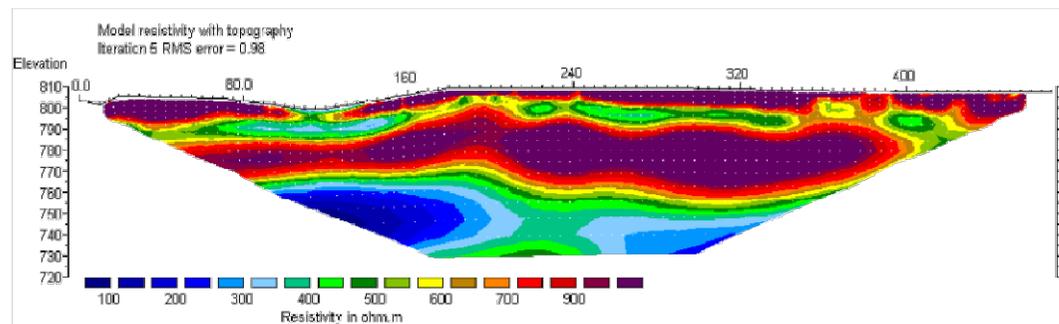
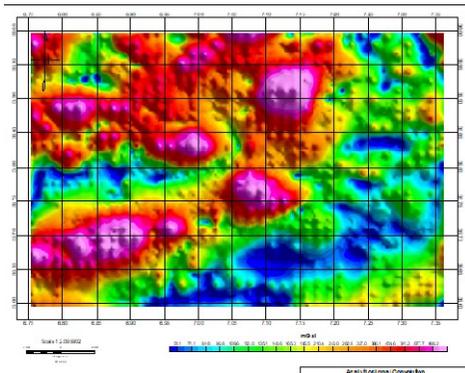


# Méthodes Electriques



# 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 :

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

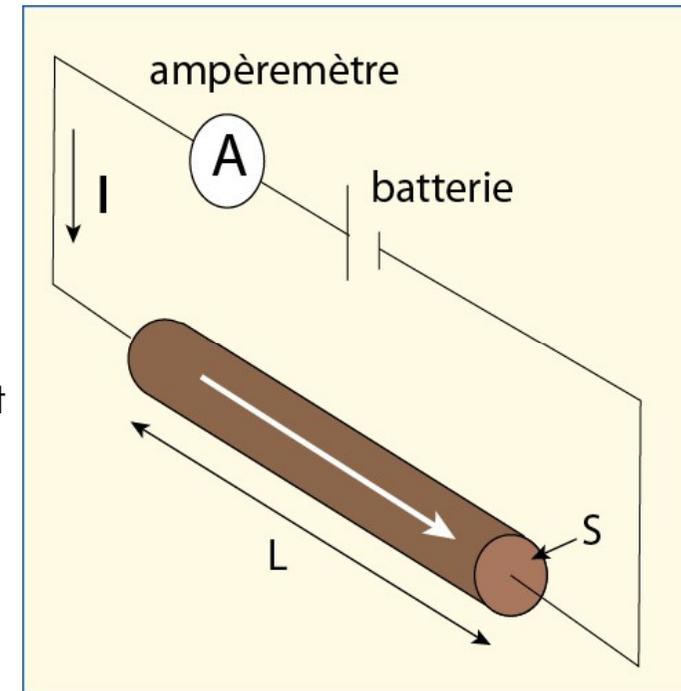
La résistance d'un milieu varie linéairement avec la longueur «  $L$  » du milieu traversé, mais de façon inversement proportionnelle à l'aire «  $S$  » de la surface traversée :

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

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  $\rho_r = \rho_w \cdot a \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n}$

- ✓  $\rho_r$  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	m	n
<i>Fct° de la lithologie</i>	<i>Fct° de la cimentation</i>	-
0.6 à 2 (~ ↑ si $\phi$ ↓)	1.3 à 2.2 (↑ avec cimentation)	~ 2

### ➤ Facteur de formation

$$F = a \cdot \phi^{-m} \Rightarrow \rho_r = \rho_w \cdot F \cdot S^{-n}$$

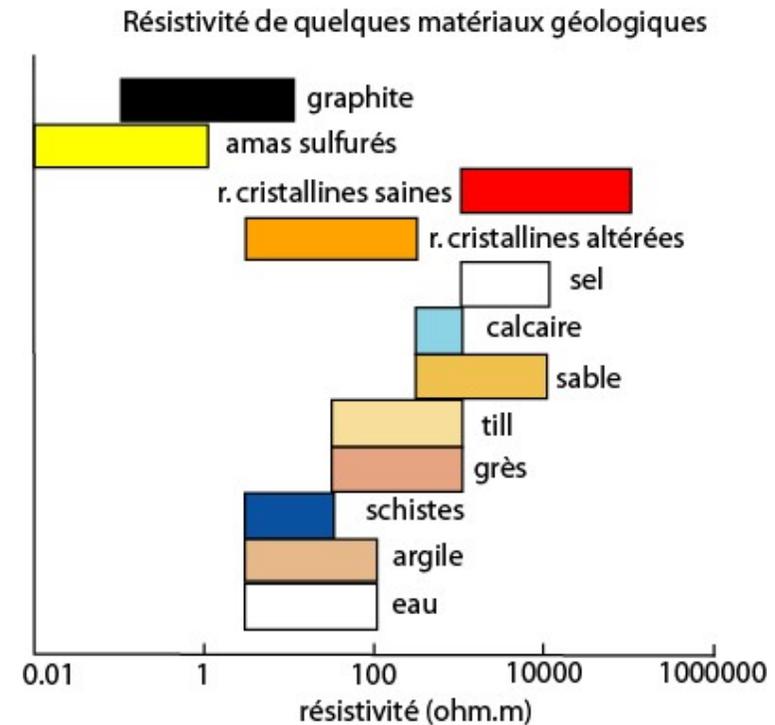
- ✓ Sables, grès  $\rightarrow F = 0.62 \cdot \phi^{-2.15}$
- ✓ Roches bien cimentées  $\rightarrow F = 1 \cdot \phi^{-2}$

## Résistivités des roches

Type de sédiments	Diamètre (mm)	porosité totale (%)	Porosité efficace (%)	Perméabilité (m/s)
Gravier moyen	2.5	45	40	$3 \cdot 10^{-1}$
Sable gros	0,250	38	34	$2 \cdot 10^{-3}$
Sable moyen	0,125	40	30	$6 \cdot 10^{-4}$
Sable fin	0,09	40	28	$7 \cdot 10^{-4}$
Sable très fin	0,045	40	24	$2 \cdot 10^{-5}$
Sable silteux	0,005	32	5	$1 \cdot 10^{-9}$
Silt	0,003	36	3	$3 \cdot 10^{-8}$
Silt argileux	0,001	38	-	$1 \cdot 10^{-9}$
Argile	0,0002	47	-	$5 \cdot 10^{-10}$

# Résistivités des matériaux les plus communs

Material	Resistivity ( $\Omega \cdot m$ )	Conductivity (Siemen/m)
<b>Igneous and Metamorphic Rocks</b>		
Granite	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalt	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Slate	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2.5 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Quartzite	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
<b>Sedimentary Rocks</b>		
Sandstone	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Shale	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Limestone	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
<b>Soils and waters</b>		
Clay	1 - 100	0.01 - 1
Alluvium	10 - 800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Groundwater (fresh)	10 - 100	0.01 - 0.1
Sea water	0.2	5
<b>Chemicals</b>		
Iron	$9.074 \times 10^{-8}$	$1.102 \times 10^7$
0.01 M Potassium chloride	0.708	1.413
0.01 M Sodium chloride	0.843	1.185
0.01 M acetic acid	6.13	0.163
Xylene	$6.998 \times 10^{16}$	$1.429 \times 10^{-17}$

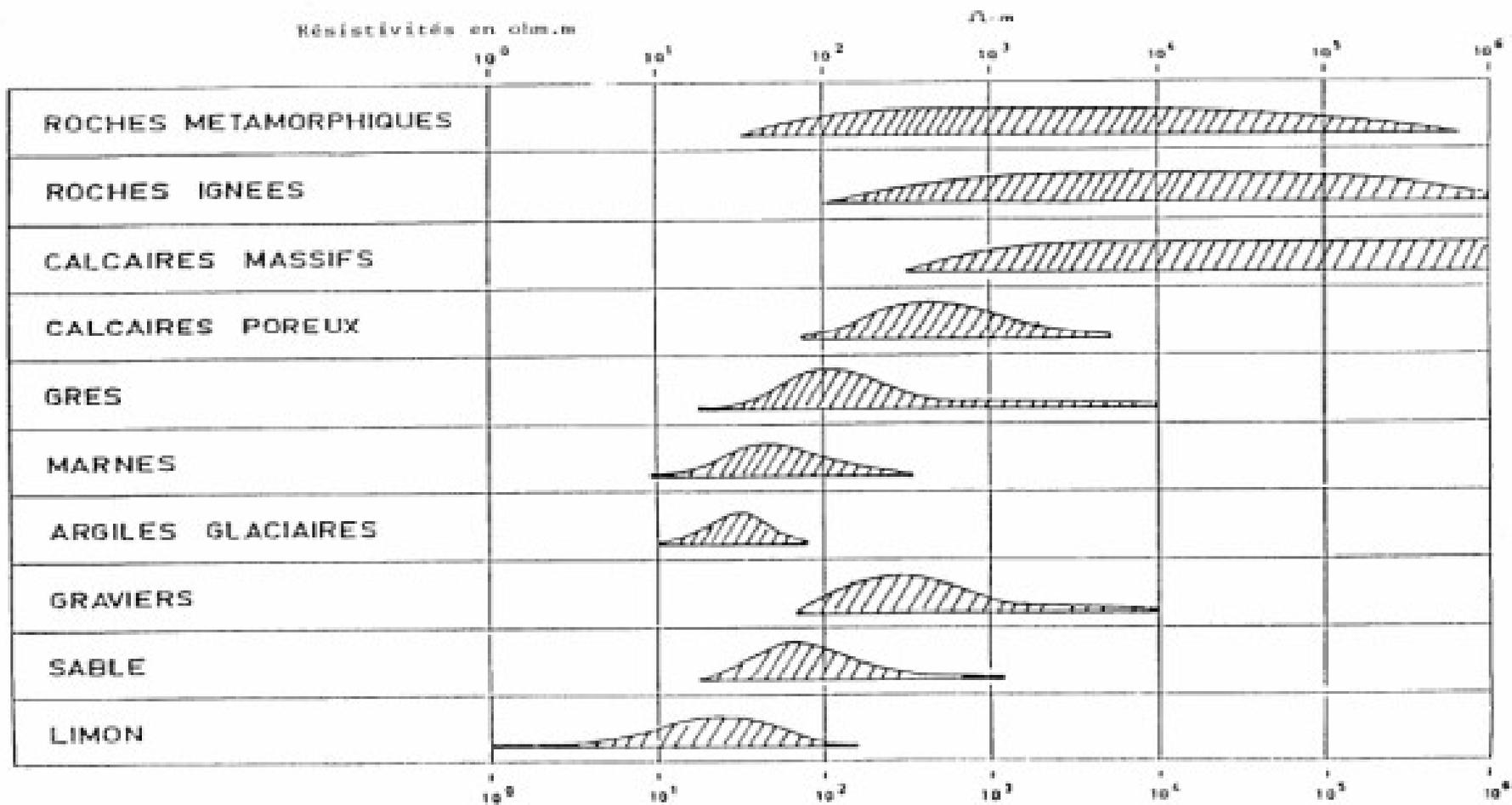


- Gamme des résistivités de matériaux naturels

<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>
Fleuve Rhône	80
Fleuve Niger	100
Jus de décharge	5
Hydrocarbure	Infini

<i>Type de roche</i>	<i>Résistivité (<math>\Omega.m</math>)</i>
Alluvions - Sables	10 – 800
Grès	30 – 800
Argiles	1 – 100
Argilites	70 – 200
Marnes	3 – 100
Craies	30 – 300
Calcaires	200 – 10 000
Dolomites	200 – 10 000
Métaschistes	300 – 800
Gneiss	1000 – 20 000
Quartzites	1000 – 10 000
Granites	1000 – 15000
Gabbro	6000 – 10 000
Basalte	800 – 15 000
Tufs volcaniques	20 - 300

