

Mag. 550. 1-01/01.

8/207.

# UNIVERSITE D'ORAN

## INSTITUT DES SCIENCES DE LA TERRE

# THESE

Document soumis le 12/30  
Date 2007 sur 20

Présentée Pour L'obtention du :  
**DIPLOME DE MAGISTER EN  
SCIENCES DE LA TERRE**

Option : Géophysique Appliquée à  
L'Hydrogéologie

par

**MAHAMMED** Djilali Morad

Ingénieur de l'Institut de Physique du Globe-Strasbourg

**RECHERCHE DE MODELES DE  
TRAITEMENT AUTOMATIQUE DES  
DONNEES EN GEOPHYSIQUE ELECTRIQUE  
APPLICATIONS A LA CONNAISSANCE  
DE LA STRUCTURE DES AQUIFERES  
SOUTERRAINS ET A L'ESTIMATION  
DE LEURS RESERVES**

Soutenue le 20 Juin 1992 devant la Commission d'examen :

- |                         |   |                   |
|-------------------------|---|-------------------|
| <b>MM. H. BENHALLOU</b> | Professeur à l'Université USTHB-Alger<br>Directeur du CRAAG | <b>Président</b>  |
| <b>J. MANIA</b>         | Professeur à l'Université de Besançon                       | <b>Rapporteur</b> |
| <b>P. VERDEIL</b>       | Professeur à l'Université d'Oran                            | <b>Examineur</b>  |
| <b>F. BENHABIB</b>      | Maitre de Conférences à l'Université d'Oran                 | <b>Examineur</b>  |

## Avant - Propos

---

L'eau est à la fois l'élément le plus commun et le plus rare à la surface de la Terre et si les Océans représentent 71% de la surface du Globe, près du 1/5 des terres émergées manque d'eau et se montre impropre à toute culture .

Dans le passé, les grandes civilisations se sont développées sur les rives des grands cours d'eaux ou à proximité des sources jaillissantes .

Bien vite ces ressources se montreront insuffisantes et dès le III<sup>e</sup> millénaire avant l'ère chrétienne, Chinois et Egyptiens sauront creuser des puits pouvant atteindre 100 m de profondeur .

Avec le temps, les besoins n'ont cessé de croître et la pollution de plus en plus poussée des eaux superficielles conduira à chercher les ressources complémentaires au niveau des aquifères souterrains qui sur une tranche de 4000 m enfermeraient 22,2 % du total des eaux douces, beaucoup plus par conséquent que ce que peuvent représenter fleuves, rivières, lacs et mers intérieures .

Longtemps considérée par les Géologues comme Science du pétrole ou des mines, la Géophysique est en train d'acquérir droit de cité dans le domaine de l'Hydrogéologie en permettant d'établir depuis la surface l'anatomie des réservoirs aquifères, les volumes emmagasinés tout en donnant également des précisions sur la qualité des eaux .

Mes fonctions dans l'industrie puis mon passage au secteur universitaire m'ayant appris qu'il n'existait dans la littérature qu'une information très restreinte concernant le traitement des données en Géophysique électrique, je devais décider dans le cadre de cette recherche de procéder à l'élaboration de modèles susceptibles d'être traités automatiquement sur ordinateur .

Ainsi les études même anciennes archivées dans les Services s'occupant des problèmes de l'eau pourront être réactualisées et servir de base pour des enquêtes nouvelles .

Dans toutes ses étapes, ce travail n'a pu voir le jour que grâce à l'amitié de nombreuses personnes, qu'elles trouvent ici la marque de ma gratitude .

*Messieurs les Professeurs :*

H. Benhallou , Directeur du Centre de Recherches en Astronomie, Astrophysique et Géophysique CRAAG Alger pour l'honneur qu'il m'a fait de juger ce travail et de présider son jury  
P. Verdeil , à qui je suis gré de m'avoir témoigné une grande confiance dans la conduite de cette recherche . Sa bienveillance a fait que l'on ne compte plus les entretiens que nous avons eus avant et tout au long de sa réalisation .

J. Mania , qui m'a accueilli dans son laboratoire au sein du Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université de Besançon et m'a permis d'utiliser les services de son Centre de Calculs

F. Benhabib , Maître de Conférences en Physique, qui a bien voulu participer à l'appréciation de ce travail et a tenu à manifester par sa présence au jury et sa compétence le principe d'interdépendance des disciplines scientifiques .

Mes collègues et amis, M. Khenafou et B. Kiès qui m'ont apporté une précieuse aide dans l'obtention d'articles scientifiques.

Il m'est également agréable de remercier M.B. Dib de la société Assistance Micro-Informatique . Oran pour les facilités accordées pour la frappe de ce texte .

Ma reconnaissance va enfin à Mme O. Miatti et M. J. Peguenet du Laboratoire de Géologie Appliquée de Besançon pour l'attention et l'aide qu'ils m'ont prodiguées .

# S O M M A I R E

	page
<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	1
<u>CHAPITRE I : LA METHODE DE RESISTIVITES</u>	3
A . <u>Définition de la Résistivité .Loi d' Ohm</u>	3
B . <u>Principes de la Prospection électrique</u>	5
C . <u>Objet du Traitement</u>	9
1. Les milieux tabulaires	9
$\alpha$ . Principe d'équivalence	10
$\beta$ . Principe de suppression	10
$\gamma$ . Anisotropie	11
2. Les milieux non tabulaires	11
$\alpha$ . Etude analytique	11
$\beta$ . Modèles réduits	12
$\gamma$ . Formes à section semi-elliptique	12
<u>CHAPITRE II : LES METHODES D'INTERPRETATION DES SONDAGES</u>	13
<u>ELECTRIQUES</u>	
A . <u>Distribution du Potentiel</u>	13
1. Méthode de développement en série	15
2. Méthode de décomposition	15
3. Méthode d'intégration approchée	16
B . <u>Utilisation d'Abaques</u>	16
1. Interprétation par les abaqués	16
2. Méthode des diagrammes auxiliaires	16
C . <u>Interprétation par Ordinateur</u>	17
1. Bases du Traitement automatique	17
2. Interprétation Indirecte	19
3. Interprétation Directe	19

D . <u>Méthode de GHOSH</u>	20
E . <u>Relation entre la Transformée T et les Paramètres</u> <u>de couches</u>	21
1. Détermination de T	21
2. Détermination des paramètres géoelectriques	22
F . <u>Utilisation de la courbe de DAR-ZARROUK</u>	23
1. Calcul de la courbe D.Z	23
2. Inversion de la courbe D.Z	24
3. Ajustements des épaisseurs et résistivités	25
<u>CHAPITRE III : INTERPRETATION DIRECTE</u>	
<u>INTERPRETATION INDIRECTE</u>	
<u>ORGANISATION DES CALCULS</u>	27
A . <u>Interprétation Indirecte</u>	28
1. Calcul d'une courbe S.E	28
2. Calcul d'une courbe D.Z	29
3. Etapes d'un Traitement Automatique	30
B . <u>Interprétation Directe</u>	31
1. Role de la Transformée T primordial	31
2. Interprétation utilisant la courbe D.Z	39
3. Interprétation Directe et Inverse	43
<u>CHAPITRE IV : APPLICATION A L'ETUDE HYDROGEOLOGIQUE</u>	
<u>DES REGIONS DE TLEMCEN ET TAMANRASSET</u>	44
A . <u>Procédures du Traitement</u>	45
1. Controle préalable des mesures	45
2. Traitement individuel des S.E	46
3. Traitement par sections	46
4. Indetermination due au principe d'équivalence	47
5. Réduction des épaisseurs	47

B . <u>Etude dans la région de Tlemcen</u>	47
1. Présentation de la zone	48
2. Travaux	50
3. Traitement des courbes S.E	51
α . 1 <sup>er</sup> Programme "Sonel"	51
Listing .Exemple 1	
β . 2 <sup>e</sup> programme "Joha"	54
Listing .Exemples 2 à 7	
γ . 3 <sup>e</sup> programme "Bich"	57
Listing .Exemples 8 et 9	
Conclusions	58
δ . 4 <sup>e</sup> programme "Bicha"	62
Listing .Exemples 10 et 11	
Conclusions	64
ε . 5 <sup>e</sup> programme " Z "	65
Listing .Exemple 12	
φ . Conclusions sur les méthodes de traitement	68
4. Résultats	69
α . Interprétation qualitative	82
β . Interprétation quantitative	82
γ . Conclusions	88
C . Etude des Alluvions de l'Oued In-Anguel	90
1. Cadre géographique et géologique	91
α . Géographie	91
β . Contexte géologique	91
γ . Possibilités aquifères	92
2. Execution des Travaux	93
α . Campagnes sismique et électrique	93
β . Campagnes topographique et de forage	93
3. Disposition et Méthodes de la Prospection sismique	94

$\alpha$ . Essais de Tir	94
$\beta$ . Méthode d'exploitation des profils	94
$\gamma$ . Sources d'énergie	94
$\delta$ . Méthode	94
4. Disposition et Méthodes de la Prospection	
électrique	96
$\alpha$ . Disposition	96
$\beta$ . Méthode	96
Exemples 13 et 14	
5. Résultats	100
$\alpha$ . Carte des Profondeurs du Substratum	
rapide	100
$\beta$ . Carte des Résistivités vraies des	
Alluvions aquifères	100
$\gamma$ . Carte des Conductances des	
Alluvions aquifères	101
6. Calcul de la Réserve d'eau	102
$\alpha$ . Détermination de la Porosité des	
Alluvions	102
$\beta$ . Relation entre la Porosité et la	
Résistivité des Alluvions	103
$\gamma$ . Calcul de la Réserve d'Eau	103
 <u>CONCLUSION GENERALE</u>	 106
Liste des figures	
Bibliographie	

# LISTE DES FIGURES

Figure	Entre pages
1	Echelles de résistivités et de vitesses sismiques.....4-5
2	Demi-milieu de résistivité $\rho$ .....6
3	Modèle de couches $\rho_v$ , $h_v$ .....22
4	Courbes S.E - courbes D.Z correspondantes .....25-26
5	Transformation de S.E pour l'interprétation autom.....32-33
6	Dispositifs quadripoles .Echantillonnage optimale.....43-44
7	Traitement de S.E par sections.....46-47
8	Coupe des formations géologiques de Tlemcen.....49-50
9	Interp.semi-automatique Directe . S.E 28 Tlemcen.....53-54
10	Interpr. automatique Indirecte . S.E 2 -----55-56
11	----- S.E 8 ----- --
12	----- S.E 40 ----- --
13	----- S.E 316 -----56-57
14	----- S.E 303 ----- --
15	----- S.E 28 ----- --
16	Interpr. automatique Directe . 1 <sup>er</sup> Essai théorique...60-61
17	----- S.E 2 Tlemcen.....61-62
18	----- 2 <sup>es</sup> Essai théorique...64-65
19	----- S.E 6 Tlemcen..... --
20	----- S.E 19 -----67-68
21	Cartes d'équirésistivités appar. AB=160,600m.....69-70
22	----- AB=1000m.....71-72
23	----- AB=1600,3000m.....72-73
24	Coupes d'équirésistivités.....73-74
25	-----74-75
26	-----75-76
27	Courbes S.E 303,304,323,327,333 Tlemcen.....77-78
28	----- 7,9, 317,332,339 -----78-79
29	Corrélation résistivités- faciès géologiques.....--
30	Diagraphies du forage Zd 1b Tlemcen.....79-80
31	Courbes S.E 309,311,315,334 -----81-82
32	Coupe géoélectrique -----83-84
33	Coupe -----84-85
34	Coupe -----86-87
35	Dispositif parallèle à une faille.S.E 5,23,38 Tlemcen.86-87
36	----- perpendiculaire ----- S.E 18,39 -----88-89
37	Carte d'isobathes du substratum résistant Tlemcen.....89-90
38	Situation de l'étude In-Amguel.....91-92
39	Dispositifs sismiques et dromochroniques.....94-95
40	Méthode sismique des délais.....94-95
41	Courbes S.E 29,246,281 In-Amguel.....97-98
42	----- .8,18,194,199,214,238 -----97-98
43	Interp. automatique Directe S.E 2 -----98-99
44	----- S.E 48 -----98-99



45	Données des forages et de l'interp. autom. In-Amguel..99-100
46	----- ..99-100
47	----- ..99-100
48	Carte de position, carte des profondeurs du Substratum.100-101
49	Carte des résistivités vraies, carte des conductances...--
50	Schéma de calcul de la réserve d'eau .....104-105

Tableau 1	: Coefficients du Filtre de H.K.Johansen.....29
2	: Valeurs de la Fonction de Bessel.....32
3	: ----- .....33
4	: Points d'échantillonnage .....36
5	: Coefficients du Filtre d'autres dispositifs.....43

## INTRODUCTION GENERALE

---

L'évolution démographique, l'amélioration des qualités de vie ont entraîné au cours des dernières années un fort accroissement des besoins en eau.

Dans la recherche de ressources nouvelles, les Hydrogéologues outre leurs moyens propres ont été amenés à faire appel de plus en plus fréquemment à la Géophysique et en particulier à la méthode des résistivités.

Lors de l'interprétation de ces mesures, les données de départ géologiques ou hydrogéologiques, ne sont pas exhaustives et tendent à être complétées par des informations nouvelles issues de forages plus récents, de campagnes piézométriques, etc...

En outre, dans nombre d'études relativement anciennes, les techniques d'interprétation manuelles, ne donnent pas de marges aux solutions et n'offrent pas la précision et la rapidité qui peuvent être atteintes aujourd'hui par traitement automatique des données sur Ordinateur.

Ces possibilités nouvelles, il nous a paru important de les exploiter en réinterprétant des études issues de mesures que nous avons effectuées il y a quelques années.

L'interprétation des sondages électriques dans la méthode des résistivités est relativement bien maîtrisée pour le modèle tabulaire c'est à dire dans le cas d'un sol assimilé à un demi-milieu homogène ou stratifié horizontalement.

De nombreux essais ont également été effectués alors même que cette hypothèse s'avère insuffisante, et que l'on est en présence d'une hétérogénéité latérale de conductivité, ce qui est le plus souvent le cas pour les structures géologiques réelles.

Des études théoriques se trouvant dans nombre d'articles surtout d'origine anglo-saxonne ,ont été effectuées au cours des dernières années essentiellement pour résoudre le problème direct c'est à dire l'obtention des épaisseurs et résistivités des couches en partant de la seule opération de transformation de la courbe de sondage électrique .

Dans ce travail ,après une synthèse des principes ainsi développés nous rechercherons des techniques d'interprétation appliquées à des cas de complexité croissante ,techniques qui feront largement appel au traitement automatique des données et à l'Ordinateur.

Nous appliquerons alors les programmes établis aux courbes de sondages obtenues lors de deux campagnes de Géophysique électrique nous avons effectuées dans deux régions géographiquement et de contexte géologique très différentes :

- les piémonts des Monts de Tiemcen
- les contreforts du massif du Hoggar dans la région de Tamanrasset

Dans le premier cas,nous nous efforcerons de préciser la structure géologique d'une zone particulièrement accidentée bordant la Méséta oranaise.

Dans le second cas,l'étude portera sur les alluvions de l'Oued In-Amguel .

Il s'agira ici de définir la géométrie de l'aquifère et de chiffrer la réserve en eau à partir d'une interprétation géophysique intégrée portant à lafois sur les mesures de résistivité et les résultats d'une campagne sismique .

## LES METHODES DE RESISTIVITES

A DEFINITION DE LA RESISTIVITE ,CONDUCTIVITE ,LOI D'OHM :

Les méthodes de prospection électrique visent à mesurer la résistivité électrique des roches dans le sous-sol. La résistivité d'un milieu est définie par la loi d'Ohm: le champ électrique  $\vec{E}$  appliqué en un point de ce milieu est proportionnel au vecteur densité de courant  $\vec{j}$ . Le coefficient de proportionnalité est la résistivité  $\rho$ .

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{j} \quad (1-1)$$

Dans l'hypothèse générale d'un milieu anisotrope  $\rho$  est un tenseur.

Nous ne considérerons ici que des milieux isotropes,  $\rho$  sera donc un scalaire.

Dans le système MKS, les unités sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \vec{E} &: \text{en Volt/m} \\ \vec{j} &: \text{en Ampère/m}^2 \\ \rho &: \text{en Ohm.m} \end{aligned}$$

Il est parfois commode de raisonner en terme de conductivité (notée  $\sigma$ ) qui est l'inverse de la résistivité.

La gamme de conductivités observées dans la nature est très étendue, de  $10^{-8}$  à  $10^7$   $\text{Ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ . On distingue plusieurs types de conductivités:

- La conductivité métallique, peu fréquente dans la nature : c'est la conductivité des métaux et du graphite. Son ordre de grandeur très élevé ( $10^7 \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) est du à la présence dans les métaux d'un très grand nombre d'électrons mobiles.

- La conductivité de la plupart des cristaux constituant les roches est du type semi-conducteur. Malgré une structure d'isolant (cristal pur, à 0° K) une certaine conductivité est due à la libération d'électrons et/ou à l'apparition de "trous" provoqués par l'énergie cinétique (température) et/ou à la présence d'impuretés dans le réseau cristallin.

Généralement plus faible que la conductivité métallique aux températures ordinaires, cette conductivité augmente rapidement avec la température.

- La conductivité ionique, celle des électrolytes solides se fait par migration des ions à travers les défauts du réseau cristallin.

- La conductivité électrolytique due aux liquides présents dans les roches poreuses. Elle dépend évidemment de la quantité de liquide, de sa composition et de sa répartition à l'intérieur de la roche.

Il est important de remarquer que, à l'exception des métaux, la conductivité des solides croît rapidement en fonction de la température. Aussi dans certains cas, la mesure de la conductivité peut être un élément intéressant de la prospection géothermique.

Il ressort de ces observations que la grande variété des résistivités représente à la fois la force et la faiblesse de la méthode des résistivités : sa force car elle facilite la distinction des différents terrains, sa faiblesse car elle entraîne parfois des variations sans rapport avec le problème que l'on va étudier. (Fig. 1)

La liaison entre la résistivité et le faciès géologique est donc une notion à degré variable, nous admettons cependant que la connaissance de la répartition des résistivités dans le sous-sol est pratiquement équivalente à celle des roches ou des faciès, donc à celle de la structure profonde des terrains.

## B PRINCIPES DE LA PROSPECTION ELECTRIQUE

Pour mesurer la résistivité du sous-sol la méthode la plus couramment employée consiste à envoyer un courant dans le sol à l'aide de deux électrodes A et B .

Le potentiel établi dans le sol par ce courant est mesuré à l'aide de deux autres électrodes M et N. La circulation du courant dans un milieu homogène obéit au principe de la conservation de la charge qui s'exprime par la relation:

$$\operatorname{div} \vec{j} = - \partial q / \partial t \quad (I-2)$$

ou  $\vec{j}$ , comme précédemment, représente le vecteur densité de courant ( $A/m^2$ ) et  $q$  est la densité de charge ( $C/m^3$ )

Cette relation, que l'on appelle aussi "équation de continuité" de la charge, devient dans le cas d'un état stationnaire (c'est à dire en courant continu):

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0 \quad (I-3)$$

Si  $\rho$  est la résistivité du milieu, on sait que  $\vec{j}$  est relié au champ électrique  $\vec{E}$  par la loi d'OHM (I-1):

$$\vec{j} = \vec{E} / \rho = -(\operatorname{grad} V) / \rho \quad (I-4)$$

ou  $V$  est le potentiel électrique.

Nous supposons tout au long de cet exposé que les milieux considérés sont isotropes, c'est à dire que  $\rho$  sera une fonction scalaire du point considéré. Les vecteurs  $\vec{j}$  et  $\vec{E}$  sont donc colinéaires.

Des relations (I-3) et (I-4) on déduit:

$$\operatorname{div} (1/\rho \operatorname{grad} V) = 0 \quad (I-5)$$

Soit: 
$$\operatorname{grad} (1/\rho) \cdot \operatorname{grad} V + 1/\rho \operatorname{div} \operatorname{grad} V = 0 \quad (I-6)$$

Ceci est l'équation fondamentale de la prospection électrique.

Dans un milieu homogène ( $\rho$  constant) l'équation (I-6) se réduit à l'équation de Laplace:

$$\Delta V = 0 \quad (I-7)$$

Supposons à présent que l'on place une source P de courant d'intensité I, dans un milieu homogène infini. Par raison de symétrie sphérique, le potentiel en un point quelconque du milieu sera une fonction de sa distance r au point P.

L'équation de Laplace en coordonnées sphériques se réduit à:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + (2/r) \frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad (I-8)$$

dont une solution est :

$$V = D - C/r \quad (I-9)$$

On suppose que le potentiel est nul à une grande distance du point d'injection, donc la constante D est nulle. Les équipotentielles sont des sphères et le champ est radial, on peut écrire:

$$j = -(1/\rho) \cdot \frac{\partial V}{\partial r} = - (1/\rho) \cdot C/r^2 \quad (I-10)$$

Le flux du vecteur densité à travers une surface S entourant le point P étant égal à l'intensité totale I, il vient:

$$I = \int \vec{j} \cdot \vec{ds} = \int (\vec{E}/\rho) \cdot \vec{ds} = \int - (C/\rho \cdot r) \cdot dS$$



Fig.2 Demi-milieu infini homogène, repéré par un système d'axes orthonormés Oxyz

Oxy représente la surface du sol

Oz est vertical descendant

$\rho$  est une fonction de Z seul  $\rho(Z) = \alpha \quad Z < 0$

$\rho \quad Z > 0$

Le potentiel en un point quelconque du milieu infini à une distance  $r$  de la source sera donné par

$$V = (I \cdot \rho / 4\pi) \cdot 1/r$$

Considérons un demi-milieu infini homogène (fig.2) lorsque la source  $P$  se trouve à la surface du sol, le flux de courant à travers une demi-sphère de rayon  $r$  sera donné par la relation:

$$2\pi \cdot r^2 \cdot J = - 2\pi C/\rho = I$$

Donc le potentiel en tout point  $P$ , placé à une distance  $r$  de la source sera:

$$V(P) = (I \cdot \rho / 2\pi) \cdot 1/r \quad (I-11)$$

S'il y a plusieurs sources de courant, le potentiel total créé en un point d'observation se calcule en ajoutant le potentiel créé par chaque source considérée séparément. Ainsi la différence de potentiel  $\Delta V$  mesurée entre deux points d'observation  $M$  et  $N$  en présence de deux sources  $A$  et  $B$  d'intensité respective  $I$  et  $-I$  va s'exprimer par

$$\Delta V = V_M - V_N = (I \cdot \rho / 2\pi) \cdot (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN)$$

Lorsque l'on a quatre électrodes  $A, B, M, N$  la résistivité du sous-sol est donnée par:

$$\begin{aligned} \rho &= \Delta V / I \cdot 2\pi / (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN) \\ &= K \Delta V / I \end{aligned} \quad (I-12)$$

L'équation (I-12) ne permet de mesurer exactement la résistivité du milieu que si celui-ci est homogène. Dans le cas où le milieu n'est pas homogène, l'équation (I-12) permet de définir la *résistivité apparente*. La résistivité apparente d'un milieu inhomogène est égale à la résistivité vraie d'un milieu homogène isotrope fictif dans lequel, pour une même répartition des électrodes et pour une même intensité, le  $\Delta V$  calculé est égal au  $\Delta V$  mesuré dans le milieu inhomogène.

Dans l'équation (I-12) le coefficient  $K$  ne dépend que du dispositif. On va donner ici les valeurs de  $K$  pour les principaux dispositifs utilisés en prospection électrique (Quadripoles rectilignes).



- Dispositif Schlumberger, dans lequel les points d'injection sont A et B, les points de mesure M et N groupés de part et d'autre du milieu O de AB. On mesure la différence de potentiel entre M et N mais pratiquement MN étant très petit devant AB cela revient à mesurer le gradient du potentiel vers lequel tend  $\Delta V_{MN}/MN$  lorsque M et N tendent vers O.

La courbe du sondage électrique est la courbe de la résistivité apparente en fonction de la demi-longueur de ligne  $AB/2$ . MN étant petit devant AB on utilise généralement pour K la relation

$$\rho_a = K \cdot \Delta V/I$$

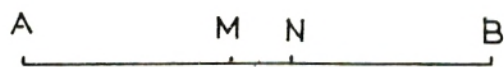
$$K = \pi \left( \left( \frac{AB}{2} \right)^2 / MN - MN/4 \right)$$

- Dispositif Wenner, comportant quatre électrodes équidistantes. La résistivité apparente est calculée en faisant varier le paramètre  $a$  :

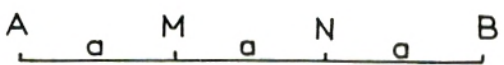
$$K = 2\pi \cdot a$$

- Dipole-dipole polaire, les lignes d'émission AB et de réception MN sont petites par rapport à la distance qui sépare AB et MN. Le coefficient K prend la valeur :

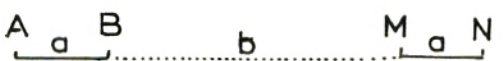
$$K = \pi \left( \left( \frac{a^3}{b^2} \right) - a \right)$$



Dispositif Schlumberger



----- Wenner



----- Dipôle  $a \ll b$

## C OBJET DU TRAITEMENT :

Les mesures sur le terrain permettent d'obtenir une courbe de sondage électrique qui est une suite de valeurs de résistivité apparente  $\rho_a$  en fonction d'un écartement d'électrodes  $r$ .

La résistivité apparente mesurée  $\rho_a$  dépend de la distribution des résistivités vraies des couches du sous-sol à l'aplomb de la station de mesure. Le problème à résoudre est alors de retrouver cette distribution à partir des valeurs de  $\rho_a$  qui résultent des mesures faites sur le terrain.

La résolution des courbes de sondage électrique (S.E) est laborieuse quand on suppose n'avoir à faire qu'à des couches horizontales (milieux tabulaires), elle devient très difficile si l'on abandonne cette hypothèse. Il n'en est pas moins important de savoir comment d'autres structures modifient la forme des courbes de S.E ne serait-ce que pour prévoir et éventuellement corriger leurs effets perturbateurs.

### 1 ) LES MILIEUX TABULAIRES :

Il s'agit des couches de stratifications horizontales supposées isotropes.

Dans ce cas, à une succession donnée des épaisseurs et des résistivités correspond un diagramme de S.E bien défini et inversement un diagramme donné ne doit résulter que d'une et une seule répartition de terrains.

Cependant cette réciprocity est loin d'être complète:

- La détermination du S.E correspondant à une certaine succession de terrains est stable: une faible modification de leurs paramètres n'entraîne qu'une faible modification du diagramme de S.E.

- La répartition des résistivités déterminée à partir d'un S.E est instable en ce sens que deux diagrammes très peu différents peuvent correspondre à des répartitions très différentes

puisque les diagrammes de S.E ne peuvent être obtenus qu'avec une précision limitée.

L'indétermination se manifeste en outre sous deux formes: le principe d'équivalence et le principe de suppression.

#### a : Le Principe d'équivalence :

Supposons un terrain résistant compris entre deux terrains plus conducteurs et définissons la résistance transversale comme étant le produit de sa résistivité par son épaisseur

$$R_t = \rho \cdot h$$

De façon analogue ,soit un terrain conducteur compris entre deux terrains résistants : sa conductance longitudinale est le rapport de son épaisseur à sa résistivité

$$C_l = h / \rho$$

Dans les deux cas on suppose que l'épaisseur du terrain n'est pas grande par rapport à la profondeur de son toit.

Dans ces conditions il sera difficile de distinguer par leur effet sur les diagrammes de S.E entre deux couches de résistivités et d'épaisseurs différentes tant que :

- pour des couches résistantes ,leur résistance transversale reste la même

- pour des couches conductrices ,leur conductance longitudinale reste constante.

b : Le Principe de suppression : il est relatif à des couches dont la résistivité est intermédiaire entre celles des couches encaissantes.

De telles couches lorsque leur épaisseur est faible ne modifient guère par leur présence ou leur absence le diagramme de S.E .Quand leur épaisseur croit elles commencent à déformer les diagrammes mais avant qu'on ne puisse les identifier elles-mêmes ,leur effet se confond avec celui d'une modification des épaisseurs ou des résistivités des couches encaissantes.

$\gamma$  : Effet de l'anisotropie : un milieu ayant une anisotropie de révolution est tel que la résistivité vraie présente un maximum suivant une certaine direction (résistivité transversale  $\rho_t$ ) tandis qu'elle a sa valeur la plus basse (résistivité longitudinale  $\rho_l$ ) suivant toutes les directions perpendiculaires à la précédente.

Le coefficient d'anisotropie  $\lambda = \sqrt{\rho_t/\rho_l}$  est toujours supérieur à 1 et généralement inférieur à 2.

Les mesures faites sur le terrain ne permettent pas de distinguer une couche isotrope d'épaisseur  $h$  et de résistivité  $\rho$  et une couche anisotrope d'épaisseur  $h/\rho$  et de résistivité moyenne

$$\rho_m = \sqrt{\rho_t \cdot \rho_l}.$$

Comme  $\lambda$  est toujours supérieur à 1 il en résulte que les profondeurs évaluées en supposant les couches isotropes seront si celles-ci sont en réalité anisotropes toujours erronées par excès.

Cette erreur ne pourra être corrigée que si l'on peut comparer en un certain nombre de points les diagrammes de S.F à la répartition réelle de résistivités déterminées à l'aide de mesures faites à l'intérieur de forages.

2 ) LES MILIEUX NON-TABULAIRES : ce sont tous les modèles qui ne comportent pas uniquement des couches parallèles planes, ou tous les modèles comportant des hétérogénéités de forme quelconque incluses:  $\rho$  est alors fonction de deux ou trois variables dans le cas bidimensionnel.

$\alpha$  : Etude analytique : le problème consiste à calculer les paramètres mesurables en surface (résistivité apparente, champ ou potentiel) à partir d'un modèle mathématique défini en dimension et où l'on fixe la répartition de résistivités.

Cependant la complexité des modèles utilisés doit être limitée pour ne pas dépasser les capacités des méthodes de calcul disponibles.

On peut citer les cas de :

- la sphère : traité par Van Nostrand (1953)   
Bibby and Risk (1973).
- le cylindre horizontal infini : traité par

Sudhir (1964) et Coggon (1971).

- la faille ,contact incliné de deux milieux  
:executés par J. Chasteney de Gery et G Kunetz (1958) .

I. R Mufti (1976) a également effectué le calcul pour des formes  
quelconques dans le cas bidimensionnel.

$\beta$  : Etudes sur modèles réduits : différents modèles ont été  
abordés avec des dispositifs  
placés parallèlement ou perpendiculairement à l'axe de la structure  
(G. Kunetz 1958 ) :

- contacts inclinés ,verticaux
- horsts ou anticlinaux
- affleurements cylindriques

$\gamma$  : Etudes des formes à sections elliptiques : dans  
certains cas ,les  
mesures peuvent être affectées d'effets latéraux dus aux structures  
situées sur les bords. Ceci concerne les remplissages des vallées et  
grabens . L'interprétation effectuée en assimilant à des couches  
horizontales peut occasionner de grossières erreurs.

Des diagrammes de S.E ont été calculés pour différentes formes de ce  
type de structure afin de permettre une interprétation plus correcte  
(E. Mundry et J. Homilius 1972).

METHODES D'INTERPRETATION  
DES DIAGRAMMES  
DE SONDAGES ELECTRIQUES

L'interprétation d'une étude faite par S.E consiste à exprimer en termes géologiques les renseignements apportés par les mesures. Une telle interprétation exige une bonne connaissance de la structure géologique d'ensemble de la région étudiée, condition d'autant plus indispensable que des mesures pratiquement identiques peuvent correspondre à des structures très différentes.

En outre les méthodes d'interprétation sont toujours étroitement liées à la nature du problème posé. Elles ne seront exposées dans leurs relations avec des cas concrets que dans le chapitre IV .

Nous nous bornerons pour l'instant à présenter d'une façon générale quelques méthodes d'interprétation.

A DETERMINATION de la DISTRIBUTION du POTENTIEL dans un MILIEU

STRATIFIE (S. Stephanesco, C. et M. Schlumberger 1930)

Considérons une succession de couches horizontales homogènes et isotropes, de résistivités  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$  d'épaisseurs  $h_1, h_2, h_3, \dots, h_{n-1}$  le dernier terrain étant infiniment épais (Fig.3).

Cherchons la distribution du potentiel due à une source de courant placée à la surface du sol.

Dans chacundes terrains, le potentiel  $V_i$  doit satisfaire à l'équation de Laplace  $\Delta V_i = 0$  qui s'écrit en coordonnées cylindriques

$$\partial^2 V / \partial r^2 + (1/r) \cdot \partial V / \partial r + \partial^2 V / \partial z^2 = 0$$

Les solutions de cette équation pour la première couche sont :

$$V_1 = I\rho_1/2\pi \left( \int_0^{\infty} J_0(\lambda r) e^{-\lambda z} d\lambda + \int_0^{\infty} \Theta_1(\lambda) J_0(\lambda r) e^{-\lambda z} d\lambda + \int_0^{\infty} \Psi_1(\lambda) J_0(\lambda r) e^{\lambda z} d\lambda \right)$$

ou,  $\Theta_1(\lambda)$  et  $\Psi_1(\lambda)$  sont des fonctions inconnues de  $\lambda$

$J_0(\lambda r)$  est la fonction de Bessel de première espèce d'ordre 0

Pour avoir les expressions de  $\Theta_1$  et  $\Psi_1$  il est nécessaire d'écrire que ces solutions satisfont à toutes les conditions requises aux limites des couches.

\* continuité du potentiel et de la composante normale du courant sur les interfaces

\* nullité de la composante verticale du courant à la surface du sol (sauf au pôle d'envoi)

\* nullité du potentiel à l'infini

\* comportement convenable du potentiel au voisinage du pôle d'envoi où il doit croître comme l'inverse de la distance.

On aboutit ainsi à une intégrale donnant le potentiel à la surface du sol

$$V_1 (z=0) = I\rho_1/2\pi \left( 1/r + 2 \int_0^{\infty} \Theta_1(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \right) \quad (II.1)$$

La fonction  $\Theta_1(\lambda)$  peut être explicitée en relation avec les différentes épaisseurs et résistivités des couches grâce aux conditions précédentes : elle est appelée fonction de *Stephanesco* ou fonction Noyau ("kernel function") :  $\Theta_1(\lambda, h, \rho)$

La résistivité apparente pour un terrain hétérogène se confond avec la résistivité réelle lorsque le sol est homogène et isotrope.

Pour le dispositif Schlumberger, on déduit alors de (II.1) l'expression de la résistivité apparente

$$\rho_s = \rho_1 \left( 1 + 2r^2 \int_0^{\infty} \Theta_1(\lambda, h_1, \rho_1) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right) \quad (\text{II.2})$$

avec  $J_1(\lambda r)$  fonction de Bessel d'ordre 1  
 $r=AB/2$  demi élongation  
 $\Theta_1(\lambda, \rho_1, h_1)$  fonction Noyau  
 $\rho_1$  résistivité du premier terrain

Divers procédés ont été utilisés pour évaluer l'intégrale précédente par des méthodes approchées. Citons entre autres:

1 ) LA METHODE de DEVELOPPEMENT en SERIE :

La fonction Noyau est développée en série d'exponentielles, ce développement est simplifié en prenant les épaisseurs comme multiples entiers d'une épaisseur unitaire  $h_0$ .

Il suffit alors d'effectuer la division des deux polynômes en  $e^{-2\lambda h_0}$  qui constituent le numérateur et le dénominateur de la fonction de *Stephanesco*. Les coefficients du polynôme-quotient s'obtiendront donc en identifiant les coefficients du produit de ce dernier par le dénominateur de la fraction, avec les coefficients du numérateur.

2 ) LA METHODE de DECOMPOSITION ( H. Flathe 1955 ) :

Elle ne s'applique que si le substratum est soit infiniment résistant, soit infiniment conducteur. Il s'agit de décomposer la fonction de *Stephanesco* en une somme pondérée de fractions plus simples dont chacune constitue la fonction Noyau d'une succession plus simple de couches le diagramme cherché s'obtient en ajoutant, multipliés par des coefficients appropriés, un certain nombre de diagrammes correspondant à de telles successions de couches.

Ce calcul a été exposé lors de l'étude géophysique que nous avons réalisée dans la Plaine d'Alsace (1975) .

Les méthodes précédentes ont été les premières à être utilisées pour le calcul des courbes d'abaques théoriques. Elles ont été remplacées depuis par des méthodes plus performantes.



### 3 ) LA METHODE d'INTEGRATION APPROCHEE :

Mise au point par *V. Baranov*, son calcul est entièrement automatisée. Une procédure plus récente encore due à cet auteur utilise les fonctions d'échantillonnage. Malgré la complexité de son développement mathématique (fonctions transcendantes) nous avons cependant pu automatiser son calcul.

### B. UTILISATION d'ABAQUES de COURBES PRECALCULEES :

Les diverses méthodes que nous venons de présenter ont permis le calcul de plusieurs catalogues d'abaques:

- abaques de la C.G.G (Compagnie générale de Géophysique 1936 ) relatifs à trois terrains, plus tard complétés par des courbes à quatre terrains.

- abaques de *Pylaeu*
- abaques d'*Orellana* et *Mooney*
- abaques *Rijkswaterstaat*.

### 1 ) INTERPRETATION des COURBES de S.E par les ABAQUES :

On procède à la superposition des courbes obtenues sur le terrain avec les courbes précalculées correspondant à une succession de couches dont les paramètres (épaisseurs et résistivités) sont connues à l'avance.

Cependant l'éventail des valeurs de paramètres offert par les divers catalogues et qui sont relatifs à un nombre maximum de quatre couches sont loin d'englober tous les cas pouvant se présenter sur le terrain.

Certaines méthodes empiriques ou semi-empiriques ont été établies pour pallier à ces insuffisances:

### 2 ) LA METHODE des DIAGRAMMES AUXILIAIRES :

C'est une méthode semi-empirique qui requiert l'utilisation de diagrammes auxiliaires conjointement avec des courbes d'abaques à deux ou trois couches.

L'idée de base est de remplacer deux ou plusieurs couches homogènes et isotropes par une couche anisotrope qui à son tour est équivalente à une autre couche fictive homogène et isotrope.

Cependant les formules semi-empiriques présentées pour calculer les diagrammes auxiliaires ne tiennent pas compte de la résistivité de la troisième couche et ont été implicitement développées pour  $\rho_3 = 0$  ou  $\rho_3 = \infty$ . Cette anomalie avait été relevé par *L. Cagniard* qui devait proposer trois abaques pour différentes valeurs de  $\rho_3$ .

En outre, dans de nombreux cas, une grande partie des sondages électriques ne peut rentrer en coincidence avec les courbes précalculées, ce qui augmente encore le degré d'imprécision.

Malgré ces lacunes, la méthode des diagrammes auxiliaires peut encore être utilisée pour avoir une première interprétation d'une courbe de S.E, c'est à dire obtenir les résistivités et épaisseurs qui constitueront la solution brute servant de départ à un traitement plus poussé par ordinateur.

Pour la suite nous avons utilisé les diagrammes auxiliaires du catalogue d'abaques d'*Orellana* et *Mooney*.

#### C. METHODES d'INTERPRETATION UTILISANT l'ORDINATEUR :

L'Ordinateur a été employé il y a déjà une trentaine d'années dans le seul but de calculer les courbes constituant les abaques.

Au fur et à mesure de la généralisation de son emploi et du fait des difficultés de résolution des courbes de S.E par la seule utilisation d'abaques, il a été fait de plus en plus appel à l'automatisation du traitement pour le rendre plus précis et plus rapide.

Ces performances ont connu un bond en avant avec l'introduction par *D.P. Ghosh* (1971) de filtres linéaires reliant les résistivités apparentes et la fonction Noyau.

##### 1 ) BASES du TRAITEMENT AUTOMATIQUE :

Si l'on reprend l'expression du potentiel obtenu à l'aide d'un quadripôle Schlumberger au-dessus d'une succession de couches parallèles :

$$V(r) = \rho_1 I / 2\pi \left( 1/r + 2 \int_0^{\infty} \Theta_1(\lambda, h, k) J_0(\lambda r) d\lambda \right) \quad (II.1')$$

$\Theta_1(\lambda, h, k)$  : fonction Noyau exprimée en terme d'épaisseurs et de coefficients de reflexion  $k$

$$k_i = (\rho_{i+1} - \rho_i) / (\rho_{i+1} + \rho_i)$$

Définissons la fonction Noyau totale :

$$T(\lambda, h_i, k_i) = \rho_i ( 1 + 2 \Theta_1(\lambda, h_i, k_i) )$$

alors

$$\Theta_1(\lambda, h_i, k_i) = ( T(\lambda, h_i, k_i) / \rho_i - 1 ) / 2$$

en substituant dans (II.1') , on obtient :

$$V(r) = \rho_i I / 2\pi ( 1/r + \int_0^{\infty} T(\lambda, h_i, k_i) / \rho_i J_0(\lambda r) d\lambda - \int_0^{\infty} J_0(\lambda r) d\lambda )$$

L'identité de *Weber-Lipschitz* donne :

$$1/r = \int_0^{\infty} J_0(\lambda r) d\lambda$$

donc

$$V(r) = I / 2\pi \int_0^{\infty} T(\lambda, h_i, k_i) J_0(\lambda r) d\lambda$$

en dérivant (I.11)

$$\rho_s(r) = - 2\pi r^2 / I \quad dV/dr$$

on obtient

$$\rho_s(r) = r^2 \int_0^{\infty} T(\lambda, h_i, k_i) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (II.3)$$

La fonction Noyau totale  $T(\lambda, h_i, k_i)$  appelée aussi Transformée de Résistivité ( "Resistivity transform" suivant la terminologie de *O. Koefoed* 1970) contient toute l'information nécessaire pour définir la section géoélectrique ( épaisseurs et résistivités des couches ) et réciproquement.

Ainsi à partir de l'hypothèse faite sur les paramètres d'une section géoélectrique , nous allons calculer  $T(\lambda, h_i, k_i)$  et aboutir grâce à (II.3) à la résistivité apparente en fonction de la demi-élongation  $r$  du dispositif, c'est à dire à la courbe de S.E correspondant à la section donnée : cette approche est nommée " Interprétation indirecte ".

Inversement, si l'on reprend l'expression (II.3) en appliquant la transformation inverse de *Hankel* à une intégrale de type de *Fourier-Bessel*, on obtient :

$$T(\lambda, h, k) = \int_0^{\infty} \rho_s(r) J_1(\lambda r) / r \, dr \quad (II.4)$$

Autrement dit, la connaissance des valeurs de la résistivité apparente en fonction de  $r$  ( c'est à dire la courbe de S.E ) permet à l'aide de (II.4) de calculer la Transformée  $T$  et ainsi d'évaluer les paramètres de la section géoélectrique : cette procédure suit "l'Interprétation directe".

## 2 ) INTERPRETATION INDIRECTE :

Cette formulation donnée par *G. Kuznetz* (1958) peut s'expliquer ainsi : il s'agit à partir de l'hypothèse sur les paramètres des couches de calculer la courbe de S.E en utilisant (II.3) ,alors qu'en réalité, c'est plutôt la courbe dont on dispose après les mesures de terrain et ce sont les paramètres qui sont à trouver.

Le problème reste donc l'évaluation de l'intégrale de (II.3) après avoir calculé  $T(\lambda, h, k)$  qui est obtenu par une relation de récurrence (cf.chap.E-1).

L'intégration numérique de (II.3) a été effectuée par *Meinardus* (1970) ,*Baranov* (1976) ,etc..Nous avons expérimenté la méthode de cet auteur qui utilise des fonctions d'échantillonnage ,mais les calculs d'intégration sont longs et fastidieux .

C'est une technique de convolution utilisant les filtres linéaires de *D.P. Ghosh* (1971) qui s'est révélée la méthode la plus intéressante pour le calcul des courbes de S.E .

## 3 ) INTERPRETATION DIRECTE :

Il s'agit ici de déduire directement les paramètres géoélectriques , des données de la courbe de S.E .

*Slichter* (1933) a été le premier à suggérer la procédure à suivre :

\* déterminer la courbe de la Transformée  $T$  à partir de celle des résistivités apparentes ;le calcul est largement facilité par la technique de convolution de *Ghosh*.

\* résoudre en termes de paramètres de couches la fonction Transformée T ; cette phase peut être abordée par deux voies

- déduction des paramètres par une méthode de réduction due à *Koefoed*, de la Transformée T

- faire une hypothèse sur les paramètres calculer la Transformée et la comparer avec la Transformée initiale (comparaison dans le domaine Noyau).

D. METHODE de GHOSH pour la DETERMINATION de la TRANSFORMEE

A PARTIR de la RESISTIVITE APPARENTE :

Considérons l'expression (II.4) de la Transformée

$$T(\lambda) = \int_0^{\infty} \rho_s(r) \cdot J_1(\lambda r) / r \, dr$$

Posons :  $r = e^x$   $\lambda = e^{-y}$

$$T(e^{-y}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_s(e^x) \cdot J_1(e^{x-y}) \, dx$$

Définissons :  $\bar{T}(y) = T(e^{-y})$   $\bar{\rho}_s(x) = \rho_s(e^x)$   $\bar{J}_1(u) = J_1(e^{-u})$

Donc :

$$\bar{T}(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{\rho}_s(x) \cdot \bar{J}_1(y-x) \, dx \quad (II.5)$$

$\bar{T}(y)$  est ainsi obtenu comme produit de convolution de  $\bar{\rho}_s$  et  $\bar{J}_1$

On peut également écrire, en considérant que  $\rho_s$  a un spectre à bande limitée entre  $-fc$  et  $+fc$  ce qui fixe alors  $fc$  (c'est à dire la Transformée de Fourier de  $\rho_s$  est nulle en dehors de l'intervalle )

$$\bar{T}(y_0) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \bar{\rho}_s(m\Delta x) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \frac{\sin(\pi u/\Delta x)}{(\pi u/\Delta x)} \right) \cdot \bar{J}_1((m_0-m)\Delta x - u) \, du \quad (II.6)$$

---


$$h((m_0-m)\Delta x)$$

avec

$$u = x - m\Delta x \quad y_0 = m_0\Delta x \quad \Delta x = 1/(2fc) = 1/3 \text{ Log}(10)$$

donc :

$$\bar{T}(m_0\Delta x) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \bar{\rho}_s(m\Delta x) \cdot h((m_0-m)\Delta x) \quad (II.7)$$

Les facteurs  $h((m_0-m)\Delta x)$  sont les coefficients du filtre de Ghosh que le calcul de l'intégrale de (II.6) permet d'évaluer.

Dans la sommation (II.7) il suffit que  $m$  varie de  $-k$  à  $+1$  ce qui donne  $k+1+1$  coefficients du filtre.

E . RELATIONS liant la TRANSFORMEE de RESISTIVITE et les PARAMETRES  $h_i$  et  $\rho_i$  des COUCHES :

Nous avons défini précédemment

$$T(\lambda) = \rho_1 ( 1 + 2 \cdot \Theta_1(\lambda) )$$

qui est la relation entre la transformée et la fonction Noyau. Cette fonction détient toutes les informations sur les épaisseurs et les résistivités.

1 ) DETERMINATION de T :

Stéphanesco(1930) avait établi la formulation pour le calcul de  $\Theta_1(\lambda)$  à partir des paramètres  $\rho_i$  et  $h_i$  à l'aide d'un déterminant d'ordre  $2n-2$  (pour  $n$  couches).

Orellana(1965) à son tour devait donner l'expression de  $T$  en faisant appel aux coefficients de réflexion  $k_1, k_2, \dots$  aux interfaces. Son calcul a été effectué pour un nombre limité de couches.

On peut faire mieux grâce à une détermination par récurrence donnée par Koefoed(1970) et que nous retiendrons comme algorithme pour l'obtention de  $T(\lambda)$ .

Pour une couche de paramètres  $( \rho_{n-1} , h_{n-1} )$  au-dessus d'un substratum de résistivité  $\rho_n$  la Transformée est donnée par :

$$T_{n-1}(\lambda) = \rho_{n-1} ( 1 - k_{n-1} \exp(-2h_{n-1}\lambda) ) / ( 1 + k_{n-1} \exp(-2h_{n-1}\lambda) )$$

avec  $k_{n-1} = ( \rho_{n-1} - \rho_n ) / ( \rho_{n-1} + \rho_n )$  (II.8)

La Transformée  $T_j$  pour une couche  $( \rho_j , h_j )$  au-dessus d'une séquence  $( \rho_{j+1}, \dots, \rho_n; h_{j+1}, \dots, h_{n-1} )$  de Transformée  $T_{j+1}$  est alors donnée par

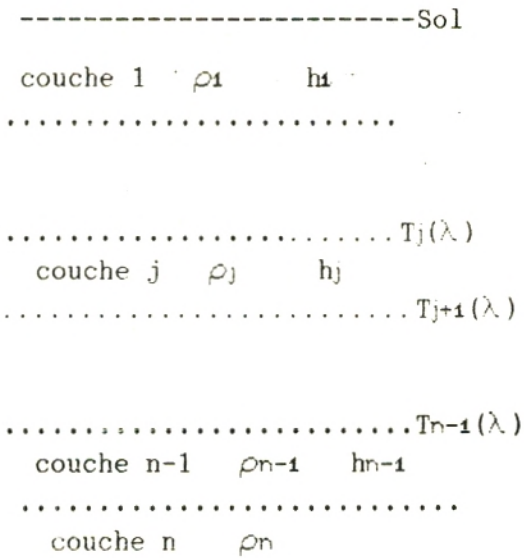


Fig.3

$$T_j(\lambda) = ( W_j(\lambda) + T_{j+1}(\lambda) ) / ( 1 + W_j(\lambda) T_{j+1}(\lambda) / \rho_j^2 )$$

$$j = n-2, n-3, \dots, 2, 1 \quad (II.9)$$

avec  $W_j(\lambda) = \rho_j ( 1 - \exp(-2h_j\lambda) ) / ( 1 + \exp(-2h_j\lambda) )$

L'application de la récurrence fournit  $T(\lambda) = T_1(\lambda)$

2 ) DETERMINATION des PARAMETRES  $h_j$  ,  $\rho_j$  :

Deux voies sont possibles pour leur évaluation :

$\alpha$  : Procédures de réduction de Koefoed(1968):

Si  $T_n$  est la Transformée correspondant à la distribution initiale des couches , $T_{n-1}$  sera la Transformée " réduite " telle que :

$$T_{n-1} = ( T_n - v_1 ) / ( 1 - T_n v_1 / \rho_1^2 ) \quad (II.10)$$

avec  $v_1 = \rho_1 ( 1 - \exp(-2h_1/u) ) / ( 1 + \exp(-2h_1/u) ) \quad u=1/\lambda$

La superposition de la courbe de  $T_n$  avec une courbe de l'abaque bicouche fixera  $h_1$  et  $\rho_1$  .Puis la superposition de la courbe de  $T_{n-1}$  avec également une courbe bicouche fixera  $h_2$  et  $\rho_2$  et ainsi de suite.

A noter qu'une procédure graphique utilisant des diagrammes spéciaux construits par Koefoed facilite le travail.

### $\beta$ : Procédure itérative :

La Transformée initiale ayant été déduite de la courbe de S.E par le procédé de convolution, les paramètres  $h_i$  et  $\rho_i$  seront obtenus de la manière suivante : on fait une hypothèse sur la distribution des épaisseurs et des résistivités puis on calcule la Transformée correspondante à l'aide de (II.8-9) .

On compare alors cette dernière avec la Transformée initiale jusqu'à obtenir une concordance avec une précision fixée.

Nous utiliserons cette technique au chapitre III.B-1 .

### F . UTILISATION de la COURBE de "DAR-ZARROUK" (D.Z) :

Les notions précédentes relatives aux principes d'équivalence et de suppression montrent le rôle important joué par la Résistance transversale et la Conductance longitudinale pour façonner la courbe S.E .Souvent d'ailleurs ce n'est que l'une ou l'autre de ces quantités que l'on peut atteindre à partir des courbes.

Le terme "Dar-Zarrouk" a été introduit en prospection électrique par R. Mailliet (1947) pour décrire une relation entre la Résistance transversale  $\tau_i = \rho_i \cdot h_i$  et la Conductance longitudinale  $s_i = h_i / \rho_i$  de la i-ème couche.

#### 1 ) CALCUL de la COURBE D.Z :

Cette courbe pour une section à  $n$  couches est constituée des points-D.Z

- d'ordonnée ,la résistivité-D.Z

$$\rho_{mj} = \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^j \tau_i}{\sum_{i=1}^j s_i} \right)}$$

- d'abscisse ,la profondeur-D.Z

$$L_{mj} = \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^j \tau_i \cdot \sum_{i=1}^j s_i}{\sum_{i=1}^j \tau_i} \right)} \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (II.11)$$

Elle a donc  $n$  branches, chacune d'elles se termine (sauf la dernière) par un point de coordonnées  $\rho_{mj}$  ,  $L_{mj}$  .



Selon cette définition les coordonnées de chaque point de la courbe D.Z sont une fonction des paramètres des couches situées au-dessus d'une certaine profondeur seulement, à la différence de la courbe S.E dont chaque point est le résultat d'une intégration englobant les paramètres de toutes les couches de la section géoélectrique.

## 2 ) INVERSION de la COURBE D.Z :

Un avantage appréciable apporté par la connaissance de la courbe D.Z est qu'on peut en extraire d'une façon simple les paramètres des couches.

En effet une transformation de (II.11) donne :

$$L_{mj} \cdot \rho_{mj} = \sum_{i=1}^j \tau_i \quad L_{mj} / \rho_{mj} = \sum_{i=1}^j s_i$$

On en déduit :

$$\text{pour } j = 1 \quad \rho_1 = \rho_{m1} \quad h_1 = L_{m1}$$

$$\text{pour } j = 2, \dots, n-1$$

$$\rho_j = \sqrt{ ( ( L_{mj} \cdot \rho_{mj} - L_{mj-1} \cdot \rho_{mj-1} ) / ( L_{mj} / \rho_{mj} - L_{mj-1} / \rho_{mj-1} ) )}$$

$$h_j = \rho_j \cdot ( L_{mj} / \rho_{mj} - L_{mj-1} / \rho_{mj-1} ) \quad (\text{II.12})$$

Ce qui signifie que la résistivité et l'épaisseur de la j-eme couche sont calculées en utilisant les coordonnées des j-1-eme et j-eme points-D.Z .

Malgré sa simplicité ,l'utilisation de la courbe D.Z n'a pas été bien exploitée .Citons à son corps défendant A. Zohdy (1974) :

"...La signification de cette technique n'a pas été bien comprise probablement à cause du fait qu'une courbe D.Z doit être construite à partir de résistivités et d'épaisseurs connues et ainsi il semble absurde de recalculer ces paramètres qui sont déjà connus."

"Il est cependant important de pouvoir déterminer plusieurs combinaisons des paramètres de couches qui sont équivalentes et qui représentent ainsi toutes des solutions de la même courbe S.E .

De plus l'inversion des courbes D.Z est fondamentale pour faire des ajustements d'épaisseurs et résistivités et produire une meilleure concordance entre courbes S.E observées et calculées..."

### 3 ) AJUSTEMENTS des EPAISSEURS et RESISTIVITES :

Utilisons la figure 4 tirée d'un exposé de Zohdy (1974) pour faire les observations suivantes dont on va exploiter les résultats au chapitre III-A .

- en définissant des sections géoélectriques équivalentes comme ayant des courbes S.E en coïncidence, on voit sur les schémas A et B que le principe d'équivalence doit être manié avec précaution ' en effet on constate sur certaines sections que la relation entre stabilité de la Résistance transversale et l'équivalence des sections n'est pas biunivoque.

- les schémas C et D montrent les courbes D.Z relatives respectivement aux schémas A et B : dans le schéma C les deux branches D.Z divergent dans le même sens que les courbes S.E correspondantes du schéma A ; par contre dans le schéma D , une courbe D.Z d'un certain modèle se place de part et d'autre de la courbe D.Z d'un autre modèle .

Cette effet de "neutralisation" aboutit à une minimisation de l'écart entre les courbes S.E correspondantes (schéma B).

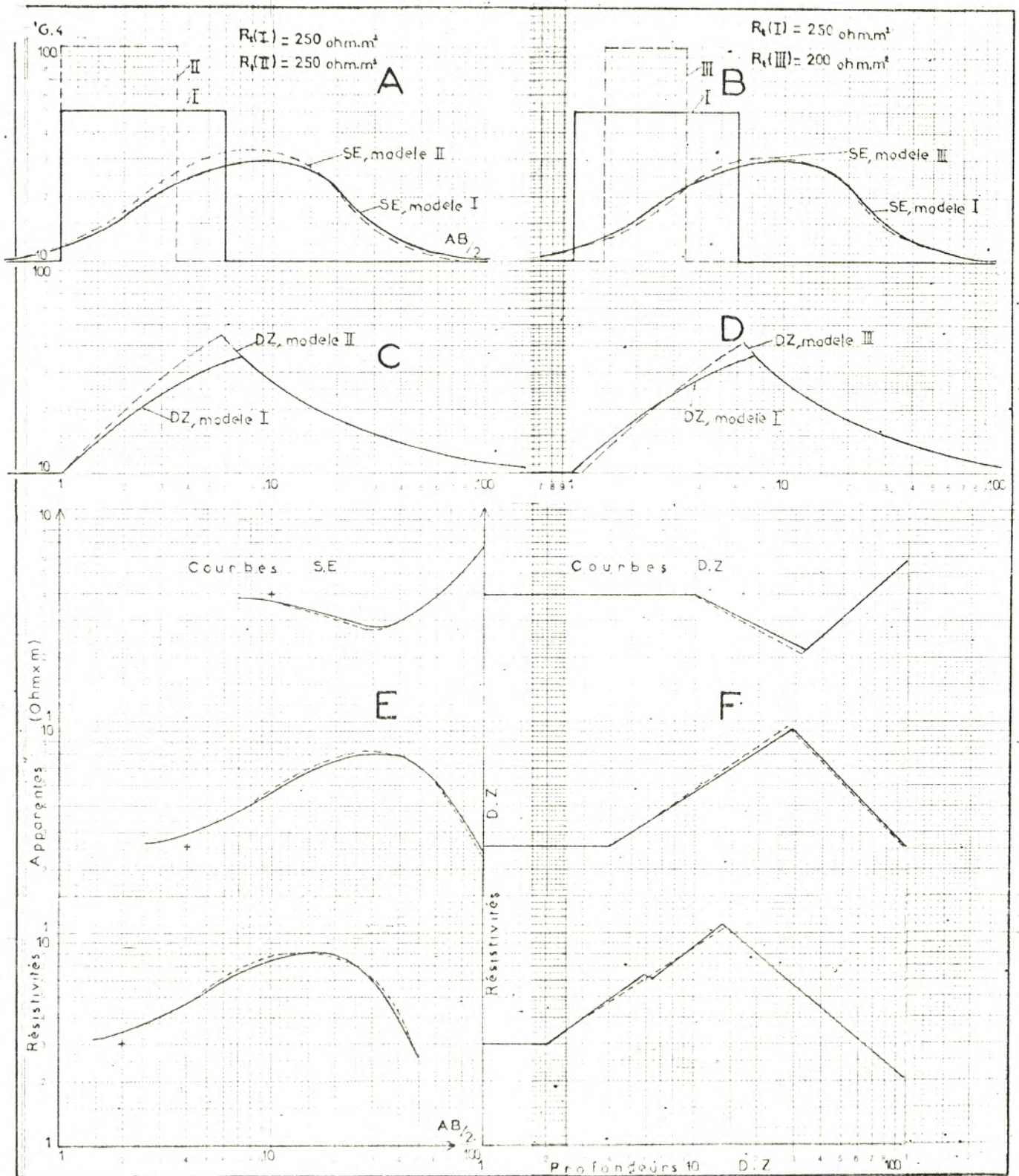
La figure 4 montre une comparaison entre cinq paires de courbes S.E équivalentes ou presque équivalentes et leurs courbes D.Z correspondantes. On observe les mêmes sens de déviations pour les deux types de courbes .

Ces remarques importantes nous permettent d'utiliser les différences entre les courbes D.Z pour prévoir les différences entre les courbes S.E correspondantes .

C'est l'inverse de cette procédure qui sera intéressante pour l'interprétation de nos S.E terrains et qui peut suivre les étapes successives

- on effectue une détermination primaire des paramètres des couches par la méthode des abaques ou des diagrammes auxiliaires .

- on calcule la courbe S.E correspondant à ce modèle



- on calcule la courbe D.Z correspondante
- en fonction des différences observées entre la courbe S.E  
initiale et la courbe S.E calculée ,de leur sens, et de leur magnitude  
on ajuste la courbe D.Z
- on inverse la courbe D.Z ajustée pour obtenir les  
nouveaux paramètres pour lesquels ,
- on recalcule une nouvelle courbe S.E et on recommence si  
nécessaire .

## CHAPITRE III

### INTERPRÉTATION DIRECTE

### INTERPRÉTATION INDIRECTE

### ORGANISATION des CALCULS

L'interprétation des sondages électriques par les abaques ou par les diagrammes auxiliaires montre ses limites dès que le nombre de couches dépasse cinq ou six .

Les différents points exposés dans le précédent chapitre vont nous permettre à présent de construire certaines techniques de traitement automatique des mesures brutes obtenues sur le terrain qui ont été transformées en courbes de sondages électriques .

Le but est d'aboutir finalement à la distribution des résistivités et épaisseurs de la section géoélectrique pour lequel les deux moyens seront appliqués : interprétation directe et interprétation indirecte interprétation prise dans un sens restreint car la manière d'aborder une interprétation est toujours étroitement liée à la nature du problème posé et ne pourrait être exposée que sur une série d'exemples concrets .

Donc, l'interprétation dans cette partie ne va pas encore consister à exprimer en termes géologiques les renseignements apportés par les mesures. Ceci fera l'objet du prochain chapitre .

Dans l'une ou l'autre des méthodes d'interprétation considérées, le mode de calcul ainsi que le nombre de solutions chaque fois envisagées qui est très grand, a nécessité l'automatisation du traitement .

Les programmes de calcul exposés ont été écrits avec le langage le plus simple, le B.A.S.I.C du fait de sa grande faculté conversationnelle susceptible d'être mise à profit entre l'utilisateur et la machine .

L'interprétation indirecte a fait l'objet d'un seul programme; par contre nous en avons établi trois pour l'interprétation directe celle-ci nous paraissant plus délicate à aborder .

Ces différents programmes nous permettront de réaliser une comparaison entre les techniques de résolution .

#### A . INTERPRETATION INDIRECTE :

Cette méthode peut également être qualifiée de méthode par approximations successives .

En gros ,il s'agit à partir de la courbe S.E obtenue sur le terrain d'effectuer d'abord une résolution primaire des paramètres de la section géoélectrique .

La courbe S.E correspondante à cette première solution sera calculée et comparée à la courbe de terrain .

Des ajustements seront alors effectués sur les épaisseurs et résistivités jusqu'à obtenir une bonne concordance des deux courbes .

Il existe donc deux phases essentielles dans ce traitement :

- la première qui consiste au calcul rapide et le plus précis d'une courbe S.E à partir d'une distribution de paramètres géoélectriques

- dans la seconde, on doit faire les ajustements les plus astucieux sur les paramètres qui permettront une rapide concordance des courbes .

#### 1 ) CALCUL d'une COURBE S.E à partir d'une DISTRIBUTION de COUCHES :

Nous utiliserons pour cela la méthode du Filtre linéaire de Ghosh .Celui-ci a fait son calcul pour un échantillonnage de courbe de 3 points par décade logarithmique, ce qui nécessite l'usage de seulement 9 coefficients de filtre .

S'inspirant des résultats de Ghosh, H.K. Johansen(1975) utilise 10 points par décade pour le tracé de la courbe des résistivités apparentes et effectue le calcul avec un filtre de 139 coefficients (Tableau 1) .

C'est ce procédé que nous avons adopté pour calculer toutes les courbes S.E des différents traitements qui vont suivre .

L'intégrale de convolution (II.3) est calculée par Johansen ce qui donne aux points d'échantillonnage  $x_i = i.\Delta x$  :

$$\rho_s(i.\Delta x) \approx \rho_n.C^{-100} + \sum_{-99}^{+99} T((i-j).\Delta x + S).C(j.\Delta x - S) + \rho_1 C$$

$$i = 0,1,2,\dots$$

avec

$$\Delta x = (\text{Log } 10)/10 \quad (\text{III.1})$$

$C(j.\Delta x - S) = C^j$  coefficients du filtre (Tableau 1)

$$C^{-100} = 6.1740 \cdot 10^{-5}$$

$$C^{+99} = 6.0905 \cdot 10^{-4}$$

$$S = -1.7239458$$

$\rho_1, \rho_n$  : résistivités de la première et la dernière couche

La Transformée  $T((i-j).\Delta x + S)$  est obtenue en fonction des épaisseurs et résistivités par l'algorithme donné en (II.8-9) .

