

Don ORSTOM

AMS

ORSTOM

Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération

Rapport sur l'étude du Time Domain Electromagnetic
- Application en Hydrogéologie
- Programme de Modélisation en 3D

Gérard RAKOTONDRA SOA

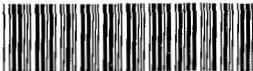
Avril/Juin 1996

AMS

I.O.G.A.

Institut et Observatoire Géophysique d'Antananarivo

Fonds Documentaire ORSTOM



010007939

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: Ax 7939 Ex: 1

INTRODUCTION

Cette étude avait été entreprise avec l'ambition - de définir les intérêts et les particularités de la nouvelle méthode de sondage « Time Domain Electromagnetic TDEM », particulièrement sur les applications hydrogéologiques et -d'essayer de mettre au point un programme de modélisation directe en TDEM 3D; il existe très peu de programme 3D en électromagnétisme temporel ; cette étude est donc très important dans la mesure où avec quelques études supplémentaires et avec les programmes graphiques adéquats, pourrait être un point de départ du programme d'inversion en TDEM 3D .

Ainsi nous présentons ce rapport en deux grandes parties :

- la première partie consiste à vérifier par des données réelles effectuées dans la région du 'Marais Poitevin', l'importance et l'efficacité de la méthode de sondage TDEM pour la détection des intercalations conductrices (eau salée) ; au point de vue théorique, le TDEM qui s'appuie sur le phénomène d'induction est beaucoup plus sensible et possède une fourchette beaucoup plus fine aux conducteurs que le sondage électrique 'SE'

- la deuxième partie consiste à mettre au point un programme de modélisation 3D en TDEM , présenter les fondements théoriques et donner la notice d'utilisation .

I/ Le sondage TDEM - application aux données de la région du 'Marais Poitevin'

1.1/ Introduction

Nous avons choisi la région du 'Marais Poitevin' pour faire cette étude, car elle possède à la fois - un contexte géologique idéal ; elle présente des couches d'eau douce et d'eau salée dans un encaissant moyennement résistant et un socle résistant - et les infrastructures requises ; nous disposons des forages de référence avec les 'logs géologiques' et les 'logs de conductivités'.

1.2/ Rappel théorique

La méthode électromagnétique repose essentiellement sur le phénomène d'induction . La théorie est régie par les équations de Maxwell qui traduisent la propagation et/ou la diffusion d'ondes.

En bref, pour un sous sol homogène de caractéristique μ (perméabilité magnétique du milieu) et σ (conductivité du milieu),
- en fréquentiel, un signal de fréquence f ($\omega = 2.\pi.f$) présente une profondeur de pénétration p :

$$p = \sqrt{\frac{2}{\mu.\omega.\sigma}} = 503.\sqrt{\frac{1}{\sigma.f}} ;$$

dans ce cas on peut faire du sondage électromagnétique si on utilise un appareil à multifréquence.

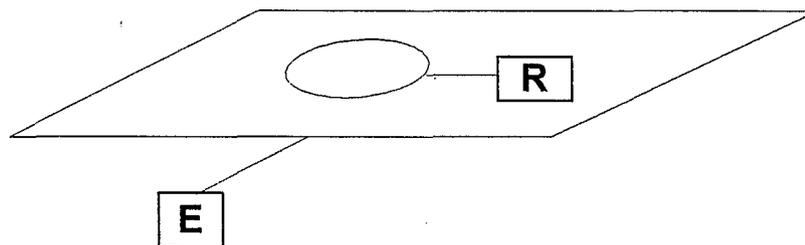
- en temporel, par contre, on envoie un signal à rupture brusque ou de type d''Heaviside'. Cette coupure brusque du signal provoque une diffusion du courant d'induction dans le sous-sol et l'équivalent de la profondeur de pénétration pour un laps de temps t après la coupure est donné par p :

$$p = \sqrt{\frac{2.t}{\mu.\sigma}}$$

donc en TDEM on fait automatiquement du sondage car cette méthode consiste à mesurer la décroissance du signal secondaire en fonction du temps t .

1.3 / Appareil et logiciel d'interprétation

Nous avons utilisé l'appareil du 'Geonics' le 'Protem 47' qui est constitué essentiellement par un émetteur muni d'une boucle émettrice (nous avons choisi une boucle carré de cent mètres de côté) et d'un boîtier récepteur muni d'une petite boucle réceptrice (voir figure ci dessous).



Le logiciel d'interprétation 'ARRTI' d'Interpex' que nous avons disposé ne peut pas lire directement les données du 'Protem 47' ; ainsi nous étions obligés d'écrire un petit programme de transformation des données pour pouvoir l'utiliser.

1.4 / Résultats et interprétations

1.4.1 / Présentation

L'objectif essentiel de cette présente étude est de déterminer l'efficacité du sondage TDEM à la détection d'une intercalation conductrice, plus particulièrement à sa capacité de discerner une couche d'eau salée au dessous d'une couche d'eau douce ; au point de vue théorique, le TDEM qui repose sur le phénomène d'induction est beaucoup plus sensible à la couche d'eau salée qui est très conductrice, qu'à la couche d'eau douce qui est moyennement conductrice. Il pourrait donc discerner les deux couches. Ce qui n'est pas le cas en sondage électrique 'SE' qui repose sur le phénomène de

conduction et qui indique seulement la présence de ces deux conducteurs (formation à eau douce et à eau salée) en bloc mais il n'est pas susceptible de les séparer.

Avec le souci d'une clarté de présentation, nous allons donner les résultats de l'interprétation directement comparés avec les 'logs géologiques' et les 'logs de conductivités' .

1.4.2 / Station 'Pétre 31'

Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique donné par le 'log géologique' et le 'log de conductivités' indique essentiellement :

- 5,50 m d'argile
- 26 m de calcaire à eau douce
- calcaire à eau salée dont l'épaisseur n'est pas déterminée sur le 'log géologique'
- calcaire dur et socle

Interprétation et commentaire

L'interprétation du TDEM indique :

- 4 m de couche superficielle (60 Ohm.m)
- 4 m d'argile (2,5 Ohm.m)
- 23 m de calcaire à eau douce (50 Ohm.m)
- 57 m de calcaire à eau salée (12 Ohm.m)
- substratum (33 Ohm.m)

On constate que le sondage 'TDEM' a pu déterminer avec précision le toit du calcaire à eau salée (à 31 m) . Par contre il ne permet pas de voir l'épaisseur de l'eau salée ; mais il indique seulement la présence d'une couche moyennement résistante au dessous.

Dans ce cas particulier où l'on a une variation alternée des conductivités, le sondage électrique 'SE' semble plus efficace mais toutefois il s'avère très utile de le combiner avec le 'TDEM' pour avoir une bonne précision à la profondeur des toits des conducteurs ; car l'électromagnétisme est sensible aux conducteurs et à leurs profondeurs et l'électrique par contre à la conductance.

1.4.3 / Station 'Pétre 112'

Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique donné par le 'log géologique' et le 'log de conductivités' indique essentiellement :

- 21 m de calcaire à eau douce
- 2,5 m de passage marneux à eau saumâtre où la concentration en sel commence à augmenter selon le 'log de conductivités'
- 9,5 m de calcaire dur
- marne à eau salée dont l'épaisseur n'est pas déterminé sur le 'log géologique'
- socle

Interprétation et commentaire

L'interprétation du TDEM indique :

- 20,5 m de calcaire à eau douce (46,5 Ohm.m)
- 12,5 m de calcaire et de passage marneux à eaux salées (4 Ohm.m)
- 5,5 m de calcaire dur (50 Ohm.m)
- 16 m de calcaire et de marne à eau salée (6 Ohm.m)
- substratum (140 Ohm.m)

Exactement comme dans 'Pétre 31', le TDEM indique avec précision la profondeur des toits des conducteurs (calcaire à eau salée à 21 m de profondeur et le marne à eau salée après le calcaire dur à 40 m de profondeur).

1.4.4 / Station 'Luçon 148'

Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique donné par le 'log géologique et le 'log de conductivités' indique essentiellement :

- 7 m d'argile
- 5,30 m de calcaire argileux
- 16,70 m de calcaire graveleux à eau douce
- 3,50 m de calcaire argileux et marne à eau douce
- 20 m de calcaire graveleux à eau salée
- calcaire marneux à eau salée et socle

Interprétation et commentaire

L'interprétation du 'TDEM' indique :

- 13 m d'argile et de calcaire argileux (6,5 Ohm.m)
- 19,5 m de calcaire graveleux à eau douce (55 Ohm.m)
- 32,2 m de calcaire à eau salée (8 Ohm.m)
- substratum (100 Ohm.m)

D'après le 'log de conductivités' la concentration en sel augmente progressivement à partir de 16 m de profondeur et atteint son maximum au delà de 30 m, mais comme le pourcentage de l'eau dans le calcaire graveleux est plus ou moins faible, le 'TDEM' n'est sensible qu'à la couche avec une concentration maximum en sel (calcaire à eau salée à 33 m de profondeur).

1.4.5 / Station 'Chanais 244'

Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique donné par le 'log géologique' et le 'log de conductivités' indique essentiellement :

- 7 m d'argile
- 27 m de calcaire à eau douce
- 6 à 7 m de calcaire à eau ~~douce~~ saumâtre de concentration en sel qui augmente avec la profondeur
- calcaire et marne à eau salée et socle

Interprétation et commentaire

L'interprétation du 'TDEM' indique :

- 2 m de terre végétale superficielle (50 Ohm.m)
- 6,5 m d'argile (6,5 Ohm.m)
- 30 m de calcaire à eau douce (51 Ohm.m)
- 23,5 m de calcaire à eau salée (8 Ohm.m)
- substratum résistant (2500 Ohm.m)

Comme dans 'Luçon 148', le 'TDEM' indique avec précision la profondeur du toit du calcaire à eau salée où la concentration en sel est maximum (à la profondeur de 39 m) . Par contre il indique seulement le substratum résistant mais il ne permet pas de localiser les résistants.

