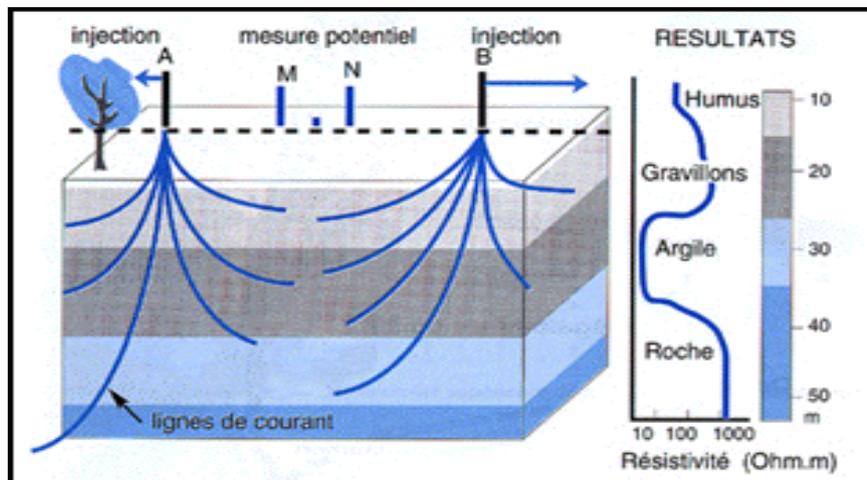


---

MASTER  
GEOSCIENCES APPLIQUEES

# COURS DE GEOPHYSIQUE APPLIQUEE



Année universitaire 2019-2020

Pr. Mustapha BOUALOUL

## INTRODUCTION A LA RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE

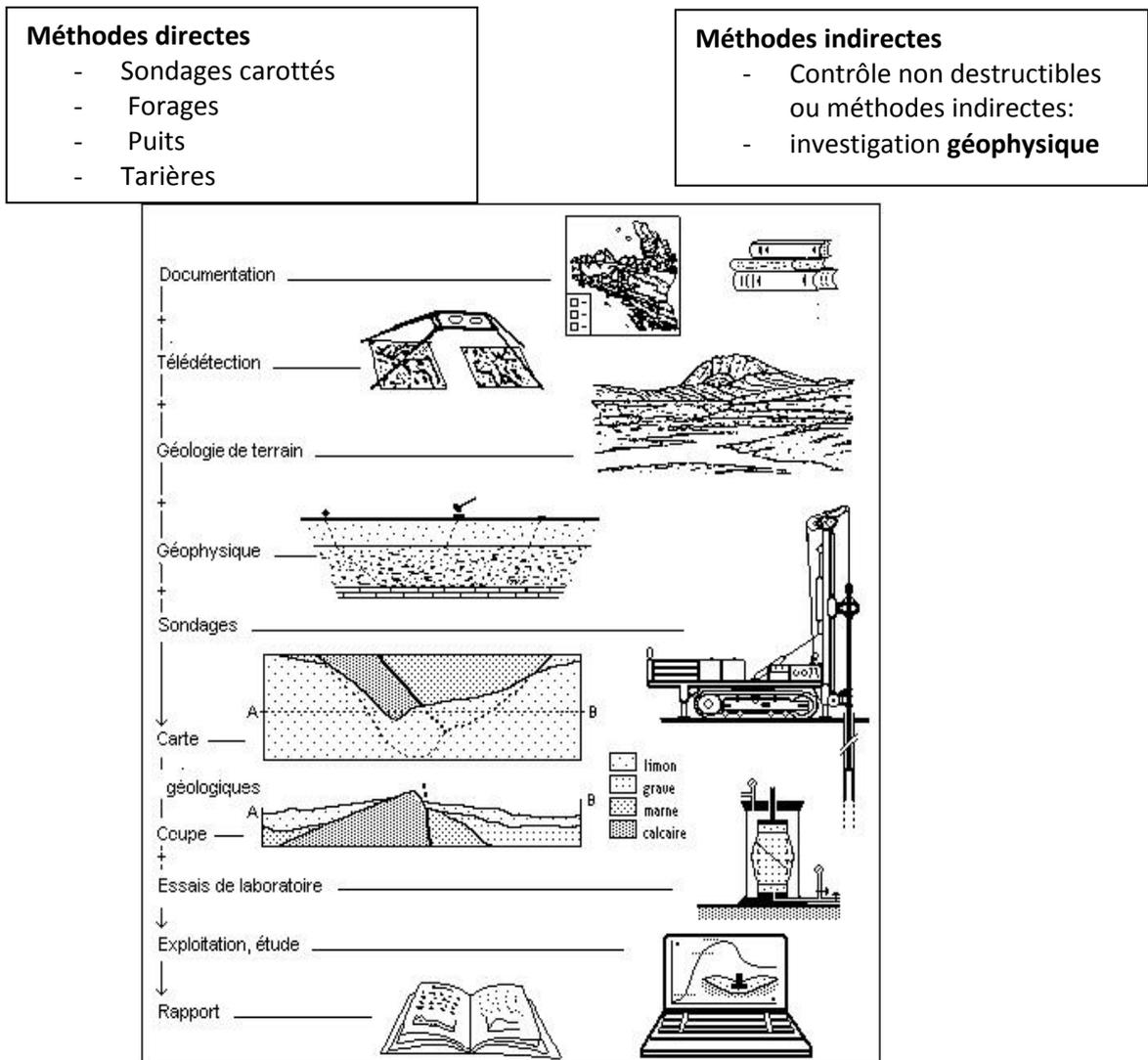
La reconnaissance géophysique d'un site consiste à déterminer:

- la nature,
- la répartition;
- les propriétés des matériaux dont il est composé ;
- l'existence ou pas d'anomalies.

La reconnaissance se traduit par l'élaboration d'un modèle géologique.

Ces représentations prennent matériellement la forme de cartes, de coupes, de blocs diagrammes, de coupes de sondages, de textes ou même de maquettes.

