

APPLICATION DE LA PROSPECTION ÉLECTRIQUE A L'ÉTUDE DES NIVEAUX D'ALTÉRATION

Yves ALBOUY

Section Géophysique du Centre ORSTOM de M'Bour

Jean-Claude PION

Section Géologie du Centre ORSTOM de Dakar-Hann

Jean-Marie WACKERMANN

Section Géologie du Centre ORSTOM de Dakar-Hann

RÉSUMÉ

On applique la prospection électrique à l'étude des niveaux d'altération en zone tropicale sèche : Sénégal, Haute-Volta. D'après les premiers résultats on peut non seulement apprécier les épaisseurs mais aussi classer les divers types de manteaux d'altération suivant leurs résistivités et en particulier différencier argiles gonflantes et kaolinites.

ABSTRACT

Electric prospection is being applied to the study of weathering levels in the dry tropical zone : Senegal, Upper Volta. According to preliminary results, not only can the thicknesses be evaluated but, also, the various types of weathering mantles can be classified in accordance with their resistivities. In particular, one can differentiate bulking clays and kaolinites.

ZUSAMMENFASSUNG

Die elektrische Prospektionsmethode wird zur Untersuchung der Verwitterungshorizonte in der trockenen Tropenzone (Senegal, Haute-Volta) herangezogen. Wie aus den ersten Ergebnissen hervorgeht, ist es möglich, nicht nur die Mächtigkeiten zu ermitteln, sondern auch die verschiedenen Typen von Verwitterungsdecken nach ihrer elektrischen Resistivität zu ordnen, und insbesondere Quellungstone von Kaoliniten zu unterscheiden.

РЕЗЮМЕ

Применялась электрическая разведка для изучения уровней преобразования в сухой тропической зоне: Сенегал, Верхняя Вольта. Судя по первым результатам, этот способ дает возможность не только оценить мощности, но также классифицировать различные типы локровов преобразования по их удельному сопротивлению, а в частности различать вздутые глины и каолиниты.

AVANT-PROPOS

Les études des niveaux d'altération météorique sur roches éruptives menées au Sénégal Oriental et en Haute-Volta ont été entreprises, à l'aide de puits creusés manuellement. Or les seules données géologiques et géomorphologiques laissent une grande part au hasard quant à l'implantation judicieuse de ces puits et à leur interprétation spatiale. En outre, les moyens mis en œuvre ne permettant pas de dépasser une quinzaine de mètres de sol et manteau d'altération, une partie de ces puits n'a pu atteindre la roche dure, limitant ainsi leur intérêt.

La connaissance préalable de l'épaisseur des matériaux altérés permettrait à la fois d'éviter les emplacements non représentatifs et de faire la liaison entre les différentes unités d'une chaîne de profils. Une carte d'isobathes du toit dur, voire sain, des massifs cristallins, faciliterait l'interprétation des circulations d'eau, de l'intensité des processus géochimiques et minéralogiques et des âges relatifs des faciès d'altération.

Nous avons donc fait appel aux méthodes géophysiques. L'existence d'une différence importante entre les résistivités des roches éruptives saines et celles des matériaux argileux et poreux nous a fait opter pour la technique du sondage électrique. Celle-ci possède en outre l'avantage de faire appel à un équipement peu encombrant, léger, robuste, de coût relativement faible. Les travaux de prospection électrique nécessitent un personnel réduit et peuvent être menés à bien dans des régions d'accès relativement difficile.

Les deux campagnes de sondages électriques faites au Sénégal Oriental, en 1969, et en Haute-Volta, en 1970 (cf. bibliographie 1 et 2), devaient servir à tester les possibilités et limites de la méthode.. Les mesures ont été exécutées à proximité immédiate de puits creusés préalablement dans le cadre des études d'altération.

Après un bref rappel concernant les techniques des sondages électriques, nous examinerons les résultats obtenus et en dégagerons les principes qui devront guider les futures prospections.