## 2 ) CALCUL de la COURBE D.Z du MODELE de COUCHES SUPPOSE :

Les n-1 points-D.Z pour un modèle de n couches sont donnés par l'expression (II.11) .

Pour un meilleur tracé des branches reliant les points-D.Z successifs, il est indispensable de déterminer quelques points intermédiaires. Pour cela nous avons exploité une expression de Zohdy (1974) :

$$\rho_m = \frac{-h_1.(c_2^2 - c_1^2) \mp \sqrt{(h_1.(c_2^2 - c_1^2))^2 + 4.(L_m.c_1.c_2)^2}}{2L_m.c_1}$$

où :  $c_{m-1}$  et  $L_{m-1}$  remplacent  $c_1$  et  $h_1$   
 $c_1$  remplace  $c_2$  (III.2)

**Tableau 1**

**Coefficients du Filtre**

The filter coefficients corresponding to a sampling frequency of 10 points per decade.  $\Delta x = (\ln 10)/10$ ,  $j_1 = -100$ ,  $j_2 = 40$ ,  $S = -1.7239458$ ,  $C_*^{(-100)} = 6.174_{10} - 5$ ,  $C_*^{(40)} = 6.0905_{10} - 4$

$j$	$C^{(j)} \cdot 10^8$	$j$	$C^{(j)} \cdot 10^8$	$j$	$C^{(j)} \cdot 10^8$	$j$	$C^{(j)} \cdot 10^8$
-99	-12484	-64	28016	-29	-110741	6	61285163
-98	12726	-63	-28830	-28	117248	7	-29362551
-97	-12975	-62	29680	-27	-124303	8	15817356
-96	13231	-61	-30568	-26	132085	9	-9504597
-95	-13494	-60	31496	-25	-140461	10	6226174
-94	13765	-59	-32467	-24	149959	11	-4353505
-93	-14043	-58	33484	-23	-159826	12	3198475
-92	14330	-57	-34549	-22	171917	13	-2441493
-91	-14625	-56	35666	-21	-182946	14	1920840
-90	14930	-55	-36838	-20	199955	15	-1548505
-89	-15244	-54	38069	-19	-209469	16	1273595
-88	15567	-53	-39363	-18	239052	17	-1065148
-87	-15901	-52	40724	-17	-234543	18	903512
-86	16246	-51	-42156	-16	304916	19	-775750
-85	-16602	-50	43666	-15	-234124	20	673079
-84	16971	-49	-45259	-14	453990	21	-589375
-83	-17352	-48	46940	-13	-106745	22	520264
-82	17746	-47	-48717	-12	899282	23	-462558
-81	-18154	-46	50596	-11	559573	24	413891
-80	18577	-45	-52587	-10	2442523	25	-372478
-79	-19015	-44	54697	-9	3250077	26	336951
-78	19469	-43	-56936	-8	7926675	27	-306251
-77	-19941	-42	59314	-7	13023345	28	279543
-76	20429	-41	-61845	-6	25610307	29	-256168
-75	-20936	-40	64540	-5	41150741	30	235594
-74	21463	-39	-67414	-4	64231809	31	-217394
-73	-22009	-38	70484	-3	72803988	32	201216
-72	22577	-37	-73767	-2	36118538	33	-186773
-71	-23166	-36	77284	-1	-100406442	34	173826
-70	23779	-35	-81057	0	-242172543	35	-162176
-69	-24416	-34	85111	1	20052460	36	151657
-68	25079	-33	-89475	2	444506381	37	-142126
-67	-25768	-32	94183	3	-489348908	38	133463
-66	26487	-31	-99267	4	294899398	39	-125568
-65	-27235	-30	104775	5	-137791072		



Les abscisses  $l_m$  seront prises égales aux abscisses pour lesquelles la courbe S.E est calculée, c'est à dire pour  $x_i = i\Delta x$   $i=0,1,2,\dots$  ce qui correspond avec le changement de variables de (II.5) à :

$$r = e^{i\Delta x}$$

### 3 ) ETAPES d'un TRAITEMENT AUTOMATIQUE :

En fonction des considérations précédentes nous pouvons à présent introduire le traitement suivant :

- La courbe S.E étudiée fera l'objet d'une première interprétation à l'aide des diagrammes auxiliaires ; le nombre de couches sera également fixé.

- Une courbe S.E sera calculée issue de la solution précédente, à l'aide du filtre de Johansen .

- Les deux courbes seront visualisées sur écran pour vérifier leur concordance

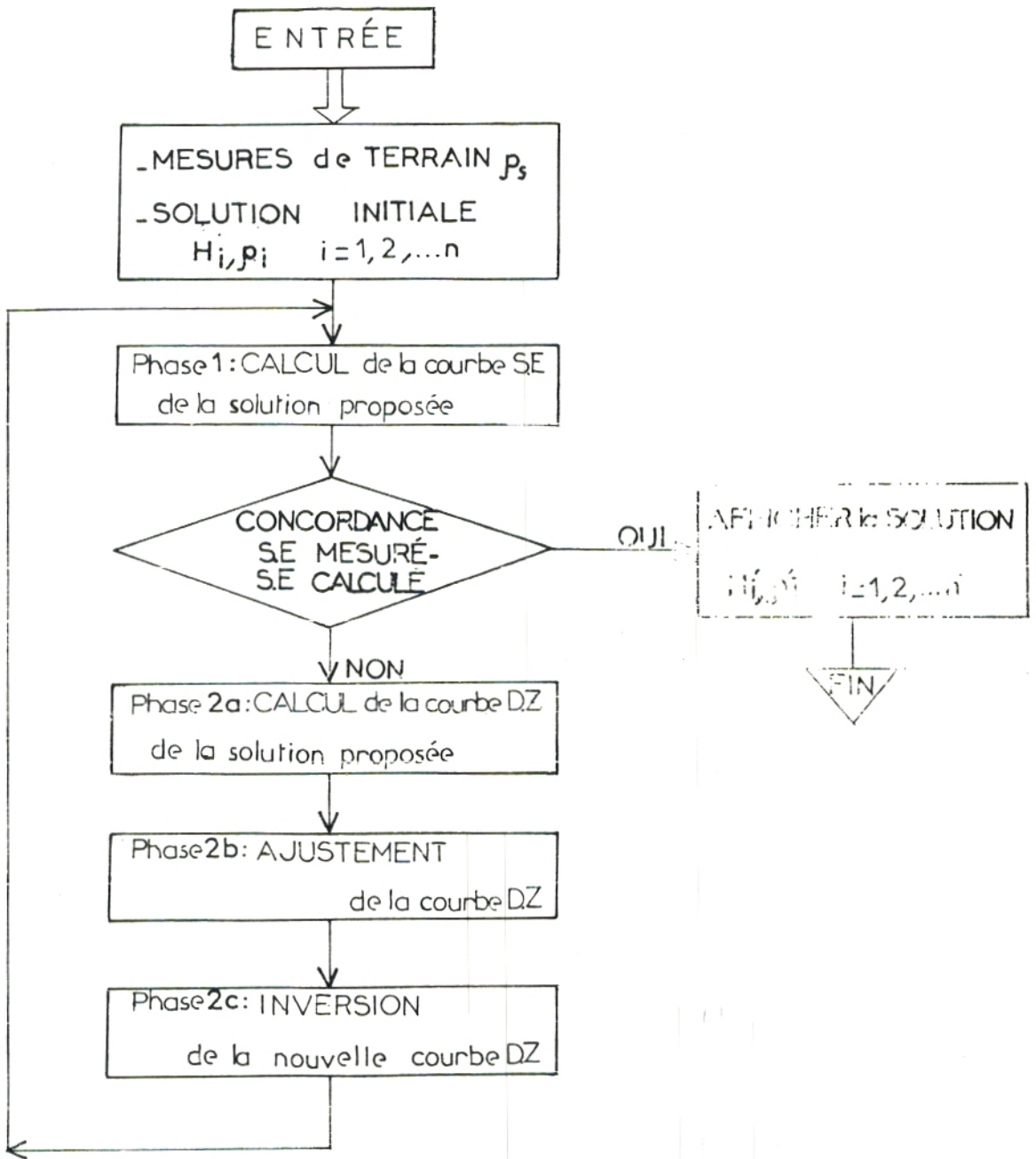
- Si le test est négatif , la courbe D.Z correspondante à la première solution est tracée . Elle est ajustée en tenant compte des observations du chap.II-E.3 . De nouvelles valeurs de points-D.Z sont alors obtenues . Leur inversion donnera une première section géoélectrique

- Une nouvelle courbe S.E est ainsi calculée et visualisée pour comparaison avec la courbe S.E initiale.

Le processus est recommencé jusqu'à concordance.

L'organigramme J suivant nous permet d'écrire le programme présenté au chap. IV-B.3.β.

ORGANIGRAMME J



## B . INTERPRETATION DIRECTE :

Cette méthode est basée sur le traitement direct des valeurs de résistivités apparentes de la courbe S.E pour en tirer de nouvelles informations , à la différence de l'interprétation indirecte où cette courbe ne sert qu'à titre de comparaison .

Nous allons étudier les deux cas où le rôle de la Transformée T est soit primordial ,soit secondaire .

### 1 ) INTERPRETATION DIRECTE UTILISANT COMME PREALABLE le CALCUL de la TRANSFORMEE T :

Dans une première étape ,il s'agit de calculer la Transformée de résistivité T à partir des valeurs de résistivité apparente  $\rho_a$  .

Ceci est grandement facilité par application du Filtre de Ghosh (chap.II-D) .

La simplicité et la rapidité de la procédure sont améliorées par l'utilisation de l'ordinateur qui permet un traitement complet du problème . Dans la seconde étape qui consiste à tirer les paramètres des couches à partir de T ,la multiplicité des solutions nécessitera obligatoirement l'automatisation du calcul .

Avant de passer à cette étape ,nous avons expérimenté une procédure dont les calculs peuvent être effectuées sur une simple calculatrice

#### $\alpha$ ) Méthode semi-automatique :

Dans le déroulement d'une campagne de prospection électrique ,il est habituel d'exécuter en fin de journée une première résolution des S.E obtenus de façon à tirer des informations et de planifier ou de rectifier les opérations suivantes.Nous avons personnellement jugé intéressant de faire appel à une méthode plus précise que celle utilisant les abaques ou les diagrammes auxiliaires sans pour autant exiger l'emploi d'un ordinateur .

α-1 : Calcul de la Transformée T :

Reprenant l'expression (II.4) , Patella (1975) la réécrit de la manière suivante:

$$T(\lambda) = \int_0^{r_1} (\rho_s(r)/r) \cdot J_1(\lambda r) dr + \sum_{j=1}^{p-1} \int_{r_j}^{r_{j+1}} (\rho_s(r)/r) \cdot J_1(\lambda r) dr + \int_{r_p}^{\infty} (\rho_s(r)/r) \cdot J_1(\lambda r) dr \quad (III.3)$$

tel que :  $\rho_s(r) \simeq \rho_1$  pour  $r \leq r_1$   
 $\rho_s(r) \simeq \rho_n$  pour  $r \geq r_p$

Pour résoudre facilement (III.3) ,on remplace dans chaque intervalle  $(r_j, r_{j+1})$  la fonction  $\rho_s(r)$  par un segment rectiligne horizontal passant par le point d'ordonnée (fig.5 )

$$(\rho_s(r_{j+1}) + \rho_s(r_j)) / 2$$

donc :

$$T(\lambda) = \rho_1 \int_0^{r_1} J_1(\lambda r)/r dr + \sum_{j=1}^{p-1} (\rho_s(r_{j+1}) + \rho_s(r_j)) / 2 \int_{r_j}^{r_{j+1}} J_1(\lambda r)/r dr + \rho_n \int_{r_p}^{\infty} J_1(\lambda r)/r dr$$

posant :

$$\int_{r_j}^{\infty} J_1(\lambda r)/r . dr = J_{u1}(\lambda r_j)$$

et sachant que :

$$\int_0^{\infty} J_1(\lambda r)/r dr = 1$$

On obtient finalement :

$$T(\lambda) = \rho_1 + \sum_{j=1}^p (\rho_s(r_{j+1}) - \rho_s(r_{j-1})) / 2 \cdot J_{u1}(\lambda r_j)$$

posant :

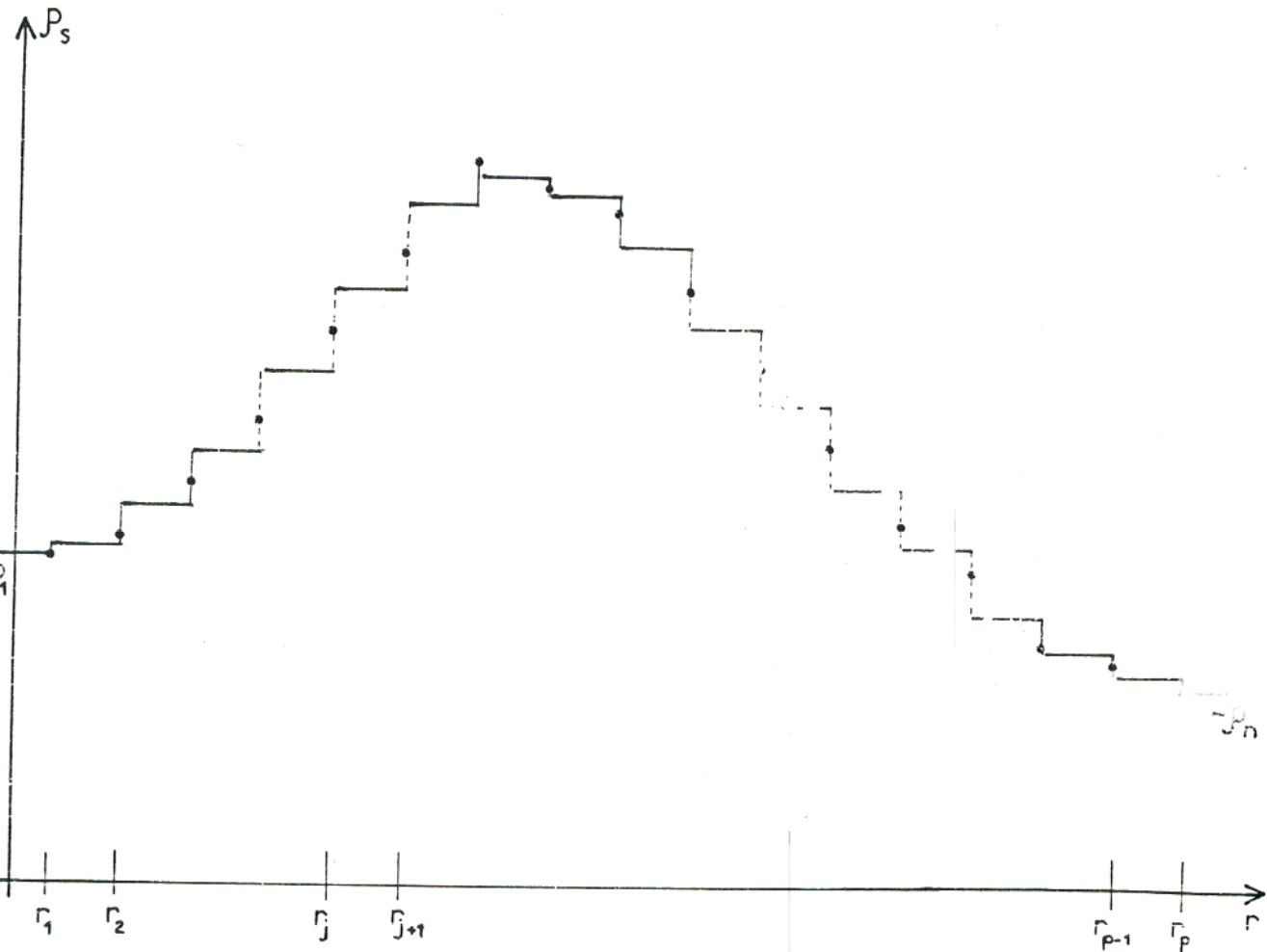
$$a_j = (\rho_s(r_{j+1}) - \rho_s(r_{j-1})) / 2$$

On a :

$$T(\lambda) = \rho_1 + \sum_{j=1}^p a_j \cdot J_{u1}(\lambda r_j) \quad (III.4)$$

Les valeurs de la fonction de Bessel  $J_{u1}$  sont disponibles grâce à des tables numériques (Tableau 2).

FIG.5



- point de la courbe SE
- segment remplaçant un tronçon de courbe



Tableau 3

Table of the values of the function  $J_{0.2}(x^p)$

$x^p$	0.1	0.12	0.16	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.6	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10
1/2	10	8.3	6.25	5	4	3.3	2.5	2	1.67	1.25	1	0.83	0.625	0.5	0.4	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34
10	7.6520	6.7113	4.5420	1.6888	0.0125	1.1195	2.8463	5.5928	7.6520	0.0385	0.0835	-0.1093	0.0397	-0.2459	0.2146	0.2511	-0.3552	-0.9929	-0.8668	-0.1935	1.1195
12	6.7113	4.5420	1.6888	0.0125	1.1195	2.8463	5.5928	7.6520	0.0385	0.0835	-0.1093	0.0397	-0.2459	0.2146	0.2511	-0.3552	-0.9929	-0.8668	-0.1935	1.1195	2.8463
16	4.5420	1.6888	0.0125	1.1195	2.8463	5.5928	7.6520	0.0385	0.0835	-0.1093	0.0397	-0.2459	0.2146	0.2511	-0.3552	-0.9929	-0.8668	-0.1935	1.1195	2.8463	5.5928
20	2.2389	0.0209	2.2389	-2.1671	-0.4838	2.2389	0.0209	2.2389	-2.1671	-0.4838	2.2389	0.0209	2.2389	-2.1671	-0.4838	2.2389	0.0209	2.2389	-2.1671	-0.4838	2.2389
25	0.0176	0.0279	0.0046	-0.0270	0.0963	0.2086	0.2086	0.0279	-0.0270	0.0963	0.2086	0.2086	0.0279	-0.0270	0.0963	0.2086	0.2086	0.0279	-0.0270	0.0963	0.2086
30	0.0139	-0.0457	-0.0717	-0.0880	-0.0457	-0.0717	-0.0880	-0.0457	-0.0717	-0.0880	-0.0457	-0.0717	-0.0880	-0.0457	-0.0717	-0.0880	-0.0457	-0.0717	-0.0880	-0.0457	-0.0717
40	0.0080	-0.0349	-0.0579	-0.0956	-0.0074	-0.1726	-0.0937	0.3340	-0.4372	-0.1590	-0.9837	0.8583	1.5207	-3.2647	-2.6005	0.0080	-0.0349	-0.0579	-0.0956	-0.0074	-0.1726
50	0.0034	0.0100	-0.0436	0.0579	-0.0436	0.0579	-0.0436	0.0579	-0.0436	0.0579	-0.0436	0.0579	-0.0436	0.0579	-0.0436	0.0034	0.0100	-0.0436	0.0579	-0.0436	0.0579
60	-0.0003	0.0359	0.0290	-0.0394	-0.0915	-0.1434	-0.1759	-0.1434	-0.1759	-0.1434	-0.1759	-0.1434	-0.1759	-0.1434	-0.1759	-0.0003	0.0359	0.0290	-0.0394	-0.0915	-0.1434
80	-0.0062	-0.0168	0.0009	0.0386	-0.0697	0.1157	-0.1912	0.0147	0.3452	-0.1874	0.6681	-0.8745	1.1794	-1.7415	1.7165	-0.0062	-0.0168	0.0009	0.0386	-0.0697	0.1157
100	-0.0104	-0.0077	-0.0211	-0.0598	-0.0872	-0.0598	-0.0872	-0.0598	-0.0872	-0.0598	-0.0872	-0.0598	-0.0872	-0.0598	-0.0872	-0.0104	-0.0077	-0.0211	-0.0598	-0.0872	-0.0598
120	0.0133	0.0232	0.0148	0.0188	0.0718	0.0018	0.0712	0.1395	0.2315	-0.3824	0.0295	0.6904	0.9345	1.3717	-1.7490	0.0133	0.0232	0.0148	0.0188	0.0718	0.0018
160	-0.0155	0.0075	-0.0229	-0.0438	-0.0337	-0.0018	0.0712	0.1395	0.2315	-0.3824	0.0295	0.6904	0.9345	1.3717	-1.7490	-0.0155	0.0075	-0.0229	-0.0438	-0.0337	-0.0018
200	-0.0136	-0.0194	0.0094	0.0386	-0.0154	0.1197	0.0490	-0.1744	-0.3949	0.2232	0.0368	0.8630	-0.4686	1.6702	0.0136	-0.0194	0.0094	0.0386	-0.0154	0.1197	0.0490
250	-0.0270	-0.0171	0.0243	-0.0278	-0.0261	-0.0013	0.0500	0.1172	0.0500	0.1155	0.1762	0.2791	-0.7197	0.9627	-0.0270	-0.0171	0.0243	-0.0278	-0.0261	-0.0013	0.0500
300	0.0006	-0.0110	0.0028	-0.0168	0.0579	-0.0982	-0.0015	0.1795	0.0888	-0.1386	-0.4574	-0.7197	0.9627	0.9627	0.0006	-0.0110	0.0028	-0.0168	0.0579	-0.0982	-0.0015
400	0.0099	0.0044	-0.0020	-0.0037	-0.0388	0.0187	0.0712	-0.0309	-0.0842	0.2393	0.0799	-0.3487	-0.9560	-0.7337	0.0099	0.0044	-0.0020	-0.0037	-0.0388	0.0187	0.0712
500	0.0038	0.0124	0.0056	-0.0183	-0.0341	-0.0485	-0.0555	-0.0521	-0.0386	-0.0020	0.0344	0.0999	-0.4359	-0.7623	0.0038	0.0124	0.0056	-0.0183	-0.0341	-0.0485	-0.0555
600	-0.0064	0.0074	-0.0083	-0.0242	-0.0220	-0.0055	0.0335	-0.0666	0.1158	-0.1963	-0.0031	0.3590	0.2896	-0.3941	-0.0064	0.0074	-0.0083	-0.0242	-0.0220	-0.0055	0.0335
800	0.0028	-0.0098	-0.0110	-0.0111	0.0089	-0.0039	-0.0073	-0.0777	0.0375	0.1543	0.0617	0.1685	0.0092	0.6974	0.0028	-0.0098	-0.0110	-0.0111	0.0089	-0.0039	-0.0073
1000	0.0005	0.0035	-0.0123	0.0123	0.0248	0.0111	-0.0367	-0.0582	0.0971	-0.1111	-0.1043	-0.0771	-0.2106	0.5983	0.0005	0.0035	-0.0123	0.0123	0.0248	0.0111	-0.0367
1200	-0.0031	0.0047	-0.0109	0.0163	-0.0148	-0.0166	-0.0484	-0.0440	-0.0110	-0.0671	-0.1333	0.2315	-0.3282	0.7180	-0.0031	0.0047	-0.0109	0.0163	-0.0148	-0.0166	-0.0484
1600	-0.0050	0.0034	-0.0037	-0.0145	-0.0197	-0.0232	-0.0178	-0.0078	-0.0147	-0.1553	0.0749	-0.2292	-0.4376	0.3370	-0.0050	0.0034	-0.0037	-0.0145	-0.0197	-0.0232	-0.0178
2000	-0.0027	-0.0063	0.0042	0.0078	0.0071	-0.0246	0.0495	0.0222	0.0178	-0.0078	-0.1553	0.0749	-0.2292	-0.4376	-0.0027	-0.0063	0.0042	0.0078	0.0071	-0.0246	0.0495
2500	-0.0033	-0.0079	-0.0012	-0.0089	0.0012	-0.0268	0.0189	-0.0268	0.0189	0.0054	-0.0729	-0.1706	-0.4277	-0.2607	-0.0033	-0.0079	-0.0012	-0.0089	0.0012	-0.0268	0.0189
3000	-0.0036	0.0017	0.0030	-0.0017	0.0067	0.1543	0.0375	0.0777	0.0375	0.1543	0.0375	0.0777	0.0375	0.0777	-0.0036	0.0017	0.0030	-0.0017	0.0067	0.1543	0.0375
4000	-0.0028	-0.0061	0.0040	-0.0126	-0.0126	-0.0126	0.0142	-0.0492	0.0492	0.0492	0.0990	0.0445	-0.0196	-0.0383	-0.0028	-0.0061	0.0040	-0.0126	-0.0126	-0.0126	0.0142
5000	-0.0011	-0.0035	0.0042	0.0029	-0.0067	-0.0157	-0.0130	0.0025	0.0177	-0.0536	0.0378	0.1238	0.0556	-0.1834	-0.0011	-0.0035	0.0042	0.0029	-0.0067	-0.0157	-0.0130

Nous avons également considéré le cas où le substratum est infiniment résistant .On a alors :

$$T(\lambda) = \rho_1 + \sum_{j=1}^p b_j \cdot J_0(\lambda r_j) + (1/S) \cdot J_0(\lambda r_p) \quad (\text{III.5})$$

avec :

$$b_j = ( \rho_s(r_{j+1}) - \rho_s(r_{j-1}) ) / 2 \quad j = 1, 2, \dots, p-1$$

$$b_p = - ( \rho_s(r_p) + \rho_s(r_{p-1}) ) / 2$$

$r_p$  : abscisse à partir de laquelle la courbe S.E se confond avec la droite à 45 degrés .

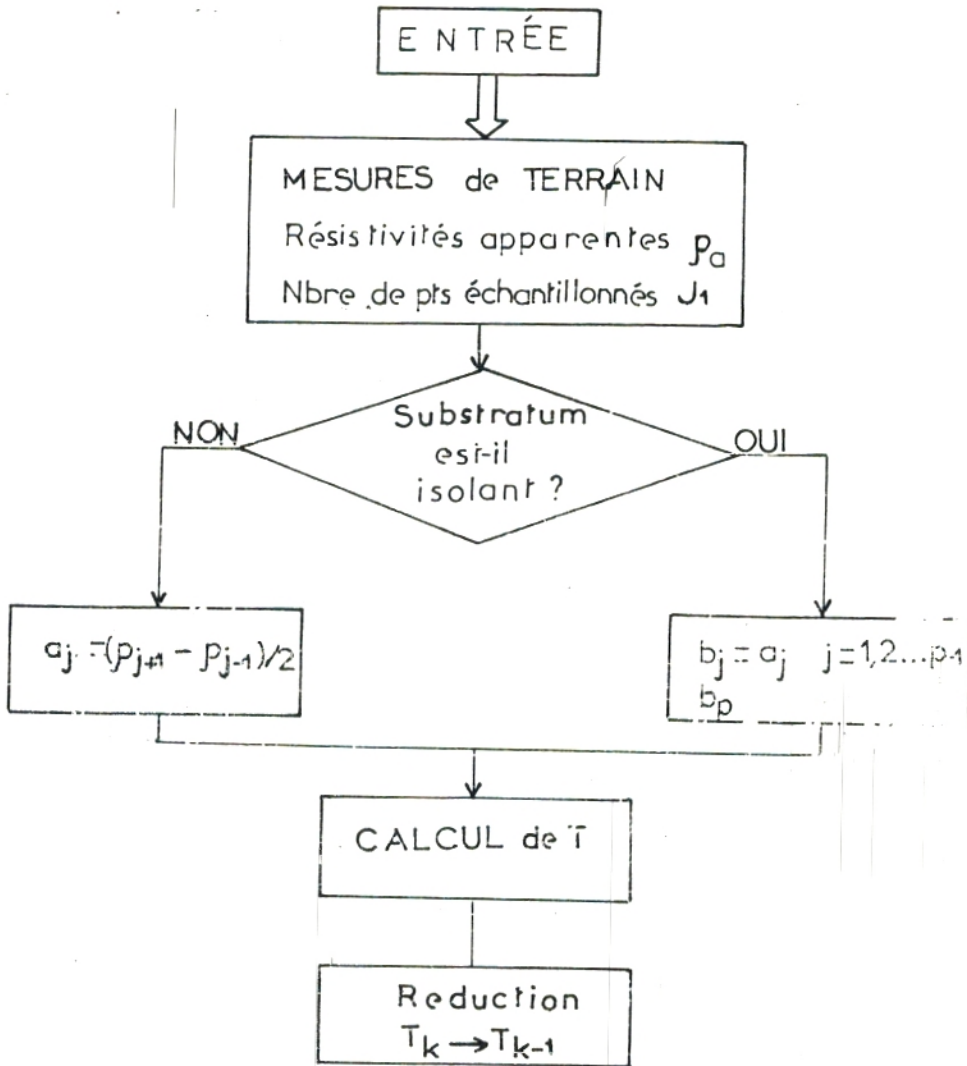
S : conductance totale des couches au-dessus de l'horizon résistant ,mesurée graphiquement .

Les valeurs de la fonction  $J_0(\lambda r_p)$  sont données par des tables numériques (Tableau 3) .

L'organisation du calcul( Organigramme S ) et le programme (cf.chap. IV-B.3.α ) que nous avons établis pour la détermination de la Transformée T à partir de (III.4-5) ,sont valables pour des longueurs de ligne  $2r_j$  n'excédant pas 500m .En fait il est possible du fait de la disponibilité des valeurs de  $J_0$  d'étudier des courbes S.E allant jusqu'à  $AB = 8000$  ou  $10\ 000m$  .



ORGANIGRAMME 5



α-2 : Détermination graphique des paramètres géoélectriques par le procédé de "réduction" de Koefoed (1968) :

Suivant la procédure décrite au chap.II-E.2 .

β ) Méthode automatique appliquant le principe du Filtre de Ghosh :

β-1 : Calcul de T<sub>1</sub> :

Nous utiliserons l'expression donnée par M. Bichara et J. Lakshmanan (1976) :

$$\bar{T}_1(y_0) = \sum_{m=-K}^{m=+L} \bar{\rho}_s(y_0 - m\Delta x) \cdot h(m\Delta x) \quad (\text{III.6})$$

avec K = 3 et L = 8 ,c'est à dire 12 coefficients du filtre calculés pour un échantillonnage  $\Delta x = (\text{Log } 10)/3$

Les coefficients du filtre utilisé sont :

h-3	h-2	h-1	h0	h1	h2
.00659	-.07828	.39991	.34916	.16754	.08586
h3	h4	h5	h6	h7	h8
.03575	.01977	.0067	.00514	.00067	.0018

Rappelons les définitions :

$$r = e^x \quad \lambda = e^{-y}$$

$$\text{et } \bar{T}_1(y) = T_1(e^{-y}) \quad \bar{\rho}_s(x) = \rho_s(e^x)$$

Nous aurons donc la correspondance suivante pour quelques valeurs de  $1/\lambda$  :

1/λ	.16	.25	.40	.63	1.	1.6	2.5
y <sub>0</sub>	-1.842	-1.382	-.922	-.46	0	.46	.92
1/λ	4	6.3	10	16	25	40	63
y <sub>0</sub>	1.38	1.84	2.302	2.76	3.22	3.68	4.14
1/λ	100	160	250	400	630	1000	
y <sub>0</sub>	4.604	5.064	5.52	5.98	6.44	6.90	

Exposons la procédure de calcul qui sera suivie pour chercher la valeur de la Transformée T1 pour  $1/\lambda = 10$  par exemple :

m	-3	-2	-1	0
$y_0 - m\Delta x$	4.604	3.82	3.062	2.302
$\bar{\rho}_s(y_0 - m\Delta x)$	$\rho_s(99.98)$	$\rho_s(45.6)$	$\rho_s(21.32)$	$\rho_s(9.97)$
m	1	2	3	4
$y_0 - m\Delta x$	1.542	.784	0	-.768
$\bar{\rho}_s(y_0 - m\Delta x)$	$\rho_s(4.66)$	$\rho_s(2.19)$	$\rho_s(1)$	$\rho_s(.46)$
m	5	6	7	8
$y_0 - m\Delta x$	-1.538	-2.3	-3.07	-3.84
$\bar{\rho}_s(y_0 - m\Delta x)$	$\rho_s(.21)$	$\rho_s(.1)$	$\rho_s(.01)$	$\rho_s(.02)$

Les lignes  $\bar{\rho}_s$  du tableau précédent permettent de connaître les abscisses de la courbe S.E pour lesquelles les valeurs de résistivités apparentes respectives  $\rho_s$  seront prises .

En agissant de même pour toutes les valeurs de  $1/\lambda$  nous avons obtenu toutes les valeurs d'abscisses de la courbe S.E dont on doit tenir compte .

L'échantillonnage de la courbe S.E s'impose donc de lui-même , en vertu du tableau précédent et qui sera généralisé pour toutes les valeurs de  $1/\lambda$  allant de 0.16 à 1000 : les valeurs d'abscisses r sont alors déduites et regroupées au tableau 4 .

Tableau 4 :

$n^{\circ}$	1	2	3	4	5	6	7	8
$r=AB/2$	.4	.46	.55	.63	.73	.85	1	1.15
resistivite apparente $E(i)$ echantillonnee	E(1)	E(2)	E(3)	E(4)	E(5)	E(6)	E(7)	E(8)
$n^{\circ}$	9	10	11	12	13	14	15	16
$r=AB/2$	1.35	1.6	1.85	2.15	2.5	2.9	3.4	4.
$E(i)$	E(9)	E(10)	E(11)	E(12)	E(13)	E(14)	E(15)	E(16)
$n^{\circ}$	17	18	19	20	21	22	23	24
$r=AB/2$	4.6	5.5	6.3	7.3	8.5	10	11.5	13.5
$E(i)$	E(17)	E(18)	E(19)	E(20)	E(21)	E(22)	E(23)	E(24)
$n^{\circ}$	25	26	27	28	29	30	31	32
$r=AB/2$	16	18.5	21.5	25	29	34	40	46
$E(i)$	E(25)	E(26)	E(27)	E(28)	E(29)	E(30)	E(31)	E(32)
$n^{\circ}$	33	34	35	36	37	38	39	40
$r=AB/2$	55	63	73	85	100	115	135	160
$E(i)$	E(33)	E(34)	E(35)	E(36)	E(37)	E(38)	E(39)	E(40)
$n^{\circ}$	41	42	43	44	45	46	47	48
$r=AB/2$	185	215	250	290	340	400	460	550
$E(i)$	E(41)	E(42)	E(43)	E(44)	E(45)	E(46)	E(47)	E(48)
$n^{\circ}$	49	50	51	52	53	54	55	56
$r=AB/2$	630	730	850	1000	1150	1350	1600	1850
$E(i)$	E(49)	E(50)	E(51)	E(52)	E(53)	E(54)	E(55)	E(56)
$n^{\circ}$	57	58	59	60	61			
$r=AB/2$	2150	2500	2900	3400	4000			
$E(i)$	E(57)	E(58)	E(59)	E(60)	E(61)			

Pour l'exemple précédent ,c'est à dire pour  $1/\lambda = 10$  la Transformée  $T_1$  s'écrira :

$$T_1 \quad = \quad E(37)x.00659 + E(32)x-.07828 + E(27)x.3999$$

(1/λ=10)

$$+ E(22)x.34916 + E(17)x.16754 + E(12)x.08586$$

$$+ E(7)x.03575 + E(2)x.01977 + R\phi(1)x(.0067+.00514+.00067+.0018)$$

Les autres formules de  $T_1$  relatives aux  $N= 20$  valeurs de  $1/\lambda$  sont données par le programme que nous avons écrit (chap.IV-B.3.γ) .

$\beta-2$  : Identification automatique de la Transformée  $T_1$  :

Il s'agit d'identifier la Transformée  $T_1$  obtenue par les mesures (c'est à dire par la transformation de la courbe S.E terrain par la procédure vue précédemment) à une Transformée hypothétique  $T(\lambda, e_1, e_2, \dots, e_{n-1}, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) = T(\lambda, m)$  dont les paramètres  $m = (e_1, \dots, e_{n-1}, \rho_1, \dots, \rho_n)$  sont à déterminer ;  $e_i$  et  $\rho_i$  étant les épaisseurs et résistivités des différentes couches .

Si  $T_{1j}$  ,  $j=1,2,\dots,N$  sont les différentes valeurs de la Transformée  $T_1$  calculées aux points  $\lambda_j$  ( ou  $1/\lambda_j$  ) comme vu en  $\beta-1$  , le critère suivant :

$$F_1(m) = \sum_{j=1}^N ( T_{1j} - T(\lambda_j, m) )^2 \quad (III.7)$$

doit être rendu minimum .

Cette condition déterminera alors la valeur de  $m = ( e_i , \rho_i )$

Pour cela nous avons utilisé la *méthode du Gradient* qui peut se résumer ainsi :

- 1 - On choisit une valeur  $\Theta$  et une valeur logique  $m_0$  (solution initiale)
- 2 - On calcule l'expression  $F_1(m_0)$
- 3 - On calcule le gradient  $g(m_0) = ( \partial F_1 / \partial m )_{m=m_0}$
- 4 - On calcule une nouvelle valeur de  $m$  ,soit
 
$$m_1 = m_0 - \Theta . g$$
- 5 - On calcule  $F_1(m_1)$  :
  - si  $F_1(m_1) \leq F_1(m_0)$  reprendre 3 en remplaçant  $m_0$  par  $m_1$
  - Autrement faire  $\Theta = \Theta/2$  et reprendre 4
- 6 - On arrête le calcul si  $F_1(m) \leq \epsilon$  où  $\epsilon$  est la précision choisie

$\beta$ -3 : Gradient de  $F_1(m)$  :

En dérivant l'expression (III.7) par rapport à chacun des paramètres de  $m = (e_1, e_2, \dots, e_{n-1}, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$ , on obtient :

$$\text{pour } e_1 : \quad \partial F_1 / \partial e_1 = -2 \cdot \sum_{j=1}^N ( \partial T(\lambda_j, m) / \partial e_1 ) \cdot (T_{1j} - T(\lambda_j, m))$$

et de même pour les autres paramètres .

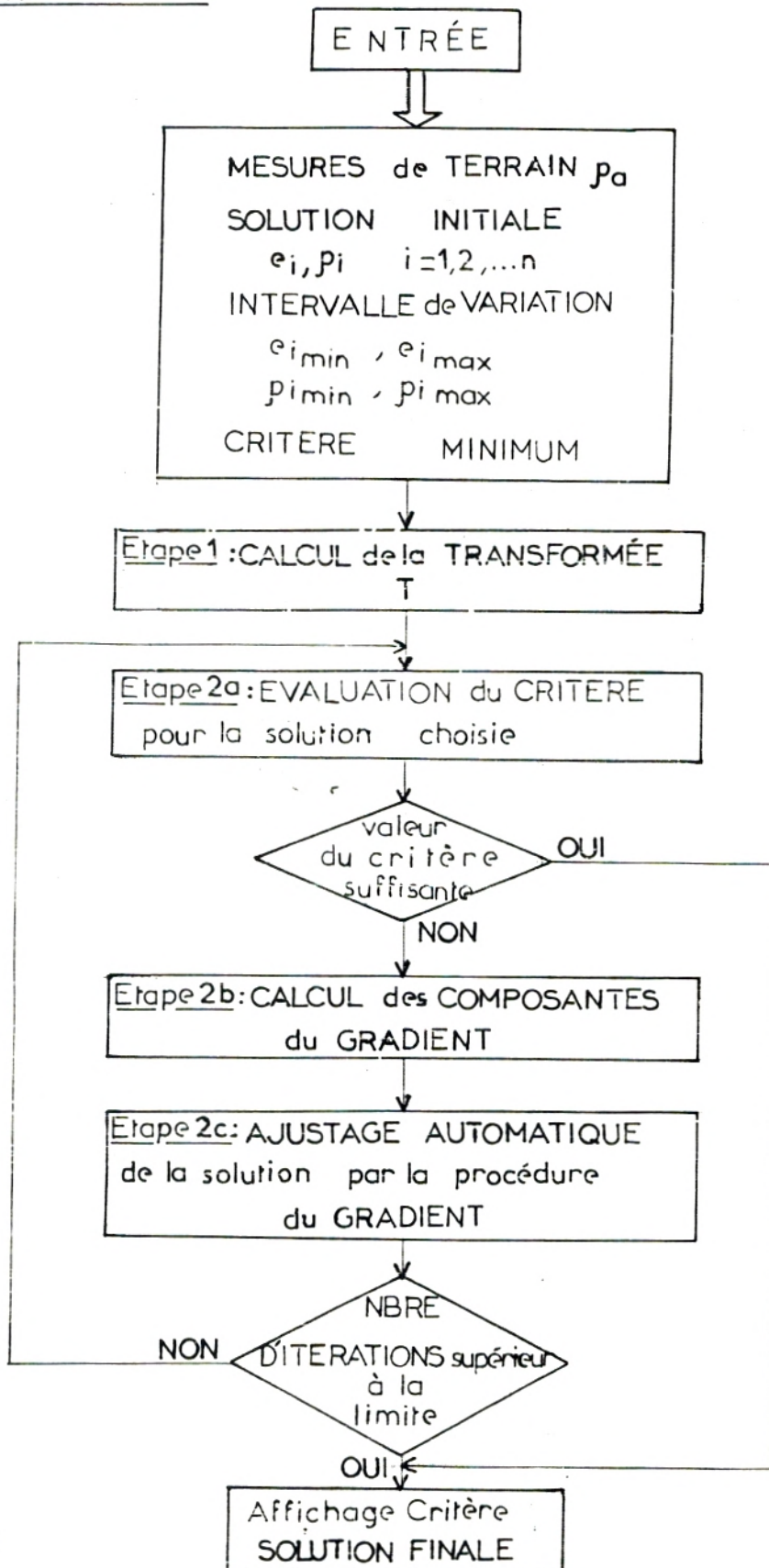
Il restera à évaluer les dérivées partielles de  $T(\lambda_j, m)$  par rapport à chacune des quantités

$$\begin{array}{ll} e_i & \text{pour } i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \rho_i & \text{pour } i = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

Pour cela nous avons utilisé une relation de récurrence développée par H.K.Johansen (1975) .

Nous avons écrit l'organigramme B de ce processus de calcul dont un sous-programme sera donné au chap.IV-B.3. $\gamma$  .

ORGANIGRAMME B



## 2 ) INTERPRETATION DIRECTE UTILISANT LA COURBE DE

### DAR-ZARROUK (D.Z) :

Les méthodes précédentes sont valables pour des courbes S.E figurant des modèles tabulaires horizontaux de terrain ,pour lesquels certaines règles sur la forme des courbes doivent être respectées : pente inférieure à  $45^{\circ}$  ,etc...

Pour les sondages électriques présentant des pentes abruptes (ne correspondant pas à l'hypothèse d'horizontalité ) ou des distorsions dues à des hétérogénéités latérales ,Zohdy (1974) développa une méthode tout à fait différente utilisant certaines propriétés de la courbe D.Z .

Dans ce cas le rôle de la Transformée T est secondaire et il ne sera pas nécessaire de remplacer les valeurs de résistivités apparentes de la courbe de S.E par celles de leur Transformée T .

En outre à la différence des techniques précédentes ,on ne fera aucune hypothèse sur le nombre de couches ,ou leurs épaisseurs et résistivités .

Le principe est le suivant :ayant observé que les courbes S.E et D.Z correspondantes sont souvent proches l'une de l'autre (cf. chap.II-E) ,il s'agira de supposer en première approximation que la courbe D.Z est identique à la courbe S.E à traiter .

Dans ce cas : - l'inversion de la courbe D.Z en considérant tous les points de mesure comme des points-D.Z ,va fournir une section géoélectrique dont le nombre de couches est égale au nombre de points-D.Z .

- la courbe S.E' correspondant à cette section sera calculée et comparée à la courbe S.E originale .

- un ajustement de la courbe D.Z sera effectué qui permettra une autre inversion ,etc...



La programmation de cette méthode est tentante et donne des résultats dans certains cas .Cependant du fait de l'existence de pentes de remontée (respectivement ou de descente) sur certaines courbes S.E pouvant être supérieures à 1 (resp. ou inférieures à -1) on aboutit à des résultats aberrants ,suivant les observations de Zohdy (1975) qui introduisit les courbes D.Z modifiées ( M D.Z ) .

$\alpha$  : Courbes D.Z modifiées M D.Z :

Nous considérerons deux sortes de courbes M D.Z :

- celles correspondant au contraste de résistivité

$\rho_1 \geq \rho_2 \leq \rho_3$  et notées M D.Z-L

- les autres relatives à la succession de résistivités

telle que  $\rho_1 \leq \rho_2 \geq \rho_3$  et notées M D.Z-T .

Ces courbes sont définies de telle façon qu'elles puissent approximer les courbes S.E de pente très ascendante ou très descendante .

$\beta$  : Inversion des courbes M D.Z :

A partir des équations des courbes M D.Z il peut être déduit l'expression donnant les paramètres  $h_1, \rho_1, h_2, \rho_2$  connaissant les points-M D.Z successifs  $(L_j, \bar{\rho}_j)$  ,  $(L_{j+1}, \bar{\rho}_{j+1})$

$(\beta-1)$  ) Pour la courbe M D.Z-L :

$$\rho_1 = \bar{\rho}_1 \quad h_1 = L_1$$

$$h_2 = \rho_2 \cdot ( L_2 / \bar{\rho}_2 - L_1 / \bar{\rho}_1 )$$

$\rho_2$  est obtenu par la résolution de l'équation :

$$((L_j + \rho_2 Q) / L_{j+1})^2 \cdot (((L_j \bar{\rho}_j + \rho_2^2 Q) / (L_j + \rho_2 Q))^2) \cdot L_{j+1} / \bar{\rho}_{j+1})^X - 1 = 0$$

$$0 \leq X \leq 1 \quad (III.8)$$

avec :  $L_j, L_{j+1}$  : abscisses de 2 points successifs d'une courbe  
M D.Z-L

$\bar{\rho}_j, \bar{\rho}_{j+1}$  : ordonnées de 2 points successifs d'une courbe  
M D.Z-L

$$Q = L_{j+1} / \bar{\rho}_{j+1} - L_j / \bar{\rho}_j$$

L'équation précédente contient donc deux inconnues  $X$  et  $\rho_2$ . Nous utiliserons pour sa résolution la méthode *Régula-Falsi* qui comporte les étapes suivantes :

Désignons par  $f$  le premier membre de (III.8)

- on détermine la première valeur  $X = X'$  (en  
 décrémentant  $X = 0.6$  par pas de  $0.2$ ) pour laquelle  $f$  prend  
 une valeur négative  $f=f^-$  pour  $\rho_2 = \rho_2^- = 0$

- puis on calcule  $f=f^+$  pour  $\rho_2 = \rho_2^+ = \bar{\rho}_j+1$

- on détermine par itération la première  
 approximation

$$\rho_2(1) = (\rho_2^- \cdot f^+ - \rho_2^+ \cdot f^-) / (f^+ - f^-) \quad (III.9)$$

-on remplace  $\rho_2$  par  $\rho_2(1)$  dans (III.8) pour  
 calculer  $f(1)$  puis on remplace  $\rho_2^-$  et  $f^-$  dans (III.9) par  
 $\rho_2(1)$  et  $f(1)$  pour obtenir une seconde approximation  $\rho_2=\rho_2(2)$   
 etc...

A noter qu'une variante de cette méthode, appelée Illinois et  
 Pegasus (M. Boumarhat et al 1983) accélère sensiblement la convergence  
 de ce processus .

(3.2) Pour la courbe M D.Z-T :

$$\rho_1 = \bar{\rho}_1 \quad h_1 = L_1$$

$$h_2 = (L_2 \cdot \bar{\rho}_2 - L_1 \cdot \bar{\rho}_1) / \rho_2$$

$\rho_2$  est obtenu à l'aide de l'équation :

$$(L_j+1/(L_j+k/\rho_2))^2 \cdot ((L_j+k/\rho_2)^2 / ((L_j+1\bar{\rho}_j+1)(L_j/\bar{\rho}_j) + K/\rho_2^2))^{X_j} - 1 = 0$$

(III.10)

$$\text{avec } K = \bar{\rho}_j L_j - \bar{\rho}_{j-1} L_{j-1}$$

L'équation est résolue d'une façon analogue à (III.8) par la  
 méthode *Regula-Falsi* .

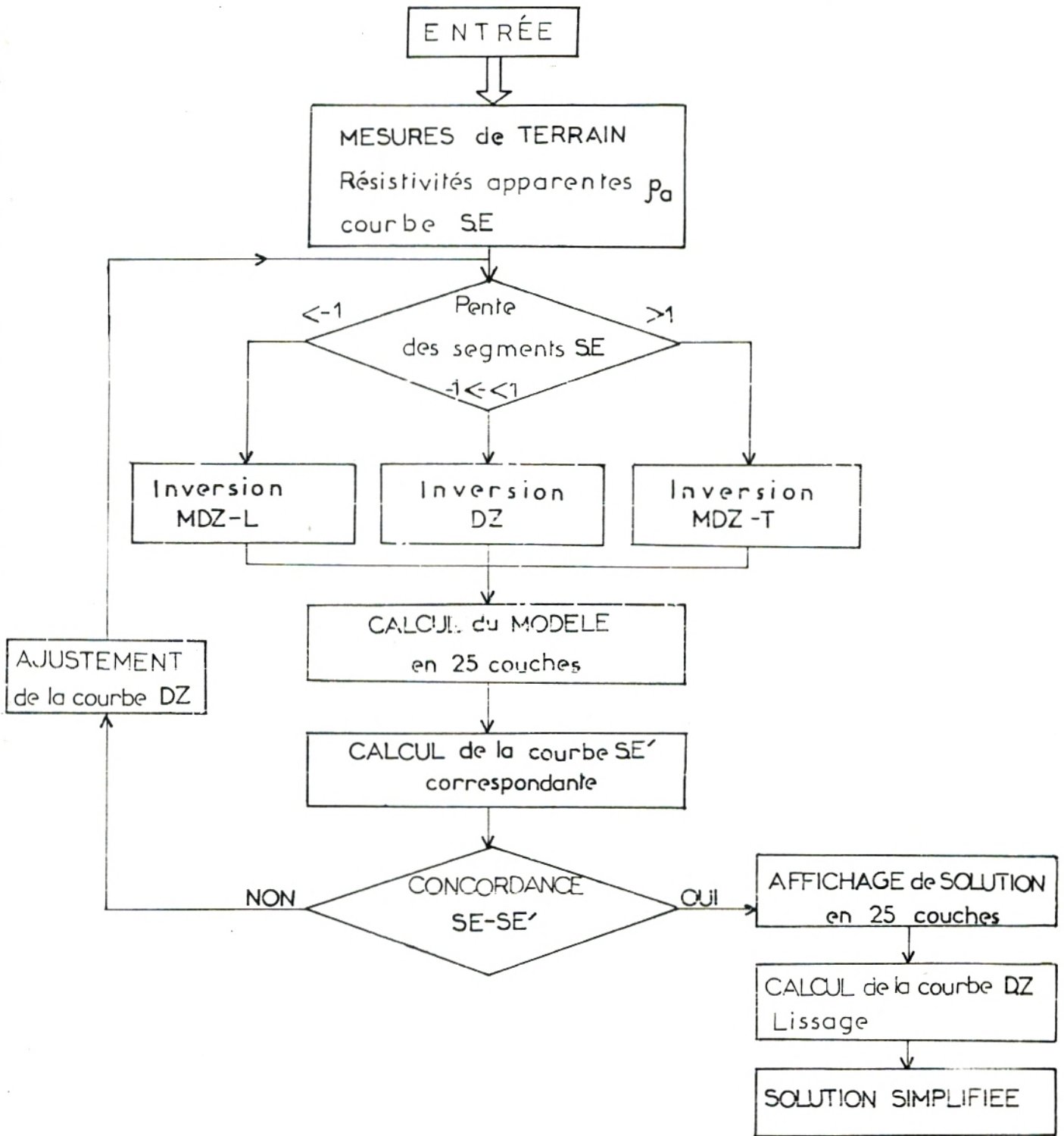
$\gamma$  : Inversion des courbes S.E :

L'inversion est exécutée en trouvant une courbe MD.Z formée par  
 une combinaison de segments D.Z , M D.Z-L et M D.Z-T qui  
 approxime la courbe S.E. L'inversion de la courbe M D.Z donnera  
 les paramètres de la section géoélectrique .

La pente de chaque segment de la courbe S.E (c'est à dire entre deux points successifs) sera calculée de façon à pouvoir choisir l'équation appropriée de l'inversion ( D.Z ou M D.Z-L ou M D.Z-T)

L'organigramme Z qui suit est relatif au programme que nous avons écrit et dont le listing se trouve au chap.IV-B.3 .

ORGANIGRAMME Z.



### 3 ) INTERPRETATIONS DIRECTE et INVERSE utilisant d'autres DISPOSITIFS QUADRIPOLAIRES :

Ce que nous avons vu jusqu'à présent concerne le Quadripôle symétrique Schlumberger .Cependant l'opération de convolution qui a permis le passage des valeurs de résistivités apparentes à la Transformée T et l'opération inverse par l'intermédiaire des coefficients d'un filtre ,peut être appliquée pour d'autres dispositifs dipolaires .(fig. 6)

C. Nyman et M. Landisman (1977) ont ainsi calculé les filtres correspondant à certains dispositifs (Tableau 5 ). Ils remarquent après *Koefoed* qu'il est possible d'augmenter la précision du transfert Direct ou inverse en limitant les oscillations du filtre : ceci est obtenu en optimisant l'intervalle d'échantillonnage  $\Psi$  .

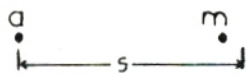
Ainsi ils calculent différentes valeurs optimales de  $\Psi$  ,nombre de points à échantillonner par décade (fig.6 ) pour les dispositifs :

$\alpha = \infty$	Schlumberger et azimuthal
$\alpha = 3$	perpendiculaire
$\alpha = 2$	radial
$\alpha = -1$	parallèle

FIG. 6

DISPOSITIFS QUADRIPOLES

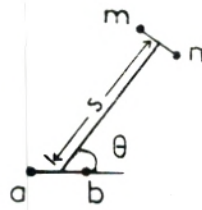
SCHLUMBERGER



b

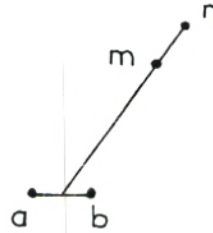
$\alpha = \infty$

AZIMUTHAL



$\alpha = \infty$

RADIAL



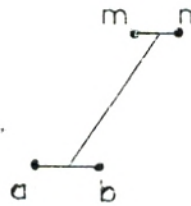
$\alpha = 2$

PERPENDICULAIRE



$\alpha = 3$

PARALLELE

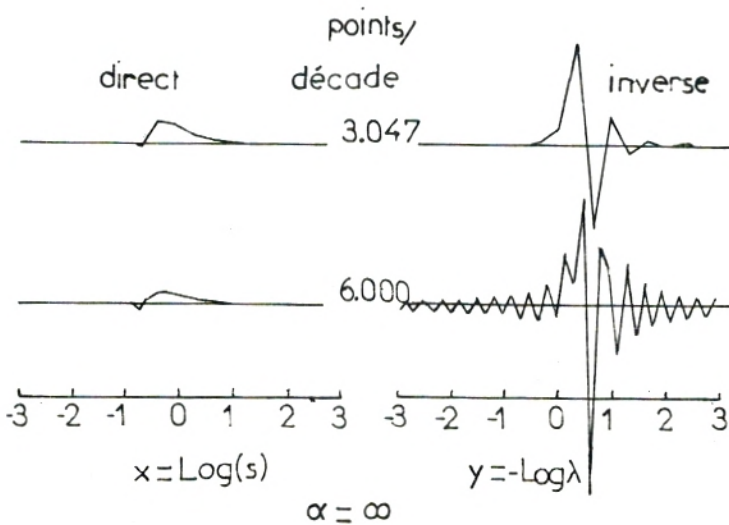


$\alpha = \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{\cos^2 \theta}$

OSCILLATIONS  
des COEFFICIENTS du FILTRE

RAPPORT  
D'ÉCHANTILLONNAGE OPTIMAL

$\Psi$  points/décade



$\alpha$	$\infty$	3	2	-1
$\Psi$	3.047	2.592	2.496	1.944
	4.438	3.996	3.934	3.692
	5.624	5.197	5.152	4.993
	6.700	6.287	6.251	6.132
	7.704	7.303	7.273	7.177
	8.656	8.265	8.239	8.159
	9.568	9.185	9.163	9.093
	10.448	10.071	10.051	9.990
	11.299	10.931	10.913	10.859

(d'après Nyman C. et al  
1977)

Tableau 5 Filtre direct  $f$  et inverse  $i$

Index	$\infty$		$\infty$		3		3		2		2		-1		-1		
	$f$	$i$	$f$	$i$	$f$	$i$	$f$	$i$	$f$	$i$	$f$	$i$	$f$	$i$	$f$	$i$	
-9																	.0176
-8																	-.0070
-7																	.0307
-6																	.0768
-5																	.1069
-4																	.1164
-3																	.1118
-2																	.0997
-1																	.0733
0																	-.0609
1																	.0698
2																	.0780
3																	.1537
4																	.9384
5																	.7642
6																	1.8482
7																	.7664
8																	-.3792
9																	-7.0691
10																	28.6716
11																	-.0336
12																	45.8147
13																	-27.3147
14																	14.0633
15																	-7.2205
16																	3.9890
17																	-2.4148
18																	1.5850
19																	-1.1092
20																	.8154
21																	-.6228
22																	.4902
23																	-.3953
24																	.3252
25																	-.2720
26																	.2307
27																	-.1064
28																	.0398

\*For values of  $\alpha$  of  $\infty$ , 3, 2, and -1, and for optimal sampling rates  $\psi$  near four and ten points per decade. Coefficients are for operator lengths of three decades.

A P P L I C A T I O N  
A L ' E T U D E H Y D R O G E O L O G I Q U E  
D E S R E G I O N S  
D E T L E M C E N E T D E T A M A N R A S S E T

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

Les méthodes de traitement que nous venons d'examiner vont être appliquées à deux problèmes distincts concernant l'hydrogéologie des régions de Tlemcen et de Tamanrasset .

Pour la première étude , nous avons établi un rapport relatif aux mesures géophysiques que nous avons effectuées en 1980 .

Les données acquises seront retraitées avec d'une part des instruments plus performants représentés par les programmes informatiques de traitement établis , et d'autre part grâce aux informations apportées par les logs géologiques de quelques forages récents . Nous pourrons alors esquisser l'allure structurale de la région .

Les différents traitements seront exposés pour quelques courbes de sondages électriques et ceci d'autant mieux que certains modèles atteignant jusqu'à 8 couches , il sera fait appel à plusieurs méthodes de traitements pour une même courbe . Nous pourrons ainsi en faire une étude comparative .

Les S.E de la seconde région , l'Oued In-Amguel, font l'objet d'une étude plus complète comportant en plus des profils de sismique-réfraction et l'exécution de nombreux piézomètres . Ces S.E de moindre elongation AB , présentent une allure plus simple et semblent ainsi être mieux appréhendés pour le traitement .

C'est dans cette dernière étude que les paramètres géophysiques seront à relier à certaines données hydrogéologiques .



## A . PROCEDURES du TRAITEMENT :

Les programmes de calcul ayant été exposés précédemment nous allons maintenant nous atteler à leur application pour la détermination de la distribution des résistivités et épaisseurs à l'aplomb des sondages électriques .

Deux procédures différentes seront utilisées dépendant des conditions géologiques spécifiques des deux zones à étudier .

### 1 ) CONTROLE PREALABLE des MESURES :

Les programmes établis concernent un sous-sol tabulaire formé de couches homogènes et isotropes . Dans ces conditions , les diagrammes de S.E doivent exclure certaines courbures excessives dues à des mesures erronées ou au fait que le sous-sol n'est pas tabulaire .

Pour traiter un S.E il faudra remplacer la courbe de terrain par la courbe la plus voisine qui corresponde effectivement à un S.E en stratification tabulaire . Si on néglige cette précaution , on risque de rechercher en vain une solution inexistante .

### 2 ) TRAITEMENT INDIVIDUEL des COURBES S.E :

Si l'on se trouve dans le cas des S.E isolés ou assez éloignés les uns des autres et que l'on n'ait pas de raisons de supposer que le sous-sol présente une bonne continuité entre les stations , par exemple dans le cas de nombreux accidents géologiques , on s'attachera alors surtout à rechercher pour chaque S.E plusieurs solutions tenant compte des données géologiques fournies .

Cette méthode sera utilisée dans l'étude de Tlemcen pour deux raisons :

- Existence de nombreuses failles
- Forages en nombre insuffisant et trop distants des S.E pour permettre d'effectuer une bonne corrélation avec ces derniers .

### 3 ) TRAITEMENT par SECTIONS :

Ce type de traitement sera appliqué pour l'étude des alluvions de l'Oued In-Amguel .

Dans ce cas les S.E sont disposés dans une zone où l'on suppose qu'épaisseurs et résistivités des couches ne varient que progressivement d'une station à l'autre .On impose donc au traitement une contrainte supplémentaire pour obtenir des sections "continues" du sous-sol .

Dans l'étude d' In-Amguel de nombreux forages ont été exécutés à l'emplacement même des S.E .De plus les mesures électriques ont été conjointement réalisées avec des profils de sismique réfraction .

Il est donc possible dans ce cas d'imposer à la solution recherchée pour chaque S.E d'un profil de ressembler à un modèle donné par le log géologique ou par les données sismiques .

Le principe est donc d'utiliser un modèle général fourni par un S.E particulier ( à l'emplacement d'un forage par exemple); chaque S.E suivant sur le profil aura comme modèle la solution du S.E précédent (fig.7).

### 4 ) INDETERMINATION DUE AU PRINCIPE D'EQUIVALENCE :

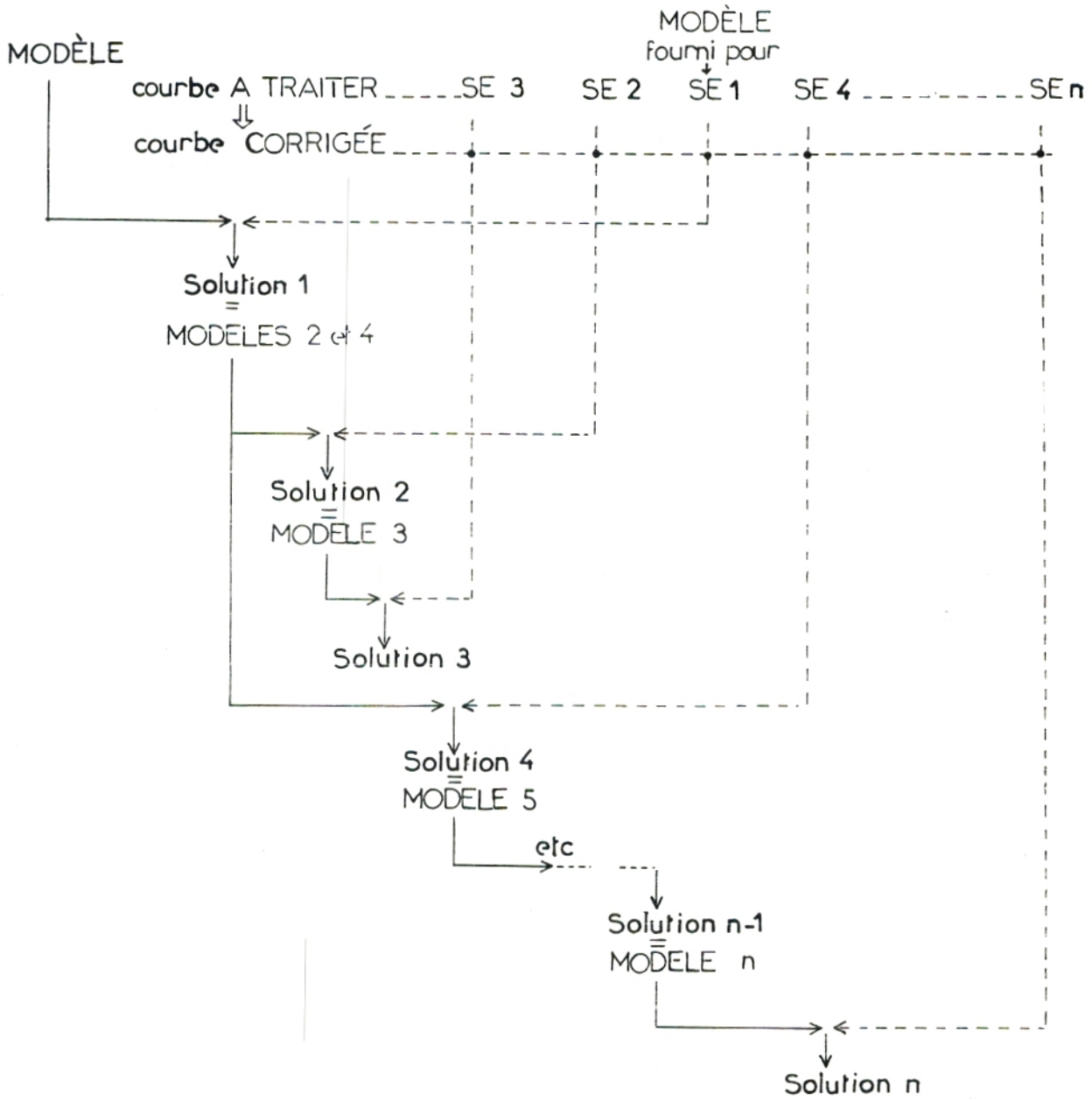
Le phénomène d'équivalence se pose dans ces termes :

$\alpha$  ) toute répartition de résistivités dans le sous-sol donnant une courbe S.E passant à l'intérieur de fourchette de résistivités apparentes est solution du problème .Ceci entraîne donc différentes distributions de résistivités donnant pratiquement la même courbe : il faut donc choisir parmi celles-ci la répartition répondant le mieux à des contraintes géologiques .