Le but de la reconnaissance est de l'améliorer, de le rendre fiable, précis, le plus complet possible afin de permettre une conception qui repose sur les données dont on a besoin et qui soient les plus sûres possible.



## Place de la géophysique dans les étapes d'étude d'un projet

### 1. Définitions

La géophysique applique les moyens de la physique à l'étude de la structure des terrains.

La géophysique est née de l'interaction de ces phénomènes physiques avec les paramètres pétro physiques liés a la roche ou caractéristiques des roches.

- 1- la méthode **gravimétrique** construite a partir de la relation « densité des roches » et « force de gravitation »
- 2- La méthode **magnétique** construite a partir de la relation « susceptibilité magnétique » et « champ magnétique terrestre »
- 3- La méthode **sismique** construite a partir de la relation « paramètre élastique » et « vitesse de propagation de l'onde »
- 4- La méthode **électromagnétique** construite a partir de la relation « permittivité électrique ou diélectrique, perméabilité magnétique » et « intensité du champ électromagnétique »
- 5- La méthode **électrique** construite a partir de la relation « résistivité » et « champ électrique »
- 6- La méthode **radioactive** construite a partir de la relation « éléments radioactifs présents dans la roche Uranium, Thorium » et champ radioactif «  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  »

### 2. Choix des méthodes Géophysiques

Du fait que les mesures géophysiques s'effectuent en surface, la profondeur d'investigation et la profondeur de pénétration des champs physiques appliqués conditionnent le choix de la méthode géophysique à utiliser.

Lors des études de **reconnaitances de bassins sédimentaires ou de zones vierges** (non explorées), le choix repose sur **la gravimétrie, le magnétisme, la radiométrie et la magnétotellurique**.

Par contre dans des **études détaillées et semi détaillées**, les méthodes qui s'appliquent mieux sont la sismique réfraction réflexion haute résolution; la méthode électrique sondage électrique et les méthodes de polarisation.

### 3. Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation varie avec les diverses méthodes.

Sism réfraction peu pénétrante, dite de surface, quelques dizaines a quelques centaines de mètres

Sism réflexion très pénétrante recherche pétrolière

Electrique: profondeur d'investigation qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres.

L'interprétation nécessite des étalonnages

### 4. Profondeur de pénétration

La profondeur de pénétration est liée aux possibilités d'un champ physique donné, de pénétrer aisément a l'aide d'un système d'acquisition adéquat

## 5. Systèmes d'acquisition des données géophysiques.

La mise en œuvre d'un système d'acquisition de données géophysiques:

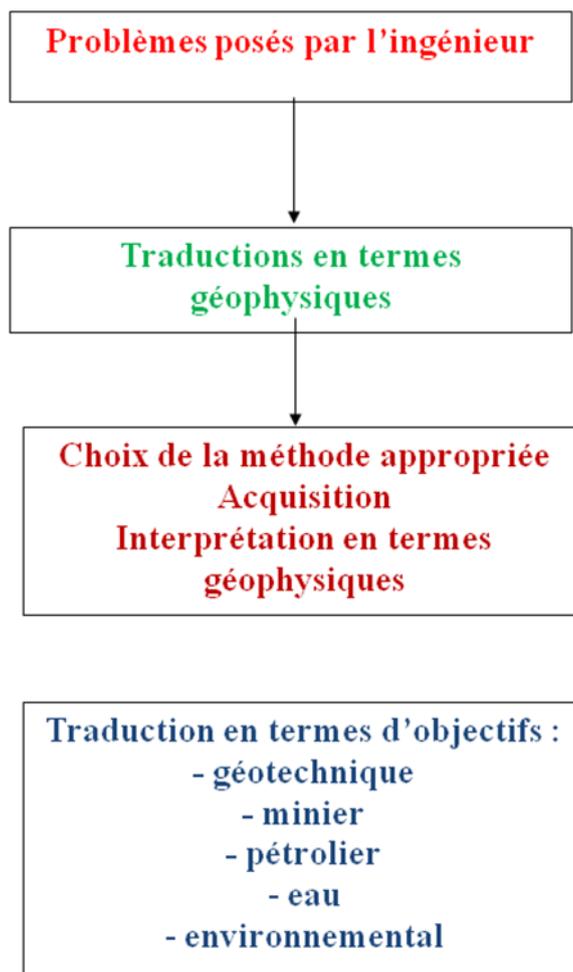
- est fonction des conditions naturelles du milieu :
- est efficace, s'il peut nous assurer d'une part une bonne acquisition de données et d'autre part un bon rapport signal sur bruit:

## 6. Traitement des données géophysiques.

Le traitement des données géophysique consiste à résoudre le problème inverse, c'est la confrontation des données expérimentales (image virtuelle du modèle réel de terrain) avec un modèle théorique, ou les paramètres de ce dernier sont prédéfinis a priori.

## 7. Stratégie de prospection géophysique

Lorsqu'on envisage une étude géophysique dans une région donnée, on commence par préciser les problèmes qu'on désire résoudre



## 8. Conditions pour qu'une technique géophysique soit efficace :

- faire la prévision;
- réaliser au bon moment ;
- connaître ses limites
- savoir que son efficacité peut être liée à une autre technique
- savoir que sa performance peut être accrue par une autre méthode.

## 9. Classification des méthodes Géophysiques

Il existe plusieurs classements possibles des méthodes géophysiques.

- Classement basé sur leur finalité: (pétrolière, minière, géotechniques, ...)

- Classement basé sur la nature physique du phénomène mesuré (potentielle par exemple si on mesure une quantité dérivant d'un potentiel).

\* les méthodes naturelles, appelées aussi passives, qui mesure un phénomène naturel (sismologie, gravimétrie, magnétométrie, tellurique et magnétotellurique, polarisation spontanée, radiométrie, géothermie)

\* les méthodes provoquées, appelées aussi actives, qui créent un phénomène pour en mesurer les effets (sismique, électrique, polarisation provoquée, électromagnétisme).

