

GLQ3205

Géophysique appliquée 2

Méthodes Électriques: Résistivité Électrique

Gabriel Fabien-Ouellet
gabriel.fabien-ouellet@polymtl.ca

Été 2023

Plan du cours

1. Résumé du dernier cours
2. Principes généraux du DC
3. Sondage électrique

Mécanismes de conduction

- Conduction électronique:
 - Significative en présence de métaux uniquement
- Conduction ionique:
 - en présence d'une solution électrolytique dans les pores
 - déplacement des ions par diffusion
- Conduction de surface
 - Conduction dans la double couche d'Helmoltz
 - Proportionnelle à la surface spécifique des pores
 - Devient significative dans les silts et argiles

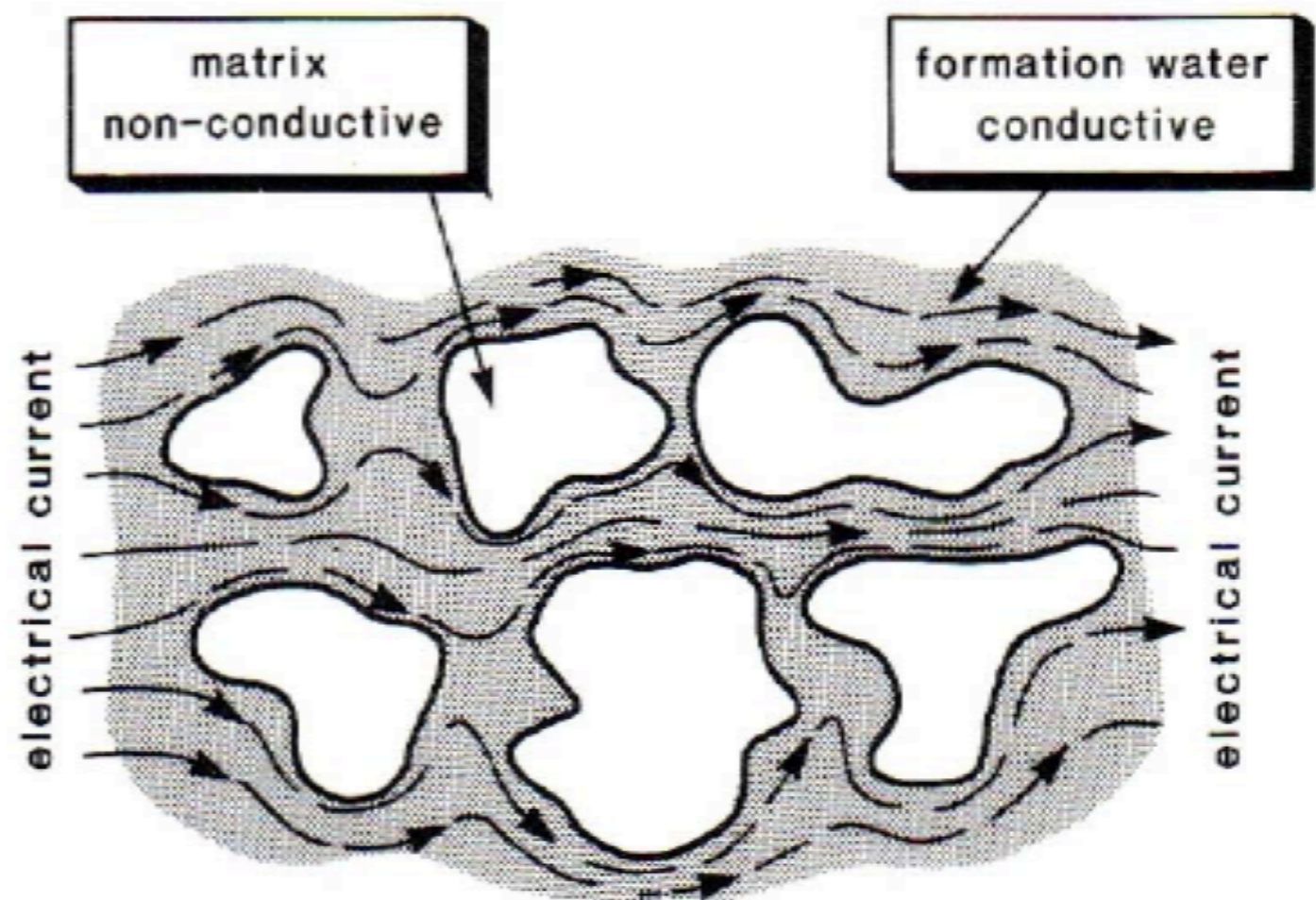
Loi d'Archie

Lorsque la conduction totale est dominée par la **conduction ionique**, Archie a empiriquement observé la loi suivante:

$$\rho_{eff} = F \rho_w$$

$$\rho_{eff} = a \phi^{-m} S_w^{-n} \rho_w$$

- F : Facteur de formation
- ϕ : Porosité
- S_w : Saturation en eau



Les sources de potentiel électrique

Nous regrouperons les potentiels en 3 catégories:

- Le potentiel électrocinétique
- Les potentiels électrochimiques
- Le potentiel de minéralisation

La méthode de la polarisation spontanée se base sur ces trois potentiels. Notons qu'il existe d'autres sources naturelles, qui seront considérées comme des bruits.

- Le potentiel bioélectrique
 - Les potentiels telluriques
-

Potentiel électrocinétique

- Lorsque l'électrolyte s'écoule dans le milieu poreux, les ions positifs de la couche diffuse sont entraînés par le courant. Les charges positives s'accumulent et crée une différence de potentiel, créant à son tour un courant de conduction dans la couche de Stern de sens opposé à l'écoulement. Le potentiel électrique créé est donnée par:

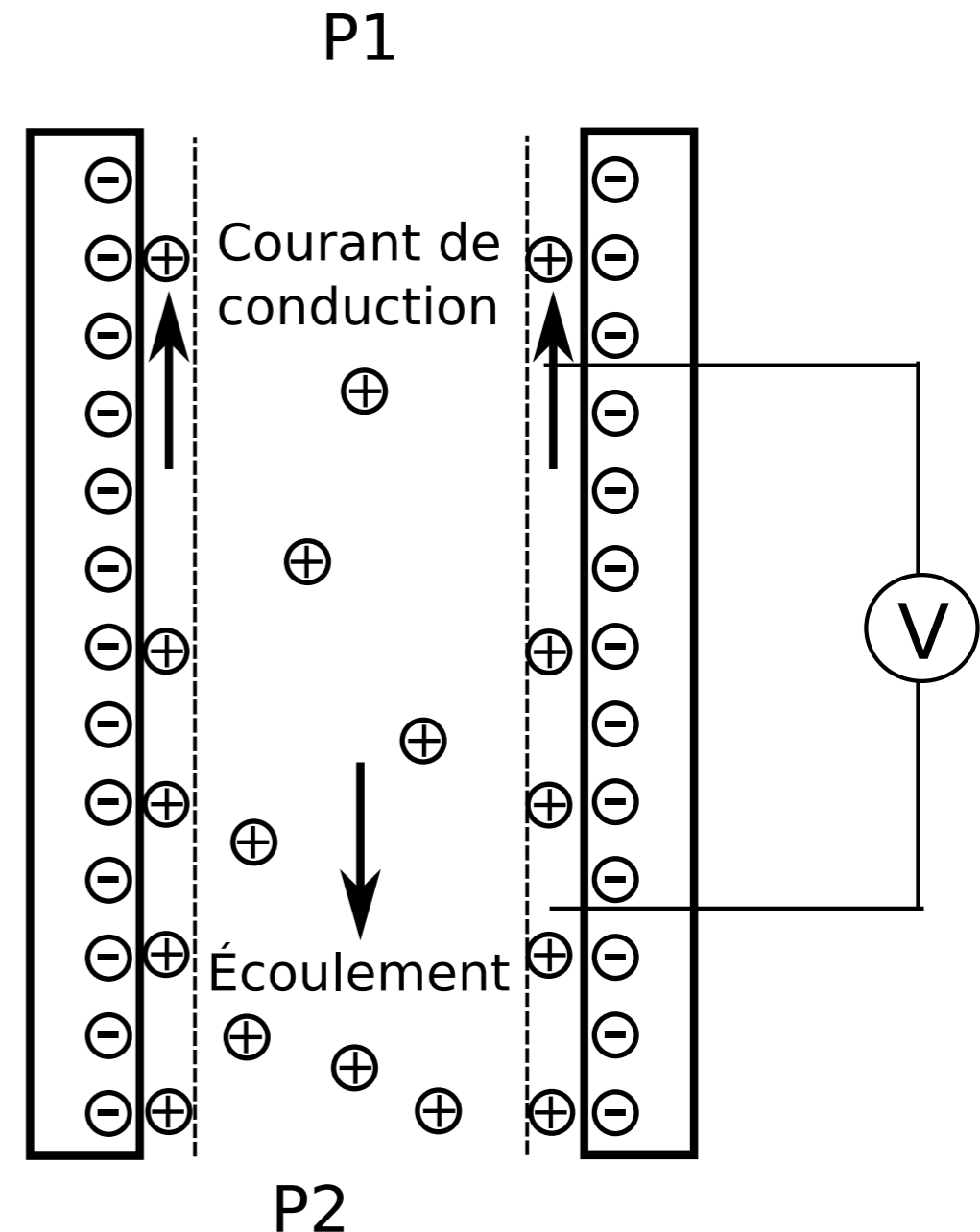
$$E_k = -\phi \frac{\Delta P \epsilon \rho}{4\pi \eta}$$

P : Pression

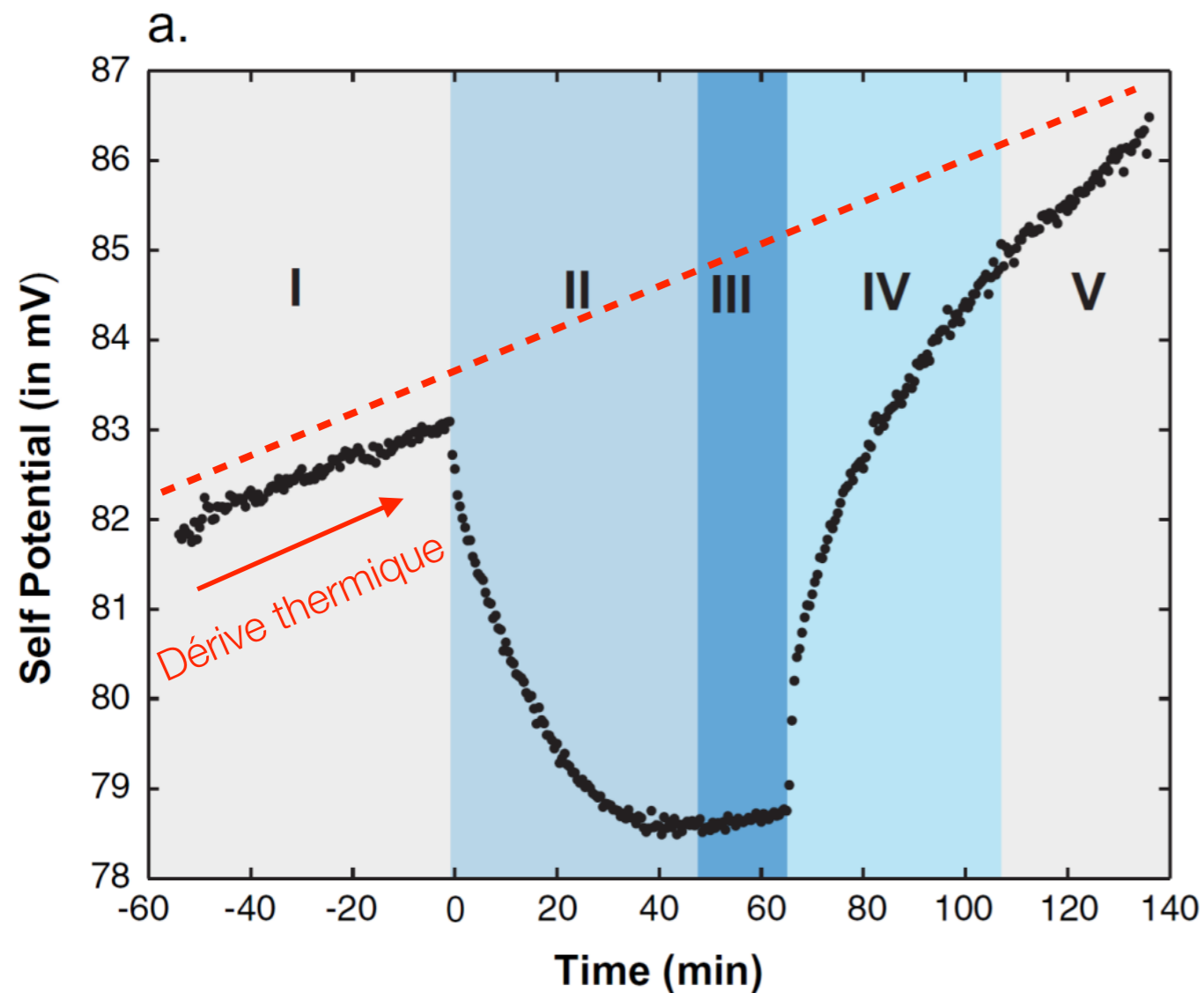
ϕ : Potentiel d'adsorption

η : Viscosité du fluide

ϵ : Permittivité électrique



Exemple: Réponse PS lors d'un essai de pompage



- L'eau est pompée dans un forage et injectée dans un autre
- Le potentiel PS est mesuré à la même station dans le temps

Le pompage crée un potentiel électrocinétique mesurable

- Avant pompage
- Phase transitoire lors du pompage
- Régime permanent
- Phase transitoire après pompage
- Régime permanent

Principes généraux du DC

Principes de base

Contrairement à la méthode du potentiel spontané, les mesures DC sont des **méthodes actives**.

- On injecte un courant dans le sol à l'aide de deux électrodes;
- On mesure le potentiel induit par le courant;
- Les mesures du potentiel et de courant peuvent ensuite être utilisées pour déterminer la distribution de résistivité électrique du sol.





Pour mettre en oeuvre une méthode DC, il faut comprendre:

- 1. Comment une électrode induit un courant dans un sol homogène ?**
- 2. Comment le courant varie en présence de plusieurs électrodes ?**
- 3. Quelle est la distribution en profondeur du courant ?**
- 4. Comment varie le courant en présence d'hétérogénéités ?**
- 5. Qu'est-ce que la résistivité apparente d'un sol tabulaire ?**

Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

Rappels:

- Maxwell-Gauss:

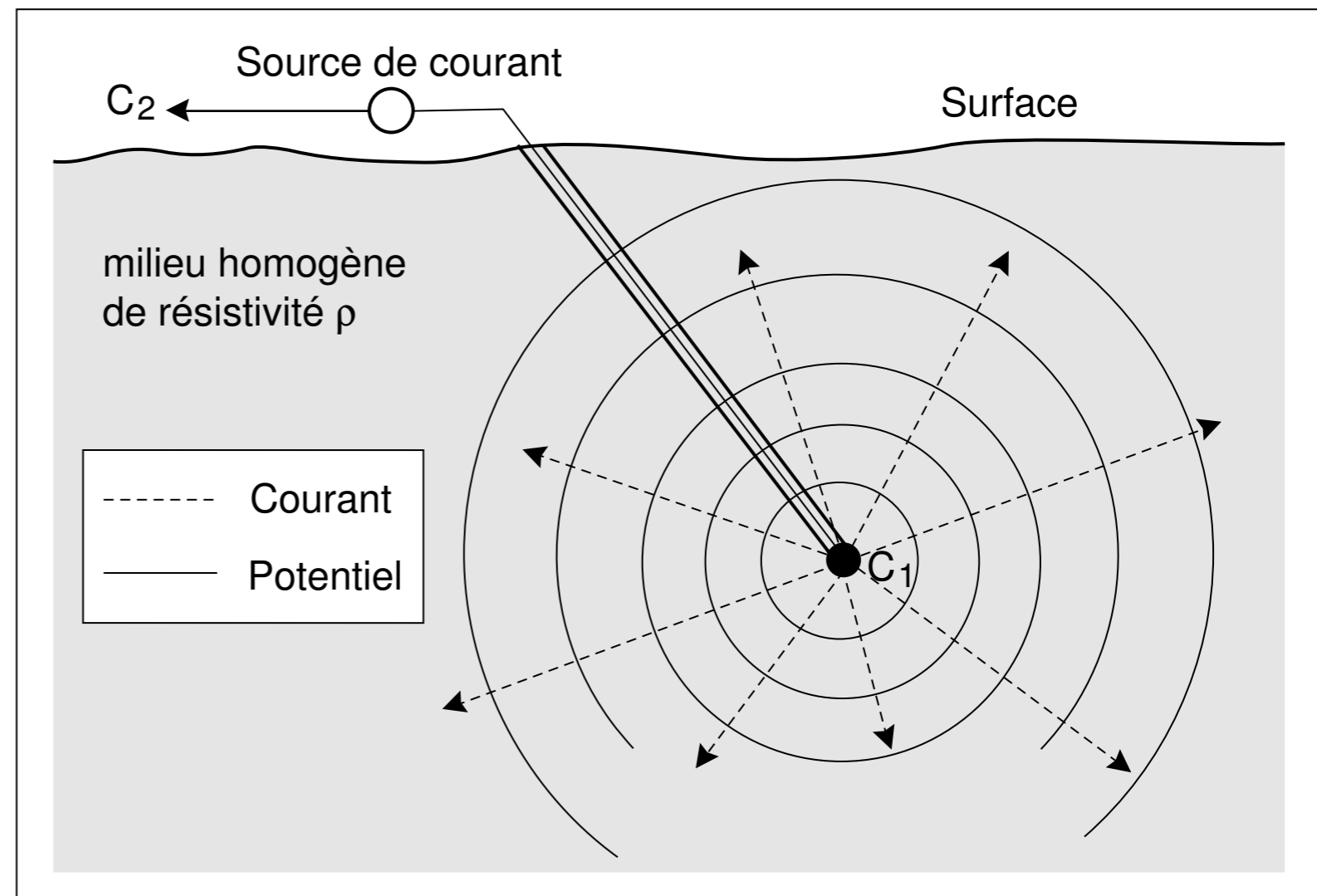
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

- Le potentiel électrique

$$\mathbf{E} = -\nabla V$$

- La densité de courant:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$



Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

L'injection d'un courant provoque une densité de courant dont la divergence est nulle

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

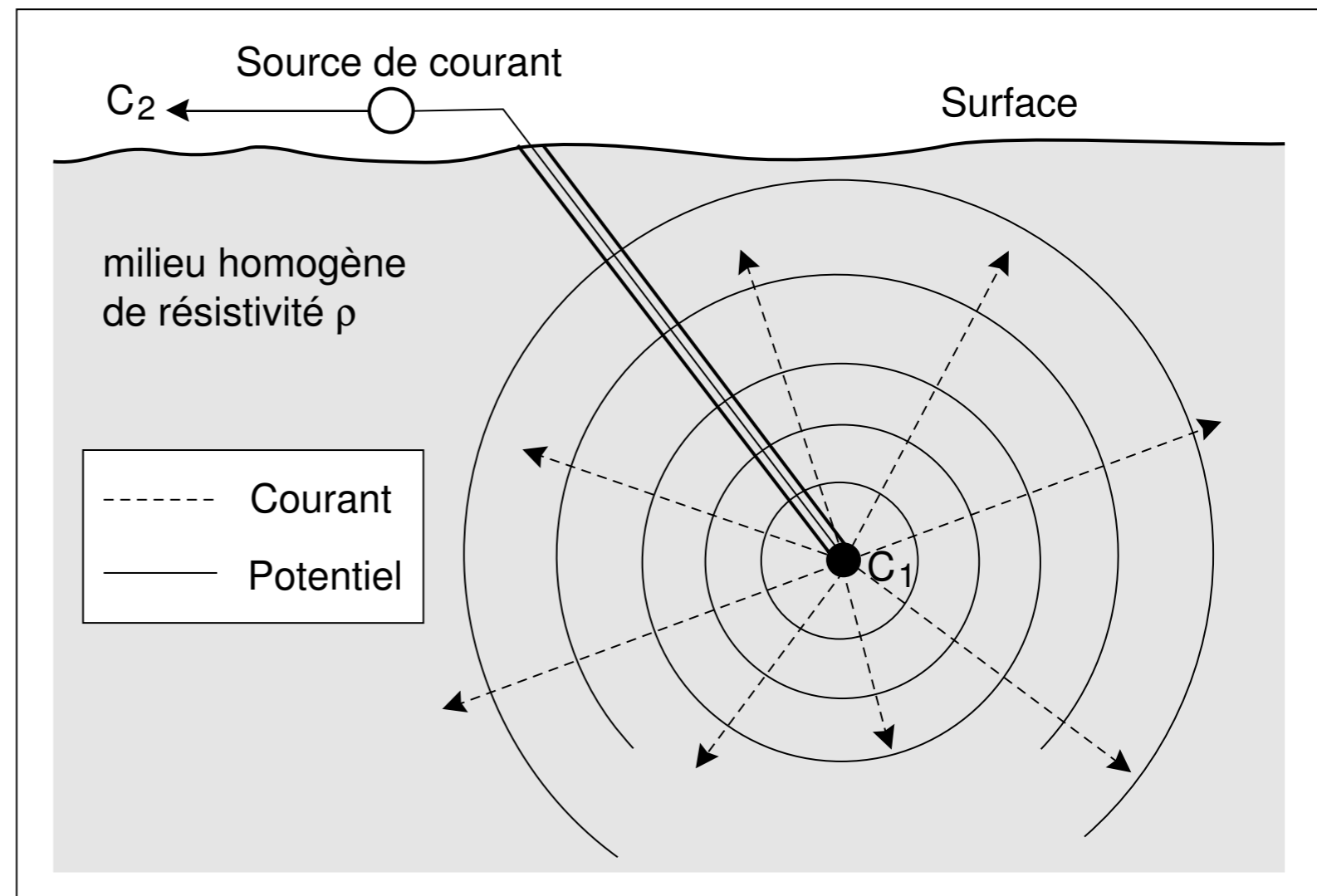
Ce qui donne l'équation de poisson après un peu d'algèbre

$$\nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = 0$$

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = 0$$

$$\nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0$$

$$\nabla^2 V = 0$$



Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

L'injection d'un courant provoque une densité de courant dont la divergence est nulle

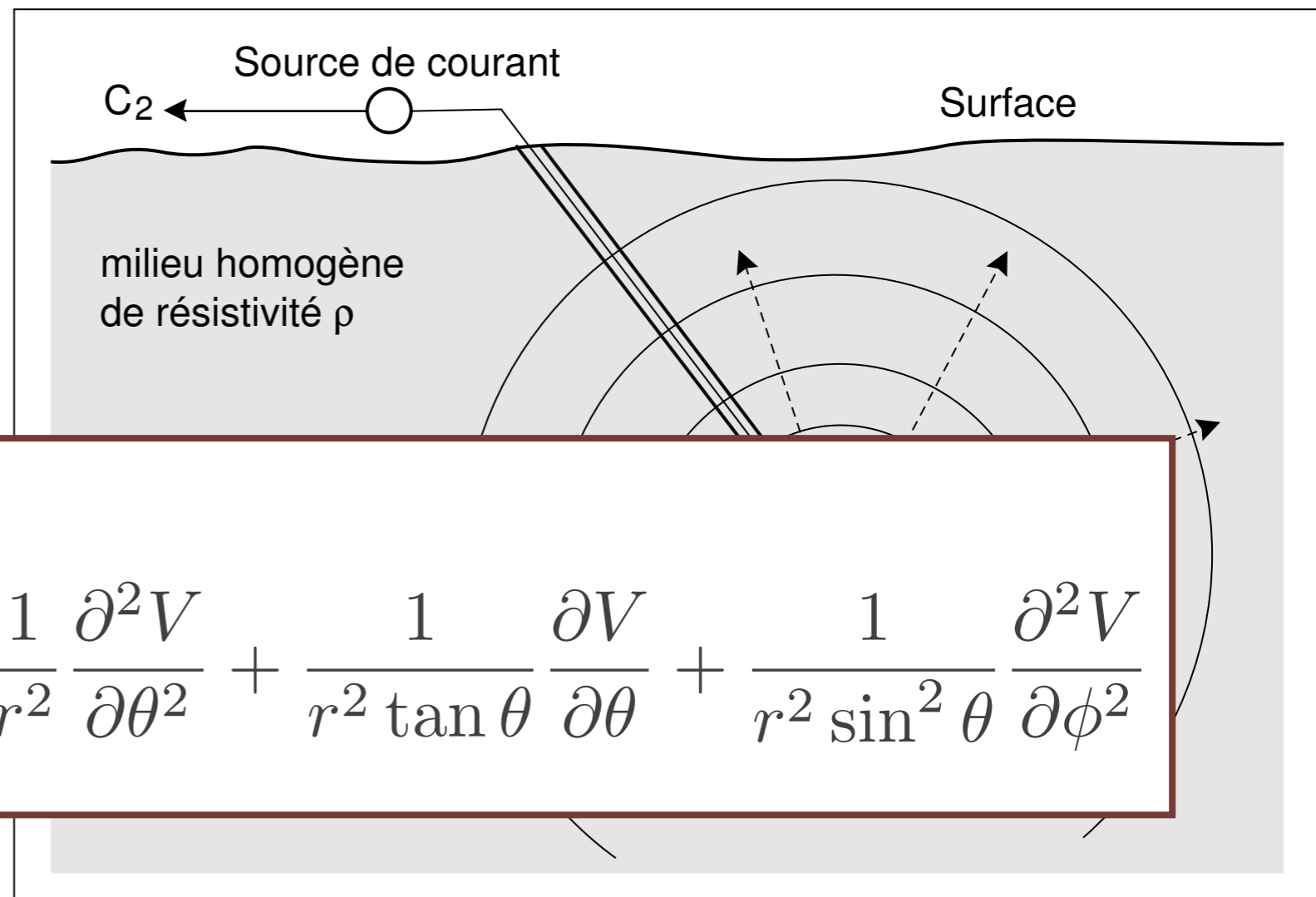
$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

Ce qui donne l'équation de

En coordonnées sphériques

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \tan \theta} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2}$$

$$\nabla^2 V = 0$$



Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

L'injection d'un courant provoque une densité de courant dont la divergence est nulle

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

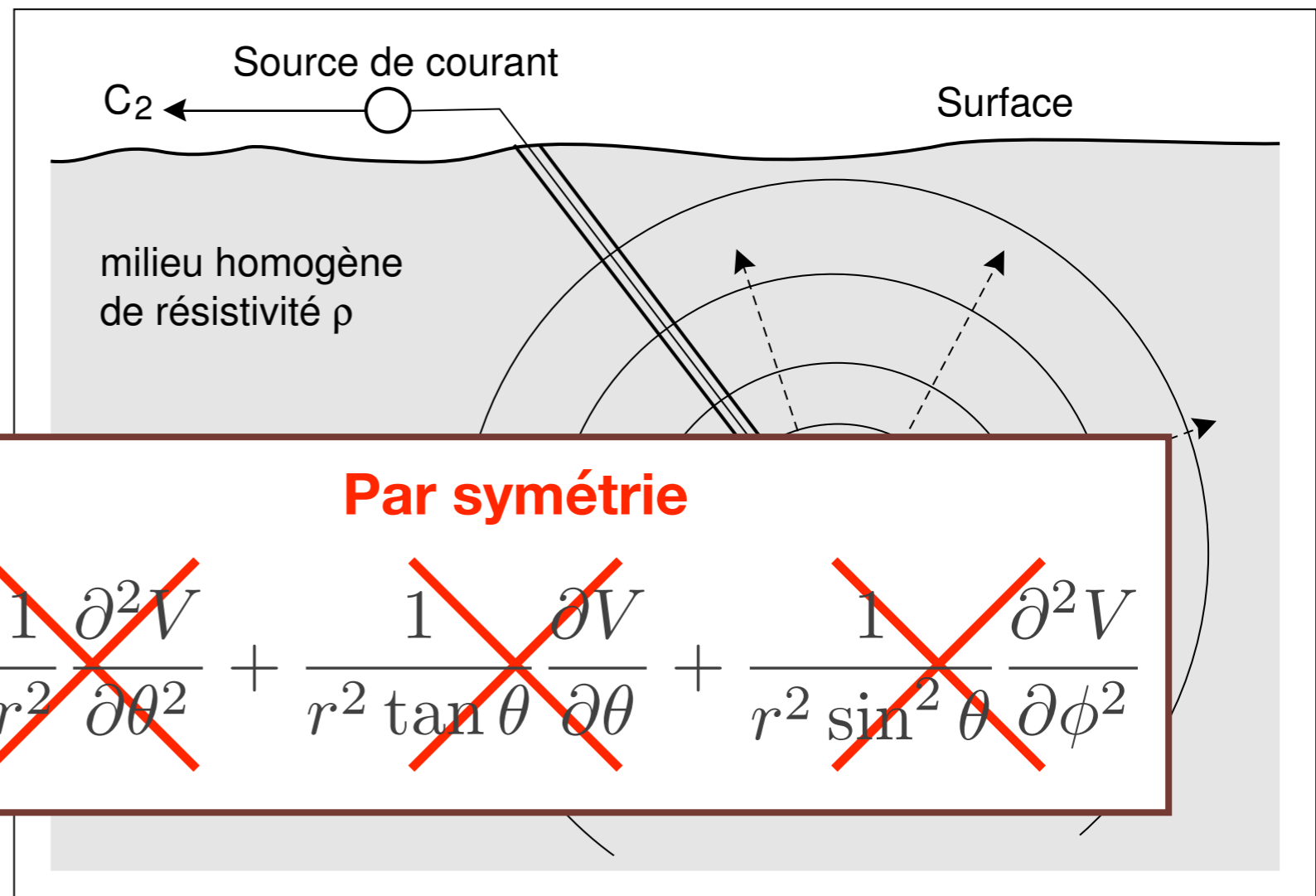
Ce qui donne l'équation de

En coordonnées sphériques

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \tan \theta} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2}$$

