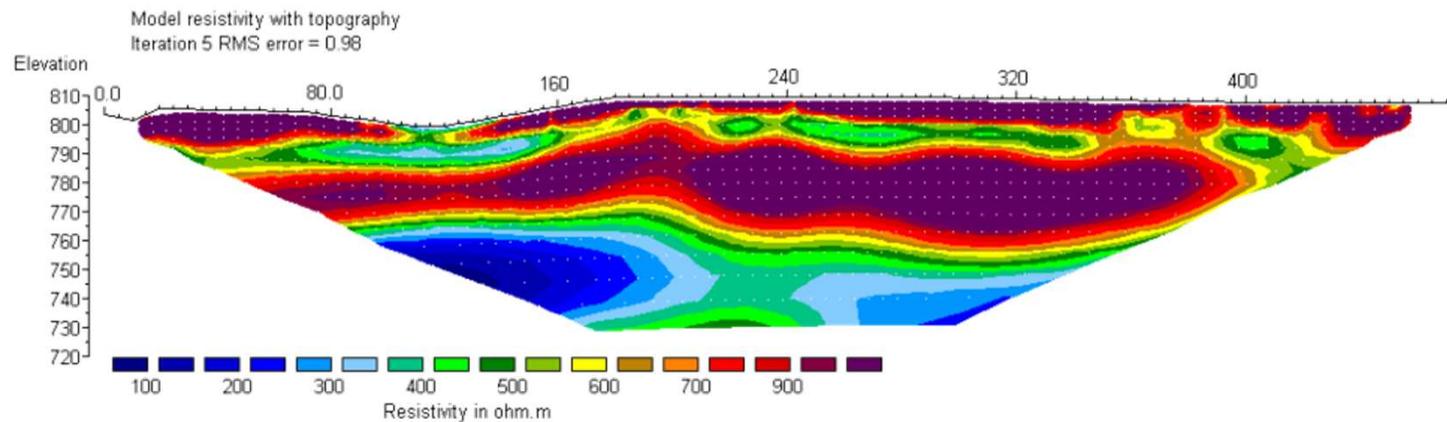


# Méthodes Electriques



Par: Dr. ZERROUKI HIACHAM

2024/2025

# Chapitre 1: Méthode de prospection électrique

# I. Rappels et définitions

## 1. La loi d'Ohm

La loi d'Ohm s'applique aux circuits électriques, et à toutes les méthodes électriques en géophysique:

$$\Delta V = R.I$$

où  $\Delta V$  est la différence de potentiel (en volts) ;  $I$  est le courant (en ampères) ;  $R$  est la résistance électrique (en ohm,  $\Omega$ ). La résistance est donc le ratio du voltage sur le courant :

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

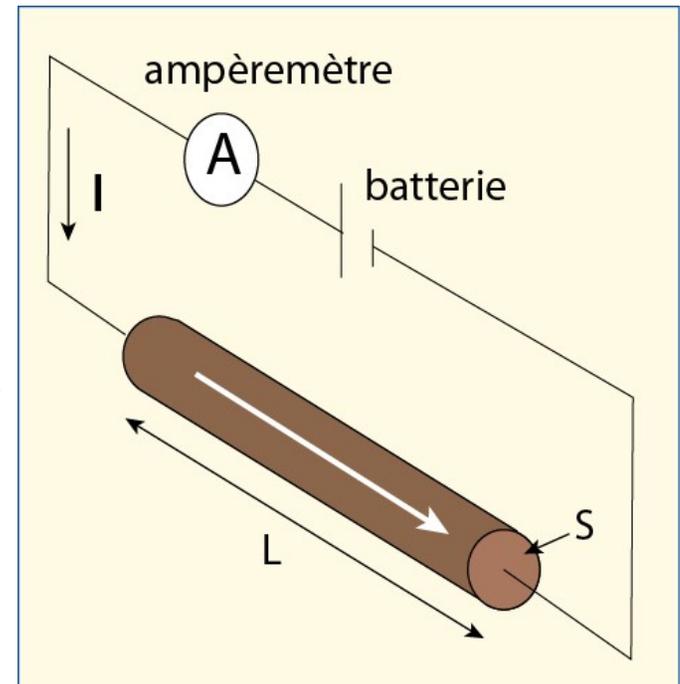
La résistance d'un milieu varie linéairement avec la longueur «  $L$  » du milieu traversé, mais de façon inversement proportionnelle à l'aire «  $S$  » de la surface traversée :

$$R = \frac{\rho.L}{S} \quad \text{d'où} \quad \rho = R \cdot \frac{S}{L} = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{S}{L}$$

où la constante de proportionnalité est la résistivité  $\rho$  (en  $\Omega.m$ ). Elle exprime la difficulté du courant à traverser un milieu :

La conductivité  $\sigma$  (en Siemens/m) est l'inverse de la résistivité :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$



## 2. La loi d'Archie

- 1. Conduction électrolytique  $\rho_r =$ 
  - ✓  $\rho_r$  la résistivité de la roche
  - ✓  $\rho_w$  la résistivité du fluide
  - ✓  $\phi$  la porosité de la roche (en %)
  - ✓ S le degré de saturation
  - ✓ a, m et n des constantes

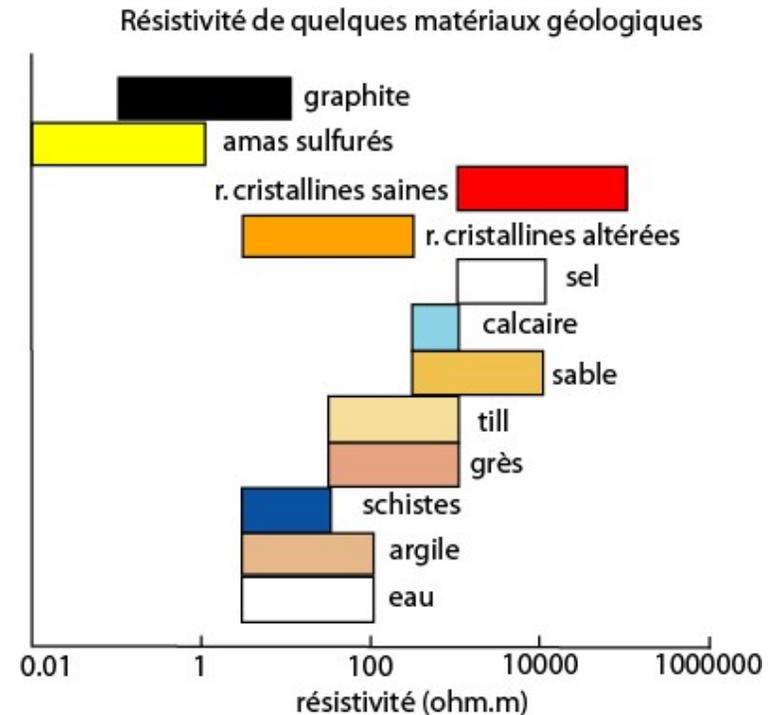
a
<i>Fct° de la lithologie</i>
0.6 à 2 (~ ↑ si $\phi$ ↓)

## Résistivités des roches

Type de sédiments	Diamètre (mm)	porosité totale (%)	Poro
Gravier moyen	2.5	45	
Sable gros	0,250	38	
Sable moyen	0,125	40	
Sable fin	0,09	40	
Sable très fin	0,045	40	
Sable silteux	0,005	32	

# Résistivités des matériaux les plus communs

Material	Resistivity ( $\Omega \cdot m$ )
<b>Igneous and Metamorphic Rocks</b>	
Granite	$5 \times 10^3 - 10^6$
Basalt	$10^3 - 10^6$
Slate	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^8$
Quartzite	$10^2 - 2 \times 10^8$
<b>Sedimentary Rocks</b>	
Sandstone	$8 - 4 \times 10^3$
Shale	$20 - 2 \times 10^3$
Limestone	$50 - 4 \times 10^2$
<b>Soils and waters</b>	
Clay	1 - 100
Alluvium	10 - 800

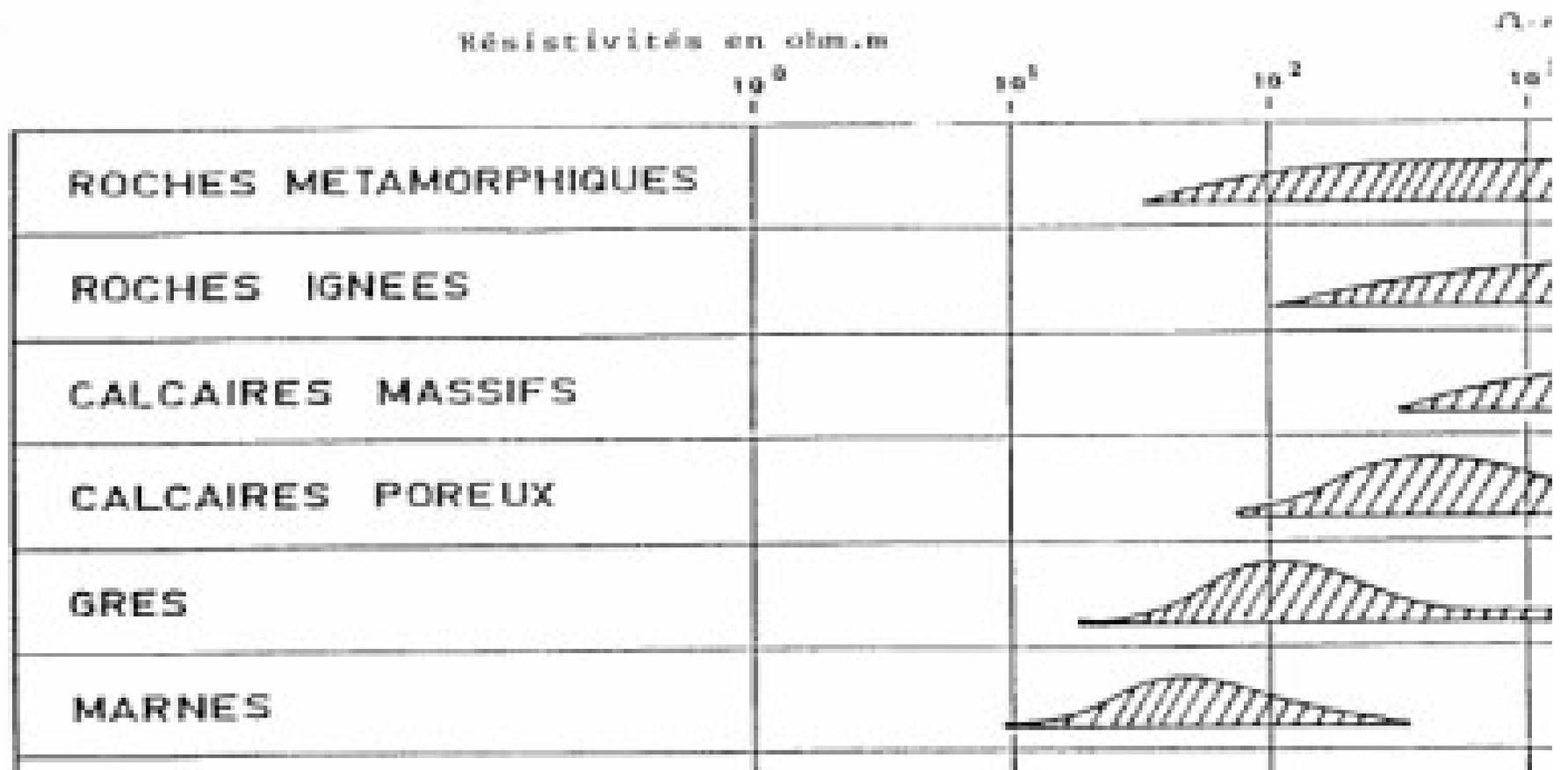


- Gamme des résistivités de matériaux naturels

<i>Type de fluide</i>	<i>Résistivité (<math>\Omega.m</math>)</i>
Eau potable	12
Eau non potable	2.8
Eau du robinet	18
Eau de mer	0.2
Eau de pluie	30 → X1000 <sup>er</sup>

<i>Type de roche</i>
Alluvions - Sables
Grès
Argiles
Argilites
Marnes
Craies
Calcaires
Dolomites
Métaschistes
Gneiss

- Gamme des résistivités de matéri



## II. Distribution du potentiel électrique dans les sols

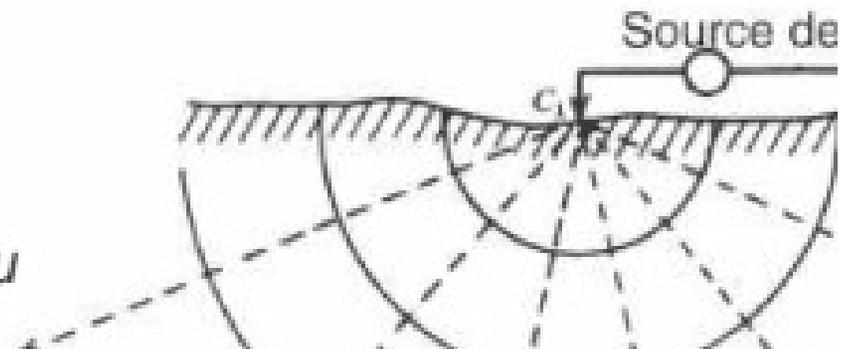
### II.1. Milieu infini, homogène et isotrope