- Classement basé sur la profondeur d'investigation :

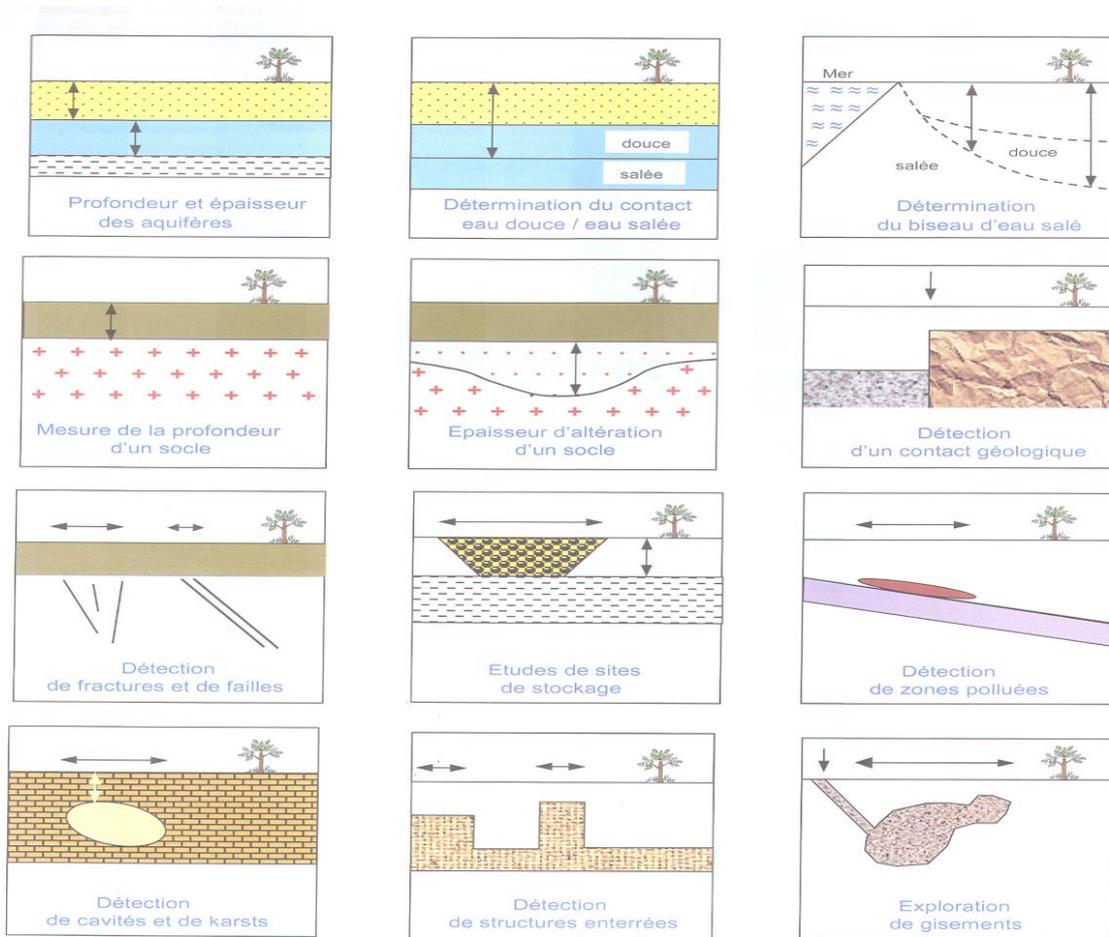
\* La géophysique des grandes profondeurs

\* La géophysique des moyennes profondeurs

\* La géophysique de subsurface

\* La géophysique spatiale.

\* La géophysique interne "Mesures dans les puits de forage"



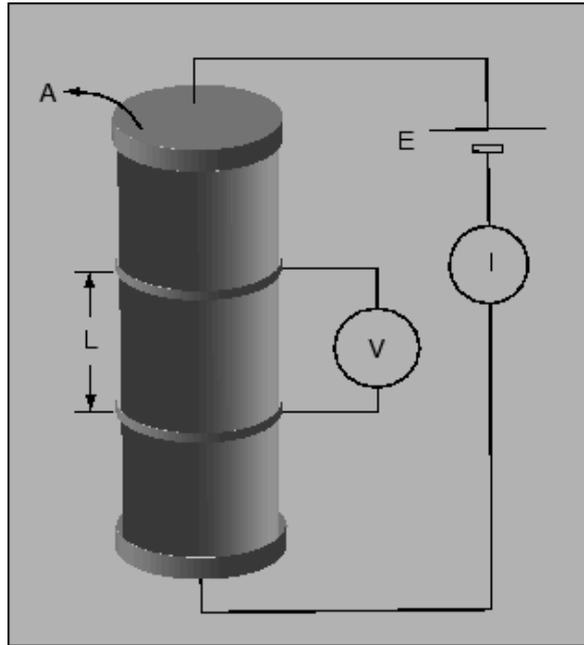
### Les domaines d'application de la géophysique

# La prospection géoélectrique.

## I. Les méthodes de résistivité à DC

Elles sont basées sur la mesure du potentiel électrique généré par l'injection d'un courant *continu* (DC) dans le sol. Elles se distinguent de la P.S. où on mesure le potentiel généré naturellement, et de la Polarisation Provoquée où on injecte un courant *alternatif* (AC).

### 1. Notion de résistivité électrique



**Figure .1:** Mesure de la résistivité en laboratoire.

La *résistance* mesure l'opposition au passage d'un courant électrique, et peut permettre de caractériser un matériau. La loi d'Ohm stipule que la résistance électrique est donnée par le quotient du potentiel  $V$  appliqué aux bornes d'un matériau par le courant  $I$  qui circule, soit

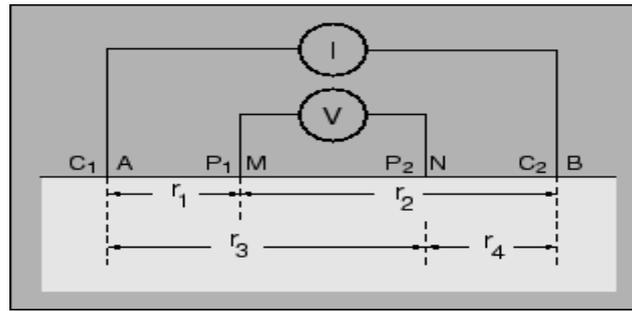
$$R = V/I. \text{ exprimée en ohm} \quad (1)$$

La *résistivité électrique*  $\rho$  et est reliée à la résistance par :

$$R = \rho L/A \text{ exprimée en ohm.m} \quad (2)$$

pour un prisme rectangulaire de longueur  $L$  et de section  $A$  (figure 1). L'inverse de la résistivité est appelée la conductivité électrique ( $\sigma = 1/\rho$ ) et ses unités des mho/m ou siemens/m.

