

P102

Interprétation automatique des sondages électriques

H. LAKSHMANAN
Ingénieur géologue
Directeur technique de la Cie
de prospection géophysique française

Y. BERTRAND
Ingénieur géologue chargé de cours
à l'École nationale supérieure des mines de Paris

et M. BICHARA
Ingénieur
Docteur en mathématiques

Présentation

M. RAY
Chef de la section de géologie prospections
Laboratoire central

PAR sa simplicité de mise en œuvre, la prospection électrique demeure la méthode géophysique la plus employée pour les études sommaires sous la forme du trainé ou de la carte de résistivité. En revanche, l'emploi du sondage électrique est resté très limité, cela étant principalement dû aux problèmes d'interprétation. Pour le faciliter, de nouveaux catalogues d'abaques très complets ont été édités, mais ils restent de toute manière limités aux schémas simples : trois couches et parfois quatre.

Cependant, on peut maintenant espérer aller au-delà, en ayant recours au calcul sur ordinateur.

Le Laboratoire de Bordeaux a mis au point un programme de calcul et de tracé des courbes de sondages électriques pour un système à n couches horizontales. Pour un problème donné, on peut donc se constituer un mini-catalogue, qui permet de faire une première interprétation : on peut alors recalculer la courbe afférente au schéma adopté et vérifier qu'elle correspond bien aux points mesurés sur le terrain.

L'article de MM. Lakshmanan, Bertrand et Bichara est plus ambitieux, puisqu'à partir des mesures de terrain et d'un certain nombre de données géologiques (nombre de couches, plages de variation de leur épaisseur et de leur résistivité), l'ordinateur fournit une interprétation, avec une estimation de sa précision. En faisant varier ces consignes, on obtient facilement plusieurs schémas et l'interprète doit choisir celui qui lui paraît le plus vraisemblable.

Cet ensemble très séduisant appelle cependant quelques remarques :

- le principe de l'équivalence limite, dans tous les cas, la précision de l'interprétation du sondage électrique, plusieurs solutions étant également acceptables, en particulier, une couche ne peut être mise en évidence par les mesures sur le terrain, que si elle présente un contraste de résistivité avec les couches encaissantes suffisant (de l'ordre de 3 à 5) ;

— pour pouvoir choisir, il est nécessaire d'avoir des données géologiques sur les épaisseurs de couches et sur leur résistivité suffisamment précises. Dans ce cas, le programme décrit est intéressant, mais le programme direct de calcul du Laboratoire de Bordeaux permet d'obtenir des résultats analogues ;

— quelle que soit la méthode d'interprétation, la précision restera faible et insuffisante pour l'exécution des travaux. Des sondages mécaniques d'étalonnage resteront nécessaires, ils permettent d'ailleurs de reprendre et de préciser les sondages électriques ;

— plus les méthodes de dépouillement sont sophistiquées, plus les mesures sur le terrain doivent être précises. Malheureusement cet aspect est souvent négligé : de nombreuses mesures sont discutables, à cause de défauts d'isolement dans les câbles ou les appareils de mesures, ou même à cause de mesures faites trop rapidement, les corrections de PS étant approximatives.

EMPLOI DES PARAMETRES DE RESISTIVITE EN GEOLOGIE

La résistivité des sols et des roches dépend de leur nature et de leur état physique (fissuration, porosité, teneur en eau, teneur en argile, etc.). La connaissance des résistivités vraies des diverses tranches de sol peut donc permettre, en théorie, de dresser une coupe géologique et ceci, d'autant plus facilement, qu'on connaît le contexte géologique intéressé. La connaissance des résistivités dans un sol ou une roche homogène permet de localiser dans cette formation des zones de caractéristiques géotechniques ou hydrogéologiques différentes. La résistivité mesurée, par un dispositif quadripôle est appelée résistivité apparente et dépend des résistivités des diverses couches et du dispositif de mesure. Dans le cas d'un sondage électrique, on fait varier la longueur de la ligne d'émission de courant et on mesure, pour chaque longueur de ligne, la résistivité apparente. La courbe de la résistivité apparente en fonction de la longueur de ligne est appelée courbe de sondage électrique. Le problème général consiste à déduire de cette courbe la superposition des couches de terrain et de les caractériser par leur épaisseur et leur résistivité.

Rappel des notions fondamentales

L'expression de la résistivité apparente d'un terrain tabulaire horizontal est donnée par l'expression :

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 2 r^2 \int_0^{+\infty} K(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right]$$

dans laquelle :

λ = paramètre d'intégration

J_1 = fonction de Bessel d'ordre 1 et de première espèce

K = une fonction des épaisseurs et des résistivités des couches

ρ_1 = résistivité du terrain de surface

r = distance entre la source de courant et l'électrode de potentiel (ou la demi-longueur de ligne AB)

Les couches sont supposées homogènes et isotropes.

Etant donné une courbe de sondage électrique parfaite, il n'existe théoriquement qu'un seul schéma parfait de terrain tabulaire et horizontal qui donne cette courbe de sondage électrique.

Dans la réalité, étant donné la précision des mesures sur le terrain, on s'aperçoit que dans certaines limites, une courbe de sondage électrique peut correspondre à plusieurs schémas tabulaires et horizontaux.

Cette imprécision dans la solution des problèmes de sondages électriques est connue sous l'appellation de principes d'équivalence.

Premier principe

Lorsqu'un terrain résistant est situé entre deux terrains conducteurs, il se caractérise uniquement par sa résistance transversale $R = e\rho$ lorsque son épaisseur est faible et sa résistivité forte. Lorsque la résistivité se rapproche de celle des terrains encaissants et que son épaisseur augmente, ce sont ces deux valeurs et non leur produit qui deviennent séparément des caractéristiques de la couche.

Les limites de e et de ρ par rapport aux mêmes paramètres des terrains encaissants sont fournies par des abaques.

Second principe

Il est relatif, dans les mêmes conditions, à un terrain conducteur compris entre deux terrains résistants. On caractérise le conducteur par sa conductance $C = e \cdot \sigma = \frac{e}{\rho}$, σ étant la conductibilité.

Corollaire

Toujours dans certaines limites, on peut décomposer ou grouper des couches pourvu qu'on ait :

$$R = \sum e_i \rho_i = \text{constant}$$
$$\text{ou } C = \sum e_i / \rho_i = \text{constant}$$

ρ_i et e_i étant la résistivité et l'épaisseur des couches de numéro d'ordre i .

Principe d'équivalence généralisé - Courbes de Dar Zarrouk

On peut calculer la résistance transversale cumulée R_z et la conductance cumulée C_z à une profondeur z , pour un schéma connu [1].

La valeur $Z = \theta_z = \sqrt{R_z C_z}$ a la dimension d'une longueur

résistivité $R_0 = \sqrt{\frac{R_z}{C_z}}$ a la dimension d'une

La courbe $Z = f(R_0)$ est appelée courbe de Dar Zarrouk.

On appelle quelquefois θ coefficient de macroanisotropie.