#### a. Cas d'une seule électrodes

- 1. Les termes
  - ✓ Lignes (ou filets) de courant
  - ✓ Equipotentiellles

*Dans un milieu  
homogène, isotrope*

*Dans le cas d'une  
injection ponctuelle du  
courant*



- 2. Détermination du potentiel sur si
  - ✓ Milieu semi infini, isotrope, homogène
  - ✓ La chute de potentiel engendrée par le passage d'un tronc de cône délimité par les deux 1/2 sphère

$$dV = \rho I \frac{dl}{dS}$$

*dl*

b. Cas de deux électrodes

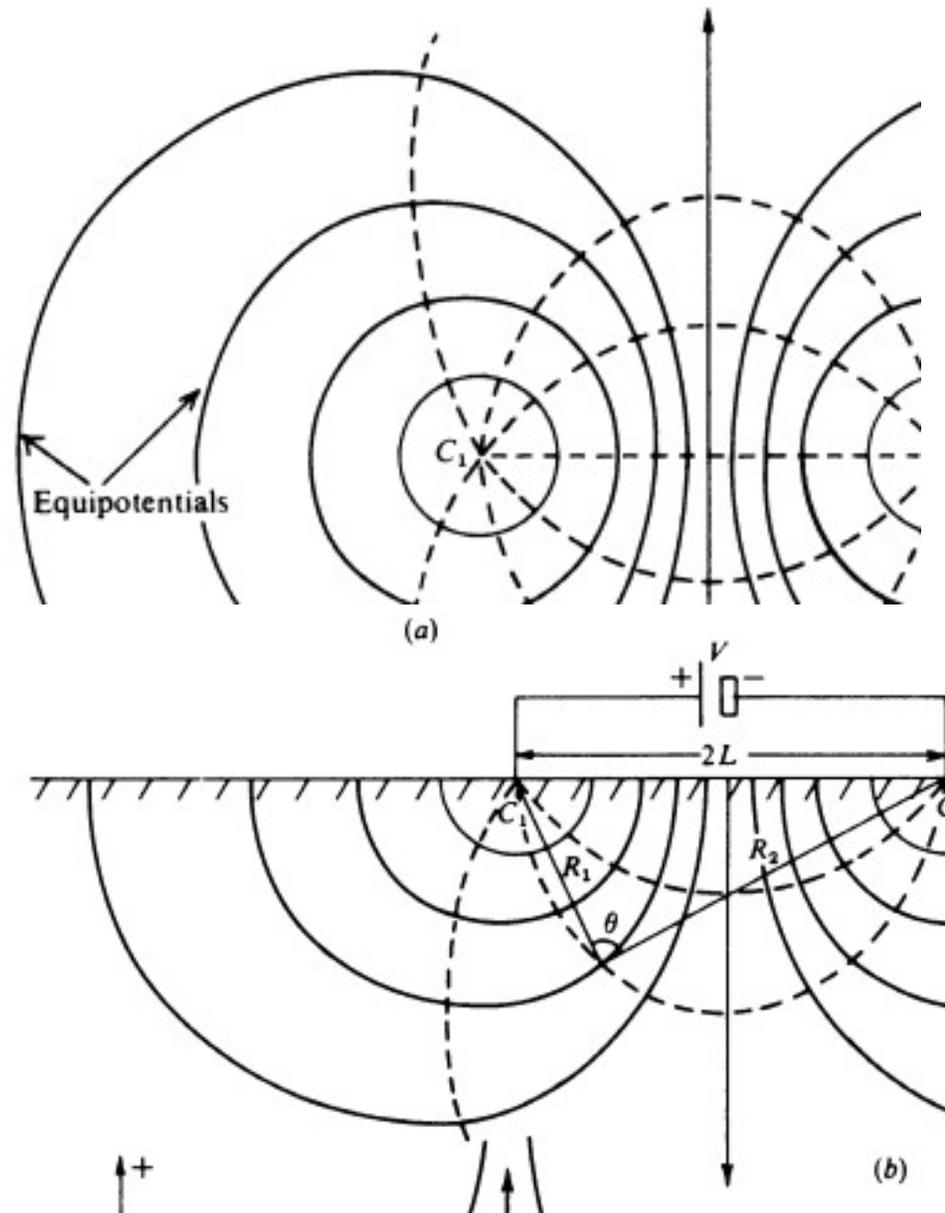
✓Équipotentiellles et lignes de courant

**Figure :** Équipotentiellles et lignes de flux de courant (chemins) pour deux sources ponctuelles de courant sur la surface d'un sol homogène.

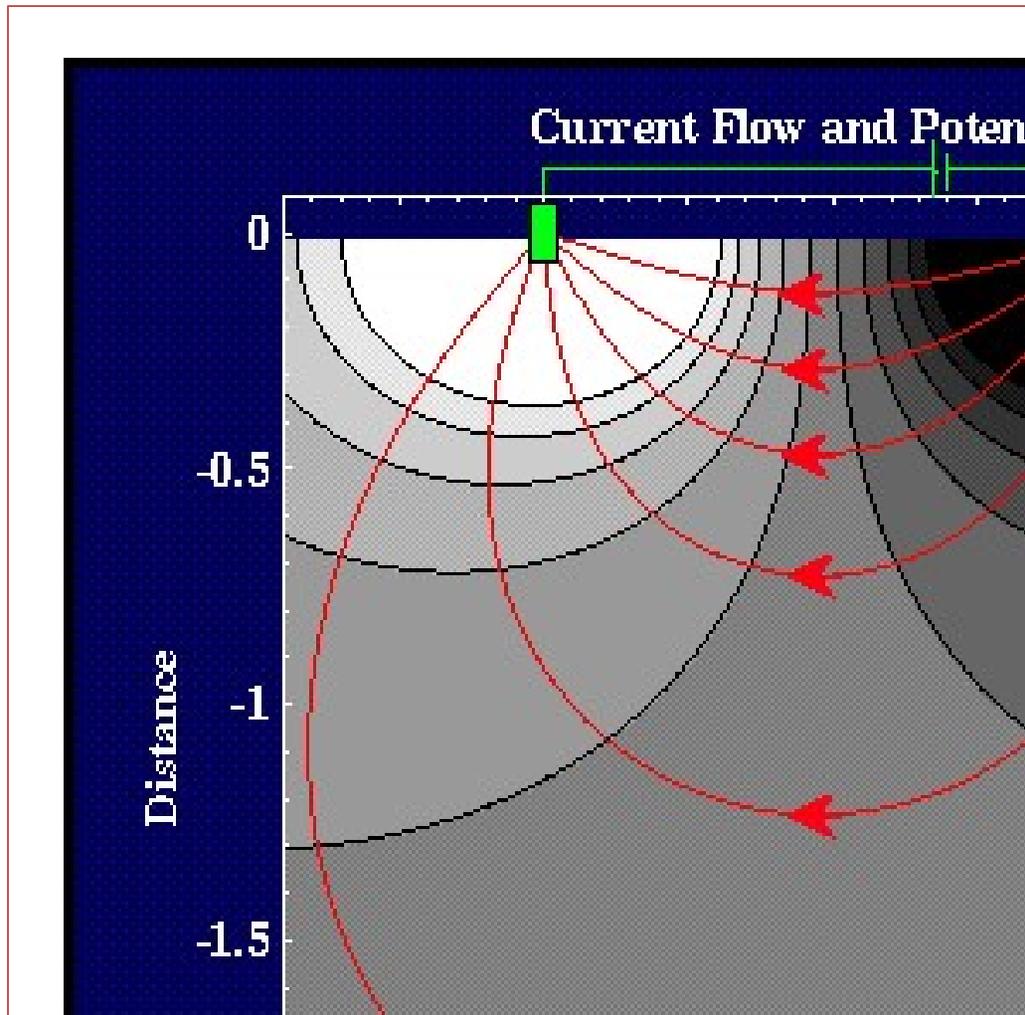
(a) Vue en plan.

(b) Section verticale.

(c) Variation de potentiel à la surface le long d'une ligne droite passant par les sources ponctuelles. (Telford et al. 1990.)



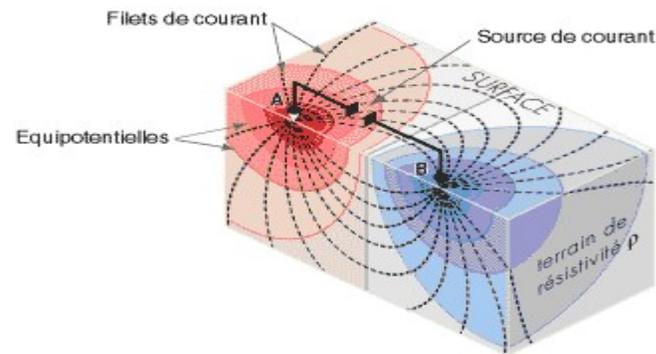
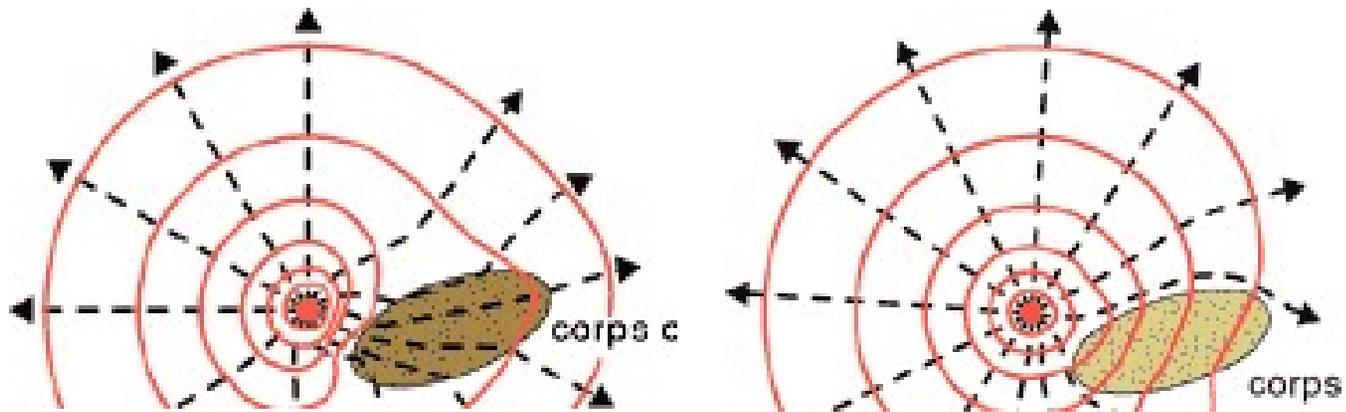
# Équipotentielles et lignes de courant



- Pour un dipôle d'injection:
- La densité de courant décroît avec la profondeur, exemple (de bas en haut):

Ligne de courant	% de courant
1	17
2	32
3	42
4	49
5	51
6	57

# Modification des lignes de champ et des équipotentielles en présence d'une anomalie de résistivité



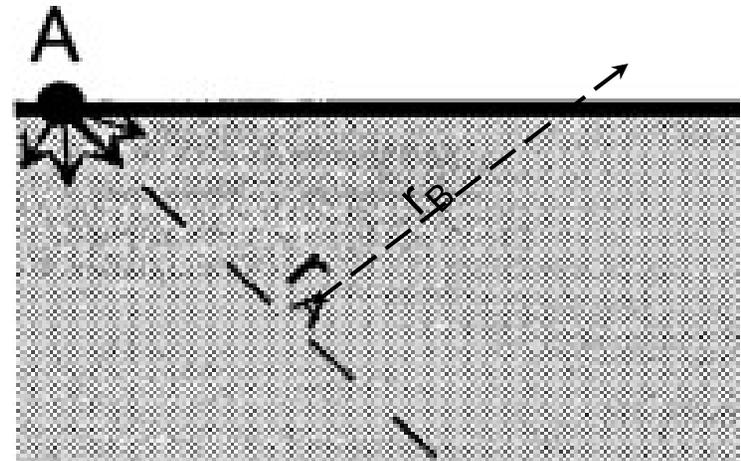
b. Cas de deux électrodes (le dipôles)

Dans ce dispositif, le courant entre en  $A$  et on le récupère en  $B$ . Au point  $M$  du demi-espace (fig.) on aura un potentiel :

$$V_M = V_A + V_B$$

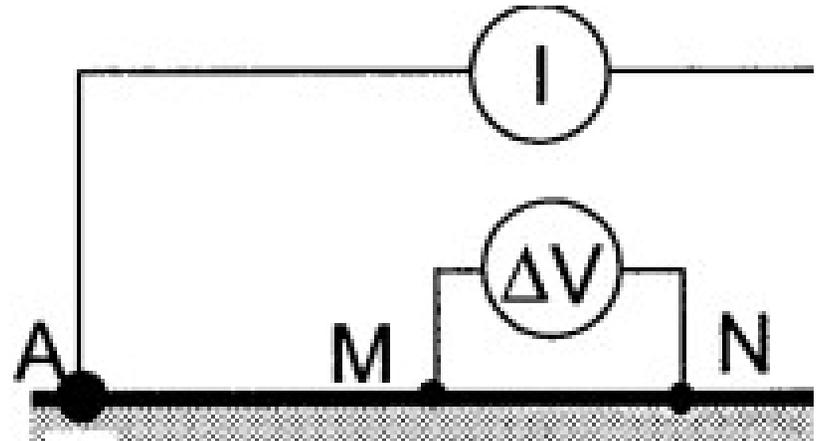
Le potentiel dû à  $A$  est :  $V_A$

Le potentiel dû à  $B$  est :  $V_B$



### c. Cas de quatre électrodes (Le quadripôle )

Lors d'une expérience sur le terrain, on injecte du courant dans le sol, grâce à une batterie ou à un groupe électrogène, reliés à 2 électrodes  $A$  et  $B$  (fig.).



On lit l'intensité du courant injecté sur un ampèremètre. On mesure des différences de potentiel sur le sol entre deux points  $M$  et  $N$  grâce à un voltmètre. Le contact des électrodes avec le sol n'est pas parfait, et une résistance de contact apparaît en  $A$  et en  $B$ . Malheureusement, on ne connaît pas leurs valeurs  $R_A$ ,  $R_B$ , mais on peut s'en affranchir grâce au calcul suivant.

