

4 La polarisation provoquée

Jusqu'ici on a supposé que lorsqu'on injectait un courant dans le sol, le potentiel mesuré en surface était obtenu instantanément et que, d'une façon similaire, lorsque le courant est coupé, le potentiel tombe instantanément à zéro. Dans la pratique, il n'en est rien. Il existe un délai entre le temps où le voltage atteint son maximum et aussi pour qu'il tombe à zéro. Ces délais tombent dans deux catégories : instrumentale et effet du sol. En général, les délais instrumentaux sont très faibles. Cependant, le délai du sous-sol, lui, est souvent significatif. Il varie de place en place et le temps de délai et la forme de la courbe de décharge constituent des paramètres utiles pour l'investigation du sol.

4.1 Origine et propriétés de la P.P.

Le passage d'un courant électrique dans un sol s'accompagne de processus électrochimiques dont le caractère et l'intensité dépendent directement des propriétés chimiques et physiques du sol.

Le passage du courant peut se faire de deux façons : (1) par conductibilité électrique pour laquelle il y a déplacement d'électrons libres dans les particules métalliques (pyrite, chalcopryrite, ...); et (2) par conductibilité ionique pour laquelle il y a déplacement d'ions dans les solutions contenues dans les pores et les fractures des roches.

La polarisation provoquée origine des processus électrochimiques qui se produisent lorsque le courant passe : (1) d'un milieu à conductibilité ionique (eau) à un milieu à conductibilité électronique; et (2) d'un milieu à conductibilité ionique à un milieu peu conducteur ou au contact d'un milieu de conductibilité ionique différente.

Examinons ces deux cas plus en détail.

4.1.1 Potentiel d'électrode

Le passage du courant dans le sol ou la roche se fait principalement par conduction ionique à travers des pores ou fractures remplis de solution. Or, il arrive que certains de ces pores soient bouchés par des particules métalliques, c'est le cas d'un minéral (figure 4.1). Puisque ces particules ne peuvent transmettre les ions, il y a accumulation des ions à la surface de la particule. Ces charges sont positives du côté A et négatives du côté B. Ces charges attirent ou repoussent des électrons dans la particule métallique. On obtient autour de la particule ce qui est appelé une *double couche* électrisée et la particule est dite *polarisée*. Si le courant d'émission cesse brusquement, cette double couche se décharge, se comportant comme un condensateur moléculaire.

Puisque chaque pore bloqué devient polarisé, l'effet P.P. total dépend donc du nombre de pores bloqués. Ce phénomène ne dépend donc pas seulement du volume du minéral, mais aussi de son état de dissémination. On notera cependant que de très petits grains offrent une très grande résistance électrique, si bien que le courant d'excitation dans un minéral finement disséminé va suivre de façon

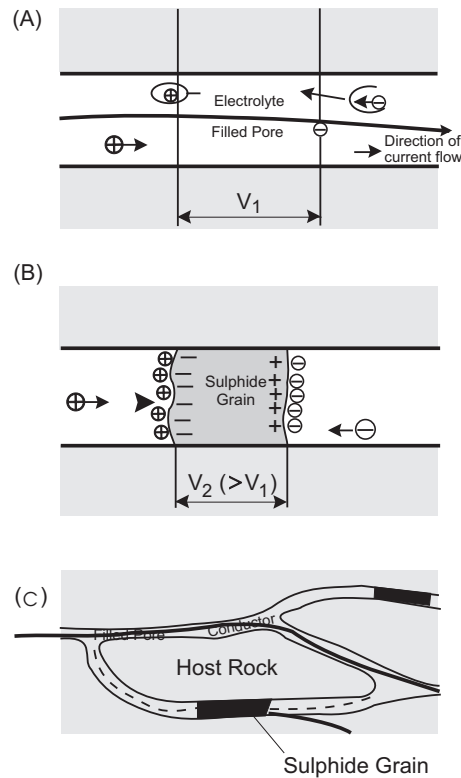


Figure 4.1: Génération de l'effet P.P. en présence de particules métalliques.

préférentielle les pores non obstrués, ce qui limite la réponse P.P. Une très grande porosité et une forte conductivité des fluides remplissant les pores vont également tendre à réduire la réponse P.P. puisque les deux tendent à court-circuiter le courant à travers les passages libres.

Le temps de délai mesuré est variable. Il dépend de facteurs tels que :

- la structure de la roche,
- la perméabilité,
- le diamètre des pores,
- la conductivité des fluides d'imbibition,
- la conductivité des particules métalliques.

Le phénomène ci-haut décrit s'appelle le potentiel d'électrode. Le deuxième phénomène responsable de l'effet P.P. est le potentiel de membrane.

4.1.2 Potentiel de membrane

Ce phénomène est plus ou moins bien compris, mais on suppose qu'il s'agit d'un genre de filtration d'ions dû à la présence de minéraux argileux (figures 4.2 et 4.3). Dans ce cas, des ions de diamètres différents sont séparés à cause de la finesse des pores du matériau qu'ils essaient de traverser. Les argiles agissent comme des filtres très fins, le diamètre des pores étant du même ordre de grandeur que celui des ions. Cependant, les ions négatifs ont tendance à être plus gros que les ions positifs et sont davantage retenus. Ceci produit une surface chargée négativement. Les charges négatives attirent un certain nombre de charges positives pour maintenir l'équilibre électrique et une *double couche* électrique en résulte.

Lorsqu'un courant traverse les argiles, l'équilibre de la double couche est rompu et une nouvelle

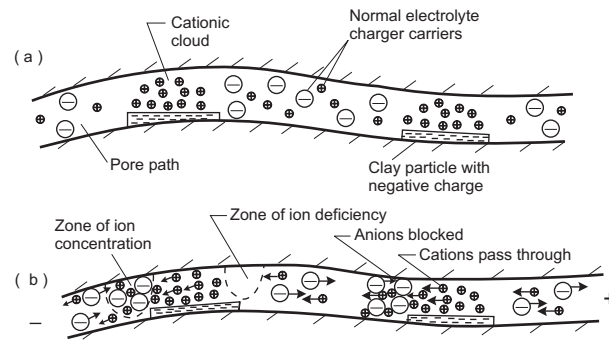


Figure 4.2: Génération du potentiel de membrane.

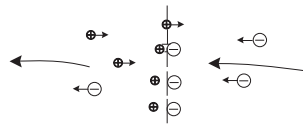


Figure 4.3: Génération du potentiel de membrane par une double couche.

forme d'équilibre s'établit sur une certaine période de temps. Lorsque le courant d'excitation est coupé, les charges se redistribuent selon leur état d'équilibre premier. Comme un délai se produit, on a un effet P.P.

Dans la polarisation de membrane, on doit aussi considérer que la plupart des minéraux ont une charge nette négative à l'interface entre la surface de la roche et le fluide contenu dans les pores. Les ions positifs sont donc attirés vers l'interface et les ions négatifs repoussés. Cette concentration d'ions positifs peut atteindre une épaisseur de 10^{-6} cm. Si le pore a un diamètre de cet ordre de grandeur, le déplacement des ions négatifs sera empêché lors de l'application d'un courant externe, produisant une accumulation de charge et une polarisation. Lorsque le courant est coupé, les ions reviennent à leur état d'origine en un temps fini, produisant un effet P.P. La chose la plus importante à retenir est que l'effet P.P. provient du blocage des ions dans un conducteur ionique.

En prospection minière, la polarisation de membrane est souvent vue comme un effet parasite car il complique les mesures et l'interprétation de l'effet P.P. lorsqu'on cherche des minéraux. Il n'y a pas vraiment d'utilité à détecter des argiles par la P.P., en tout cas pas en exploration minière.

4.1.3 Minéraux donnant des effets P.P.

1. la plupart des sulfures ;
2. quelques oxydes (la magnétite) ;
3. graphite ;
4. certains argiles (bentonite).

L'effet P.P. pour la polarisation de membrane est un phénomène plus faible que celui de la polarisation d'électrode. Les deux effets sont semblables et rien ne permet de les distinguer dans les mesures.

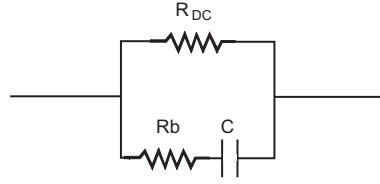


Figure 4.4: Circuit électrique équivalent à l'effet P.P.

4.2 Circuit électrique équivalent

D'un point de vue électrique, on peut grossièrement représenter une roche présentant un effet P.P. au circuit de la figure 4.4 où R_{DC} est la résistance due à la conduction ionique dans les pores non bouchés, R_b est la résistance due à la conduction ionique dans les pores bouchés, C est la capacitance représentant la charge qui s'installe sur les particules métalliques lorsque le courant est injecté.