Dans le cas d'un schéma compliqué, on peut lisser la courbe $Z = f(R_0)$ et obtenir un schéma équivalent plus simple, les couches étant alors groupées et affectées de caractéristiques équivalentes.

Solution du problème $\rho_a = f(e_i, \rho_i)$

A partir d'une configuration de terrains homogènes isotropes, tabulaires et horizontaux, on peut calculer la courbe de sondage électrique.

Il y a quelques années, il n'existait sur le marché que des catalogues très réduits de courbes de sondage électrique, qu'on utilisait en se servant parallèlement des courbes de point auxiliaire (méthodes Cagniard, Hébert, Orellana, etc.).

Le calcul sur ordinateur étant maintenant devenu très classique, on peut, pour chaque problème pratique qui se pose, se fabriquer un jeu de courbes bien adapté à la géologie du site à étudier. L'utilisation d'un tel programme est très peu onéreuse.

Dans la pratique, l'utilisation des abaques devient très délicate dès qu'on dépasse trois ou quatre couches. Le cas classique du problème à trois couches est celui des alluvions avec nappe en charge sous le limon et substratum conducteur. Mais la présence d'une tranche d'altération du substratum, ou de sables ou graviers secs sous le limon, modifie considérablement l'interprétation et oblige à tenir compte d'un plus grand nombre de paramètres. Dans le cas comparable où le substratum est résistant, on hésite à utiliser la méthode des sondages électriques en raison du manque de contraste entre les résistivités des couches intéressantes.

Enfin, dans les études géologiques structurales (principalement pour les recherches d'eau) on est amené à traiter des problèmes à plus de cinq couches pour lesquels l'utilisation d'abaques devient délicate, en raison de l'impossibilité pratique de prévoir toutes les variations possibles des divers paramètres, de toutes les façons possibles.

Interprétation automatique des sondages électriques

C'est ainsi que, depuis quelques années, on tente à l'aide des calculs à l'ordinateur de traiter les courbes de sondages électriques pour en rechercher directement une solution géologiquement valable.

Quelques rares tentatives ont été faites, dont certaines ont fait l'objet de publications [2]. Nous apportons ici notre contribution en présentant une méthode qui a l'avantage d'être fiable, très bon marché et très souple, c'est-à-dire pouvant, directement et à la volonté de l'ingénieur, s'adapter à la géologie du site étudié.

Nous ne parlerons ici que du traitement individuel du sondage électrique, les solutions étant géologiquement suffisamment bien adaptées pour qu'une synthèse des résultats sur un profil se fasse sans traitement supplémentaire.

PROGRAMME AUTOMATIQUE D'INTERPRETATION DES SONDAGES ELECTRIQUES

Principe

Ce programme permet d'apporter une ou plusieurs solutions aux courbes de sondages électriques (résistivité apparente en fonction de la longueur de ligne).

Nous avons adapté le programme pour qu'il donne la solution géologique intéressante dans le cas où, d'après les principes d'équivalence, plusieurs possibilités de solutions se présentent. C'est-à-dire que pratiquement on est maître du nombre de couches et qu'on peut imposer à chaque couche des limites de résistivités et d'épaisseurs. Actuellement, on peut traiter jusqu'à 21 couches. Il est aisé d'augmenter le nombre de couches à traiter, mais l'utilisation devient très onéreuse et le traitement des résultats très lourd.

Pratiquement, on donne à l'ordinateur :

- la courbe du sondage électrique (valeurs de résistivités apparentes),
- le nombre de couches qu'on désire voir apparaître dans la solution,
- les intervalles de variation des résistivités et des épaisseurs.

On peut donc traiter le problème de plusieurs façons :

Méthode rigide

On impose un nombre de couches très limité, compatible avec la géologie. On peut alors :

- fixer les épaisseurs et faire varier les résistivités pour, par exemple, s'étalonner sur un sondage,

- fixer certaines épaisseurs et laisser les autres libres,
- fixer les résistivités dans des limites raisonnables et faire varier les épaisseurs.

Méthode à grand degré de liberté

Ce cas se présente lorsque les terrains sont très hétérogènes ou lorsque la courbe de sondage électrique ne permet pas de déterminer facilement le nombre des couches, ou encore lorsque le nombre de couches apparaissant bien, on désire obtenir une précision meilleure en subdivisant des couches supposées à première vue homogènes. On peut alors utiliser le programme à ses possibilités maximales (21 couches), soit en imposant encore certains intervalles de variation, soit en laissant totalement libres tous les paramètres (variation de 0 à l'infini).

Enfin, signalons deux points très importants :

- à l'intérieur des fourchettes dans lesquelles on désire voir varier les paramètres, on peut imposer des valeurs moyennes de e et ρ de départ du calcul, telles que le résultat se rapprochera le plus possible de ces valeurs,
- on se fixe la résistivité de la dernière couche avec le maximum de soin. On a, en général, une infinité de solutions possibles au vu de la courbe, mais des possibilités plus réduites en regard de la géologie.

A l'issue du calcul, la machine donne :

- un tableau des résultats : épaisseurs et résistivités des différentes couches ;
- les paramètres de Dar Zarrouk ;
- certaines valeurs des tests exécutés, en particulier le critère que nous reproduisons pour chaque exemple cité. Ce critère exprime, d'une certaine façon, les écarts cumulés entre la courbe proposée et la courbe recalculée à partir de la solution trouvée :

--- un critère supérieur à $0,5 \times 10^{-1}$ indique une mauvaise identification,

--- un critère compris entre $0,5 \times 10^{-1}$ et $0,1 \times 10^{-1}$ indique une identification qui peut être bonne,

--- un critère compris entre $0,1 \times 10^{-1}$ et $0,5 \times 10^{-2}$ indique une bonne identification,

--- un critère inférieur à $0,5 \times 10^{-2}$ indique une identification excellente ;

4. un tableau donnant les valeurs des résistivités apparentes en fonction de la longueur de ligne :

--- de la courbe de sondage électrique proposée à la machine,

--- de la courbe recalculée à partir de la solution fournie ;

5. un graphique de ces courbes suivant une échelle logarithmique.

Les justifications théoriques du procédé feront l'objet d'un article qui sera présenté au congrès de l'European Association of Exploration geophysicists (Madrid 1974) par MM. Bichara et Lakshmanan et intitulé : « Fast Automatic Processing of Resistivity Soundings ».

Exemples

Pour illustrer les possibilités du programme, on montrera dans ce qui suit, le traitement de plusieurs cas individuels dont certains constituent un profil.

Exemple théorique (fig. 1)

Nous avons choisi la courbe théorique correspondant au schéma suivant :

- $\rho_1 = 100 \Omega m$ $e_1 = 2m$ $R_2 = e_2 \rho_2 = 2000 \Omega m^2$
- $\rho_2 = 1000 \Omega m$ $e_2 = 2m$
- $\rho_3 = 20 \Omega m$ $e_3 = 10m$ $C_3 = e_3/\rho_3 = 0,5$
- $\rho_4 = 100 \Omega m$

Il existe plusieurs solutions qui donnent cette courbe. D'après certains abaques d'équivalence, on peut avoir :

$$2,60 < \rho_2 < \infty \Omega m \quad 0 < e_2 < 7,7 m$$

$$0 < \rho_3 < 56 \Omega m \quad 0 < e_3 < 2,8 m$$

On part de la courbe théorique correspondant à un tel schéma et on l'interprète comme s'il s'agissait d'une courbe de terrain. Connaissant a priori la solution, la détermination automatique des paramètres e et ρ peut ainsi être vérifiée.

