de la sphère par rapport au dipôle est variable.

Les résultats sont figurés sur le tableau 50.

X_s, Y_s, Z_s sont les coordonnées de la sphère. On rappelle que le dipôle est repéré par $X = 0, Y = 0$ et $Z = 0$

$X_{opt}, Y_{opt}, Z_{opt}$ sont les coordonnées du dipôle calculées par le programme de localisation CERCL à partir des valeurs fournies par DIPMAG + MARCH. L'erreur dans la localisation est directement lisible à travers l'écart entre les valeurs réelles (x, y, z) et les valeurs obtenues par le calcul $(X_{opt}, Y_{opt}, Z_{opt})$. α et β sont les deux angles définissant l'orientation du dipôle calculés par CERCL.

Nous allons commenter quelques cas les plus représentatifs.

VI.3.4.1. - Cas d'un dispositif symétrique

La sphère est située dans l'axe d'un dipôle vertical, au-dessus ou au-dessous (colonnes 1 et 2 du tableau).

Les courbes d'amplitude et phase obtenues sur le profil passant à la verticale du dipôle sont présentées sur les figures 51 et 52.

.../...

TABLEAU 50

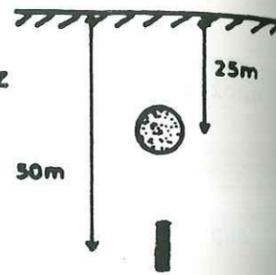
COORDONNEES DE LA SPHERE	Xs : 0				Xs : 25				Xs : 10				Xs : 10				Xs : 10				Xs : 10			
	Ys : 0	Zs : 25	Ys : 0	Zs : -25	Ys : 0	Zs : 0	Ys : 10	Zs : 25	Ys : 10	Zs : 0	Ys : 10	Zs : 25	Ys : 10	Zs : 0	Ys : 10	Zs : 25	Ys : 10	Zs : 0	Ys : 10	Zs : 25	Ys : 10	Zs : 0		
DIPOLE VERTICAL ($\alpha = 0^\circ \beta = 90^\circ$)	Xopt:0	0	0	0,25	-0,1	-10,56	-3,1	1,32	1,92	0,52	0,70	1,32	1,92	0,52	0,70	1,32	1,92	0,52	0,70	1,32	1,92	0,52	0,70	
	Yopt:0	0	0	0	0	-0,01	-3,1	1,92	1,32	0,52	1,13	1,92	1,32	0,52	1,13	1,92	1,32	0,52	1,13	1,92	1,32	0,52	1,13	
DIPOLE HORIZONTAL ($\alpha = 0^\circ \beta = 0^\circ$)	Zopt:3,08	-0,16	0,42	-0,27	0,27	-0,79	0,7	1,31	1,31	0	0,43	1,31	1,31	0	0,43	1,31	1,31	0	0,43	1,31	1,31	0	0,43	
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 57^\circ 6'$	$\alpha = 32^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 58^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 57^\circ 6'$	$\alpha = 32^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 58^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 57^\circ 6'$	$\alpha = 32^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 58^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 57^\circ 6'$					
	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 89^\circ$	$\beta = 89^\circ 5'$	$\beta = 66^\circ 6'$	$\beta = 84^\circ 8'$	$\beta = 78^\circ 5'$	$\beta = 78^\circ 5'$	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 85^\circ$	$\beta = 78^\circ 5'$	$\beta = 78^\circ 5'$	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 85^\circ$	$\beta = 78^\circ 5'$	$\beta = 78^\circ 5'$	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 85^\circ$	$\beta = 78^\circ 5'$	$\beta = 78^\circ 5'$	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 85^\circ$	

fig 51 Anomalies électromagnétiques
Cas d'un dispositif symétrique

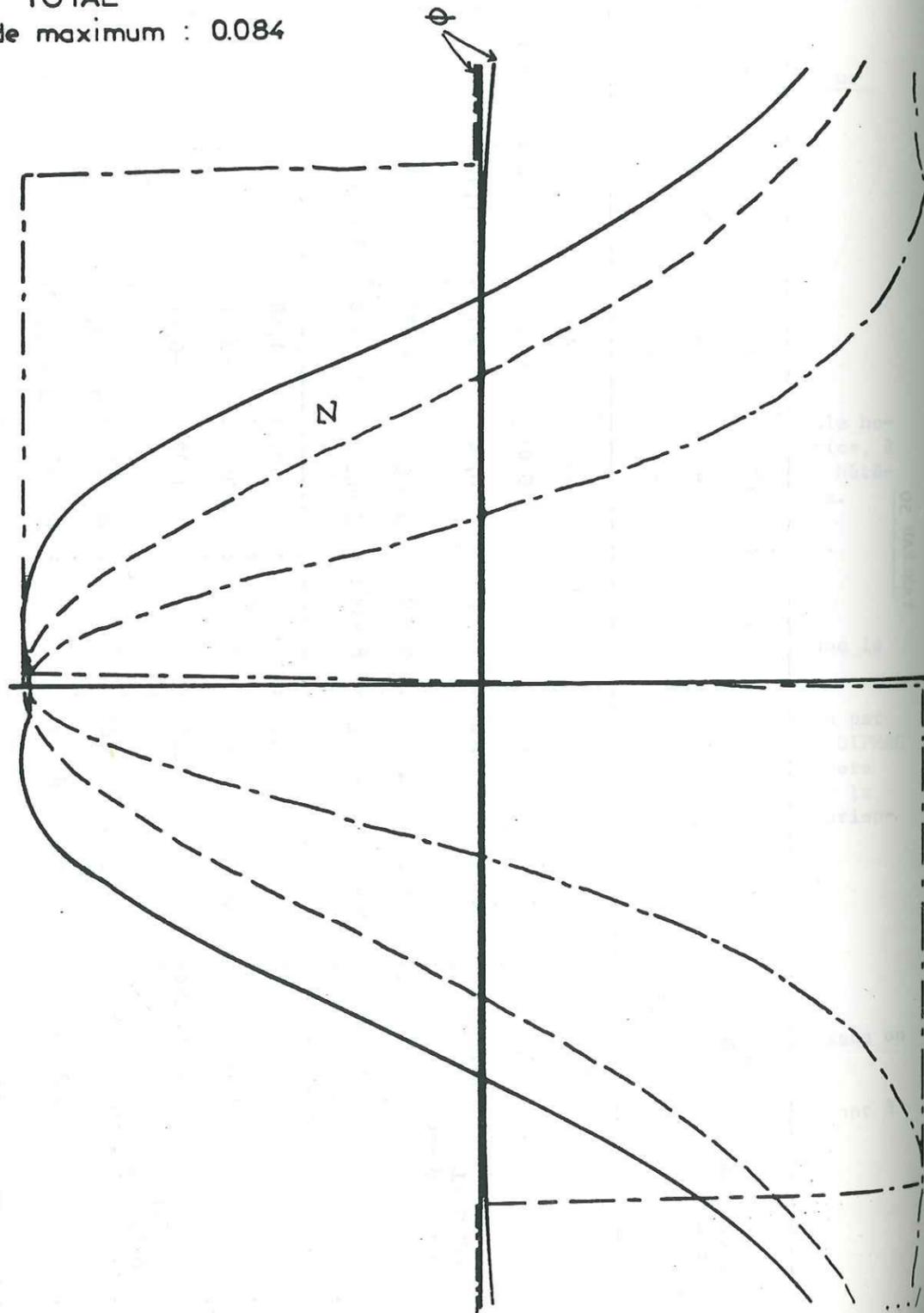
- 132 -

H_z

FREQUENCE = 1Hz



- EFFET DU DIPOLE
amplitude maximum : 0.127 A/m
- EFFET DE LA SPHERE
amplitude maximum : 0.044
- EFFET TOTAL
amplitude maximum : 0.084



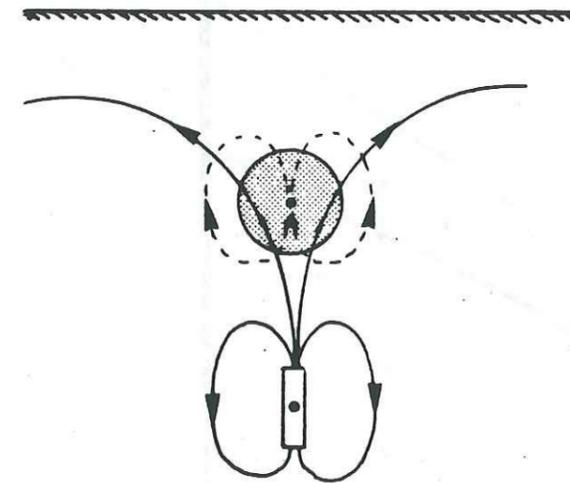
- 133 -

Dans le cas où la sphère est à une profondeur plus grande que le dipôle (figure 51 et première colonne du tableau 50) l'effet du champ magnétique qu'elle crée est quasiment nul en surface. Le champ résultant est celui du dipôle.

L'erreur de localisation est très faible et porte uniquement sur la profondeur.

Par contre pour une sphère située à mi-distance entre la surface et le dipôle les perturbations sont plus importantes (Fig. 52 et 2ème colonne du tableau 50).

Le champ magnétique induit par la sphère est en opposition de phase avec le champ magnétique du dipôle. Le champ résultant est donc diminué d'où une localisation du dipôle plus profonde que la réalité.



La sphère se comporte comme un dipôle opposé au dipôle émetteur.

En résumé la présence d'un amas très conducteur entre le dipôle et la surface de prospection perturbe le champ magnétique primaire au point d'entraîner une erreur de localisation d'environ 18 %, soit 8,6 m pour une profondeur de 50 m.

Cette erreur porte uniquement sur la localisation en profondeur du fait de la géométrie du dispositif.

V.3.4.2. - Cas d'un dispositif asymétrique

1er cas : Sphère dans le plan Xoz, dipôle vertical (colonne 3 et 5 du tableau)

Les courbes amplitude et phase des champs sont représentées sur les figures 53 et 54.

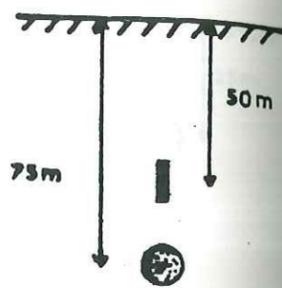
.../...

fig 52 Anomalies électromagnétiques

Cas d'un dispositif symétrique

FREQUENCE 1 Hz

- 134 -
Hz



- EFFET DU DIPOLE
amplitude maximum : 0.127 A/m
- EFFET DE LA SPHERE
amplitude maximum : 0.0028
- EFFET TOTAL
amplitude maximum : 0.124

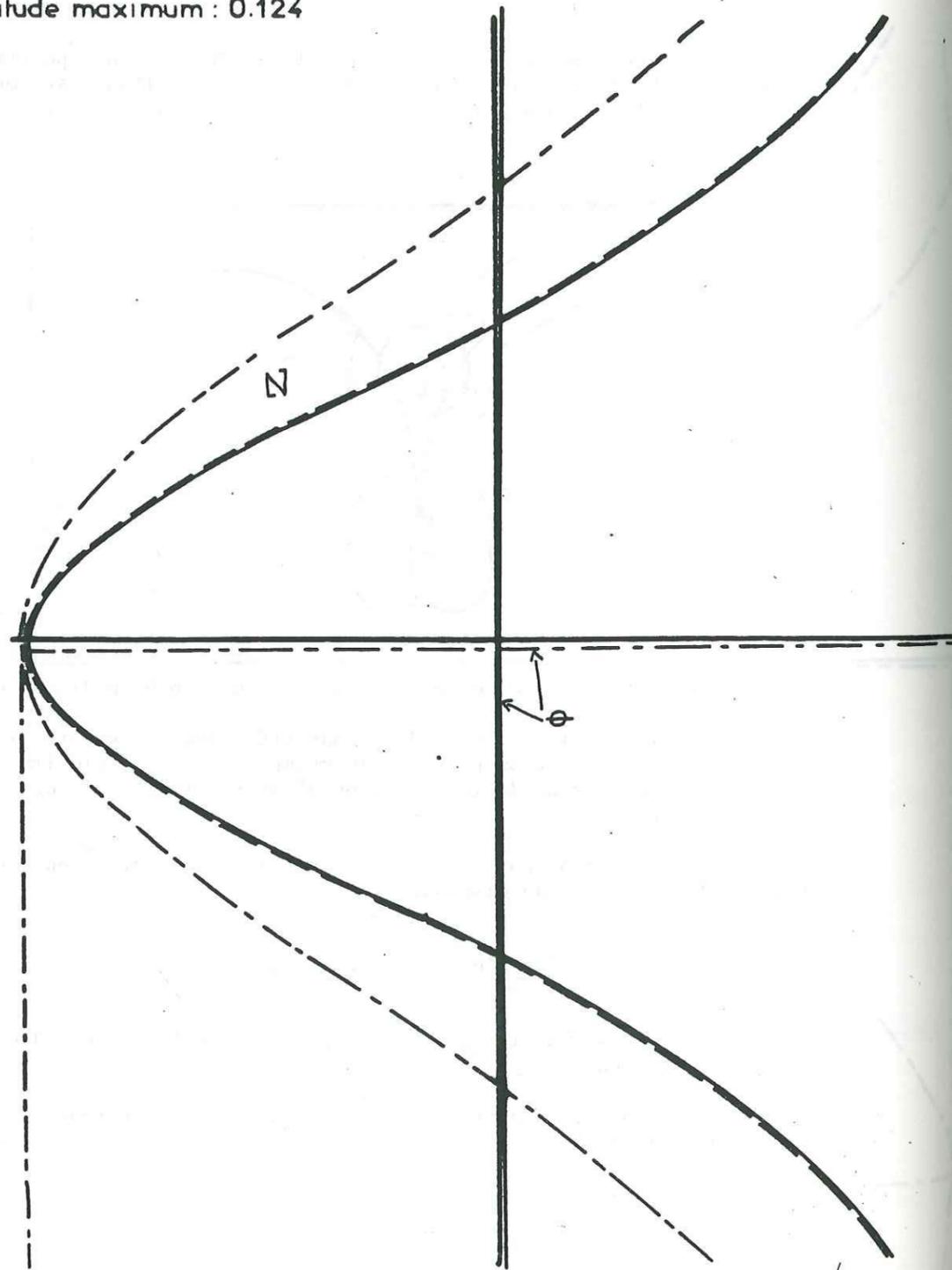
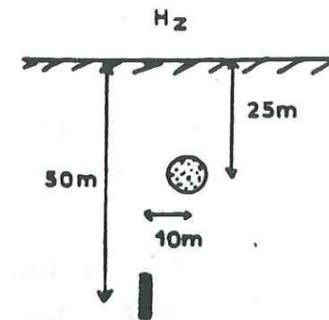


fig 53 Anomalies électromagnétiques

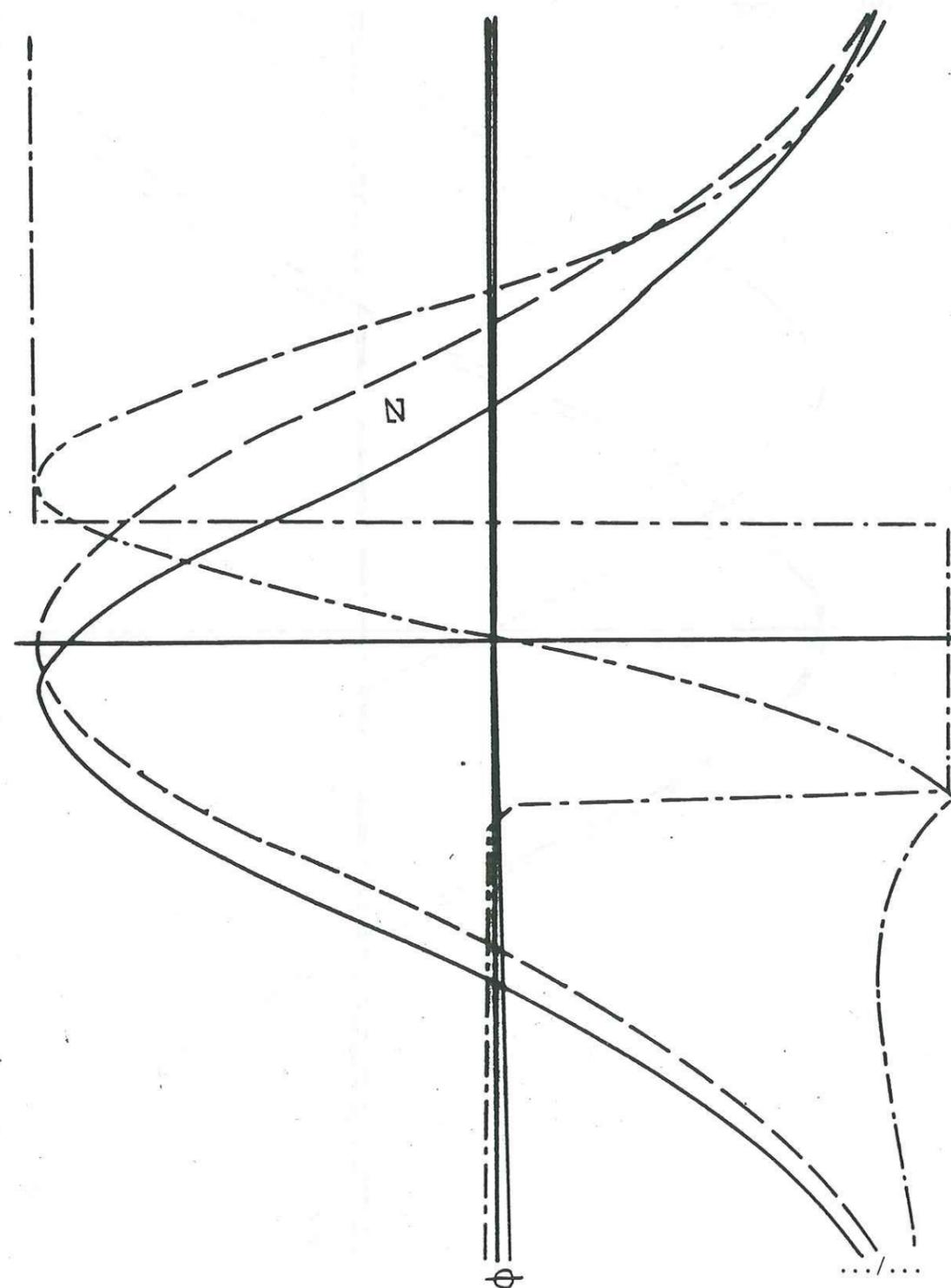
Cas d'un dispositif asymétrique

FREQUENCE 1 Hz

- 135 -
Hz

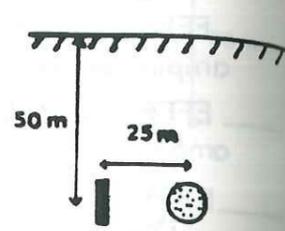


- EFFET DU DIPOLE
amplitude maximum : 0.127 A/m
- EFFET DE LA SPHERE
amplitude maximum : 0.031
- EFFET TOTAL
amplitude maximum : 0.116

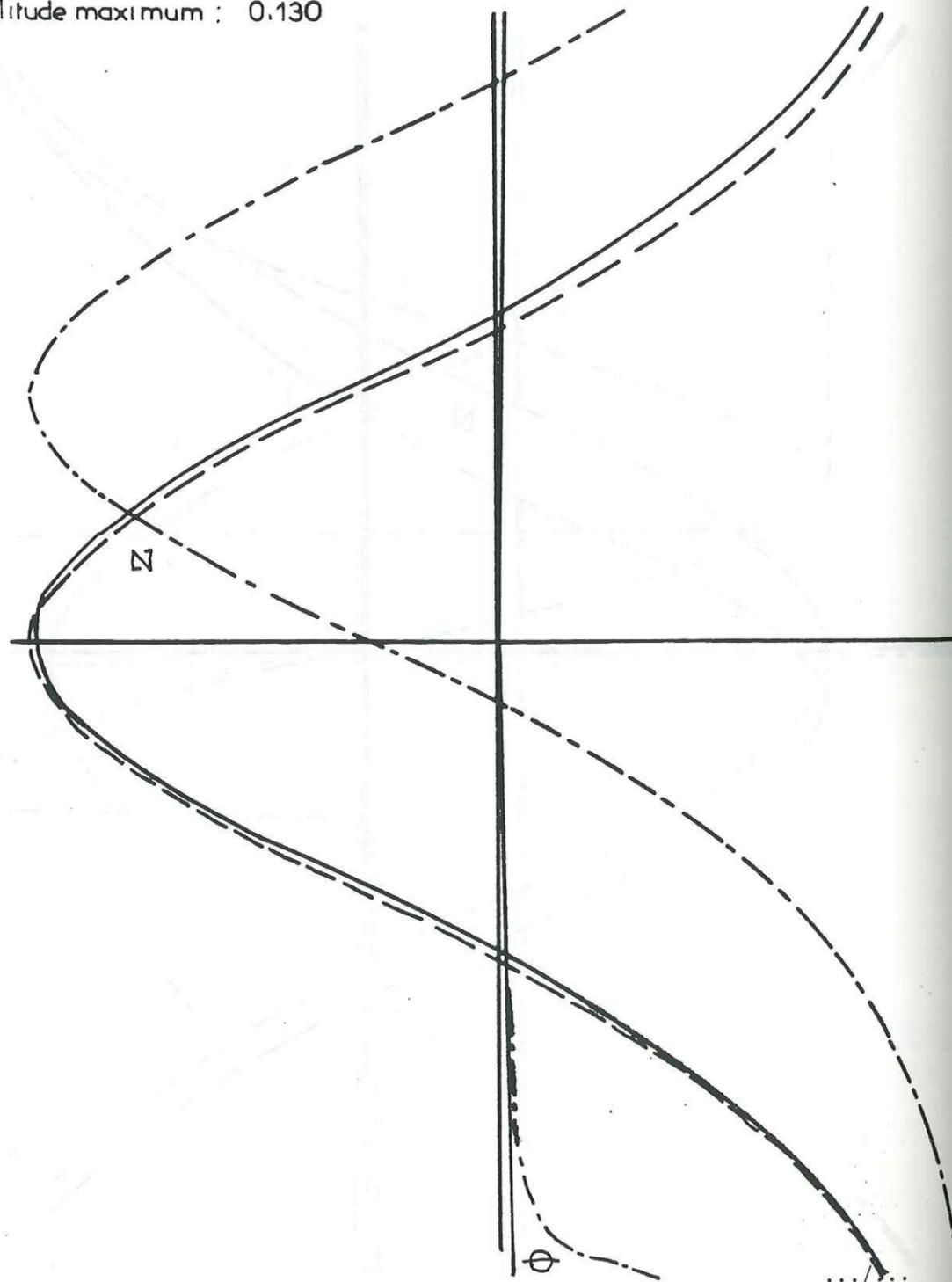


FREQUENCE 1 Hz

H_z



- EFFET DU DIPOLE
amplitude maximum : 0.127 A/m
- EFFET DE LA SPHERE
amplitude maximum : 0.004
- EFFET TOTAL
amplitude maximum : 0.130



Pour une sphère à la même profondeur que le dipôle l'effet du champ magnétique secondaire est négligeable par rapport au champ primaire.

L'erreur de localisation porte sur X et Z. Le dipôle est localisé avec un léger décalage du maximum de l'amplitude du champ résultant.

Si la sphère est plus proche de la surface que le dipôle, la perturbation est beaucoup plus importante. Le champ secondaire s'oppose au champ primaire d'où une diminution du champ total résultant et un déplacement du maximum d'amplitude du côté opposé à la sphère (selon X).

La répercussion sur la localisation du dipôle est importante avec une erreur selon X de 20 % égale à la distance dipôle-sphère selon ox. De plus l'orientation calculée pour le dipôle est erronée (erreur de 30° sur β)

En résumé, la présence d'un amas très conducteur situé au-dessus du dipôle et décalé latéralement par rapport à celui-ci, provoque une importante déformation du champ résultant mesuré en surface par rapport au champ du dipôle. Ceci entraîne une grossière erreur de localisation dans le plan (20 %). Cette erreur porte sur la valeur de x ou de y suivant la direction dans laquelle est décalée la sphère et est égale à la distance dipôle-sphère selon cette direction. L'orientation trouvée pour le dipôle est, elle aussi, erronée.

2ème cas : sphère au-dessus du dipôle décalée en X et en Y (colonne 6 du tableau)

Cette fois-ci l'erreur se répartit principalement sur la localisation en X et en Y (6 % d'erreur). L'orientation calculée pour le dipôle diffère de 45°, dans le plan XY, de la valeur réelle.

V.3.4.3. - Conclusion

La perturbation liée à la présence d'un amas conducteur sphérique d'une vingtaine de mètres de diamètre entre le dipôle et la surface de prospection n'est pas négligeable du tout, même à basse fréquence. La position de la sphère a une influence directe sur la localisation du dipôle. On constate que l'erreur porte directement sur les axes (X, Y ou Z) selon lesquels est décalée la sphère par rapport au dipôle. L'effet de la sphère est tel qu'elle semble repousser le dipôle le long d'un axe dipôle-sphère et à l'orienter dans sa direction suivant cet axe.

V.3.5. - Conclusion

Dans un premier temps nous avons pu constater (chapitre V) que la méthode de localisation dans sa configuration actuelle reste valable pour une étude en alternatif dans un milieu homogène si l'on respecte la condition :

$$R/\delta \ll 0,6.$$

Au cours de ce chapitre, l'étude d'un terrain hétérogène nous a révélé que, dans les conditions imposées par les équations de H.W. March, même en travaillant en basse fréquence, (produit $\sigma \times F = 1$ c'est à dire par exemple à 100Hz dans un terrain d'une résistivité de 100 ohm m), il est difficile de conserver une bonne localisation. Dans l'optique d'appliquer la méthode de localisation en alternatif il est indispensable de prendre en compte la nature et la structure du terrain. On peut envisager de faire précéder les mesures électromagnétiques d'une rapide étude électrique pour déceler les éventuelles hétérogénéités du sous-sol. Cependant, même en parfaite connaissance de la géologie, il reste que les résultats sont difficiles à interpréter notamment au niveau de la compensation de l'effet secondaire du à l'hétérogénéité. De plus, nous avons étudié les cas d'un dipôle vertical et horizontal qui sont les plus simples, il est certain que si l'orientation du dipôle est intermédiaire, les phénomènes sont d'une complexité accrue.

Dans une optique un peu différente, le modèle mis au point peut être utilisé pour l'évaluation des effets dus à un objet métallique (hypothèse de la sphère infiniment conductrice) noyé dans un milieu conducteur et excité par un champ électromagnétique. Ceci concerne toutes les localisations d'objets conducteurs (pipe-line, ancre, mines...) dont se préoccupe le laboratoire de magnéto-métrie.

V.4. - ETUDE EXPERIMENTALE SUR LE TERRAIN

On veut d'une part, vérifier expérimentalement le comportement des champs électromagnétiques avec la fréquence au-dessus d'un terrain relativement homogène et d'autre part, mettre au point la technique expérimentale de travail en alternatif (inventaire et essai de l'appareillage).

Pour des raisons d'ordre pratique et circonstancielle nous n'avons pas réalisé cette étude dans la configuration réelle d'une mesure de localisation mais de la manière suivante : au-dessus d'un terrain plat (plaine du Drac) sont disposées les deux bobines, une réceptrice et une émettrice (dipôle) ; on mesure le champ électromagnétique plus ou moins déformé par les propriétés électriques du sous-sol.

V.4.1 - Appareillage

V.4.1.1. - Liste du matériel

Emission

- . 1 groupe électrogène
- . 1 générateur de puissance
- . 1 bobine d'émission
cordon secteur (générateur - groupe électrogène) 50 m
- . contrôleur

Réception

- . batteries 2 x 12 V
- . Onduleur (24 V → 220 V)
- . Détection synchrone
- . 1 bobine de réception avec son trépied orientable
- . 1 oscilloscope
Câble de raccord avec l'émission pour le signal de référence
50 m

Capacités d'accord

Fer à souder

Jerrican essence

V.4.1.2. - Caractéristiques du matériel utilisé

- Bobine d'émission (Photo 6)

Cadre carré de 2 m x 2 m

Résistance = 17,3 Ω

Self L = 70 mH

Nombre de spires ≈ 100 (diamètre 1 mm)

Puissance : pour U = 30V
I = 4,62 Amp à D = 30 m

Dans la deuxième configuration de Gauss, on mesure

$\vec{B} = 6,8 \gamma$

- Bobine de réception (Photo 7)

Cylindrique

blindée

noyau de ferrite ($\mu = 450$)

Résistance = 135 Ω

Self L = 1,428 H

Nombre de spires : 6 728 (fil 17/100)

La bobine de réception est disposée sur un trépied avec table orientable dans le plan horizontal et vertical avec repères de niveau et d'orientation, le tout étant non magnétique.

- La détection synchrone (D.S) (Photo 8)

La détection synchrone est un appareil de mesure assez sophistiqué. Schématiquement ses possibilités sont les suivantes :

- Amplification,
- Filtrage,
- Dans un signal bruité (plusieurs signaux de fréquences parasites) détection du signal à la fréquence recherchée,
- Mesure d'amplitude d'un signal et déphasage.

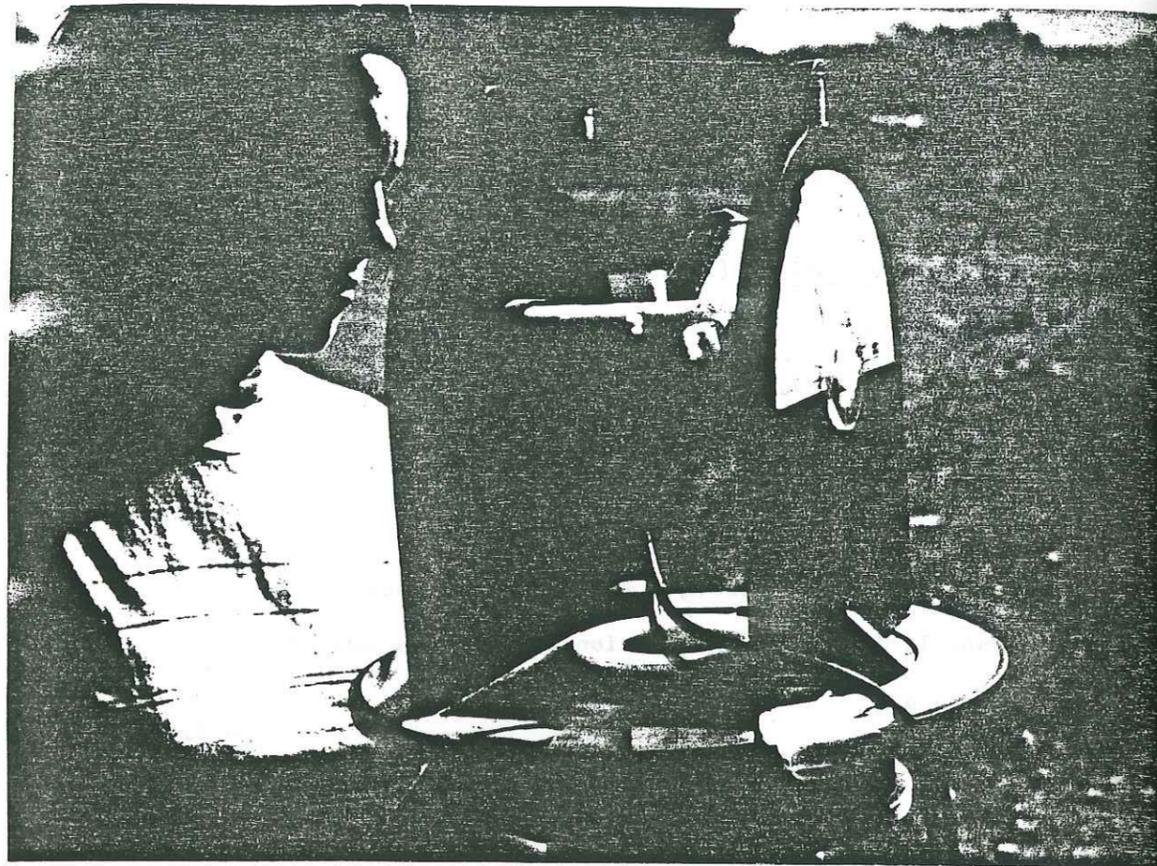


PHOTO n°6 BOBINE D EMISSION

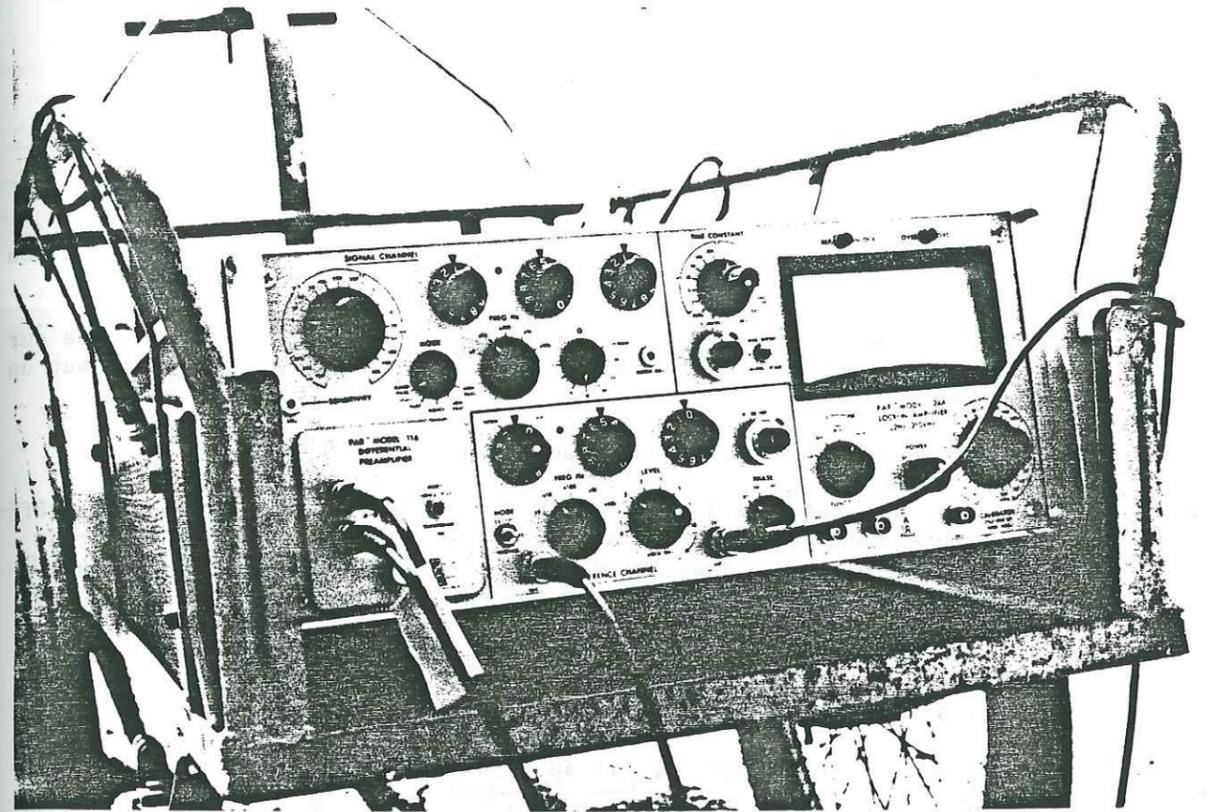


PHOTO n°8 DETECTION SYNCHRONE

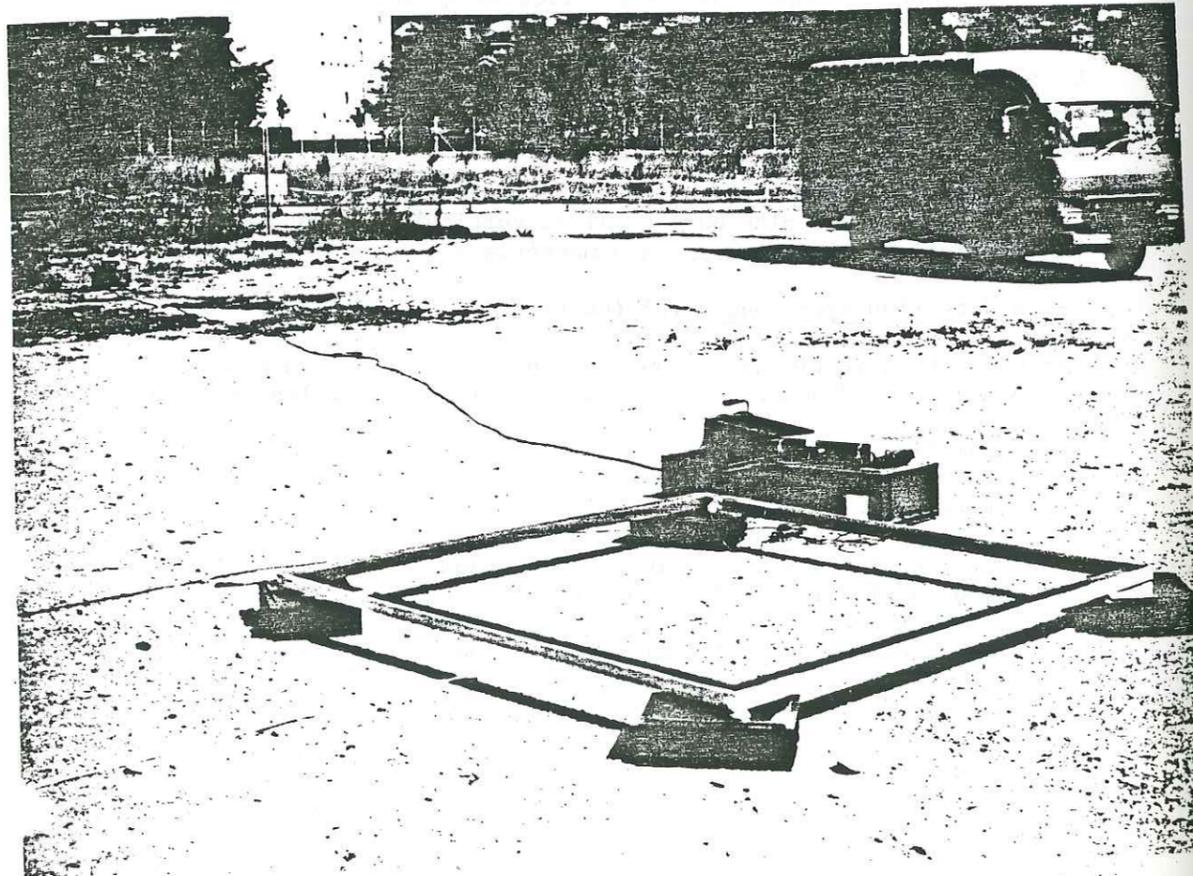


PHOTO n°7 BOBINE DE RECEPTION

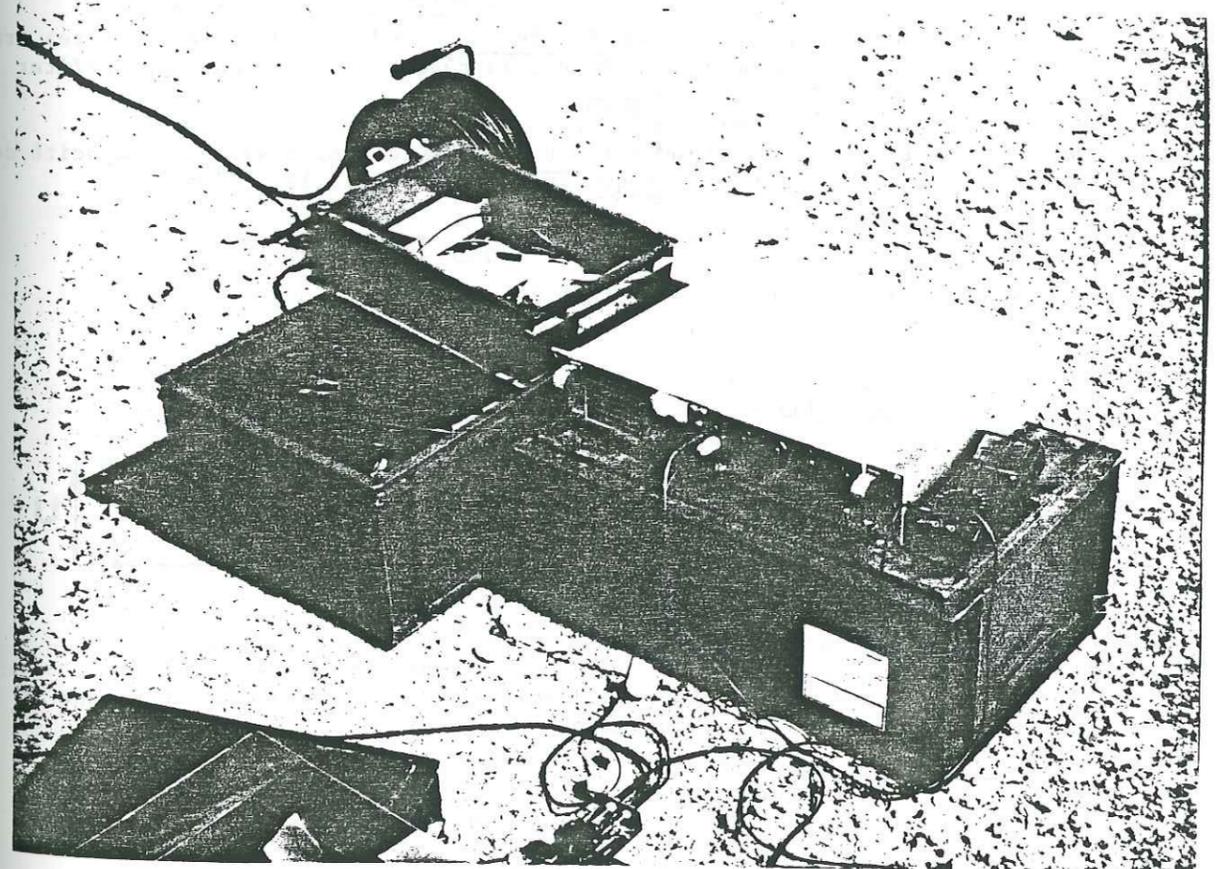


PHOTO n°9 SIGNAL DE REFERENCE

Principe de fonctionnement

Deux modes d'utilisation :

- 1 - en position ACVM on utilise uniquement les capacités d'amplification et du filtrage de la DS.

