

Remarques : le temps indiqué correspond au temps du chrono au moment du changement de transparent. Le texte surligné en jaune est à lire lors de la présentation si on est en avance sur le temps. Les transparents sont en annexe.

T1

Introduction

La géophysique joue un rôle essentiel dans la détection et la gestion des ressources de la terre. On cite souvent l'utilisation des ondes sismiques comme moyen de connaître le sous sol, mais on peut être surpris d'apprendre qu'il est possible d'accéder à cette connaissance à l'aide des propriétés électriques des matériaux que l'on mesure en envoyant un courant électrique depuis la surface. Je me suis donc demandé comment l'on pouvait déterminer la composition du sous-sol en utilisant la méthode de mesure de la résistivité.

Pour y répondre, j'ai d'abord étudié les principes fondamentaux à la base de cette méthode, puis je me suis intéressé à ses aspects pratiques. Enfin, j'ai réalisé une expérience à l'université Pierre et Marie Curie à Paris, dont je vais présenter les résultats.

T2 (0'50)

I

A

Il faut tout d'abord savoir que les matériaux sont caractérisés par leur résistivité, inverse de la conductivité, due au déplacement d'ions présents dans le matériau. Cette résistivité s'exprime en ohm mètres, elle vaut dans le sol entre quelques dizaines et quelques milliers d'ohm mètres. Les matériaux que l'on considère sont donc résistants.

La méthode consiste à planter 4 électrodes dans le sol comme indiqué sur le schéma, en faisant circuler un courant entre les électrodes A et B.

Ce courant circule dans le sol, et crée une DDP entre les électrodes M et N, que l'on mesure avec le voltmètre.

B

On peut montrer à l'aide de raisonnements sur les champs électriques que la résistivité d'un terrain homogène et isotrope s'écrit : $\rho = 2\pi K \frac{\Delta V}{I}$

K est appelé le coefficient géométrique et dépend du dispositif utilisé.

Lorsque le terrain n'est pas homogène, la valeur de cette expression est appelée résistivité apparente et dépend des matériaux présents dans le volume hachuré sur le

schéma du bas, les matériaux les plus proches de la surface ayant une influence plus grande que ceux situés en profondeur.

Comme on peut l'imaginer sur ce schéma, la profondeur maximale d'investigation augmente lorsqu'on augmente la distance AB. Expérimentalement, elle vaut entre AB/10 et AB/4 suivant les valeurs des résistivités.

Transition :

Ainsi, la connaissance de l'intensité du courant injecté et de la ddp mesurée permet d'accéder à la résistivité apparente qui joue un rôle essentiel dans l'interprétation des résultats. Il s'agit en effet de relier la résistivité apparente aux résistivités vraies des matériaux.

T3 (2'50)

II

A

Alors comment, concrètement, peut on analyser le sol en utilisant cette méthode ? C'est ce que j'ai voulu savoir en allant réaliser une expérience à l'Université Pierre et Marie Curie à Paris, où j'ai utilisé cet appareil, le RMCA-3, qui est pratique et léger, et fonctionne avec une batterie. Cela permet d'effectuer des mesures sur le terrain de façon assez simple : Il suffit de brancher les 4 électrodes et d'appuyer sur un bouton pour envoyer le courant. On visualise alors presque instantanément la valeur de delta V/I.

Cet appareil envoie un courant alternatif, ce qui peut paraître contradictoire avec la théorie, où l'on considère un courant continu. Mais les résultats obtenus avec un courant alternatif, de faible fréquence, sont assez proches des mesures en courant continu.

L'avantage du courant alternatif est d'éviter le phénomène de polarisation pouvant se produire au niveau des électrodes d'envoi du courant.

B

J'ai utilisé un dispositif que l'on appelle Wenner où les électrodes sont alignées et équidistantes, je note a la distance inter - électrodes. Le coeff. géométrique K est = à a et donc on a alors $\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$.

J'ai réalisé ce que l'on appelle un sondage en profondeur : on augmente la valeur de a tout en gardant le centre du dispositif fixe. On obtient alors une image de la coupe géologique à la verticale du centre du dispositif.

Les 2 schéma du bas représentent ce montage, où le rectangle symbolise l'appareil de mesure, et où a1 et a2 sont 2 valeurs différentes de la distance inter électrodes.

Transition :

J'ai ainsi réalisé un sondage électrique en faisant varier a de 50cm à 10 m, ce qui correspond à environ 3m en profondeur.

T4 (5'10)

III

A

Sur les conseils de Christian Camerlynck, le chercheur que j'ai rencontré, je me suis procuré le logiciel de géophysique Qwseln, avec lequel j'ai tracé les résultats que j'ai obtenus en échelle bi logarithmique, en plaçant la résistivité apparente (en ohm m) en fonction de la longueur a (en m).