## 2. Deux électrodes à la surface



**Figure .2:** Dispositif à quatre électrodes en surface.

Lorsque la distance entre deux électrodes du courant est finie, le potentiel en un point  $P_1$  est affecté par ces deux électrodes (figure 4). Le potentiel au point  $P_1$  dû à l'électrode  $C_1$  est :

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{I} \rho / 2\pi r_1, \text{ et le potentiel au point } P_1 \text{ dû à l'électrode } C_2 \text{ est : } \mathbf{V}_2 = - \mathbf{I} \rho / 2\pi r_2,$$

Puisque le courant qui sort par une électrode est égal au courant qui entre par l'autre électrode, on peut écrire que  $\mathbf{I}_1 = - \mathbf{I}_2$ . Le voltage total à  $P_1$  est :

$$\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 = (\mathbf{I} \rho / 2 \pi) * (1/r_1 - 1/r_2)$$

Ainsi, la différence de potentiel  $\Delta \mathbf{V}$  entre deux électrodes de potentiel sera

$$\Delta \mathbf{V} = (\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2) - (\mathbf{V}_3 + \mathbf{V}_4), \text{ ou encore } \Delta \mathbf{V} = (\mathbf{I} \rho / 2 \pi) * (1/r_1 - 1/r_2) - (1/r_3 - 1/r_4) \quad (7)$$

### 3. L'exploration verticale du sol: les sondages

On a vu que pour un sous-sol homogène et isotrope, il est possible de trouver la résistivité du milieu en injectant du courant et en mesurant le  $\Delta \mathbf{V}$  ainsi créé. Pour un dispositif comme celui de la figure 4, la résistivité  $\rho$  se trouve par la relation

$$\rho = \Delta \mathbf{V} / \mathbf{I} * \underbrace{\left[ \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \right]}_K \quad (17)$$

où  $\mathbf{K}$  est un facteur géométrique du dispositif d'électrode, et où les unités sont:

$$I = \text{mA}, \Delta \mathbf{V} = \text{mV}, \rho = \Omega\text{m}, \text{ distances} = \text{m}.$$

Jusqu'ici, nos calculs de la résistivité du sol se sont basés sur l'hypothèse d'un sous-sol homogène et isotrope. Or, il n'en est rien en réalité. Le but de la prospection électrique est

justement de permettre au géophysicien de se faire une image de la structure et des hétérogénéités du sol. L'exploration par méthode à courant continu se fait de deux façons:

- sondages électriques: exploration verticale;
- profilage (traîné électrique): exploration horizontale.

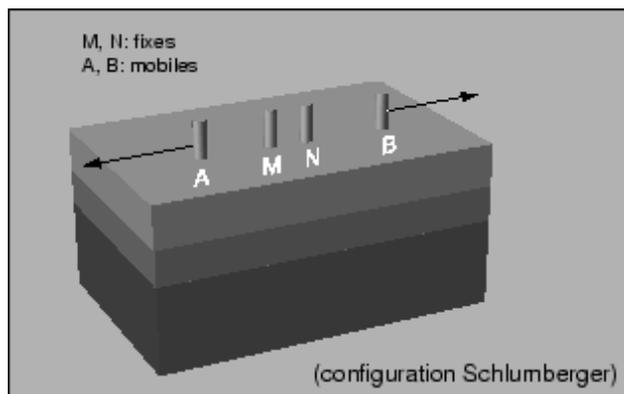
L'examen de sous-sols hétérogènes va nous amener à définir la notion de résistivité apparente ( $\rho_a$ ). Si dans un sous-sol hétérogène quelconque on injecte un courant  $I$  à l'aide d'un dipôle  $AB$  et qu'on mesure une différence de potentiel  $\Delta V$  à l'aide d'un dipôle  $MN$ , chacune de ces quatre électrodes étant placée n'importe où, alors la résistivité apparente  $\rho_a$  est donnée par :

$$\rho_a = \Delta V / I * \underbrace{\left[ \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \right]}_K \quad (18)$$

et correspond à la résistivité d'un sous-sol homogène pour lequel on mesurerait les mêmes valeurs  $\Delta V$  et  $I$  pour le même dispositif d'électrodes. La résistivité apparente a donc la dimension d'une résistivité et est exprimée en  $\Omega m$ .

La résistivité apparente n'est pas caractéristique d'un site donné car elle dépend du dispositif d'électrodes employé. La valeur de  $\rho_a$  n'a par conséquent aucune signification en soi (mesure relative). On peut lui donner un sens en la comparant à d'autres valeurs

- quantitativement: sondages électriques sur terrains tabulaires;
- qualitativement: cas des traînés électriques.