Au point  $M$ , en surface, on a :

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} \right) - R_A I +$$

Au point  $N$  :

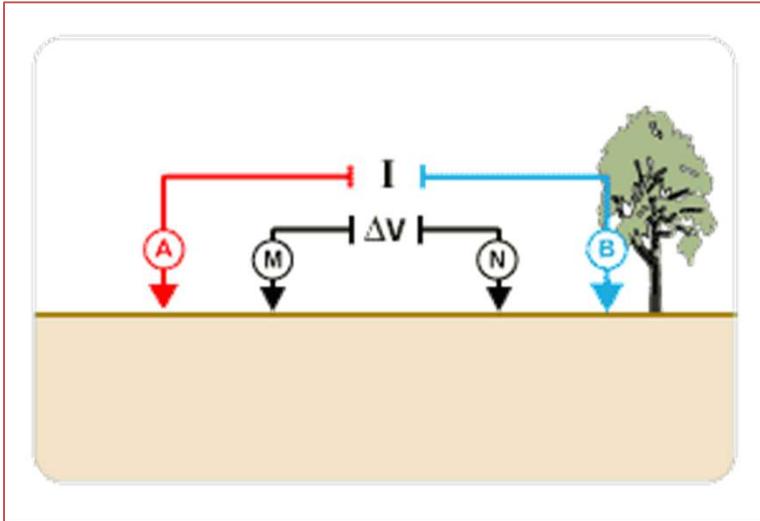
$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{NA} - \frac{1}{NB} \right) - R_A I +$$

La différence de potentiel entre  $M$  et  $N$  s'obtient par  
La quantité entre crochets est le facteur géométrique du montage. Il dépend en effet des positions des quatre électrodes sur le sol. On pose  $[ ] = f$  et l'on obtient l'expression du paramètre recherché, la résistivité :

$$\rho = \frac{V_M - V_N}{f}$$

Les points  $ABMN$  forment un *quadripôle*. Suivant le problème à étudier, on utilise divers dispositifs.

## Le quadripôle



$$\text{Potentiel en M : } V_M = \frac{\rho_a \cdot I}{2\Pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right)$$

$$\text{Potentiel en N : } V_N = \frac{\rho_a \cdot I}{2\Pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

Différence de potentiel entre M et N:

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho_a \cdot I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

D'où la résistivité apparente:

$$\rho_a = \frac{k \cdot \Delta V}{I}$$

Avec  $k = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)}$

facteur géométrique du dispositif

## II. 2. Milieu hétérogène

Si, dans ce cas on mesure toujours, quel que soit le montage, une intensité entre  $A$  et  $B$  et une différence de potentiel entre  $M$  et  $N$ , on pourra toujours calculer la résistivité du terrain. Compte tenu de l'inhomogénéité de celui-ci, on parlera alors de résistivité apparente et l'on aura :

$$\rho_a = k \frac{2\pi V_M}{I}$$

Ce paramètre présente trois propriétés principales :

- $\rho_a$  dépend de  $I$ .
- $\rho_a$  dépend de la configuration géométrique utilisée.
- $\rho_a$  est une sorte de moyenne des résistivités du milieu.

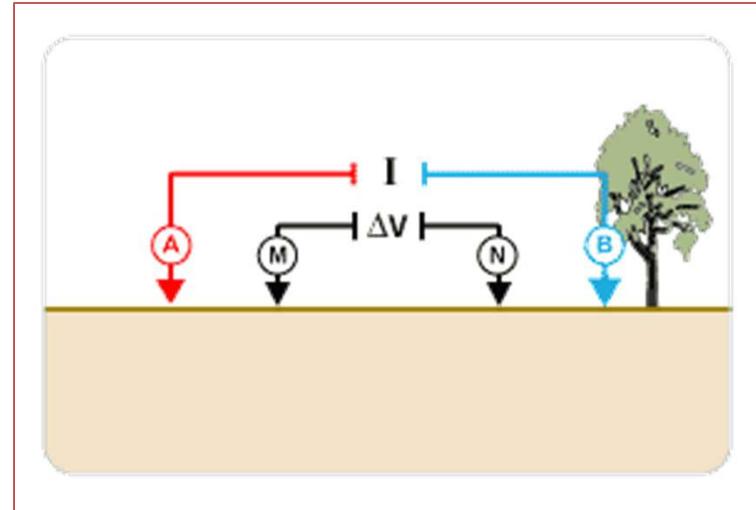
# Types de Quadripôles

➤ Il existe plusieurs types de dispositifs et on cite:

- **Dispositif Wenner:**

pour  $AM = MN = NB = a$

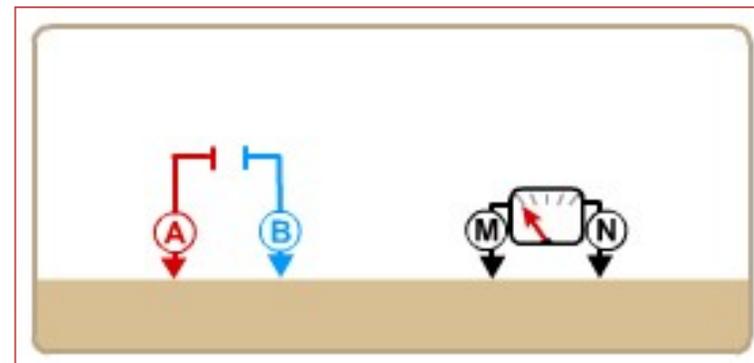
$$k = 2\pi a$$



- **Dispositif Dipole-Dipole:**

pour  $AB = MN = a$

$$k = \pi.n.(n + 1)(n + 2).a$$



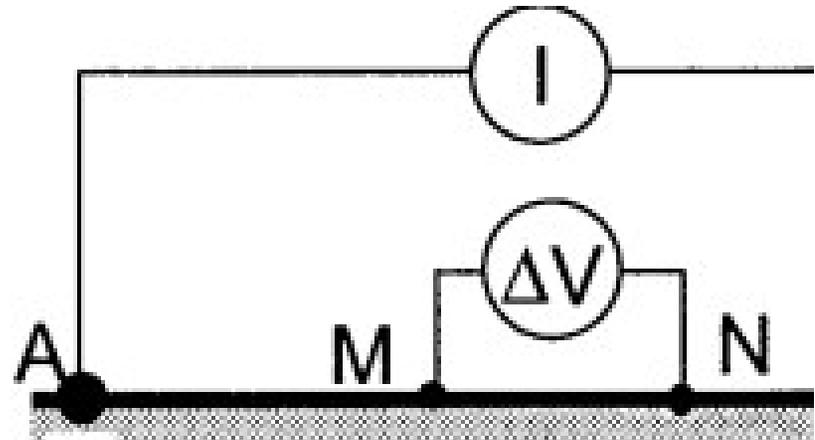
# Types de Quadripôles

- **Dispositif Schlumberger:**

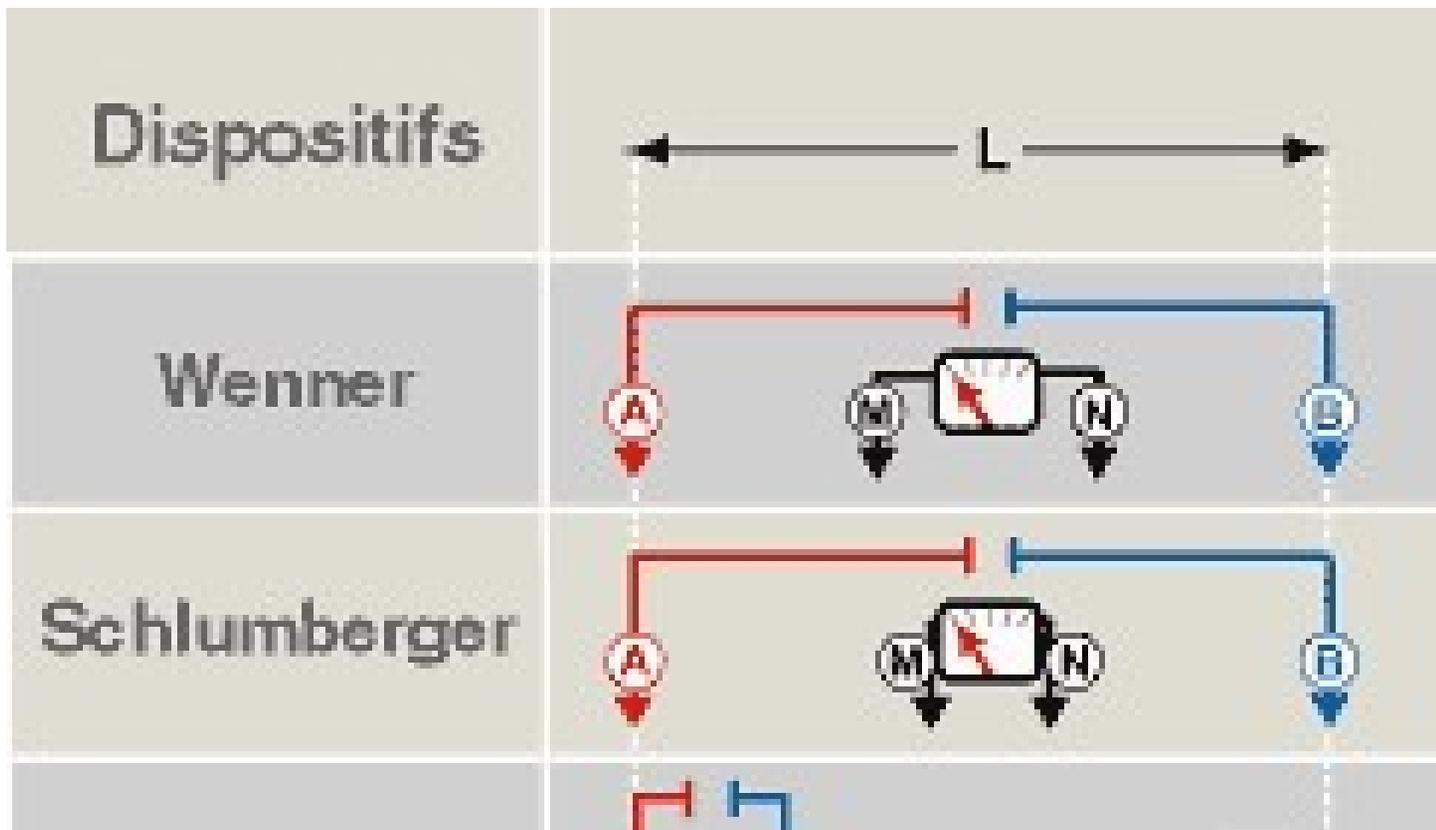
- Pour Schlumberger on a  $AM=BN$  et  $BM=AN$  donc :

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{AM}} = \frac{2\pi}{\frac{2}{AM} - \frac{2}{AN}} = \frac{2\pi}{\frac{2AN - 2AM}{AM \times AN}} = \frac{2\pi}{\frac{2(AN - AM)}{AM \times AN}} \\
 &= \frac{\pi}{\frac{AN - AM}{AM \times AN}} = \frac{\pi}{\frac{MN}{AM \times AN}} = \pi \frac{AM \times AN}{MN}
 \end{aligned}$$