Par symétrie

$$\nabla^2 V = 0$$



Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

Nous devons résoudre

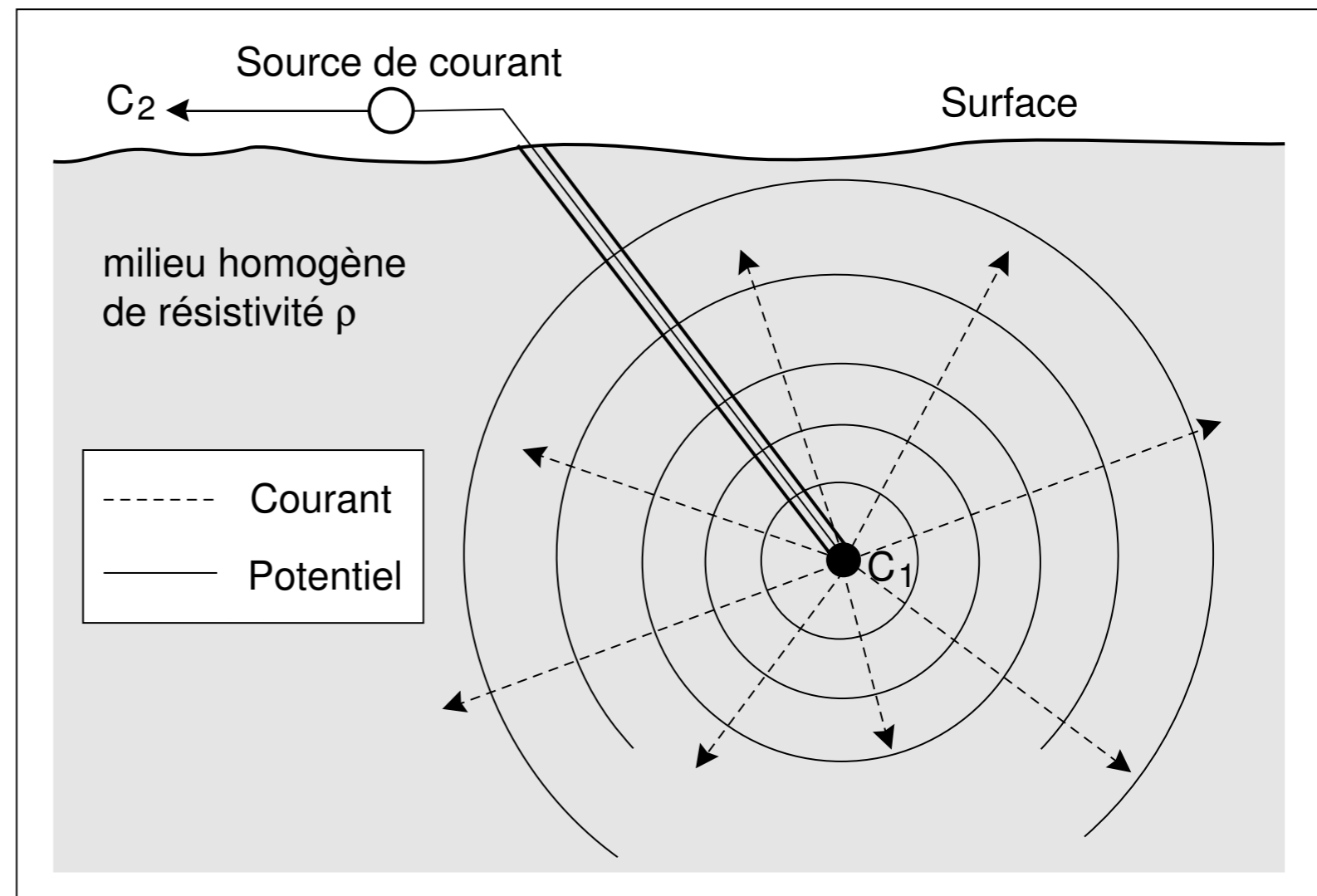
$$\nabla^2 V = 0$$

Par inspection, on trouve la solution:

$$V = -\frac{A}{r} + B$$

La constante B doit être nulle, car

$$r \rightarrow \infty, V \rightarrow 0$$



Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

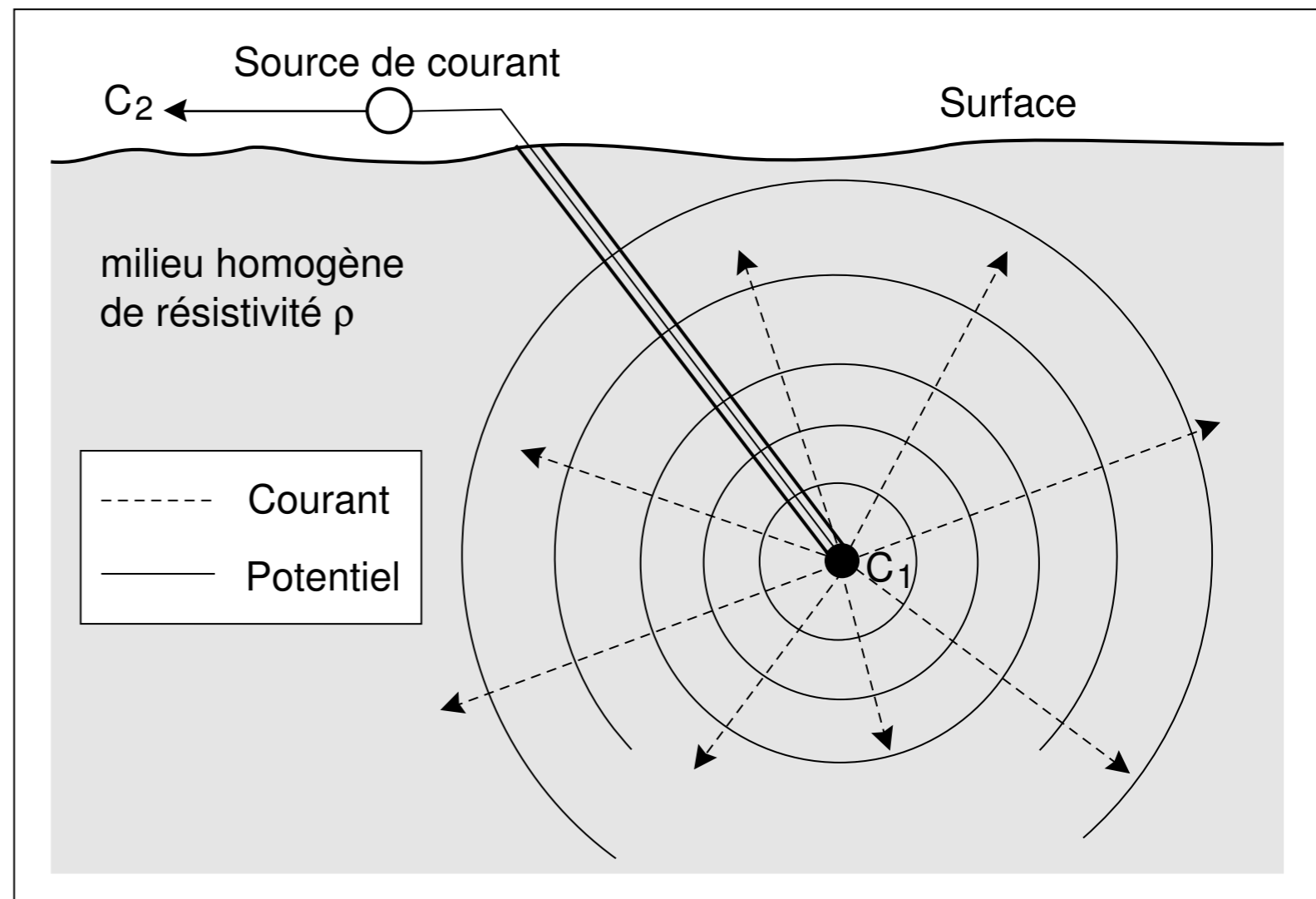
Exercice:

Trouvez la constante A:

$$V = -\frac{A}{r}$$

Réponse:

$$A = -\frac{I\rho}{4\pi}$$



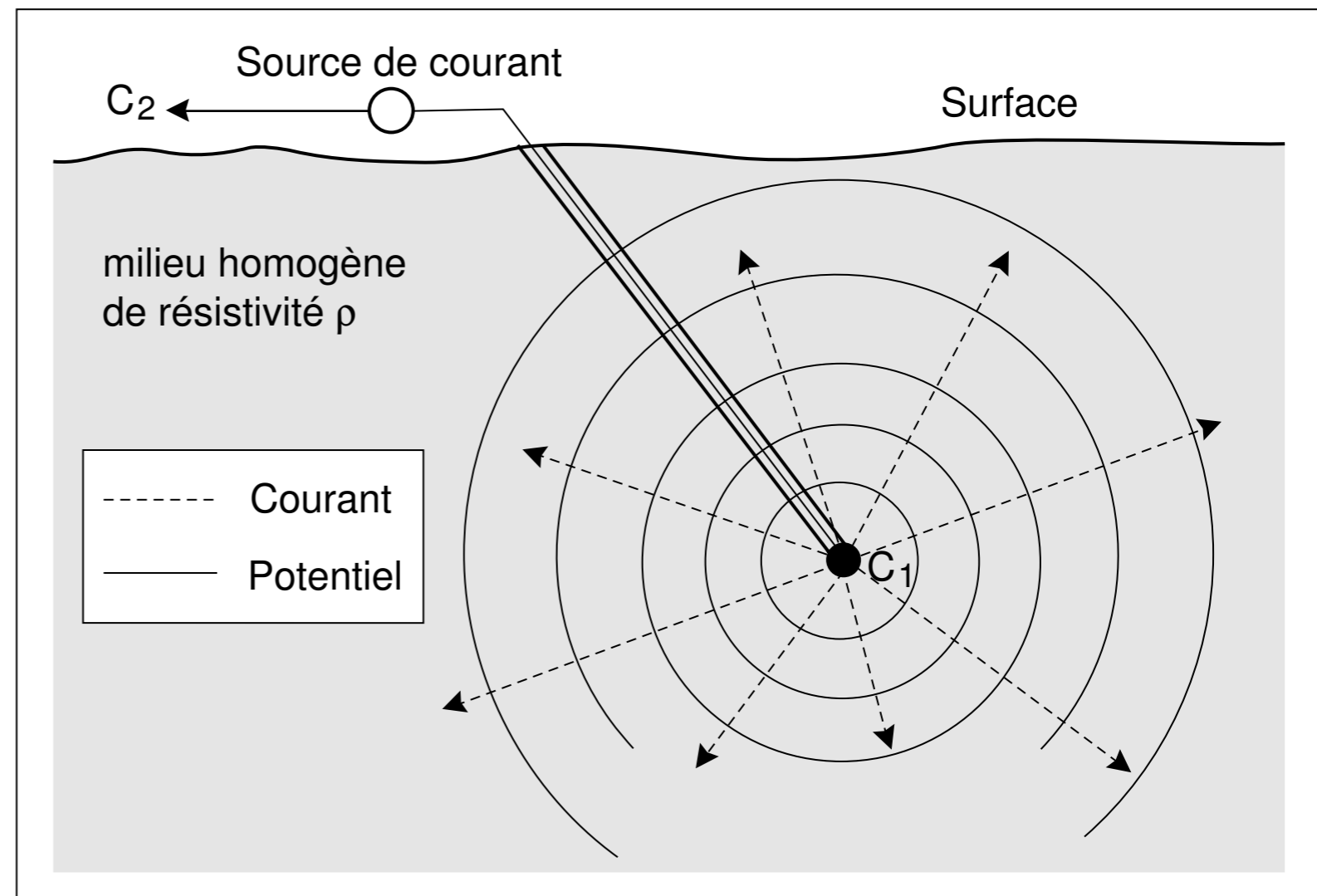
Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

Le potentiel pour une électrode dans un milieu homogène infini:

$$V = I\rho \frac{1}{4\pi r}$$

- Le potentiel est radial
- Dépend du courant et de la résistivité du milieu

En mesurant V et I, il est donc possible d'inférer la résistivité du sol.

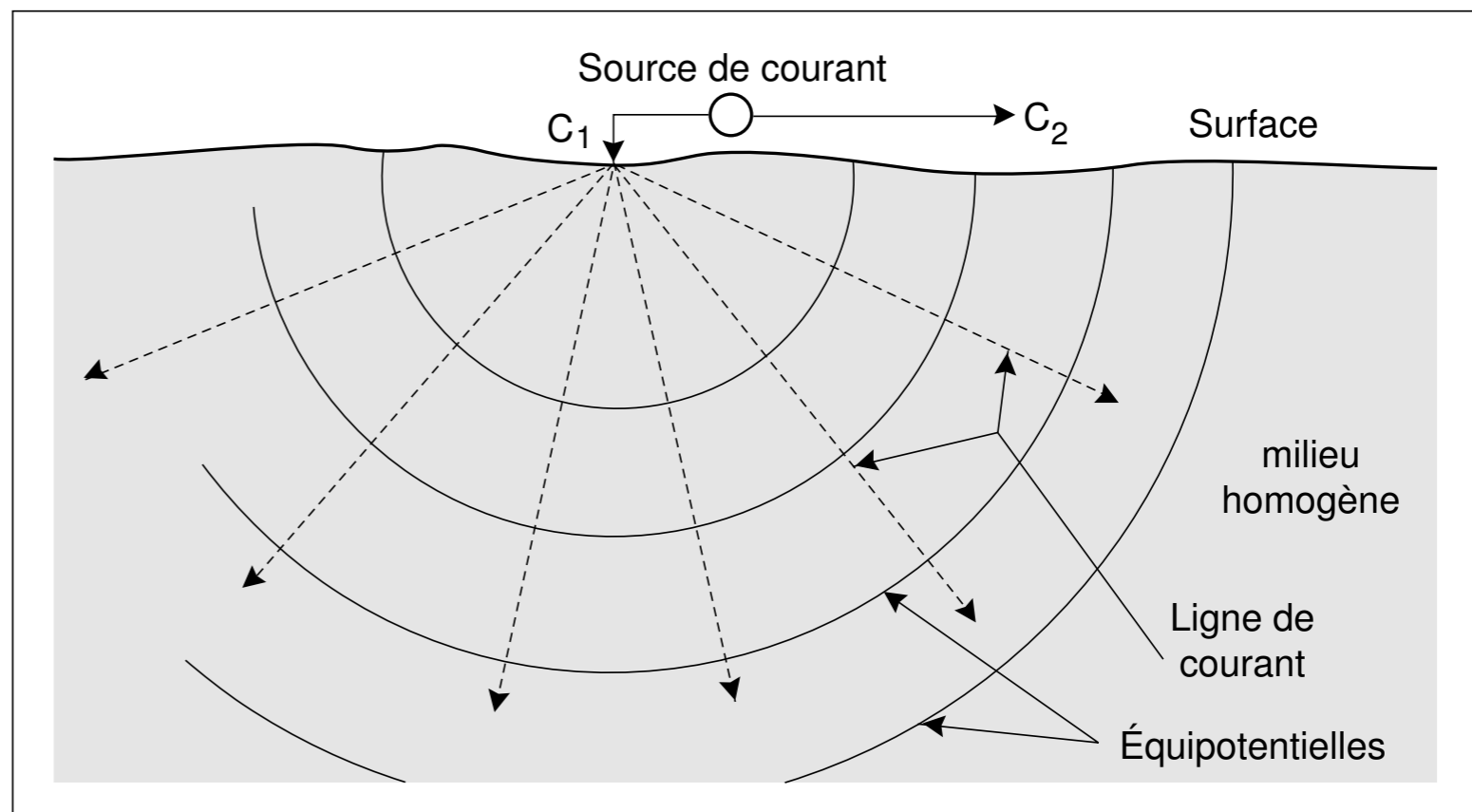


Distribution du potentiel: Électrode en surface

On place habituellement nos électrodes en surface!

La même solution s'applique, or la courant passe maintenant par une surface hémisphérique, qui a une surface deux fois moindre:

$$V = I\rho \frac{1}{2\pi r}$$





Pour mettre en oeuvre une méthode DC, il faut comprendre:

- 1. Comment une électrode induit un courant dans un sol homogène ?**
- 2. Comment le courant varie en présence de plusieurs électrodes ?**
- 3. Quelle est la distribution en profondeur du courant ?**
- 4. Comment varie le courant en présence d'hétérogénéités ?**
- 5. Qu'est-ce que la résistivité apparente d'un sol tabulaire ?**

Distribution du potentiel: Plusieurs électrodes

Pour faire passer un courant, on place habituellement deux électrodes. Quelle est la solution ?

À noter que l'équation de Laplace est linéaire:

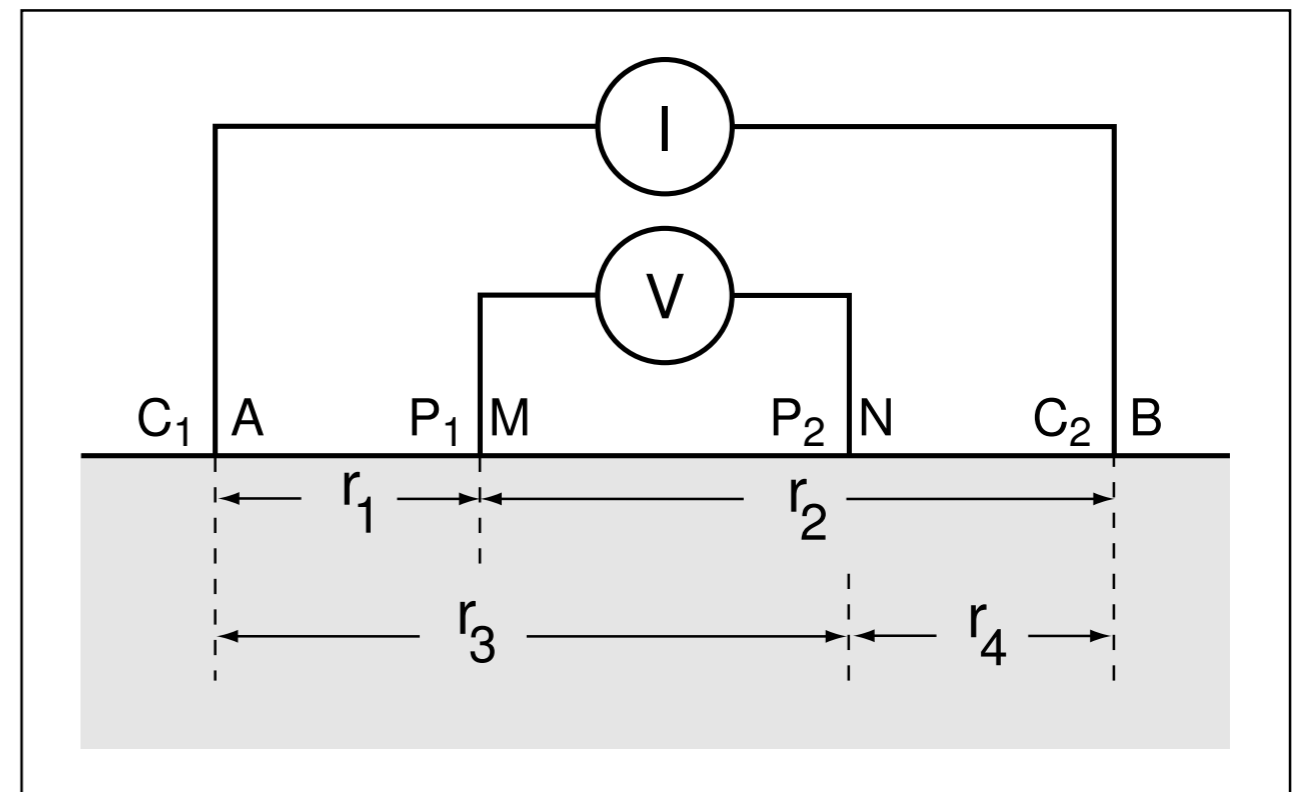
$$\nabla^2 V = 0$$

Si :

$$\nabla^2 V_1 = 0 \quad \nabla^2 V_2 = 0$$

alors:

$$\nabla^2 (V_1 + V_2) = 0$$



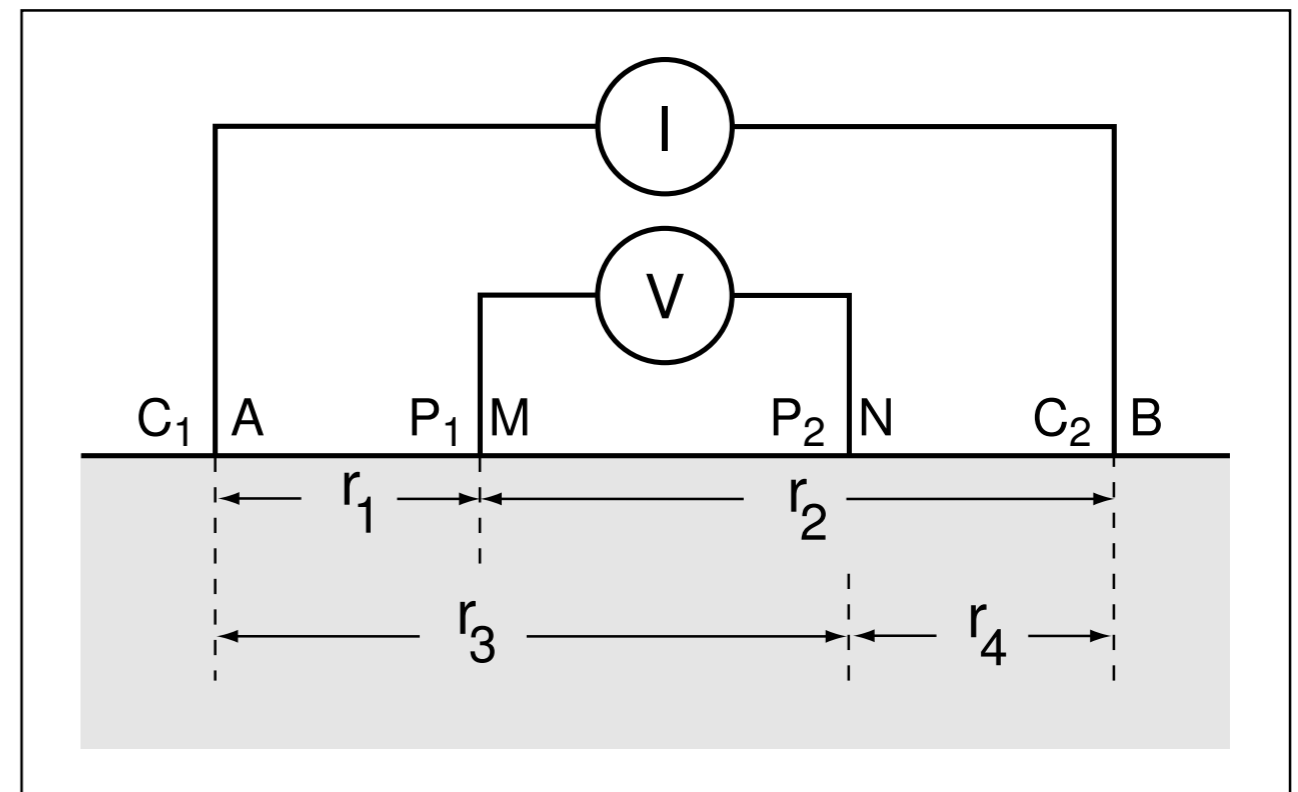
Distribution du potentiel: Plusieurs électrodes

Pour faire passer un courant, on place habituellement deux électrodes. Quelle est la solution ?

Alors, pour une électrode de surface qui injecte I et une autre électrode qui reçoit I :

$$\begin{aligned} V_{tot} &= V_A + V_B \\ &= \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \end{aligned}$$

M et N: électrodes de potentiel
A et B: électrodes de courant



Distribution du potentiel: Plusieurs électrodes

Pour 4 électrodes:

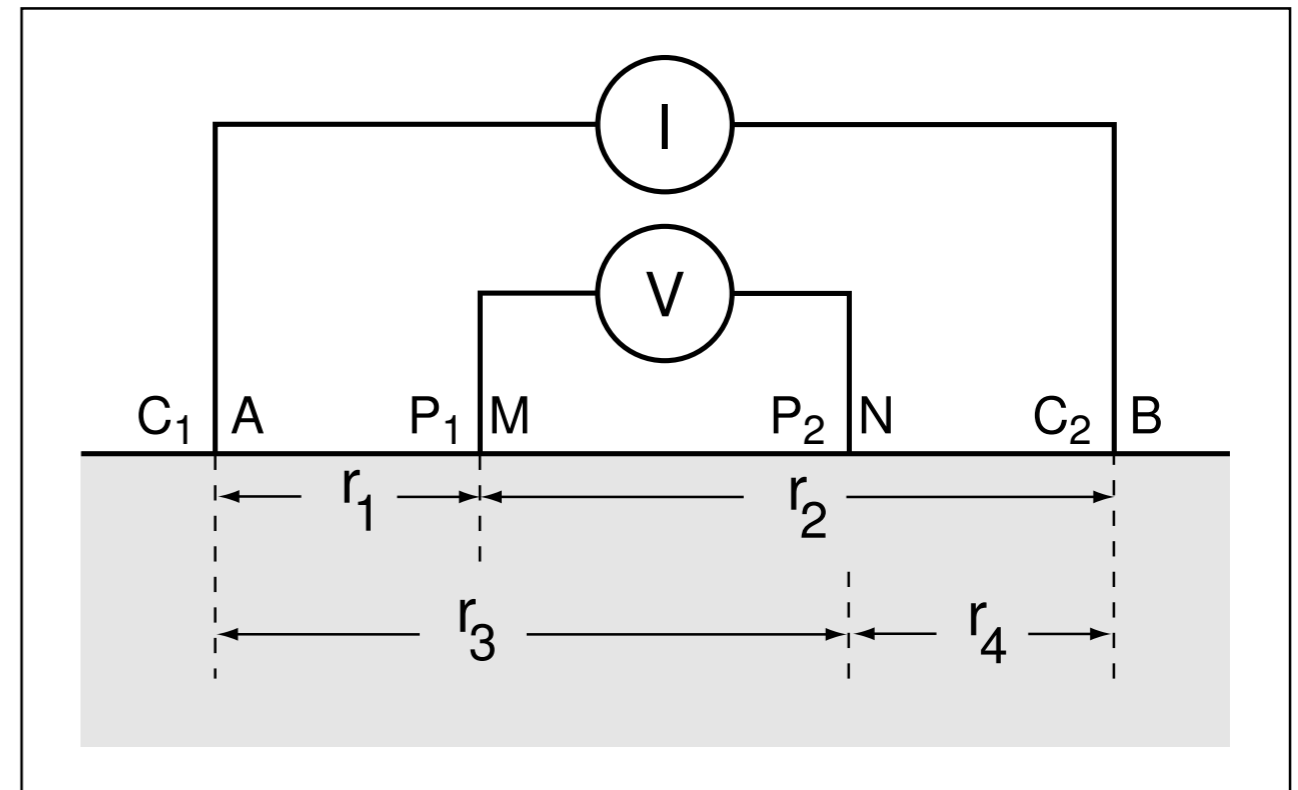
$$\Delta V_{MN} = \frac{I_{AB}\rho}{2\pi} \left(\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \right)$$

On écrit de façon plus générale:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$$

avec le facteur géométrique

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}}}$$



Résistivité apparente

Il est donc possible de mesurer la résistivité du sol avec 4 électrodes

$$\rho_a = K \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$$

Attention, nous avons fait la supposition que le sol est **homogène**.

Résistivité apparente:

- Résistivité obtenue avec la formule d'un sol homogène
- Pour un sol hétérogène, n'est pas égale à la résistivité vraie
- Les sondages et l'inversion traduisent la résistivité apparente en résistivité vraie

Distribution du potentiel: Plusieurs électrodes

Dispositif de Wenner: $r_1 = r_4 = a$

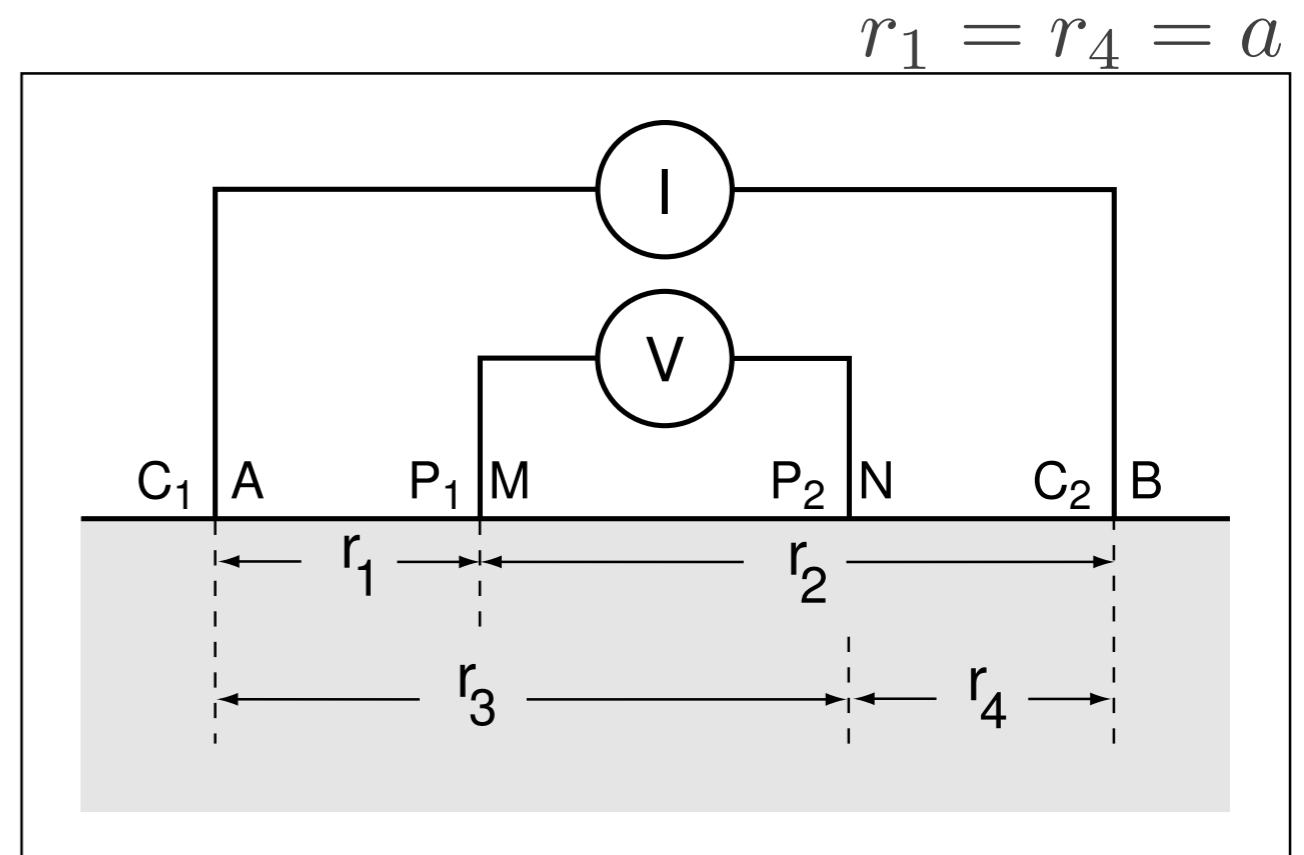
Si la distance entre les électrodes est a :

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a}}$$

$$= 2\pi a$$

Et la résistivité apparente est:

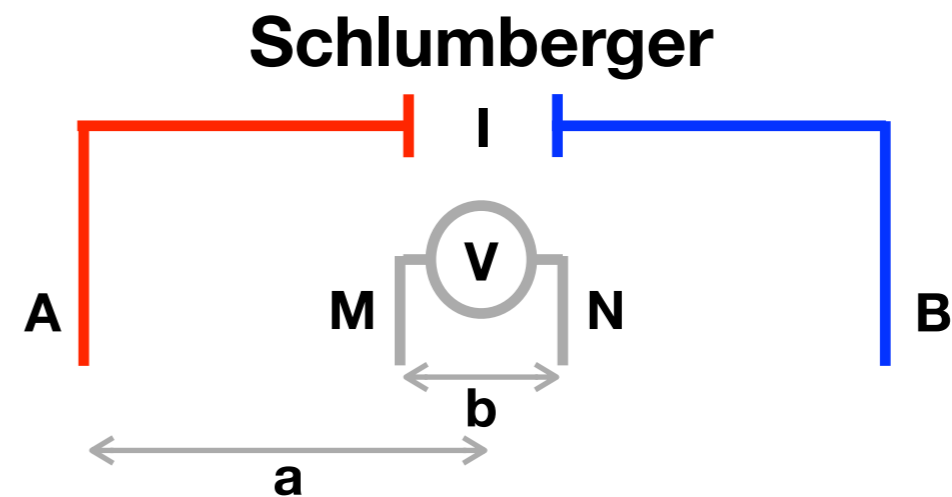
$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$



Distribution du potentiel: Plusieurs électrodes

Exercice: Montrez que pour la configuration de Schlumberger, la facteur géométrique est:

$$K = \pi \frac{a^2}{b} \left(1 - \frac{b^2}{4a^2} \right)$$





Pour mettre en oeuvre une méthode DC, il faut comprendre:

- 1. Comment une électrode induit un courant dans un sol homogène ?**
- 2. Comment le courant varie en présence de plusieurs électrodes ?**
- 3. Quelle est la distribution en profondeur du courant ?**
- 4. Comment varie le courant en présence d'hétérogénéités ?**
- 5. Qu'est-ce que la résistivité apparente d'un sol tabulaire ?**

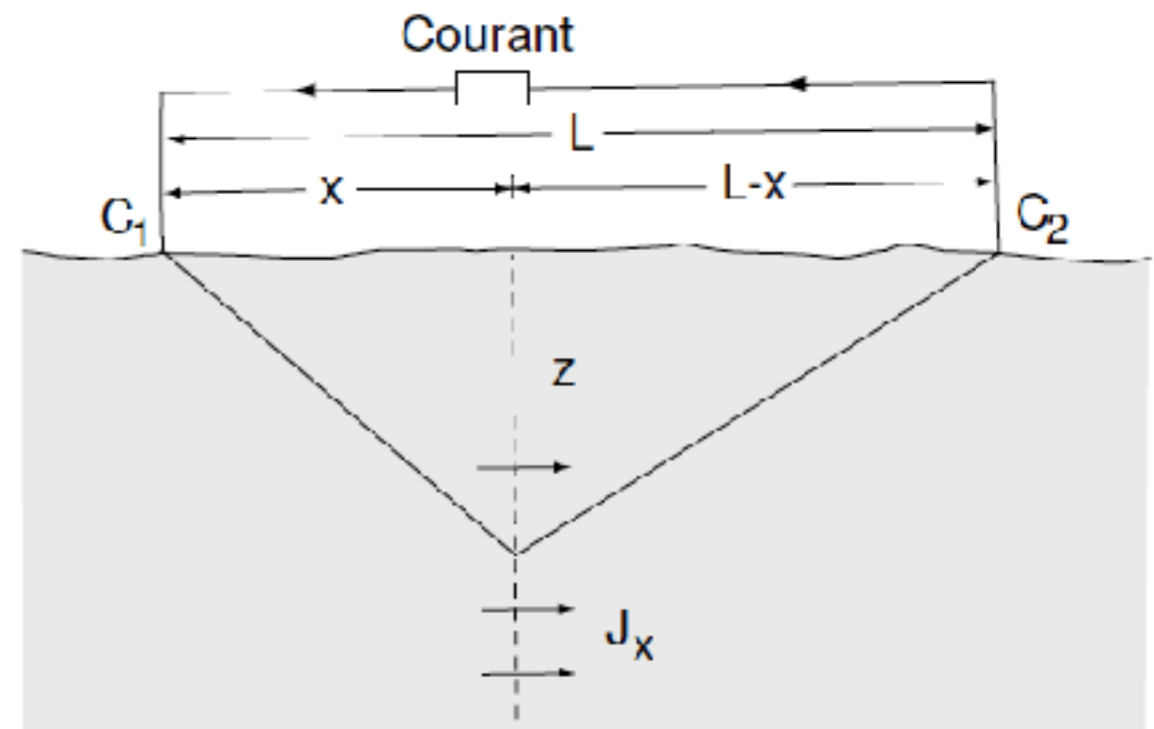
Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation dépend de l'écartement entre les électrodes

On peut montrer (voir notes de cours):

$$J_x \Big|_{x=L/2} = \frac{I}{2\pi} \frac{L}{(z^2 + L^2/4)^{3/2}}$$

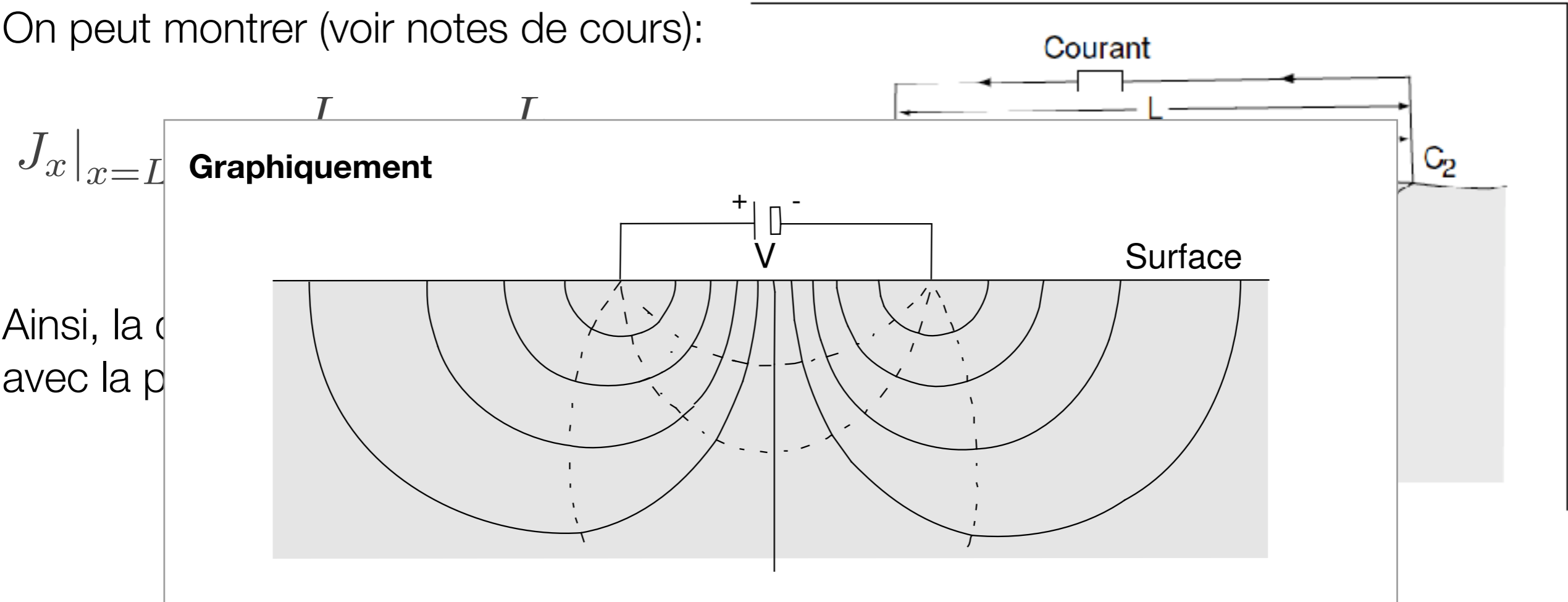
Ainsi, la densité de courant diminue avec la profondeur !



Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation dépend de l'écartement entre les électrodes

On peut montrer (voir notes de cours):



$$J_x |_{x=L}$$

Graphiquement

Ainsi, la c
avec la p

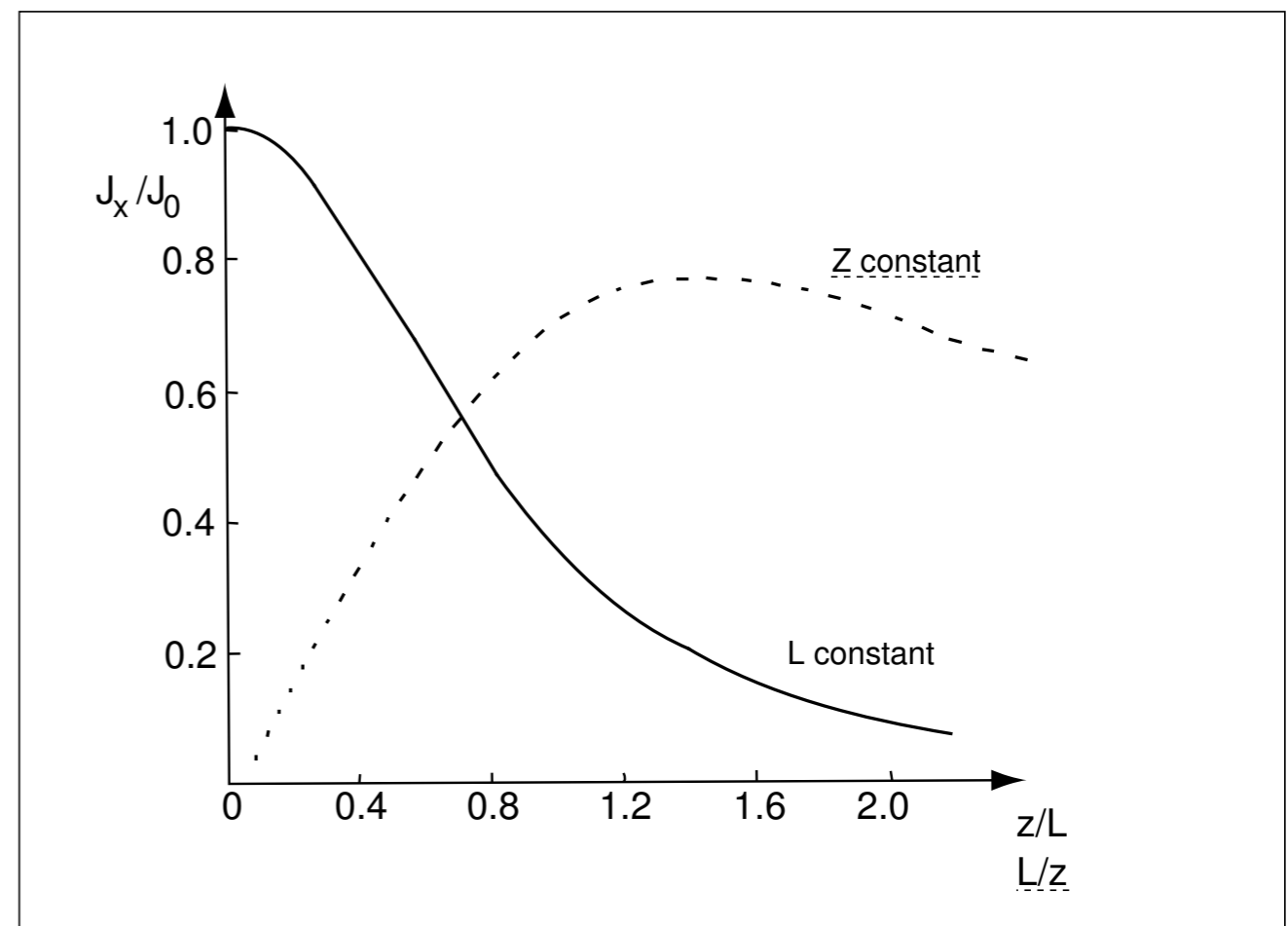
Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation dépend de l'écartement entre les électrodes

On peut montrer (voir notes de cours):

$$J_x \Big|_{x=L/2} = \frac{I}{2\pi} \frac{L}{(z^2 + L^2/4)^{3/2}}$$

Ainsi, la densité de courant diminue avec la profondeur !



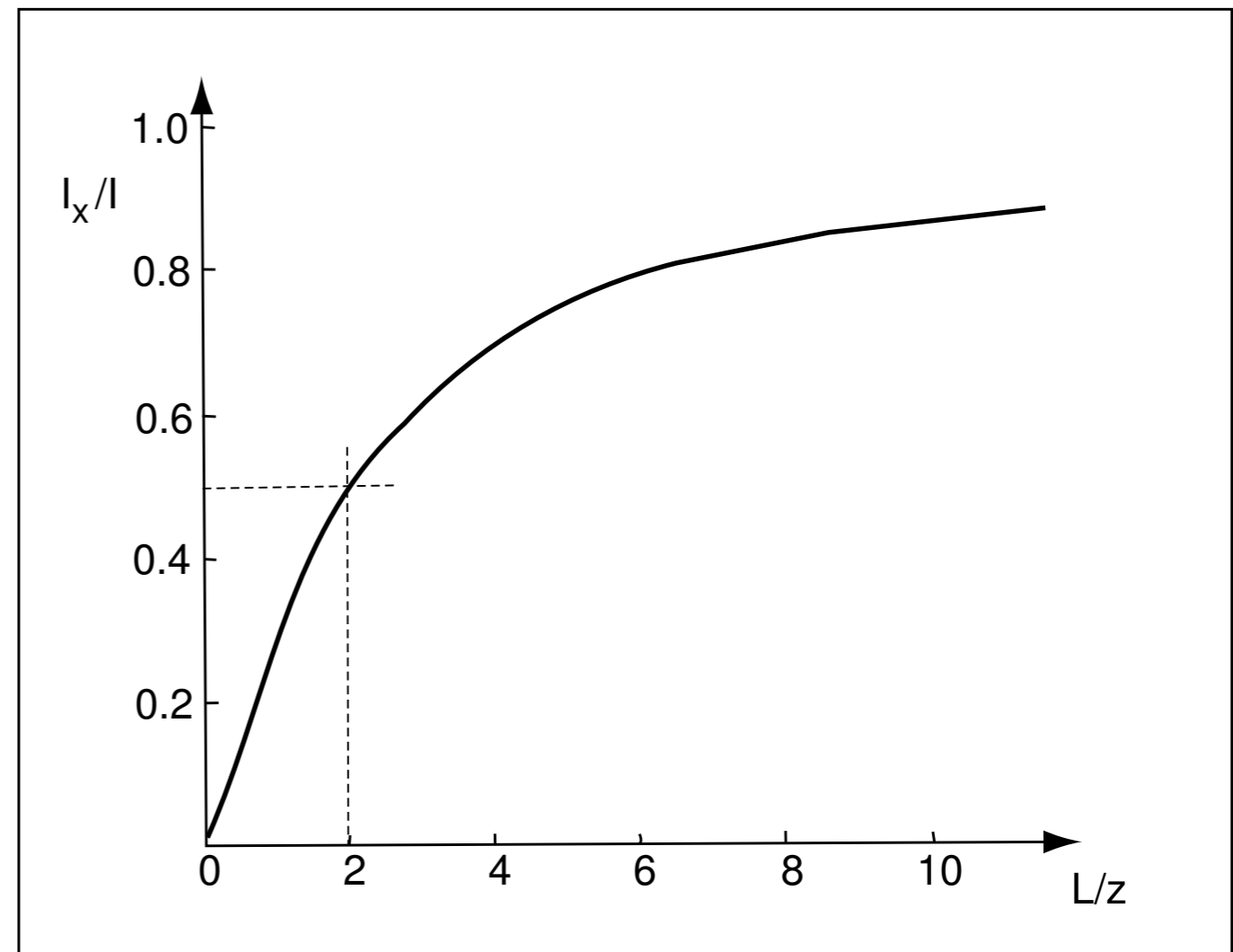
Profondeur d'investigation

- Pour une profondeur donnée, la densité de courant est maximale pour un écartement L
- Plus l'écartement L est grand, plus les lignes de courant pénètrent en profondeur

Le courant entre la surface et une profondeur z est donné par

$$\frac{I_x}{I} = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{2z}{L}$$

La moitié du courant passe entre la surface et $z = L/2$!



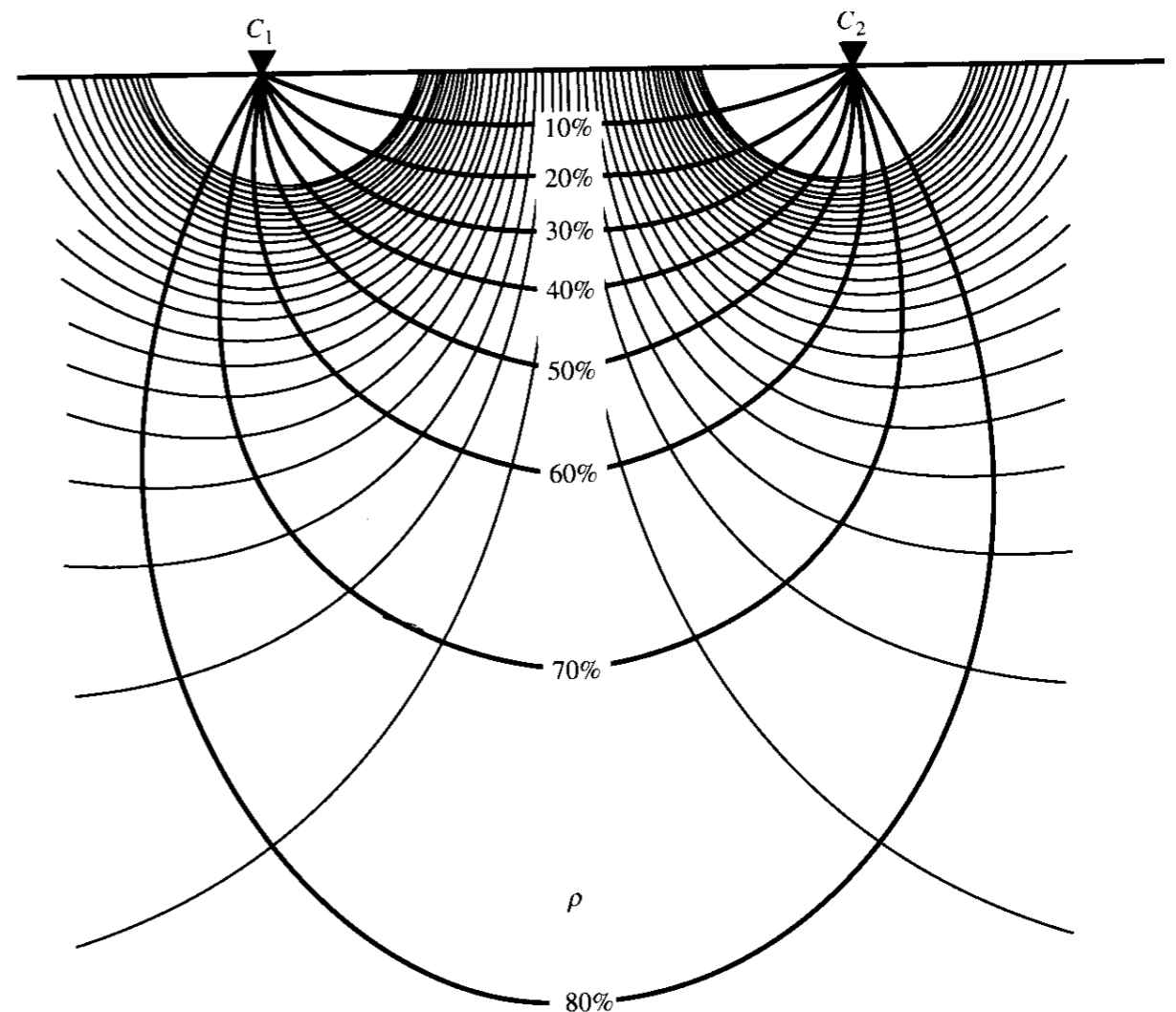
Profondeur d'investigation

- Pour une profondeur donnée, la densité de courant est maximale pour un écartement L
- Plus l'écartement L est grand, plus les lignes de courant pénètrent en profondeur

Le courant entre la surface et une profondeur z est donné par

$$\frac{I_x}{I} = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{2z}{L}$$

La moitié du courant passe entre la surface et $z = L/2$!





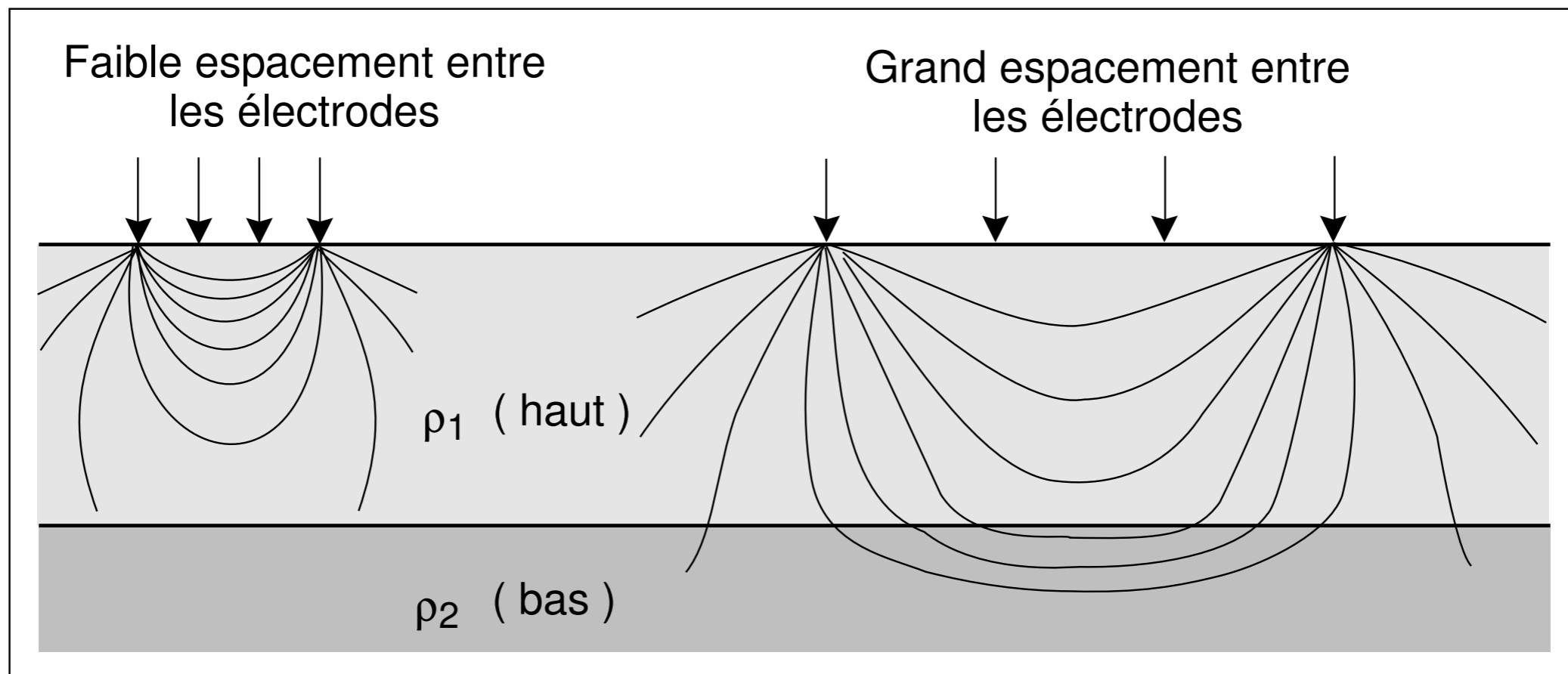
Pour mettre en oeuvre une méthode DC, il faut comprendre:

- 1. Comment une électrode induit un courant dans un sol homogène ?**
- 2. Comment le courant varie en présence de plusieurs électrodes ?**
- 3. Quelle est la distribution en profondeur du courant ?**
- 4. Comment varie le courant en présence d'hétérogénéités ?**
- 5. Qu'est-ce que la résistivité apparente d'un sol tabulaire ?**

Déviations des lignes de courants

Qu'arrive-t-il au courant lorsque le sol n'est pas homogène ?

Considérons un sol tabulaire à deux couches.



Déviatation des lignes de courants

Qu'arrive-t-il au courant lorsque le sol n'est pas homogène ?

Deux conditions frontières s'appliquent:

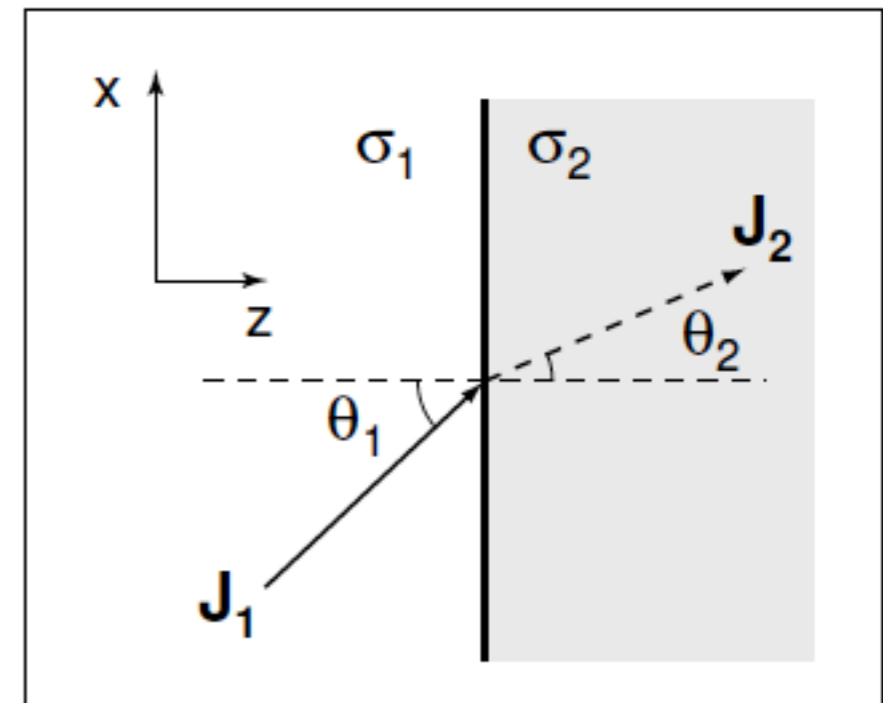
1. Le potentiel est continu: $V^{(1)} = V^{(2)}$

$$\frac{\partial V^{(1)}}{\partial x} = \frac{\partial V^{(2)}}{\partial x}$$

$$E_t^{(1)} = E_t^{(2)}$$

2. La densité de courant passant par l'interface est continue:

$$J_n^{(1)} = J_n^{(2)}$$



Déviations des lignes de courants

Qu'arrive-t-il au courant lorsque le sol n'est pas homogène ?

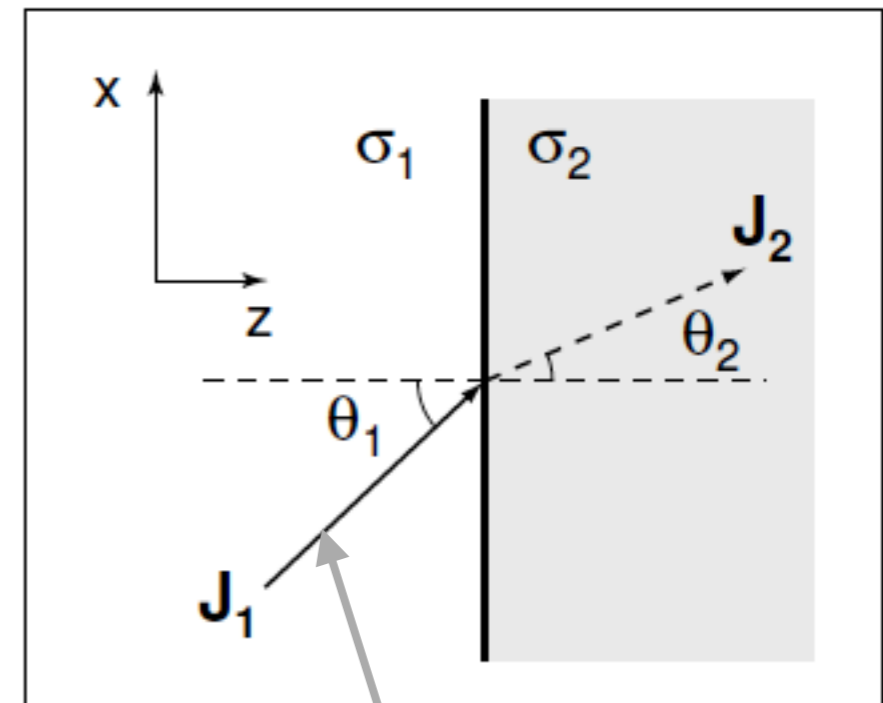
On peut donc obtenir une loi de la réfraction.

$$E_t^{(1)} = E_t^{(2)} \longrightarrow J_x^{(1)} \rho_1 = J_x^{(2)} \rho_2$$

En divisant par: $J_n^{(1)} = J_n^{(2)}$

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

- Si $\rho_1 < \rho_2$, déviation vers la normale
- Si $\rho_1 > \rho_2$, déviation vers l'interface

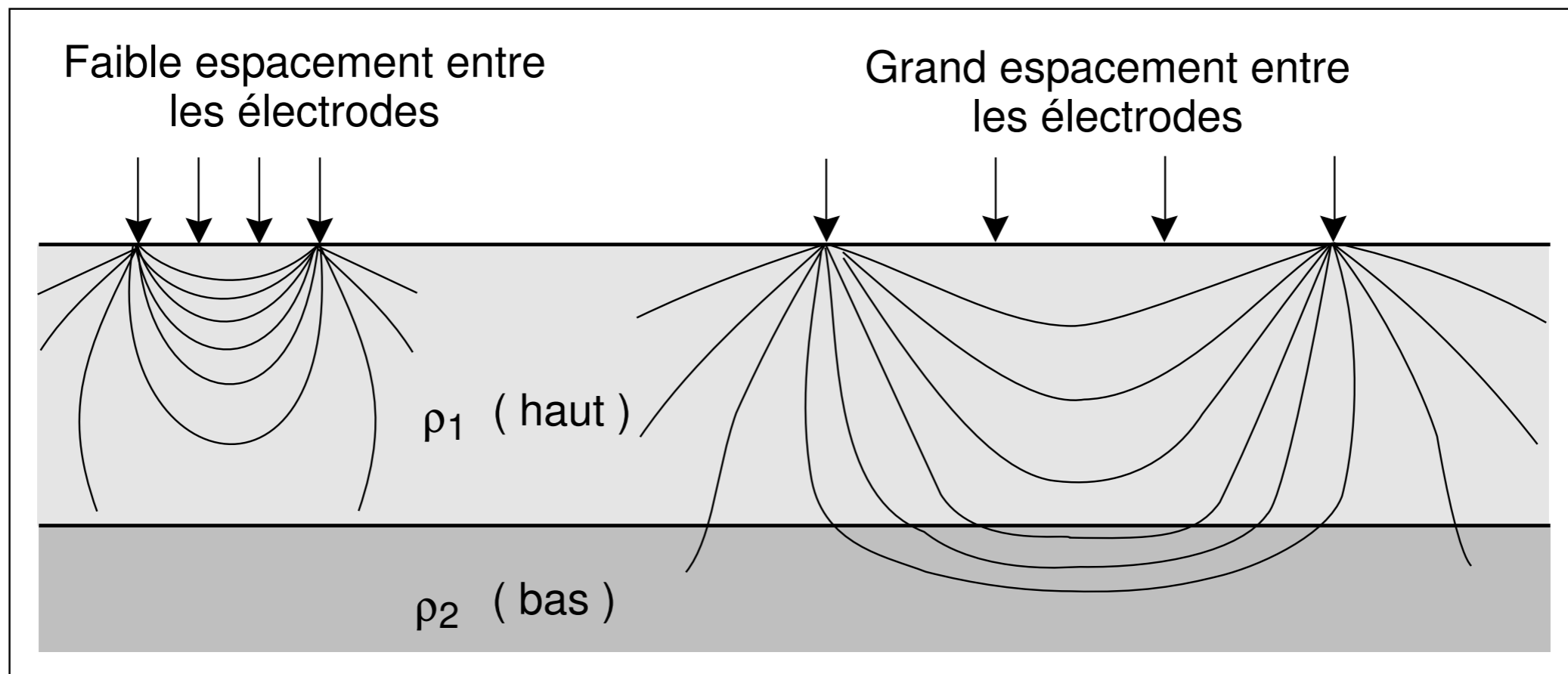


$$\tan \theta = \frac{J_x}{J_z}$$

Déviations des lignes de courants

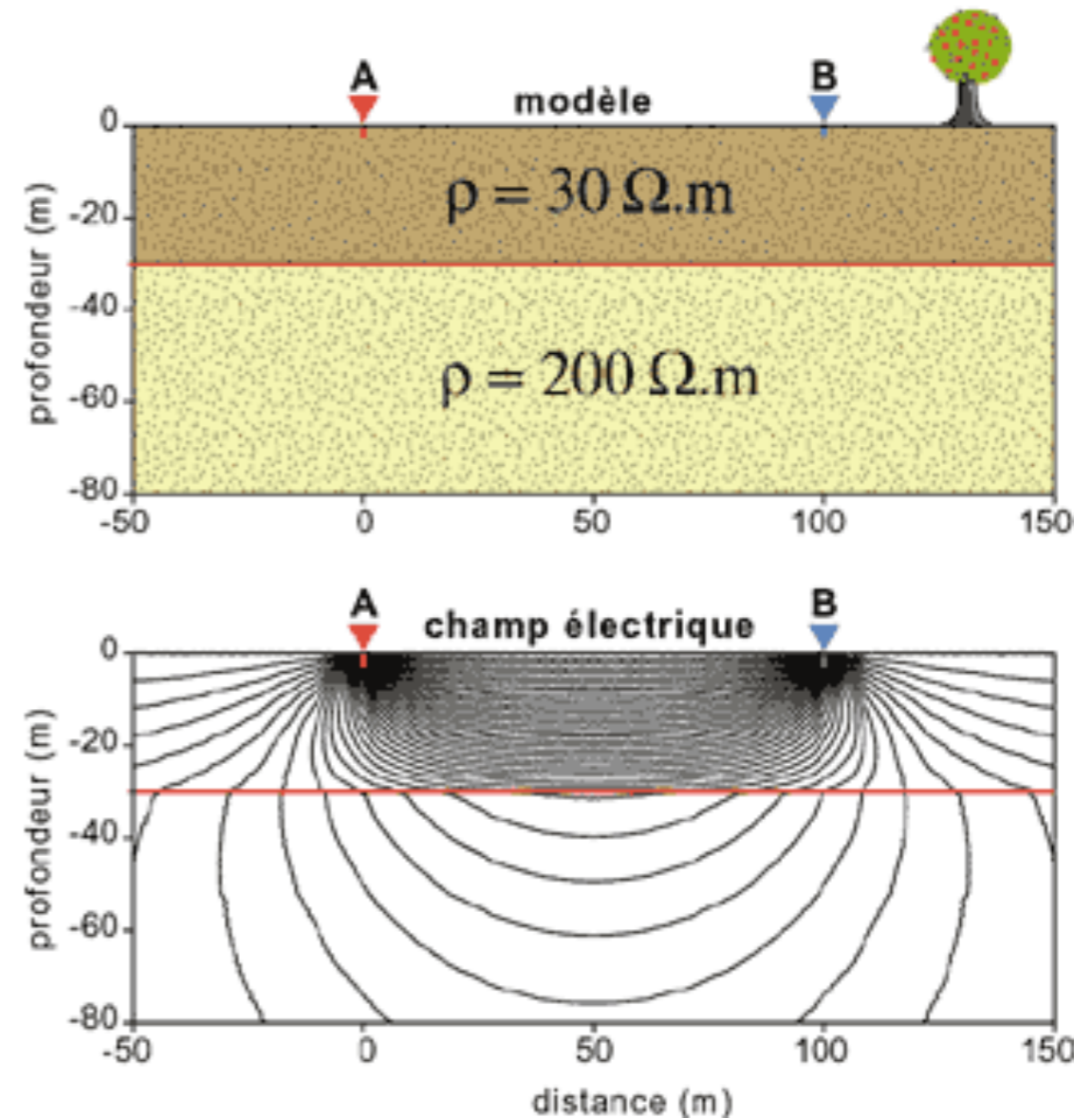
Qu'arrive-t-il au courant lorsque le sol n'est pas homogène ?

Quelle est la couche la plus conductrice ?