- Gamme des résistivités de matériaux naturels



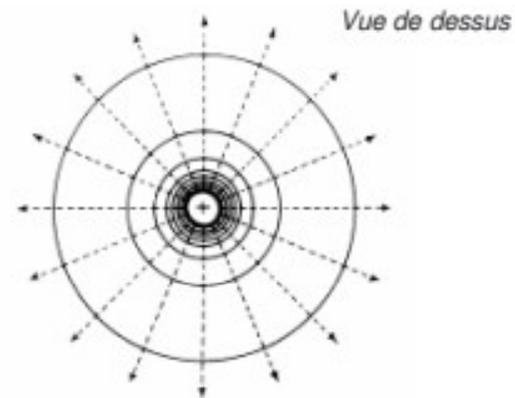
# II. Distribution du potentiel électrique dans les sols

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

a. Cas d'une seule électrodes

- 1. Les termes

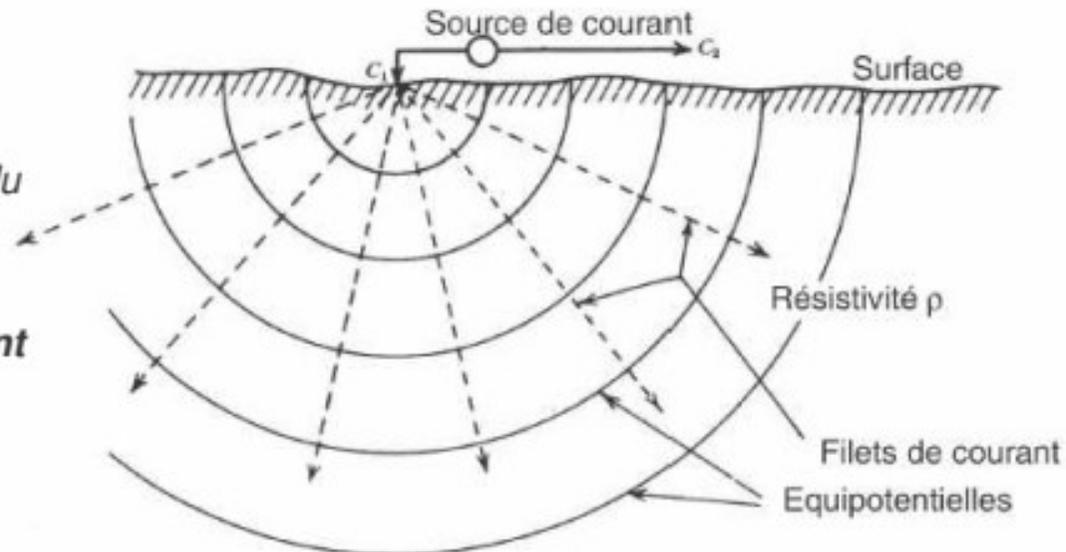
- ✓ Lignes (ou filets) de courant
- ✓ Equipotentiellles



Dans un milieu homogène, isotrope

Dans le cas d'une injection ponctuelle du courant

Alors les équipotentiellles sont circulaires

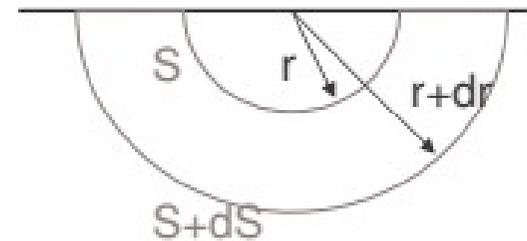


- 2. Détermination du potentiel sur site

- ✓ Milieu semi infini, isotrope, homogène

- ✓ La chute de potentiel engendrée par le passage du courant dans le tronç de cône délimité par les deux 1/2 sphères:

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



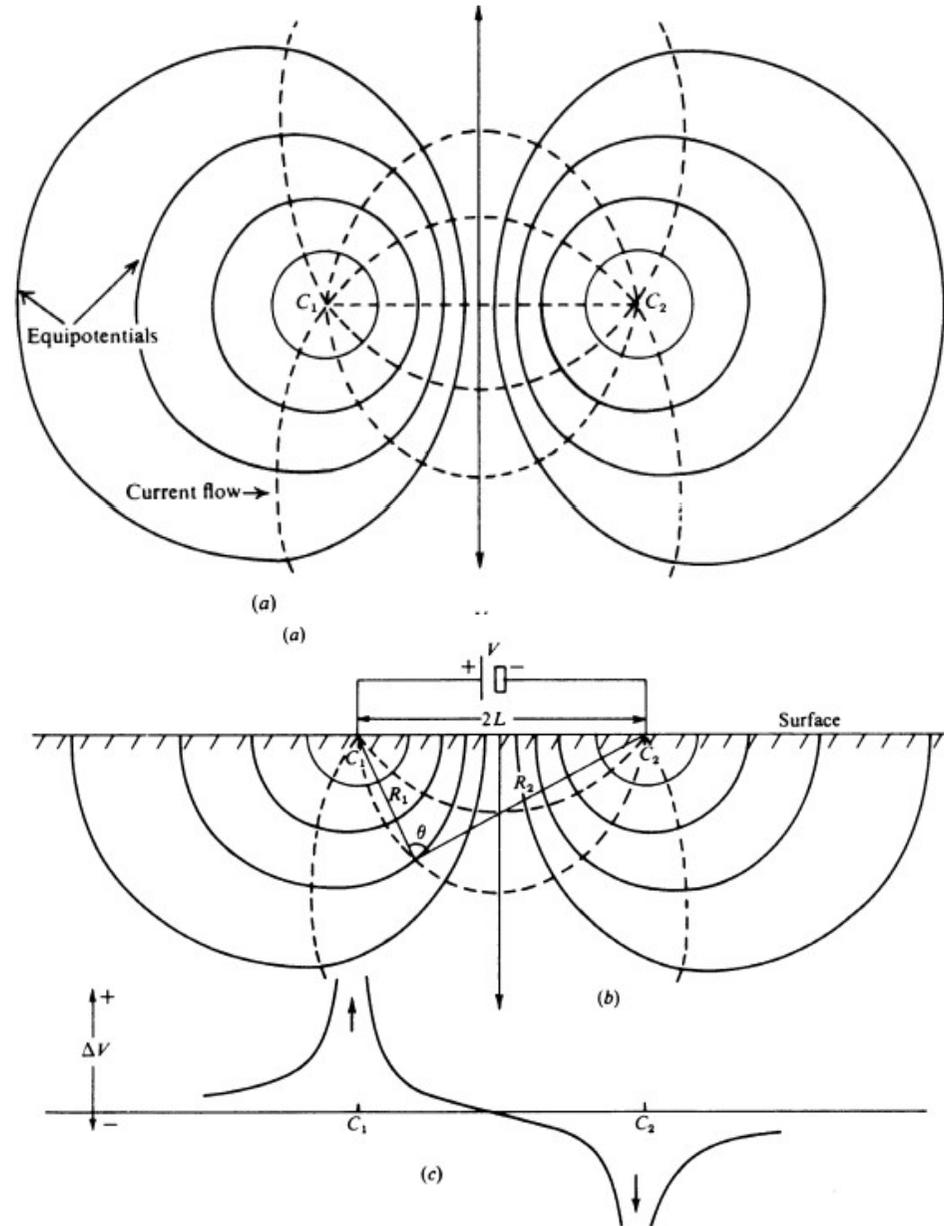
⇒ Pour toute la 1/2 sphère:  $dV = -\frac{\rho l}{2\pi \cdot r^2} \cdot dr$

⇒ En intégrant sur le rayon r:  $V = \frac{\rho l}{2\pi \cdot r} + Cste$

b. Cas de deux électrodes

✓ Équipotentielles et lignes de courant

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

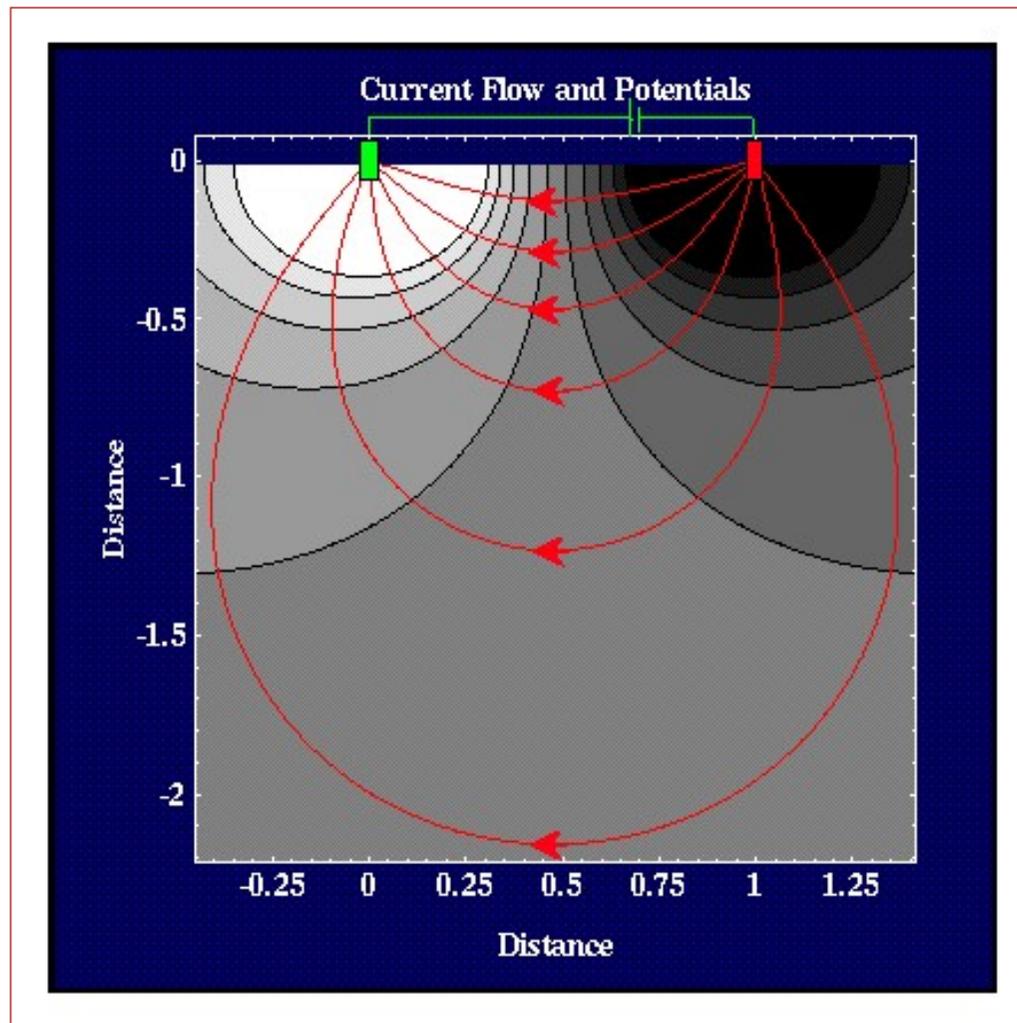


(a) Vue en plan.