Le signal à mesurer est filtré, à la fréquence désirée, affichée sur la DS, et amplifié ; on mesure son amplitude en volt efficace sur un galvanomètre.

- 2 - en position détection synchrone

En plus du signal à mesurer, on injecte dans la DS le signal de référence dont la fréquence va servir à la DS de base pour éliminer du signal de mesure tous les signaux parasites dont la fréquence est différente de la fréquence de référence.

Une fois que le signal vrai est détecté on peut mesurer :

- son amplitude maximale
- son déphasage par rapport au signal de référence (émission)

V.4.1.3. - Conditions de mesures

Emission

- On accorde la bobine d'émission quand on travaille en hautes fréquences (> 100 Hz) de manière à être à la résonance du circuit et profiter de la surtension de la bobine ;

A la résonance $LC\omega^2 = 1$, on accorde la bobine avec une capacité dont la valeur est telle qu'à la fréquence où l'on travaille $LC\omega^2 = 1$.

La tension induite e devient :

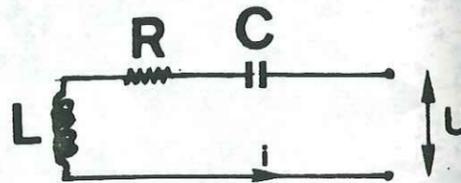
$V = Qe$ avec Q coefficient de surtension $\frac{L\omega}{R}$

$$U = Zi$$

$$Z = R + jL\omega - \frac{j}{C\omega}$$

$= R + j(L\omega - \frac{1}{C\omega})$

$= R + j \frac{(LC\omega^2 - 1)}{C\omega}$



A la résonance $LC\omega^2 = 1$ donc $Z = R$. Il n'y a pas de déphasage et l'intensité du courant est maximale.

- En basse fréquence, on n'accorde pas la bobine, l'effet capacitif et selfique étant négligeable.

Le cadre est posé sur le sol sur des cales permettant un réglage de l'horizontale. Il reste fixe au cours d'une série de mesures.

Le signal de référence

Le signal de référence peut être transmis à la réception de deux manières :

- par l'intermédiaire d'une bobine proche de la bobine d'émission qui capte le signal et le transmet jusqu'à la DS.

Il peut y avoir un déphasage entre le signal de référence et le signal de l'émission dû à la capacité de la bobine de référence.

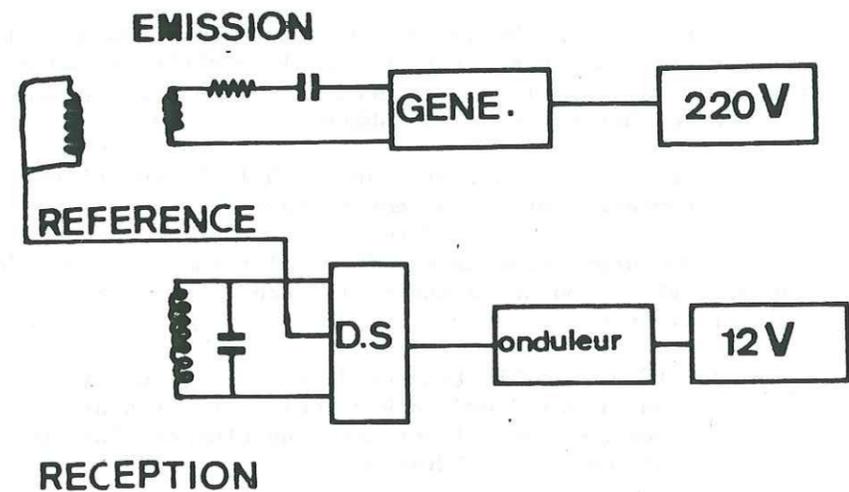


Figure 55 : Signal de référence pris aux bornes d'une bobine

- On peut prendre comme référence la tension aux bornes d'une petite résistance placée en série avec le cadre d'émission.

L'avantage de ce montage est que l'on est sûre de ne pas avoir de déphasage entre le signal de référence et le signal d'émission. L'inconvénient vient du fait que l'on a alors une masse commune au module d'émission et de réception.

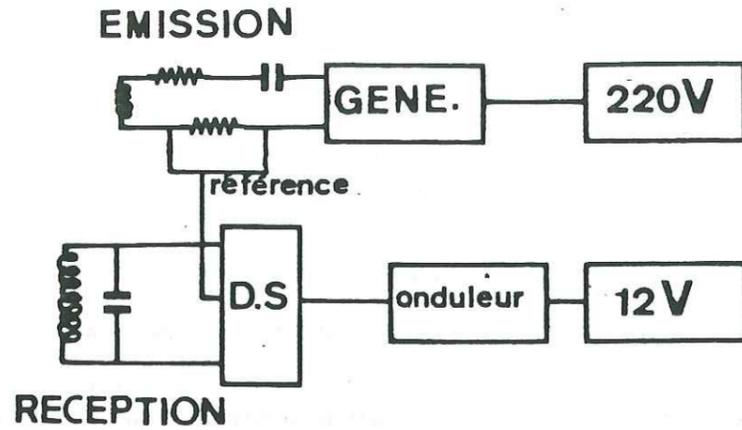


Figure 56 : Signal de référence pris aux bornes d'une résistance

Un essai sur le terrain de la première solution met en évidence un problème de qualité du signal de référence.

En effet la bobine de référence n'est pas accordée ; des signaux parasites viennent s'ajouter au signal de référence avec des intensités élevées du fait que leur fréquence doit être assez proche de la fréquence de résonance naturelle de la bobine.

Le signal résultant transmis à la DS constitue une mauvaise référence, notamment pour ce qui est de la phase.

On adopte donc la deuxième solution, le signal de référence est donc prélevé aux bornes d'une résistance en série avec la bobine d'émission. (photo 9)

Remarque : Le groupe électrogène doit produire une tension stable donnant un signal "pur", d'éventuels parasites affectent la qualité des mesures. Il est maintenu éloigné d'une vingtaine de mètres du dispositif d'émission.

A la réception

La bobine de réception est montée sur un dispositif adapté de type goniomètre qui permet des orientations variables en azimut et en inclinaison et des réglages de niveaux précis.

Pour les mesures à proximité de l'émission, on veille spécialement à ce que les deux bobines, émission et réception, soient à la même hauteur.

Le niveau du signal étant en général assez élevé, sauf en très basses fréquences, on n'accorde pas la bobine à chaque fréquence de travail.

La bobine de réception mesure la tension induite créée par le champ magnétique qui la traverse.

Cette tension e est liée au champ magnétique H par la relation suivante :

$$e = \frac{-d\phi}{dt} \text{ avec } \phi = B.S$$

$$e = \frac{-d(B.S)}{dt} \text{ B induction magnétique } = \mu H$$

L'induction B est fonction du temps et peut s'écrire :

$$B = B_0 e^{j\omega t} e^{j\rho}$$

$$\text{Donc } e = -j\omega B_0 S e^{j\omega t} e^{j\rho}$$

Le terme j introduit le déphasage de $\frac{\pi}{2}$

La valeur de la tension induite est fonction de :

- la perméabilité
 - la surface de la bobine
 - le nombre de spires
 - l'intensité du courant induit
 - la fréquence du signal
-] constant

Comme la bobine de réception n'est pas accordée à chaque fréquence de mesure, l'intensité du courant induit varie avec la fréquence suivant que l'on se rapproche ou non de la fréquence de résonance.

Pratiquement ceci signifie que la comparaison de résultats à différentes fréquences n'est pas directe ; il est plus facile de travailler sur les rapports.

En très basses fréquences (< 50 Hz), le niveau du signal devenant très faible avec la distance on accorde la bobine de réception pour être à la surtension. Dans ce cas, il faut tenir compte du déphasage introduit par la capacité d'accord.

V.4.2. - Déroulement des mesures

Un sondage électromagnétique, c'est-à-dire l'étude de la variation du champ électromagnétique avec la profondeur, peut se dérouler de deux façons :

- en faisant varier la fréquence du signal d'émission : sondage paramétrique
- en faisant varier la distance entre l'émetteur et le récepteur : sondage géométrique

Ceci du fait du terme $B = R/\delta$ qui intervient dans les formules des composantes du champ magnétique en courant alternatif

δ est la profondeur de peau : $\left(\frac{2}{\sigma\omega\mu}\right)^{1/2}$

Le paramètre $R/\delta = R \times (\sigma\omega\mu / 2)^{1/2}$ conditionne la réponse électromagnétique.

Pour des raisons pratiques, on travaille dans un premier temps à fréquence constante et à distance émetteur/récepteur variable (ce qui évite d'accorder à chaque fréquence, entre deux mesures, la bobine d'émission) pour un profil.

V.4.2.1. - Paramètres mesurés

En chaque station, on mesure (à une fréquence fixe donnée) le module et la phase du champ magnétique horizontal :

$$|H_r|, \phi_r \quad \vec{H}_r = |H_r| e^{i\phi_r}$$

le module et la phase du champ magnétique vertical

$$|H_z|, \phi_z \quad \vec{H}_z = |H_z| e^{i\phi_z}$$

Exploitation des mesures

Il est intéressant de calculer un certain nombre de paramètres à partir de ces valeurs.

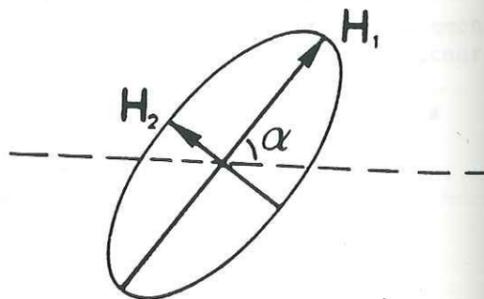
- le "wave tilt" $\left| \frac{H_r}{H_z} \right| = \left| \frac{H_r}{H_z} \right| e^{i\phi_t}$ avec $\phi_t = \phi_r - \phi_z$

- Les deux paramètres de polarisation qui définissent la forme de l'ellipse de polarisation à savoir le "tilt angle" et l'ellipticité.

En général, l'ellipticité est mesurée sur le terrain en cherchant la position de la bobine telle que la tension induite soit maximale. On mesure H_1 .

L'axe de la bobine et l'horizontale définissent un angle (tilt angle). En tournant la bobine de 90° on mesure la tension minimum H_2

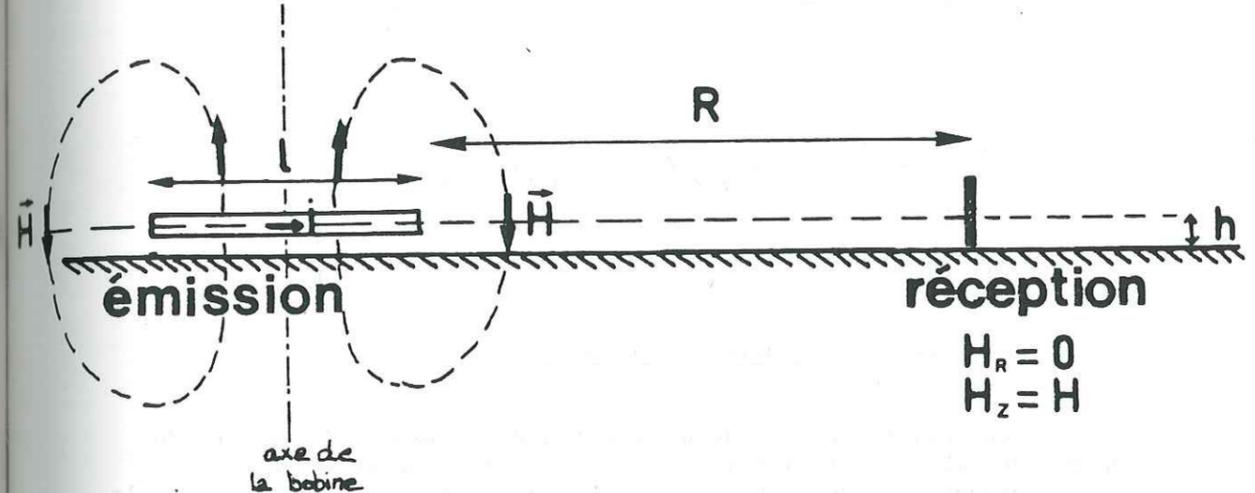
Le rapport $\frac{H_2}{H_1}$ définit l'ellipticité $\frac{V_2}{V_1}$



V.4.3 - Ellipse de polarisation magnétique dans le cas statique

V.4.3.1. - Point de vue théorique

Etant donné la configuration suivante on peut tirer quelques conclusions sur l'ellipse de polarisation à fréquence nulle.



Les lignes de champs se présentent en anneaux rayonnants depuis la bobine d'émission.

- L'intensité du champ magnétique décroît, quand on s'éloigne de l'émission, en $1/R^3$

$$H \approx \frac{I l^2}{2 \pi R^3}$$

- Si les deux bobines, émission et réception, sont exactement à la même altitude, le champ magnétique à leur niveau doit être dirigé selon la verticale, c'est-à-dire qu'il se décompose en : $H_z = H$
 $H_r = 0$

Ceci quelle que soit la distance.

Ceci est équivalent à un "wave tilt"

$$\frac{H_r}{H_z} \rightarrow 0$$

- Du point de vue phase, il ne doit pas exister théoriquement de déphasage entre champ émis et champ reçu.

A la réception : $H_r = \frac{2M \cos \theta}{R^3}$ et $H_z = \frac{M \sin \theta}{R^3}$ ($\omega = 0$)

Pour des raisons de précision et d'ordre pratique, on calculera les paramètres de l'ellipse de polarisation magnétique plutôt que l'on ne les mesurera.

H Ward (46) donne les formules permettant d'obtenir le tilt angle en fonction de H_r , H_z , ϕ_r et ϕ_z .

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \left(\frac{-B + (B^2 + 4A^2)^{1/2}}{2A} \right) \text{ avec } \begin{cases} A = |H_r| |H_z| \cos(\phi_r - \phi_z) \\ B = |H_r|^2 - |H_z|^2 \\ 0 < \alpha < \pi \end{cases}$$

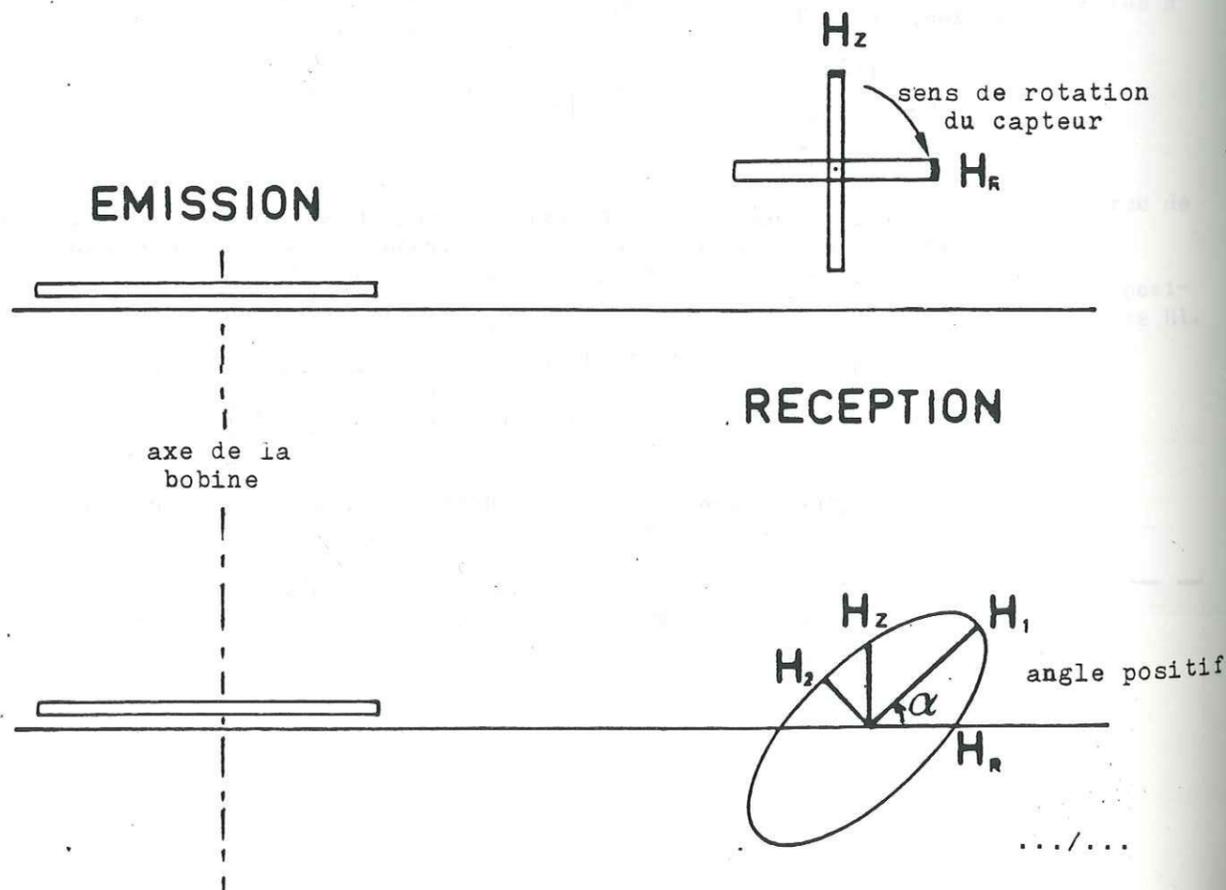
Et l'ellipticité :

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{[H_r^2 + H_z^2 \text{tg}^2 \alpha + 2H_r H_z \cos(\phi_r - \phi_z) \text{tg} \alpha]}{[H_z^2 + H_r^2 \text{tg}^2 \alpha - 2H_r H_z \cos(\phi_r - \phi_z) \text{tg} \alpha]}^{1/2}$$

V.4.2.2. - Conventions de mesures

On définit un sens de branchement de la bobine d'émission de manière que le courant circule toujours dans le même sens. De même pour le branchement de la bobine de réception sur les deux entrées de la D.S (entrée différentielle).

On prend également des conventions sur la rotation de la bobine pour les mesures de H_z et H_r et sur le signe de l'angle α



$$\text{Donc } \phi_r = \phi_z \rightarrow 0$$

Ceci est équivalent à $\text{tg} \alpha \rightarrow \infty$

donc un tilt angle $\alpha \rightarrow 90^\circ$

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{H_z^2}{H_z^2 \text{tg}^2 \alpha} = 0$$

L'ellipticité est nulle $H_2 = 0$

L'ellipse de polarisation magnétique dans le cas de mesure en très basses fréquences est une droite verticale

$$\begin{cases} H_1 = 2H_{\text{max}} = 2H_z \\ \alpha = 90^\circ \end{cases}$$

V.4.3.2. - Point de vue expérimental

On travaille à 15Hz. Dans cette gamme de fréquence le générateur de puissance à l'émission ne peut pas délivrer un signal d'une intensité supérieure à 600 mA ; au-dessus de cette valeur, le signal est écrêté (sinusoïdes aplaties signe de saturation).

Dans ce cas, il est préférable d'accorder non seulement la bobine émettrice mais aussi la bobine de réception, le coefficient de surtension amplifiant alors le niveau de signal reçu.

De plus, une bobine accordée est plus sélective vis à vis des fréquences parasites (50 Hz notamment et ses harmoniques) du fait qu'elle n'amplifie que le signal correspondant à la fréquence pour laquelle elle a été accordée : effet de filtre.

On effectue un sondage géométrique c'est-à-dire que l'on fait varier la profondeur d'investigation du système au moyen de la distance entre le dispositif d'émission et le dispositif de réception ; la fréquence étant fixe.

Le long d'un profil perpendiculaire à un des côtés du cadre d'émission on matérialise 10 points de mesures allant d'une distance de 5 m à 150 m.

En chaque station, on mesure le champ magnétique selon deux directions :

- bobine verticale $\rightarrow H_z, \phi_z$
- bobine horizontale $\rightarrow H_r, \phi_r$

.../...

Résultats

R(m)	Hz ϕ_z	Hr ϕ_r	Hr/Hz	α	H2/H1
5	- 9,4 mV 17°	140 μ V 13°	1,5 10^{-2}	89°	1,42 10^{-3}
10	- 1,2 mV 18°	- 2 μ V 60°	1,66 10^{-1}	83°	9,5 10^{-2}
15	- 350 μ V 18°	5 μ V 20°	1,42 10^{-2}	89°	1,52 10^{-3}
20	- 150 μ V 17°5	400 nV 20°	2,66 10^{-3}	89°8	1,54 10^{-4}
25	- 78 μ V 18°	400 nV 18°	5,12 10^{-3}	89°7	8 10^{-5}
30	- 47 μ V 17°	non mesurable niveau trop faible	? 0	? 90°	? 0

Au-delà de 25 m de distance le niveau de signal dans la direction horizontale (Hr) est trop faible pour la sensibilité de la détection synchrone. On admet alors que Hr tend vers une valeur nulle

Commentaires des résultats

- La composante verticale du champ ne suit pas une décroissance en 1/R3 rigoureuse comme le veut la théorie.

- On a bien une wave tilt Hr/Hz très petit, la composante verticale est largement prépondérante.

- Cependant la valeur de la composante horizontale n'est pas nulle comme le voudrait la théorie :

La cause est probablement à rechercher dans un manque de rigueur dans la géométrie du système : il suffit que les deux bobines ne soient pas exactement à la même altitude pour qu'apparaisse une composante horizontale à la réception.

Plus on est proche de l'émission, plus on est dans une zone de champ intense ; donc la moindre erreur géométrique fera apparaître une composante horizontale d'autant plus importante.

Cette composante Hr est donc fonction, en chaque station, de la précision du positionnement de la bobine de réception.

- Les déphasages ϕ_z et ϕ_r sont faibles mais non nuls. D'après ce que l'on vient de dire, ϕ_r n'est pas significatif ; quant à ϕ_z sa valeur constante en chaque station de mesure semble indiquer qu'il est lié aux caractéristiques propres du système de mesure :

Il suffit que l'on ne soit pas exactement accordé à la réception pour qu'intervienne un terme imaginaire résiduel qui introduit un déphasage :

$$LC\omega^2 \neq 0 \text{ donc } \frac{1}{jC\omega} + L\omega \neq 0 \text{ apparition d'un déphasage}$$

On peut donc considérer que le déphasage réel du champ est quasiment nul.

L'ellipse de polarisation magnétique est bien une droite comme l'indique la valeur presque nulle de l'ellipticité.

$$H_2 \rightarrow 0$$

Droite orientée verticalement comme l'indique la valeur du tilt angle $\alpha \rightarrow 90^\circ$

Les résultats de cette étude en basse fréquence nous prouvent deux choses :

- la technique expérimentale est bonne puisque les résultats sont compatibles avec la théorie,

- A 15 Hz, pour le cas en question, on peut encore se considérer dans des

conditions statiques ($R/\delta \ll 0,6$) avec un champ électromagnétique très peu dévié de la verticale par les effets du terrain sous-jacent, d'où une ellipticité nulle et un tilt angle avoisinant 90° .

V.4.4. - Evolution du champ électromagnétique avec la fréquence : sondage paramétrique

On fixe la distance entre l'émission et la réception à 50 m. On effectue une série de mesures à fréquences variables ; pour chaque fréquence on accorde la bobine d'émission, l'intensité du courant est maintenue constante et égale à 1 A.

La bobine de réception n'est pas accordée, on ne peut donc pas comparer les valeurs de champ à différentes fréquences ; par contre on pourra travailler sur les quotients.

Résultats

F (Hz)	Hz	ϕ_z	Hr	ϕ_r	Hr/Hz	α	H2/H1
65	7,4 μ V	5°	3 μ V	10°	0,40	68°	$3,3 \cdot 10^{-2}$
266	200 μ V	45°	120 μ V	80°	0,60	61°	$2,73 \cdot 10^{-1}$
530	1,3 mV	-45°	1,2 mV	35°	0,92	$59^\circ 4'$	$8,24 \cdot 10^{-1}$
819	4,3 mV	23°	3,6 mV	22°	0,84	50°	$1,83 \cdot 10^{-3}$
1140	17 mV	17°	14 mV	23°	0,82	$50^\circ 6'$	$6,3 \cdot 10^{-2}$
2280	-20 mV	-55°	-13 mV	-50°	0,90	48°	$5,2 \cdot 10^{-2}$
3180	-12,5 mV	-39°	-12 mV	-39°	1	46°	$3 \cdot 10^{-4}$

Commentaires

Avec l'augmentation de la fréquence les valeurs des différents paramètres qui définissent le champ électromagnétique s'écartent progressivement de celles trouvées dans le cas statique :

L'intervention d'un champ magnétique secondaire engendré par la naissance de courants induits de plus en plus intenses au fur et à mesure que la fréquence croît se traduit de la manière suivante :

. apparition d'une composante horizontale du vecteur champ de plus en plus importante avec la fréquence : le rapport Hr/Hz croît jusqu'à la valeur 1.

En hautes fréquences $H_r = H_z$

. le champ magnétique est déphasé par rapport au champ primaire. Les déphasages ϕ_r et ϕ_z des deux composantes varient avec la fréquence.

En hautes fréquences les 2 composantes Hr et Hz sont en phase $\phi_r = \phi_z$

. l'orientation de l'ellipse de polarisation varie avec la fréquence, verticale en continu ($\alpha = 90^\circ$) elle se rapproche progressivement de l'horizontale quand la fréquence augmente.

En hautes fréquences $\alpha = 45^\circ$

. la valeur de l'ellipticité reste très faible, environ 10^{-2} ; en haute fréquence l'ellipticité est la même qu'en continu (10^{-4}) ce qui revient à assimiler l'ellipse à une droite.

V.4.5. - Evolution du champ électromagnétique avec la distance : sondage géométrique

On n'agit plus sur la fréquence pour atteindre la profondeur d'investigation mais sur la distance entre la bobine d'émission et la bobine de réception

Rappel : $R/\delta = R(\sigma\omega\mu/2)^{1/2}$ conditionne la réponse électromagnétique.

On suit le même profil que lors du sondage paramétrique. Sur le site, on jalonne le profil de dix points de mesure allant d'une distance de 5 m par rapport à l'axe de la bobine d'émission jusqu'à 150 m.

La bobine d'émission est accordée à la fréquence de travail ; l'intensité du courant est fixée à un ampère. Le signal à la réception est suffisamment élevé même à une distance de 150 m pour qu'il ne soit pas nécessaire d'accorder la bobine de réception.

On effectue deux sondages géométriques :

1ère fréquence : 266 Hz

2ème fréquence : 534 Hz

On essaie en chaque station d'avoir une bonne précision dans la géométrie des bobines notamment au niveau de leur altitude.

Fréquence : 266 Hz I : 1 A

Résultats

R(m)	Hz	Hr	Hr/Hz	α	H2/H1
	ϕ_z	ϕ			
5	- 115 mV 88°	- 1,6 mV 84°	0,014	89°2	1,44 10 ⁻³
10	- 14 mV 89°	- 860 μ V 26°	0,061	88°4	5,45 10 ⁻²
15	- 4,1 mV 90°	- 210 μ V -40°	0,051	88°1	3,91 10 ⁻²
20	- 1,95 mV 95°	- 205 μ V -42°	0,105	85°6	7,12 10 ⁻²
25	- 920 μ V 93°	- 110 μ V -21°	0,12	87°2	1,09 10 ⁻¹
30	- 680 μ V 100°	- 100 μ V -40°	0,14	83°	9,34 10 ⁻²
50	- 360 μ V 109°	- 130 μ V -32°	0,36	73°5	2,1 10 ⁻¹
70	- 120 μ V 133°	- 100 μ V -19°	0,83	50°8	2,44 10 ⁻¹
100	- 155 μ V 137°	- 150 μ V -41°	0,97	46°	3,2 10 ⁻²
150	- 130 μ V 122°	- 120 μ V -58°	0,92	47°	1,53 10 ⁻³

Fréquence : 534 Hz I : 1 A

Résultats

R(m)	Hz	Hr	Hr/Hz	α	H2/H1
	ϕ_z	ϕ_r			
5	- 270 mV 89°	- 2,1 mV -93°	7,7 10 ⁻³	89°5	4,6 10 ⁻⁴
10	- 33 mV - 89°	- 1,8 mV -69°	5,45 10 ⁻²	87°	1,81 10 ⁻²
15	- 11 mV - 89°	- 1,3 mV -62°	1,18 10 ⁻¹	84°	5,38 10 ⁻²
20	- 4,6 mV - 86°	- 1,2 mV -66°	2,6 10 ⁻¹	76°1	8,5 10 ⁻²
25	- 2,1 mV - 73°	- 400 μ V 1°	1,9 10 ⁻¹	87°	1,83 10 ⁻¹
30	- 1,8 mV 130°	- 300 μ V -167°	1,66 10 ⁻¹	85°	1,47 10 ⁻¹
50	- 1,3 mV 139°	- 1,2 mV - 35°	0,92	48°	1,4 10 ⁻¹
70	- 1,25 mV 135°	- 1,05 mV - 45°	0,84	50°	3,04 10 ⁻²
100	- 1 mV 132,5°	- 900 μ V - 41°	0,9	48°1	7,45 10 ⁻²
150	- 0,9 mV - 69°	- 880 μ V - 66°	1,01	45°6	3,5 10 ⁻²

Commentaires

. A très faibles distances, l'effet des courants induits est presque négligeable : jusqu'à 15 m à 266 Hz et jusqu'à 10 m à 534 Hz.

La composante verticale du champ est nettement prépondérante sur la composante horizontale ($H_r/H_z \approx 10^{-2}$ et décroît en $1/R^3$)

L'ellipse de polarisation est orientée quasiment à la verticale $\alpha \approx 88^\circ$ et assimilable à une droite (ellipsité très faible 10^{-3}).

On est dans des conditions de mesure encore assez proches du continu et ceci parce que le terme R dans la formule $B = R \times (\omega\mu / 2)1/2$ est petit.

. A des distances supérieures à 10 - 15 m, l'effet de la fréquence par l'intermédiaire des courants induits intervient et ceci de manière croissante avec le paramètre B.

La composante Hz ne suit plus la loi de décroissance en $1/R^3$ et d'autre part le terme H_r tend à augmenter jusqu'à devenir égal à Hz.

Pour R grand $H_r = H_z$ d'où $H_r/H_z = 1$.

Le déphasage, important, tend à devenir égal entre les deux composantes

Pour R grand $\phi_r = \phi_z$

Le tilt angle décroît avec la distance jusqu'à une valeur $\alpha = 45^\circ$; l'ellipse de polarisation s'incline vers l'horizontale.

Assimilable à une droite pour de très faibles distances H_2/H_1 10^{-3} , l'ellipticité s'arrondit, H_2/H_1 croît avec la distance, puis dans les distances les plus élevées se réaplatit pour redevenir assimilable à une droite.

V.4.6. - Exploitation des résultats

Notre objectif n'était pas dans un premier temps de tirer des conclusions sur la géologie du terrain mais plutôt d'essayer de comprendre les phénomènes observés, au moyen de l'étude théorique effectuée au cours des précédents chapitres et de confronter les résultats à ceux que nous avons pu trouver dans la littérature.

H.Ward, dans un article intitulé "Electromagnetic fields about a loop source of current" (46), où il étudie l'ellipse de polarisation magnétique obtenue à partir de sondages paramétriques et géométriques écrit : "au vu des résultats obtenus on constate que l'ellipse de polarisation se réduit presque à un axe vertical en basse fréquence et un axe horizontal en haute fréquence en passant par un maximum d'ellipsité dans les moyennes

fréquences". Cette constatation s'appuie sur les courbes qu'il a pu tracer et qui représentent la variation du tilt angle et de l'ellipticité en fonction du nombre d'induction B (Figures 58, 59, 60,61).

Nous avons tracé ces mêmes courbes avec les valeurs obtenues lors des sondages géométriques à 266 et 534 Hz (Figure 62) dans le cas du tilt angle.

L'allure des courbes est sensiblement la même que celle trouvée par H. Ward avec une décroissance du tilt angle avec la distance. Cependant nous n'atteignons pas de valeurs inférieures à 45° soit parce que nous ne nous sommes pas suffisamment éloignés de l'émission soit parce que le terrain n'était pas homogène (proximité de la nappe phréatique du Drac).

Dans le cas de l'ellipticité on retrouve bien pour nos valeurs une croissance jusqu'à un maximum, suivie d'une décroissance avec la distance ; cependant la forme de la courbe est très pointue avec des écarts très accentués entre chaque point. Il est probable que ceci soit dû à un manque de rigueur dans la géométrie de notre dispositif, principalement au niveau de l'altitude qui devrait être identique entre la bobine d'émission et la bobine de réception ; la précision dans la géométrie est d'autant plus difficile à maintenir que la distance émission/réception est grande ; or plus l'on s'éloigne plus les valeurs mesurées sont faibles, donc plus l'erreur due à l'imprécision de la mesure est relativement forte

D'après les courbes de H. Ward, il est tout à fait remarquable de noter que le passage du cas continu (tilt angle de 90° , ellipticité presque nulle) au cas alternatif (tilt angle décroissant jusqu'à une valeur nulle, ellipticité croissante puis décroissante) se situe pour des valeurs de B comprises entre 0,5 et 0,8.

Ceci n'est pas sans rappeler les conclusions que nous avons tirées par le calcul et la modélisation de l'évolution du champ électromagnétique avec la fréquence dans le cas d'un terrain homogène. En effet, nous avons conclu (chapitre V) qu'à partir d'une valeur $B = R/\delta > 0,6$, l'influence des courants induits dans le terrain était trop importante pour que l'on puisse encore se considérer dans le cas statique et utiliser les équations du continu.

Ce phénomène est donc vérifié ici.