- Avec  $AN-AM=MN$

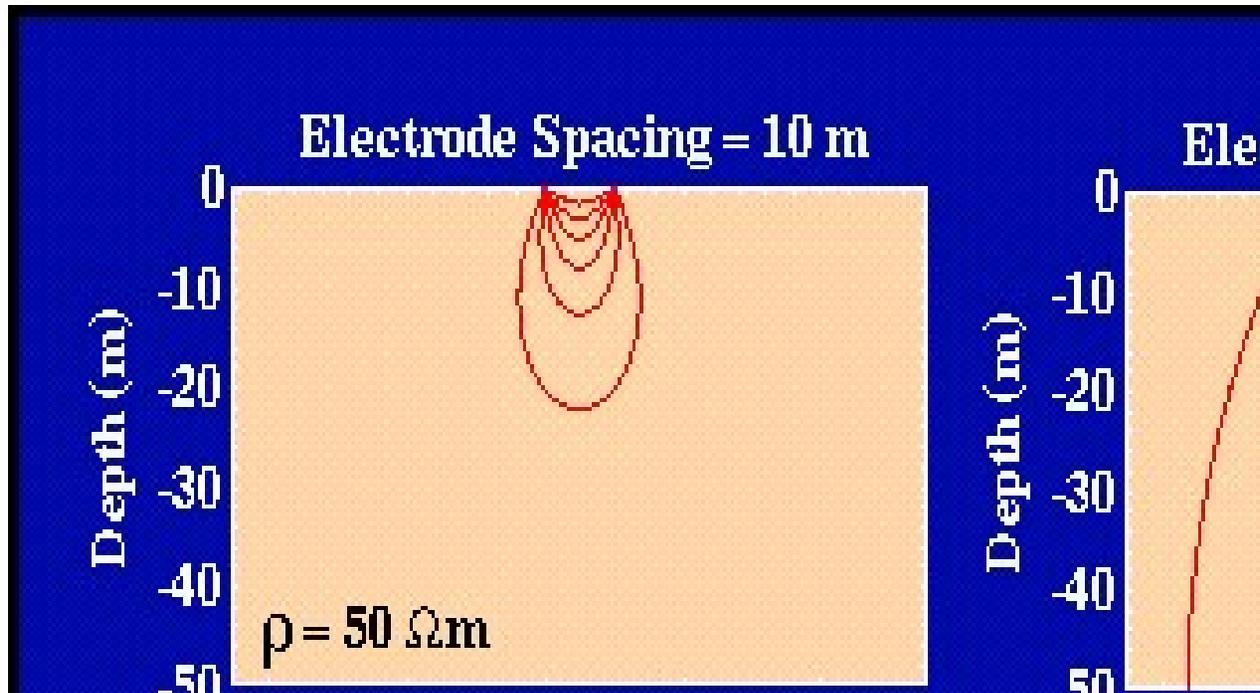


# Profondeur de pénétration des principaux dispositifs



D'après Chouteau et Gloaguen

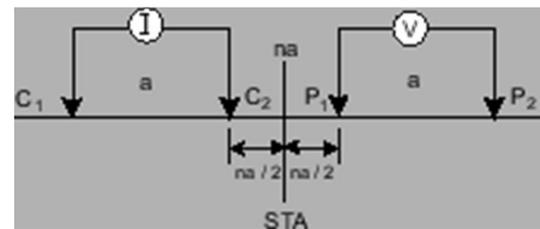
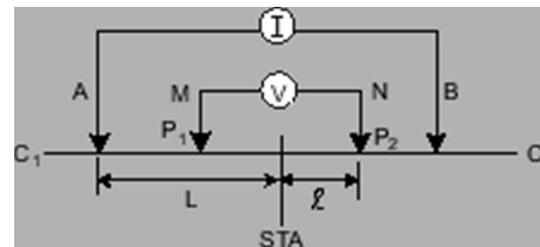
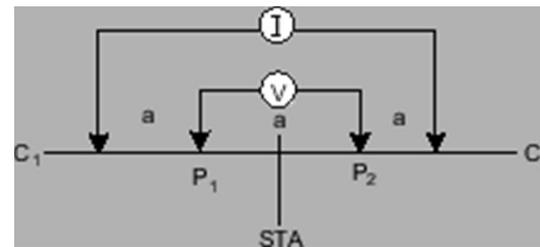
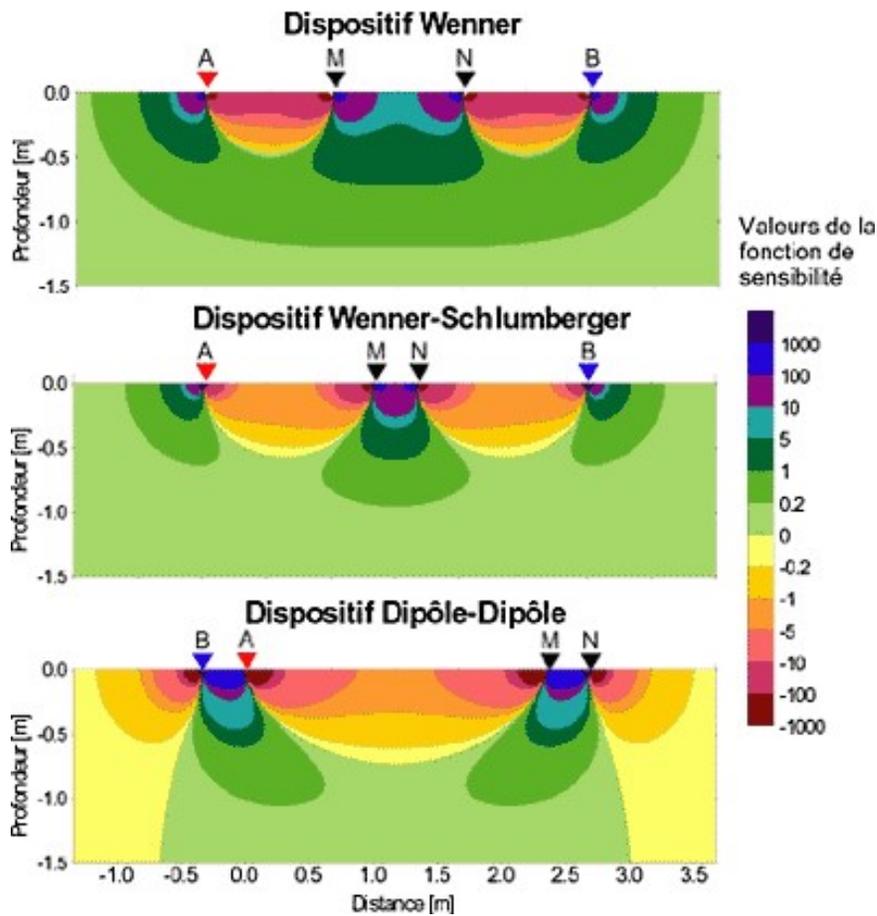
# Profondeur de pénétration (d'investigation) et écartement des électrodes



50 % de tout le courant circule sur une profondeur inférieure à la séparation des électrodes. Pour augmenter la pénétration, on augmente la séparation des électrodes

D'après Chouteau et Gloaguen

# Sensibilité des principaux dispositifs



D'après Chouteau et Gloguen

# Mesures et appareillages



**Résistivimètre** type ABEM



**Résistivimètre** type Syscal de  
IRIS Instruments

# Les méthodes de prospection

## 1. Sondage électrique vertical S.E.V. « Exploration verticale »

- Prospection en profondeur

- dispositif Schlumberger

- ✓ Écartement de l'injection

- ✓ Mesures de Rho app. en fonction de la profondeur

- Hypothèses

- ✓ Résistivités contrastées entre couches

- ✓ Extension verticale et horizontale des couches, suffisante

- ✓ Stratification (sub)horizontale

- ✓ Injection ponctuelle.

# Les méthodes de prospection

## 1. Sondage électrique vertical S.E.V. « Exploration verticale »

- Mesures de Rho app. pour AB de plus en plus grand.
- Construction de  $Rho_{app.} = f(AB/2)$
- Embrayage et à-coup de prise



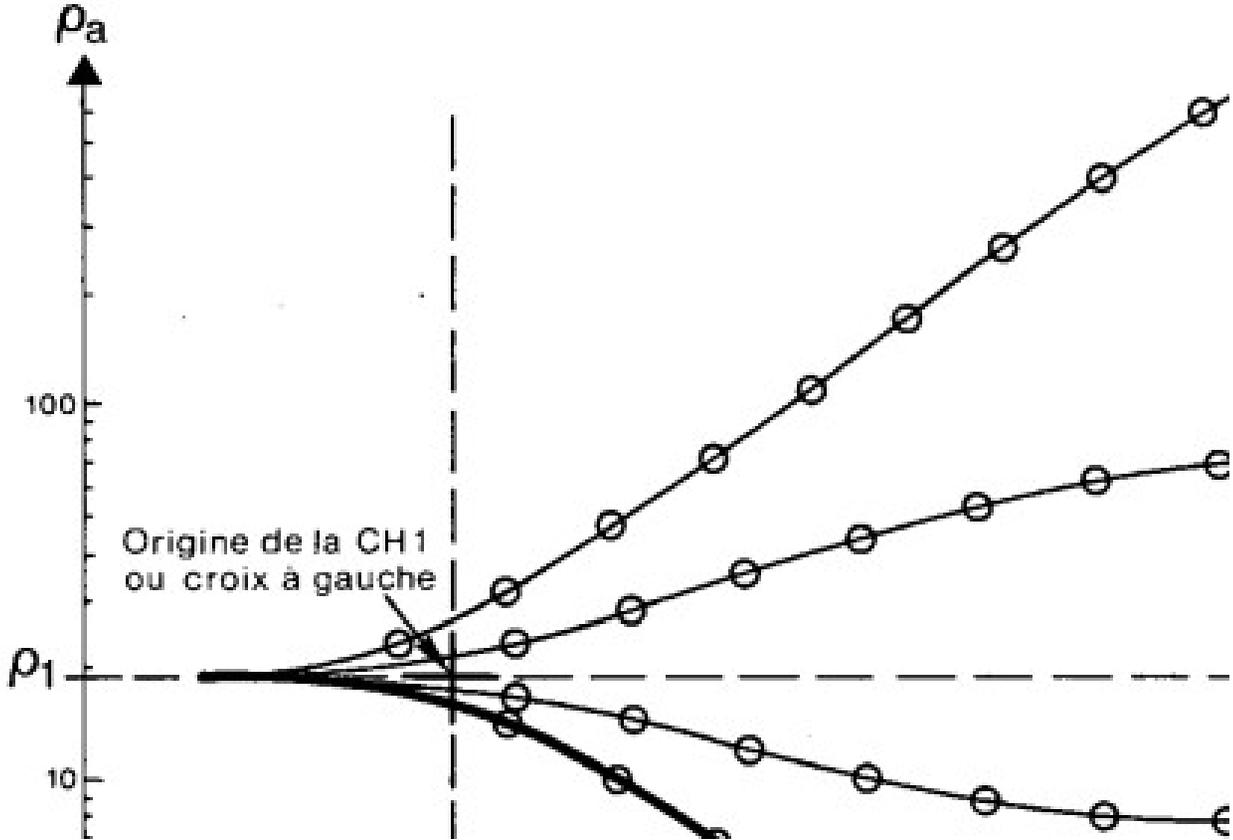
# Les méthodes de prospection

## 1. Le Sondage Electrique Vertical (SEV)

En résolvant l'équation générale du potentiel à la surface **de deux terrains parallèles, homogènes et isotropes**, on peut construire une série de courbes représentant la résistivité apparente (Abaque CH1)

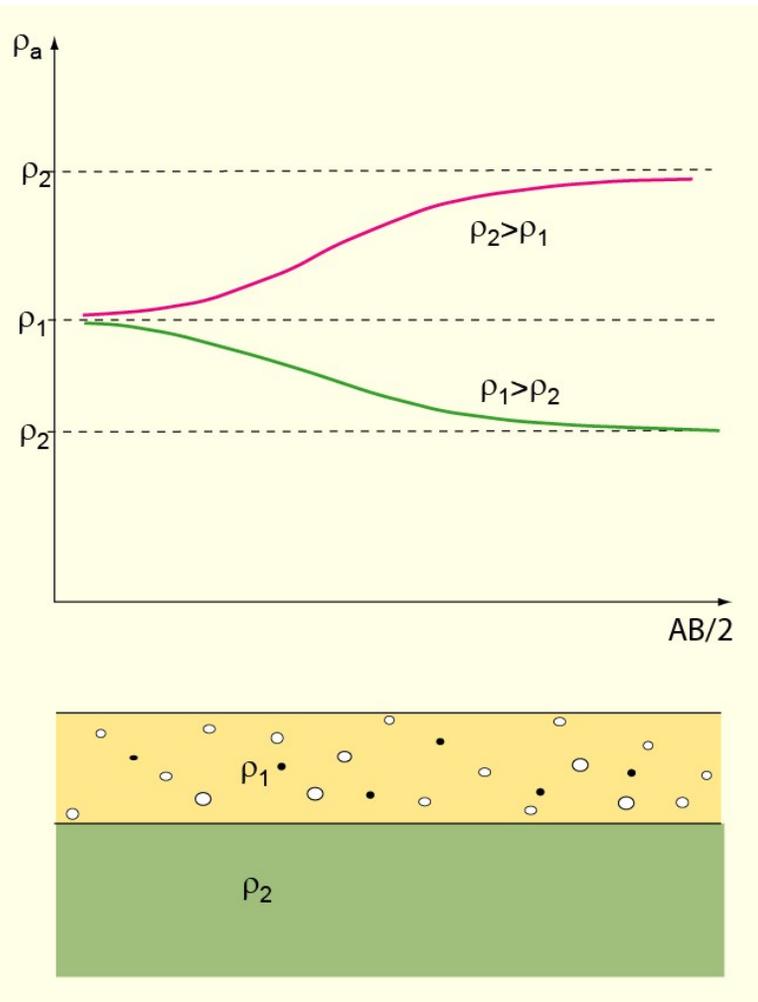
$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{L^2 +}$$

