



Cours

Méthodes de Reconnaissances Géophysique

UED1 / Composante 2

Introduction

La reconnaissance géophysique, ou prospection géophysique (geophysical survey en anglais), met en œuvre un ensemble de méthodes indirectes où l'on cherche, à partir d'une ou Plusieurs propriétés physiques à déterminer la structure du milieu souterrain de manière non destructive (non-invasive) et avec un échantillonnage spatial suffisamment dense pour que les Variations latérales et verticales en soient décrites aussi complètement que le permettent la Propriété et la méthode de mesure utilisées. La résolution, c'est à dire le degré de finesse avec lequel le sous-sol va être décrit, est en effet variable selon la propriété choisie et la méthode utilisée.

Caractérisée par la diversité de ses méthodes, la géophysique intervient actuellement dans plusieurs domaines, à savoir : l'exploration pétrolière et minière, le génie civil, la télédétection, la sismologie, la cartographie ... etc. Dans le secteur de la recherche minière, les méthodes géophysiques, particulièrement les méthodes de potentiel, jouent un rôle primordial dans la recherche et l'évaluation des différents types de gisements.

Plusieurs méthodes et techniques de prospection géophysique peuvent être effectuées à partir d'un avion dont, trois parmi elles sont les méthodes de base, à savoir : le magnétisme, la radiométrie et l'électromagnétisme.

Les recherches faites à des fins militaires avaient largement contribué à promouvoir des méthodes géophysiques plus spécifiques à savoir l'Aéromagnétisme et la radiométrie aéroportée qui bénéficient d'un caractère stratégique. Depuis lors, et stimulée par l'accroissement des besoins en matières premières qui devaient être recherchées dans des régions vierges ou pas complètement prospectées, la géophysique n'a cessé de se développer parallèlement aux techniques de mesure et appareillage utilisé, Parmi les méthodes et techniques qui peuvent être effectuées à partir d'un levé aérien, le magnétisme et la radiométrie sont les plus employées.

La difficulté pour le géophysicien et de fournir l'épaisseur du terrain meuble, l'épaisseur de la roche altérée, le toit de la roche saine, les caractéristiques géomécaniques du massif rocheux et du terrain meuble, plusieurs facteurs interviennent dans le choix des méthodes géophysiques a employer : la présence d'un contraste suffisant, la pénétration, le pouvoir de résolution et une interprétation non univoque.

La méthode de prospection électrique

Introduction

La prospection électrique est une des méthodes géophysiques, appliquée dans l'exploration du sous sol, par sondage vertical ou par profilage (recherche des conducteurs).

La profondeur d'investigation s'étale de quelques centimètres à quelques centaines de mètres de profondeur; donc son spectre d'utilisation est très large: En sub-surface, en recherche minière, dans l'agriculture, dans l'aménagement du territoire, construction de bâtiments, des ponts et chaussées, voies ferrées, dans les recherches archéologiques, également dans la recherche des aquifères en hydrogéologie.

Elle est utilisée en sub-surface, grâce aux techniques de multi électrodes, on peut ausculter la partie superficielle du sol avec une grande précision.

1/ Propagation du courant dans le sous sol (1 électrode)

La loi d'Ohm nous permet de prévoir le cheminement des filets de courant dans un milieu homogène et isotrope. Soit un terrain homogène et isotrope de résistivité ρ limité par une surface plane du côté de l'air. Envoyons un courant continu à l'aide d'une électrode ponctuelle C_1 . L'écoulement du courant se fera par filets rectilignes rayonnant autour de C_1 et produira des variations de potentiel dans le sol à cause de la résistance ohmique de celui-ci. La répartition du potentiel peut être représentée par des demi-sphères centrées sur A.

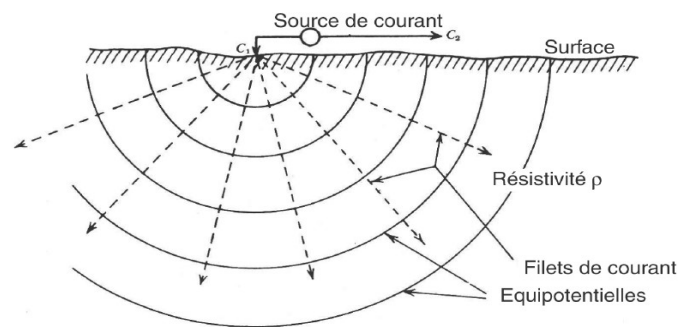


FIG : Equipotentiels et des filets de courant

2/ Propagation du courant dans le sous sol (2 électrodes)

Dans la pratique, il existe deux électrodes d'émission. Le courant envoyé par A (+) sera recueilli par B (-), mais d'après le théorème de superposition, le potentiel en un point M sera le même si l'on envoie indépendamment un courant +I par A ou un courant -I par B.