GÉNÉRALITÉS

Principe du sondage électrique

Le dispositif de mesure est un quadripôle symétrique AMNB, (AM = NB, MN petit devant AB : quadripôle Schlumberger). Un courant d'intensité I est envoyé dans le sol par l'intermédiaire des électrodes A et B, tandis qu'on mesure la différence de potentiel ΔV , créée par l'envoi du courant, entre les électrodes M et N au moyen d'un potentiomètre (fig. 1).

On a la relation

$$\rho_a \text{ (résistivité apparente : } \Omega \cdot \text{m)} = K(m) \frac{\Delta V \text{ (mV)}}{I \text{ (mA)}}$$

K est fonction de la géométrie du quadripôle.

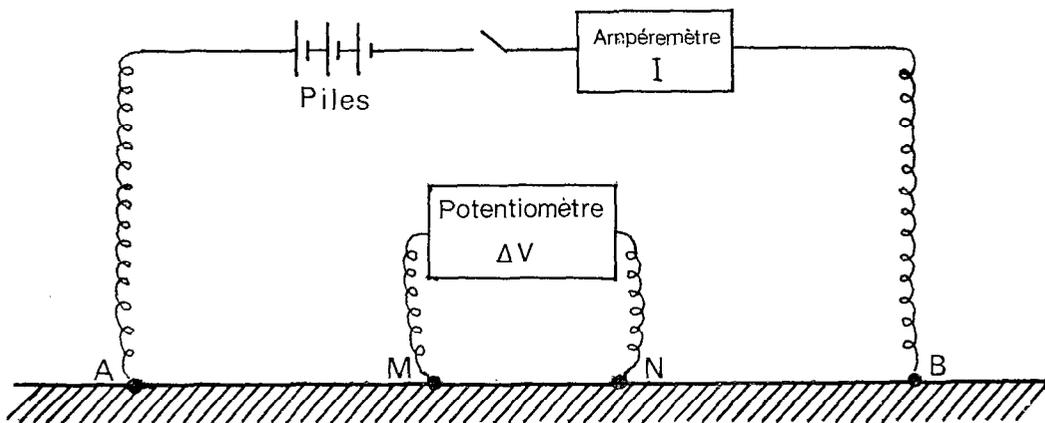


FIG. 1.

ρ_a est une sorte de résistivité moyenne, résistivité d'un certain volume de terrain, dont les dimensions dépendent de la distance des électrodes A et B et des résistivités des divers terrains.

Lorsque l'on augmente AB (et MN quand V devient trop faible) le volume de terrain intéressé par le courant I s'accroît, et, en supposant les terrains horizontaux, on obtient différentes valeurs de ρ_a , correspondant à des profondeurs croissantes, d'où le nom de sondage électrique.

Lorsque l'on conserve AB constant et que l'on déplace l'ensemble du quadripôle suivant son axe, on réalise un profil de résistivité.

Exécution des mesures

Lorsqu'on ferme le circuit MN, en l'absence de tout courant dans AB, l'aiguille du galvanoscope se déplace du fait de la polarisation des électrodes. Cette différence de potentiel parasite est annulée au moyen d'un premier circuit du potentiomètre, circuit dit de compensation. L'aiguille étant au zéro, on ferme le circuit AB et compense la différence de potentiel à mesurer aux bornes de MN au moyen du 2^e circuit, circuit de mesure. La lecture de I (ampère-mètre), V (potentiomètre) et la connaissance de K permettent le calcul de ρ_a (1).

Les terrains à prospector étant relativement peu épais, il est normal d'effectuer des mesures avec des électrodes très rapprochées ; pratiquement on ne peut pas descendre, pour $AB/2$, au-dessous du mètre. Les mesures sont poursuivies, pour des $AB/2$ croissants, sans changement de MN, tant que la différence de potentiel est assez grande. Lorsqu'un changement de MN est nécessaire il faut doubler les mesures : faire 2 mesures pour un même AB, avec les 2 MN, afin d'évaluer l'«à-coup de prise». Il y a tout intérêt à effectuer les calculs de ρ_a après chaque mesure afin de pouvoir éventuellement reprendre les mesures défectueuses, ou donnant lieu à des « à-coups » intempestifs.