$\beta$  ) l'équivalence évoquée au chap. I permet de voir le rôle important joué par la résistance transversale  $R_t = \rho .h$  et par la conductance longitudinale  $C_l = h/\rho$  .

Ce sont ces grandeurs qui sont déterminées d'une façon précise par la résolution de la courbe S.E . Il en résultera une double infinité de solutions sur la résistivité ou l'épaisseur des couches .

FIG.7



TRAITEMENT des SE par SECTIONS

Le problème d'équivalence étant incontournable ,on peut par contre définir des intervalles de variations des épaisseurs et des résistivités qui permettraient de fournir les modèles géologiques extrêmes compatibles avec les résultats des mesures géophysiques .

J.F. Rocroi (1975) a étudié ce problème en utilisant certains diagrammes d'équivalence .Quant à nous ,nous utiliserons les diagrammes de Pylaev pour déterminer les limites de l'équivalence.

#### 5 ) REDUCTION des EPAISSEURS :

Pour des commodités de calcul nous avons divisé toutes les épaisseurs des couches lors du traitement des courbes S.E ,par celle de la première couche .

En vertu des lois de similitude ,ceci revient à translater horizontalement toutes les courbes sur le papier logarithmique de façon à lire pour l'épaisseur de la première couche la valeur 1 .

### E . ETUDE dans la REGION de TLEMCEEN :

#### Introduction :

Dans le cadre d'un programme d'extension de la Ville et de sa zone industrielle ,il a été nécessaire il y a une dizaine d'années d'étudier les potentialités en eau présentées par cette zone . De nombreuses études hydrogéologiques ont été menées dans le but de permettre l'implantation de forages .

Des campagnes de géophysique par la méthode des sondages électriques ont été menées pour préciser la position des réservoirs potentiels .Nous avons publié les résultats à cette époque : différenciation d'horizons en fonction de leurs résistivités ,structure géologique etc ...

Deux points importants de ce rapport sont à relever qui nous ont amenés à reprendre cette étude :

En premier lieu la quasi-totalité des courbes S.E avait été traitée par la méthode des abaques et des diagrammes auxiliaires ce qui a, outre son imprécision, limité le nombre de couches et réduit les hypothèses sur les modèles à considérer.

Par ailleurs, aucun forage profond n'était disponible dans la zone étudiée ou dans les secteurs limitrophes qui auraient permis un étalonnage des mesures.

Ces considérations nous ont conduit aujourd'hui à reprendre le traitement des données en utilisant l'outil puissant que représente l'Ordinateur et en exploitant au maximum les informations données par les nombreux forages actuellement disponibles.

## 1) PRESENTATION de la ZONE d'ETUDE :

### a : Situation . Géographie :

L'étude a été réalisée sur la bordure septentrionale des Monts de Tlemcen, dans la dépression qui vers le Nord et l'Ouest s'étale en vaste plaine.

Nous avons exécuté les mesures à partir des abords immédiats de la ville de Tlemcen jusque vers le Nord-Est à proximité du village de Sidi Abdelli.

La superficie du permis est d'environ 200 km<sup>2</sup>.

Il est cadré par les coordonnées Lambert :

X = 130 000 à 147 000

Y = 182 000 à 202 000

Il figure sur la carte topographique :

Tlemcen n° 270 échelle 1/ 50 000

Du pied de la région haute (700 à 1000 m) caractérisée par :

- les Djebel Tefatisset, Ech-Cherg et Dhahar Mendjel à l'Ouest

- le Djenaf Sakrtine au Sud

- et les Djebel Oum-el-Allou et Ramlya à l'Est

le relief du sol s'abaisse en gradins jusqu'à 400m environ.

Des petits cours d'eau s'encaissent profondément dans les terrains traversés : l'Oued Saf-Saf par exemple qui devient l'Oued Sikkak et creuse le canyon de Négrier.

β : Elements géologiques :

β-1 ) documents consultés :

- carte géologique au 1/50.000
- photos aériennes

β-2 ) Situation géologique :

Les Monts de Tlemcen comportent un ensemble d'assises Jurassiques limitées vers le Nord-Ouest par un effondrement .

Le Graben ainsi créé a été partiellement comblé au Tertiaire par des sédiments mollassiques : marnes , grès , localement poudingues liés à des paléo-oueds et ce comblement s'est localement poursuivi assez tard si l'on considère que les calcaires lacustres du Quaternaire font partie de cette même phase .

Le substratum Jurassique réapparaît sous forme d'une petite chaîne qui va du Djebel Tefatisset au Djebel el Hadid..

Elle est bien marquée dans la topographie et l'on en a une bonne vue d'ensemble depuis la terrasse de Lalla Setti au-dessus de Tlemcen

Ce substratum réapparaît plus discrètement dans la plaine au pied du Djebel el Hadid . On connaît également trois petits affleurements entre Tlemcen et Ain-Defla . Ces affleurements pourraient être le témoin d'un substratum peu profond mais la coupe de l'Oued el Horra un peu plus à l'Ouest montre des sédiments Tertiaires sur plus de 30m .

Il faut donc admettre que ce bed-rock Jurassique tout comme les Monts de Tlemcen eux-mêmes est affecté d'un important réseau de failles .

Ces failles n'apparaissent pas sur les photos aériennes en raison des dépôts Tertiaires qui les masquent , néanmoins sur la bordure des Monts , on a pu les observer en particulier à l'Est de Oum el Allou

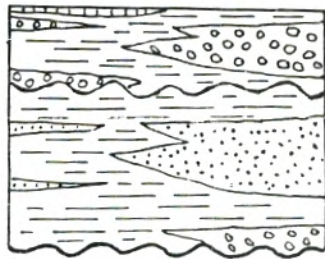
L'accident majeur de direction ENE-OSO qui limite les Monts de Tlemcen au Nord-Ouest se suit bien depuis Tlemcen .

On trouve des échos de cette direction au Nord-Ouest de Tlemcen dans le Dahar el Mendjel ( chaînon Tefatisset -el Hadid ) .

Des réajustements se traduisent par des directions Est-Ouest ,  
N N O-S S E et plus rarement N N E-S S O .

La direction Est-Ouest est particulièrement spectaculaire sur les photos à l'est de la feuille Tlemcen 7-8 (1/25 000) .

FIG. 8



Plio-Quaternaire : dépôts continentaux plus ou moins grossiers avec un ou plusieurs horizons indurés ( 5 à 100 m )

Miocène : marnes plastiques et grès tendres argileux ( 200 à plus de 1000 m )

Crétacé basal : alternances de marnes et de marno-calcaires avec de rares bancs gréseux ( 200 à 300 m )

Zéglia A : calcaires et marno-calcaires ( 100 à 150 m )

dolomies de Terni : dolomies massives avec de nombreux bancs et lentilles calcaires ( 100 à 120 m )

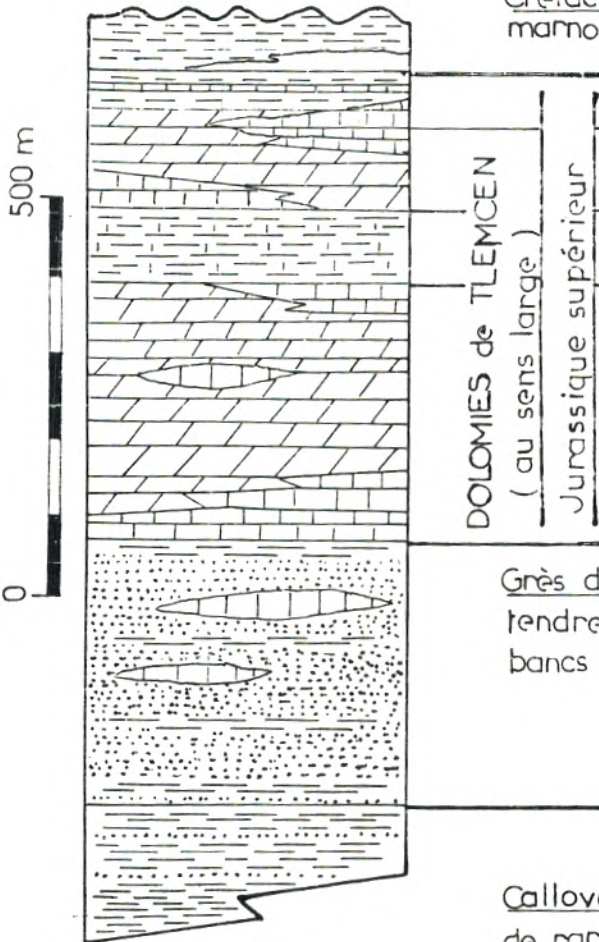
marno-calcaires ( 60 à 120 m )

dolomies de Tlemcen ( au sens strict )

dolomies massives avec de rares bancs et lentilles calcaires ( 250 à 350 m )

Grès du Jurassique supérieur : grès assez tendres un peu argileux avec de nombreux bancs marneux ou argileux ( 300 à 600 m )

Callovo-Oxfordien : argiles et marnes avec de rares passées gréseuses ( 300 à 500 m )



Coupe synthétique des formations affleurant

dans les Monts de Tlemcen ( d'après B.Collignon 1986 )

### β-3 ) Hydrogéologie :

Le Jurassique ( calcaires ,grès ,marnes ) a été et est encore en partie le siège d'importantes circulations d'eau .

Les tufs et travertins en sont une preuve ,l'alignement des sources au pied des Monts en est une autre .

Localement et plus particulièrement aux croisements des failles,des dolines se sont formées suffisamment nettes pour être levées par le topographe sur la carte au 1/25 000 ( Djebel Remailya ) .

Des traces d'anciens systèmes karstiques bien développés sont visibles sur les flancs des vallées que l'érosion a ouvertes dans le chaînon Tfatisset el Hadid ,en particulier dans les gorges de l'Oued Saf-Saf .

Il est logique de penser que les failles affectant le fond du fossé pour autant qu'elles soient ouvertes se sont développées en karst comme on peut l'observer chaque fois que le Jurassique affleure.

La prise d'eau de Négrier près d'un affleurement du Jurassique est une résurgence de ce système karstique ; les développements de tufs au Nord de Négrier sont aussi liés à ce karst .

Les sédiments de type mollassique ne devraient pas donner de très grosses sources .

Les bancs de grès et de sables peuvent contenir un peu d'eau mais leur discontinuité et leur puissance réduite ne permettent pas des accumulations importantes .Par contre ils peuvent former une couverture protectrice efficace contre la pollution de l'eau du karst sous-jacent .

## 2 ) TRAVAUX :

### α : Exécution :

Il ont été effectués du 12.4 au 15.5.79 pour un programme de

- 41 S.E en longueur AB = 1000m
- 39 S.E en longueur AB = 3000m

### β : Logistique : le personnel était constitué de

- un géophysicien ,chef de mission , l'auteur
- deux techniciens opérateurs
- un chauffeur et six manoeuvres



Le matériel comportait :

- un potentiomètre OYO ES-D2 (Japonais)
- une source de courant SCINTREX avec un groupe électrogène (Canadien)
- un amplificateur de tension SERVOGOR avec dérouleur de papier enregistreur (Autrichien)
- trois véhicules tous terrains .

### 3 ) TRAITEMENT des COURBES S.E :

Nous passerons en revue successivement les cinq programmes de traitement automatique établis ,pour résoudre des courbes S.E progressivement plus compliquées et comportant un nombre plus grand de couches .

Le choix a été porté sur des courbes dont l'allure est régulière et préfigurent des modèles tabulaires horizontaux .Les autres courbes S.E dont l'allure est en rapport avec des couches inclinées ou autres accidents géologiques font l'objet d'une autre analyse et sont intégrés dans les profils en fonction de leurs particularités .

Le reste des S.E ,environ 5 à 10 % ,n'est pas interprétable en raison d'erreurs de mesures ou de fuites de courant dans les lignes AB .

#### $\alpha$ : Premier Programme " S o n e l " :

##### $\alpha-1$ ) Etapes :

Pour l'interprétation directe nous avons écrit ce programme qui va effectuer un traitement semi-automatique .En effet la résolution s'effectuera en deux étapes ,suivant la méthode de Patella (cf.chap.III-B.1) et l'organigramme S.

##### a ) Calcul automatique de la Transformée $T_n$ :

Ce calcul s'effectue ainsi :

■ comme entrée ,on introduit.

- les résistivités apparentes échantillonnées
- le nombre de points échantillonnés

■ comme sortie ,on obtient

- les valeurs de la Transformée  $T_n$
- les valeurs des Transformées réduites  $T_{n-1}$

$T_{n-2}$  ,...en fonction de  $1/\lambda$  .

b ) Détermination graphique des paramètres des couches  $(h_1, \rho_1)$  ,  $(h_2, \rho_2)$  , etc...

$\alpha-2$  ) Caractéristiques :

- le programme permet le traitement des S.E d'élongation maximale  $AB = 3200m$  : ceci a nécessité l'introduction de deux matrices  $G(38,38)$  et  $F(25,40)$  représentant les valeurs de la fonction de Bessel

- il permet également de traiter les modèles à substratum très résistant

- toutes les courbes de Transformées  $T_n$  et Transformées réduites  $T_{n-1}, T_{n-2}, \dots$  sont calculées automatiquement .

$\alpha-3$  ) Listing partiel : permettant le calcul des Transformées de résistivités .

```

3281 REM CALCUL de la TRANSFORMEE T
3282 REM et des TRANSFORMEES REDUITES
3290 J=1
3300 LPRINT USING "#####.##";R(J),P(J)
3310 FOR J=2 TO J1-1
3320 LET A(J-1)=(P(J+1)-P(J-1))/2
3330 NEXT J
3340 LET J=J1
3350 A(J-1)=(P(J)-P(J-1))/2
3360 FOR K=1 TO J1-1
3370 S=0
3380 FOR J=1 TO J1-1
3390 LET S=S+A(J)*G(J,K)
3400 NEXT J
3410 T(K)=S+P(1)
3420 NEXT K
3430 FOR K=1 TO J1-1
3440 LPRINT USING "#####.##";R(K+1),P(K+1),A(K),L(K),T(K)
3450 NEXT K
3460 PRINT "Donner la première épaisseur"
3470 PRINT "et le nombre estimé de couches"
3480 INPUT E1,N
3490 FOR N=1 TO N-2
3500 FOR K=2 TO J1-1
3510 H=-2*E1/L(K)
3520 V=(1-EXP(H))/(1+EXP(H))
3530 V=P(1)*V
3540 LET T(K)=(T(K)-V)/(1-T(K)+V/(P(1)^2))
3550 IF N=2 THEN 3570
3560 T1(K)=T(K)
3570 NEXT K
3590 NEXT N
3594 LPRINT "TABLEAU S2"
3600 LPRINT "Transformées réduites de T"
3610 LPRINT " L Tn-1 Tn-2 "
3615 LPRINT
3620 FOR K=9 TO J1-1
3630 LPRINT USING "#####.##";L(K),T1(K),T(K)
3640 NEXT K
3650 GOTO 3910
3660 PRINT "donner la conductance"
3670 INPUT C
3680 DIM B(50)
3690 J=1
3700 PRINT J-1,R(J),P(J),"neant"
3710 FOR J=2 TO J1-1
3720 B(J-1)=(P(J+1)-P(J-1))/2
3730 PRINT J-1,R(J),P(J),B(J-1)
3740 NEXT J
3750 J=J1
3760 B(J-1)=(P(J)-P(J-1))/2
3770 PRINT J-1,R(J),P(J),B(J-1)
3800 PRINT "calcul des t cas infini"
3810 PRINT "l=", "t="
3820 FOR K=1 TO J1+1
3830 T=0
3840 FOR J=1 TO J1-1
3850 T=T+B(J)*C(J,K)
3860 NEXT J
3870 I=J1-16
3880 T(K)=T+P(1)+2(I,K)/C
3890 PRINT L(K),T(K)
3900 NEXT K
3910 END

```

INTERPRETATION DIRECTE

APPLICATION au S.E 28 TLENCEN

Détermination des Paramètres R(i),H(i) des couches

Echantillonnage de la courbe du S.E 28s  
Donner le nombre de points : 35

Donner les résistivités  
Le substratum est-il isolant ? Non

TABLEAU S1

r(j)	p(j)	a(j)	L	T(L)
0.00	1.00			
0.30	1.00	0.00	0.00	1.00
0.40	1.00	0.00	0.40	1.00
0.50	1.00	0.00	0.50	0.99
0.60	1.01	0.00	0.63	1.00
0.80	1.01	0.01	0.83	1.03
1.00	1.03	0.02	1.00	1.06
1.20	1.05	0.04	1.25	1.12
1.60	1.10	0.08	1.67	1.21
2.00	1.20	0.13	2.00	1.27
2.50	1.35	0.13	2.50	1.35
3.00	1.45	0.13	3.30	1.45
4.00	1.60	0.13	4.00	1.52
5.00	1.70	0.07	5.00	1.58
6.00	1.73	0.05	6.25	1.62
8.00	1.80	0.03	8.30	1.61
10.00	1.80	0.00	10.00	1.58
12.00	1.80	-0.07	12.50	1.53
16.00	1.65	-0.15	16.70	1.42
20.00	1.50	-0.18	20.00	1.36
25.00	1.30	-0.18	25.00	1.27
30.00	1.15	-0.15	33.00	1.20
40.00	1.00	-0.10	40.00	1.16
50.00	0.95	-0.01	50.00	1.18
60.00	0.97	0.05	62.50	1.23
80.00	1.05	0.12	83.00	1.35
100.00	1.20	0.20	100.00	1.44
120.00	1.45	0.25	125.00	1.59
160.00	1.70	0.27	167.00	1.88
200.00	2.00	0.30	200.00	2.09
250.00	2.30	0.35	250.00	2.35
300.00	2.70	0.30	333.00	2.66
400.00	2.90	0.35	400.00	2.83
500.00	3.40	0.45	500.00	3.01
600.00	3.80	0.20	625.00	3.16

8.30	1.85	2.22
10.00	1.76	2.02
12.50	1.65	1.81
16.70	1.49	1.57
20.00	1.40	1.45
25.00	1.29	1.32
33.00	1.22	1.23
40.00	1.19	1.21
50.00	1.18	1.19
62.50	1.24	1.25
83.00	1.36	1.37
100.00	1.45	1.46
125.00	1.60	1.62
167.00	1.89	1.91
200.00	2.10	2.12
250.00	2.37	2.38
333.00	2.68	2.70
400.00	2.85	2.87
500.00	3.03	3.04
625.00	3.18	3.19

TABLEAU S2

Transformées réduites de T

L	Tn-1	Tn-2
2.00	1.95	15.33
2.50	2.00	6.72
3.30	2.01	4.22
4.00	2.02	3.53
5.00	2.01	3.01
6.25	1.97	2.63

Grâce au principe de similitude, nous traiterons la courbe S.E 28 dont les paramètres de la première couche sont ramenés à  $h_1=1, \rho_1=1$

Les 35 points  $P_j$  de la courbe correspondant aux abscisses  $R_j$  (col.1) sont échantillonnés (col.2) .

Le tableau S1 donne en dernière colonne les valeurs calculées de la Transformée  $T_n$  .

Le tableau S2 donne les Transformées réduites  $T_{n-1}, T_{n-2}$  obtenues en conclusion du processus de calcul .

Toutes ces courbes ont été reprises en fig.9 .

La superposition des courbes de l'abaque bi-couche avec les Transformées réduites donne successivement les paramètres  $(h_2, \rho_2)$   $(h_3, \rho_3)$  . Pour cette procédure , nous avons cependant préféré utiliser les Transformées de ces courbes , ceci donnant de meilleurs résultats selon les conclusions de Koefoed (1976) .

Exemple n° 1 : S.E 28 (Fig.9)

Voir le traitement en page suivante .

Nous obtenons finalement par résolution graphique la solution :

$\rho = 1 \text{ Ohm.m}$	$h = 1 \text{ m}$
2	9
0.7	40
4.4	

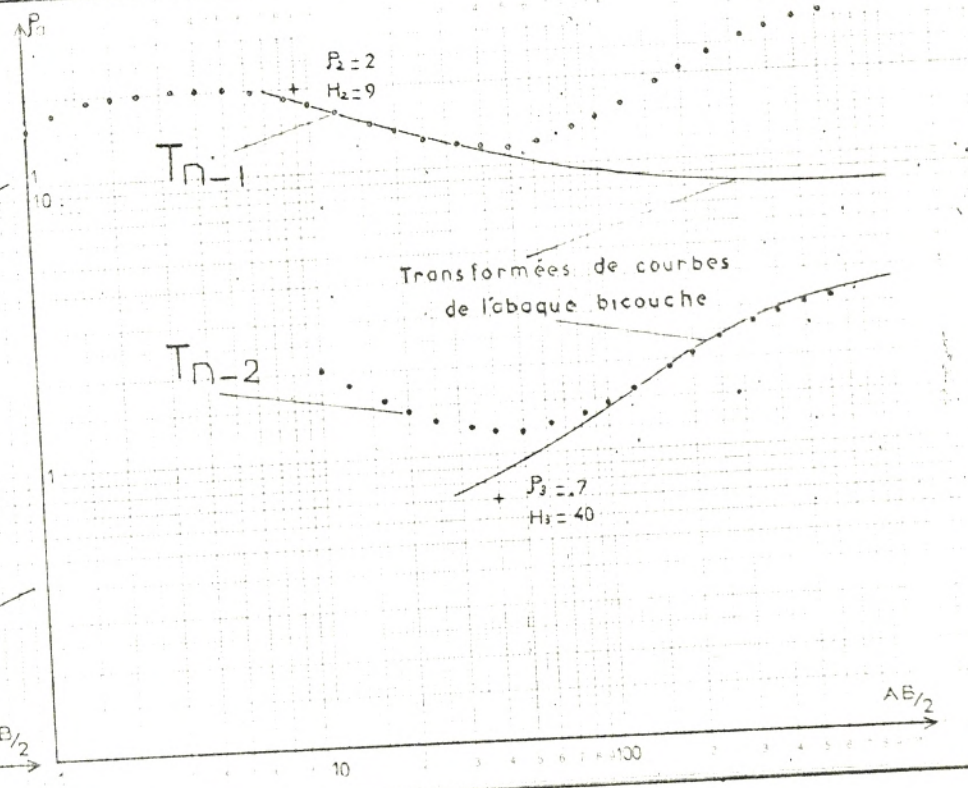
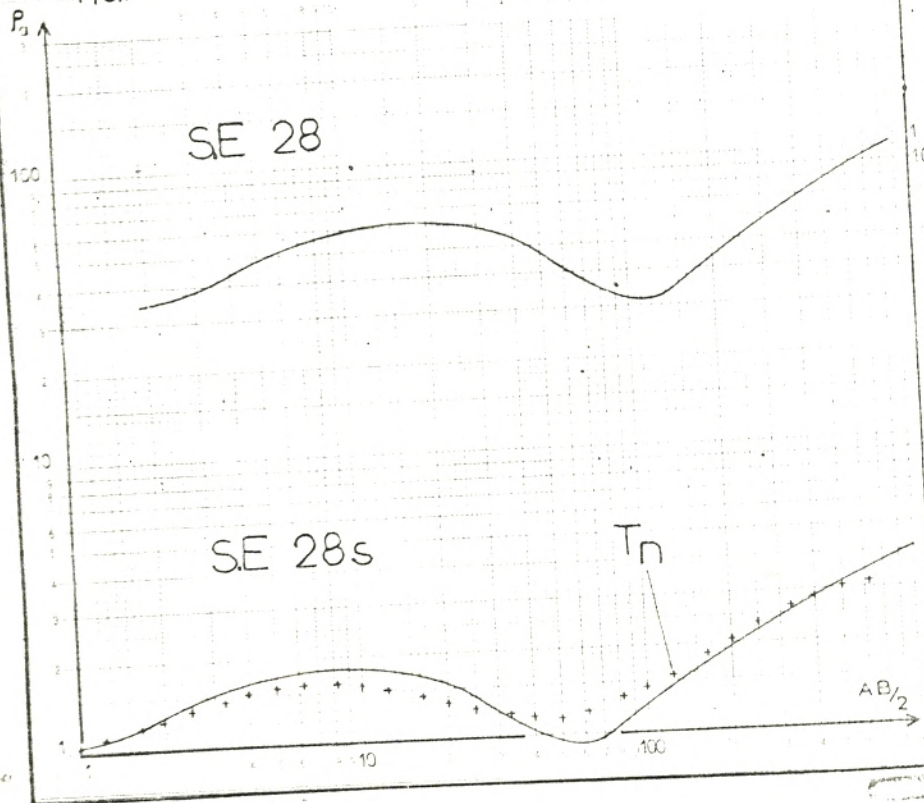
Ce qui correspond en revenant à la résistivité et à l'épaisseur réelle de la 1° couche à :

$\rho = 34 \text{ Ohm.m}$	$h = 2 \text{ m}$
68	18
23.8	80
150	

Cette résolution a été effectuée en simplifiant et lissant la courbe . Nous allons voir que nous pouvons améliorer la solution en tenant compte de certains points d'inflexion visibles sur la courbe originale et en considérant les modèles des S.E avoisinants.

(cf. Exemple n° 7) .

FIG.9



$\beta$  ) Deuxième programme " Joha " :

$\beta$ -1) Etapes :

Ce programme fait appel au calcul d'une courbe de S.E avec une précision de 10 points par décade et aux propriétés de la courbe de Dar-Zarrouk (chap.II-F.3).

Le calcul s'articule ainsi :

■ Entrée :

- échantillonner les résistivités apparentes à raison de 10 points par décade
- introduire les paramètres  $h_i, \rho_i$  issus d'une interprétation primaire du S.E

□ Sortie :

- la courbe initiale et la courbe calculée correspondant à l'interprétation sont visualisées
- " Y-a-t-il bonne coïncidence des 2 courbes ?"  
? Non
- les points D.Z et la courbe D.Z complète correspondant à l'interprétation sont visualisés

■ Entrée :

- les nouveaux points D.Z sont introduits
- inversion des nouveaux points D.Z pour obtenir les nouveaux paramètres  $h_i, \rho_i$

□ Sortie :

- la courbe initiale et la courbe calculée de la nouvelle interprétation sont visualisées
- " Y-a-t-il bonne coïncidence des 2 courbes ?"  
? Non : le processus recommence  
? Oui : la solution finale est affichée

$\beta$ -2 ) Listing partiel : correspondant au calcul

des points D.Z de la courbe D.Z avec tous les points intermédiaires en utilisant l'expression (III.2) .

```

1521 REM CALCUL des POINTS de la COURBE D.Z
1522 REM
1530 LPRINT "traçage de la courbe D.Z"
1540 DATA 1,1.25,1.58,2.0,2.5,3.16,4.0,5.0,6.3,7.9
1550 DATA 10,12.5,15.8,20,25.,31.6,40.,50.,63.,79.
1560 DATA 100,125,158,200,250,316,400.,500,1000
1570 DATA 1,1.25,1.58,2,2.5,3.16,4,5,6.3,7.9
1580 DATA 10,12.5,15.8,20,25,31.6,40,50,63,79
1590 DATA 100,125,158,200,250,316,400,500,1000
1600 READ X
1610 Y1=RO(1)
1620 IO=1
1630 Y1(IO)=Y1
1640 V(IO)=(LOG(Y1))*2.67*5
1650 READ X
1660 FOR J=1 TO N-1
1670 IO=IO+1
1680 Y1=(-L2(J)*(RO(J+1)^2-R(J)^2)+SQB(((L2(J)*(RO(J+1)^2-R(J)^2))^2)+4*(X*R(J)*
RO(J+1))^2))/(2*X*R(J))
1690 Y1(IO)=Y1
1700 V(IO)=(LOG(Y1))*2.67*5
1710 READ X
1720 IF X=1000 THEN 1770
1730 IF (J+1)>N-1 THEN 1670
1740 IF X>L2(J+1) THEN 1760
1750 GOTO 1670
1760 NEXT J
1770 LPRINT "valeurs des points D.Z"
1780 LPRINT
1790 FOR I=1 TO 4
1800 J=7*(I-1)+1
1810 LPRINT J;Y1(J);Y1(J+1);Y1(J+2);Y1(J+3);Y1(J+4);Y1(J+5);Y1(J+6)
1820 NEXT I
1830 LPRINT "courbe DAR ZARROUK D.Z"
1840 LPRINT TAB(6);"1.";TAB(36.7);"10.";TAB(67.4);"100."
1850 FOR I=1 TO 28
1860 LPRINT TAB(V(I)+6);"+"
1870 NEXT I

```

β-3) Applications :

Exemple n° 2 : S.E 2 (Fig.10) Voir le traitement en pages suivantes .

Le traitement a été appliqué à la courbe S.E 2s .Pour revenir à la courbe originale du S.E 2, il faut multiplier les épaisseurs obtenues par 0.4 .

Soit la solution finale :

$\rho = 31 \text{ Ohm.m}$	$h = 0.4 \text{ m}$
124.5	3.6
6.5	40.8
19.8	80
150	

Exemple n° 3 : S.E 8 (Fig.11)

Nous pouvons appliquer le principe d'équivalence

(chap.I-C) pour changer les paramètres des 5° et 6° couches .

En effet les résistivités égales à 318 Ohm.m et 1 Ohm.m sont soit trop forte soit trop faible par rapport au modèle que l'on s'impose du fait des S.E avoisinants .

On trouve :

$\rho = 85 \text{ Ohm.m}$	$h = 1 \text{ m}$
21	2.5
5.9	14.4
9.3	4.5
106	9.4
4.3	70.8
59.3	49.2
300	

Exemple n° 4 : S.E 40 (Fig.12) .

On multiplie par 2.6 les épaisseurs pour retrouver la solution de la courbe S.E originale .



FIG. 10

SE 2

$P_c$

100

10

100

10

SE 2s








AB<sub>2</sub>

$P_0$

100

10

LEGENDE :

-  courbe SE de terrain
-  courbe SE translátée
-  courbe SE du modèle initial
-  courbe Dar Zarrouk du modèle initial
-  points-DZ
-  points-DZ rectifiés
-  courbe SE solution

AE/2

RESOLUTION DE LA COURBE S.E n°2 PAR AJUSTEMENT DES POINTS-D.Z  
DE LA COURBE DAR-ZARROUK

Introduire les Résistivités apparentes de la courbe S.E

Donner le nombre et les paramètres des couches du 1<sup>er</sup> modèle supposé

n= 5  
r0= 31 h= 1  
r0= 125 h= 8  
r0= 7.5 h= 87.5  
r0= 16 h= 220  
r0= 150

Calcul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent

Valeurs calculées des résistivités apparentes

1	34.72538	37.37713	41.30646	46.60726	53.07937	60.33102	67.84278
8	75.0384	81.19694	85.38122	86.43177	83.15323	74.79968	61.79815
15	46.19012	31.1818	19.67093	12.78106	9.664478	8.678346	8.611639
22	8.970123	9.643581	10.62286	11.92173	13.59267	15.75258	18.56339

Visualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

1. 10. 100.

y a t-il une bonne coïncidence? oui=1,non=0

Courbe D.Z du modèle supposé

l2(1)= 1 r(1)= 31  
l2= 9.962031 r= 103.493  
l2= 140.8794 r= 11.97656  
l2= 364.4889 r= 14.28644

tracage de la courbe D.Z

valeurs des points D.Z

1	31	37.56127	45.32734	53.81742	62.15892	70.84821	79.15055
8	86.34779	92.97373	98.59656	103.1041	82.7268	65.7658	52.35371
15	42.35159	34.10458	27.67235	22.96147	19.20766	16.40991	14.21339
22	12.65098	12.34949	13.02867	13.56954	14.04155	15.64963	19.44494

courbe DAR ZARROUK D.Z

1. 10. 100.

dans le cas où les 2 courbes ne coïncident pas ,introduire les nouveaux points D.Z

l2 E

1	31
11	105
169	10.8
386	15

Calcul du modèle de la courbe D.Z modifiée

RO(1)= 31 h(1)= 1  
RO= 124.5096 h= 9.02742  
RO= 6.566432 h= 102.0646  
RO= 19.82753 h= 199.9643  
RO= 150

Calcul du S.E pour ce modèle modifié

Donner la résistivité du dernier terrain  
et le nombre de terrains

Calcul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent

Valeurs calculées des résistivités apparentes

1	34.72088	37.37042	41.29828	46.60158	53.08756	60.37913	67.98371
8	75.37178	81.89582	86.71557	88.75819	86.81716	79.90476	67.92045
15	52.35304	36.16705	22.69345	13.8724	9.475454	7.900687	7.631944
22	7.922765	6.584171	9.614841	11.0376	12.88869	15.24234	18.21458

Visualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

1. 10. 100.



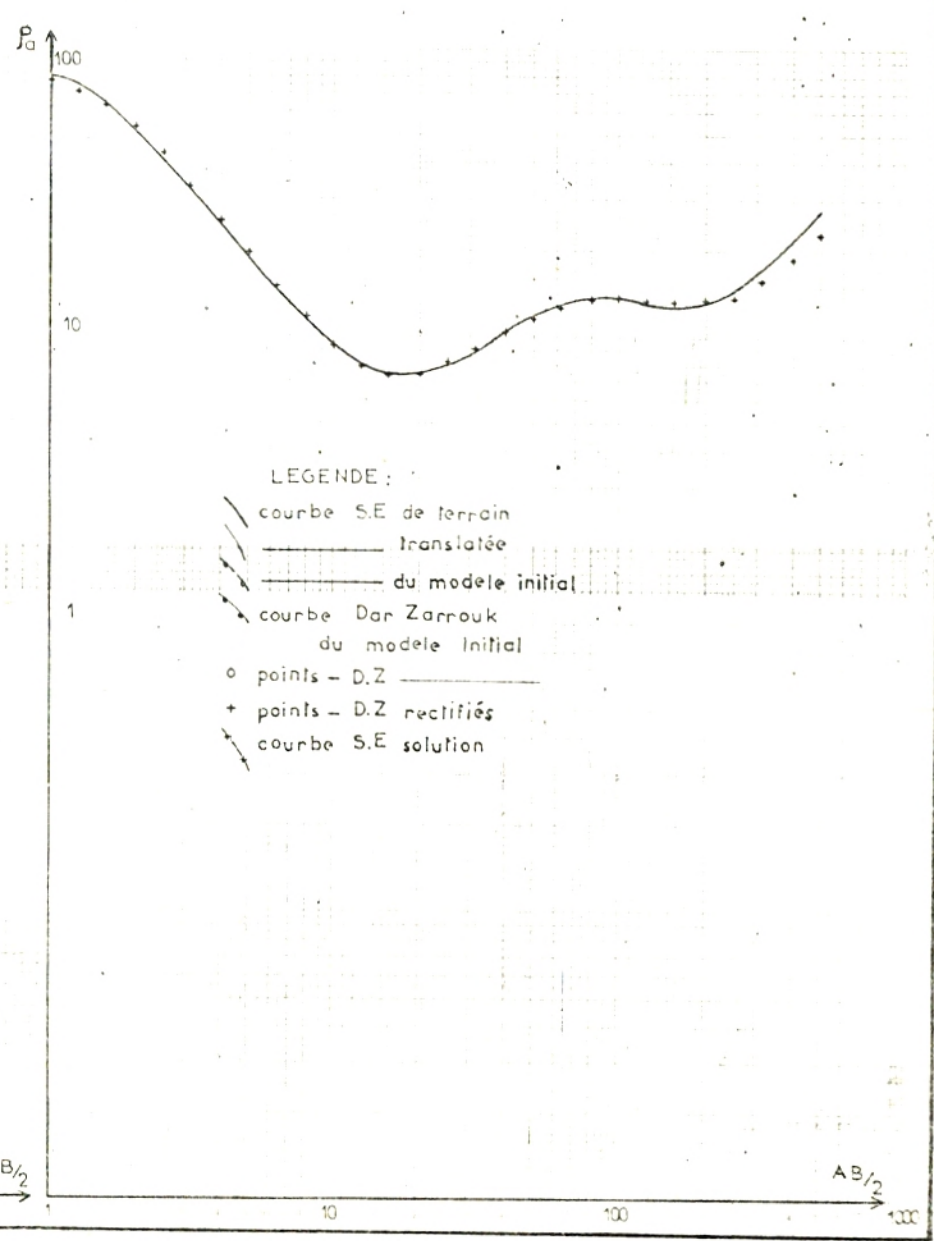
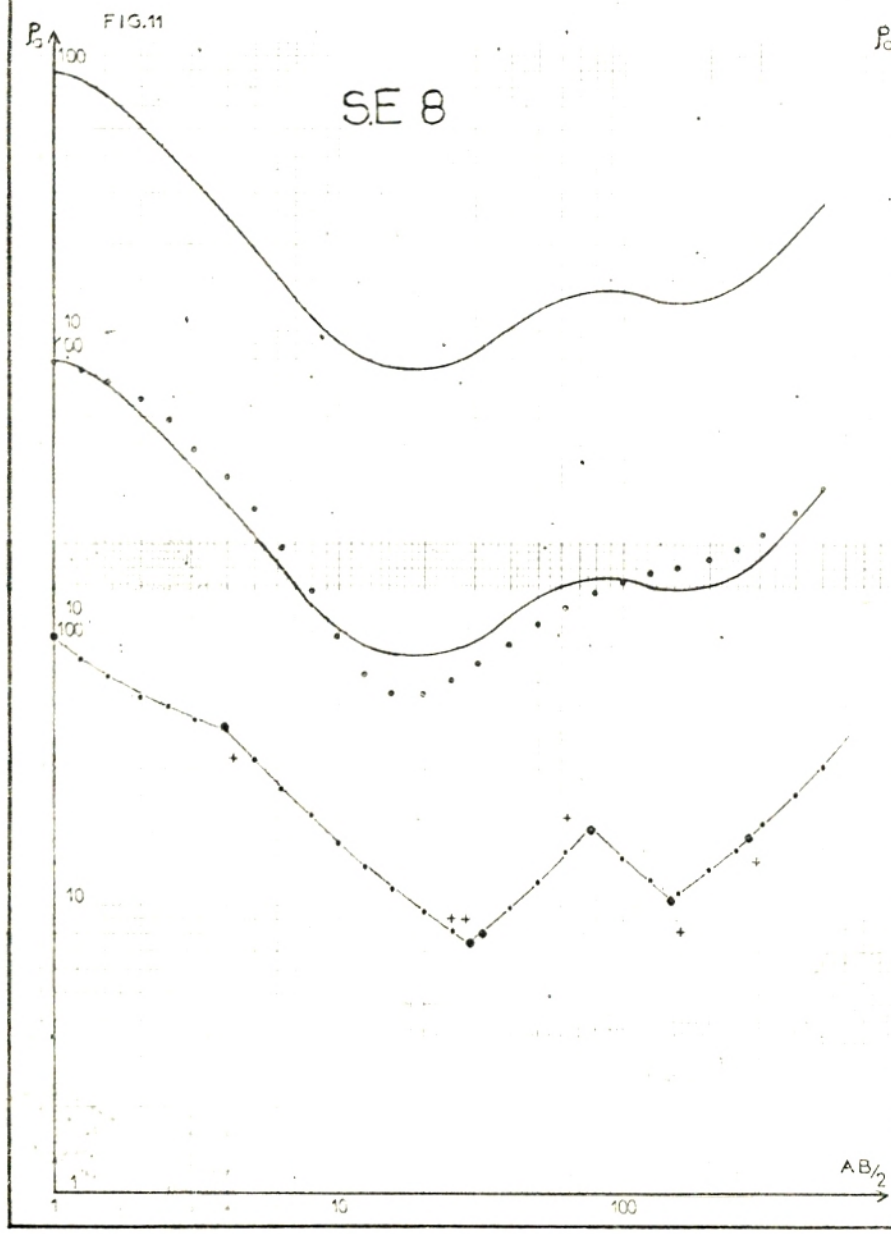
y a t-il une bonne coïncidence? oui=1,non=0

Afficher la solution

h= 1 r0= 31  
h= 9.02742 r0= 124.5096  
h= 102.0646 r0= 6.566432  
h= 199.9643 r0= 19.82753  
r0= 150

FIG.11

SE 8



- LEGENDE :
- courbe S.E de terrain
  - translée
  - du modele initial
  - courbe Dar Zarrouk du modele Initial
  - o points - D.Z
  - + points - D.Z rectifiés
  - courbe S.E solution

RESOLUTION DE LA COURBE S.E n°8 PAR AJUSTEMENT DES POINTS-D.Z  
 LA COURBE DAR-ZARROUK

Introduire les Résistivités apparentes de la courbe S.E

Donner le nombre et les paramètres des couches du 1<sup>er</sup> modèle supposé

- h = 8
- ρ = 85 h = 1
- ρ = 30 h = 2.5
- ρ = 4 h = 15
- ρ = 15 h = 3
- ρ = 120 h = 10
- ρ = 3 h = 30
- ρ = 40 h = 80
- ρ = 300

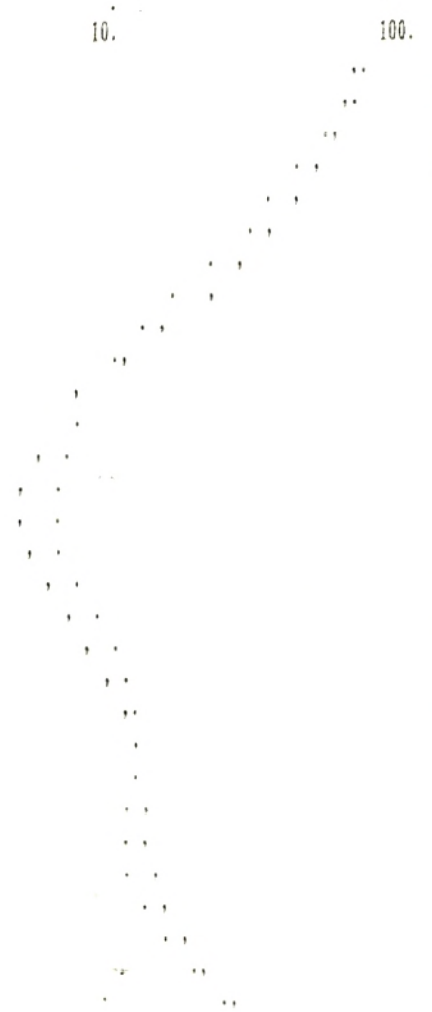
Calcul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent

valeurs calculées des résistivités apparentes

1	78.04405	73.29928	66.57541	58.11246	48.79649	39.66619	31.4294
8	24.16871	17.78593	12.46316	8.613668	6.40247	5.541806	5.558501
15	6.113491	7.046938	8.2579	9.633841	11.04615	12.36978	13.50217
22	14.4059	15.17336	16.07081	17.50991	19.92322	23.61032	28.67858

Visualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

1. 10. 100.



Y a-t-il une bonne coïncidence? oui=1, non=0

Courbe D.Z du modèle supposé

l2(1)= 1	r(1)= 85
l2= 3.900729	r= 41.01798
l2= 29.08473	r= 7.564107
l2= 32.74066	r= 8.093911
l2= 77.76997	r= 18.83763
l2= 148.2218	r= 10.49103
l2= 276.9309	r= 17.17035

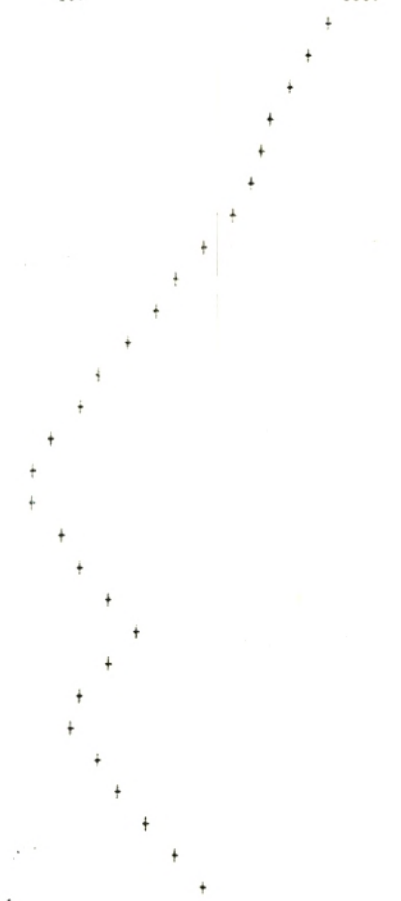
tracage de la courbe D.Z

valeurs des points D.Z

1	85	72.02506	61.68606	53.90266	48.37092	44.00176	40.01942
8	32.1927	25.77604	20.82873	16.80021	13.83478	11.4301	9.591982
15	8.273113	7.93595	9.866551	12.28694	15.38831	18.55892	14.88315
22	12.16272	11.08666	13.47611	15.97218	19.57341	24.71353	30.77573

courbe DAR ZARROUK D.Z

1. 10. 100.



dans le cas où les 2 courbes ne coïncident pas, introduire les nouveaux points D.Z

l2 E

1	85
4.24	32.42
23.96	9.29
28.51	9.29
62.5	20.3
158.8	8.11
293.1	14.36

Calcul du modèle de la courbe D.Z modifiée

RO(1)= 85	h(1)= 1
RO= 20.9947	h= 2.498763
RO= 5.896577	h= 14.43679
RO= 9.290001	h= 4.550001

RO= 318.0125 h= 3.156769  
RO= 1.076348 h= 17.76184  
RO= 59.32044 h= 49.24185  
RO= 300

Calcul du S.E pour ce modèle modifié

Donner la résistivite du dernier terrain  
et le nombre de terrains

Calcul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent

Valeurs calculées des résistivités apparentes

1	76.4752	70.72031	62.6625	52.73474	42.22728	32.62898	24.93409
8	19.16016	14.81736	11.53242	9.241868	7.923025	7.42109	7.52708
15	8.096645	9.040309	10.24215	11.51839	12.64318	13.40973	13.69539
22	13.53311	13.17571	13.08005	13.76395	15.59285	18.66564	22.90819

Visualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

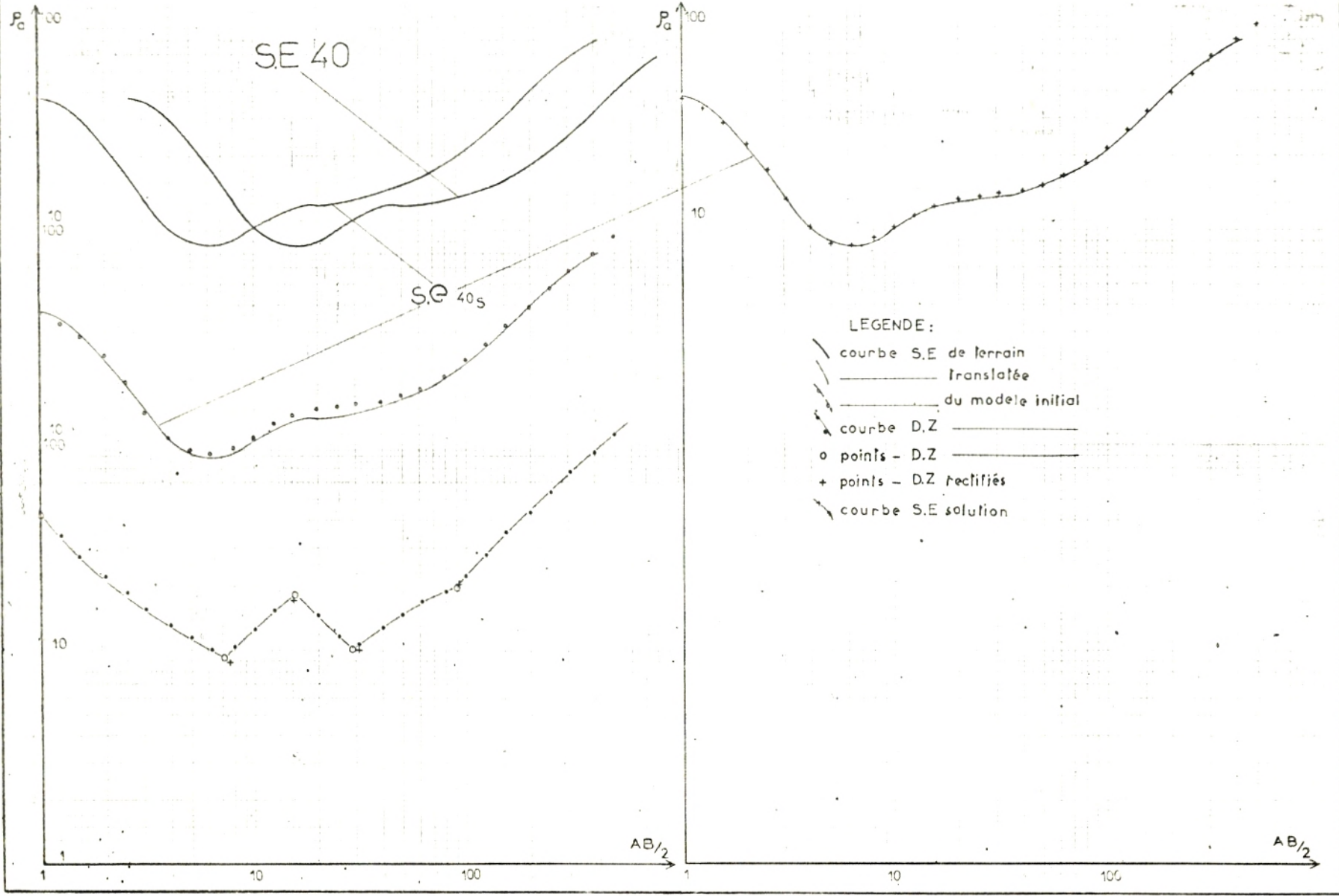
1. 10. 100.

y a t-il une bonne coincidence? oui=1,non=0

Afficher la solution

h= 1	r0= 85
h= 2.498763	r0= 20.9947
h= 14.43679	r0= 5.896577
h= 4.550001	r0= 9.290001
h= 3.156769	r0= 318.0125
h= 17.76184	r0= 1.076348
h= 49.24185	r0= 59.32044
r0= 300	

FIG. 12



RESOLUTION DE LA COURBE S.E n°40 PAR AJUSTEMENT DES POINTS-D.Z  
DE LA COURBE DAR-ZARROUK

Introduire les Résistivités apparentes de la courbe S.E

Donner le nombre et les paramètres des couches du 1<sup>er</sup> modèle supposé

n= 6  
r0= 42 h= 1  
r0= 6 h= 4.5  
r0= 55 h= 4  
r0= 2.5 h= 5  
r0= 30 h= 50  
r0= 300

Calcul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent  
Valeurs calculées des résistivités apparentes

1	36.93137	33.54827	28.87439	23.25565	17.58884	12.8964	9.861564
8	8.483314	8.33059	8.930117	9.950624	11.13458	12.25703	13.13947
15	13.71152	14.04798	14.38723	15.07986	16.47014	18.78566	22.13637
22	26.60598	32.31719	39.41248	48.02217	58.26529	70.25027	84.0487

Y a-t-il une bonne coïncidence? oui=1, non=0

Courbe D.Z du modèle supposé

l2(1)= 1 r(1)= 42  
l2= 7.307042 r= 9.442946  
l2= 15.64126 r= 18.47677  
l2= 29.29558 r= 10.29166  
l2= 90.16949 r= 19.97904

traçage de la courbe D.Z  
valeurs des points D.Z

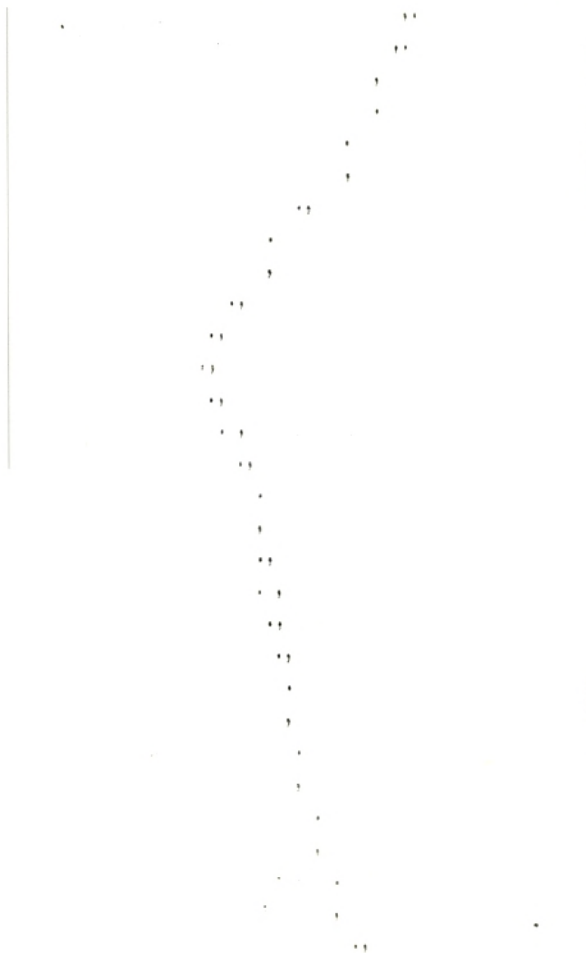
1	42	33.97392	27.35578	22.19352	18.41235	15.36316	13.04532
8	11.3894	10.09628	10.16033	12.61508	15.3483	18.29784	14.61315
15	11.8747	10.91608	12.95605	14.95856	17.0151	18.93032	22.13482
22	27.58471	34.69411	43.57285	53.84728	66.8378	82.32055	99.1295

courbe DAR ZARROUK D.Z

1. 10. 100.

Visualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

1. 10. 100.



dans le cas où les 2 courbes ne coïncident pas, introduire les nouveaux points D.Z

l2 E  
1 42  
7.6 8.8  
15.4 17.1  
31.6 10  
91.2 20.2

Calcul du modèle de la courbe D.Z modifiée

EO(1)= 42 h(1)= 1



R0= 5.442899 h= 4.571093  
R0= 72.91872 h= 2.694233  
R0= 4.827724 h= 10.90783  
R0= 33.56338 h= 45.47338  
R0= 300

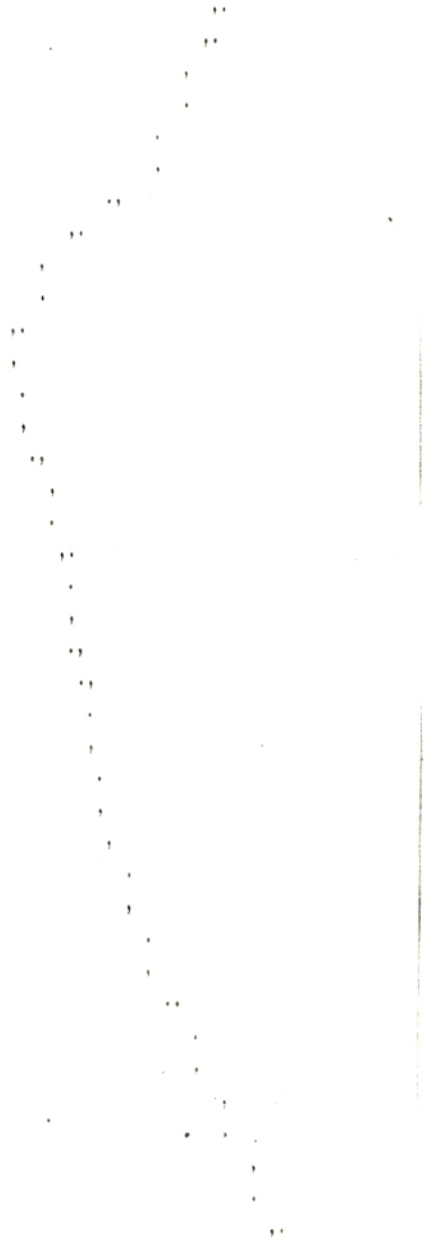
Calcul du S.E pour ce modèle modifié  
Donner la résistivite du dernier terrain  
et le nombre de terrains  
Calcul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent  
Valeurs calculées des résistivités apparentes

1 36.80423 33.33859 28.55421 22.80951 17.02708 12.25352 9.177894  
8 7.780877 7.604622 8.161332 9.124249 10.2543 11.34806 12.24455  
15 12.87712 13.30846 13.75393 14.54384 16.01861 18.41772 21.86077  
22 26.42401 32.21114 39.35324 47.98435 58.23499 70.22248 84.0222

y a t-il une bonne coincidence? oui=1,non=0  
Afficher la solution  
h= 1 r0= 42  
h= 4.571093 r0= 5.442899  
h= 2.694233 r0= 72.91872  
h= 10.90783 r0= 4.827724  
h= 45.47338 r0= 33.56338  
r0= 300

Visualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

1. 10. 100.



Exemple n° 5 : S.E 316 (Fig.13) .

Il y a 2 étapes dans ce calcul :

- on cherche le modèle de couches qui aille le mieux avec celui causant la courbe S.E ,en faisant varier les points-D.Z .

C'est le même processus que pour les exemples précédents .

- on complique le modèle solution en introduisant une couche supplémentaire entre la 2° et la 3° .

Le nombre de couches passe de 4 à 5 .

La solution finale est :

$\rho = 80 \text{ Ohm.m}$	$h = 3.4 \text{ m}$
7.9	41
70	19
13	476
200	

Exemple n° 6 : S.E 303 (Fig.14) .

On multiplie les épaisseurs par 3 pour revenir à la courbe S.E originale .

Exemple n° 7 : S.E 28 (Fig.15) .

Ce S.E a été traité précédemment par le programme "Sonel".

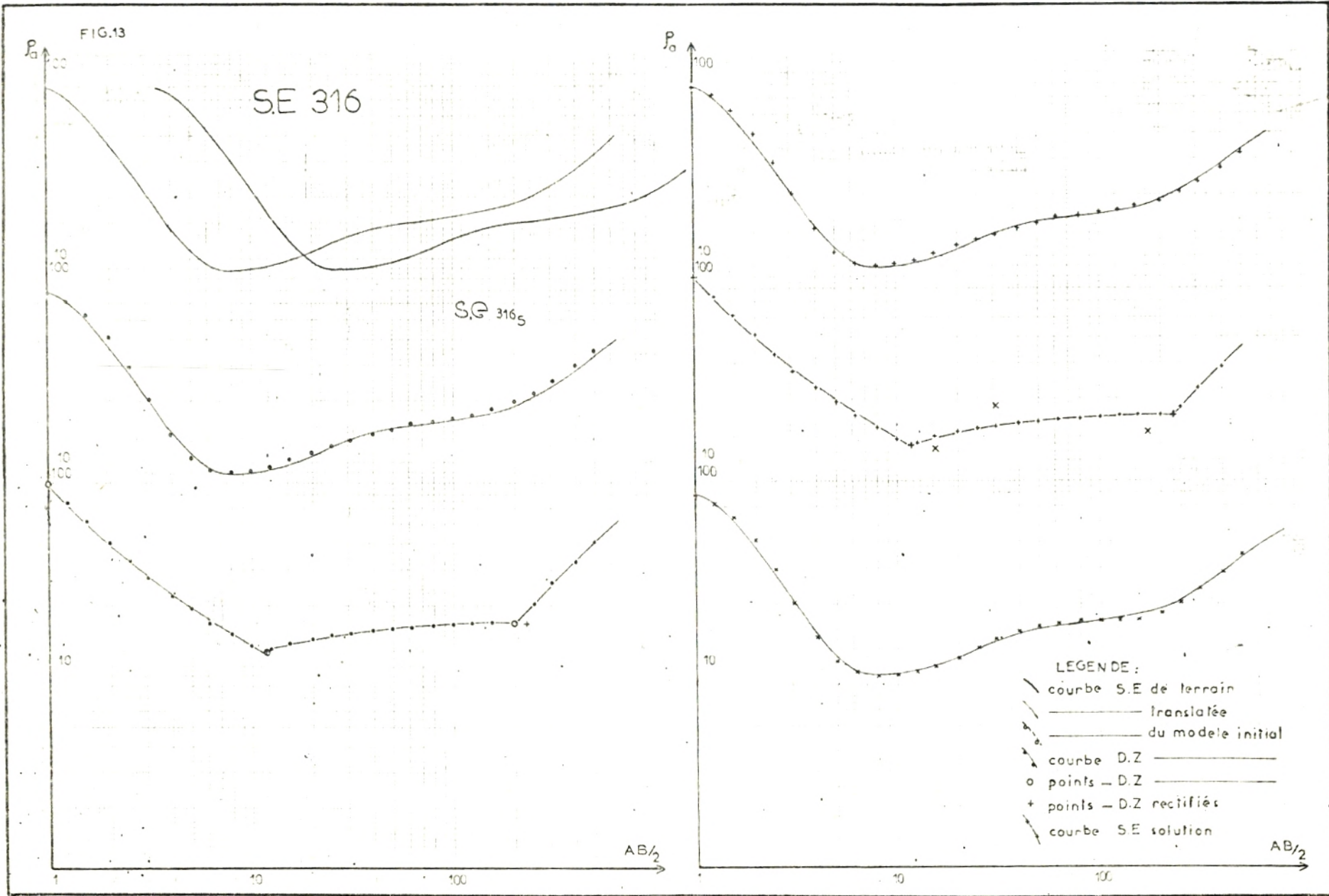
Sa solution peut être améliorée pour deux raisons :

- un lissage de la courbe a été pratiqué alors qu'il apparait une petite inflexion entre la 3° et 4° couche .

- cette couche est nettement identifiée sur les S.E voisins 27 et 37 .