# Principe de l'abaque CH1

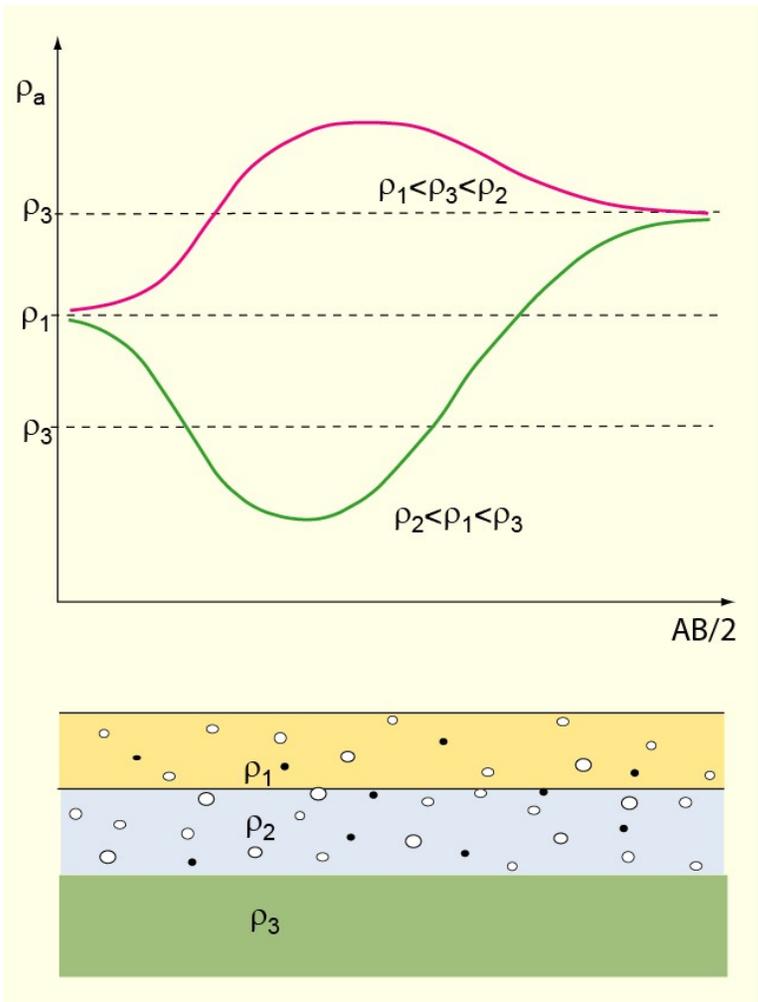


# Sondages Electriques

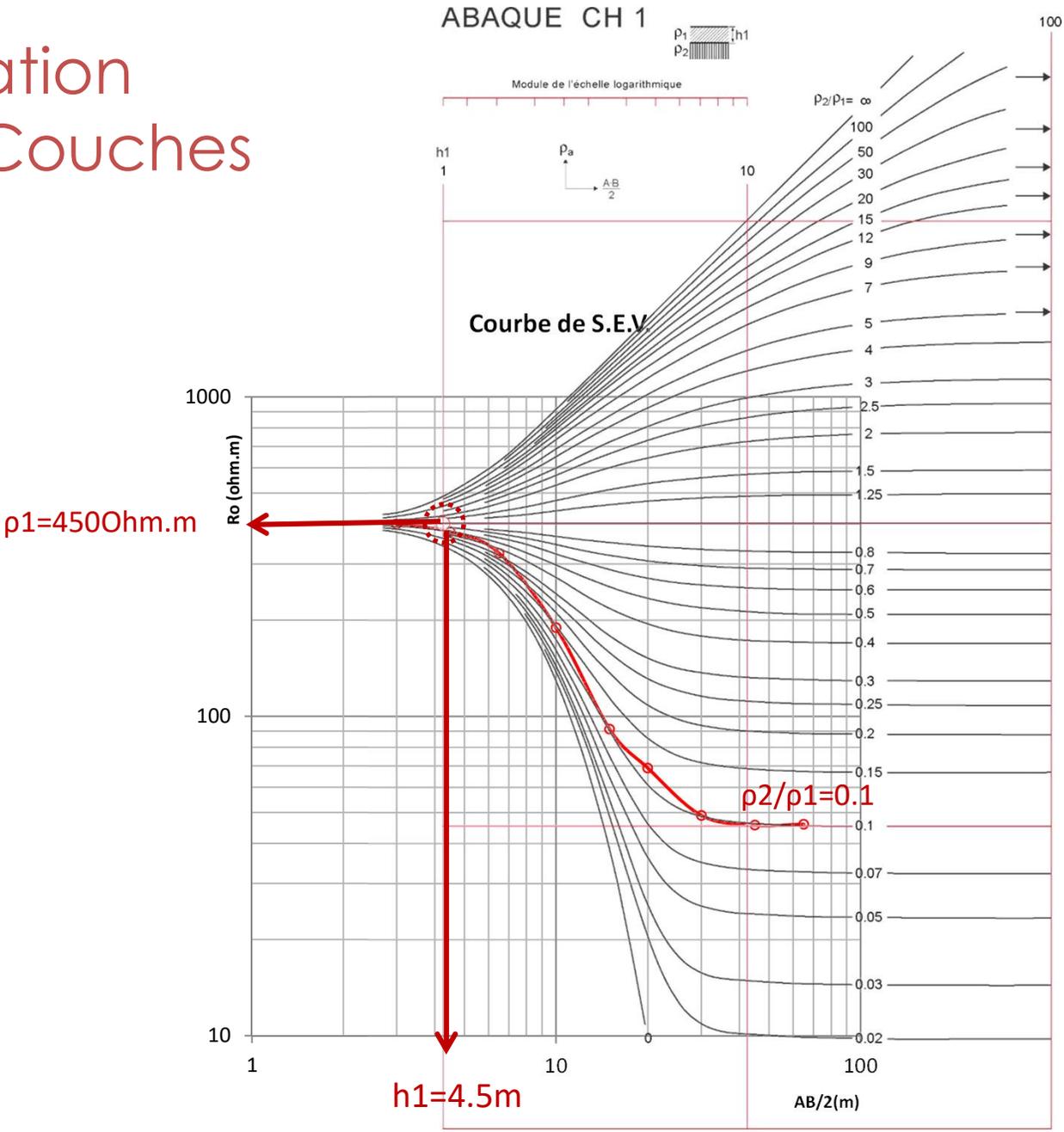
deux couches



trois couches



# Interprétation Sondages 2 Couches



# Sondage dans un Terrain à 3 couches

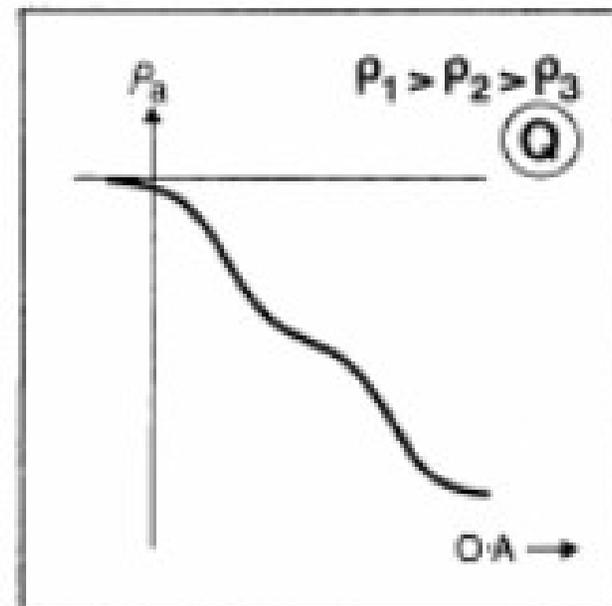
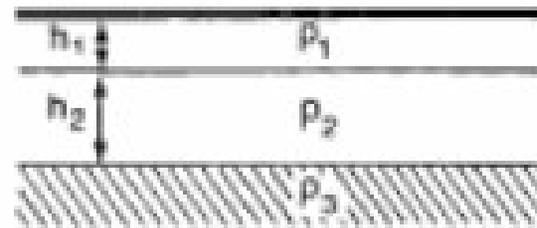
Si le sous-sol est composé de trois couches de résistivité  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  et d'épaisseur  $h_1, h_2$  il y a alors quatre combinaisons possibles :

- Type Q : décroissante par palier (escalier descendant)

- Type A : croissante par palier (escalier montant)

- Type K : résistant entre deux conducteurs (en cloche)

- Type H : conducteur entre deux résistants (en fond de bateau)



# Interprétation Sondages 3 Couches

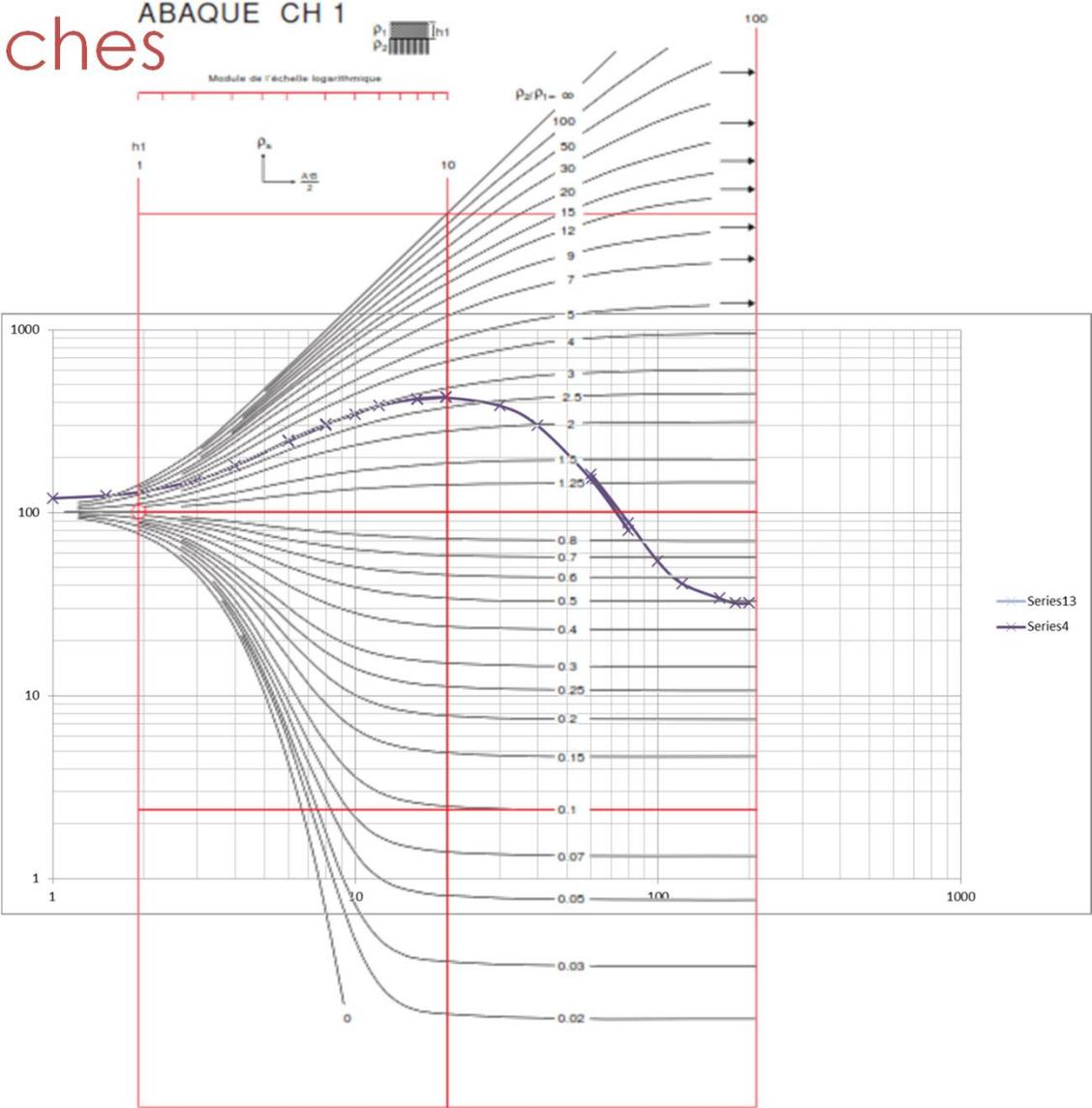
Les abaques à deux couches ne dépendaient que de trois paramètres  $\rho_1$ ,  $\rho_2/\rho_1$  et  $e_1$  (Fig.).

Dans le cas à trois couches, il y a 5 paramètres  $\rho_1$ ,  $\rho_2/\rho_1$ ,  $\rho_3/\rho_2$ ,  $e_1$  et  $e_2/e_1$ . Les abaques sont donc plus compliqués et plus nombreuses (Fig.).

On présente les abaques selon les contrastes de résistivité et on trace les courbes pour différent  $e_2/e_1$ .

L'interprétation se fait en ajustant la courbe expérimentale avec les abaques. On interprète la partie gauche ( $AB/2$  petit) de la courbe à partir de l'abaque à deux couches (CH1) et on obtient ainsi  $e_1$ ,  $\rho_1$  et  $\rho_2/\rho_1$ . On note alors le point  $(e_1, \rho_1)$  sur la courbe expérimentale.

# Interprétation Sondages 3 Couches



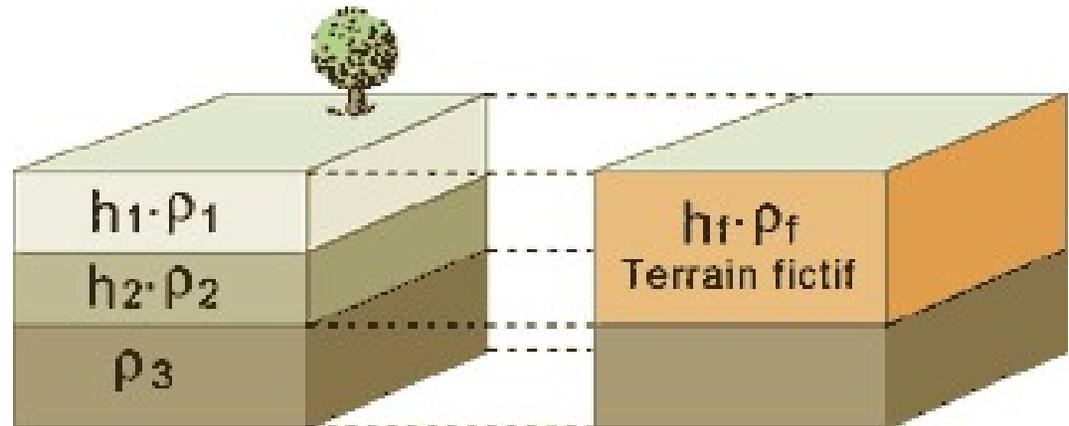
# Interprétation Sondages 3 Couches

Pour le reste de la courbe expérimentale on applique le principe de réduction.

L'idée du principe de réduction consiste à remplacer deux couches homogènes isotropes et parallèles par une seule couche équivalente électriquement.

Cette couche fictive équivalente a pour résistivité  $\rho_f$  et pour épaisseur  $h_f$ .