Notons que, l'interprétation des sondages supposant des terrains horizontaux, dans le cas de terrains en pente, le sondage est orienté perpendiculairement à la ligne de plus grande pente, de façon à ce que les variations d'épaisseur soient minimales sur l'axe AB.

Le personnel indispensable se compose de 3 manœuvres, en plus de l'opérateur. Dans le cas le plus fréquent où il s'agit de manœuvres non spécialisés, il est néanmoins possible de faire 3 à 5 sondages en courte longueur de ligne ($AB/2 = 2$ à 300 m) par jour.

(1) Pour tous renseignements complémentaires concernant en particulier l'appareillage utilisé, les problèmes de sensibilité, les différentes valeurs de K , on consultera utilement les rapports ayant fait suite aux campagnes 1969 et 1970 : ALBOUY (Y.) et WACKERMANN (J.M.), ALBOUY (Y.) BOULANGE (B.), PION (J.C.).

Interprétation des résultats

Les courbes de sondages électriques, reportées sur papier bilogarithmique spécial, sont comparées aux abaques 3 terrains C.G.G. Epaisseurs et résistivités du 1^{er} terrain, lues directement sur les abaques et prises comme unités, permettent de déterminer l'épaisseur et la résistivité du 2^e terrain, ainsi que la résistivité du 3^e terrain (substratum). (Cf. figure 2, extraite du catalogue d'abaques, et montrant différentes formes de courbes correspondant à des épaisseurs différentes du 2^e terrain).

Dans le cas de niveaux d'altération sur roches éruptives la résistivité ρ_3 est celle de la roche saine et en général $\rho_3/\rho_2 > 100$, ρ_2 étant la résistivité des niveaux d'altération. Quant à la résistivité ρ_1 du terrain superficiel elle peut prendre toutes les valeurs comprises entre quelques $\Omega \cdot m$ (niveau très argileux) et quelques dizaines de milliers d' $\Omega \cdot m$ (niveaux latéritiques, gravillons ferrugineux, etc.).

Dans ce dernier cas, l'on ne peut espérer déterminer à la fois e_2 et ρ_2 . En effet la courbe est telle qu'elle est applicable sur 2 ou plusieurs abaques, si bien que l'on peut connaître seulement le rapport e_2/ρ_2 (principe de l'équivalence, courbe en fond de bateau).

Dans le cas où ρ_1 est très inférieure à ρ_2 la détermination de e_2 et ρ_2 est possible avec quelque précision à la seule condition que le rapport e_2/ρ_2 n'ait pas une valeur trop faible. Si e_2/ρ_2 est très petit, le 2^e terrain n'apparaît pas sur le diagramme (principe de la « suppression » du terrain intermédiaire, cas de l'escalier montant).

L'interprétation d'un groupe de sondages permet toutefois une appréciation relative des épaisseurs même s'il n'est pas possible de déterminer e_2 : en effet, en supposant ρ_2 constant, l'épaisseur e_2 sera d'autant plus grande que le palier de la courbe (fond de bateau ou marche d'escalier) sera plus accusé.

ÉTUDE DES NIVEAUX D'ALTÉRATION

Les campagnes de sondages électriques ont intéressé les secteurs suivants :

Sénégal (1969) :

TAKOUTALA	(Long. 12°14' Lat. 14° 9')	3 sondages
BAGNOMBA	(Long. 12° 22' Lat. 12° 43')	6 sondages
KANEMERE	(Long. 12° 11' Lat. 12° 53')	7 sondages

Haute-Volta (1970) :

KOLEL	(Long. 0° 26' Lat. 14° 33')	7 sondages
SIAN	(Long. 1° 13' Lat. 13° 06')	8 sondages
TAN KIEDOUGOU	(Long. 13° 24' Lat. 11° 07')	10 sondages.