La solution finale trouvée est donc :

$\rho = 34 \text{ Ohm.m}$	$h = 2 \text{ m}$
68	30
8	20
79	50
10	8.3
170	



OLUTION DE LA COURBE S.E n°316 PAR AJUSTEMENT DES POINTS-D.Z  
LA COURBE DAR-ZARROUK

roduire les Résistivités apparentes de la courbe S.E

ner le nombre et les paramètres des couches du 1' modèle supposé

4

80 h= 1  
8 h= 7.9  
17 h= 188  
200

cul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent

eurs calculées des résistivités apparentes

69.53271 62.5576 52.9369 41.39827 29.79283 20.18159 13.84299  
  
10.57552 9.307531 9.014526 9.174093 9.619554 10.29709 11.14183  
  
12.0702 12.99905 13.87014 14.65168 15.33918 15.95479 16.55606  
  
17.24505 18.18494 19.60977 21.81299 25.09432 29.67063 35.60214

y a t-il une bonne coïncidence? oui=1,non=0

Courbe D.Z du modèle supposé

l2(1)= 1 r(1)= 80  
l2= 11.96662 r= 11.96662  
l2= 200.666 r= 16.64059

tracage de la courbe D.Z  
valeurs des points D.Z

1 80 64.3545 51.37239 41.1551 33.58558 27.39913 22.62632  
8 19.17728 16.45971 14.45335 12.88646 12.14054 13.00108 13.74138  
15 14.33228 14.84886 15.27491 15.60441 15.8822 16.10224 16.28662  
22 16.4268 16.54487 16.63941 20.6536 25.94355 32.51894 40.07601

courbe DAR ZARROUK D.Z

1. 10. 100.

ualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

1. 10. 100.

dans le cas ou les 2 courbes ne coïncident pas ,introduire les  
nouveaux points D.Z

l2 E  
1 80  
11.96 11.96  
230 16.6

Calcul du modèle de la courbe D.Z modifiée

RO(1)= 80 h(1)= 1  
RO= 7.989969 h= 7.890094

cul du S.E pour ce modèle modifié  
 ner la résistivite du dernier terrain  
 le nombre de terrains  
 cul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent  
 eurs calculées des résistivités apparentes  
 69.53034 62.55363 52.9309 41.39 29.78246 20.16993 13.83086

10.56351 9.295529 9.001948 9.159946 9.602665 10.2756 11.11387

5 12.03388 12.95218 13.81001 14.57374 15.23478 15.80747 16.33472

2 16.89419 17.61291 18.68158 20.36083 22.95399 26.73344 31.8503

Y a t-il une bonne coincidence? oui=1,non=0  
 Courbe D.Z du modèle supposé  
 12(1)= 1 r(1)= 80  
 12= 11.96 r= 11.96  
 12= 230 r= 16.6

traçage de la courbe D.Z  
 valeurs des points D.Z

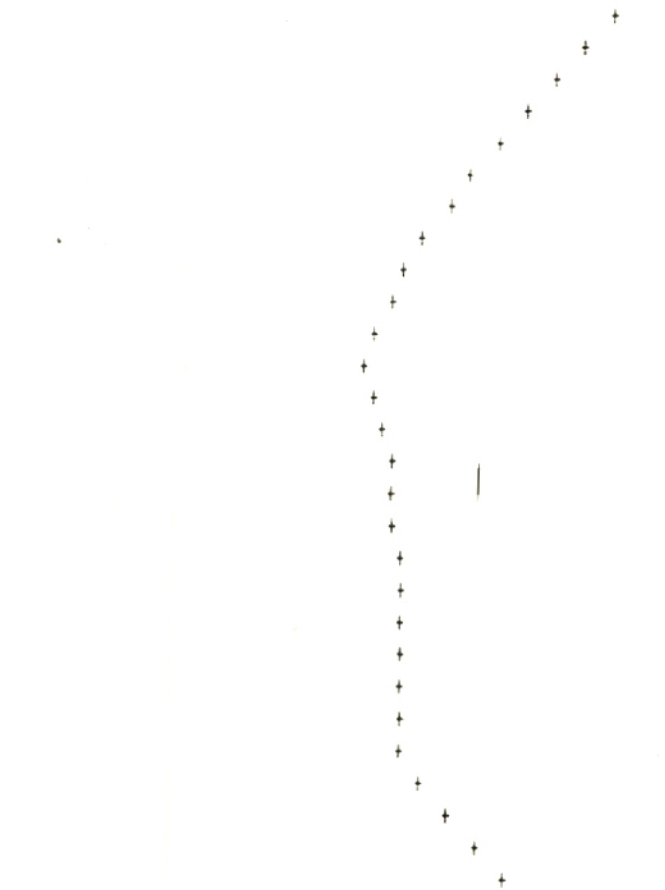
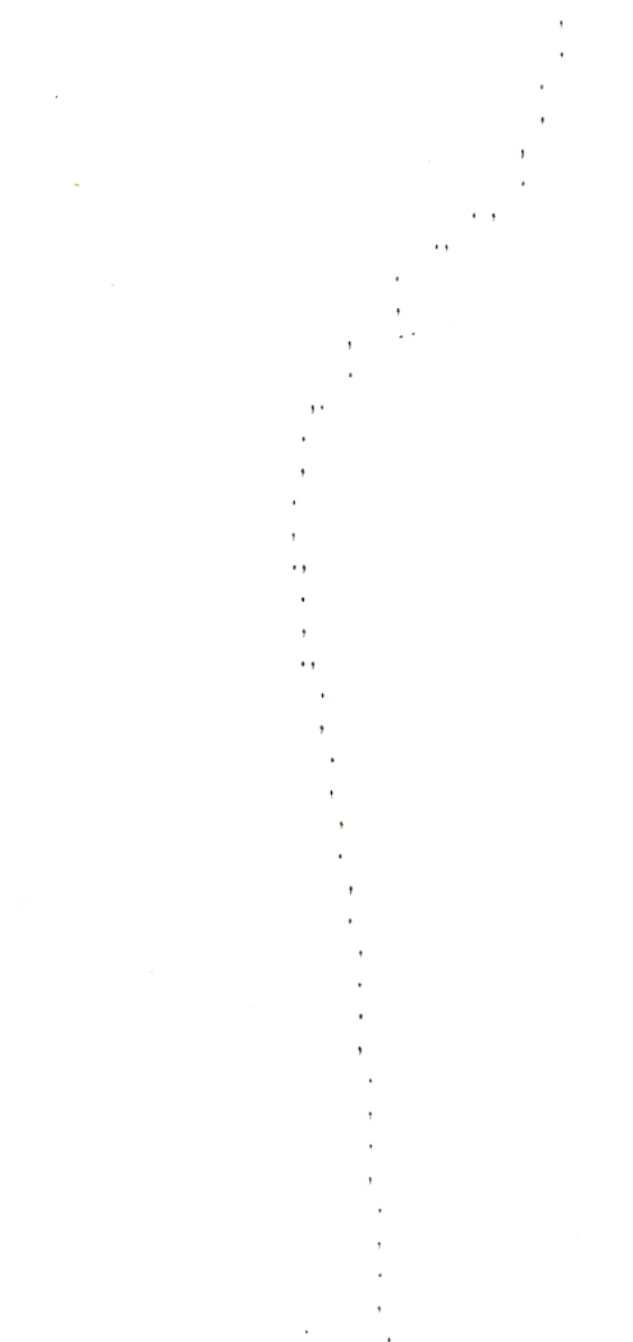
1 80 64.35361 31.37058 41.1523 33.58182 27.39432 22.62246  
 8 19.1705 16.45208 14.44505 12.87761 12.13371 12.98152 13.7099  
 15 14.29071 14.79809 15.21631 15.53959 15.81205 16.02782 16.20858  
 22 16.34598 16.4617 16.55434 18.02108 22.67005 28.48035 35.21097

courbe DAR FARROU D.Z

ualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

1. 10. 100.

1. 10. 100.



dans le cas ou les 2 courbes ne coincident pas ,introduire les nouveaux points D.Z

12	R
1	80
16.36	10.68
30.4	18.86
172.1	13.9

Calcul du modèle de la courbe D.Z modifiée

R0(1)= 80 h(1)= 1  
 R0= 7.895962 h= 11.99661

R0= 70.57011 h= 5.648556  
R0= 12.99577 h= 139.9568  
R0= 0

y a t-il une bonne coincidence? oui=1,non=0

Afficher la solution

h= 1 r0= 80  
h= 11.99661 r0= 7.895962  
h= 5.648556 r0= 70.57011  
h= 139.9568 r0= 12.99577  
r0= 200

Calcul du S.E pour ce modèle modifié

Donner la résistivite du dernier terrain

et le nombre de terrains

Calcul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent

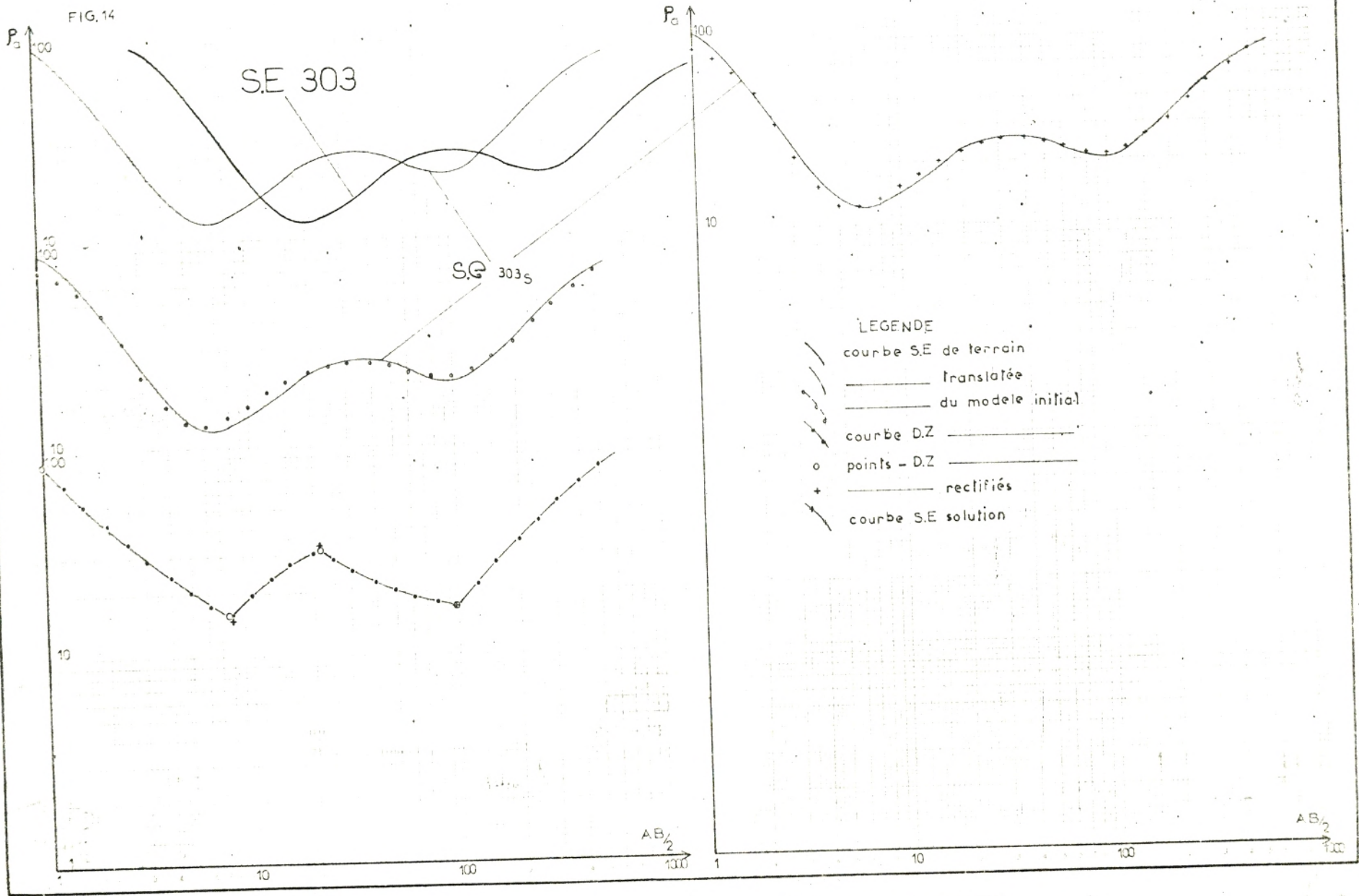
Valeurs calculées des résistivités apparentes

1	69.50726	62.51552	52.87243	41.30781	29.6772	20.04488	13.68766
8	10.39588	9.086991	8.729537	8.807879	9.188204	9.879254	10.8884
15	12.14806	13.48738	14.70419	15.61886	16.14543	16.31038	16.27138
22	16.30043	16.74099	17.94469	20.2079	23.71142	28.49765	34.52152

Visualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

1. 10. 100.

FIG. 14



ION DE LA COURBE S.E n°303 PAR AJUSTEMENT DES POINTS-D.Z  
 COURBE DAR-ZARROUK

aire les Résistivités apparentes de la courbe S.E

le nombre et les paramètres des couches du 1° modèle supposé

- h= 1
- 8 h= 4.11
- 6 h= 10.55
- .83 h= 70.06

de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent  
 s calculées des résistivités apparentes

.9875 66.65271 56.5433 44.4381 32.31178 22.38319 16.0767

.28337 12.96888 14.07941 15.96824 18.25077 20.6172 22.76251

4.37765 25.19091 25.06768 24.12466 22.78542 21.7156 21.63853

3.11289 26.3944 31.44977 38.109 46.2459 55.84688 66.95321

isation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

10. 100.

y a t-il une bonne coïncidence? oui=1,non=0

Courbe D.Z du modèle supposé

l2(1)= 1 r(1)= 85

l2= 7.593596 r= 15.99991

l2= 21.47691 r= 31.98677

l2= 97.46957 r= 16.98896

traçage de la courbe D.Z

valeurs des points D.Z

1	85	68.41051	54.65314	43.83504	35.82973	29.29674	24.26746
8	20.63572	17.77985	16.53481	19.93253	23.40235	27.16213	30.89382
15	28.94918	25.25056	22.47436	20.50086	18.95605	17.80981	17.42573
22	21.72328	27.33635	34.36018	42.51137	52.86051	65.26926	78.84568

courbe DAR ZARROUK D.Z

1. 10. 100.

dans le cas où les 2 courbes ne coïncident pas ,introduire les nouveaux points D.Z

l2	R
1	85
8	15
21.5	33.6
97.5	16.8

Calcul du modèle de la courbe D.Z modifiée

RO(1)= 85	h(1)= 1
RO= 8.19178	h= 4.272576
RO= 75.19183	h= 8.611508
RO= 13.31597	h= 68.75954
RO= 250	





Calcul du S.E pour ce modèle modifié

Donner la résistivité du dernier terrain

et le nombre de terrains

Calcul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent

Valeurs calculées des résistivités apparentes

1	73.82216	66.3805	56.12871	43.86276	31.59224	21.56798	15.22407
8	12.4316	12.13281	13.27154	15.22001	17.61164	20.14098	22.49577
15	24.35272	25.41238	25.49348	24.65563	23.28395	22.05534	21.75744
22	23.02805	26.16585	31.12997	37.72038	45.78955	55.31819	66.34911

Visualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

1. 10. 100.

y a t-il une bonne coïncidence? oui=1,non=0

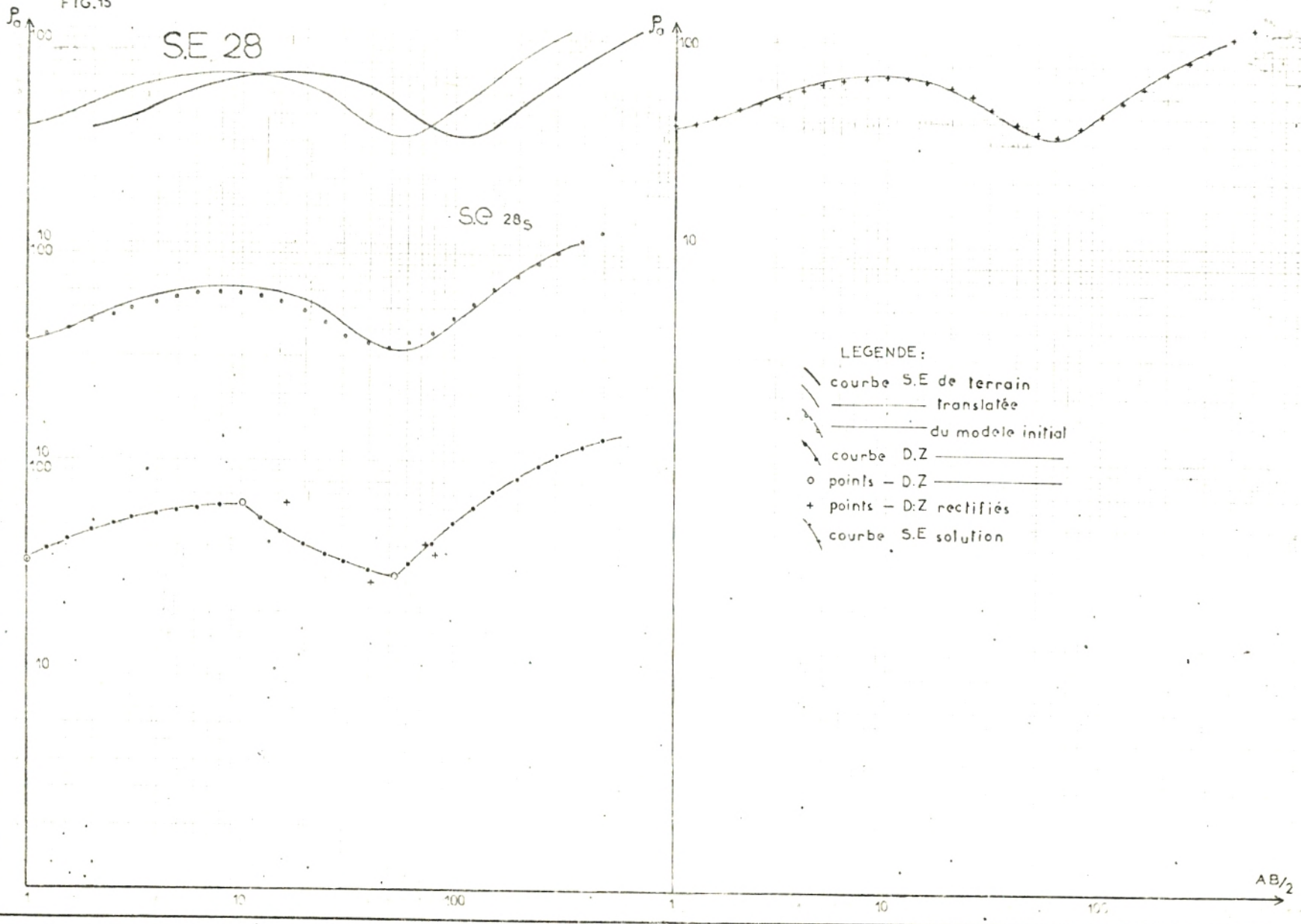
Afficher la solution

h= 1	r0= 85
h= 4.272576	r0= 8.19178
h= 8.011508	r0= 75.19183
h= 68.75954	r0= 13.31597








FIG.15

S.E. 28

SE 28<sub>s</sub>



LEGENDE:

-  courbe S.E. de terrain
-  courbe S.E. translaturée
-  courbe du modèle initial
-  courbe D.Z.
-  points - D.Z.
-  points - D.Z. rectifiés
-  courbe S.E. solution

$AB/2$

RESOLUTION DE LA COURBE S.E n°28 PAR AJUSTEMENT DES POINTS-D.Z  
 DE LA COURBE DAR-ZARROUK

Introduire les Résistivités apparentes de la courbe S.E

Donner le nombre et les paramètres des couches du 1<sup>er</sup> modèle supposé  
 n= 4

r0= 34 h= 1  
 r0= 68 h= 9  
 r0= 23.8 h= 40  
 r0= 170

Calcul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent

Valeurs calculées des résistivités apparentes

1	36.14099	37.64119	39.82707	42.69751	46.05675	49.59524	52.96555
8	55.87019	58.04167	59.20777	59.06505	57.31723	53.8157	48.79786
15	43.07558	37.8405	34.26935	33.07622	34.45857	38.2744	44.21204
22	51.87329	60.86561	70.88092	81.6621	92.92708	104.5344	115.4966

Visualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

1. 10. 100.



y a t-il une bonne coïncidence? oui=1, non=0

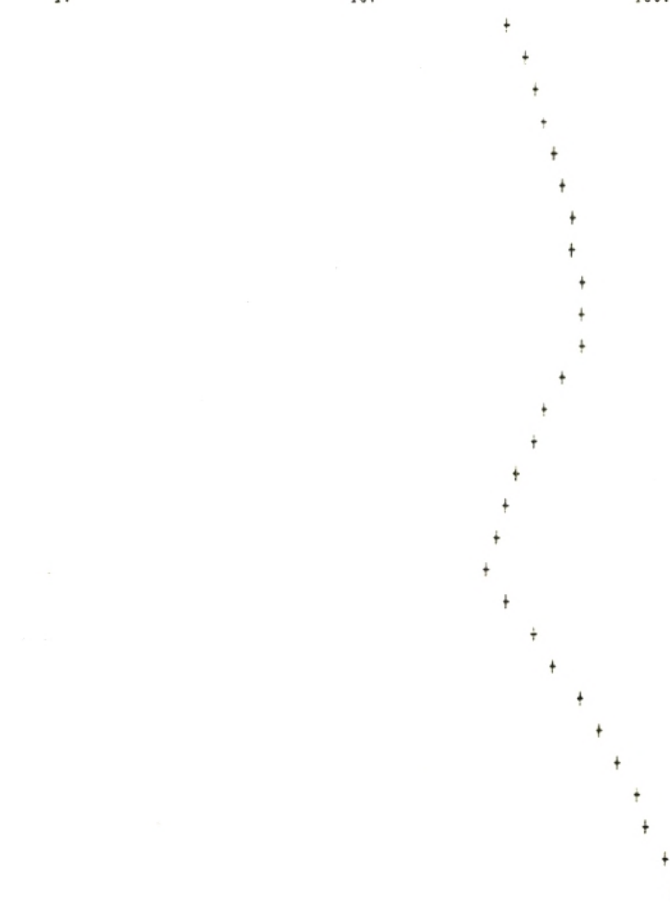
Courbe D.Z du modèle supposé

l2(1)= 1 r(1)= 34  
 l2= 10.22252 r= 63.19379  
 l2= 54.26062 r= 29.45046

traçage de la courbe D.Z  
 valeurs des points D.Z

1	34	38.50095	42.99369	47.12403	50.59408	53.74978	56.43499
8	58.56074	60.38492	61.85006	63.09098	54.7042	47.11038	41.40047
15	37.34326	34.13666	31.71792	29.98082	33.85383	41.5624	50.93257
22	60.95246	72.38197	84.35552	95.62584	106.9005	117.2857	126.0242

courbe DAR ZARROUK D.Z



dans le cas où les 2 courbes ne coïncident pas, introduire les nouveaux points D.Z

l2	R
1	34
16.23	64.9
41.26	27.47
75.37	41.4
83.9	37.7

Calcul du modèle de la courbe D.Z modifiée

EO(1)= 34 h(1)= 1  
 EO= 67.9657 h= 14.99767  
 EO= 7.998097 h= 10.01302  
 EO= 78.97943 h= 25.15726  
 EO= 10.2703 h= 4.15878  
 EO= 0

Calcul du S.E pour ce modèle modifié

Donner la résistivite du dernier terrain

et le nombre de terrains

Calcul de la courbe de S.E correspondante au modèle précédent

Valeurs calculées des résistivités apparentés

1	36.14327	37.64613	39.83783	42.72082	46.10636	49.69842	53.17423
8	56.28067	58.82246	60.63177	61.51877	61.22826	59.43238	55.8325
15	50.43451	43.92914	37.8565	33.98376	33.41529	36.01919	40.93885
22	47.43392	55.20694	64.16029	74.14606	84.90987	96.12346	107.4113

y a t-il une bonne coincidence? oui=1,non=0

Afficher la solution

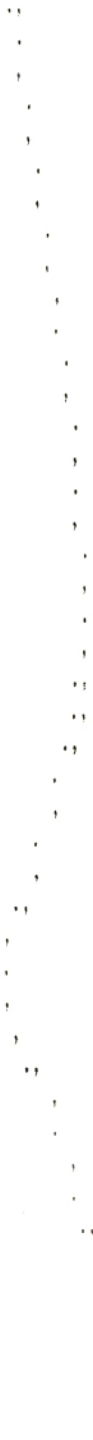
h= 1	r0= 34
h= 14.99767	r0= 67.9657
h= 10.01302	r0= 7.998097
h= 25.15726	r0= 78.97943
h= 4.15878	r0= 10.2703
r0= 170	

Visualisation de la Courbe de terrain et de la Courbe calculée

1.

10.

100.



γ ) Troisième programme " B i c h " :

Il s'agit du second programme que nous avons établi pour l'interprétation " directe " : dans cette méthode , les valeurs des résistivités apparentes échantillonnées de la courbe S.E sont introduites dans le programme qui va procéder à une recherche du modèle géoélectrique responsable de la courbe .

γ-1) Caractéristiques du programme :

a ) échantillonnage fin de la courbe S.E :

61 points sont échantillonnés de l'abscisse  $AB/2 = 0.4m$  à  $AB/2 = 4000m$  à raison de 15 points par décade logarithmique. La courbe s'étale sur 4 décades au maximum .

b ) la Transformée de résistivité  $T_1$  sera calculée pour les abscisses variant de  $1/\lambda = .16$  à  $1/\lambda = 1000$  c'est à dire pour 20 valeurs .

La fonction T correspondant au modèle proposé est obtenue grâce à une relation de récurrence (chap.II-E.1).

c ) le modèle proposé est fourni à l'aide d'une interprétation simple faisant appel aux abaques des courbes précalculées et la méthode des diagrammes auxiliaires .

Il est évident que le temps de calcul automatique sera fonction de l'écart entre le modèle vrai correspondant à la courbe et le modèle proposé .

D'où la nécessité de réduire cet écart en affinant l'interprétation simple : nombre de couches , choix des résistivités et épaisseurs .

d ) il n'y a pas de limite en principe au nombre de couches proposées . Cependant nous avons écrit le programme pour un nombre maximal de 8 couches .

e ) Choix du critère pour l'identification de la Transformée  $T_1$  :

Le critère le plus simple a été adopté :

$$F_1 = \sum_{j=1}^{20} ( T_{1j} - T )^2$$

avec  $T_1$  : Transformée de la courbe S.E de terrain

$T$  : Transformée hypothétique (cf.chap.III-B.1) .

- à la première itération : ce sont les paramètres

$(e_1, e_2, \dots, e_{n-1}, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) = m_0$  du modèle proposé qui permettent le calcul de  $F_1(1)$

- à la seconde itération : ce sont les paramètres

$(e'_1, e'_2, \dots, e'_{n-1}, \rho'_1, \rho'_2, \dots, \rho'_n) = m_1 = m_0 - T_4 \cdot G$  du modèle modifié qui calculent  $F_1(2)$

Deux cas peuvent se produire :

□ si  $F_1(2) \leq F_1(1)$  : le processus se poursuit en remplaçant  $m_0$  par  $m_1$

□ si  $F_1(2) \geq F_1(1)$  : ceci signifie que la variation de  $m_0$  à  $m_0 - T_4 \cdot G$  est trop importante, donc il faut diminuer le pas  $T_4$ .

f) choix du pas  $T_4$  : initialement il est pris égal à

$$T_4 = F_1(1) / G_2$$

$F_1(1)$  : critère de la première itération

$G_2$  : carré du module du gradient défini par

$$G_2 = (\partial F_1 / \partial \rho_2)^2 + (\partial F_1 / \partial e_1)^2 + \dots + (\partial F_1 / \partial e_{n-1})^2 + (\partial F_1 / \partial \rho_{n-1})^2$$

pour les paramètres  $(e_1, \rho_2, e_2, \dots, \rho_{n-1}, e_{n-1})$  du modèle proposé

g) les gradients de résistivités  $G = \partial F_1 / \partial \rho_i$  et les gradients d'épaisseurs  $G_1 = \partial F_1 / \partial e_i$  sont définis par :

$$G(\rho_i) = \partial F_1 / \partial \rho_i = -2 \cdot \sum_{j=1}^N \partial T / \partial \rho_i \cdot (T_{1j} - T(\lambda_j, m))$$

l'indice de sommation  $j$  parcourt les valeurs de  $T_1$  calculées pour les  $N=20$  valeurs de  $1/\lambda$

$T_{1j}$  : transformée de la courbe S.E de terrain pour la  $j^{\text{ème}}$  valeur de  $1/\lambda$

$T(\lambda_j, m)$ : transformée hypothétique correspondant à  $\lambda_j$

Les dérivées partielles  $\partial T / \partial \rho_i$ ,  $\partial T / \partial e_i$  sont calculées par la relation de récurrence donnée par Johansen (1975).

e ) en imposant aux résistivités  $\rho_i$  et épaisseurs  $e_i$  cherchées de varier entre certaines limites ( $\rho_{i,\min}$ ,  $\rho_{i,\max}$ ) et ( $e_{i,\min}$ ,  $e_{i,\max}$ ), on obtient en considérant  $e'_i$  et  $\rho'_i$  comme étant les paramètres dégradés par les itérations successives :

$$e_i = e'_i \quad \text{si } e_{i,\min} \leq e'_i \leq e_{i,\max}$$

$$e_i = e_{i,\min} \quad \text{si } e'_i \leq e_{i,\min}$$

$$e_i = e_{i,\max} \quad \text{si } e'_i \geq e_{i,\max}$$

et d'une façon analogue pour les résistivités  $\rho_i$ .

#### $\gamma$ -2) Listing :

Correspondant au sous-programme que nous avons établi pour le calcul de la Transformée de résistivité  $T_1$  pour les 20 abscisses de  $1/\lambda$ .

450 T1(1)=E(10)\*.00659+E(5)\*(-.07828)+R0(1)\*1.0723  
460 T1(2)=E(13)\*.00659+E(8)\*(-.07828)+E(3)\*(.39991)+R0(1)\*.6724  
470 T1(3)=E(16)\*.00659+E(11)\*(-.07828)+E(6)\*.39991+E(1)\*.34916+R0(1)\*.3223  
480 T1(4)=E(19)\*.00659+E(14)\*(-.07828)+E(9)\*.39991+E(4)\*.34916+R0(1)\*.3223  
490 T1(5)=E(22)\*.00659+E(17)\*(-.07828)+E(12)\*.39991+E(7)\*.34916+E(2)\*.16754+  
R0(1)\*.1557  
500 T1(6)=E(25)\*.00659+E(20)\*(-.07828)+E(15)\*.39991+E(10)\*.34916+E(5)\*.16754+  
R0(1)\*.1557  
510 T1(7)=E(28)\*.00659+E(23)\*(-.07828)+E(18)\*.39991+E(13)\*.34916+E(8)\*.16754+  
E(3)\*.08586+R0(1)\*.06983  
520 T1(8)=E(31)\*.00659+E(26)\*(-.07828)+E(21)\*.39991+E(16)\*.34916+E(11)\*.16754+  
E(6)\*.08586+E(1)\*.03408  
530 T1(9)=E(34)\*.00659+E(29)\*(-.07828)+E(24)\*.39991+E(19)\*.34916+E(14)\*.16754+  
E(9)\*.08586+E(4)\*.03408  
540 T1(10)=E(37)\*.00659+E(32)\*(-.07828)+E(27)\*.39991+E(22)\*.34916+E(17)\*.16754+  
E(12)\*.08586+E(7)\*.03575+E(2)\*.01977+R0(1)\*.01431  
550 T1(11)=E(40)\*.00659+E(35)\*(-.07828)+E(30)\*.39991+E(25)\*.34916+E(20)\*.16754+  
E(15)\*.08586+E(10)\*.03575+E(5)\*.01977+R0(1)\*.01431  
560 T1(12)=E(43)\*.00659+E(38)\*(-.07828)+E(33)\*.39991+E(28)\*.34916+E(23)\*.16754+  
E(18)\*.08586+E(13)\*.03575+E(8)\*.01977+R0(1)\*.0076  
570 T1(13)=E(46)\*.00659+E(41)\*(-.07828)+E(36)\*.39991+E(31)\*.34916+E(26)\*.16754+  
E(21)\*.08586+E(16)\*.03575+E(11)\*.01977+R0(1)\*.00514+  
R0(1)\*.0025  
580 T1(14)=E(49)\*.00659+E(44)\*(-.07828)+E(39)\*.39991+E(34)\*.34916+E(29)\*.16754+  
E(24)\*.08586+E(19)\*.03575+E(14)\*.01977+R0(1)\*.00514+  
R0(1)\*.0025  
590 T1(15)=E(52)\*.00659+E(47)\*(-.07828)+E(42)\*.39991+E(37)\*.34916+E(32)\*.16754+  
E(27)\*.08586+E(22)\*.03575+E(17)\*.01977+R0(1)\*.00514+  
E(2)\*.00067+R0(1)\*.0018  
600 T1(16)=E(55)\*.00659+E(50)\*(-.07828)+E(45)\*.39991+E(40)\*.34916+E(35)\*.16754+  
E(30)\*.08586+E(25)\*.03575+E(20)\*.01977+R0(1)\*.00514+  
E(5)\*.00067+R0(1)\*.0018  
610 T1(17)=E(58)\*.00659+E(53)\*(-.07828)+E(48)\*.39991+E(43)\*.34916+E(38)\*.16754+  
E(33)\*.08586+E(28)\*.03575+E(23)\*.01977+R0(1)\*.00514+  
E(8)\*.00067+E(3)\*.0018  
620 T1(18)=E(61)\*.00659+E(56)\*(-.07828)+E(51)\*.39991+E(46)\*.34916+E(41)\*.16754+  
E(36)\*.08586+E(31)\*.03575+E(26)\*.01977+R0(1)\*.00514+  
E(11)\*.00067+E(6)\*.0018



γ-3) Applications :

a ) exemple théorique : prenons une courbe théorique empruntée à un catalogue d'abaques et correspondant à la succession

$$\begin{array}{ll} \rho_1 = 10 \text{ Ohm.m} & e_1 = 1 \text{ m} \\ & = 100 & = 2 \\ & = 2 & = 25 \\ & = 10 \end{array}$$

Soit sa courbe correspondante (fig.16)

Effectuons la résolution de cette courbe en considérant :

- la première et la dernière résistivité sont facilement déterminées grâce à l'étude des asymptotes à gauche et à droite de la courbe .

- la méthode des diagrammes auxiliaires donne une solution brute II qui servira comme modèle initial

- les limites des résistivités et épaisseurs sont introduites pour le calcul

Considérons donc comme modèle interprété initial , la succession :

$$\begin{array}{ll} \rho_1 = 10 \text{ Ohm.m} & e_1 = 1.2 \text{ m} \\ & = 120 & = 3 \\ & = 3 & = 30 \\ & = 10 \end{array}$$

Soit sa courbe correspondante (fig.16)

Le programme de calcul va procéder à la recherche d'une solution constituée d'une succession de couches , telle que sa courbe soit la plus proche possible au sens du critère défini et avec la précision voulue , de la courbe théorique donnée .

Exemple n° 8 : S.E courbe théorique (Fig.16) .

Voir le traitement en pages suivantes .

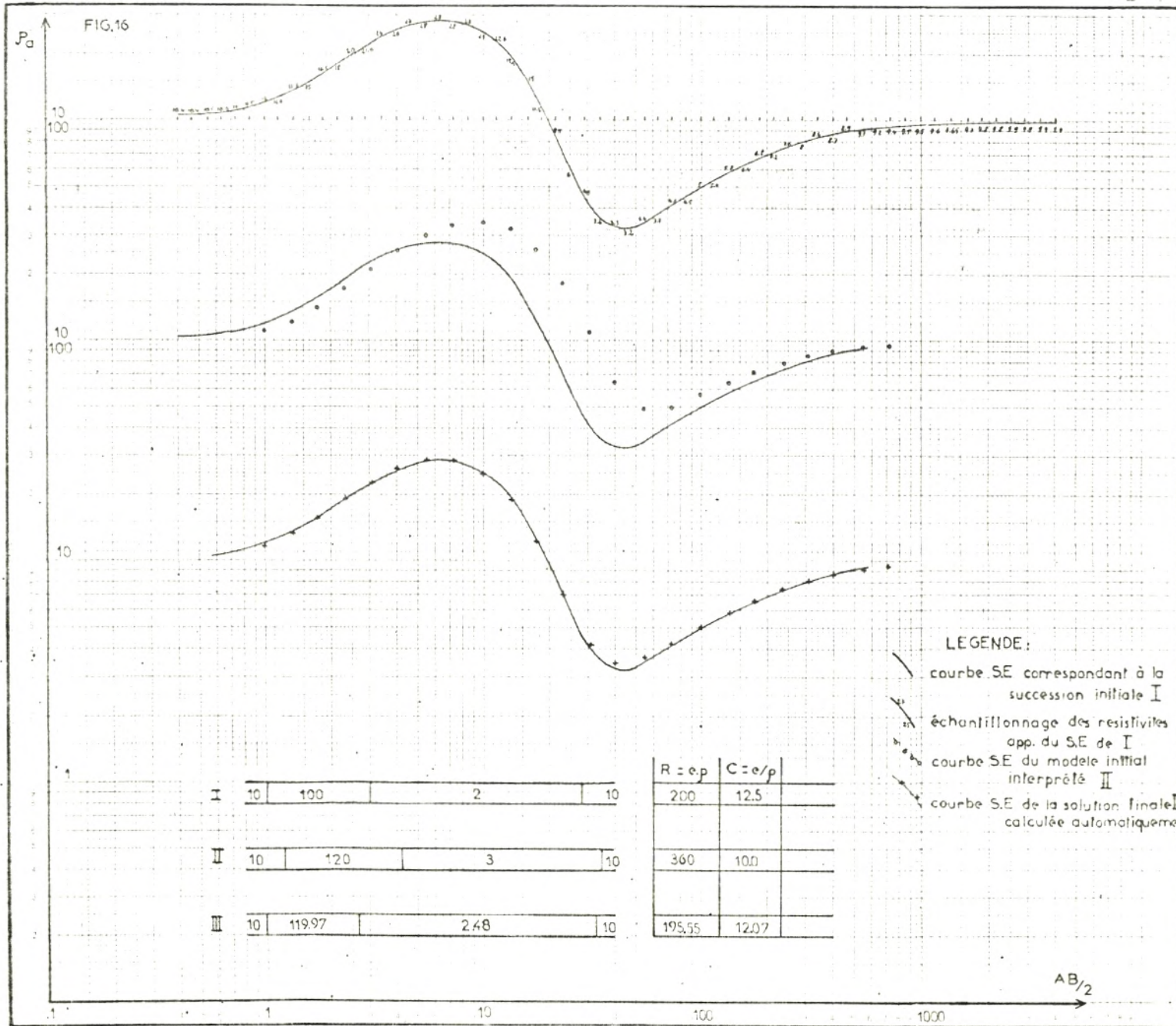


FIG.16

$P_a$

10  
100

10  
100

10

$AB/2$

LEGENDE:

- courbe S.E correspondant à la succession initiale I
- échantillonnage des resistivites app. du S.E de I
- courbe S.E du modele initial interprété II
- courbe S.E de la solution finale III calculée automatiquement

I	10	100	2	10
II	10	120	3	10
III	10	119.97	2.48	10

R = e/p	C = e/p
200	12.5
360	10.0
195.55	12.07

EXEMPLE n° 8 Utilisation du programme BICH

INTERPRETATION DIRECTE

S.E : Essai courbe théorique  
Echantillonnage des valeurs de résistivités apparentes  
de la courbe S.E  
nombre de points : 61

Valeurs de la Transformée T1 en fonction de 1/L0

.16	9.967279	.25	10.07306	.4	10.14113
.63	10.87519	1	12.5905	1.6	15.89564
2.5	20.15489	4	23.3893	6.3	22.8806
10	18.7321	16	14.00926	25	10.45455
40	8.180351	63	6.990468	100	6.782733
160	7.162087	250	7.679146	400	8.239279

Modèle :

Le modèle initial est le suivant :

nombre de couches N= 4

Résistivités Epaisseurs

R0= 10 H= 1.2

R0= 120 H= 3

R0= 3 H= 30

R0= 10

Valeurs du Criterium F1 en fonction

du nombre d'itérations Q

1	237.8446	2	111.2905	3	72.00923	4	42.70295	5	22.51944
6	10.58784	7	4.635904	8	2.097254	9	1.142325	10	.8092244
11	.6928381	12	.6464614	13	.6218707	14	.604061	15	.5885385
16	.5739428	17	.5598853	18	.5462525	19	.5329912	20	.520087
21	.5075351	22	.4953171	23	.4834238	24	.4718606	25	.4606089
26	.4496662	27	.4390285	28	.4286779	29	.4186128	30	.4088338
31	.3993216	32	.39008	33	.381096	34	.372364	35	.3638791
36	.3556338	37	.3476215	38	.3398479	39	.3322874	40	.3249515
41	.3178252	42	.3109036	43	.3041829	44	.2976599	45	.2913264
46	.2851821	47	.2792101	48	.2734222	49	.2677995	50	.2623454
51	.2570581	52	.251922	53	.2469469	54	.2421169	55	.2374331
56	.2328848	57	.2284831	58	.22421	59	.220068	60	.2160517
61	.2121589	62	.2083803	63	.2047263	64	.2011793	65	.1977438

Modèle final :

Nbre d'itérations Q= 65

Précision :

f3= 8.313991E-04

r0= 10 h= .9962984

r0= 119.9718 h= 1.632135

r0= 2.485767 h= 29.95792

r0= 10

b ) S.E 2 Tlemcen : (Fig.17)

La courbe 2S représente la courbe translatée, dont la première épaisseur a été ramenée à 1.

L'interprétation par les abaques donne comme modèle initial, la succession :

$\rho_i = 29$ Ohm.m	$h_i = 1$ m
= 150	= 10
= 7	= 100
= 20	= 200
= 200	

Exemple n° 9 : S.E 2 (Fig.17) .

Voir le traitement en pages suivantes .

A l'issue du calcul la solution finale est à multiplier par 0.4 .

c ) Conclusion : nous observons :

- sur l'exemple n°8 : la coïncidence entre la courbe solution III et la courbe théorique initiale I est parfaite .

- le tableau (Fig.16) indique les valeurs de  $R_t$  et  $C_l$  correspondantes aux modèles I et III : il existe une bonne concordance des valeurs .

- sur l'exemple n°9 : la coïncidence entre les courbes est encore très bonne même si la précision  $F_3$  ( rapport entre les valeurs des dernier et premier critères) est inférieure à celle de l'exemple précédent .

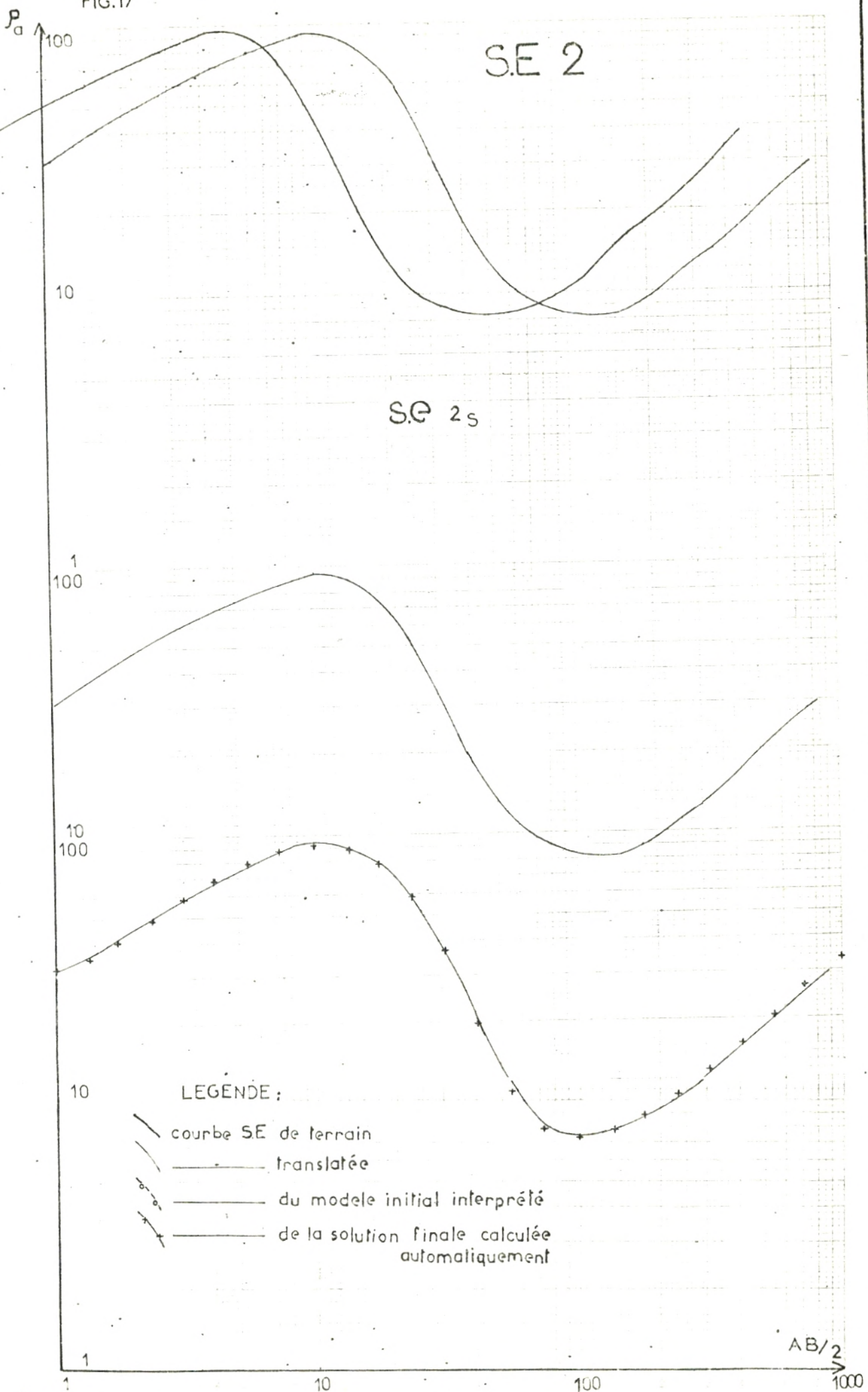
Notons que la courbe S.E 2 a fait l'objet d'une interprétation avec le programme de calcul précédent :

solutions : Programme "Joha"      Programme "Bich"

$\rho_i = 31$	$h_i = 1$	$\rho_i = 29$	$h_i = 1$
124.5	9	149.8	7.7
6.5	102	6.4	100
19.8	199.9	19.9	199.9
150		200	

Ces deux solutions sont équivalentes .

FIG.17



INTERPRETATION DIRECTE

S.E n° 2 Tlemcen

Echantillonnage des valeurs de résistivités apparentes

de la courbe S.E

nombre de points : 61

Valeurs de la Transformée T1 en fonction de 1/L0

.16	29.09018	.25	28.41079	.4	28.19039
.63	30.09034	1	33.87455	1.6	41.67417
2.5	51.69143	4	65.13896	6.3	76.68908
10	74.08572	16	63.64398	25	46.79304
40	34.56893	63	25.01742	100	18.89718
160	15.96863	250	15.86133	400	18.72801

Modèle

Le modèle initial est le suivant :

nombre de couches N = 5

Résistivités Epaisseurs

RO= 29	H= 1
RO= 150	H= 10
RO= 7	H= 100
RO= 20	H= 200
RO= 200	

Valeurs du Critérium F1 en fonction  
du nombre d'itérations Q

1	597.1963	2	484.3792	3	489.6161	4	334.8691	5	312.6211
6	291.9017	7	272.3609	8	253.9217	9	236.5384	10	220.1698
11	204.7768	12	190.3187	13	176.7551	14	164.0469	15	152.1537
16	141.0373	17	130.6591	18	120.9804	19	111.9653	20	103.5771
21	95.7815	22	88.54343	23	81.83071	24	75.61172	25	69.85572
26	64.53385	27	59.61725	28	55.08029	29	50.89668	30	47.04275
31	43.49533	32	40.23299	33	37.23526	34	34.48269	35	31.95722
36	29.64183	37	27.52047	38	25.57828	39	23.80127	40	22.17662
41	20.69185	42	19.33687	43	18.09933	44	16.97043	45	15.9411
46	15.00313	47	14.14891	48	13.37109	49	12.66339	50	12.0196
51	11.43427	52	10.90226	53	10.41894	54	9.979982	55	9.581452
56	9.21984	57	8.89165	58	8.593981	59	8.32411	60	8.079541
61	7.857798	62	7.656898	63	7.474943	64	7.310181	65	7.160935
66	7.025861	67	6.903676	68	6.793001	69	6.692961	70	6.602394
71	6.520524	72	6.446495	73	6.37953	74	6.31902	75	6.264302
76	6.214861	77	6.170178	78	6.129799	79	6.093317	80	6.060314

81 6.030529 82 6.00362 83 5.979279

Modèle final:

Nombre d'itérations Q= 83

précision:

F3= 1.001225E-02

RO= 29	H= 1.085086
RO= 149.8398	H= 7.650203
RO= 6.437849	H= 100.0084
RO= 19.97788	H= 199.9985
RO= 200	

δ ) Quatrième programme " B i c h a " :

δ-1) Caractéristiques : elles sont les mêmes que pour le programme précédent .La seule différence réside dans la procédure du gradient ou nous avons effectué un changement :

Ainsi dans le programme précédent la valeur  $m(e_1, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{n-1}, e_{n-1})$  est dégradée de la quantité  $T_4.G$  (ou  $T_4.G_1$ )

$$\text{où } G = \partial F_1 / \partial \rho_i \quad i = 2, \dots, n$$

$$G_1 = \partial F_1 / \partial e_i \quad i = 1, \dots, n-1$$

A présent  $m$  sera dégradé de la valeur  $T_4.p_k$  pour  $k = 0, \dots, n-1$  tel que :

$$\begin{aligned} p_0 &= ( \partial F_1 / \partial e_1 , \partial F_1 / \partial \rho_2 , \dots , \partial F_1 / \partial \rho_{n-1} , \partial F_1 / \partial e_{n-1} ) \\ \dots p_k &= ( 0 , 0 , \dots , \partial F_1 / \partial \rho_k , \partial F_1 / \partial e_k , \partial F_1 / \partial \rho_{k+1} , 0 \dots 0 ) \\ \dots p_{n-1} &= ( 0 , 0 , \dots , 0 , \partial F_1 / \partial \rho_n , \partial F_1 / \partial e_{n-1} ) \end{aligned}$$

Cette variante consiste à effectuer une recherche cyclique en faisant varier les paramètres de chaque couche indépendamment des autres .Au terme de chaque  $n$  itérations ,on aura effectué alors une recherche globale pour tous les paramètres  $\rho_i, e_i$  .

Le critère  $F_1$  est calculé à chaque dégradation de la valeur  $m$  d'une quantité  $T_4.p_k$  .Chaque valeur de  $F_1$  est comparée à la précédente et la même procédure que  $\gamma-1$  est suivie .

δ-2 ) Convergence du processus itératif :

Le pas  $T_4$  a été pris au départ égal à  $T_4 = F_1(1)/G_2$  avec :

$F_1(1)$  : valeur du critère pour le modèle proposé

$G_2$  : carré du module du gradient

Cependant ce pas peut se révéler dans le processus itératif :

- soit trop faible : alors les dégradations successives des paramètres  $\rho_i = \rho_i - T_4.G \quad i = 2, \dots, n-1$   
 $e_i = e_i - T_4.G_1 \quad i = 1, \dots, n-1$

seront trop petites ; par conséquent la diminution de  $F_1$  sera lente et le temps de traitement plus long .

- soit trop élevé : dans ce cas ,les valeurs de  $F_1$  vont osciller fortement et le processus diverge .

Pour pallier à ces défauts, nous avons introduit un coefficient  $A_2$  tel que :

$$T_4 = A_2 \cdot F_1(1)/G_2$$

Nous agirons alors sur  $A_2$  au fur et à mesure du calcul pour accélérer la convergence du processus .

ô-3) Précision  $F_2$  du traitement :

Durant le processus de calcul, la valeur  $F_1$  décroît, même d'une façon non monotone .Au fur et à mesure, la décroissance est de plus en plus lente jusqu'à tendre vers une valeur asymptotique .D'où la nécessité de pouvoir choisir la dernière valeur de  $F_1$  qui satisfait et qui arrête le traitement .Nous l'avons notée  $F_2$  grandeur au delà de laquelle aucune amélioration du modèle ne peut être atteinte .

ô-4) Listing : correspondant au sous-programme pour le calcul des dérivées partielles

$$\partial T_1 / \partial \rho_i \quad i = 1, \dots, n \quad \text{et} \quad \partial T_1 / \partial e_i \quad i = 1, \dots, n-1$$



```
6170 Q=Q+1
6171 IF Q<N+1 THEN 6173
6172 Q=1
6173 GOTO 810
6174 DI(N)=1
6175 FOR E=N-2 TO 1 STEP -1
6176 D(E)=(1-W(E).2/RO(E).2)/(1+W(E).T(E+1)/RO(E).2.2
6177 DZ=D1(N)+D(E)
6178 DI(N)=D2
6179 NEXT E
6180 IF (2+H(N-1)+L1(I))<10 THEN 6183
6181 B=0
6182 GOTO 6184
6183 B=E1+EXP(-2+H(N-1)+L1(I))
6184 P=4+RO(N-1)+B/(K1+(1+B).2)
6185 DI(N-1)=DI(N)+B/RO(N-1)/(RO(N-1)+RO(N).2)
6186 DI(N)=DI(N)+P+RO(N-1)/(RO(N-1)+RO(N).2
6187 FOR M=N-2 TO 2 STEP -1
6188 S(M)=(1-T(M+1).2/RO(M).2)/(1+W(M).T(M+1)/RO(M).2)+
2*(W(M).T(M+1)+W(M).T(M+1)+RO(M).-3/(1+W(M).T(M+1)/RO(M).2.2)
6189 DI(M)=1
6190 FOR E=M-1 TO 1 STEP -1
6191 D(E)=(1-W(E).2/RO(E).2)/(1+W(E).T(E+1)/RO(E).2.2
6192 DZ=D1(M)+D(E)
6193 DI(M)=D2
6194 NEXT E
6195 DI(N)=DI(M)+S(M)
6196 NEXT M
6197 DI(1)=(1-T(2).2/RO(1).2)/(1+W(1).T(2)/RO(1).2.2+(W(1)/RO(1).+
2*(W(1).T(2)+W(1).T(2)+RO(1).-3/(1+W(1).T(2)/RO(1).2.2
6198 B=M
6199 CI(N-1)=1
6200 FOR E=N-2 TO 1 STEP -1
6201 D(E)=(1-W(E).2/RO(E).2)/(1+W(E).T(E+1)/RO(E).2.2
6202 C2=CI(N-1)+D(E)
6203 CI(N-1)=C2
6204 NEXT E
6205 CI(N-1)=CI(N-1)+P+L1(I)
6206 FOR M=N-2 TO 2 STEP -1
6207 IF (2+H(M)+L1(I))<10 THEN 6210
6208 S1(M)=0
6209 GOTO 6211
6210 S1(M)=(1-T(M+1).2/RO(M).2)/(1+W(M).T(M+1)/RO(M).2.2
*(4+RO(M)+EXP(-2+H(M)+L1(I)))/(1+EXP(-2+H(M)+L1(I)).2)+L1(I)
6211 CI(M)=1
6212 FOR E=M-1 TO 1 STEP -1
6213 D(E)=(1-W(E).2/RO(E).2)/(1+W(E).T(E+1)/RO(E).2.2
6214 C2=CI(M)+D(E)
6215 CI(M)=C2
6216 NEXT E
6217 CI(M)=CI(M)+S1(M)
6218 NEXT M
6219 IF (2+H(1)+L1(I))<10 THEN 6222
6220 CI(1)=0
6221 GOTO 6223
6222 CI(1)=(1-T(2).2/RO(1).2)/(1+W(1).T(2)/RO(1).2.2+
*(4+RO(1)+EXP(-2+H(1)+L1(I)))/(1+EXP(-2+H(1)+L1(I)).2)+L1(I)
6223 RETURN
```

ô-5) Applications :

a ) Exemple théorique : considérons la même succession que celle vue en γ-3 .(Fig.18)

Le modèle initial sera ,après une interprétation avec les abaques pris identique comme en γ-3.

Exemple n° 10 : S.E courbe théorique (Fig.18) .

Voir le traitement en pages suivantes .

b ) S.E 6 Tlemcen :(Fig.19)

La courbe 6S représente la courbe translatée, dont la première épaisseur a été ramenée à 1 .

Le modèle initial adopté est le suivant :

$\rho_v$	= 41 Ohm.m	$e_v$	= 1 m
	= 12		= 3.8
	= 100		= 2.1
	= 6		= 16
	= 40		= 32
	= 300		

Exemple n° 11 : S.E 6 (Fig.19) .

Voir le traitement en pages suivantes .

A l'issue du calcul ,la solution finale doit être multipliée par un coefficient de 2.8 .

c ) Conclusion :

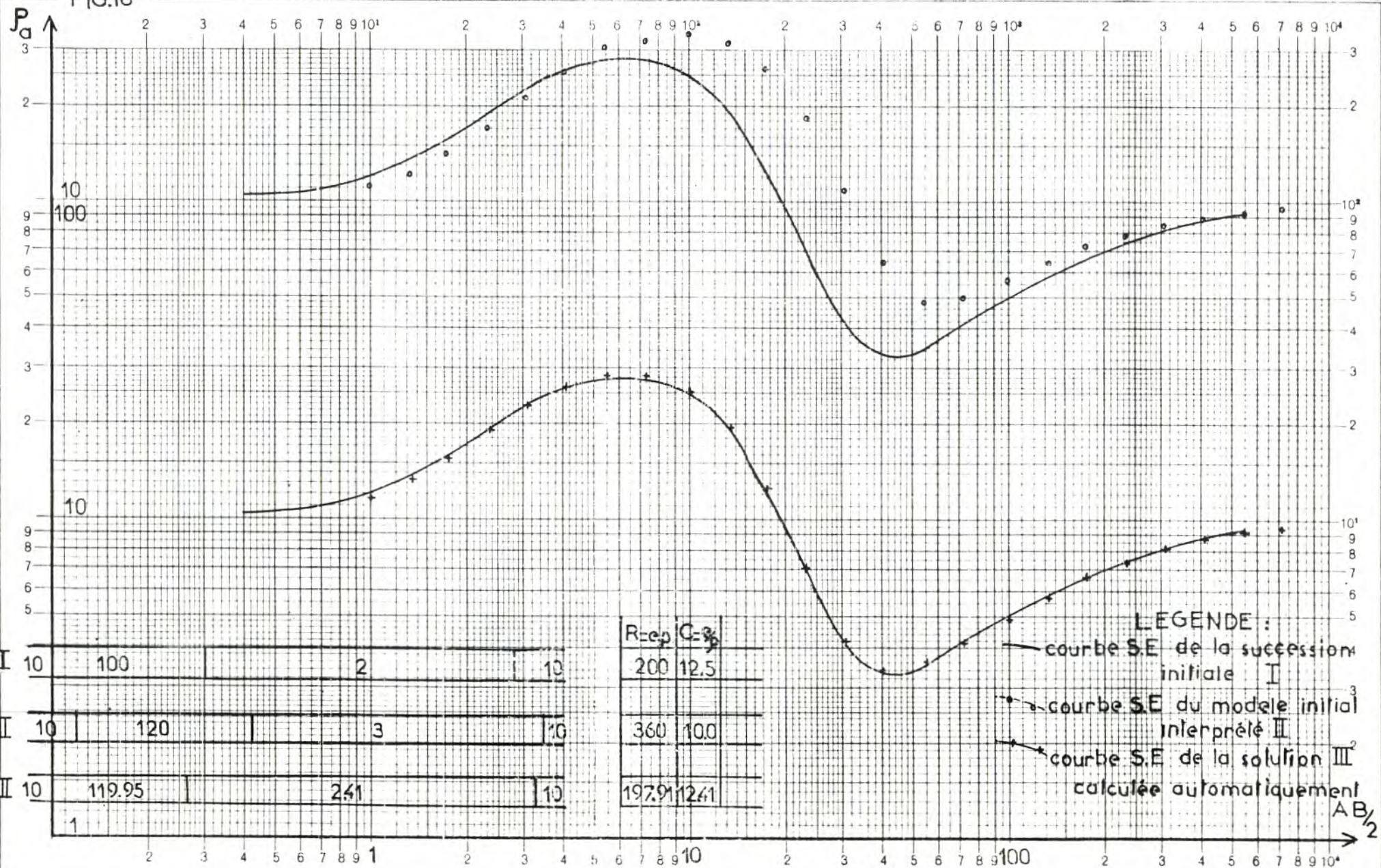
- pour l'exemple 10 : ce programme est plus rapide et plus efficace que le précédent (cf. γ.3.a) .

En effet le nombre d'itérations est moindre : 18 au lieu de 65 alors que la solution finale est encore plus proche de la courbe théorique.

Les valeurs  $R_t$  et  $C_l$  sont respectivement égales à 197.5 et 12.4 c'est à dire encore plus proches des valeurs théoriques ( 200 et 12.5 ) .

- pour l'exemple 11 : la rapidité d'exécution se confirme la précision  $F_3 = 6.29 E-03$  est meilleure pour un nombre d'itérations inférieur (  $Q_{max} = 14$  ) ,alors que le nombre de couches est supérieur par rapport à l'exemple 9 .

FIG.18



$R_{exp}$	$C_{30}$
200	12.5
360	100
197.9	124.1

LEGENDE :

- courbe S.E. de la succession initiale I
- courbe S.E. du modèle initial interprété II
- courbe S.E. de la solution III calculée automatiquement

I	10	100	2	10
II	10	120	3	10
III	10	119.95	241	10

Exemple n° 10 Utilisation du programme Bicha

EXEMPLE n° 11 Utilisation du programme BICHA

INTERPRETATION DIRECTE

INTERPRETATION DIRECTE

S.E : essai courbe théorique

S.E n° 6 Tlemcen

Echantillonnage des valeurs de résistivités apparentes de la courbe S.E

Echantillonnage des valeurs de résistivités apparentes de la courbe S.E

nombre de points : 61

nombre de points : 61

Valeurs de la Transformée T1 en fonction de 1/L0

Valeurs de la Transformée T1 en fonction de 1/L0

.16	9.967279	.25	10.07306	.4	10.14113
.63	10.87519	1	12.5905	1.6	15.89564
2.5	20.15489	4	23.3893	6.3	22.8806
10	18.7321	16	14.00926	25	10.45455
40	8.180351	63	6.990468	100	6.782733
160	7.162087	250	7.679146	400	8.239279

.16	41.46991	.25	40.69022	.4	41.08337
.63	38.85677	1	34.67428	1.6	28.6235
2.5	24.41363	4	21.1192	6.3	20.72915
10	18.96216	16	16.72498	25	14.53706
40	13.4947	63	16.83364	100	20.98058
160	30.96791	250	42.19307	400	62.61903

Le modèle initial est le suivant :

nombre de couches N= 4

Le modèle est le suivant :

Résistivités Epaisseurs

nombre de couches N= 6

Résistivités Epaisseurs

RO= 10	H= 1.2
RO= 120	H= 3
RO= 3	H= 30
RO= 10	

RO= 41.3	H= 1
RO= 12	H= 3.8
RO= 100	H= 2.1
RO= 6	H= 16
RO= 40	H= 32
RO= 300	

Valeurs du Critérium F1 en fonction du nombre d'itérations Q

1	237.8446	2	152.929	3	151.8711
4	64.34267	5	60.93836	6	33.0989
7	27.79054	8	7.733269	9	6.624325
10	3.70368	11	3.535794	12	1.225351
13	1.091352	14	.6211999	15	.6106907
16	.2547042	17	.2209059	18	.1408815

1	581.2923	2	330.9002	3	329.8461
4	321.6848	5	111.4793	6	6.770958
7	6.844723	8	4.352836	9	4.472838
10	4.371773	11	4.352163	12	4.325044
13	4.811586	14	3.66154		

Modèle final:

Modèle final:

Nbre d'itérations Q= 18

Nbre d'itérations Q= 14

Précision:

Précision:

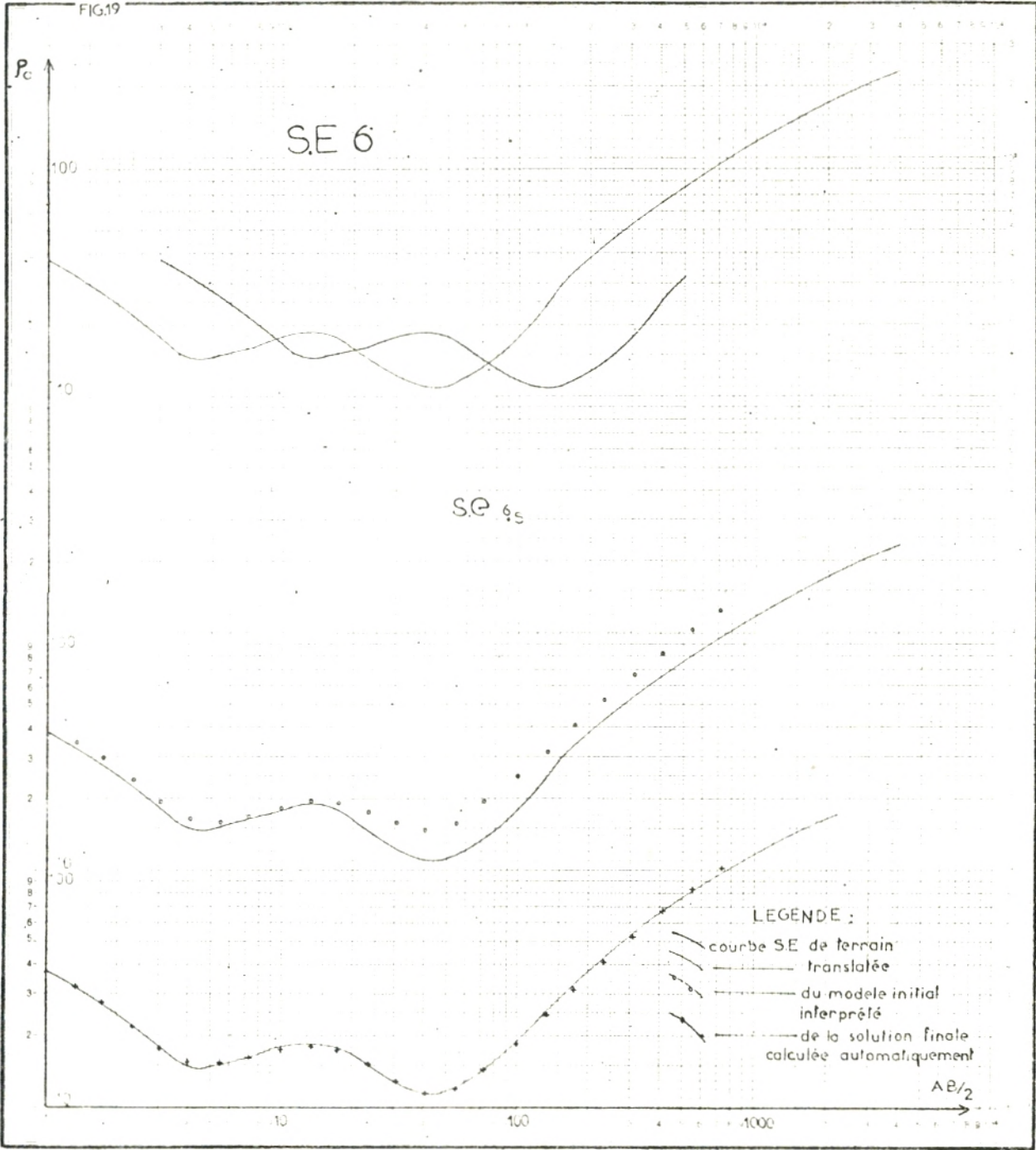
f3= 5.923256E-04

f3= 6.298966E-03

RO= 10	H= 1.005649
RO= 119.9544	H= 1.65448
RO= 2.414619	H= 29.97472
r0= 10	

r0= 41.3	h= .9033401
r0= 11.87303	h= 3.988413
r0= 99.99322	h= 1.932771
r0= 4.13859	h= 16.46709
r0= 40.06072	h= 32.13736
r0= 300	

FIG.19



ε ) Cinquième programme " Z " :

Ce programme dont les bases théoriques ont été données au chap. III-B.2 réalise l'interprétation directe ,c'est à dire donne le modèle géoélectrique le plus proche de la succession de couches responsable de la courbe de S.E .