L'impédance du système est

$$\frac{1}{Z_f} = \frac{1}{Z_{DC}} + \frac{1}{Z_b}, \quad (4.1)$$

ou bien

$$Z_f = \frac{Z_b Z_{DC}}{Z_b + Z_{DC}} \quad (4.2)$$

avec $Z_b = R_b + \frac{1}{i\omega C}$. À basse fréquence, la capacitance agit comme un circuit ouvert et on mesure R_{DC} seulement. À plus haute fréquence, la capacitance approche le court-circuit et le calcul de R dépend de R_b et R_{DC} . Le voltage transitoire vaut

$$V(t) = V_o \left[\frac{R_{DC}}{R_{DC} + R_b} \right] e^{-t/\tau}, \quad (4.3)$$

où $\tau = (R_b + R_{DC})C$ est la constante de temps du système.

4.3 Étude de la courbe de décharge

4.3.1 Concept de chargeabilité

Si dans un milieu homogène, nous introduisons un courant par deux électrodes, un champ électrique E est généré. La densité de courant dans le milieu est donnée par la loi d'Ohm : $J = \sigma E$. La différence de potentiel entre deux autres électrodes va être donnée par

$$V = \frac{I}{\sigma} F(s, g) \quad (4.4)$$

Cette relation est vraie s'il n'y a pas d'effets de polarisation. $F(s, g)$ est fonction de la grandeur et de la forme du corps et de la géométrie des électrodes.

Si, comme à la figure 4.5, on introduit maintenant un phénomène de polarisation (réel, pour tout mécanisme), on peut le représenter comme étant une distribution de dipôles électriques s'apparentant à de petites piles électriques dont l'intensité est proportionnelle à la densité du courant primaire, appelée J , et qui s'opposent au courant principal. Si la constante de proportionnalité est appelée m , alors la densité de courant réelle sera de $J - mJ = J(1 - m)$. Le densité de courant est donc réduite, mais le champ électrique E reste le même, ce qui en vertu de la loi d'Ohm a pour conséquence de réduire la conductivité effective du milieu à $\sigma(1 - m)$ (Seigel, 1959).

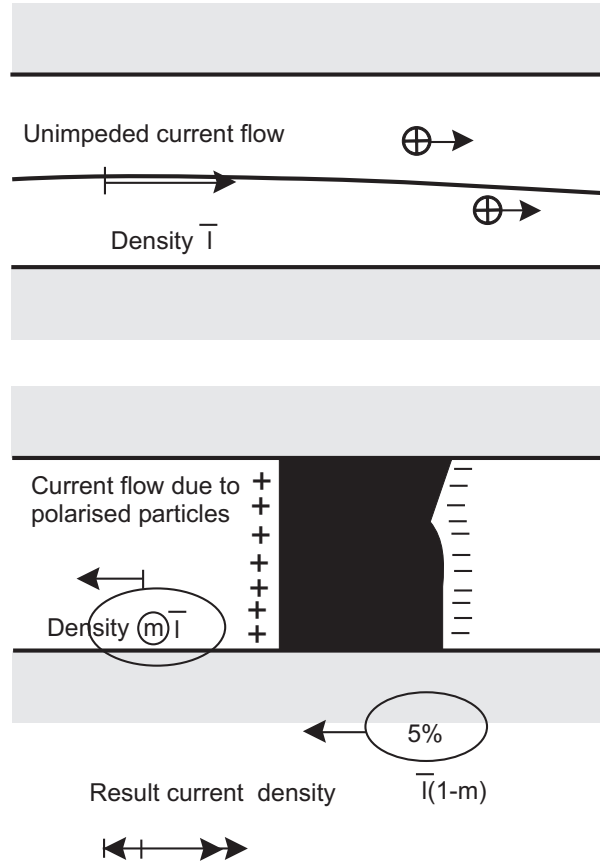


Figure 4.5: Réduction de l'intensité du courant en présence de polarisation.

Ainsi, en présence d'un effet P.P., le potentiel entre deux électrodes augmentera à

$$V_o = \frac{I}{\sigma(1-m)} F(s, g) \quad (4.5)$$

L'augmentation du voltage, appelée voltage secondaire V_s , est donné par

$$\begin{aligned} V_s = V_o - V &= \frac{I}{\sigma} F(s, g) \left(\frac{1}{1-m} - 1 \right) \\ &= \frac{I}{\sigma} F(s, g) \frac{m}{1-m} \end{aligned} \quad (4.6)$$

et le rapport entre la valeur maximale de V_s sur le voltage observé

$$\frac{V_s}{V_o} = \frac{V_o - V}{V_o} = m \quad (4.7)$$

m est appelé la chargeabilité du médium. L'expression de la chargeabilité ne contient aucun facteur géométrique donc, idéalement, m est un effet des volumes. Le rapport $\frac{V_s}{V_o}$ devrait être indépendant de :

1. la topographie,
2. la géométrie des électrodes,
3. la grosseur et la forme de l'échantillon (pour des échantillons homogènes tel qu'utilisés en laboratoire).

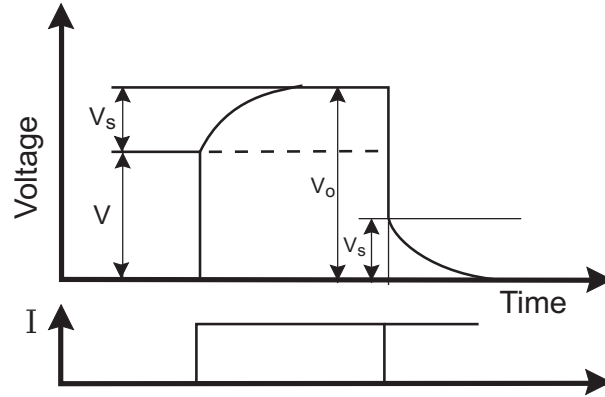


Figure 4.6: Courbe de décharge.

On peut se demander ce que la mesure de la chargeabilité implique comme opération sur le terrain. On mentionnera que la chargeabilité peut être mesurée de deux manières sur le terrain : (1) dans le domaine du temps, ou transitoire, et (2) dans le domaine des fréquences.

Nous commencerons donc par examiner le problème sous sa forme la plus utilisée et la plus visuelle, le domaine du temps.

4.4 Mesure de la P.P. dans le domaine du temps

Tel que mentionné, l'application d'un courant continu dans le sol suivi de son arrêt produira une courbe voltage-temps telle que celle de la figure suivante. Le voltage V_o est celui qui est observé et mesuré et est dû à l'application du courant et aux effets de polarisation. Le voltage continu V_s est celui qui serait observé immédiatement après que le courant fut coupé et ce, si ce courant avait été appliqué suffisamment longtemps pour que V_o atteigne son maximum. On voit facilement que $V_s = V_o - V$.

Dans des travaux pratiques, la vraie chargeabilité d'un milieu ne peut être mesurée ou si elle le peut, elle n'est d'aucun intérêt puisque cela impliquerait que le sous-sol est homogène. Nous recherchons des endroits où il y a des hétérogénéités. Donc ce que nous mesurons vraiment est la chargeabilité apparente m_a qui est une fonction des vraies chargeabilités et résistivités des matériaux sondés.

Trois points méritent aussi d'être mentionnés à ce sujet. Il s'agit de chargeabilité apparente parce que :

1. m_a est fonction de tous les m_i présents ;
2. V et les autres voltages dépendent du temps *on* de l'émetteur, à moins que $t \rightarrow \infty$;
3. à cause de problèmes pratiques, V_s ne peut être mesuré donc un autre voltage plus petit que V_s est utilisé. (N'oublions pas que V_s est le voltage immédiatement après la coupure).

Le problème principal dans l'observation de V_s provient de sa nature transitoire. Lorsque le courant est tourné *on* et *off* instantanément, il se produit toute sorte de voltages secondaires transitoires dans le sous-sol et dans l'équipement. Ceci se produit dans tout système ayant de l'inductance. Nous devons donc attendre avant de pouvoir mesurer V_s , donc on ne mesure pas vraiment V_s .