Deux interprétations automatiques de cette courbe ont été faites.

Interprétation rigide à quatre couches

On propose à la machine 4 couches, avec profondeurs fixées à 5 m pour le résistant et 25 m pour le conducteur, avec fourchettes de 0,20 m. Les résultats ainsi que la courbe reconstituée pour la solution trouvée font l'objet de la figure 1. Cette courbe

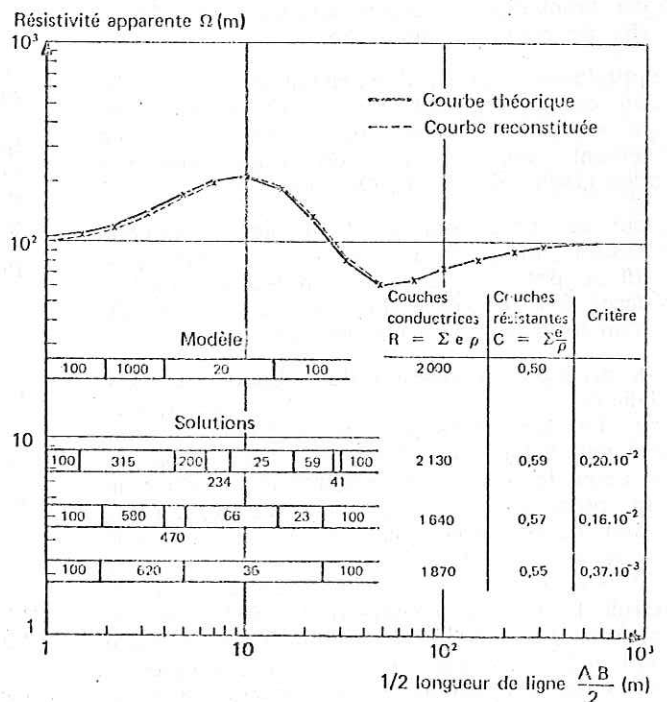


Fig. 1 - Cas théorique correspondant au modèle.

reconstituée s'éloigne très peu de la courbe proposée tandis que la résistance transversale et la conductance des terrains résistants et conducteurs sont fournies à 10-15 % près.

Interprétation plus souple à 6 couches (fig. 1)

On propose, dans ce cas, un schéma à 6 couches avec liberté totale pour les paramètres épaisseur et résistivité. La courbe reconstituée se confond avec la courbe reconstituée précédente. On obtient $R = \epsilon\rho$ des résistants égale à 1 640 au lieu de 2 000 et $C = e/\rho$ des conducteurs égale à 0,57 au lieu de 0,50. Cette anomalie s'explique aisément quand on observe que le premier conducteur avec la valeur 66 Ωm joue encore dans la descente, en partie, le rôle d'un résistant dont il faudrait ajouter une partie de la résistance transversale à celle des terrains supérieurs. On voit, à l'aide de cet exemple, que les principes d'équivalence simple ($\epsilon\rho$ et e/ρ pris séparément) sont insuffisants pour comparer deux schémas. L'analyse des courbes de Dar Zarrouk serait plus significative.

Interprétation à 8 couches (fig. 1)

On obtient une masse résistante à $R = 2130 \Omega\text{m}^2$ contre $2000 \Omega\text{m}^2$ et une masse conductrice $C = 0,59$ contre 0,50.

Ces trois calculs pourraient être améliorés en imposant un nombre d'itérations plus grand. Il est de plus possible de proposer un grand nombre de couches et de regrouper les résultats en terrains équivalents en passant par le calcul des courbes de Dar Zarrouk. Cependant, le calcul avec un nombre de couches le plus proche possible de la réalité nous semble préférable.

Exemple d'un étalonnage (fig. 2)

Un sondage électrique a été exécuté sur un sondage mécanique d'étalonnage. Le tableau ci-dessous donne la coupe du sondage avec profondeurs et épaisseurs des couches, la fourchette de variation des résistivités imposée au calcul ainsi que les résistivités trouvées par le calcul automatique.

On a laissé cependant à la machine la possibilité de faire varier les épaisseurs dans une fourchette de 20 cm au-dessus et 20 cm au-dessous de la valeur connue. Le sondage électrique intègre une quantité de terrain qui permet de supposer une telle variation des épaisseurs par rapport au forage (on aurait pu aisément imposer une variation qui ne soit pas supérieure à 1 mm).

Sur la figure 2 nous avons représenté la courbe de terrain et la courbe reconstituée à partir de la solution trouvée. On voit que ces courbes sont très voisines et que le critère d'identification est bon.

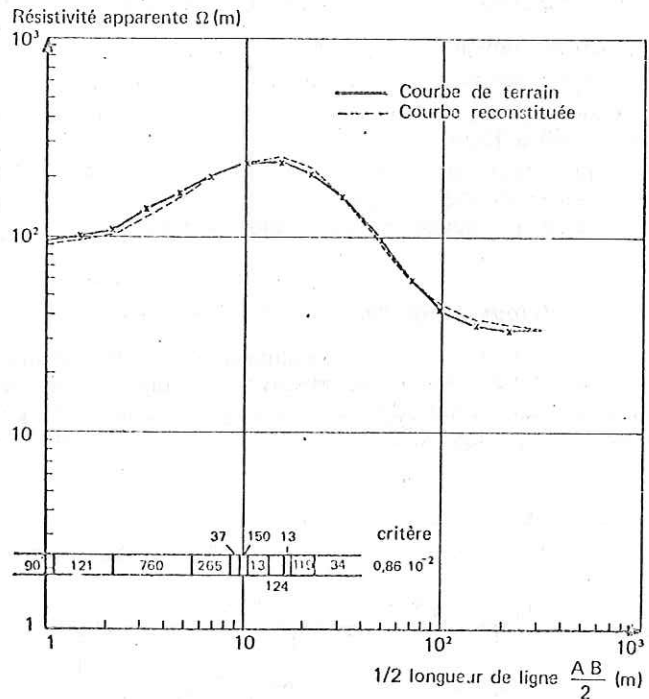


Fig. 2 - Sondage d'étalonnage.