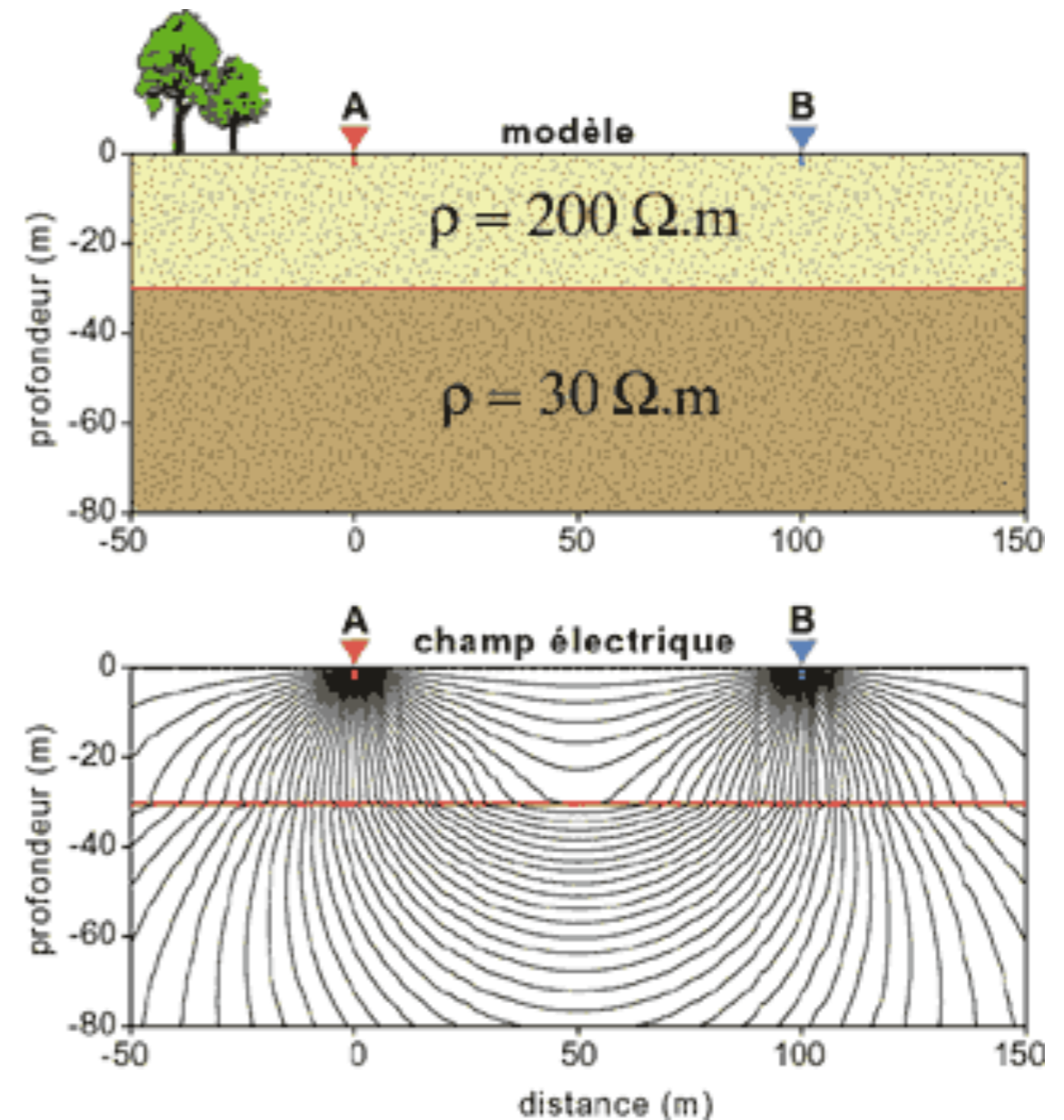
Déviations des lignes de courants

- Cas 1: $\rho_2 > \rho_1$
- La courant a tendance à vouloir rester dans la couche 1 (moins résistance)
- Augmentation de la densité de courant dans la couche 1
- Augmentation de ΔV
($\mathbf{J} = -\sigma \nabla V$)
- Sachant que $\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$
- Conséquence: $\rho_a > \rho_1$



Déviations des lignes de courants

- Cas 2: $\rho_2 < \rho_1$
- La courant a tendance à vouloir aller dans la couche 2 (moins résistance)
- Diminution de la densité de courant dans la couche 1
- Diminution de ΔV
($\mathbf{J} = -\sigma \nabla V$)
- Sachant que $\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$
- Conséquence: $\rho_a < \rho_1$



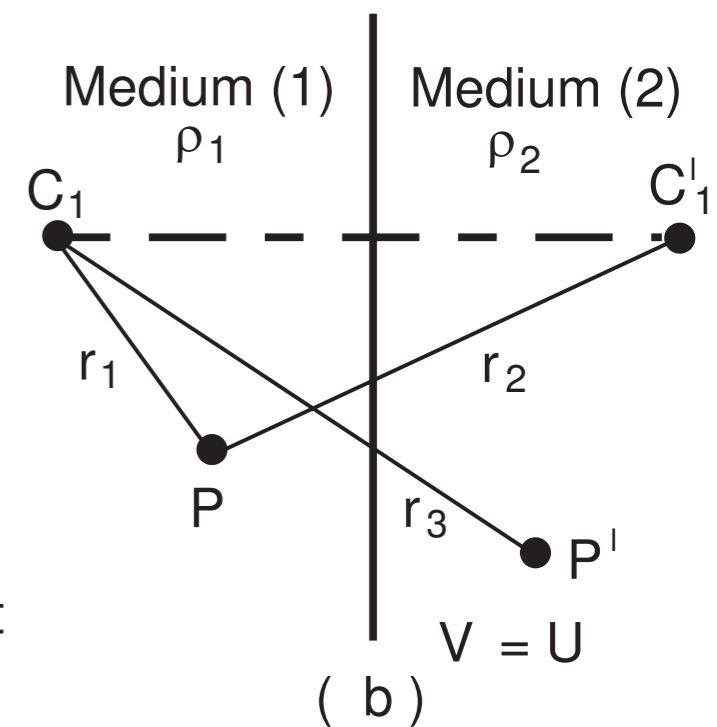
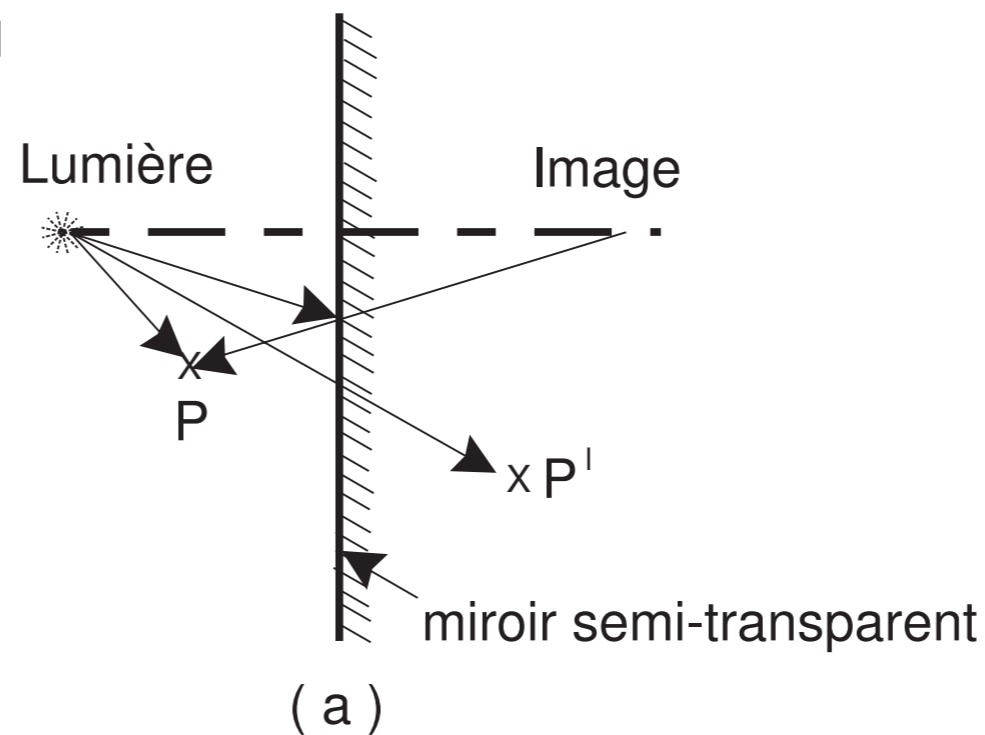
Modification du potentiel: méthode des images

Comment le potentiel est affecté par les hétérogénéités ?

À l'interface, un portion k du courant sera réfléchi.

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Le coefficient de réflexion est entre -1 et 1.



Modification du potentiel: méthode des images

Comment le potentiel est affecté par les hétérogénéités ?

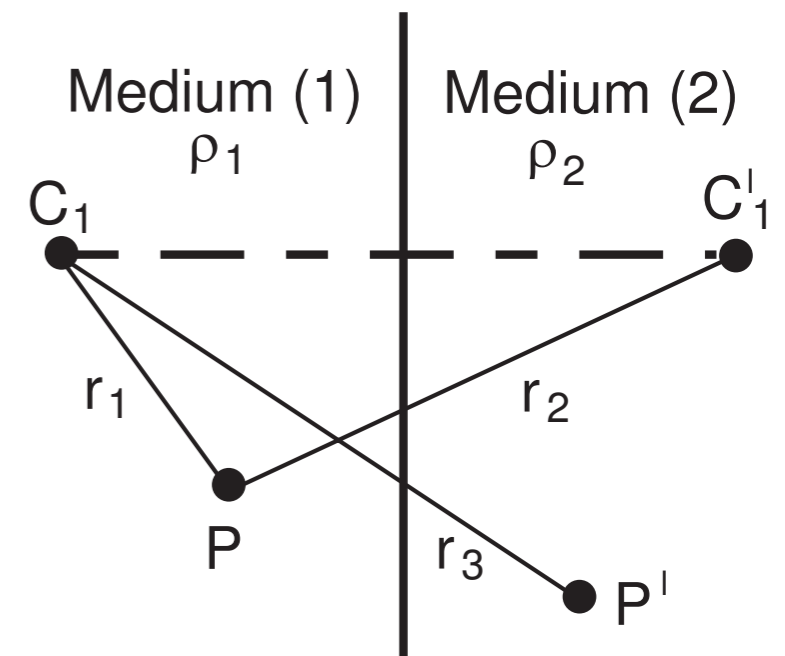
Exemple: Proximité d'une interface

Le potentiel pour un milieu homogène infini:

$$V = \frac{\rho I}{4\pi r}$$

Au point P:

$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi r_1} + k \frac{\rho I}{4\pi r_2} \longrightarrow k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$



Modification du potentiel: méthode des images

Comment le potentiel est affecté par les hétérogénéités ?

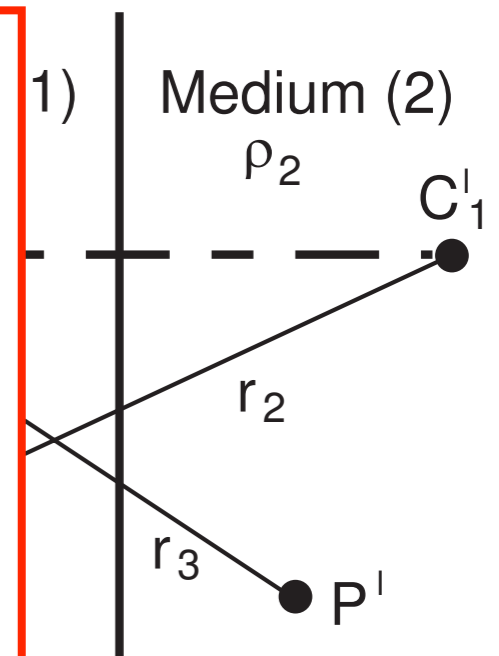
Exemple: Proximité d'une interface

Deux cas:

- Si $\rho_2 > \rho_1$, le potentiel dans le milieu 1 augmente
- Si $\rho_2 < \rho_1$, le potentiel dans le milieu 1 diminue

Le potentiel

Au point P:

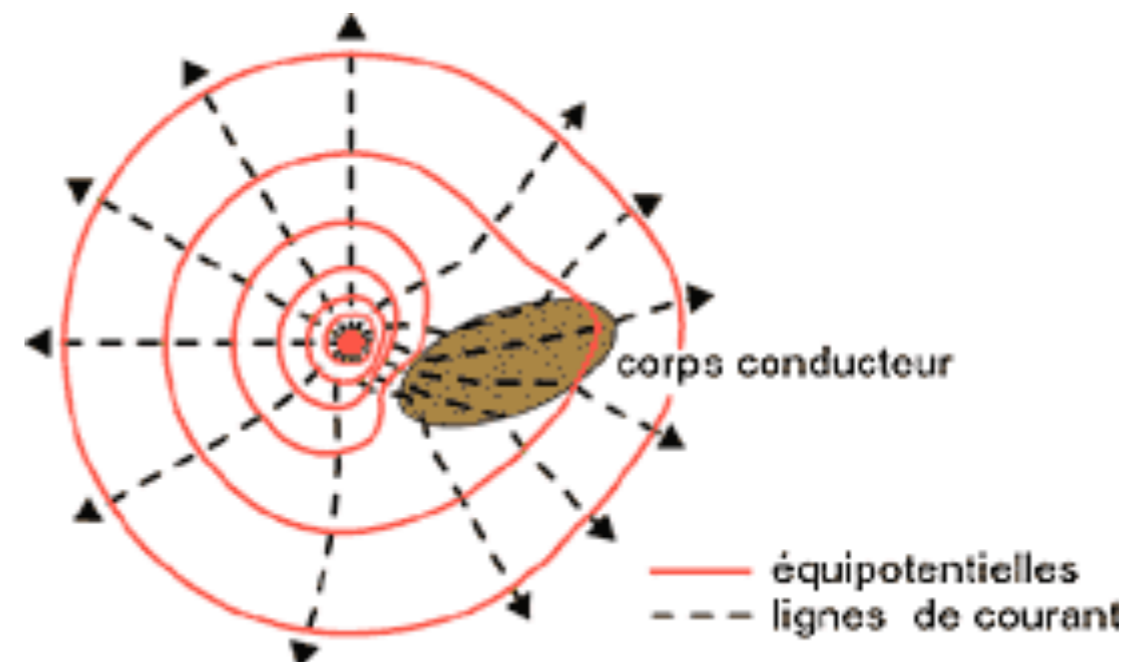
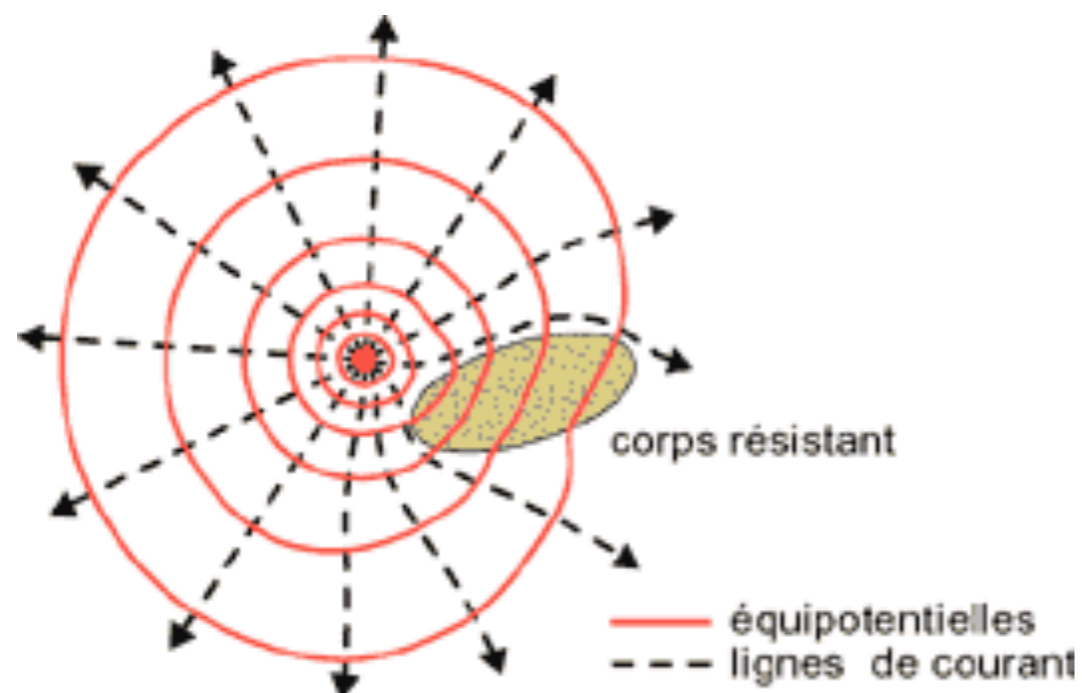


$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi r_1} + k \frac{\rho I}{4\pi r_2} \longrightarrow k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Déviatation du courant et du potentiel

En présence d'hétérogénéités:

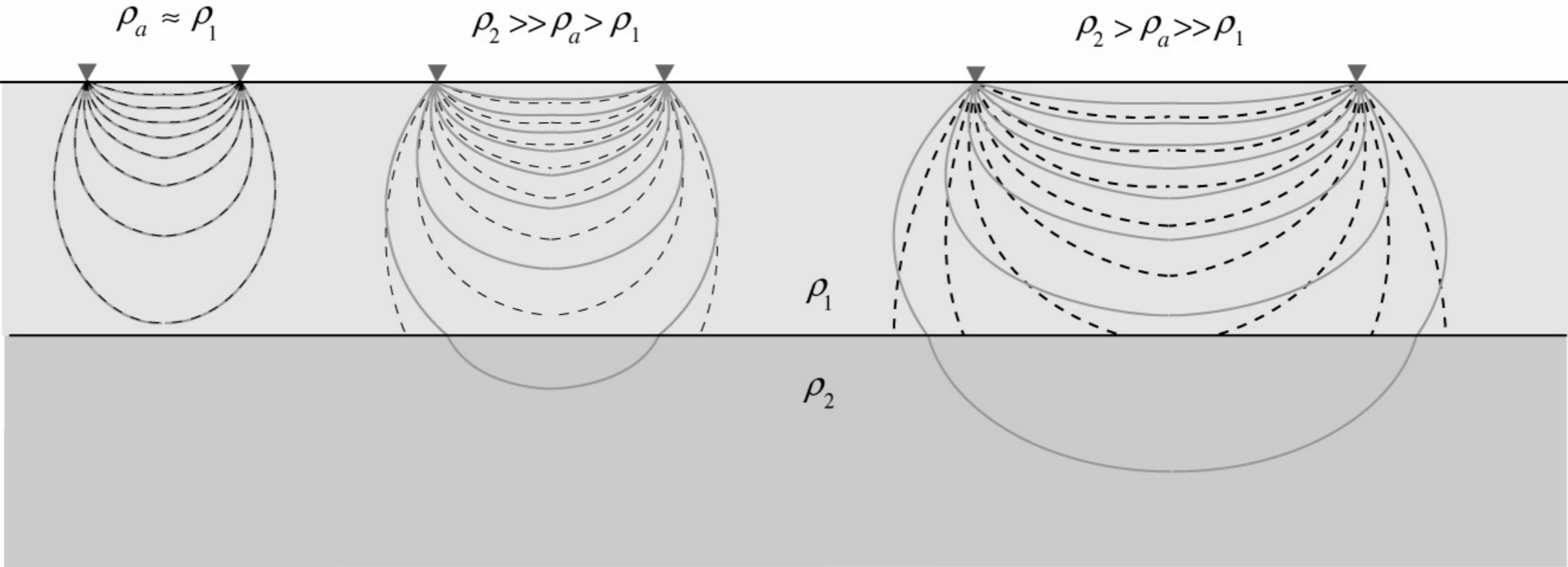
- Les lignes de courants sont attirés par les conducteurs et repoussés par les corps résistants
- Le potentiel augmente à proximité d'un corps résistant et diminue en présence d'un corps conducteur



En résumé

La déformation des équipotentiels affectera la résistivité apparente

$$\rho_a = K \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$$



----- Current flow lines – homogeneous subsurface $\rho_2 > \rho_1$
 ————— Current flow lines – horizontal interface

(Burger et al. 2005)



Pour mettre en oeuvre une méthode DC, il faut comprendre:

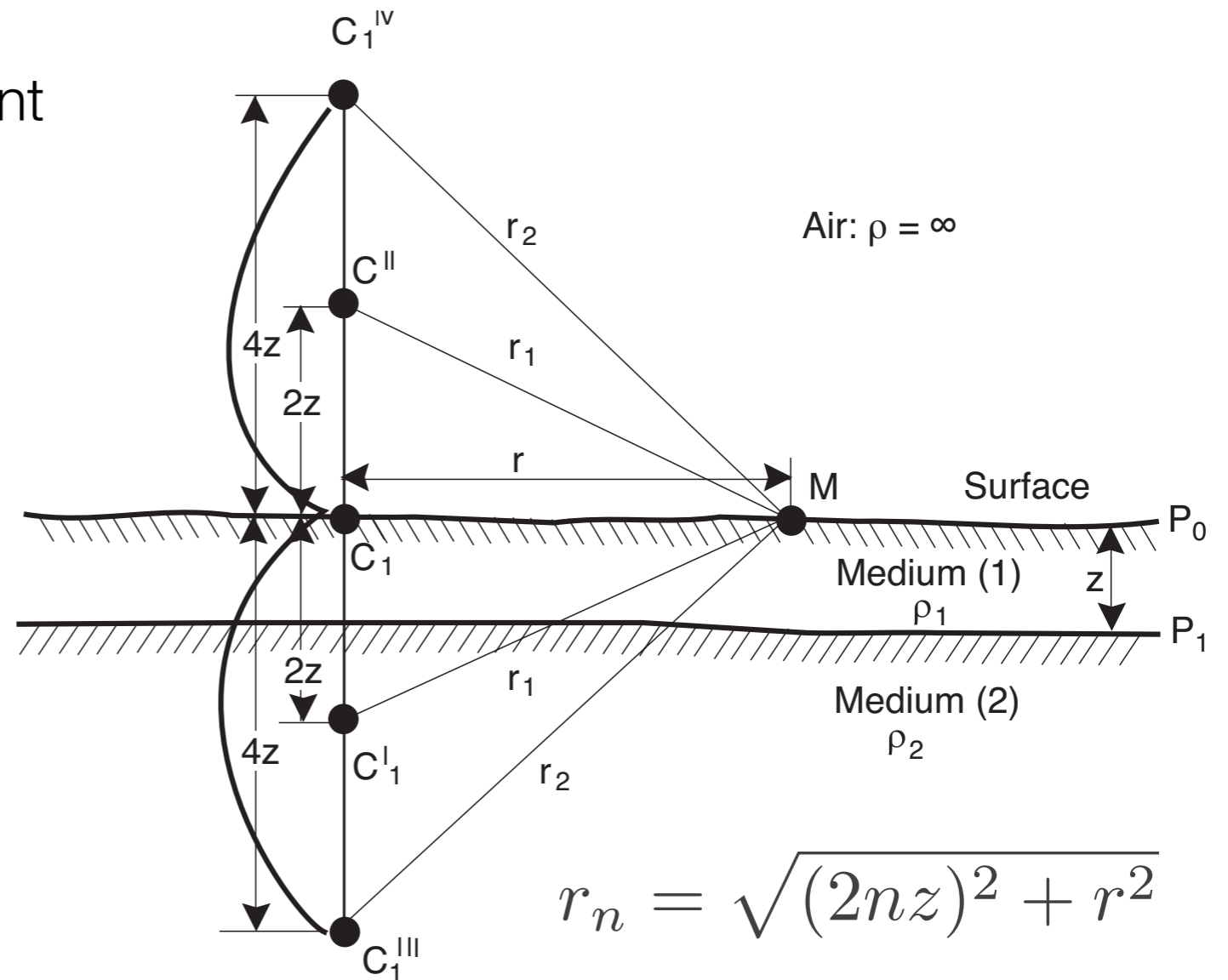
- 1. Comment une électrode induit un courant dans un sol homogène ?**
- 2. Comment le courant varie en présence de plusieurs électrodes ?**
- 3. Quelle est la distribution en profondeur du courant ?**
- 4. Comment varie le courant en présence d'hétérogénéités ?**
- 5. Qu'est-ce que la résistivité apparente d'un sol tabulaire ?**

Résistivité apparente: méthode des images

Peut-on mesurer la résistivité d'un milieu à deux couches ?

Des réflexions multiples se produisent pour un cas à 2 couches.

$$V_M = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{k}{r_1} + \frac{k}{r_1} + \frac{k^2}{r_2} + \frac{k^2}{r_2} + \frac{k^n}{r_n} + \frac{k^n}{r_n} \right)$$

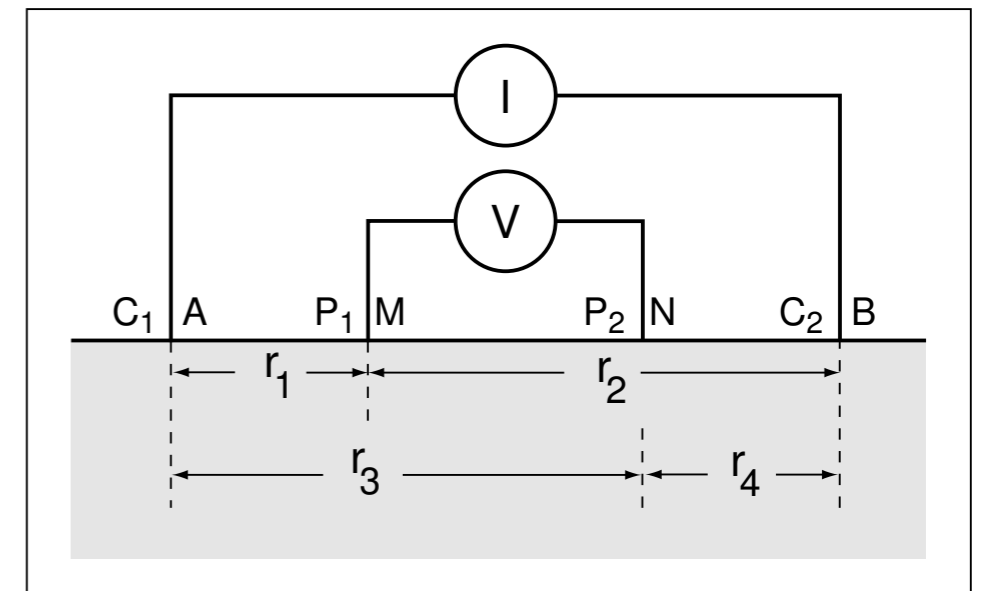


Résistivité apparente: méthode des images

Peut-on mesurer la résistivité d'un milieu à deux couches ?

Pour une électrode:

$$V_M = \frac{\rho_1 I}{2\pi r} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{1 + (2nz/r)^2}} \right)$$



Pour 4 électrodes en dispositif Wenner:

$$r_1 = r_4 = a$$

$$\Delta V = \frac{I}{2\pi a} \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (2nz/a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + (2nz/a)^2}} \right) \right]$$

Résistivité apparente: méthode des images

Peut-on mesurer la résistivité d'un milieu à deux couches ?

La résistivité apparente pour un milieu homogène était:

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

Pour 2 couches, nous avons:

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (2nz/a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + (2nz/a)^2}} \right) \right]$$

Pour n couches: C'est compliqué, on utilise la résolution numérique.



Pour mettre en oeuvre une méthode DC, il faut comprendre:

- 1. Comment une électrode induit un courant dans un sol homogène ?**
- 2. Comment le courant varie en présence de plusieurs électrodes ?**
- 3. Quelle est la distribution en profondeur du courant ?**
- 4. Comment varie le courant en présence d'hétérogénéités ?**
- 5. Qu'est-ce que la résistivité apparente d'un sol tabulaire ?**

Sondages électriques

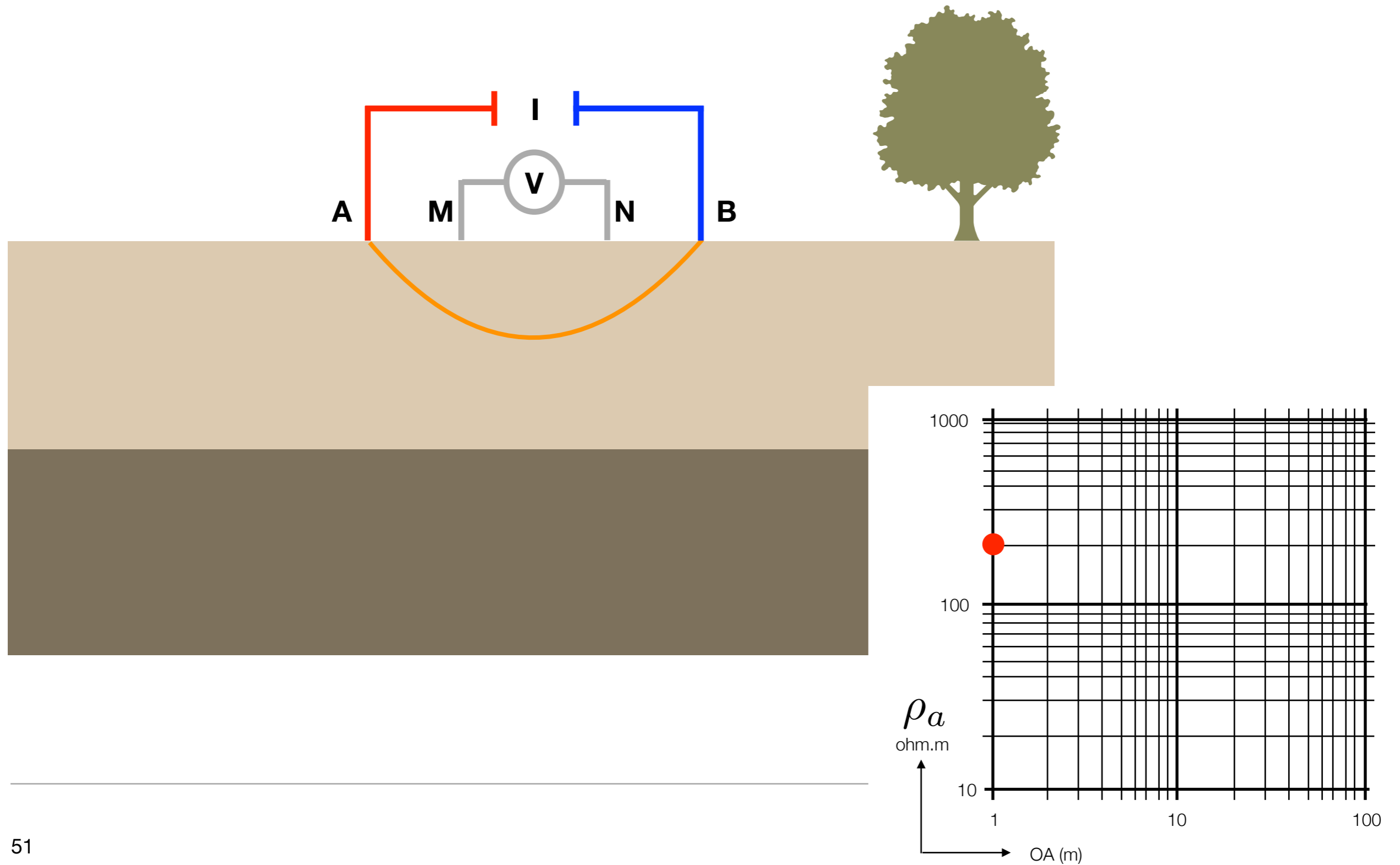
Sondages électriques

Nous avons vu que:

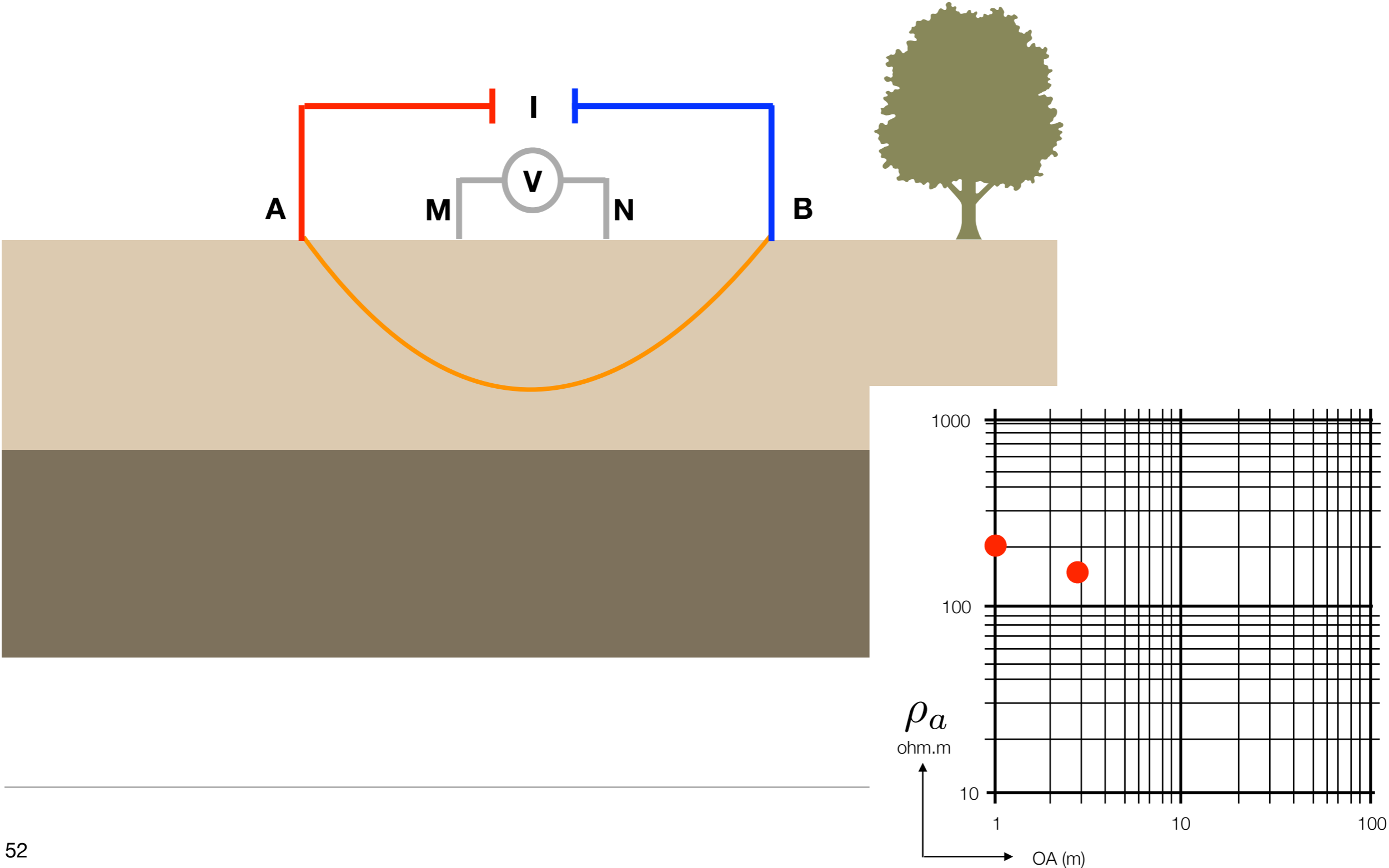
- Les mesures du potentiel généré par un courant permettent d'en déduire une résistivité apparente.
- La résistivité apparente dépend de la distribution des résistivité vraies dans le sol
- Plus la séparation entre les électrodes est grande, plus le courant se propage en profondeur

Est-il possible de reconstruire le profil en profondeur d'un sol tabulaire grâce aux mesures de potentiels et de courants ?