Les sondages électriques sont situés, dans la majorité des cas, à proximité immédiate d'un puits, pour étalonnage.

Les données géologiques de chaque puits et les interprétations géophysiques des sondages (à l'exception de trois sondages non interprétables) sont résumés dans quatre tableaux : chaque tableau regroupe les profils correspondant à un type de manteau d'altération.

Les figures 3, 4, 5 et 6 reproduisent quelques courbes de sondages électriques relatives à chacun des tableaux.

Résultats des étalonnages

Les étalonnages des sondages par les puits devraient permettre de lever les indéterminations de la méthode électrique.

PROSPECTION ÉLECTRONIQUE DES NIVEAUX D'ALTÉRATION

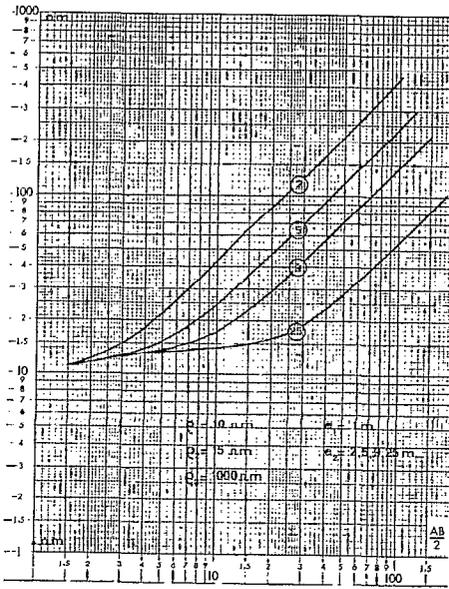


FIG. 2.

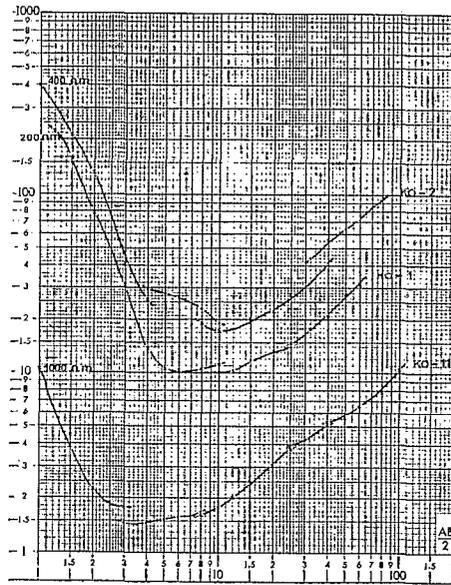


FIG. 3.

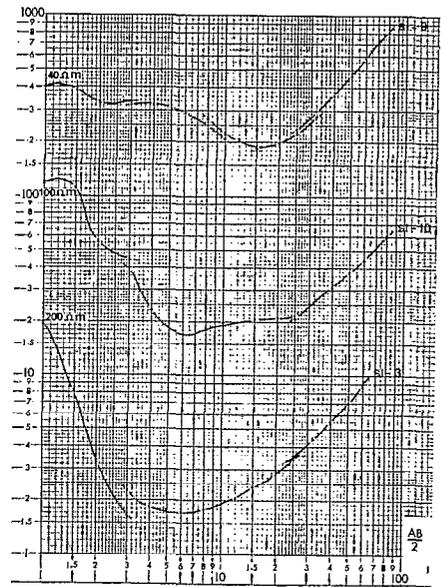


FIG. 4.