En principe, il est possible de mesurer la courbe voltage-temps et d'extrapoler vers le temps où le courant a été coupé pour obtenir V_s directement. Cette approche est trop compliquée du point de vue appareillage et temps. On mesure alors un autre voltage qui peut s'exprimer comme

$$V_t = F(m_a, V_o, t). \quad (4.8)$$

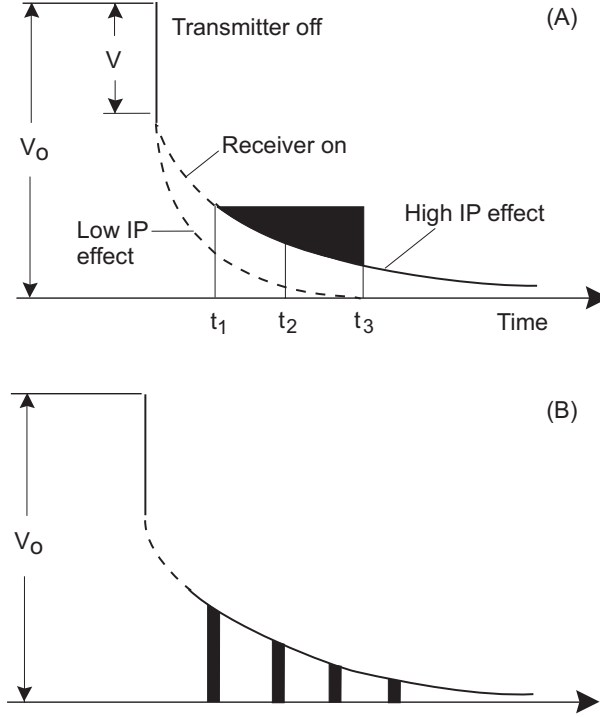


Figure 4.7: Courbe de décharge.

Puisque V_o est connu, la fonction $F(m_a, V_o, t)$ ne dépend que de m_a . Si les mesures sont faites à des temps fixes alors on peut avoir une idée des valeurs relatives de V_t pour différents m .

$$m = \frac{1}{V_o} \int_a^b V_t(t) dt. \quad (4.9)$$

Pour avoir des chiffres significatifs, on aura des mesures en ms ou mV/V.

4.5 Mesure de la P.P. dans le domaine de fréquences

L'intérêt de la méthode en fréquence réside dans le fait que la résistivité apparente mesurée change avec la fréquence du courant appliqué. Le fait que ρ_a change avec la fréquence peut être facilement compris. Lorsque la fréquence est élevée, le temps d'injection est court et la polarisation n'a pas le temps de se produire. Alors le voltage V_o mesuré est proche de V , beaucoup plus faible que si la polarisation avait le temps de se produire, ainsi ρ_a est plus faible. La résistivité mesurée à haute fréquence est donc celle qui serait mesurée s'il n'y avait pas d'effet P.P.

D'un autre côté, à basse fréquence, le voltage a le temps d'augmenter et d'atteindre un maximum alors V_o est plus grand et ρ_a est plus élevée. Pour rendre utilisable cette propriété, un paramètre appelé effet de fréquence (ou *EF*, en anglais *frequency effect*) a été défini

$$EF = \frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{AC}} \quad (4.10)$$

où $\rho_{DC} = \rho$ pour $f = 0$ et où $\rho_{AC} = \rho$ à hautes fréquences.

En pratique, on utilise ρ_{DC} pour f compris entre 0.05 et 0.5 Hz, et ρ_{AC} pour f supérieur à 10 Hz.

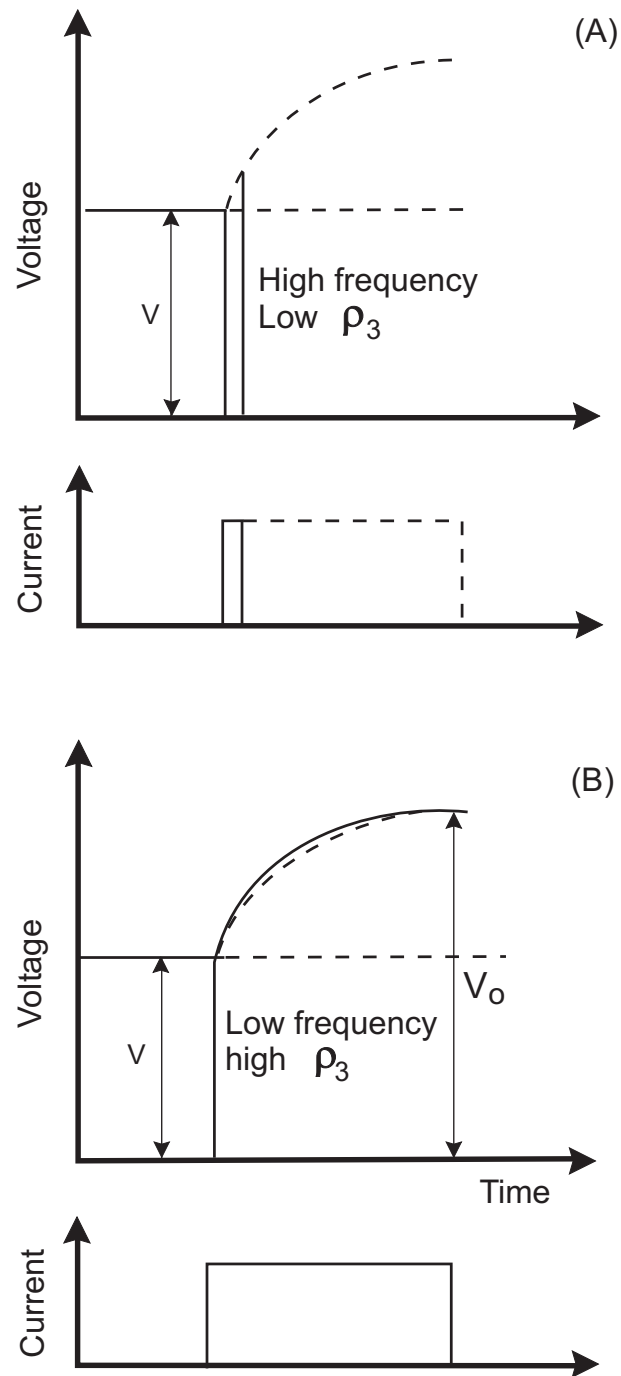


Figure 4.8: Effet de la fréquence sur la résistivité apparente.

4.6 Relation entre la chargeabilité et l'effet de fréquence

Intuitivement, on sait que puisque l' EF dépend de V_s et que V_s définit la chargeabilité, m et EF doivent être reliés.

À haute fréquence, l'effet P.P. n'est pas mesuré, et on a

$$V = \frac{I}{\sigma} F(s, g) = \frac{I}{\sigma_{AC}} F(s, g).$$

À basse fréquence, l'effet P.P. est présent, et on a

$$V_o = \frac{I}{\sigma_{AC}(1-m)} F(s, g).$$

La conductivité mesurée serait la même que celle mesurée en utilisant un courant DC dans le domaine des fréquences, soit

$$V_o = \frac{I}{\sigma_{DC}} F(s, g),$$

donc (puisque $\rho = 1/\sigma$)

$$\rho_{AC} = \rho_{DC}(1-m).$$

D'après la définition de l' EF

$$EF = \frac{\rho_{DC} - \rho_{DC}(1-m)}{\rho_{DC}(1-m)} = \frac{m}{1-m}, \quad (4.11)$$

ou alors

$$m = \frac{EF}{1+EF}. \quad (4.12)$$

Si $EF \ll 1$, donc $\rho_{DC} = \rho_{AC}$, c'est-à-dire que le matériau n'est pas polarisable ($m = EF$). Les équations montrent que les deux méthodes sont semblables et mesurent la même chose.

En pratique, ces relations ne sont pas rigoureusement vérifiées parce qu'une analyse complète de la P.P. n'est pas disponible (simplifications dans les deux cas) et aussi parce que les mesures ne sont pas absolument faites en DC et THF (très hautes fréquences).

4.7 Le facteur métal

On définit un deuxième paramètre appelé le facteur métal FM égal à

$$FM = \frac{EF}{\rho_{DC}} \times 2\pi \times 10^5.$$

Le FM est une mesure par laquelle on tente de corriger l'effet sur la P.P. de la variation de résistivité d'un milieu à un autre. Le facteur 2π indique une géométrie semi-infinie et la constante 10^5 ne sert qu'à obtenir des chiffres significatifs.

