GLQ3205
Géophysique appliquée 2

Méthodes Électriques: Résistivité Électrique

Ahmed Mhenni
ahmed.mhenni@polymtl.ca

Été 2025

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

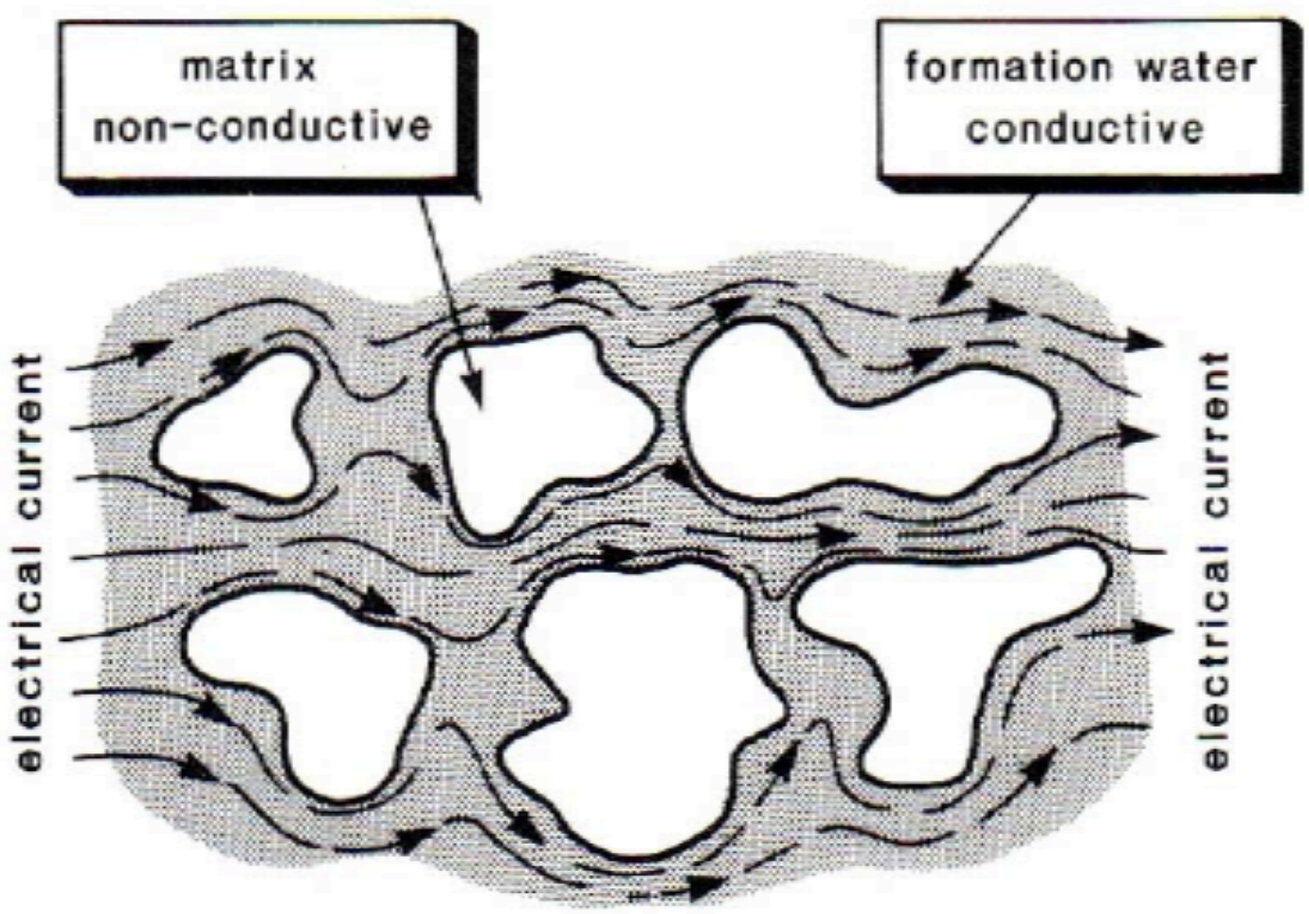
Loi d'Archie

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.