(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

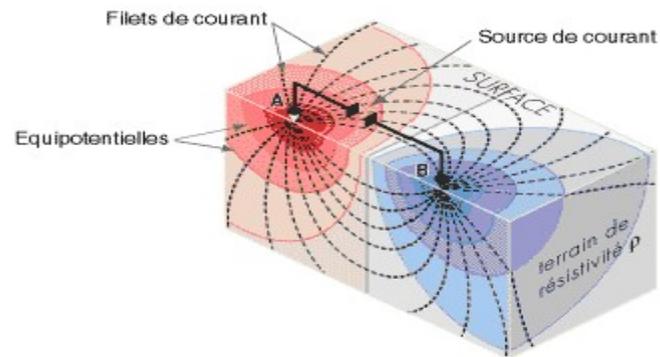
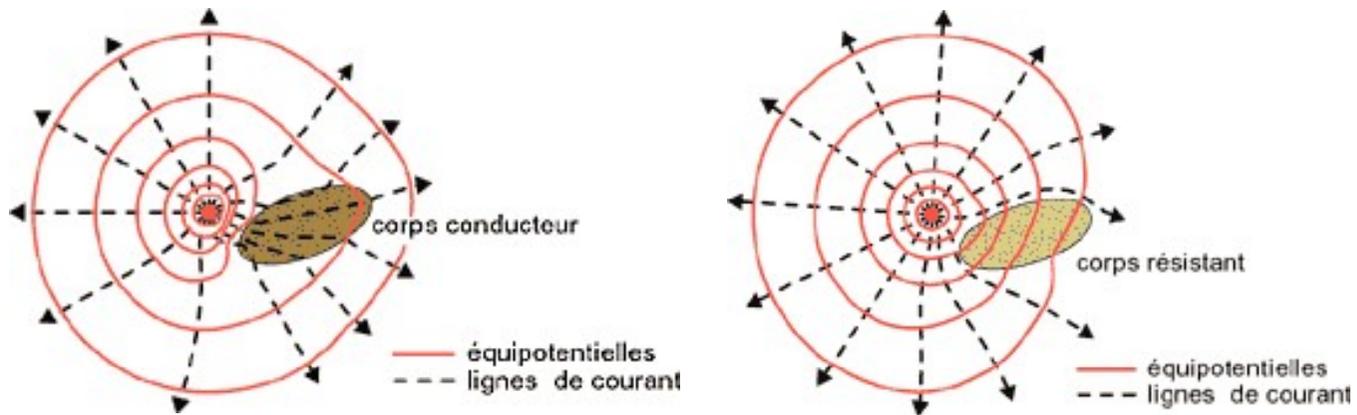


- Pour un dipôle d'injection:
- La densité de courant décroît avec la profondeur, exemple (de bas en haut):

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

D'après Chouteau et Gloaguen

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



## b. Cas de deux électrodes (le dipôles)

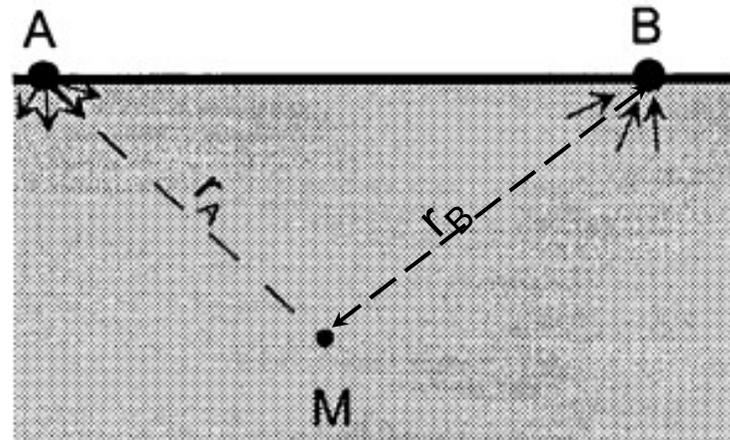
Dans ce dispositif, le courant entre en  $A$  et on le récupère en  $B$ . Au point  $M$  du demi-espace (fig.) on aura un potentiel :

$$V_M = V_A + V_B$$

Le potentiel dû à  $A$  est :  $V_A = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_A}$

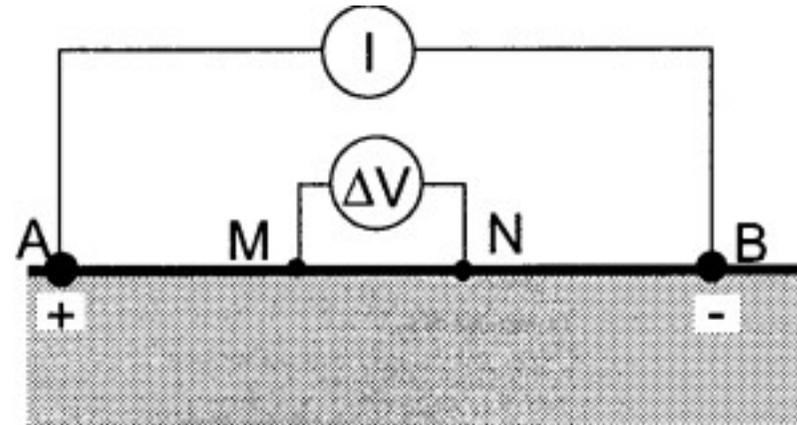
Le potentiel dû à  $B$  est :  $V_B = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_B}$

Le potentiel en  $M$  est :  $V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right]$



### 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 :

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

Au point  $N$  :

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

La différence de potentiel entre  $M$  et  $N$  s'obtient par soustraction de la deuxième équation à la première, ce qui, par ailleurs, permet d'éliminer les inconnues  $R_A$ ,  $R_B$  :

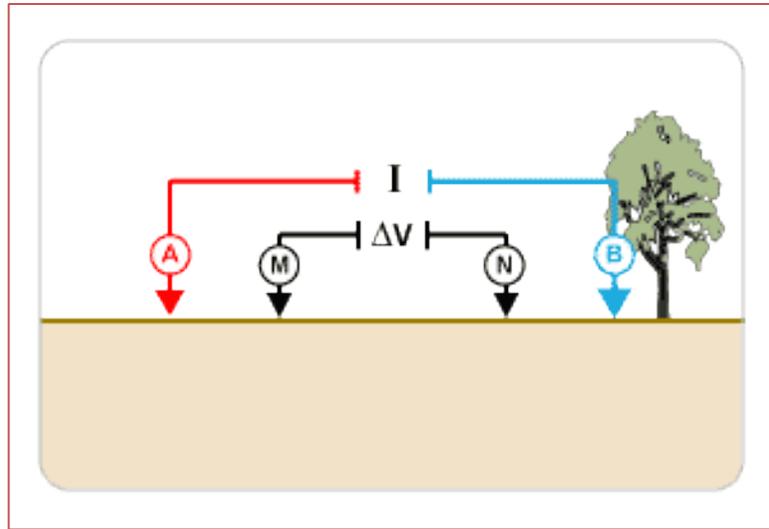
$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right].$$

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

$$\rho = \frac{V_M - V_N}{I} 2\pi \frac{1}{k}.$$

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 :

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

Ce paramètre présente trois propriétés principales :

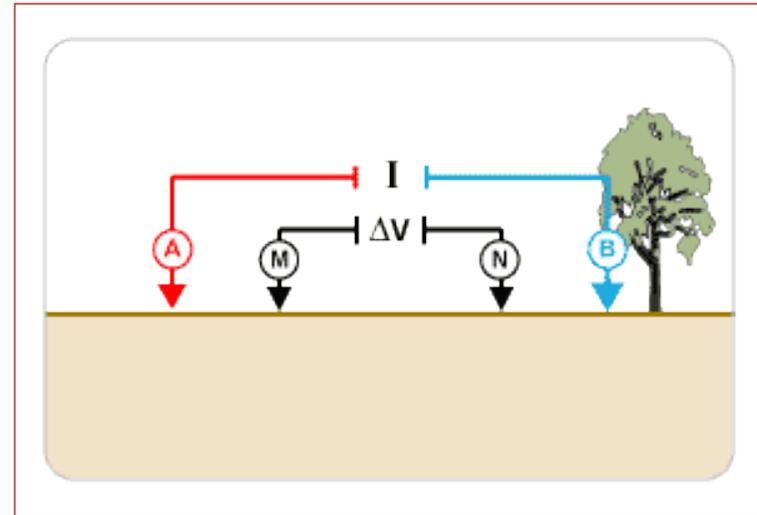
- $\rho_a$  ne dépend pas de  $l$ .
- $\rho_a$  dépend de la configuration géométrique utilisée.
- $\rho_a$  est une sorte de moyenne des résistivités du milieu.

# Types de Quadripôles

- Dispositif Wenner:

pour  $AM = MN = NB = a$

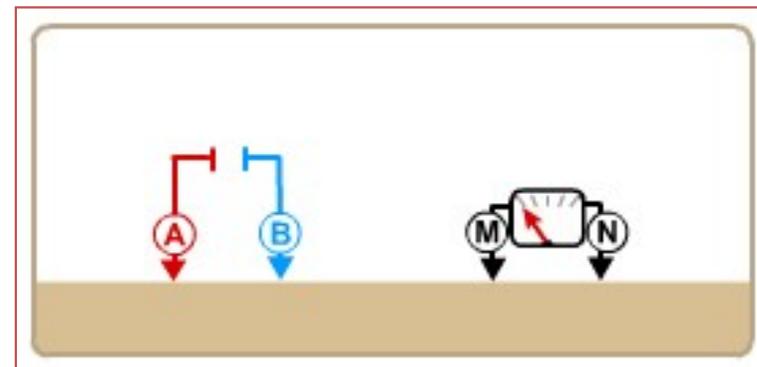
$$k = 2\pi a$$



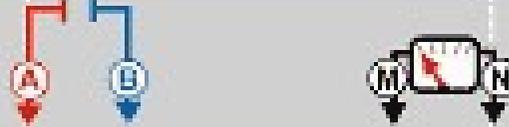
- Dispositif dipôle-dipôle:

pour  $AB = MN = a$

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

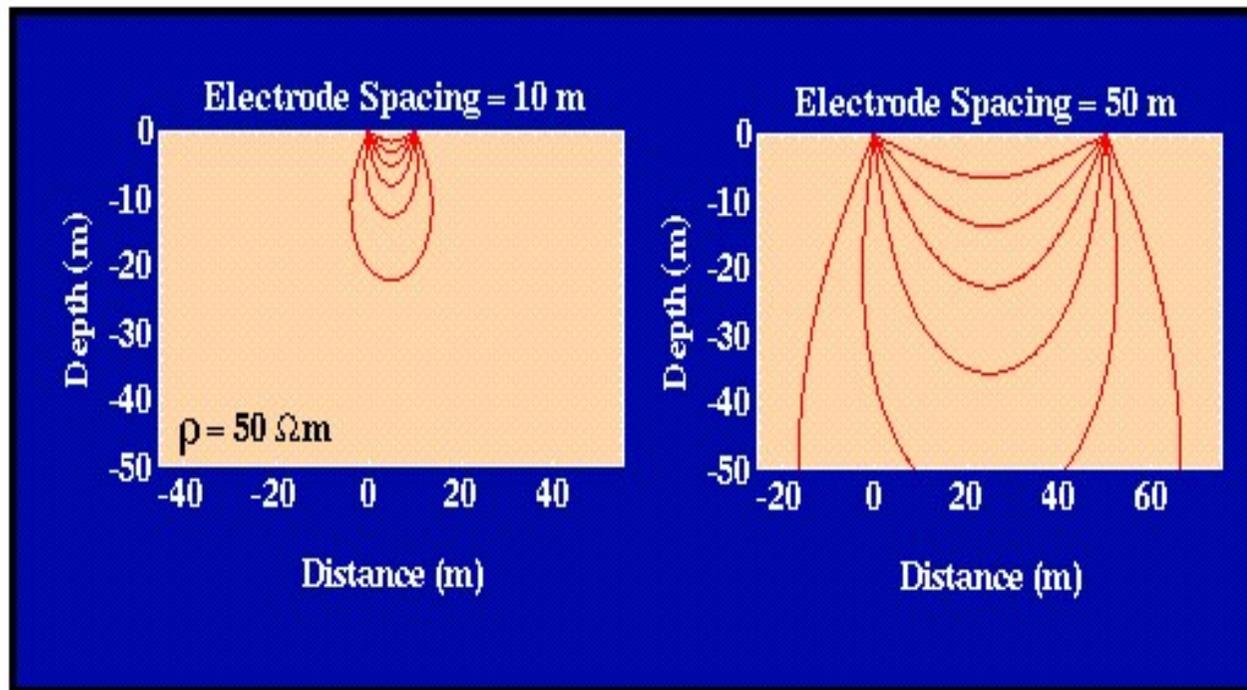


## Profondeur de pénétration des principaux dispositifs

Dispositifs		Prof. d'investigation	
		Roy (1971)	Barker (1969)
Wenner		0.11L	0.17L
Schlumberger		0.125L	0.19L
Dipôle-Dipôle		0.195L	0.25L
Pôle-Pôle		0.35L	