A partir d'une valeur de B supérieure à environ 0,7, le champ magnétique secondaire dû au terrain est tel qu'il perturbe le champ primaire d'où une déformation de l'ellipse de polarisation magnétique de plus en plus importante au fur et à mesure que B croît.

fig 58 Tilt angle en fonction de $B_{ref(46)}$

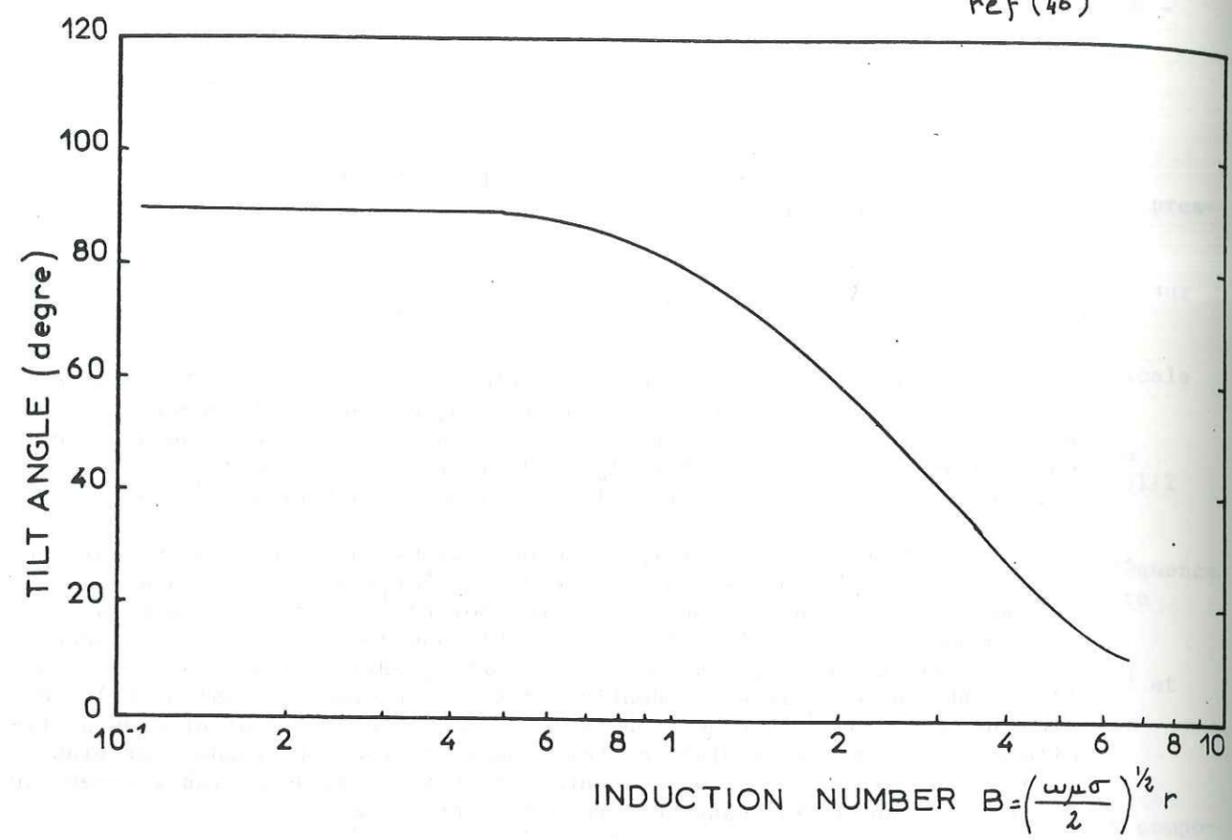


fig 60 Tilt angle en fonction de $B_{ref(46)}$

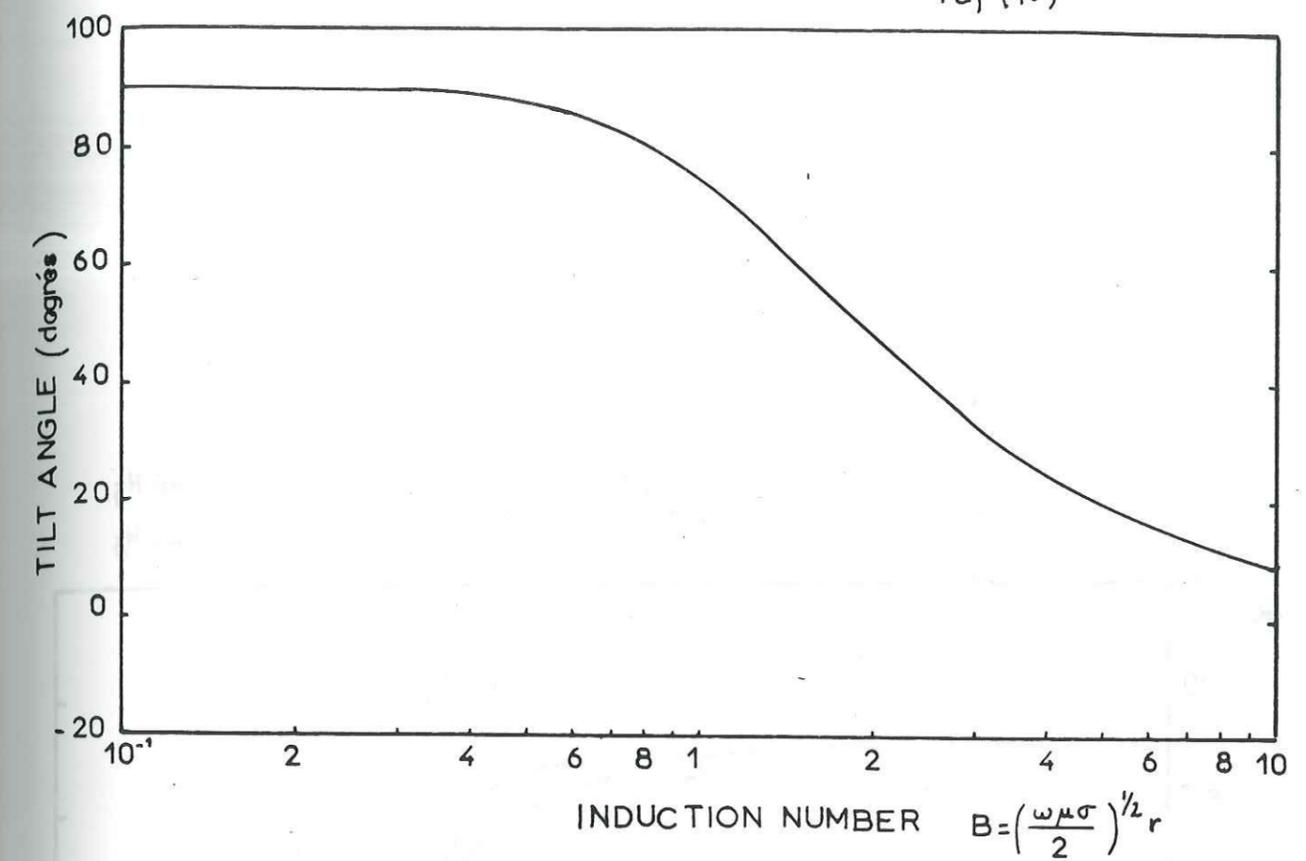


fig 59 éllipticité en fonction de $B_{ref(46)}$

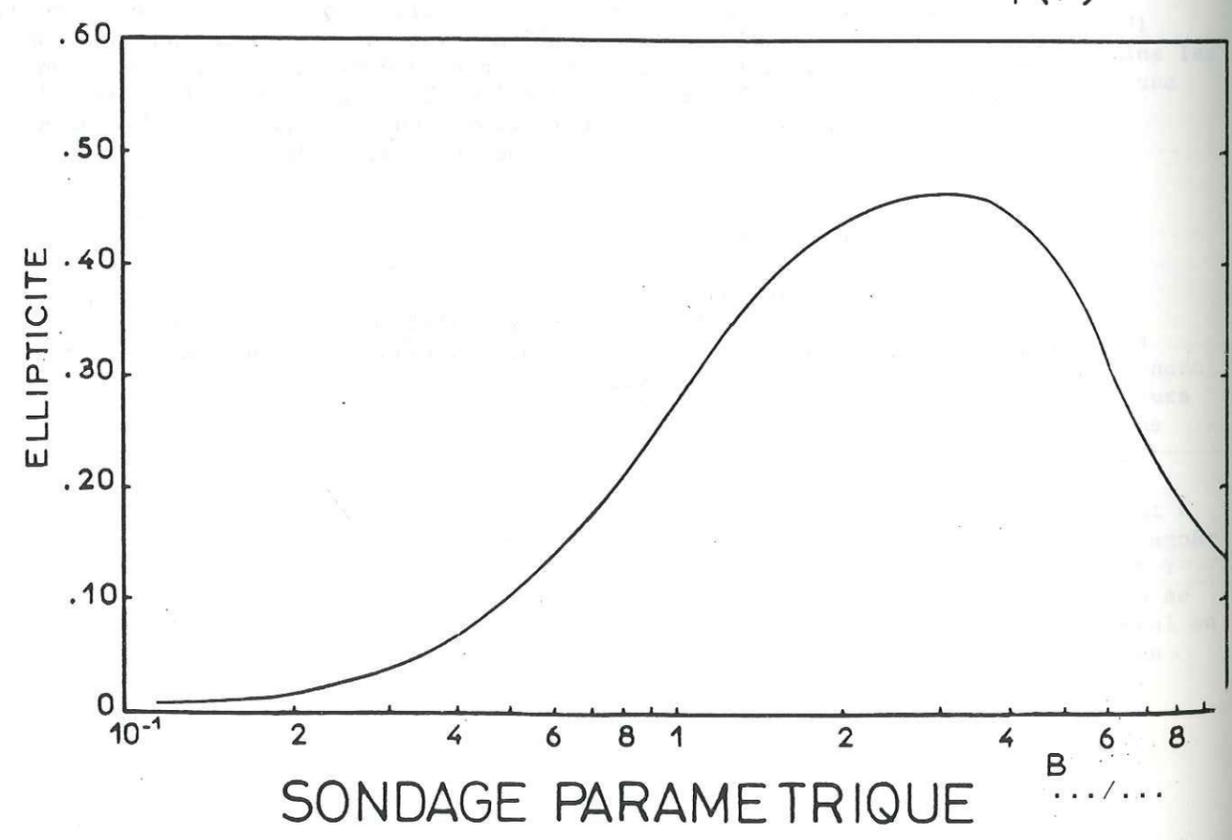
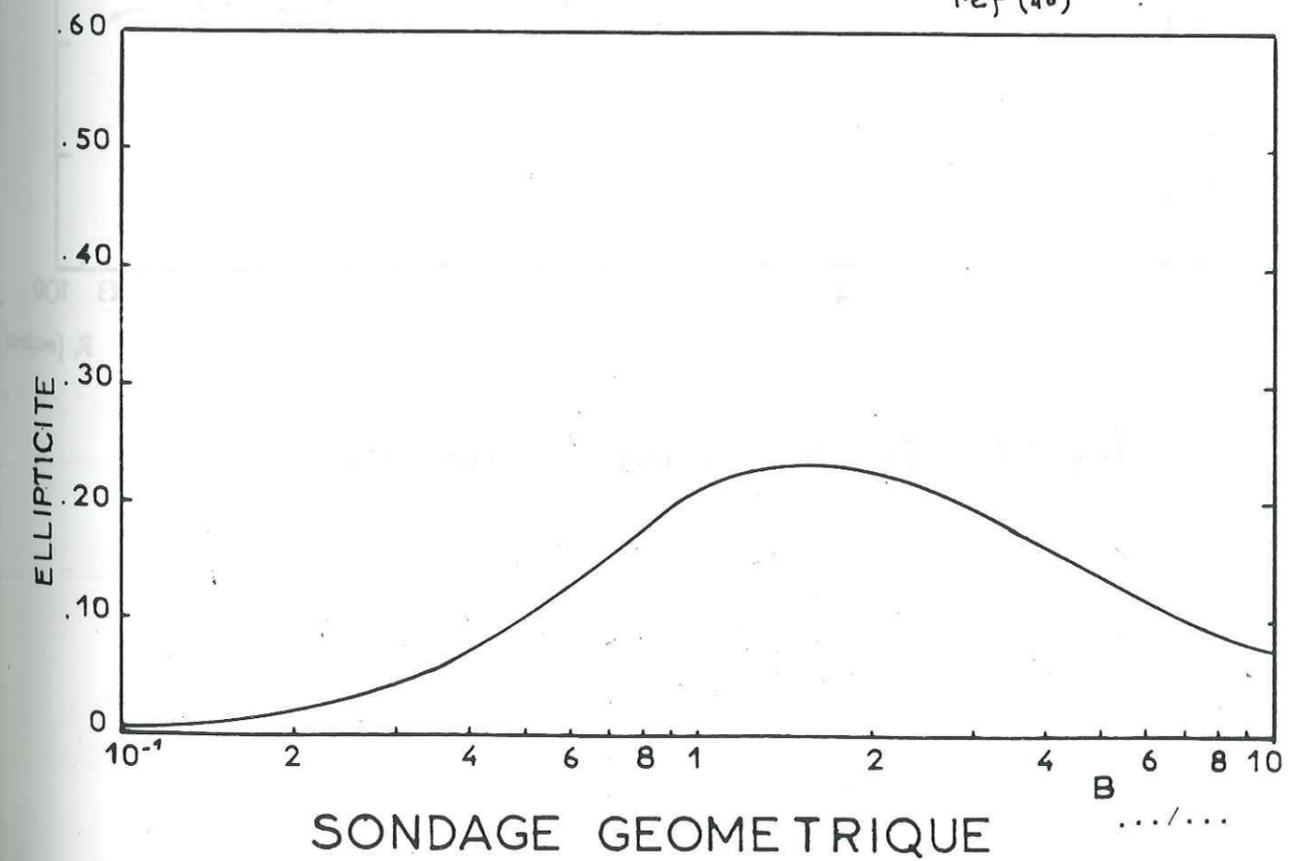


fig 61 éllipticité en fonction de $B_{ref(46)}$



SONDAGE PARAMETRIQUE

SONDAGE GEOMETRIQUE

V.4.7. - Conclusion

L'expérimentation sur le terrain des mesures électromagnétiques nous a permis d'approcher de manière pratique plusieurs problèmes liés :

- à l'instrumentation, avec l'utilisation d'appareils sophistiqués (détection synchrone),
- à la mesure, notamment les mesures de phase et leur signification,
- à la précision du dispositif qui doit être grande dans les mesures électromagnétiques.

Les résultats obtenus ainsi que ceux trouvés dans la littérature traitant de l'ellipse de polarisation magnétique, nous confortent dans les conclusions obtenues au cours des précédents chapitres, à savoir qu'il n'est plus possible de négliger l'intervention de la géologie et des propriétés physiques du terrain lors de mesures électromagnétiques au-delà de certaines conditions d'expérimentation qui sont définies par la valeur du rapport :

$$B = R/\delta$$

R : distance bobine émission, bobine réception

δ : profondeur de peau

La limite entre le cas statique et le cas théorique est définie par la valeur $B = 0,6$.

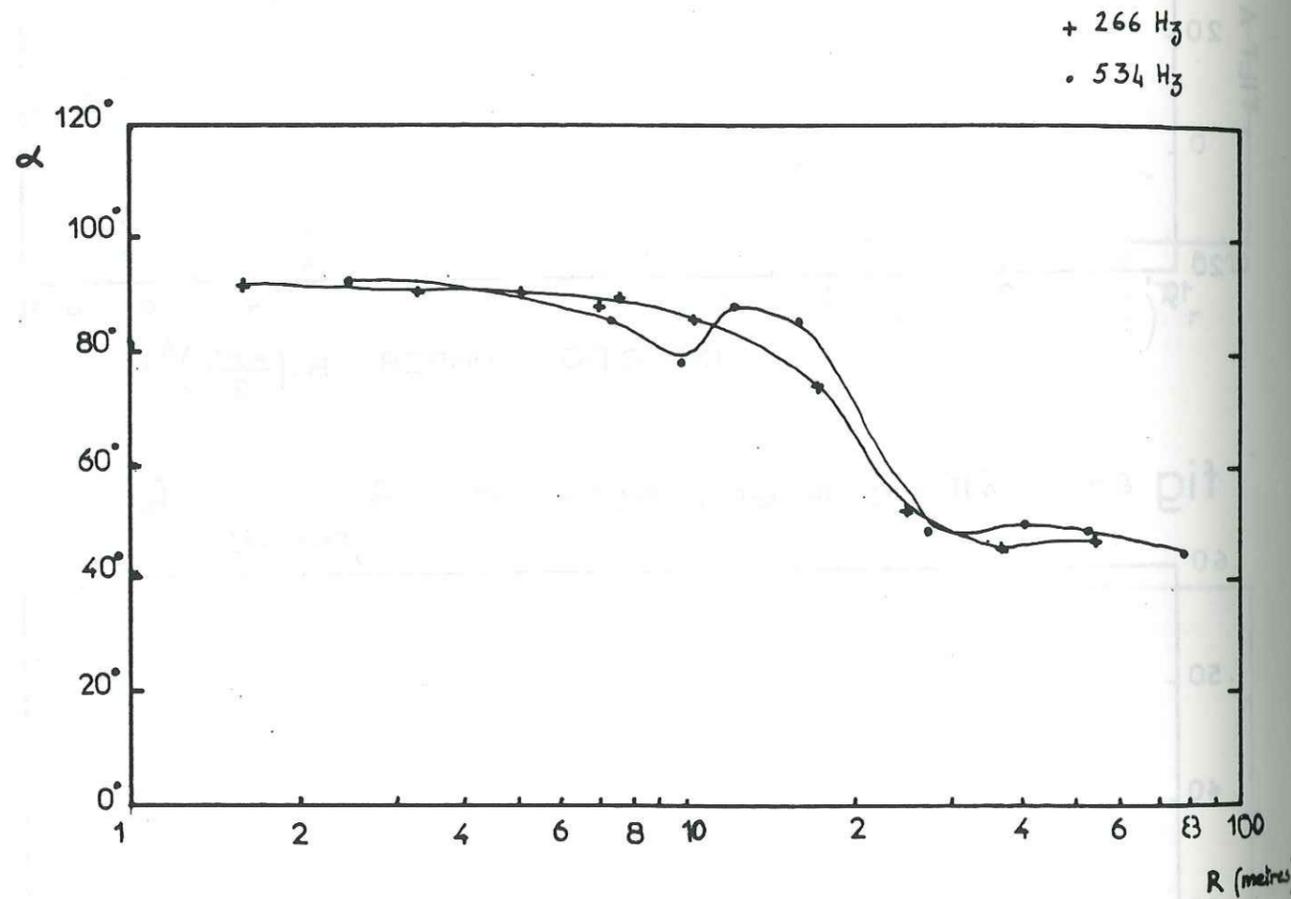


fig 62 Tilt angle en fonction de R

CONCLUSION - PERSPECTIVES

Dans l'introduction, nous avons souligné une orientation nouvelle du laboratoire de Magnétométrie vers les méthodes géophysiques de type électromagnétique au sens large.

Pour ce qui est de la mesure de résistivité, une technique simple et efficace permet d'évaluer ce paramètre (partie réelle et complexe) sur échantillon cylindrique.

Concernant la magnétorésistivité, une évaluation des performances des appareils développés au laboratoire a été faite. Des améliorations techniques sont nécessaires pour exploiter de façon satisfaisante cette méthode.

Pour les méthodes de localisation, une étude théorique permet de fixer l'incidence de la géologie sur la qualité de la mesure et de cerner les avantages respectifs de la solution traditionnelle et de son extension haute fréquence.

Cette étude théorique a été complétée par la mise au point d'un appareillage électromagnétique et une campagne de mesure a permis d'atteindre des résultats satisfaisants tant sur le plan opérationnel que théorique.

Dans l'avenir, il semble particulièrement intéressant de reprendre les résultats obtenus lors de l'étude de la méthode de localisation en régime alternatif pour essayer de déterminer une relation entre la nature et la valeur de l'erreur sur le repérage du dipôle, dont les coordonnées sont connues, et la position relative d'une anomalie conductrice dans le terrain.

Afin de modéliser différentes configurations géologiques, l'étude d'un modèle de forme cylindrique et infiniment conducteur, figurant un filon, pourrait être réalisée en complément du modèle de la sphère sur lequel nous avons travaillé.

S'il s'avère possible de mettre en évidence une relation entre la structure du terrain et l'erreur sur la localisation, la méthode que nous avons présentée pourrait être utilisée pour la reconnaissance de sites géologiques.

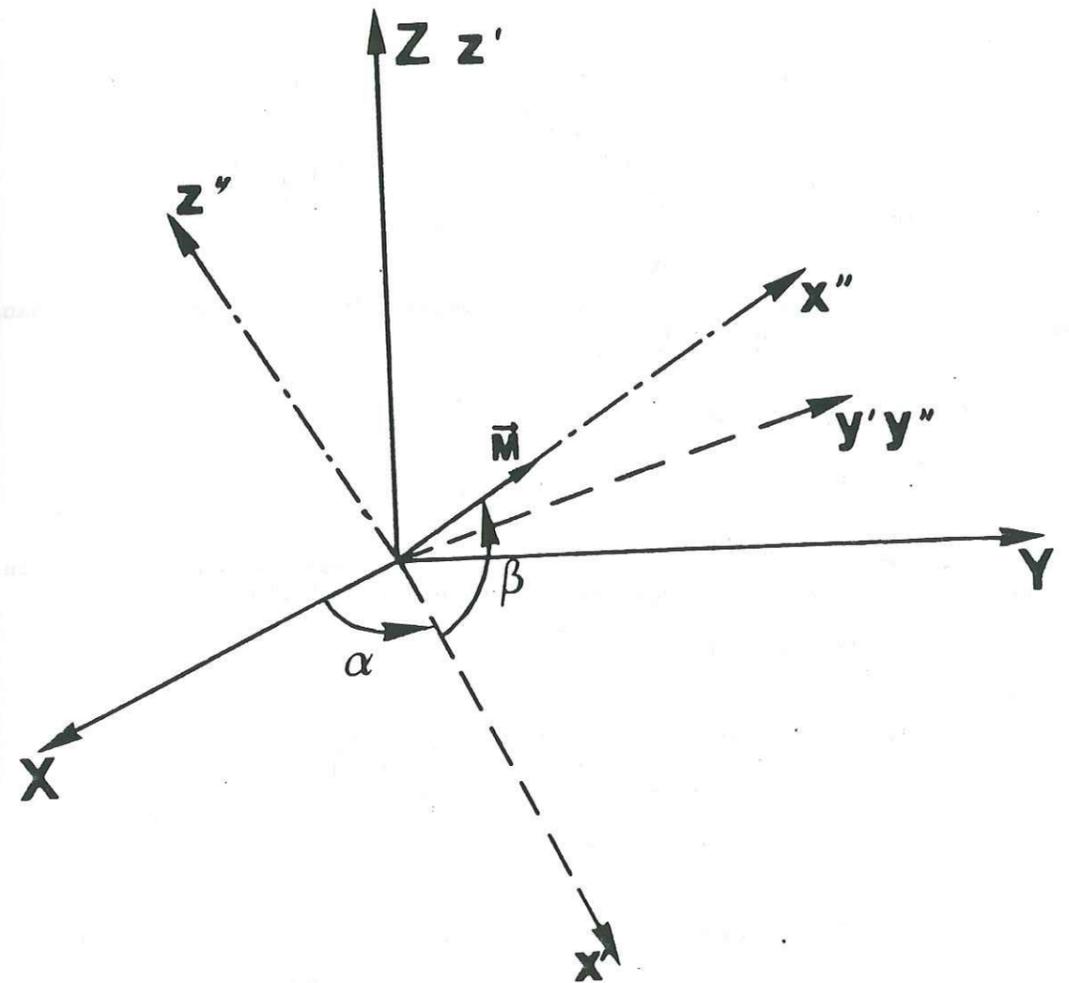
La rentabilité d'un tel dispositif est bien entendu fonction des possibilités d'accès à une cavité souterraine au sein de laquelle le dispositif d'émission peut être déposé. Ceci oriente la méthode proposée vers des applications dans les domaines du minier et du génie civil. En effet, dans les deux cas l'investigation est relativement superficielle et les galeries, tunnels, et autres édifices souterrains fréquents ;

les hétérogénéités que l'on cherche à déceler sont alors des filons ou des poches minéralisées, des conduites, des câbles enterrés ou des réservoirs d'eau ; toutes ces formes peuvent être étudiées au moyen de l'un ou l'autre des modèles sphère ou cylindre.

ANNEXE 1 : PROGRAMME DIPMAG

CALCULS - COMMENTAIRES DU LISTING

Trièdre repéré au centre du dipôle



α = Déclinaison
β = Inclinaison

Z = altitude

F x δ = produit fréquence conductivité

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} = \sqrt{\frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2\pi f\sigma}} = \left(\frac{1}{40\pi^2 \cdot 10^{-8} f\sigma}\right) = \left(\frac{10^4}{\pi}\right) \left(\frac{1}{40\sigma f}\right)^{1/2}$$

- On définit la matrice B qui permet de calculer les coordonnées d'un vecteur dans le repère (x,y,z) à partir des coordonnées connues dans le repère (x'' y'' z'').

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$

- D'où la matrice B produit des deux précédentes

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cos\alpha & \cos\beta & -\sin\alpha & -\cos\beta & \sin\beta \\ \sin\alpha & \cos\beta & \cos\alpha & -\sin\beta & \sin\beta \\ \sin\beta & 0 & 0 & \cos\beta \end{pmatrix}}_B \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix}$$

- on définit les coordonnées du vecteur M, moment magnétique, dans le repère (o,x,y,z) lié au dipôle

$$\begin{aligned} UHX &= \cos\alpha \cos\beta \\ UHY &= \cos\beta \sin\alpha \\ UHZ &= \sin\beta \end{aligned}$$

- On définit la matrice C qui permet de passer des coordonnées du système (x y z) aux coordonnées dans le système (x'' y'' z'')

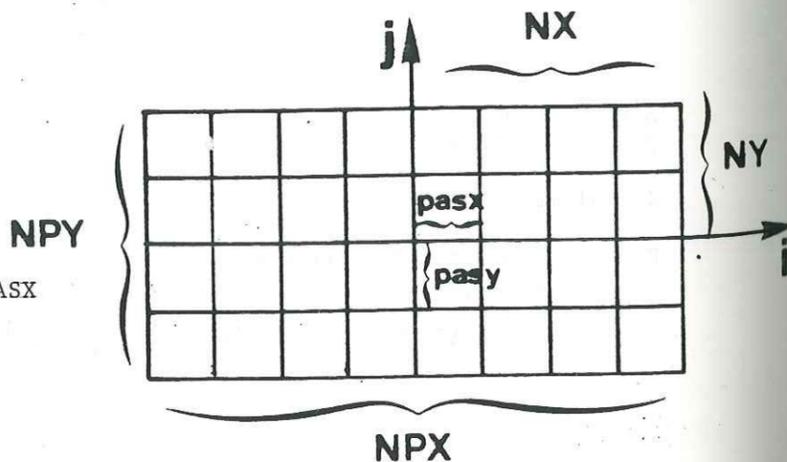
$$C(I,J) = B(J,I)$$

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cos\beta & \cos\alpha & \cos\beta \sin\alpha & \sin\beta \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ -\sin\beta & \cos\alpha & -\sin\beta \sin\alpha & \cos\beta \end{pmatrix}}_C \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

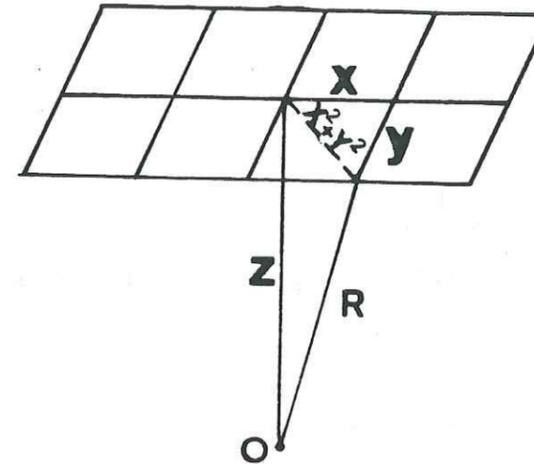
- On définit la valeur que prennent X et Y en chaque point du quadrillage

$$\begin{aligned} NPX &= 2NX + 1 \\ NPY &= 2NY + 1 \end{aligned}$$

Y = PASY (J - 1 - NY)
X = PASX (I - 1 - NX)
sur l'exemple ci-contre
I varie de 1 à 9
X varie de -4.PASX à +4.PASX



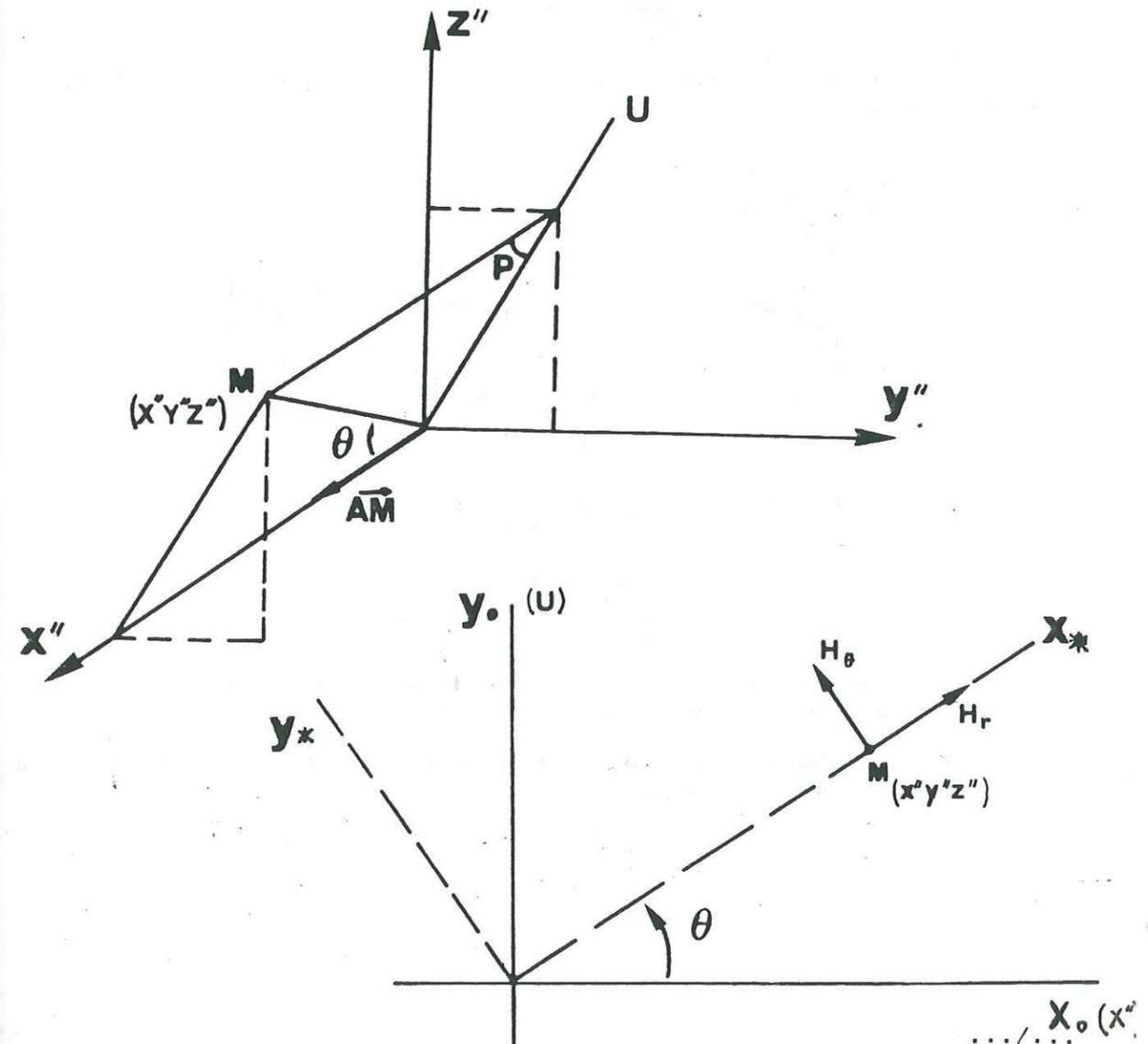
- On calcule la distance entre le dipôle et les points de mesure du quadrillage.



$$R = z^2 + y^2 + x^2$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

- On calcule les coordonnées des 2 vecteurs champ magnétique au point M dans le système x'' y'' z''.



$$\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ +\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^* \\ Y^* \end{pmatrix}$$

On projette H_r et H_θ dans le système de coordonnées X_0, Y_0 c'est à dire x'' et y''

$$\begin{pmatrix} H_{x''} \\ H_{y''} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_r \\ H_\theta \end{pmatrix}$$

On peut calculer les coordonnées du vecteur \vec{H}_u dans le système $x'' y'' z''$

$$\vec{H}_u \begin{cases} H_{y''} = \frac{y''}{\sqrt{y''^2 + z''^2}} H_u \\ H_{z''} = \frac{z''}{\sqrt{y''^2 + z''^2}} H_u \end{cases}$$

Donc les coordonnées de H_θ et H_r dans le système $x'' y'' z''$ sont données par la matrice A

$$\begin{pmatrix} H_{x''} \\ H_{y''} \\ H_{z''} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{y''}{\sqrt{y''^2 + z''^2}} \sin \theta & \frac{y''}{\sqrt{y''^2 + z''^2}} \cos \theta \\ \frac{z''}{\sqrt{y''^2 + z''^2}} \sin \theta & \frac{z''}{\sqrt{y''^2 + z''^2}} \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_r \\ H_\theta \end{pmatrix}$$

$$\text{avec } \cos \theta = \frac{x''}{R''} = \frac{x''}{R} = \frac{x''}{\sqrt{x''^2 + y''^2 + z''^2}}$$

$$\sin \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta} = \sqrt{\frac{R^2 - x''^2}{x''^2 + y''^2 + z''^2}}$$

On peut calculer les valeurs de $x'' y'' z''$ en fonction de $x y z$ par la matrice C définie auparavant.

On aboutit à une matrice de transformation A composée de termes en x, y, z , coordonnées du point M

$$A : \begin{matrix} H_r & H_{x''} \\ & \rightarrow H_{y''} \\ H_\theta & H_{z''} \end{matrix}$$

- On cherche la matrice qui permet de passer de

$$\begin{matrix} H_r & H_x \\ & \rightarrow H_y \\ H_\theta & H_z \end{matrix}$$

On a défini plus haut la matrice B qui permet de passer de termes en $x'' y'' z''$ à des x, y, z ,

On multiplie la matrice A par la matrice B $\rightarrow D$

$$D : \begin{matrix} H_r & H_x \\ & \rightarrow H_y \\ H_\theta & H_z \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} H_x = D(1,1) H_r + D(1,2) H_\theta \\ H_y = D(2,1) H_r + D(2,2) H_\theta \\ H_z = D(3,1) H_r + D(3,3) H_\theta \end{matrix}$$

- On calcule H_r et H_θ à partir des formules de PATRA (Page 58)(43)

$$H_r = 2b' \frac{\cos \theta (1 + kr)}{r^3} e^{-kr}$$

$$H_\theta = b' \frac{\sin \theta}{r^3} (1 + kr + k^2 r^2) e^{-kr}$$

$$\text{avec } k^2 = i\mu\omega\sigma$$

$$k = \frac{1 + i}{2} \sqrt{\mu\omega\sigma} \quad \text{avec } \delta = \left(\frac{2}{\mu\omega\sigma} \right)^{1/2}$$

$$k = (1 + i) \frac{1}{\delta}$$

$$\text{et } b' = \frac{\mu I S}{4\pi} = \mu \frac{\vec{M}}{4\pi} \quad \text{on pose } |\vec{M}| = AM$$

$$H_r = \frac{2AM \cos \theta}{4\pi R^3} \left[1 + \frac{R}{\delta} + \frac{iR}{\delta} \right] \exp \left(-\frac{R}{\delta} \right) \exp \left(-i \frac{R}{\delta} \right)$$

$$H_\theta = \frac{AM \sin \theta}{4\pi R^3} \left[1 + \frac{R}{\delta} + i \frac{R}{\delta} \left(1 + \frac{2R}{\delta} \right) \right] \exp \left(-\frac{R}{\delta} \right) \exp \left(-i \frac{R}{\delta} \right)$$

$$\text{On pose } RN = \frac{R}{\delta}$$

On pose $H_r = CHR$ et $H_\theta = CHO$

A partir de CHR et CHO on calcule CHX, CHY, CHZ par la matrice D

$$\begin{matrix} CHX \\ CHY \\ CHZ \end{matrix} = D \begin{pmatrix} CHR \\ CHO \end{pmatrix}$$

On a donc les composantes dans x, y, z du champ magnétique total créé en tout point M de mesure

- Calcul de l'amplitude et de la phase suivant UHX, UHY, UHZ

On projette CHX, CHY, CHZ respectivement sur UHX, UHY, UHZ

$$CT = CHX * UHX + CHY * UHY + CHZ * UHZ$$

On appelle par décomposition pour un point de coordonnées I et J

$$\begin{aligned} AR &= CT(I, J) && \text{partie réelle} \\ AI &= \text{AIMAG} [CT(I, J)] && \text{partie imaginaire} \end{aligned}$$

On calcule la norme du vecteur CT

$$AUX = AR^2 + AI^2$$

$$AUX = \sqrt{AR^2 + AI^2}$$

Pour chaque point de coordonnées I, J , on écrit le résultat

I, J, AUX, BUX

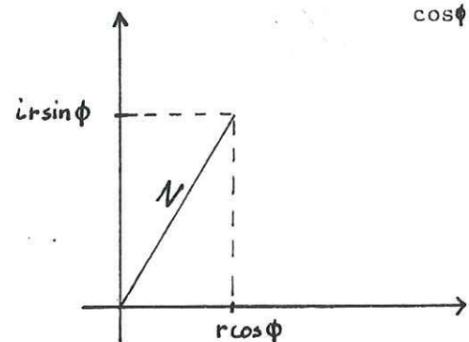
$$\begin{aligned} \text{avec } AUX &= CT(I, J) && \text{Amplitude} \\ BUX &= \text{AIMAG } CT(I, J) && \text{Phase} \end{aligned}$$

On définit la valeur et le signe à prendre pour BUX suivant le signe du produit $(AR * AI)$ et le signe respectif de AR et AI

On définit arbitrairement la valeur de la phase qui conditionne le changement de signe de l'amplitude.

En effet quand $\phi = -\pi$ ou $+\pi$

$$\cos\phi = -1$$



$$Z = e^{i\phi} r \text{ (r toujours positif)}$$

$$= r (\cos\phi + i \sin\phi)$$

$$\begin{aligned} \text{Quand } \phi = -\pi \text{ ou } \pi & Z < 0 \\ \phi = 0 & Z > 0 \end{aligned}$$

.../...

Pour les valeurs numériques on pose la limite $-\pi/2 + \pi/2$ pour le changement de signe des amplitudes

quand $\phi > -\pi/2$ et $\phi < \pi/2$ Amplitude > 0

Les données I, J, AUX, BUX sont transmises à un sous-programme courbe amplitude et phase le long des profils (CSORT)

Sur les courbes on corrige les signes graphiquement en inversant les portions correspondant à une $\phi = \pm\pi$

(M) Les données X, Y, AUX sont transmises au programme de localisation (CERCL)

.../...

< LISTING DE L'UTILISATEUR : 0004 DATE : 00/ 00/ 00 06H 51MNS

LISTE DU FICHIER : DIPMAG- 4S ,D3

```

COMPLEX CHR(101,5),CT(101,5),CHO(101,5)
COMPLEX CHX(101,5),CHY(101,5),CHZ(101,5)
COMPLEX W(20)
DIMENSION A(3,2),B(3,3),C(3,3),D(3,2)
COMMON /IO/IDW,IR
COMMON W
DATA IDW,IR,IW/128,129,143/
C NX ,NY NB POINTS EN X,Y, DS PLAN ALTITUDE Z=ALT
C DIPOLE DEFINI PAR ALPHA-(OX,PROJ M SUR XOY),BETA-(PROJ M SUR XOY,M)
C MOMENT DU DIPOLE-AM
C AXE DE MESURE-DEFINI PAR DEC,DINC COMME ALPHA,BETA,EN DEGRES
C PASX,PASY,SIGMA,FREQ,SONT LES PAS ,LA CONDUCTIVITE,LA FREQUENCE
C AM DOIT CONTENIR LE COEFFICIENT LIEE AU SYSTEME D UNITE
C SYSTEME MKSA RATIONNALISE CALCUL DE CHAMP MAGNETIQUE EXCLUSIVEMENT(A/M)
C IVAR=1 ON A AMPLITUDE ET PHASE DS CT=LES CHAMPS
C IVAR=2 ON A LES RAPPORTS DES AMPLITUDES ALTERNATIF/CONTINU ET LA PHASE
C IVAR=3 CALCUL DE L EFFET GLOBAL SPHERE ET MILIEU CONDUCTEUR
C IVAR=4 CALCUL DU CHAMP SECONDAIRE ASSOCIE A LA SPHERE
  CALL EI('NX ',NX)
  CALL EI('NY ',NY)
  CALL EF('PASX',PASX)
  CALL EF('PASY',PASY)
  CALL EF('ALT ',ALT)
  CALL EF('ALFA',ALPHA)
  CALL EF('BETA',BETA)
  CALL EF('AM ',AM)
  CALL EF('DEC ',DEC)
  CALL EF('INC ',DINC)
  CALL EF('SIGM',SIGMA)
  CALL EF('FREQ',FREQ)
  CALL EI('IVAR',IVAR)
  IF(IVAR.LT.3)GO TO 40
  CALL EF('XS ',XS)
  CALL EF('YS ',YS)
  CALL EF('ZS ',ZS)
  CALL EF('A ',AG)
40 CONTINUE
C
500 FORMAT(I4)
501 FORMAT(2F10.2)
502 FORMAT(F10.2)
PI=3.141593
Z=ALT
FS=FREQ*SIGMA
IF(FS.LT.1.E-8)GO TO 50
DELTA=(10000./PI)/SQRT(40.*FREQ*SIGMA)
50 CONTINUE
CA=COS(ALPHA*PI/180.)
SA=SIN(ALPHA*PI/180.)
CB=COS(BETA*PI/180.)
SB=SIN(BETA*PI/180.)
B(1,1)=CA*CB
B(1,2)=-SA

```

```

B(1,3)=-CA*SB
B(2,1)=SA*CB
B(2,2)=CA
B(2,3)=-SA*SB
B(3,1)=SB
B(3,2)=0.
B(3,3)=CB
UHX=COS(DINC*PI/180.)*COS(DEC*PI/180.)
UHY=COS(DINC*PI/180.)*SIN(DEC*PI/180.)
UHZ=SIN(DINC*PI/180.)
NPX=2*NX+1
NPY=2*NY+1
DO 90 I=1,3
DO 90 J=1,3
C(I,J)=B(J,I)
90 CONTINUE
KK=0
DO 100 J=1,NPY
Y=PASY*(J-1-NY)
DO 101 I=1,NPX
X=PASX*(I-1-NX)
RC=X*X+Y*Y+Z*Z
R=SQRT(RC)
X2=X*C(1,1)+Y*C(1,2)+Z*C(1,3)
Y2=X*C(2,1)+Y*C(2,2)+Z*C(2,3)
Z2=X*C(3,1)+Y*C(3,2)+Z*C(3,3)
RU=SQRT(Y2*Y2+Z2*Z2)
A(1,1)=X2/R
A(1,2)=-SQRT(1-A(1,1)*A(1,1))
A(2,1)=-A(1,2)*Y2/RU
A(2,2)=A(1,1)*Y2/RU
A(3,1)=-A(1,2)*Z2/RU
A(3,2)=A(1,1)*Z2/RU
DO 95 II=1,3
DO 95 JJ=1,2
D(II,JJ)=0.
DO 94 K=1,3
D(II,JJ)=D(II,JJ)+B(II,K)*A(K,JJ)
94 CONTINUE
95 CONTINUE
RN=0.
IF(FS.LT.1.E-8)GO TO 51
RN=R/DELTA
51 CONTINUE
AUX=2.*AM*A(1,1)/(R*RC*4.*PI)
BUX=-AM*A(1,2)/(R*RC*4.*PI)
IF(IVAR.EQ.2)AUX=2.*A(1,1)*AM/(4.*PI)
IF(IVAR.EQ.2)BUX=-A(1,2)*AM/(4.*PI)
CHR(I,J)=AUX*CMPLX(1.+RN,RN)*EXP(-RN)*CMPLX(COS(RN),-SIN(RN))
CHO(I,J)=BUX*CMPLX(1.+RN,RN*(1.+2.*RN))
S*EXP(-RN)*CMPLX(COS(RN),-SIN(RN))
CHX(I,J)=CHR(I,J)*D(1,1)+CHO(I,J)*D(1,2)
CHY(I,J)=CHR(I,J)*D(2,1)+CHO(I,J)*D(2,2)
CHZ(I,J)=CHR(I,J)*D(3,1)+CHO(I,J)*D(3,2)
IF(IVAR.LT.3)GO TO 101
CALL MARCH(X,Y,Z,XS,YS,ZS,AG,BB,RW,AM,ALPHA,BETA,SIGMA,
SFREQ,DELTA,EPSI,KK,IW)
IF(IVAR.LT.4)GO TO 99
CHX(I,J)=W(1)
CHY(I,J)=W(2)
CHZ(I,J)=W(3)
GO TO 101

```

```

99  CONTINUE
    CHX(I,J)=CHX(I,J)+W(1)
    CHY(I,J)=CHY(I,J)+W(2)
    CHZ(I,J)=CHZ(I,J)+W(3)
101  CONTINUE
100  CONTINUE

C  AMPLITUDE ET PHASE SUIVANT UHX,UHY,UHZ
    DO 200 J=1,NPY
    DO 200 I=1,NPX
    CT(I,J)=CHX(I,J)*UHX+CHY(I,J)*UHY+CHZ(I,J)*UHZ
    AR=CT(I,J)
    AI=AIMAG(CT(I,J))
    AUX=AR*AR+AI*AI
    AUX=SQRT(AUX)
    BUX=0.
    IF(AUX.EQ.0.)GOTO 62
    AC=AR/AUX
    AS=AI/AUX
    CUX=AC*AS
    IF(CUX)59,60,61
59   IF(AC.GT.0.)BUX=ARSIN(AS)
    IF(AC.LT.0.)BUX=ARCOS(AC)
    GOTO 62
60   IF(AS.NE.0.)BUX=-PI/2.
    IF(AS.GT.0.)BUX=PI/2.
    IF(AS.NE.0.)GOTO62
    BUX=0.
    IF(AC.LT.0.)BUX=PI
    GO TO 62
61   IF(AC.GT.0.)BUX=ARSIN(AS)
    IF(AC.LT.0.)BUX=-PI+ARSIN(-AS)
62   CONTINUE
    CT(I,J)=CMPLX(AUX,BUX)
200  CONTINUE
    DO 220 J=1,NPY
    DO 220 I=1,NPX
    AUX=CT(I,J)
    BUX=AIMAG(CT(I,J))
    WRITE(IDW,600)I,J,AUX,BUX
600  FORMAT(2X,I3,2X,I2,E10.3,2X,E10.3)
220  CONTINUE
    DO 221 J=1,NPY
    DO 221 I=1,NPX
    AUX=CT(I,J)
    BUX=AIMAG(CT(I,J))
    S=-1.
    IF((BUX.GT.(-PI/2.)).AND.(BUX.LT.(PI/2.)))S=1.
    AUX=AUX*S
    X=PASX*(I-1-NX)
    Y=PASY*(J-1-NY)
    WRITE(IDW,601)X,Y,Z,AUX
601  FORMAT(3F10.2,F10.5)
221  CONTINUE
    WRITE(IDW,659)
659  FORMAT('ELISABETH A TORT')
    IP=0
    DO 230 JF=1,NPY
    CALL INITEK(3)
    CALL CSORT(CT,IP,JP,NX,NY,ALPHA,BETA,AM,DEC,DINC,
    SSIGMA,FREQ,ALT,PASX,PASY,IW,IVAR,XS,YS,ZS,AG)
    CALL TEMPO(10000)

```

```

    CALL INITEK(4)
    CALL TEMPO(10000)
    CALL INITEK(3)
230  CONTINUE
    STOP
    END

C
C
C
    SUBROUTINE EI(ITAB,I)
    DIMENSION ITAB(2)
    COMMON /IO/IDW,IR

C
    WRITE(IDW,100) ITAB
100  FORMAT(1X,2A2,'=')
    READ(IR,101) I
101  FORMAT(I4)
    RETURN
    END

C
C
C
    SUBROUTINE EF(ITAB,A)
    DIMENSION ITAB(2)
    COMMON /IO/IDW,IR

C
    WRITE(IDW,100) ITAB
100  FORMAT(1X,2A2,'=')
    READ(IR,101) A
101  FORMAT(F10.2)
    RETURN
    END

C
C
C
    SUBROUTINE TEMPO(II)
    B=0.
    DO 100 I=1,II
    A=COS(1./I)
    B=B+A
100  CONTINUE
    RETURN
    END

```

/*

.. FIN DU LISTING ..

```

SUBROUTINE CSORT(CT,IP,JP,NX,NY,ALPHA,BETA,AM,
SDEC,DINC,SIGMA,FREQ,ALT,PASX,PASY,IW,IVAR,
SXS,YS,ZS,A)
  X COMPLEX CT(101,5)          COMPLEX(S,10)
C CONVENTION:IP=0,X EST VARIABLE DE 1 A NPX AVEC Y=JP.
C IDEM POUR Y;JP=0,Y EST VARIABLE.
C DETERMINATION DE L'AMPLITUDE MAX. SUR TOUTE LA ZONE.
C L'AMPLITUDE EST DANS LA PARTIE REELLE DE CT.
  PI=3.141593
  NPX=2*NX+1
  NPY=2*NY+1
  CAMI=CT(1,1)
  CAMA=CAMI
  DO 100 I=1,NPX
  DO 100 J=1,NPY
  CAC=CT(I,J)
  IF (CAC.GT.CAMA) CAMA=CAC
  IF (CAC.LT.CAMI) CAMI=CAC
100 CONTINUE
C TRACE DU CADRE
  CALL INITEK(2)
  CALL TL(0,0,1000,0)
  CALL TL(1000,0,1000,780)
  CALL TL(1000,780,0,780)
  CALL TL(0,780,0,0)
  CALL TL(0,390,1000,390)
  CALL TL(500,0,500,780)
C TRACE DE COURBE
  IF(IP.NE.0) GO TO 110
C X EST VARIABLE
  K=0
  DO 101 I=1,NPX
  IX=(I-1)*(1000./(NPX-1))
  IY=780*(CT(I,JP)/CAMA)
  CALL TRATEK(K,IX,IY)
  K=1
101 CONTINUE
  GO TO 120
110 CONTINUE
C TRACE A Y VARIABLE
  K=0
  DO 102 J=1,NPY
  IX=(J-1)*(1000./(NPY-1))
  IY=780*(CT(IP,J)/CAMA)
  CALL TRATEK(K,IX,IY)
  K=1
102 CONTINUE
  GO TO 130
120 CONTINUE
C TRACE DE LA PHASE COMPRISE ENTRE -PI/ ET+PI/
  IF (IP.NE.0)GO TO 130
  K=0
  DO 103 I=1,NPX
  IX=(I-1)*(1000./(NPX-1))
  IY=390*(AIMAG(CT(I,JP))/PI)+390
  CALL TRATEK(K,IX,IY)
  K=1
103 CONTINUE
  GO TO 140
130 K=0
  DO 104 J=1,NPY
  IX=(J-1)*(1000./(NPY-1))

```

```

  IY=390+390*(AIMAG(CT(IP,J))/PI)
  CALL TRATEK(K,IX,IY)
  K=1
104 CONTINUE
140 CONTINUE
C ECRITURES DES DIFFERENTS PARAMETRES
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,675)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,600)NX,NY
600 FORMAT(60X,I3,1X,I3)
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,650)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,600)IP,JP
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,575)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,601)ALPHA,BETA
601 FORMAT(60X,F4.0,2X,F4.0)
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,550)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,601)DEC,DINC
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,725)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,602)SIGMA
602 FORMAT(60X,F10.3)
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,600)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,602)AM
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,750)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,602)FREQ
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,625)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,602)ALT
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,700)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,601)PASX,PASY
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,525)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,605)CAMA
605 FORMAT(60X,E10.3)
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,500)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,603)IVAR
603 FORMAT(63X,I4)
  IF (IVAR.LT.3.) GO TO 105
  CALL INITEK(2)
  CALL TRATEK(0,0,475)
  CALL INITEK(1)
  WRITE(IW,604)XS,YS,ZS
604 FORMAT(54X,F4.0,2X,F4.0,2X,F4.0)
  CALL INITEK(2)

```

```

CALL TRATEK(0,0,450)
CALL INITEK(1)
WRITE(IW,602)A
105   RETURN
      END
/*

```

.. FIN DU LISTING ..