**Figure .3:** Illustration du principe de mise en oeuvre d'un sondage.

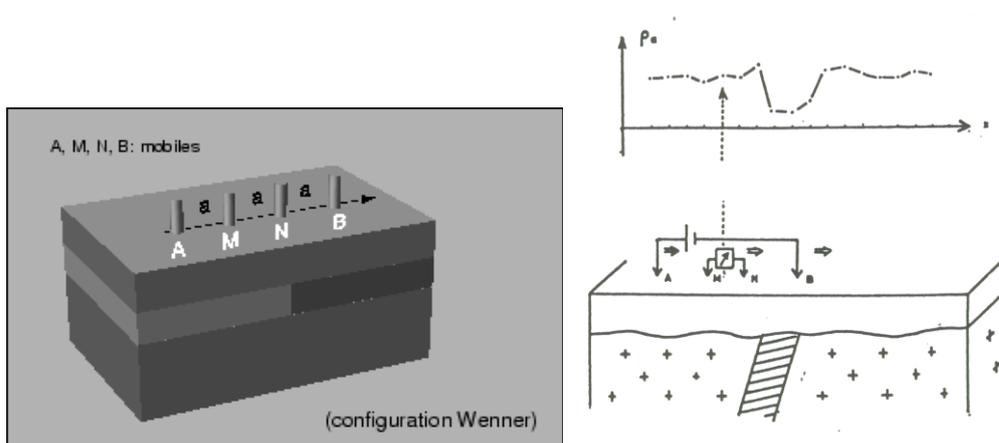
Lorsqu'on injecte un courant dans le sol, les filets de courant pénètrent à une profondeur théoriquement infinie. On a cependant démontré que pour une longueur de ligne  $AB$  constante, la densité de courant diminue avec la profondeur. Un corps produit une distorsion des lignes équipotentielles d'autant plus importante que la densité de courant est forte. Donc,

si le corps est profond, la ligne  $AB$  est grande. C'est le principe des sondages électriques: disposant d'un quadripôle  $AMNB$ , on fait varier la longueur  $AB$  en laissant le point  $O$ , centre de  $AB$  et de  $MN$ , fixe (figure .11). On peut alors tracer la courbe représentative de  $\rho_a$  en fonction de  $L = AB/2$ .

L'interprétation de ces courbes n'est pratiquement possible que si: (1) les résistivités des différentes couches sont bien contrastées; (2) les couches ont une extension verticale et horizontale assez importante; et (3) les terrains sont stratifiés horizontalement ou sub-horizontalement.

Au-dessus de terrain H ou A, ces courbes de sondages sont équivalentes si la *conductance longitudinale* ( $S$  ou  $Cl = h/\rho$ ) reste la même (exprimée en  $\text{ohm.m}^{-1}$ ). Dans le cas des terrains de type K ou S, c'est la *résistance transversale* ( $R = \rho * h$ ) qui est importante (exprimée en  $\text{ohm.m}^2$ ).

#### 4. L'exploration horizontale du sol: les traînés électriques



**Figure .4:** Illustration du principe de mise en œuvre d'un profil.

Il s'agit simplement de déplacer un quadripôle  $AMNB$  de dimension fixe sur le site à explorer (figure .15). À chaque station, on fait une mesure de  $I$  et de  $\Delta V$  qui permet de calculer  $\rho_a$  qu'on affecte au centre du dispositif.

Si les mesures se font sur une grande surface, on peut rapporter en plan les mesures et tracer des courbes d'équi-résistivité. Si les mesures se font sur une ligne, on établit un profil de résistivité. Si plusieurs séparations sont utilisées, on peut tracer des pseudo-sections (figure .16). On obtient ainsi une représentation *qualitative* de la variation de  $\rho_a$  latéralement et en profondeur. Ce n'est *pas* une vraie section géoélectrique. Entre le sondage et les traînés électriques, il existe des solutions moyennes:

- traînés avec plusieurs longueurs de lignes;
- traînés avec, de place en place, un sondage soigné.

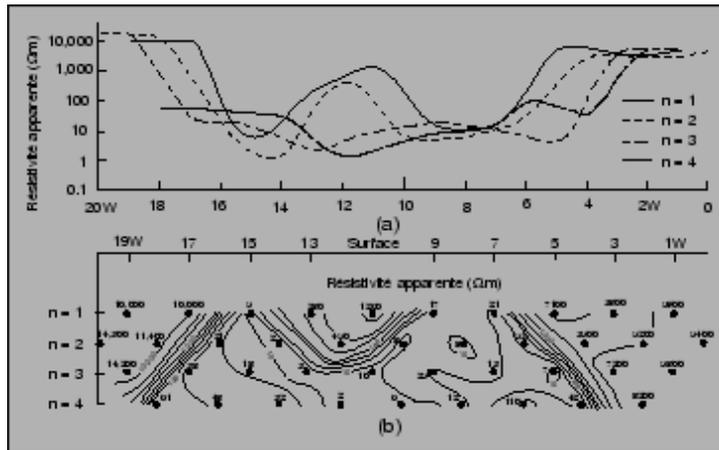


Figure. 5 : Construction d'une pseudo-section.

### 5. Les configurations d'électrode

Plusieurs configurations d'électrode ont été mises de l'avant. Elles permettent toutes de trouver la résistivité apparente du sous-sol à partir de mesures de  $\Delta V$  et  $I$ . Toutes les configurations ne sont qu'une variation sur le thème du quadripôle  $AMNB$  et l'expression de  $\rho_a$  pour chacune des configurations se dérive de l'équation de base (35).

Le choix d'un dispositif n'est souvent qu'une question de commodité du point de vue logistique et pratique (problèmes avec la topo, nombre de personnes requises, vitesse d'exécution, etc.). Les plus populaires sont:

- Dispositif Wenner

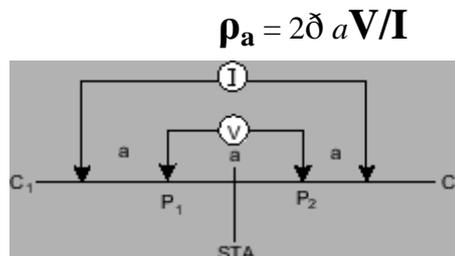


Figure. 6: Configuration de Wenner.

- Dispositif Schlumberger

$$L = AB/2 \text{ et } l = MN/2$$

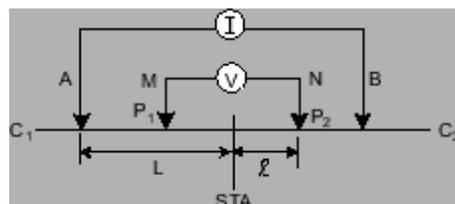


Figure.7 Configuration de Schlumberger.