Par ailleurs, les lois qui régissent la propagation des phénomènes électriques sont linéaires, ce qui signifie que l'on peut additionner algébriquement les potentiels créés par différentes sources. Le potentiel total en un point sera $V_{tot} = V_1 + V_2$ pour deux pôles d'envoi de courant :

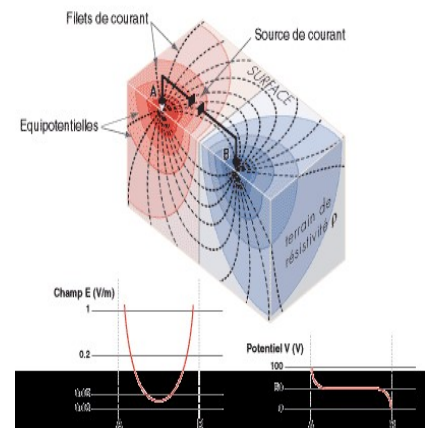


Figure : Filet de courant

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \left(\frac{1}{r_1} \pm \frac{1}{r_2} \right) \text{ Où nous avons :}$$

V = potentiel [V]

r₁ et **r₂** = rayons [m]

ρ = résistivité du milieu [ohm.m]

I = intensité du courant [A].

Les courbes représentées sur la figure ci-dessus montrent l'évolution du potentiel et de son gradient, le champ E. Les champs V et E sont sensiblement uniformes dans le tiers central de AB tandis que la majeure partie de la chute de potentiel est localisée au voisinage immédiat des électrodes A (+) et B (-), cela signifie que la presque totalité de la résistance qu'offre le sol au passage du courant provient du voisinage immédiat des prises A et B.

2.1 / Répartition du potentiel

Le courant circule dans le sous sol d'une électrode de courant à l'autre. La densité de courant est plus forte près de la surface qu'en profondeur. La profondeur d'investigation est fonction de l'espacement maximal entre les électrodes. Plus cet espacement est grand, plus la profondeur d'investigation est grande.