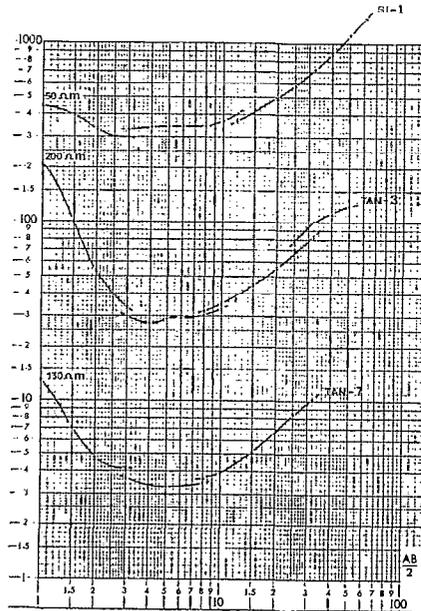


FIG. 5.

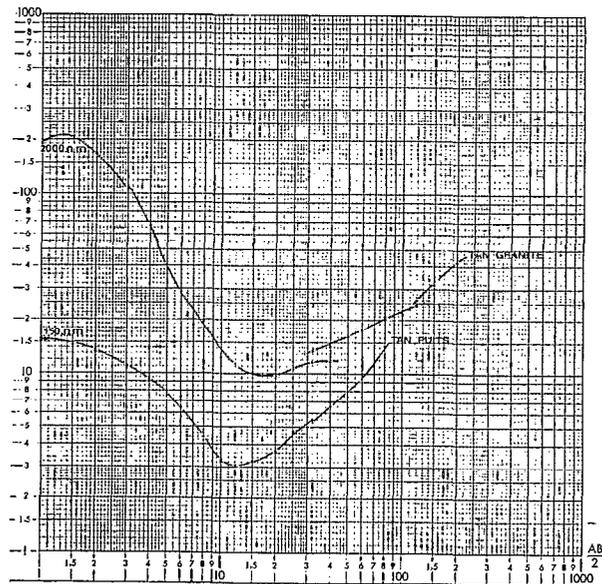


FIG. 6.

TABLEAU I
Manteau d'altération à argile gonflante

Profil	Sol				Altération			Roche			Observations
	Nature	Épais- seur	e_1	ρ_1	Épais- seur	e_2	ρ_2	Nature	Profon- deur	$e + e_2$	
KO-1	Sable éolien Sol brun	3,0	0,8	400	8,20	18	9	Gabbro	> 11	18,8	Sol 2,2 m non visible dans descente.
KO-2	Blocs ébou- lis Sols bruns	2,8	0,8	500		10	12	Gabbro	> 9,5	10,8	
KO-3	Boules Sols bruns	3,0	1,5	80		10 ou 12	10 ou 12	Gabbro	> 13	10,5 à 13	
KO-11	Sable gra- villon	1,2	0,4	3 000	2,50	3,6 à 6,0	14	Amphiboli- te quartzite	3,5	4	
SI-1	Gravillon blocs	3,0	1,5	100		18	12	Epidotite	> 17	19,5	Deux terrains groupés en début de courbe.
TAN-1	Sol verti- que	2,8	0,6	500		13,5	12	Prasinite	> 8,5	14	Possibilité palier pour terrain intermédiaire
TAN-2	Sol verticale gravillon	2,5	1,1	1 000		13	12	Prasinite	> 9,5	14,1	
K-5	Vertisol	3,0		10	1,5		10	Granite	> 4,5	6,5	Pas de couverture.
K-6	Vertisol + gravillon	1,0	1,4	70	1,5	1,4	9	Gabbro	2,5	2,8	
K-7	Vertisol	1,5	2,0	35	3,0	2,8	6	Gabbro	4,5	4,8	

Légende : e = épaisseur calculée
 ρ_1 = résistivité apparente du 1^{er} terrain
 ρ_2 = résistivité apparente du 2^e terrain
 $e_1 + e_2$ = profondeur de la roche saine.