Un tel graphe permettait, avant l'apparition de logiciels performants, d'utiliser des abaques, tracées sur un transparent que l'on superposait aux points de mesure. Elles permettaient d'obtenir rapidement les épaisseurs des premières couches ainsi que leurs résistivités. Elles étaient assez simples à utiliser pour un terrain à 2 couches, mais l'interprétation devenait ensuite délicate.

On observe sur cette courbe un point où la résistivité apparente est étrangement élevée. Cela est probablement dû à la présence d'un milieu conducteur à proximité d'une électrode de mesure qui aurait perturbé le trajet du courant lors de l'acquisition des données. J'ai donc supprimé ce point dans la suite.

B

Pour interpréter ces résultats, j'ai supposé que le milieu était tabulaire (c'est à dire composé de couches superposées) chaque couche étant homogène.

A partir de ce graphique, un géophysicien peut intuitivement les valeurs des résistivités des différentes couches et leur profondeur. On sait en effet que la résistivité apparente mesurée pour une faible valeur de a est proche de la résistivité de la première couche, puis elle tend vers la résistivité de la deuxième couche, si celle-ci est assez profonde, et ainsi de suite.

Le géophysicien peut également se servir d'informations, d'hypothèses qu'il a sur ces valeurs, en s'aidant de sondages déjà réalisés ou de la connaissance du type de milieu qu'il étudie.

Pour ma part, je me suis fié aux indications du géophysicien qui m'encadrerait pour entrer un modèle dans le logiciel. Le logiciel trace alors la courbe correspondant à ce modèle, comme on peut le voir sur le deuxième graphique.

T5 (7'30)

Pour améliorer ce modèle (c'est à dire pour qu'il soit plus proche des mesures) on peut utiliser la fonction d'optimisation des résultats du logiciel qui, à partir d'algorithmes mathématiques, teste différents modèles et détermine celui qui est le plus proche à la fois des mesures et du modèle entré.

Ceci montre l'importance d'avoir un bon modèle au départ, d'autant plus que différents modèles peuvent correspondre aux mesures, ce qui explique la difficulté d'interprétation des résultats.

En utilisant un tableau donnant l'ordre de grandeur des résistivités de certains matériaux, j'ai déduit des résultats donnés par le logiciel la composition probable du terrain étudié. Cette composition n'est qu'une hypothèse, d'abord car d'autres modèles peuvent donner les mêmes résultats et ensuite car elle suppose que le milieu est tabulaire, ce qui n'est pas le cas en général.

Cependant, l'élève avec qui je travaillais sur ce TIPE et qui, lui, a utilisé une méthode sismique sur ce même terrain, a obtenu des résultats à peu près similaires, ce qui pourrait confirmer ces hypothèses. Cette démarche correspond de plus à celle des géophysiciens, qui utilisent plusieurs méthodes et de nombreuses mesures afin de déterminer la structure réelle du sous sol.

Conclusion (9'00 ->9'30)

En somme, la méthode de mesure des résistivités se montre performante pour des sols de configuration simple (du type milieux tabulaires). Pour des configurations plus compliquées, la méthode nécessite l'apport d'autres connaissances provenant de données géologiques supplémentaires ou de prospections déjà réalisées. Néanmoins, cette méthode est très utilisée, en particulier dans l'agriculture ou la recherche d'eau minérale, ses principaux avantages étant son coût peu élevé et la simplicité de sa réalisation.

ANNEXE

- Les 5 transparents pour la présentation
- Les transparents prévus pour les questions
- La fiche synoptique

ETUDE DU SOUS-SOL PAR MESURE DE LA RESISTIVITE

Problématique: Comment déterminer la composition du sous-sol en utilisant la méthode de mesure de la résistivité ?

I) Présentation de la méthode

A) Principes de base

- ✘ Notion de résistivité
- ✘ Schéma du montage

B) Mesure de la résistivité

- ✘ Résistivité d'un terrain homogène
- ✘ Résistivité apparente

II) Aspect pratique

A) Etude du matériel utilisé lors de l'expérience

- ✘ Le RMCA-3

B) Déroulement de la mesure

- ✘ Dispositif Wenner
- ✘ Sondage électrique en profondeur

III) Réalisation d'un sondage électrique

A) Résultats

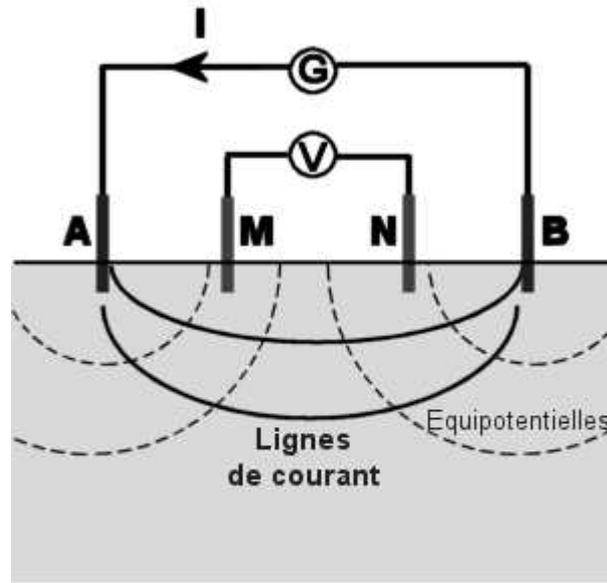
- ✘ Tracé en échelle bi logarithmique
- ✘ Modèle a priori