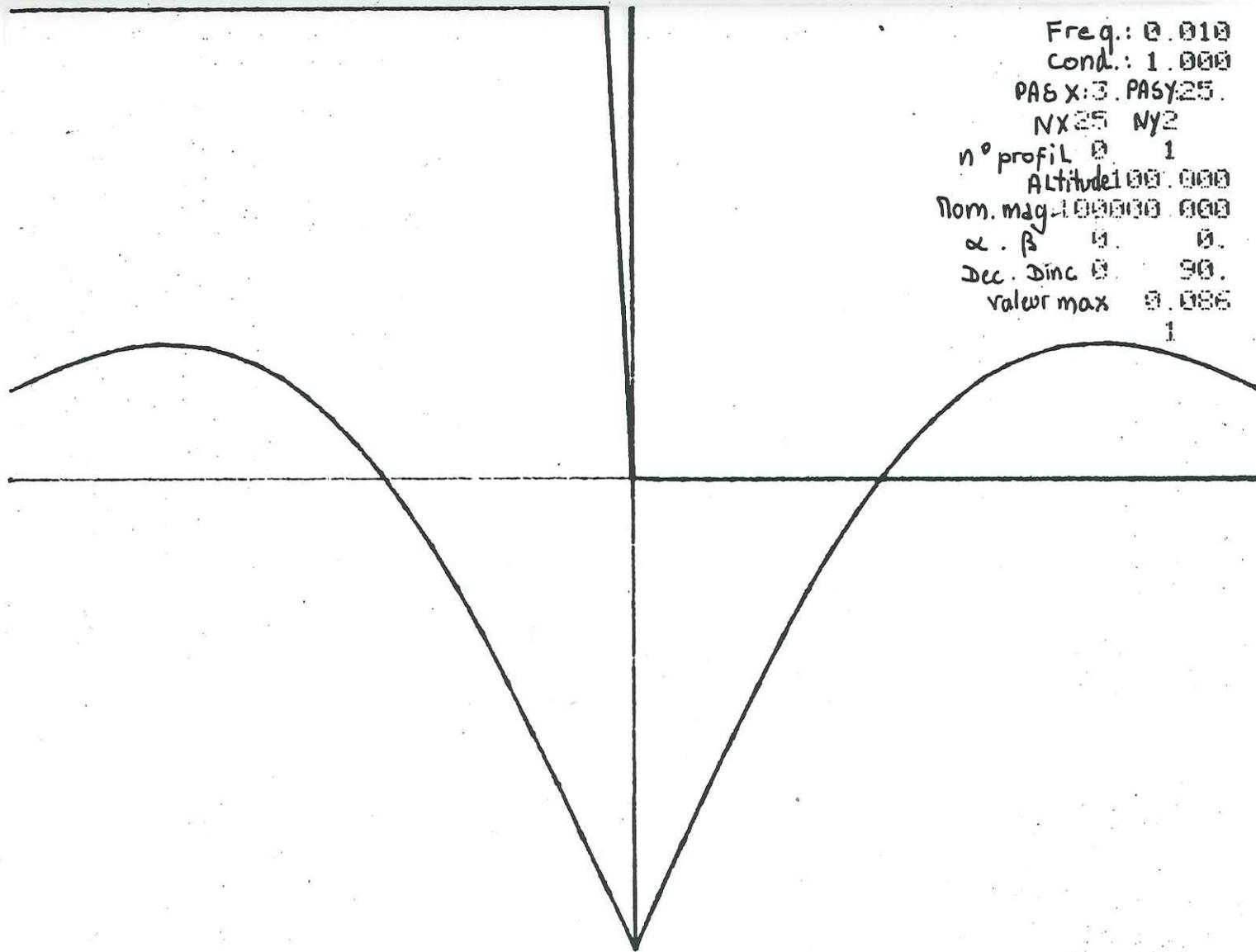
.../...

ANNEXE 2

RESULTATS GRAPHIQUES DU PROGRAMME DIPMAG

- Etude en basses frequences de l'effet de l'orientation du dipole sur l'anomalie magnetique mesurée en surface.
- Etude du cas d'un dipole incliné à differentes fréquences.

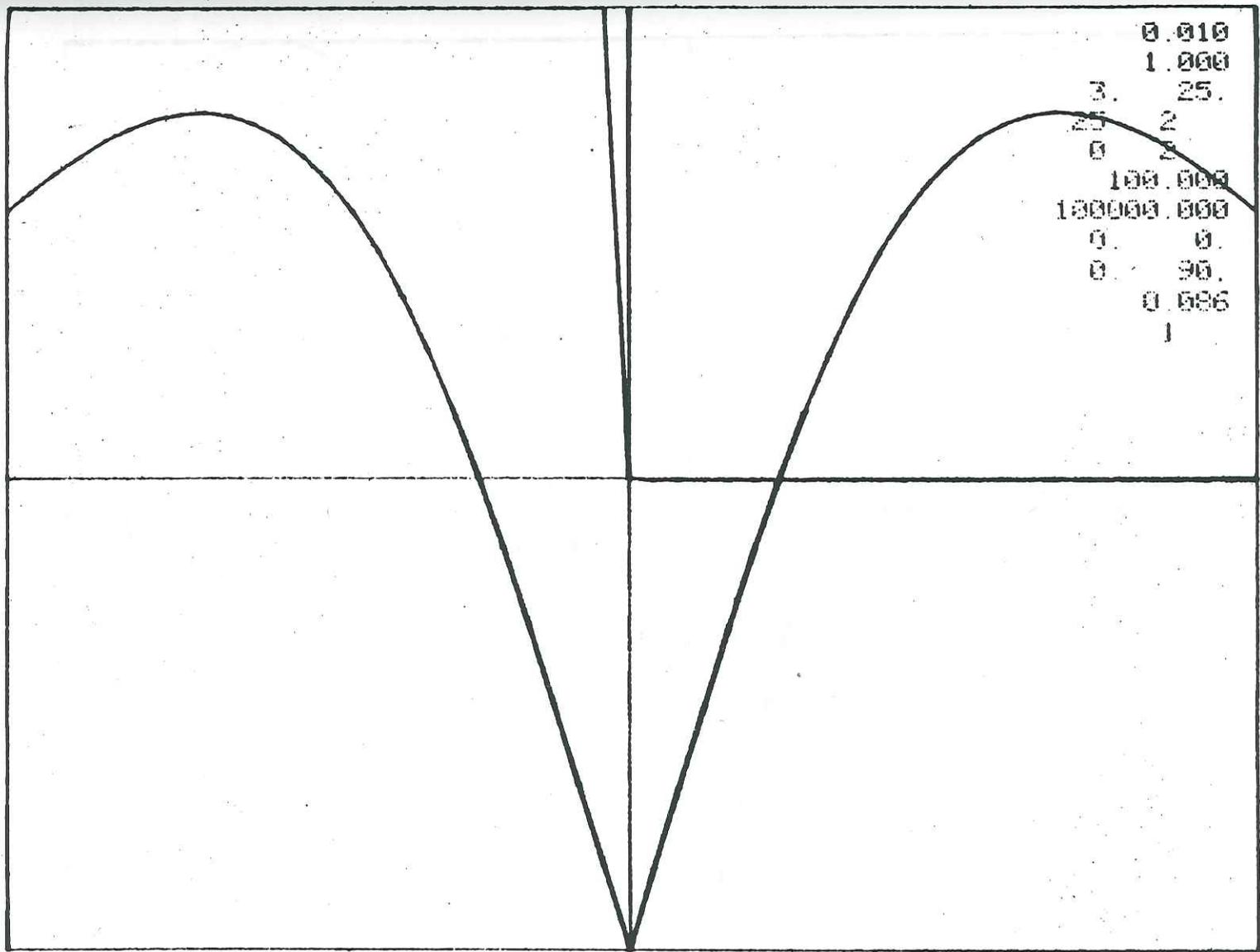
.../...

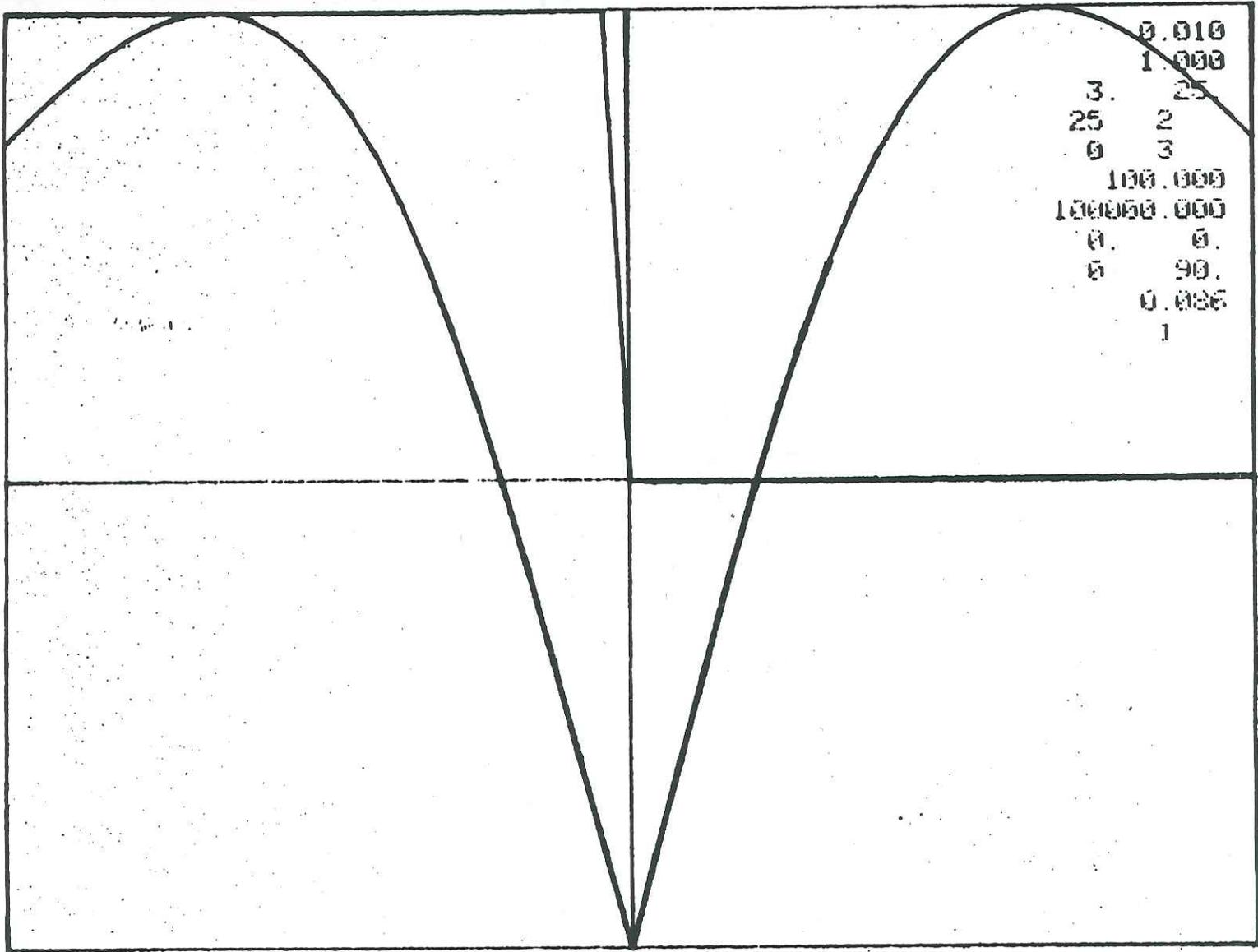


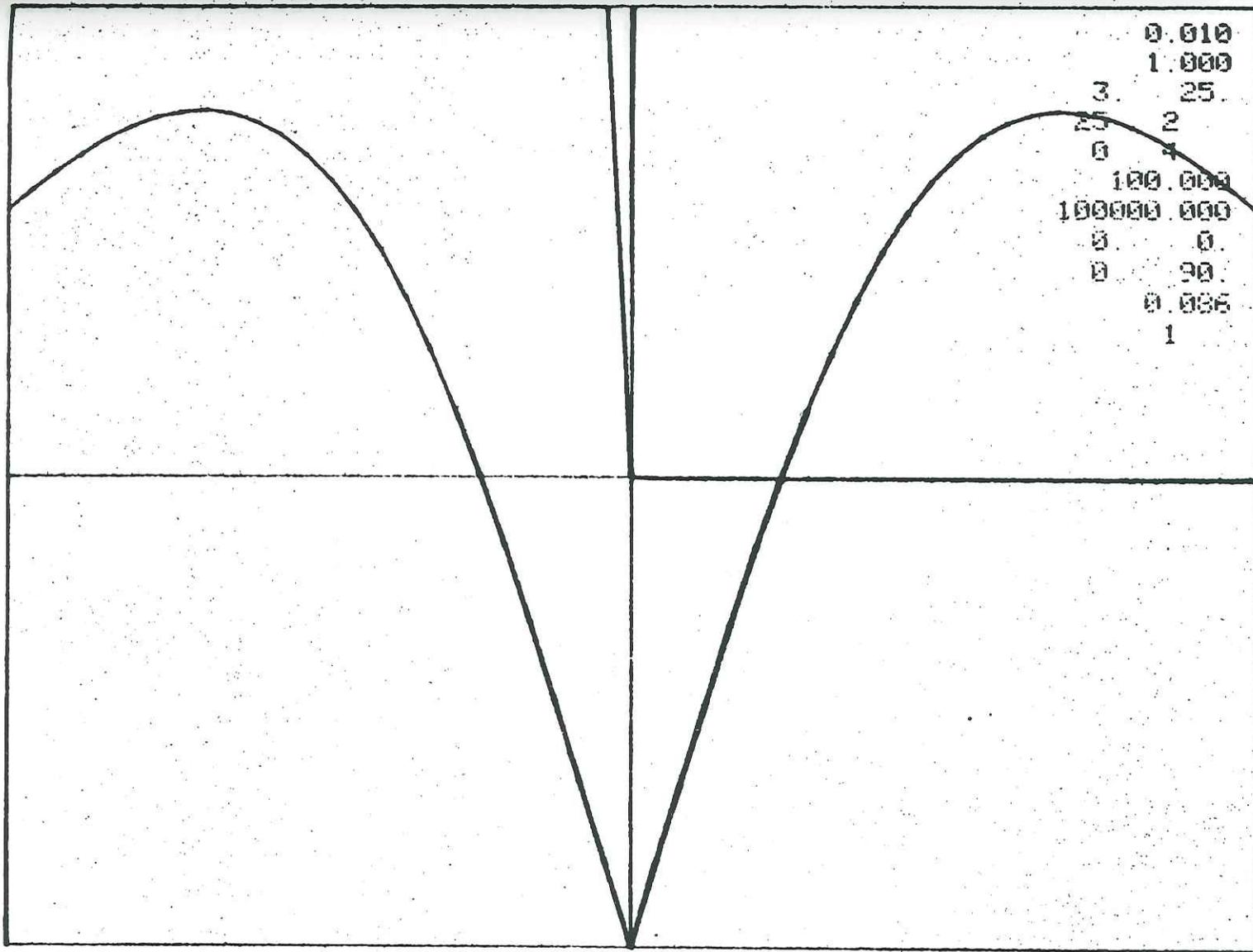
Freq.: 0.010
 Cond.: 1.000
 PAS X: 3. PAS Y: 25.
 NX 25 NY 2
 n° profil 0 1
 Altitude 00.000
 Nom. mag. 100000 000
 α . β 0. 0.
 Dec. Dinc 0. 90.
 valeur max 0.086
 1

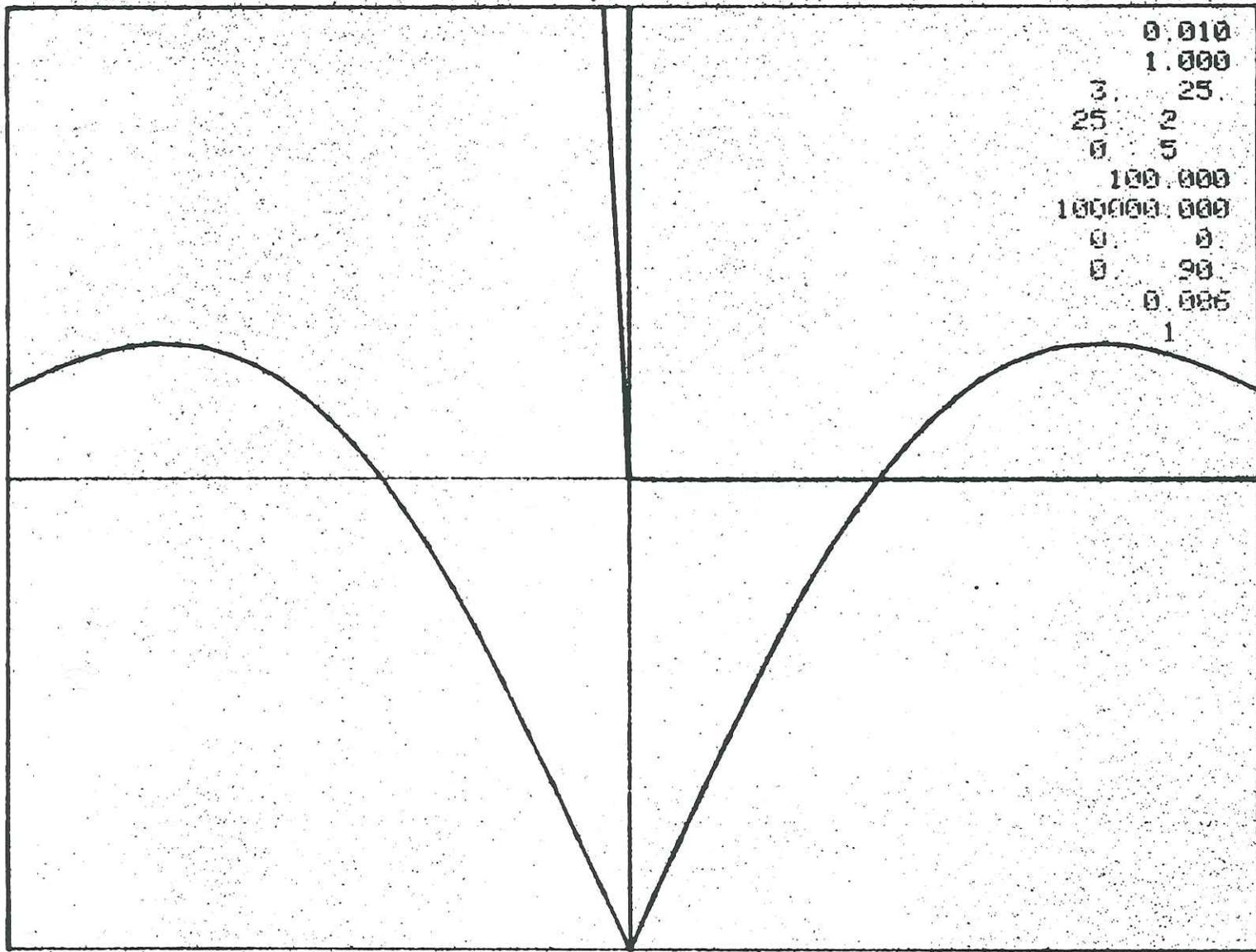
DIPOLE HORIZONTAL

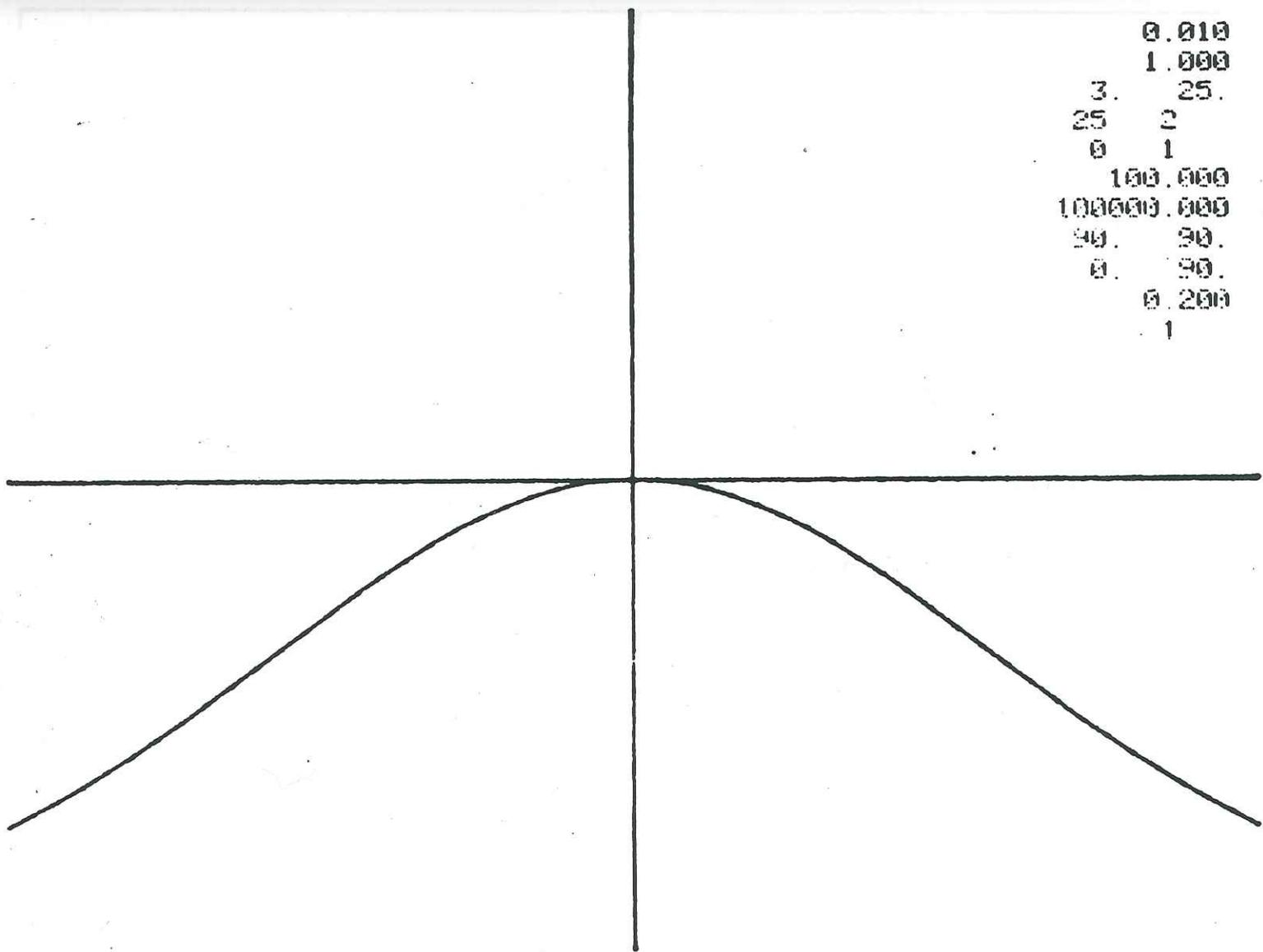
F = 0,01 Hz





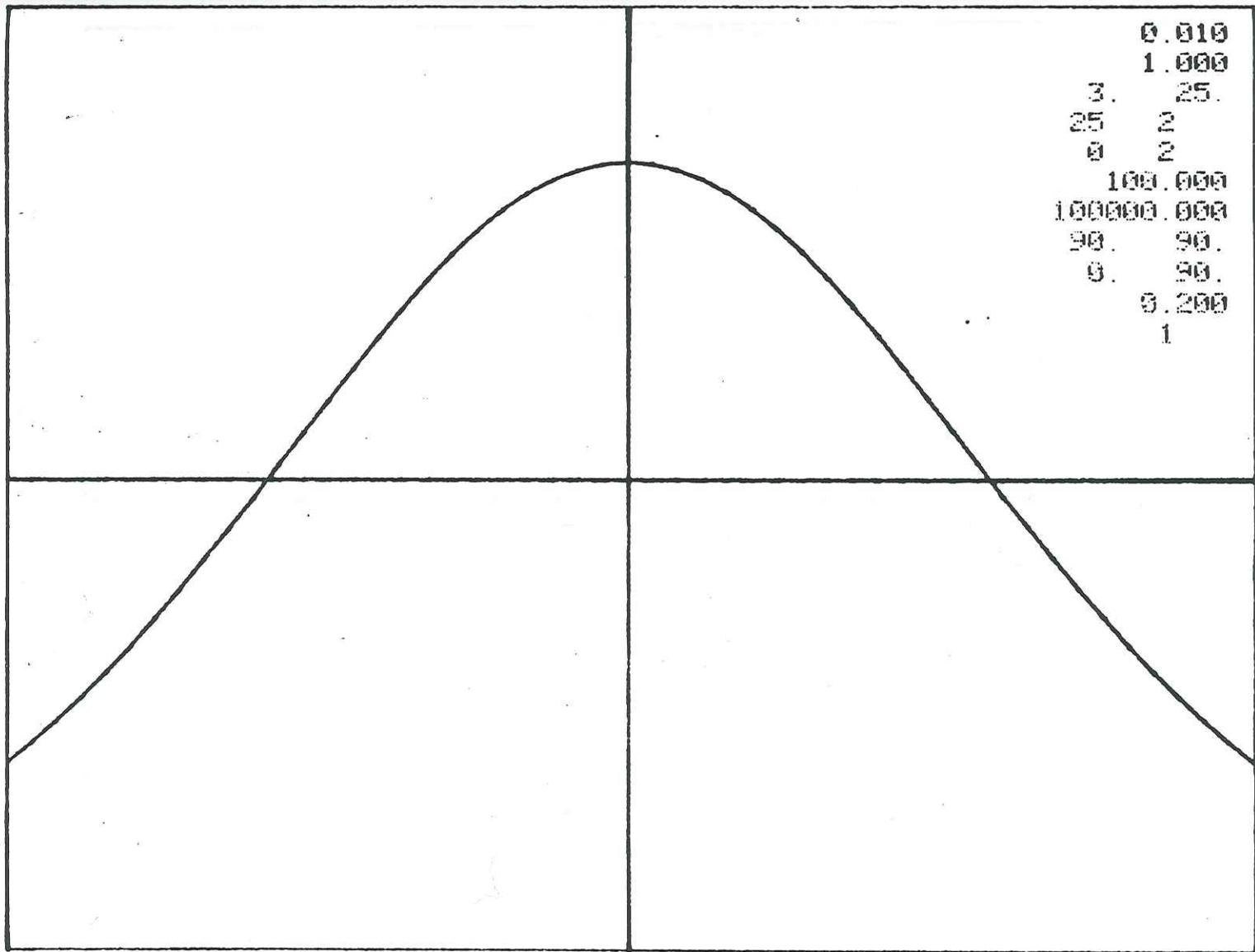




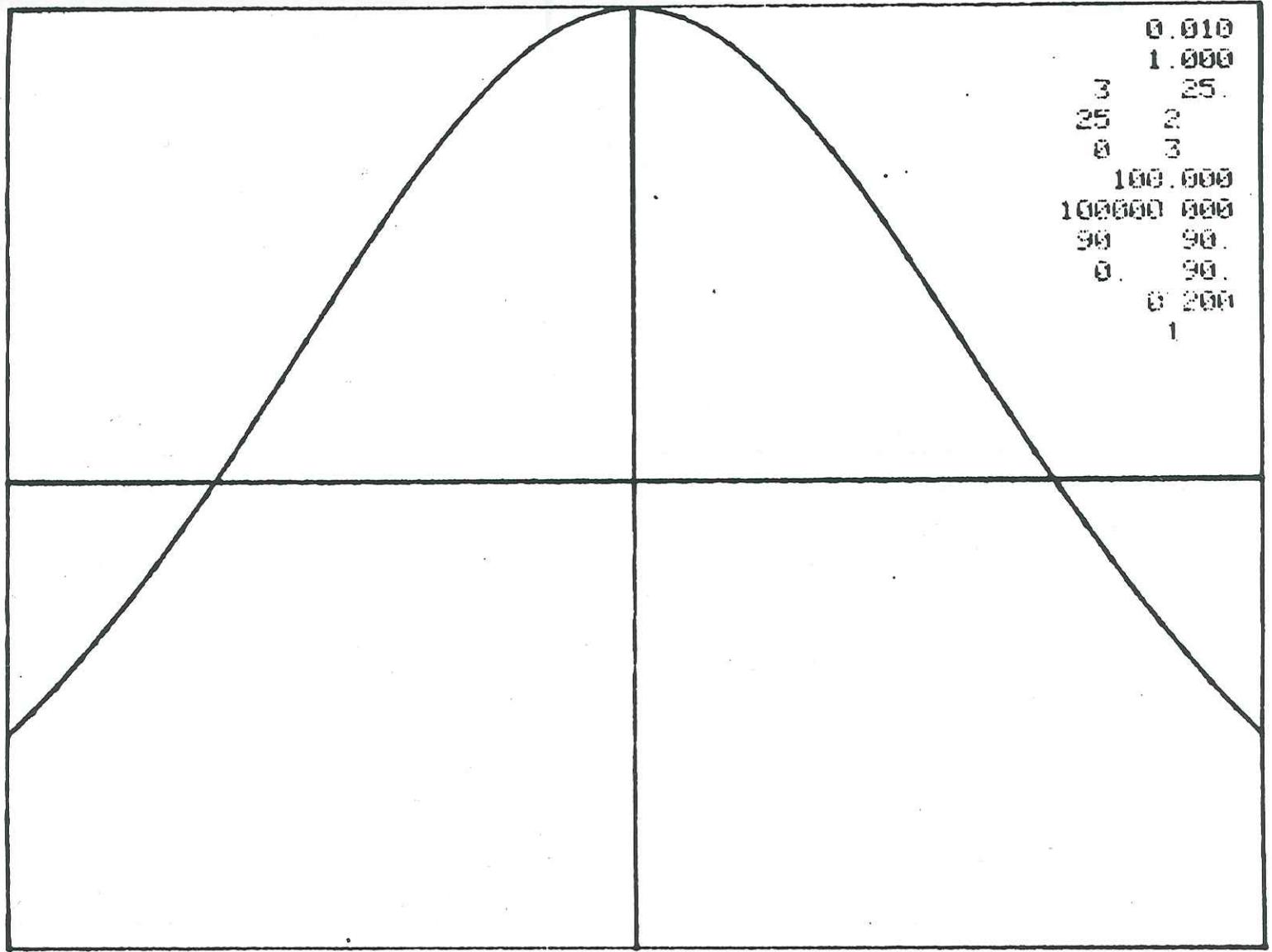


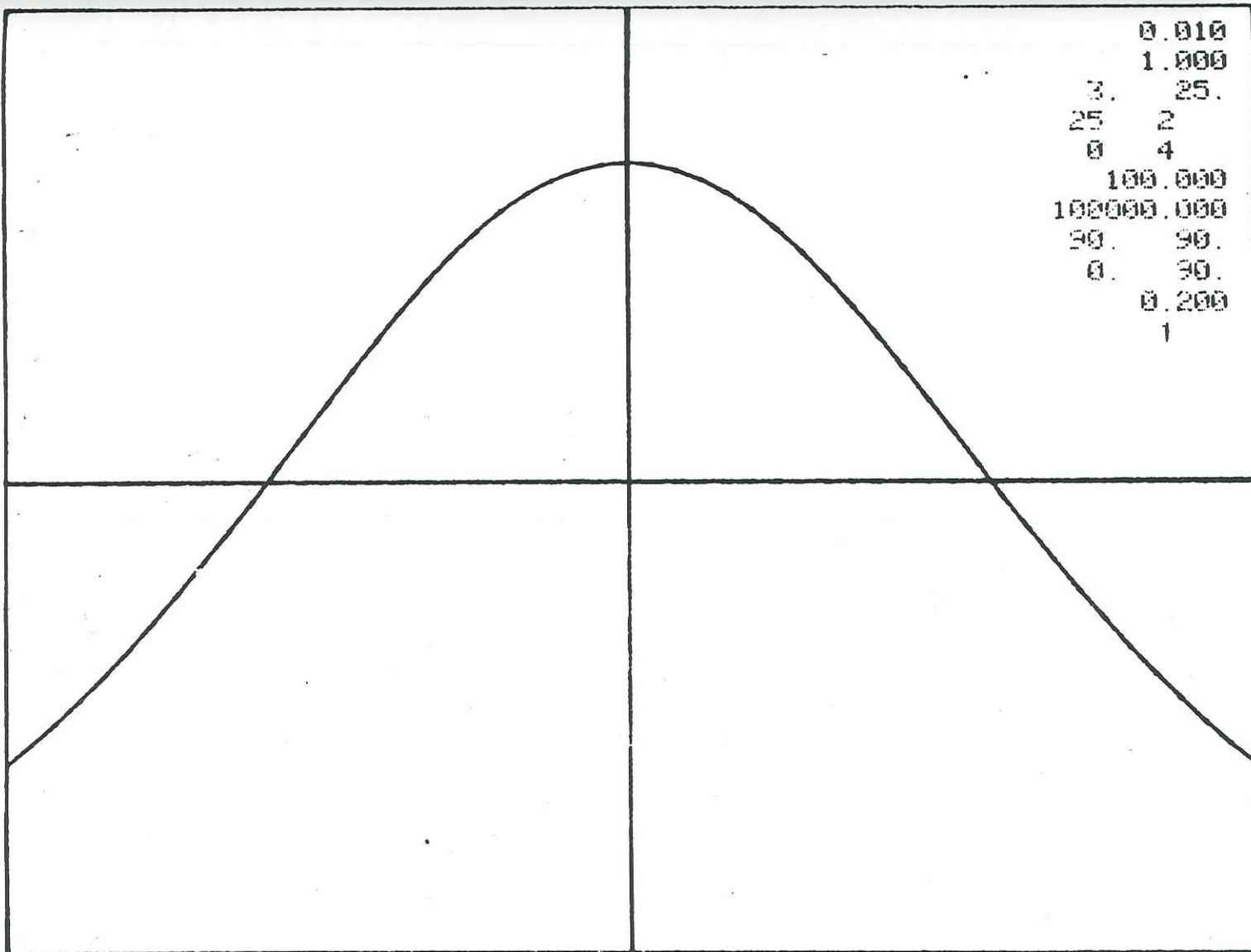
0.010
 1.000
 3. 25.
 25 2
 0 1
 100.000
 100000.000
 90. 90.
 0. 90.
 0.200
 1