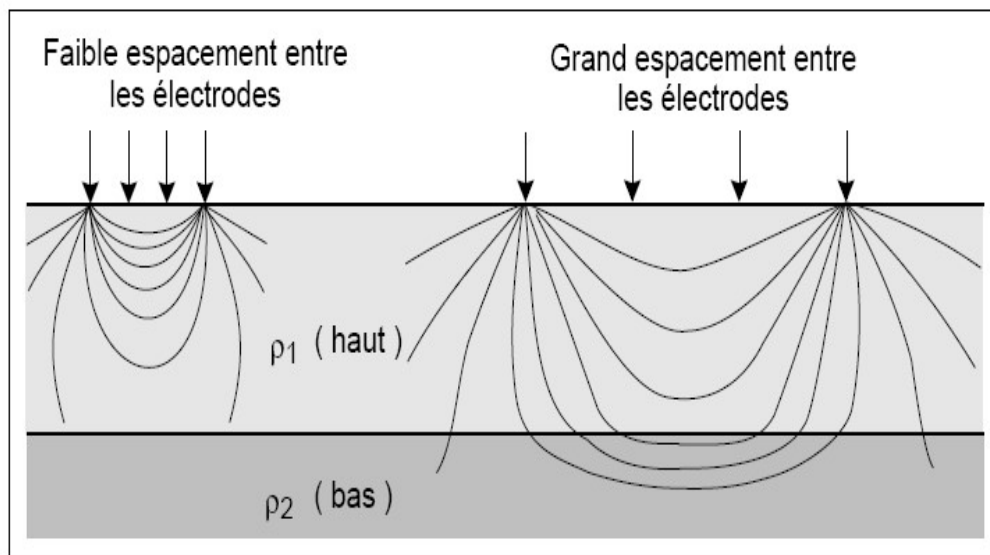


Figure : Pénétration du courant dans un sol tabulaire

pour une électrode de diamètre a, 90% de la résistance du circuit se situe dans une sphère de rayon 10a, le reste du terrain ayant une contribution très faible, il sera donc impossible de connaître la nature du sous-sol par l'étude de la résistance entre deux prises. Les couches profondes du sous-sol ne se manifestent que par leur influence sur la répartition du potentiel au tiers central du dispositif, d'où la nécessité de mesurer la différence de potentiel à cet endroit. D'autre part, lorsque la résistance de contact est très importante, il passe peu de courant dans le sous-sol. Par conséquent il est recommandé d'essayer de diminuer cette résistance (on peut pour faire passer plus de courant dans le sous-sol, augmenter le nombre de piles, diminuer la résistance de contact en arrosant les électrodes, augmenter le nombre d'électrodes, etc ...).

La figure ci dessous montre comment évolue la densité de courant sur un plan vertical situé à x en fonction de la profondeur z et l'écartement L des électrodes d'injection. Le trait continu décrit la densité du courant en fonction de la profondeur lorsque l'écartement L est constant on remarque que la densité diminue très rapidement (moitié de sa valeur en surface à ($z/L=0.8$)). pour une profondeur donnée, la densité du courant sera maximale pour un écartement donné (trait pointillé).

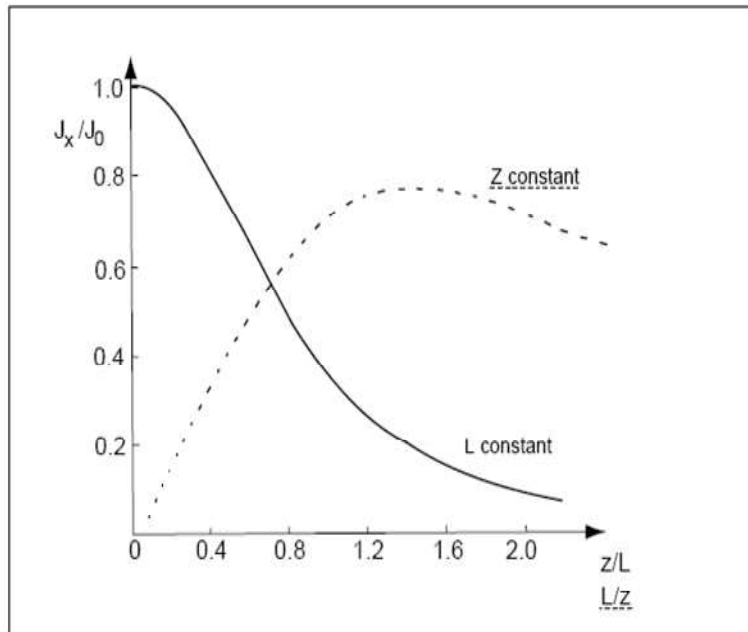


Figure : Densité du courant en fonction de la profondeur

2.2 / Effet de hétérogénéités

Lorsque l'on est en présence de variation plus ou moins locale de la résistivité, un corps conducteur va attirer et concentrer les lignes de courant et va repousser les équipotentiels. A l'inverse pour un corps résistant, les filets de courant auront tendance à contourner les obstacles résistants et les équipotentiels se resserreront au voisinage et à l'intérieur de ce corps. Malheureusement, les effets de ces hétérogénéités s'atténue très rapidement avec la distance et deviennent difficile à mettre en évidence dès que la distance est de l'ordre de grandeur des dimensions du corps perturbateur.

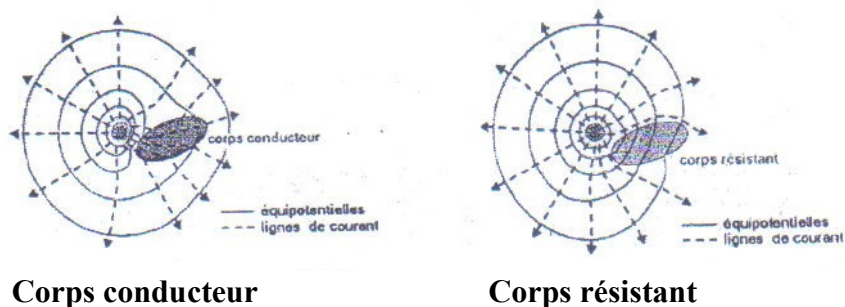


Figure : Equipotentiels et filets de courant électrique en présence d'hétérogénéités

3 / Les méthodes de prospection :

Le but immédiat de la prospection électrique est la détermination de la répartition des résistivités dans le sous-sol. Toutes les méthodes utilisées sont fondées sur la comparaison de la distribution du potentiel créé par l'émission d'un courant.