4.8 La P.P. multi-fréquentielle

La disponibilité de programmes d'inversion rapide permet l'analyse de mesure de P.P. complexe. On sait que le mécanisme contrôlant l'effet P.P. résulte en un déphasage entre le courant injecté dans

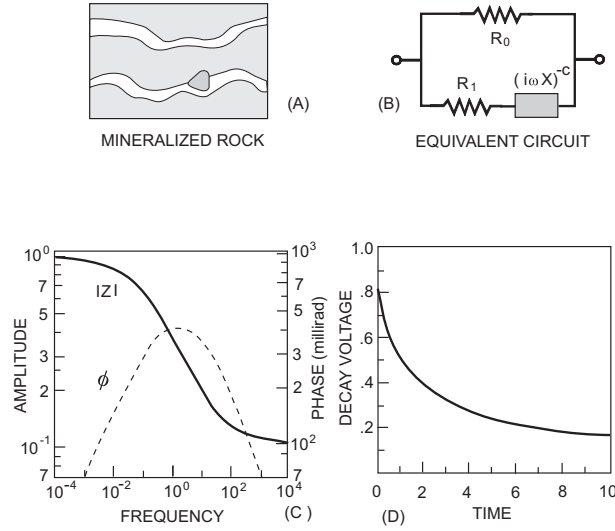


Figure 4.9: Modèle Cole-Cole.

le sol et le voltage résultant. L'idée derrière la P.P. multi-fréquentielle est d'utiliser ce déphasage pour essayer de discriminer entre les différentes sortes de minéralisation dans le sol. Ainsi, les sulfures massifs et le graphite ont des signatures spectrales différentes de la pyrrhotite et la magnétite qui ont des signatures semblables.

Le circuit équivalent (figure 4.9) à l'effet observé dans le sol est appelé le modèle Cole-Cole. On a observé qu'une source de bruit importante dans les mesures P.P. est le couplage électromagnétique (EM). Le modèle de Cole-Cole permet de soustraire cet effet des mesures. Il dépend des paramètres suivants :

- R_o résistivité DC simulant les pores non obstrués (R_o ne dépend pas de la minéralisation présente);
- m la chargeabilité;
- τ constante de temps pour l'effet P.P.;
- c constante qui caractérise la dépendance en fréquence de phénomène (c varie entre 0.25 et 0.35 pour la plupart des effets P.P.).

Le modèle est décrit par

$$Z = R_o \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]. \quad (4.13)$$

Notons que m et τ varient beaucoup avec le type et la qualité de minéralisation. L'influence de m sur Z est illustrée à la figure 4.10.

Le modèle Cole-Cole est également utilisé pour discriminer les types de gisement. À basse fréquence, l'impédance $\|Z\|$ vaut R_o , à haute fréquence $\|Z\|$ est l'équivalent de R_o en parallèle avec R_1 . Entre les deux, il y a une zone de transition où l'amplitude décroît lentement et le déphasage augmente avec la fréquence.

Il existe des programmes d'inversion qui permettent de retrouver les quatre paramètres à partir de données de terrain.

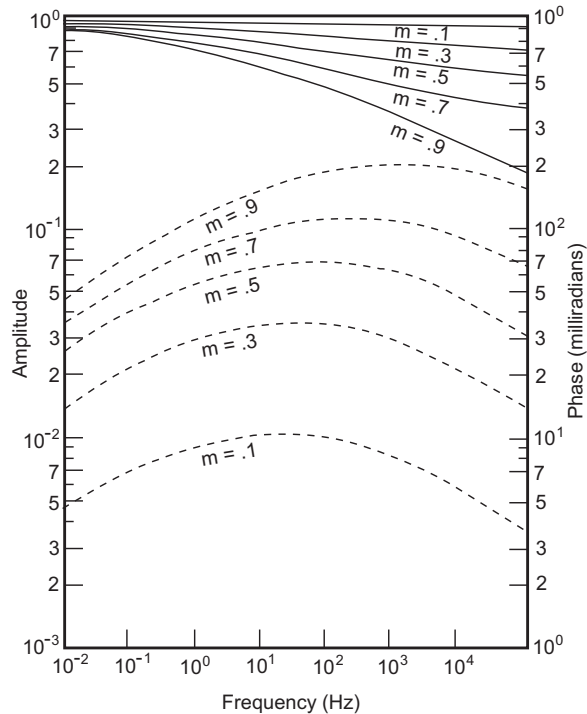


Figure 4.10: Influence de la chargeabilité sur l'impédance complexe (modèle Cole-Cole).

4.9 Interprétation des données P.P.

4.9.1 Présentation des données

Généralement, les données P.P. sont présentées sous forme de pseudo-sections de résistivité apparente et de chargeabilité. Les mesures sont habituellement réalisées avec une configuration d'électrode dipôle-dipôle. Si l'écartement n augmente, la résolution diminue (*averaging effect*).

Construction de la pseudo-section

Les données mesurées sont présentées en sections de contour ou de couleur. L'axe vertical est une pseudo-profondeur proportionnelle à l'écartement des électrodes n . La mesure est reportée au point :

- d'abscisse = milieu du dispositif utilisé ;
- d'ordonnée = pseudo-profondeur n .

4.9.2 Réponses types

Les effets topographiques vont occasionner des anomalies parasites importantes. On peut soustraire la réponse due à l'effet topographique.

Un dyke vertical est représenté par une anomalie conique caractéristique (figures 4.16 et 4.17).

L'amplitude de l'anomalie diminue fortement si la profondeur du corps générant l'anomalie augmente (figures 4.18 et 4.19).

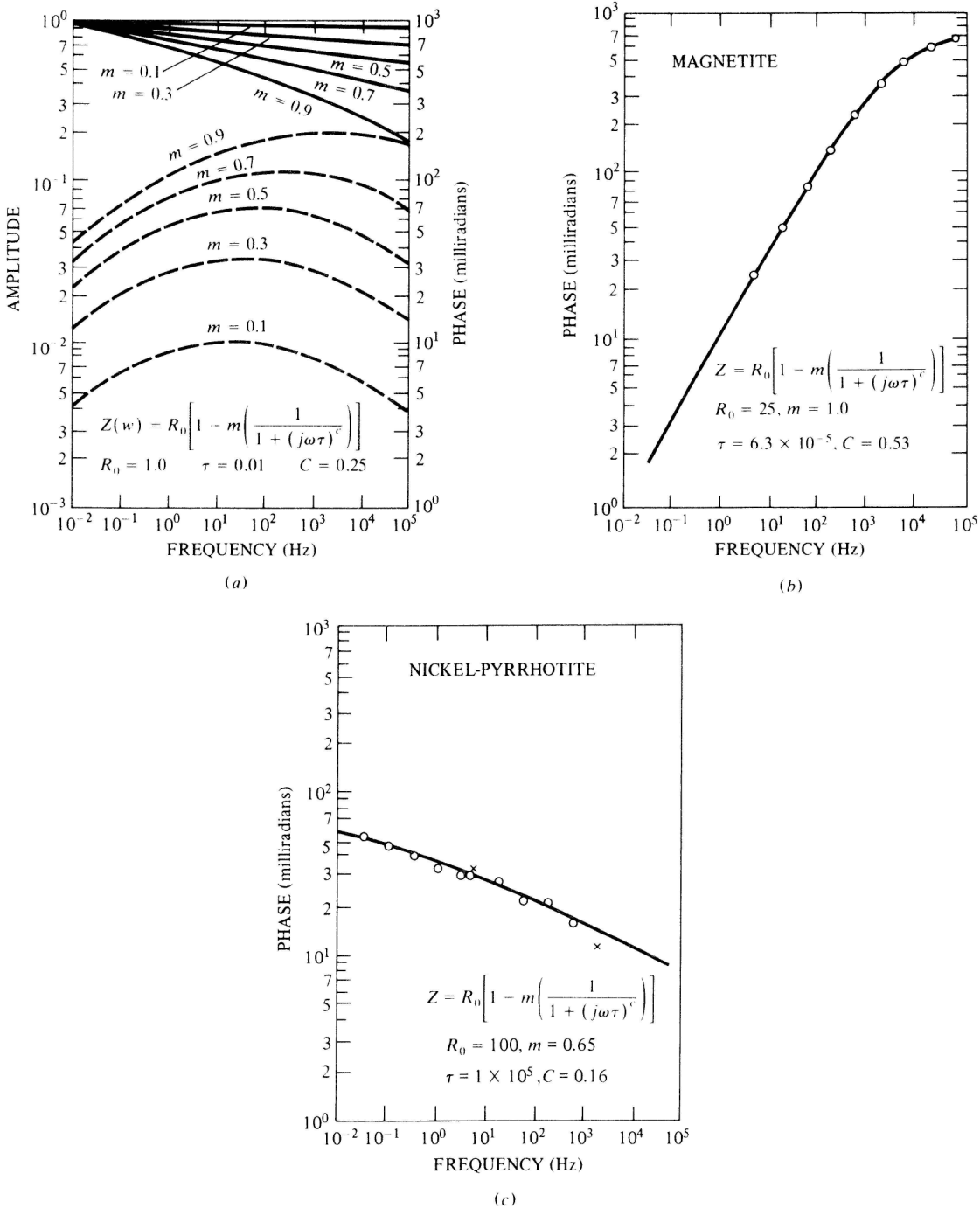
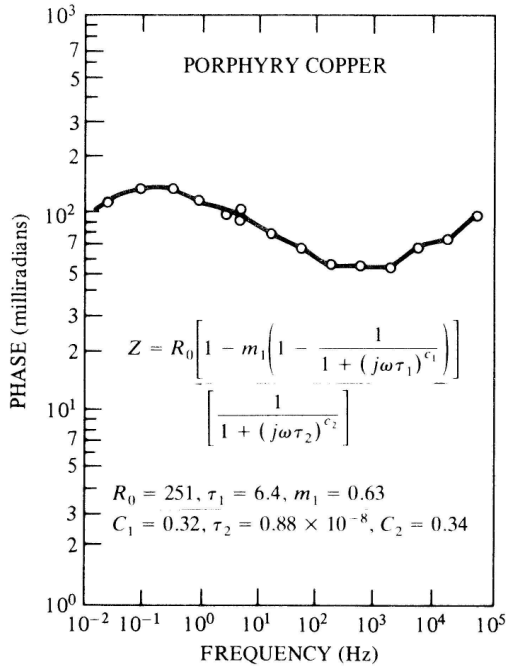
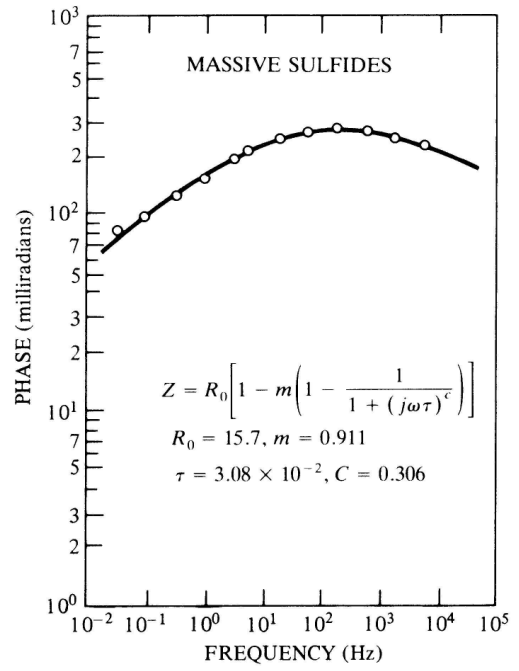