En général, on utilise  $L/2l > 1.5$  (jusqu'à 50, sous de bonnes conditions) et  $\rho_a = \delta (L^2 - l^2)/2l * V/I$   
 Si  $L/2l > 2.5$ ,  $\rho_a = \delta L^2/2l * V/I$  est acceptable.

- Dispositif Dipôle - Dipôle

$$\rho_a = \delta a(n)(n + 1)(n + 2) * V/I$$

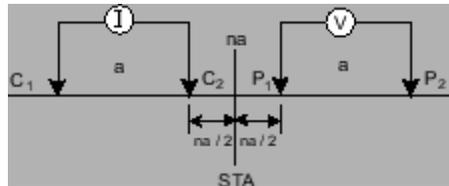


Figure .8: Configuration dipôle-dipôle.

## Interprétation des données géophysiques

\* **Interprétation qualitative.** Elle consiste à :

- décrire les anomalies constatées ;
- étudier la répartition des résistivités apparentes dans le sous-sol,
- donne des indications sur les grands traits de l'ensemble des structures géologiques.

Les conclusions ainsi obtenues permettront d'orienter les études de détail et ainsi fournir une interprétation pseudo quantitative, moyennant des hypothèses qui restent à vérifier.

### **PARTIE PRATIQUE.**

Exemple : analyse des familles de sondages électriques par **WINSEV**; cartes de résistivités apparentes pour différentes longueurs de ligne d'envoi de courant AB correspondant à différentes tranches de terrain.

\* **Interprétation quantitative.** Elle consiste à déterminer la profondeur des couches, leur épaisseur, les résistivités vraies, les anomalies; la géométrie des corps anomaux (épaisseur, forme, largeur..).

### **PARTIE PRATIQUE.**

Exemple : Cartes thématiques en isopaches, isobathes, isohypses, isorésistivités vraie, résistance transversale, conductance longitudinales. Coupes géoélectriques transversales et longitudinales.

## **II. Prospection électrique pour la mise en évidence de l'agressivité des sols**

### 1. Critères d'agressivité des sols

L'agressivité du sol est considérée comme la principale caractéristique qui contribue directement au processus de corrosion des structures enfouies.

Les facteurs déclenchant la corrosion des éléments enterrés (béton, acier, fer, cuivre, fonte...): :

- la nature du terrain (argiles, sables, marnes;);)constitue un élément très important dans la corrosion
- les caractéristiques hydrogéologiques. (le taux d'humidité joue un rôle important sur le processus de corrosion par son incidence sur l'aération d'un sol et sur la résistivité du sol). Par ailleurs, les terrains aquifères présentent une corrosivité importante naturellement.
- le degré d'aération d'un sol indiqué par le potentiel Redox. Un faible potentiel Redox (faible oxygénation) caractérise des conditions propices à la corrosion bactérienne anaérobie.

En résumé, le caractère corrosif des sols est dépendant des paramètres suivants :

- perméabilité à l'air et à l'eau, qui dépend de leur porosité et de la granulométrie des sols ;
- taux d'humidité ;
- teneur en sels ;
- alcalinité ou acidité (pH) ;
- conductivité électrique ou résistivité.

Nous pouvons dire par exemple, qu'un sol acide, humide, peu aéré et dont la conductibilité est bonne (conductivité > 0.2 S/m (Siemens par mètre)) est très agressif.

L'étude de la résistivité du sol peut nous renseigner sur sa propriété d'électrolyte. Cette propriété pourra favoriser ou non le développement de mécanisme de corrosion. Nous pouvons évaluer la corrosivité du sol en fonction de sa résistivité.

Nous constatons par ailleurs que l'agressivité du sol diminue avec l'augmentation de la résistivité. Un sol résistant a un faible apport sur le processus de corrosion tandis qu'un sol de faible résistivité permet l'activation et la propagation rapide de la corrosion et, par conséquent, une apparition importante du nombre de bris sur les conduites du réseau.

La conduite en fonte ductile présente généralement une bonne résistance à la corrosion externe. Cependant, en présence des sols agressifs, les risques d'activité de corrosion sont élevés. À cet effet, la connaissance de la résistivité du sol entourant les conduites sert à estimer la corrosivité du sol, à déterminer les zones exposées à la corrosion et aussi à établir des plans d'intervention et de prévention en fonction des priorités.

## 2. Différents types d'agressivité

**Tableau 1. Corrosivité du sol/fonte selon la résistivité électrique**

Résistivité électrique du sol (en $\Omega.m$ )	Agressivité	Corrosion
$\rho \leq 2$	Très agressif	Corrosion certaine
$2 < \rho \leq 5$	Agressif	Corrosion possible
$5 < \rho \leq 10$	Faiblement agressif	Corrosion probable
$\rho > 10$	Non agressif	Pas de corrosion

**Tableau 2. Corrosivité du sol/béton selon la résistivité électrique**

Résistivité électrique du sol (en $\Omega.m$ )	Agressivité	Corrosion
$\rho \leq 5$	Très agressif	Corrosion certaine
$5 < \rho \leq 10$	Agressif	Corrosion possible
$10 < \rho \leq 20$	Faiblement agressif	Corrosion probable
$\rho > 20$	Non agressif	Pas de corrosion

**Tableau 3. Corrosivité du sol/acier selon la résistivité électrique**

Résistivité électrique du sol (en $\Omega.m$ )	Corrosion
$\rho \leq 15$	Très corrosif
$15 < \rho \leq 30$	Corrosif
$30 < \rho \leq 50$	Moyennement corrosif
$50 < \rho \leq 100$	Faiblement corrosif
$\rho > 100$	Non corrosif

### 3. Mesure de la résistivité électrique

Les résistivités électriques peuvent être mesurées par un quadripôle d'électrodes type Wenner avec des distances AB de 3, 6, 9 et 12m et des distances MN de 1, 2 et 3m soit un espacement entre électrodes quelconques  $a=1m, 2m, 3m$  et  $4m$  correspondant à des profondeurs d'investigation respectivement de  $1m, 2m, 3m$  et  $4m$

A partir des résultats de ces mesures, on a déterminé les résistivités moyennes relatives aux tranches des sols comprises entre  $1m$  et  $2m$ , entre  $2m$  et  $3m$  et entre  $3$  et  $4m$ . Pour cela, on a utilisé les formules suivantes :

$$\rho_{1-2} = \frac{\rho_1 \times \rho_2}{2\rho_1 - \rho_2} \quad \rho_{2-3} = \frac{\rho_2 \times \rho_3}{3\rho_2 - 2\rho_3} \quad \rho_{3-4} = \frac{\rho_3 \times \rho_4}{4\rho_3 - 3\rho_4}$$

$\rho_1$  : résistivité sur une profondeur de  $1m$ .  $\rho_2$  : résistivité sur une profondeur de  $2m$ .