B) Interprétation des résultats

- ✘ Inversion des résultats à l'aide du logiciel Qwseln
- ✘ Détermination des caractéristiques du sous-sol

I) Présentation de la méthode

A) Principes de base



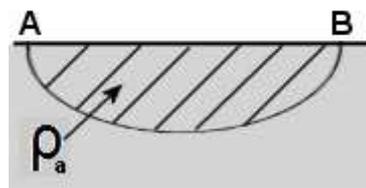
B) Mesure de la résistivité

✘ Résistivité d'un terrain homogène

$$\rho = 2\pi K \frac{\Delta V}{I}$$

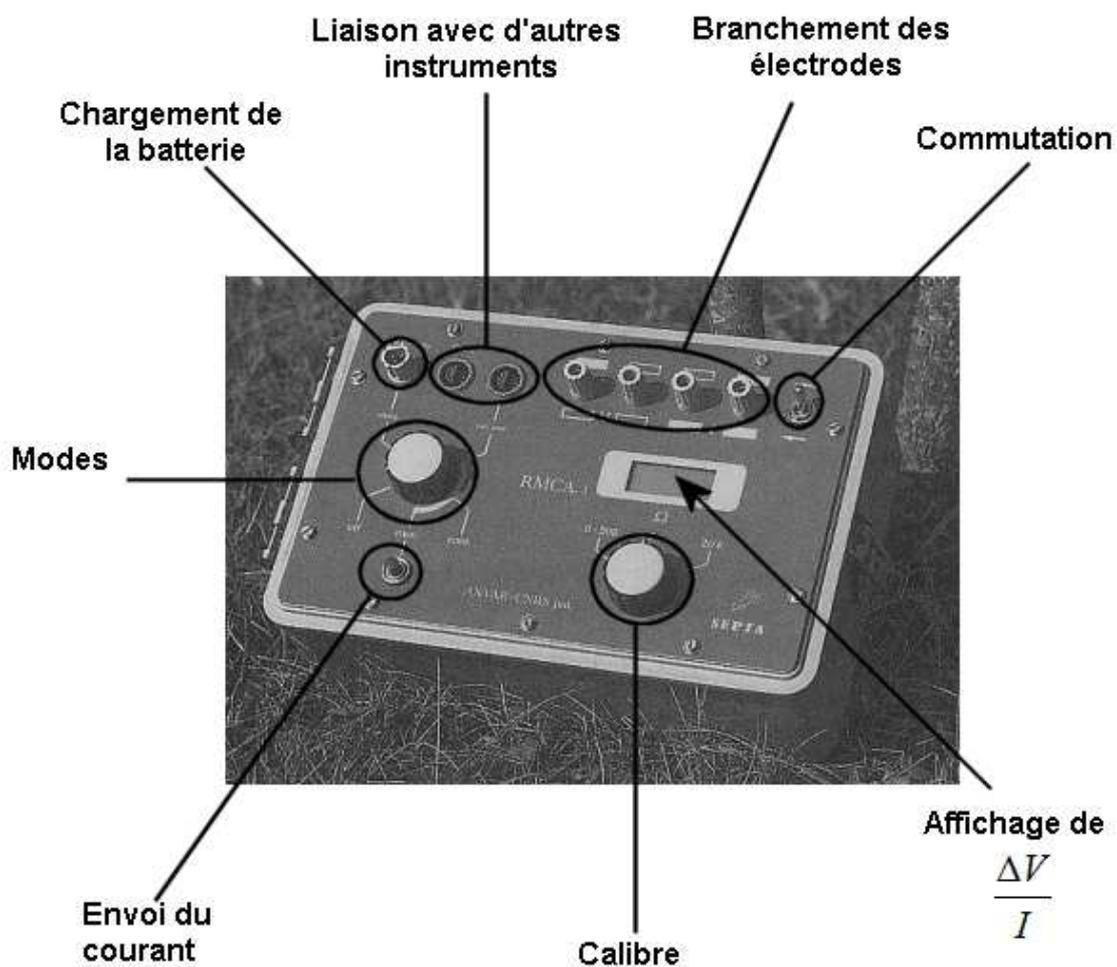
$$K = \frac{1}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN}}$$