Profondeurs (m)	Données du sondage mécanique		Fourchette des résistivités imposée par l'ingénieur (Ωm)	Résultats du calcul	
	Coupe	Epaisseur (m)		Résistivité (Ωm)	Epaisseur (m)
0 - 1,10	grave argileuse	1,10			1,30
1,10 - 5,40	grave hors nappe	4,30	80 - 1 000	121	0,90
5,40 - 8,90	grave sous nappe	3,50	500 - 1 000	760	3,20
8,90 - 9,90	argile	1	150 - 300	265	3,30
9,90 - 10,80	grave	0,90	10 - 50	37	1
10,80 - 13,40	grave et limon argilo-sableux	2,60	100 - 200	150	0,80
13,40 - 16,30	grave	2,90	10 - 70	13	2,80
16,30 - 17,30	grave	2,90	80 - 250	124	3,10
17,30 - 23,10	limon argileux	1	10 - 70	13	0,90
23,10	grave	5,80	80 - 250	119	5,70
	terrain argileux			34	Profondeur totale 23 m

Etude d'un profil *

Nous donnons maintenant des exemples de traitement de plusieurs courbes de sondages électriques constituant un profil. Il s'agit d'un cas concret et les courbes proposées sont toutes des courbes de terrain.

Il s'agit de détecter sous une plaine alluviale l'importance et l'extension de la fissuration de la craie, ainsi que la qualité hydrogéologique des alluvions. En tout, 100 sondages électriques ont été exécutés dont 50 ont été interprétés automatiquement. Nous présentons ici un des profils exécutés perpendiculairement à la vallée. Nous n'avons à notre disposition aucun sondage sur le site pour étalonner la mesure. On est donc amené à étudier plusieurs solutions possibles.

Cependant, on sait que :

- l'épaisseur des alluvions doit être de 6 à 8 m,
- la résistivité de la craie fissurée peut être très variable de 40 à 120 Ωm ,
- on a pu constater, enfin, que la craie saine ou présumée saine semble se grouper en deux familles : une famille à résistivité assez faible centrée vers

120 Ωm et une famille à résistivité supérieure à 150 Ωm .

On a donc proposé à l'ordinateur 4 hypothèses pour chacune des courbes :

- 1a : 40 Ωm , craie fissurée à résistivité faible,
- 1b : 40 à 100 Ωm , craie fissurée à résistivité croissante avec la profondeur,
- 1c : 75 Ωm , craie fissurée à résistivité moyenne,
- 1d : 95 à 100 Ωm , craie fissurée à forte résistivité.

On a donné ces valeurs pour le départ du calcul, sans imposer, en général, de limites aux résistivités et épaisseurs pour la recherche des meilleures valeurs de la résistivité de la craie fissurée et des profondeurs correspondantes.

On a limité le nombre de couches à 9.

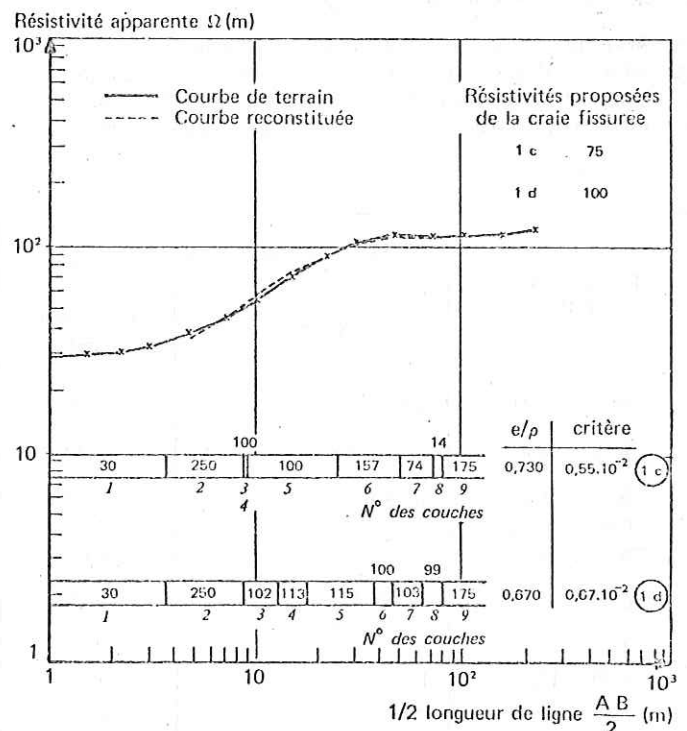
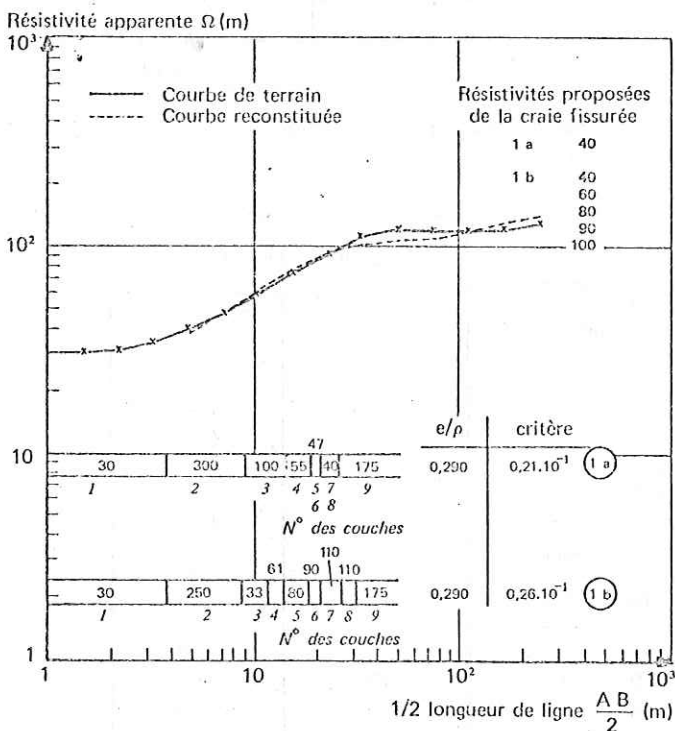
Sur les graphiques de sondage électrique, nous n'avons reporté qu'une courbe recalculée à partir de la solution trouvée. L'autre courbe est trop voisine pour qu'on en fasse une représentation claire. La tendance est indiquée par des flèches.

Sondage électrique 1 (fig. 3)

L'identification de la courbe aux solutions 1a et 1b est mauvaise. Elle est, en revanche, très bonne pour les solutions 1c et 1d avec une préférence pour une solution du type 1d qui donne des valeurs assez homogènes. Il est intéressant de noter, dans le cas de ce sondage électrique, que pour arriver à une bonne identification, le calcul refuse les valeurs faibles de résistivité de la craie fissurée et épaissit les alluvions au maximum admissible.

Fig. 3

SONDAGE SE 1.