DIPOLE VERTICAL $F = 0,01H_3$

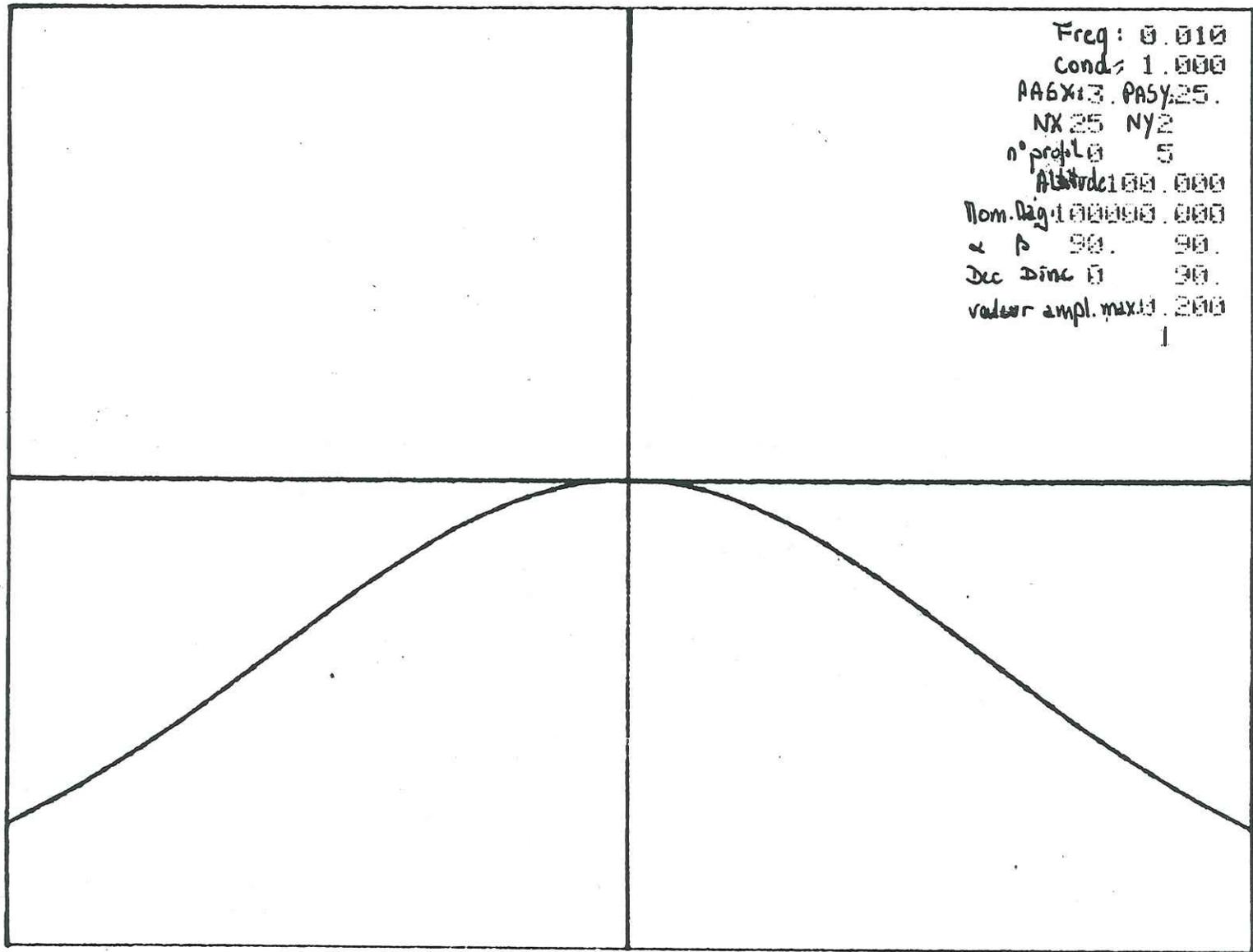


0.010
 1.000
 3. 25.
 25 2
 0 2
 100.000
 100000.000
 90. 90.
 0. 90.
 0.200
 1

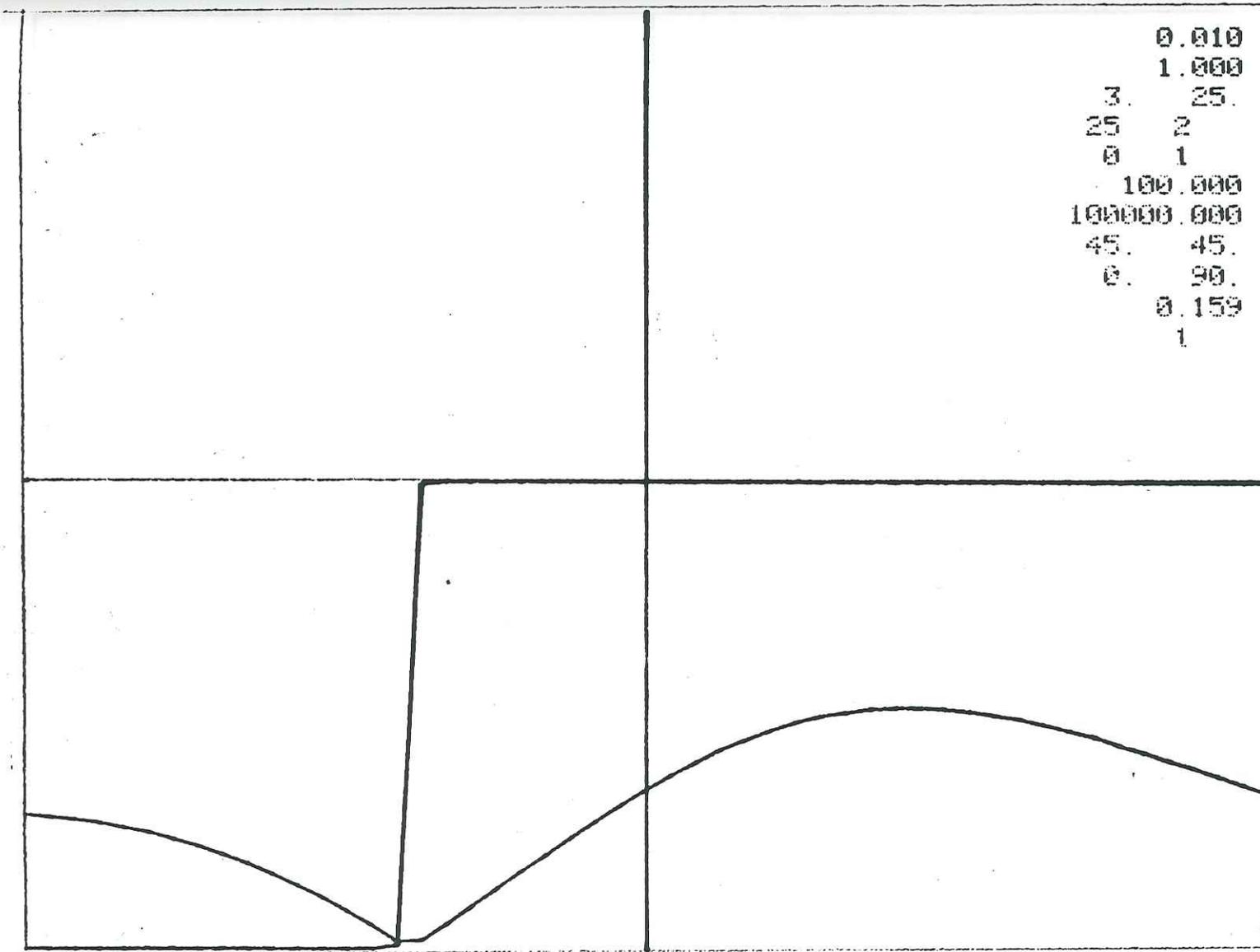




	0.010
	1.000
3.	25.
25	2
0	4
	100.000
100000.000	
90.	90.
0.	90.
	0.200
	1

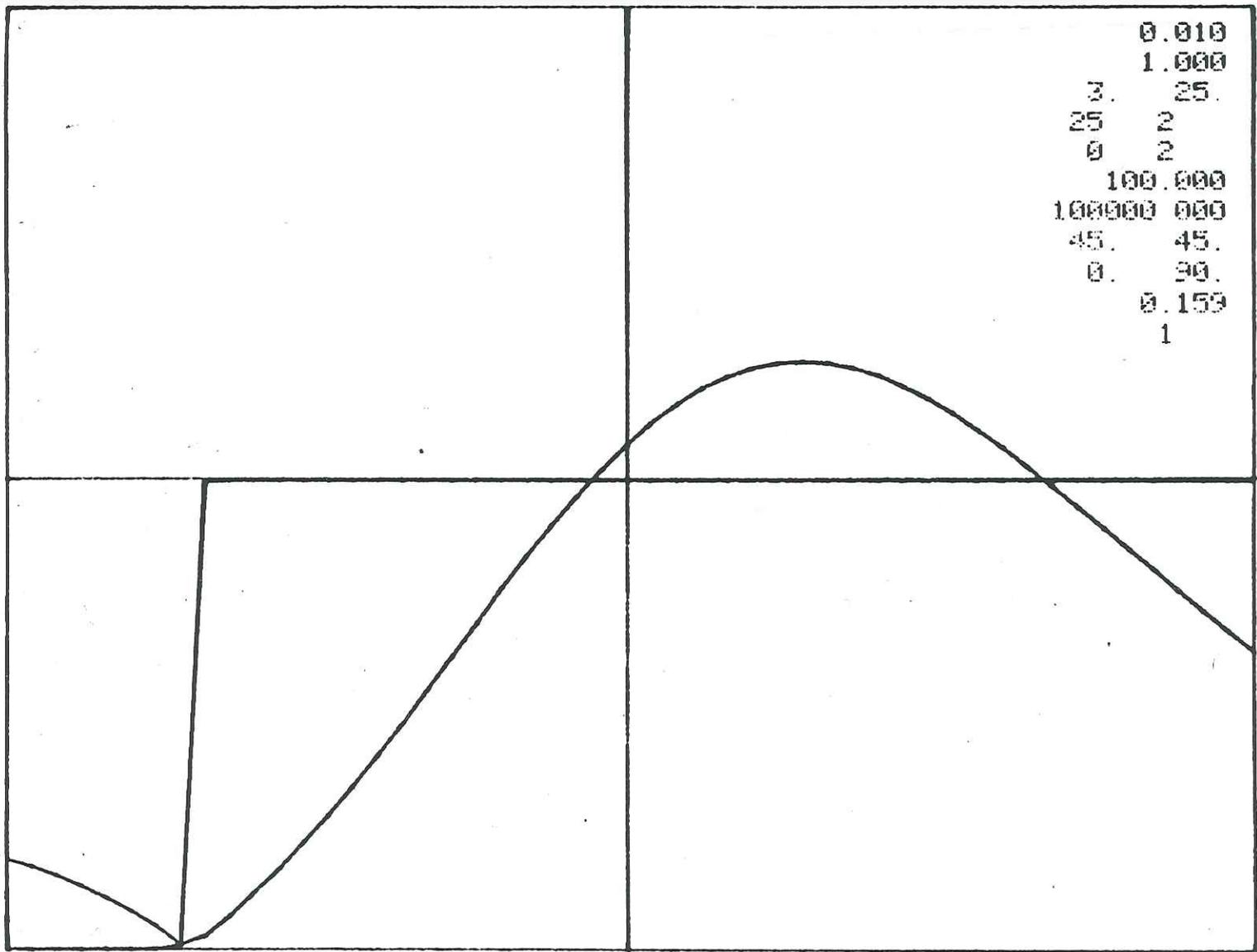


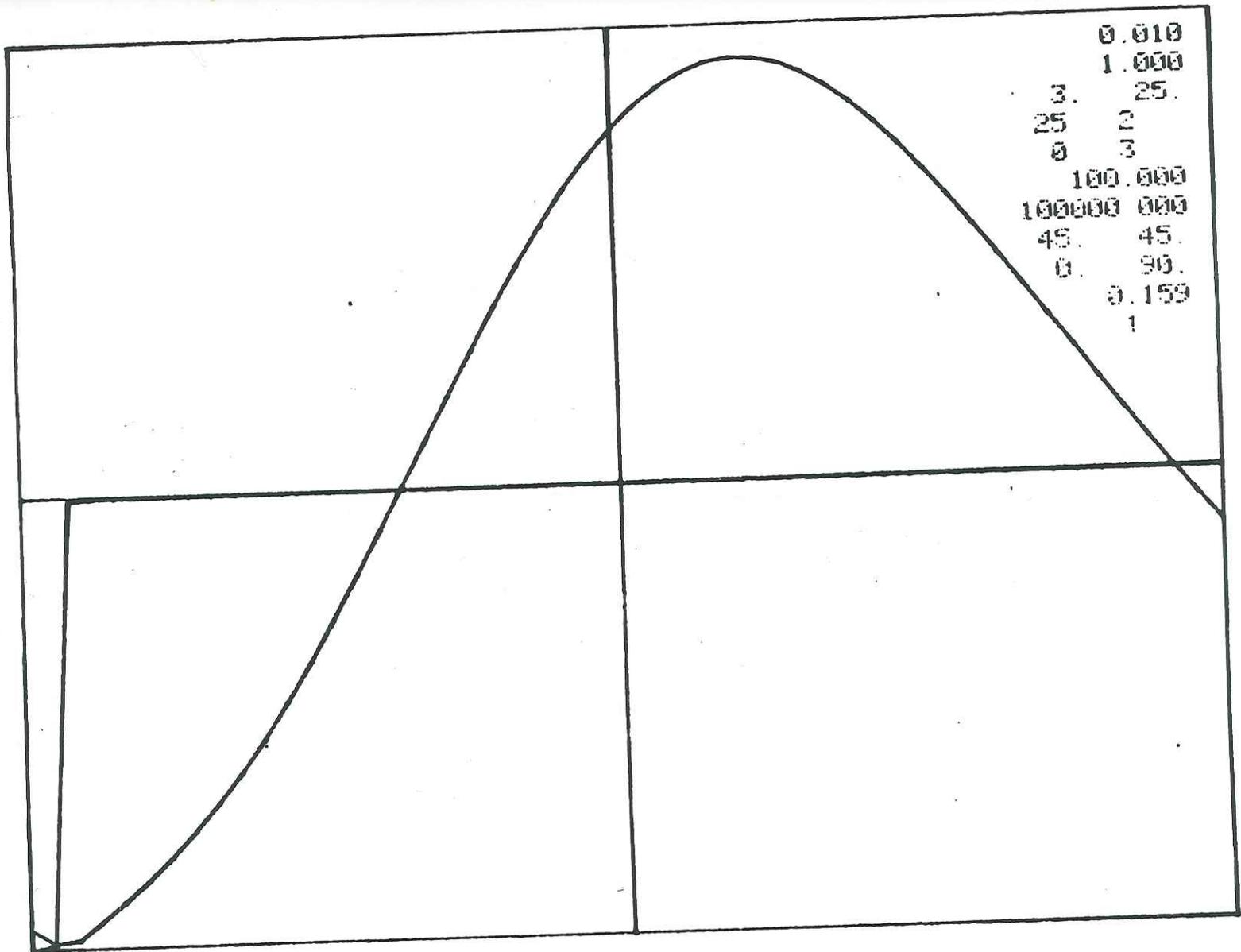
Freq: 0.010
Cond: 1.000
AA6X13. PA5Y25.
NX 25 NY 2
n° prof: 5
Alt: 100.000
Nom. Dig: 100000.000
α β 90. 90.
Dec Dinc 0 90.
valeur ampl. max: 200
1

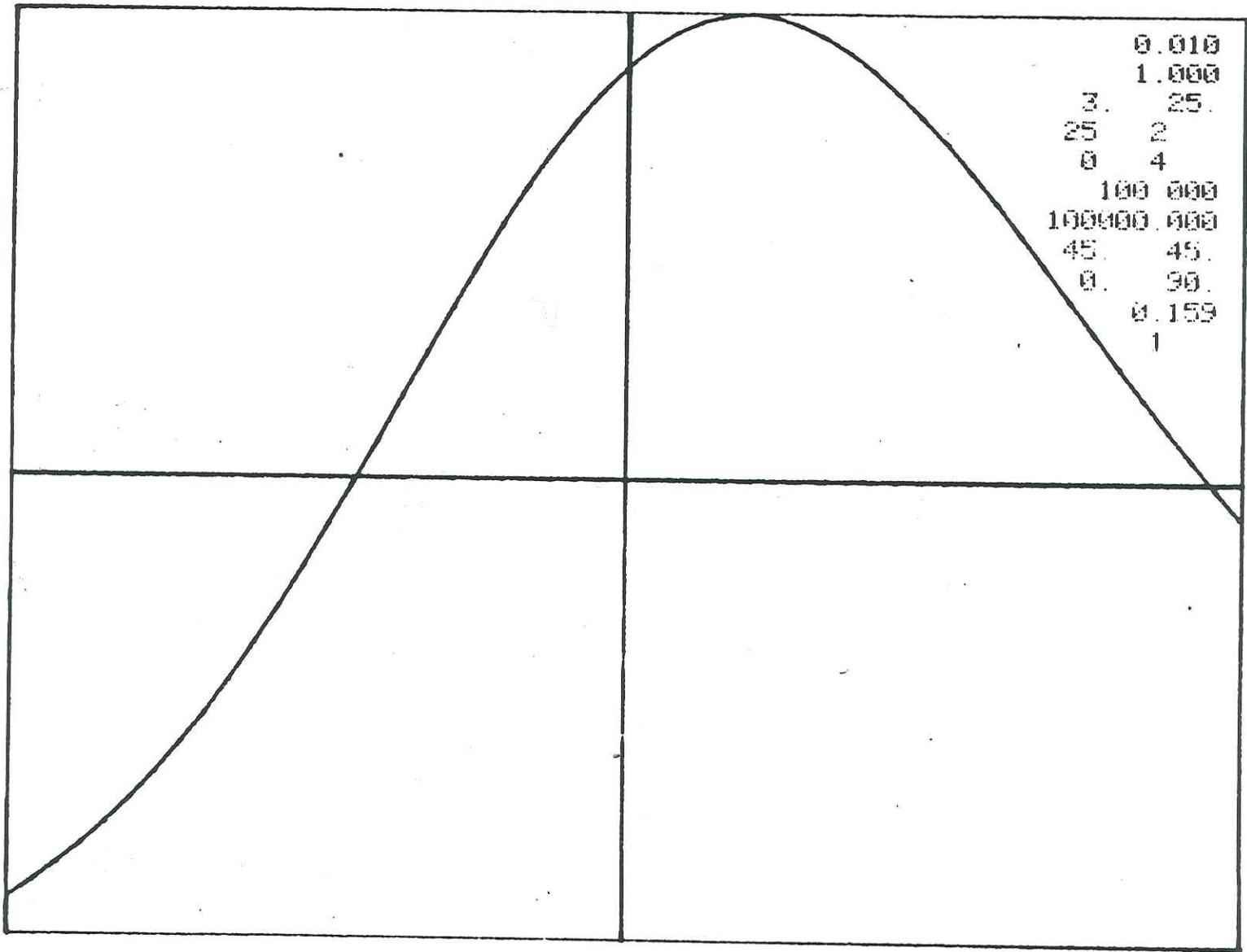


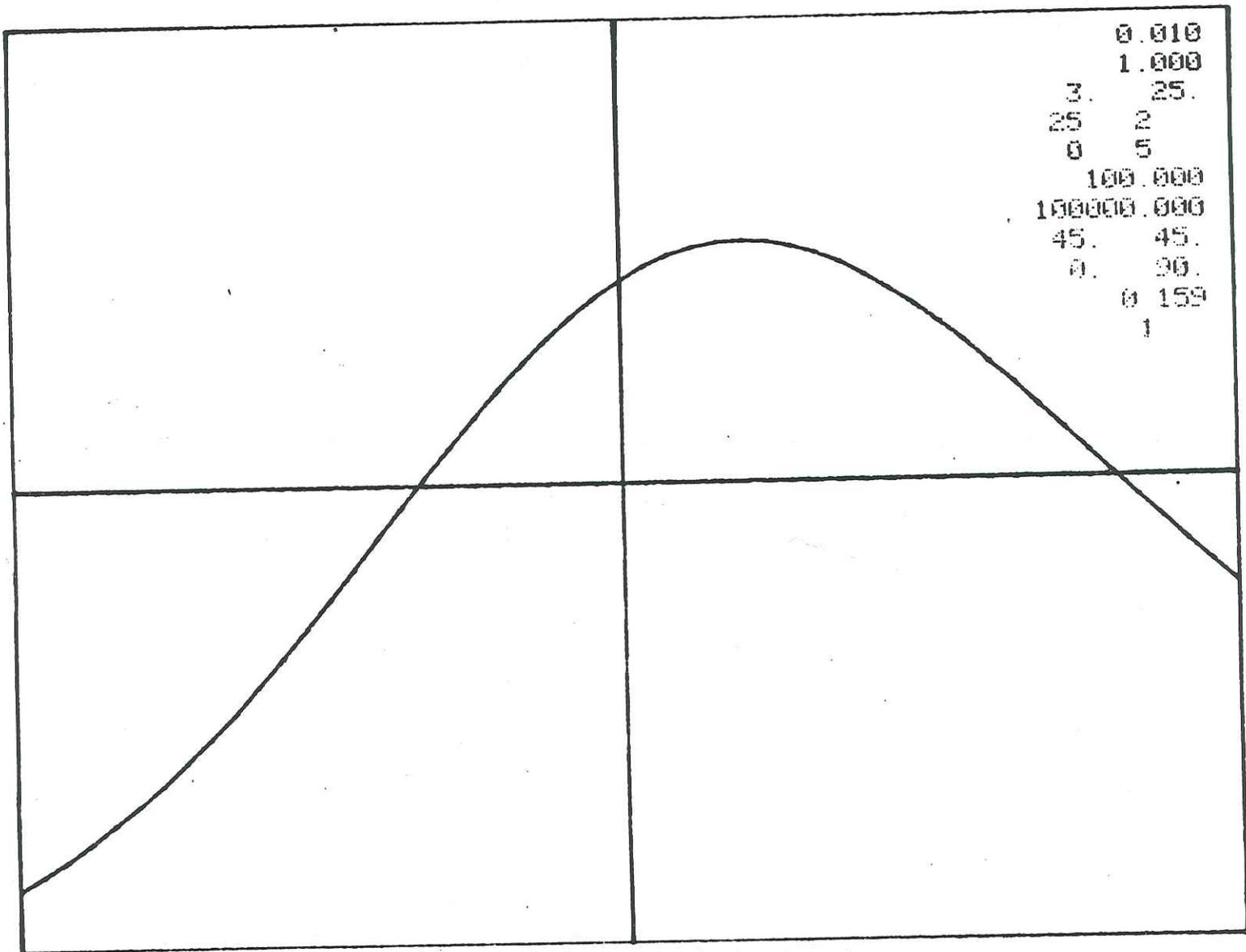
DÍPOLE INCLINÉ

$F = 0,01 \text{ Hz}$

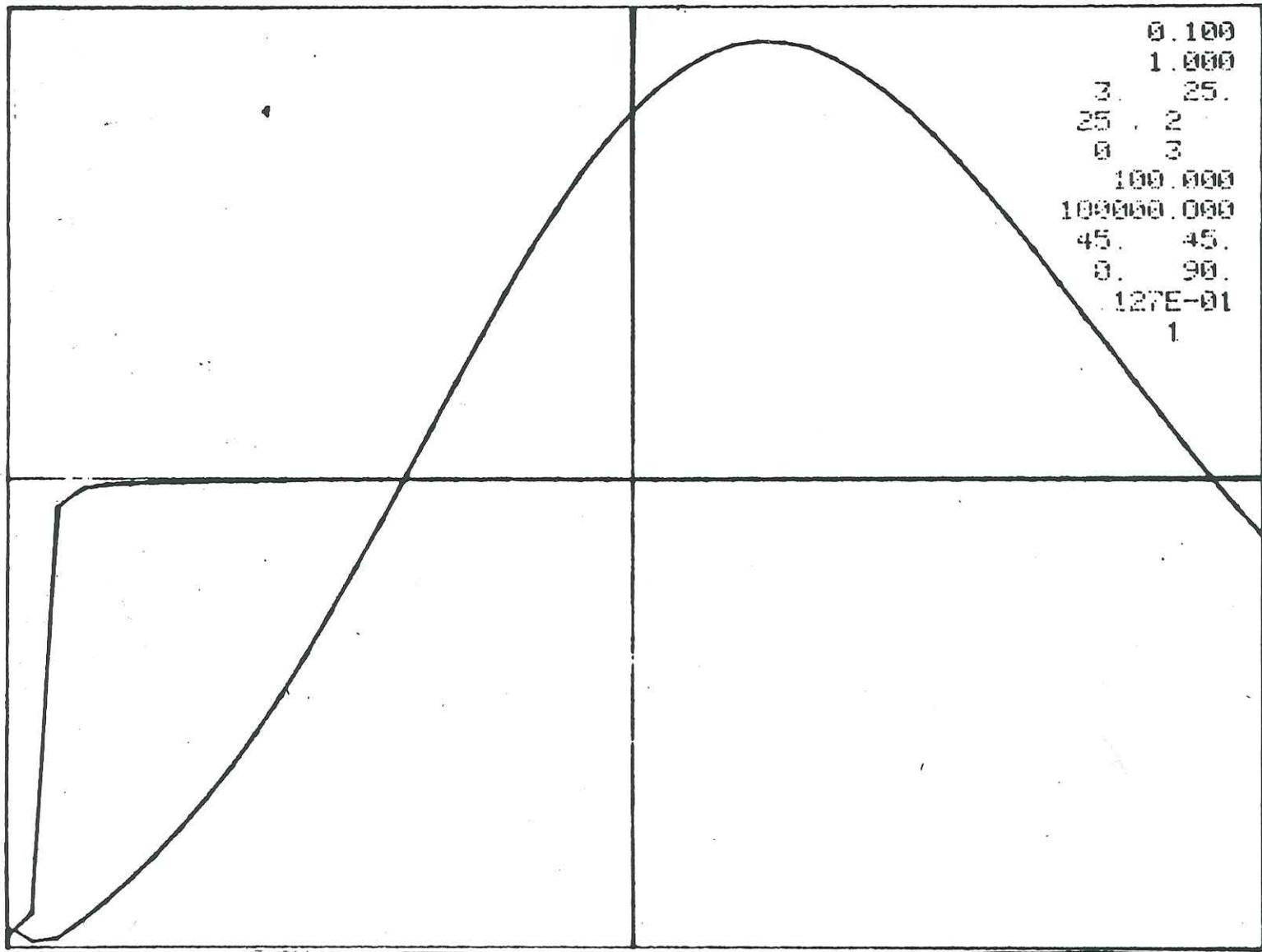




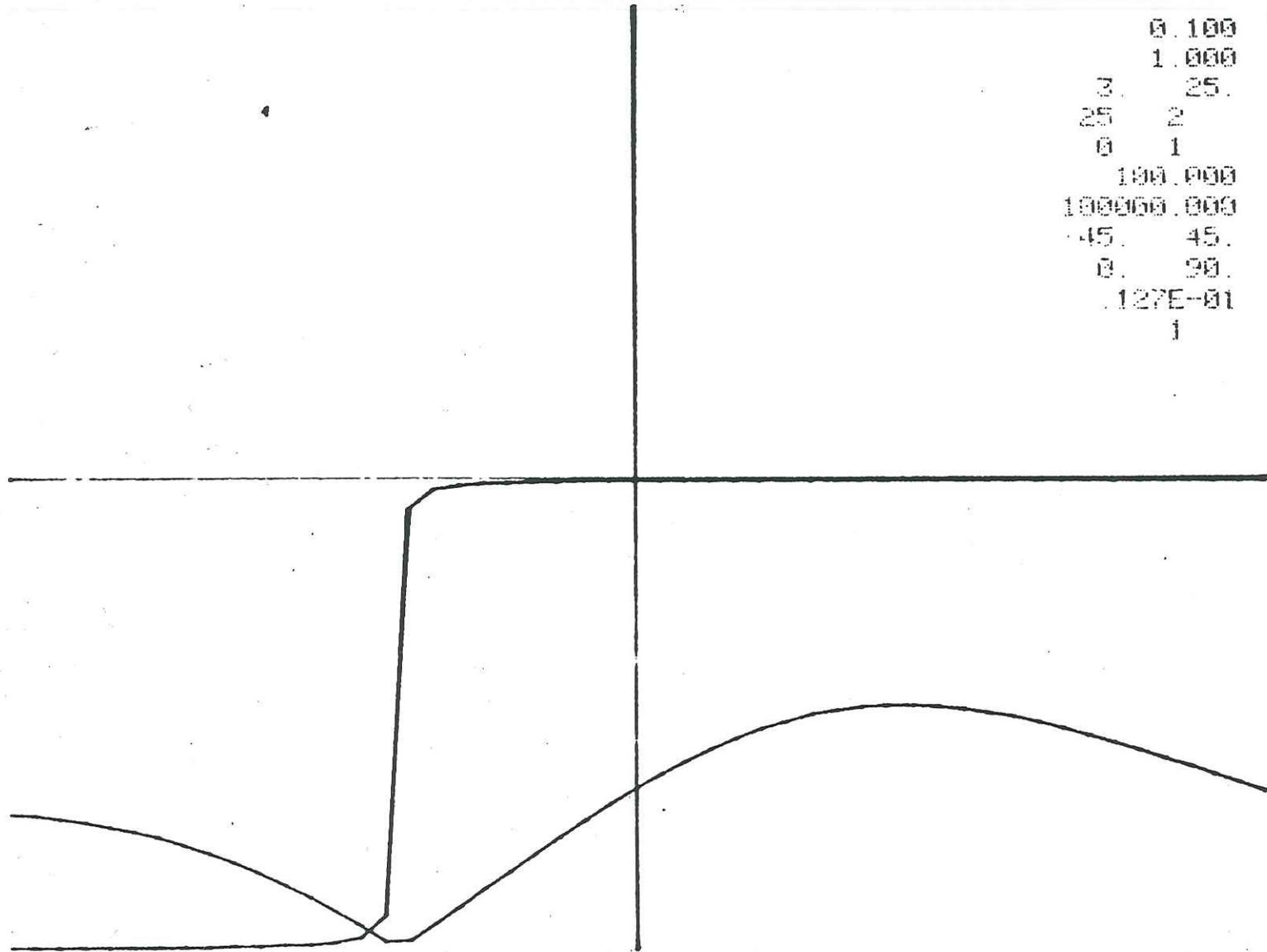




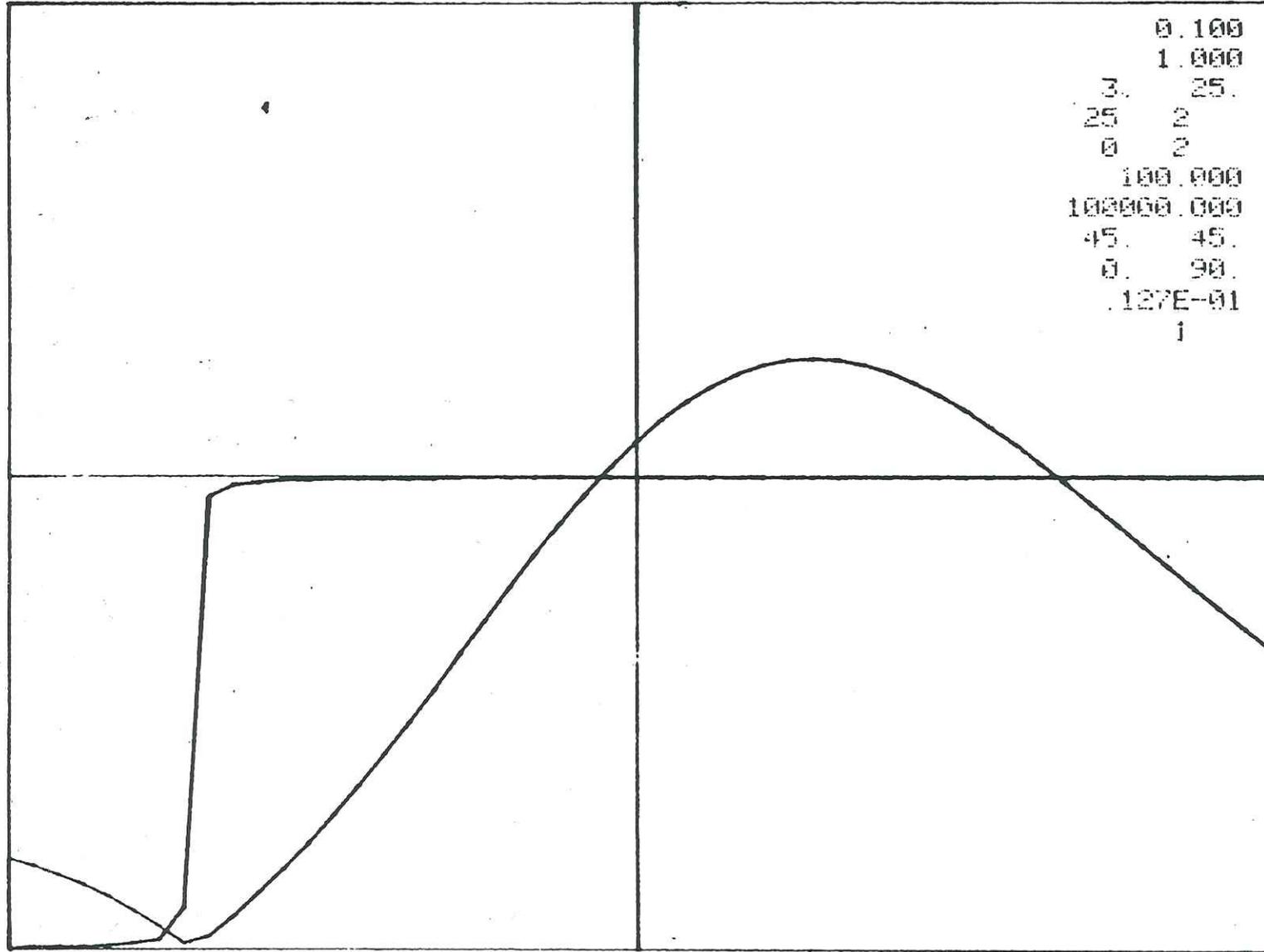
0.010
 1.000
 3. 25.
 25 2
 0 5
 100.000
 100000.000
 45. 45.
 0. 90.
 0 159
 1

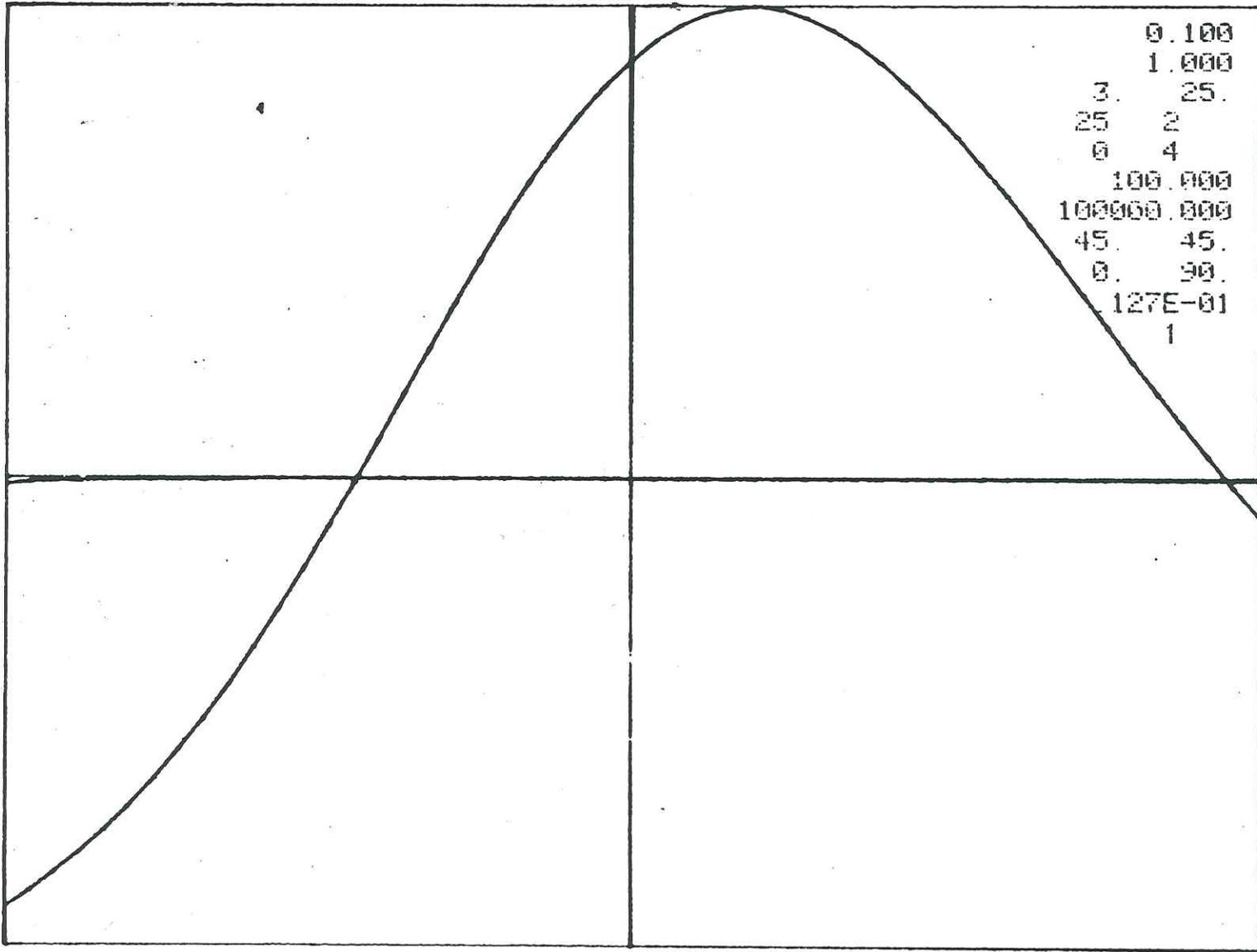


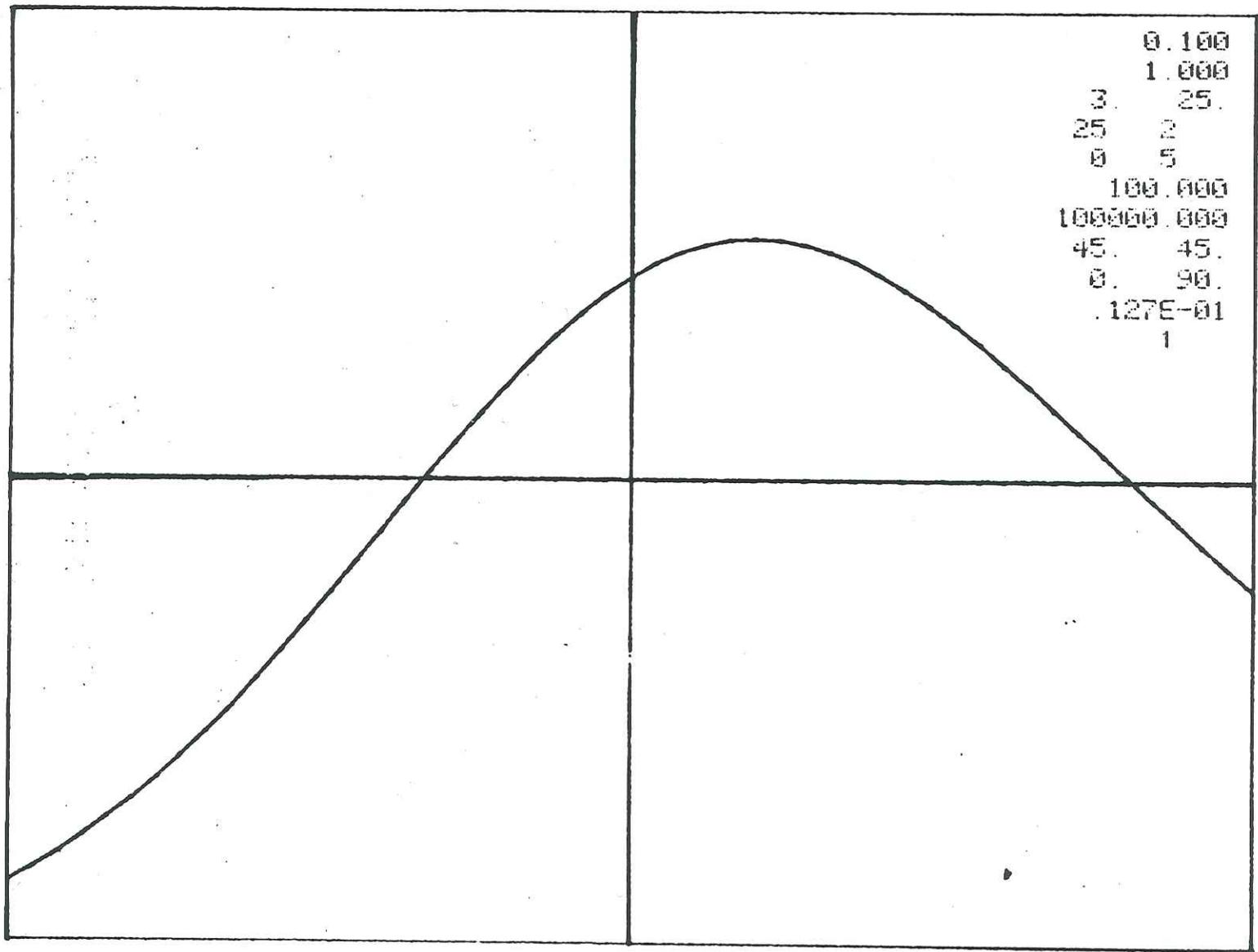
Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle incliné. FREQUENCE 0.1Hz