3.1/ Principe de mise à la masse : (application en exploration minière)

La mise à la masse consiste à remplacer l'électrode d'émission par un gisement conducteur dans lequel on injecte le courant. L'ensemble du gisement joue alors le rôle de d'électrode, toute sa surface se mettant sensiblement au même potentiel. Cette méthode est utilisée surtout en recherche minière et applicable surtout aux sulfures de cuivre, nickel, plomb. Mais pour son application effective, il faudrait que la résistivité du conducteur soit très faible et inférieure à celle de l'environnement et que le gisement conducteur soit continu et atteignable par forage. Le principe à placer l'électrode de courant A dans le minerai conducteur à travers un forage, l'autre étant placé à l'infini. Le point de mesure est une électrode de potentiel, l'autre étant aussi considérée à l'infini.

Le courant tend à s'écouler uniformément depuis le corps conducteur dans les roches environnantes. Il devrait y avoir un potentiel uniformément réparti à la surface du corps conducteur. En réalité cette répartition est modifiée par la forme du corps, son pendage et son contraste de résistivité avec l'encaissant. Plus le contraste est élevé plus la répartition du potentiel se fait uniformément à la surface du corps minéralisé. Lorsque le contraste diminue, la cartographie potentielle de la forme du corps est moins précise et, s'il n'existe aucun contraste, on retrouve une répartition de potentiel hémisphérique.

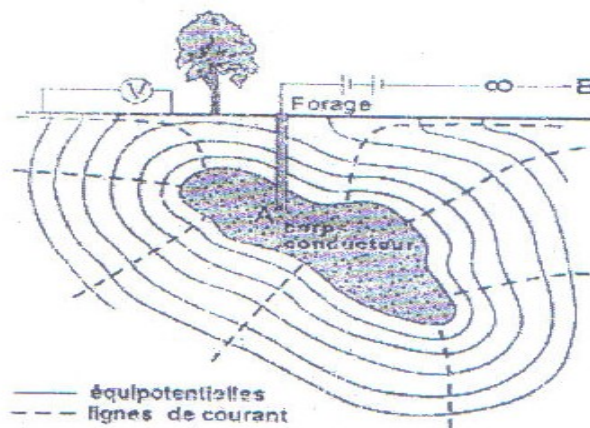


Figure : Principe de mise à la masse

3.2 / Les profils et cartes de résistivité :

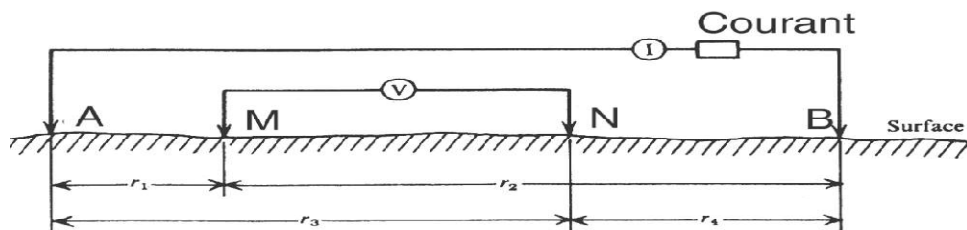


Figure : Dispositif d'électrodes en terrain homogène et isotrope.

Pour établir des profils et des cartes de résistivité en différents endroits on déplace solidement les quatre électrodes AMNB, et d'effectuer ainsi des profils et des cartes de résistivité.

3.2 / Mise en œuvre des dispositifs :

- **La source :** On utilise généralement des piles sèches de 90 volts en série. Plus rarement une génératrice à essence couplée avec un redresseur ou une batterie de voiture. Avec les nouveaux appareils, 10 piles en série peuvent être utilisées.

- **Les électrodes d'émission :** Les électrodes d'émission sont généralement constituées par des piquets d'acier. Supposons une électrode métallique parfaitement conductrice, et calculons la résistance de contact de cette électrode :

$$dR = \rho \frac{dL}{s} = \rho \frac{dL}{2\pi L^2}$$

$$\text{en intégrant: } R = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^L \frac{dL}{L^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{L} \right)$$

Avec :

L = Distance au centre de l'électrode [m].

r = Rayon de l'électrode [m].