D'après Chouteau et Gloaguen

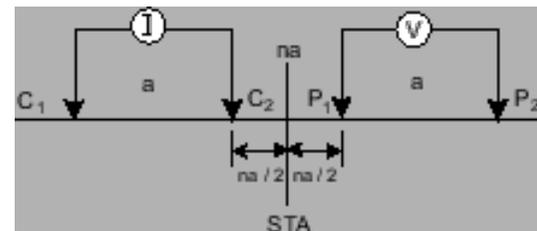
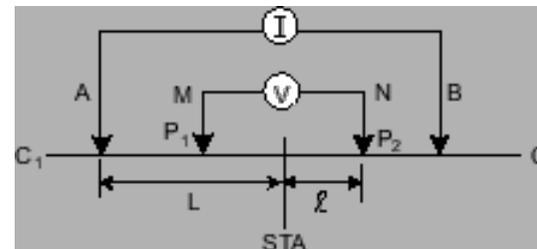
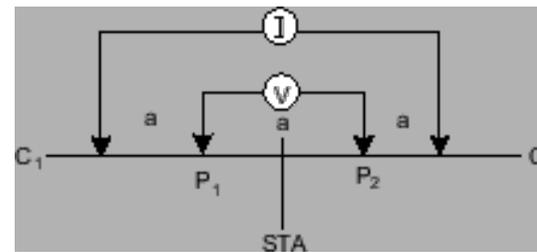
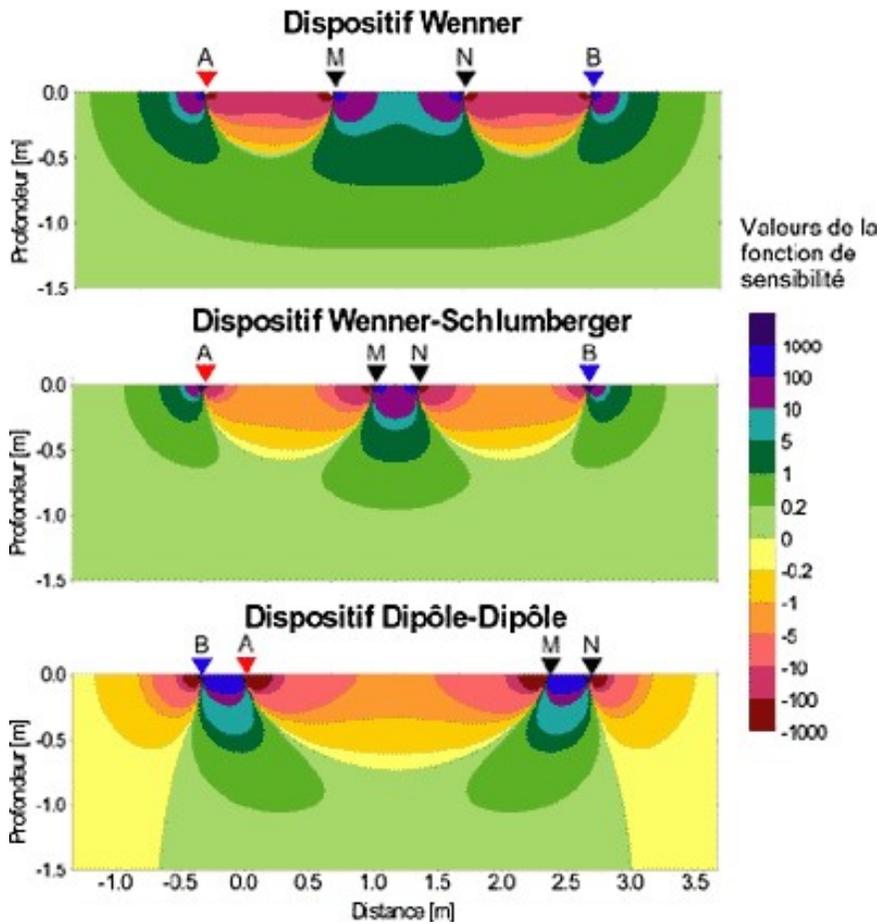
# Profondeur de pénétration (d'investigation) et écartement des électrodes



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

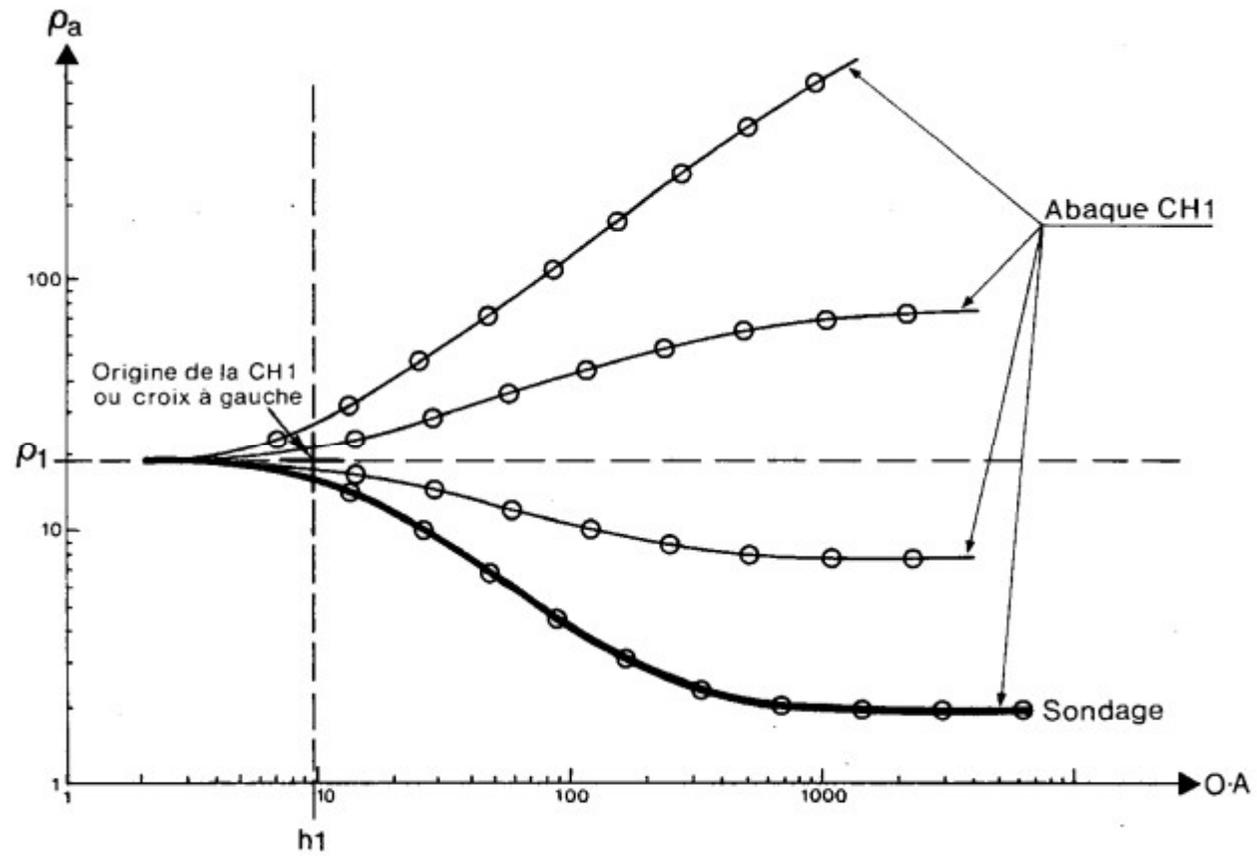
## Le Sondage Electrique Vertical (SEV)

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)

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n L^3}{\left[ L^2 + (2n)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

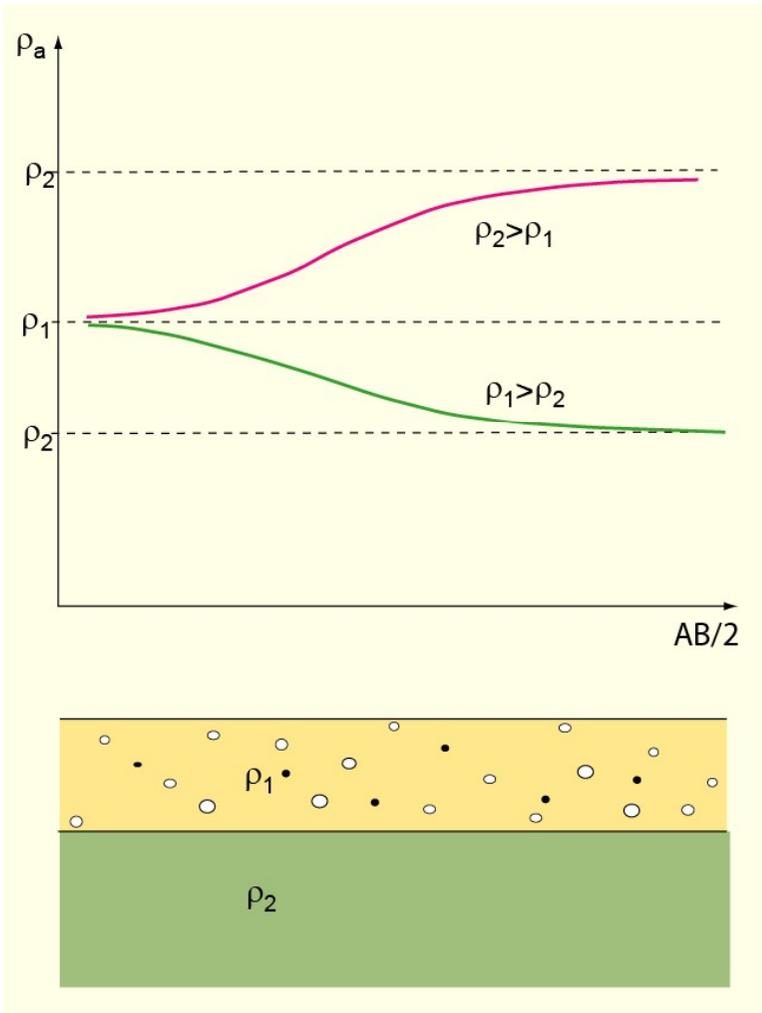
$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad \text{et} \quad L = \frac{OA}{h_1}$$