Le résultat montre une fois encore que le 'TDEM' s'avère très complémentaire avec le sondage électrique 'SE' qui est sensible aux résistants.

1.4.6 / Station 'Chanais 242'

Contexte géologique

Le contexte hydrogéologique donné par le 'log géologique' et le 'log de conductivités' indique essentiellement :

- 30 m de calcaire à eau douce
- 11 m de calcaire à eau salée
- marne à eau salée et socle

Interprétation et commentaire

L'interprétation du 'TDEM' indique :

- 29 m de calcaire à eau douce (136 Ohm.m)
- 30 m de calcaire et de marne à eau salée (16 Ohm.m)
- 27 m de calcaire dur (350 Ohm.m)
- 7 m de calcaire à eau salée (2,5 ohm.m)
- substratum résistant (500 Ohm.m)

Le 'TDEM' confirme sa précision sur la profondeur du toit du calcaire à eau salée (conducteur) (à 30 m de profondeur).

1.4.7 / Station 'Mars 1' et 'Mars 2'

L'interprétation du 'TDEM' indique :

'Mars 1' :

- 43 m de calcaire à eau douce (259 Ohm.m)
- 16 m de calcaire à eau salée (23 Ohm.m)
- calcaire dur et socle (2500 Ohm.m)

'Mars 2' :

- 40,50 m de calcaire à eau douce (226 Ohm.m)
- 5,5 m de calcaire à eau salée (26,5 Ohm.m)
- calcaire dur et socle (2500 Ohm.m) .

1.5/.CONCLUSION

Le sondage électrique reste la méthode la plus usée en hydrogéologie ; il s'appuie sur le phénomène de conduction ; il est sensible aux conductances ou aux résistances mais non pas aux profondeurs et aux conductivités séparées. Mais il s'avère impuissant dans le cas où on a un type de succession de couches « résistant, moyennement conducteur, conducteur et résistant » ; en général il ne permet pas de déterminer ce conducteur mais il donne seulement une conductance équivalente du 'moyennement conducteur' et du conducteur. Même dans le type de cas « conducteur, moyennement conducteur, conducteur et résistant » où il semble fonctionner grâce à la variation alternative des conductivités, il n'indique pas avec précision le toit de ce deuxième conducteur car il est sensible à la conductance et non à l'épaisseur.

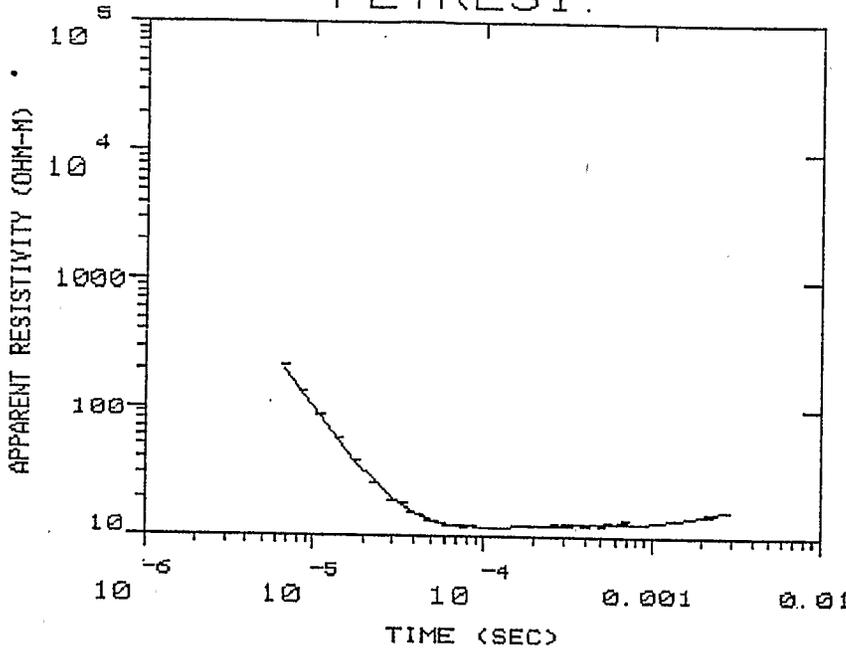
Ces deux types de cas énumérés ci-dessus sont très importants en hydrogéologie ; ils se rencontrent souvent sous forme de « couche résistante, formation à eau douce moyennement conductrice, formation à eau salée conductrice et substratum résistant » ou « argile conducteur, formation à eau douce moyennement conductrice, formation à eau salée conductrice et substratum résistant ». La présente étude aboutit à vérifier pratiquement que le 'TDEM' pourrait résoudre ces problèmes.

Le 'TDEM' repose sur le phénomène d'induction ; le courant d'induction qui se diffuse dans le sous sol excite les conducteurs, particulièrement les formations conductrices, qui par induction créent un champ secondaire mesurable à la réception. Il est donc sensible aux conducteurs, aux certaines gammes de conductivités et aux profondeurs où se produisent l'induction. Ainsi dans les cas qui nous intéressent cette étude

montre clairement que le 'TDEM' est très efficace pour distinguer la formation à eau salée et à eau douce et qu'il s'avère très précis à localiser les conducteurs, plus particulièrement la formation à eau salée. Par contre il n'est pas susceptible de placer correctement les résistants ; ce qui est plus ou moins dans la vocation du phénomène de conduction c'est à dire le sondage électrique.

Ainsi la combinaison des deux méthodes (TDEM et SE) est très conseillée en hydrogéologie à cause de leur complémentarité ; le 'TDEM' place correctement les toits des conducteurs et le 'SE' est plus ou moins susceptible à localiser les autres interfaces.

PETRE31.



MODEL:

53.1	
OHM-M	4.32 M

2.48	
OHM-M	4 M

48.8	
OHM-M	23 M

12.4	
OHM-M	57 M

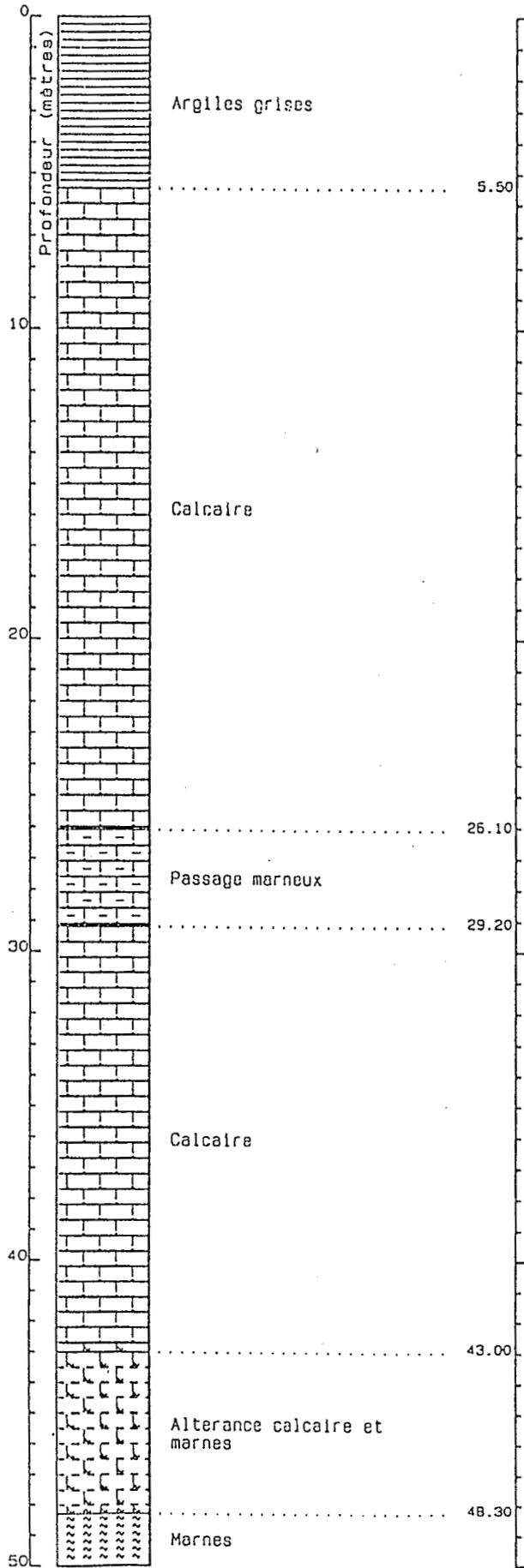
33	
OHM-M	

% ERROR: 4.17
 CALIBRATION: 1
 OFFSET: 37.5 M
 SYSTEM: NONE
 INTERPEX: ARTI

Département : VENDEE
Commune : Moreilles

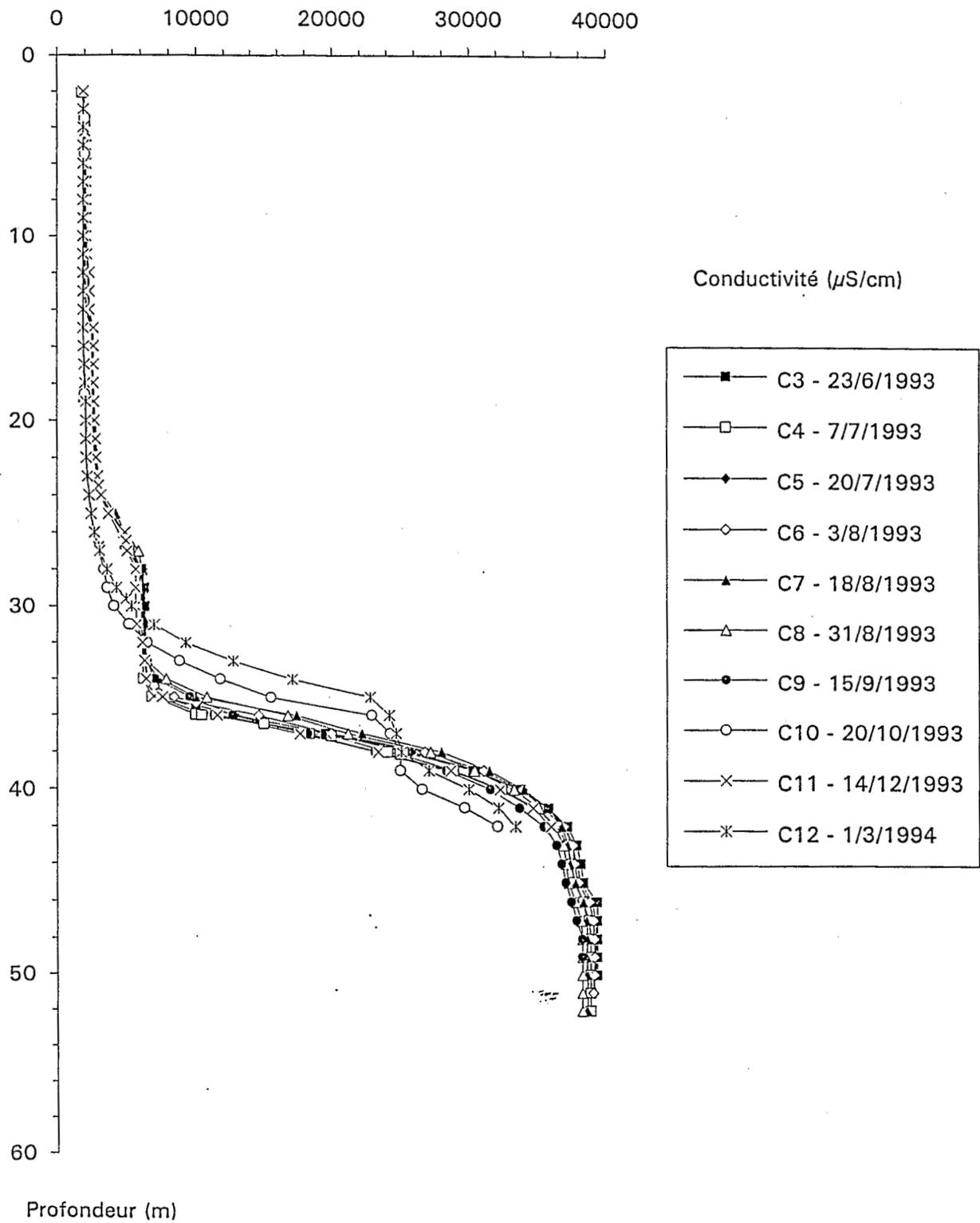
N° classement : 0608-4N-0031
Désignation : Piézo

COUPE LITHOLOGIQUE

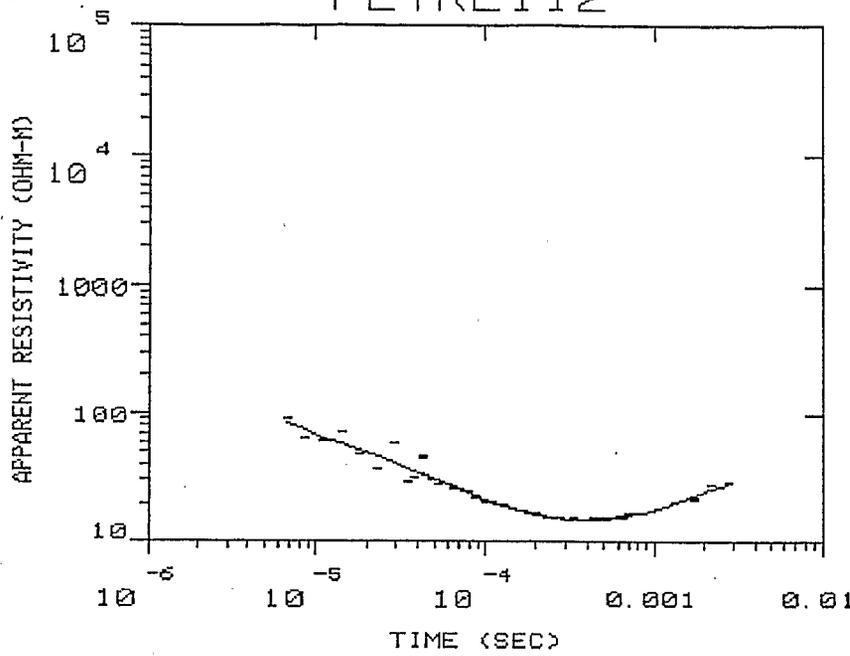


SERVICE DEPARTEMENTAL D'HYDROGEOLOGIE - 85 -

Pétré / Ste-Gemme - Forage F4 (608-4-31)



PETRE112



MODEL:

72.7 OHM-M	2.03 M
58.8 OHM-M	11.8 M
21.2 OHM-M	12.7 M
9.16 OHM-M	36.4 M
169. OHM-M	

% ERROR: 15.7
 CALIBRATION: 1
 OFFSET: 29.5 M
 SYSTEM: NONE
 INTERPEX: ARTI

Département : VENDEE

N° classement : 0585-BS-0112

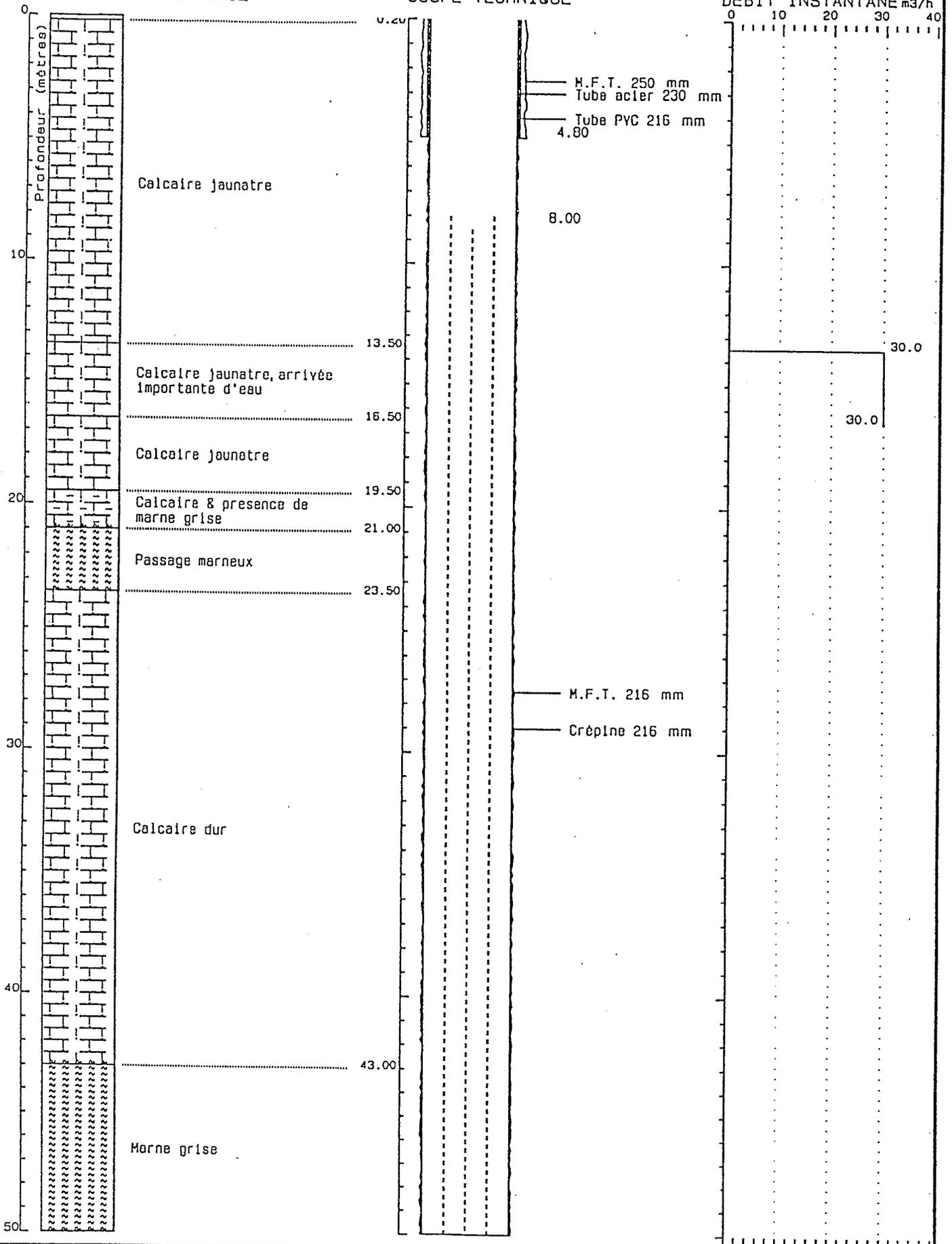
Commune : Ste. Gémme-La-Plaine

Désignation : Piézo

COUPE LITHOLOGIQUE

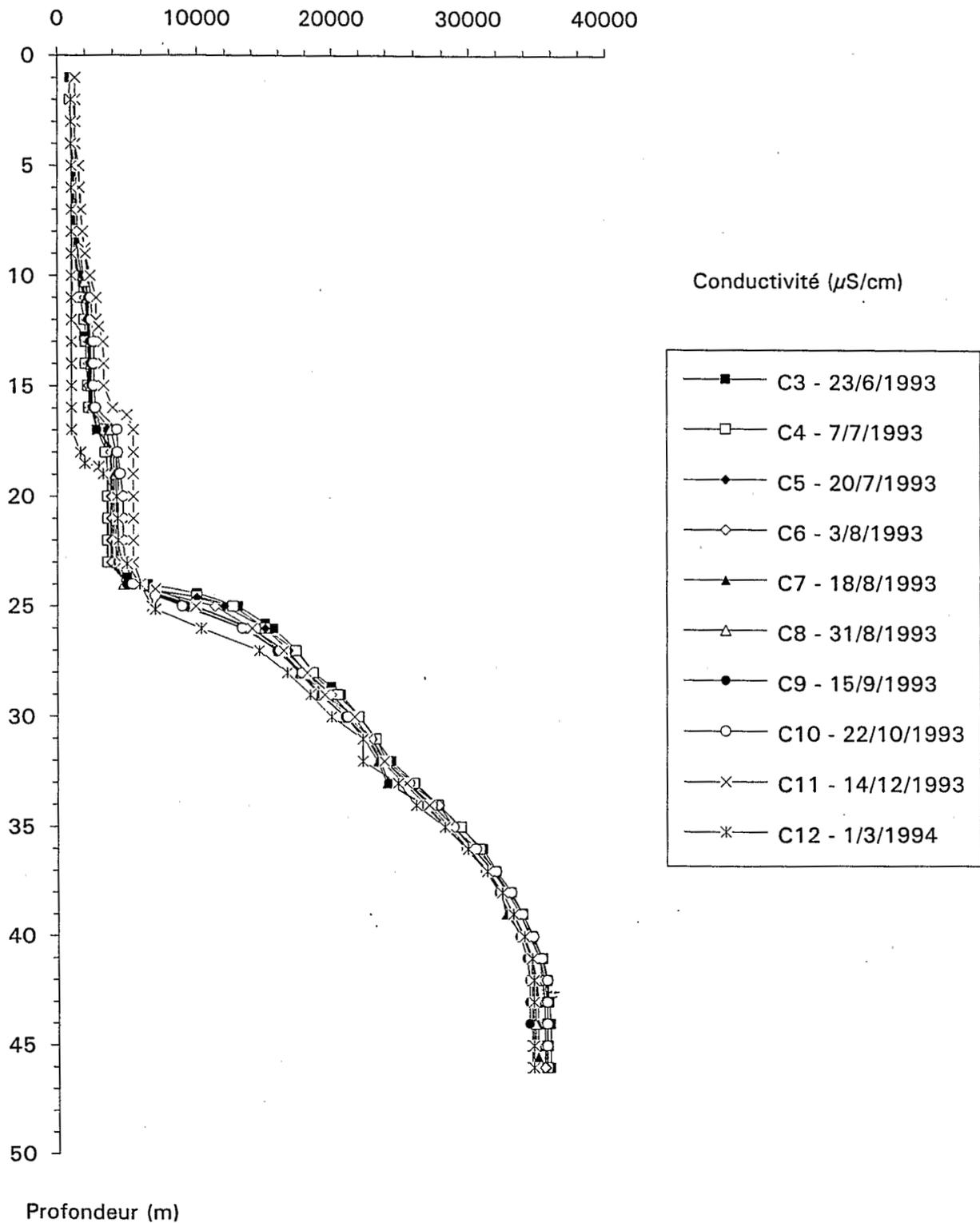
COUPE TECHNIQUE

DEBIT INSTANTANE m^3/h

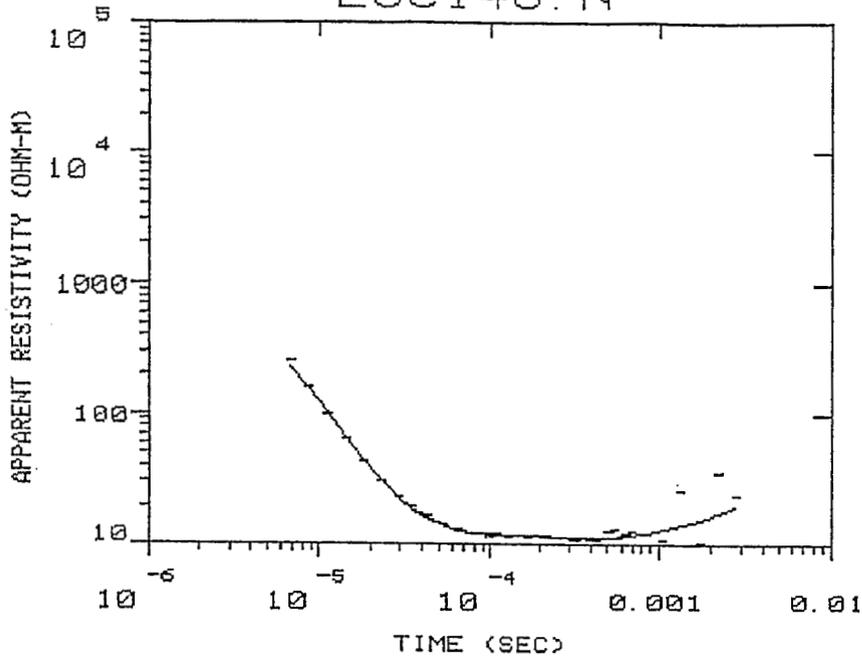


SERVICE DEPARTEMENTAL D'HYDROGEOLOGIE - 85 -

Pétre / Ste-Gemme - Forage F2 (585-8-112)



LUC148.N



MODEL:

32.5 OHM-M	0.994 M
5.35 OHM-M	13.4 M
55.2 OHM-M	19.6 M
9.14 OHM-M	32.2 M
100 OHM-M	

% ERROR: 25.5
CALIBRATION: 1
OFFSET: 40.0 M
SYSTEM: NONE
INTERPEX. ARRTI

Cote NGF : repère + 3,08 m

Indice BRGM : 585-7-148

Coupe technique

Coupe géologique

Diagraphie Gamma Ray

Niveau piézométrique le 4/02/80 : - 0,66 au repère
Cote NGF sol : + 2,45 m

Repère de niveau d'eau
0,68 m/sol

Tubage PVC plein ϕ 180 x 180 mm

Tubage en acier ϕ 239,2 x 244,5 mm

Forage au marteau fond de trou
 ϕ 216 mm
Réalésage en ϕ 304 mm

Forage au marteau fond de trou
 ϕ 216 mm

Tubage PVC crépiné en ϕ 180 x 188 mm

Dépôt sableux

FLANDRIEN

"bri"

Argile bleutée
plastique

7,00m

CALLOVIEN

calcaire
argileux

11,00m

12,30m

BATHONIEN

calcaire
graveleux

17,50m

Zone faillée 28,00m-
sur 0,50 m 29,00m

"banc pourri"