R = Résistance [ohm].

ρ = Résistivité du terrain environnant [ohm.m].

- Les électrodes de mesure

La mesure de la différence de potentiel est plus délicate. En effet, dans le sol, les électrodes M et N s'oxydent de façon différente et sont polarisées. On parle de polarisation spontanée des électrodes.

Pour limiter le plus possible le plus efficacement possible le phénomène de polarisation des électrodes, on choisit pour confectionner les électrodes des métaux chimiquement assez stables (cuivre, plomb).

3.3 / Calcul de la résistivité

Ayant mesuré la différence de potentiel entre M et N et l'intensité du courant, il ne nous reste qu'à calculer la résistivité. Dans un milieu homogène de résistivité ρ avec deux pôles A et B, l'action conjuguée de A et B donnera :

$$\text{Le potentiel en M : } V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right)$$

$$\text{Le potentiel en N : } V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

$$\text{La différence de potentiel entre M et N : } V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

La résistivité : $\rho = \frac{K \, dV}{I}$ avec $K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$

K = facteur géométriques. Pour un dispositif symétrique par rapport à O, milieu de AB, le facteur géométrique K vaut:

$$K = \pi \frac{AM \, AN}{MN}$$

Si le sous-sol est homogène et isotrope, avec un dispositif de ce type on obtiendra la résistivité vraie. Si par contre, le sous-sol est hétérogène, on mesurera la résistivité apparente, qui est fonction de la nature du sous-sol et de la dimension du dispositif utilisé.

Les résultats que l'on obtient en maintenant constante la distance entre A, B, M, et N, l'ensemble se déplaçant le long d'un profil, servent à établir les profils et cartes de résistivité. Une carte de résistivité apparente dessinée à partir de plusieurs profils est une carte des anomalies relatives qui se rapporte à une longueur et une orientation sensiblement constante de tout le dispositif de mesure. En effet, à une longueur déterminée de AMNB correspond une profondeur d'investigation à peu près constante, donc à l'étude d'une tranche de terrain d'épaisseur et de largeur déterminées. Les dimensions du dispositif seront donc choisies en fonction du problème à traiter. Il est souvent nécessaire de dresser des cartes avec plusieurs longueurs de ligne pour pouvoir interpréter correctement les résultats.

• Définition de la ρ_a

On fixe un dispositif ABMN dans le sol hétérogène, qui aura une direction azimuth = θ situé en un angle droit au point O du dispositif, deux coordonnées (X_0, Y_0) , ΔV du courant est :

En milieu hétérogène : $\Delta V = I f(x_0, y_0, a, b, \theta)$

En milieu homogène : $\Delta V_0 = I g(a, b)$

Donc : $\rho_a = \rho_0 h(x_0, y_0, a, b, \theta)$.

ρ_0 est la résistivité vraie du milieu. Il existe deux cas de résistivité apparente qui devient résistivité vraie :

- Un sol parfaitement homogène et isotrope.
- Dans un sous-sol approximativement homogène et isotrope pour un ABMN petit ($AB < 100m$).

Cette résistivité apparente va s'éloigner de la résistivité vraie au fur et à mesure que ABMN augmente.

3/ Dispositif de mesure

Tout dispositif de mesure comporte en fait quatre électrodes, deux A et B, pour l'envoi de courant " circuit d'émission " et deux M et N, pour la mesure du potentiel ΔV "circuit de mesure".

• Les dipôles



Les électrodes B et N sont placées à l'infini, on ne s'occupe que de A et M. ce dispositif est encombrant à cause de la longueur des câbles nécessaires pour rendre négligeable l'effet des électrodes placées à l'infini.

• Les tripôles



On ne rejette à l'infini qu'une des quatre électrodes, on obtient un tripôle AMN ou ABM. Le tripôle le plus courant est celui où les trois électrodes sont disposées sur une même ligne droite, A étant à l'extérieur de MN. De plus généralement, ou bien ces trois électrodes sont équidistantes, ou bien la distance MN est petite par rapport à AN.

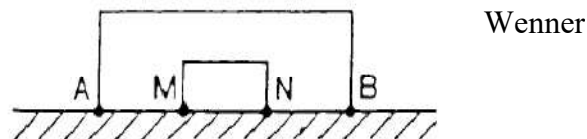
• Les quadripôles

Les quatre prises sont disposées sur un même alignement. Les deux électrodes de mesure M et N sont le plus souvent, à l'intérieur de l'intervalle AB et en général symétriques par rapport au milieu O de cet intervalle.