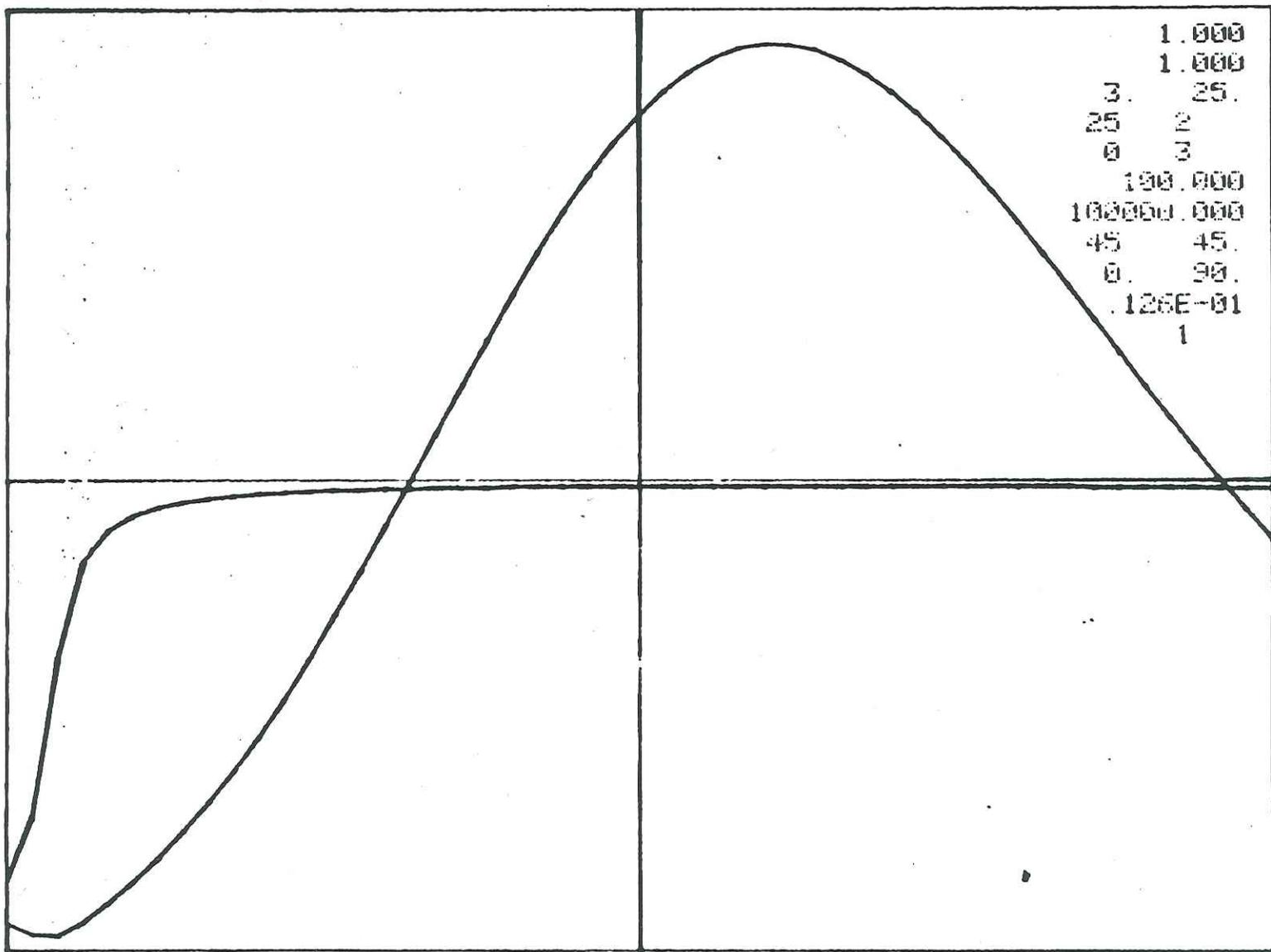
0.100
1.000
3. 25.
25. 2
0 1
100.000
100000.000
45. 45.
0. 90.
.127E-01
1



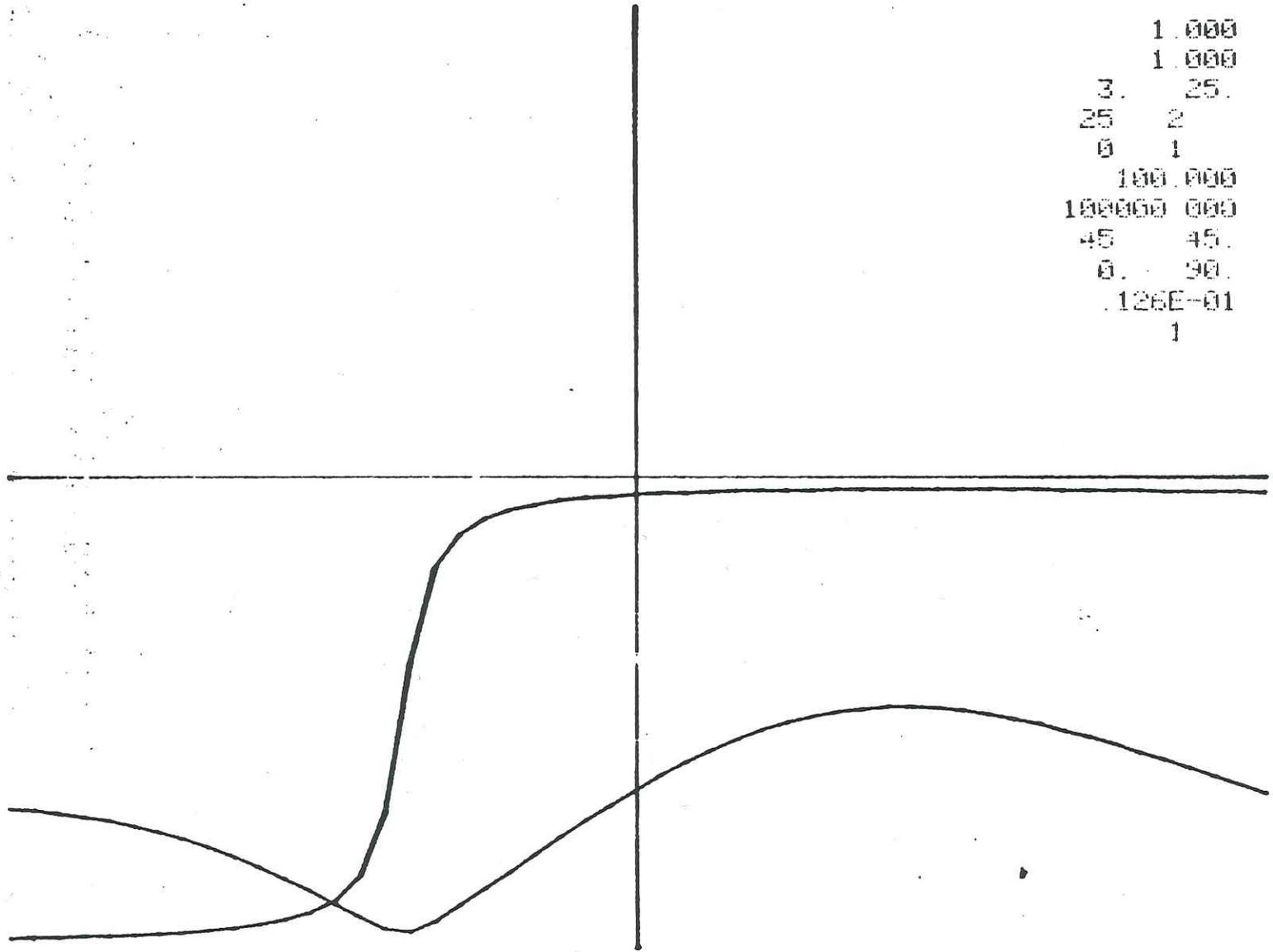




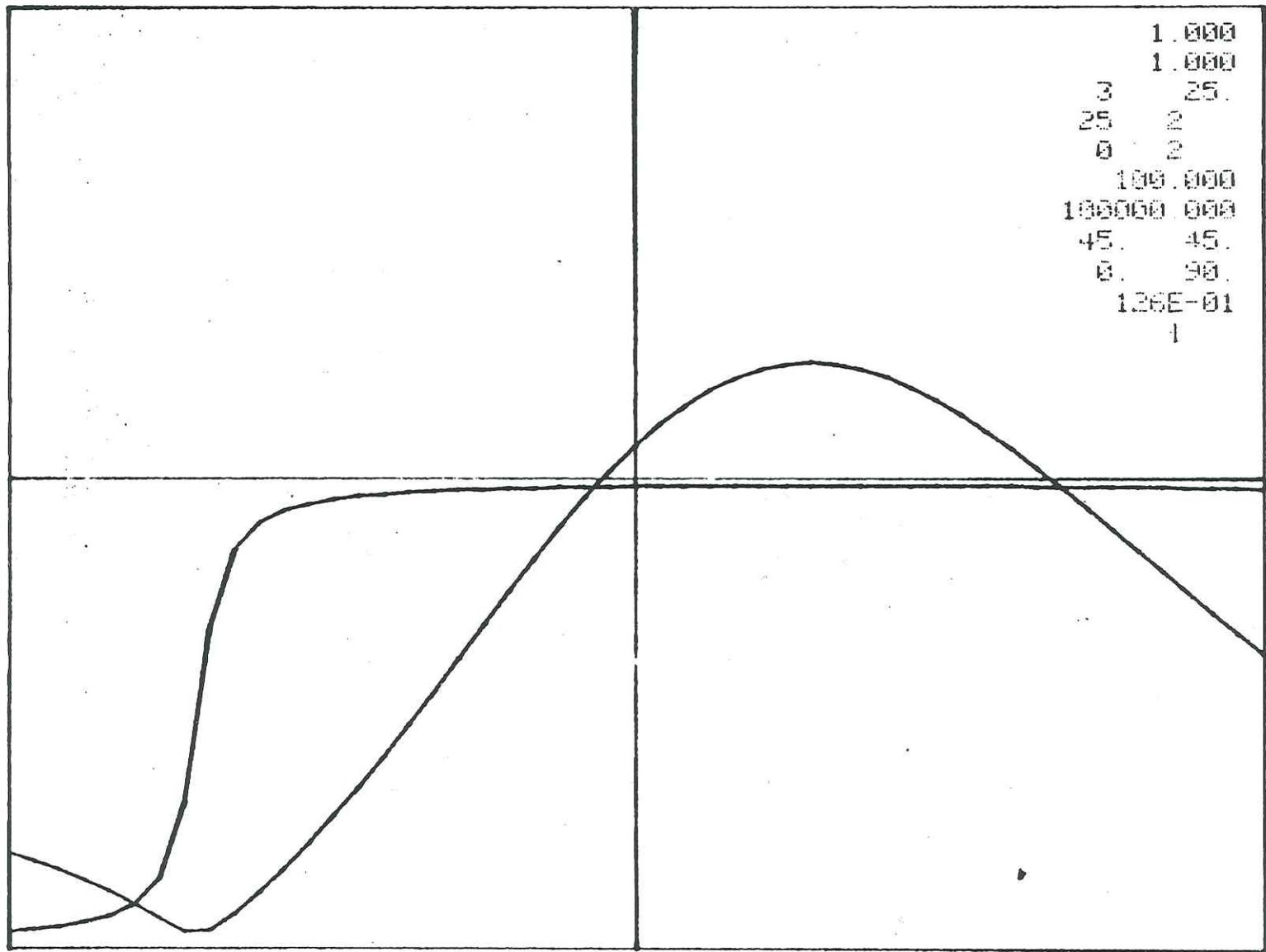
0.100
 1.000
 3. 25.
 25 2
 0 5
 100.000
 100000.000
 45. 45.
 0. 90.
 .127E-01
 1

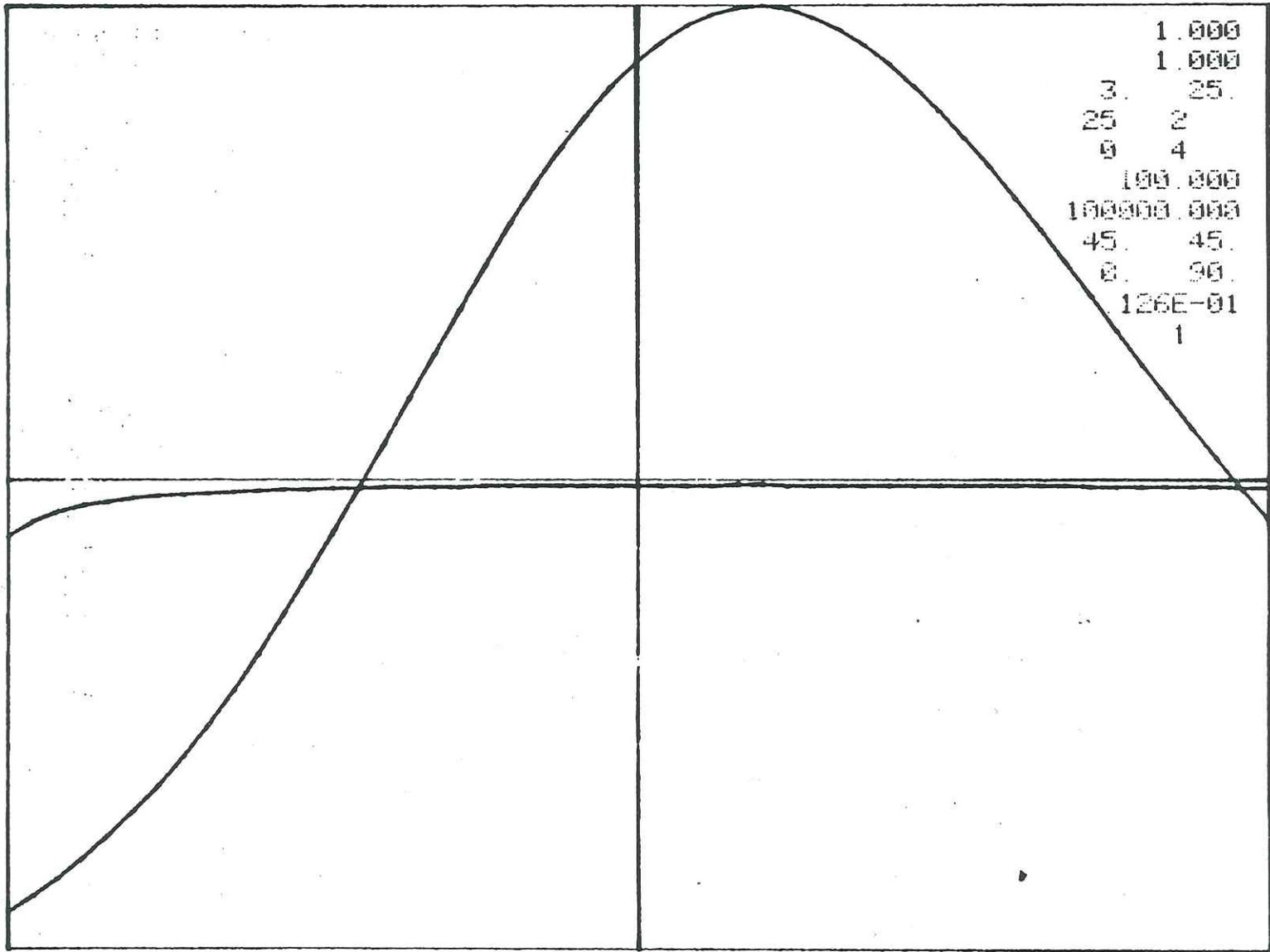


Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle incliné. FREQUENCE 1Hz

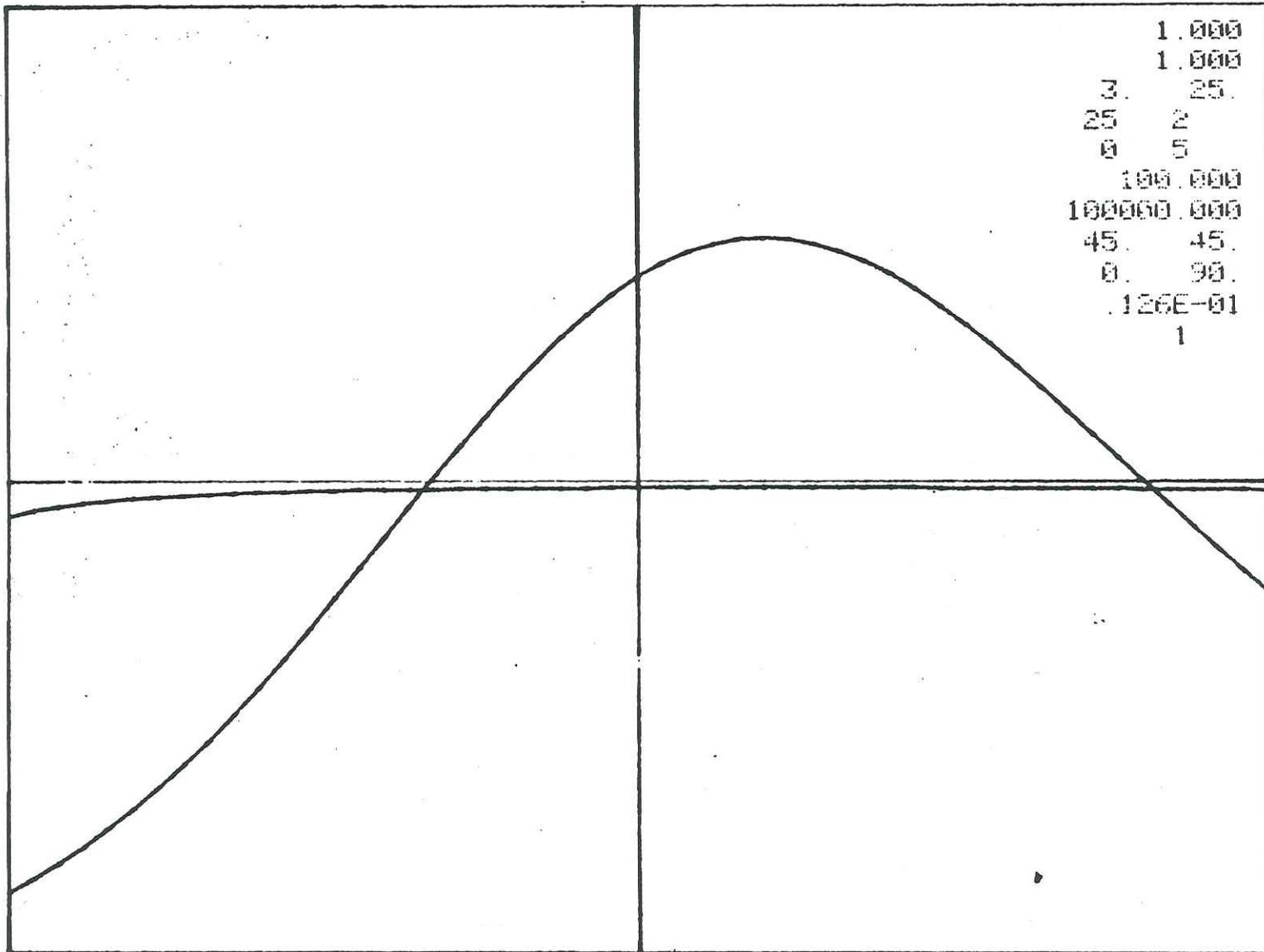


1.000
 1.000
 3. 25.
 25 2
 0 1
 100.000
 100000 000
 45 45.
 0. 90.
 .126E-01
 1

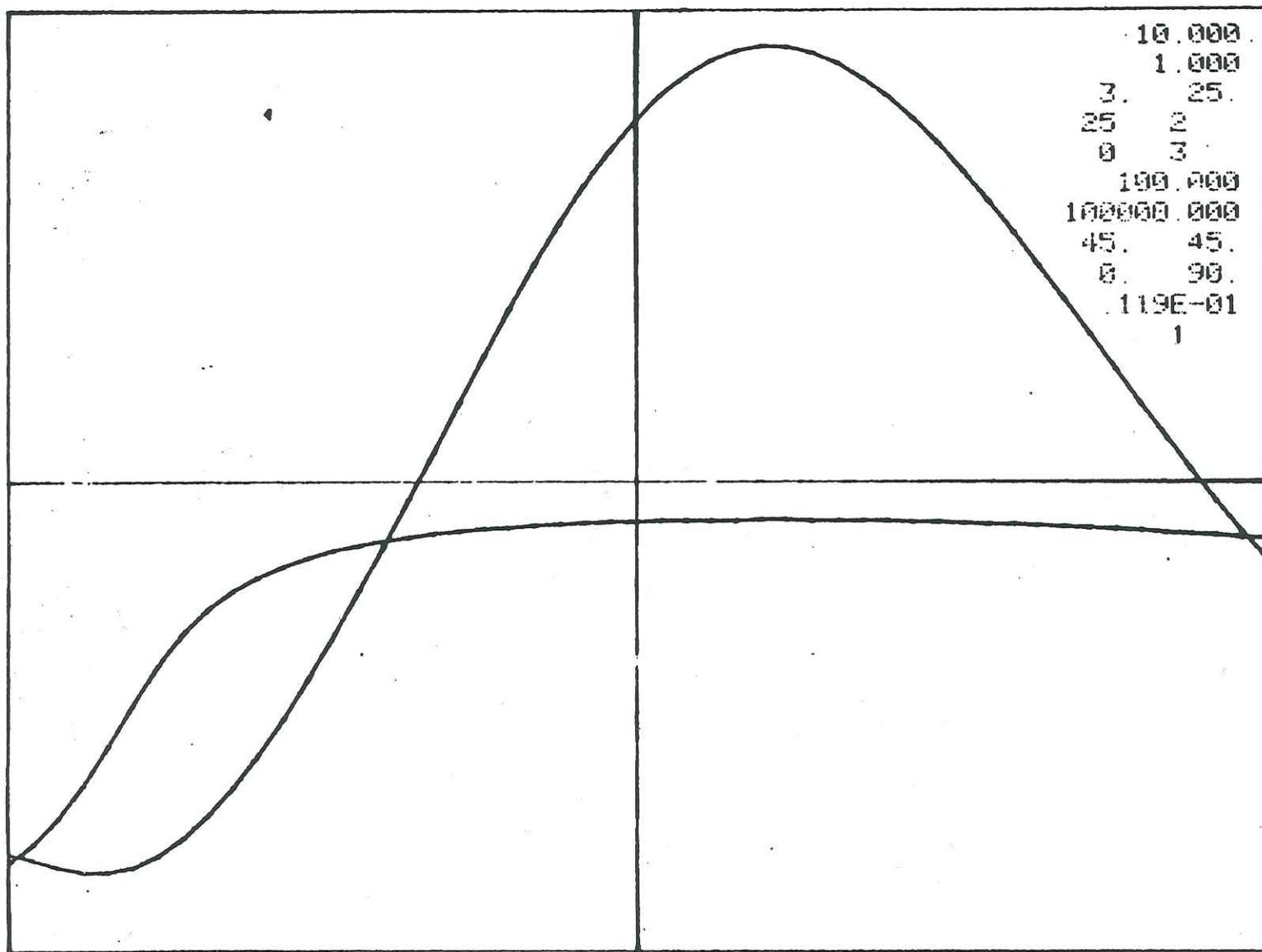




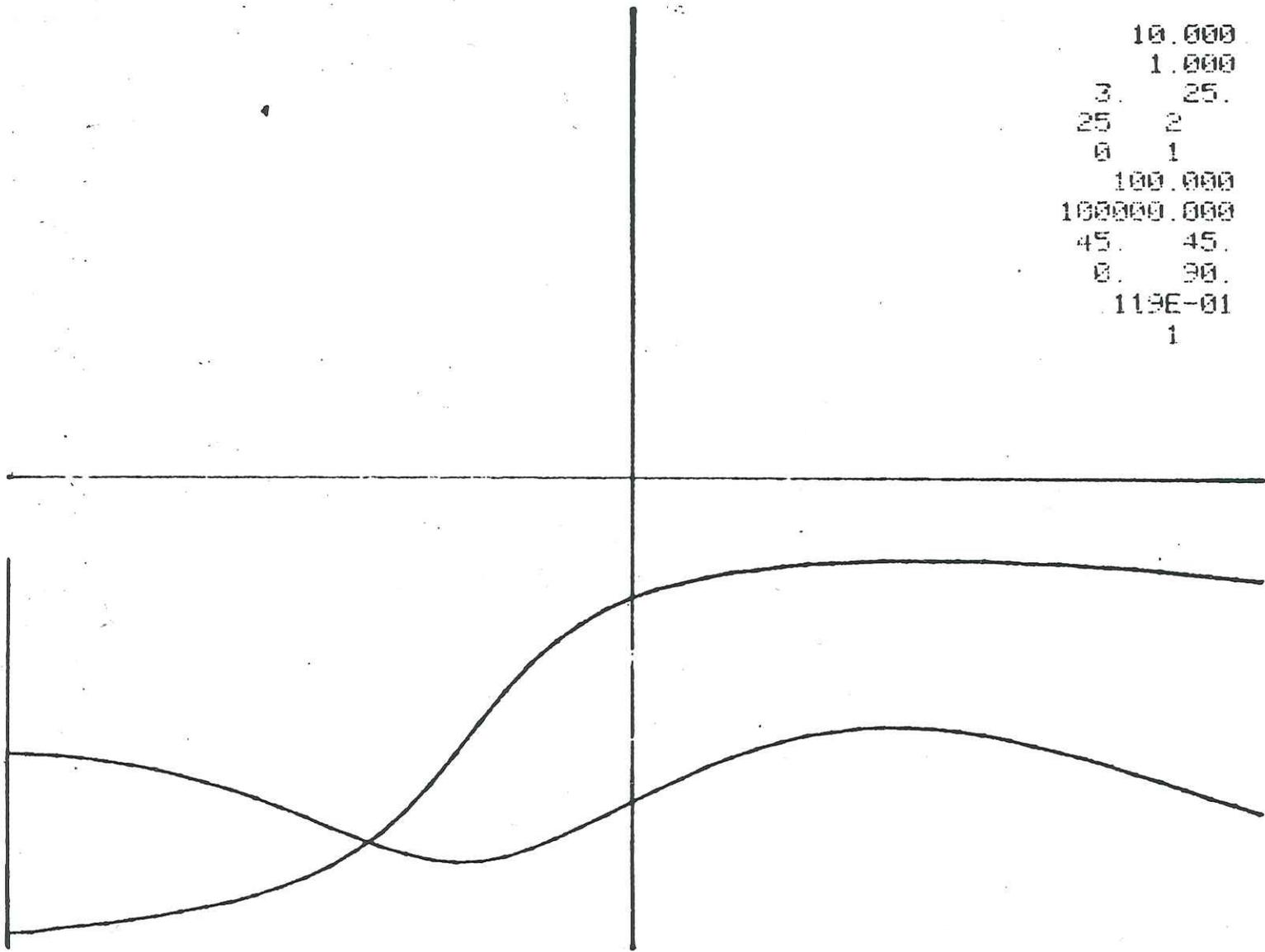
1.000
 1.000
 3. 25.
 25. 2
 0 4
 100.000
 100000.000
 45. 45.
 0. 90.
 126E-01
 1



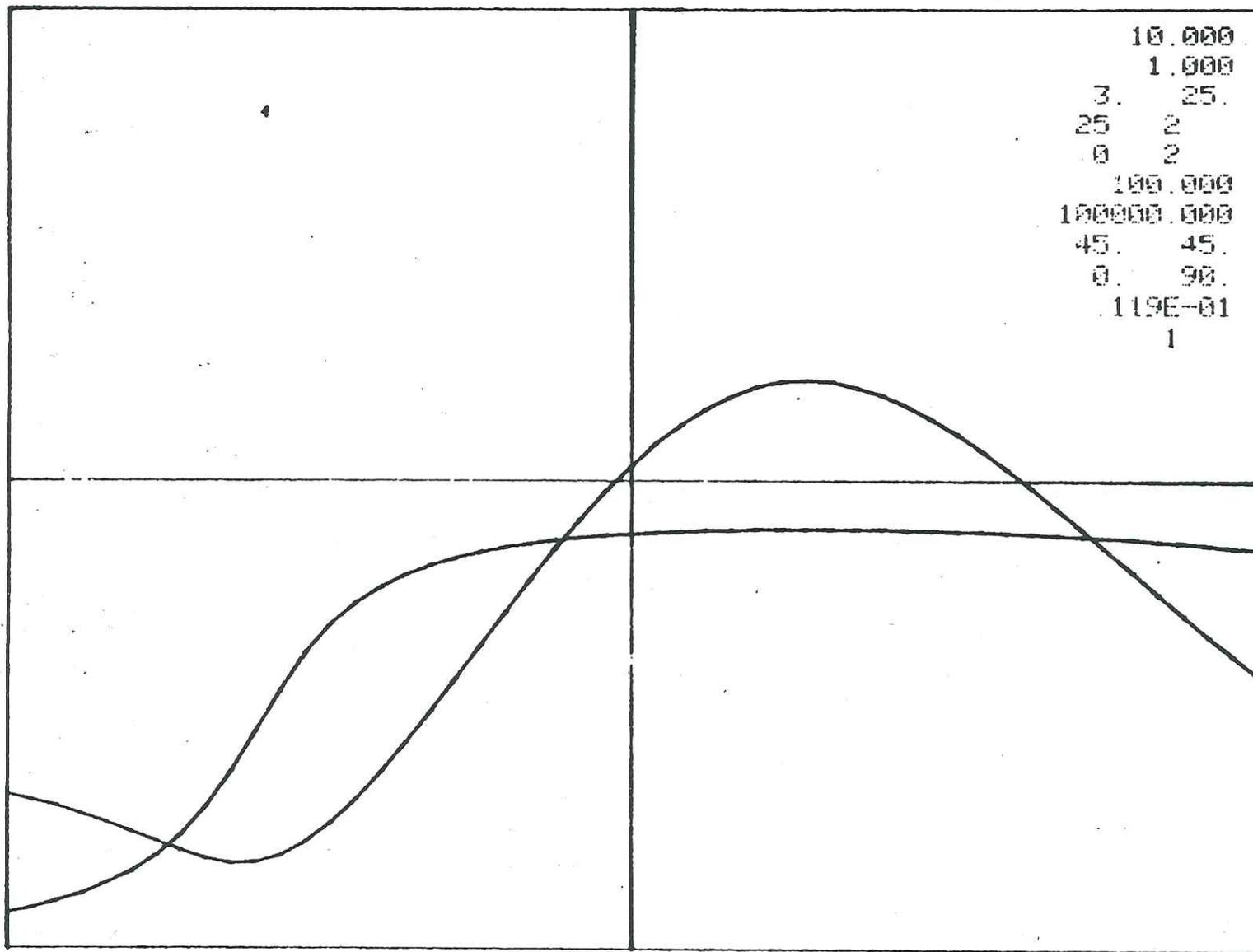
1.000
 1.000
 3. 25.
 25. 2
 0 5
 100.000
 100000.000
 45. 45.
 0. 90.
 .126E-01
 1

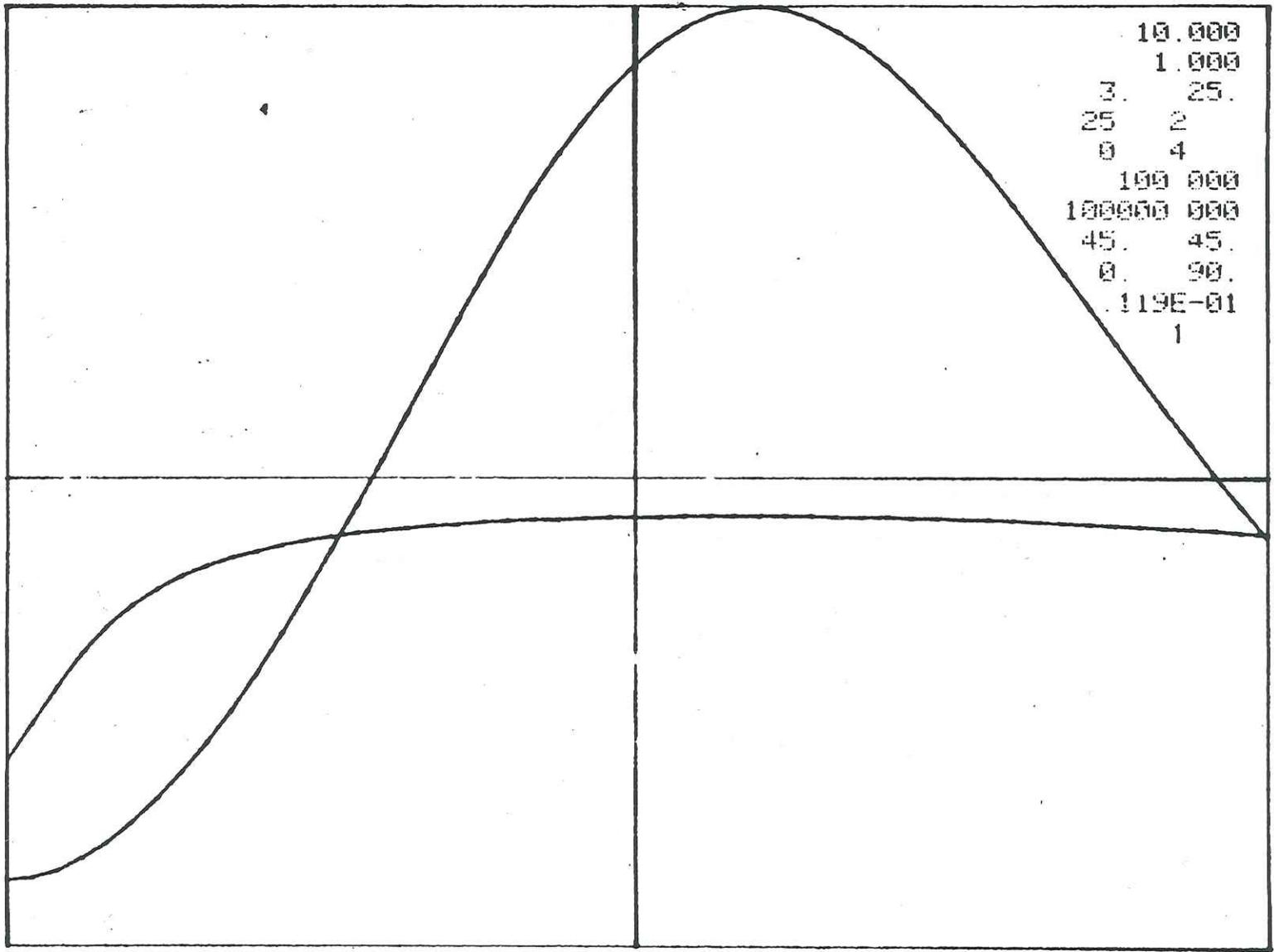


Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle incliné. FREQUENCE 10 Hz

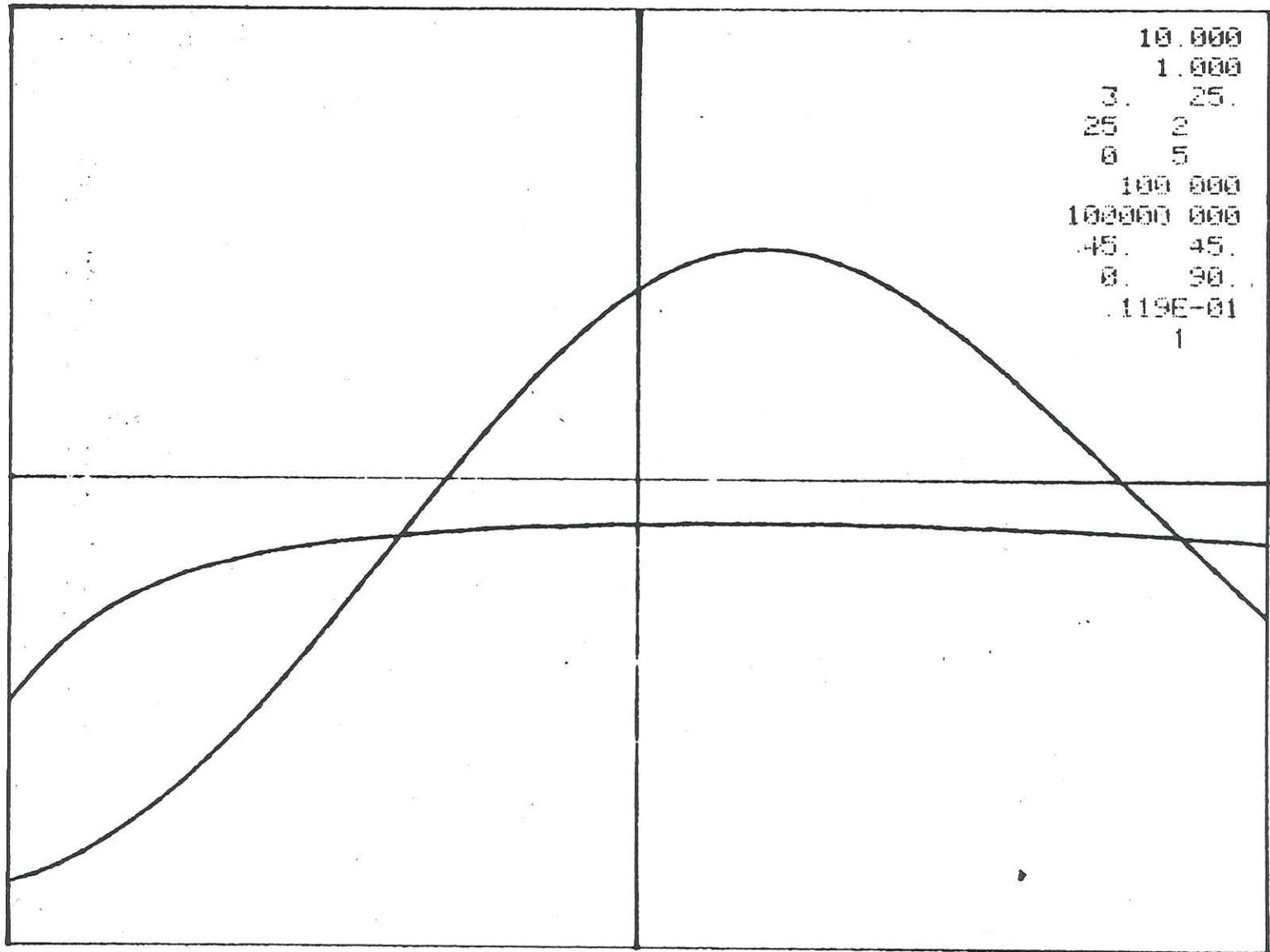


10.000
 1.000
 3. 25.
 25 2
 0 1
 100.000
 100000.000
 45. 45.
 0. 90.
 .119E-01
 1

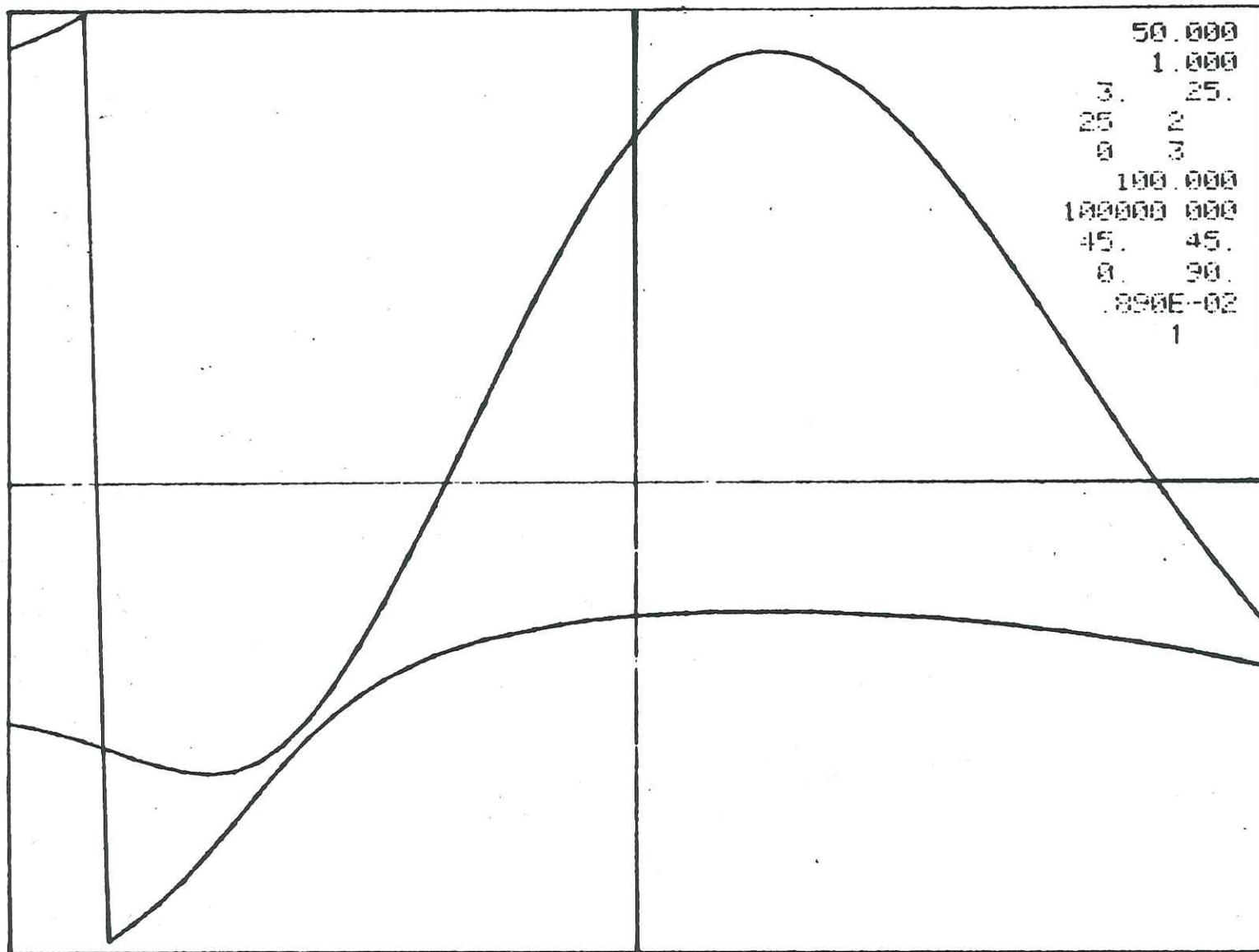




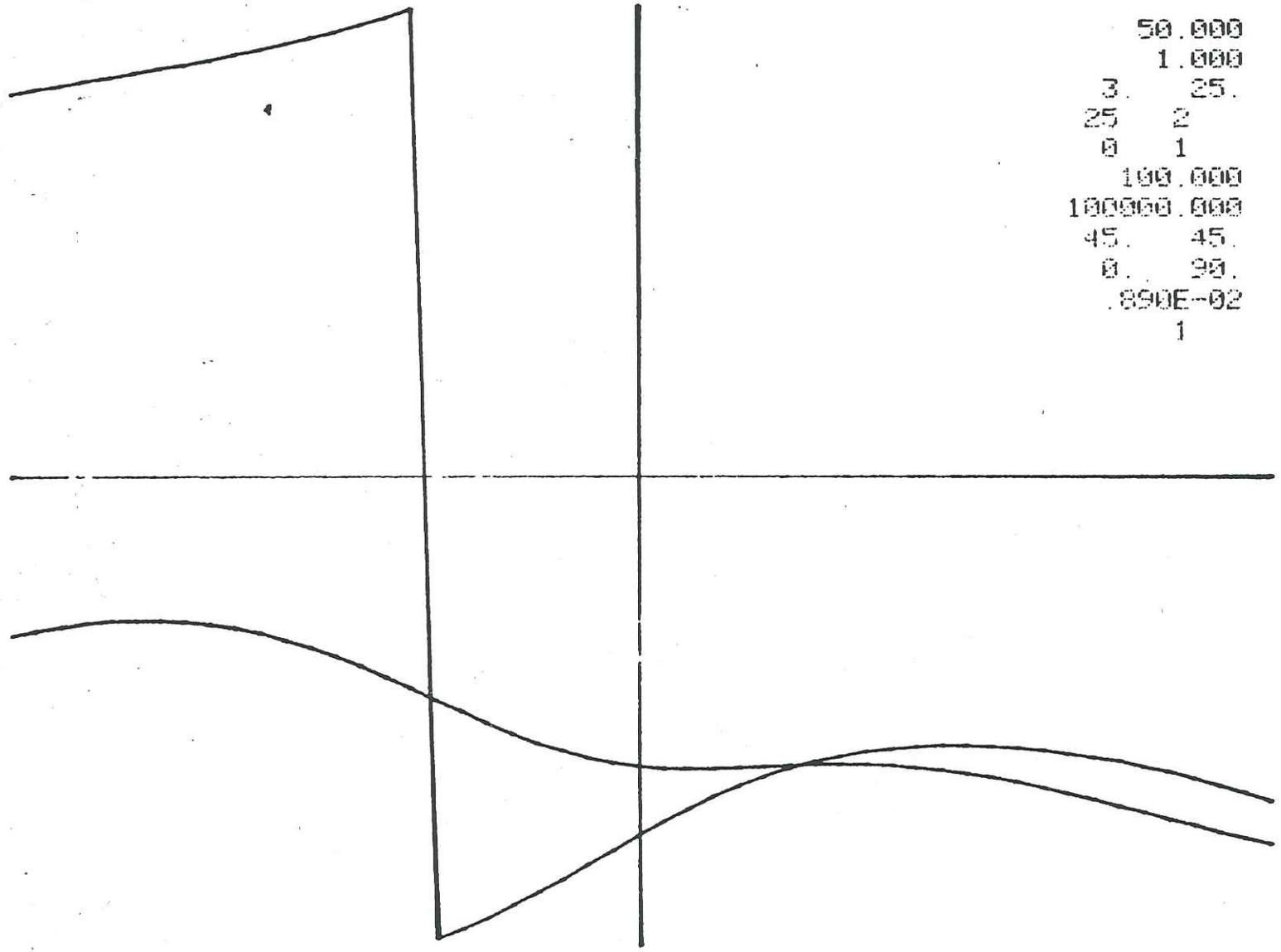
10.000
 1.000
 3. 25.
 25 2
 0 4
 100 000
 100000 000
 45. 45.
 0. 90.
 .119E-01
 1