Si nous examinons tout d'abord les résultats quant aux épaisseurs des terrains superficiels, nous constatons que, pour 30 sondages électriques, seules 8 interprétations de l'épaisseur du premier terrain coïncident avec l'épaisseur mesurée. Dans la plupart des cas, l'appréciation est nettement inférieure à la réalité, ce qui s'explique vraisemblablement par l'existence dans le sol d'une frange supérieure très résistante et donc par la « suppression » de la partie inférieure, jouant le rôle de terrain intermédiaire ; l'erreur commise n'affecterait donc pas l'estimation que l'on peut faire de la profondeur de la roche saine.

Nous savons que cette estimation est souvent incertaine du fait de l'application du principe de l'équivalence, mais connaissant d'une part e_1 et e_2 (abaque), d'autre part $e_1 + e_2$ (puits) l'on peut déduire ρ_2 , à condition que la roche mécaniquement dure soit aussi électriquement résistante ; il apparaît en fait que la prospection électrique place en général la roche saine à une profondeur supérieure à celle obtenue par creusement :

En effet, si nous appelons p la profondeur obtenue par creusement, nous avons

pour 6 puits : $e_1 + e_2 = p$ pour 10 puits : $e_1 + e_2 > p$ pour 3 puits : $e_1 + e_2 < p$

Pour l'un de ces trois derniers puits (BA, tableau II) les résultats du sondage sont complètement aberrants, et les deux autres sont situés sur des pentes fortes ; l'on ne peut pas considérer ces résultats comme significatifs.

Enfin un risque non négligeable d'erreur est celui que constitue la présence dans la remontée de la courbe d'une partie à pente faible voire d'un faux palier. Pour un rapport ρ_3/ρ_1 de l'ordre de 100, la

TABLEAU II

Manteau d'altération kaolinique + argiles gonflantes

Profil	Sol				Altération			Roche			Observations
	Nature	Épaisseur	e_1	ρ_1	Épaisseur	e_2	ρ_2	Nature	Profondeur	$e_1 + e_2$	
K-22	Vertisol	2,5	0,6	100	1,0	2,4	20	Gabbro	3,5	3,0	Manque de points en début de courbes.
K-12	Sol hydro-morphe	2,0	1,7	12	> 5	17	18	Gabbro	> 7	19	
BA-7	Vertisol	1,0	1,0	11	9,0	8 à 9	18	Dolérite	10,0	9 à 10	
BA-4	Lithosol	0,5	1,0	120	2,5	2,0		Diorite	3,0	3,0	
BA	Lithosol	1,5	1,6	22	>10	4,8	17	Diorite	>11,5	6,5	Aberrant.
T-1	Vertisol	3,0	1,5	13	4,8	6	25	Grano Diorite	7,8	7,5	Pente 25°.
SI-3	Eboulis de pente	2,5	0,5	300	10,5	10	15	Epidotite chlorite	12	10,5	
SI-9	Colluvions gravillon	5,0	5,0	34	18	15	15	Amphibolite	23	20	
SI-10	Sol gravil. gros blocs	1,2	0,8	160	> 7,3	19,0	17	Dolérite	> 8,3	19,8	
SI-11	Sols bruns	1,0	0,6 à 0,8	35	8,2	8	15	Dolérite	9	8,8	
TAN-6	Sol gravil. sol brun	2,0	0,8	100	5,5	7,5	16	Amphibolite	7,5	8,3	
SI-Faille			2	50		4	20	Dolérite		56	$e_3 = 50$ $\rho_3 = 35$.

remontée de la courbe doit avoir une pente voisine de 45° ; une pente plus faible peut laisser supposer qu'il existe un terrain de résistivité intermédiaire. C'est en particulier le cas pour KO 11 (figure 3) ; en l'absence d'un puits, l'épaisseur estimée des niveaux d'altération aurait été grossièrement erronée, la courbe montrant deux niveaux à résistivités faibles et légèrement différentes.