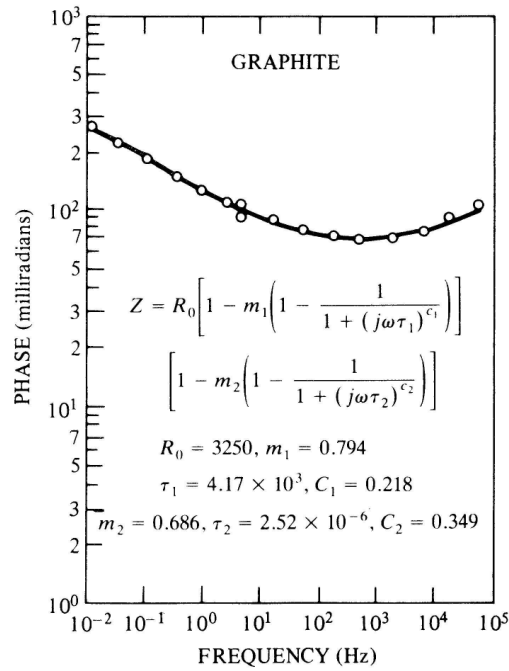
Figure 4.11: Signatures spectrales de l'effet P.P.



(d)



(e)



(f)

Figure 4.12: Signatures spectrales de l'effet P.P.

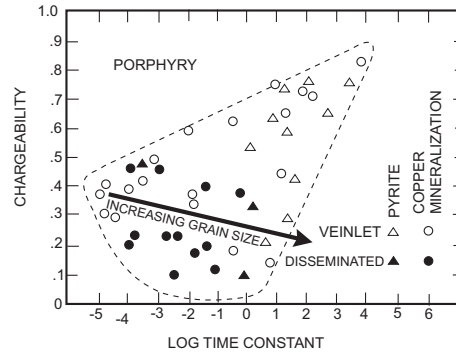


Figure 4.13: Chargeabilité et constante τ de différents dépôts de porphyre.

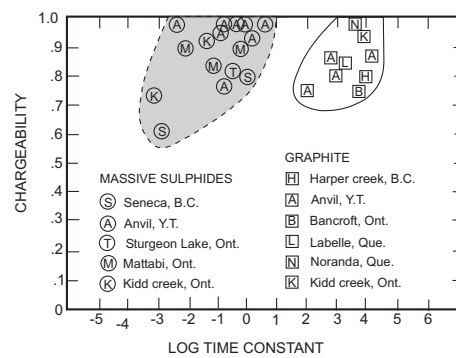


Figure 4.14: Chargeabilité et constante τ de différents dépôts de sulfures et graphite.

La présence d'un mort-terrain conducteur a pour effet de camoufler la réponse du corps sous-jacent (figure 4.20).

La mesure de chargeabilité peut compenser pour les faibles anomalies de ρ_a lorsque le conducteur est profond (figure 4.21).

L'anomalie P.P. est généralement de plus grande amplitude qu'en résistivité DC (pour les métaux).

4.9.3 Interprétation semi-quantitative

Profondeur

Il existe des règles de pouce pour évaluer de façon approximative la profondeur d'une structure conductrice, résistante ou polarisable sur une pseudo-section. La profondeur est fonction de l'écartement initial des électrodes a et du facteur multiplicatif d'écartement n du dispositif. Le facteur n peut être évalué à une demi unité près (i.e. 2.5 si l'anomalie max est entre $n=2$ et $n=3$). Ces règles sont données au tableau 4.1.

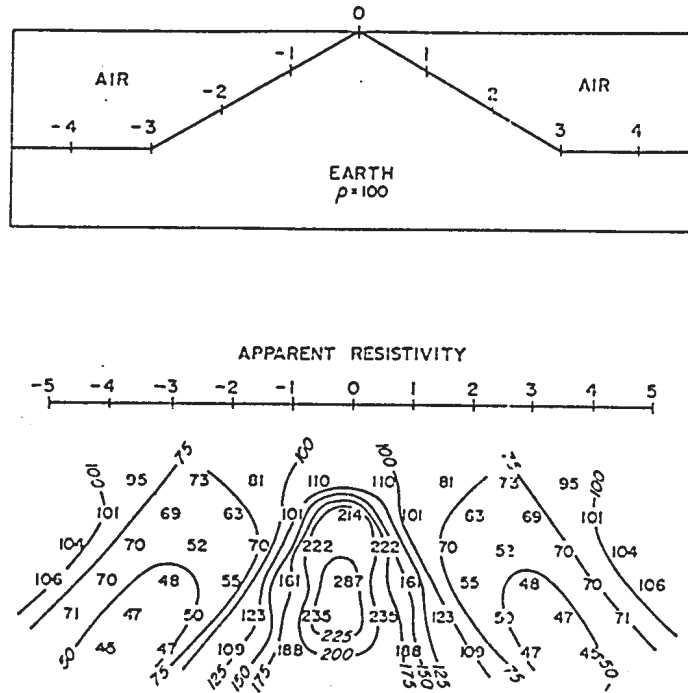


Fig. 5. Apparent resistivity anomaly due to a ridge with 30-degree slopes. Contour interval on pseudosection is 25 Ω -m.

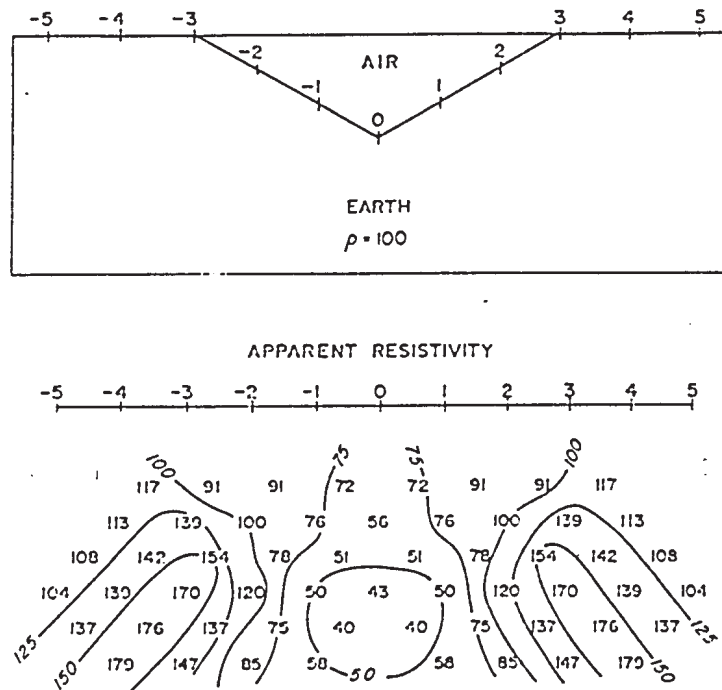


Fig. 4. Apparent resistivity anomaly due to a valley with 30-degree slopes. Contour interval on pseudosection is 25 Ω -m.