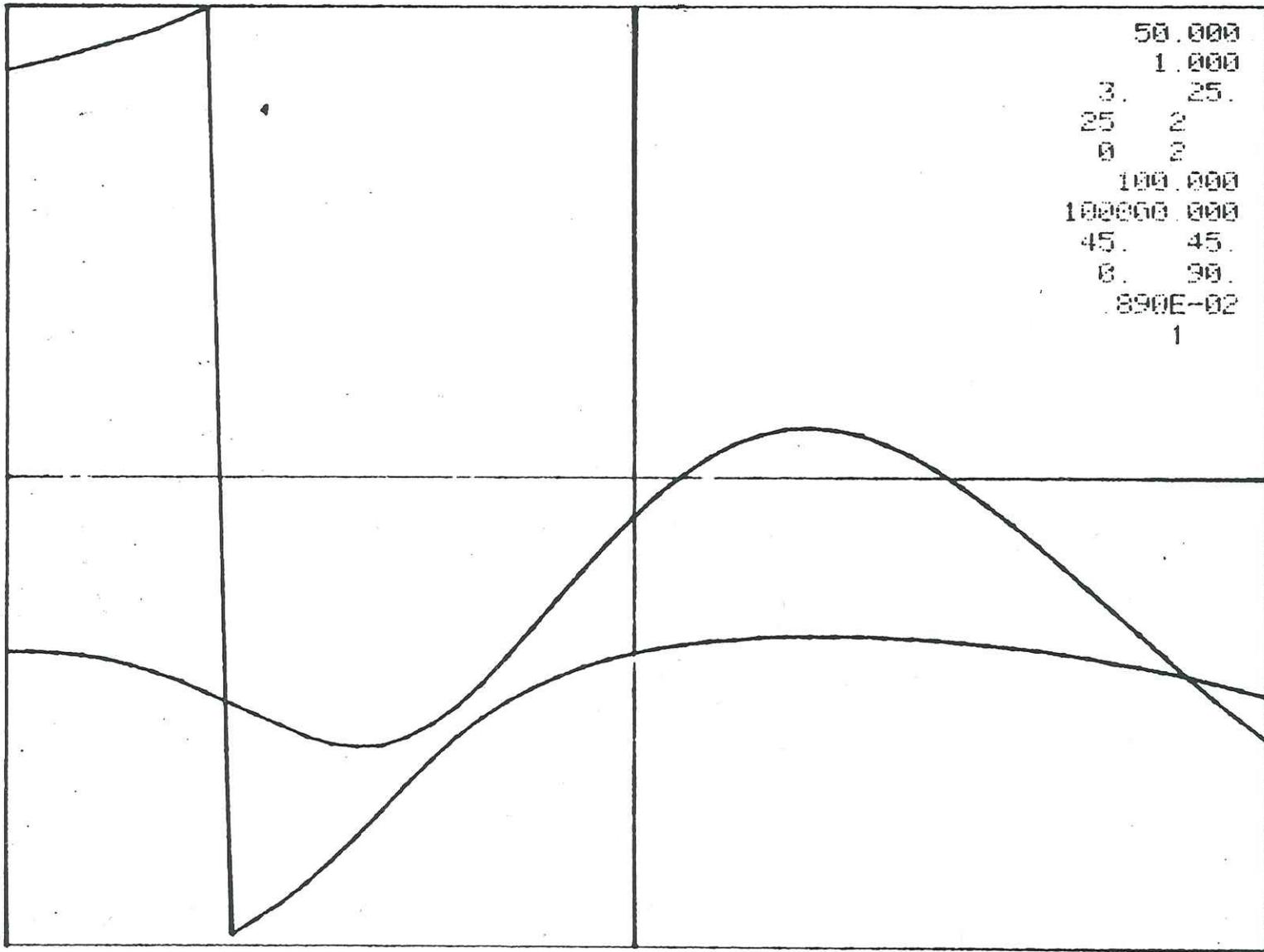
10.000
 1.000
 3. 25.
 25 2
 0 5
 100 000
 100000 000
 .45. 45.
 0. 90.
 .119E-01
 1

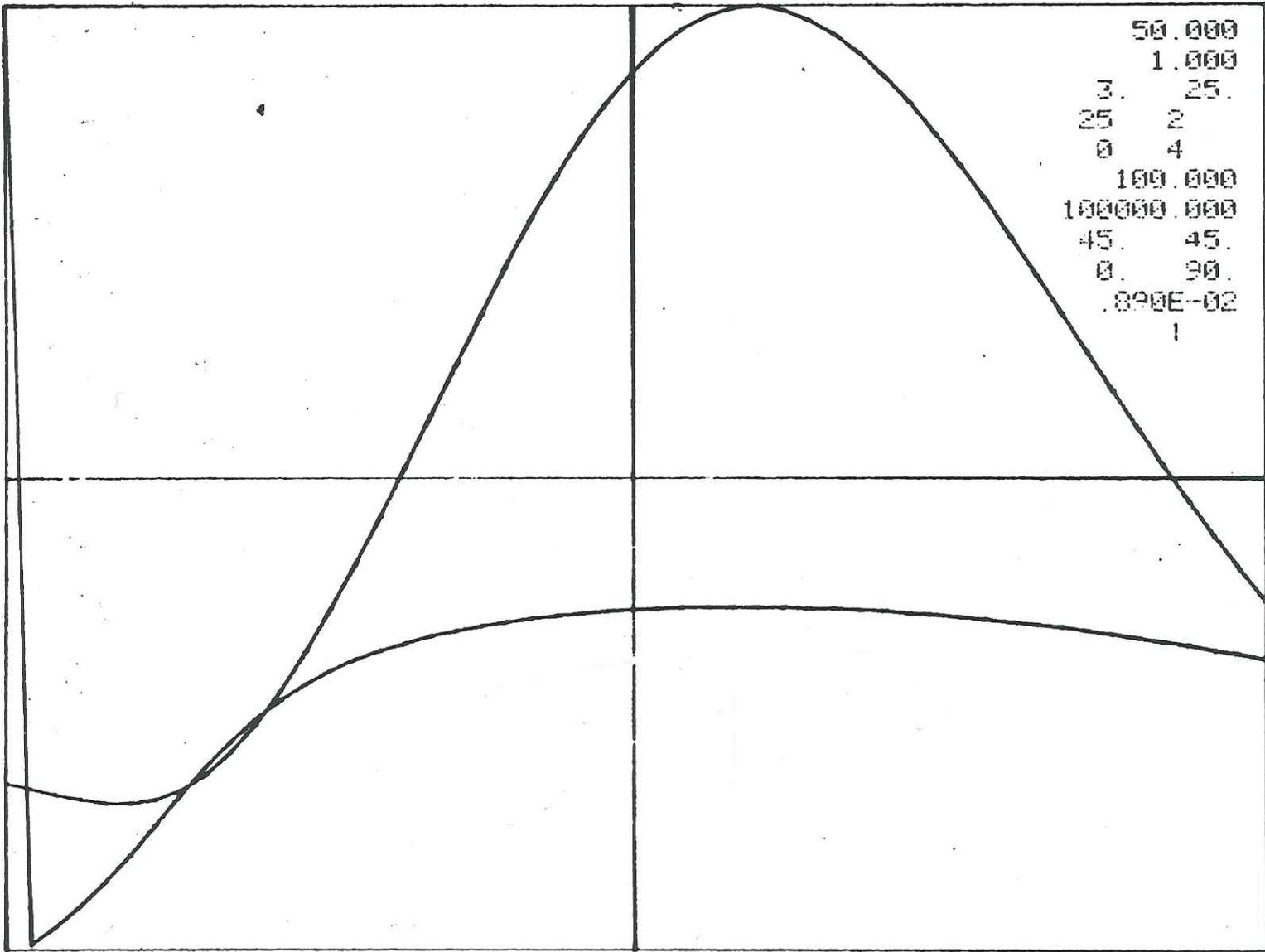


Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle incliné. FREQUENCE 50 Hz

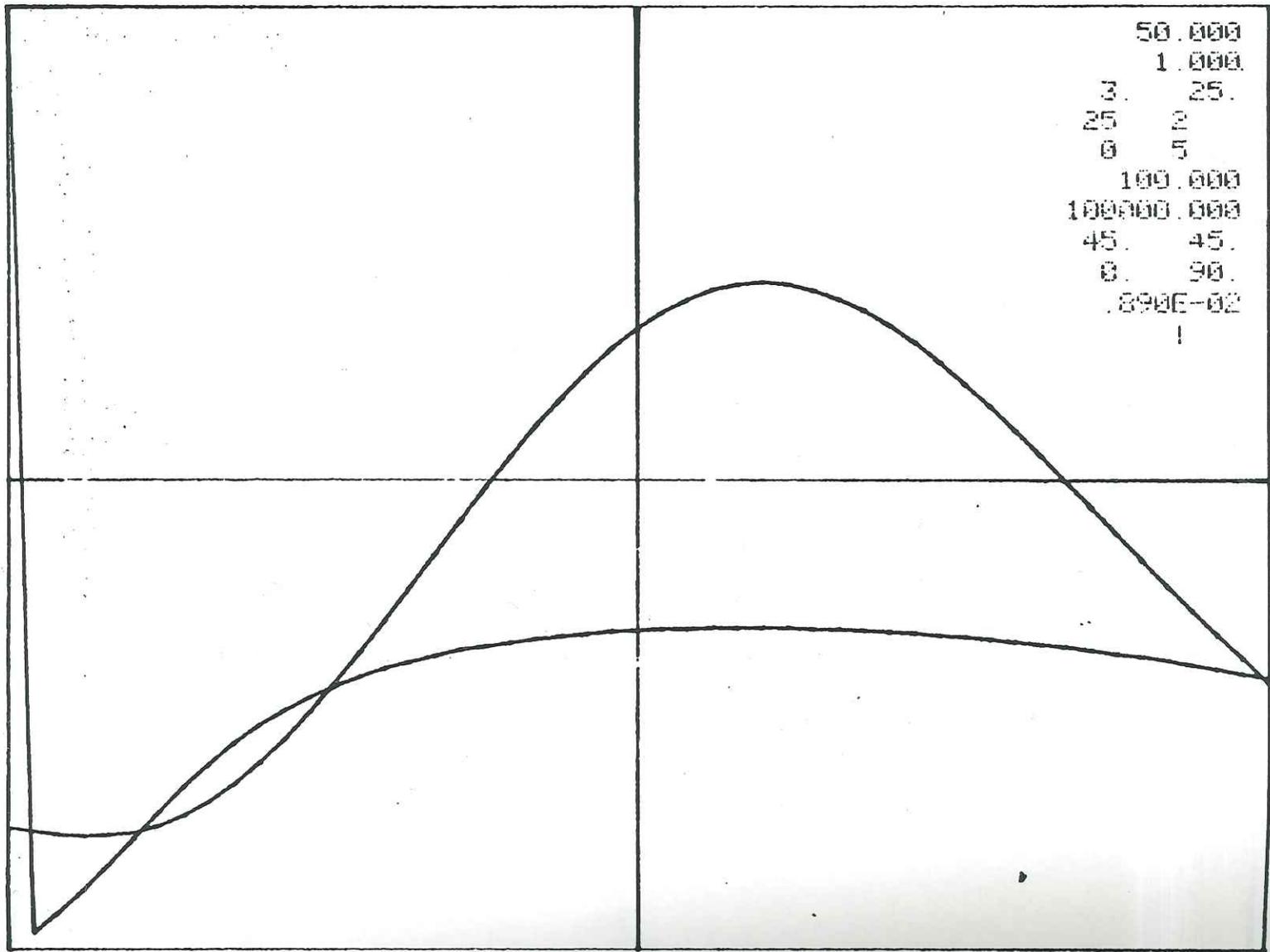


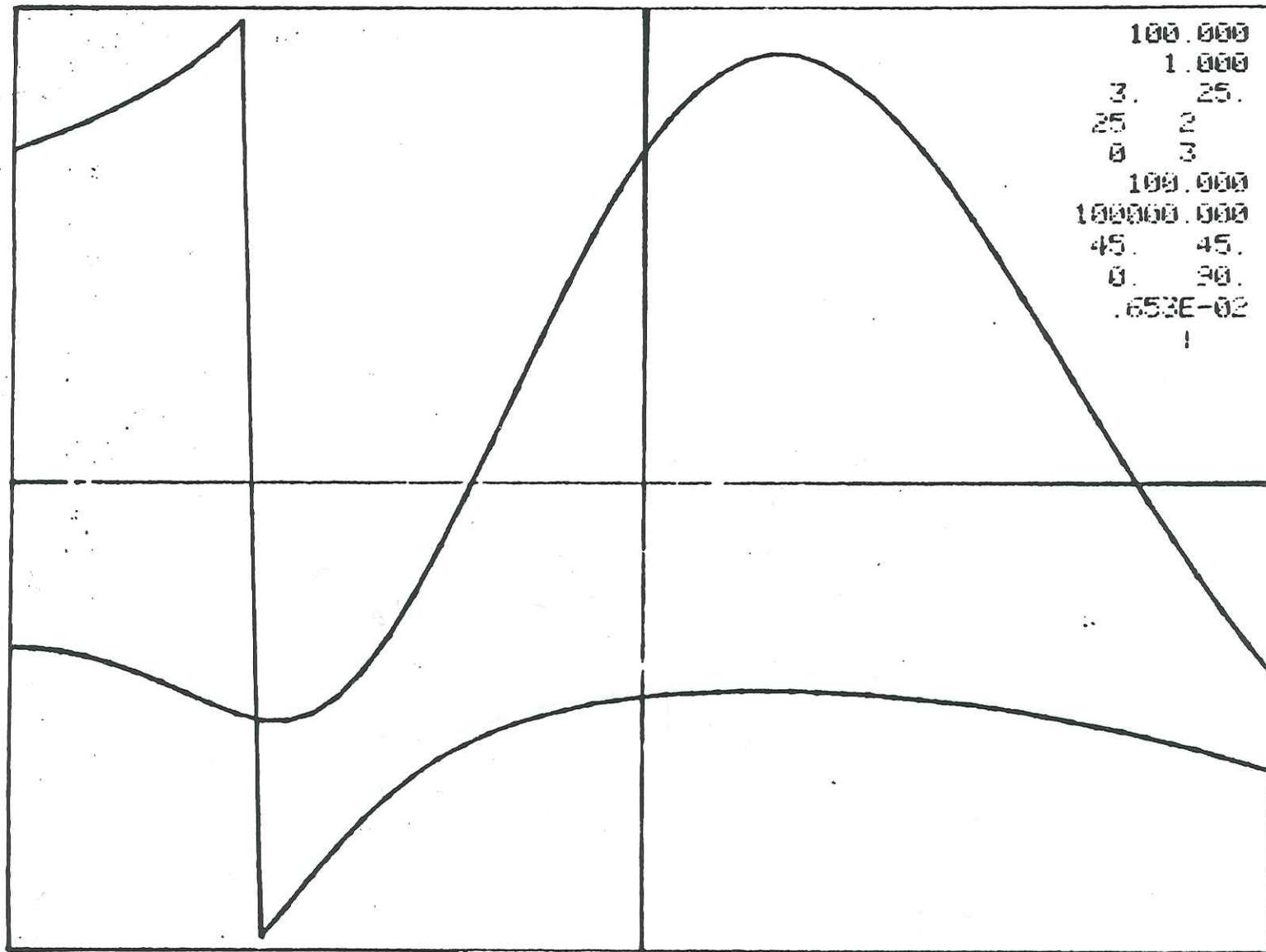
50.000
 1.000
 3. 25.
 25 2
 0 1
 100.000
 100000.000
 45. 45.
 0. 90.
 .890E-02
 1



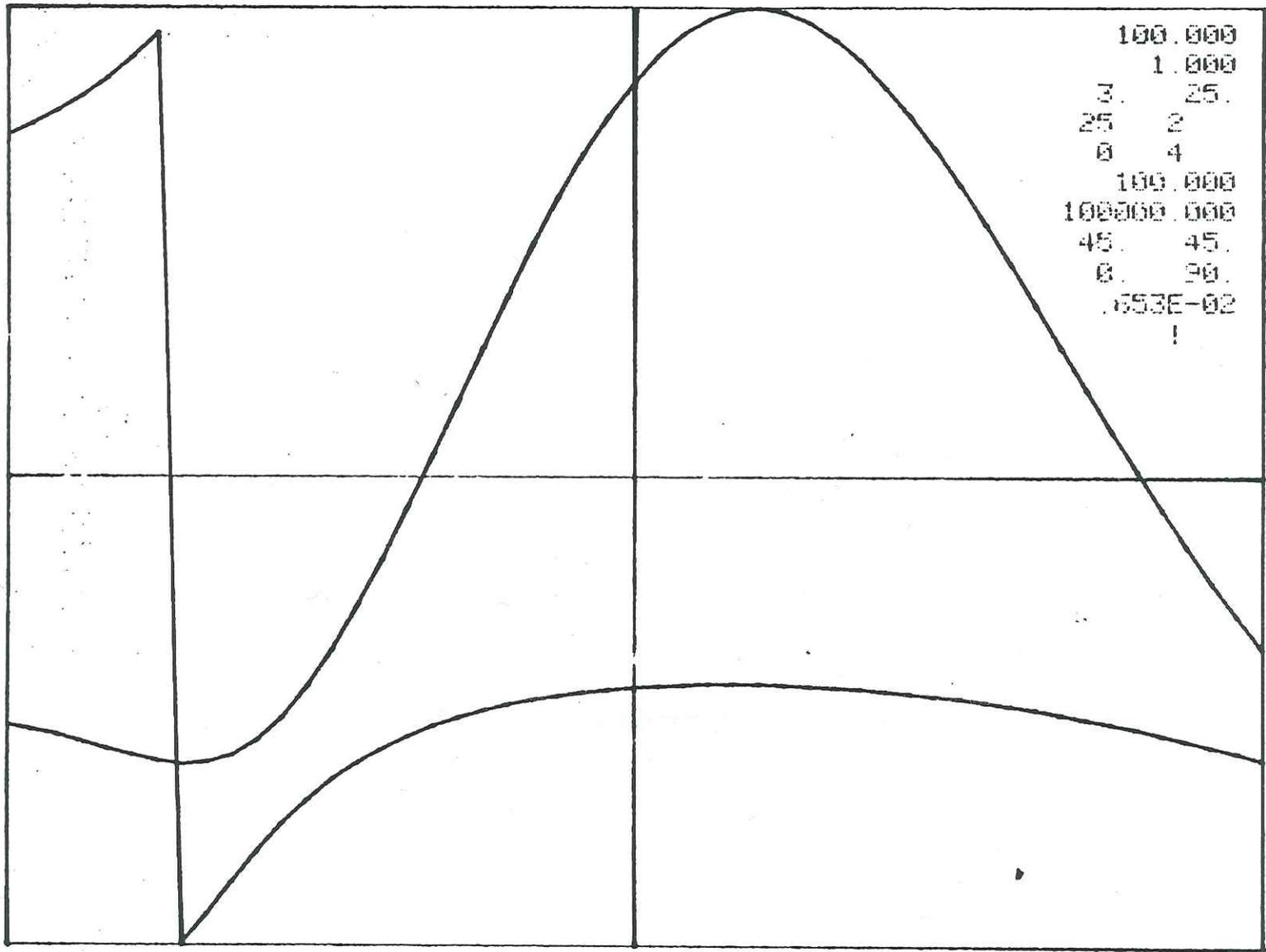


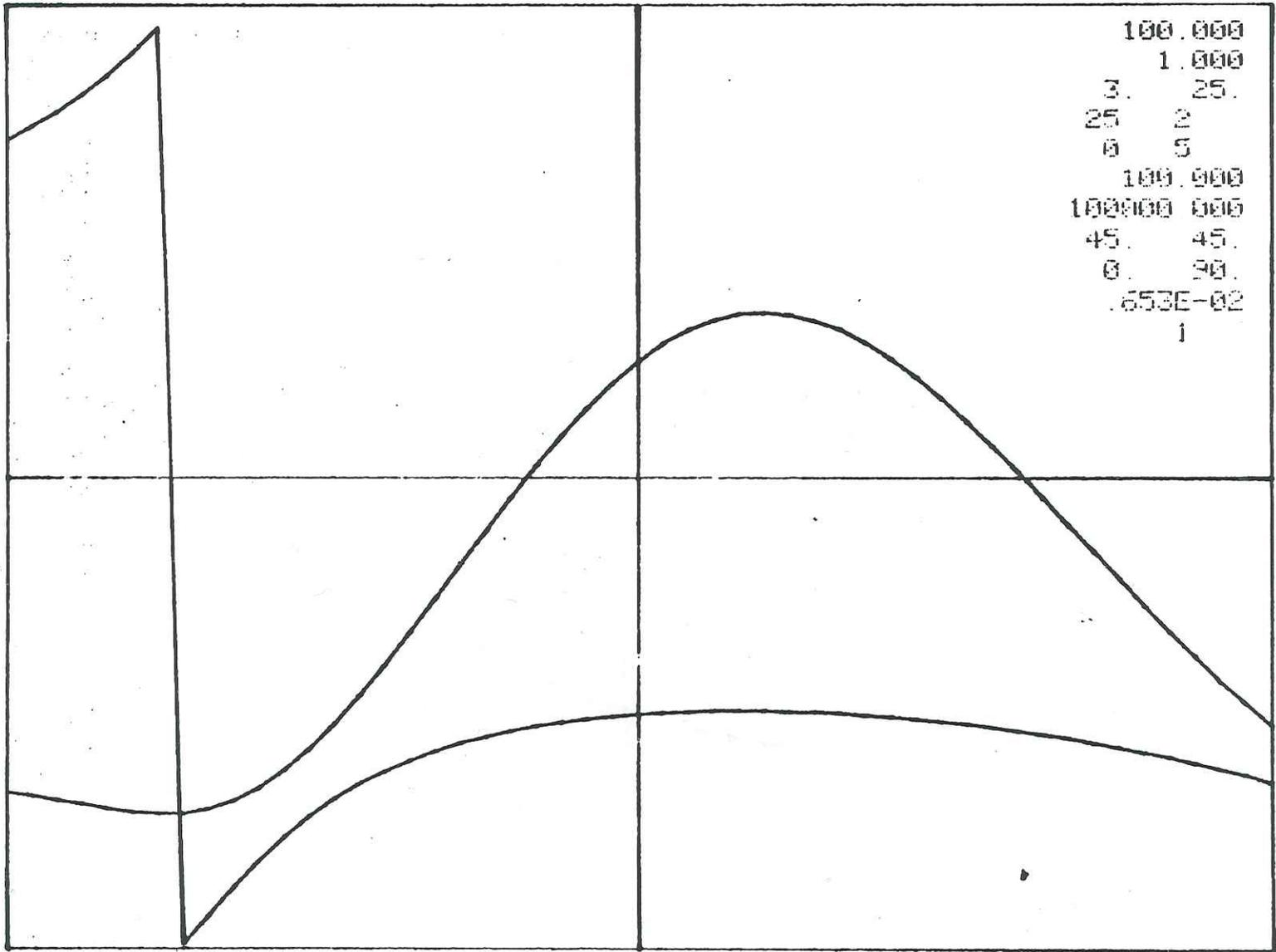
50.000
 1.000
 3. 25.
 25 2
 0 4
 100.000
 100000.000
 45. 45.
 0. 90.
 .890E-02
 1

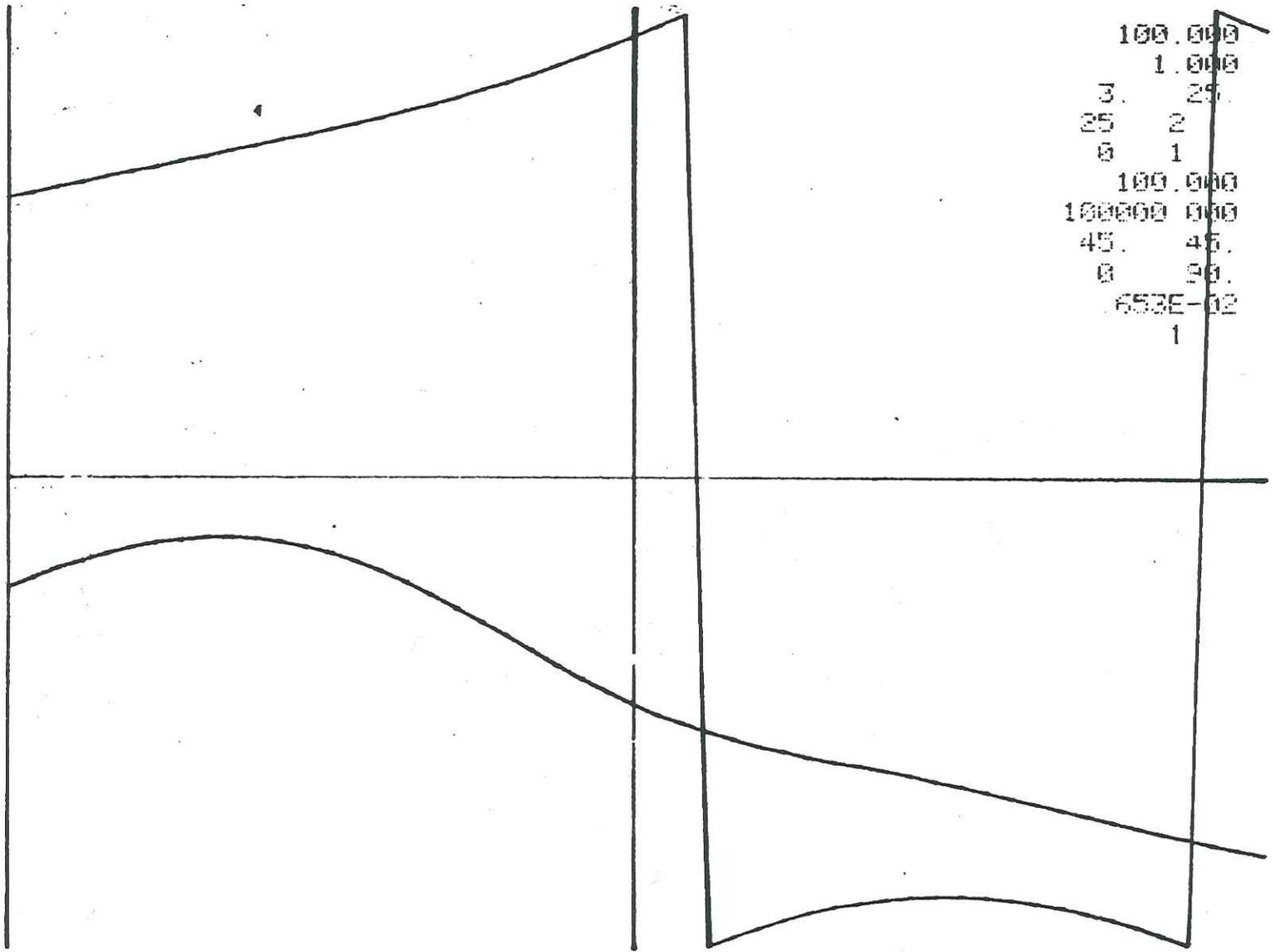


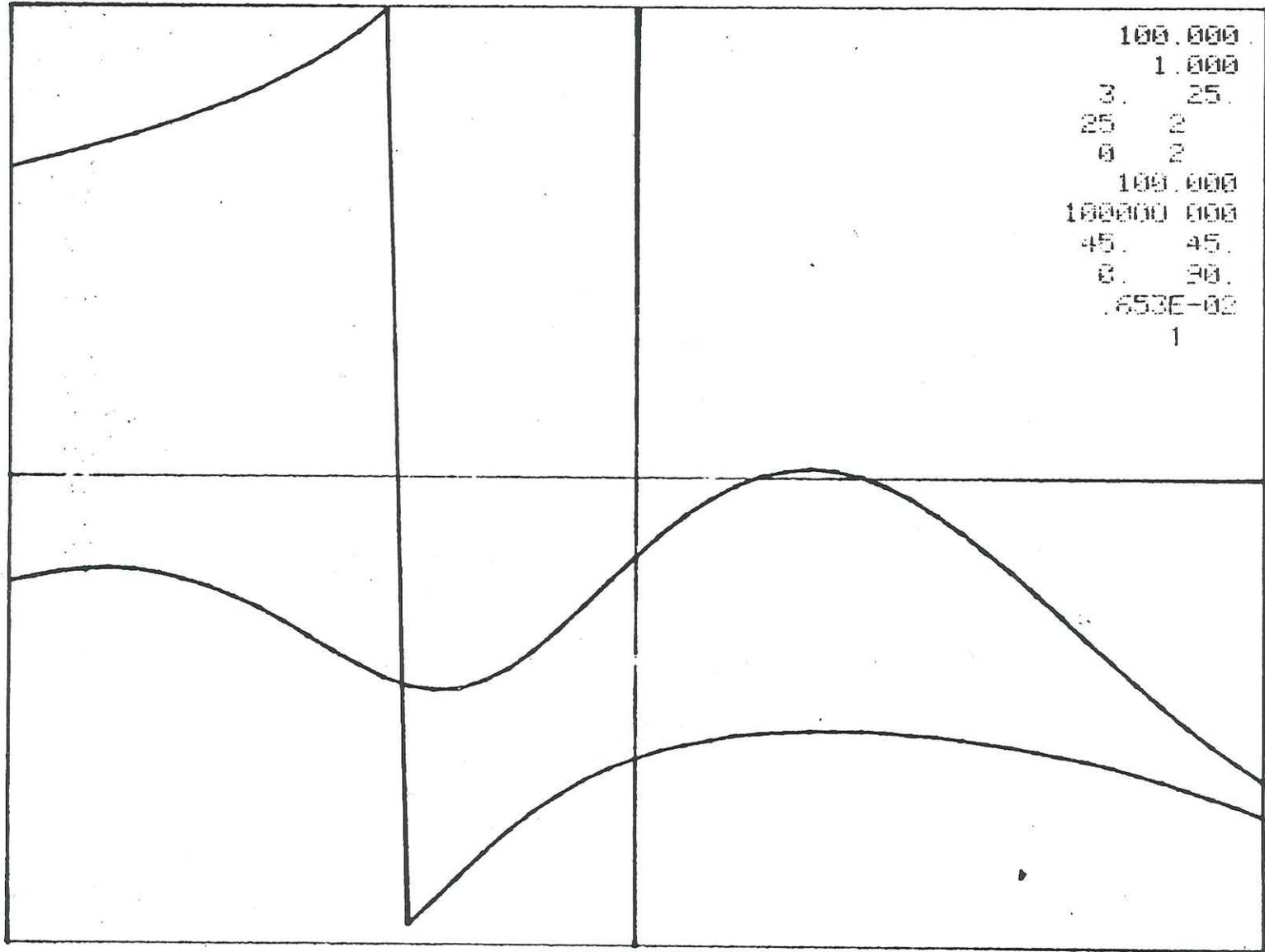


Anomalie électromagnétique au-dessus d'un dipôle incliné. FREQUENCE 100 Hz







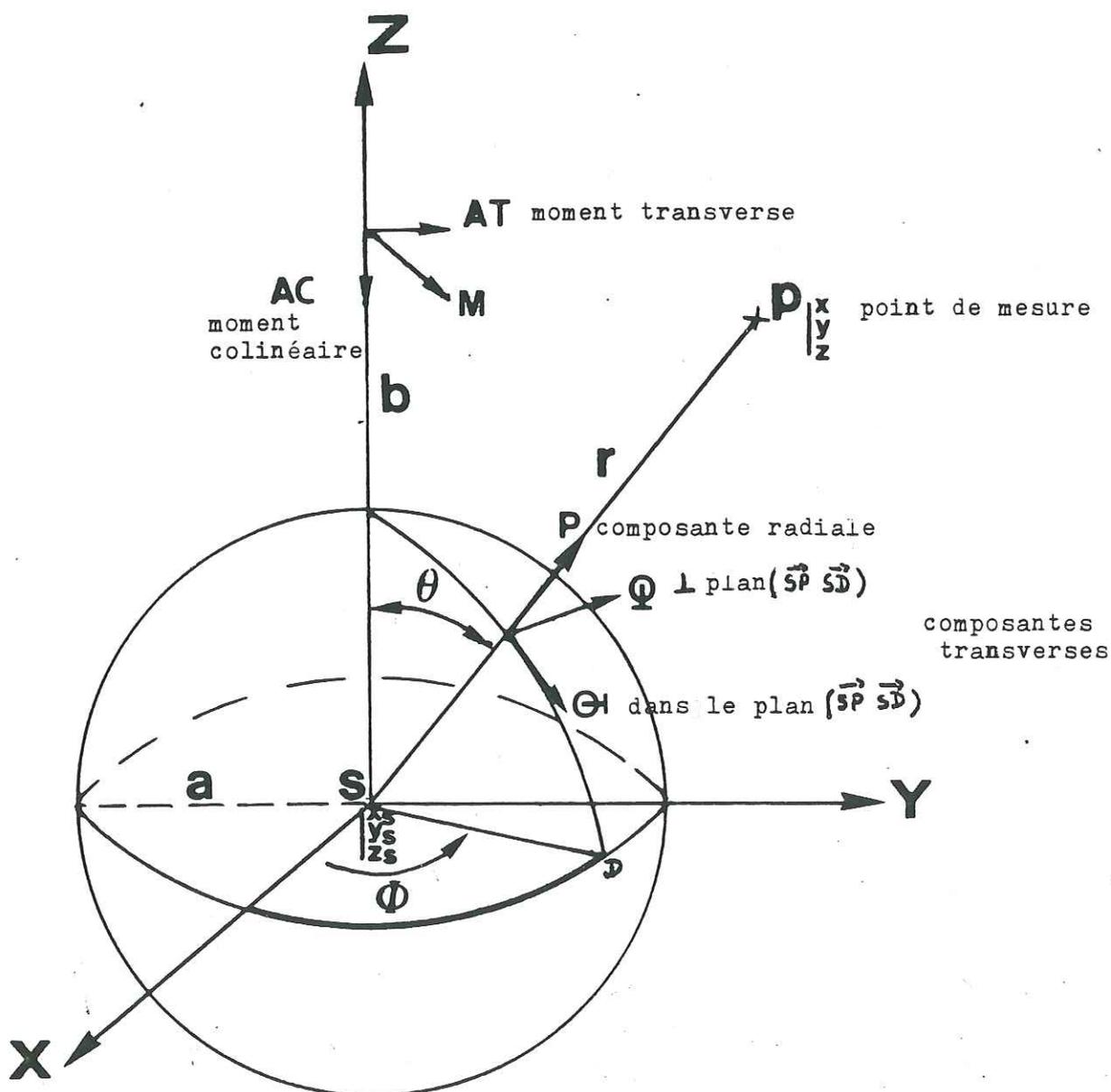


ANNEXE 3

PROGRAMME MARCH

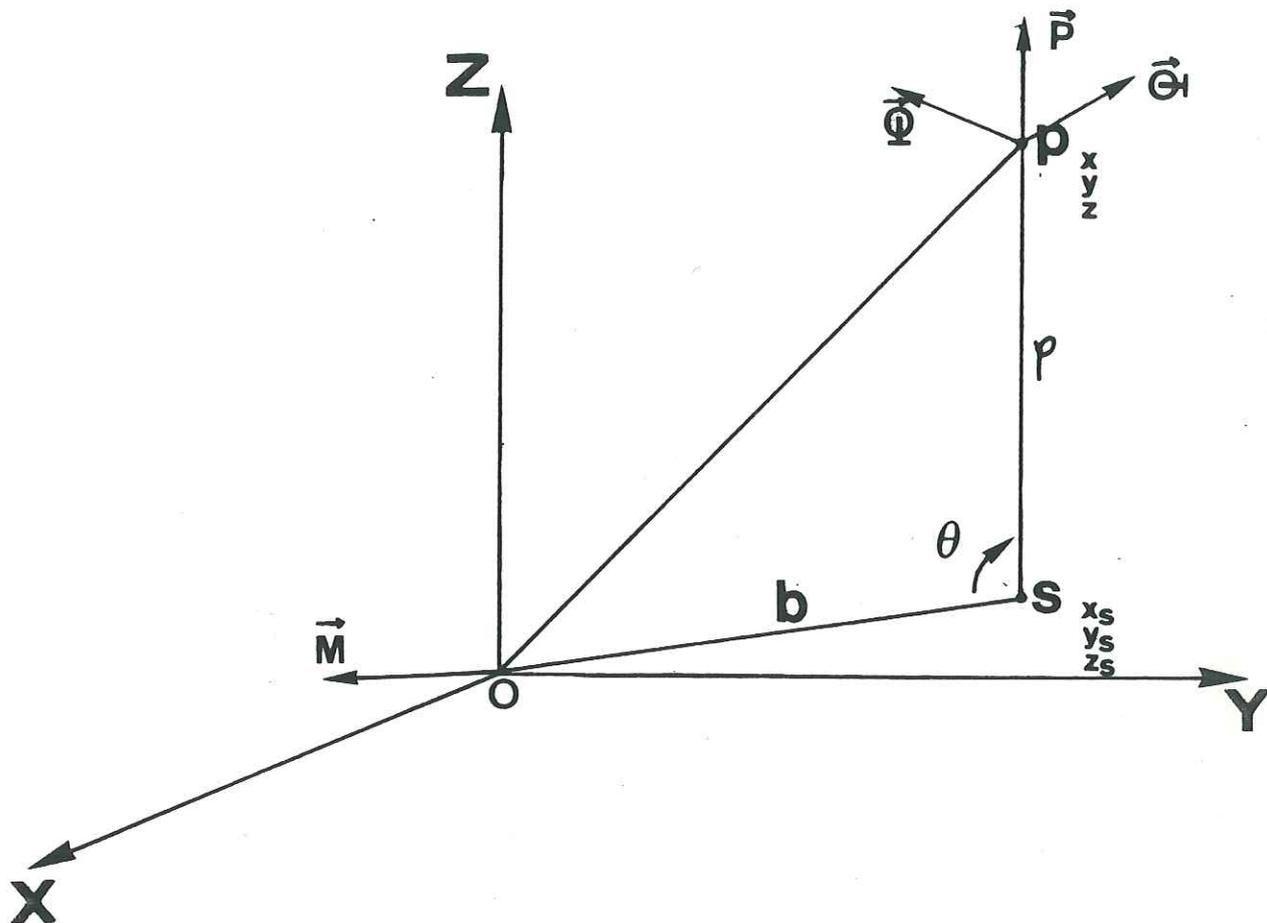
CALCULS - COMMENTAIRES DU LISTING

Trièdre de base de P.M. MARCH



- Expression des vecteurs \vec{P} , θ , $\vec{\phi}$ dans le système de coordonnées ox, y, z centré sur le dipôle

S centre de la sphère
le vecteur \vec{P} est porté par SP



$$SP = \rho$$

$$\rho^2 = (x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z-z_s)^2$$

$$\rho = \sqrt{\rho^2}$$

Les composantes UPX , UPY , UPZ d'un vecteur unitaire \vec{USP} porté par SP sont :

$$UPX = \frac{x - x_s}{\rho} \quad UPY = \frac{y - y_s}{\rho} \quad UPZ = \frac{z - z_s}{\rho}$$

Le vecteur θ est situé dans le plan $\vec{SP} \vec{S0}$

Le vecteur ϕ à ce plan

θ dérive d'un accroissement positif de θ qui est compté à partir de $\vec{S0}$

.../...