TABLEAU III

Manteau d'altération kaolinitique

Profil	Sol				Altération			Roche			Observations
	Nature	Epaisseur	e_1	ρ_1	Epaisseur	e_2	ρ_2	Nature	Profondeur	$e_1 + e_2$	
K-15	Gravillons	1,0	1,0	15 000	+7,5	10	30	Basalte	> 8,5	11	Pente > 45°.
BA-6	Vertisol	1,2	1,0	18	9,5	10	30	Dolérite	10,5	11	
Bara-fouté	Gravillons	1,0	2,0	10 000	?	35-60	20-30	Basalte	?	35-60	Non étalonné sur puits.
KO-4	Eboulis Sol brun	1,0	0,8	700	5,5	7	30	Gabbro	6,5	7,8	
SI-12	Sol de pente	0,3	0,8	45		9	30	Dolérite	> 4,5	9,8	
TAN-3	Eboulis gravillon	1 m	0,5	500	5,5	7,6	26	Peridotite	6	8	
TAN-7	Sols bruns débris de pente	1,2	0,4	300		8	30	Amphibolite	7,5	8,4	
TAN-Cuirasse	Cuirasse moyen glaciaire		1,5	> 35 000		8	24			9,50	Non étalonné par puits - possibilité terrain intermédiaire.
T-2	Vertisol	3,0	1,0	12	2,5	3,5	30	Gabbro	5,5	4,5	

TABLEAU IV

Manteau d'altération arénacé ou roche peu altérée

Profil	Sol				Altération			Roche			Observations
	Nature	Epaisseur	e_1	ρ_1	Epaisseur	e_2	ρ_2	Nature	Profondeur	$e_1 + e_2$	
K-31	Sol gravillon.	0,5	1,0	20 000	6	9,0	60	Granite	> 6,5	10	Dispersé.
TAN-granite			1,7	2 000		41,0	100	Granite		42,7	
TAN-5	Sol vertique	2	2	15	9	16 à 18	55	Granite	> 11	18	
SI-2	Eboulis	2			7	9	60	Epidotite	9	9	
KO-10	Cuirasse + sable éolien	0,8	0,4	5 000	2,20	3	100	Amphibolite	3	3,4	
KO-9	Gravillon	2	1,1	300	2,50	3,3	70	Amphibolite	4,5	4,5	
TAN-Puits	Sol vertique	1,2	1,7	15	2,8	3,4	70	Migmatite	> 4	14	$e_3 = 9$. $\rho_3 = 30$.

Résistivité des niveaux d'altération

Les lois concernant la distribution des résistivités apparentes mises en évidence au cours des deux campagnes 1969 et 1970 peuvent se résumer de la manière suivante :

	argiles		
ρ argiles gonflantes	< ρ argiles gonflantes + kaolinites	< ρ kaolinite	< ρ roche altérée

Les valeurs limites des résistivités pour chaque manteau d'altération, tirées des quatre tableaux, sont les suivantes :

Argiles gonflantes	:	$6 \leq \rho \leq 14$
Argiles gonflantes + kaolinite	:	$15 \leq \rho \leq 25$
Kaolinite	:	$20 \leq \rho \leq 30$
Arène	:	$50 < \rho < 100$

Ce tableau chiffré semble indépendant de la localisation géographique et s'applique aussi bien aux matériaux d'altération du Sénégal oriental que de la Haute-Volta.

Ces résultats permettent de dégager quelques règles quant à la précision des sondages et donc une méthode d'investigation rapide des niveaux d'altération.

Précision des sondages électriques de reconnaissance

Lorsque les sondages ne sont pas étalonnés, leurs interprétations appellent quelques réserves.

— Il n'existe pratiquement aucune précision quant aux terrains superficiels.

— Chaque fois que la remontée de la courbe est moins accusée que la normale, la détermination sur l'épaisseur des niveaux d'altération peut être très imprécise. Il y a lieu alors d'effectuer un deuxième sondage d'azimut différent du premier.