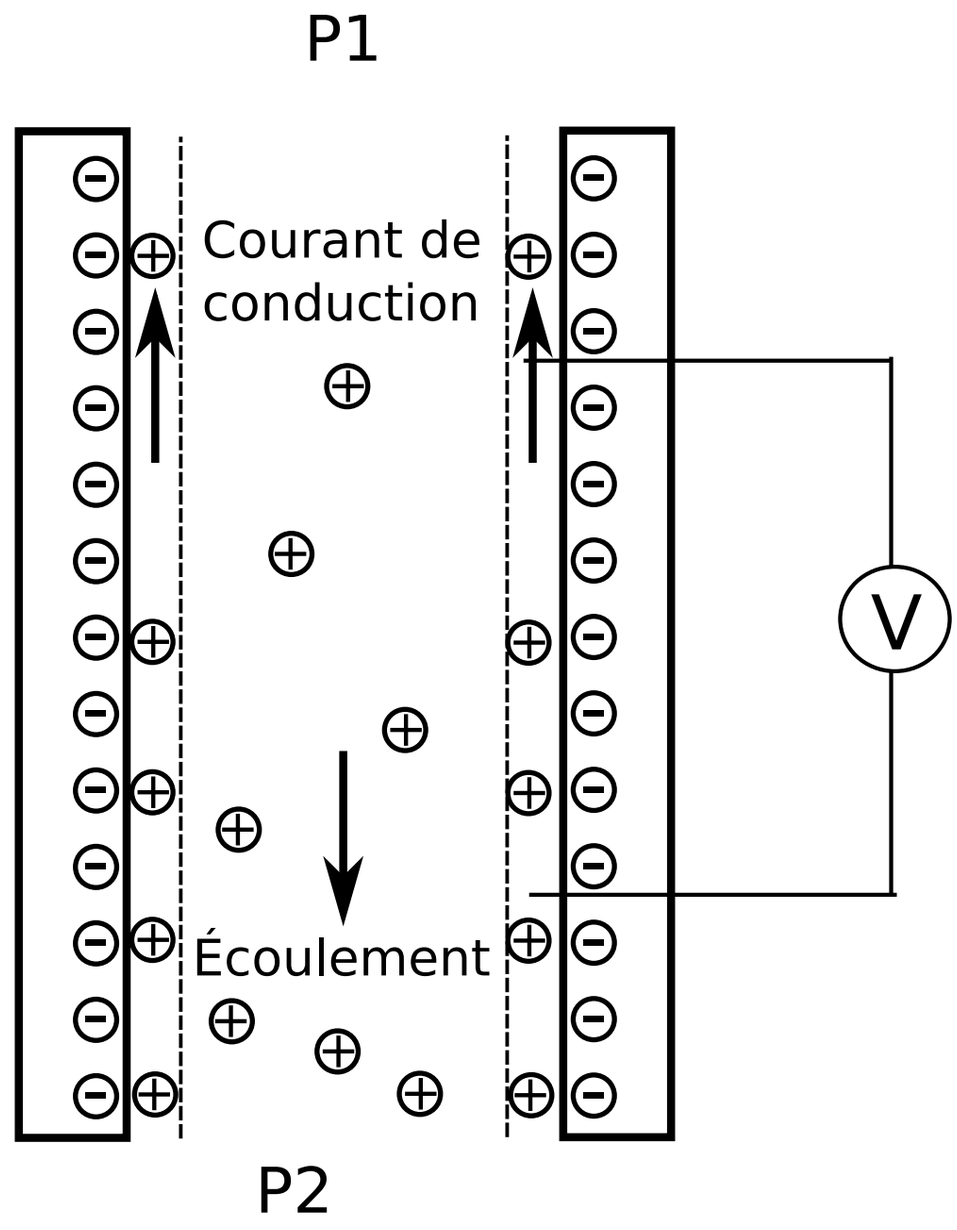
- Le potentiel bioélectrique
- Les potentiels telluriques

Potentiel électrocinétique

- Lorsque l'électrolyte s'écoule dans le milieu poreux, les ions positifs de la couche diffuse sont entrainés 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:

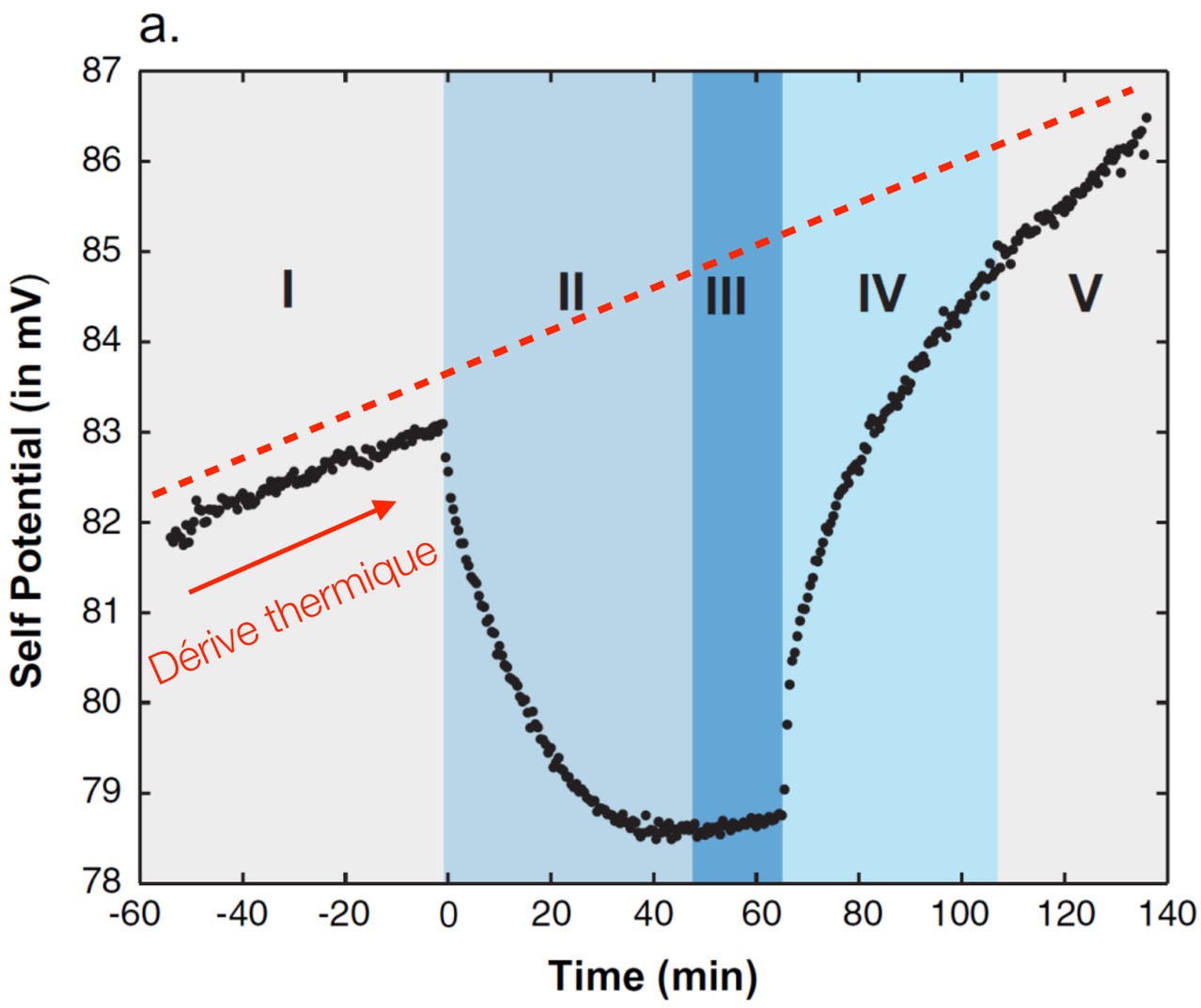
$$E_k = -\phi \frac{\Delta P \epsilon \rho}{4\pi\eta}$$