Figure 4.15: Effet topo

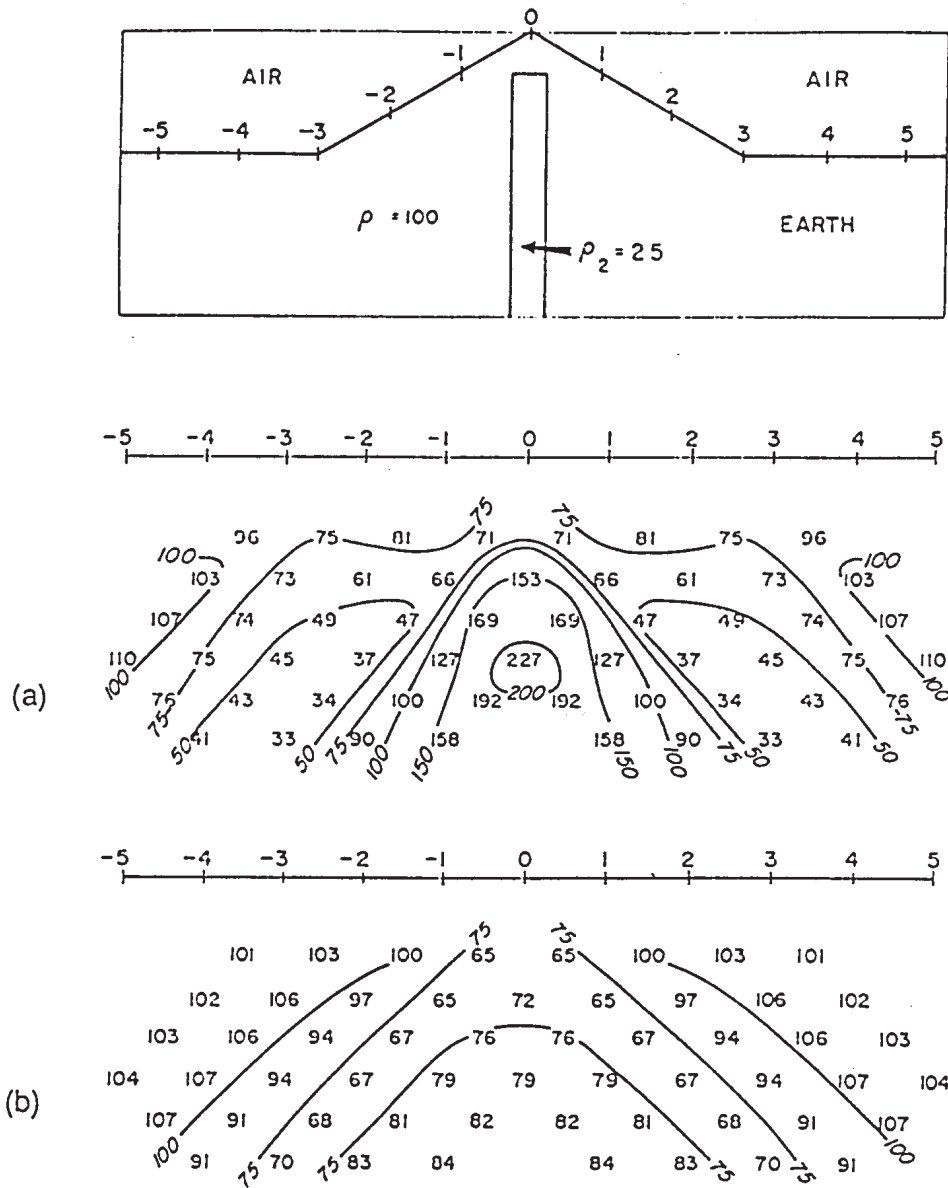


FIG. 10. Apparent resistivity over a buried dike under a ridge: (a) topographic effect included, (b) corrected for topography. Contour interval on pseudosections is 25 Ω -m.

Figure 4.16: Dyke vertical sous une crête

Tableau 4.1: Règles de pouce en interprétation P.P.

Configuration	Profondeur du sommet
Dipôle-dipôle	$0.19(n+2)a$
Pôle-dipôle	$0.24(n+2)a$
Pôle-pôle	$0.35na$