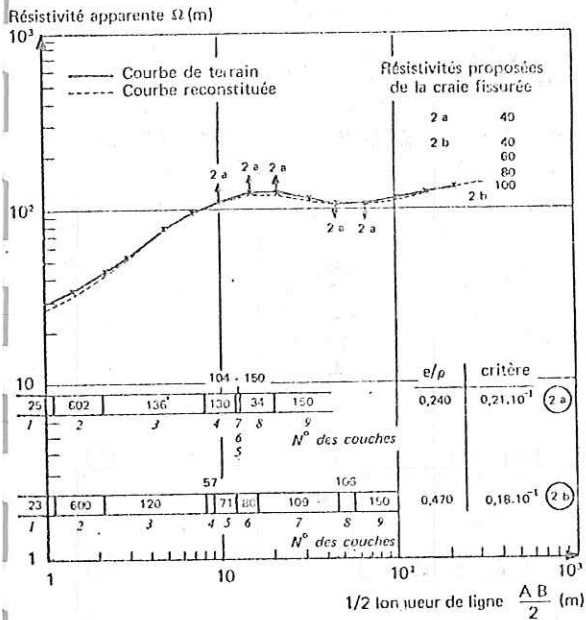
* Etude géophysique de l'alimentation en eau de zone d'appui nord champenoise (DDE de la Marne).

Sondage électrique 2 (fig. 4)

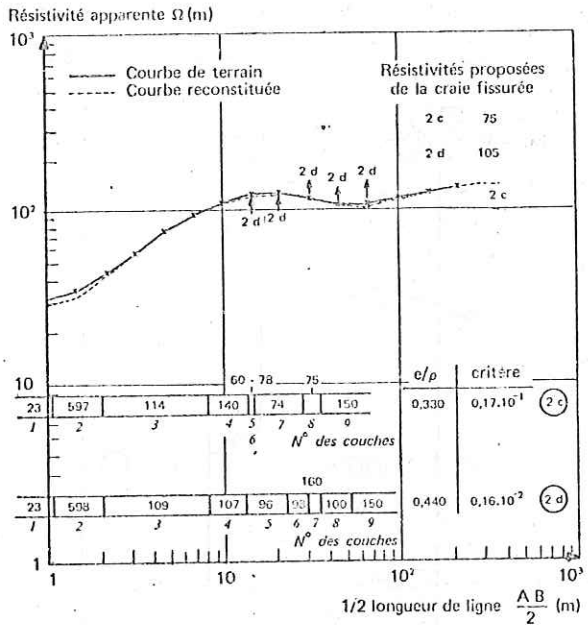
Dans tous les cas, l'identification est très bonne en dehors du début de la courbe qui est responsable du critère un peu fort.

La définition des premiers terrains aurait pu être améliorée aisément par l'addition d'une couche supplémentaire dans le premier mètre. On a imposé une fourchette de résistivité assez élevée à la couche 2 et une épaisseur a priori fixée, car on connaissait avec précision la position de la nappe et, par conséquent, l'existence d'une tranche dénoyée résistante. Les solutions qui nous semblent les plus vraisemblables sont les solutions 2d et 2b.

Fig. 4



SONDAGE SE 2.

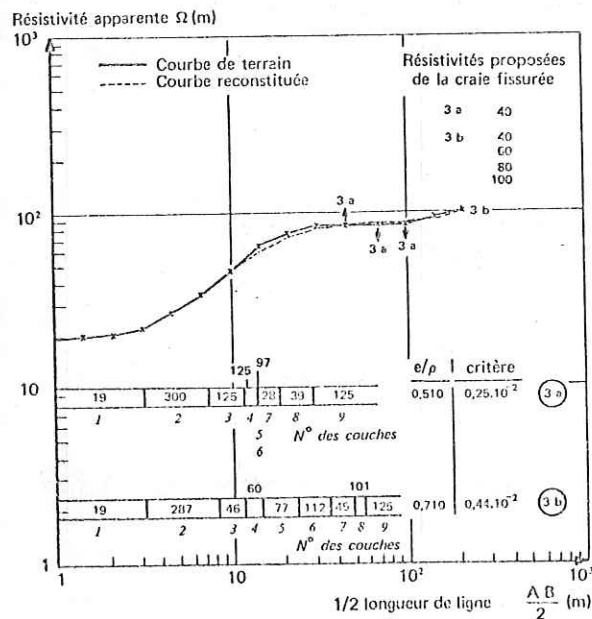


Sondage électrique 3 (fig. 5)

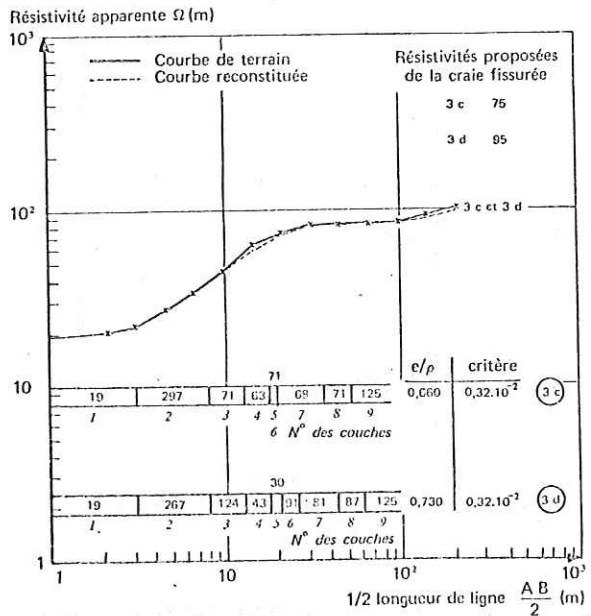
Les identifications des 4 solutions sont bonnes. Les résistivités du sondage électrique de terrain sont manifestement imprécises pour les valeurs de la demi-longueur de ligne $AB/2 = 15$ et 20 m. La machine a donné des solutions qui, toutes, adoucissent la pente de la courbe dans cette zone.

Les solutions 3a et 3b sont, à notre sens, à rejeter en raison de la présence d'un horizon très conducteur vers la base de la craie altérée. De même, la solution 3d souffre de la présence d'un horizon de craie saine juste sous les alluvions. La solution 3c a le mérite d'être homogène. D'une façon générale, on note une très forte altération de la craie quelle que soit la solution choisie.

Fig. 5



SONDAGE SE 3.

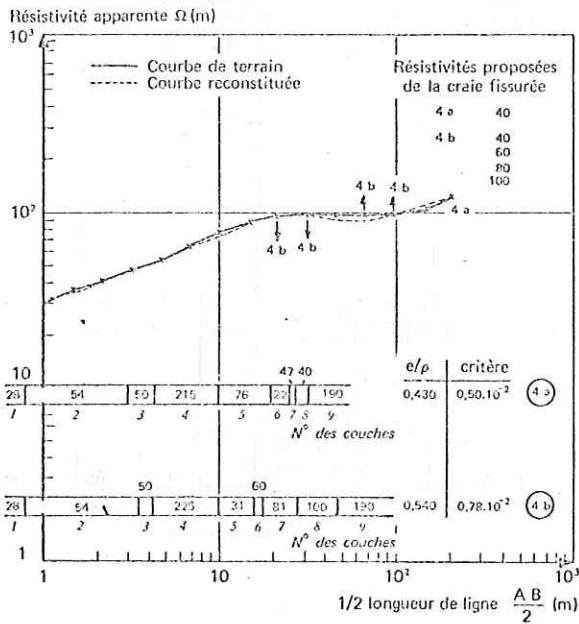


Sondage électrique 4 (fig. 6)