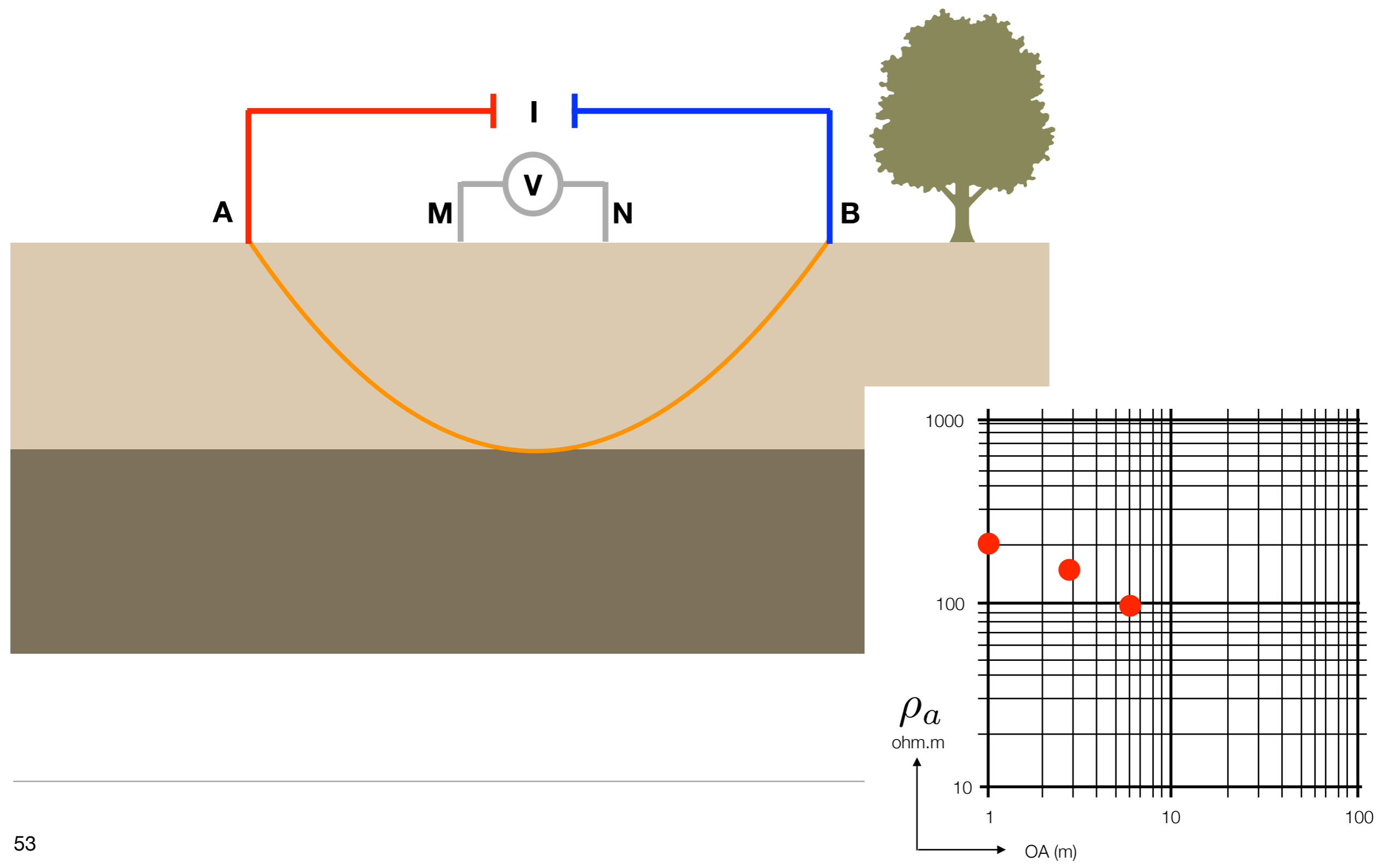
Mise en oeuvre



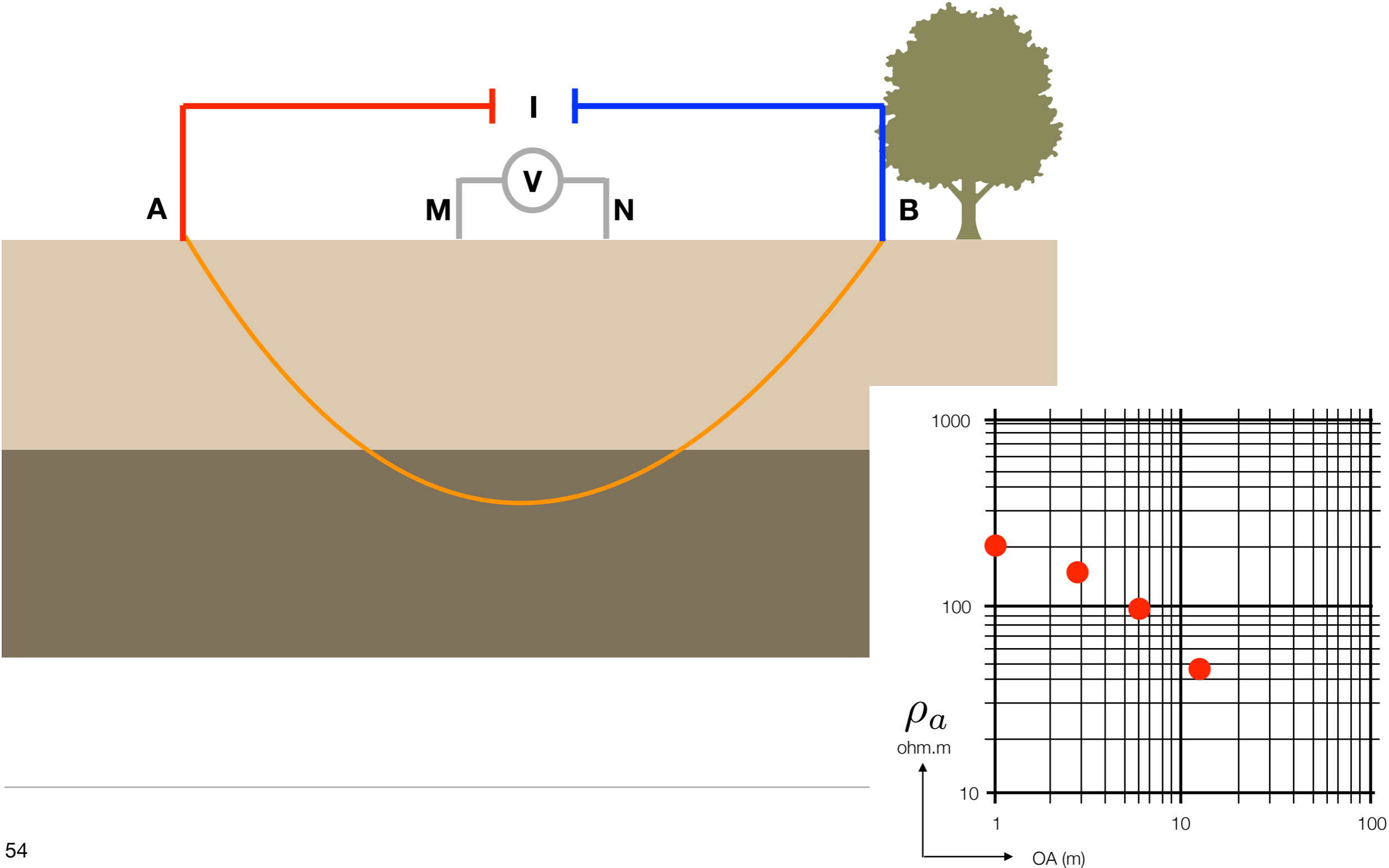
Mise en oeuvre



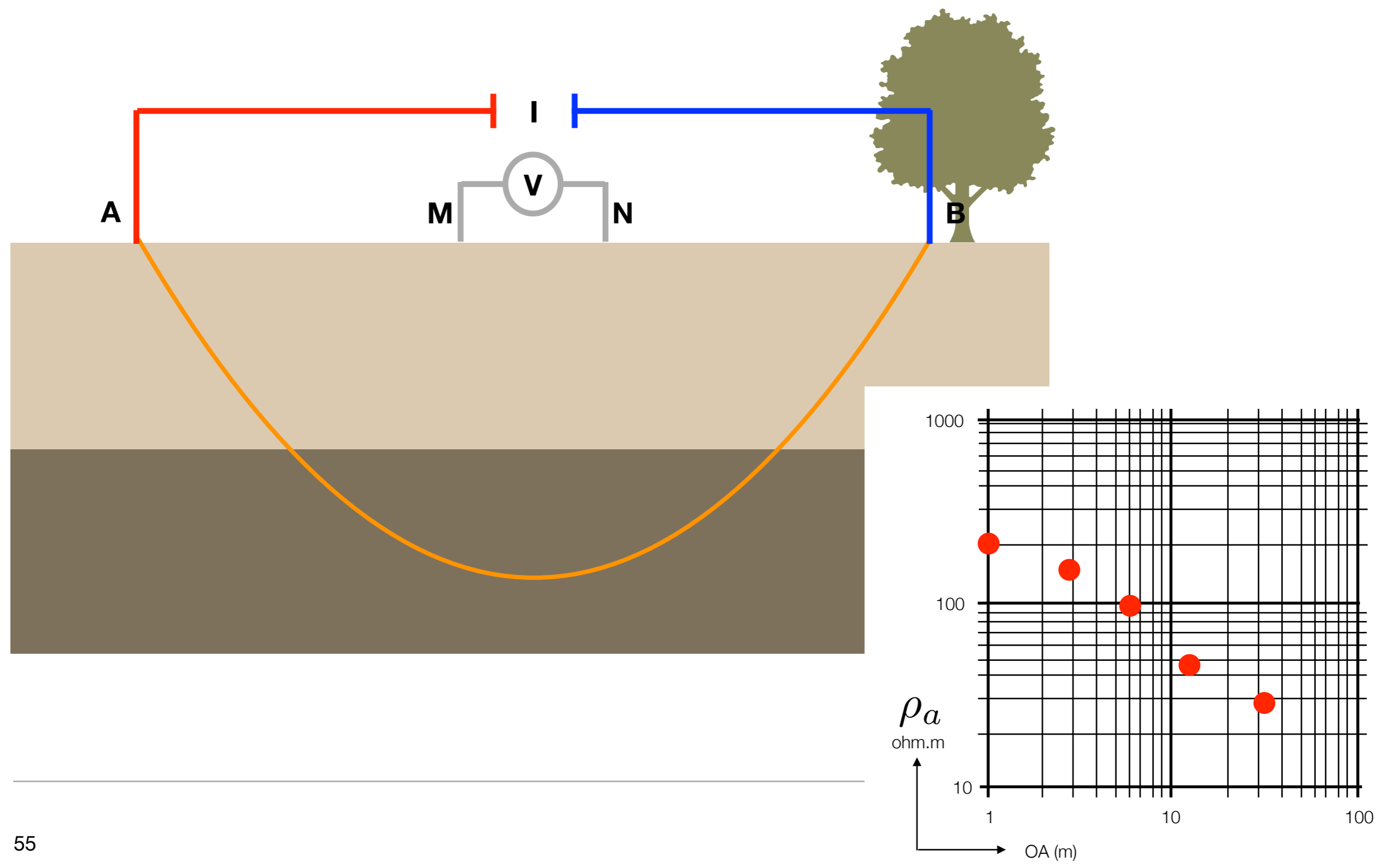
Mise en oeuvre



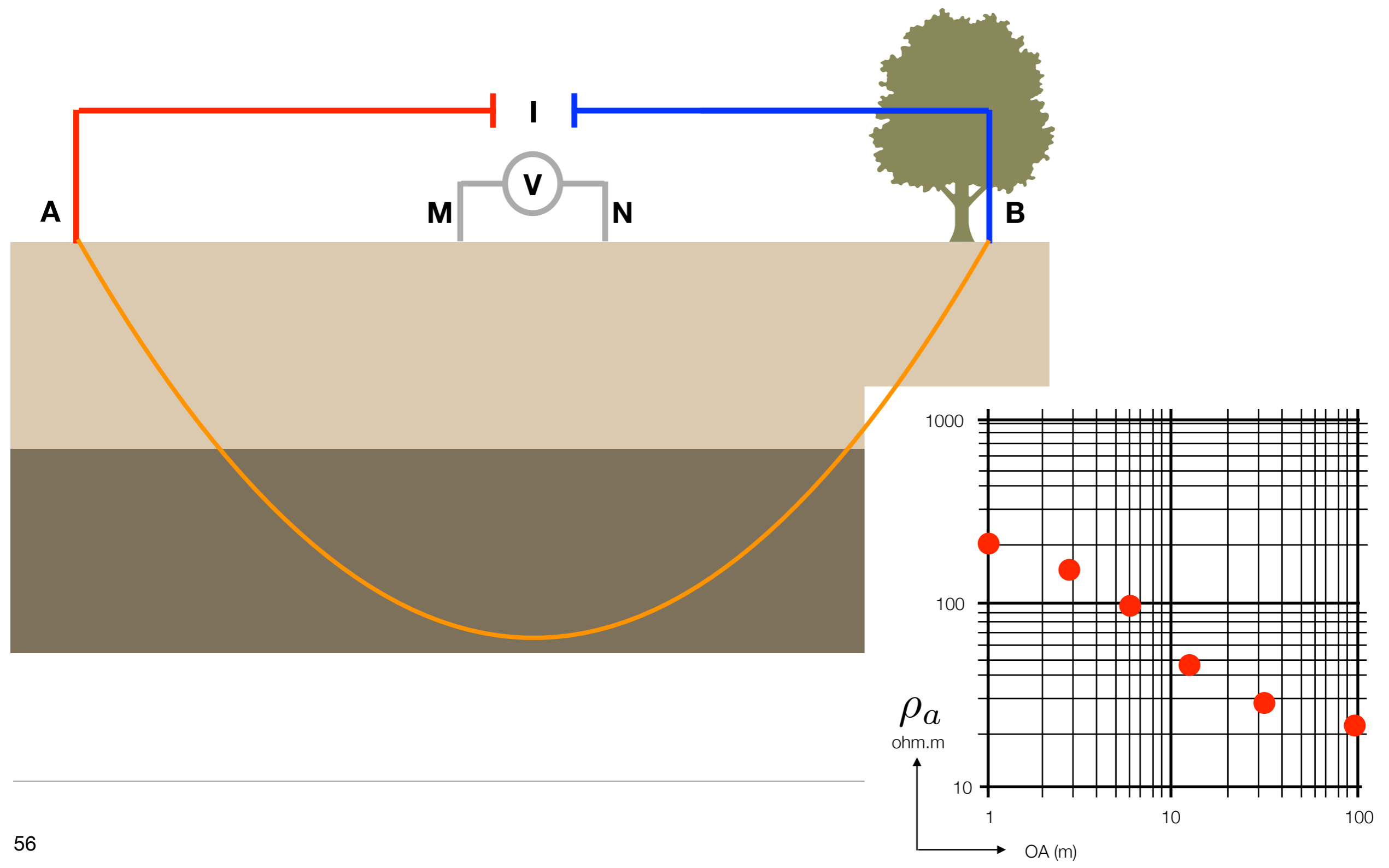
Mise en oeuvre



Mise en oeuvre



Mise en oeuvre



Mise en oeuvre

Pour faire un sondage:

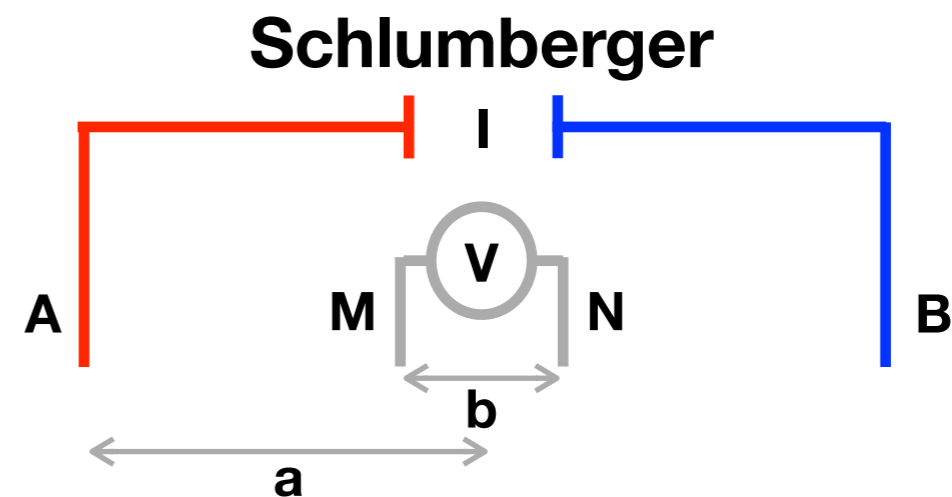
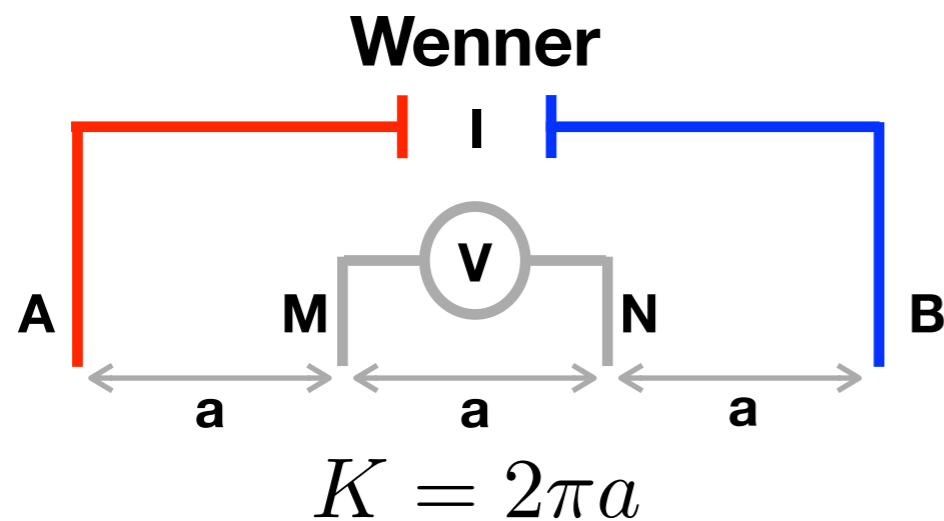
- On utilise un dispositif à 4 électrodes (soit Wenner, soit Schlumberger),
- En gardant le même point milieu du dispositif, on augmente les écartements, souvent en multipliant les dimensions du dispositif d'un même facteur,
- Pour le dispositif de Schlumberger, si la tension entre MN devient trop faible, on augmente l'écartement entre MN,
- Ceci donne les variations en profondeur de résistivité apparente au point milieu du dispositif.

Dispositifs

- On se rappelle que la résistivité apparente est donnée par:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$$

- Le facteur géométrique dépend de la configuration des électrodes. Les sondages sont la plupart du temps effectués avec le dispositif de Schlumberger ou de Wenner



$$K = \pi \frac{a^2}{b} \left(1 - \frac{b^2}{4a^2} \right) \quad a \geq 5b$$

Résistance de contact

Lorsqu'on plante une électrode, le contact entre le sol et l'électrode possède une résistance, qui diminue le courant que l'on peut injecter.

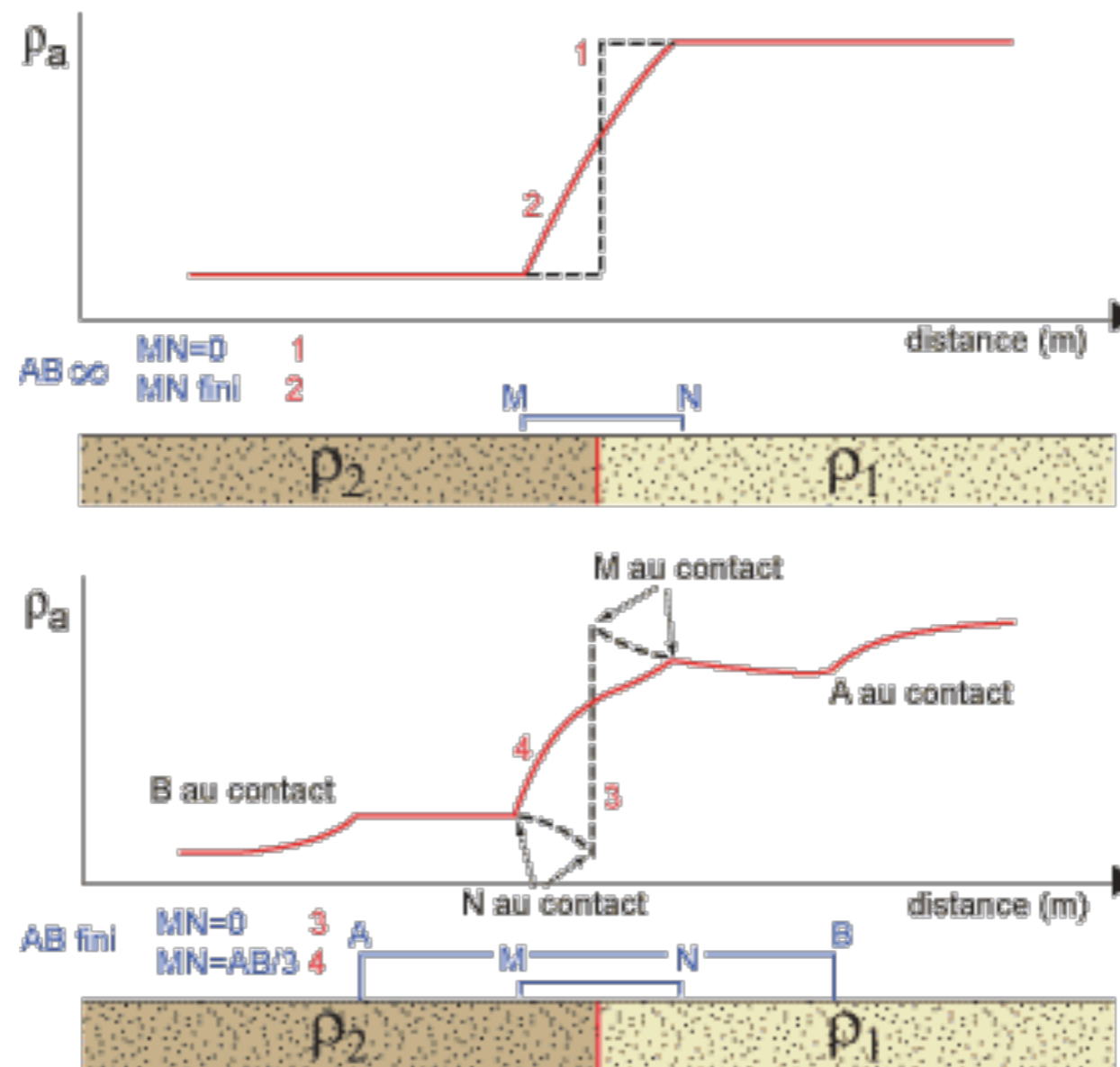
Pour augmenter le courant

- Planter plus profondément l'électrode,
- Utiliser une électrode de plus grand rayon,
- Utiliser plusieurs électrodes,
- Utiliser un transmetteur plus puissant.



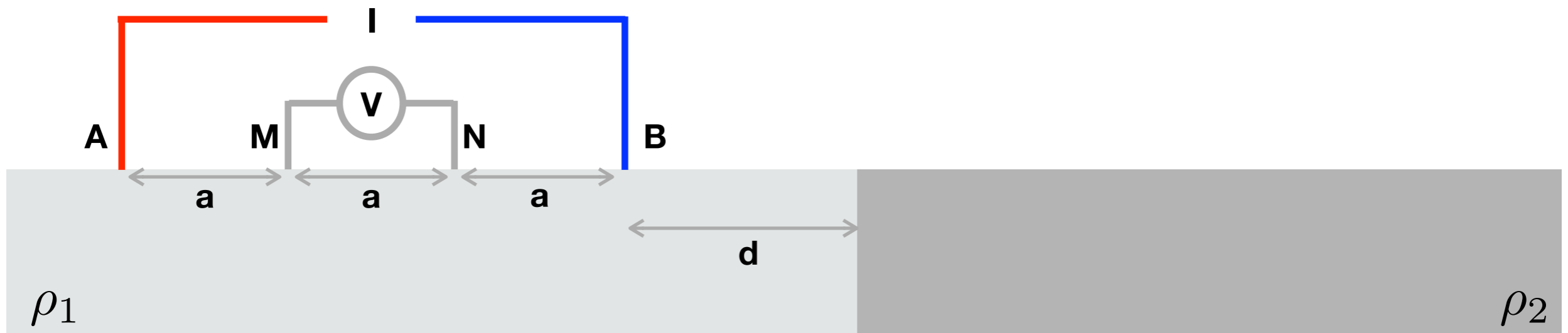
À-coups-de-prise: variations latérales

Les variations latérales de résistivité affectent la résistivité apparente.



Exercice: Méthode des images

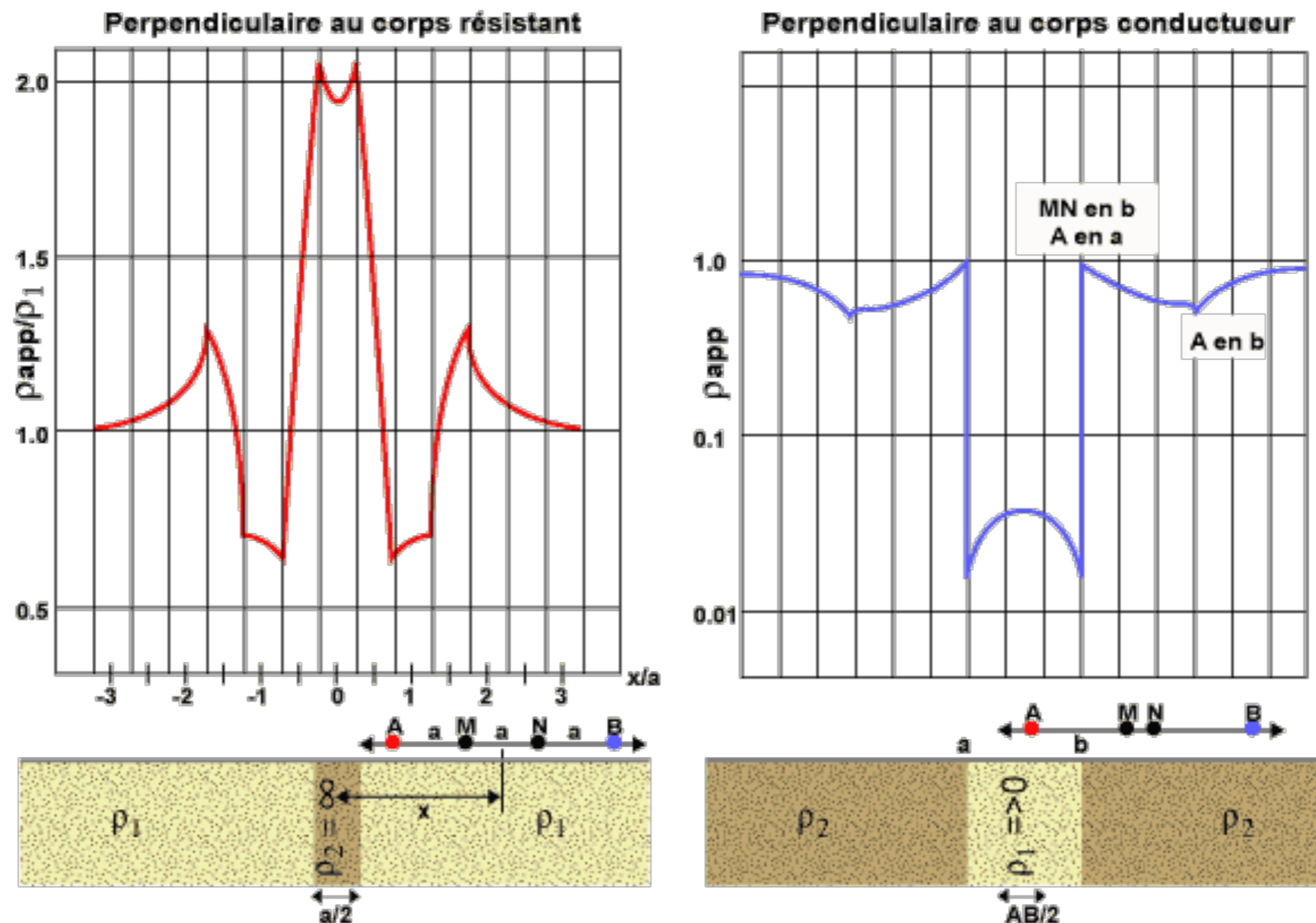
Quelle est la résistivité apparente à proximité d'un contact vertical ?



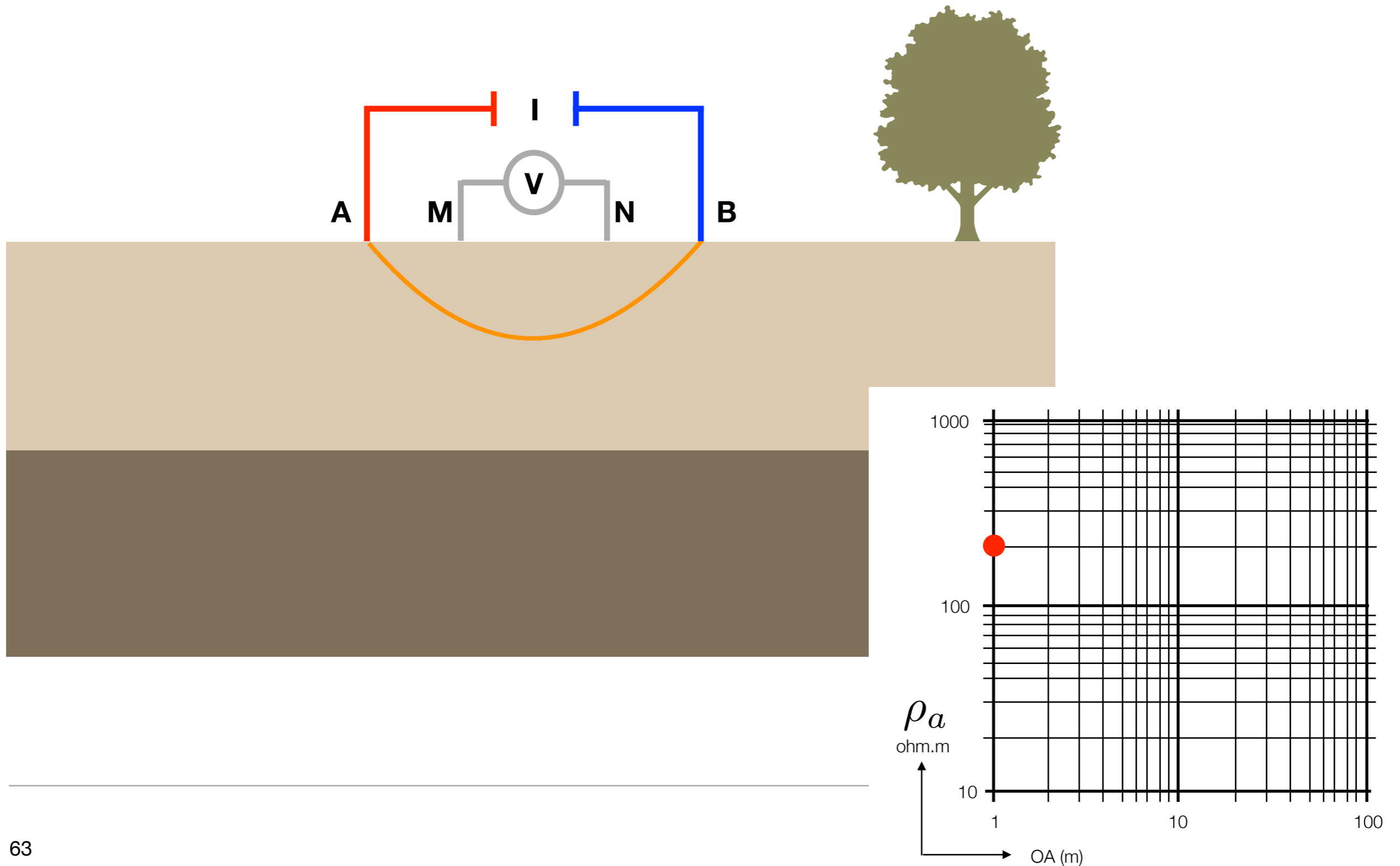
Utilisez la méthode des images pour trouver la résistivité apparente en fonction de a et d .