$\rho_3$  : résistivité sur une profondeur de  $3m$ .  $\rho_4$  : résistivité sur une profondeur de  $4m$

$\rho_{1-2}$  : résistivité dans la tranche de terrain située entre  $1m$  et  $2m$

$\rho_{2-3}$  : résistivité dans la tranche de terrain située entre  $2m$  et  $3m$

$\rho_{3-4}$  : résistivité dans la tranche de terrain située entre  $3m$  et  $4m$

## **PARTIE PRATIQUE**

Traitement des données géoélectriques appliquées à l'étude de l'agressivité du sous-sol

### III. Tomographie Électrique nouvelle génération : couplage de sondages et traînés

Classiquement, afin de réaliser un panneau de tomographie de résistivité électrique, une série d'électrodes est implantée sur une ligne droite avec un espacement inter-électrodes constant.

De même que pour le sondage de résistivité électrique, en faisant appel à un quadripôle de mesure de plus en plus étiré, la profondeur d'investigation augmente. Cet allongement de la longueur du quadripôle associée à une translation latérale de celui-ci permet l'obtention d'une pseudo-section de résistivités électriques apparentes du sous-sol. La profondeur d'investigation maximale est atteinte lorsque le quadripôle se déploie sur la longueur maximale du dispositif installé.

A partir des pseudo-sections de résistivités apparentes, il est possible de calculer la matrice de sensibilité pour l'ensemble de la pseudo-section. Plus la valeur de sensibilité est grande, plus la valeur de résistivité du modèle obtenu après inversion sera fiable. La prise en compte de la sensibilité permet d'évaluer la fiabilité des résultats obtenus.

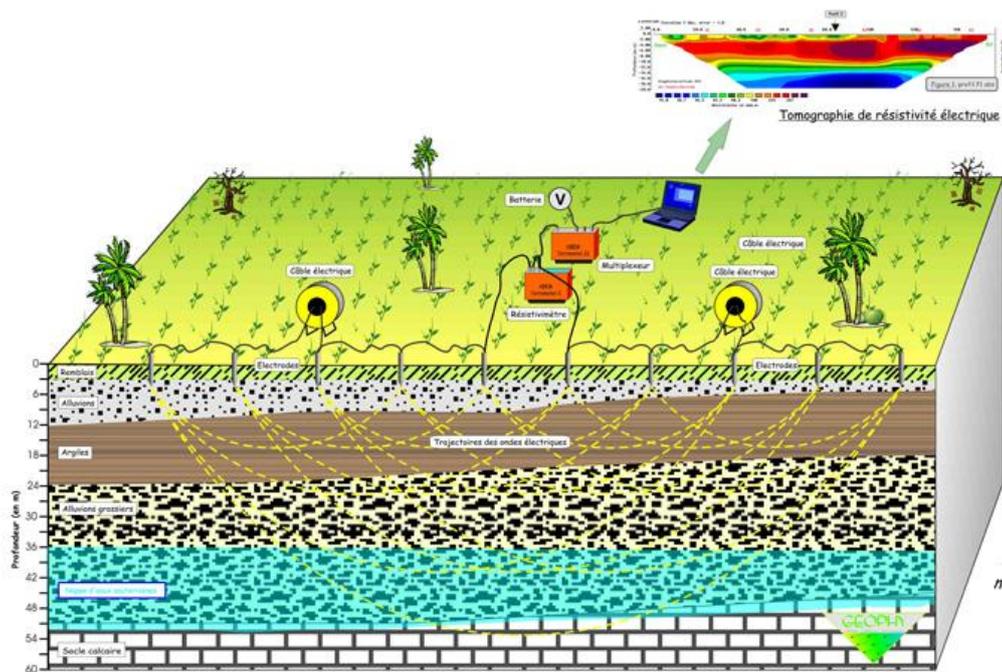
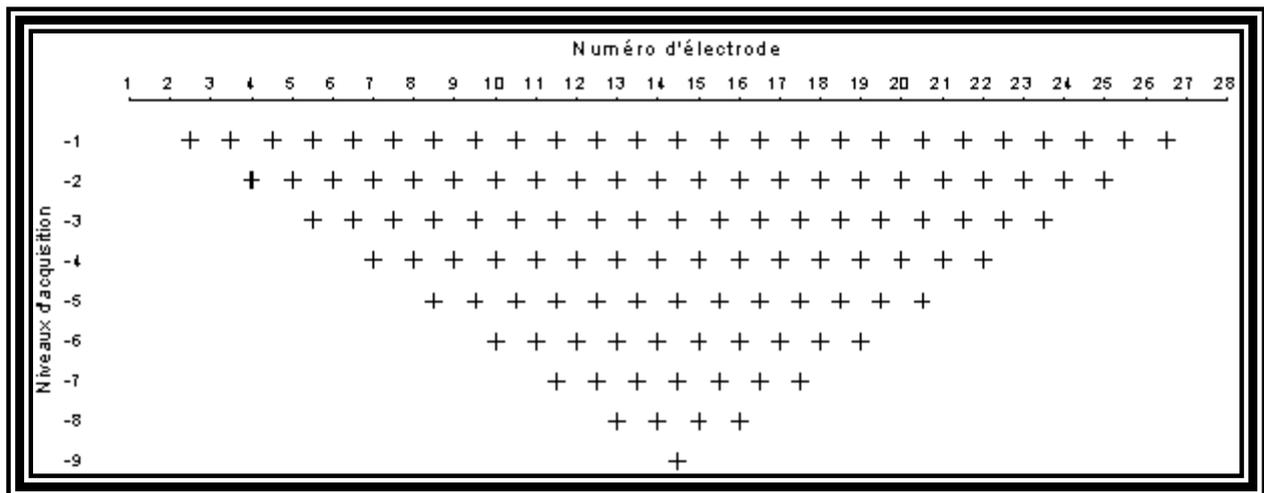