L'idée de base de Zohdy (1975) est qu'il considère que la courbe de S.E est assez proche de la courbe D.Z due à la succession de terrains .Donc le point de départ du programme que nous avons établi sera cette dernière courbe .

A la différence des programmes précédents " Bich " et " Bichà " ce dernier ne donne pas la prédominance à la Transformée de résistivité T .

ε-1) Caractéristiques :

a ) l'échantillonnage de la courbe S.E est effectué en 24 points

b ) en fonction des pentes entre les points échantillonnés ,inférieures à -1 ,supérieures à 1 ,ou comprises entre ces deux valeurs ,les tronçons des courbes modifiées MDZ-L ,MDZ-T ou DZ sont calculés et permettent de donner la solution en 25 couches .

c ) pour la détermination des résistivités par la méthode Régula-Falsi ,l'itération est répétée au maximum 15 fois ou bien jusqu'à ce que deux valeurs successives obtenues remplissent la condition

$$0.98 < \rho(i)/\rho(i-1) < 1.02$$

d ) les courbes S.E correspondant aux modèles à 25 couches sont calculées à raison de 10 points par décade logarithmique .Le processus est répété jusqu'à ce que la courbe S.E calculée se rapproche le plus près de la courbe originale .

e ) le modèle solution finale adopté de 25 couches est simplifié en un nombre de couches inférieur ; en effet la solution automatique en 25 couches donne à l'interpréteur la possibilité de construire rapidement diverses autres solutions plus simples, qui respectent encore les résultats des mesures faites sur le terrain .

Ceci est obtenu en programmant une procédure inspirée de Zohdy (1975)

- en calculant la courbe D.Z détaillée issue du modèle en 25 couches

- en lissant graphiquement la courbe D.Z, de façon à obtenir un nombre inférieur de points-D.Z

- l'inversion des nouveaux points-D.Z donne le modèle solution simplifié .

2) Listing : correspondant au calcul des résistivités des 24 couches .La résistivité de la dernière représente l'asymptote de la courbe S.E à droite et est facilement déterminée .

```

590 H(1)=L2(1)
600 B0(1)=R(1)
610 FOR j=1 TO 23
620 S0=(LOG(R(j+1))-LOG(R(j)))/(LOG(L2(j+1))-LOG(L2(j)))
630 IF S0<=-1 THEN 910
640 IF S0>=1 THEN 690
650 E0(j+1)=SQR((L2(j+1)+R(j+1)-L2(j)+R(j))/(L2(j)+R(j+1))-L2(j)/R(j)))
660 H(j+1)=B0(j+1)+((L2(j+1)+R(j+1))-L2(j)/R(j))
670 H0=H0+H(j+1)
680 GOTO 1110
690 E=L2(j+1)+R(j+1)-L2(j)+R(j)
700 Y=1
710 P2(j)=(L2(j+1)+K/(50+R(j+1)))/(L2(j)+K/(50+R(j+1)))+(E/(50+R(j+1)))+(X-1)/2
720 IF P2(j)<0 THEN 890
730 P0(j)=(L2(j+1)+R(j+1))/(L2(j)+R(j+1)))+(L2(j)+R(j+1))/(L2(j)+R(j+1)))+(X-1)/2
740 B0(j+1)=R(j+1)+P2(j)-50+R(j+1)+P0(j))/(P2(j)+P0(j))
760 I=1
770 R5(1)=R0(j+1)
780 R=(L2(j+1)/L2(j)+R/R5(1)))+(L2(j)+R/R5(1)))+(X-1)/2
790 R5(1+1)=(R(j+1)+R-R5(1)+P0(j))/(P-R0(j))
800 IF R5(1+1)/R5(1))<.98 THEN 830
810 IF R5(1+1)/R5(1))>1.02 THEN 830
820 GOTO 860
830 I=I+1
840 IF I>=15 THEN 860
850 GOTO 780
860 B0(j+1)=R5(1)
870 H(j+1)=E/R0(j+1)
880 GOTO 1110
890 X=X-.1
900 GOTO 710
910 Q=(L2(j+1)/R(j+1))-L2(j)/R(j)
920 X=.6
930 P0(j)=(L2(j)+R(j+1))/(L2(j)+R(j+1)))+(L2(j)+R(j+1))/(L2(j)+R(j+1)))+(X-1)
940 IF P0(j)>0 THEN 1090
950 P2(j)=(L2(j)+R(j+1)+Q)/(L2(j)+R(j+1)+Q)+(L2(j)+R(j+1))/(L2(j)+R(j+1)))+(X-1)
960 R0(j+1)=R(j+1)+P0(j))/(P2(j)+P0(j))
970 I=1
980 R5(1)=R0(j+1)
990 R=(L2(j)+R5(1)+Q)/(L2(j)+R5(1)))+(L2(j)+R5(1))/(L2(j)+R5(1)))+(X-1)
1000 R5(1+1)=(R5(1)+R(j+1)+P2(j)-R(j+1)+P)/(P2(j)+R)
1010 IF R5(1+1)/R5(1))<.98 THEN 1040
1020 IF R5(1+1)/R5(1))>1.02 THEN 1040
1030 GOTO 1070
1040 I=I+1
1050 IF I>=15 THEN 1070
1060 GOTO 990
1070 B0(j+1)=R5(1)
1080 GOTO 1110
1090 X=X-.2
1100 GOTO 930
1110 NEXT j

```



### 5-3) Application :

Exemple n° 12 : S.E 19 (Fig.20) .

Voir le traitement en pages suivantes .

La courbe S.E du modèle calculé coïncide parfaitement avec la courbe S.E 19s (Fig.20).

La succession des couches précédente peut être de même simplifiée en choisissant de nouveaux points-D.Z .Cependant les solutions resteront équivalentes .

Les épaisseurs doivent enfin être multipliées par 2 pour revenir à la courbe originale S.E 19 .

### 4 ) Conclusions :

- La méthode semi -automatique est bien adaptée pour l'interprétation initiale sur le terrain .Cependant ,si elle est très précise pour le calcul de la Transformée T ,une bonne marge d'erreur est possible dans la détermination des croix ,ainsi que dans la superposition avec les diagrammes de l'abaque bi-couche comme le remarque Koefoed(1976).

- Nous avons opté pour le calcul des courbes de S.E pour l'expression de Johansen utilisant un filtre de 135 coefficients Malgré le temps de calcul plus grand ,son intérêt réside dans la précision de 8 points/décade ,et le nombre de couches du modèle qui n'est pas limité .

- Les programmes d'interprétation directe utilisant la méthode des gradients donne d'excellents résultats pour les courbes théoriques .Mais le processus de calcul est plus ardu pour les courbes de terrain ,dont les courbures ne sont pas toujours dues à des modèles de couches tabulaires .

FIG. 20

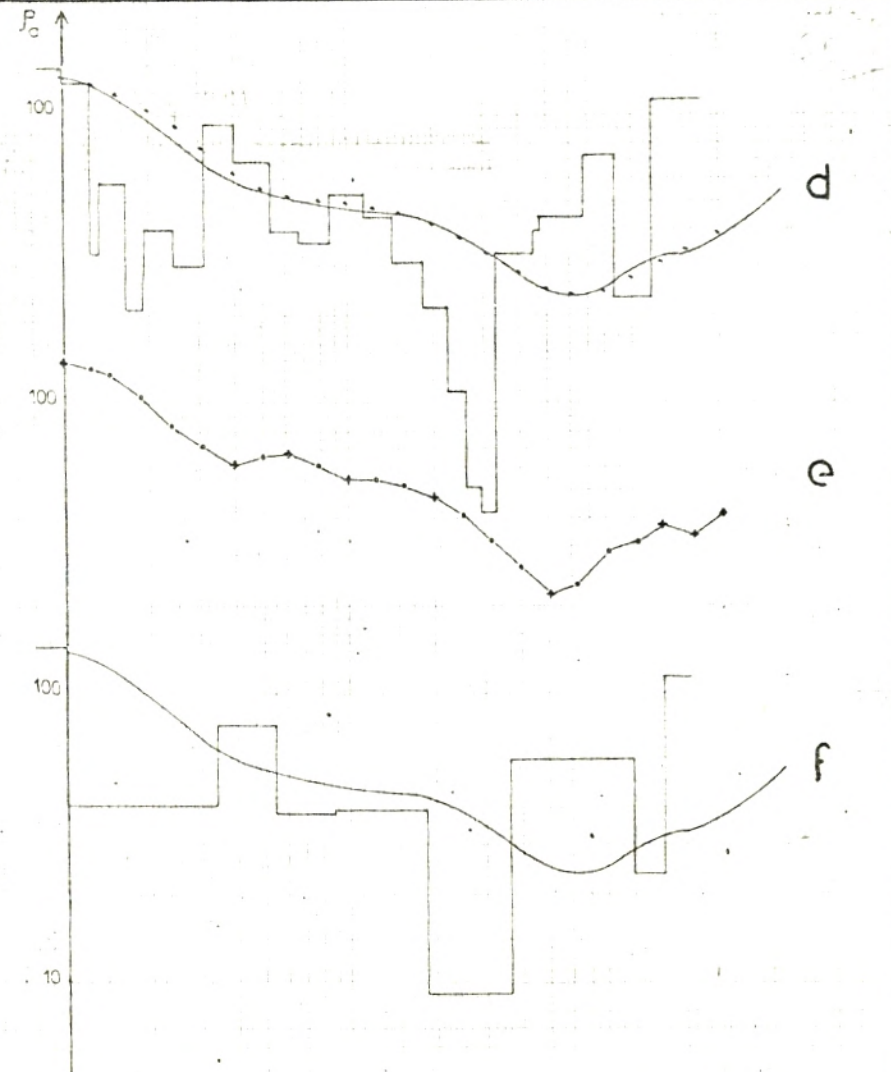


SE 19

SE 19<sub>s</sub>

LEGENDE :

- a — courbe S.E. de terrain translatée
- b,c — distribution de résistivités et épaisseurs en 25 couches
- ... courbe S.E. calculée pour la distribution précédente



- d — distribution finale de résistivités et épaisseurs en 25 couches
- ... courbe S.E. solution correspondant à la distribution précédente
- e — courbe D.Z. simplifiée
- ... courbe D.Z. simplifiée

- f — distribution simplifiée des résistivités et épaisseurs
- ... courbe S.E. correspondante

A B /

10

100

A B /

INTERPRETATION DIRECTE

S.E n° 19 Tlencen

Echantillonnage de la courbe S.E : 24 points

Résistivités et Epaisseurs du Modèle à 25 couches

H	RO	H	RO	H	RO	H	RO
1.00	135.00	0.25	111.60	0.25	56.74	0.37	62.53
0.23	21.83	0.49	33.25	0.58	25.56	0.95	41.08
1.26	41.70	1.54	38.53	2.07	40.11	2.60	44.62
3.17	39.51	4.02	32.11	4.47	24.60	5.27	17.60
6.03	12.80	7.24	11.05	12.95	21.67	14.32	40.05
19.94	37.41	21.25	53.54	32.35	39.46	33.68	70.85

Résistivités apparentes de la courbe calculée du Modèle à 25 couches

127.81	122.41	114.10	102.56	88.40	73.33
59.73	49.57	43.47	40.57	39.42	38.81
38.05	36.75	34.72	32.00	28.91	26.09
24.25	23.87	24.99	27.28	30.31	33.82

Visualisation courbe calculée et courbe de terrain

y a t il coincidence ? oui=1 non =0

Non

Résistivités et Epaisseurs du Modèle à 25 couches

H	RO	H	RO	H	RO	H	RO
1.00	142.59	0.25	121.22	0.08	14.51	0.36	58.89
0.23	28.55	0.55	38.16	0.68	32.07	0.98	73.56
1.30	67.00	1.56	48.45	2.04	45.45	2.60	54.48
3.13	44.33	3.78	31.52	3.83	20.78	3.42	10.46
2.24	4.10	3.89	4.93	12.88	25.70	4.30	186.76
18.93	47.53	18.73	75.26	32.95	34.26	28.65	99.90

Résistivités apparentes de la courbe calculée du Modèle à 25 couches

133.77	127.27	117.54	104.52	89.45	74.73
62.96	55.59	52.21	51.16	50.63	49.51
47.31	43.90	39.30	33.92	28.62	24.62
22.88	23.58	26.14	29.76	33.95	38.58

Visualisation courbe calculée et courbe de terrain

Y a t il coincidence ? oui=1 non =0

Non

Résistivités et Epaisseurs du Modèle à 25 couches

H	RO	H	RO	H	RO	H	RO
1.00	143.91	0.25	130.02	0.08	33.36	0.37	57.55
0.23	21.19	0.59	40.06	0.69	30.12	0.89	93.38
1.29	68.44	1.47	39.05	1.96	37.00	2.60	53.54
3.17	44.38	3.83	31.02	4.02	21.57	3.70	11.13
2.86	5.17	3.50	4.30	12.13	32.80	2.52	394.38
19.96	44.77	19.82	73.31	30.00	23.47	25.89	111.75

Résistivités apparentes de la courbe calculée  
du Modèle à 25 couches

135.84	129.77	120.49	107.76	92.59	77.28
64.66	56.49	52.53	50.93	49.88	48.16
45.56	42.08	37.80	32.98	28.30	24.79
23.34	24.16	26.70	30.20	34.19	38.59

Visualisation courbe calculée et courbe de terrain

Y a t il coincidence ? oui=1 non =0

Oui

solution finale

Courbe DZ de la solution

L2	R2	L2	R2	L2	R2	L2	R2
1.00	143.91	1.25	141.02	1.58	126.50	2.00	106.78
2.50	85.00	3.16	72.88	4.00	61.53	5.00	66.43
6.30	66.84	7.90	60.22	10.00	54.59	12.60	54.38
15.80	52.21	20.00	47.09	25.00	41.06	31.60	33.72
40.00	26.97	50.00	21.86	63.00	23.67	79.00	30.46
100.00	32.88	125.00	37.70	158.00	34.41	200.00	41.43

Donner le nombre de points et les points-D.Z  
de la courbe D.Z simplifiée

N1= 9

L4	R	L4	R	L4	R	L4	R	L4	R
1.00	143.00	4.00	61.00	6.20	66.80	10.00	54.50	20.00	47.00
50.60	21.80	128.00	37.70	161.00	34.40	203.00	41.40		

Calcul du Modèle de la courbe D.Z simplifiée

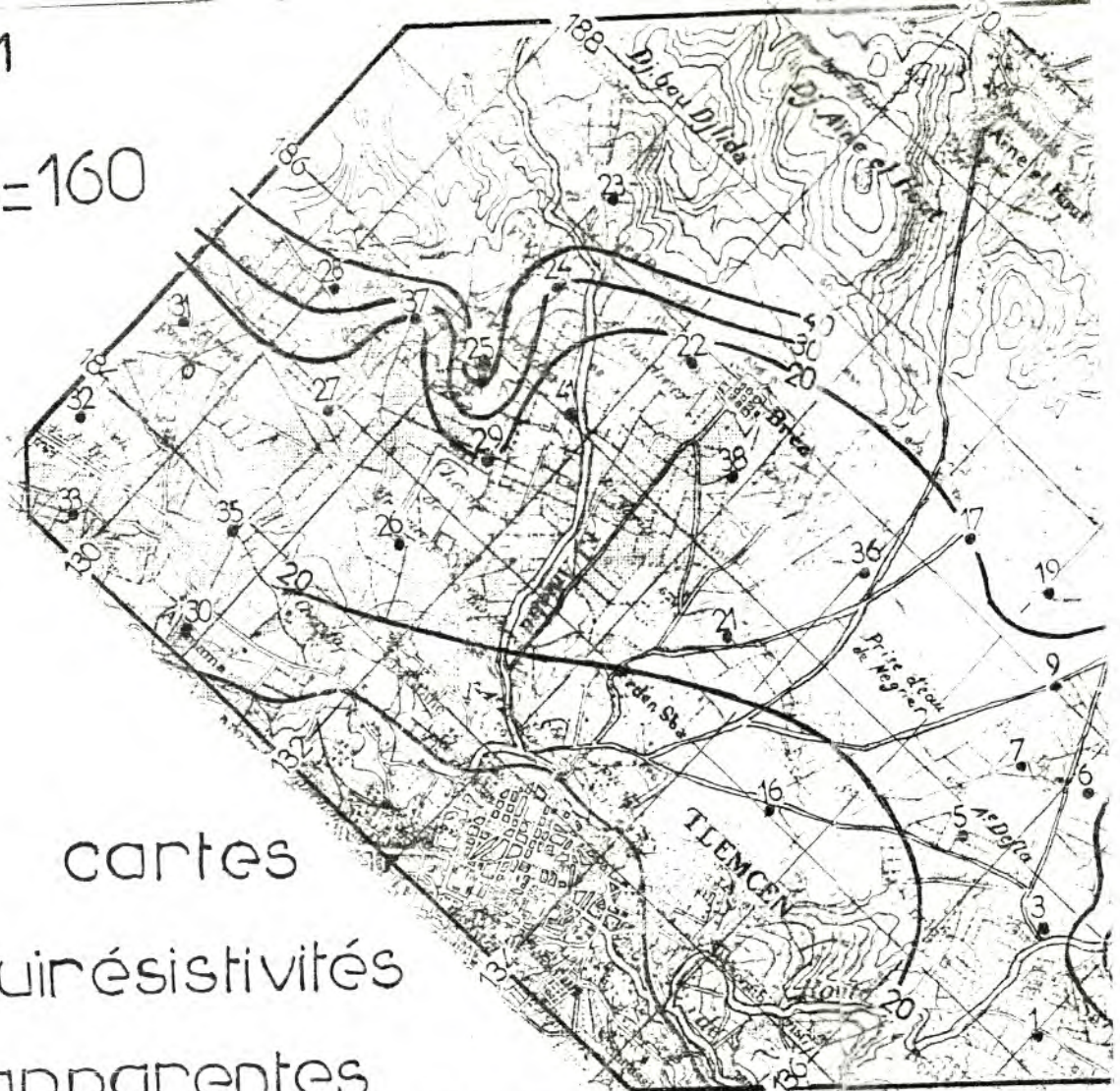
RO(1)= 143 H(1)= 1  
 RO= 41.52247 H= 2.432418  
 RO= 79.03518 H= 2.152966  
 RO= 37.98691 H= 3.444344  
 RO= 40.39707 H= 9.777937  
 RO= 9.275353 H= 17.58207  
 RO= 58.86962 H= 63.23329  
 RO= 23.55218 H= 30.26472  
 RO= 113.325 H= 25.28834

- Le temps de calcul est un peu long avec le dernier programme "Z" calculant la courbe S.E du modèle à 25 couches bien qu'il soit considérablement réduit avec un micro-Ordinateur de type AT .L'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite aucune hypothèse préalable sur les paramètres des couches et qu'elle permet de considérer le nombre de couches qu'on désire comme solution .

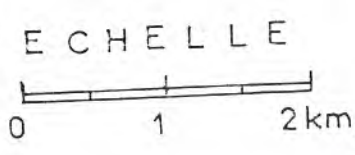
- Les courbes solutions finales sont très proches avec une grande précision des courbes S.E initiales .Les très faibles écarts peuvent être dus aux imprécisions des mesures de terrain de ces dernières et ne réduise en rien l'efficacité des différentes méthodes .

FIG.21

AB=160

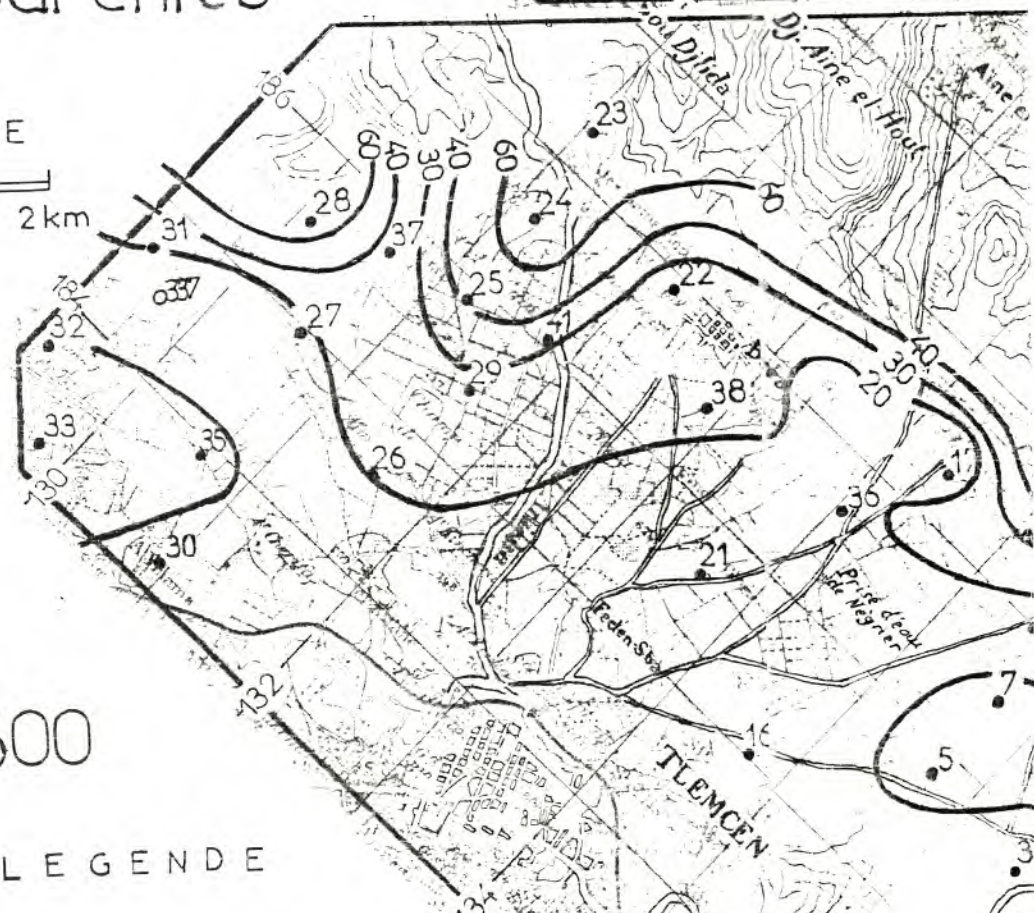


cartes  
d'équirésistivités  
apparentes



AB=600

LEGENDE



L'enfoncement des formations résistantes se fait comme dans le secteur du Djebel-el-Hadid vers le Sud-Est : les valeurs d'isolignes diminuent à partir des massifs carbonatés du Djebel Aïn-el-Hout et du Djebel-bou-Djelida ainsi que du Djebel Tefatisset formant deux blocs en contact constitués d'une part de formations conductrices et d'autre part de formations résistantes.

• Zone B : les isolignes ont été tracées avec un pas plus faible que dans la zone précédente et leur observation montre :

◦ les mêmes isolignes qui se retrouvent pratiquement à la même position pour les longueurs AB = 160 et 600 m .

De plus les valeurs de résistivités apparentes sont nettement inférieures à celles de la zone A .

Ces deux remarques impliquent une prédominance des formations conductrices ,assez homogènes pour garder les mêmes résistivités à plusieurs niveaux de profondeurs .

◦ les lignes ont une direction SO-NE au Nord du Djebel-el-Hadid et plus franchement N-S à l'Est de l'Amiguièr .

◦ les formations conductrices s'épaississent donc vers le Nord et vers l'Ouest avec un gradient faible .

b- AB = 1000 m : (fig.22)

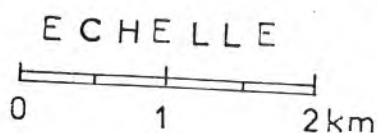
• Zone A : l'allure des isolignes observées précédemment se retrouve pour une investigation plus profonde en AB = 1000 m ,leurs valeurs étant ici plus élevées car la tranche de terrain captée ,plus épaisse ,comporte plus de terrains résistants du substratum .

◦ secteur I : au Sud et Sud-Ouest du Djebel-el-Hadid

Le rebroussement des lignes vers le Sud observé sur les cartes AB = 160 , 600 m au niveau du S.E 19 est moins accentué en AB = 1000 m dénotant la présence d'accidents se situant uniquement à des profondeurs basses ou moyennes .

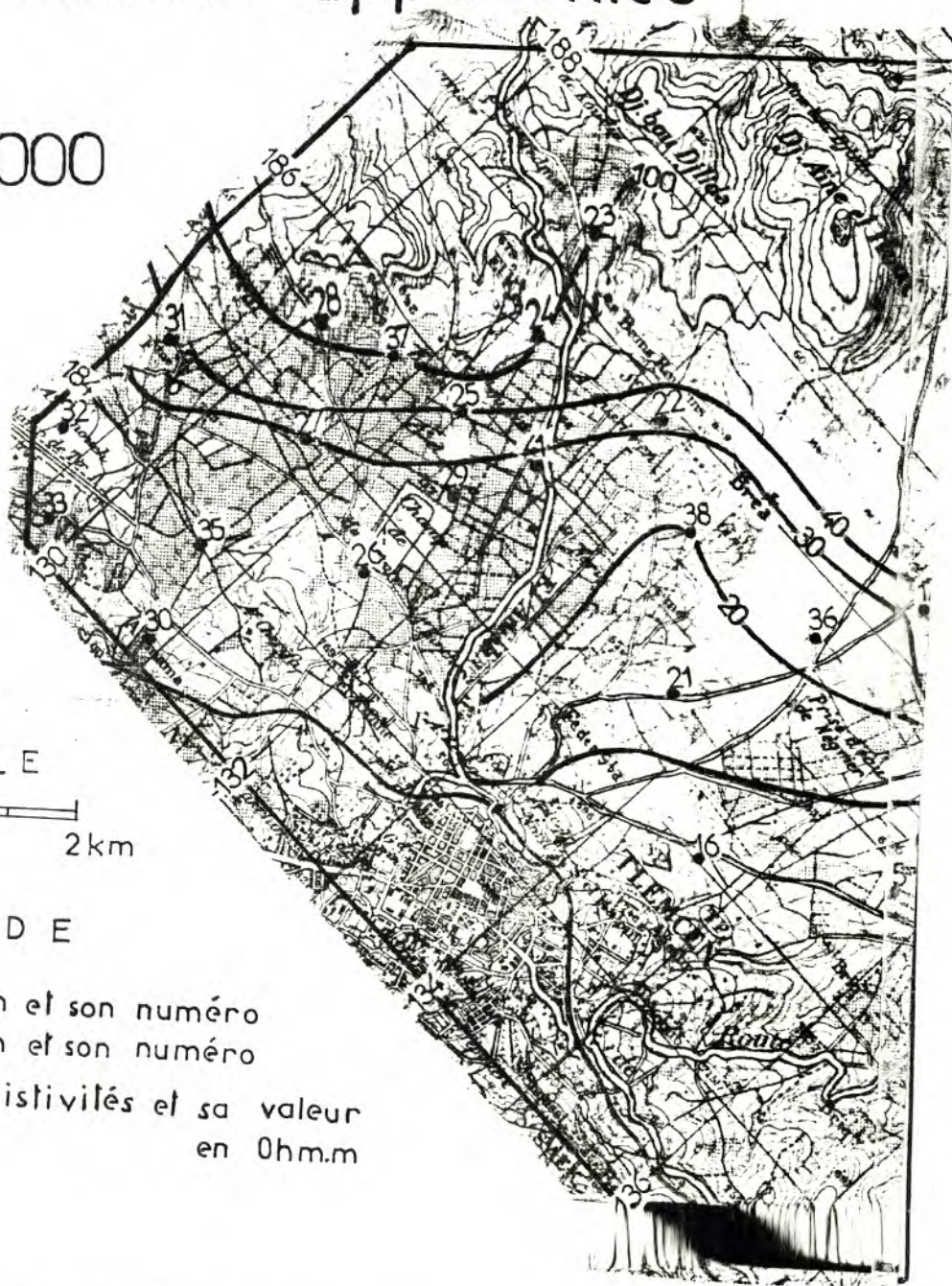
FIG. 22      carte  
d'équirésistivités apparentes

AB = 1000



LEGENDE

- 12 ● S.E. en AB=1000 m et son numéro
- 303 ○ S.E. en AB=3000 m et son numéro
- 20 — courbe d'équirésistivités et sa valeur en Ohm.m



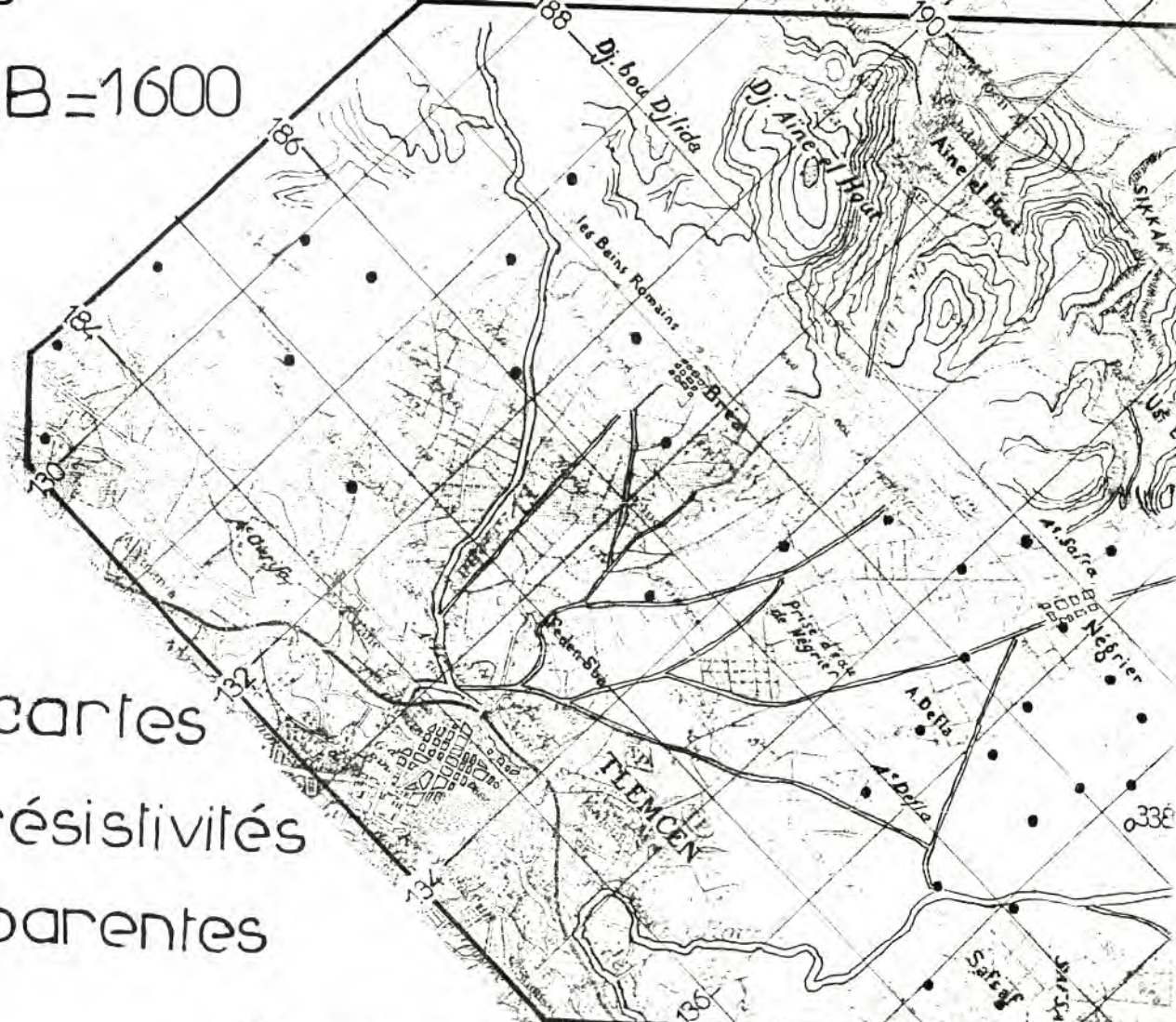
Par contre la dépression observée au niveau des S.E 9 ,10 se confirme en ligne AB = 1000 m c'est à dire jusqu'au substratum par

l'ensemble de la

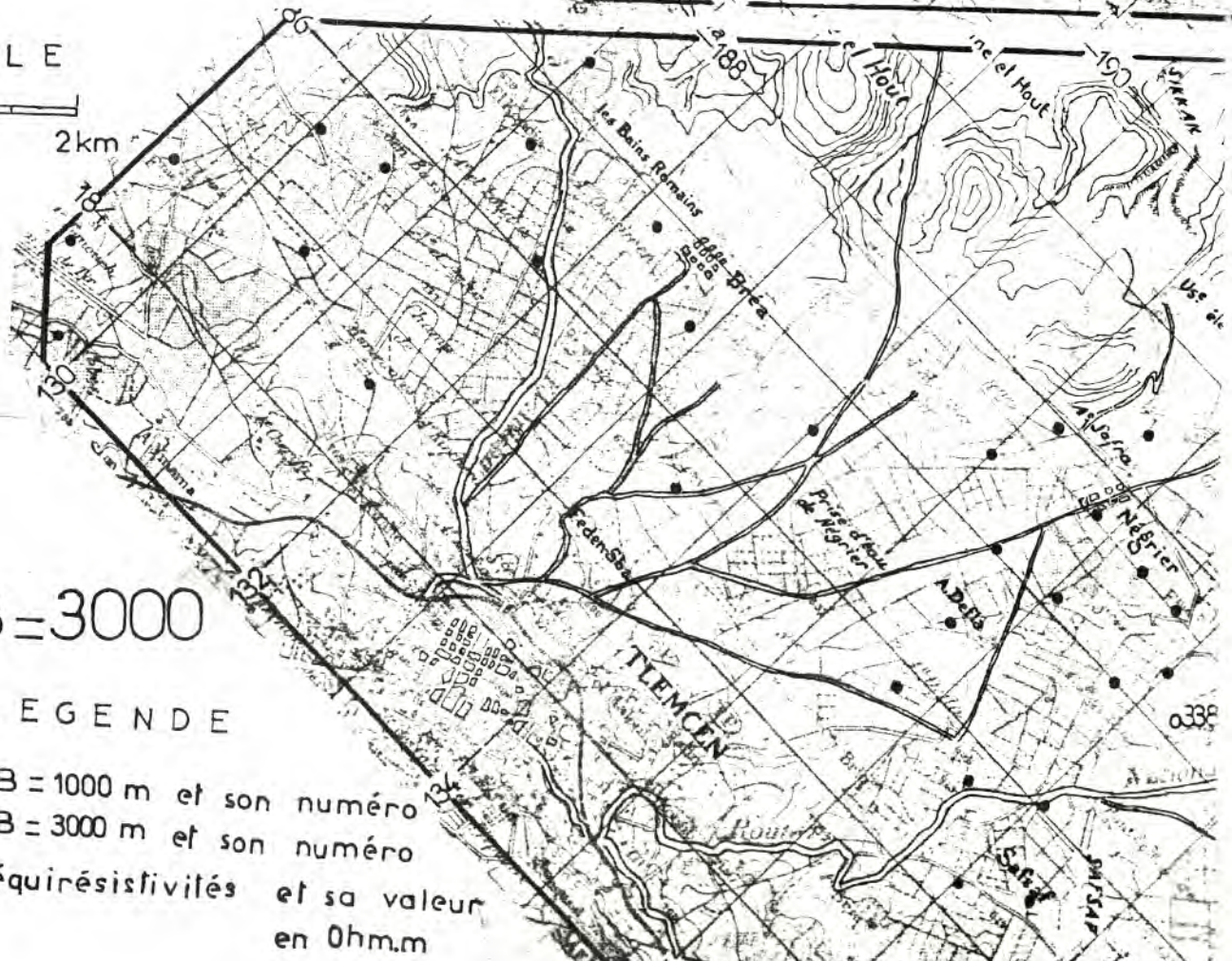
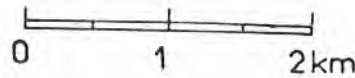


AB=1600

cartes  
d'équirésistivités  
apparentes



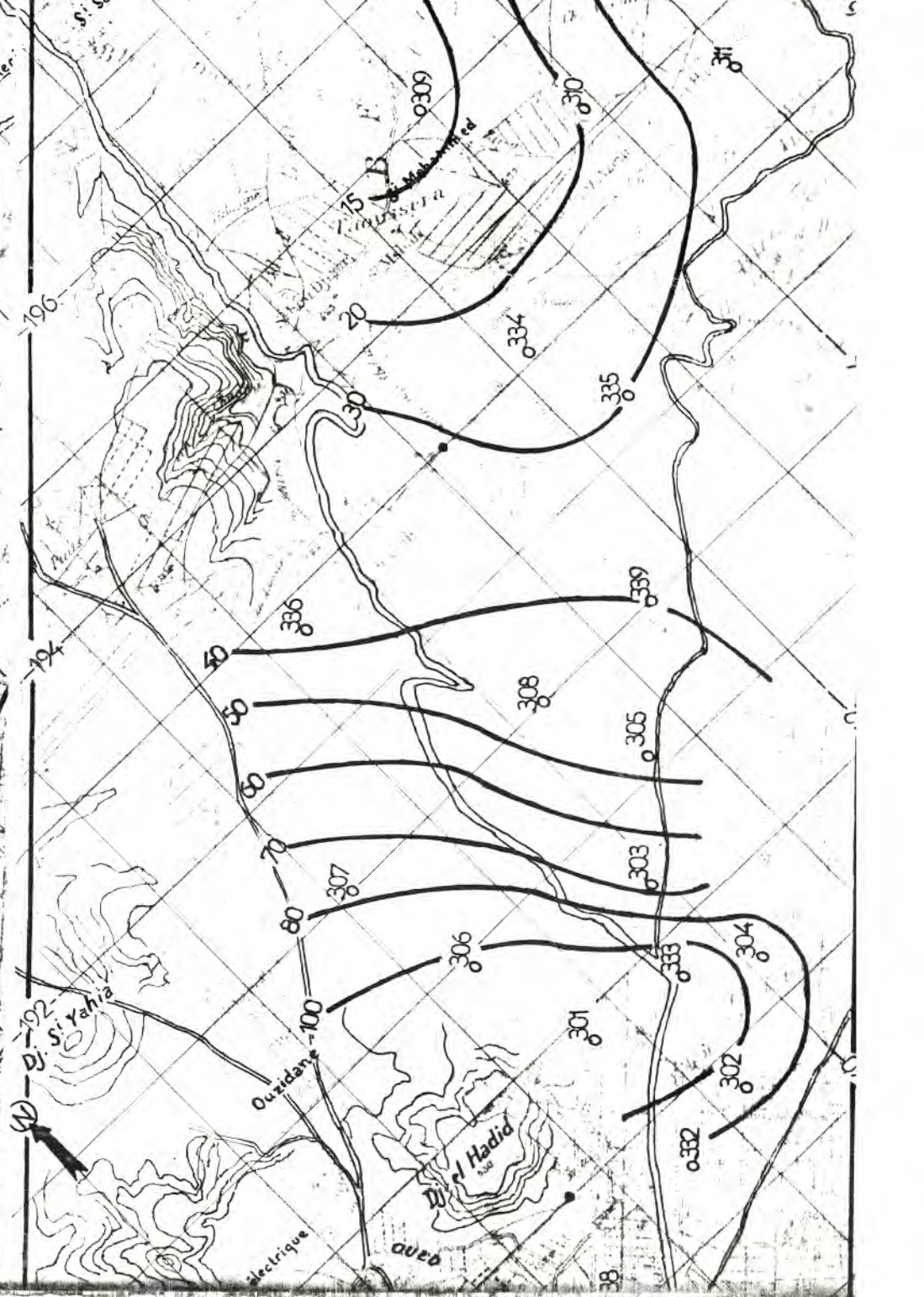
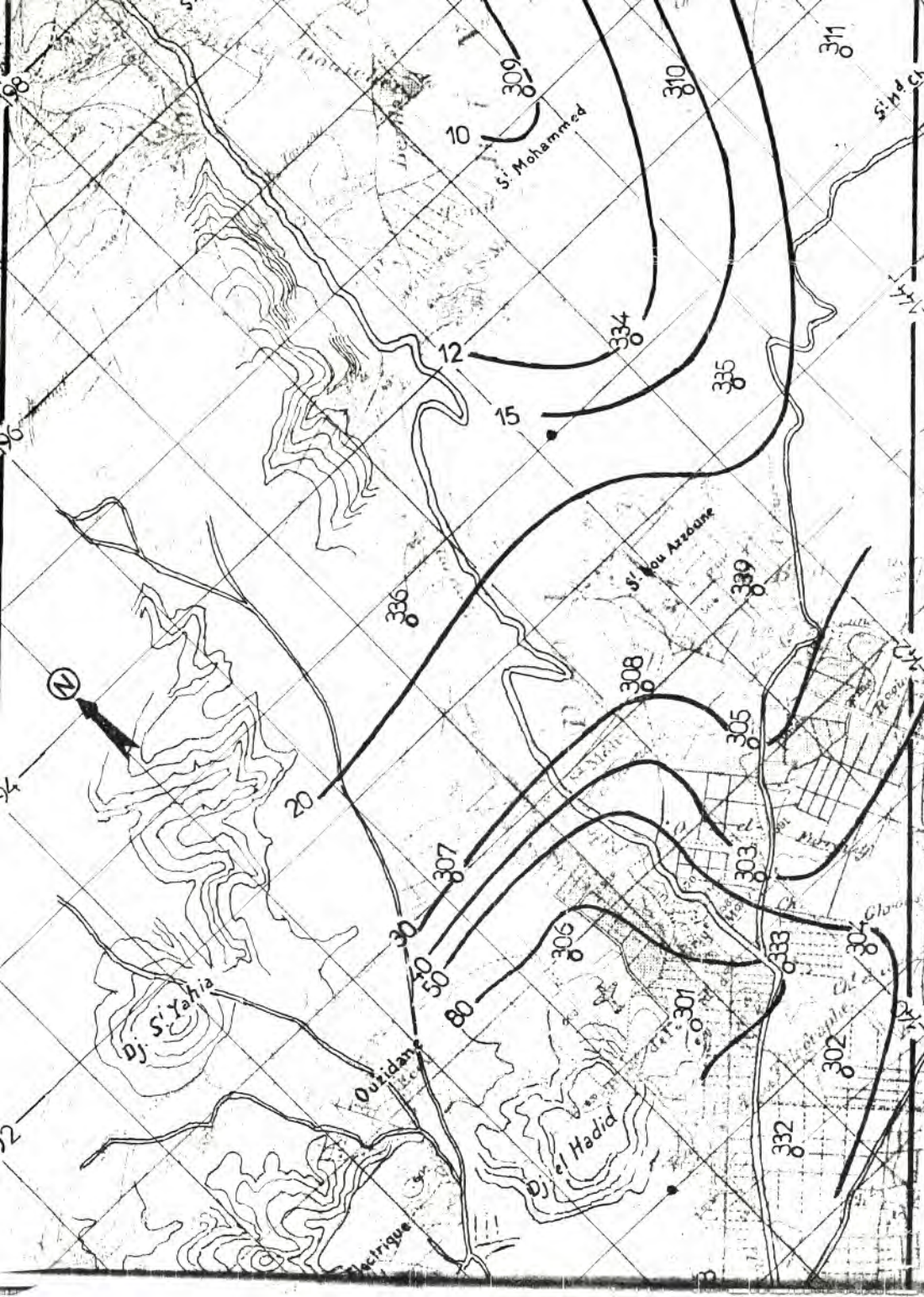
E C H E L L E



AB=3000

LEGENDE

- 2 • S.E en AB=1000 m et son numéro
- 03 o S.E en AB=3000 m et son numéro
- o — courbe d'équirésistivités et sa valeur en Ohm.m



Le substratum possède des résistivités supérieures à 200 Ohm.m valeurs bien contrastées par rapport à celles des marnes Helvétiques sus-jacentes .Il représente les dolomies et calcaires sans que l'on puisse différencier par leurs résistivités ces deux faciès .

Au Sud et jusqu'au S.E 339 ,ce substratum s'enfonce progressivement pour passer d'une profondeur voisine de 150m aux S.E 40 et 332 , à 350m au S.E 339 .

A partir du S.E 335 ,il accuse une chute brusque qui l'amène jusqu'à la fin du profil vers le Nord à une profondeur de 500 à 600m . La cause semble en être la faille de près de 150m de rejet qui a d'ailleurs été mise en relief sur la coupe en AB correspondante .

b ) Coupe 3b :(Fig.33) le long d'un profil Ouest-Est .

Une succession identique des résistivités apparaît ici , le mur des formations résistantes représentées par des dolomies s'enfonçant jusqu'à 200m .

Ces dolomies sont surmontées aux S.E 8 et 40 d'un terrain de résistivité intermédiaire comprise entre 33 et 60 Ohm.m : il pourrait s'agir des marno-calcaires Jurassiques qui affleurent non loin au Djebel-el-Hadid et au Djebel Oum-el-Allou .

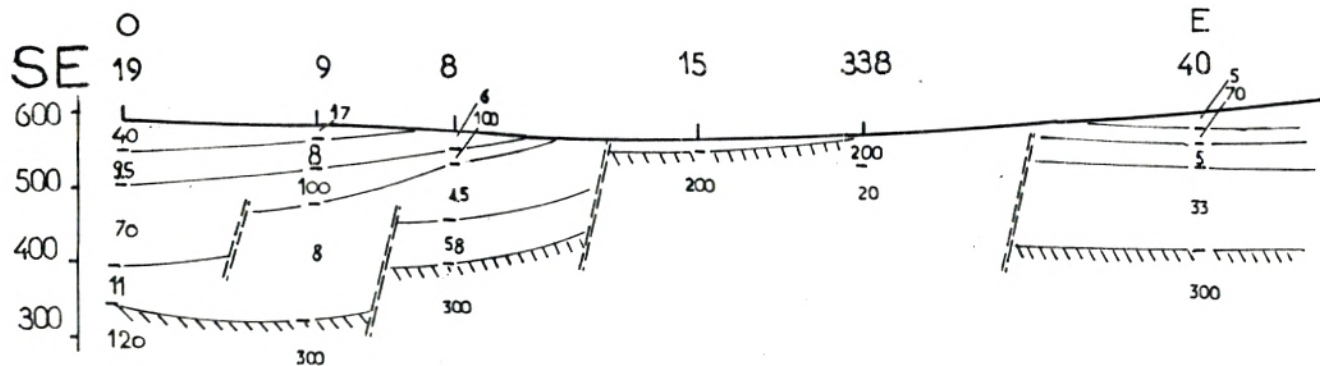
Le trait essentiel de cette coupe reste le relèvement substantiel des formations très résistantes et épaisses entre les S.E 15 et 338 relèvement qui semble se prolonger suivant une direction NNE-SSO comme nous le verrons plus loin.

c ) Coupe 4b :(Fig.33) le long d'un profil orienté sensiblement Nord - Sud .

Les formations conductrices à moyennement résistantes occupent la majeure partie de la coupe .De la valeur 6 Ohm.m à 100 Ohm.m elles représentent les terrains du Tertiaire comportant principalement des marnes ou des grès plus ou moins intercalés de marnes .

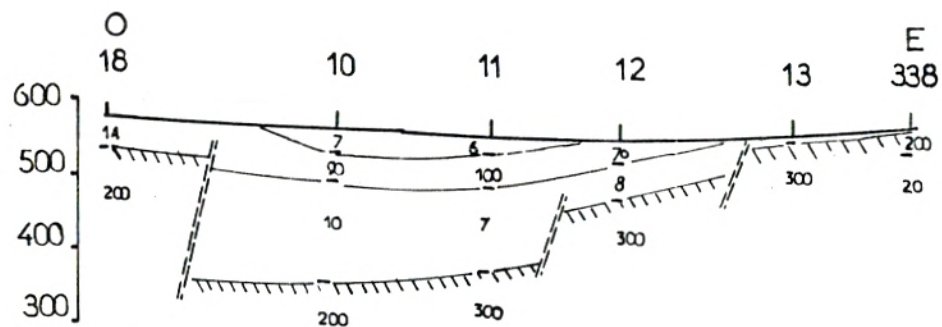
FIG. 33

# Coupes géoélectriques



COUPE 3b

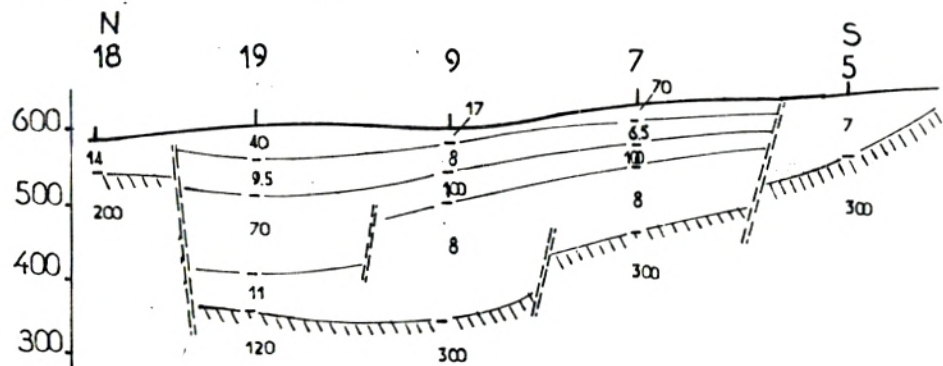
ECHELLE : 1 / 25 000



COUPE  $\alpha$

LEGENDE :

- $\bar{\rho}$  résistivité vraie de formation
- limite de formation
- ▨ substratum résistant
- - - faille supposée



L 'horizon résistant de résistivité supérieure à 120 Ohm.m représente le substratum Jurassique calcaréo-dolomitique .En général la résistivité est bien supérieure à cette valeur.Les faibles résultats observés ici pouvant laisser penser à un substratum faisant l'objet de fractures .

Les caractères structuraux déjà mis en évidence sur les coupes en AB (fig.24 à 26) se retrouvent encore ici :les profondeurs du substratum varient de 250m à l'aplomb du S.E 9 à moins de 50m au S.E 18 indiquant qu'il est le siège de failles de fort rejet .

Comme probablement entre les S.E 18 et 19 où la dénivellée est de l'ordre de 200m .

Les terrains conducteurs de l'ordre de 8 Ohm.m correspondent à des marnes qui sont plus épaisses au S.E 9 .Elles sont surmontées d'une formation plus résistante que l'on retrouvera sur toutes les coupes de l'ordre de 50 à 100 Ohm.m ,ces résistivités étant attribuées à des grès intercalés de marnes .

Ces couches sont également séparées par des failles .

Globalement la coupe du substratum semble présenter une structure en U avec un point bas sous le S.E 9 et deux remontées des terrains résistants :

- vers le Nord ,jusqu'aux affleurements Jurassiques au Nord de Négrier

- vers le Sud où ces affleurements se manifestent bien à l'Ouest de Ain Defla .

d ) Coupe  $\alpha$  : (Fig.33) le long d'un profil Ouest-Est .

On observe la même tendance que précédemment :les formations marneuses miocènes abaissées dès le début de la coupe à l'Ouest par une faille importante voient leur épaisseur diminuer vers l'Est en raison de la présence d'une série de failles jusqu'au niveau des S.E 13 et 338 ,où le Jurassique est subaffleurant .

La formation au-dessous ,de résistivité comprise entre 20 et 40 Ohm.m semble être constituée par des marno-calcaires qui représentent la partie intermédiaire des dolomies de Tlemcen .

e ) Coupe  $\beta$  : (Fig.34) le long d'un profil Ouest-Est, qui concerne le groupe de S.E situés à gauche dans la carte de position .  
Le mouvement manifeste est l'approfondissement des formations suivant un pendage vers l'Est. A partir du S.E 41 cet enfoncement est plus fort , des failles entraînant l'horizon de 300 Ohm.m à environ 330m de profondeur .

Au S.E 38 qui présente une particularité étudiée plus loin les marnes de résistivité 7 Ohm.m surmontent l'horizon très résistant situé à 40 m de profondeur .

Vers l'Est le substratum retombe à 250m au S.E 36 , comme le confirme le forage de Ain-el-Hout situé à moins de 500m qui donne une profondeur de 240m .

f ) Coupe 7b : (Fig.34) le long d'un profil Nord-Sud .

La courbe du S.E 23 (fig.35) présente au départ une pente abrupte caractéristique du fait que le sondage est placé sur un affleurement résistant constitué des dolomies et calcaires du Djebel bou Djelida .

Le substratum s'abaisse à 120m aux S.E 24 ; 25 , 29 puis jusqu'à environ 300m au S.E 26 par une série de failles parallèles .

Il garde cette profondeur plus au Sud puisque le forage TL5 dans le prolongement du profil atteint les dolomies à 320m .

g ) Particularités de certaines courbes de S.E .

Comparaison avec des modèles réduits :

Nous venons de voir que la zone d'étude est le siège de nombreux accidents géologiques . Les caractéristiques de certains S.E peuvent fournir d'autres indications sur la structure permettant ainsi de préciser cette observation .

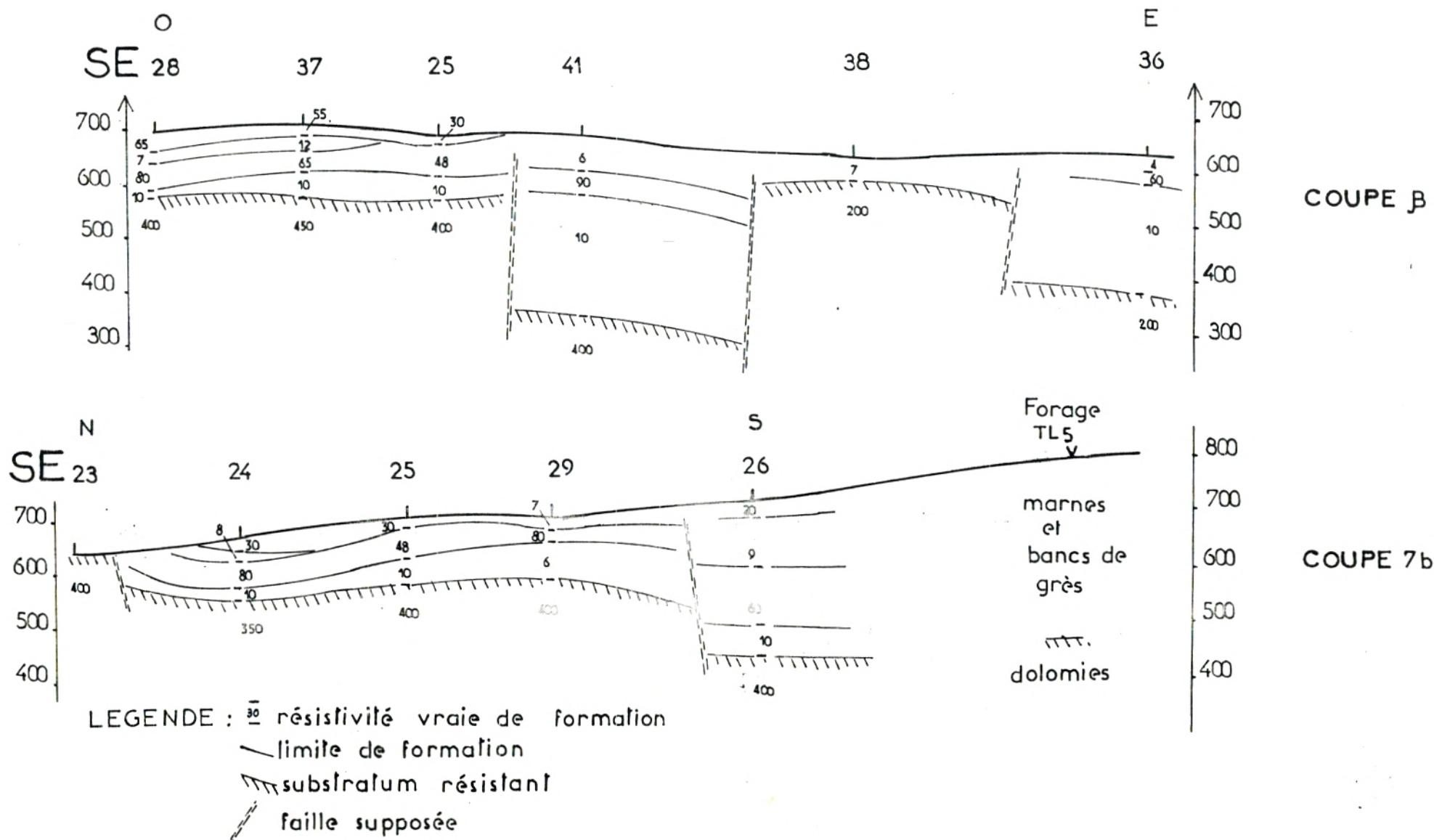
• S.E 39 : (fig.36)

Les points anguleux , de rebroussement observés sur les courbes sont l'indice de la rencontre d'une ligne de courant AB avec une ligne de faille selon les conclusions de Kunetz (1958) d'après des travaux qu'il a effectué sur modèles réduits .

FIG. 34

# Coupes géoélectriques

ECHELLE : 1 / 25 000



Ainsi la ligne du S.E 39 en direction du S.E 12 rencontre les terrains grés-marneux plus conducteurs à l'aplomb de ce dernier (fig.36).

L'électrode A qui rencontre la ligne d'une faille entraîne la présence du point anguleux .Il s'agit probablement du prolongement de la faille qui se manifeste aux S.E 12 et 13 (coupe  $\alpha$ ) accident de direction NNE-SSO .

• SE 18 : (fig.36)

Un raisonnement identique peut être effectué : les formations résistantes profondes d'une trentaine de mètres sont surélevées par rapport à celles du S.E 19 ,où elles se trouvent à environ 250m par le jeu d'une faille les mettant en contact avec des résistivités plus faibles (coupe 4b) .

Le point de rebroussement se situe à la demi-longueur de ligne AB/2 = 300m qui doit en principe représenter la distance à la ligne de faille (fig.36) .

• S.E 5 : (fig.35)

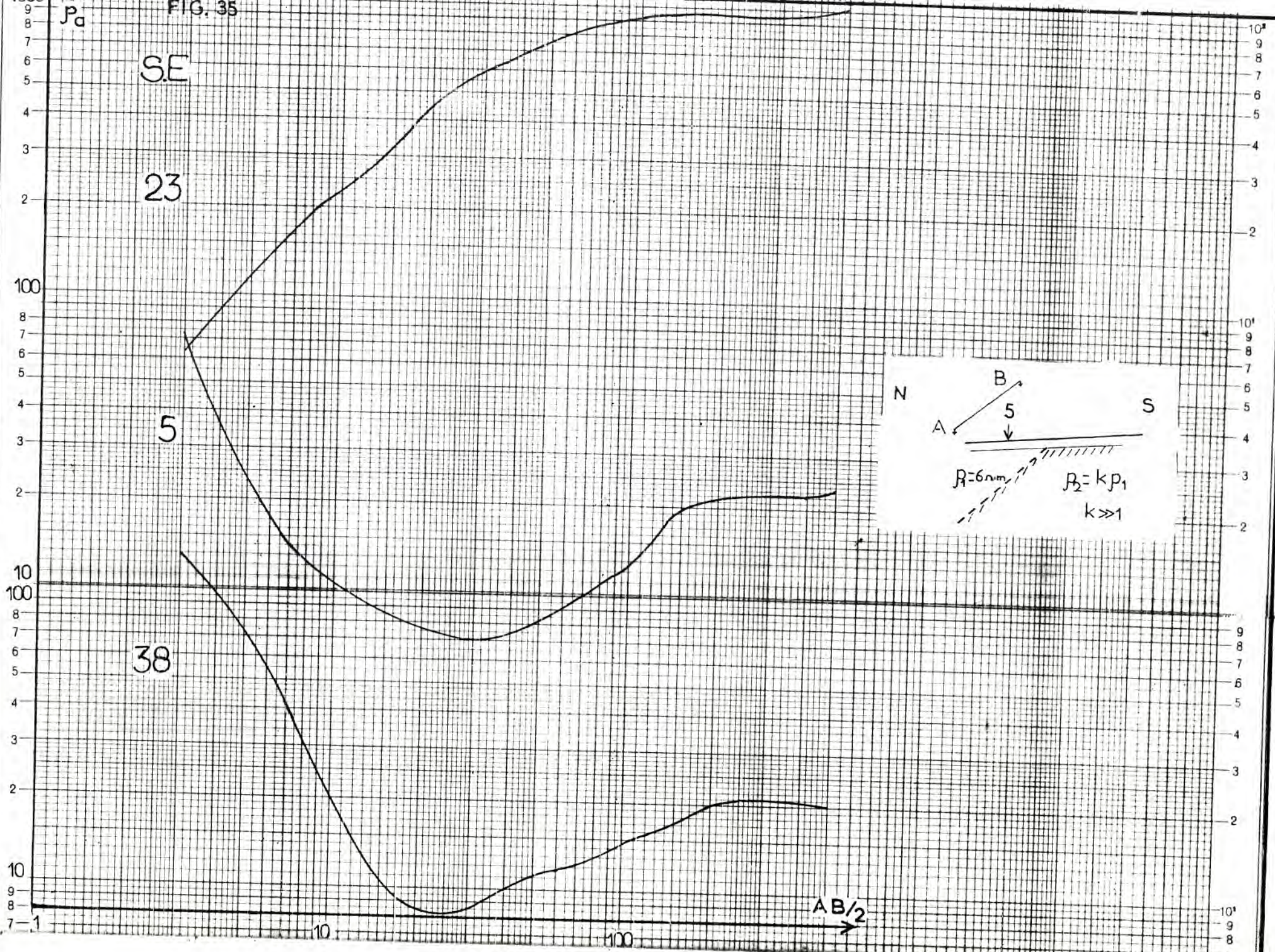
La forme régulière de la courbe incite à admettre une succession de couches dont la plus profonde de résistivité 22 Ohm.m aurait son mur à au moins 500m ; ce qui entrainerait un substratum à partir de cette profondeur : or ceci est incompatible avec les valeurs données par les S.E voisins .