# Principe de l'abaque CH1

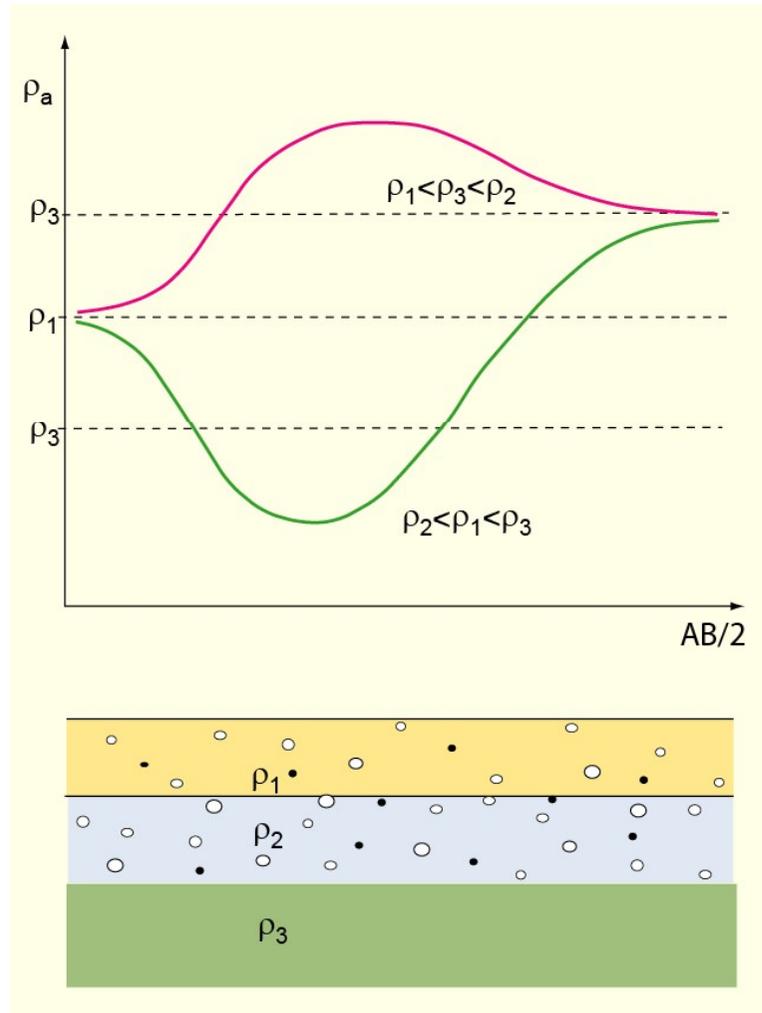


# Sondages Electriques

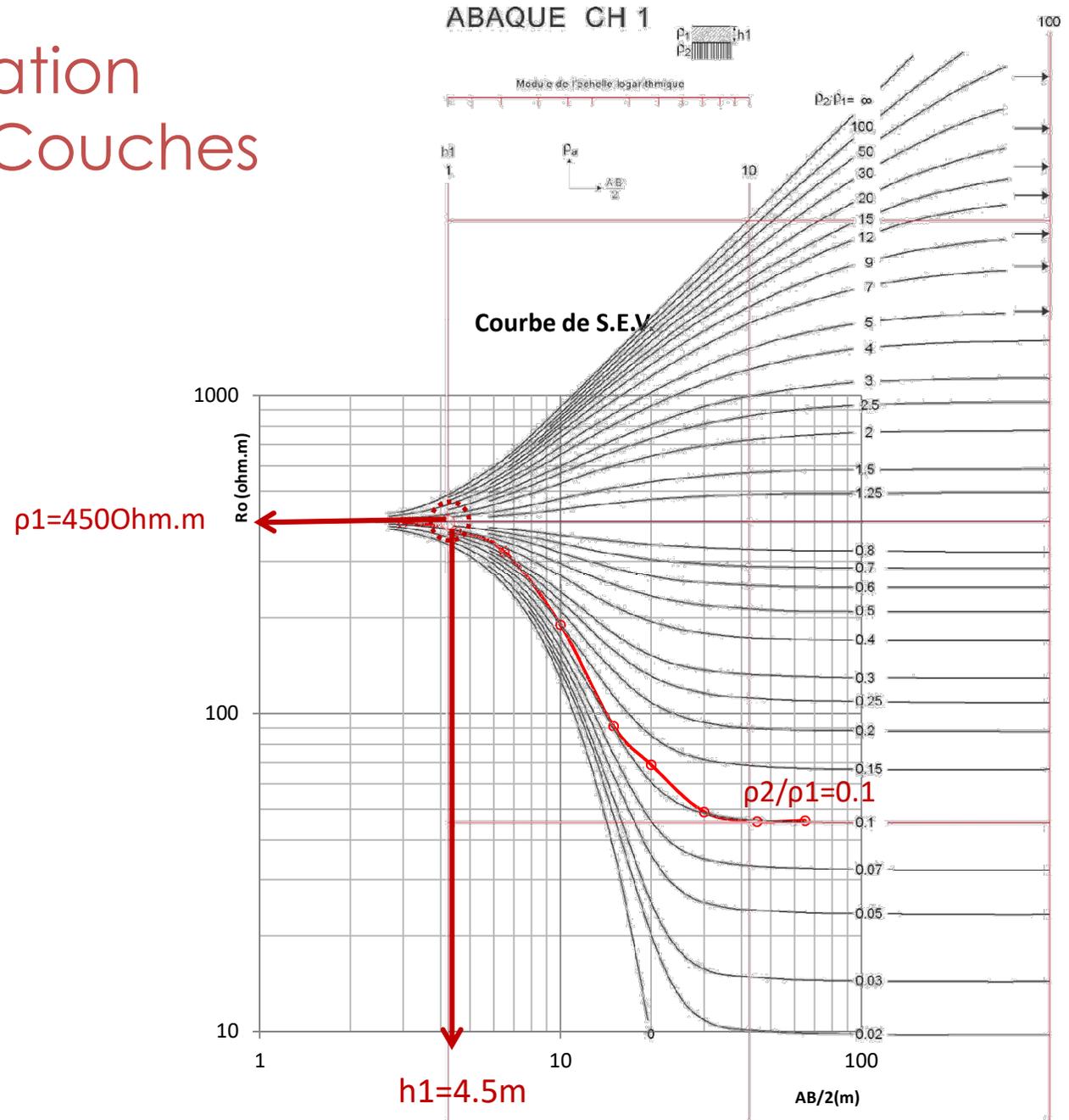
deux couches



trois couches



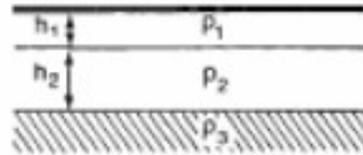
# Interprétation Sondages 2 Couches



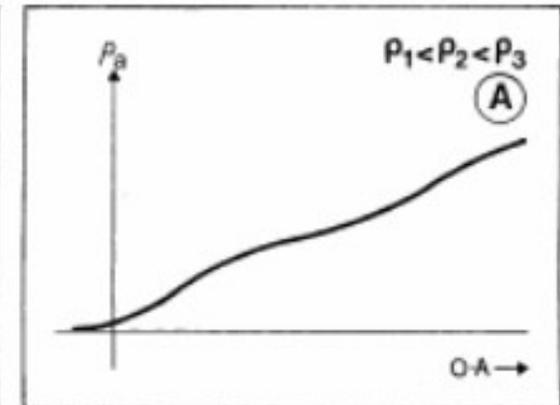
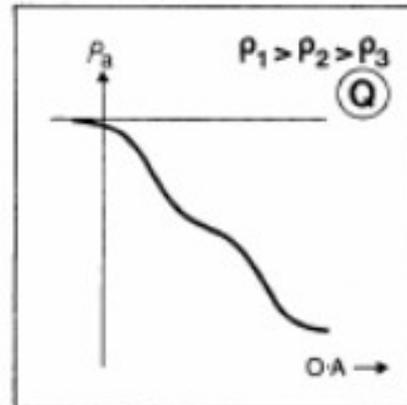
# Sondage dans un Terrain à 3 couches

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 :

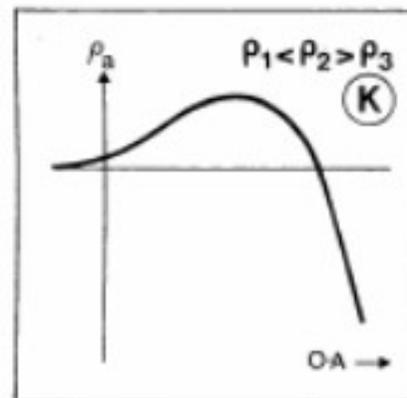
- Type Q : décroissante par palier (escalier descendant)



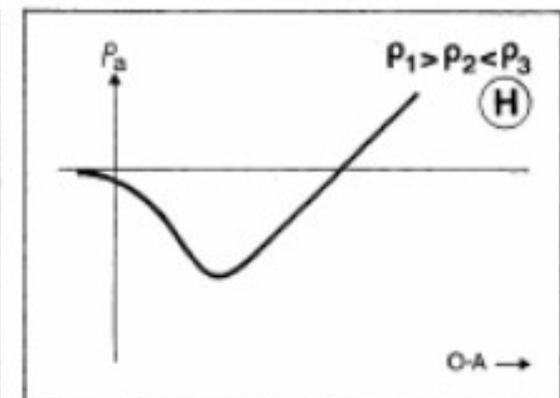
- Type A : croissante par palier (escalier montant)



- 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.

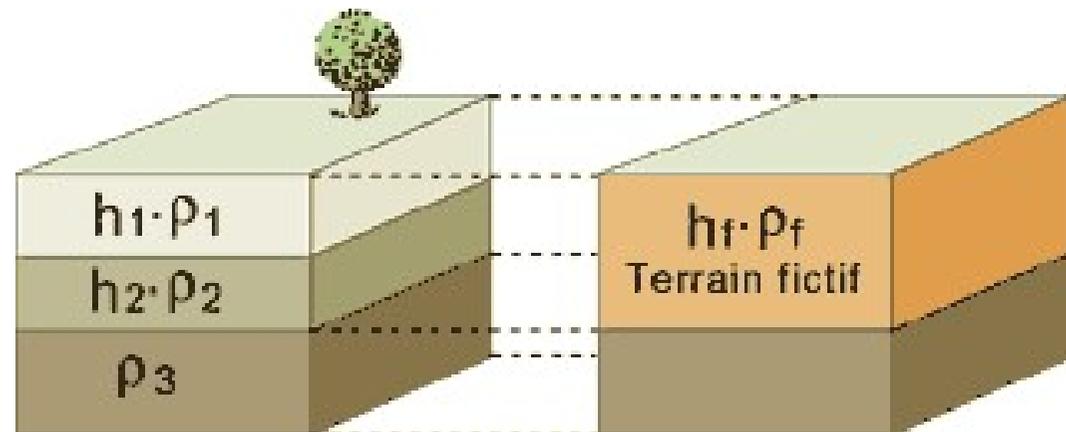
# Interprétation Sondages 3 Couches

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

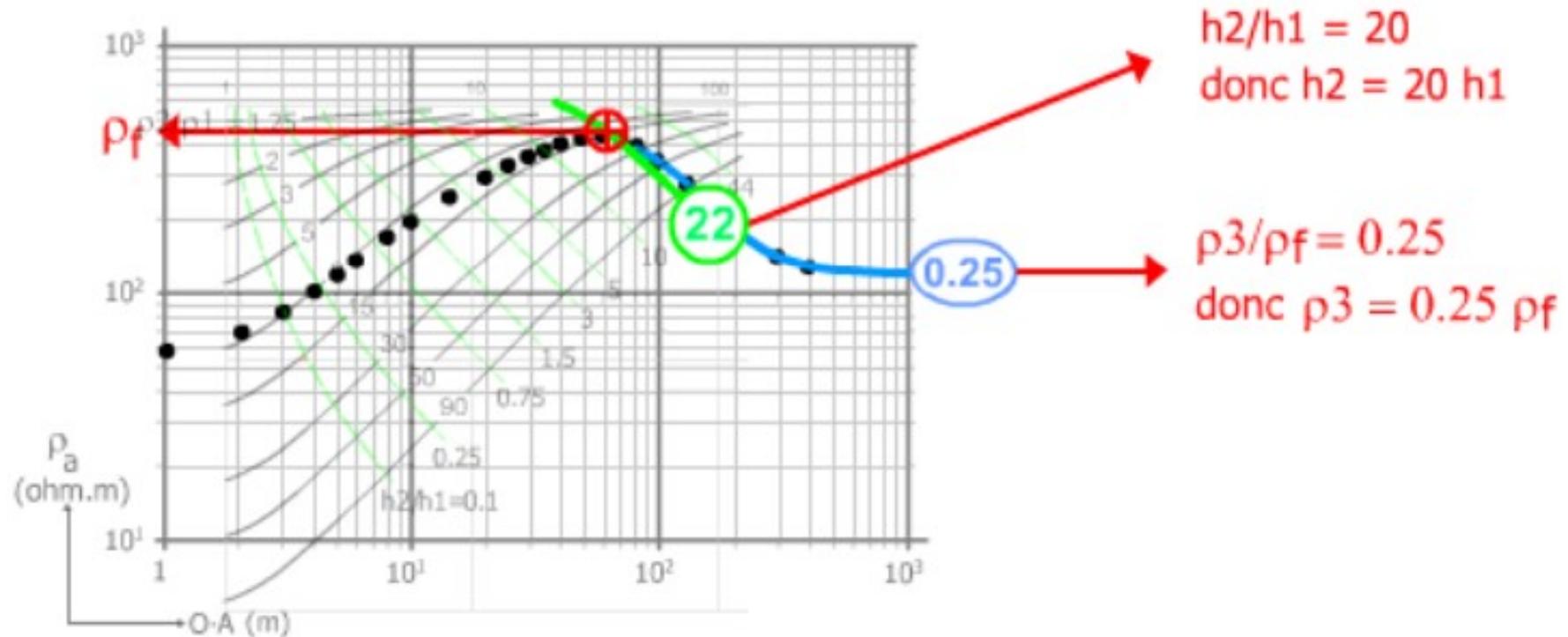
## Exemple:

Tableaux des valeurs de résistivité apparentes.