✘ Résistivité apparente

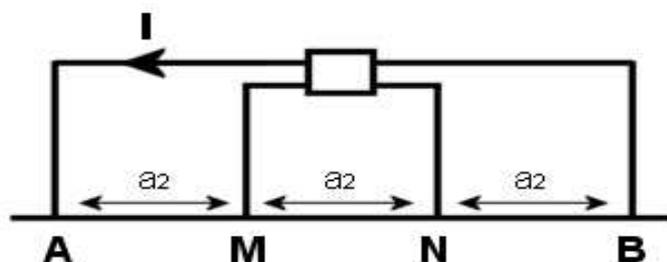
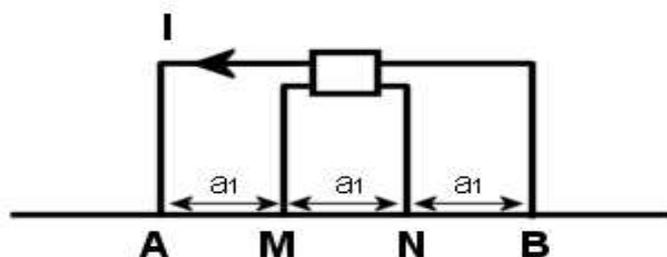


II) Aspect pratique

A) Etude du matériel utilisé lors de l'expérience



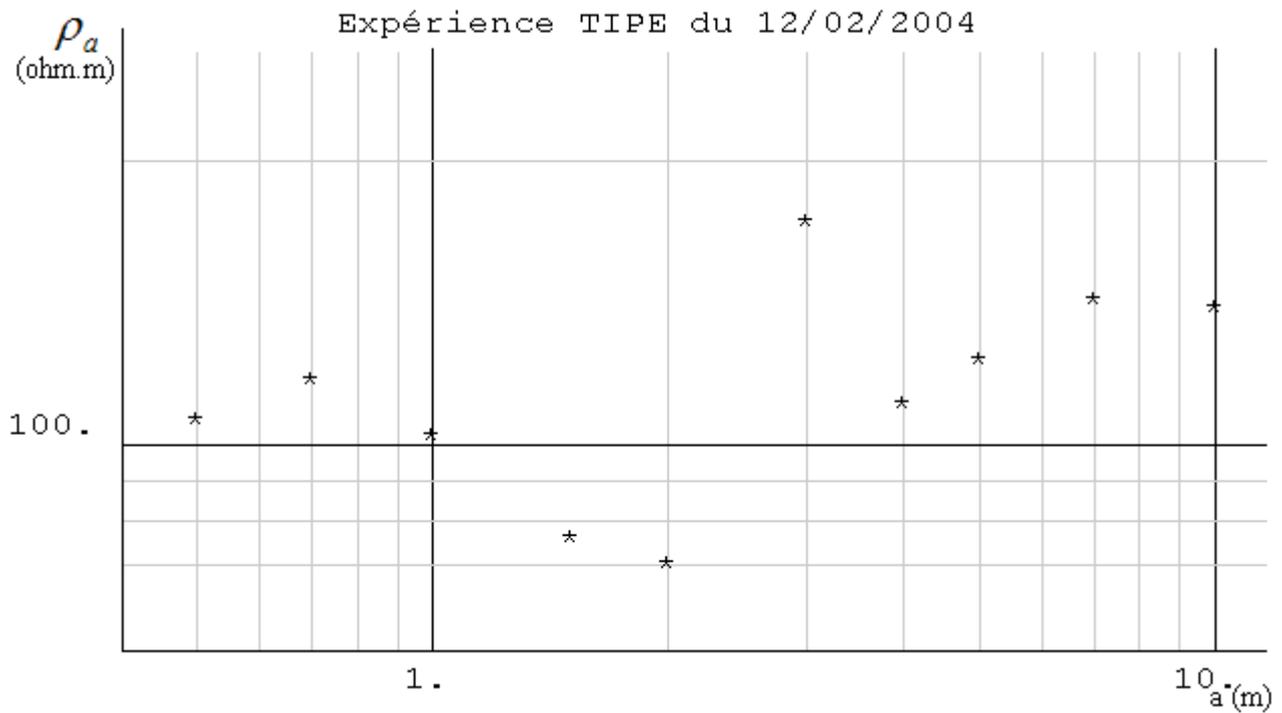
B) Déroulement de la mesure



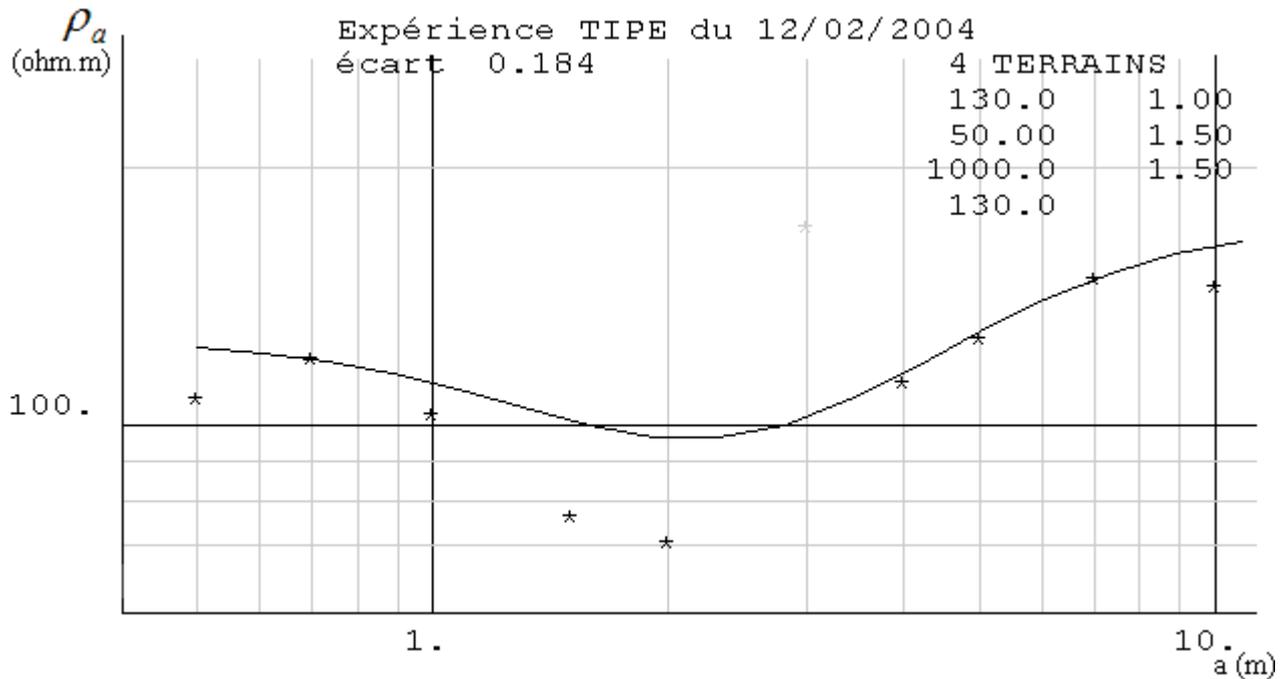
III) Réalisation d'un sondage électrique