Cette couche fictive aura :



- une résistance transverse de  $T = h_f \cdot \rho_f = f(h_2/h_1, \rho_2/\rho_1) \cdot (T_1 + T_2)$
- une conductance longitudinale de  $S = h_f/\rho_f = g(h_2/h_1, \rho_2/\rho_1) \cdot (S_1 + S_2)$

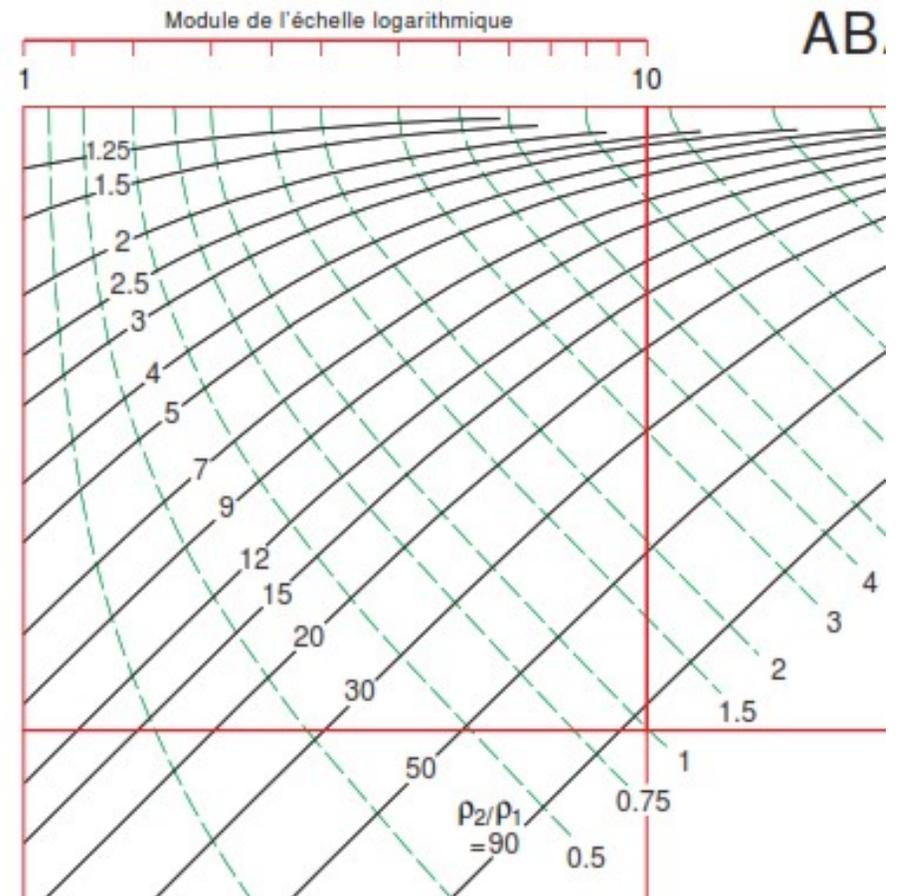
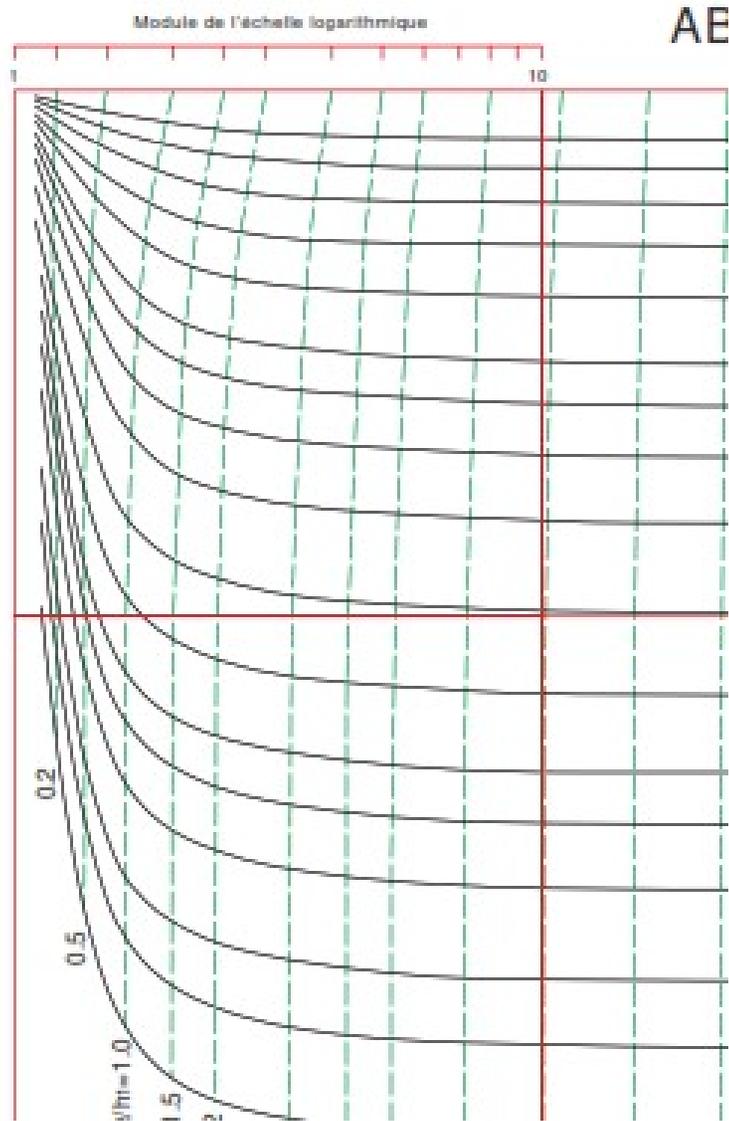
# Interprétation Sondages 3 Couches

$f$  et  $g$  sont des fonctions déterminées empiriquement.  $h_1$ ,  $\rho_1$  et  $\rho_2$  sont déterminées en étudiant le début du sondage à l'aide de l'abaque CH1.  $h_f$  et  $\rho_f$  dépendent donc encore de  $h_2$ . En exprimant  $h_f$  et  $\rho_f$  en fonction de différents  $h_2$ , on obtient une famille de courbes LCD pour chaque valeur de  $h_1$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ , et  $h_2$ .

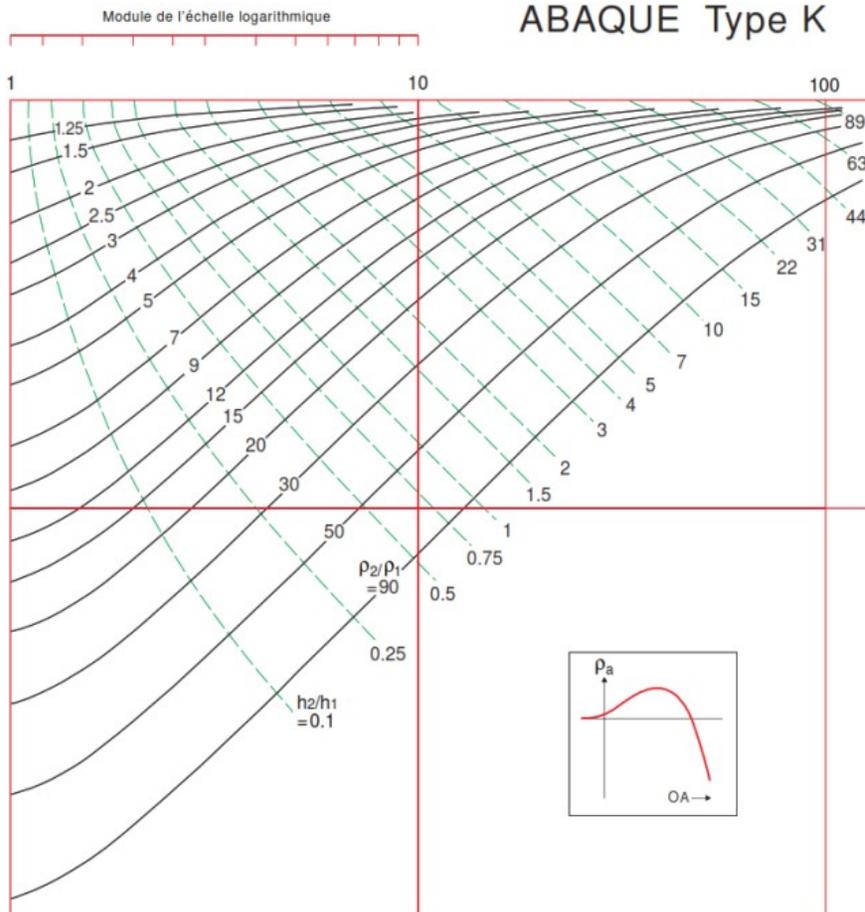
A chaque type de sondage A, Q, H, et K correspond une famille de courbes LCD (Abaque)

:

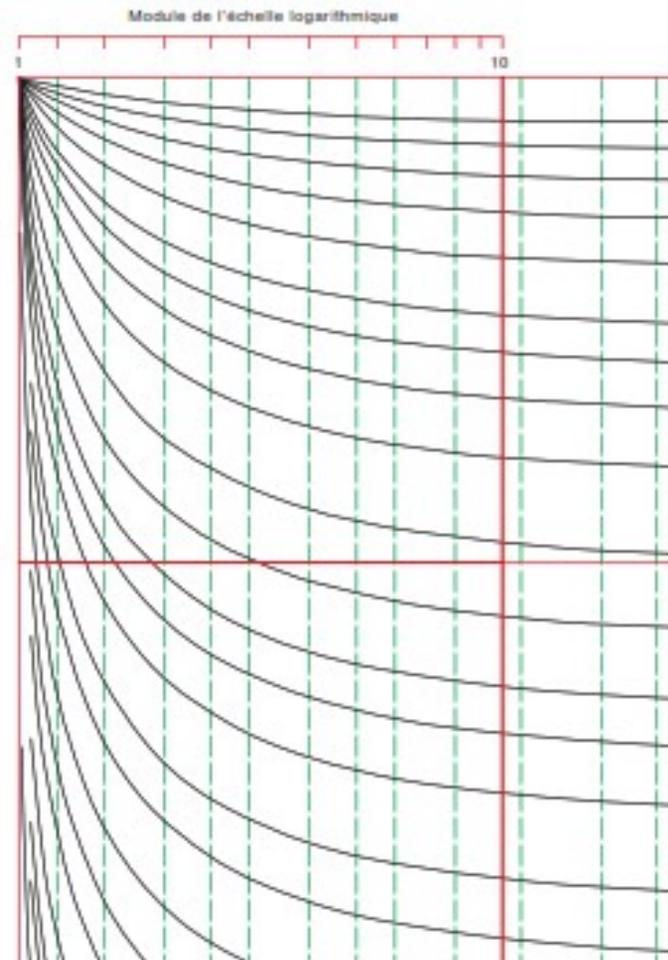
# Interprétation Sondages 3 Couches Abaques



# Interprétation Sondages 3 Couches Abaques



### ABAQUE Type H



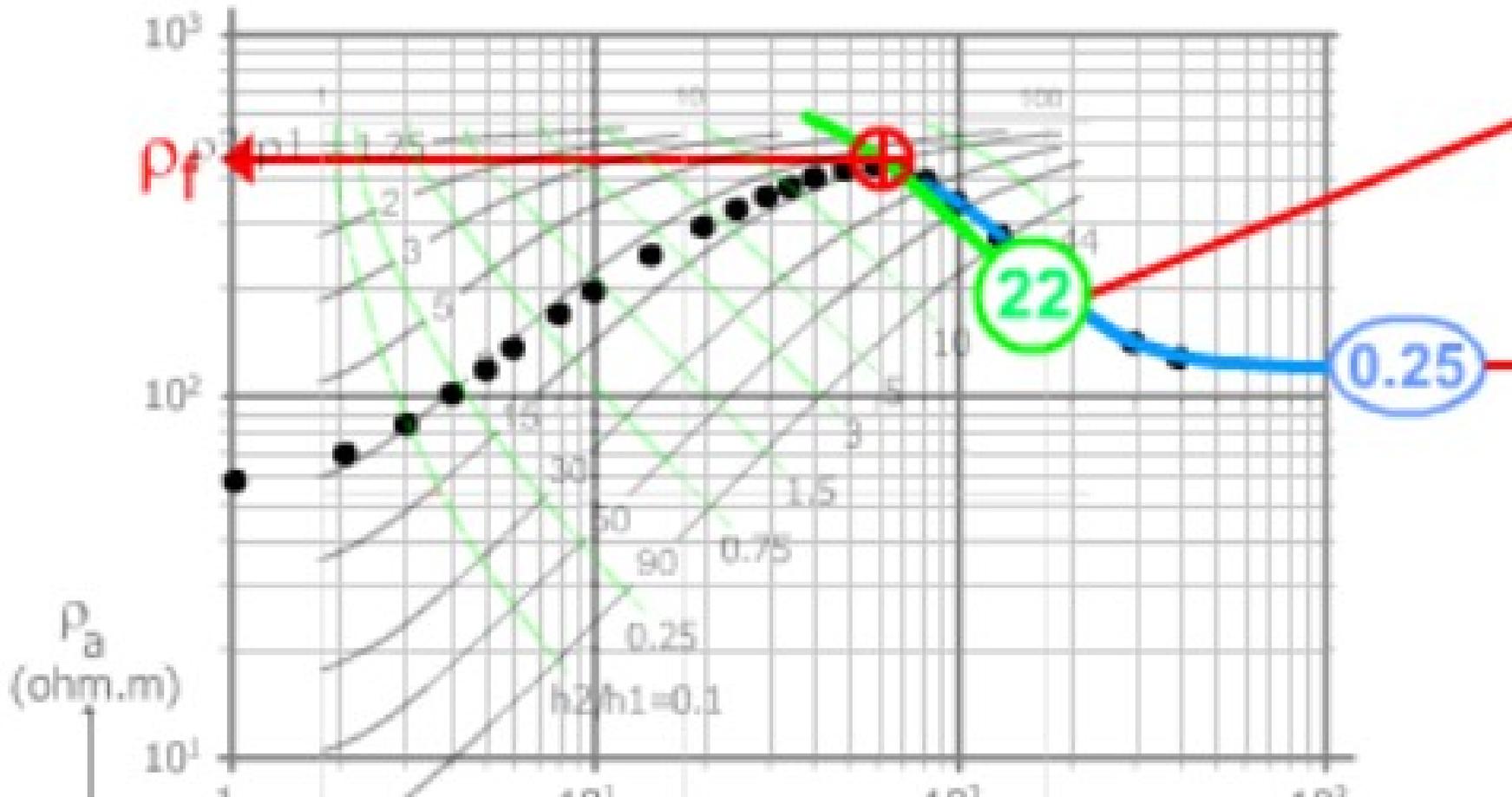
# Interprétation Sondages 3 Couches Exemple:

Tableaux des valeurs de résistivité apparentes.