P : Pression
ϕ : Potentiel d'adsorption
η : Viscosité du fluide
ϵ : Permittivité électrique



https://wiki.anton-paar.com/en/zeta-potential/

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

I. Avant pompage
II. Phase transitoire lors du pompage
III. Régime permanent
IV. Phase transitoire après pompage
V. Régime permanent

Jardani, A. et al., 2008

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:

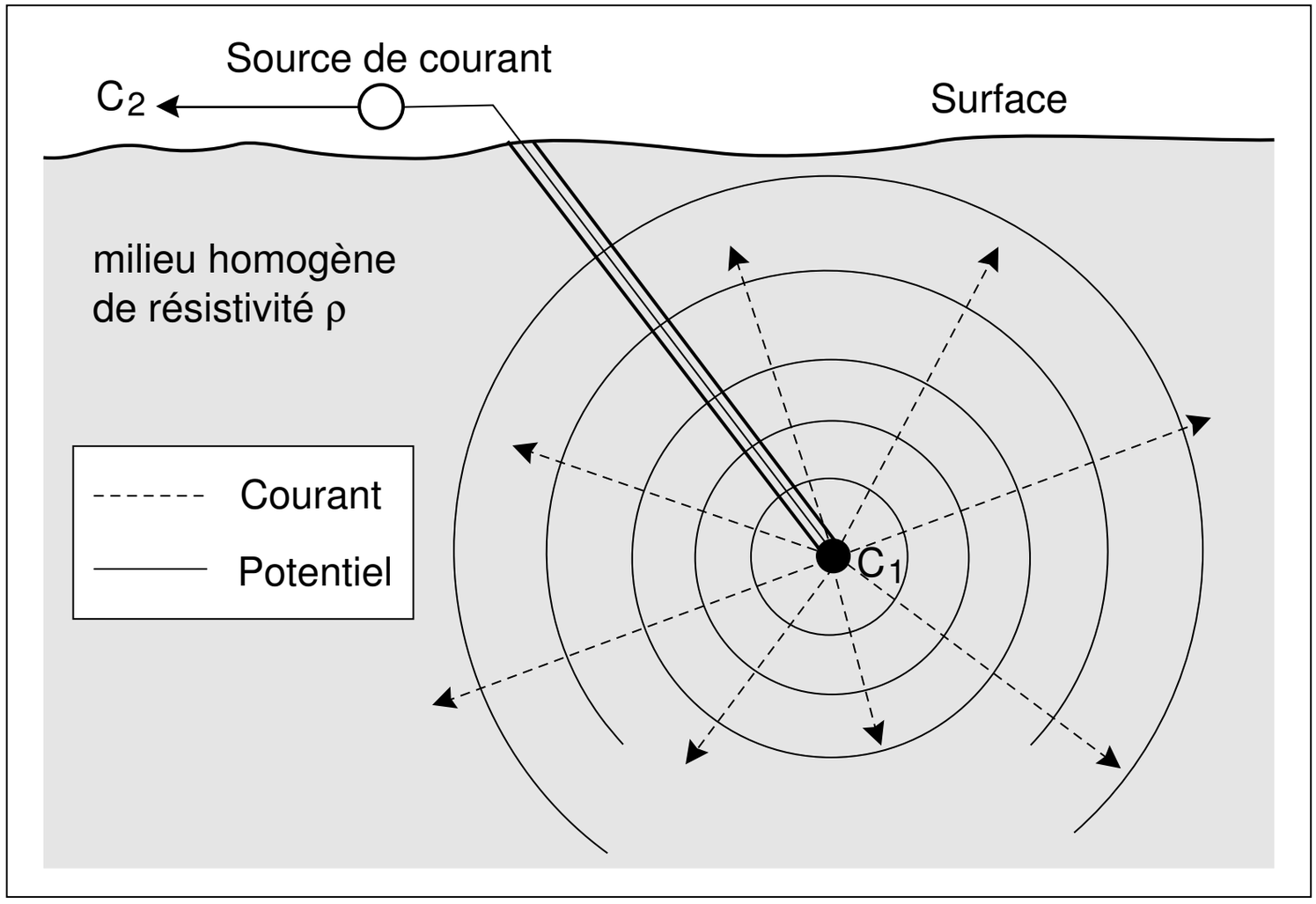
$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