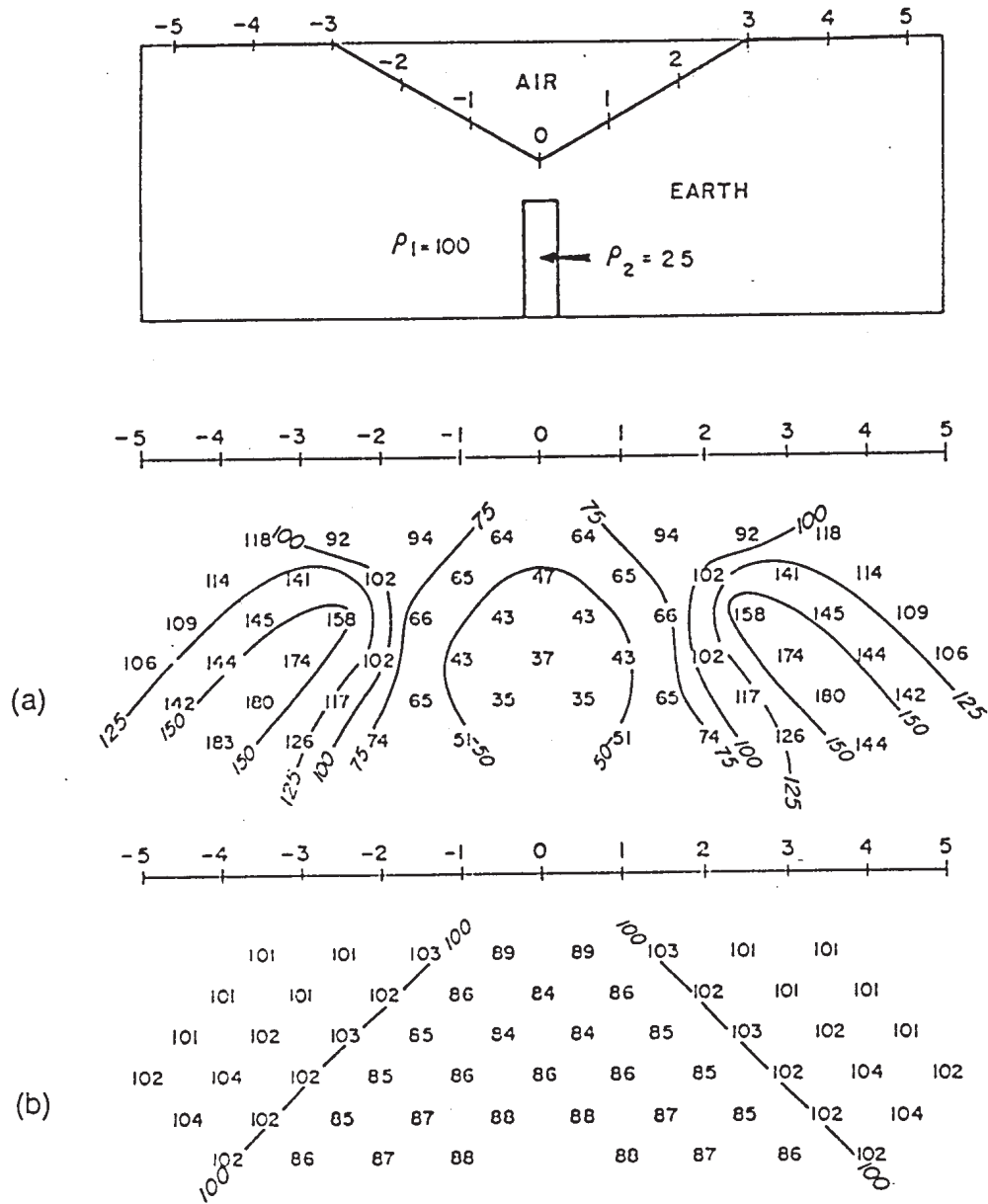
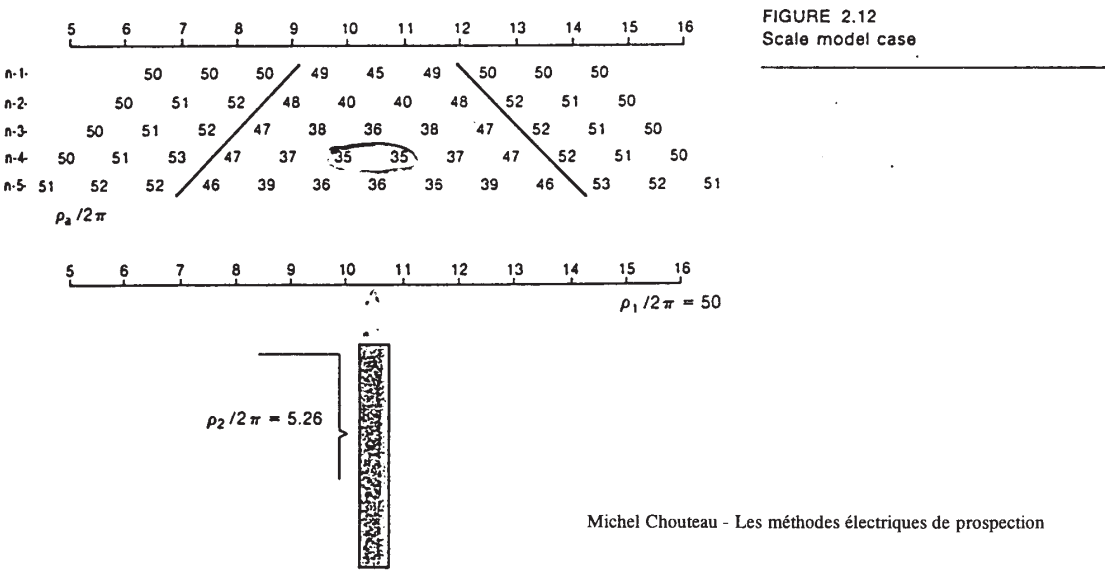
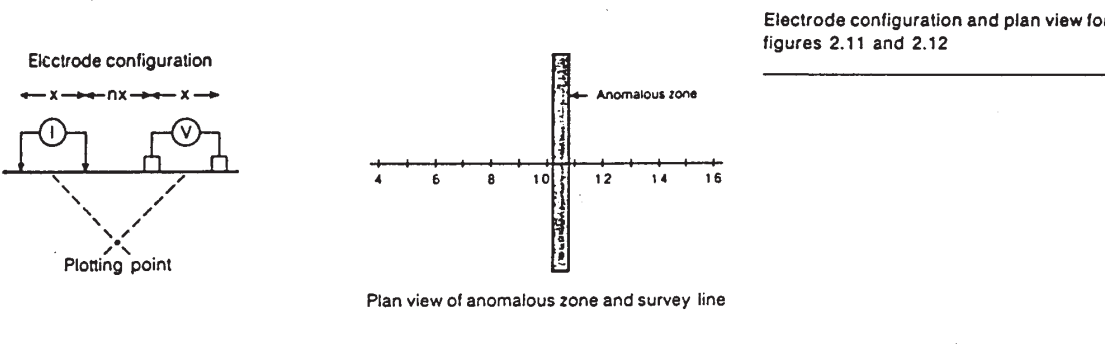
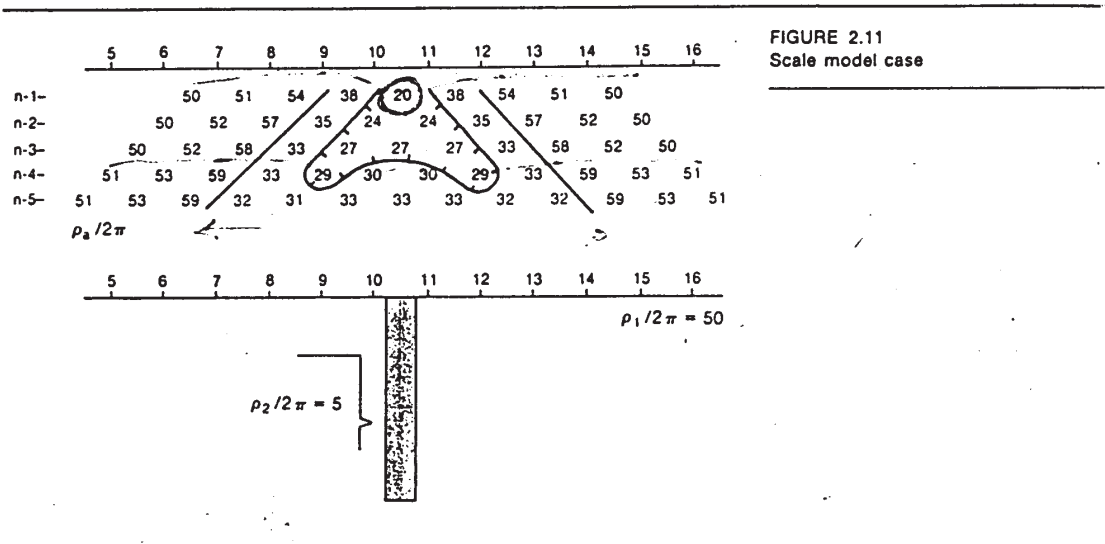


FIG. 9. Apparent resistivity over a buried dike under a valley: (a) topographic effect included, (b) corrected for topography. Contour interval on pseudosections is 25 Ω -m.

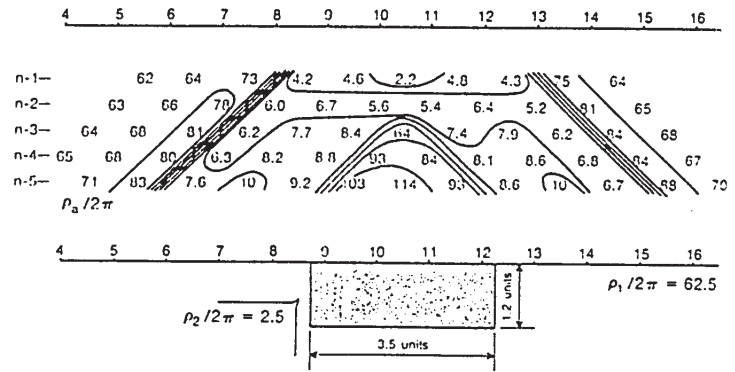
Figure 4.17: Dyke vertical sous une vallée