Les deux quadripôles les plus utilisés sont:

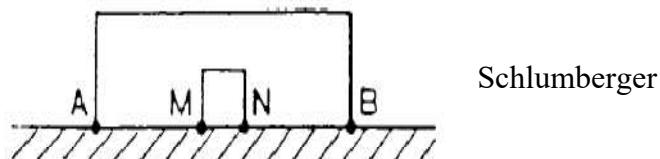
Le Wenner

Toutes les électrodes sont équidistantes, $AM = MN = NB = AB/3$



Le Schlumberger

La distance MN est petite par rapport à AB. En général $(MN < AB/5)$



4/ Méthode d'acquisition des données

La méthode électrique peut s'employer de deux façons complémentaires, le **sondage électrique** et la **traînée** qu'on peut réaliser simultanément avec des dispositifs multi-électrodes, dont le plus utilisé est le « **panneau** ». Sa mise en œuvre nécessite que l'on maîtrise la notion de profondeur d'investigation. Cette notion empirique qualifie l'épaisseur de terrain prise en compte dans la mesure. Pour un quadripôle donné, elle dépend de l'écart existant entre l'électrode de potentiel et l'électrode d'injection les plus proches. Selon la répartition verticale des résistivités elle est prise égale à cet écart ou à la moitié de cet écart.

En traîné on déplace latéralement un dispositif de dimensions fixes, afin de cartographier les variations horizontales de la résistivité.

4.1/ L'exploration verticale du sous sol : sondage électrique verticale (SEV)

Lors de l'exécution d'un sondage électrique on recherche comment varie, en un point donné de la surface, la résistivité du sous-sol à la verticale. Pour cela on exécute en un même endroit une succession de mesures, en augmentant chaque fois toutes les dimensions du dispositif et de ce fait la profondeur d'investigation qui leur est proportionnelle. On explore à cet endroit une tranche de terrain de plus en plus épaisse et l'on met ainsi en évidence les changements de constitution géologique suivant la verticale. Les mesures peuvent être réalisées avec les dispositifs classiques : Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, etc...



Figure : Appareil pour un sondage électrique

• Milieu homogène est isotrope

La résistivité apparente mesurée sera une ligne droite dont l'ordonnée est l à résistivité ρ_1 de ce milieu.

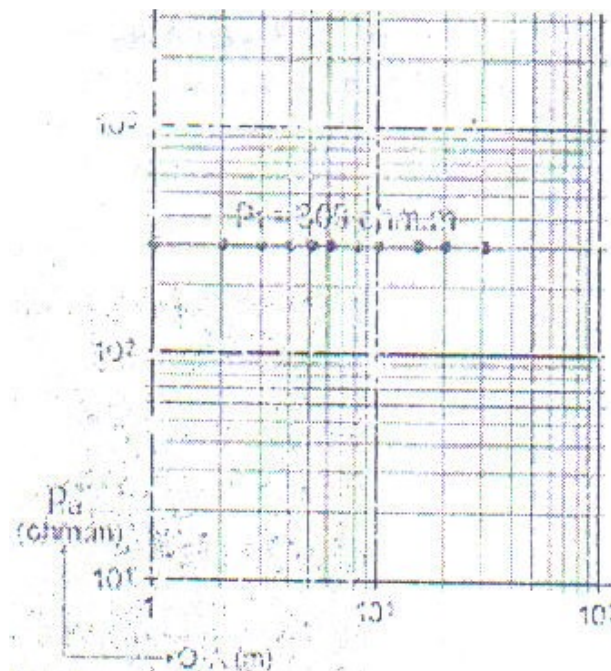


Figure : Sondage a un terrain.

• Sondage à deux couches

Si le sous sol est composé de deux couche, une première couche d'épaisseur h_1 et de résistivité ρ_1 surmontant un substratum d'épaisseur infinie et de résistivité ρ_2 , alors que le sondage électrique débute pour les petits espacements par une portion de ligne droite ou la résistivité apparente ρ_a est plus ou moins égale à la résistivité ρ_1 du premier terrain, puis au fur et à mesure que l'espacement augmente, la courbe monte ou descend selon ρ_2 et plus grand ou petite que ρ_1 et finalement atteint la valeur qui est celle de ρ_2 .