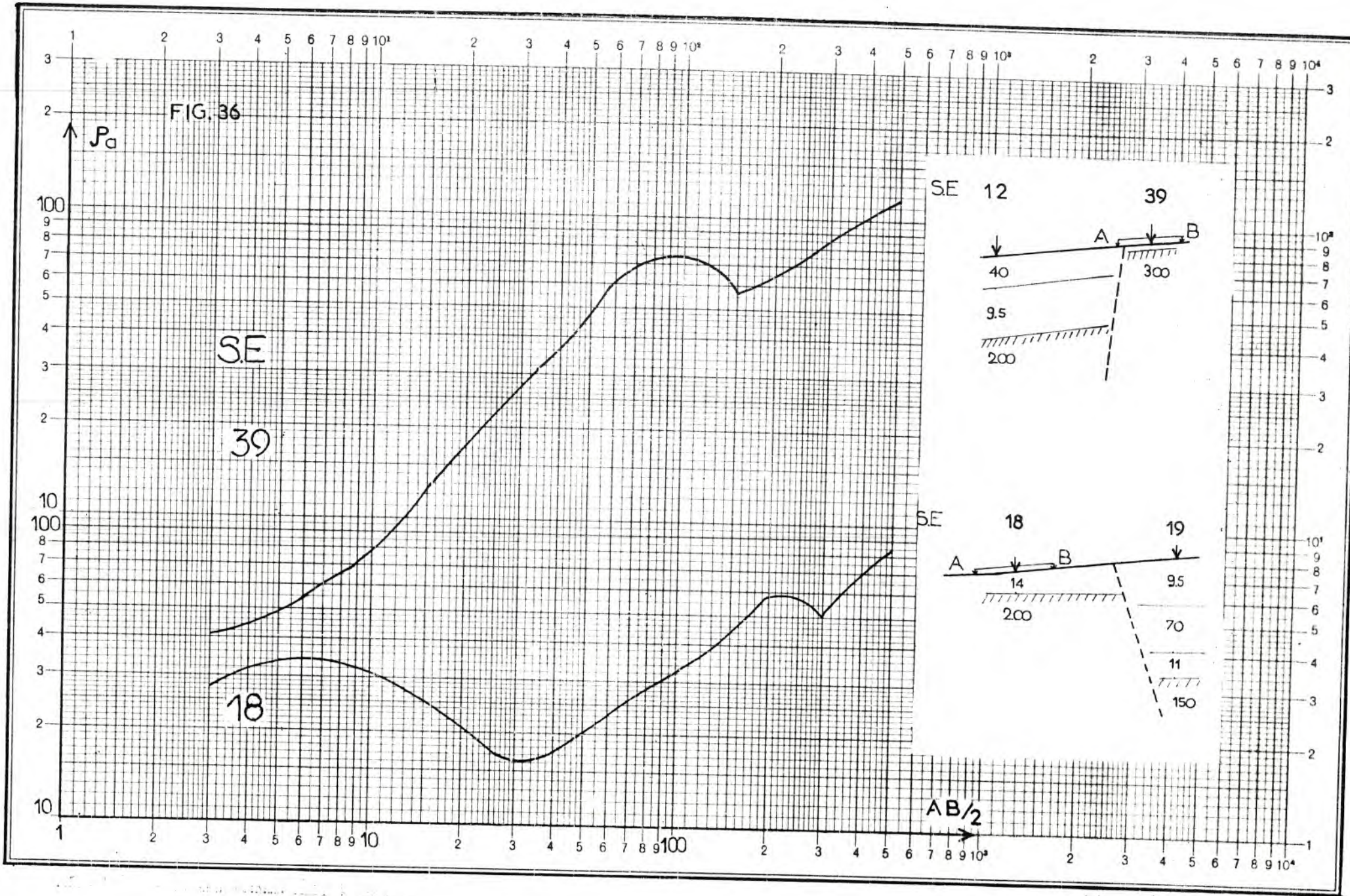
En fait une observation sur la descente abrupte de la courbe pour les petites valeurs de longueur de ligne AB incite à supposer plutôt un modèle en couche inclinée .

D'après le modèle de Kunetz ,ce S.E dont l'élongation est dirigée N 70° E , c'est à dire dans le sens de la structure générale, est probablement parallèle à une ligne de faille : dans ce cas la résistivité du terrain juxtaposé est en réalité plusieurs fois supérieure à la résistivité maximale donnée par l'asymptote de la courbe de S.E (fig.35) .



FIG. 35





Ceci amène donc à supposer un relèvement du substratum au Sud immédiat du S.E 5 ,avant son effondrement aux S.E 3 et 1 plus au Sud.

• S.E 38 : (fig.35)

Vu la forme régulière de la courbe ,il est tentant comme dans le S.E précédent, de l'attribuer à des couches tabulaires horizontales et un substratum extrêmement profond : en effet la remontée finale n'atteint pas 20 Ohm.m indiquant une profondeur d'au moins 600 ou 700m valeurs trop élevées par à celles mesurées alentours .

Par un raisonnement identique au précédent ,il est possible d'envisager que l'élongation du S.E est parallèle à une faille ,ce qui remonterait considérablement le substratum .

γ ) Conclusions :

Une carte des profondeurs du substratum a été tracée (Fig.37) qui synthétise nos différents résultats . Sa lecture appelle les observations suivantes :

■ Zone A :

Si l'on considère les S.E disposés suivant une direction NNE-SSO à savoir suivant le groupe des S.E 13 , 15, 338 et se prolongeant jusqu'au S.E 39 , il est intéressant de noter la présence d'un substratum peu profond .

A ce compartiment surélevé de direction NNE-SSO et où la profondeur du substratum ne dépasse pas 30m , est juxtaposé un autre compartiment de même direction réunissant les S.E 6 , 7 puis les S.E 8 , 11 où le substratum est respectivement à environ 150m et 180m

Un troisième compartiment leur succède suivant le groupe des S.E 9 , 10 et 19 où l'abaissement du substratum est le plus grand : 200 à 250m .

α-2) Coupes en AB : (Fig.24 à 26)

C'est une présentation des résultats moins usitée en général que les cartes en AB précédentes et qui cependant dans cette étude va nous donner des informations remarquables sur la structure géologique.

a ) Coupe 1 : (Fig.24a) cette coupe a le mérite d'englober les deux types de structures correspondant aux deux zones distinctes A et B déjà ébauchées sur les cartes en AB . Deux secteurs sont mis en évidence :

• un secteur accidenté : à gauche du S.E 335

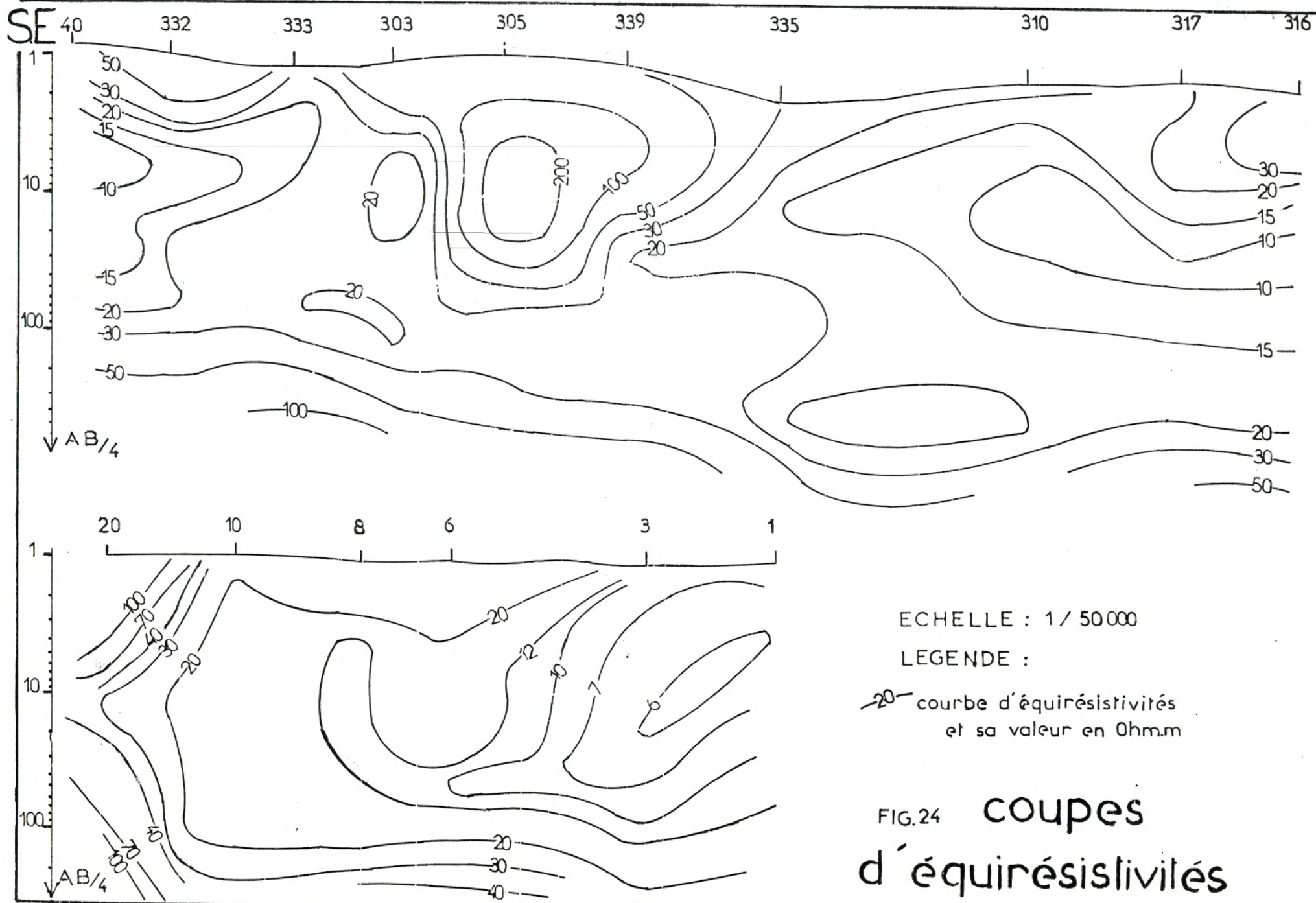
Les courbes d'équirésistivités à la verticale entre les S.E 303 et 305 montrent sans ambiguïté un secteur où sont en contact des formations de résistivités de l'ordre de 15 Ohm.m d'une part et de l'ordre de 200 Ohm.m d'autre part , séparées par des lignes à la verticale : ceci caractérise une faille normale affectant sur une grande épaisseur les couches intermédiaires surmontant le substratum résistant .

Ces couches intermédiaires comportent un autre accident moins important entre les S.E 339 et 335 . Les courbes ont cette fois un pendage vers la gauche suivant un mouvement d'envoyage des terrains conducteurs sous les terrains résistants moyennement profonds à l'aplomb du S.E 305 .

Une autre faille dont le pendage a la même direction que la précédente semble se profiler au niveau des terrains de subsurface entre les S.E 316 et 317 .

• un secteur calme : à droite du S.E 335 caractérisé par une allure régulière et uniforme des courbes d'équirésistivités parallèles à la surface et qui suggère des terrains conducteurs empilés horizontalement sur de grandes épaisseurs .

Les couches profondes résistantes présentent également la même morphologie monotone que sur la partie gauche du profil .



Cependant on observe entre les S.E 339 et 335 une dénivellée sensible des lignes profondes ,ceci étant l'indice d'un accident affectant les formations à grandes résistivités ; cette constatation est à relier avec le changement de direction des isolignes de toutes les cartes en AB au niveau des S.E 335-339 dénotant des accidents affectant cette zone .

Quoiqu'il en soit ces couches profondes résistantes s'enfoncent régulièrement vers le Nord avec néanmoins l'esquisse d'une remontée à la fin du profil à l'aplomb du S.E 317 .

b ) Coupe 2 :(Fig.24b)

On constate une physionomie identique des lignes dont les faibles valeurs de résistivités apparentes au centre représentent les terrains conducteurs affectés d'ailleurs d'accidents comme permet de le prévoir la quasi-verticalité des isolignes .

Un accident majeur se manifeste entre les S.E 10 et 20 affectant toute la série y compris le substratum : il met en contact des formations résistantes et des formations conductrices . A droite de la coupe entre les S.E 3 et 6 ,la même constatation peut être faite concernant l'existence d'un ensemble de valeur à 20 Ohm.m ,contigu à des formations de résistivité apparente inférieure à 7 Ohm.m .

Il est à remarquer comme sur la coupe 1 ,la monotonie des isolignes profondes contrastant avec les lignes d'allure plus complexe des couches intermédiaires .

c ) Coupe 3 :(Fig.25)

Les accidents dans les couches inférieures résistantes se dessinent plus nettement dans cette coupe .En effet au S.E 15 on distingue une importante remontée des terrains résistants par un jeu de failles mettant en voisinage des formations très différentes .

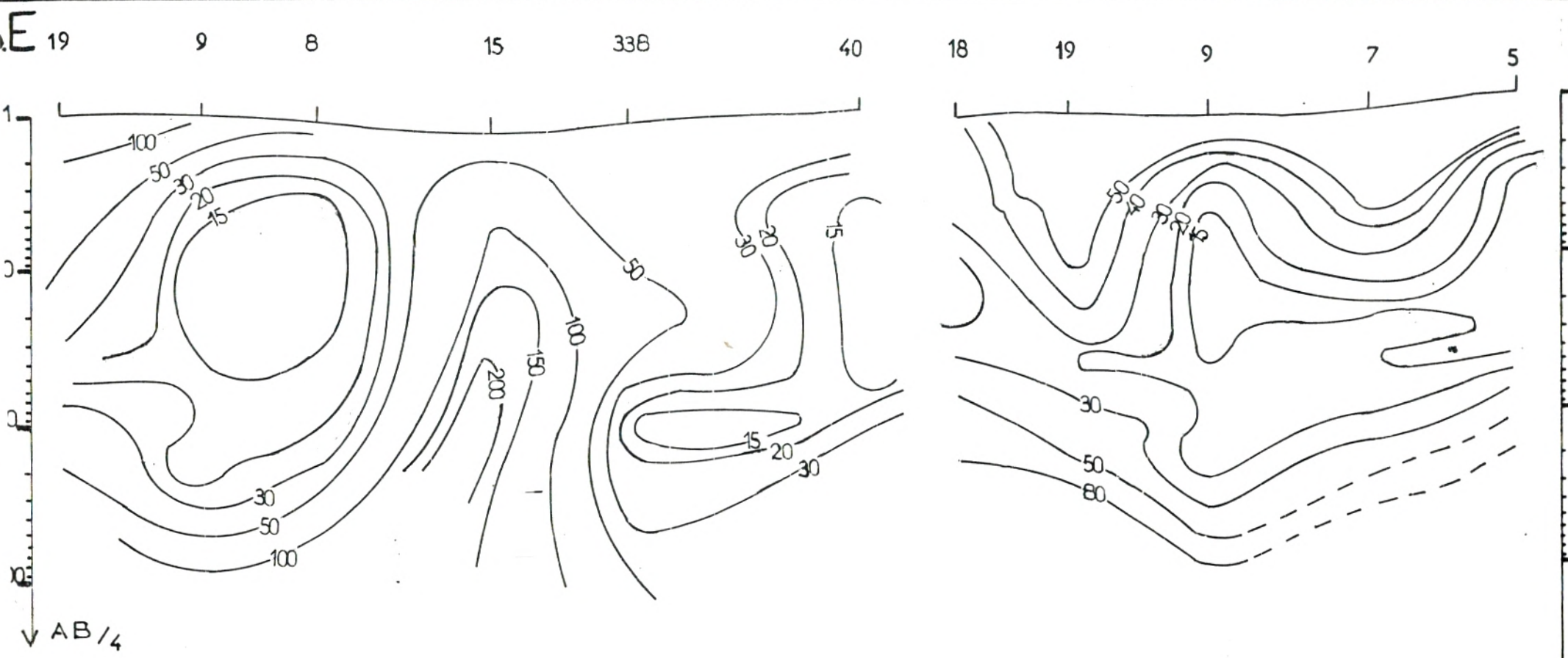
L'inclinaison des lignes entre les S.E 9 et 19 indique le même phénomène pour les couches intermédiaires à profondes .

FIG.25

# coupe d'équirésistivités

ECHELLE : 1/25000

LEGENDE : -50- courbe d'équirésistivités et sa valeur



Ainsi il semble qu'un bloc de terrains conducteurs dans le secteur des S.E 8 et 9 soit en contact à gauche, sur la coupe, avec des formations résistantes et à droite avec un ensemble massif de couches très résistantes .

d ) Coupe 4 :

Les dénivellés dans les couches profondes suggèrent un mouvement ondulé allant jusqu'à la rupture par de petites failles dans le substratum .Ces failles affectent toute la série jusqu'en haut .

La remontée du substratum s'effectue comme dans la coupe 3 ,vers le Sud et le Sud-Est, les affleurements résistants du Djebel Oum-el-Allou donnent à l'ensemble une structure en U .

e ) Coupe 5 :

Le caractère "ondulant" du substratum est bien mis en évidence, ce qui en termes géologiques se traduit probablement mieux par un faisceau de failles peu espacées qui relève et abaisse alternativement le substratum .

Comme précédemment le substratum présente un relèvement net vers le Sud .

f ) Coupes 6 et 7 : (Fig.26) On peut observer les mêmes caractères que précédemment : sur la première coupe le mouvement ample des isolignes de 10 à 30 Ohm.m suggère de grandes épaisseurs des formations intermédiaires essentiellement marneuses qui vers le Nord voient leur résistivité progressivement augmenter ce qui est probablement dû à un changement de faciès .

Entre les S.E 27 et 37 ,un accident est perceptible concernant des terrains à faibles profondeurs .

Un effondrement du substratum apparait nettement dans ce secteur les formations se relevant graduellement par un jeu de failles jusqu'à être subaffleurantes au S.E 23 et poursuivant leur remontée vers le Nord jusqu'aux affleurements des Djebel bou Djlida et Aïn-el-Hout.



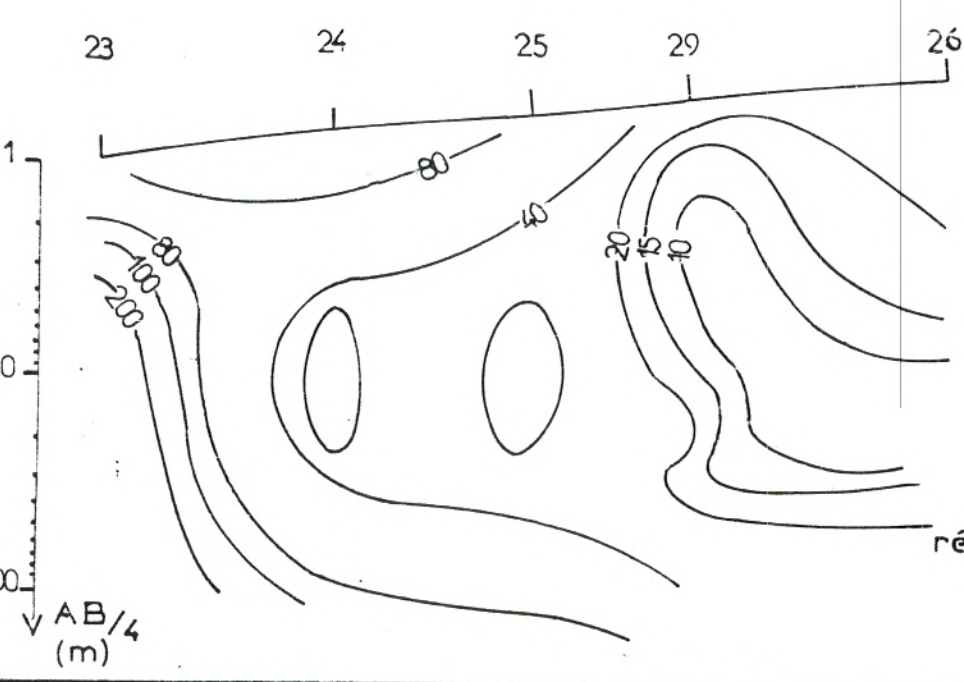
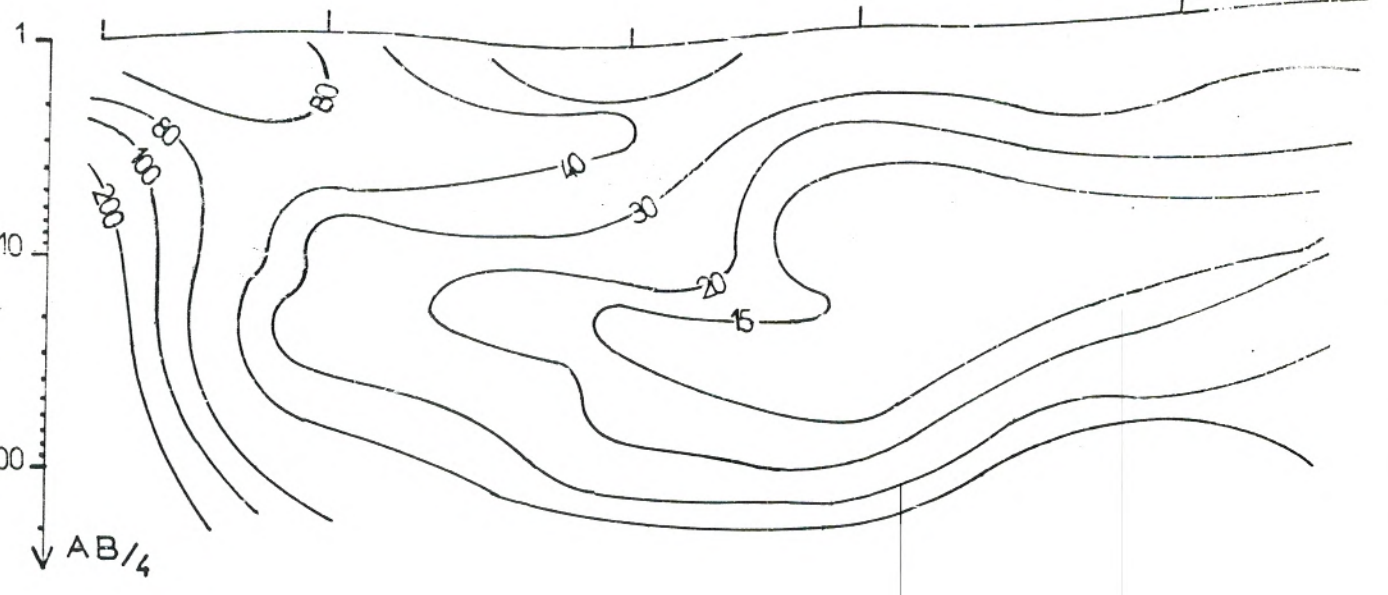
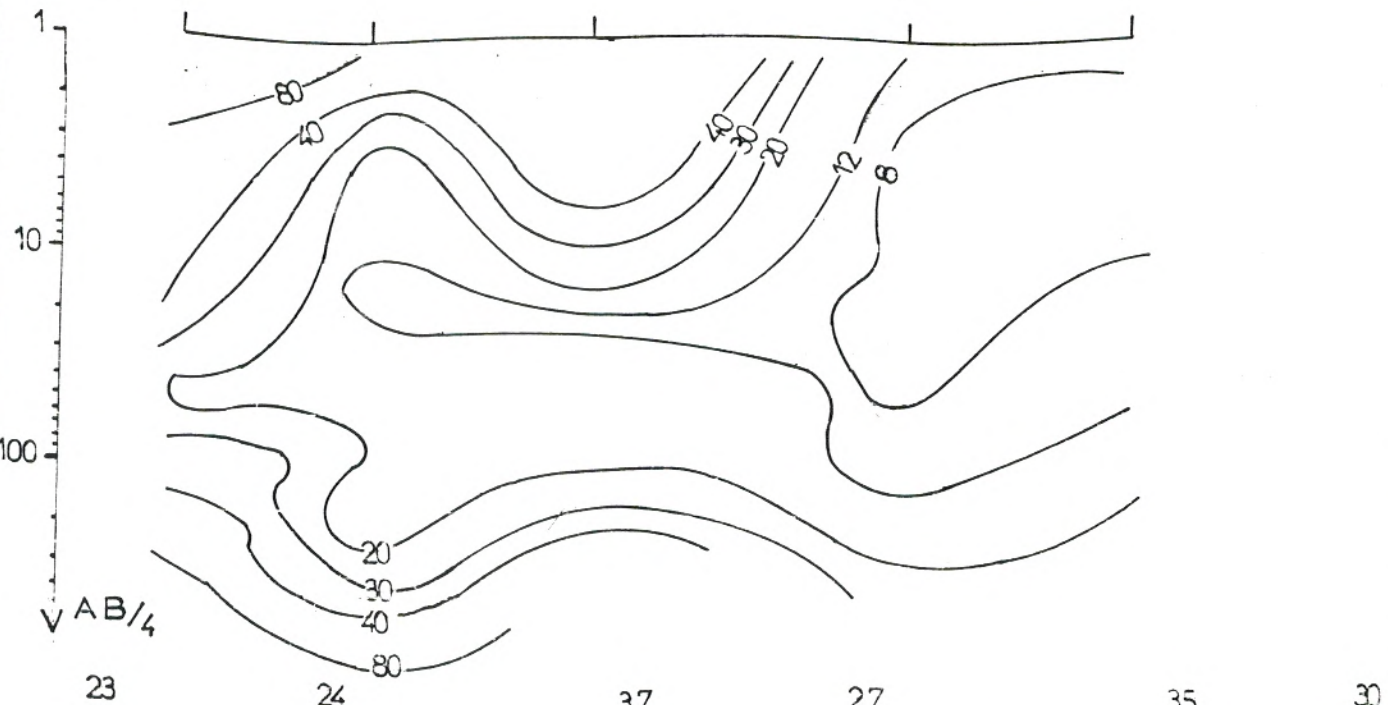
S.E. N° 19

9

7


3

1



ECHELLE : 1 / 25 000

LEGENDE :

 courbe d'équivalivités et sa valeur en Ohm.m

Un accident majeur apparait ainsi entre les S.E 23 et 24 qui relève brusquement les isolignes à l'aplomb du S.E 23 près des affleurements des terrains dolomitiques résistants .

Un mouvement semblable est constaté sur la seconde coupe :une faille entre les S.E 25 et 29 mettant en contact des résistivités sensiblement différentes du moins dans les premiers mètres ;et une seconde plus évidente (vue précédemment) entre les S.E 23 et 24 qui relève fortement le substratum .

### α-3) Echelles des résistivités :

#### a ) sondages sur affleurements :

Lors de la campagne que nous avons effectuée en 1979 ,il n'existait aucun forage sur la zone d'étude qui aurait permis l'exécution d'un sondage étalon .Nous avons alors procédé à :

• un sondage électrique sur un affleurement jurassique au pied du Djebel Oum-el-Allou à l'Est pour estimer les résistivités

- Calcaires et Dolomies du Kimmeridgien :supérieur à 150-200 Ohm.m

- Grès Séquaniens : 45 Ohm.m

• deux autres sondages électriques ont été réalisés assez loin du permis au Nord de Hennaya, près de puits dont les coupes géologiques étaient disponibles

- Marnes Helvétiennes : environ 7 Ohm.m

- Grès Tortoniens : environ 30 Ohm.m

#### b ) Sondages électriques caractéristiques :

Nous avons constaté grâce à l'étude qualitative que sur les S.E en AB=3000m ,les formations géologiques semblent homogènes sur de grandes épaisseurs .En effet l'observation de ces courbes montrent aisement les mêmes terrains bien distincts :

◦ 1<sup>er</sup> terrain R<sub>1</sub> : résistant superficiel d'épaisseur faible ,de résistivité variable allant de 30 à 100 Ohm.m

◦ 2<sup>e</sup> terrain C<sub>2</sub> : conducteur à très conducteur de résistivité variant de 6 à 12 Ohm.m

◦ 3<sup>e</sup> terrain R<sub>3</sub> : moyennement résistant de résistivité variant de 20 à 100 Ohm.m

◦ 4<sup>e</sup> terrain C<sub>4</sub> : très conducteur de résistivité comprise entre 4 et 15 Ohm.m

◦ Substratum RR : très résistant de résistivité supérieure à 120-150 Ohm.m

• S.E en AB = 3000 m : (Fig.27)

Les courbes des S.E 303 ,333 au centre ,et du S.E 327 à l'extrême Nord de l'étude présentent la même forme tant la succession des unités géoélectriques est identique .

Une remarque analogue s'applique aux courbes des S.E 304 et 323 dans les deux secteurs précédents ,avec un quatrième terrain conducteur C<sub>4</sub> qui se matérialise moins bien que dans les S.E précédents du fait de sa faible épaisseur .

En fait la même succession de couches apparait sur la quasi-totalité des courbes en AB = 3000m ,comme le montrent également les S.E 309, 311 ,315 ,334 disposés sur toute la zone.

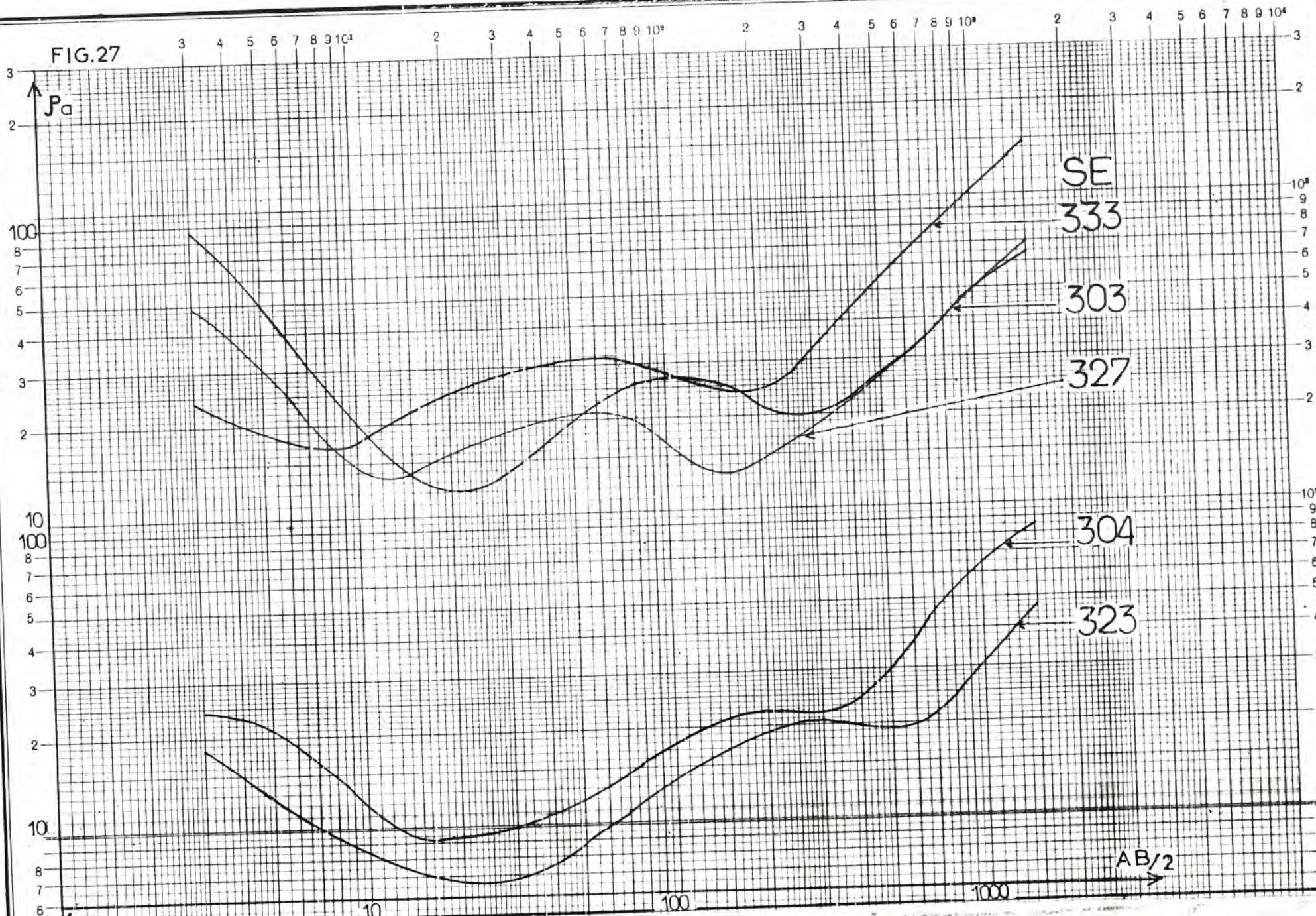
• S.E en AB = 1000 m :

Si l'on considère une échelle des épaisseurs plus réduites ,les S.E en AB = 1000m présentent la même succession R<sub>1</sub> / C<sub>2</sub> / R<sub>3</sub> / C<sub>4</sub> / RR .

Un exemple en est donné par la courbe du S.E 7 : la remontée correspondant au résistant R<sub>3</sub> n'est pas aussi franche que dans les S.E en AB = 3000m ,ceci étant probablement dû à la plus faible épaisseur de cette couche .

Le même phénomène se manifeste pour la couche C<sub>4</sub> dont la descente est atténuée pour la même raison ,ce qui à la limite pour des terrains encore moins épais fait qu'il seront totalement masqués comme nous l'avons déjà noté dans le paragraphe sur le " principe de suppression " (cf., chap.I-C.1) .

FIG.27



C'est le cas également du S.E 40 (fig.12) : la descente due à la présence de la quatrième couche conductrice C4 s'estompe, de même d'ailleurs que la remontée, causée par la couche sus-jacente R3 .

Néanmoins, nous sommes obligés d'admettre l'existence de couches dont l'effet sur les courbes de S.E se manifeste difficilement, pour faire respecter une règle de continuité des formations pour des mesures voisines .

Ce modèle s'affirme quand on observe les courbes des S.E 8 et 9 (fig.11 et 28) où toutes les couches sus-mentionnées se représentent sans équivoque .Cependant il n'est pas exhaustif .

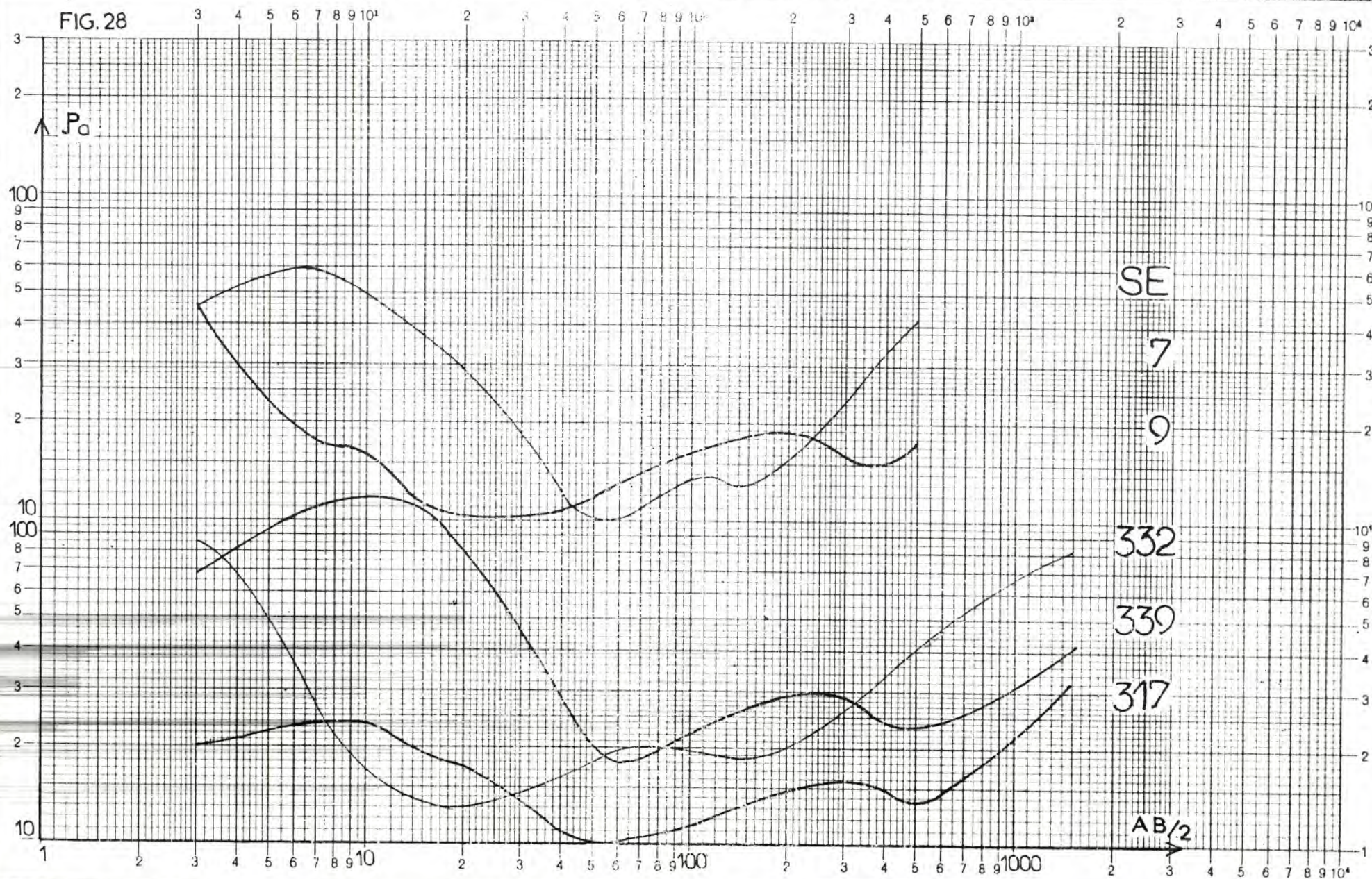
En effet d'autres formations peuvent faire leur apparition: reprenons l'exemple du S.E 40 où une couche moyennement résistante R5 s'intercale entre la couche conductrice C4 et le substratum résistant RR .

A ce stade de l'analyse, il est possible d'établir la correspondance entre les couches mises en évidence sur les S.E et celles données par les informations géologiques et les logs de forage .

Un schéma (fig.29) esquisse cette relation qui est développée sur le tableau suivant :

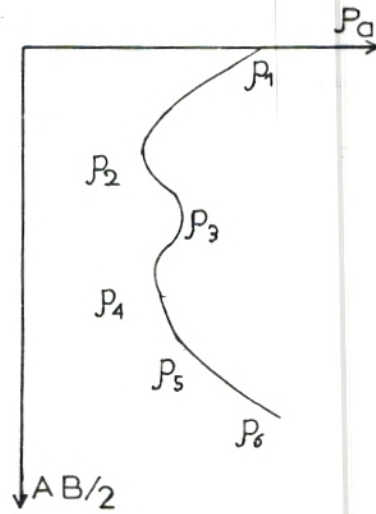
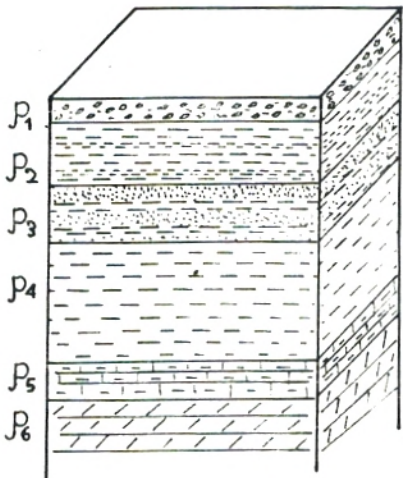
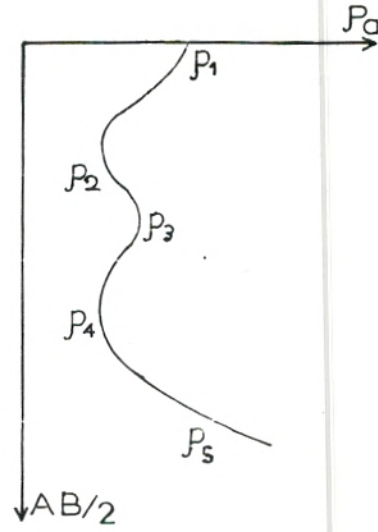
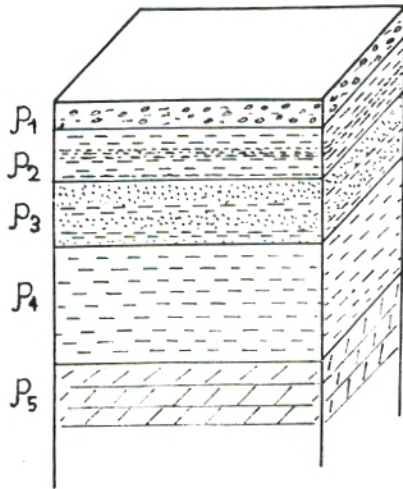
Echelle de Résistivités	Caractéristiques lithologiques
4 - 15 Ohm.m	marnes grises et vertes avec de petits bancs gréseux
30 - 100	grès jaunes, tendres, argileux
20 - 70	conglomérats alternances de depots caillouteux cimentés d'argiles, marnes
30 - 60	marno-calcaires
> 120	calcaires et dolomies




FIG. 28



# Corrélation Résistivités - Faciès géologiques

FIG.29



 terrain superficiel  
 marnes et argile  
 grès  
 ou marnes et grès

 marnes  
 marno-calcaires  
 calcaires, dolomies

c) Diagraphies : (Fig.30)

La majorité des forages exécutés l'ont été près des affleurements calcaréo-dolomitiques au Sud 'immédiat' de Tlemcen , au Nord-Ouest vers Hennaya et à l'Est de la plaine en longeant la route menant à Sidi Abdelli .

Deux forages situés au centre OU1 et F2 (Saf-saf) s'enfoncent au bout de 30m dans le Jurassique , alors que le forage TL5 à proximité immédiate de Tlemcen indique 300m de recouvrement Tertiaire .

Le seul forage Zeddiga 1b , où ont été effectuées des diagraphies est situé près des affleurements Jurassiques à l'Est de l'étude .

Sa coupe montre des calcaires et dolomies à partir de la surface (Fig.30) .

L'analyse des diagraphies indique :

- les Logs Normales montrent jusqu'à 75m environ des résistivités apparentes (10 à 30 Ohm.m) trop faibles pour des résistivités vraies de calcaires compacts .

Ceci est caractéristique du signal donné par des formations constituées de bancs peu épais (de l'ordre ou inférieur à l'espacement  $AM=64''=1.6m$  ) intercalés dans notre cas de marno-calcaires karstifiés de résistivité plus basse .

Certains bancs sont même invisibles aux sondes Normales .

- l'intérêt de la sonde Latérale est d'indiquer ces bancs ceci se matérialise entre 0 et 75m par de nombreux pics significatifs .

- à 50, 60, 69m : la formation résistante sur les Normales est plus épaisse que plus haut mais reste de résistivité très inférieure à la résistivité vraie .

Cette formation se retrouve sur le Log Latérale avec une translation vers le bas du pic résistant (caractéristique de cette sonde)

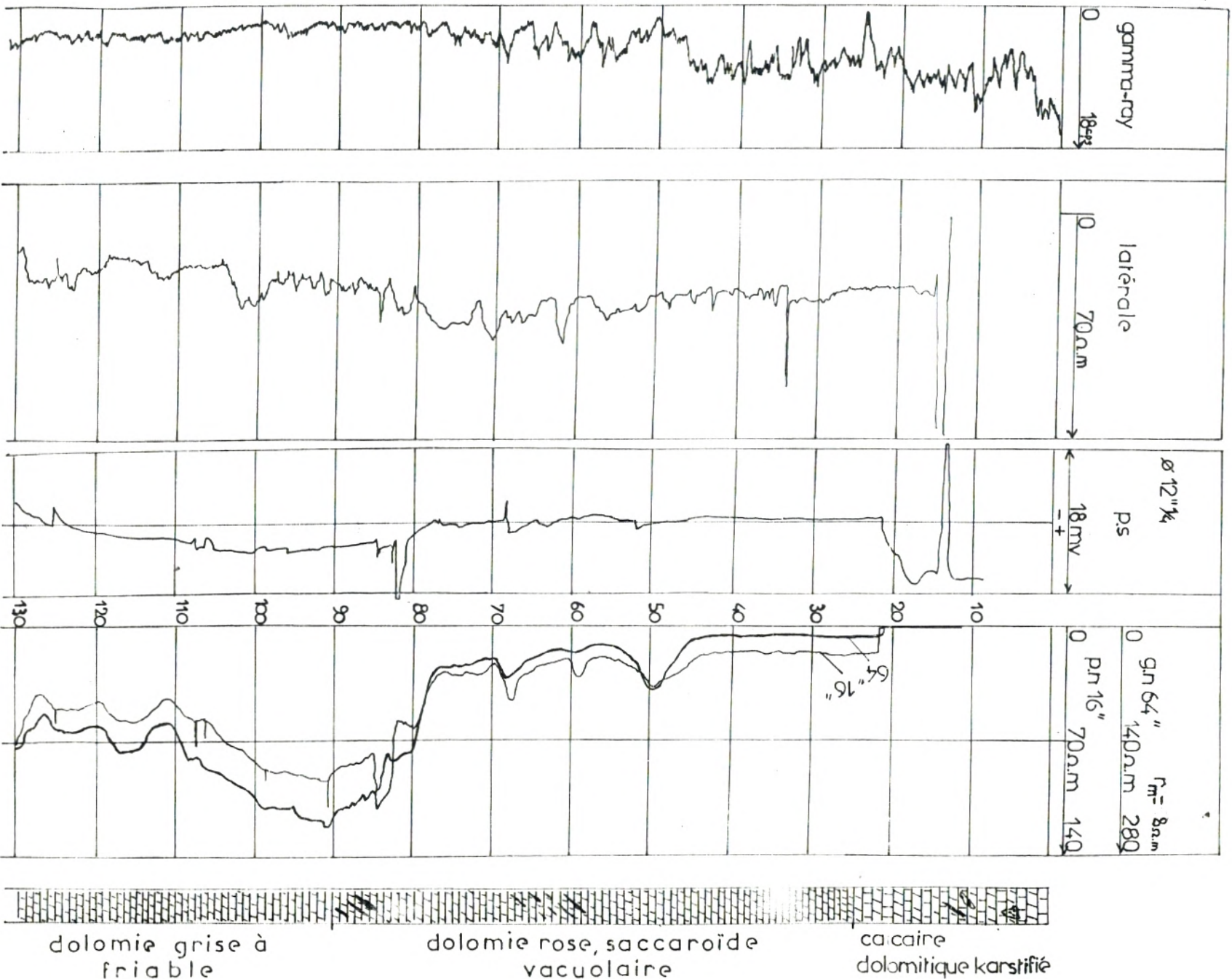
- à partir de 80m : les formations résistantes sont plus épaisses et la Grande Normale donne une résistivité apparente 220 Ohm.m plus proche de la résistivité vraie .



FIG.30

DIAGRAPHIES

ZEDIGGA 1b X = 145,600  
Y = 192,450



A noter que ces formations correspondent à des signaux  $\gamma$ -rays plus faibles .

Si l'on utilise la courbe d'écart de la sonde Normale ,on peut évaluer la résistivité vraie de ces formations à partir de :

d : diamètre du trou 12"1/4

rm: résistivité de la boue 8 Ohm.m

$\rho_a$ : résistivité apparente lue 220 Ohm.m

Ceci donne une résistivité vraie de 160 Ohm.m qui semble être une valeur minimale pour les calcaires et dolomies.

#### $\alpha$ -4) Corrélation :

En considérant la distribution des unités résistantes et conductrices ,qui s'est imposée pour modèle et la succession des formations telle que donnée par les informations géologiques ,il est possible d'établir une corrélation en s'aidant des correspondances du tableau précédent .

Cependant une ambiguïté subsiste découlant de la force et faiblesse de la méthode de résistivités :en effet la marge comprise entre 30 et 60 Ohm.m par exemple ,représente non seulement les grès ,mais encore les conglomérats ,ou même les marno- calcaires .

En outre une même formation peut avoir des résistivités variant à l'intérieur d'une large marge en fonction des conditions locales .

Enfin les résistivités apparentes lues sur les courbes de S.E et correspondant à certaines unités ,peuvent aussi largement varier et introduire une incertitude pour l'identification de ces dernières .

Un exemple pour illustrer cet aspect est donné par les courbes des S.E suivants :

• S.E 323 ,327 :(fig.27)

La courbe du premier S.E montre que le terrain situé en troisième position à partir du sol est plus résistant que ne le montre la seconde courbe : ceci vient certainement du fait que le terrain marneux sous-jacent est manifestement moins conducteur ou moins épais sur le premier S.E que sur le second .

Le même infléchissement de la résistivité du troisième terrain est constaté sur le S.E 315 il est dû à l'épaisseur considérable de la formation marneuse faisant pallier à 10 Ohm.m .

• S.E 309 ,334 :(fig.31)

L'observation de ces courbes contribue à mieux lever l'incertitude. De droite à gauche sur ces courbes :

- la dernière couche très épaisse au-dessus du substratum se manifeste par des résistivités apparentes de l'ordre de 9 Ohm.m c'est à dire par des résistivités vraies bien inférieures attribuées sans équivoque aux marnes Helvétiques .

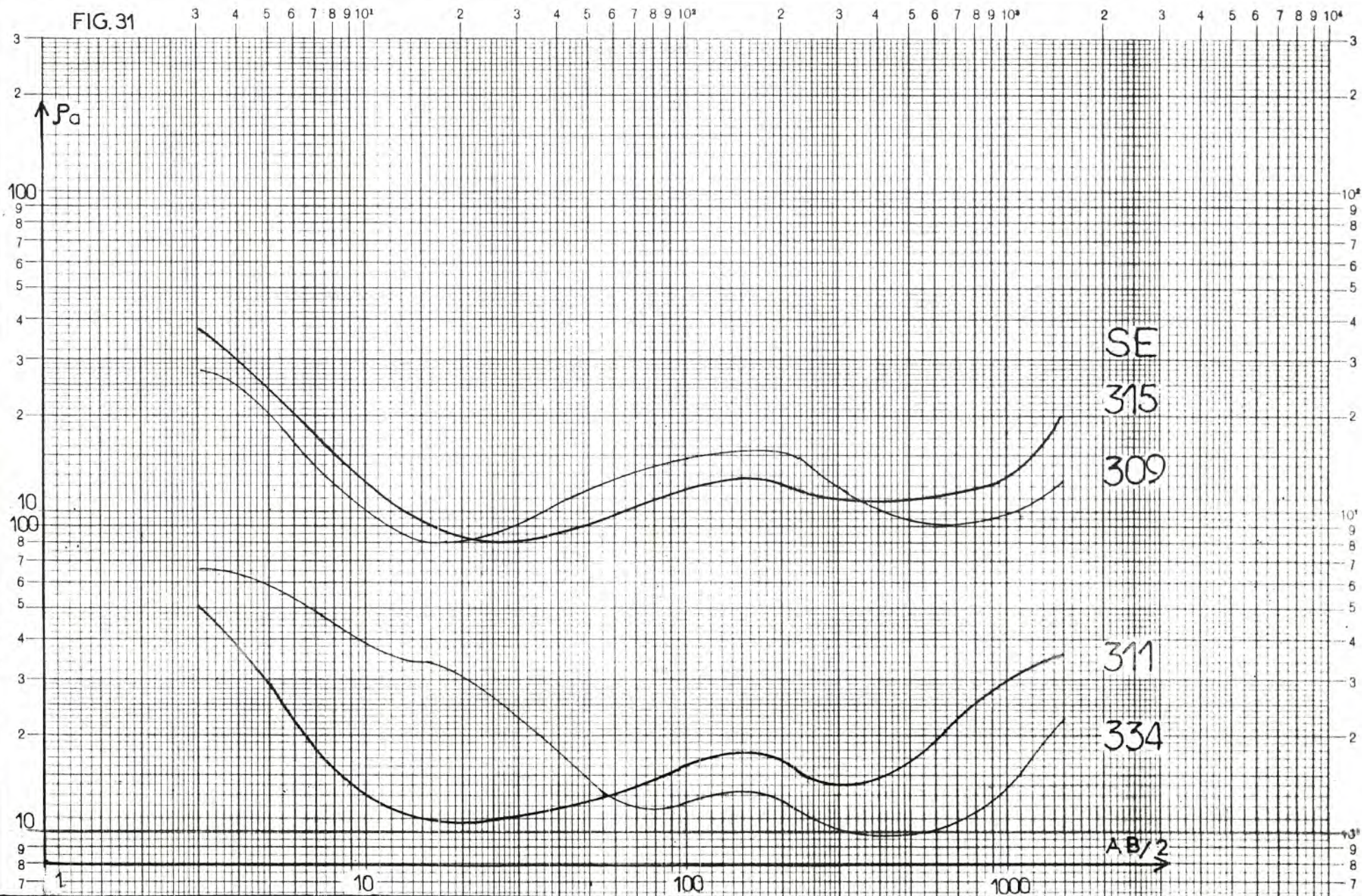
- la couche la surmontant est peut-être constituée, vu sa résistivité ,soit par des grès Tortoniens ,soit par les conglomérats Cénozoïques des Hauts-Plateaux .En raison de leur grande épaisseur il est probable qu'il puisse s'agir plutôt de la première formation qui semble bien se développer à proximité des reliefs Jurassiques .Une autre hypothèse impliquerait des marnes plus compactes ou avec de plus fréquentes intercalations de grès .

- au-dessus ,la couche à faible résistivités inférieures à 7-8 Ohm.m représente probablement les marnes sableuses et argiles des dépôts alluvionnaires .

- la première formation de résistivité variable représente le terrain superficiel .

Il est évident que le nombre de couches présentes peut être en réalité plus élevé ,ce qui implique une certaine anisotropie. En conséquence l'épaisseur résolue est toujours déterminée ,dans ce cas par excès par rapport à l'épaisseur réelle ,d'un coefficient d'anisotropie  $\lambda$  (cf.chap.I-C.1).

FIG. 31



### β ) Interprétation Quantitative :

A cette étape de l'étude, il est possible par application des programmes précédents de dégager à partir des courbes de S.E les résistivités vraies et épaisseurs des formations. Ces paramètres vont nous permettre à partir de l'échelle précédente de préciser la nature des formations géologiques rencontrées de même que la disposition du schéma structural .

#### β-1) Sondages électriques caractéristiques :

Différentes couches caractérisées par des marges de résistivités plus ou moins distinctes ont été mises en évidence dans les exemples de S.E traités précédemment .

##### • S.E 19 :(Fig.20)

Le traitement effectué sur ce S.E par le programme de calcul "Z" a cet avantage qu'aucune hypothèse préalable sur le nombre de couches ou sur leurs résistivités n'est nécessaire : les résultats semblent donc plus objectifs ,et correspondent d'ailleurs aux marges de valeurs de résistivités obtenues dans la résolution des autres S.E .

Reprenons la succession des résistivités du S.E 19 :

- terrain superficiel de 1 à 3 m : résistivité très variable
- grès : résistivité allant de 20 à 100 Ohm.m
- marnes : résistivité de 4 à 12 Ohm.m
- marno-calcaires : résistivité de 20 à 60 Ohm.m
- dolomies : résistivité supérieure à 150 Ohm.m

##### • S.E 40 :(fig.12)

On observe la même succession que précédemment avec comme couche supplémentaire surmontant le substratum résistant une formation de résistivité de 30 Ohm.m environ attribué aux marno-calcaires .

## (β-2) Coupes géoélectriques :

Nous commençons par la présentation des résultats des S.E situés dans la zone A : tout d'abord ceux groupés au Nord-Est de Tlemcen puis ceux du Nord-Ouest . En second lieu nous analyserons les coupes portant sur la zone B , c'est à dire le long de la route menant à Sidi Abdelli .

Les accidents déterminés entre les compartiments voisins peuvent correspondre à des passages horizontaux de faciès , à des changements brusques du pendage des couches ou le cas échéant à des failles .

Les coupes géoélectriques n° 1b , 3b , etc...reportent aux coupes en AB n° 1 , 3 , etc...vues plus haut .

### a ) Coupe 1b : (Fig.32)

Cette coupe englobe les deux types de structures distinguant les zones A et B .

\* à gauche du S.E 335 : les formations de résistivités vraies les plus basses c'est à dire comprises entre 6 et 20 Ohm.m , s'épaississent progressivement du Sud vers le Nord elles correspondent aux marnes Helvétiques qui atteignent dans ce secteur des puissances de 270m à l'aplomb du S.E 305 .

Cette formation accuse au niveau de ce S.E une résistivité maximale de 20 Ohm.m due vraisemblablement à la présence de nombreux bancs de grès intercalés dans les marnes .

Ces terrains conducteurs sont surmontés par des couches de résistivités allant de 40 Ohm.m à 90 Ohm.m , représentant probablement des grès . Au-dessus les résistivités sont plus faibles environ 6 à 10 Ohm.m valeurs qui doivent caractériser des marnes ou argiles .

L'épaisseur de cet ensemble qui pourrait être attribué au Tortonien ne dépasse pas 70m . Son mur est nettement plus bas au S.E 339 mettant en contact des formations de résistivités différentes par le biais d'un accident , qui a déjà été mis en évidence sur la coupe en AB n° 1

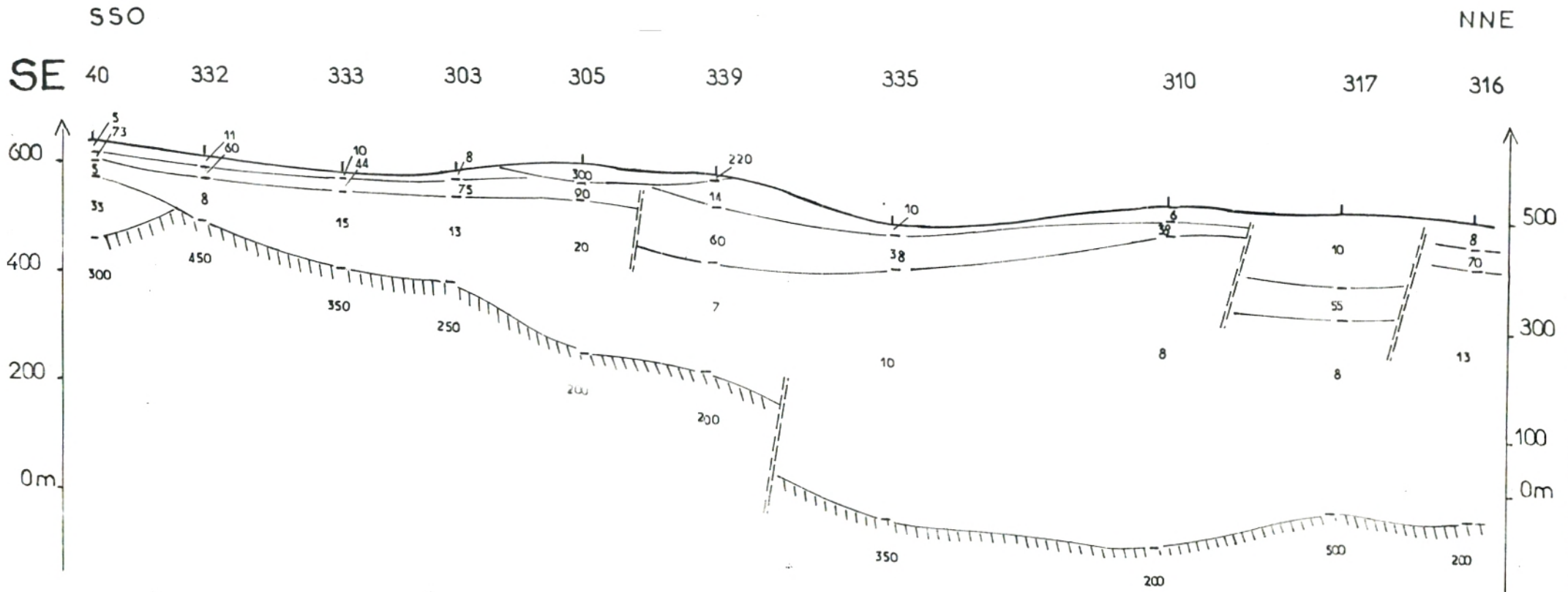
Le même phénomène apparaît à droite du profil où une épaisse série grés-marneuse au S.E 317 se manifeste , encadrée par des failles .

FIG. 32

# Coupe géoélectrique

ECHELLE:

1 / 50 000



LEGENDE :  $\overline{30}$  résistivité vraie de formation

— limite de formation

▨ substratum résistant

--- faille supposée

COUPE 1b







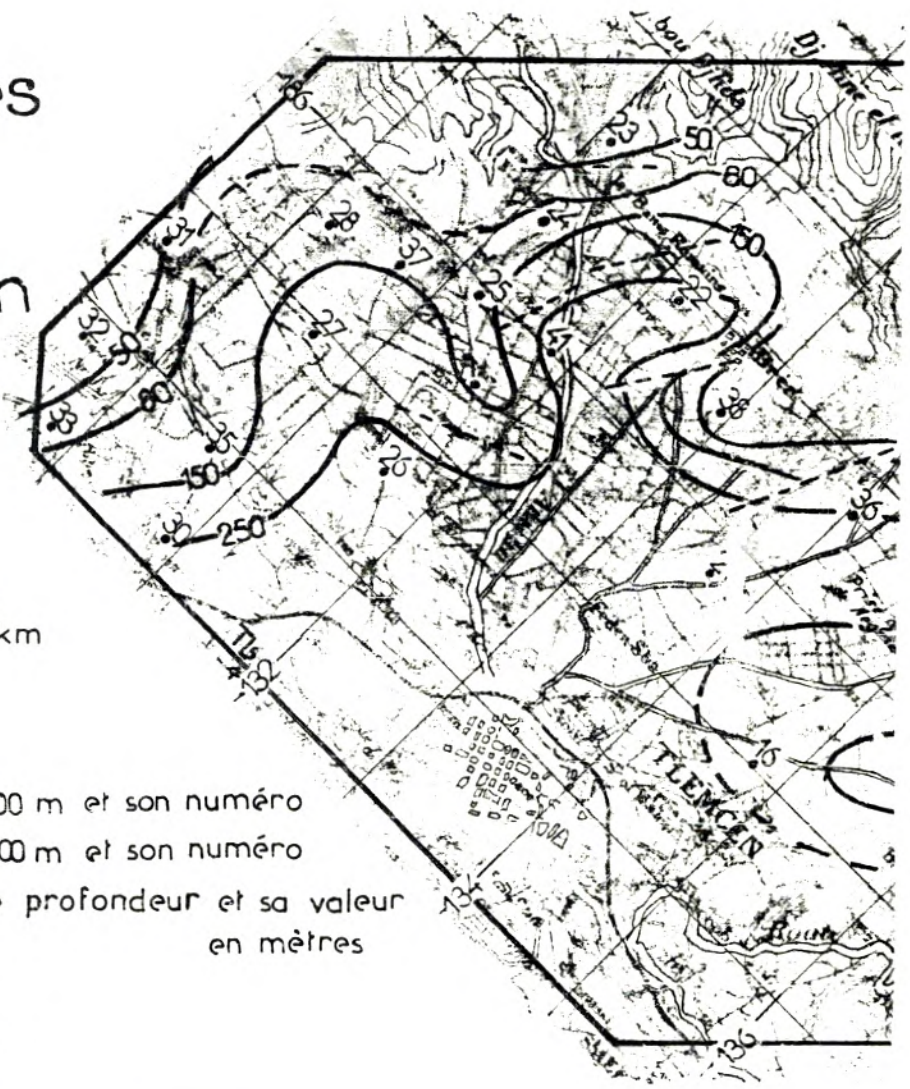
FIG.37

carte  
d'isobathes  
du  
Substratum  
résistant



L E G E N D E

- 12 • S.E en AB=1000 m et son numéro
- 303 ○ S.E en AB=3000 m et son numéro
- 20 — courbe d'égale profondeur et sa valeur en mètres
- — forage
- faille supposée



Le mouvement de remontée s'amorce au Nord du S.E 19 et se continue par un accident majeur qui porte la formation résistante à moins de 40m de profondeur au S.E 18. Cet accident se prolonge vers l'Ouest d'après les indications de la carte géologique .

A noter pour étayer cette constatation que sur la même direction le forage d'Ouzidane OUI donne les dolomies à 30m .

L'ensemble suggère donc un substratum surélevé en forme de dôme allongé de direction NNE-SSO englobant le Djebel el-Hadid .

Le substratum s'affaisse vers le Nord-Ouest et vers le Sud-Est avant de remonter à nouveau .

Pour les S.E situés sur la gauche de la carte , d'Ouest en Est on constate une structure en abaissement-relèvement ponctuée par plusieurs failles parallèles abaissant le substratum dolomitique au centre , près des S.E 22 et 41 , jusqu'à plus de 300m .

Au Sud de ce secteur les isolignes semblent plus régulières à partir des affleurements dolomitiques du Djebel Tefatisset , indiquant un pendage du substratum vers l'Est .

#### ■ Zone B :

Cette zone se distingue bien de la précédente par l'espacement et la régularité des isolignes de profondeurs, comme cela a été constaté sur les cartes d'équirésistivités et les coupes étudiées.

Dans le bas de la zone , le substratum s'abaisse vers le Nord puis à partir d'une ligne constituée par les S.E 336-339, les isolignes changent de direction et montrent un pendage franchement vers l'Ouest qui abaisse le substratum à plus de 800m .

## C) ETUDE des ALLUVIONS de l'OUED

### IN - AMGUEL (Tamanrasset) :

#### Introduction :

La profondeur d'investigation de la méthode électrique est théoriquement illimitée .Il est cependant indéniable que la méthode devient moins précise aux grandes profondeurs ; c'est ce que nous avons vu dans l'étude précédente ,il en est de même en cas de multiplicité des couches .