Michel Chouteau - Les méthodes électriques de prospection

Figure 4.18: Effet de la profondeur du corps

FIGURE 2.13
Scale model case



Electrode configuration and plan view for figures 2.13 and 2.14

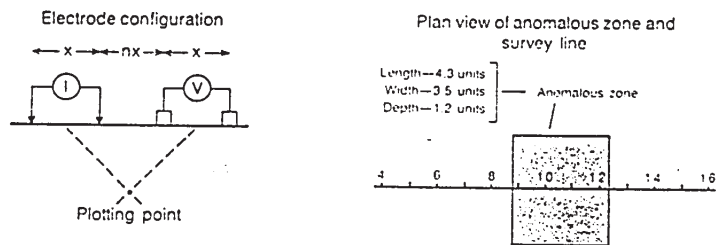


FIGURE 2.14
Scale model case

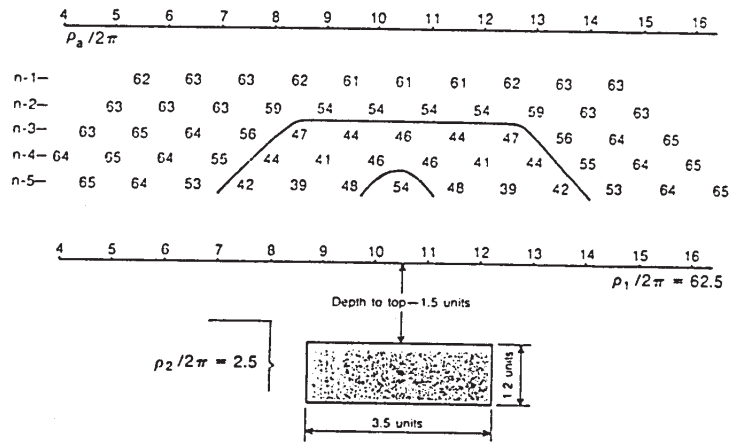
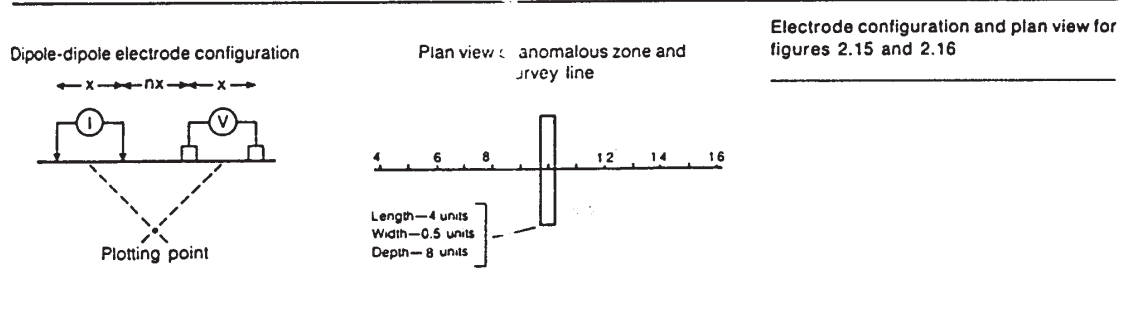
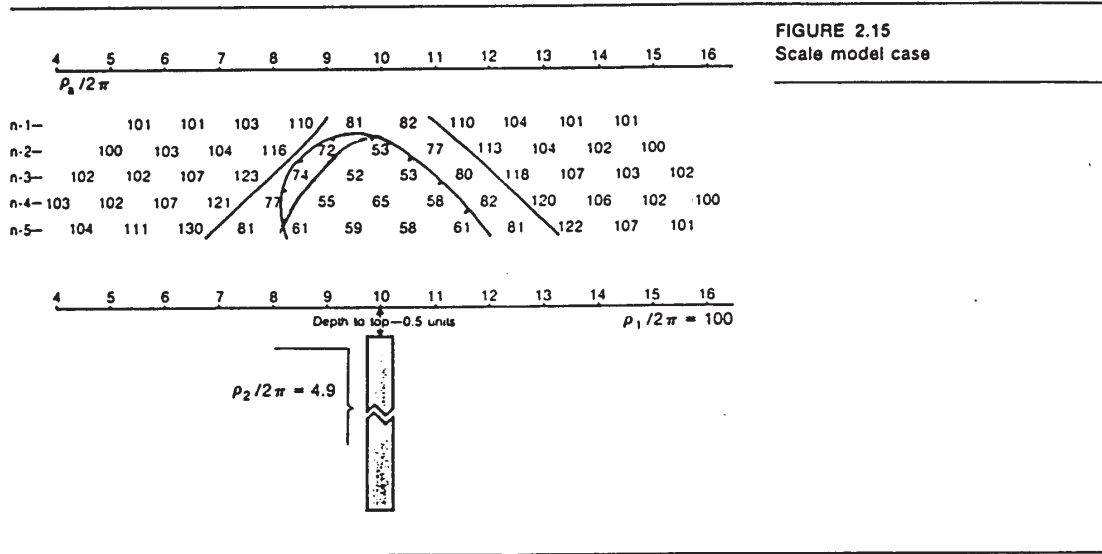


Figure 4.19: Effet de la profondeur du corps



Electrode configuration and plan view for figures 2.15 and 2.16

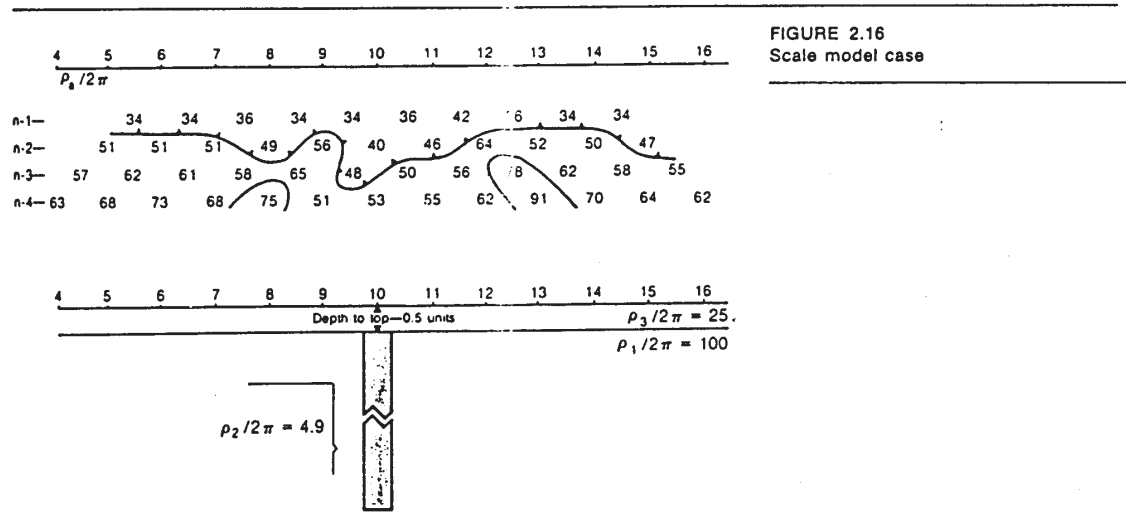
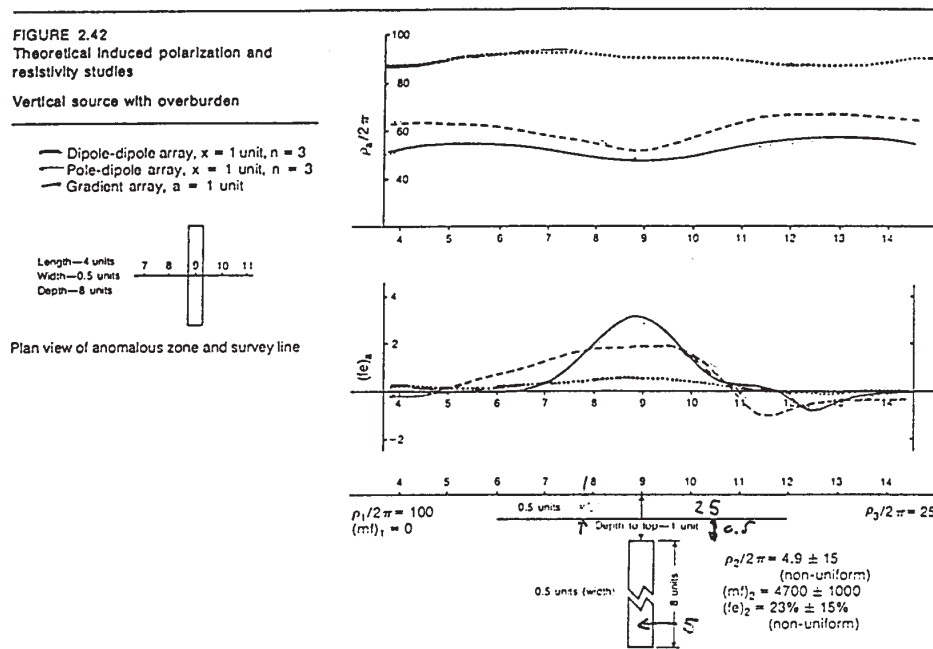


Figure 4.20: Effet du mort-terrain

Figure 4.21: Chargeabilité vs ρ_a

4.10 Équipement

4.10.1 Sources de courant

Pour les mesures P.P. en exploration, les sources doivent être puissantes car les distances entre électrodes peuvent être grandes. On utilise alors des génératrices permettant d'atteindre des puissances de 1 à 10 kW. Pour les mesures DC en environnement ou en génie, les écartements entre électrodes sont plus modestes, et une batterie de voiture 12V est suffisante pour alimenter la source de courant pendant une journée.

Lors de levés P.P., on utilise nécessairement un courant alternatif. Cependant, pour un levé de résistivité, il est possible d'utiliser une source DC directement (batterie 12V). L'avantage de la source DC est qu'on mesure la vraie résistivité DC. Cependant, la polarisation spontanée se superpose à la mesure et il faut donc la mesurer séparément et la soustraire. De plus, l'utilisation d'une source DC requiert l'utilisation de pots poreux. Pour ces raisons, on travaille généralement avec une source AC de basse fréquence. Le signal est en habituellement une onde carrée avec inversion de polarité, qui permet de réduire les effets de polarisation électrolytique. L'avantage d'une source AC est donc qu'on élimine plus facilement l'effet dû à la P.S. Par contre, la résistivité mesurée n'est pas la vraie résistivité DC, mais est légèrement plus faible. La source AC entraîne également des problèmes de couplage et de courants de fuite (en particulier dans les sols humides).

4.10.2 Électrodes et câblage

Avec des sources AC, des électrodes métalliques sont adéquates. Elles sont plus faciles à manipuler et nécessitent peu d'entretien, contrairement aux pots poreux. Une longueur est 50 cm, permettant de les enfoncer de 10-15 cm, est suffisante. Si le sol est sec, il peut être nécessaire d'arroser les électrodes

pour réduire la résistance de contact. En P.P., les câbles d'injection doivent pouvoir supporter de 5 à 10 kV.