A) Résultats

✘ Tracé en échelle bi logarithmique

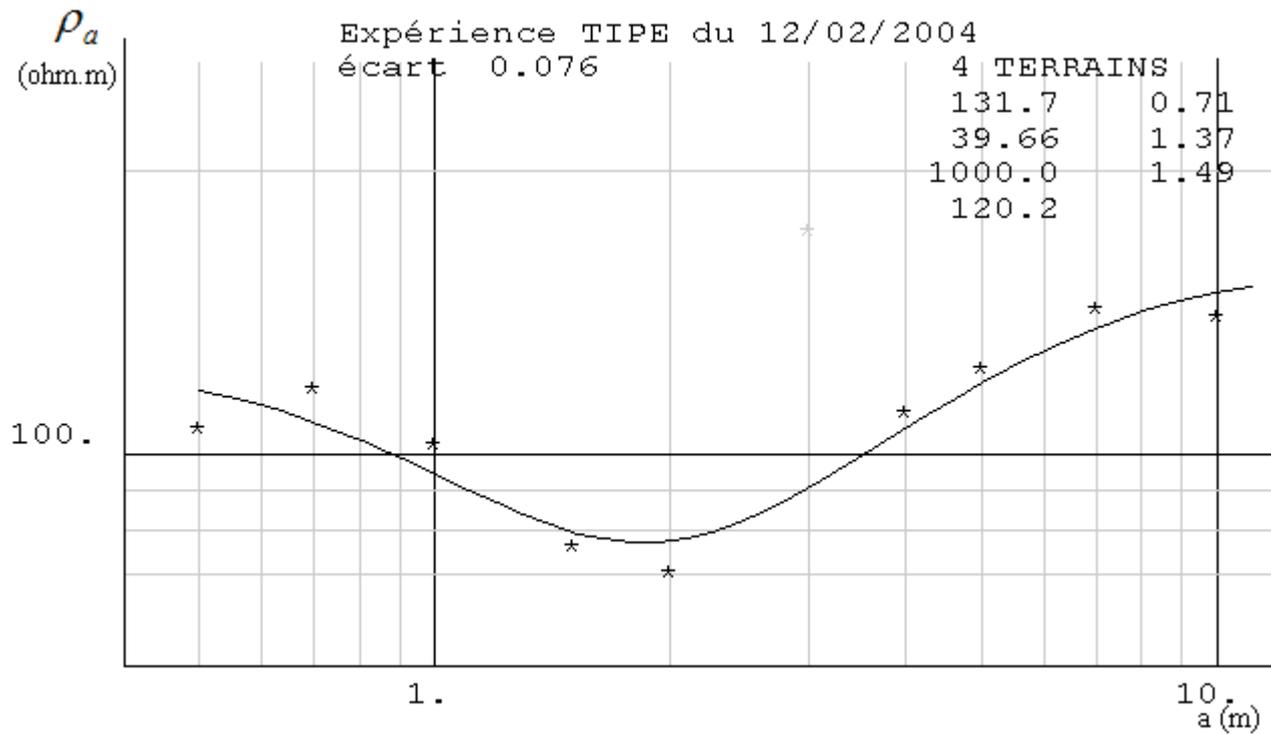


✘ Modèle a priori

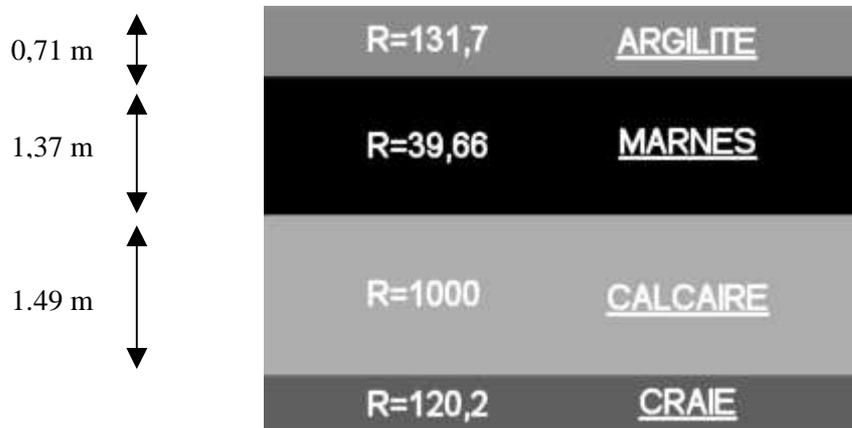


B) Interprétation des résultats

✘ Inversion des résultats à l'aide du logiciel Qwseln



✘ Détermination des caractéristiques du sous-sol



AUTRES METHODES

✓ Méthodes sismiques

Principe : Utiliser la réflexion et la réfraction des ondes sismiques sur une interface entre des milieux différents. Les matériaux sont caractérisés par la vitesse des ondes sismiques qui les traversent.

Application : Recherche de pétrole et grands travaux essentiellement, la méthode étant très coûteuse. Utilisation des séismes pour connaître la composition de la Terre en profondeur.

✓ Méthode gravimétrique

Principe : Mesurer les variations de l'accélération de la pesanteur, puis en extraire les variations dues aux variations de densité du sous-sol.

Application : Lors de contrastes de densité.

✓ Méthodes électromagnétiques

Principe : Création d'un champ électromagnétique de fréquence imposée. Apparition d'un champ induit.

Application : Génie civil, détecteur de métaux, méthode aéroportée.