— Dans le cas général où le principe de l'équivalence s'applique, on peut définir seulement les limites de variation de ρ_2 , limites d'autant plus étroites que le « fond de bateau » de la courbe est plus large : dans le cas de SI-12 (tableau III, figure 5), où l'on a un assez long palier, la précision est bonne, par contre pour le sondage de Tan Puits (tableau IV, figure 6), la résistivité peut être comprise entre 12 et 30 $\Omega \cdot m$, les épaisseurs correspondantes étant égales à 3, 6 et 9 m.

Pour terminer ces remarques relatives à la précision des sondages électriques notons qu'ils sont incapables de « voir » les nappes.

Méthode d'investigation

Avant toute implantation de puits quelques sondages électriques régulièrement espacés sur la zone à prospector doivent permettre d'éliminer les éventuelles zones défavorables : zones à très long palier horizontal, correspondant à des épaisseurs d'altérations trop fortes (par exemples : paliers dépassant les 25 m en AB/2).

Il se peut que les terrains superficiels présentent peu de variations tant en épaisseur qu'en résistivité et que la résistivité des niveaux d'altérations paraisse constante sur des zones assez larges. A l'intérieur de ces zones on peut alors appliquer la méthode du profil électrique, après avoir défini la longueur de ligne AB d'après les premiers sondages.

Par exemple si l'on a (voir figure 2)

$$\begin{aligned}e_1 &= 1 \text{ m} \\ \rho_1 &= 10 \Omega \cdot \text{m} \\ \rho_2 &= 15 \Omega \cdot \text{m}\end{aligned}$$

les résistivités apparentes $AB/2 = 100 \text{ m}$ sont

$$\begin{aligned}420 \Omega \cdot \text{m} &\text{ pour } e_2 = 2 \text{ m} \\ 230 \Omega \cdot \text{m} &\text{ pour } e_2 = 5 \text{ m} \\ 140 \Omega \cdot \text{m} &\text{ pour } e_2 = 9 \text{ m} \\ 55 \Omega \cdot \text{m} &\text{ pour } e_2 = 25 \text{ m}\end{aligned}$$

Ainsi la carte des résistivités apparentes pour $AB/2 = 100 \text{ m}$ permettrait de définir les zones d'épaisseur faible :

$$\rho_a \geq 230 \Omega \cdot \text{m} \text{ pour } e_2 \leq 5 \text{ m}$$

Il s'agit là d'un cas éminemment favorable. En général les différences de résistivité des terrains superficiels sont importantes d'un point à l'autre et interdisent l'utilisation du profil électrique. Quelques puits doivent alors être implantés dans les zones reconnues comme les plus favorables par les premiers sondages et, d'après les résultats des étalonnages, on entreprendra, si cela est nécessaire, d'autres sondages électriques sur une maille plus serrée.

CONCLUSION

La prospection électrique, en tant que méthode d'investigation rapide de l'épaisseur des niveaux d'altérations, est, depuis longtemps, utilisée en hydrogéologie. Elle peut être, de plus, une méthode de détermination de ces niveaux, si les lois de distribution des résistivités en fonction de la nature des altérations sont confirmées dans d'autres zones géographiques à climat tropical sec. De nouvelles prospections doivent donc être entreprises ; elles seront placées de préférence dans des régions déjà reconnues par sismique réfraction afin de pouvoir utilement comparer les deux méthodes géophysiques quant à l'étude des niveaux d'altération.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBOUY (Y.), WACKERMANN (J.M.), 1969. — Application de la prospection électrique par courant continu à l'étude des niveaux d'altération. Rapport ORSTOM-Dakar, *multigr.*
- ALBOUY (Y.), BOULANGÉ (B.), PION (J.C.), 1970. — Essai de prospection électrique appliqué à l'étude des niveaux d'altération en Haute-Volta. Rapport ORSTOM-Dakar, *multigr.*
- Compagnie Générale de Géophysique, 1963. — Abaques de sondage électrique.