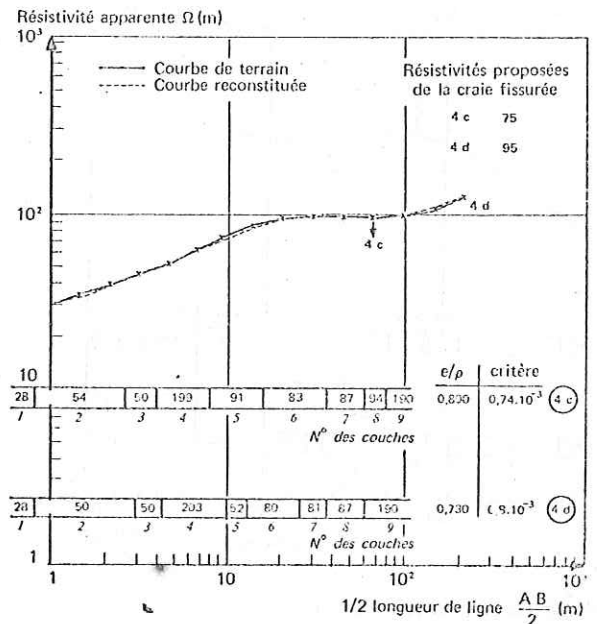
Pour les solutions 4a et 4b, on voit que les écarts entre les courbes se situent surtout dans la partie significative de la craie fissurée. Le bon critère est dû à la superposition parfaite du début de la courbe. En raison du problème traité, on peut considérer que les hypothèses a et b ne parviennent pas à donner une solution satisfaisante. On avait imposé, pour ce sondage électrique, des intervalles de variations des résistivités très sévères que la machine n'a pas admis.

Par contre, pour les solutions 4c et 4d, on peut considérer l'identification comme parfaite. L'évolution régulière des résistivités de la craie fissurée nous fait préférer la solution 4c.

Fig. 6



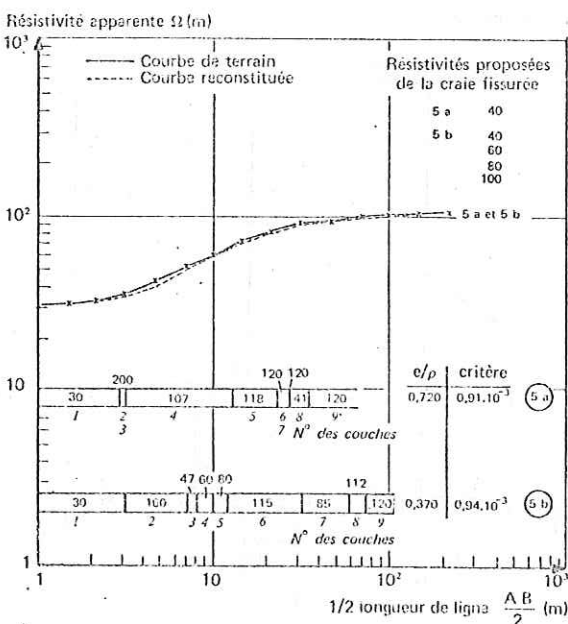
SONDAGE SE 4.



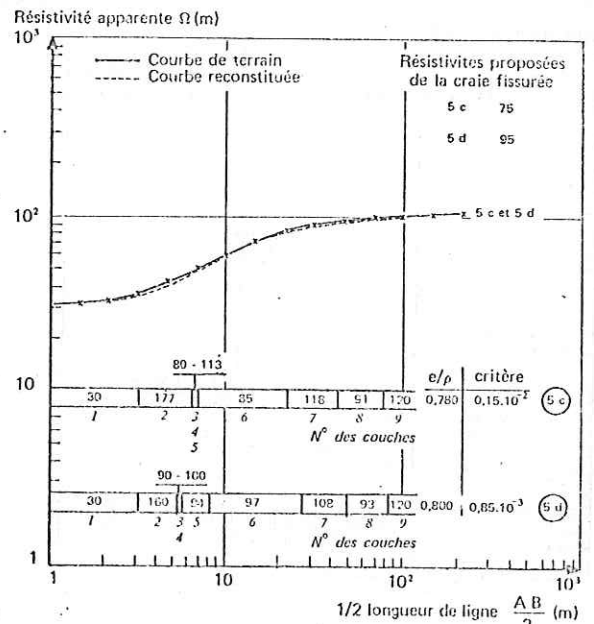
Sondage électrique 5 (fig. 7)

En dehors du point de la courbe pour $AB/2 = 5$ m, l'identification est très bonne. On voit que pour les 4 solutions, on retrouve une couche relativement conductrice à la base de la craie fissurée. Les solutions 5c et surtout 5d sont les plus homogènes.

Fig. 7



SONDAGE SE 5.

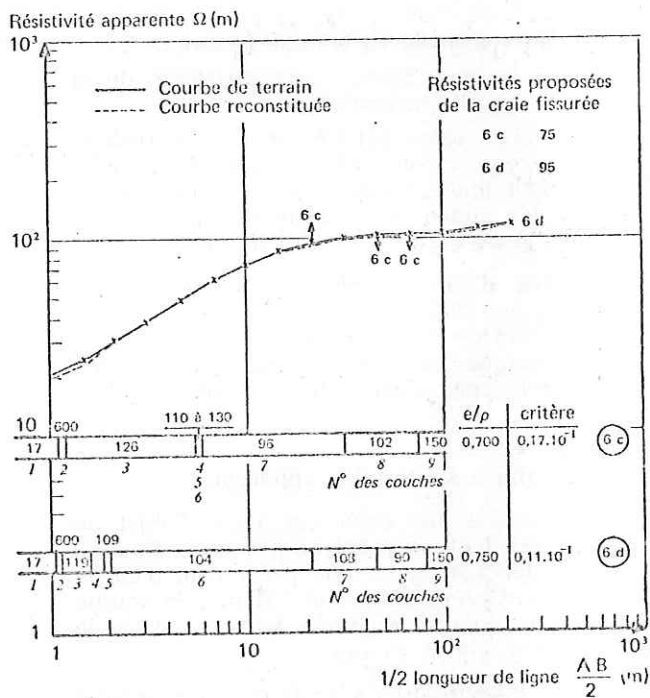
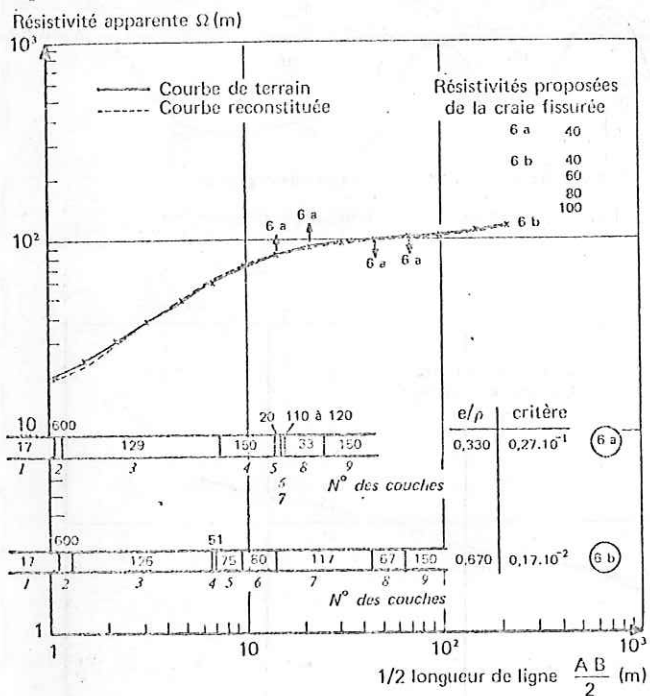