- Le potentiel électrique

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

- La densité de courant:

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



Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

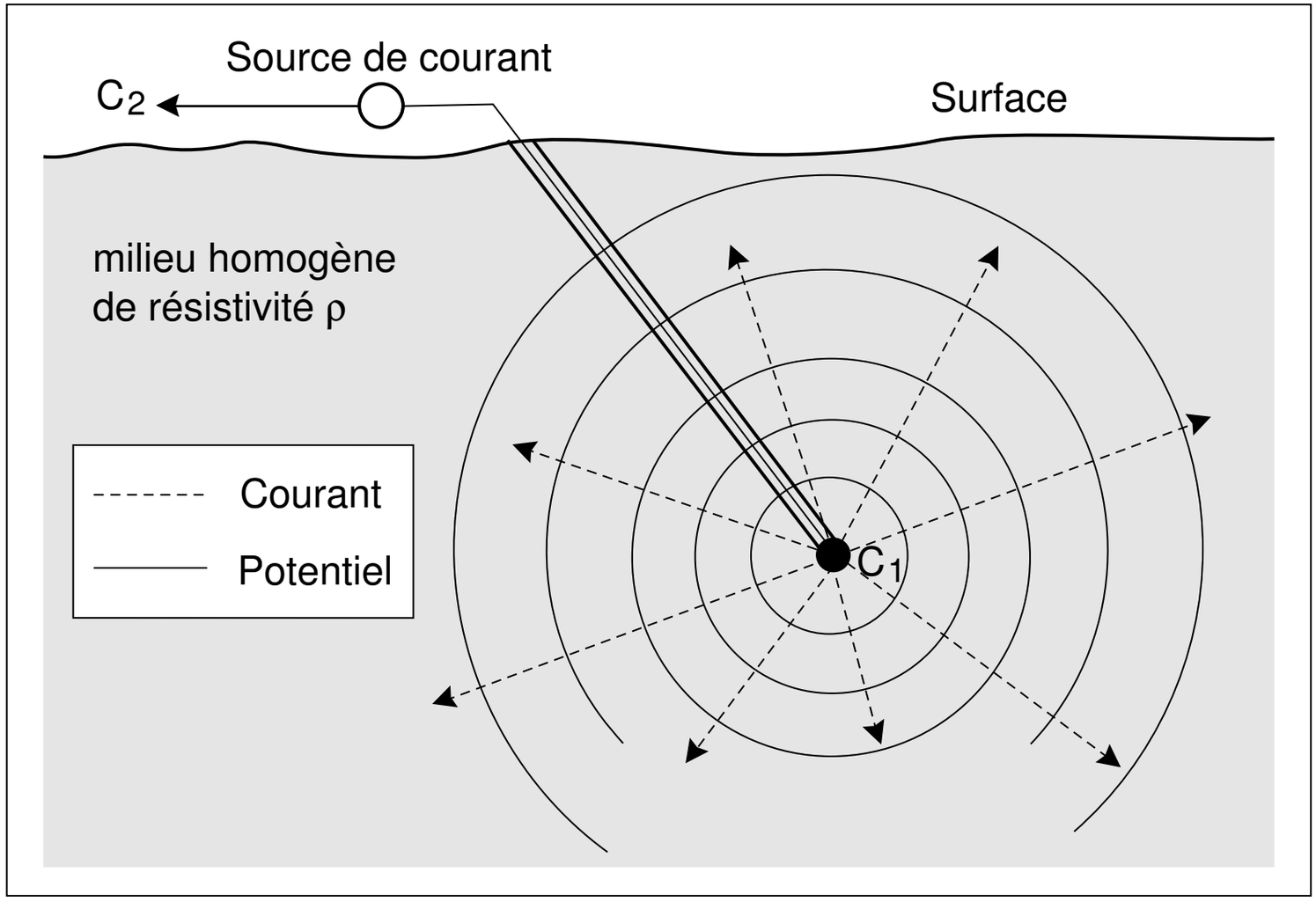
L'injection d'un courant provoque une densité de courant dont la divergence est nulle