1 - ϕ Pour obtenir le "bon sens" pour ϕ , c'est-à-dire correspondant à un $d\phi > 0$, on considère le produit vectoriel

$$\vec{USO} \times \vec{USP} = \vec{n} \sin \theta$$

avec dans le programme

$$\vec{SP} \begin{vmatrix} x - x_s \\ y - y_s \\ z - z_s \end{vmatrix} \quad \vec{SO} \begin{vmatrix} - x_s \text{ (USX)} \\ - y_s \text{ (USY)} \\ - z_s \text{ (USZ)} \end{vmatrix} \quad \vec{USP}, \vec{USO} \text{ vecteurs unitaires}$$

$$\vec{USP} \begin{vmatrix} \frac{x - x_s}{\rho} \\ \frac{y - y_s}{\rho} \\ \frac{z - z_s}{\rho} \end{vmatrix} \quad \vec{USO} \begin{vmatrix} - x_s/b \\ - y_s/b \\ - z_s/b \end{vmatrix}$$

Les composantes du vecteur ϕ sont donc :

$$U\phi X = \frac{1}{\sin \theta} \left[\frac{(y - y_s) z_s}{\rho b} - \frac{(z - z_s) y_s}{\rho b} \right]$$

$$U\phi Y = \frac{1}{\sin \theta} \left[\frac{(z - z_s) x_s}{\rho b} - \frac{(x - x_s) z_s}{\rho b} \right]$$

$$U\phi Z = \frac{1}{\sin \theta} \left[\frac{(x - x_s) y_s}{\rho b} - \frac{(y - y_s) x_s}{\rho b} \right]$$

Soit
$$U\phi X = \frac{1}{\rho b \sin \theta} \left[(y - y_s) z_s - (z - z_s) y_s \right]$$

$$U\phi Y = \frac{1}{\rho b \sin \theta} \left[(z - z_s) x_s - (x - x_s) z_s \right]$$

$$U\phi Z = \frac{1}{\rho b \sin \theta} \left[(x - x_s) y_s - (y - y_s) x_s \right]$$

$U\phi X = \frac{1}{\rho b \sin \theta} \left[y z_s - z y_s \right]$
$U\phi Y = \frac{1}{\rho b \sin \theta} \left[z x_s - x z_s \right]$
$U\phi Z = \frac{1}{\rho b \sin \theta} \left[x y_s - y x_s \right]$

(Dans le programme UIX
UIY
UIZ)

.../...

2 - Θ On détermine Θ à partir de \vec{P} et \vec{Q}

Le produit vectoriel $\vec{UO} \times \vec{USP}$ donne un vecteur perpendiculaire $\vec{\Theta}$

$$\vec{UQ} \times \vec{UP} = \begin{vmatrix} UQX & UPX \\ UQY & UPY \\ UQZ & UPZ \end{vmatrix}$$

Donc

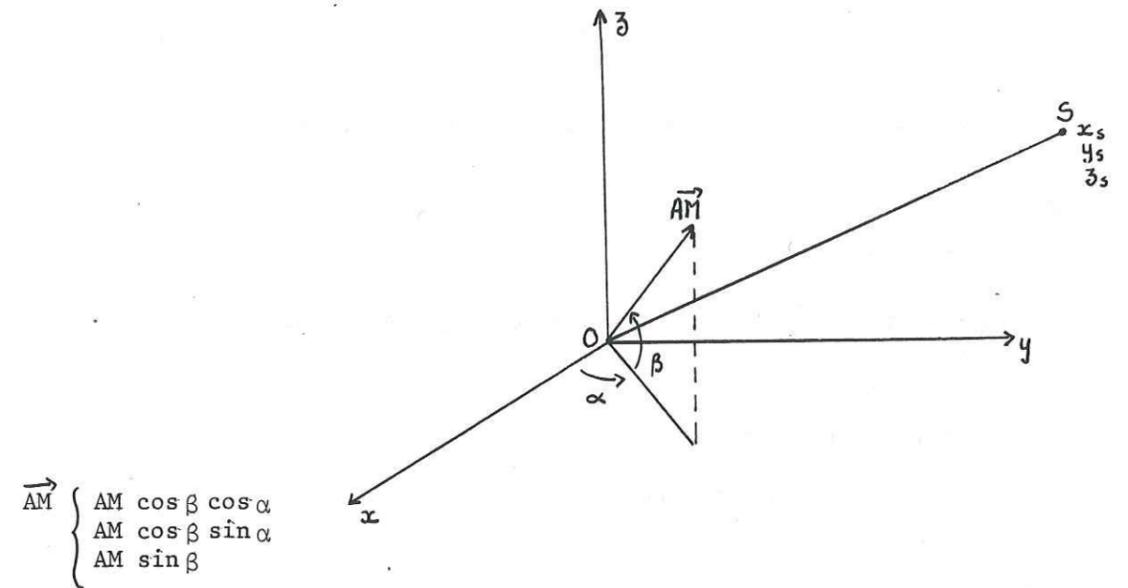
$$\begin{aligned} U\Theta X &= UQY \cdot UPZ - UQZ \cdot UPY \\ U\Theta Y &= UQZ \cdot UPX - UQX \cdot UPZ \\ U\Theta Z &= UQX \cdot UPY - UQY \cdot UPX \end{aligned}$$

(Dans le programme UAX
UAY
UAZ)

A chaque composante transverse ou radiale, il faut affecter un moment magnétique; donc il faut décomposer le vecteur moment du dipôle \vec{AM} en moment radial et moment transverse.

.../...

- Evaluation du moment radial et transverse



$$\vec{AM} \begin{cases} AM \cos \beta \cos \alpha \\ AM \cos \beta \sin \alpha \\ AM \sin \beta \end{cases}$$

Moment radial suivant \vec{SO} : moment collinéaire \vec{AC}

$$\vec{AC} = \vec{AM} \times \vec{USO} \quad \text{avec} \quad \vec{USO} = \begin{cases} -x_s/b \\ -y_s/b \\ -z_s/b \end{cases}$$

$$\vec{AC} = - \frac{AM}{b} (x_s \cos \beta \cos \alpha + y_s \cos \beta \sin \alpha + z_s \sin \beta)$$

Valeur algébrique

Moment transverse = \vec{AT}

$$\vec{AT} = \vec{AM} - \vec{AC}$$

$$\text{avec} \quad \vec{AC} = \vec{AC} \cdot \vec{USO}$$

$$\vec{AC} \begin{cases} \frac{AM}{b} (x_s \cos \beta \cos \alpha + y_s \cos \beta \sin \alpha + z_s \sin \beta) \frac{x_s}{b} \\ \frac{AM}{b} (x_s \cos \beta \cos \alpha + y_s \cos \beta \sin \alpha + z_s \sin \beta) \frac{y_s}{b} \\ \frac{AM}{b} (x_s \cos \beta \cos \alpha + y_s \cos \beta \sin \alpha + z_s \sin \beta) \frac{z_s}{b} \end{cases}$$

.../...

Donc \vec{AT}

$$ATX = AM \left(\cos \beta \cos \alpha - \frac{x_s}{b^2} (x_s \cos \beta \cos \alpha + y_s \cos \beta \sin \alpha + z_s \sin \beta) \right)$$

$$ATY = AM \left(\cos \beta \sin \alpha - \frac{y_s}{b^2} (x_s \cos \beta \cos \alpha + y_s \cos \beta \sin \alpha + z_s \sin \beta) \right)$$

$$ATZ = AM \left(\sin \beta - \frac{z_s}{b^2} (x_s \cos \beta \cos \alpha + y_s \cos \beta \sin \alpha + z_s \sin \beta) \right)$$

$$AT = |\vec{AT}| = \sqrt{ATX^2 + ATY^2 + ATZ^2} \quad \text{Valeur algébrique}$$

Par définition AT est toujours > 0

AC peut être négatif

- Autres grandeurs intervenant dans les formules de MARCH

Ⓕ est égal à ρ (R dans le programme)

Ⓖ intervient par son cosinus et sinus

c'est un angle $\in (0, \pi)$ car la sphère est toujours à une altitude supérieure à l'altitude du point de mesure

$\sin \theta$ toujours positif

$$\vec{USP} \cdot \vec{USO} = \cos \theta$$

$$UPX \cdot USX + UPY \cdot USY + UPZ \cdot USZ = \cos \theta$$

$$\frac{x - x_s}{p} \cdot \frac{-x_s}{b} + \frac{y - y_s}{p} \cdot \frac{-y_s}{b} + \frac{z - z_s}{p} \cdot \frac{-z_s}{b} = \cos \theta$$

$$\cos \theta = -\frac{1}{\rho b} \left((x - x_s) x_s + (y - y_s) y_s + (z - z_s) z_s \right) \quad \text{(Dans le programme CA et SA)}$$

$$\sin \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta}$$

.../...

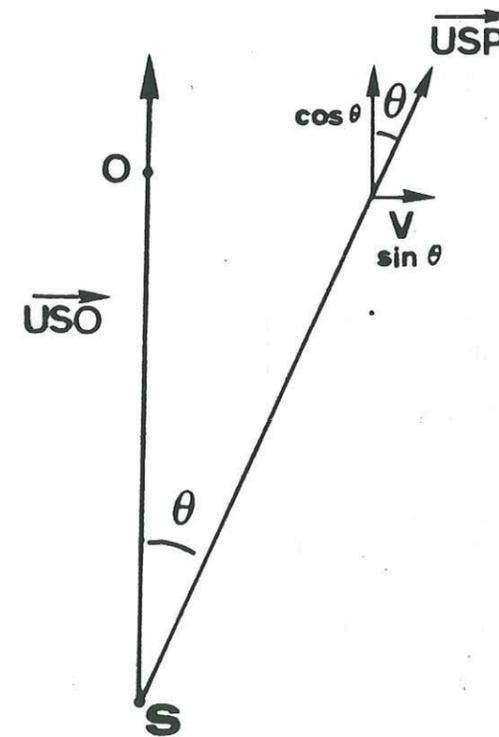
Ⓔ angle compris entre 0 et 2π

Il est compté à partir de \vec{AT} qui définit OX (trièdre March) et la projection de P sur le plan XOY

Sur OX on a le vecteur \vec{AT}

On calcule le vecteur unitaire

$$\begin{cases} UTX = \frac{ATX}{AT} \\ UTY = \frac{ATY}{AT} \\ UTZ = \frac{ATZ}{AT} \end{cases} \quad \text{Composantes du vecteur unitaire (suivant OX de March)}$$



Le vecteur V définit la direction de la projection du point P sur le plan XOY

On va calculer les coordonnées de ce vecteur

$$\vec{USP} = (\vec{USP} \cdot \vec{USO}) \cdot \vec{USO} + \vec{V}$$

Le vecteur \vec{V} a comme module $\sin \theta$

$\theta \neq 0$ toujours > 0

.../...

$$\vec{UV} = \frac{\vec{V}}{\sin\theta} \text{ avec } \vec{V} = \vec{USP} - (\vec{USP} \cdot \vec{USO}) \times \vec{USO}$$

$$D'où \text{ UVX} = \frac{1}{\sin\theta} \left[\frac{x - x_s}{\rho} + \left(\frac{x - x_s}{\rho} \cdot \frac{x_s}{b} + \frac{y - y_s}{\rho} \cdot \frac{y_s}{b} + \frac{z - z_s}{\rho} \cdot \frac{z_s}{b} \right) \left(\frac{x_s}{b} \right) \right]$$

$$\text{UVY} = \frac{1}{\sin\theta} \left[\frac{y - y_s}{\rho} \left(\frac{x - x_s}{\rho} \cdot \frac{x_s}{b} + \frac{y - y_s}{\rho} \cdot \frac{y_s}{b} + \frac{z - z_s}{\rho} \cdot \frac{z_s}{b} \right) \left(-\frac{y_s}{b} \right) \right]$$

$$\text{UVZ} = \frac{1}{\sin\theta} \left[\frac{z - z_s}{\rho} + \left(\frac{x - x_s}{\rho} \cdot \frac{x_s}{b} + \frac{y - y_s}{\rho} \cdot \frac{y_s}{b} + \frac{z - z_s}{\rho} \cdot \frac{z_s}{b} \right) \left(\frac{z_s}{b} \right) \right]$$

On a $\vec{UT} \cdot \vec{UV} = \cos \phi$

$$\cos \phi = \text{UTX} \cdot \text{UVX} + \text{UTY} \cdot \text{UVY} + \text{UTZ} \cdot \text{UVZ}$$

$$\sin \phi = (\vec{UT} \times \vec{UV}) \cdot \vec{USO}$$

On prend le produit mixte des vecteurs \vec{UT} , \vec{UV} et \vec{USO}

$$\sin \phi = \begin{vmatrix} \text{UTX} & \text{UVX} & \text{USOX} \\ \text{UTY} & \text{UVY} & \text{USOY} \\ \text{UTZ} & \text{UVZ} & \text{USOZ} \end{vmatrix}$$

$$\sin \phi = \text{UTX} \cdot \text{UVY} \cdot \text{USOZ} + \text{UTY} \cdot \text{UVZ} \cdot \text{USOX} + \text{UVX} \cdot \text{USY} \cdot \text{UTZ} - (\text{UTZ} \cdot \text{UVY} \cdot \text{USOX} + \text{UTY} \cdot \text{UVX} \cdot \text{USOZ} + \text{UTX} \cdot \text{UVZ} \cdot \text{USOY})$$

On a redéfini tous les termes par rapport à un repère centré sur le dipôle. On peut appliquer les formules pour calculer les vecteurs Φ , θ et P .

Le programme MARCH est en fait un sous-programme de DIPMAG.

En définitive DIPMAG sous sa forme actuelle offre quatre possibilités de travail différent suivant la valeur de la variable IVAR :

IVAR = 1 Calcul des amplitudes et phase

IVAR = 2 Rapport des amplitudes alternatif/continu et phase

IVAR = 3 Calcul de l'effet global sphère et milieu conducteur

IVAR = 4 Calcul de l'effet de la sphère seule

.../...

UNITES

Les formules de March sont écrites dans le système Heaviside rationalisé en utilisant les unités électrostatiques.

Pour se ramener en CGS, unité utilisée dans notre programme DIPMAG, il faudra faire intervenir un coefficient égale à $1/4\pi$.

En multipliant les valeurs de champ trouvées à la suite des formules de March, par $1/4\pi$ on obtient des quantités compatibles du point de vue unités avec les valeurs de champs primaires.

$K = -i\sigma\mu\omega$ σ : conductivité du milieu extérieur à la sphère.

.../...

< LISTING DE L'UTILISATEUR : 0004 DATE : 00/00/00 06H 54MNS
<

LISTE DU FICHIER : MARCH- 4S ,D3

SUBROUTINE MARCH(X,Y,Z,XS,YS,ZS,A,B,R,AM,ALPHA,BETA,SIGMA,
WFREQ,DELTA,EPSI,K,IW)
COMPLEX W(20)
COMMON W
COMMON /IO/IDW,IR
COMPLEX SOX,SOY,SOZ,AKCA,BUX,RO,TH,PH

.../...

```
COMPLEX P1AT,P2AT,P2AR,TH1AT,TH2AT,TH2AR
COMPLEX PH1AT,PH2AT,PH2AR
EQUIVALENCE(W(1),SOX),(W(2),SOY),(W(3),SOZ)
EQUIVALENCE(W(4),P1AT),(W(5),P2AT),(W(6),P2AR)
EQUIVALENCE(W(7),TH1AT),(W(8),TH2AT),(W(9),TH2AR)
EQUIVALENCE(W(10),PH1AT),(W(11),PH2AT),(W(12),PH2AR)
EQUIVALENCE(W(13),RO),(W(14),PH),(W(15),TH)
EQUIVALENCE(W(16),BUX),(W(17),AKCA)
WRITE(IDW,601)X,Y,Z
601  FORMAT(3F10.2)
C
C X,Y,Z COORDONNEES DU POINT P OU S EFFECTUE LE CALCUL DU CHAMP SECONDI
C
C XS YS ZS CENTRE DE LA SPHERE
C
C A:RAYON B:DISTANCE DIPOLE-SPHERE=SO R:DISTANCE SP
C
C K=0 DETERMINATION DE CONSTANTES POUR LA SUBROUTINE EN PREMIERE PASSE
C
C      PI=3.141593
C
C VECTEUR UNITAIRE SELON SO:US
C
C      IF(K.NE.0)GO TO 101
C      K=1
C      C=4.*PI
C      B=SQRT(XS*XS+YS*YS+ZS*ZS)
C      B2=B*B
C      B3=B2*B
C      B4=B2*B2
C      USX=-XS/B
C      USY=-YS/B
C      USZ=-ZS/B
C
C CALCUL DES DIVERS MOMENTS-AC:COLINEAIRE A SO,-AT: TRANSVERSE
C
C      CAL=COS(ALPHA*PI/180.)
C      SAL=SIN(ALPHA*PI/180.)
C      CBE=COS(BETA*PI/180.)
C      SBE=SIN(BETA*PI/180.)
C      PS=XS*CBE*CAL+YS*CBE*SAL+ZS*SBE
C      AC=-AM*PS/B
C      AUX=PS/B/B
C      ATX=AM*(CBE*CAL-XS*AUX)
C      ATY=AM*(CBE*SAL-YS*AUX)
C      ATZ=AM*(SBE-ZS*AUX)
C      AT=SQRT(ATX*ATX+ATY*ATY+ATZ*ATZ)
C
C VECTEUR UNITAIRE TRANSVERSE :UT
C
C      UTX=ATX/AT
C      UTY=ATY/AT
C      UTZ=ATZ/AT
C
C      A2=A*A
C      A3=A2*A
C      A4=A2*A2
C
C AKCA CONSTANTE DE PROPAGATION
C
C      AKCA=CMPLX(0.,-8.*PI*PI*1.E-7*SIGMA*FREQ)
101  CONTINUE
RC=(X-XS)*(X-XS)+(Y-YS)*(Y-YS)+(Z-ZS)*(Z-ZS)
```

.../...

```

R=SQRT(RC)
R2=RC
R3=RC*R
R4=RC*RC
EPSI=R/DELTA
C EVALUATION DES CONDITIONS DE L APROXIMATION.
IF(EPSI.GT.0.5)WRITE(IDW,600) EPSI
600 FORMAT('APROXIMATION NON VALABLE EPSILON=',F10.2)
C
C VECTEUR UNITAIRE SELON SP :UP
C
UPX=(X-XS)/R
UPY=(Y-YS)/R
UPZ=(Z-ZS)/R
C
C CALCUL DE COS ET SIN DE THETA :CA,SA
C
CA=UPX*USX+UPY*USY+UPZ*USZ
SA=SQRT(1.-CA*CA)
IF(SA.LT.1.E-8)GO TO 102
C
C CALCUL DU VECTEUR UNITAIRE SELON PHI :UI
C
AUX=R*B*SA
UIX=(Z*YS-Y*ZS)/AUX
UIY=(X*ZS-Z*XS)/AUX
UIZ=(Y*XS-X*YS)/AUX
C
C VECTEUR UNITAIRE SELON THETA :UA
C
UAX=UIY*UPZ-UIZ*UPY
UAY=UIZ*UPX-UIX*UPZ
UAZ=UIX*UPY-UIY*UPX
C
C VECTEUR UNITAIRE PERPENDICULAIRE A SO DANS SOP
C
AUX=UPX*USX+UPY*USY+UPZ*USZ
UVX=(UPX+AUX*USX)/SA
UVY=(UPY+AUX*USY)/SA
UVZ=(UPZ+AUX*USZ)/SA
C
C CALCUL DE COS ET SIN PHI
C
CI=UTX*UVX+UTY*UVY+UTZ*UVZ
SI=UTX*UVY*USZ+UTY*UVZ*USX+UTZ*UVX*USY
SI=SI-(UTZ*UVY*USX+UTX*UVZ*USY+UTY*UVX*USZ)
C
C EVALUATION DES COMPOSANTES DU CHAMP SECONDAIRE
C
P1AT=CMPLX(0.,0.)
AUX=CI*SA*A3/(B3*R3)
AUX=AUX*(1.+6.*A2*CA/(B*R)+9.*A4*(5.*CA*CA-1.)/(2.*B2*R2))
P2AT=CMPLX(AUX,0.)
AUX=CA+3.*A2*(3.*CA*CA-1.)/(2.*B*R)+3.*A4*CA*(5.*CA*CA-3.)/(B2
W*R2)
AUX=AUX*2.*A3/(B3*R3)
P2AR=CMPLX(-AUX,0.)
AUX=1.+3.*A2*CA/(4.*B*R)+A4*(5.*CA*CA-1.)/(6.*B2*R2)
AUX=AUX*CI*A3/(B2*R2)
TH1AT=CMPLX(AUX,0.)*AKCA
AUX=CA+4.*A2*(CA*CA-SA*SA)/(B*R)

```

.../...

```

AUX=AUX+9.*A4*(15.*CA*CA-11.)*CA/(4.*B2*R2)
AUX=-CI*A3*AUX/(2.*B3*R3)
TH2AT=CMPLX(AUX,0.)
AUX=1.+6.*A2*CA/(B*R)+9.*A4*(5.*CA*CA-1.)/(2.*B2*R2)
AUX=-A3*SA*AUX/(B3*R3)
TH2AR=CMPLX(AUX,0.)
AUX=CA+3.*A2*(CA*CA-SA*SA)/(4.*B*R)
AUX=AUX+A4*(15.*CA*CA-11.)*CA/(6.*B2*R2)
AUX=-AUX*SI*A3/(B2*R2)
PH1AT=CMPLX(AUX,0.)*AKCA
AUX=1.+4.*A2*CA/(B*R)+9.*A2*(5.*CA*CA-1.)/(4.*B2*R2)
AUX=AUX*SI*A3/(2.*B3*R3)
PH2AT=CMPLX(AUX,0.)
PH2AR=CMPLX(0.,0.)
C SORTIE VALEURS DES COMPOSANTES DU CHAMP SECONDAIRE
SRA=P1AT
SIA=AIMAG(P1AT)
SRB=P2AT
SIB=AIMAG(P2AT)
SRC=P2AR
SIC=AIMAG(P2AR)
WRITE(IDW,602) SRA,SIA,SRB,SIB,SRC,SIC
602 FORMAT(' P ',6(2X,E10.3))
SRA=TH1AT
SIA=AIMAG(TH1AT)
SRB=TH2AT
SIB=AIMAG(TH2AT)
SRC=TH2AR
SIC=AIMAG(TH2AR)
WRITE(IDW,603) SRA,SIA,SRB,SIB,SRC,SIC
603 FORMAT(' TH ',6(2X,E10.3))
SRA=PH1AT
SIA=AIMAG(PH1AT)
SRB=PH2AT
SIB=AIMAG(PH2AT)
SRC=PH2AR
SIC=AIMAG(PH2AR)
WRITE(IDW,604) SRA,SIA,SRB,SIB,SRC,SIC
604 FORMAT(' PH ',6(2X,E10.3))
WRITE(IDW,605) SA,CA,SI,CI
605 FORMAT(' TRIGO',4F7.4)
C
C INTRODUCTION DES MOMENTS AC ET AT
C
P1AT=P1AT*AT
P2AT=P2AT*AT
P2AR=P2AR*AC
TH1AT=TH1AT*AT
TH2AT=TH2AT*AT
TH2AR=TH2AR*AC
PH1AT=PH1AT*AT
PH2AT=PH2AT*AT
PH2AR=PH2AR*AC
RO=P1AT+P2AT+P2AR
TH=TH1AT+TH2AT+TH2AR
PH=PH1AT+PH2AT+PH2AR
C
C SORTIE SOX...
C
SOX=RO*UPX+TH*UAX+PH*UIX
SOY=RO*UPY+TH*UAY+PH*UIY

```

.../...

B I B L I O G R A P H I E

RESISTIVITE

```

SOZ=RO*UPZ+TH*UAZ+PH*UIZ
SOX=SOX/C
SOY=SOY/C
SOZ=SOZ/C
RETURN
102  CONTINUE
AUX=-2.*A3/(B3*R3)
AUX=AUX*(CA+3.*A2/(B*R)+CA*6.*
SA4/(B2*R2))
AUX=AUX*AC
F2AR=CMPLX(AUX,0.)
AUX=-A3/(2.*B3*R3)
AUX=AUX*(CA+4.*A2/(B*R)+CA*9.*
SA4/(B2*R2))
AUX=AUX*AT
BUX=CMPLX(AUX,0.)
SOX=F2AR*UPX+BUX*UTX
SOY=F2AR*UPY+BUX*UTY
SOZ=F2AR*UPZ+BUX*UTZ
SOX=SOX/C
SOY=SOY/C
SOZ=SOZ/C
RETURN
END

```

/*

.../...

(1) L.S. COLETT and T.J. KATSUB
 - Electrical parameters of rocks in developing geophysical technics -
 Geophysics - Vol. 38 n° 1.

(2) GEOLOGICAL SURVEY CIRCULAR 789
 - Initial report of the Petrophysics Laboratory

(3) G.V. KELLER, F.C. FRISCHKNECHT
 - Electrical methods in geophysical prospecting - Pergamon press
 (1970)

(4) G.V. KELLER - A. RAPOLLA
 - Electrical prospecting methods in volcanic and geothermal
 environments

(5) K.S. HENDELSON, M.H. COHEN
 - The effect of grain anisotropy on the electrical properties of
 sedimentary rocks - Geophysics, vol.47, n° 2, p 257 - (1982)

(6) G.R. OLHOEFT
 - Electrical properties of rocks - Geophysical prospecting - (1976)

(7) G.R. OLHOEFT
 - US Department of the interior geological survey : tables of room
 temperature electrical properties for selected rocks and minerals
 with dielectric permittivity statistics - (1979)

(8) E.I. PARKHOMENKO
 - Electrical properties of rocks - (1967)

.../...

- (9) T.J. SHANKLAND, H.S. WOLF
- Conductivity in fluid-bearing rocks - Journal of Geophysical Research - Vol.79, n° 32
- (10) R.T. SHUEY and M. JOHNSON
- On the phenomenology of electrical relaxation in rocks - Geophysics, Vol.38, n° 1 - (1973)
- (11) SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS
- Mining geophysics, Vol II
- (12) H.W. TELFORD and al
- Prospection géophysique - Tome 2
- (13) W.O. WINSAUER and al
- Resistivity of brine-saturated sands in relation to pore geometry
Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists
Vol 38, n°2 (1952)

MAGNETORESISTIVITE

- (14) R.N. Edwards - E.C. Howell
- A field test of the magnetometric resistivity (MRM) method - Geophysics, Vol 41, n° 6A, p 1170, - (1976)
- (15) E. Gomez-Trevino - R.N. Edwards
- Magnetometric resistivity (MRM) anomalies of two dimensional structures - Geophysics, Vol 44, n° 5, P 947, - (1979)
- (16) H. Lee - R.N. Edwards and M.W. Nabighian
- On the theory of magnetometric resistivity methods - Geophysics, Vol 43, n° 6, p 1176, - (1978)
- (17) M.M. Worthington - J.E. Acosta
- A borehole magnetometric resistivity experiment - Geophysical prospecting, Vol 31, n° 5 - (1983)

ELECTROMAGNETISME

(18) F. ABRAHOVICI and M. CHLANTAC

- Fields of a vertical dipole over a vertically inhomogeneous earth - Geophysics, Vol 43, n° 5, p 954-966 - (1978)

(19) A. ANGOT

- Complements de mathématiques - Ed. de la revue d'Optique

(20) P. ANNAN, W.P. WALLER, D.W. STANGWAY

- The electromagnetic response of a low-loss, two layer dielectric earth for a horizontal electric dipole excitation - Geophysics, Vol 40, n° 2, p 285-293 - (1975)

(21) G. BRUHAT

- Cours de physique générale - Electricité par G. GOUDET - Masson et Cie

(22) W.C. CHEW and J.A. KONG

- Electromagnetic field of a dipole on a two layer earth - Geophysics, Vol. 46, n° 3, p 309-315, - (1981)

(23) T.W.H. CAFFEY and L. ROMERO

- Locating a buried magnetic dipole - IEEE, Vol. 20, n° 2, p 188-192, - (1982)

(24) T.W.H. CAFFEY

- Maximum induced voltage between coaxial coils - IEEE, Vol.16, n° 4, p 314-315, - (1978)

(25) P. CORNILLE

- Phase measurements of electromagnetic field components - Geophysics, Vol. 35, n° 5, p 897-901, - (1970)

(26) P. DEBRAINE

- Unités de mesure des grandeurs physiques - DUNOD

.../...

(27) R.J. GREENFIELD and C.H. STOYER

- Errors in the location of a buried electromagnetic source resulting from lateral changes in ground conductivity - IEEE, p 115-117, - (Avril 1976)

(28) H.L. HAM, F.W. JONES and R.D. HIBBS

- The response of perturbation and induction arrows to a three dimensional buried anomaly - Geophysics, Vol 47, n° 1, p 51-59 (1982)

(29) D.A. THILL and J.R. WAIT

- Perturbation of magnetic dipole field by a limitely conducting circular cylinder - Rivista italiana di geofisica, n° 22, p 421-424 - (1983).

(30) G.T. INOUE, H. BERNSTEIN

- Electromagnetic depth sounder - IEEE, Vol 8, n° 4, p 336-343 (1970)

(31) A. KAUFMAN, G.V. KELLER

- Frequency and transient soundings - Ed. Elsevier

(32) A. KAUFMAN

- Frequency and transient responses of electromagnetic fields created by currents in confined conductors - Geophysics, vol.43, n° 5, p 1002-1010 - (1978)

(33) A. KAUFMAN

- The influence of currents induced in the host rocks on electromagnetic response of a spheroid directly beneath a loop - Geophysics, Vol 46, n° 8, p 1121-1146 - (1981)

(34) A. KAUFMAN

- Harmonic and transient fields on the surface of a two layer medium - Geophysics, Vol. 44, n° 7, p 1208-1217 - (1979)

(35) A. KAUFMAN, G.V. KELLER

- The MT sounding method - Ed. Elsevier

.../...

- (36) G.V. KELLER, F.C. FRISCHKNECHT
- Electrical methods in geophysical prospecting - Pergamon press (1970)
- (37) R.W.P. KING
- A comprehensive study of subsurface propagation from horizontal electric dipoles - IEEE, Vol. 18, n° 3, p 225-233, - (1980)
- (38) J.J. LAJOIE and G.F. WEST
- The electromagnetic response of a conductive inhomogeneity in a layered earth - Geophysics, Vol. 41, n°6, p 1133-1156, - (1976)
- (39) K. MALLICK
- Conducting sphere in electromagnetic input field - Geophysical prospecting, n° 20, p 293-303, - (1972)
- (40) H.W. MARCH
- The field of a magnetic dipole in the presense of a conductive sphere - Geophysics, Vol. 18, p671-684 - (1953)
- (41) J.G. NEGI
- Electromagnetic screening due to a dissiminated spherical zone over a conducting sphere - Geophysics, Vol. 32, n° 1, p69-87 (1967)
- (42) R.G. OLSON and A.J. FARSTAD
- Electromagnetic direction finding experiments for location of trapped miners - Proc. of Through the earth - Electromagnetic Workshop sponsored by US Bureau of Mines, Col. School of Mines, Aug. 15-17, 34-37,- (1973)
- (43) H.P. PATRA
- Geosounding principles, 2 - Time varying geoelectric soundings - Ed.Elsevier
- (44) H. PODDAR
- Very low frequency electromagnetic response of a perfectly conducting half plane in a layered half space - Geophysics, Vol.47, n° 7, p 1059-1067 - (1982)

.../...

- (45) A.P. RAICHE and B.R. SPIES
- Coincident loop transient electromagnetic master curves for interpretation of two layer earths - Geophysics, Vol 46, n° 1, p 53-64 - (1981)
- (46) J. RYU, M.F. MORISSON, S.H. WARD
Electromagnetic field about a loop source of current - Geophysics, Vol. 35, n°5, p802-897, - (1970)
- (47) A.S. SAYDAN
- Very low frequency electromagnetic interpretation using tilt angle and ellipticity measurements - Geophysics, Vol 46, n° 11, p 1594-1605 - (1981)
- (48) A. SALVI
- Magnétomètre absolu a résonance magnétique nucléaire - thèse Grenoble - (1961)
- (49) A. SALVI
- Perfectionnements apportés aux magnétomètres à résonance magnétique nucléaire à pompage électronique - Revue de Physique Appliquée, 5, p 131-234, - (1970)
- (50) A. SALVI
- Magnétomètre a résonance magnétique nucléaire par pompage à double effet - Colloque International sur l'Exploitation des Océans (Bordeaux), Th IV, II, - (1971)
- (51) SOCIÉTÉ OF EXPLORATION GEOPHYSICIST'S
- Mining Geophysics, Vol II (Theory)
- (52) L. SOLOMON
- Augmentation des signaux de résonance magnétique nucléaire par polarisation dynamique - Journal de Physique, 19, p 617-680, (1958)

.../...

(53) L. SOLOMON, J. COMBRISSE, A. ABRAGAM

- Polarisation nucléaire par effet Overhauser dans les solutions d'ions paramagnétiques, CR Académie des Sciences, Paris, 245, 157-160

(54) C.H. STOYER and R.J. GREENFIELD

- Numerical solutions of the response of a two dimensional earth to an oscillating mag. dipole source - Geophysics, Vol. 41, n°3, p 519 - 530, - (1976)

(55) H.J. TSAKNAKIS and E.E. KRIEZIS

- Transient electromagnetic fields due to a circular current loop perpendicular or parallel to a conducting half space - IEEE, Vol. 20, n° 1, p 122-130, - (1982)

(56) K. TSUBOTA and J.R. WAIT

- The frequency and the time domain responses for a buried axial conductor - Geophysics, Vol. 45, n° 5, p 941-951, - (1980)

(57) R.K. VERNA

- Detectability by electromagnetic sounding systems - IEEE Transactions on Geoscience Electronics, Vol. 15, n° 4, p 232-251 (1977)

(58) J.R. WAIT

- A conducting sphere in a time varying magnetic fields - Geophysics, Vol. 16, p 666-672, - (1951)

(59) J.R. WAIT

- Electromagnetic technique for locating a buried source - IEEE, Vol. 9, n° 2, p95-98, - (1971)

(60) J.R. WAIT

- Induction by an oscillating magnetic dipole over a two layer ground - Appl. Sci. Res, Section B, Vol. 7, p 73-80, - (1953)

.../...

DOCUMENTS CEA/LETI

(1*) J.M. ITTEL

- Localisation d'un électroaimant à l'aide d'un magnétomètre RMN - Méthode de calcul de l'électroaimant - Note LETI/MA 82/849, (1982)

(2*) D. LEMERCIER, R. BEGOUEN, A. CHAPUIS, G. REY-GIRAUD

- Accurate localisation of prehistoric caves in the south of France - Note LETI/MA n° 3140, - (1979)

(3*) M. PACCAUD, P. REVEL, F. ROBACH

- Localisation par méthode magnétique de galeries souterraines noyées sur le site de GOUL DE LA TANNERIE, Bourg St Andeol (Ardèche) - Note LETI/MA n° 83/267, - (1983)

(4*) F. ROBACH, A. CHAPUIS

- Localisation par méthode magnétique de galeries souterraines noyées - Note LETI/MA n° 78/68, - (1978)

(5*) F. ROBACH, G. REY-GIRAUD, E. FRIESS

- Localisation par méthode magnétique de galeries souterraines noyées - Note LETI/MA n° 77/87, - (1977)

(6*) A. SALVI, H. GLENAT, J. CRESCINI

- Résultat des mesures effectuées à la source de Lez à Montpellier Note LETI/MA 72-3556, - (1972)

(7*) A. SALVI

- Localisation d'une cavité karstique par des mesures magnétiques statistiques - Note LETI/MA 70/268 AS/GE - (1970)

(8*) A. SALVI, C.R. COLLIN, D. LEMERCIER, P. LEMERCIER, F. ROBACH

- Magnétomètre différentiel à haute sensibilité - Geophysical prospecting - Vol.21, p704, - (1973)

26 OCT. 1984

RESUME

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
B 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL (176) 87.48.43

Mise au point d'un dispositif expérimental de mesure des propriétés électriques (partie réelle et imaginaire) d'échantillons rocheux.

Étude d'un dispositif de mesure magnétorésistive à réception basée sur un capteur ferromagnétique à couche mince.

Description d'une méthode de localisation de cavités souterraines par prospection magnétique. En vue de l'extension de cette méthode aux régimes alternatifs, pour un meilleur pouvoir d'investigation, étude, par la modélisation et le calcul, de l'incidence de la conductivité du terrain, encaissant la cavité, sur la mesure électromagnétique. L'intervention de la géologie se traduit par une erreur de localisation. L'étude porte dans un premier temps sur le cas d'un terrain homogène, dans un deuxième temps sur le cas d'un terrain hétérogène, l'anomalie étant figurée par une sphère infiniment conductrice au sein d'un terrain plus résistant. On détermine une valeur du produit Conductivité.Fréquence qui fixe la limite entre le cas statique (théorie magnétique) et le cas alternatif (théorie électromagnétique) au travers de l'étude de la précision de la localisation dans différentes configurations de terrain et de mesure. Une étude sur le terrain vient confirmer les résultats obtenus lors du calcul et permet de définir et tester une chaîne d'appareillage adéquate à la mesure électromagnétique.

MOTS CLES

Electromagnétisme - Résistivité - Magnétorésistivité - Localisation - Dipôle - Courants de Foucault - Induction - Cavités - Spéléologie - Forage.