calcaire
argileux
et marnes

32,50m

calcaire
graveleux

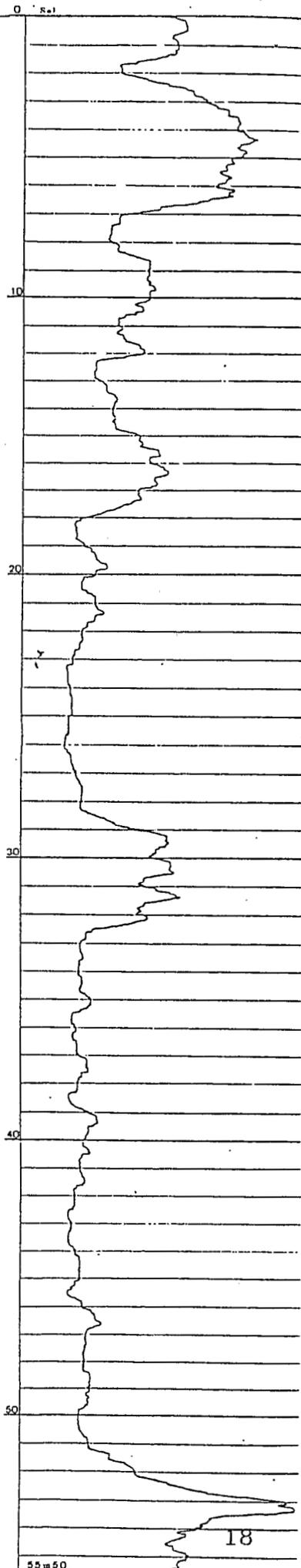
BAJOCIEN

52,20m

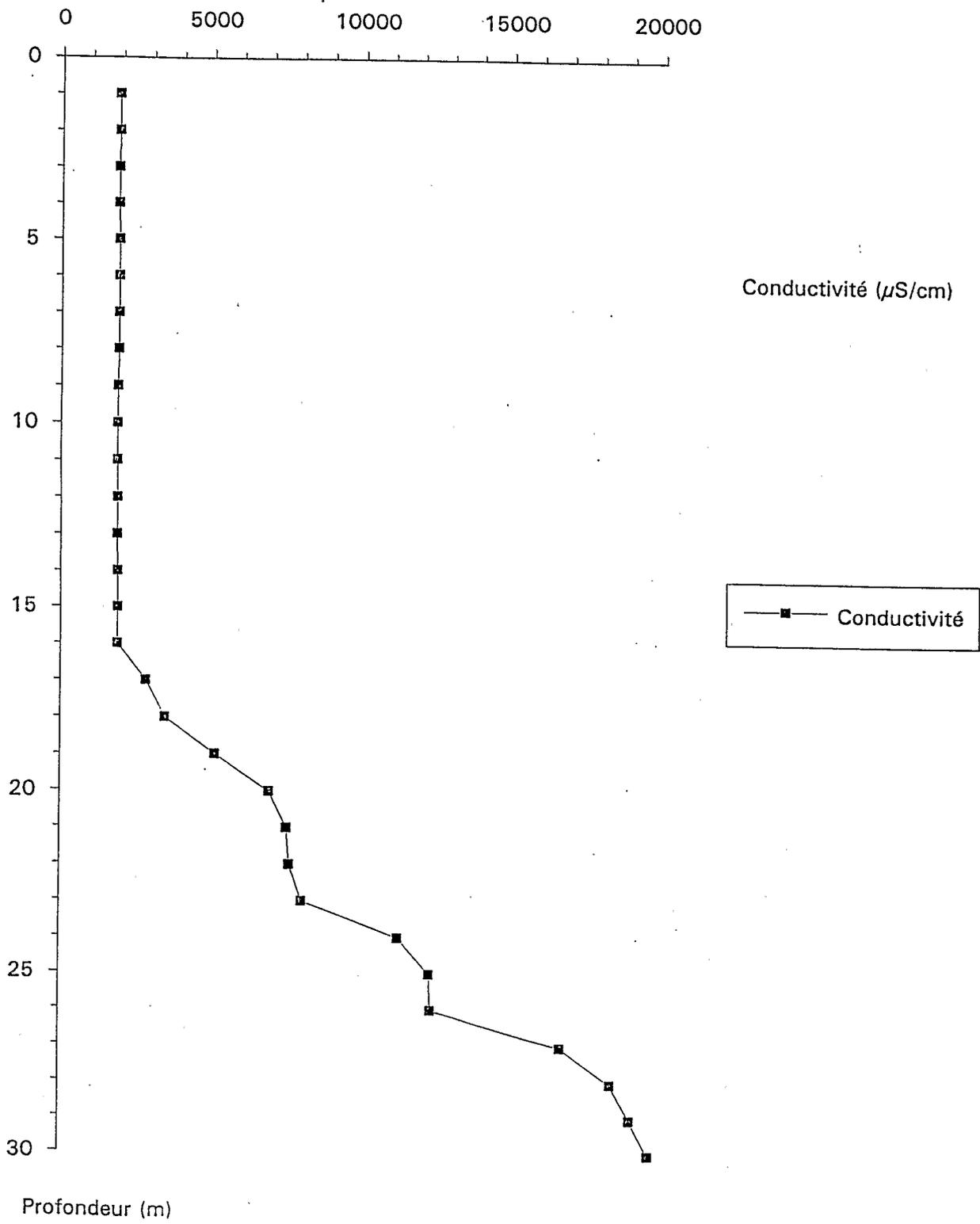
52,50m

calcaire
marneux

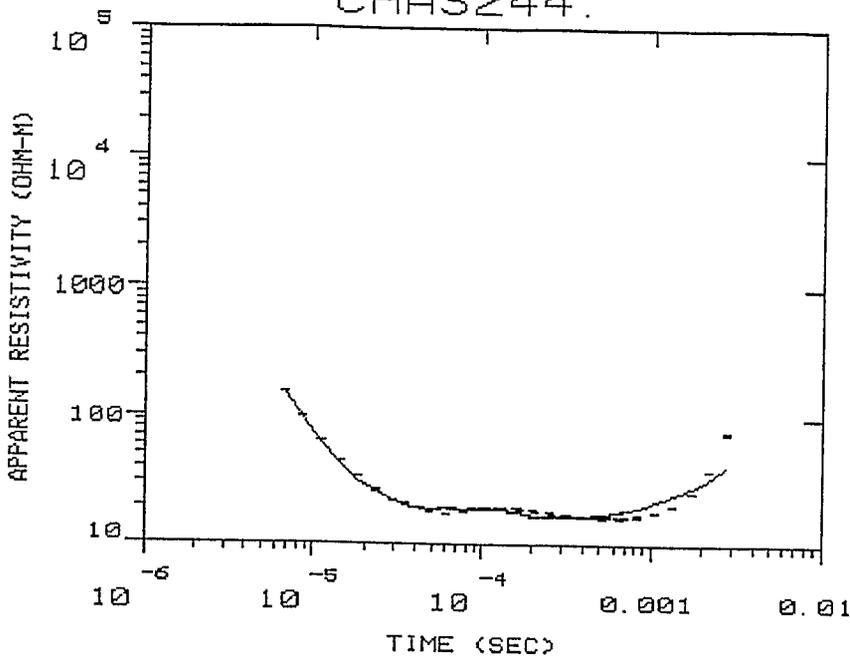
55,50m



Luçon - Forage F2 (585-7-148)
15/3/1994



CHAS244.



MODEL:

50.5 OHM-M	2.07 M
5.45 OHM-M	6.64 M
51.2 OHM-M	30 M
7.91 OHM-M	23.6 M
2534 OHM-M	

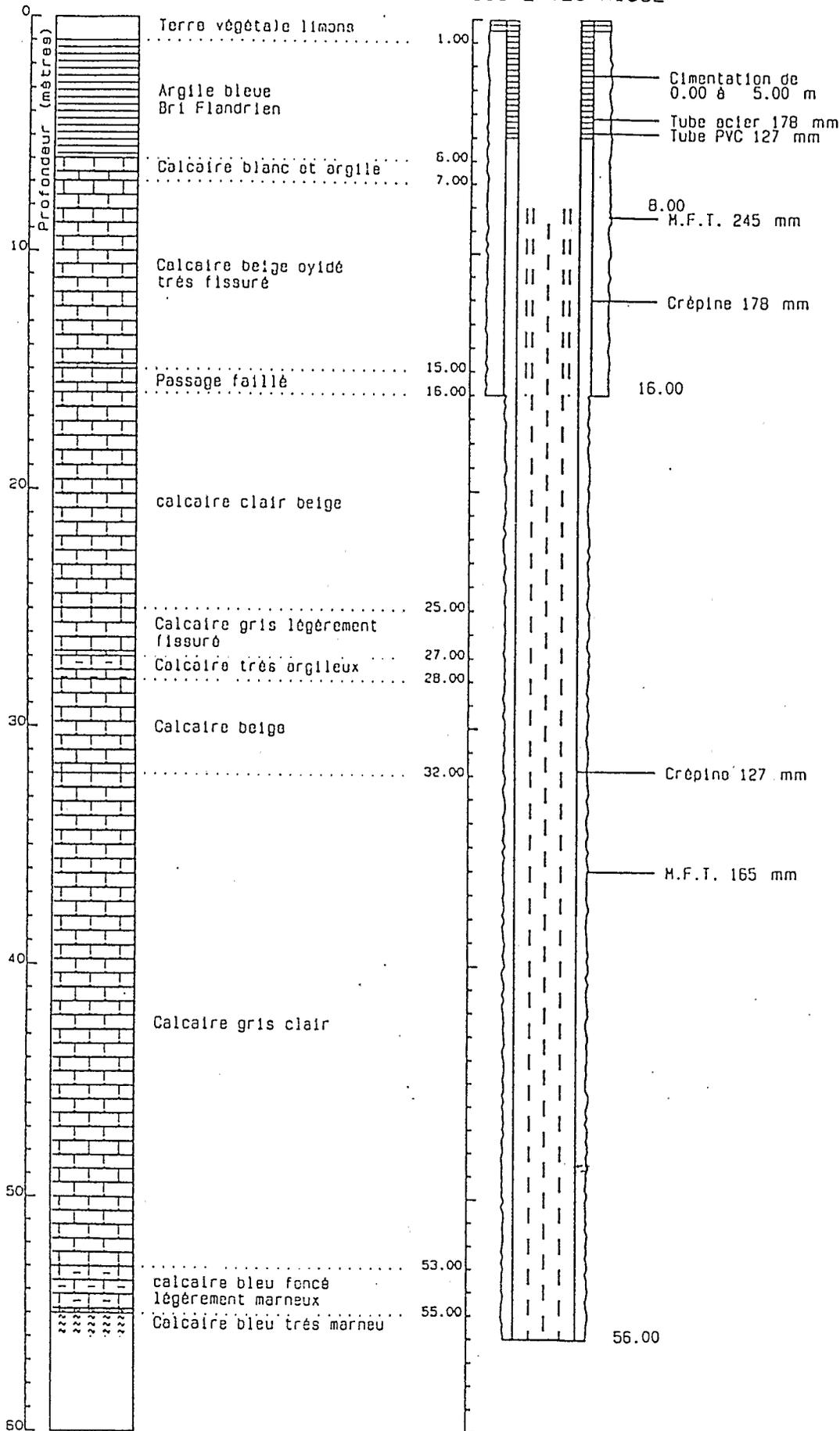
% ERROR: 18.3
 CALIBRATION: 1
 OFFSET: 33.0 M
 SYSTEM: NONE
 INTERPEX: ARRTI

Département : VENDEE
Commune : Chasnaïs

N° classement : 0585-7S-0244
Désignation : F3

COUPE LITHOLOGIQUE

COUPE TECHNIQUE



DATE(S) D'EXECUTION

Début : 04/02/92

Fin : 11/02/92

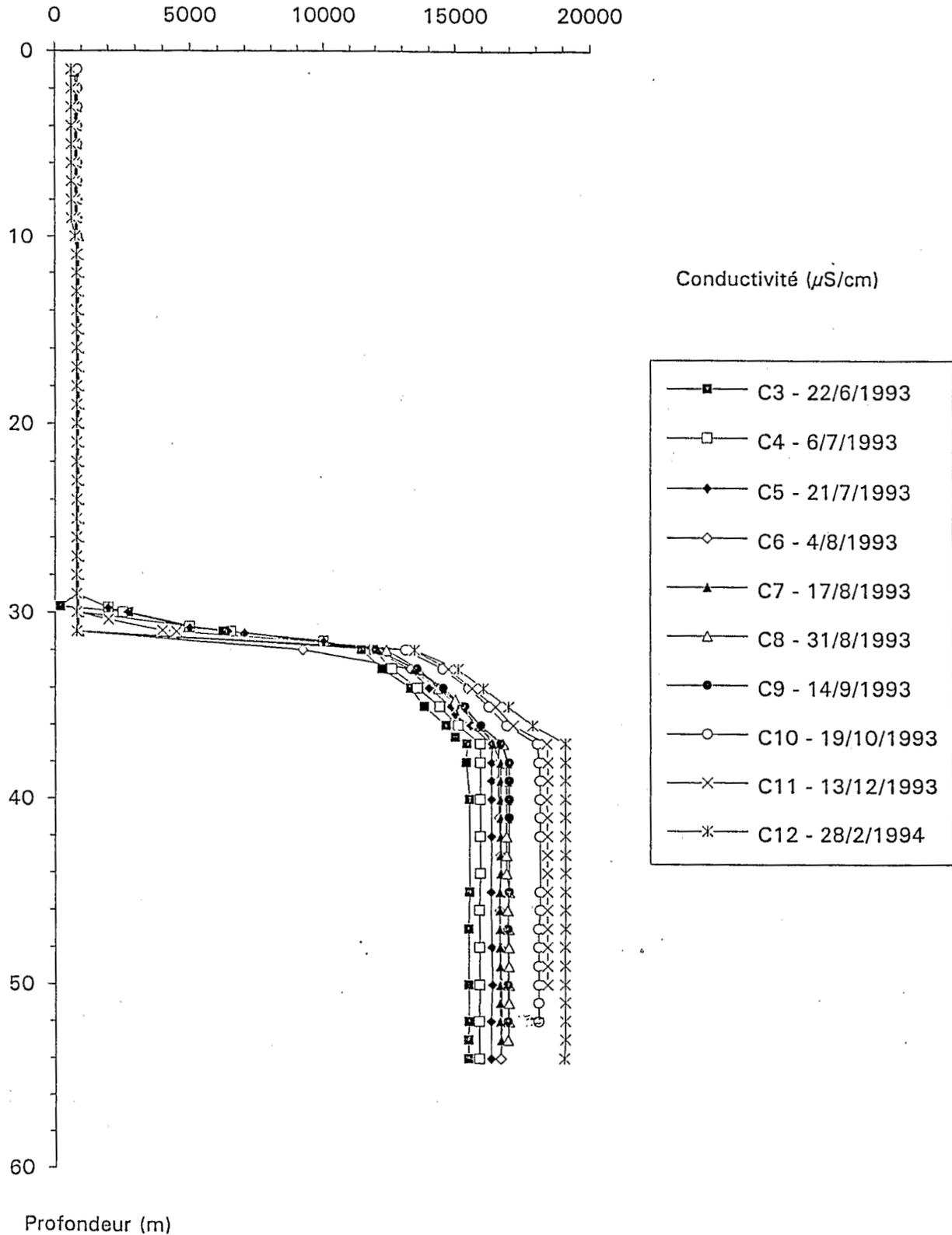
LOCALISATION

X : 326.600 km

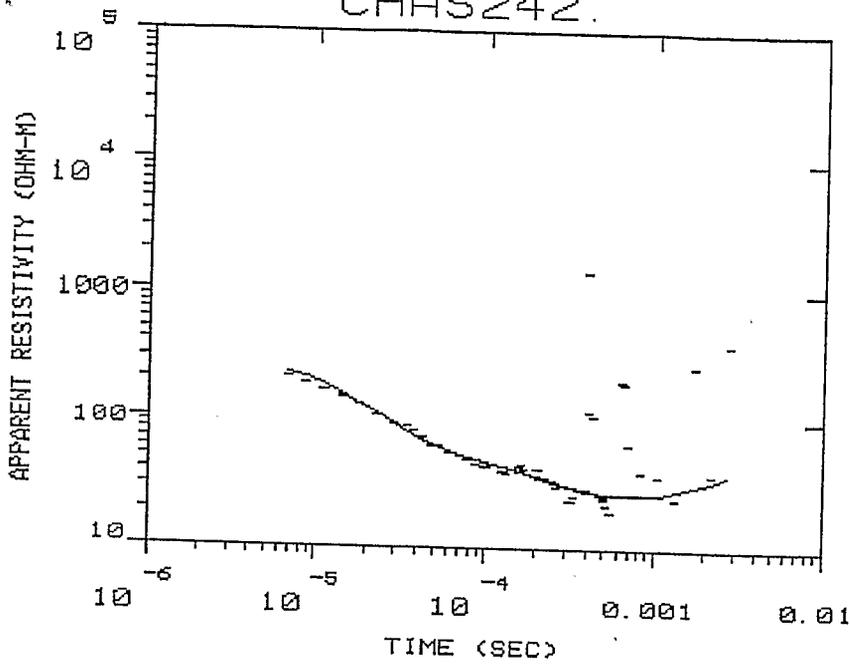
Y : 167.425 km

Z sol : 4.00 m

Chasnais - Forage F3 (585-7-244)



CHAS242



MODEL:

135 OHM-M	29.2 M
--------------	--------

16.2 OHM-M	38 M
---------------	------

350 OHM-M	27 M
--------------	------

2.40 OHM-M	7 M
---------------	-----

500 OHM-M	
--------------	--

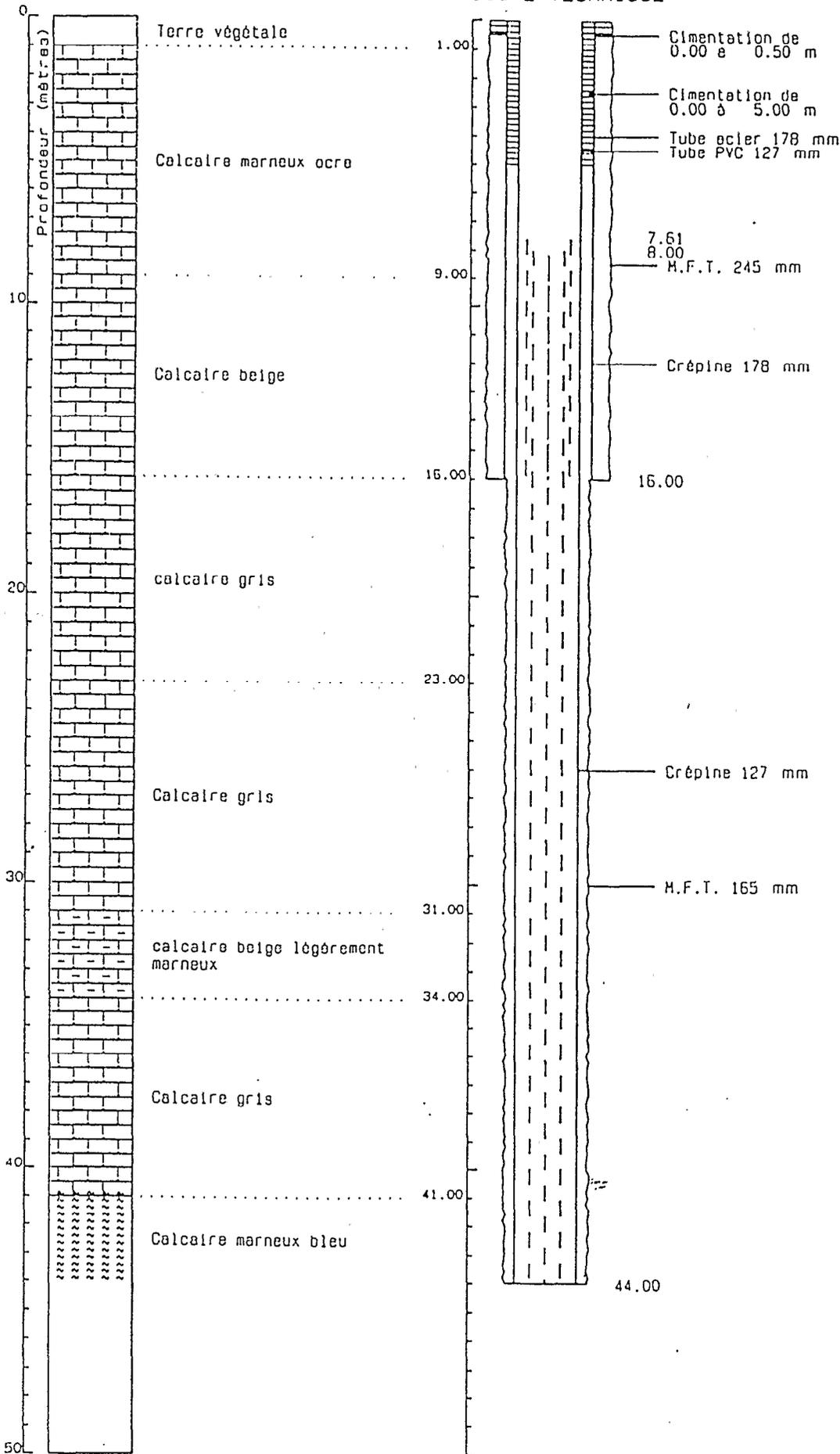
% ERROR: 272.
CALIBRATION: 1
OFFSET: 40.0 M
SYSTEM: NONE
INTERPEX. ARRTI

Département : VENDEE
 Commune : Chasnais

N° classement : 0585-7S-0243
 Désignation : F2

COUPE LITHOLOGIQUE

COUPE TECHNIQUE



DATE(S) D'EXECUTION

Début : 03/02/92

Fin : 04/02/92

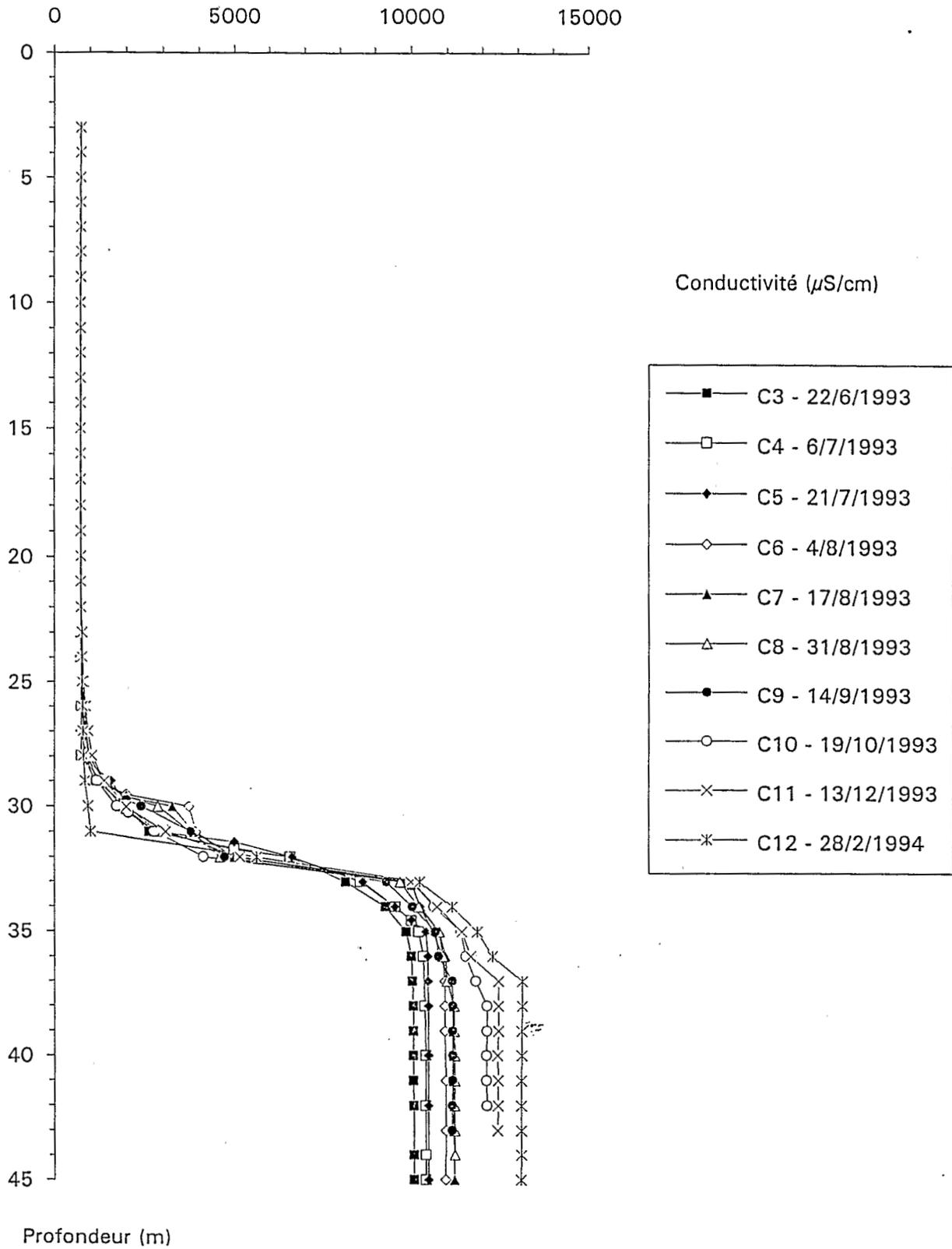
LOCALISATION

X : 326.725 km

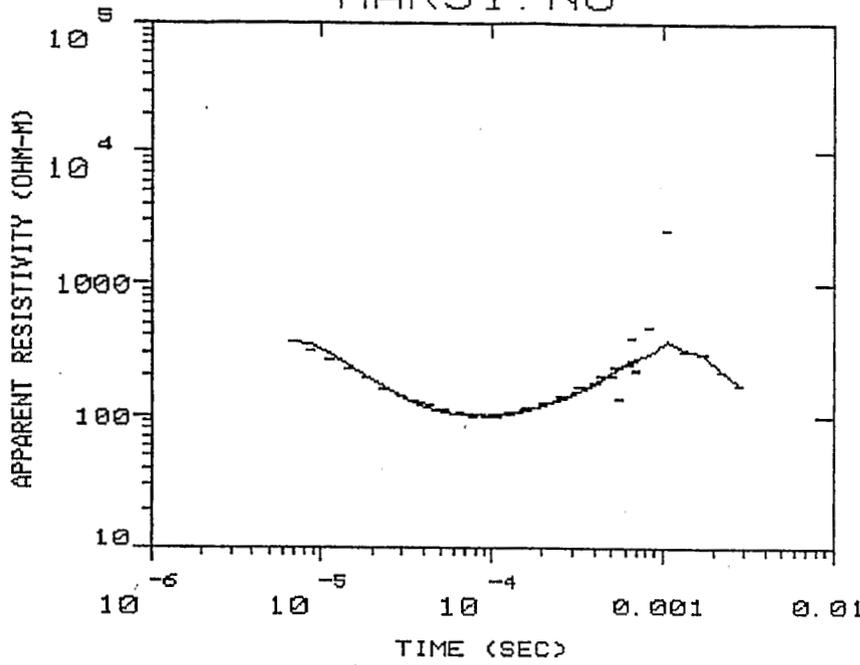
Y : 168.750 km

Z sol : 6.00 m

Chasnais - Forage F2 (585-7-242)



MARS1.NO



MODEL:

259	
OHM-M	42.8 M

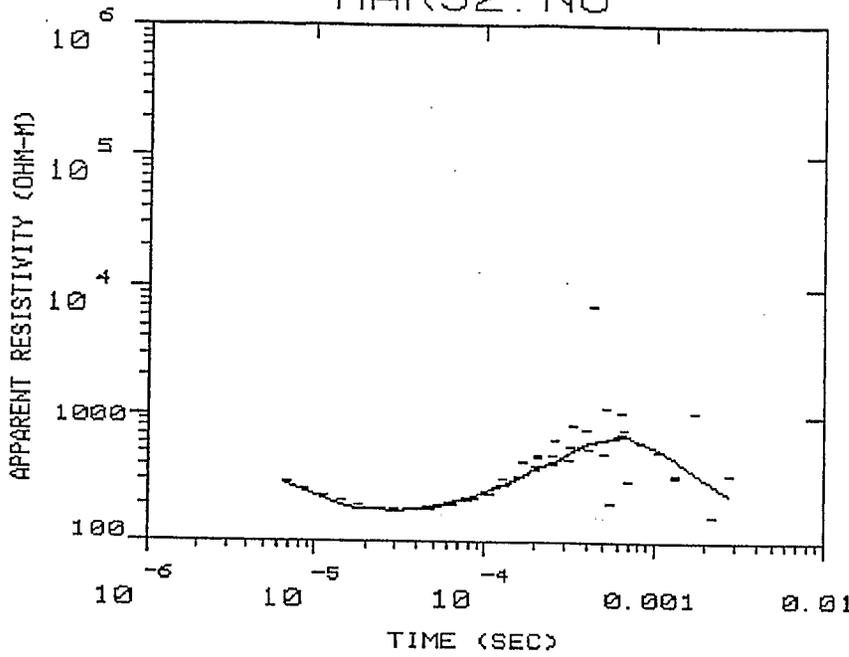
22.9	
OHM-M	16.2 M

2503	
OHM-M	398 M

2.49	
OHM-M	

% ERROR: 56.0
 CALIBRATION: 1
 OFFSET: 40.0 M
 SYSTEM: NONE
 INTERPEX: ARTI

MARS2. NO



MODEL:

226	
OHM-M	40.6 M

26.7	
OHM-M	5.42 M

2500	
OHM-M	486 M

18.6	
OHM-M	

% ERROR: 103.
 CALIBRATION: 1
 OFFSET: 40.0 M
 SYSTEM: NONE
 INTERPEX: ARRTI

II / Programme de modélisation 3D en 'TDEM'

2.1 / Introduction

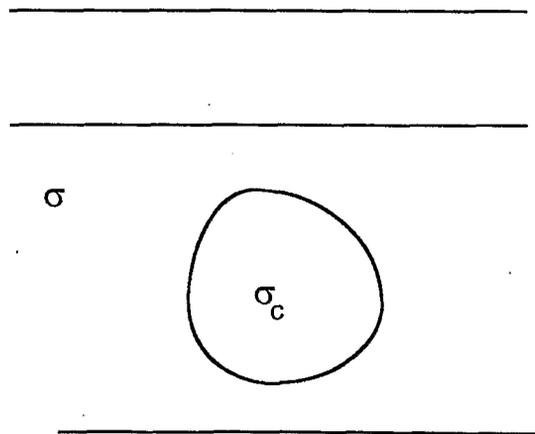
Il existe très peu de programme qui traite le 'TDEM' 3D et même le 3D fréquentiel. A cause de l'évolution en exponentiel des ordinateurs et de l'informatique ; le traitement en 3D, dans certains cas, deviendra dans l'avenir très proche non pas un superflu mais une exigence pour la qualité et la précision de l'interprétation. Ainsi nous avons décidé de ne pas rater ce développement technologique et d'entreprendre par la présente étude un programme de modélisation 3D en 'TDEM' ; à partir d'un programme électromagnétique fréquentiel 3D qui s'appuie sur la méthode des moments nous avons déterminer les réponses en temporel par la transformée inverse de Laplace.

2.2 / Fondements théoriques

le programme comporte deux étapes :

- première étape : on calcule les champs magnétiques et électriques en 3D fréquentiel.