À-coups-de-prise: inclusion de petite taille

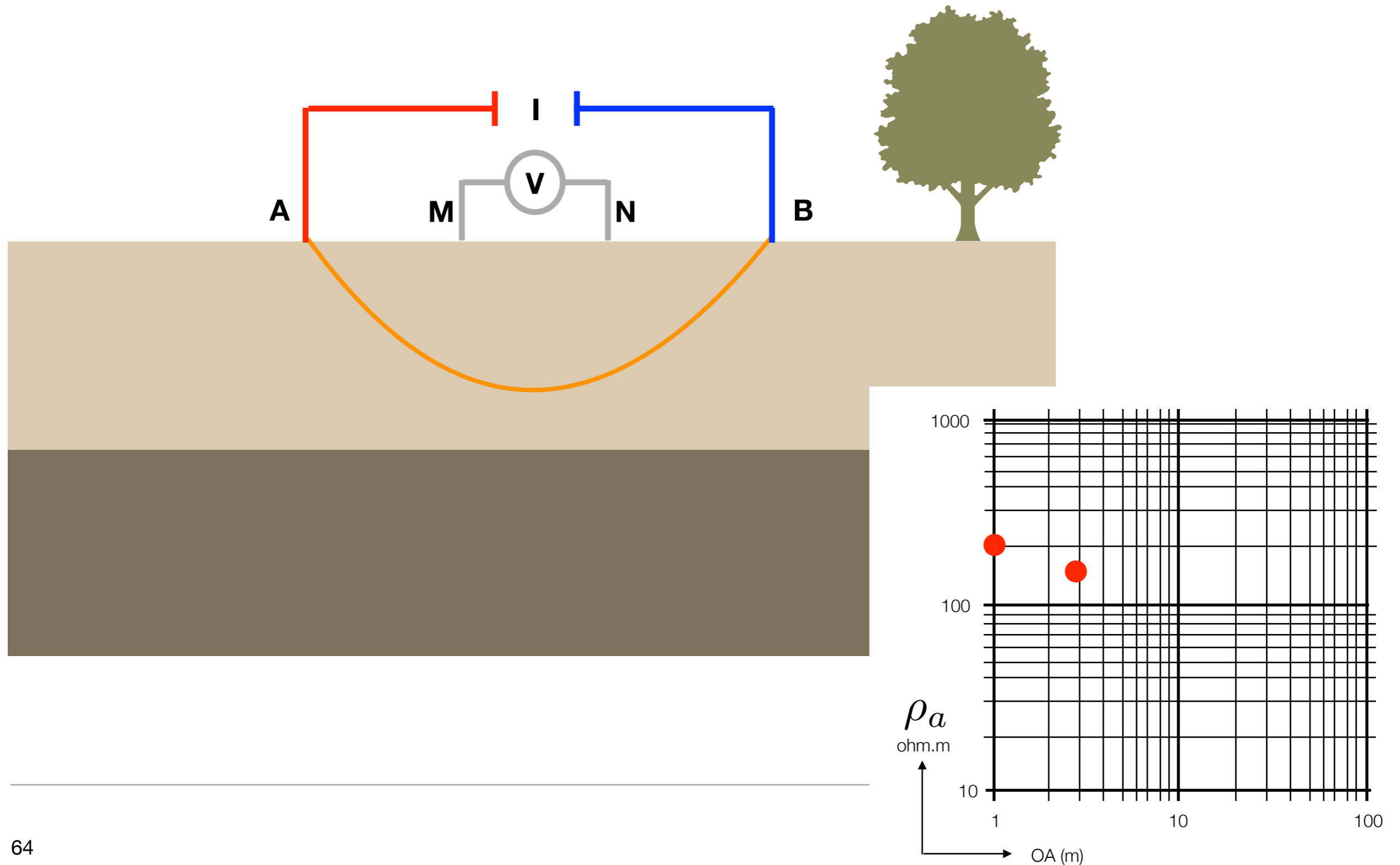
Des inclusions de faible taille mais de fort contraste affectent aussi les courbes!



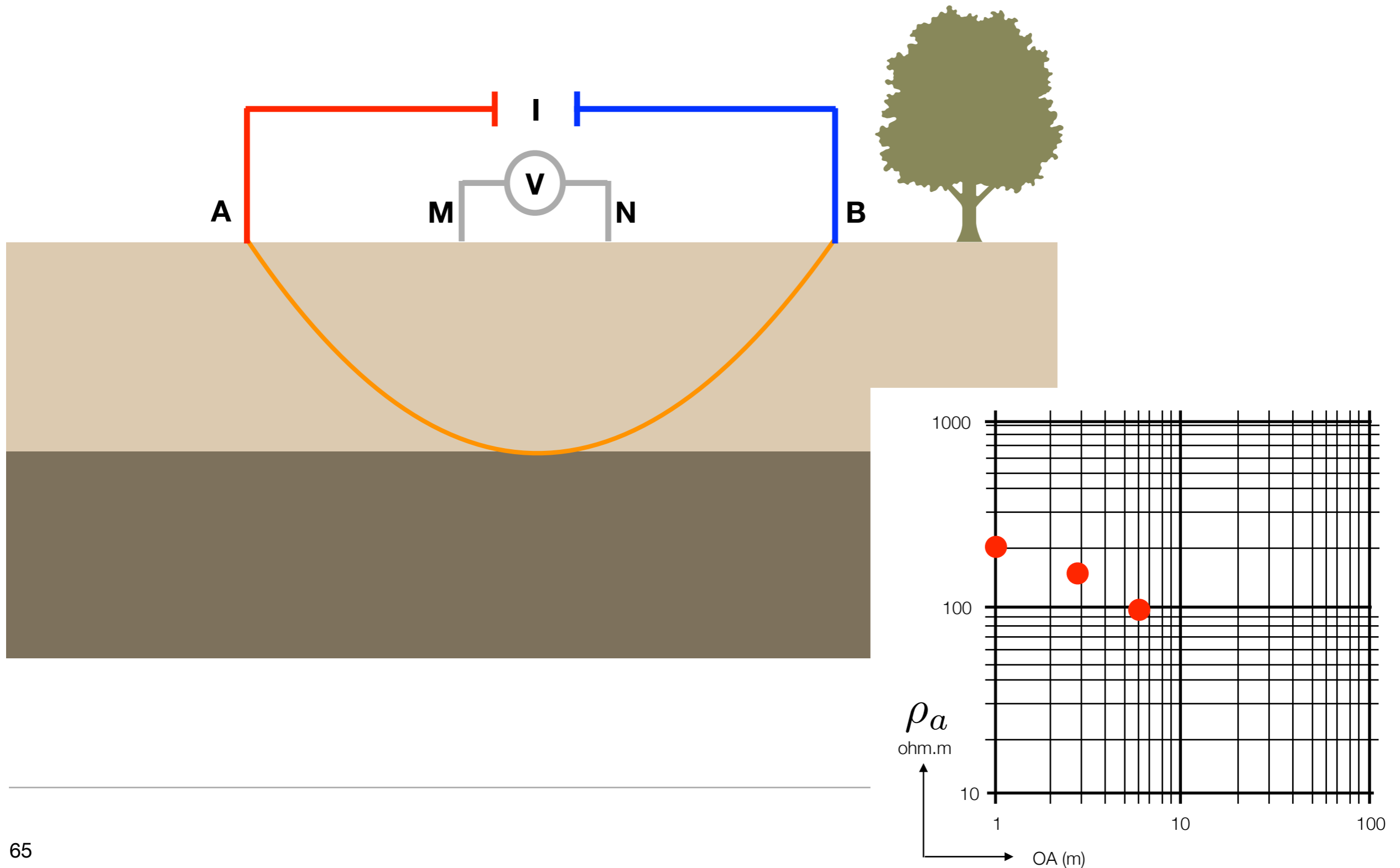
À-coups-de-prise: corrections par débrayage



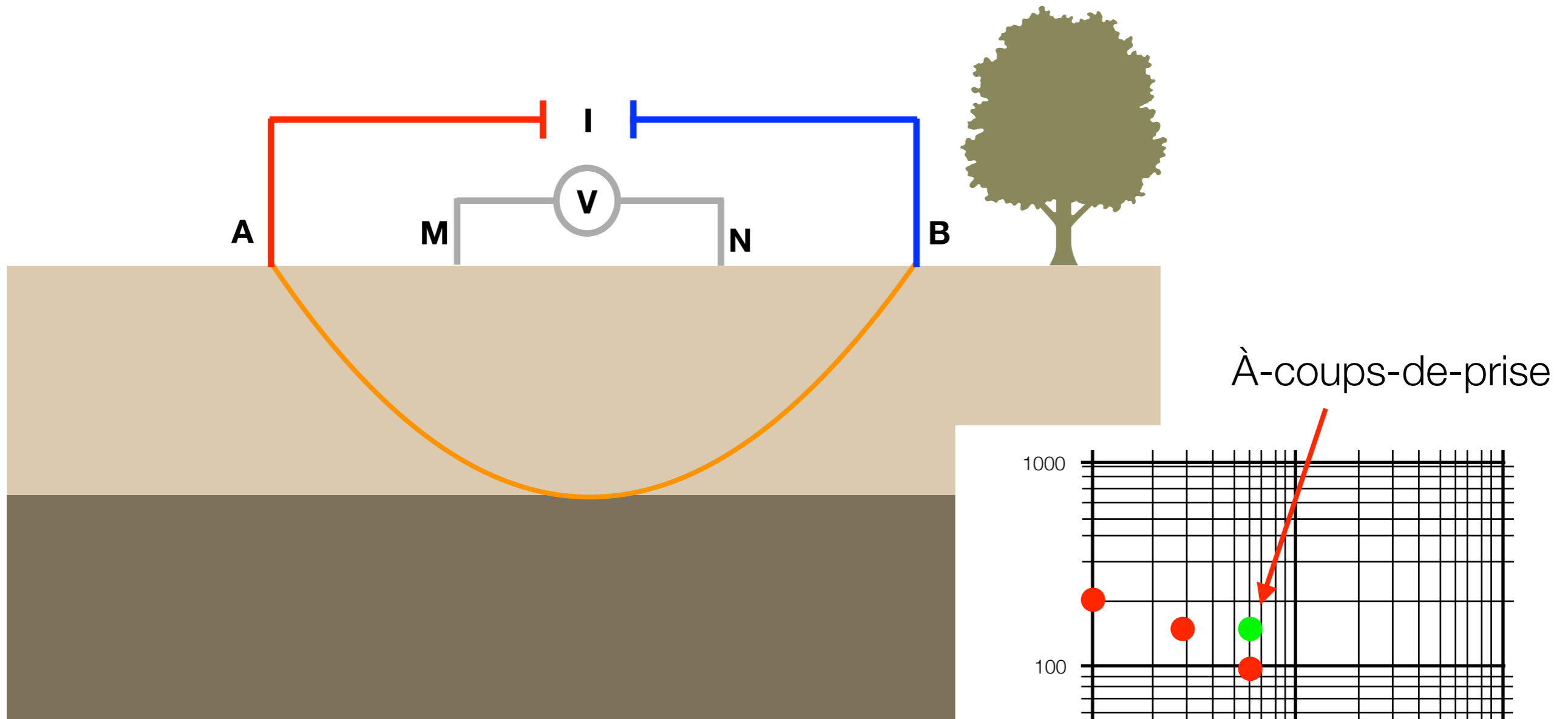
À-coups-de-prise: corrections par débrayage



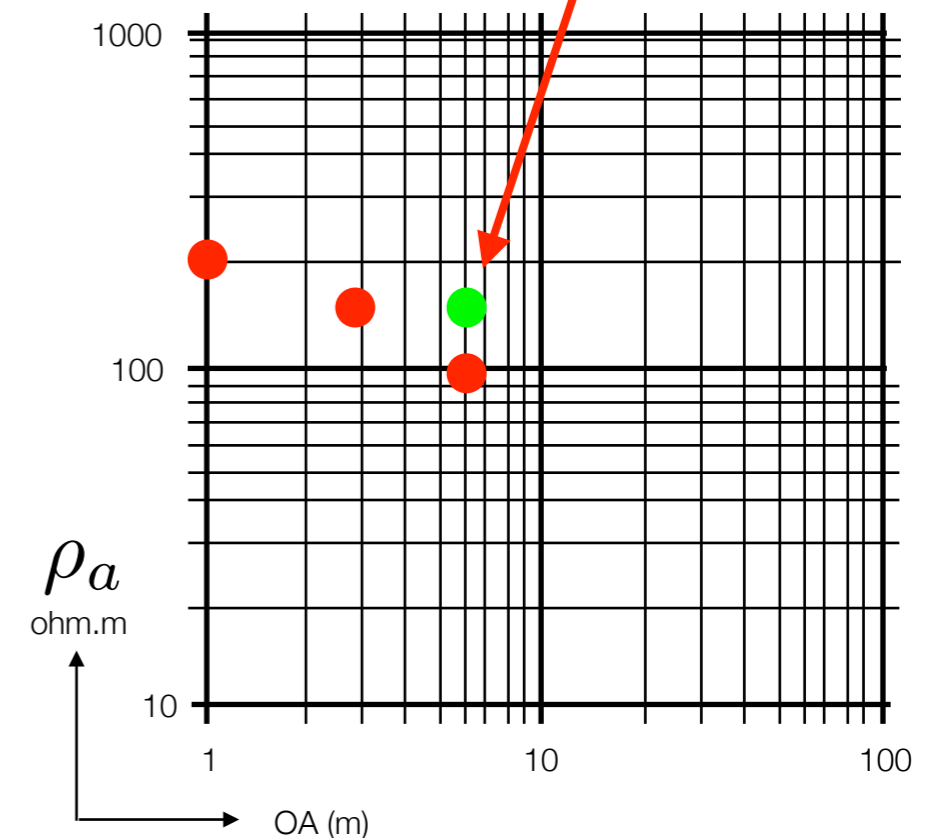
À-coups-de-prise: corrections par débrayage



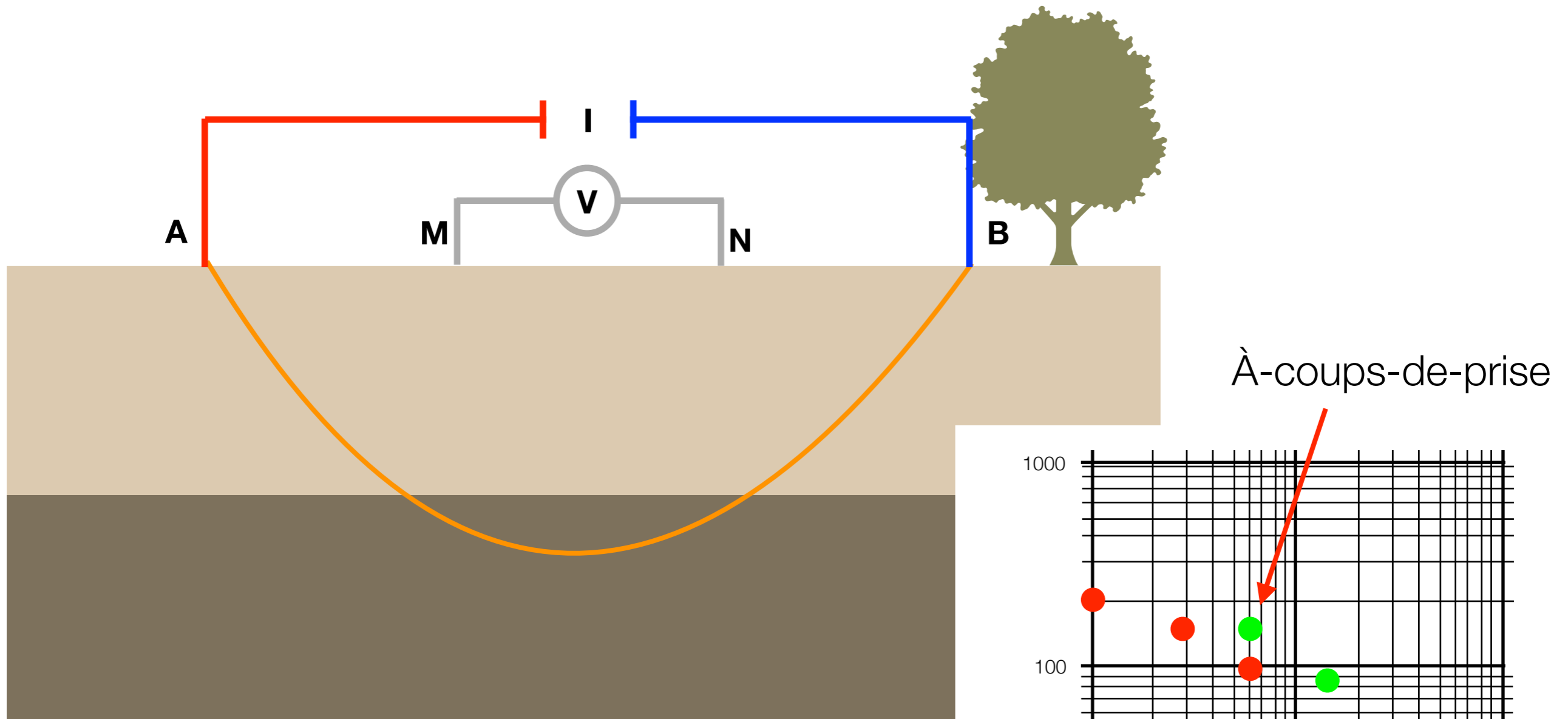
À-coups-de-prise: corrections par débrayage



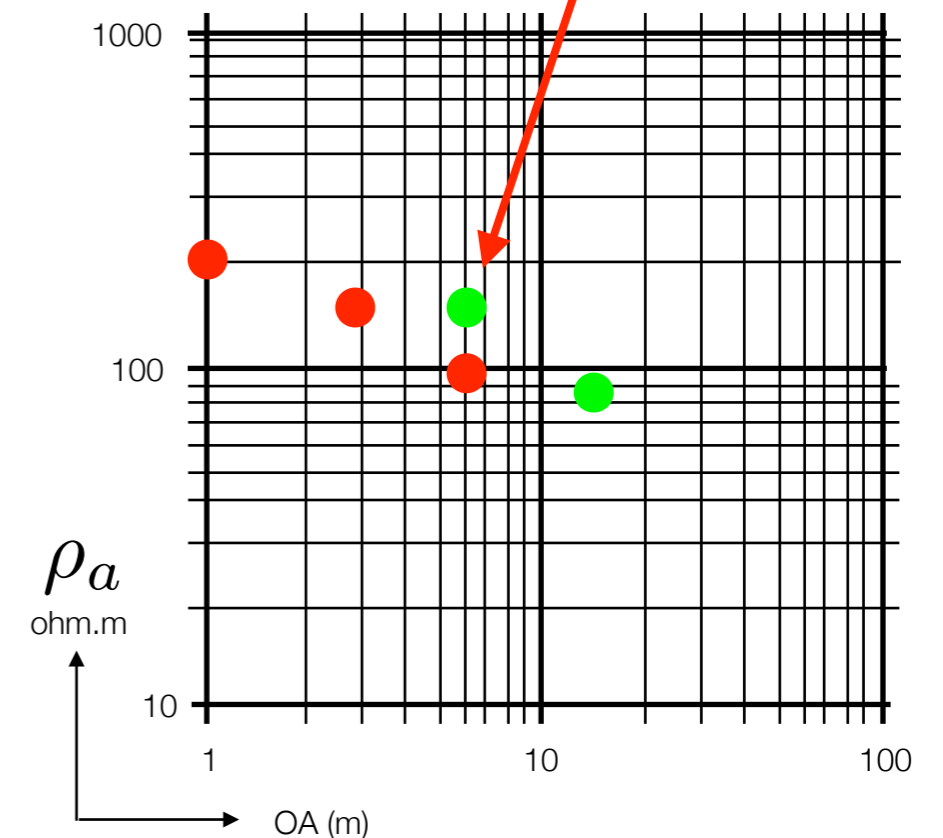
On doit changer l'espacement MN lorsque la tension devient trop faible



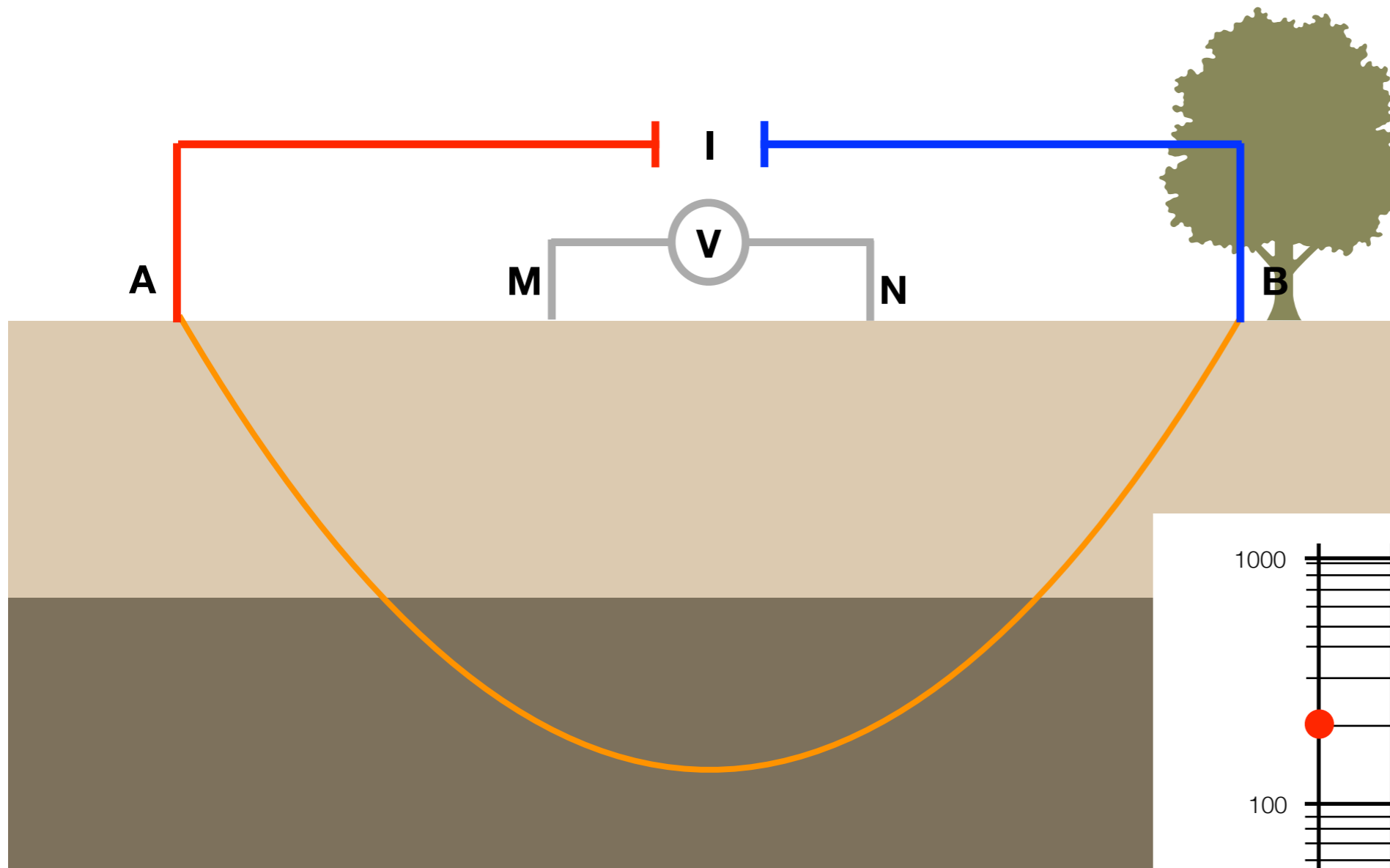
À-coups-de-prise: corrections par débrayage



On doit changer l'espacement MN lorsque la tension devient trop faible

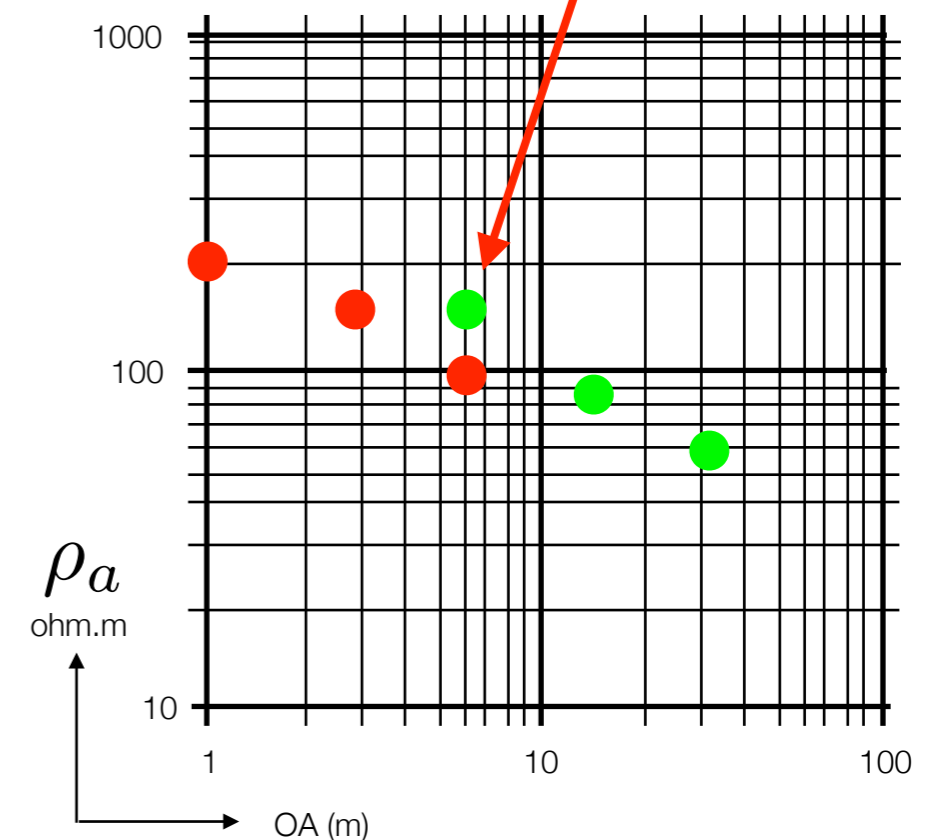


À-coups-de-prise: corrections par débrayage

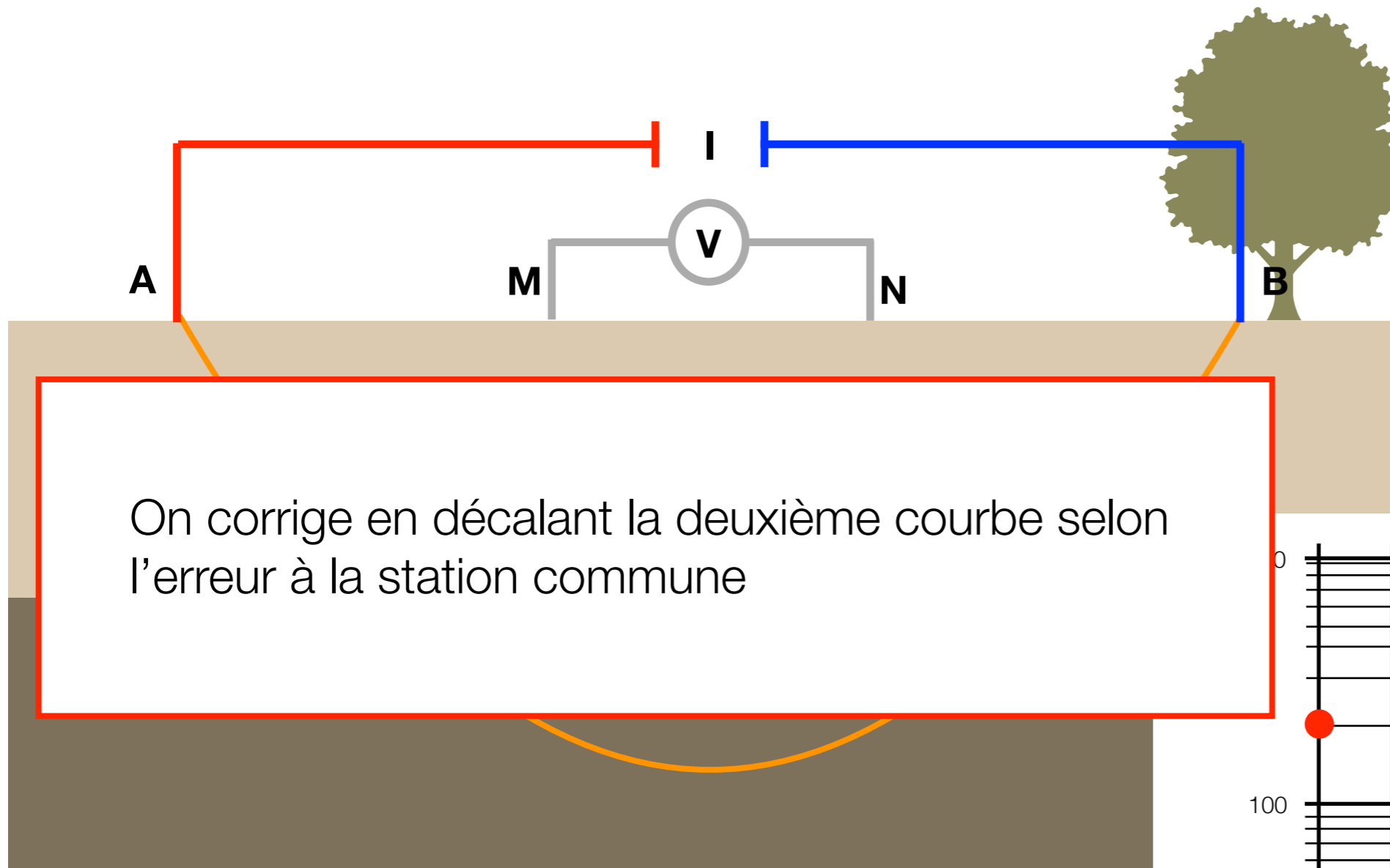


On doit changer l'espacement MN lorsque la tension devient trop faible

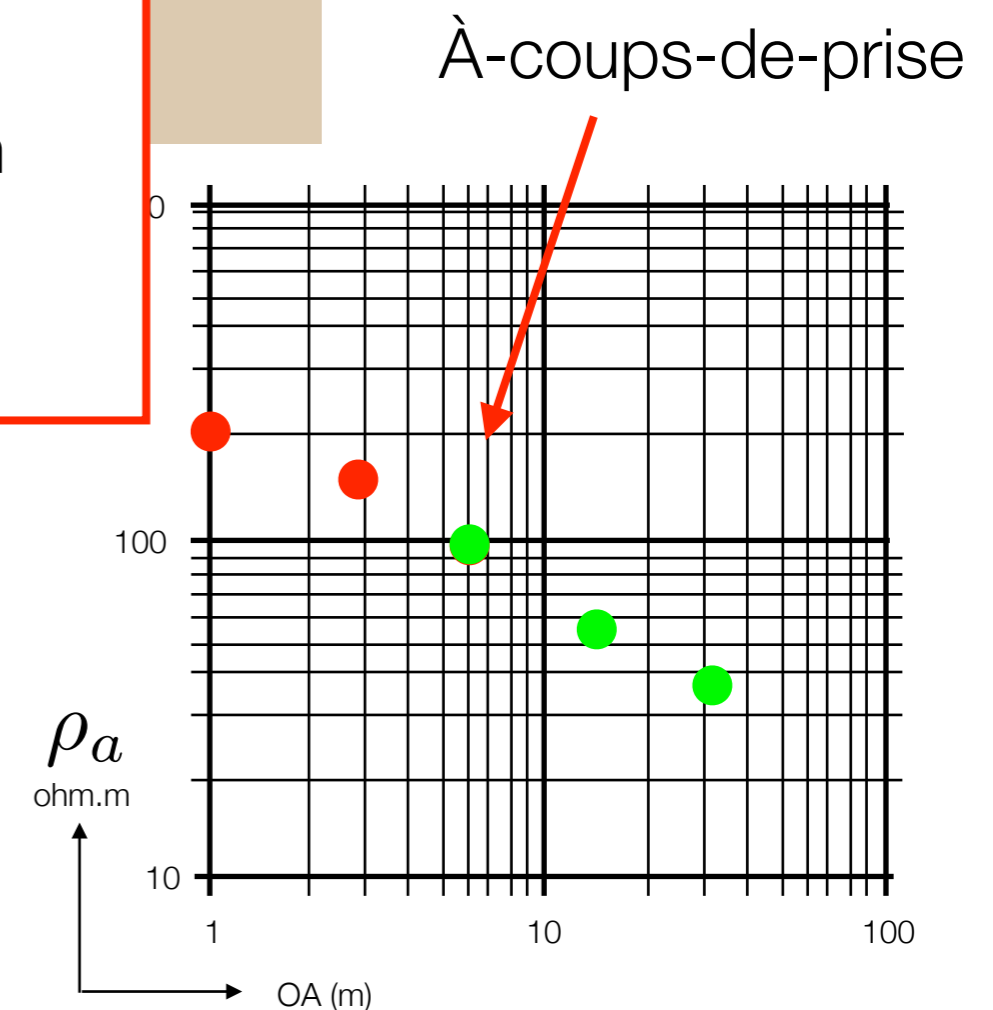
À-coups-de-prise



À-coups-de-prise: corrections par débrayage



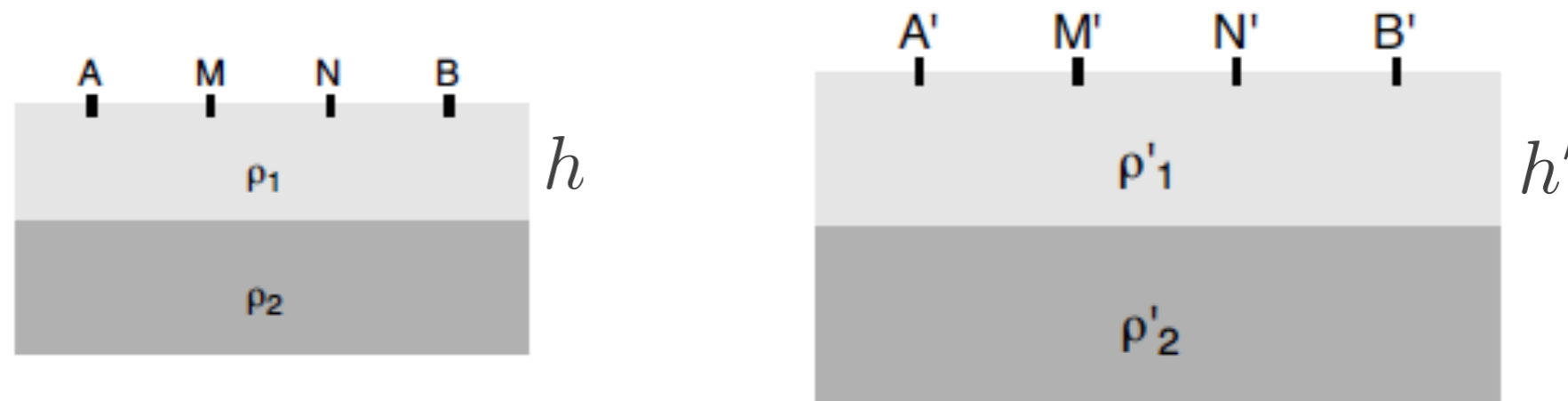
On doit changer l'espacement MN lorsque la tension devient trop faible



Interprétation: Principe de similitude

Les méthodes d'interprétation se basent sur le principe de similitude.