Le choix des méthodes de traitement adoptés pour cette seconde étude a été réalisé pour éviter au mieux ces deux problèmes .

D'autre part cette étude bénéficie de l'apport de mesures de sismique réfraction ,méthode bien adaptée aux conditions géologiques du secteur pour mieux préciser la profondeur des terrains .

Une importante campagne de forages permettra d'affiner les mesures et de mieux cerner l'extension latérale du réservoir aquifère ,son épaisseur et son volume .

Les paramètres de Dar-Zarrouk utilisée précédemment dans la technique de traitement des courbes de S.E,vont trouver cette fois une application pour tenter d'estimer la réserve en eau de l'aquifère

En raison du très grand nombre de mesures que nous avons effectuées dans cette campagne ,j'ai jugé utile de ne reprendre et retraiter que les données et résultats couvrant approximativement le quart de l'étude initiale ,ce qui représente tout de même des mesures très denses sur un secteur pris le long de l'Oued sur 10km le long pour 0.5km de large .

Cependant dans un souci de continuité, nous présentons ici le cadre et les conditions générales de l'ensemble de l'étude tels qu'ils ont été exposés dans notre rapport intitulé " Prospection géophysique à In-Amguel "(1981).

Les mesures et l'objet de l'interprétation considérés à présent sont matérialisés et limités par les figures qui suivent .

## 1 ) CADRE GEOGRAPHIQUE et GEOLOGIQUE :

### a ) Géographie :

Le site étudié est compris entre 5° 7' et 5°18' Est du Méridien International et entre 23°40' et 23°47' de latitude Nord .

L'extrait de la carte du Sahara au 1/ 200 000 feuille NF 31 XXIV Assekrem montre la situation de l'Oued .(fig.38)

La superficie étudiée couvre une surface de 18.5 km<sup>2</sup> ; ses limites externes dans le système UTM (fuseau 31) sont :

- Ouest X<sub>1</sub> = 718 000
- Est X<sub>2</sub> = 734 500
- Sud Y<sub>1</sub> = 2619 000
- Nord Y<sub>2</sub> = 2631 000

Le climat de la région est de type désertique continental caractérisé par de grandes chaleurs l'été et par un froid sec l'hiver le tout ponctué par des vents de sable .La variation de température entre le jour et la nuit est telle qu'elle entraîne la fracturation des roches de surface .

La pluviométrie de la région est parmi la plus faible du pays .

Des précipitations atmosphériques parfois importantes ont lieu en hiver sur le Mont Assekrem ,situé à environ 100km du secteur étudié et où l'Oued In-Amguel prend naissance .

Une végétation se remarque tout juste dans la vallée de l'Oued .

La population nombreuse est groupée autour d'anciens puits et vit dans des conditions difficiles, pratiquant le jardinage et l'élevage d'où l'importance de découvrir de nouvelles ressources hydrauliques dans cette région déshéritée .

### β ) Contexte géologique :

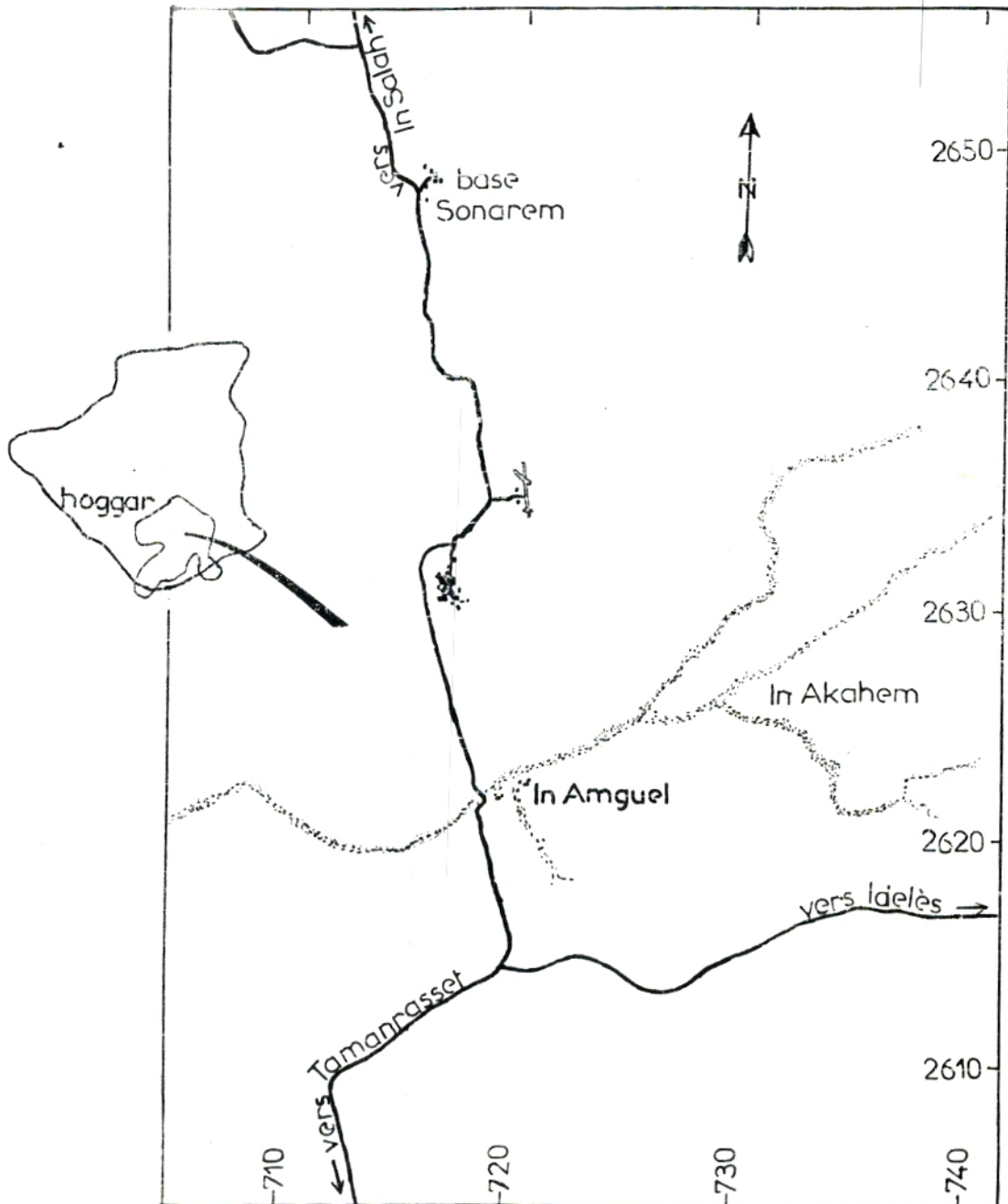
L'Oued In-Amguel naît sur le versant Nord de l'Atakor ,partie élevée et centrale du Hoggar .

La bande centrale du massif est le domaine :

FIG.38

SITUATION GEOGRAPHIQUE

0 5 10 km



- des roches précambriennes métamorphisées (Suggarien)
- différentes générations de granit les recourent

(Pharusien) lors de l'orogénèse panafricaine .

- des épandages volcaniques se sont mis en place dans différents secteurs à la fin du Tertiaire et au Quaternaire .

L'oued In-Amguel draine les séries cristalloyphylloïennes du Suggarien il traverse de petits massifs volcaniques et ne recoupe qu'un seul massif granitique au niveau d'In-Amguel .

Les phases tectoniques ont entraîné dans le Hoggar central une structure complexe caractérisée par de nombreux accidents développés le plus souvent dans les roches du socle .

- les accidents méridiens : les plus anciens soulignés sur le terrain par des zones de broyage ou par des niveaux silicifiés et durcis. Ils dessinent dans le paysage une suite de crêtes caractéristiques ,et constituent des barrières hydrauliques .

- les accidents 70° Est : plus récents ,correspondent à la phase tectonique post-Crétacé . Ils ne sont pas silicifiés donc tendres et se présentent le plus souvent en creux dans la nature et de nombreux oueds ,tels l'Oued In-Amguel ,les empruntent en s'adaptant à la structure tectonique de la région .

Ces accidents ont un intérêt hydrogéologique fondamental du fait des "ouvertures" qu'ils ont créées dans le socle cristallin ,de même que leur rencontre crée des seuils naturels favorables à l'accumulation des eaux souterraines .

#### γ ) Possibilités aquifères au Hoggar :

Il existe quatre possibilités de formation et d'accumulation des eaux souterraines :

- les terrains sédimentaires des zones marginales  
( auréole Tassilienne et Tanezrouft )
- les formations volcaniques
- l'aquifère lié aux fissures du socle cristallin
- les dépôts d'alluvions et de colluvions dans les oueds

ainsi que la zone d'altération du socle cristallin sous-jacente :

c'est l'aquifère le plus important ,dont la nappe de l'Oued In-Amguel est un exemple .

## 2 ) EXECUTION des TRAVAUX :

### α ) Campagnes sismique et électrique :

Nous avons effectué environ 50km de profils sismiques durant une période de 2 mois ,ainsi que 303 sondages électriques en AB = 300m pendant 2 mois et demi .

Le personnel était constitué d'un géophysicien ,chef de mission,l'auteur qui a dirigé les travaux de :

- sismique : avec une équipe formée d'un observerjunior , 6 manoeuvres , 2 chauffeurs

- électrique : avec une équipe de 2 opérateurs 8 manoeuvres , 1 chauffeur

Le matériel était composé respectivement de :

- un laboratoire sismique SIE 24 traces , 4 flûtes , des géophones ,une ligne de tir avec dynamite et détonateurs et 2 véhicules tout-terrain

- deux potentiomètres électriques , quatre bobines de cables ,un véhicule tout-terrain et un camion 4x4 avec citerne d'eau .

### β ) Campagnes topographique et de forage :

Un plan de positionnement de l'étude à l'échelle 1/ 5000 a été établi dans le système UTM (fuseau 31) ainsi qu'un répertoire de coordonnées et d'altitudes des points d'eau et des piézomètres .

La campagne de forage s'est conclue par 800m linéaires forés à petites profondeurs dont 600m équipés en piézomètres .

L'ensemble du personnel affecté à ces différentes missions a été logé dans quatre roulottes stationnées à proximité du chantier et pourvues de 2 citernes ,un groupe électrogène ,une boulangerie , un camion 4x4 atelier mécanique , un stock d'explosifs ,etc...



### 3 ) DISPOSITIONS et METHODES de la PROSPECTION SISMIQUE :

#### α ) Essais de Tir pour le choix des paramètres :

Avant le commencement des travaux ,trois dispositifs ont été essayés:

- dispositif de longueur  $L = 230m$  à pas constant  $x = 10m$  et un offset de  $10m$

- dispositif de longueur  $L = 115m$  à pas constant  $x = 5m$  et un offset de  $5m$

- dispositif de longueur  $L = 148m$  à pas variable et offset de  $3m$  (fig.39)

Les dromochroniques obtenues avec ce dernier dispositif reflètent mieux la présence des différents horizons , de même que l'enregistrement des premières arrivées est meilleur, c'est la raison pour laquelle il a été retenu pour la production .

#### β ) Méthodes d'exploitation des profils :

Ils ont été exploités de la façon suivante :

- à chaque dispositif ,deux tirs ( direct -inverse) ont été effectués avec offset de  $3m$

- de manière à mieux cerner les profils ,une couverture a été appliquée à chaque dispositif à partir de la 20<sup>e</sup> trace .

#### γ ) Sources d'énergie :

La charge des points de tir a été prise très variable de 1 à 3 kg d'explosifs ; ces grandes valeurs ayant été imposées par la forte absorption d'énergie dans le sable très sec de la formation superficielle .

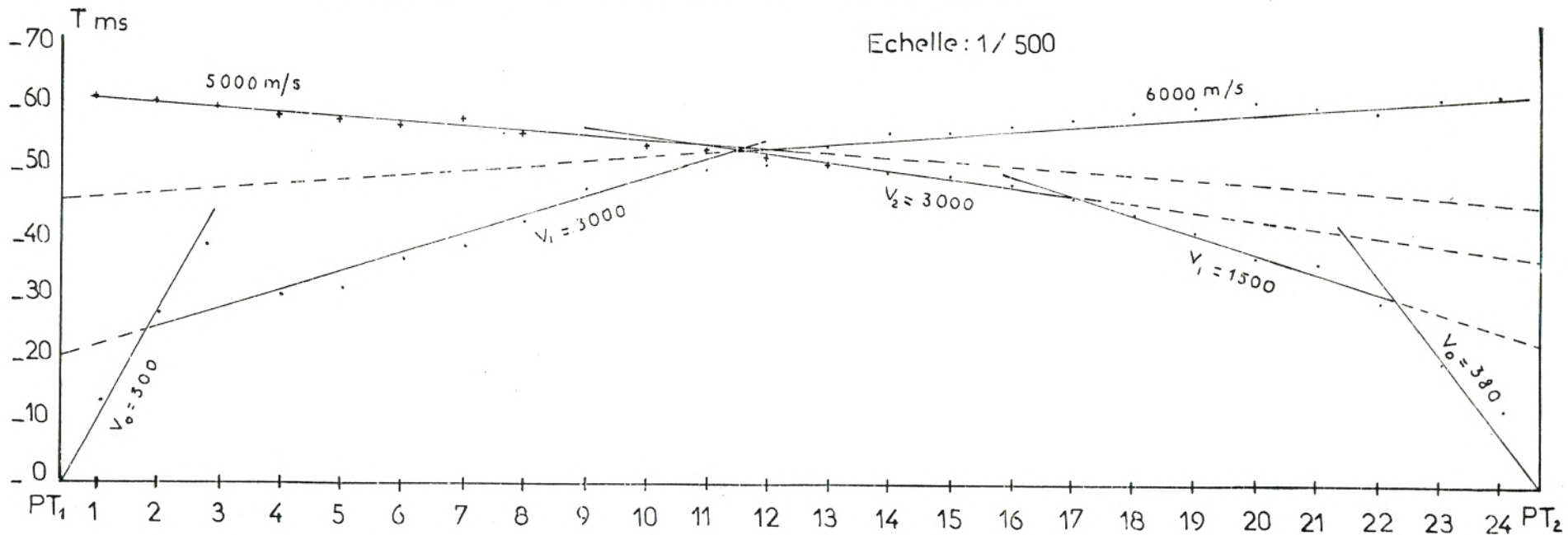
#### δ ) Méthodes de la Prospection sismique :

δ-1 ) Sous la majorité des dromochroniques, nous avons représenté les coupes altimétriques avec les épaisseurs des formations ainsi que les points de croisement des profils .

Les anomalies d'enregistrement dues aux effets topographiques ont été mises en évidence et corrigées sur les dromochroniques .

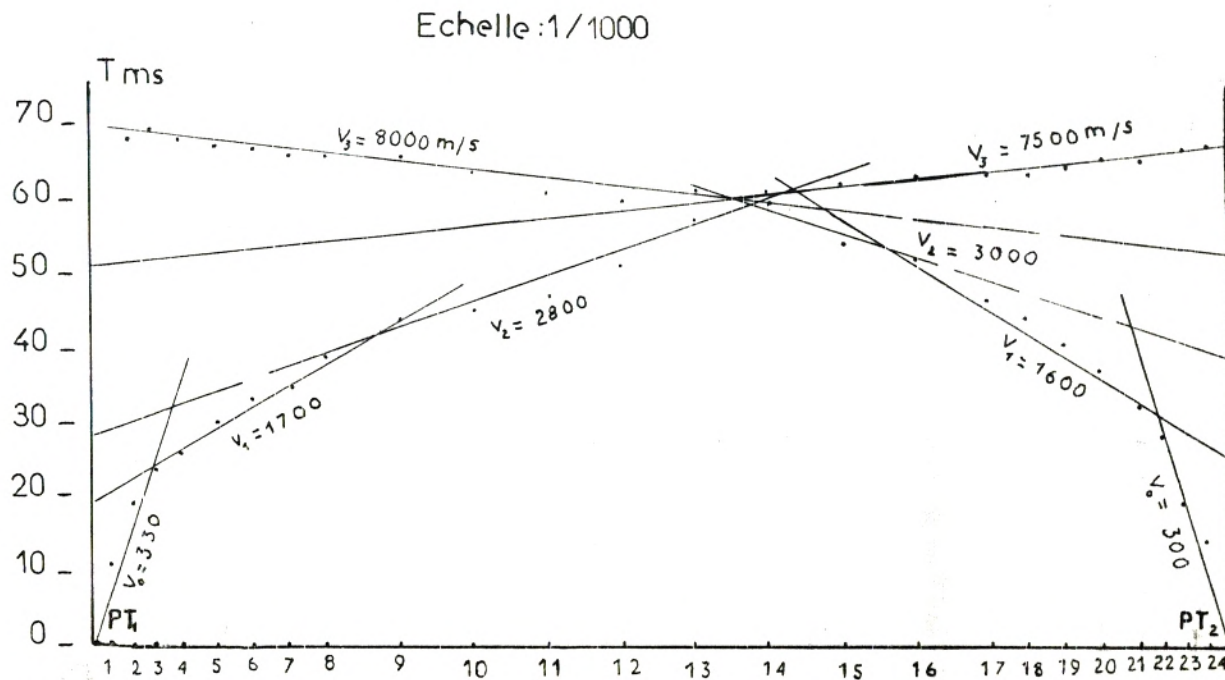
FIG. 39

DISPOSITIFS SISMIQUES ET DROMOCHRONIQUES



Dispositifs:  $\Delta X = 5 \text{ m}$   
 $D = 115 \text{ m}$   
 OFFSET 3 m

$\Delta X$  variable  
 $D = 148 \text{ m}$   
 OFFSET 3 m



δ-2 ) Les profondeurs du toit du substratum ont été déterminées sous les points de tir par la méthode des *délais* .

De même , les profondeurs à chaque géophone peuvent être obtenues par une variante de cette méthode .(fig. 40)

Soit le 1<sup>er</sup> tir de S<sub>1</sub> , le temps enregistré à un géophone G et à un autre géophone placé en S<sub>2</sub> .

Considérons également un tir en S<sub>2</sub> ; les temps d'arrivée étant t(S<sub>1</sub>G) , t(S<sub>1</sub>S<sub>2</sub>) = t(S<sub>2</sub>S<sub>1</sub>) , t(S<sub>2</sub>G)

$$\text{On a : } t(S_1G) + t(S_2G) - t(S_1S_2) = 2 \cdot z_g \cdot \cos i_{12} / v_1$$

Le membre de gauche est le délai Δt ,qui peut être lu sur les dromochroniques .

La vitesse de terrain de surface v<sub>1</sub> peut être lue directement sur les diagrammes .

L'angle critique i<sub>12</sub> est déterminé à partir de :

$$\cos i_{12} = \cos ( \text{arc sin} ( v_1/v_2 ) )$$

L'erreur sur i<sub>12</sub> n'est pas conséquente en considérant pour v<sub>2</sub> la valeur lue sur les dromochroniques .

D'une façon générale ,l'expression pour avoir l'épaisseur du n<sup>ème</sup> terrain z<sub>n</sub> est :

$$z_n = ( \Delta t_n - \sum_{k=1}^{n-1} (z_k/v_k) \cdot \cos i_{k,n+1} ) \cdot v_n / \cos i_{n,n+1}$$

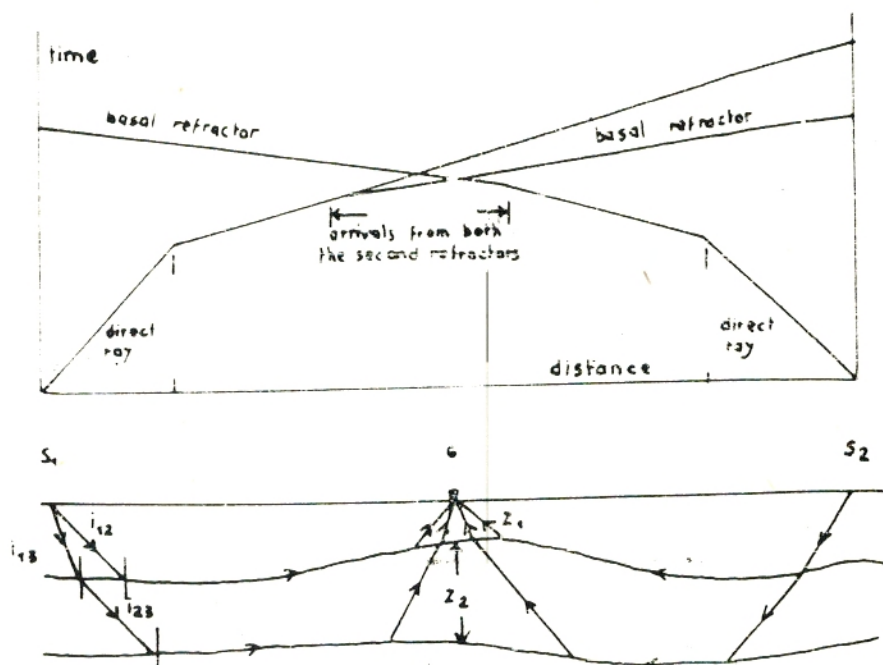
### δ-3 ) Résultats :

Les formations géologiques se caractérisent par les vitesses suivantes :

- zone altérée ,sable sec et limon .....V<sub>0</sub> = 300-500m/s
- alluvions sèches .....V<sub>1</sub> = 600-800m/s
- alluvions aquifères .....V<sub>2</sub> = 1200-2000m/s
- couche altérée , niveau fissuré .....V<sub>3</sub> = 2500-3000m/s
- substratum sain .....V<sub>4</sub> = 4000-7000m/s

Le contraste entre le toit du socle Précambrien et le remplissage alluvionnaire est le plus souvent assez net et se caractérise par une grande différence de vitesses .Il est également illustré par le diagramme représentant le log d'avancement de l'outil de forage avec un net point de rupture des temps .(fig.46)

Fig. 40



Méthode des délais

Cependant ,il est parfois difficile de faire la distinction entre les alluvions et le substratum altéré ,ce dernier se manifeste au niveau des profils A,B,D,E,F,I,J et est confirmé par l'examen d'une carotte extraite au forage F.218 .

En outre la variation des vitesses de 4000-7000m/s est due à l'hétérogénéité du substratum .Cette constatation est confirmée par la composition minéralogique des carottes des forages 199 ,224 et 218 dans la mesure où chacune comporte son propre minéral dominant .Ainsi l'on note un début d'altération du substratum dans le secteur où la biotite est dominante dans la composition de la roche dure .

#### 4 ) DISPOSITION et METHODE de la PROSPECTION ELECTRIQUE :

##### α ) Disposition :

Nous avons exécuté 303 sondages électriques en AB = 300m à partir de la route Transsaharienne et vers l'Est suivant des profils perpendiculaires au cours de l'Oued ,et distants de 200 à 500m environ . L'élongation des sondages ayant été prise parallèlement à l'Oued .

Du fait de la présence d'une couche superficielle sableuse très sèche ,il a fallu recourir à des prises de courant plus longues (1 à 1.5m) et arroser systématiquement à l'eau salée .

Ces profils ont été superposés aux profils sismiques, les sondages eux-mêmes ont été placés à proximité immédiate des points de tir. Ceci dans le but de corréler les résultats des deux méthodes .

Les forages eux ont été exécutés essentiellement à partir des premières interprétations des sondages électriques l'exploitation des 50km de profils sismiques nécessitant un temps plus long .

##### β ) Méthode :

Le problème étant d'évaluer les épaisseurs des alluvions l'efficacité des techniques mises en oeuvre, sondages électriques comme sismique réfraction dépend de la nature du substratum .

Nous avons vu précédemment que le contraste important de vitesses:1200-1600m/s pour les alluvions aquifères ,4000-7000m/s pour le substratum favorisait l'application de la sismique .

D'une façon analogue ,la résistivité très grande du substratum(supérieure à 750 Ohm.m) par rapport à celle des alluvions permettra de mieux délimiter le mur de ces dernières .

En réalité ,nous considèrerons les profondeurs fournies par la sismique comme la base de l'interprétation des S.E ,laquelle profitera également de la disponibilité des log géologiques des forages réalisés .

Ceci permettra d'améliorer le calcul des résistivités vraies des formations nécessaire à une meilleure connaissance du réservoir aquifère .

#### β-1) Problèmes de l'interprétation :

Les épaisseurs données par les forages et calculées par la sismique ont constitué la base de l'interprétation des mesures électriques.

Il a été ainsi utile de repérer au préalable le marqueur de vitesse très rapide en le fixant à chaque S.E .

- S.E F.246 :(Fig.41) la résistivité de la 4<sup>e</sup> couche (alluvions aquifères) peut être estimée comme supérieure à 150 Ohm.m avec une épaisseur très grande .

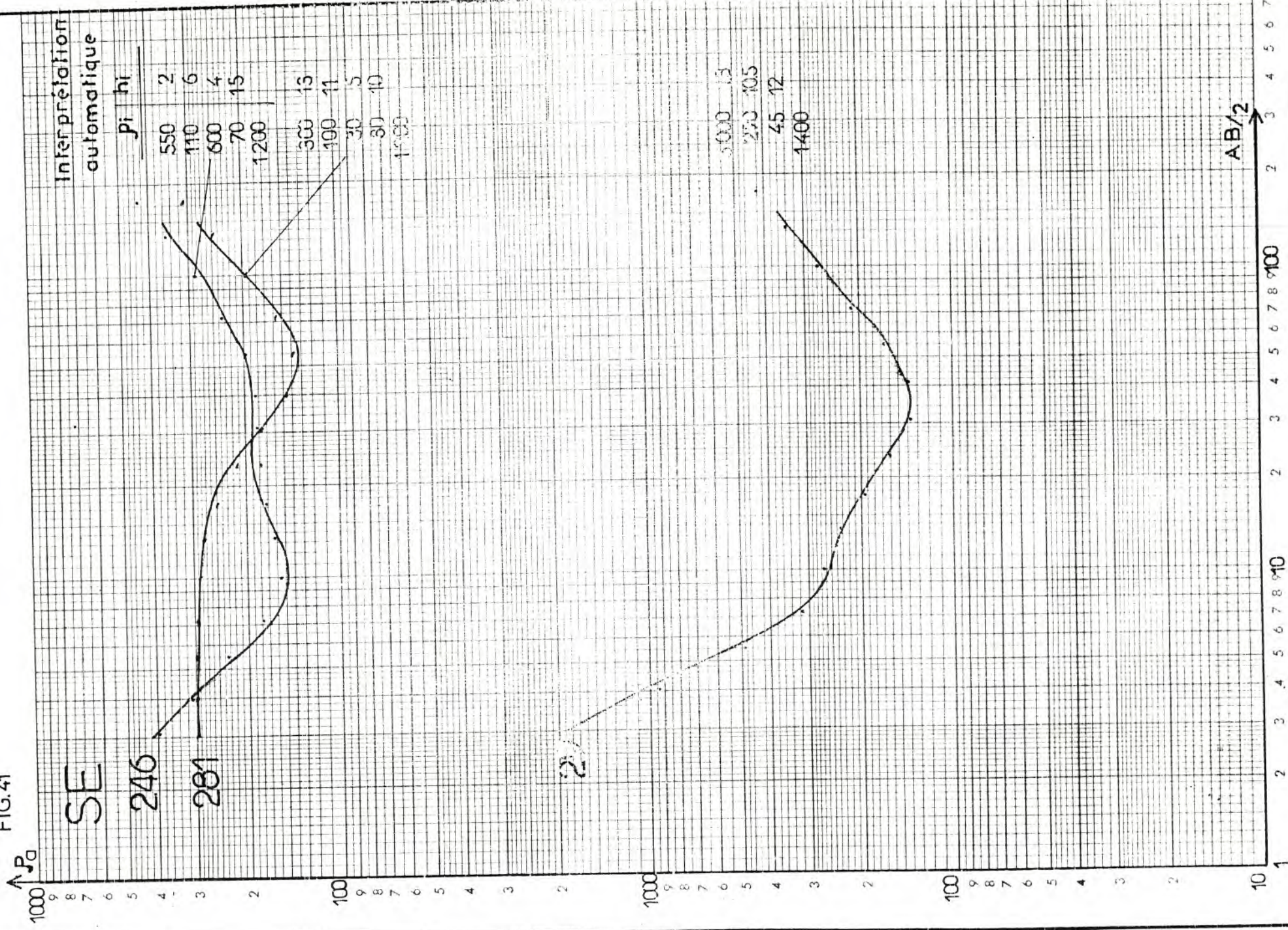
Cependant l'indication préalable sur la profondeur du substratum donné par le forage et la sismique ( 26m ) permet de calculer une valeur plus faible de résistivité : 70 Ohm.m .

- S.E F.238 :(Fig.42) le palier à 130 Ohm.m de la 4<sup>e</sup> couche est incompatible avec une profondeur de 22 à 24m donnée par le forage et la sismique .

La valeur probable calculée serait plutôt égale à 65 Ohm.m .

En fait dans beaucoup de cas les courbes de S.E présente des résistivités apparentes très supérieures à 120 Ohm.m en particulier pour les alluvions aquifères , impliquant des résistivités vraies de l'ordre de 70 à 100 Ohm.m .

FIG. 41







Ceci étant dû au fait qu'ils sont encadrés par des formations très résistantes .

En réalité ,comme nous allons le voir leurs résistivités vraies sont nettement plus faibles ,de l'ordre de 30 Ohm.m .

( $\beta$ -2 ) Interprétation automatique :

a ) S.E 2 : nous appliquons le programme "Z"

Exemple n°13 : S.E 2 (Fig.43)

Voir le traitement en pages suivantes .

Après simplification de la courbe D.Z (passant de 24 à 4 points) le calcul du modèle correspondant donne :

$\rho$ = 109.6 Ohm.m	h = 1 m
602.6	2.3
423.1	4.5
36.8	5.9
1000	

Si nous multiplions par le coefficient de translation 1.5 ,la solution finale est :

$\rho$ = 109.6 Ohm.m	h = 1.5 m
602	3.45
423	6.75
36.8	8.85
1000	

Donc le substratum est calculé à 20.5m ,alors que le forage le donne à 18.5m .(Fig.45)

b ) S.E 48: nous appliquons le programme  
" Bich "

Exemple n°14 : S.E 48 (Fig.44)

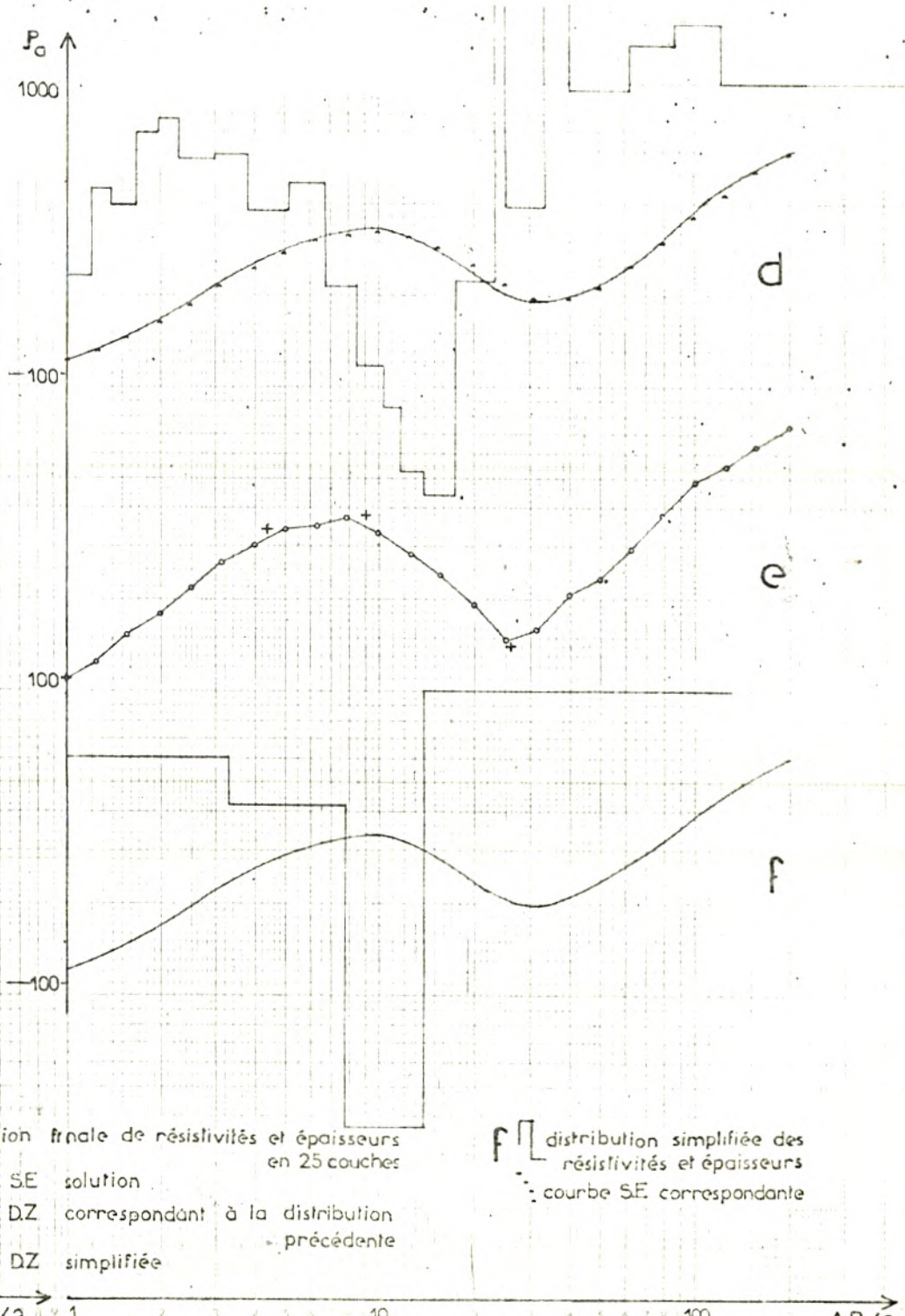
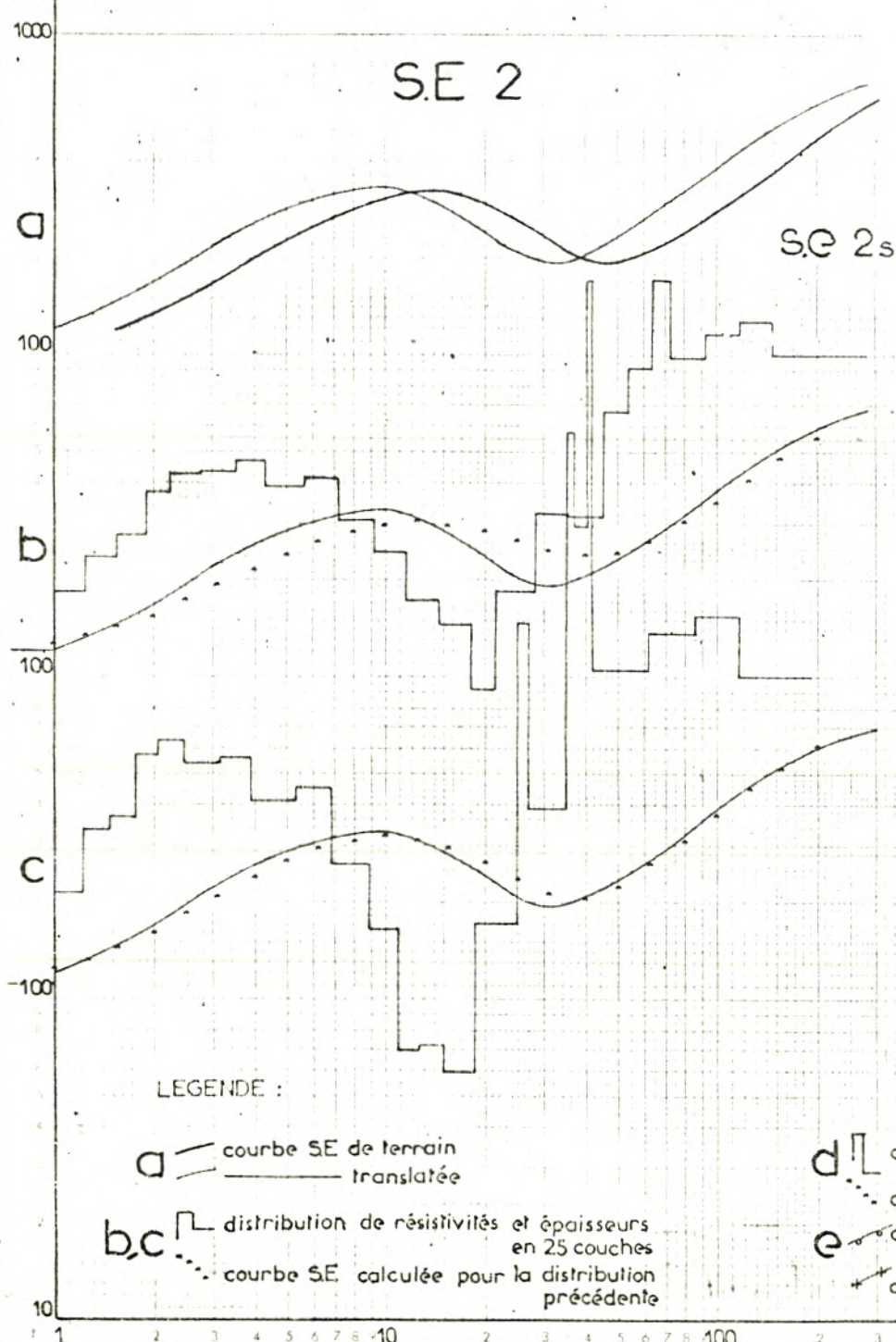
Voir le traitement en pages suivantes .

La solution est obtenue après seulement 3 itérations .

La solution finale est :

$\rho$ = 1700 Ohm.m	h = 1.17 m
191	6.5
20	6.2
1500	

FIG. 43



LEGENDE :

- a — courbe SE de terrain  
— courbe SE de terrain  
translatée
- b, c — distribution de résistivités et épaisseurs  
en 25 couches  
... courbe SE calculée pour la distribution  
précédente
- d — distribution finale de résistivités et épaisseurs  
en 25 couches  
... courbe SE solution
- e — courbe DZ correspondant à la distribution  
précédente  
... courbe DZ simplifiée
- f — distribution simplifiée des  
résistivités et épaisseurs  
... courbe SE correspondante

INTERPRETATION DIRECTE

S.E n° 2 In-Anguel

Echantillonnage de la courbe S.E : 24 points

Résistivités et Epaisseurs du Modèle à 25 couches

H	RO	H	RO	H	RO	H	RO
1.00	120.00	0.23	182.07	0.29	237.72	0.36	276.48
0.39	373.99	0.52	427.35	0.71	431.59	0.86	464.10
1.24	394.85	1.53	415.95	2.10	305.96	2.53	241.56
2.83	171.53	3.64	146.69	3.54	91.74	6.56	182.07
7.69	322.68	9.49	315.98	8.76	666.78	9.77	903.08
8.79	1709.80	18.97	975.20	24.87	1144.93	32.57	1274.79

Résistivités apparentes de la courbe calculée  
du Modèle à 25 couches

127.73	133.55	142.57	155.50	172.49	193.08
216.21	240.36	263.56	283.46	297.47	303.19
299.19	286.09	267.44	249.62	240.24	245.29
267.02	304.10	353.78	413.56	481.63	556.48

Visualisation courbe calculée et courbe de terrain

y a t il coincidence ? oui=1 non =0

Non

Résistivités et Epaisseurs du Modèle à 25 couches

H	RO	H	RO	H	RO	H	RO
1.00	112.74	0.21	212.38	0.23	336.25	0.31	364.89
0.30	575.99	0.42	637.93	0.67	543.79	0.84	564.09
1.27	408.39	1.55	453.28	2.01	260.36	2.16	167.92
1.57	69.93	2.47	71.60	3.54	59.11	6.58	172.59
2.01	1493.06	8.45	389.98	1.25	5730.65	3.62	2942.78
1.1417	123.56	19.93	1051.49	24.65	1348.31	31.89	1535.60

Résistivités apparentes de la courbe calculée  
du Modèle à 25 couches

123.37	131.32	143.54	160.84	183.16	209.60
238.40	267.18	292.98	312.25	321.22	316.78
298.14	268.61	236.50	213.09	208.07	225.08
261.49	312.34	374.08	445.21	525.18	613.31

Visualisation courbe calculée et courbe de terrain

y a t il coincidence ? oui=1 non =0

Non

Résistivités et Epaisseurs du Modèle à 25 couches

H	R0	H	R0	H	R0	H	R0
1.00	109.65	0.20	233.88	0.19	450.53	0.30	399.47
0.26	694.90	0.38	763.79	0.67	567.15	0.84	588.87
1.29	381.61	1.55	466.18	1.88	217.38	1.76	118.55
1.57	86.65	2.10	53.01	3.54	44.26	5.98	225.19
1.90	1982.06	8.67	390.03	0.5115628.48		3.42	3350.36
2.56	8888.09	21.99	958.23	25.95	1333.87	32.79	1562.40

Résistivités apparentes de la courbe calculée du Modèle à 25 couches

121.63	130.51	144.08	163.10	187.36	215.66
245.93	275.49	301.00	318.55	324.09	314.63
290.12	255.31	220.07	196.43	193.21	212.11
249.05	298.93	358.86	427.90	505.79	592.11

Visualisation courbe calculée et courbe de terrain

Oui  
solution finale  
Courbe DZ de la solution

L2	R2	L2	R2	L2	R2	L2	R2
1.00	109.65	1.25	125.28	1.58	152.07	2.00	179.61
2.50	217.10	3.16	263.11	4.00	303.14	5.00	341.83
6.30	349.66	7.90	370.21	10.00	333.38	12.60	281.12
15.80	241.81	20.00	192.29	25.00	147.03	31.60	159.11
40.00	207.70	50.00	231.45	63.00	295.94	79.00	369.21
100.00	483.19	125.00	542.88	158.00	631.94	200.00	737.30

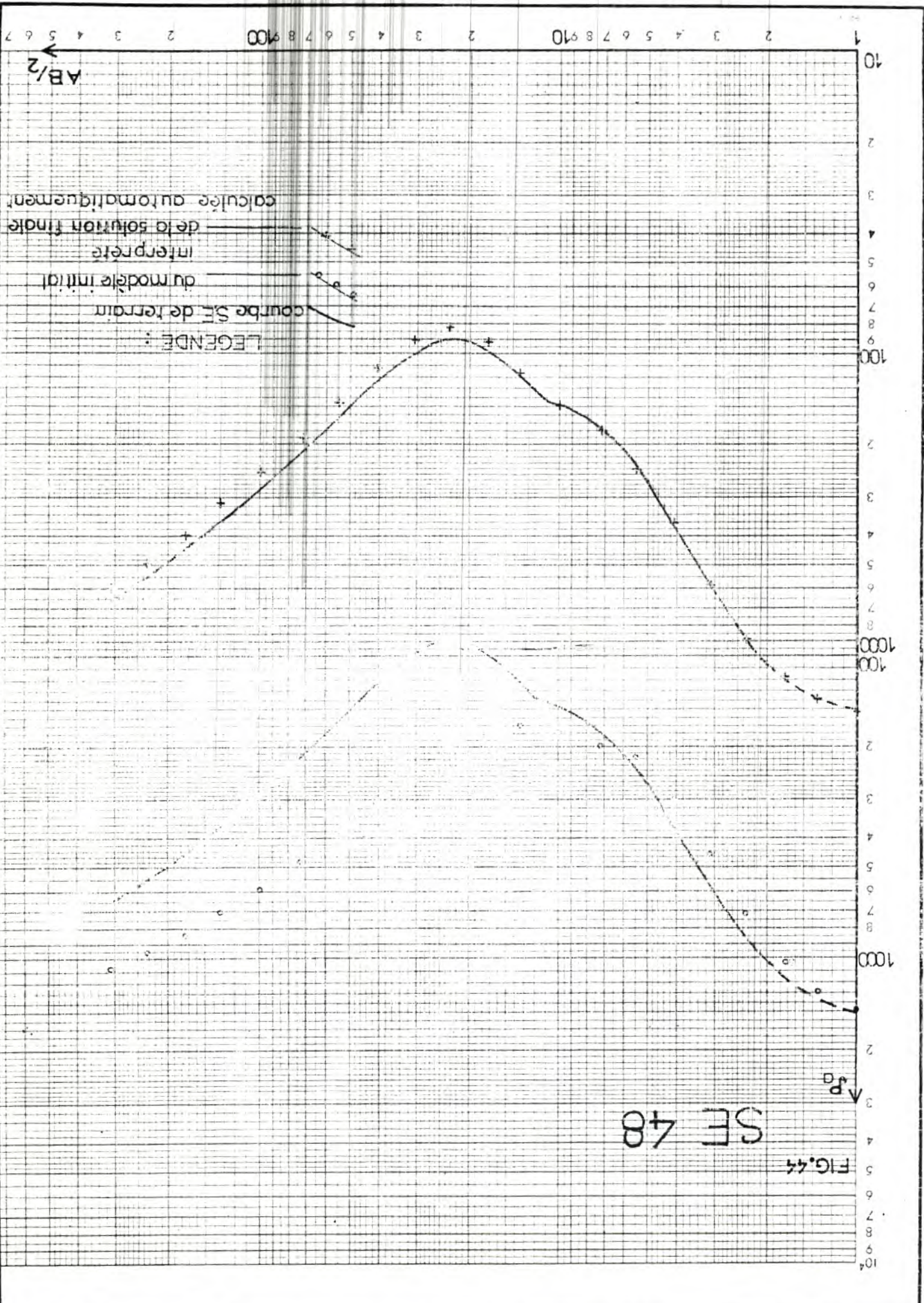
Donner le nombre de points et les points-D.Z de la courbe D.Z simplifiée

N1= 4

1.00	109.60	4.40	340.00	9.00	380.00	26.00	140.00
------	--------	------	--------	------	--------	-------	--------

Calcul du Modèle de la courbe D.Z simplifiée

R0(1)= 109.6 H(1)= 1  
R0= 602.668 H= 2.300438  
R0= 423.1936 H= 4.546383  
R0= 36.84797 H= 5.970479  
r0= 1000



EXEMPLE n°14 Utilisation du programme BICH

INTERPRETATION DIRECTE

S.E 48 In-Anguel

Echantillonnage des valeurs de résistivités apparentes  
de la courbe S.E

nombre de points : 61

Valeurs de la Transformée T1 en fonction de 1/L0

.16	17.03881	.25	17.0461	.4	16.83977
.63	16.39407	1	14.43243	1.6	11.94353
2.5	8.8749	4	6.407143	6.3	4.63564
10	3.342676	16	2.523335	25	2.056484
40	2.015341	63	2.331949	100	3.014022
160	3.919713	250	4.954607	400	6.037268

Modèle :

Le modèle initial est le suivant :

nombre de couches N= 4

Résistivités Epaisseurs

R0= 17 H= 1

R0= 2 H= 6.5

R0= .8 H= 6.3

R0= 15

Valeurs du Criterium F1 en fonction  
du nombre d'itérations Q

1	71.41568	2	2.572765	3	.639285
---	----------	---	----------	---	---------

Modèle final :

Nbre d'itérations Q= 3

Précision :

f3= 8.951606E-03

r0= 17 h= 1.174428

r0= 1.912641 h= 6.5271

r0= .2 h= 6.210785

r0= 15

### c ) S.E caractéristiques

Les figures 45 à 47 montrent les interprétations fournies pour des S.E effectués en différents points de forage .Nous avons essayé d'intégrer les épaisseurs fournies par les logs et la sismique de façon à mieux en déduire les résistivités vraies .

Ceci nous amène à constater que :

- les résistivités des alluvions aquifères sont relativement peu élevées ( 50 à 90 Ohm.m ) par rapport aux valeurs habituellement rencontrées .On rencontre des résistivités encore nettement plus faibles : 18 Ohm.m au S.E 32 ou même 12 Ohm.m au S.E 14 du fait de la présence d'une épaisse couche de vase noire.

- l'existence de cette couche dont la vitesse n'est pas marquée sur les dromochroniques et qui est certainement plus lente que celle des alluvions sus-jacents ,fait que la détermination de la profondeur du substratum est obtenue par excès par la sismique ( exemple du S.E 224 ) .

#### ( $\beta$ -3 ) Echelle de résistivités :

La synthèse des interprétations précédentes permet d'établir à présent la corrélation entre les résistivités et les faciès .

Faciès lithologique	Résistivités
Sable fin	110-350 Ohm.m
Sable grossier	100-700
Gravier fin aquifère	30-100
Gravier moyen aquifère	70-150
Vase noire	15-30
Roche dure	750-1500

FIG. 45

SE	prof.	log	description	interpret. autom.		SE	Prof.	log	description	interpret. autom.	
199	4	m	sable fin et grossier	360	1.2	194	5	m	sable fin et grossier	280	2.3
			gravier moyen	70					sable grossier	95	
	8	roche dure compacte	750	8.2							

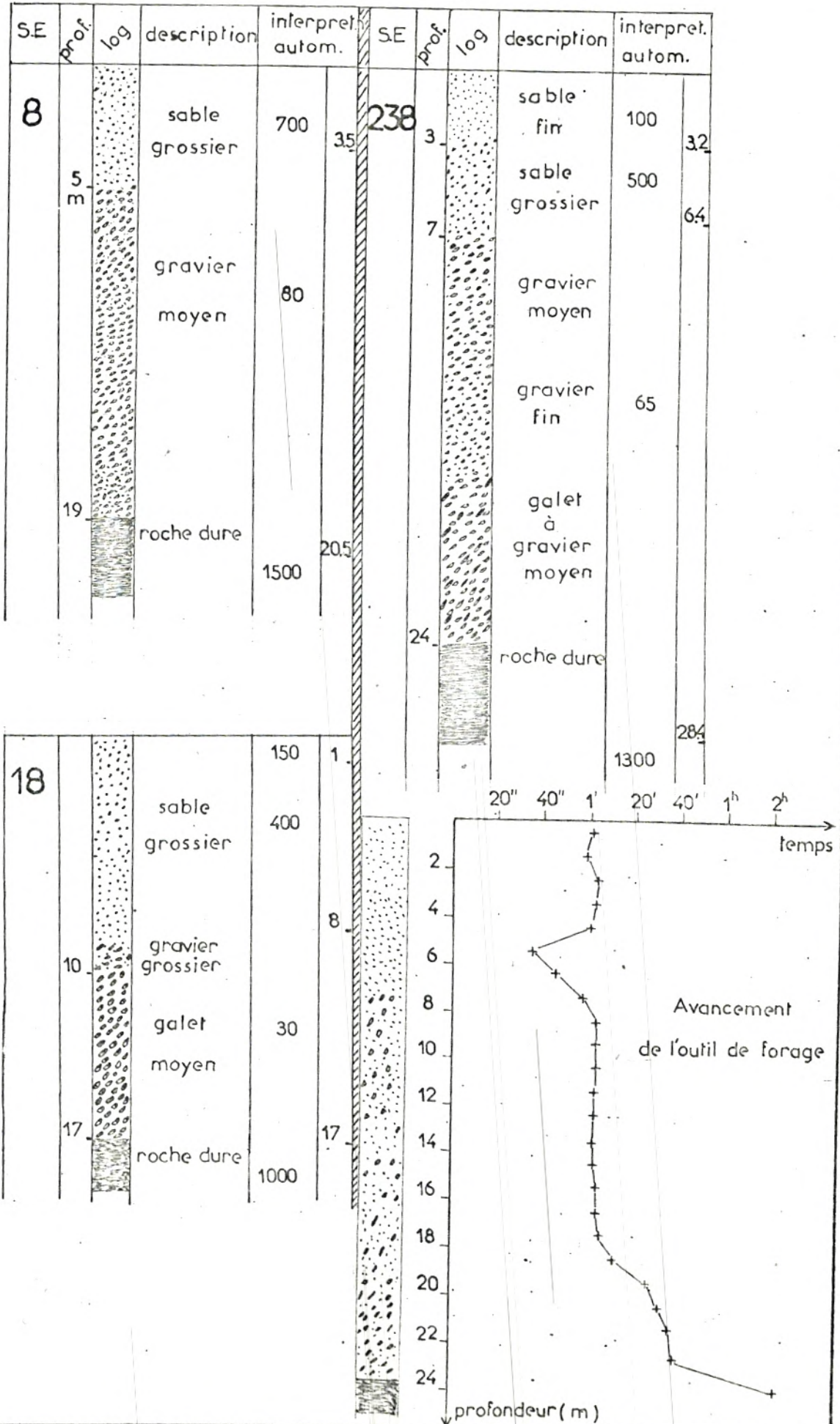
2	3	m	sable fin et grossier	110	1.5
			sable grossier	600	8
	8	m	gravier fin	37	11.5
			roche dure	1000	20

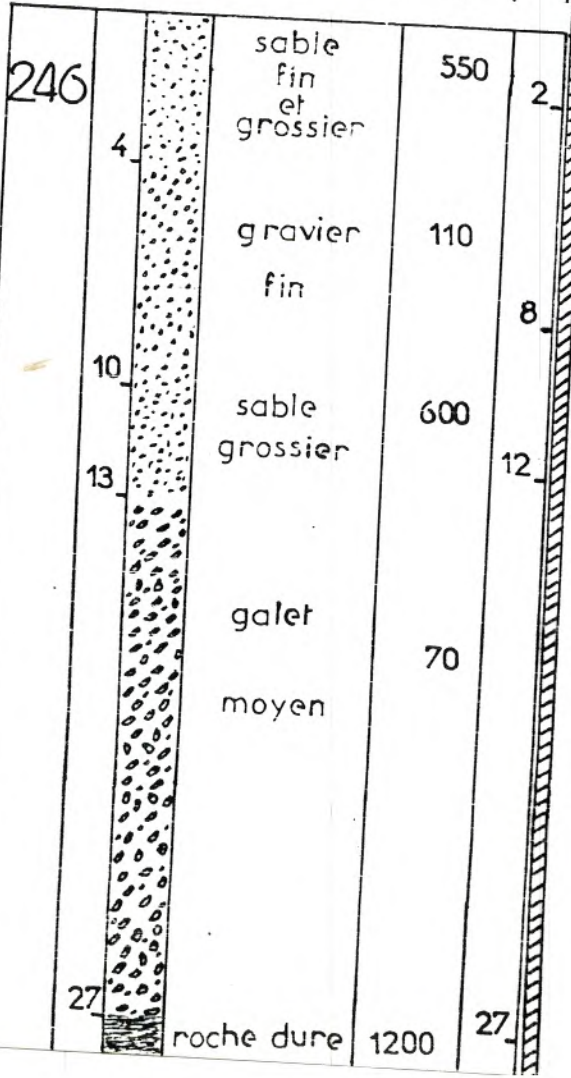
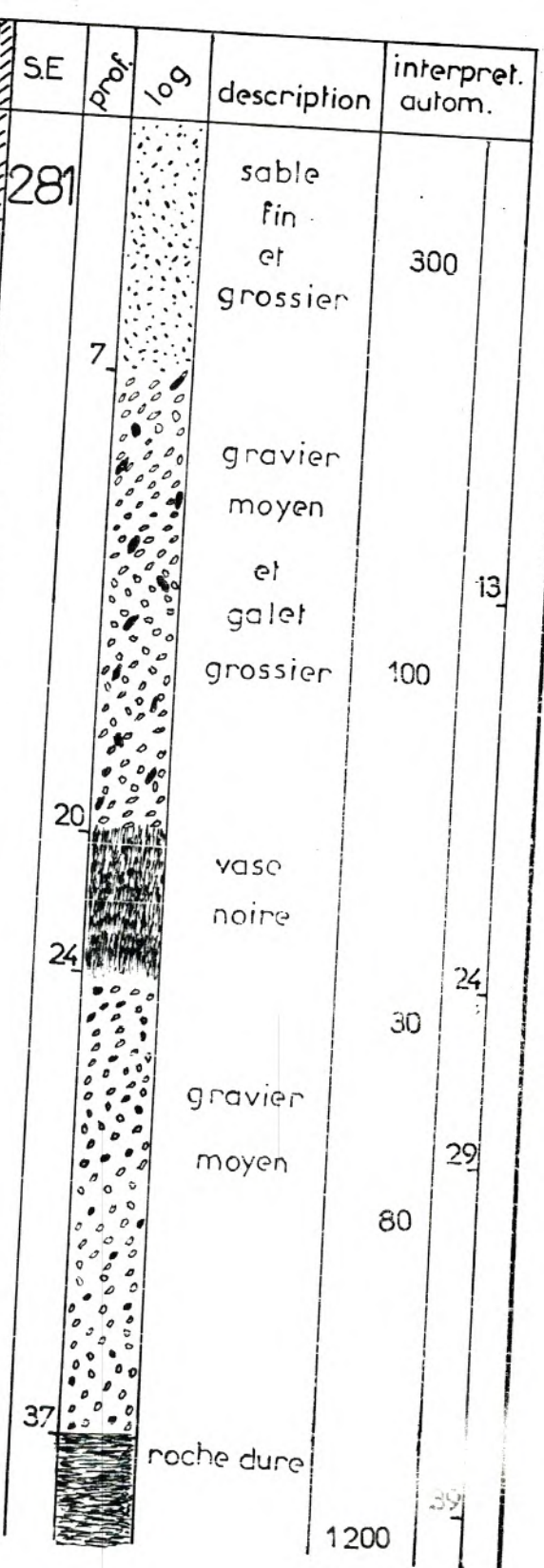
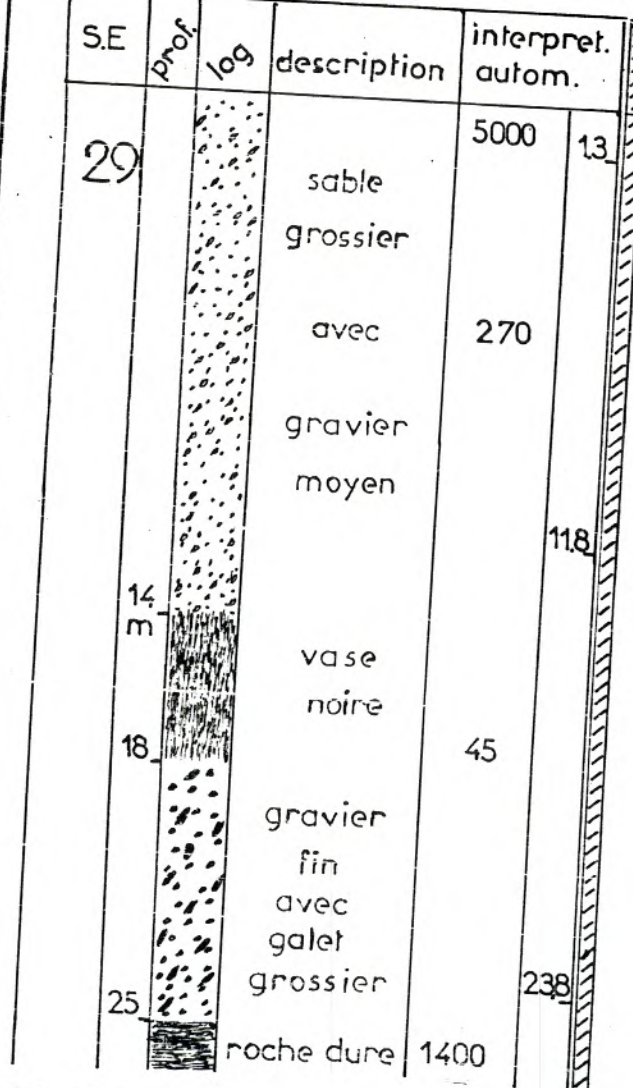
14	m	gravier fin	30	15		
		19	m	roche dure compacte	1000	18.5

2	m	sable fin et grossier	420	1.4
		sable grossier	220	4.2
5	m	gravier fin	60	
		13	m	vase noire
17	m			roche dure



FIG. 46





## 5 ) RESULTATS :

Les résultats ont été rassemblés sur 3 cartes que nous examinons en détail :

*α ) Carte des Profondeurs du Substratum rapide : obtenue pour l'horizon de vitesse supérieure à 4000m/s .(Fig.48)*

Les isolignes observent une allure régulière ,parallèles au cours de l'Oued ,avec une augmentation des valeurs à partir des bords vers son milieu .Elles varient de 3m à plus de 40m .

Les valeurs les plus grandes apparaissent aux abords des deux jardins de la Révolution Agraire (R.A) près des deux forages F.36 et F.224 où l'on note des creux jusqu'à 50m .A moins que cette dernière zone soit le siège de failles dans le substratum ce qui est plausible vu le gradient relativement élevé des courbes .

Une observation analogue peut être faite à la droite de la carte où l'on assiste à un relèvement important encadré par deux dépressions du substratum autour des forages F.52 et F.281 .

Une constatation en rapport avec ces secteurs où le gradient est le plus grand,est le débit plus important observé qui peut être mis à l'actif de failles dans le substratum .

Les parties où les isolignes sont plus régulières semblent présenter des débits moins intéressants .

*β ) Carte des Résistivités vraies des Alluvions aquifères :*

(Fig.49)

Les valeurs varient de 30 Ohm.m à 150 Ohm.m en général augmentant du milieu vers les bords ,suivant la granulométrie des alluvions .

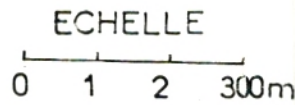
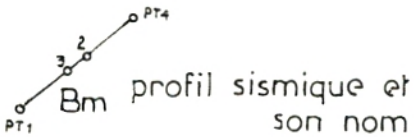
Des valeurs extrêmes sont notées : 12 Ohm.m au F.14 dû certainement à la présence de vase noire, ou supérieures à 150-200 Ohm.m à proximité des bords de l'Oued .

A son milieu ,les valeurs varient entre 30 et 100 Ohm.m ,selon la granulométrie des graviers,on aurait là les zones les plus favorables.