Pour ce faire, considérons un milieu stratifié avec une hétérogénéité à l'intérieur



Nous pouvons considérer que le champ total E est la somme des champs primaires H_p, E_p et des champs secondaires d'induction H_s, E_s :

$$E = E_p + E_s$$

$$H = H_p + H_s$$

on peut considérer une source secondaire qui traduit l'induction dans l'hétérogénéité

$$J_s = i \mu \omega P_s = (\sigma_c - \sigma) E$$

Ainsi dans l'hétérogénéité nous avons comme équations de Maxwell:

$$\nabla \times (E_p + E_s) = -i \mu \omega (H_p + H_s + M_j)$$

$$\nabla \times (H_p + H_s) = \sigma_c E + i \mu \omega P_i$$

où M_j et P_i sont respectivement les moments sources magnétiques et électriques

et en séparant les champs primaires et secondaires nous obtenons :

$$\nabla \times E_p = -i \mu \omega (H_p + M_j)$$

$$\nabla \times H_p = \sigma E_p + i \mu \omega P_i$$

On retrouve exactement les équations en milieu tabulaire

$$\nabla \times E_s = -i \mu \omega H_s$$

$$\nabla \times H_s = J_s + \sigma E_s$$

Ces équations se présentent comme les équations classiques avec une source électrique secondaire J_s

Nous avons ainsi à résoudre

$$\nabla \times \nabla \times E_s - k_c^2 E_s = -i \mu \omega J_s$$

La solution de cette équation est de la forme :

$$E_s = \Gamma(r, r') * J_s = \int_V \Gamma(r, r') J_s dv' = \frac{(\sigma_c - \sigma)}{\sigma} \int_V \Gamma(r, r') E(r') dv'$$

où Γ est la distribution de Green définie par :

$$\nabla \times \nabla \times \Gamma - k_c^2 \Gamma = \delta$$

Soit la forme de Γ :

$$\Gamma(r, r') = \frac{i\omega}{\sigma} [k^2 I - \nabla \nabla'] G(r, r')$$

où $G(r, r')$ est la fonction de Green :
$$G(r, r') = \frac{e^{-ik|r-r'|}}{|r-r'|}$$

En discrétisant le corps en N cellules nous avons alors :

$$E = E_p + E_s = E_p + \frac{(\sigma_c - \sigma)}{\sigma} \sum_{n=1}^N \int_{V_n} \Gamma(r, r') E dv'_n = E_p + \frac{(\sigma_c - \sigma)}{\sigma} \sum_{n=1}^N \int_{V_n} \Gamma(r, r') dv'_n E_n$$

Soit :

$$E(r) = E_p(r) + (\sigma_c - \sigma) \sum_{n=1}^N \Gamma(r, r') E_n$$

On obtient finalement le système sous forme matricielle:

$$(E_p) = [T](E)$$

où [T] représente les coefficients correspondant aux effets d'une cellule sur une autre cellule

Ce système permet de déterminer le champ E dans la cellule ; pour calculer le champ anomalique d'induction à l'extérieur de l'anomalie, en particulier en surface, il faut considérer l'équation générale ci dessus.

Chaque élément de [T] est calculé en deux termes :

- dans un premier temps le terme dû à la stratification qui consiste à calculer les effets indirects de chaque dipôle sur un dipôle par les coefficients de la stratification et par la transformée de Hankel.

- puis dans un second temps le terme dit "effet direct" dû aux effets en milieu homogène de chaque dipôle sur un dipôle.

Nous présentons ci dessous le programme de calcul de la transformée de Hankel 'TH' par laquelle se base le calcul des champs ;

Soit la transformée de Hankel

$$g(r) = \int_0^{\infty} f(\lambda, z) \lambda J_\nu(\lambda r) d\lambda$$

On passe aux logarithme des variables λ et r , on définit ainsi des fonctions nouvelles

$$\lambda = e^{-u} \quad \text{et} \quad r = e^v$$

$$F(u) = e^{-u} f(e^{-u}) \quad \text{et} \quad G(v) = e^v g(e^v)$$

soit :

$$G(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(u) H_\nu(v - u) du = F * H_\nu$$

$$H_\nu \text{ étant le noyau de la transformation : } H_\nu = e^v J_\nu(e^v)$$

Sous la forme discrète on calcule pour différentes valeurs équidistantes $n\Delta$:

$$G^*(m\Delta) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} F(n\Delta) \cdot H_\nu((m - n)\Delta)$$

Nous déduisons la valeur de G approchée par interpolation :

$$G^{**}(v) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} G^*(m\Delta) \cdot P\left(\frac{v}{\Delta} - m\right)$$

$P(u)$ étant le coefficient d'interpolation

$$P(u) = a \frac{\sin(\pi u)}{\sinh(a \pi u)} \quad a \text{ étant une constante}$$

- deuxième étape :

soit $E(p)$ et $H(p)$ les réponses en fréquentiel où $p = i.\omega$ et $\omega = 2.\pi.f$

et en temporel :

$$e(t) = L^{-1} [E(p)]$$

$$h(t) = L^{-1} [H(p)]$$

(L^{-1} représente la transformée de Laplace inverse)

En introduisant l'expression de la source $M(t)$ nous avons :

$$e_m(t) = e(t) * M(t)$$

$$h_m(t) = h(t) * M(t)$$

soit finalement :

$$e_m(t) = L^{-1} [E(p) M(p)]$$

$$h_m(t) = L^{-1} [H(p) M(p)]$$

($M(p)$ est la transformée de Laplace de $M(t)$)

en particulier, pour une source de type d'Heaviside' ($Y(t)$)

$$M(t) = Y(t)$$

$$M(p) = L [Y(t)] = 1/p$$

dans ce cas nous avons :

$$e_m(t) = L^{-1} [E(p) / p]$$

$$h_m(t) = L^{-1} [H(p) / p]$$

La transformée de Laplace dans notre programme se calcule sous la forme d'une transformée en cosinus ;

$$h(r) = \int_0^{\infty} \psi(\omega) \omega \cos(\omega t) d\lambda$$

On passe aux logarithme des variables ω et t , on définit ainsi des fonctions nouvelles

$$\omega = e^{-u} \quad \text{et} \quad t = e^v$$

$$\psi(u) = e^{-u} \Psi(e^{-u}) \quad \text{et} \quad H(v) = e^v h(e^v)$$

soit :

$$H(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(u) K(v - u) du = \psi * K$$

K étant le noyau de la transformation : $K = e^v \cos(e^v)$

Sous la forme discrète on calcule pour différentes valeurs équidistantes $n\Delta$:

$$H^*(m\Delta) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \psi(n\Delta) \cdot K((m - n)\Delta)$$

Les valeurs de $K(n\Delta)$ sont données sous forme d'un filtre (Anderson 1975)

Nous déduisons la valeur H^{**} par la méthode d'interpolation par spline.

Les conductivités ou les résistivités équivalentes sont calculées par la formule classique :

en late time ou zone proche :
$$\rho = \frac{m^{2/3} \mu}{30^{2/3} \pi t} (h_z)^{-2/3}$$

en early time ou zone lointaine :
$$\rho = \frac{2\pi \mu r^3}{9 m t} \left(\frac{m}{4\pi r^3} + h_z \right)$$

2.3 / Notice d'utilisation

Ce programme permet de calculer les champs électromagnétiques rayonnés par une boucle magnétique horizontal ou vertical, la boucle de réception est horizontal ou vertical suivant la configuration choisie.

Les anomalies se trouvent dans la deuxième couche d'un milieu tabulaire à deux couches. Elles se modélisent en forme parallélépipédique discrétisée en mailles qui sont aussi parallélépipédiques.

Nous avons fixés les paramètres relatifs aux précisions de calcul et à la capacité des machines, conformément à notre ordinateur (un P.C.) ; toutefois il n'est pas difficile de les changer et de les adapter.

Il reste pour l'utilisateur à entrer les données et les paramètres relatifs aux terrains et aux mesures :

Configuration de l'appareil :

On peut choisir parmi les cinq configurations suivantes :

- 1 PERP les deux bobines (émetteur et récepteur) sont perpendiculaires
- 2 PARA elles sont parallèles coaxiales
- 3 HCP elles sont en horizontales coplanaires
- 4 VCA elles sont en verticales coaxiales
- 5 VCP elles sont en verticales coplanaires

Écartement et hauteur de l'appareil:

On donne la valeur de la distance entre les deux bobines et leur hauteur par rapport au sol.

Données relatives aux terrains :

On entre les valeurs

- RAU1 la résistivité du premier terrain
- CHI1 la susceptibilités électrique du premier terrain
- E1 l'épaisseur du premier terrain
- RAU2 la résistivité du deuxième terrain
- CHI2 la susceptibilités électrique du deuxième terrain

Nombre de profil et nombre de point par profil :

- Pour avoir une carte, on calcule les réponses sur plusieurs profils ; ainsi on entre
- le nombre de profil et le nombre de station par profil.
 - le pas de mesure suivant x et suivant y
 - la disposition du profil (1 profil en ligne et 0 profil à travers)
 - la position de départ du centre du profil (X et Y)

Corps :

On entre le nombre de corps

les paramètres du corps :

- RAUC la résistivité du corps
- CHIC la susceptibilité électrique du corps

les coordonnées du corps :

- XC, YC et ZC
- les dimensions ΔX , ΔY et ΔZ

chaque corps sont divisé en mailles : dont les dimensions sont dx, dy et dz

Calcul en temporel :

La gamme de temps dépend de l'appareil utilisé et de la profondeur d'investigation souhaitée ; ainsi on entre :

le nombre de décade

le nombre de point par décade

le temps t où on commence l'acquisition

2.4 / Conclusion

Nous avons mis au point, par la présente étude, un programme 3D 'TDEM' qui traite un modèle parallélépipédique pour un milieu tabulaire à deux couches. La contrainte en temps de calcul et en limite de capacité de notre machine (un P.C.) ne nous a pas permis de présenter un programme complet et souple, aussi bien dans le choix du nombre de couche que dans la forme et la position des anomalies ; toutefois il ne sera pas difficile de changer les coefficients et les fonctions de stratification pour l'adapter dans ce sens.

Faute de vélocité et de mémoire suffisante, il n'est pas intéressant à notre niveau actuel d'essayer de faire une inversion. Mais, si on dispose d'une machine beaucoup plus puissant et rapide, ce programme pourrait sans aucun doute servir de point de départ pour réaliser un programme d'inversion en 3D 'TDEM' ; il suffit pour cela d'y ajouter le programme graphique et de l'étoffer un peu plus pour être plus conviviale.