<u>AB</u> 2	Res. Ap.	<u>AB</u> 2	Res. Ap.
1	60	30	364
2	67	40	394
3	82	50	413
4	100	60	415
5	118	70	408
6	138	80	380
8	171	100	340
10	200	130	270
15	260	160	225
20	302	200	180
25	335	300	140

# Interprétation Sondages 3 Couches Exemple:

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

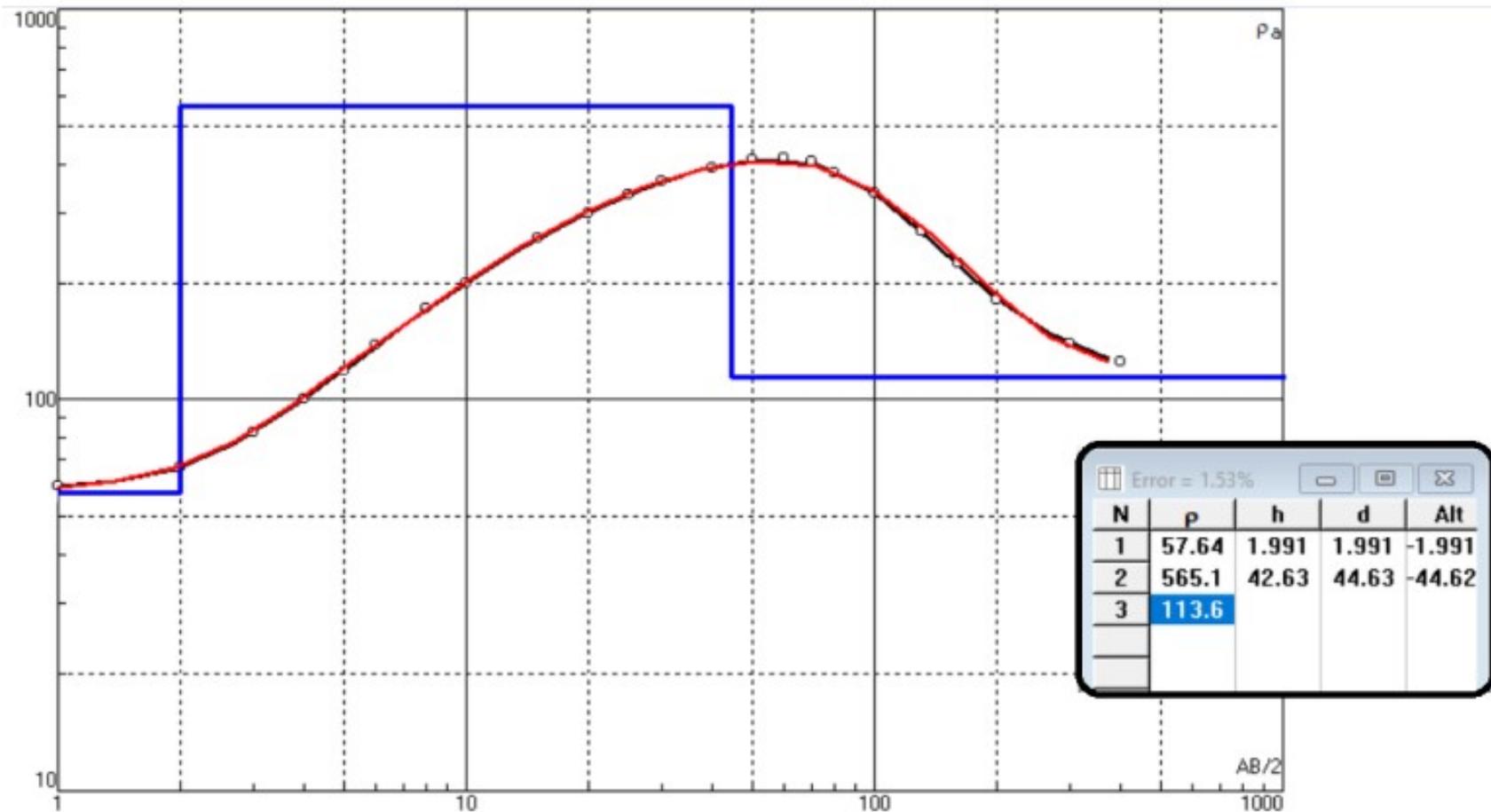


Finalement, l'épaisseur du 2ème terrain est calculée grâce au rapport  $h_2/h_1$  de la courbe LCD interceptant la croix de référence.



# Interprétation Sondages 3 Couches

## Exemple 2: Application par logiciel IP2WIN

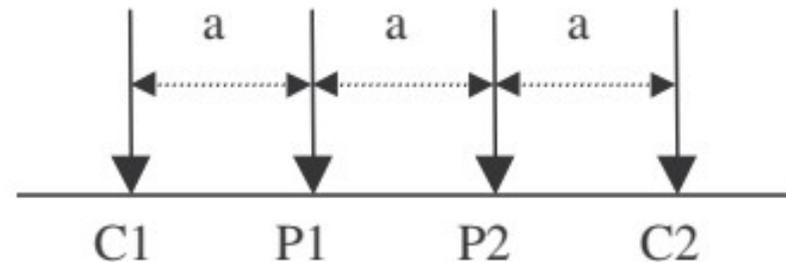


Exemple d'un model établi suit à une application du programme IP2WIN

# Les méthodes de prospection

## 1. Trainé électrique « Exploration horizontale »

- Prospection à profondeur constante
  - Dispositif Wenner
    - ✓ Prof. d'invest  $\approx 0.125$  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...

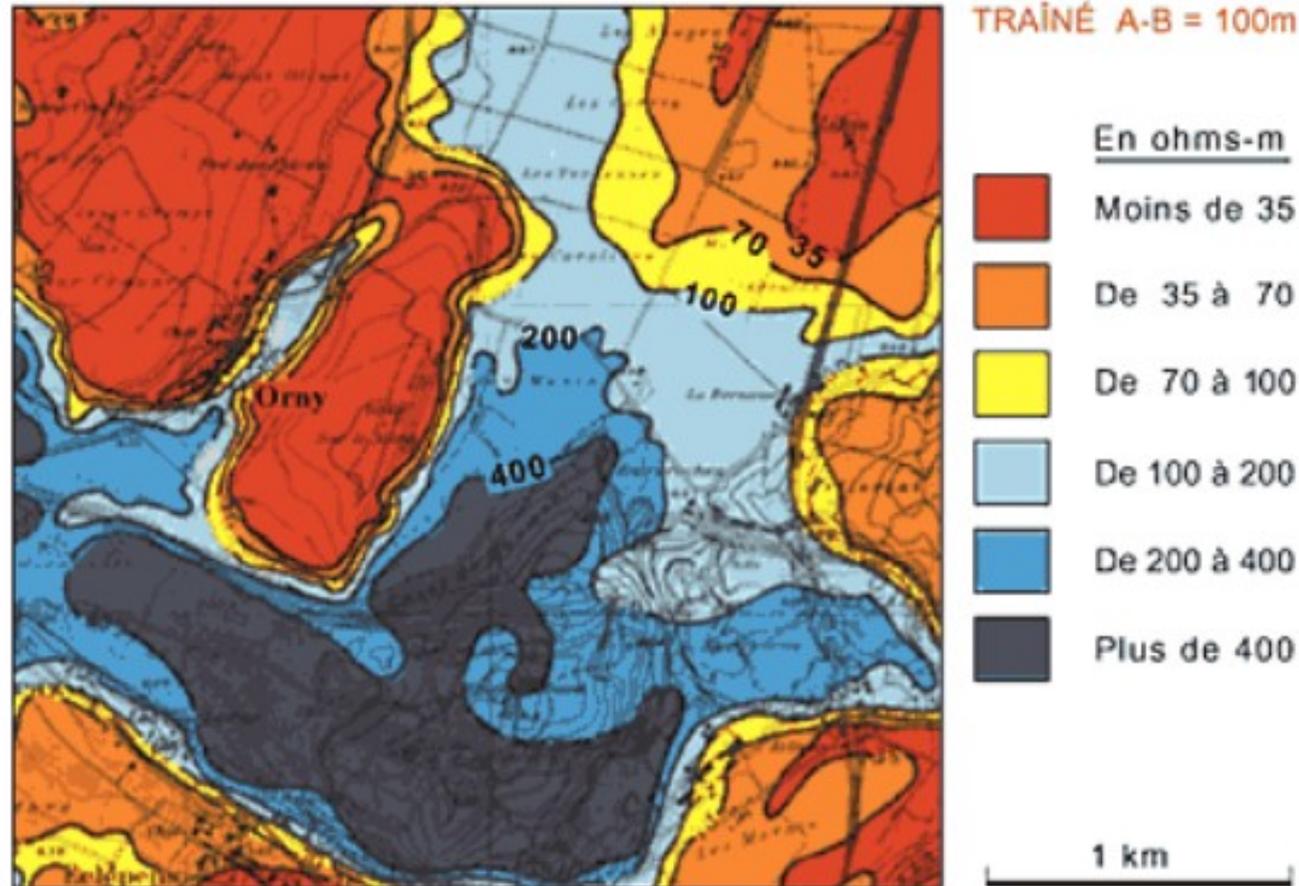


# Les méthodes de prospection

## 1. Trainé électrique « Exploration horizontale »

CARTE DES ÉQUIRÉSISTIVITÉS ÉLECTRIQUES APPARENTES

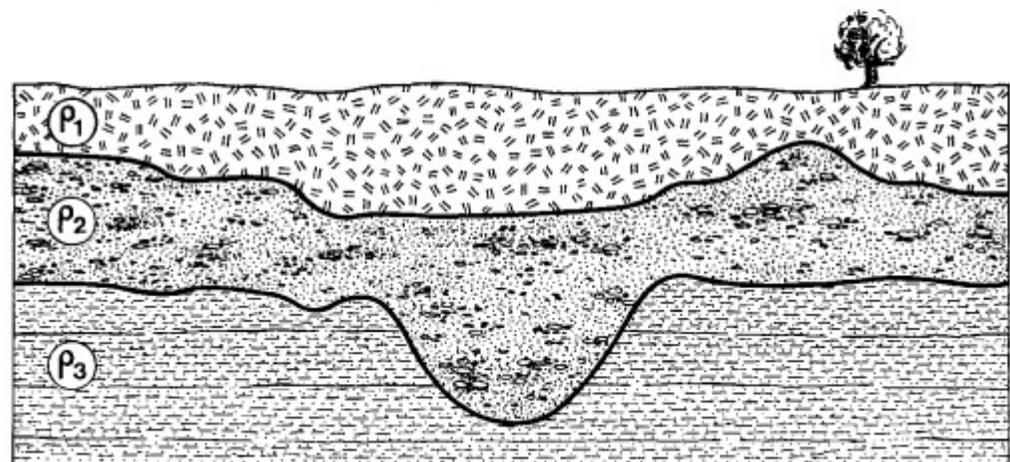
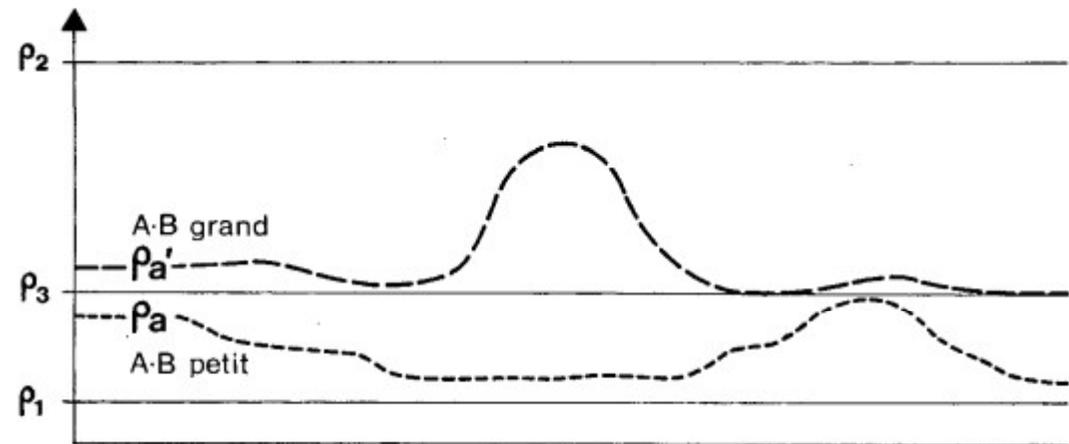
TRAINÉ A-B = 100m