Principe de similitude: Les résistivités apparentes mesurées par deux dispositifs peuvent être les mêmes si certaines proportions sont respectées:



Interprétation: Principe de similitude

Les méthodes d'interprétation se basent sur le principe de similitude.

Principe de similitude: Les résistivités apparentes mesurées par deux dispositifs peuvent être les mêmes si certaines proportions sont respectées:

Soient 3 facteurs de similitudes:

- $k_\rho \longrightarrow \rho'_2 = k_\rho \rho_2 \quad \rho'_1 = k_\rho \rho_1$
- $k_h \longrightarrow h' = k_h h$
- $k_K \longrightarrow K' = k_K K \longrightarrow$ facteur géométrique

Alors:

$$\rho'_a = \rho_a \frac{k_\rho k_K}{k_h}$$

Interprétation: Principe de similitude

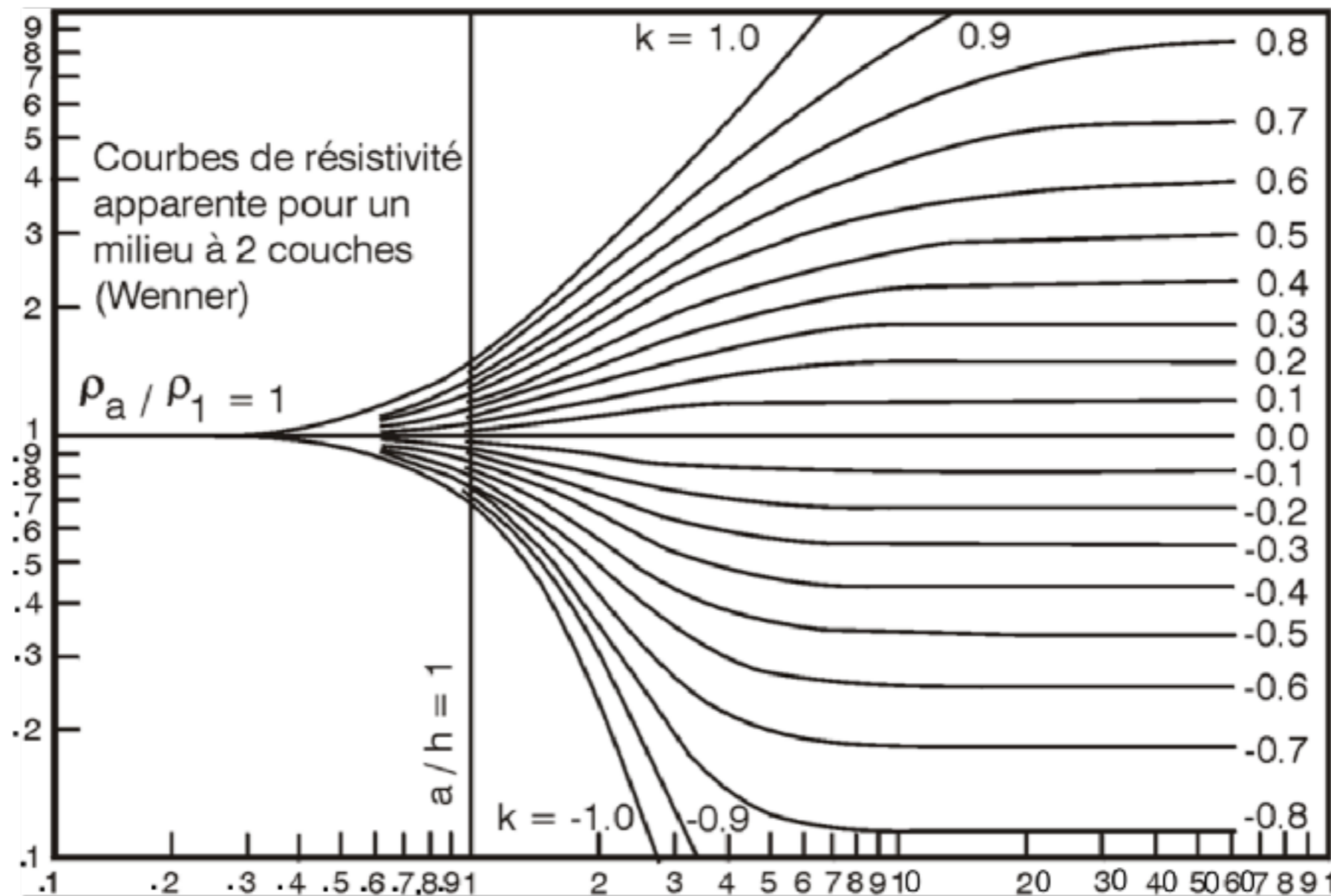
Pour le voir, revenons à la résistivité apparente pour deux couches:

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (2nz/a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + (2nz/a)^2}} \right) \right]$$

- Qu'arrive-t-il lorsque ρ_1 et ρ_2 sont multipliés par une constante ?
 - Qu'arrive-t-il lorsque l'espacement a est multiplié par une constante ?
 - Qu'arrive-t-il lorsque z est multiplié par une constante ?
-

Abaque: 2 couches, dispositif de Wenner

Les abaques sont une série de courbes normalisées!



Exemple abaque

Quelle est la résistivité apparente pour un dispositif de Wenner avec $a = 64$ m ?

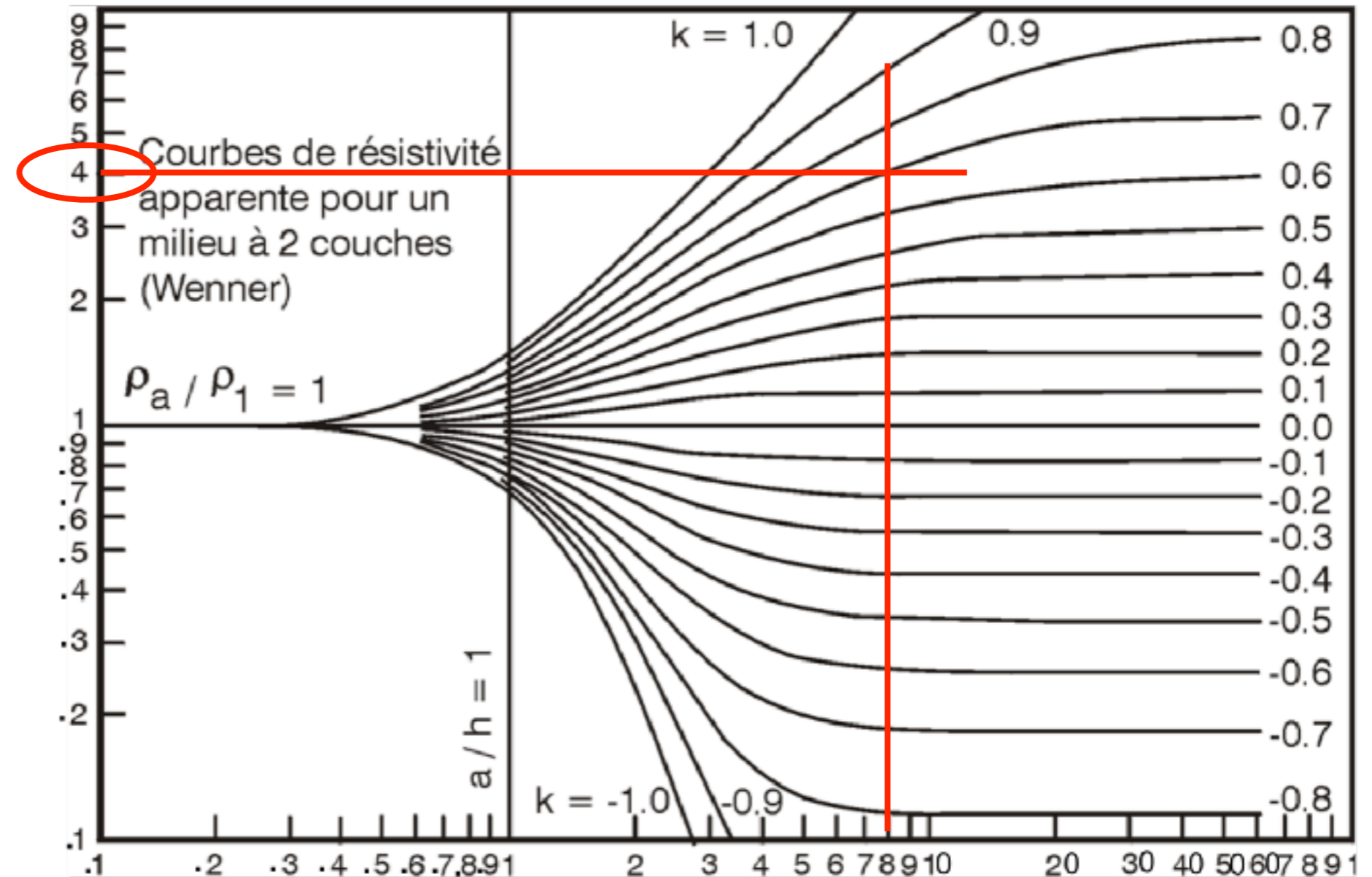


Exemple abaque

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad k &= \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \\
 &= \frac{57 - 10}{57 + 10} \\
 &= 0.7
 \end{aligned}$$

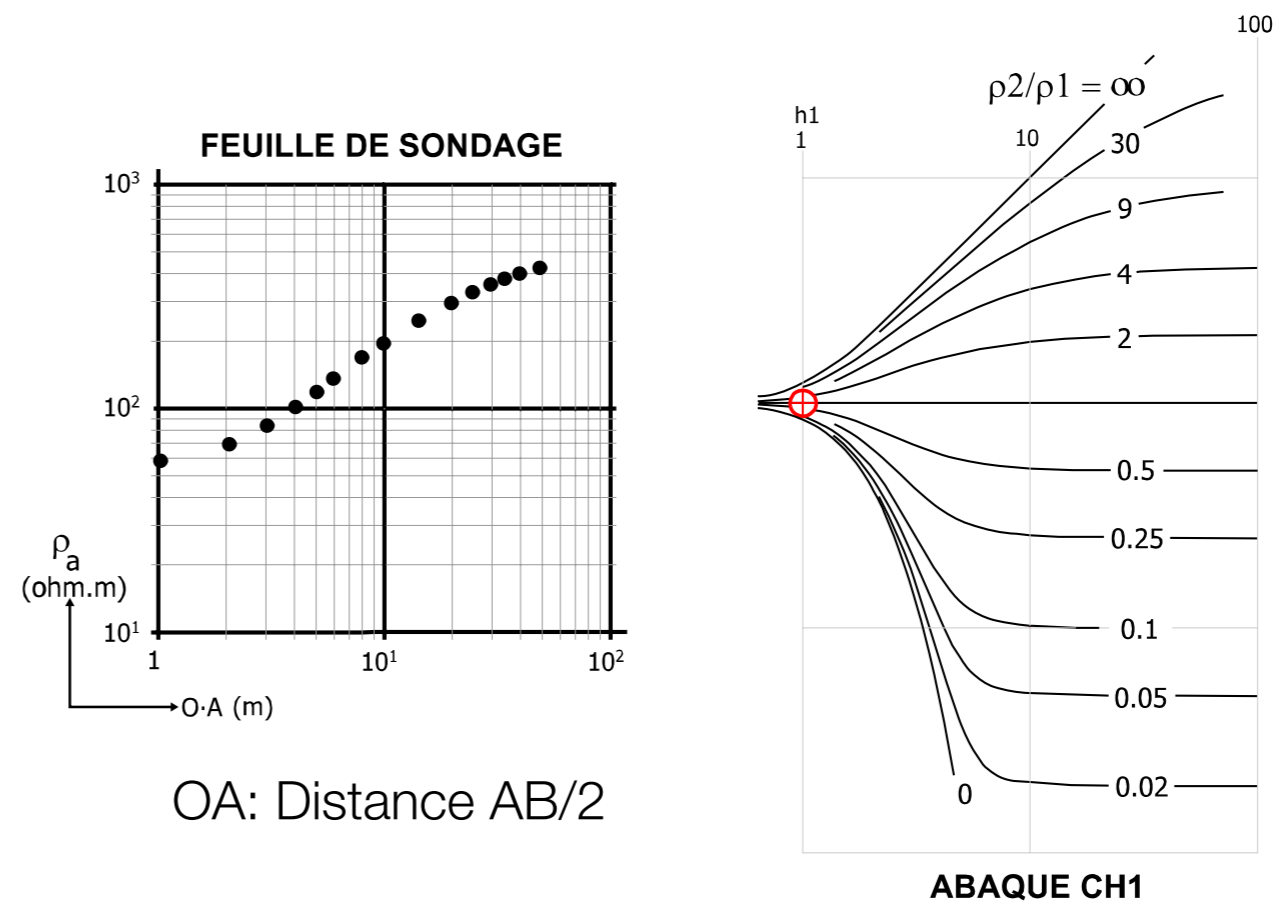
$$\bullet \quad \frac{a}{h} = \frac{64}{8} = 8$$

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad \rho_a &= 4\rho_1 \\
 &= 40 \text{ ohm-m}
 \end{aligned}$$



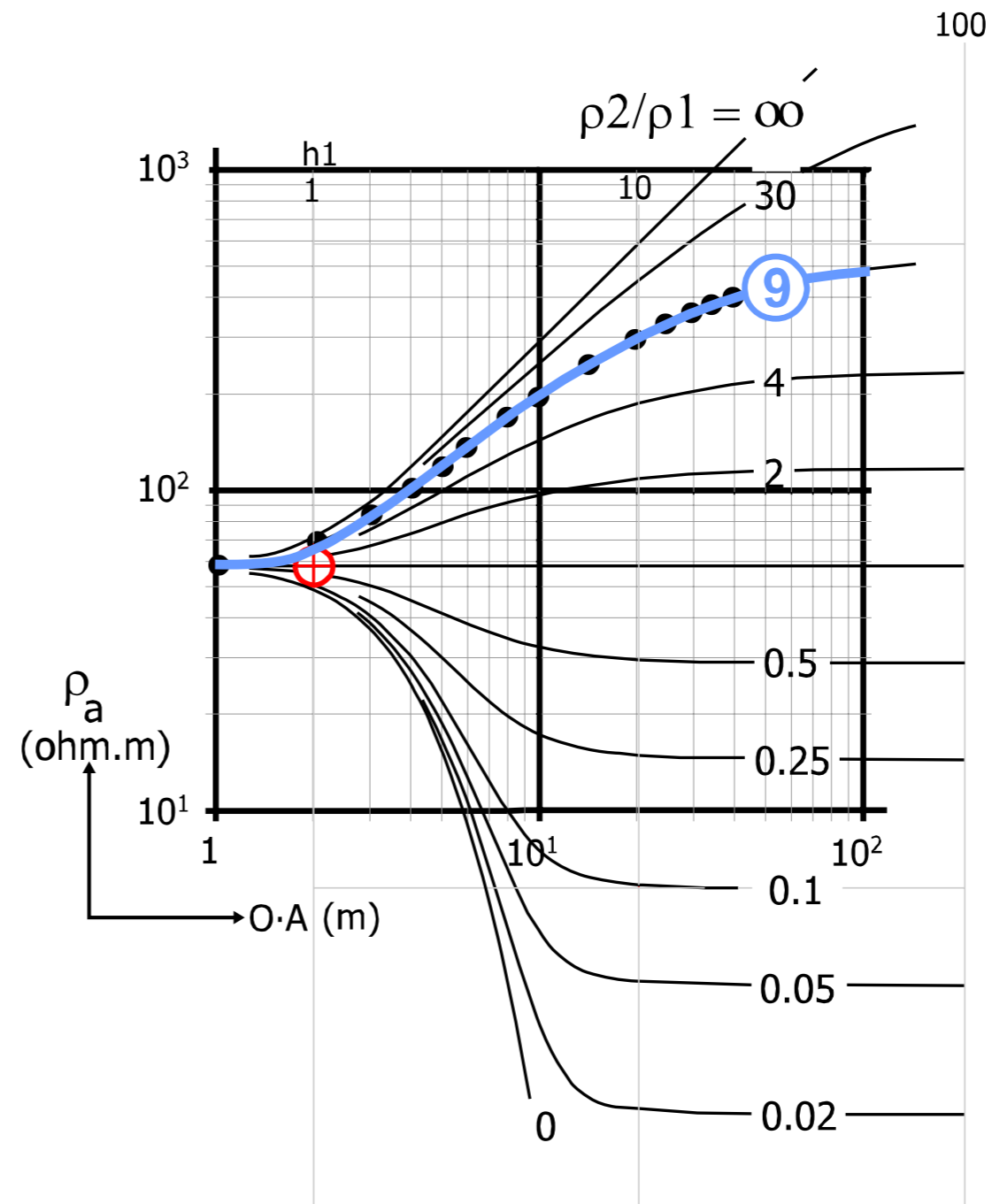
Interprétation 2 couches, Schlumberger

1. Tracer la courbe de sondage sur un graphique bi-logarithmique



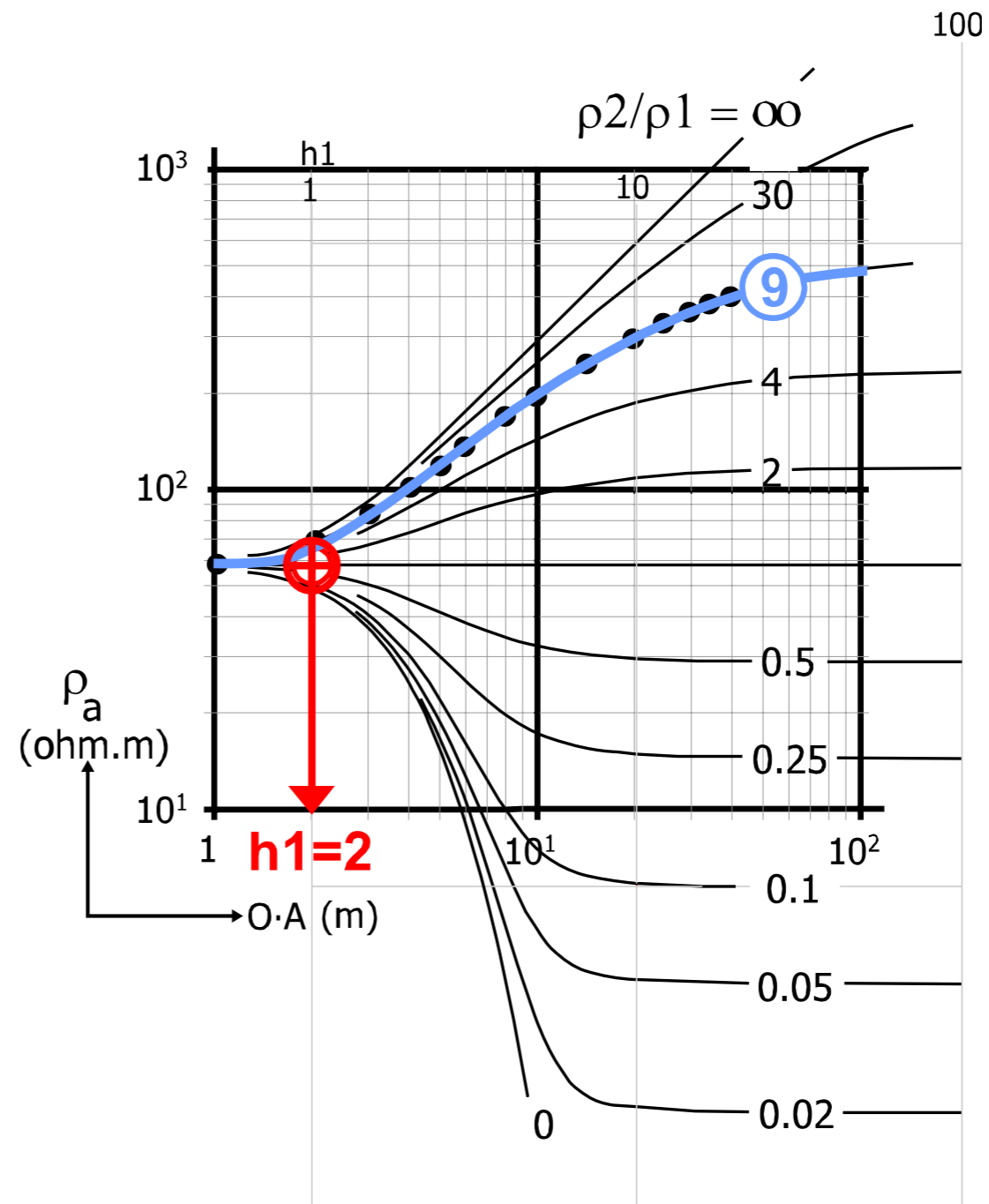
Interprétation 2 couches, Schlumberger

1. Tracer la courbe de sondage sur un graphique bi-logarithmique
2. Superposer l'abaque pour faire correspondre la courbe de sondage à une des courbes de l'abaque



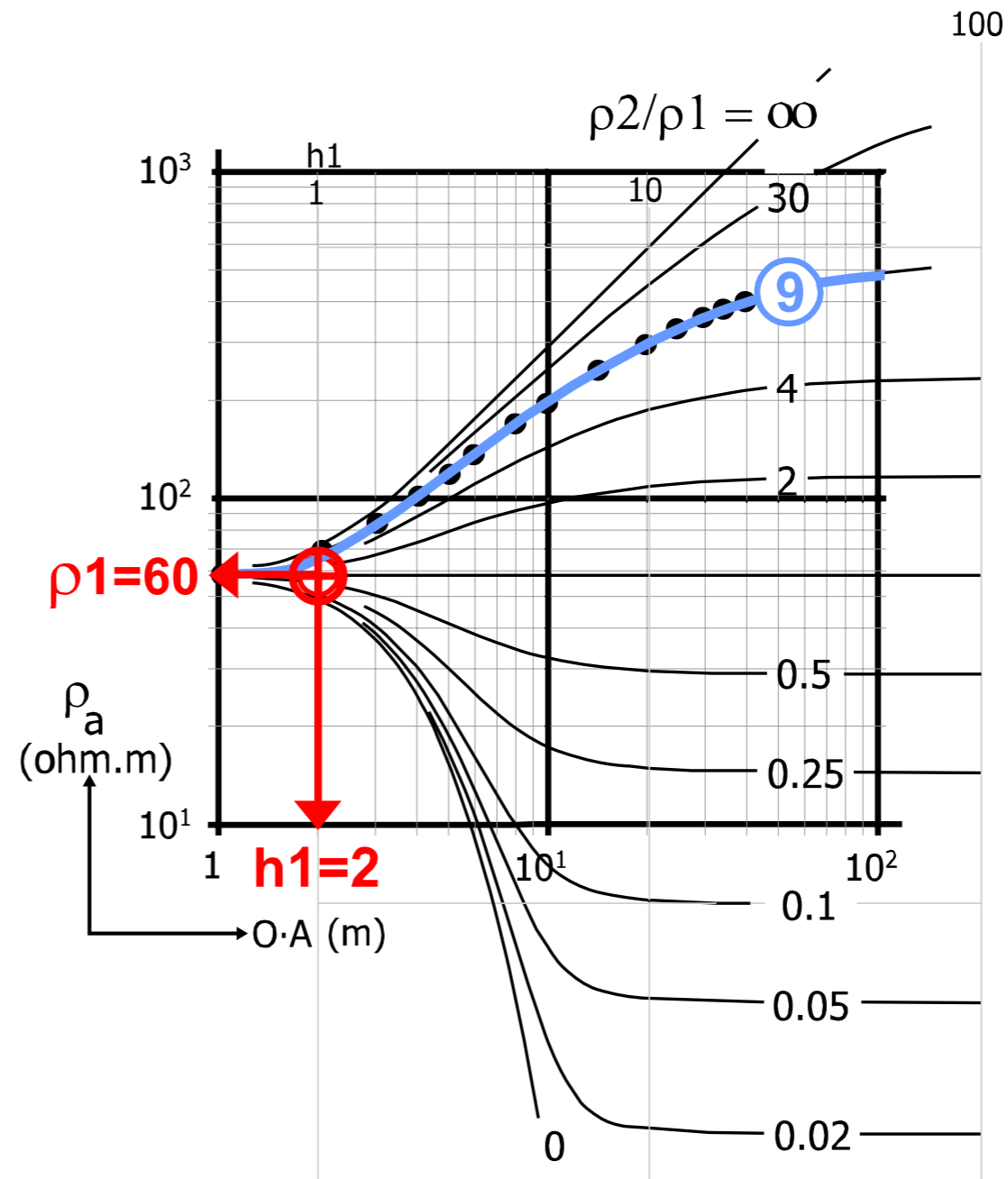
Interprétation 2 couches, Schlumberger

1. Tracer la courbe de sondage sur un graphique bi-logarithmique
2. Superposer l'abaque pour faire correspondre la courbe de sondage à une des courbes de l'abaque
3. Obtenir l'épaisseur du terrain en identifiant l'abscisse de la croix



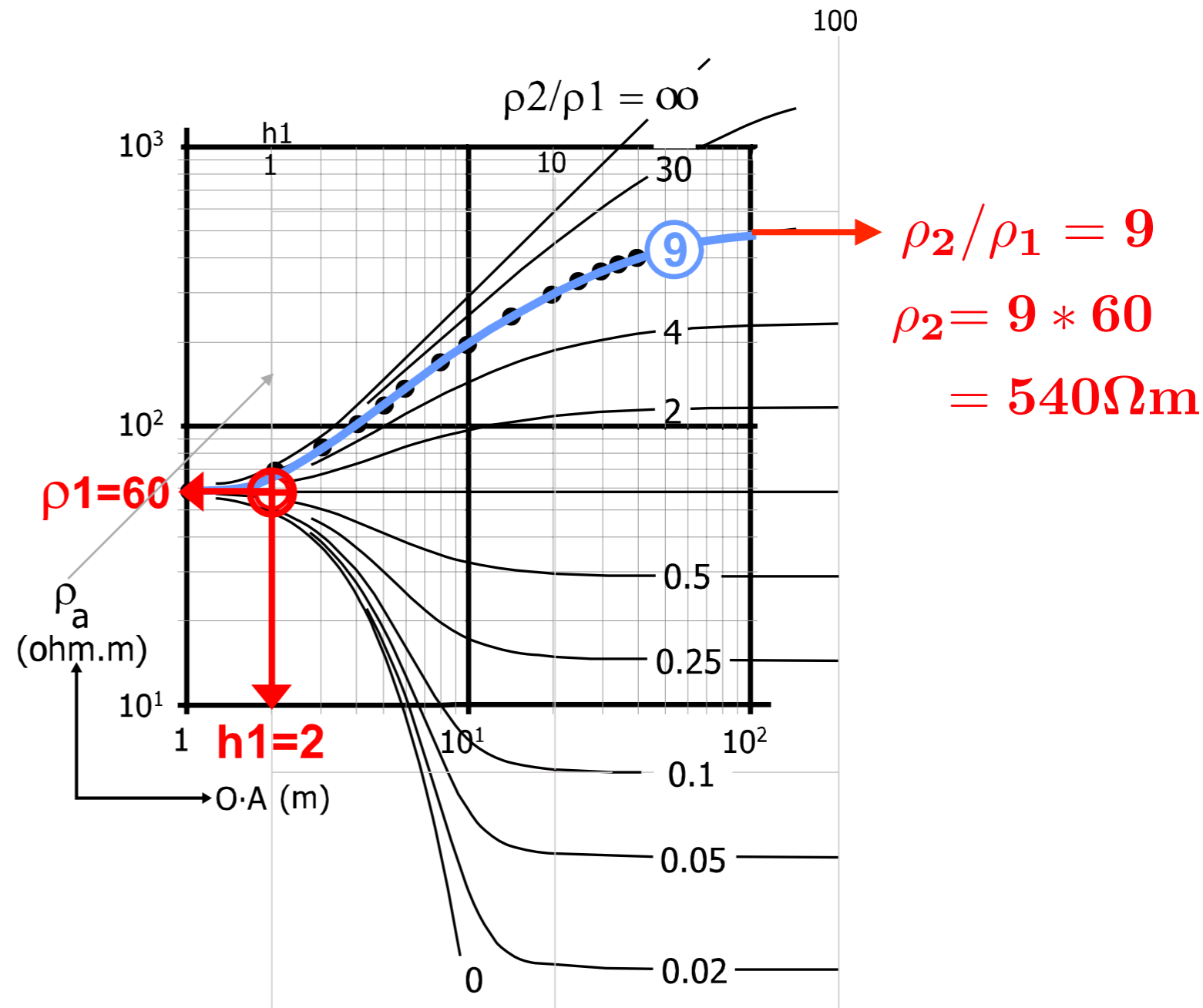
Interprétation 2 couches, Schlumberger

1. Tracer la courbe de sondage sur un graphique bi-logarithmique
2. Superposer l'abaque pour faire correspondre la courbe de sondage à une des courbes de l'abaque
3. Obtenir l'épaisseur du terrain en identifiant l'abscisse de la croix
4. Obtenir ρ_1 en identifiant l'ordonnée de la croix



Interprétation 2 couches, Schlumberger

1. Tracer la courbe de sondage sur un graphique bi-logarithmique
2. Superposer l'abaque pour faire correspondre la courbe de sondage à une des courbes de l'abaque
3. Obtenir l'épaisseur du terrain en identifiant l'abscisse de la croix
4. Obtenir ρ_1 en identifiant l'ordonnée de la croix
5. Obtenir ρ_2 grâce au rapport des résistivité de la courbe (ou k) et ρ_1

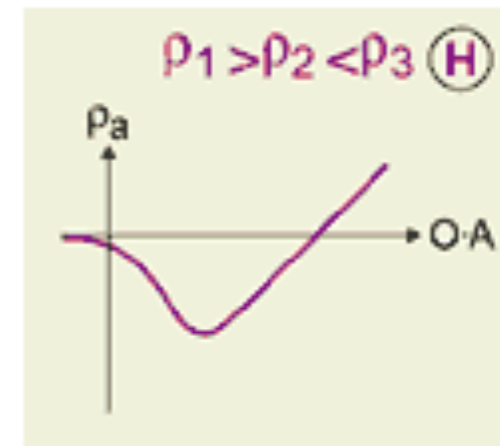
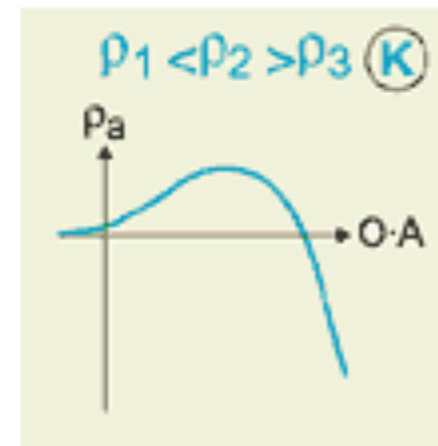
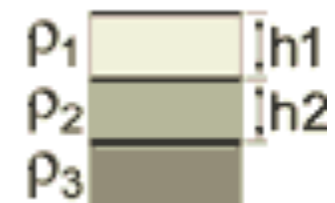
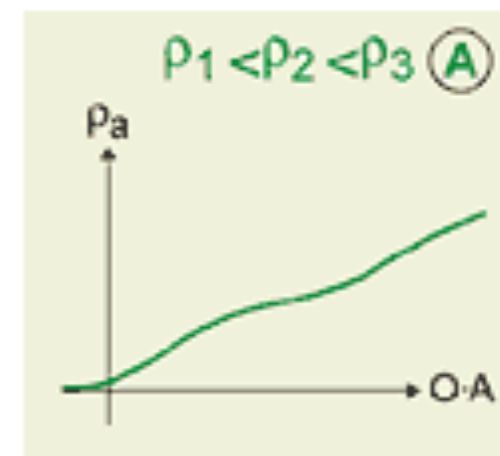
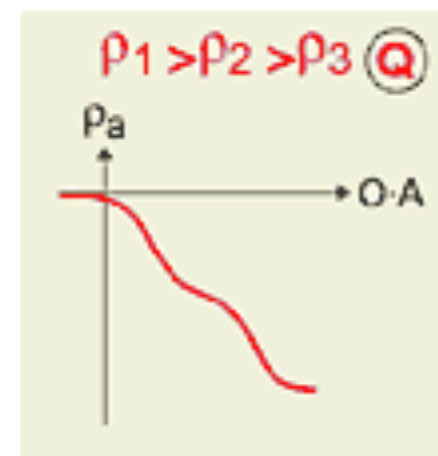


Sondage: Plusieurs couches

On peut utiliser les abaques pour des modèles à 3, 4 couches.