Sondage électrique 6 (fig. 8)

Ici aussi, on a le choix entre les solutions 6c et 6d pour éviter de donner des couches profondes trop conductrices (6a et 6b). La solution 6c qui semble la plus satisfaisante ne diffère vraisemblablement pas de la solution 6d au point de vue lithologique (la solution 6c semble mieux faire ressortir les alluvions).

Fig. 8

SONDAGE SE 6.

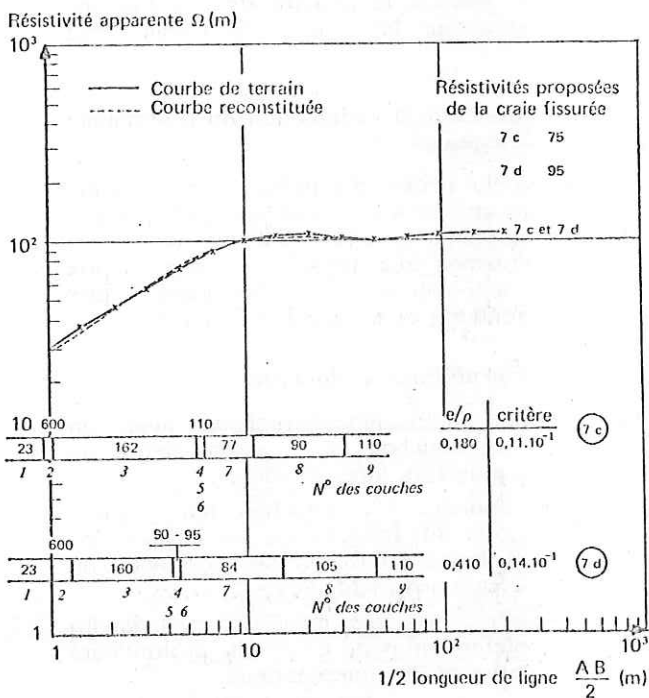
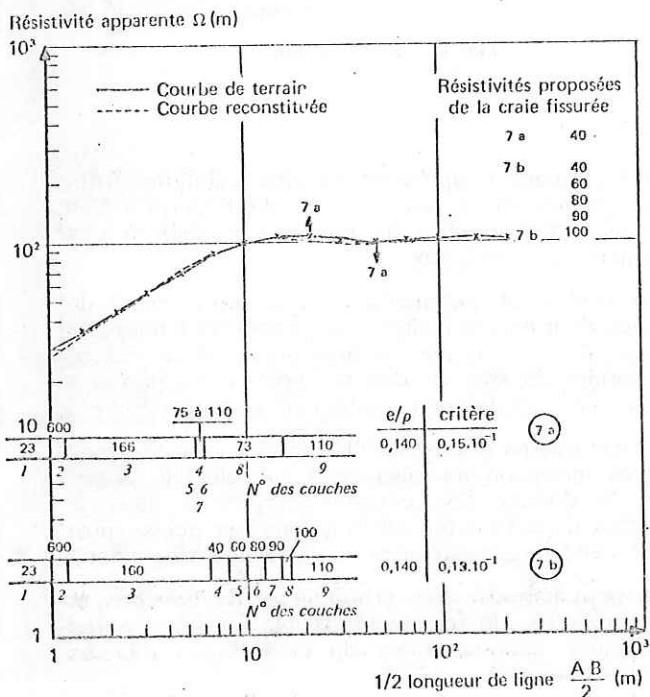


Sondage électrique 7 (fig. 9)

Le critère assez moyen est dû au début de la courbe et à la zone $AB/2 = 20$ m. Ici encore, une solution mathématiquement possible adoucit la courbe. On craignait d'avoir, à ce sondage électrique, des sables et graviers secs. Le calcul a réduit cette couche à 0,10 - 0,30 m. Les 4 solutions sont à peu près identiques et rejettent le faciès de craie à plus de 100 Ω m vers 15-20 m de profondeur.

Fig. 9

SONDAGE SE 7.



Synthèse des sondages électriques (fig. 10)

La connaissance d'une coupe de sondage mécanique dans le secteur étudié permettrait de faire une synthèse géologique des sondages électriques. Nous présentons ici une coupe possible établie à partir de certaines idées directrices :

- profondeur des alluvions réglée à une valeur de 5-8 m,
- homogénéité maximale de la craie fissurée,
- tendance à l'augmentation de la résistivité de la craie fissurée avec la profondeur,
- lorsque la craie saine est très résistante, recherche d'un horizon profond de la craie fissurée à 100-120 Ωm pour tenter d'établir une continuité lithologique avec les zones où la craie présumée saine a une résistivité de l'ordre de 120 Ωm .

On peut établir d'autres profils ayant une physiologie quelque peu différente. On trouvera cependant toujours une zone de craie suraltérée aux points des sondages électriques 3 et 4 et deux zones où les alluvions sont les plus résistantes : sondages électriques 1, 3 et 4.

Cas d'une courbe à six terrains apparents

Dans le même site que celui qui a fait l'objet du paragraphe précédent, on a été en présence d'autres courbes plus difficiles parce que présentant plus de couches. Le sondage électrique n° 401 dont la courbe de terrain et la courbe identifiée font l'objet de la figure 11, en est une illustration.

On a donné des limites très strictes d'épaisseur pour les alluvions, toutes les interprétations, manuelles et à l'aide de la machine, ayant tendance à donner une épaisseur trop forte. L'épaisseur totale de 9 m est la plus faible qu'on puisse obtenir en conservant une valeur de résistivité raisonnable pour les sables et graviers de base. On aurait pu améliorer encore l'identification du début de la courbe en proposant à l'ordinateur une subdivision des premières couches. Mais on voit qu'on aboutit très bien à une solution satisfaisante en prenant le nombre de couches qui semble apparaître sur la courbe de terrain, soit 6 couches.

Commentaires concernant l'adaptation du programme aux réalités géologiques

Nous avons voulu mettre au point un programme « passe-partout » qui puisse être utilisé quel que soit le problème géologique et également qui puisse être adapté aux problèmes très superficiels avec un prix d'interprétation automatique compatible avec le prix de revient du sondage électrique sur le terrain.