# Les méthodes de prospection

## 1. Trainé électrique « Exploration horizontale »

**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. 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

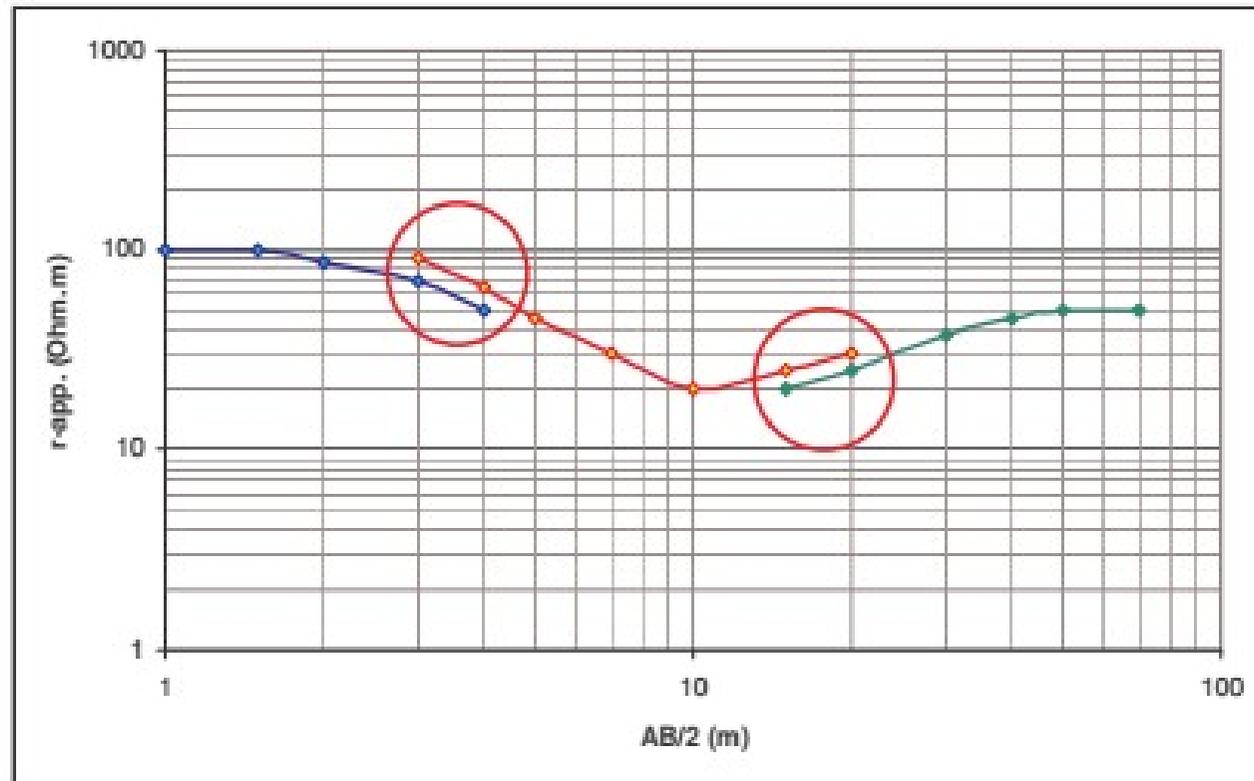
- ✓ Stratification (sub)horizontale

- ✓ Injection ponctuelle.

# Les méthodes de prospection

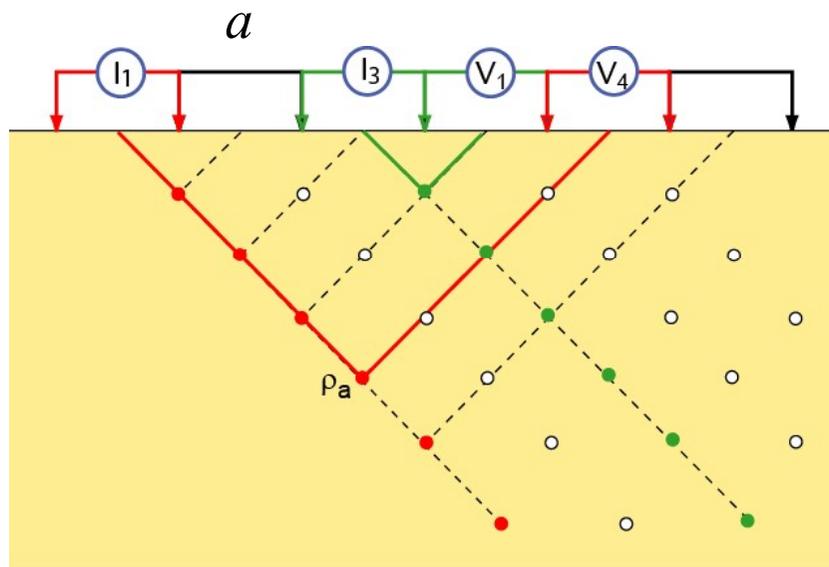
## 2. Sondage électrique vertical S.E.V. « Exploration verticale »

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

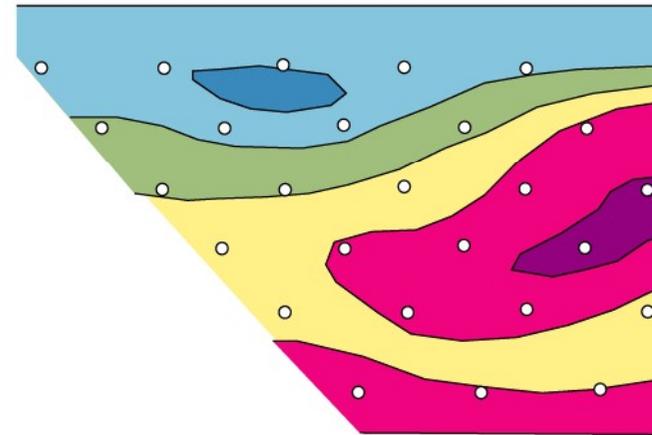


# Les méthodes de prospection

## 3. Imagerie (Tomographie) électrique 2D

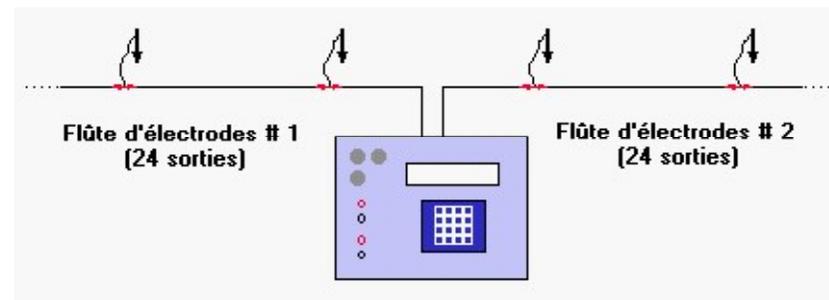


Pseudo-section



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

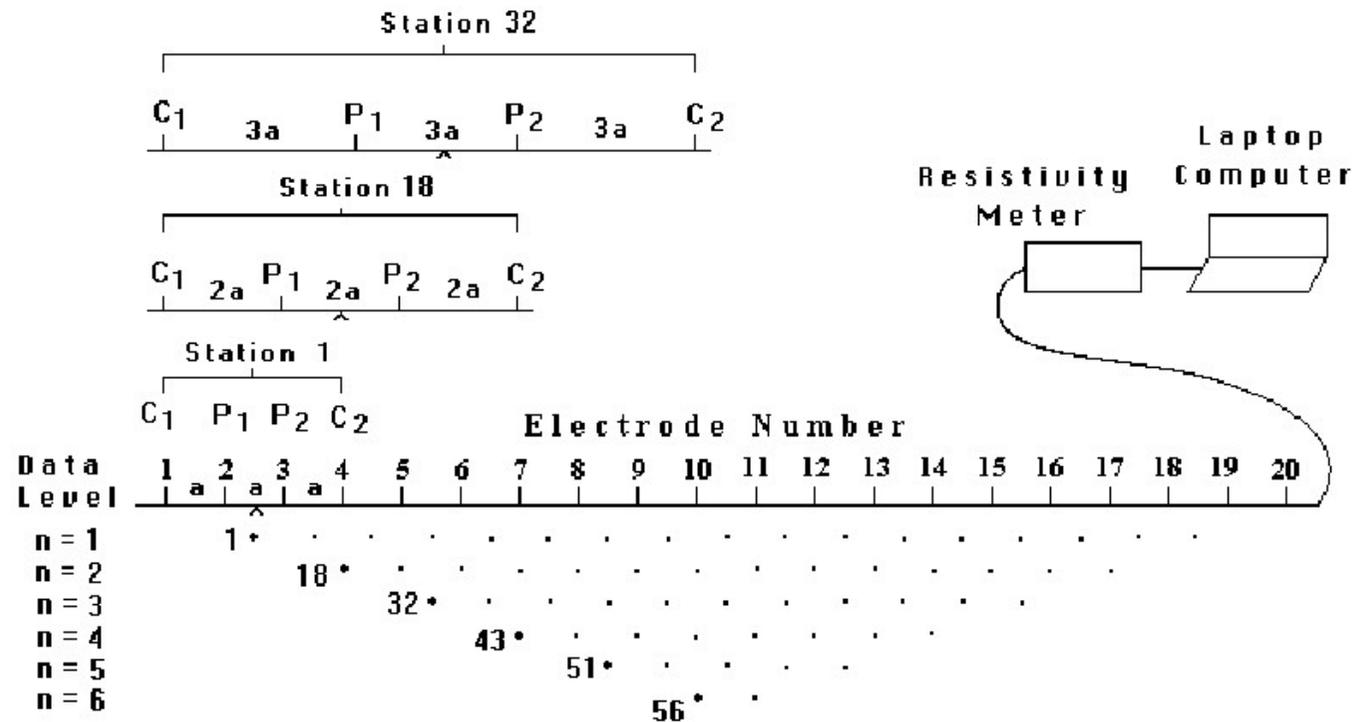
# appareillage multiélectrodes (Imagerie électrique 2D)



## **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



## Sequence of measurements to build up a pseudosection

Figure 5. The arrangement of electrodes for a 2-D electrical survey and the sequence of measurements used to build up a pseudosection.