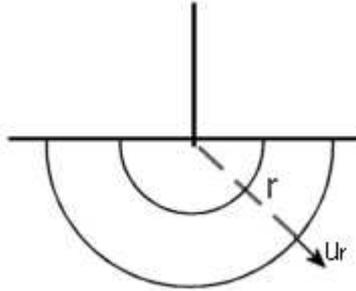
✓ Diagraphies

Principe : Utiliser la sismique et la résistivité dans des forages.

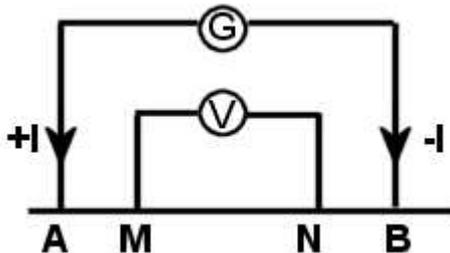
Application : En compléments des autres méthodes pour plus de précision.

RESISTIVITE D'UN TERRAIN HOMOGENE

Avec une seule électrode :



$$\left. \begin{aligned} \vec{j} &= \gamma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \\ \vec{E} &= -\overrightarrow{\text{grad}}(V) \\ I &= \iint_S \vec{j} \cdot \vec{n} dS \end{aligned} \right\} \Rightarrow V(r) = \frac{\rho I}{2\pi r}$$



En M:

$$\text{potentiel créé par A : } V_A(M) = \frac{\rho I}{2\pi AM}$$

$$\text{potentiel créé par B : } V_B(M) = -\frac{\rho I}{2\pi BM}$$

$$V(M) = V_A(M) + V_B(M) = \frac{\rho I}{2\pi AM} - \frac{\rho I}{2\pi BM}$$

En N :

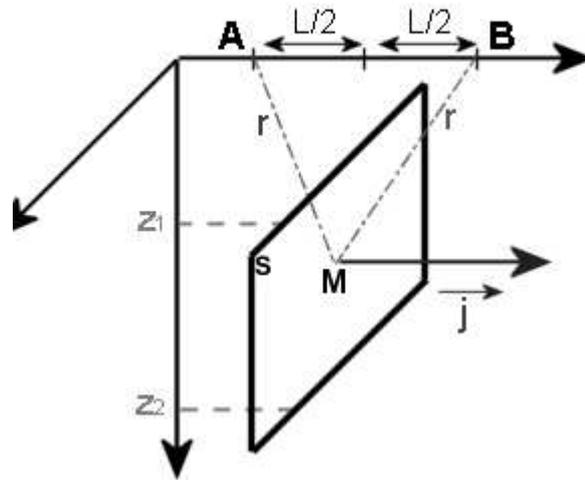
$$V(N) = V_A(N) + V_B(N) = \frac{\rho I}{2\pi AN} - \frac{\rho I}{2\pi BN}$$

$$\Delta V = V(M) - V(N) = \frac{\rho I}{2\pi AM} - \frac{\rho I}{2\pi BM} - \left(\frac{\rho I}{2\pi AN} - \frac{\rho I}{2\pi BN} \right)$$

$$\rho = 2\pi K \frac{\Delta V}{I}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN}}$$