# CARTE DE POSITIONNEMENT DES POINTS DE MESURE

## LEGENDE

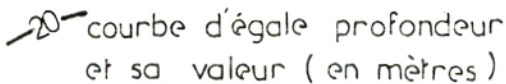
- ① sondage électrique et son numéro
- ⊙ point de tir sismique et son numéro
- F. 29 forage et son numéro



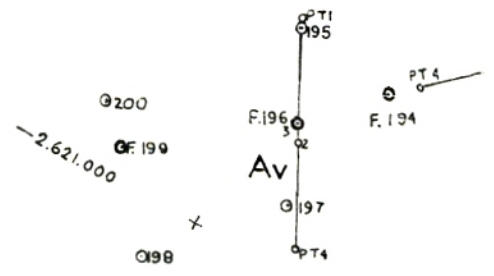
# CARTE DES PROFONDEURS DU SUBSTRATUM RAPIDE

## LEGENDE

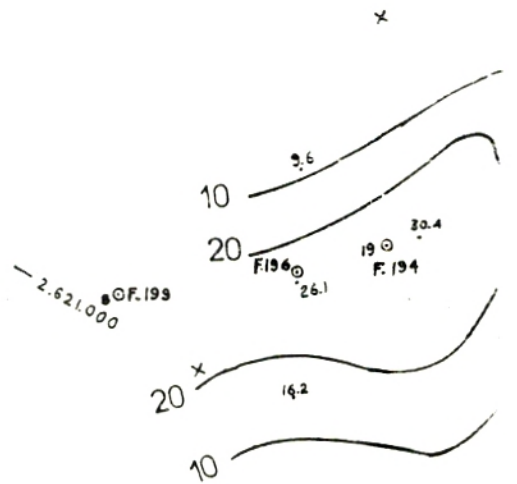
- ⊙ point de tir sismique et profondeur du Substratum
- F. 18 forage et son numéro



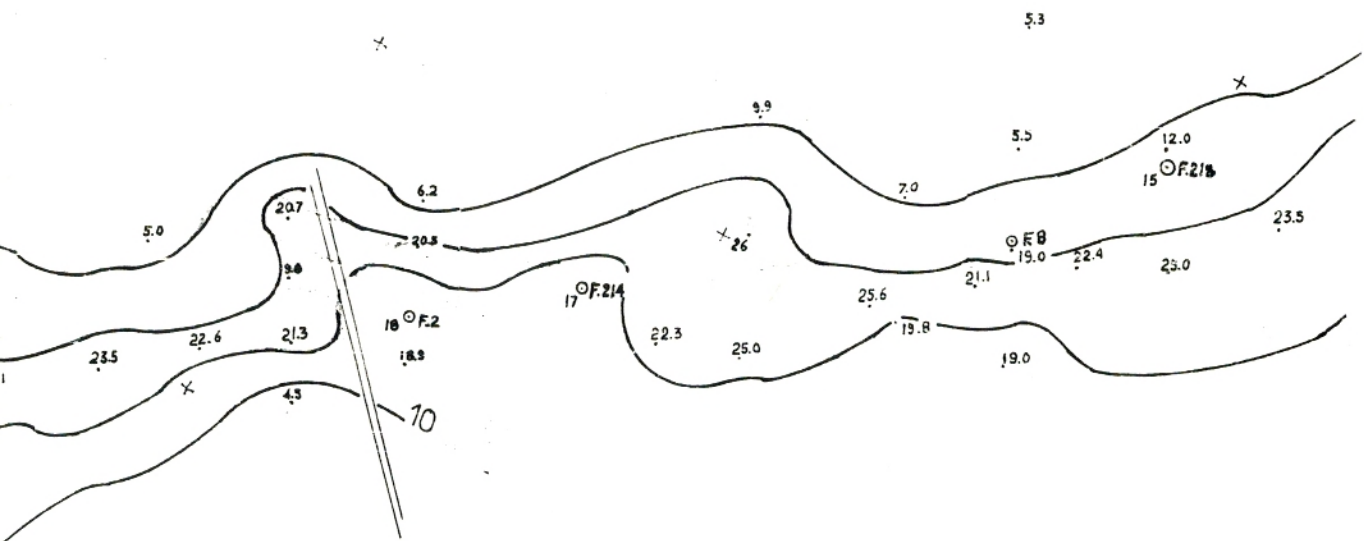
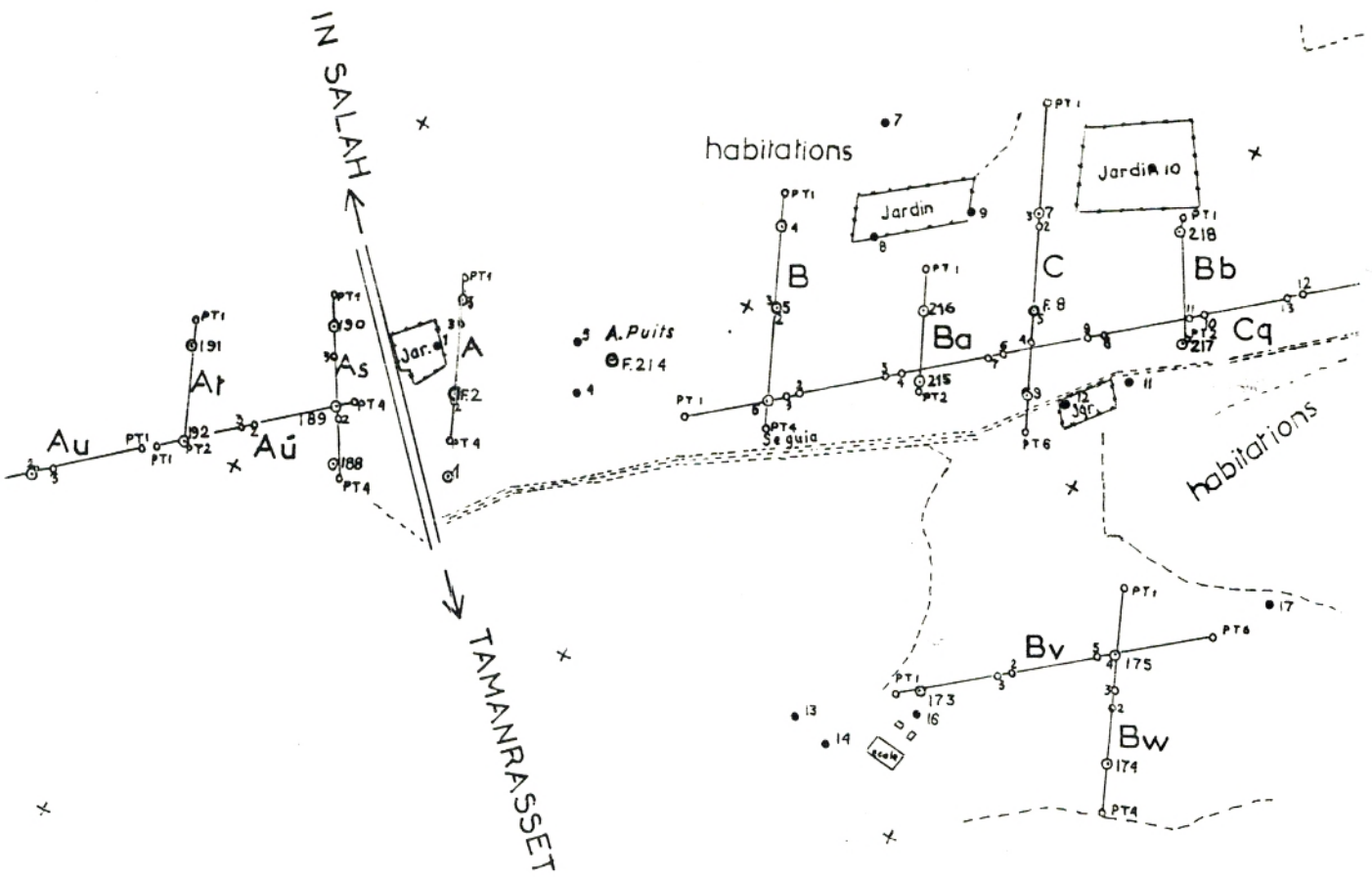
717500  
+ 2.621.500



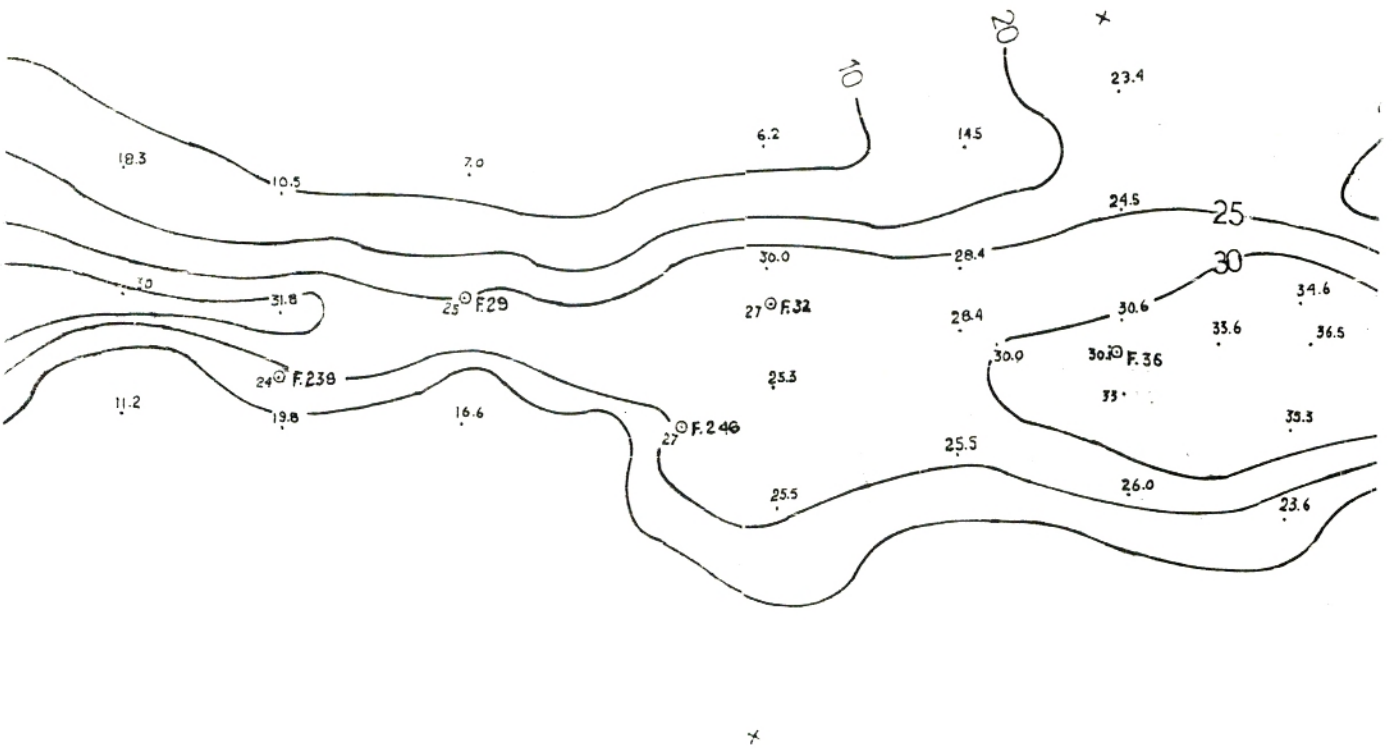
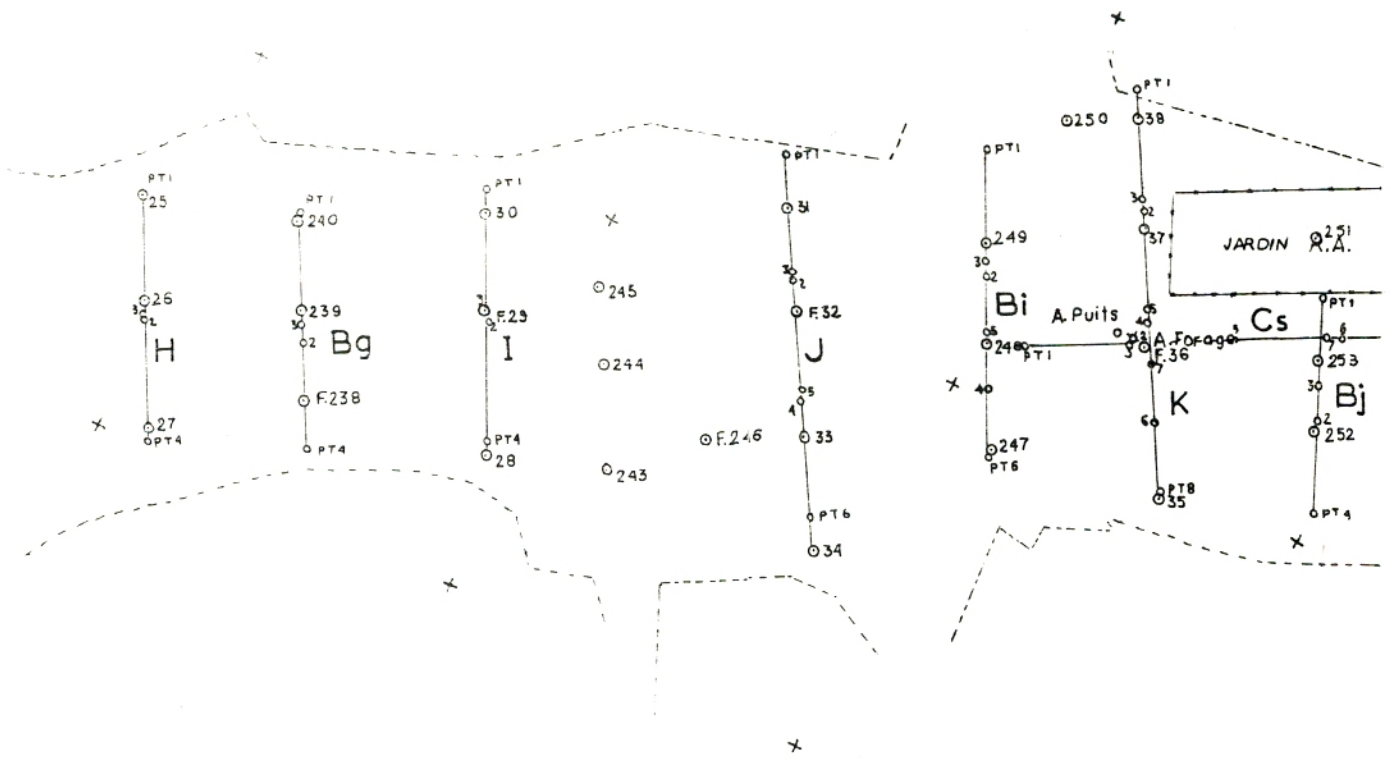
717500  
+ 2.620.500  
717500  
+ 2.621.500

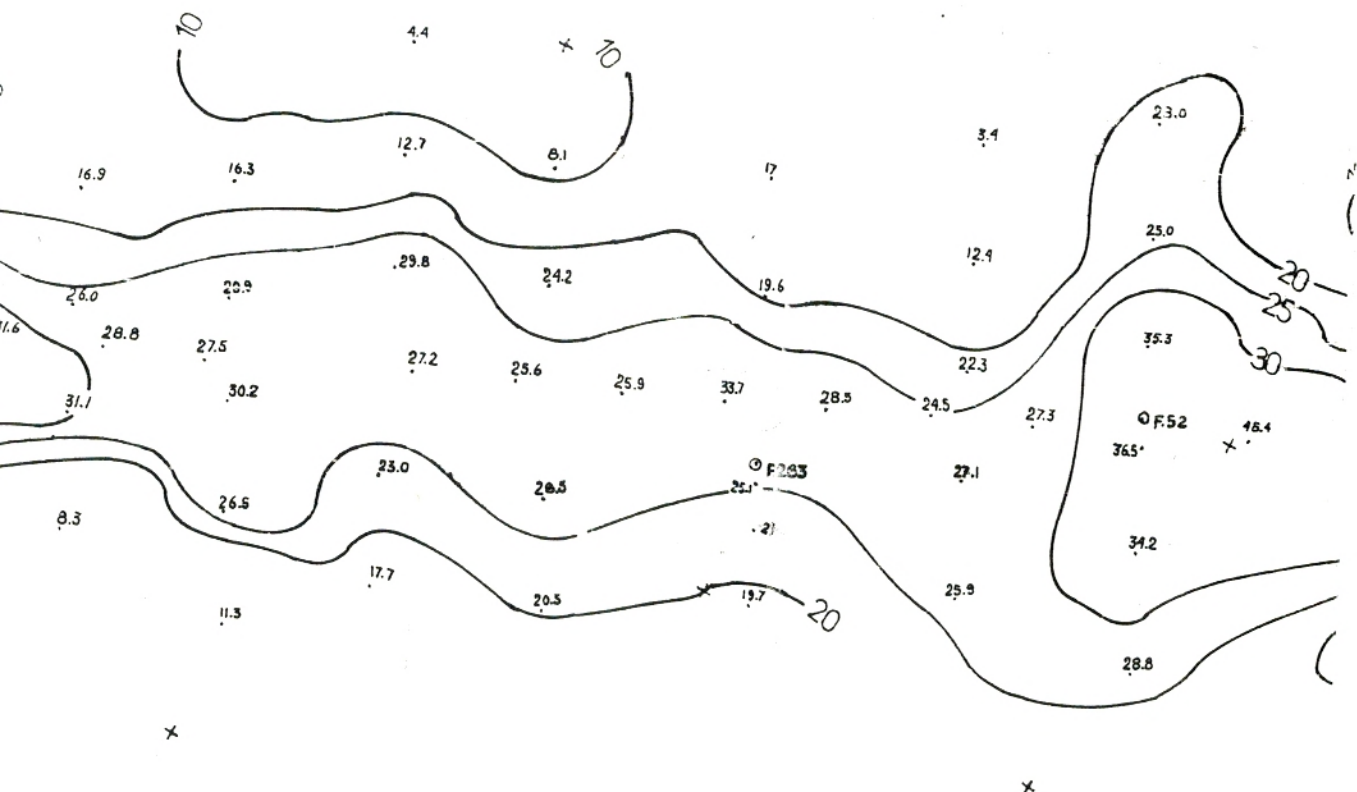
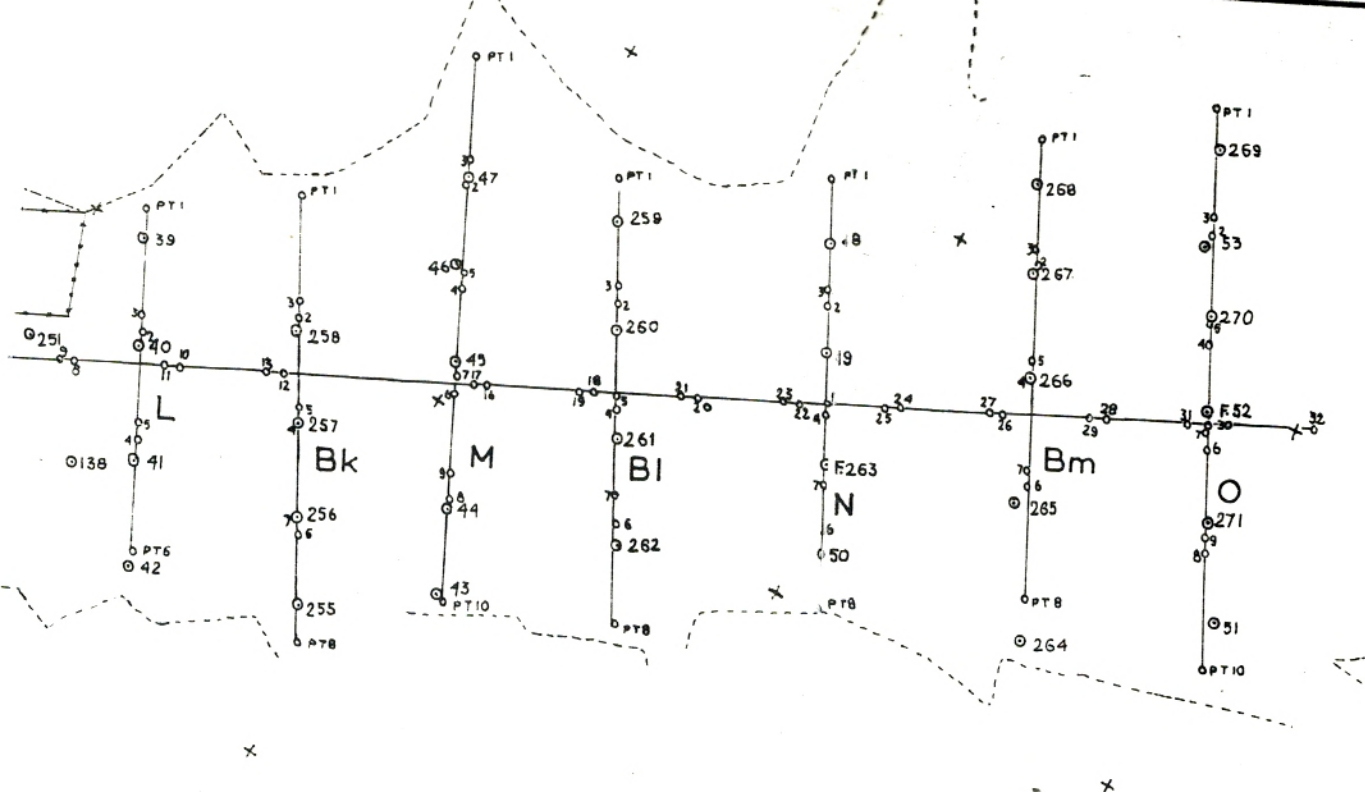


717500  
+ 2.620.500











γ ) Carte des Conductances des Alluvions aquifères :

(Fig.49)

La conductance est ,rappelons-le ,le rapport de l'épaisseur à la résistivité vraie de la couche .La couche considérée est celle ayant des résistivités supérieures à 30 Ohm.m ,ceci pour éliminer l'effet de la couche vaseuse noire .De même la valeur de 150 Ohm.m a été choisie comme valeur maximale de résistivité des alluvions mouillées .

Cette carte permet de mettre en évidence les valeurs les plus fortes de la conductance c'est à dire les zones hydrogéologiquement intéressantes observées sur les deux cartes précédentes ,à savoir des épaisseurs grandes pour des résistivités plus faibles .

La même physionomie de courbes que sur les deux autres cartes se retrouve et les mêmes secteurs sont mis en évidence :

- autour des forages F.238 à F.32 où la conductance atteint  $0,5 \text{ Ohm}^{-1}$

- sur la droite de la carte ,autour des S.E 40 ,44  
45, où la conductance varie entre  $0,45$  et  $0,56 \text{ Ohm}^{-1}$

- les valeurs les plus fortes observées de l'ordre de  $0,8$  à  $1,3 \text{ Ohm}^{-1}$  apparaissent autour du S.E 53 à droite et du S.E 226 à gauche de la carte .Elles correspondent à des valeurs de résistivités vraies d'environ 12 à 25 Ohm.m ,dues certainement à la présence d'alluvions mélangées de vase noire .

De même ,on note que vers l'Est il y a des possibilités aquifères à exploiter au même titre que dans la zone proche de la route Transsaharienne .

L'intérêt d'une telle carte est qu'elle fournit une image de la distribution spatiale du réservoir aquifère.Ceci sur le plan qualitatif .

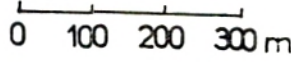
Nous allons tenter, maintenant d'utiliser cette carte pour l'évaluation de la réserve totale de l'aquifère.

# CARTE DES RESISTIVITES VRAIES DES ALLUVIONS AQUIFERES

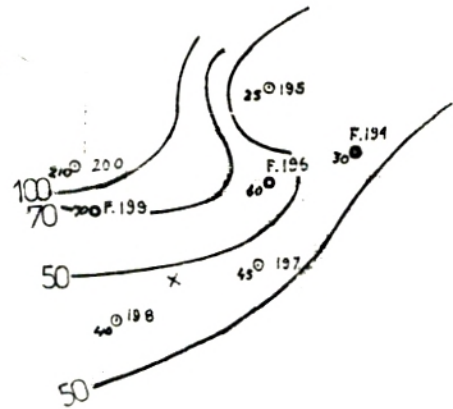
LEGENDE

- <sup>27</sup> sondage électrique et son numéro  
70 valeur de résistivité (en ohm.m)
- 70— courbe d'équirésistivité et sa valeur  
(en ohm.m)
- ⋄ limite de l'Oued

ECHELLE :



717,500  
+ 2.621,500



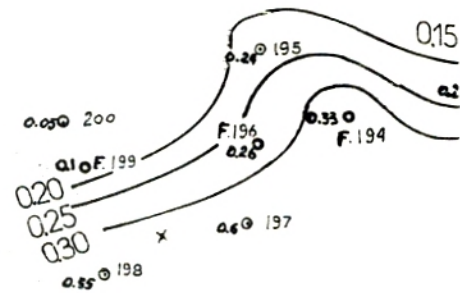
# CARTE DES CONDUCTANCES DES ALLUVIONS AQUIFERES

LEGENDE

- <sup>72</sup> sondage électrique et son numéro  
0,3 valeur de conductance (en ohm<sup>-1</sup>)
- 0,4— courbe d'égale conductance  
et sa valeur (en ohm<sup>-1</sup>)
- ⋄ limite de l'Oued

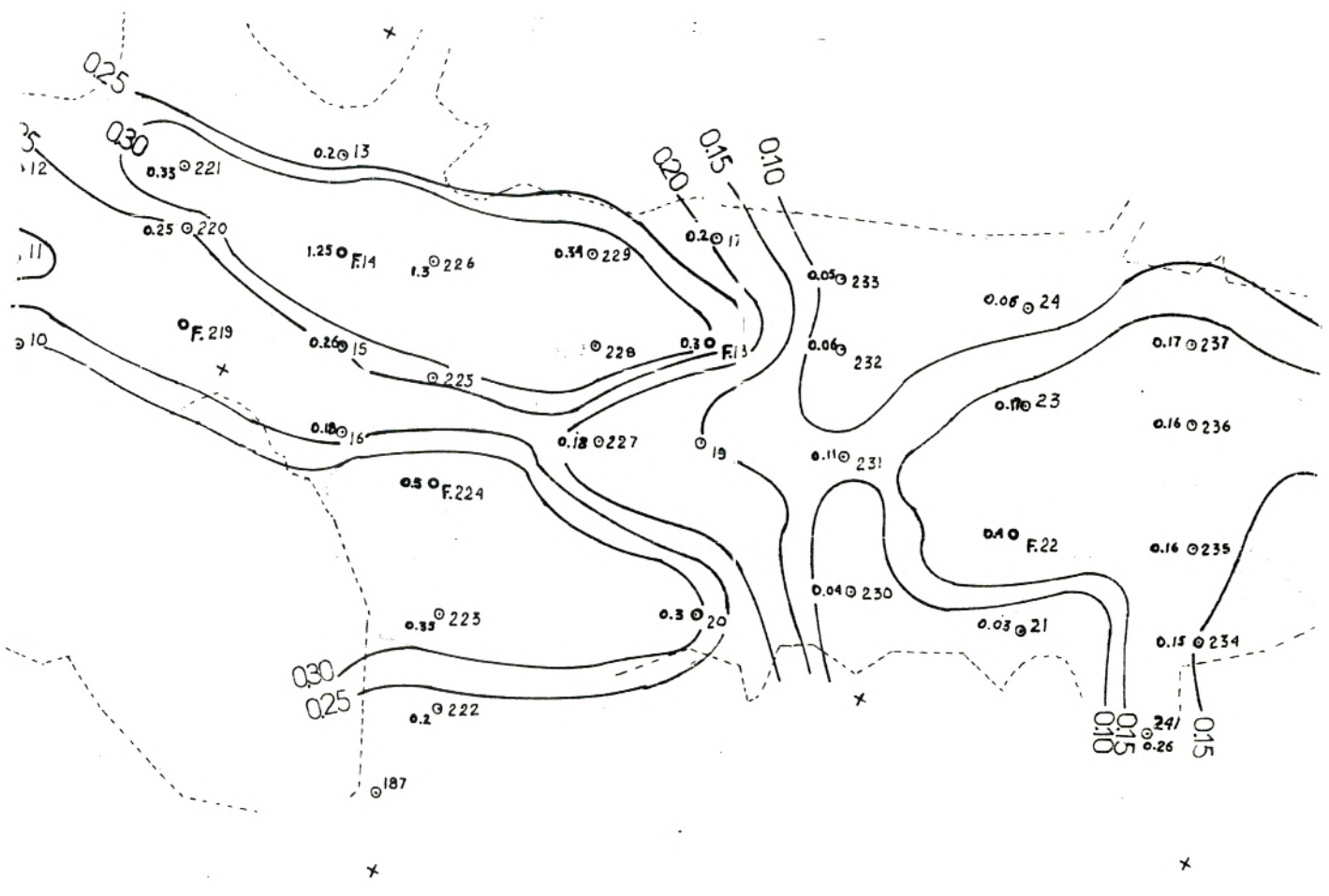
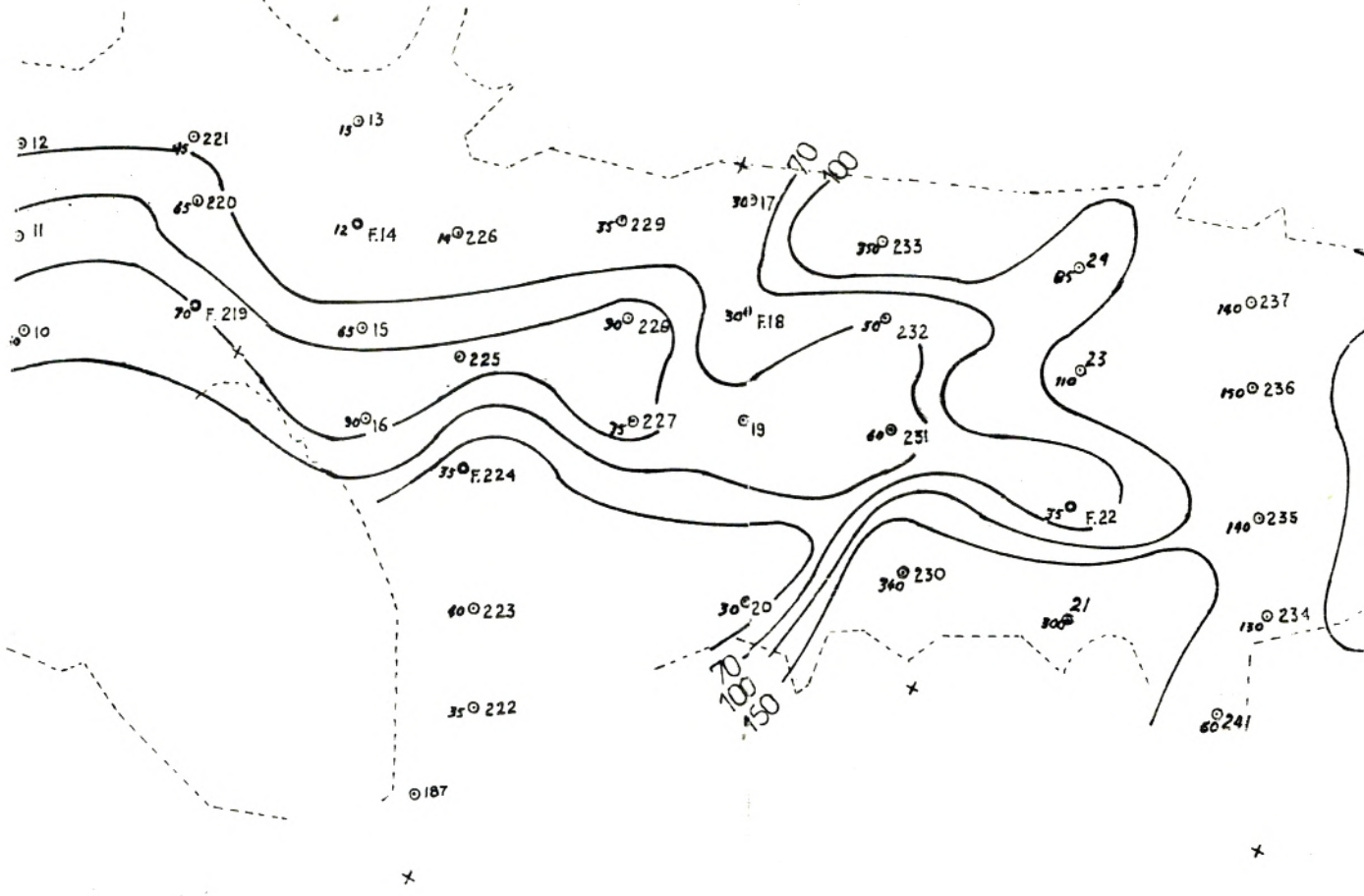
ECHELLE :

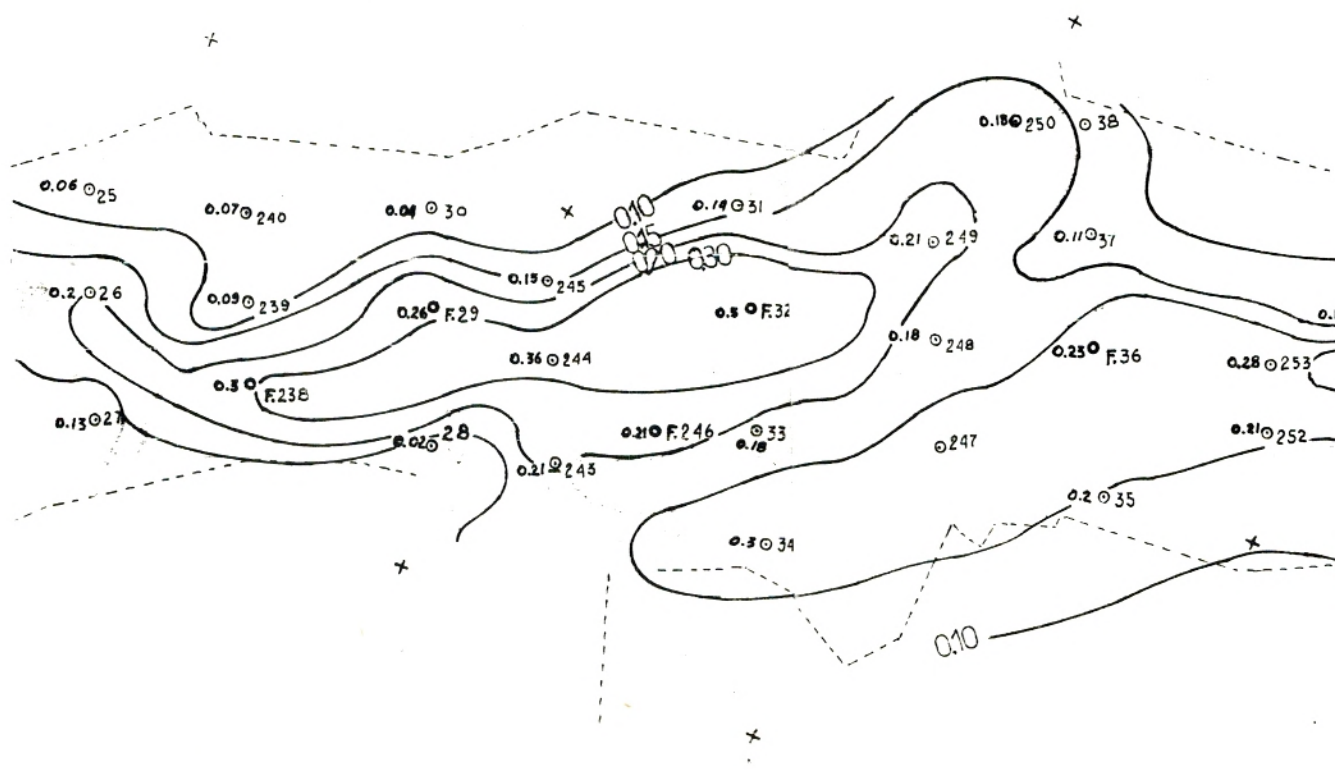
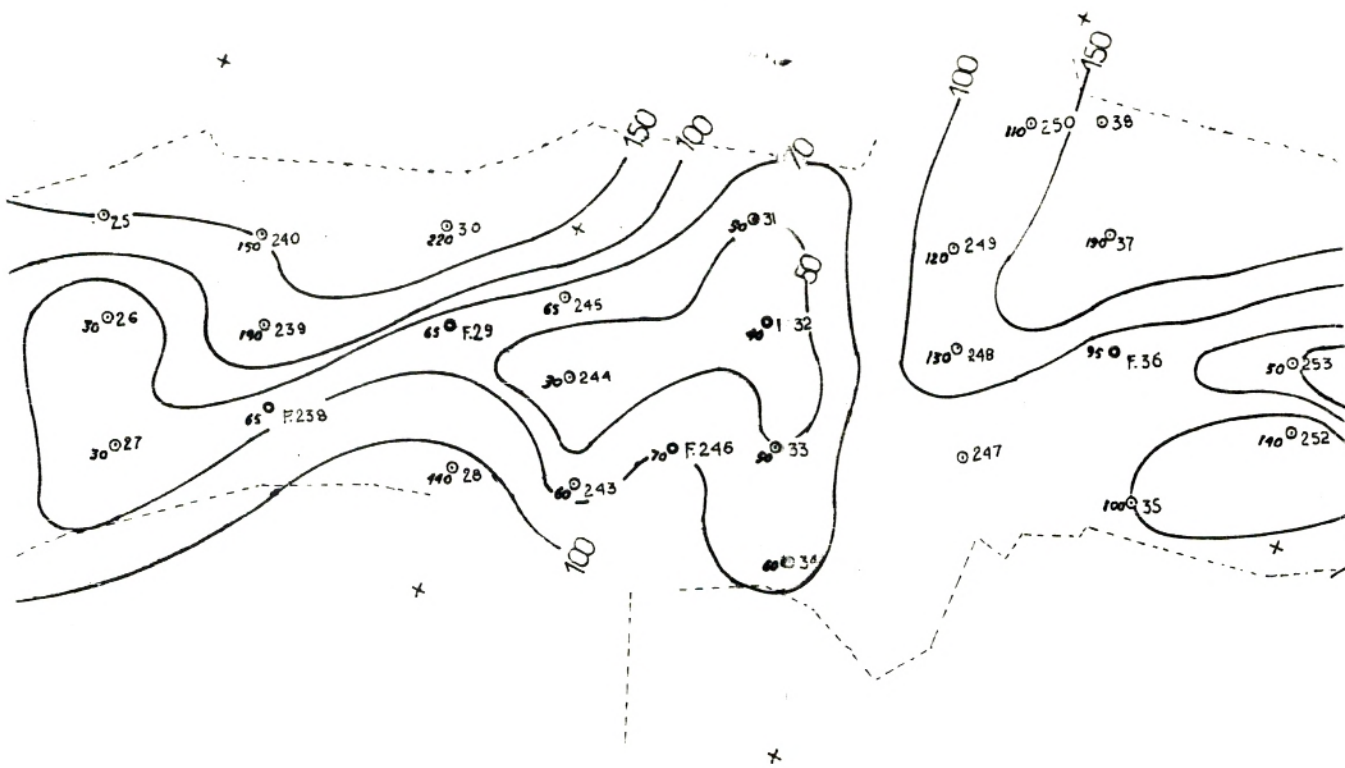
717,500  
+ 2.621,500

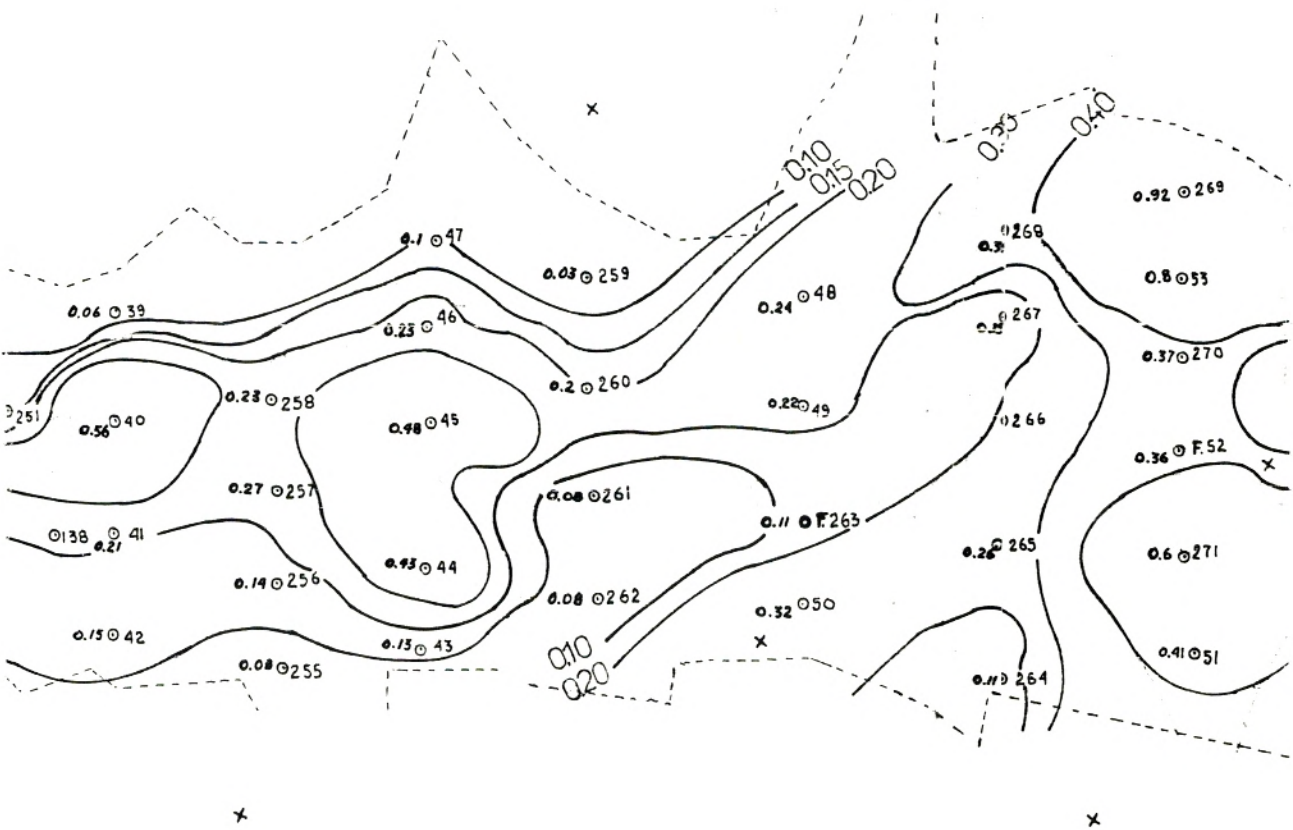
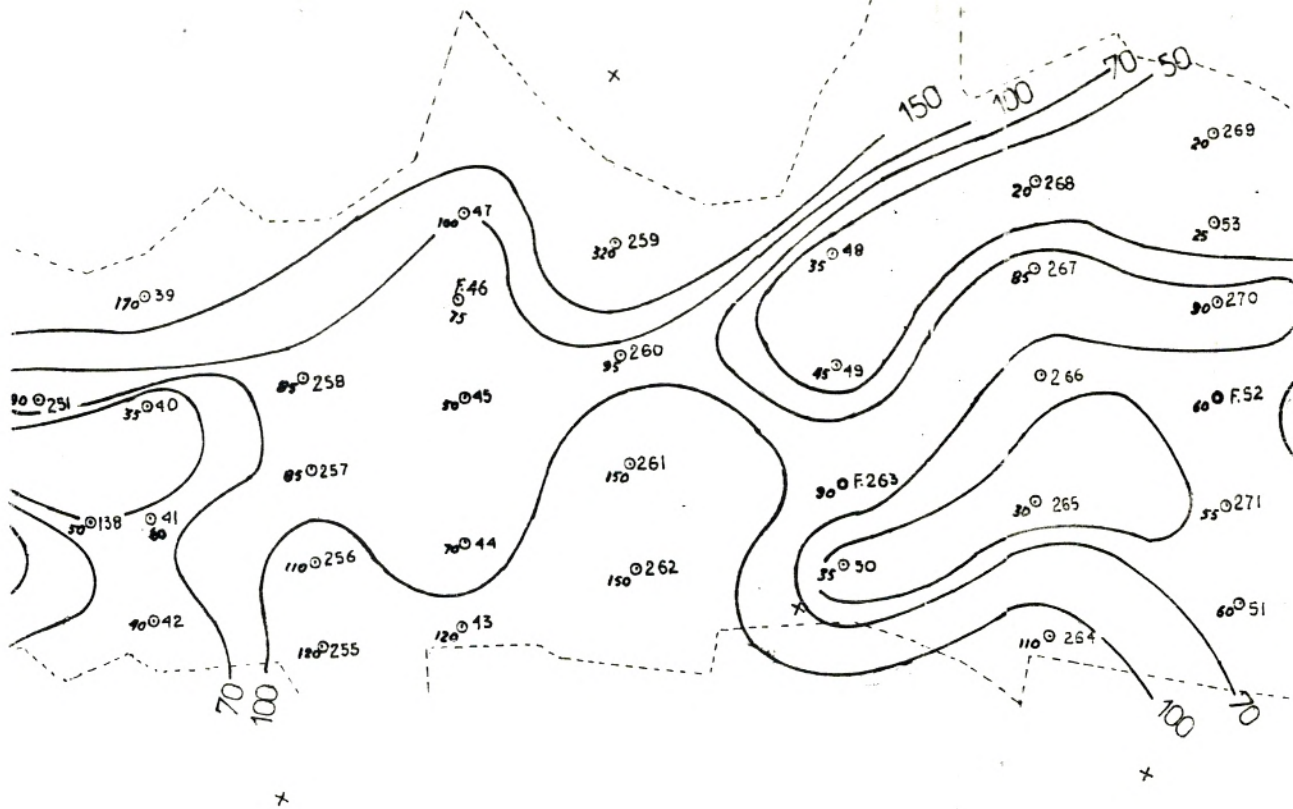


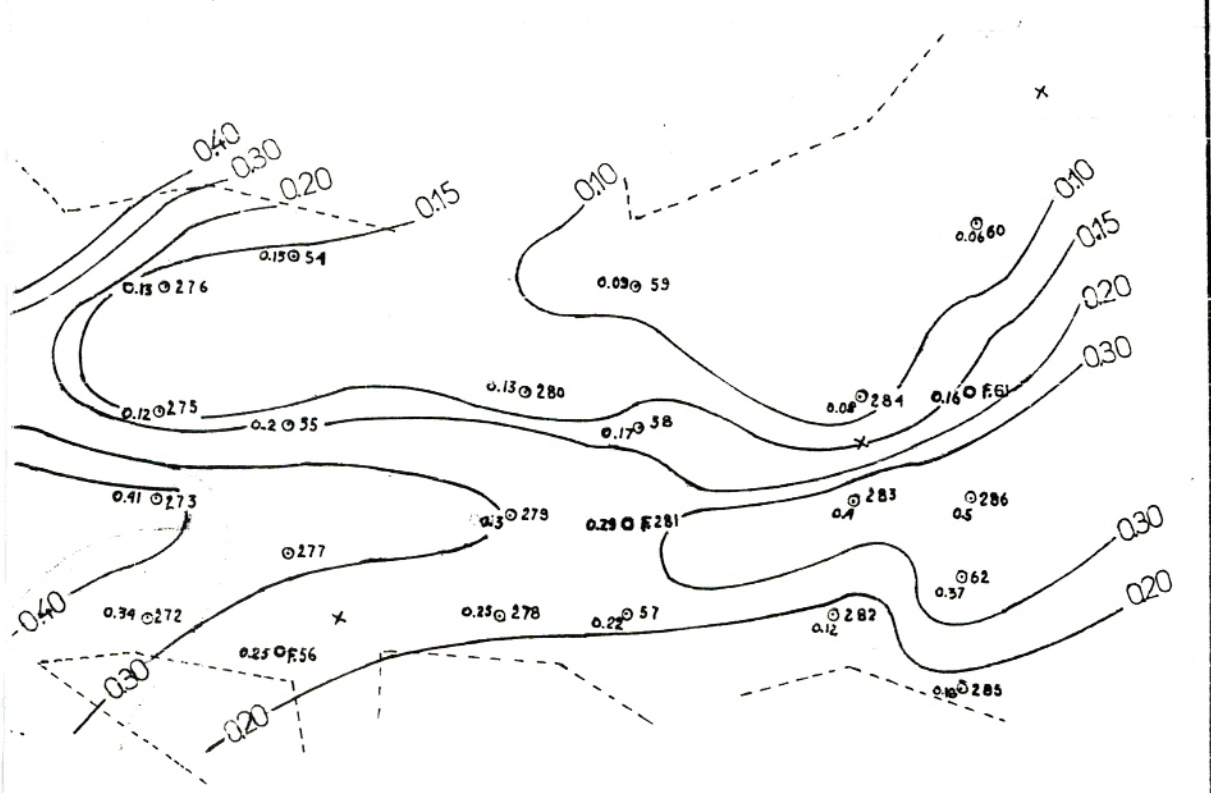
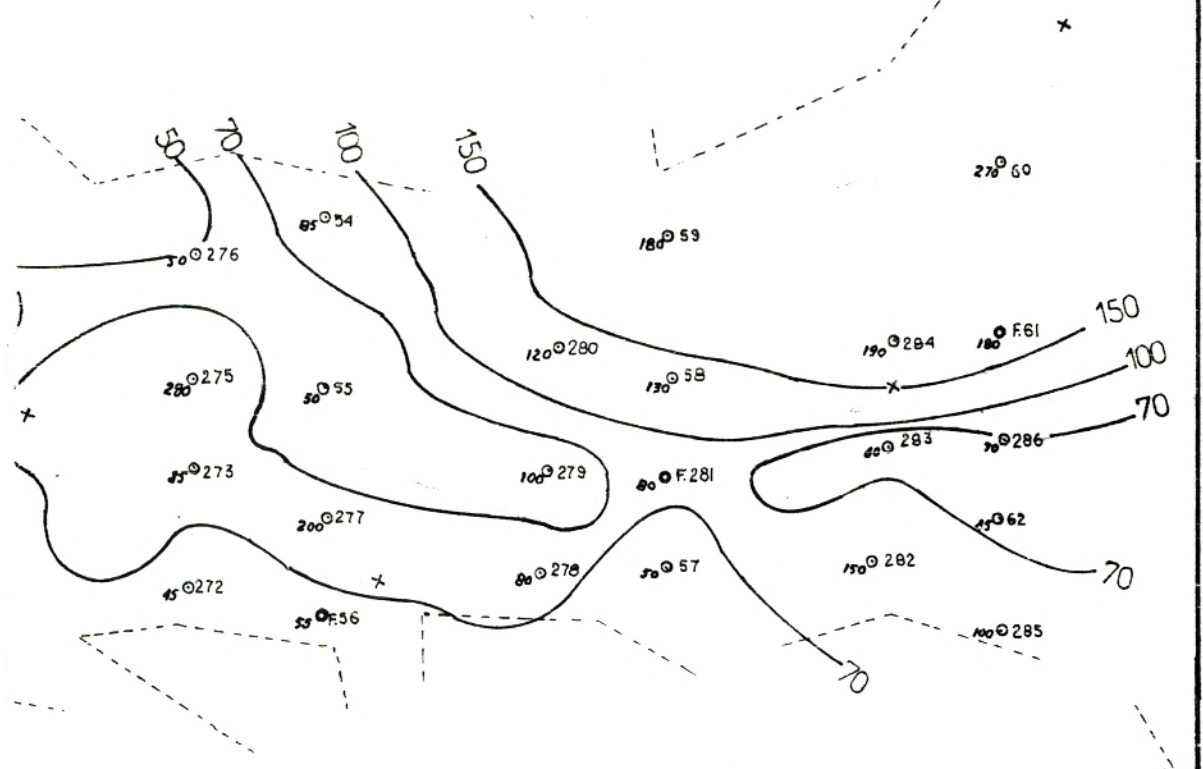
718,000  
+ 2.65











## 6 ) CALCUL de la RESERVE d'EAU :

Pour évaluer la réserve d'eau comprise dans les limites de notre étude ,nous nous inspirerons d'un procédé mis au point par J.P.Henriet (1976).

### a ) Determination de la Porosité des Alluvions :

La lithologie ,la porosité (et la structure des pores) ,les pressions sont généralement considérés comme étant les variables premières affectant les vitesses tandis que les effets de la température sont supposés être de second ordre et habituellement négligés dans les études sismiques .

Pour l'Oued In-Amquel ,les alluvions sont dépourvues d'argile comme nous l'avons constaté sur les nombreux logs de forage .

Ainsi nous pouvons utiliser la formule de Wood ,donnant la porosité des alluvions non argileuses en fonction de leur vitesse.

$$1/V^2 = ( P/V_e^2 + 1.6(1-P)/V_s^2 ) ( P + (1-P)\sigma )$$

où :

P : porosité totale des alluvions aquifères

V : vitesse des ondes sismiques dans les alluvions aquifères

V<sub>e</sub> : vitesse des ondes sismiques dans l'eau

V<sub>s</sub> : vitesse des ondes sismiques dans la partie solide  
des alluvions

σ : densité de la partie solide des alluvions

Prenons comme moyenne de vitesse des alluvions aquifères :1700m/s

Si l'on prend en outre ,pour l'eau : V<sub>e</sub> = 1450m/s

Le granit compact atteint une densité σ = 2.8

Le calcul va donner : P = 30 %

Notons, à titre de comparaison ,qu'on attribue aux sables:20 à 35 % ( E.Parkhomenko ,1967 ).

En outre c'est l'ordre de grandeur trouvé pour les sables moyens aravelleux des oueds du Hoggar ,par O.Saighi (1984).



### β) Relation entre la Porosité et la Résistivité des

#### Alluvions :

G.E. Archie (1947) a établi la relation entre la résistivité  $\rho$  d'une formation aquifère non argileuse, la résistivité  $\rho_e$  de l'eau d'imbibition et la porosité totale  $P$

$$\rho / \rho_e = F = a / P^m$$

avec

$F$  : facteur de formation

$m$  : coefficient de cimentation caractérisant la texture

$a$  : paramètre empirique

Nous utiliserons dans notre cas l'expression suivante:  
(E. Parkhomenko)

$$\rho / \rho_e = 0.88 / P^{1.37}$$

### γ) Calcul de la Réserve d'Eau :

Réécrivons l'expression précédente

$$1 / \rho = P^m / a \rho_e$$

Exprimons la conductance de la couche aquifère

$$\Delta C = h / \rho = h P^m / a \rho_e = (h P) \cdot P^{m-1} / a \rho_e$$

$(h P)$  est le volume d'eau  $\delta W$  contenu dans une colonne de hauteur  $h$  de l'aquifère et de section unité.

$$\text{Soit } \Delta C = \delta W \cdot P^{m-1} / a \rho_e \quad \text{ou} \quad \delta W = a \rho_e \cdot \Delta C / P^{m-1}$$

Ainsi le calcul de la réserve de l'aquifère peut se résumer en un problème d'intégration de la conductance sur toute la surface du réservoir

$$\text{Donc } W = a \rho_e / P^{m-1} \cdot \int \Delta C \Delta S$$

L'intégration sera effectuée par une méthode graphique en utilisant le planimétrage des surfaces englobées par les isolignes de la carte des conductances (Fig.49)

La mesure concernera un espace ,allant de la route Transsaharienne jusqu'à une zone située à 10km en amont .Elle a été exécutée sur les courbes  $\Delta C = 0.1 , 0.15 , 0.2 , 0.3$  et  $0.4 \text{ Ohm}^{-1}$  .

- Limites d'intégration : considérons le S.E 8 (fig.43) situé sur l'isoligne  $\Delta C = 0.2 \text{ Ohm}^{-1}$  .

L'aquifère constitué de gravier moyen de résistivité  $80 \text{ Ohm.m}$  a une épaisseur de  $14\text{m}$  .Le niveau statique mesuré était de  $3.5\text{m}$  et le débit très bon .

La correspondance entre les épaisseurs données par le log géologique et celles de l'interprétation automatique ,incite à admettre la valeur  $80 \text{ Ohm.m}$  comme fiable .

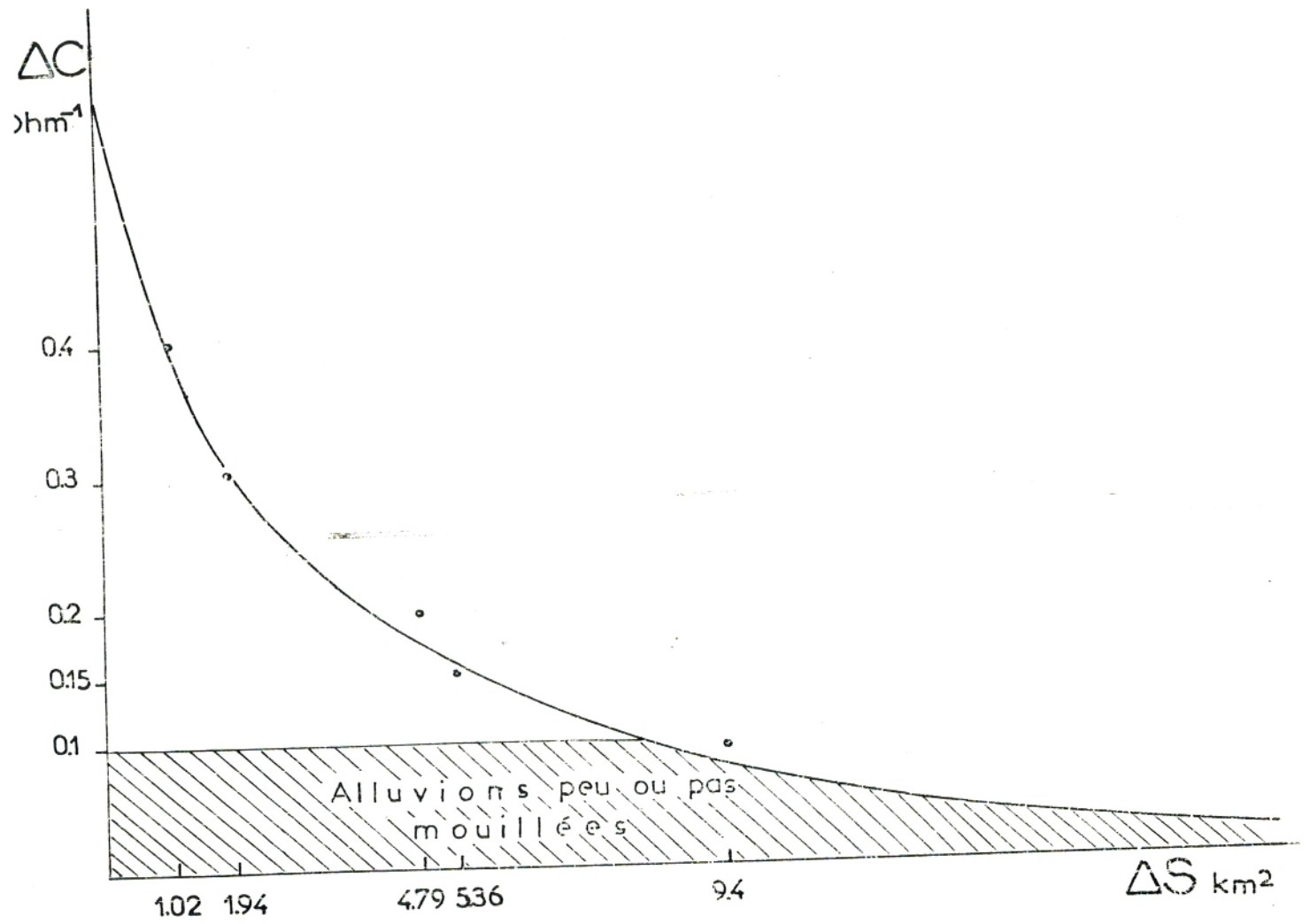
Il en est de même pour d'autres S.E situés plus près de la ligne médiane de l'Oued ,pour lesquels la conductance est plus grande et dont les résistivités de la formation aquifère sont comprises en général entre  $30$  et  $70 \text{ Ohm.m}$  .

Inversement ,pour les points (S.E F.214) dont la conductance est inférieure à  $0.1 \text{ Ohm}^{-1}$  ,c'est à dire pour les formations qui ont des résistivités en général de l'ordre de  $150 \text{ Ohm.m}$  (Fig.49) ou plus nous pouvons les considérer correspondant à des alluvions assez sèches .

Donc l'isoligne  $0.1 \text{ Ohm}^{-1}$  qui suit et se confond quelquefois avec le bord de l'Oued ,peut être considérée comme la limite des alluvions que nous considérerons comme humides (fig.50).

- Résistivité de l'eau de la nappe : la minéralisation des eaux varie de  $329 \text{ mg/l}$  à  $384 \text{ mg/l}$  ,valeurs largement supérieures à celles des autres nappes de la région de Tamanrasset (Oueds Amsel , Tit , Outoul) .De plus la température des eaux est de l'ordre de  $23^\circ\text{C}$  . Ceci donne ,grâce à un abaque de correspondance ,une résistivité de l'eau égale à  $10 \text{ Ohm.m}$  .

FIG. 50



- Calcul de la Réserve :

La valeur de l'intégrale  $\int \Delta C \cdot \Delta S$ , en tenant compte des limites d'intégration, est représentée par l'aire comprise entre l'axe des ordonnées, l'horizontale menée de la valeur  $0.1 \text{ Ohm}^{-1}$  et la courbe.

On mesure :  $\int \Delta C \cdot \Delta S = 1.18 \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{km}^2$

Donc :  $W = 0.88 \times 10 \times 1.18 / 0.3^{1.37-1}$

$$\underline{W = 16.2 \text{ } 10^6 \text{ m}^3}$$

## CONCLUSION GENERALE :

Le but de ce travail a été de mettre au point des méthodes de traitement et de résolution automatique des problèmes direct et indirect en courant continu appliqués à des structures supposées tabulaires ,et de les expérimenter sur des cas concrets .

Les travaux théoriques publiés antérieurement à notre étude nous ont permis d'effectuer la mise en équation de ces problèmes ,avec l'opportunité de rassembler et synthétiser leurs résultats les plus importants .

La résolution numérique utilisant les deux concepts de récurrence et d'approximations successives, a abouti à l'établissement de plusieurs programmes de traitement automatique ,de complexité croissante ,et privilégiant la méthode d'interprétation directe .

Leur utilisation ,bien que généralisable à tous les modèles possibles ,reste cependant pour l'instant au stade expérimental et leur application de routine nécessitera un travail d'optimisation .

Notre souci , en utilisant un langage simple dans l'établissement de ces programmes a été de les rendre abordables au plus grand nombre de praticiens .

L'application au problème de détermination de la structure des dolomies constituant l'aquifère de la région de Tlemcen ,nous a permis de préciser le compartimentage des formations par le jeu de failles de direction en général NNE-SSO les secteurs de recoupement pouvant présenter un intérêt hydrogéologique .

Pour confirmer la présence de ces failles , il serait utile de procéder à quelques profils de résistivités avec un dispositif à 2 électrodes ou demi-Schlumberger ,dispositif qui semble fournir les meilleurs résultats pour des terrains très résistants ( Verma et. al 1980).

Les paramètres de Dar-Zarrouk ,ont été largement utilisés dans les programmes de traitement .

A In-Amguel ils ont également servi à l'estimation de la réserve d'eau d'une nappe alluviale .

Les épaisseurs des formations reposant sur le substratum sont assez grandes .Des sondages électriques d'élongation supérieure à 300m seraient intéressant à expérimenter pour étudier également les variations de résistivités de la roche dure ce qui permettrait de localiser ses zones de fissuration .

Ayant essentiellement considéré dans cette étude le cas des milieux tabulaires ,nous envisageons d'ores et déjà de traiter dans des travaux ultérieurs le problème des structures plus complexes à partir par exemple de modèles tridimensionnels .

## BIBLIOGRAPHIE

- ASTIER J.L. 1971 . Géophysique appliquée à l'Hydrogéologie Ed.Masson
- BARANOV V. 1976 . Calcul de courbes de sondages électriques à l'aide  
de fonctions d'échantillonnage Geoph.Pros. vol.24
- BARTHES V. 1977. Modélisation des problèmes de Prospection  
électrique en milieux non-tabulaires  
Thèse 3<sup>e</sup> cycle Ac.Montpellier
- BICHARA M.,LAKSHMANAN J. 1976 Fast automatic processing of  
resistivity soundings Geoph.Pros. vol.24
- BOUMAH RAT M.,GOURDIN A. 1983 Méthodes numériques appliquées  
Ed.OPU Alger
- COLLIGNON B. 1986 Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques  
des Monts de Tlemcen Thèse Doctorat Université Avignon
- GHOSH D.P. 1971 The application of linear Filter theory to Direct  
interpretation of Sev measurements Geoph.Pros.vol.19
- GREEN A . 1974 The Seismic refraction method Geoexpl.vol.12
- HENRIET J.P. 1976 Direct applications of the Dar-Zarrouk parameters  
in groundwater surveys Geoph.prosp.vol.24
- JOHANSEN H.K. 1975 An interactive computer graphic display terminal  
system for interpretation of Sev Geoph.Pros.vol.23
- KOEFOED O. 1970 A fast method for determining the layer  
distribution from the raised kernel function  
Geoph.Pros.vol.18
- 1976 Recents developments in the Direct interpretation  
of Sev. Geoexpl.vol.14

- KUNETZ G. 1966 Principles of direct current resistivity prospecting  
Geoexploration Monographs
- MAHAMMED D. 1975 Application de la Prospection électrique à l'étude  
de la salure en Alsace Mémoire Ing.Géophysicien  
IPG.Strasbourg
- 1978 Analyse de vitesses dans la recherche de  
matériaux pour la future jetée de Jijel  
Ministère des Travaux Publics
- 1980 Prospection géophysique dans les Monts de Tlemcen  
Rapport INRH
- BOUGUERNE A. 1981 Prospection géophysique à In-Amguel  
Rapport INRH
- MENCHIKOV V.,CHOUMAKOV M.,MAHAMMED D. 1982 Cours et T.P de  
Prosp.géophys. Fasc.INH Boumerdès
- MUNDRY E. ,HOMILIUS J. 1972 Resistivity measurements in valleys  
with elliptic cross section Geoph.Prospect.vol.20
- MEINARDUS H.A. 1970 Numerical interpretation of resistivity  
soundings Geoph.Prospect.vol.3
- NYMAN C.,LANDISMAN D. 1977 VES dipole-dipole filter coefficients  
Geophysics vol.42
- PARKHOMENKO E.1967 Electrical Properties of rocks Plenum Press
- PATELLA D. 1975 A numerical Computation Procedure of the direct  
interpretation of Sev Geoph.Prospect.vol.23
- ROCROI J.P.,DUPRAT A 1973 Applications pour l'interprétation  
des sondages électriques Geoph.Prospect.vol.21
- SAIGHI O. 1984 Etude des Aquifères du Hoggar  
Thèse d'Hydrogéologie 3<sup>e</sup> cycle Univ.Alger



STEPHANESCO Ş., SCHLUMBERGER C. et M. 1930 Sur la distribution  
électrique potentielle autour d'une prise de terre pour des couches  
horizontales Journ. Physique et le Radium

VERMA K. et al 1980 Use of resistivity methods for study of  
some faults in India Geoexpl.vol.18

ZOHDY A. 1974 Use of D.Z curves in the interpretation of Ves  
Geological Survey Bulletin 1313 D

--- 1975 Automatic interpretation of Ves using modified  
D.Z functions Geolog. Surv.Bull. 1313 E