Fig. 1. Schéma de principe d'acquisition des mesures de résistivité électrique et de chargeabilité



**Fig. 2. Schéma des niveaux d'acquisition des mesures de résistivité électrique et de chargeabilité**

La distance entre deux électrodes est notée  $a$ . En dispositif Wenner (Fig.2), la première mesure du fichier d'acquisition va se faire à l'aide des électrodes 1, 2, 3 et 4 ; les électrodes 1 et 4 serviront à l'injection du courant, les 2 et 3 à la mesure du potentiel. Tout le dispositif va ensuite se déplacer d'une distance «  $a$  ». Les électrodes 2 et 5 serviront alors d'injection du courant et les 3 et 4 de mesure du potentiel.

Le processus se répète jusqu'à l'électrode 28. On a donc, pour le premier niveau d'acquisition 24 possibilités (28-3). Comme la caractéristique du dispositif Wenner est de garder une distance constante entre toutes les électrodes, on va donc, pour le niveau suivant, prendre une distance égale à  $2*a$ . La première mesure du 2<sup>ème</sup> niveau impliquera donc les électrodes 1 et 7 pour l'injection du courant et 3 et 5 pour la mesure du potentiel.

Le processus se répète à nouveau jusqu'à l'électrode 28. On effectue ainsi les mesures de chaque niveau d'acquisition (il en existe 9 pour 28 électrodes en Wenner). Il est évident que plus la distance inter-électrode augmente, plus le nombre de possibilités diminue.

### **Traitement des données**

La phase de traitement comprend plusieurs étapes (fig.3) :

- Un premier processus de filtrage des données brutes récupérées du résistivimètre ;
- Exportation des données vers le Logiciel RES2DINV ;
- Inversion des résistivités par RES2DINV ;
- Présentation des résultats.

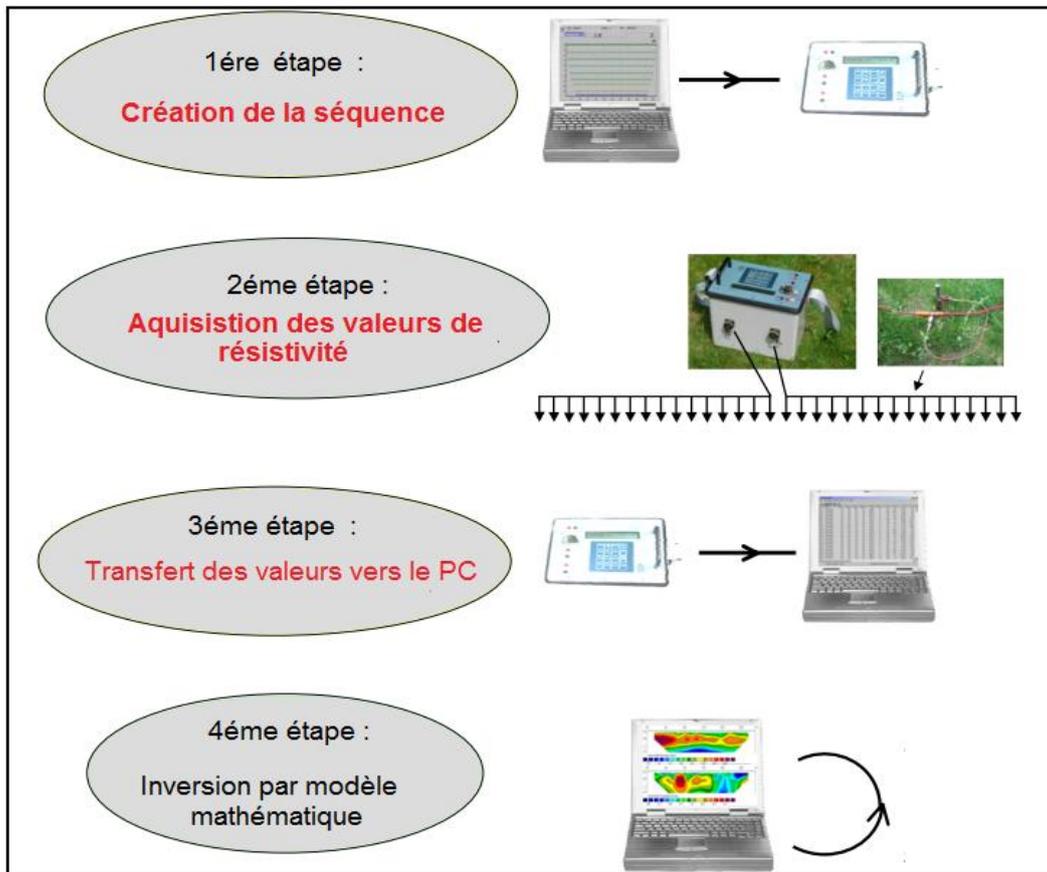


Figure .3. Les étapes de traitement

## **PARTIE PRATIQUE**

- Application de la Géoélectrique au dégagement des ressources en eau.  
Exemple de cas dans le bassin de Saïss ;
- Application de la la Géoélectrique à la détermination de l'agressivité des sols ;
- Application de la tomographie électrique au dégagement des ressources en eau : cas de l'aquifère alluvial de oued My Bouchta, réigon de Chaouen
- Application de la tomographie électrique à l'étude d'une carrière : cas de la carrière de calcaires du Lias, oued Beht