PROFONDEUR



$$AM = BM = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Pour une électrode : $\vec{j} = \frac{I}{2\pi r^2} \vec{u}_r$

$$\left. \begin{aligned} \vec{j}_A(M) &= \frac{I}{2\pi AM^2} \times \frac{\overrightarrow{AM}}{AM} = \frac{I \overrightarrow{AM}}{2\pi r^3} \\ \vec{j}_B(M) &= -\frac{I \overrightarrow{BM}}{2\pi r^3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \vec{j}(M) = \vec{j}_A(M) + \vec{j}_B(M) = \frac{I \overrightarrow{AB}}{2\pi r^3}$$

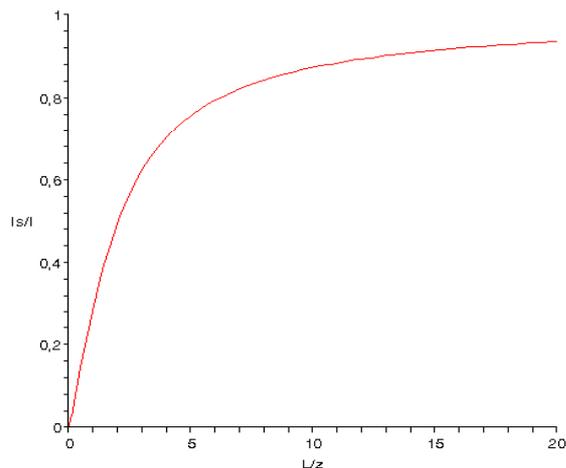
Intensité à travers S :

$$I_S = \int_{z=z_1}^{z=z_2} \int_{y=-\infty}^{y=+\infty} \frac{I \times L}{2\pi \left(\frac{L^2}{4} + y^2 + z^2 \right)^{3/2}} dz dy$$

$$I_S = \frac{2I}{\pi} \left(\arctan\left(\frac{2z_2}{L}\right) - \arctan\left(\frac{2z_1}{L}\right) \right)$$

$z_2 \rightarrow +\infty$:

$$I_S = \frac{2I}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{2z_1}{L}\right) \right)$$



RESISTIVITE DES MATERIAUX

Dans le sol, les charges électriques sont transportées par les ions (conductivité électrolytique).
La résistivité dépend :

- de la température : $\rho(T) = \frac{\rho(20^\circ\text{C})}{1 + 0,022 \times (T - 20)}$ (pour NaCl)
- des ions présents dans l'eau occupant les interstices entre les grains du matériau. On note la résistivité de cette eau : ρ_w .

Pour une roche saturée non argileuse : $\frac{\rho}{\rho_w} = a\Phi^{-m}$ (Loi d'Archie),

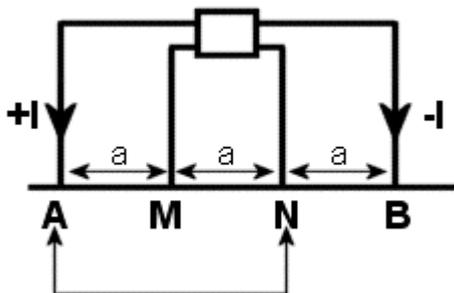
avec : $0,5 < a < 2$ et $1,5 < m < 2,5$ et Φ la porosité : $\Phi = \frac{\text{Volume des vides (eau + air)}}{\text{Volume total (eau + air + solide)}}$.

Pour une roche non saturée : $\frac{\rho}{\rho_w} = a\Phi^{-m}S_w^{-n}$,

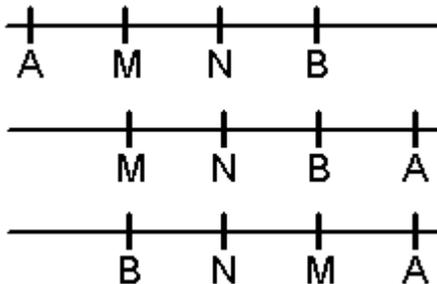
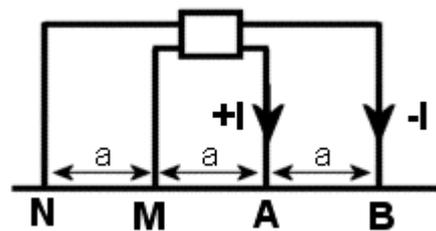
avec $n \approx 2$ et $S_w = \frac{\text{Volume des pores remplis d'eau}}{\text{Volume total des pores}}$ (saturation).