La représentation du sondage électrique se fait sur un papier bilogarithmique qui représente au moins 2 avantage sérieux :

- Permet de représenter sur une même feuille des résistivités apparente comprise entre 1 et plusieurs milliers de Ωm et dans les abscisses $AB/2 = a$ de 1 jusqu'à plusieurs milliers de mètre.

- Permet de représenter un grand nombre de courbe sur une feuille.

L'interprétation des sondages électrique se fait par la recherche de coïncidence du diagramme expérimental avec une courbe théorique de l'abaque **CH1**, la courbe **CH1** est exprimé par la relation suivante :

$$\log \frac{\rho_a}{\rho_1} = f \left(\log \frac{OA}{h_1} \right)$$

Avec :

ρ_1 = résistivité du 1er terrain [Ωm];

ρ_c = résistivité apparente des 2 terrains [Ωm];

f = fonction;

OA = longueur $AB/2$ [m];

h_1 = épaisseur du 1er terrain [m].

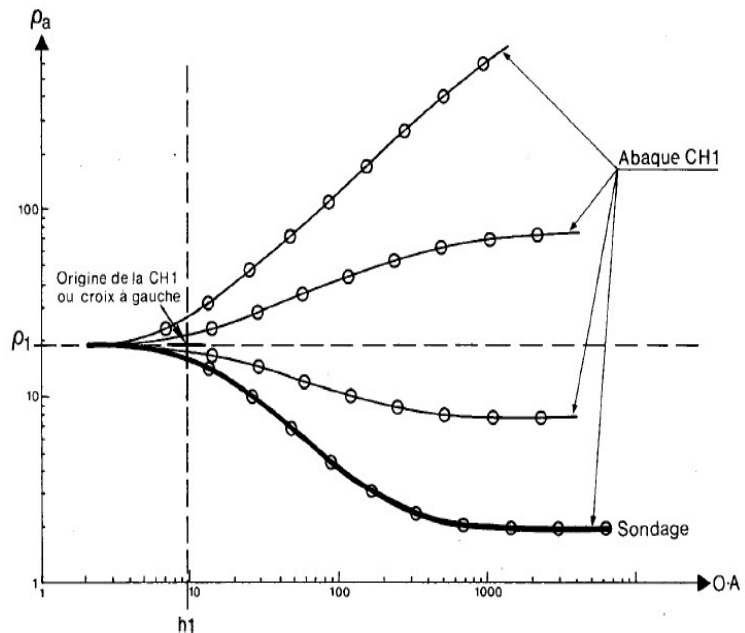


Figure : Utilisation de l'abaque pour deux terrains.

Les valeurs de ρ_1 et h_1 lue sous la croix à gauche de l'abaque **CH1** sont la résistivité et l'épaisseur du premier terrain, les précisions demandées en sondage électrique sont satisfaisante pour une marge d'erreur de 15%.

• Sondage a 3 couches :

Si le sous-sol est composé de trois couches de résistivité ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 et d'épaisseur h_1 , h_2 il y a alors quatre combinaisons possibles :