Or, aujourd'hui, on utilise plutôt des **méthodes automatisées basées sur l'inversion!**

Quelques principes sont toutefois utiles à garder en tête lors de l'inversion: l'**équivalence** et la **suppression!**

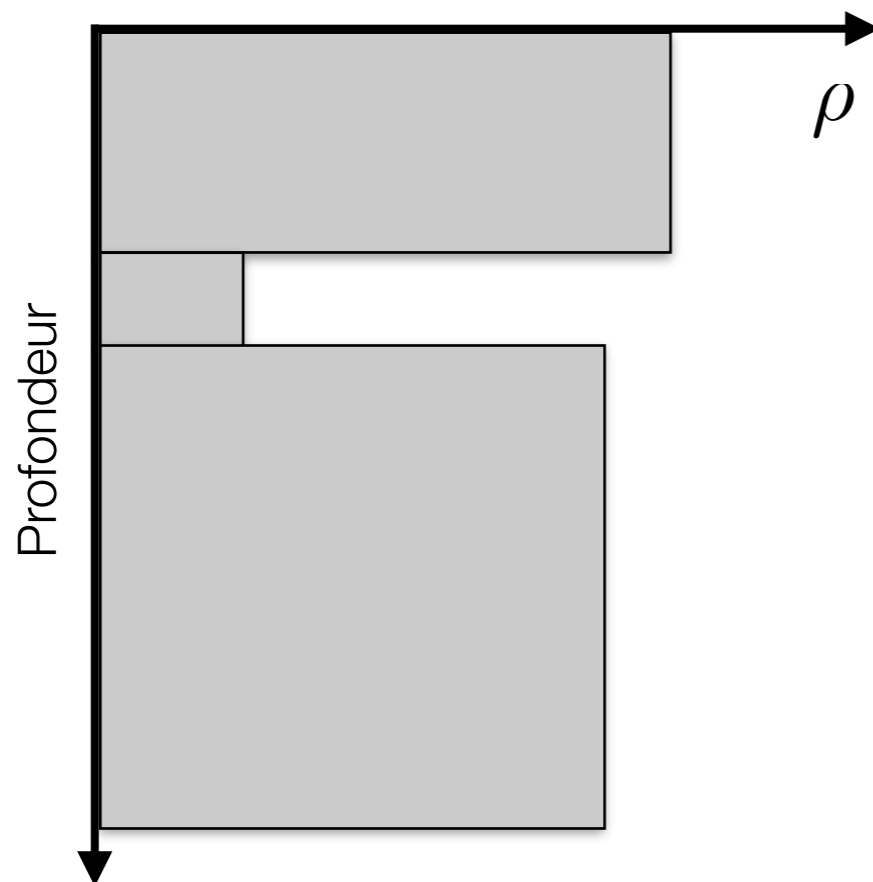


Courbes types pour un modèle à 3 couches

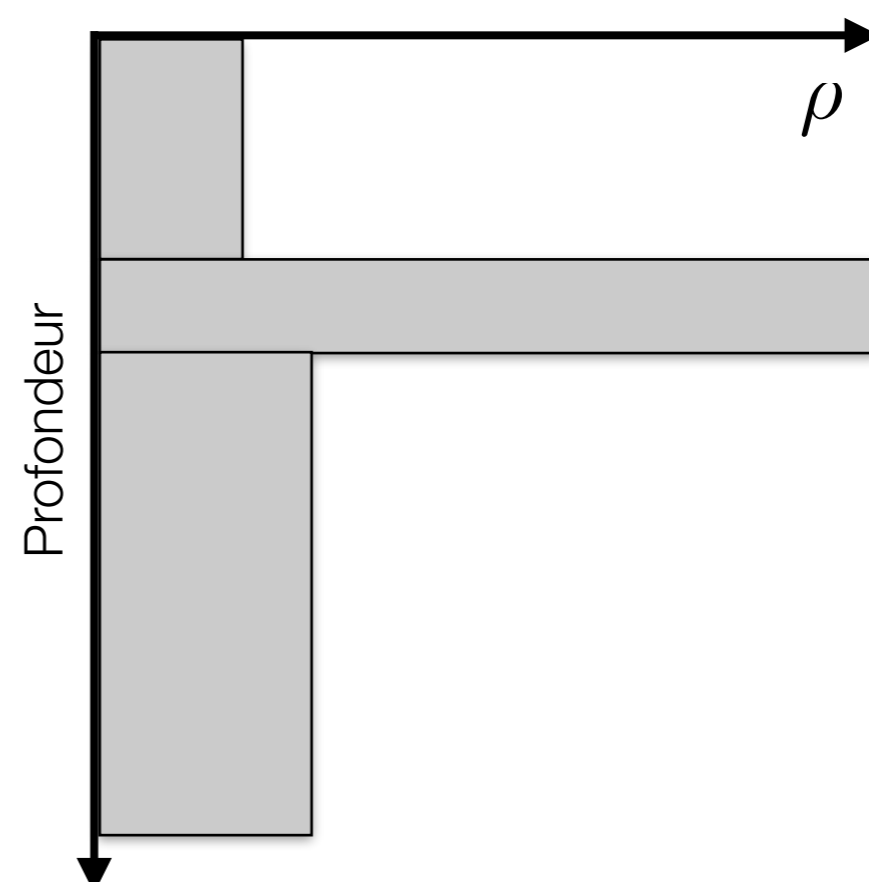
Sondage: Principe d'équivalence

Attention! Deux modèles tabulaires différents peuvent donner des courbes de sondage très similaires l'une à l'autre.

Couche mince conductrice entre deux couches résistives



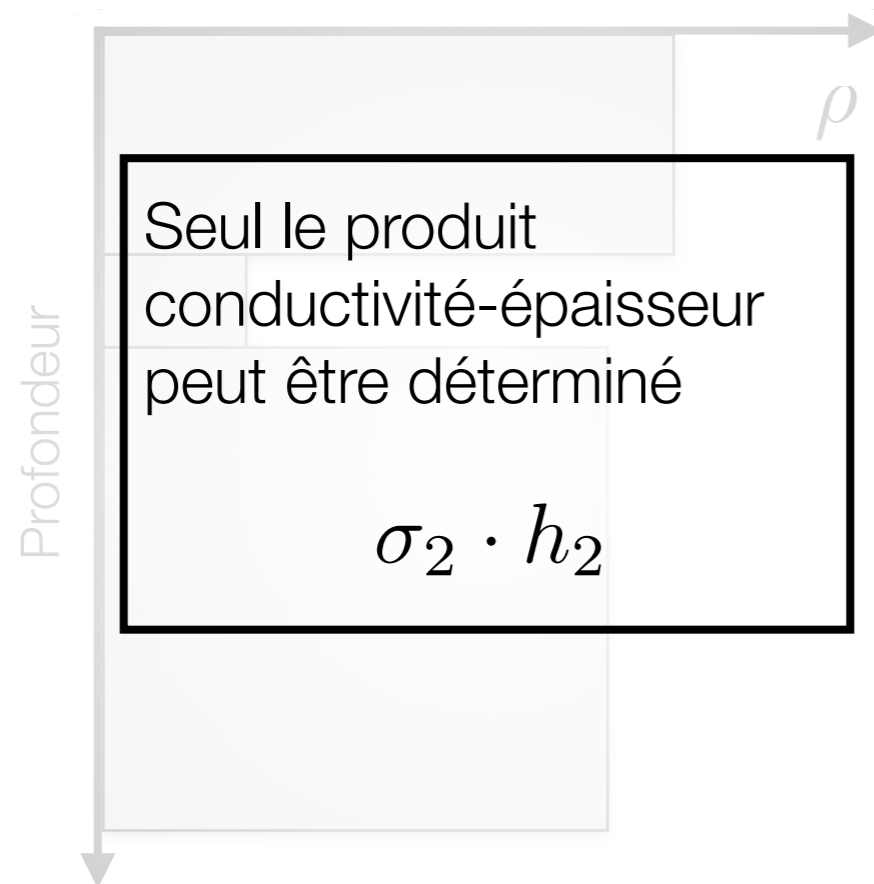
Couche mince résistive entre deux couches conductrices



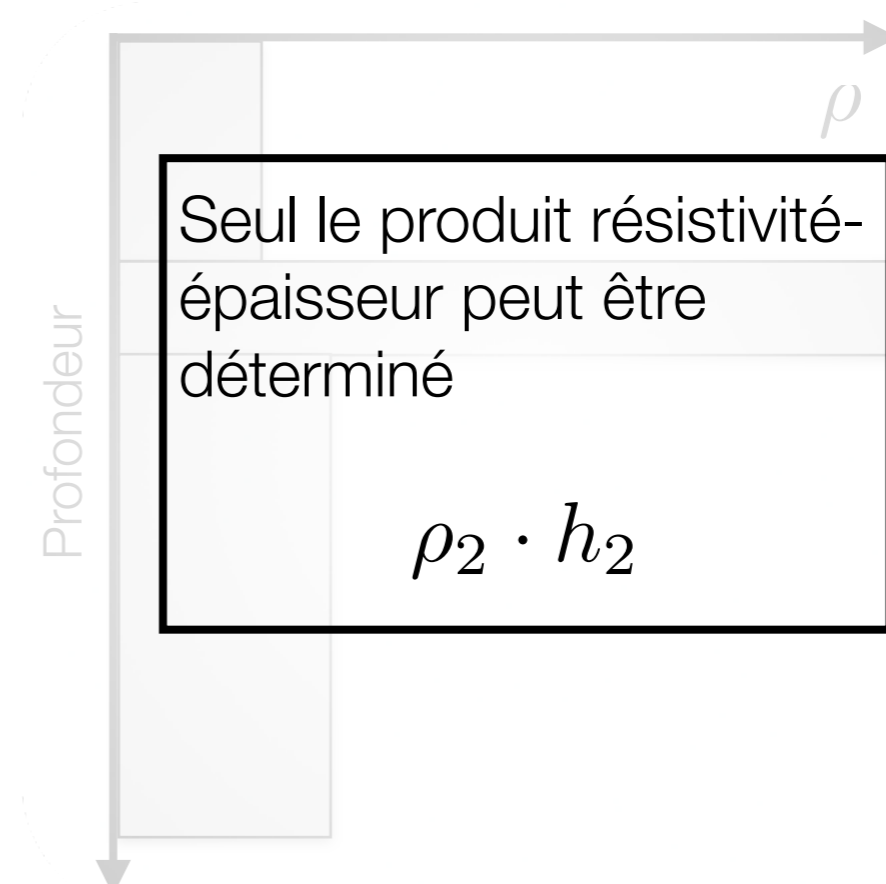
Sondage: Principe d'équivalence

Attention! Deux modèles tabulaires différents peuvent donner des courbes de sondage très similaires l'une à l'autre.

Couche mince conductrice entre deux couches résistives



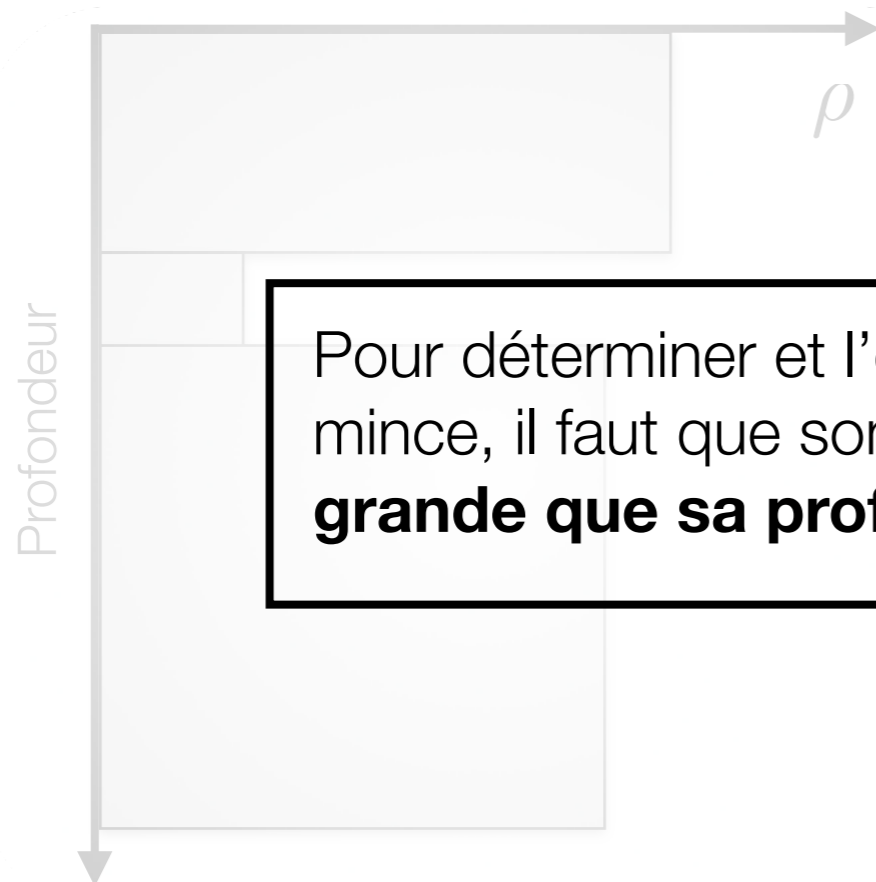
Couche mince résistive entre deux couches conductrices



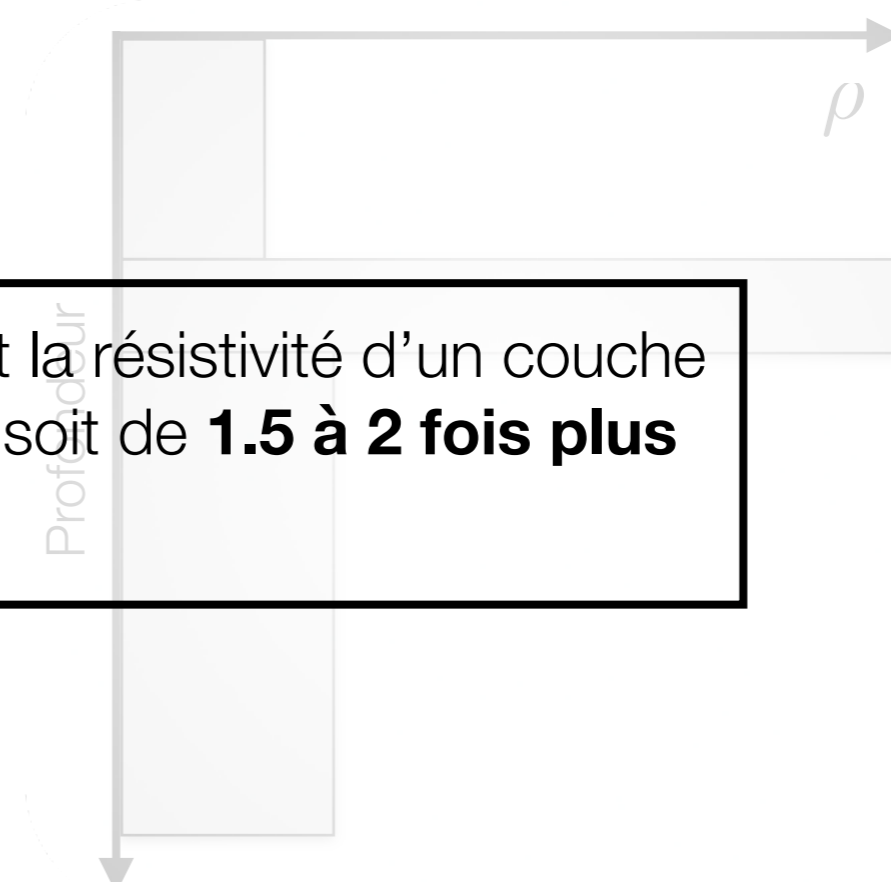
Sondage: Principe d'équivalence

Attention! Deux modèles tabulaires différents peuvent donner des courbes de sondage très similaires l'une à l'autre.

Couche mince conductrice entre deux couches résistives

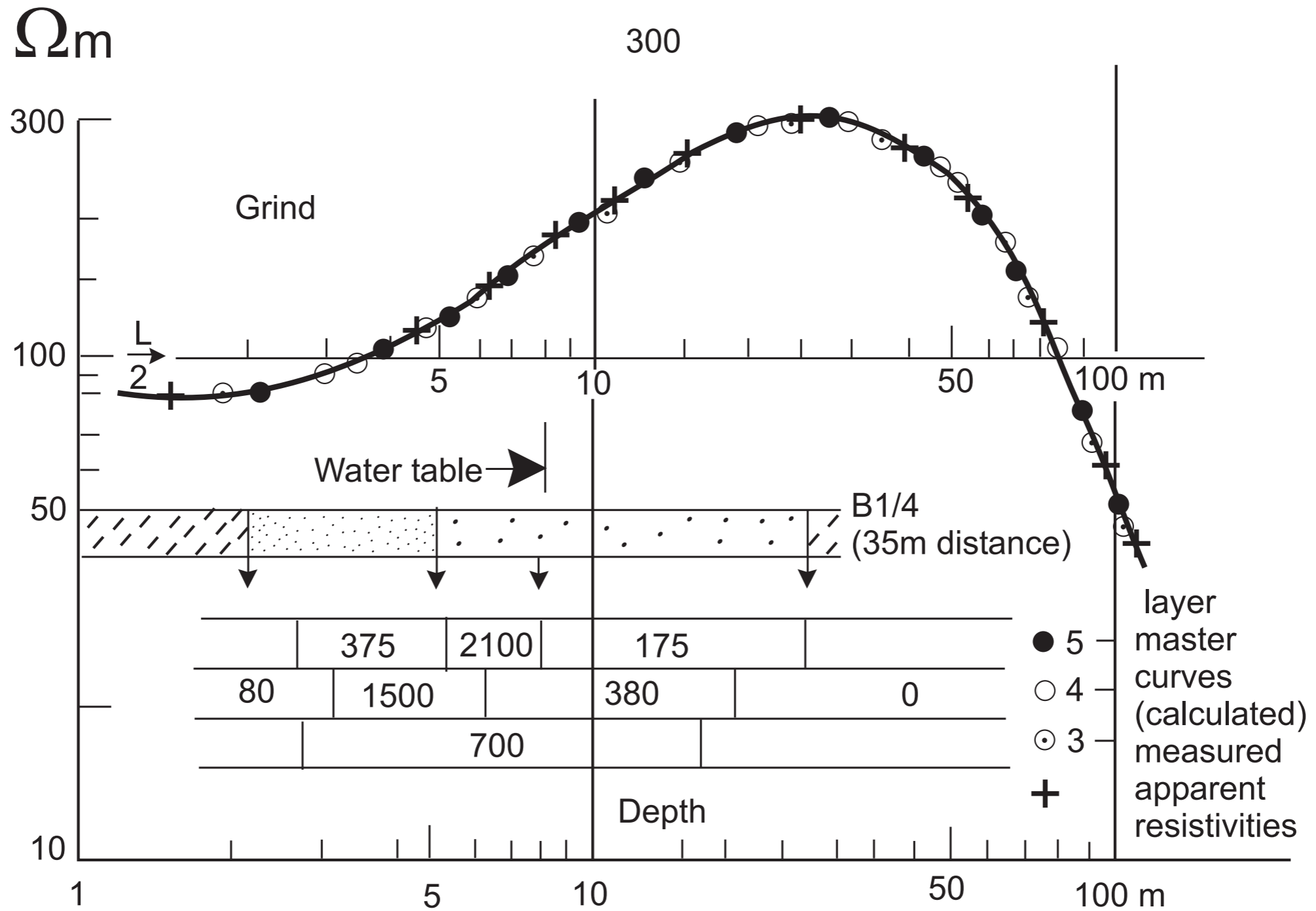


Couche mince résistive entre deux couches conductrices



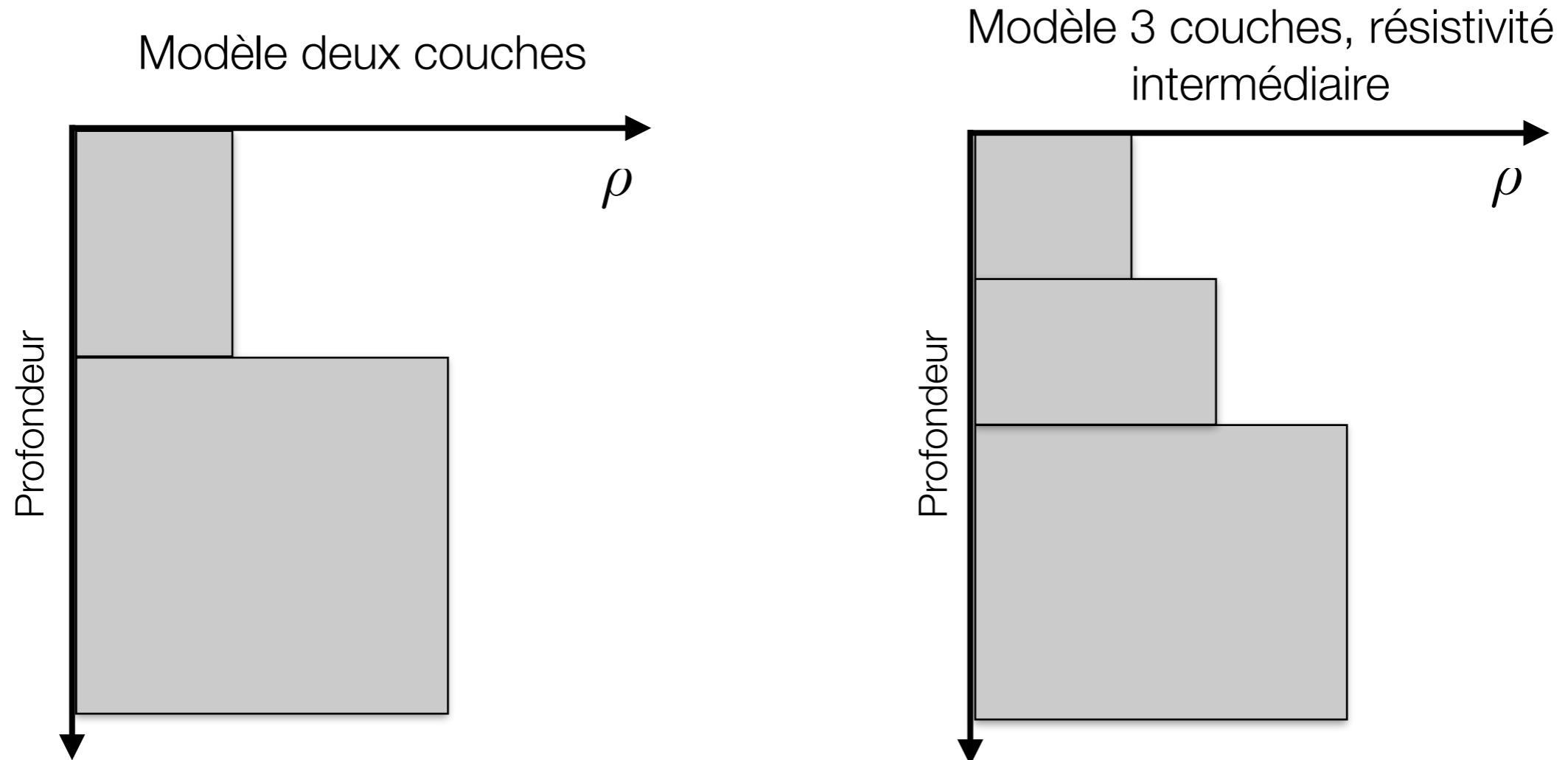
Pour déterminer l'épaisseur et la résistivité d'une couche mince, il faut que son épaisseur soit de **1.5 à 2 fois plus grande que sa profondeur.**

Sondage: Principe d'équivalence



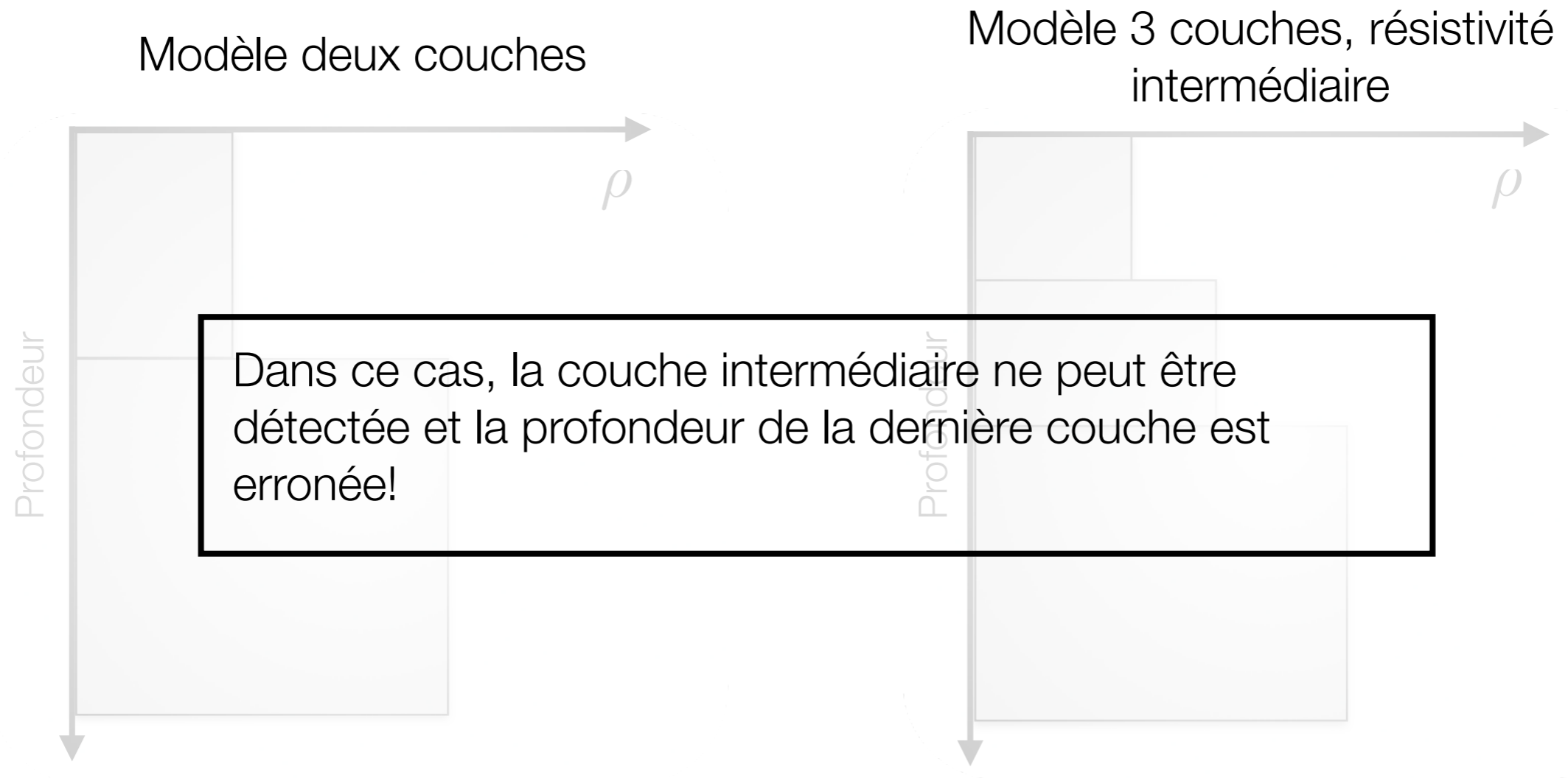
Sondage: Principe de suppression

Attention! Deux modèles tabulaires différents peuvent donner des courbes de sondage très similaires l'une à l'autre.



Sondage: Principe de suppression

Attention! Deux modèles tabulaires différents peuvent donner des courbes de sondage très similaires l'une à l'autre.

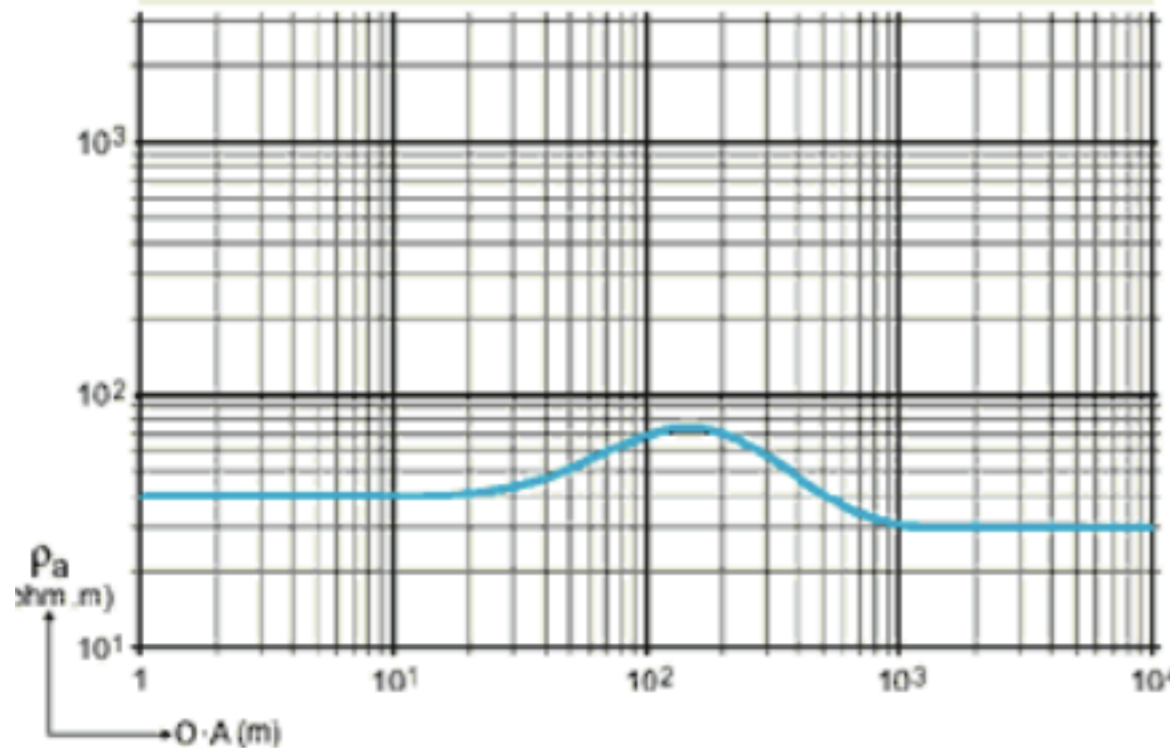


Sondage: Principe de suppression

EQUIVALENCE TYPE K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)

INTERPRÉTATION (A)		
Résistivité (ohm.m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
40	36	0
800	10	36
30		46

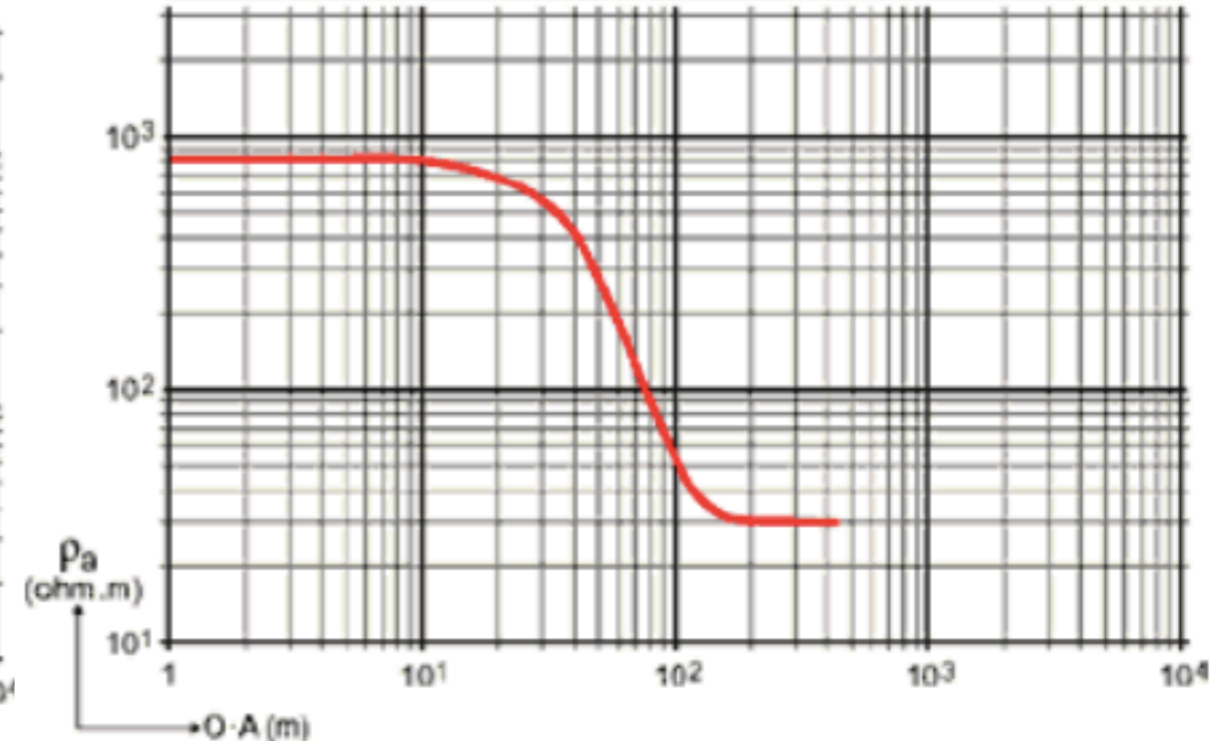
INTERPRÉTATION (B)		
Résistivité (ohm.m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
40	36	0
400	20	36
30		56



SUPPRESSION TYPE Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$)

INTERPRÉTATION (A)		
Résistivité (ohm.m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
800	21	0
30		21

INTERPRÉTATION (B)		
Résistivité (ohm.m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
800	20	0
200	5	20
30		25



En résumé

Bref, les sondages électriques:

- donnent la variation en profondeur de la résistivité électrique,
- sont sensibles aux hétérogénéités à proximité des électrodes,
- sont historiquement interprétés par des abaques, mais aujourd'hui on utilise l'inversion,
- plusieurs modèles peuvent expliquer les données selon les principes d'équivalence et de similitude.

Au prochain cours: Tomographie électrique