TRAINÉE

Wenner α $\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$



Wenner β $\rho_a = 6\pi a \frac{\Delta V}{I}$



VISITE DU 12/02/2004

- Chercheur rencontré : Christian Camerlynck, Maître de Conférences au Département de Géophysique Appliquée de l'Université Pierre et Marie Curie.
- Lieu : Unité Mixte de Recherche 7619 Sisyphé, Université Pierre et Marie Curie Paris VI.
- Déroulement :
 - rappels théoriques
 - manipulations (sur une pelouse à Jussieu) :
 - prospection en traînée sur 50m (résultats non exploités) : utilisation du bouton de commutation.
 - réalisation du sondage sur 10m, difficulté rencontrée : il faut déplacer toutes les électrodes à chaque mesure, ce qui prend du temps.
 - Etude sismique : utilisation d'une masse pour créer un choc et mesure des temps d'arrivée à l'aide d'un géophone.
 - Retour au laboratoire pour analyser les résultats du sondage sur ordinateur.
- Valeurs obtenues lors du sondage :

a (en m)	0,5	0,7	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	7,0	10,0
$\frac{\Delta V}{I}$ (en ohm)	34,5	27,6	16,4	8,1	5,6	13,3	4,5	3,5	2,4

RESISTIVITES DE QUELQUES ROCHES

Roches	Résistivité (ohms.m)
Argilite	70 à 200
Craie	30 à 300
Tuf volcanique	20 à 300
Marnes	20 à 100
Grès	30 à 800
Dolomite	200 à 10 000
Calcaires	200 à 10 000
Métaschistes	300 à 800
Gneiss	1 000 à 20 000
Quartzite	1 000 à 10 000
Granite	1 000 à 15 000
Gabbro	6 000 à 10 000
Basalte	800 à 15 000

(source : cours online de géophysique, Université de Lausanne)

ETUDE DU SOUS-SOL PAR MESURE DE LA RESISTIVITE

✓

Introduction

J'ai toujours été intéressé par la géologie et curieux de connaître le sous-sol. J'ai donc choisi d'étudier une méthode de prospection géophysique que je ne connaissais pas, et qui m'intriguait. En effet, il peut paraître surprenant de caractériser des matériaux par leurs propriétés électriques et de les reconnaître dans le sol à l'aide d'électrodes et de courants électriques.

✓

Plan

IV) Présentation de la méthode

A) Principes de base

B) Mesure de la résistivité

V) Aspect pratique

A) Etude du matériel utilisé

B) Déroulement de la mesure

VI) Réalisation d'un sondage électrique

A) Résultats

B) Interprétation des résultats

✓

Démarche

Je voulais initialement comparer différentes méthodes de prospection géophysique, puis j'ai consacré mon étude aux seules méthodes électriques, permettant d'analyser le sous-sol par la résistivité des matériaux. Après ma rencontre avec Albert Tarantola, je pensais m'intéresser aux principes d'inversion des résultats, mais je me suis vite aperçu que cela était trop théorique et complexe pour le TIPE. J'ai alors donné une orientation plus expérimentale à mon sujet, en prenant contact avec Alain Tabbagh. Il m'a mis en relation avec son collègue Christian Camerlynck que j'ai rencontré le 12 février pour réaliser des mesures de résistivité.



Sources

Livres:

- *Archaeological prospecting and remote sensing* ; I. Schollar, A. Tabbagh, A. Hesse, I. Herzog ; Cambridge University Press ; 1990.
- *Applied Geophysics* ; W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Shérif, D.A. Keys ; Cambridge University Press ; 1976.

Internet :

- Cours on-line de géophysique de l'Université de Lausanne; D. Chapellier, J.L. Mari ; <http://www-ig.unil.ch/cours/>
- Cours sur les méthodes électriques de l'Université de Liège ; http://www.ulg.ac.be/geomac/etudes/pdf/prosp_geo_ElectriqueCC.pdf
- Département de Géophysique Appliquée de l'Université Pierre et Marie Curie ; <http://www.ccr.jussieu.fr/dga>
- Les méthodes géophysiques utilisées en recherche d'eau minérale, note technique n°9 ; Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie ; Octobre 1997 ; <http://www.industrie.gouv.fr/energie/matieres/pdf/nt09.pdf>

Contacts:

- *Christian Camerlynck*, Maître de Conférences au Département de Géophysique Appliquée de l'Université Pierre et Marie Curie, camerl@ccr.jussieu.fr
- *Alain Tabbagh*, Directeur de l'Unité Mixte de Recherche 7619 Sisyphe de l'Université Pierre et Marie Curie, alat@ccr.jussieu.fr
- *Albert Tarantola*, Professeur à l'Institut de Physique du Globe de Paris, albert.tarantola@ipgp.jussieu.fr