<u>AB</u> 2	Res. Ap.	<u>AB</u> 2
1	60	30
2	67	40
3	82	50
4	100	60
5	118	70
6	138	80
8	171	100

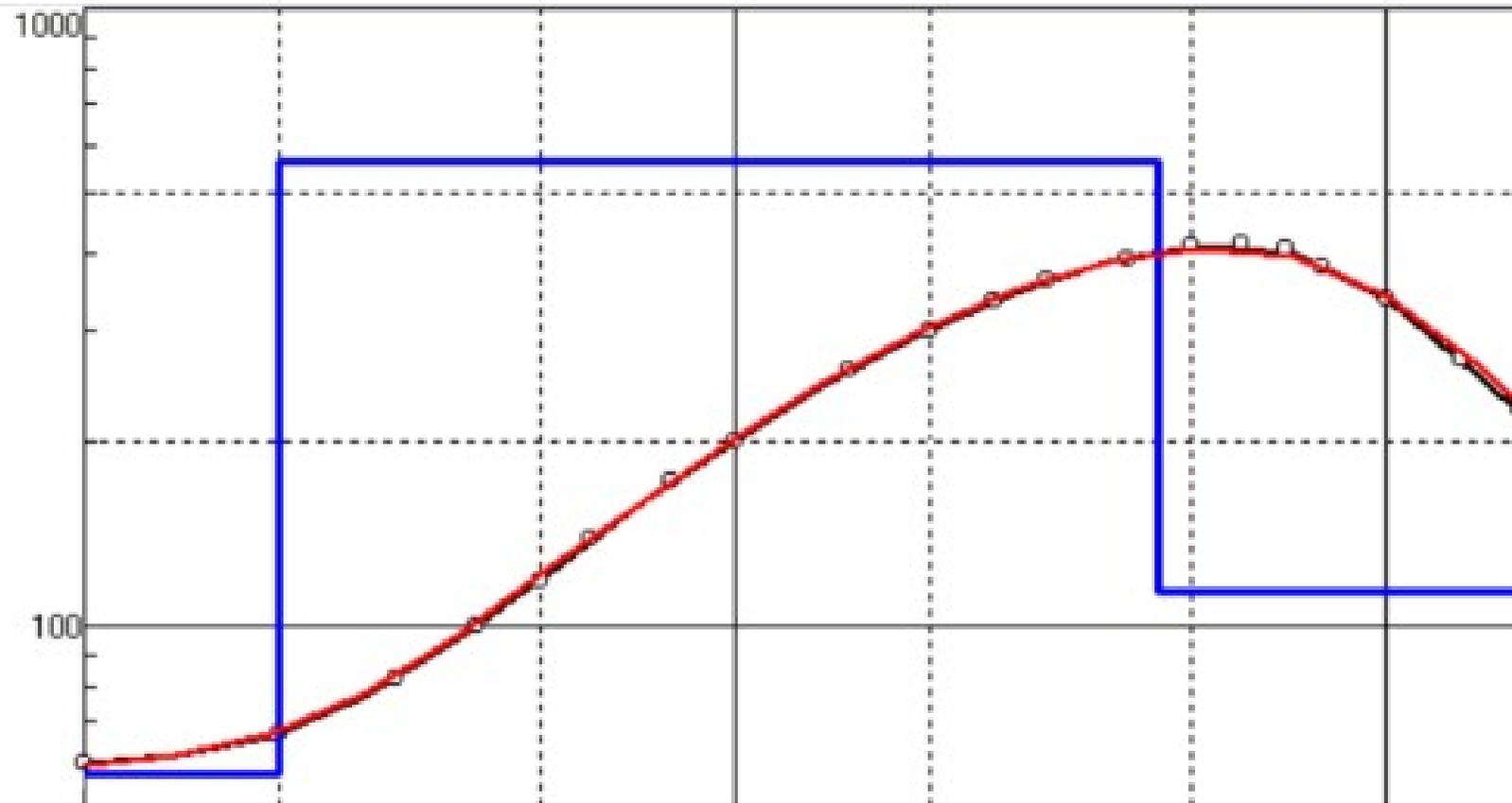
# Interprétation Sondages 3 Couches Exemple:

Représentation des valeurs de la résistivité vs.  $AB/2$  sur une courbe bi-logarithmique.



# Interprétation Sondages 3 Couches

## Exemple 2: Application par logiciel IP2WIN

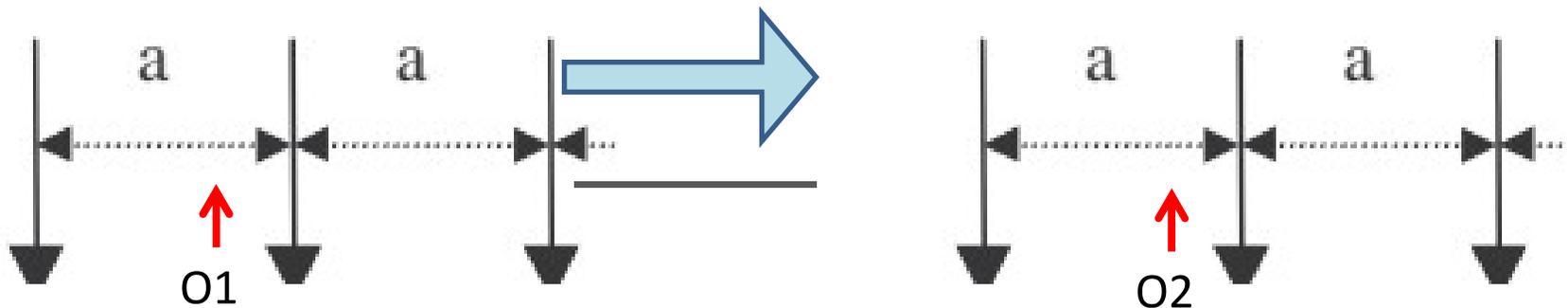


Exemple d'un model établi suit à une application du programme IP2WIN

# Les méthodes de prospection

## 2. Trainé électrique « Exploration horizontale »

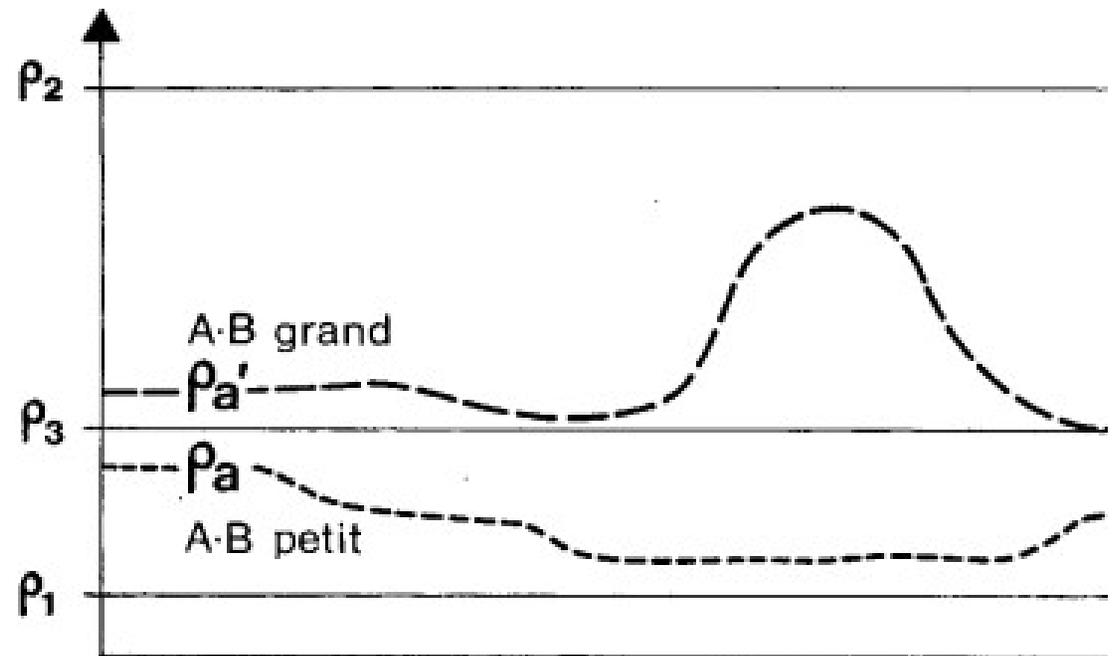
- Prospection à profondeur constante
  - Dispositif Wenner
    - ✓ Prof. d'invest # 0.125 largeur du dipôle d'injection.
  - Taille dispositif fixe
  - Résolution latérale élevée.
  - Variations latérales de résistivités apparentes
    - ✓ Interfaces des formations, variations des épaisseurs, accidents tectoniques etc...



# Les méthodes de prospection

## 2. Trainé électrique « Exploration horizontale » - Profile.

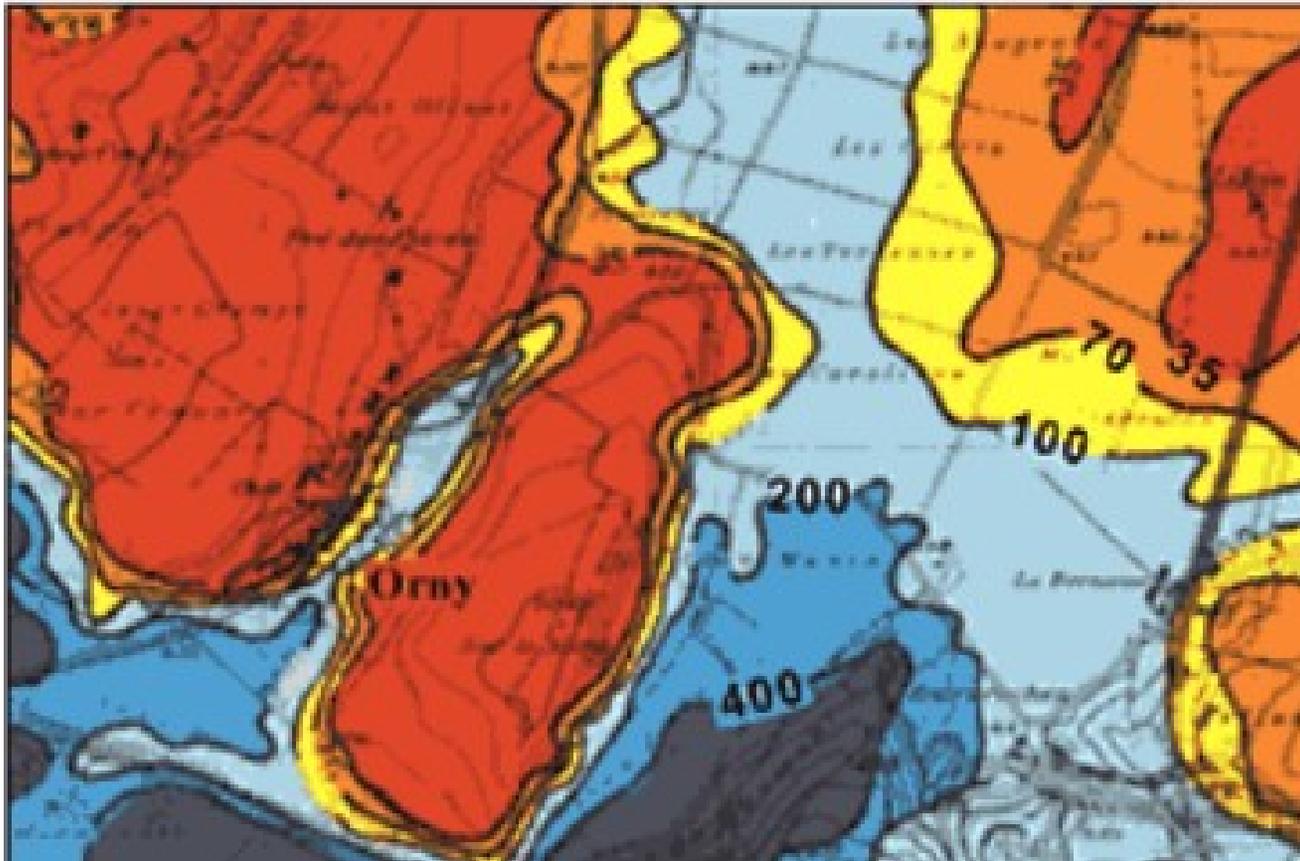
**Fig.:** Variations des résistivités apparentes avec la longueur AB de la ligne d'émission  
( $\rho_2 > \rho_1 < \rho_3$ )



# Les méthodes de prospection

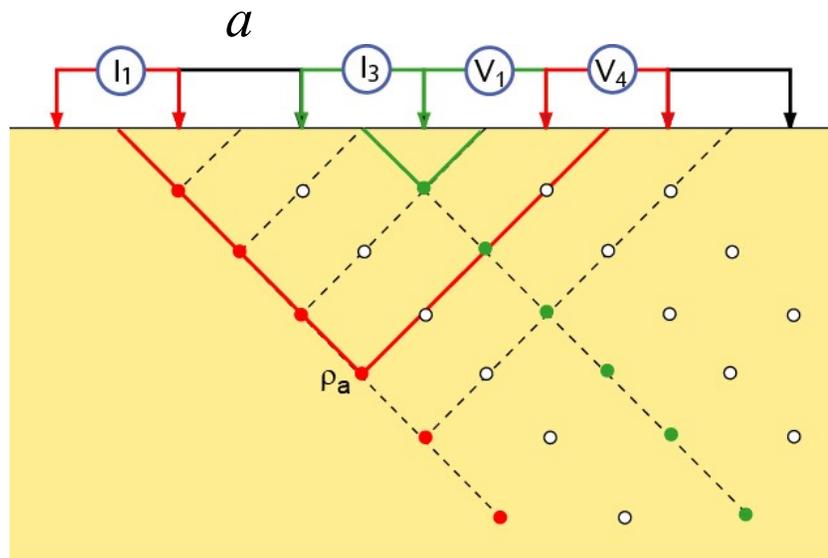
## 2. Trainé électrique « Exploration horizontale » - Carte.