# PROCÉDURE DE TERRAIN: 'ROLL-ALONG'

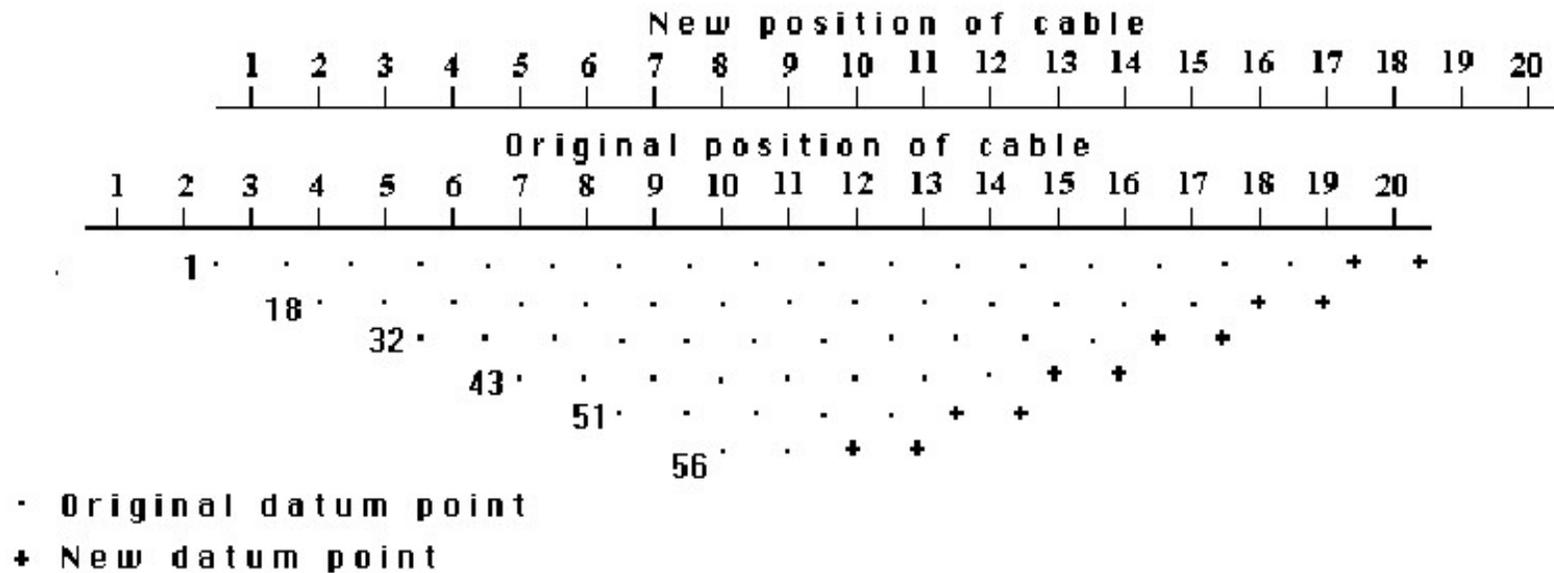
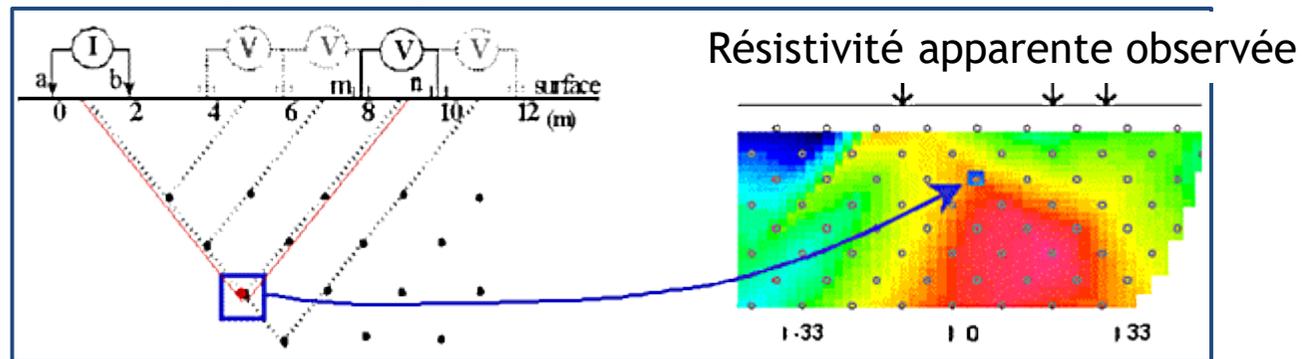


Figure 6. The use of the roll-along method to extend the area covered by a survey.

# 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

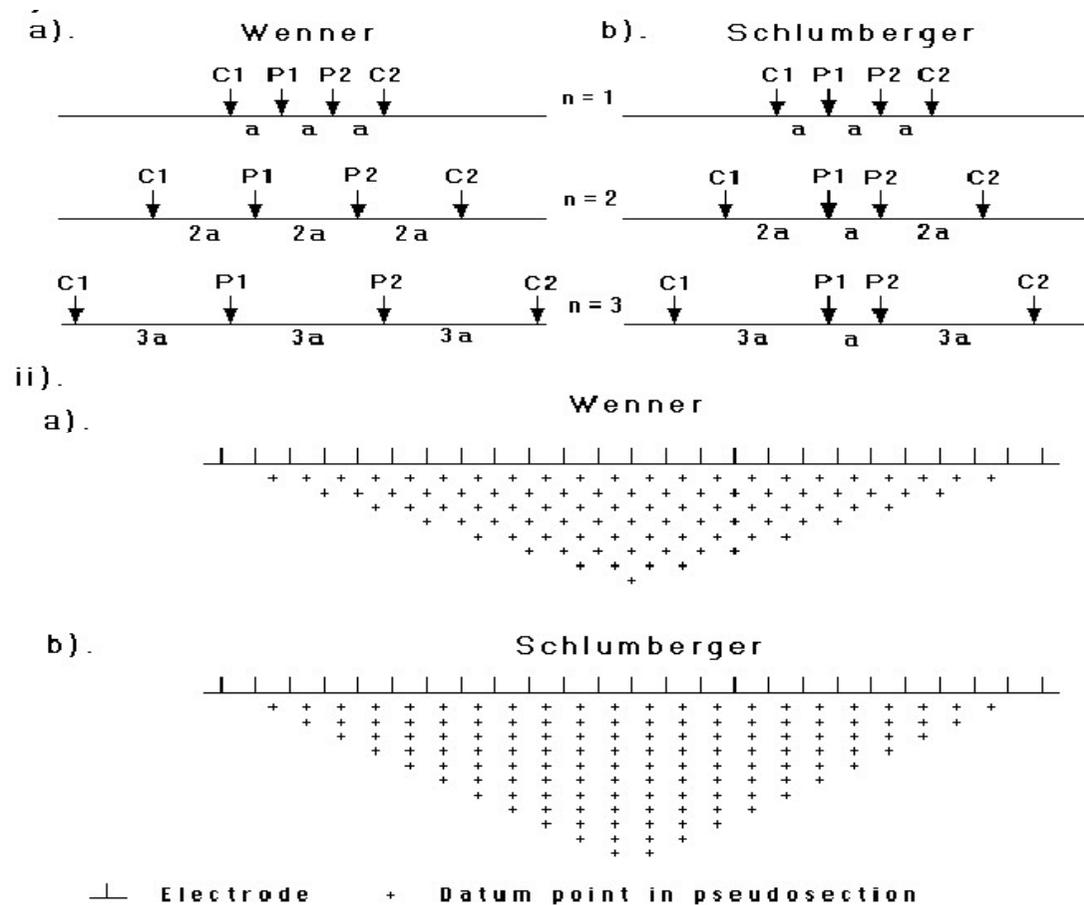
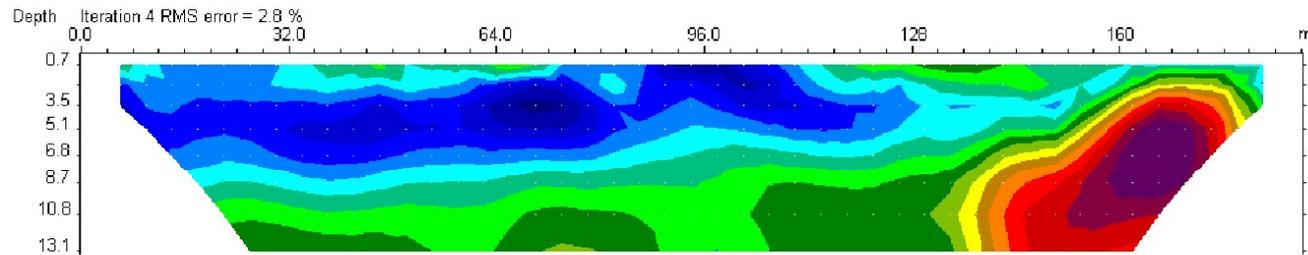
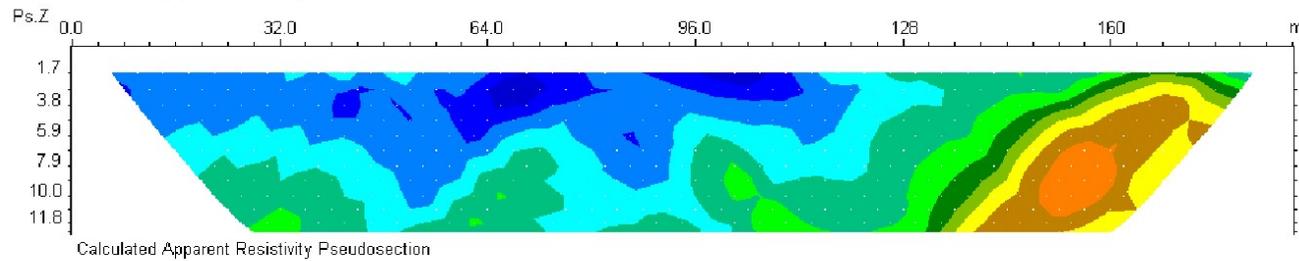
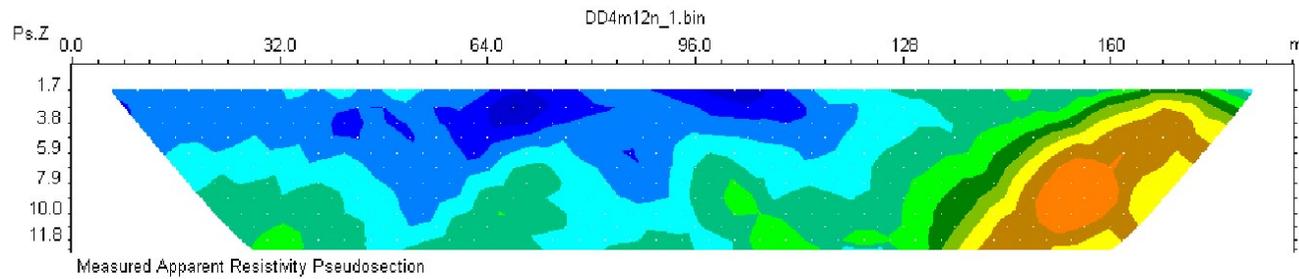
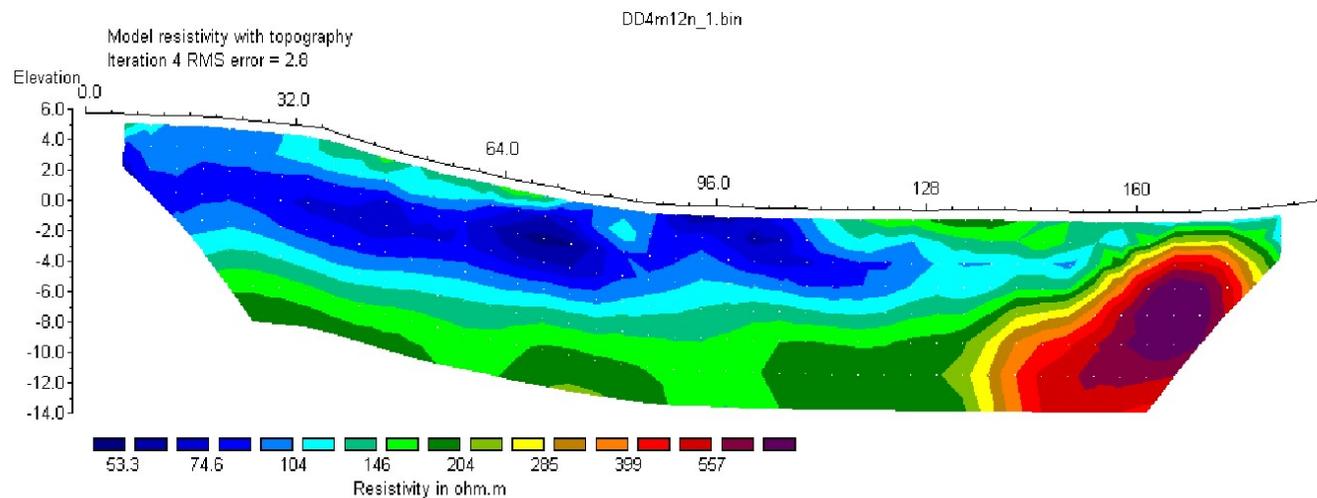


Figure 10. A comparison of the (i) electrode arrangement and (ii) pseudosection data pattern for the Wenner and Wenner-Schlumberger arrays.

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



Unit electrode spacing 4.0 m.



Unit Electrode Spacing = 4.0 m.