Adaptation aux problèmes géologiques

— L'interprétation automatique réalisée avec un grand nombre de couches et un grand degré de liberté présente plusieurs inconvénients :

a) l'ordinateur donnera des couches qui risquent d'être très lissées et faisant mal apparaître les contrastes géologiques en raison de l'existence de couches à résistivités intermédiaires,

b) on aura, de ce fait, des solutions qu'il faudra retoucher complètement pour caler les profondeurs de certains repères géologiques connus,

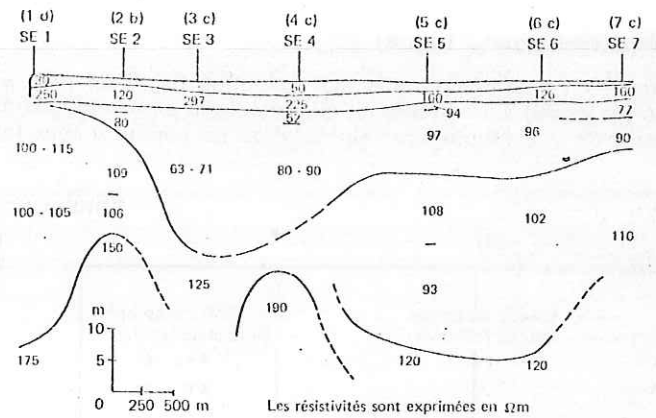


Fig. 10 - Synthèse des sondages électriques.

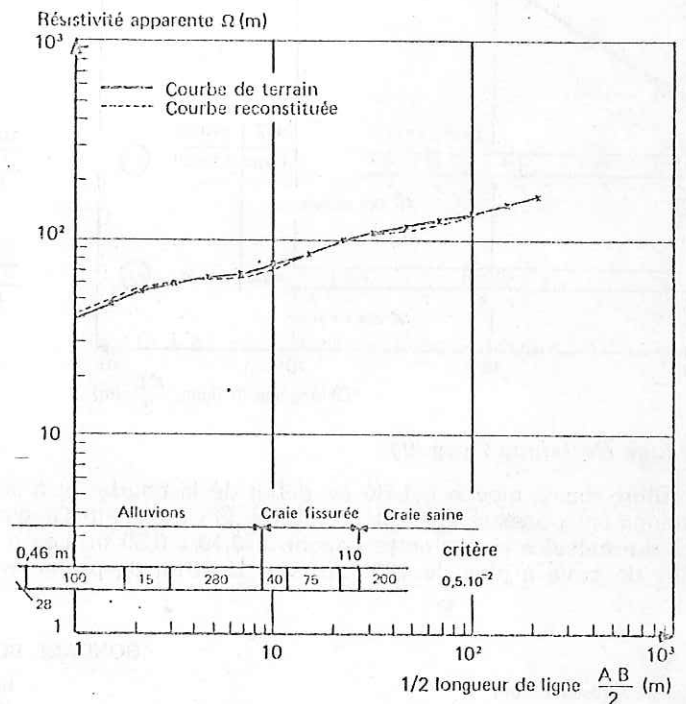


Fig. 11 - Sondage 401.

c) le traitement supplémentaire des solutions trouvées directement, ajouté au prix de l'interprétation avec un grand nombre de couches, conduit à des traitements très onéreux.

— Le traitement automatique avec un nombre de couches dont on est maître et la possibilité d'imposer, a priori, des contraintes de profondeur et de résistivité permet de trouver des solutions géologiques à prendre en compte sans traitement supplémentaire :

a) les contrastes apparaissent bien entre les diverses couches lorsqu'on ne laisse pas au calcul la possibilité de donner des couches moyennes dans la zone des discontinuités lithologiques (ce qui se produirait avec une subdivision en couches très fines),

b) on peut imposer des profondeurs de couches et des fourchettes de résistivités telles que les repères géologiques connus soient de cette façon injectés dans les données.

Par exemple, dans un cas qui s'est présenté (à Mirebeau-en-Poitou) on connaissait la position de l'Oxfordien marneux avec une résistivité comprise entre 10 et 25 Ωm . Le calage précis de cette couche a permis de bien caractériser les diverses couches du Rauracien situées au-dessus. Si on avait laissé libre toutes les données, une partie de la conductance de l'Oxfordien se serait retrouvée dans le Rauracien et une partie de la résistance du Rauracien se serait retrouvée dans l'Oxfordien pour donner des valeurs de résistivités lissées. De même, des contraintes sur la position de la base des alluvions donnent une meilleure détermination des caractéristiques d'altération du substratum.

CONCLUSION

La méthode d'interprétation des sondages électriques que nous venons d'exposer, présente l'avantage d'être économique et applicable aussi bien aux problèmes profonds qu'aux problèmes superficiels avec

un nombre de couches qu'on choisit librement et des possibilités d'imposer des contraintes ou une totale liberté à tous les paramètres.

Ce programme permet d'injecter des données géologiques connues et de trouver des solutions à partir de ces éléments.

Le prix d'un passage de courbe est de l'ordre de 5 à 30 F, ce qui permet toutes les applications souhaitables aux problèmes de subsurface (génie civil et hydrogéologie).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] La prospection électrique appliquée aux problèmes des Ponts et Chaussées, *Bull. Liaison Labo. routiers P. et Ch.*, n° spécial 1, juil. 1967, p. 131-132.
- [2] DUPRAT A., GOLFÉ F. et ROCROU J.-P., Exemples d'application de traitements automatiques à l'interprétation des sondages électriques, *Geophysical Prospecting*, vol. 21, 3, sept. 1973.

TABLEAU DES SYMBOLES

$AB/2 = r$	= demi-longueur de ligne d'émission de courant en mètres,	$C = \sum e_i/\rho_i$	= conductance cumulée de plusieurs couches,
ρ_a	= résistivité apparente en Ωm ou $\Omega\text{m}^2/\text{m}$,	R_z	= résistance transversale cumulée des couches jusqu'à la profondeur z ,
ρ_i	= résistivité de la i^{e} couche d'un terrain tabulaire à n couches horizontales, la couche d'ordre 1 étant la couche superficielle,	C_z	= conductance cumulée des couches jusqu'à la profondeur z ,
e_i	= épaisseur de la i^{e} couche d'un terrain tabulaire à n couches horizontales, la couche d'ordre 1 étant la couche superficielle,	$R_0 = \sqrt{\frac{R_z}{C_z}}$	= résistivité équivalente d'une masse de terrain jusqu'à la profondeur z ,
$e_i \cdot \rho_i$	= résistance transversale de la i^{e} couche,	$0 = \sqrt{\frac{R_z \cdot C_z}{z}}$	= coefficient de macroanisotropie,
e_i/ρ_i	= conductance de la i^{e} couche,	λ	= paramètre d'intégration,
$C = \sum e_i \cdot \rho_i$	= résistance transversale cumulée de plusieurs couches,	$K(\lambda)$	= fonction noyau : fonction des épaisseurs, des résistivités et du paramètre d'intégration,
		$J_1(\lambda r)$	= fonction de Bessel d'ordre 1 et de première espèce.