### CARTE DES ÉQUIRÉSISTIVITÉS ÉLECTRIQUES

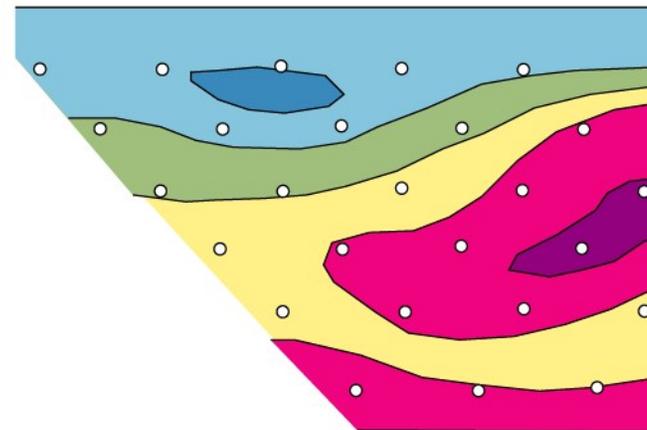


# Les méthodes de prospection

## 3. Imagerie (Tomographie) électrique 2D

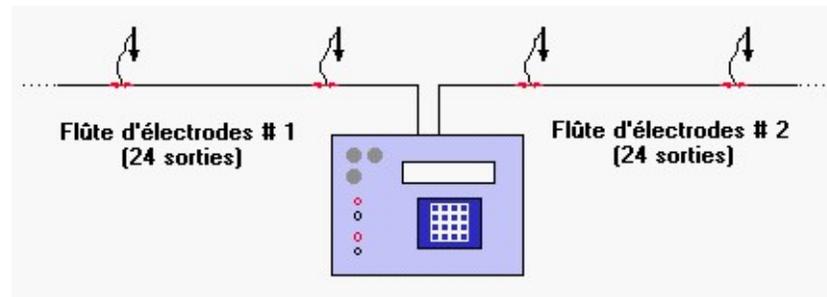


Pseudo-section



$$\rho_a = \frac{V_i}{I_j} \pi \cdot n \cdot (n + 1) \cdot (n + 2) \cdot a$$

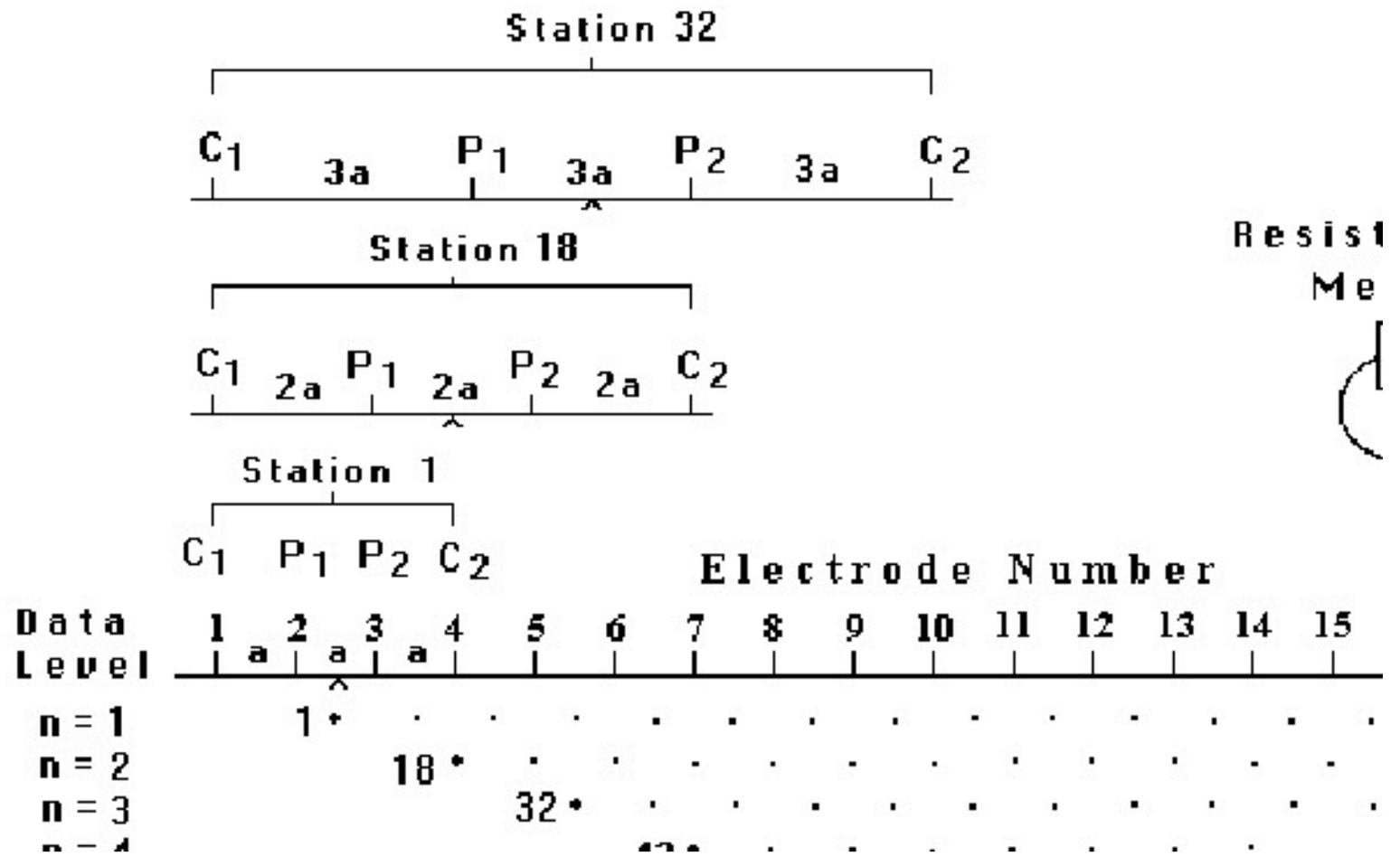
# appareillage multiélectrodes (Imagerie électrique 2D)



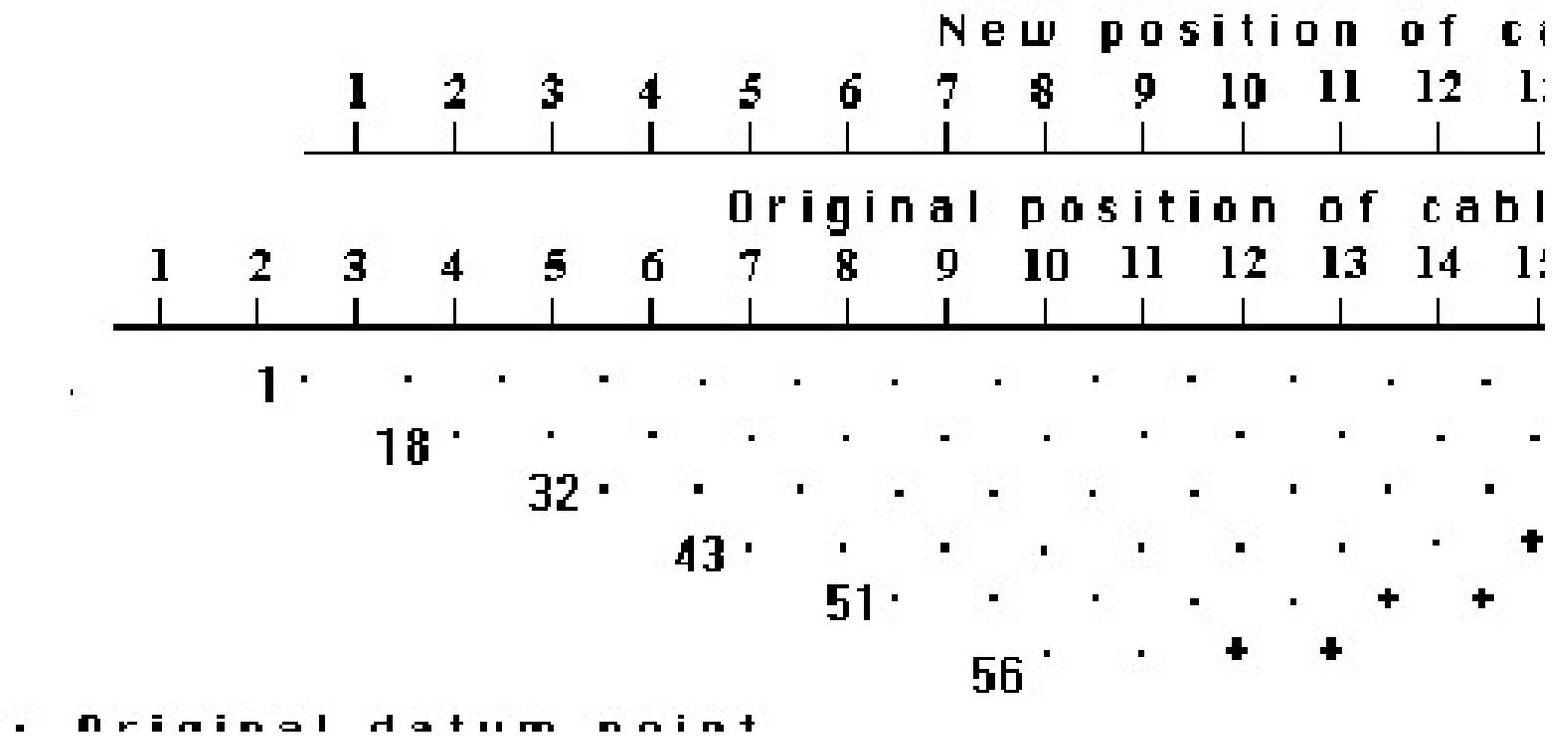
## **Résistivimètre SYSCAL Jr Switch**

- Cet appareillage possède un système de commutation interne permettant de piloter 48 électrodes (2 flûtes de 24 électrodes) et une source de 100 W.
- Le courant de sortie est automatiquement ajusté afin d'optimiser les valeurs de tension d'entrée et d'assurer la meilleure qualité de mesure. En sortie, on peut obtenir une tension maximale de +/- 400V et une intensité maximale de 1.2 A.
- Le SYSCAL Jr Switch possède également un système de compensation automatique de la PS, un système d'amélioration du rapport signal sur bruit ; il calcule également la déviation standard.

# PROCÉDURE DE TERRAIN



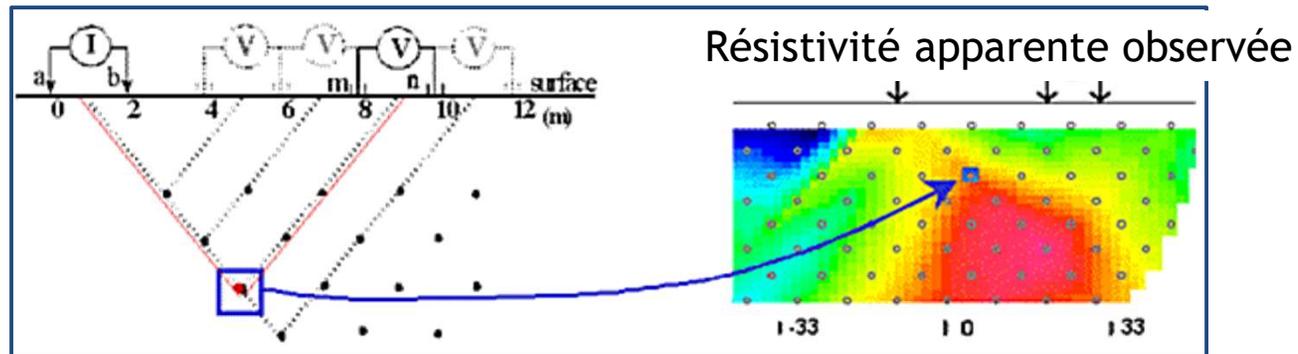
# PROCÉDURE DE TERRAIN: 'ROLL-ALONG'



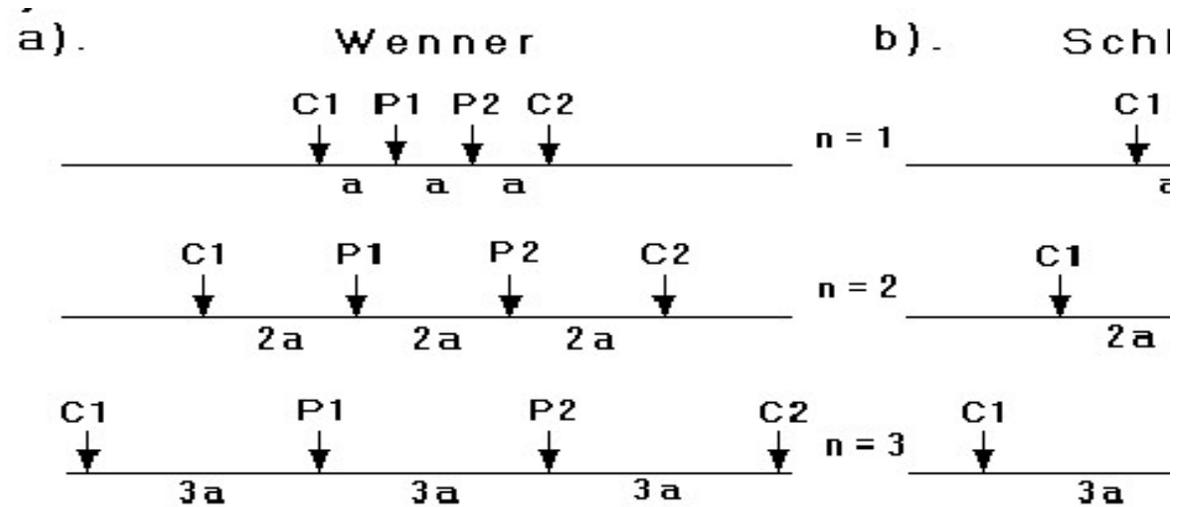
# Représentation : la pseudo-section

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

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

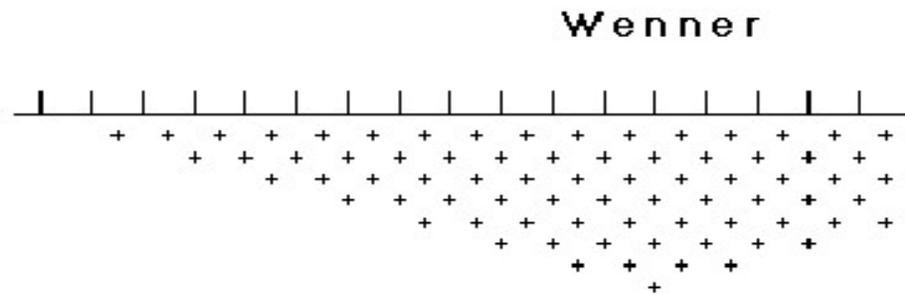


# CONSTRUCTION DE LA PSEUDO-SECTION



ii).

a).



b).

**Schlumberger**



Pseudo-section 2D  
+ inversion +  
ajout de la  
topo