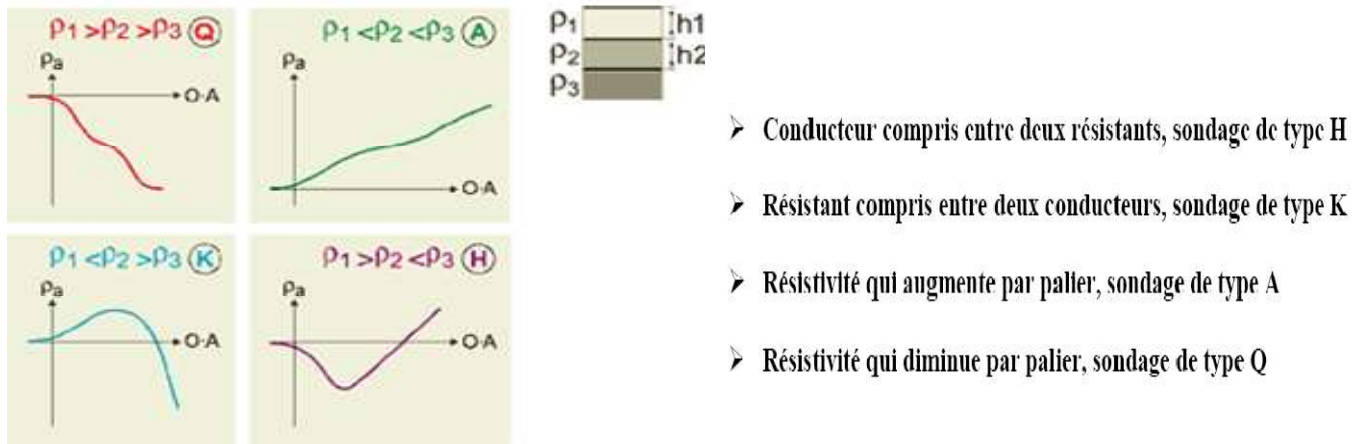


Figure : Les 4 cas possibles d'un sondage à 3 couches

4.1 / Problème d'interprétation

Après avoir déterminé à quel type de courbe correspond notre sondage nous allons interpréter ce sondage pour déterminer la résistivité et l'épaisseur des trois couches. Dans le cas de couches horizontales, infinies latéralement, on démontre qu'à une succession donnée de résistivités et d'épaisseurs correspond un seul diagramme de sondage électrique bien défini, l'inverse n'est pas vrai. Une courbe de sondage électrique peut correspondre à des répartitions très différentes des résistivités et des épaisseurs, ce qui peut conduire à une indétermination. Il y'a plurivocité d'interprétation. Cette indétermination se manifeste sous deux forme particulières qui ont reçu le nom de principe d'équivalence et principe de suppression.

a) Principe de suppression

Le principe de suppression est également très important lors de l'interprétation des sondages électriques. De telle couche tant qu'elles n'ont pas une épaisseur assez grande ne modifient que peu ou pas le diagramme de sondage électrique. Cette indétermination se trouve souvent dans les études hydrogéologiques.

b) Principe d'équivalence

Une couche conductrice comprise entre deux couches résistantes se fera connaître par sa conductance longitudinale, rapport de son épaisseur par sa résistivité (h/ρ) sondage de type H. Tant que le rapport reste le même, le sondage reste inchangé. Les limites de validité de ce principe dépendent des caractéristiques de l'ensemble des couches en présence.

Prenons le cas d'un terrain résistant entre deux terrains plus conducteurs, sondage de type K. Le terrain 2 se manifestera par sa résistance transverse ($h \cdot \rho$), produit de sa résistivité par son épaisseur. Tant que ce produit reste constant et dans certaines limites, le sondage électrique reste inchangé.

c) Les perturbations extérieur

provoquées par des conduites métallique, si la ligne AB est parallèle, la perturbation augmente avec l'augmentation de AB. Cette perturbation consiste a une diminution de la résistivité apparente ρ_a qui est du a l'introduction d'un élément conducteur. Cette perturbation est d'autant plus forte que la distance à la conduite est petite.

4.2/ L'exploration horizontale du sous sol : la traîné électrique



Un même MN sert successivement à la mesure de ΔV pour l'envoi de courant entre A' B' et AB. L'ensemble du dispositif est ensuite décalé le long du profil. Il s'agit du **traîné multiple**.

L'intervalle entre les mesures successives dépendra de la précision avec laquelle on veut localiser les accidents. Il est en général égal à AB pour les études de précision (repérage des zones fracturées) on peut utiliser un pas de mesure égal à MN ce qui conduit à une exploration continue du profil. Le même travail est ensuite repris sur des profils parallèles et équidistants.

5/ Conclusion

Les mesures électriques sont des mesures géophysiques classiques, mais malgré bientôt un siècle d'existence, de nombreux développements continuent à avoir lieu. La méthode de sondage électrique se caractérise par une flexibilité des géométries, ainsi qu'une bonne résolution des terrains superficiels, et peut être appliquée dans différentes disciplines comme l'hydrogéologie (reconnaissance des aquifères), le domaine minier (détermination des filons), mais peut présenter certaines limites comme la difficulté d'injection du courant dans des terrains très secs, les sondages exécutés sur des couches non parallèles ou de trop fortes variations latérales de faciès peuvent fournir des interprétations erronées, une mise en œuvre assez lourde et un temps de mesure important si la longueur des lignes est grande, l'interprétation est délicate dans le cas de la non présence de puits ou de forage, sans oublier le principe de suppression et d'équivalence qui peut causer des problèmes lors de l'interprétation.