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

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

$$\nabla \cdot (\sigma \boldsymbol{E}) = 0$$
$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = 0$$
$$\nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0$$

$$\boxed{\nabla^2 V = 0}$$

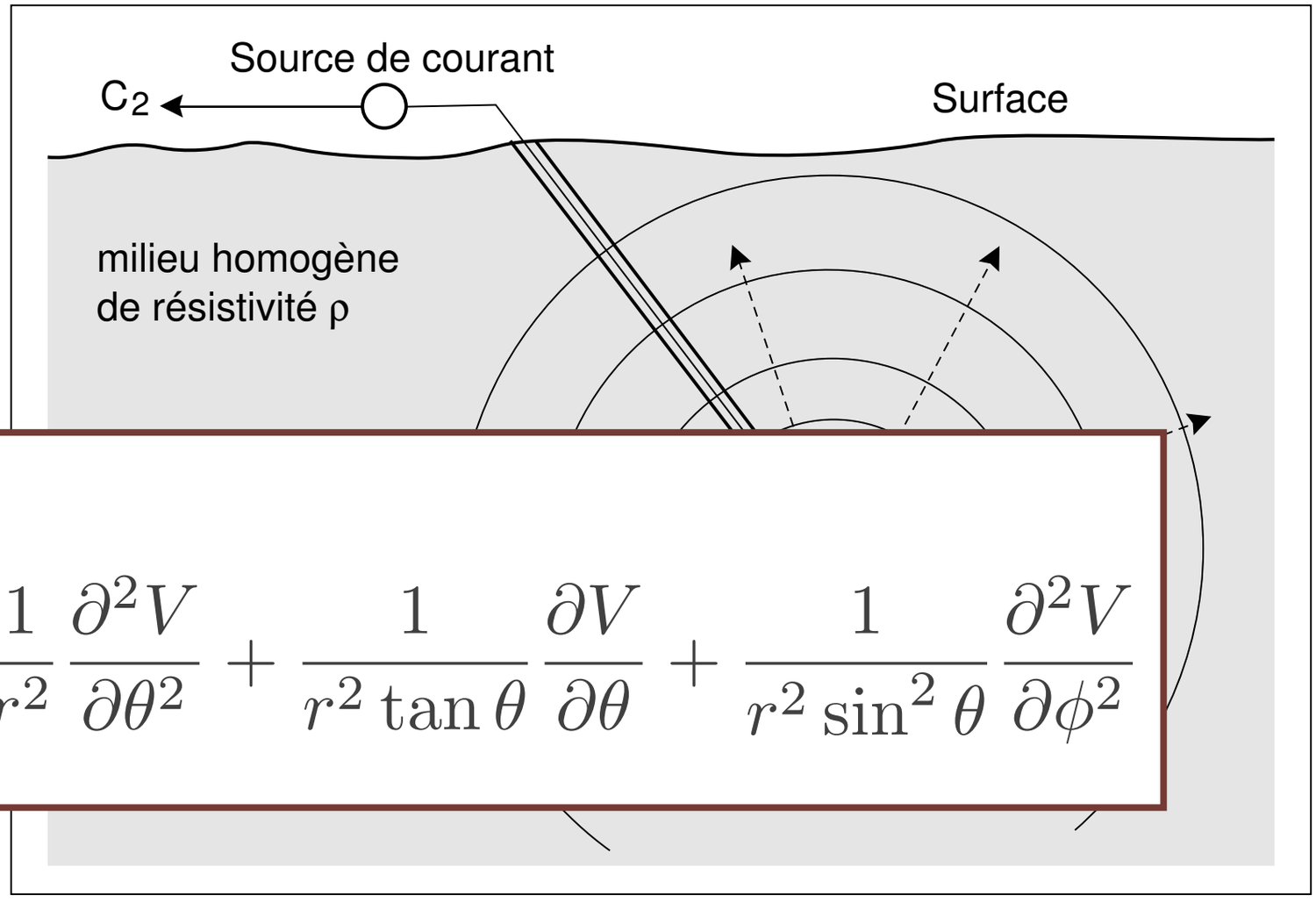


Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

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

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

Ce qui donne l'équation de



En coordonnées sphériques

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

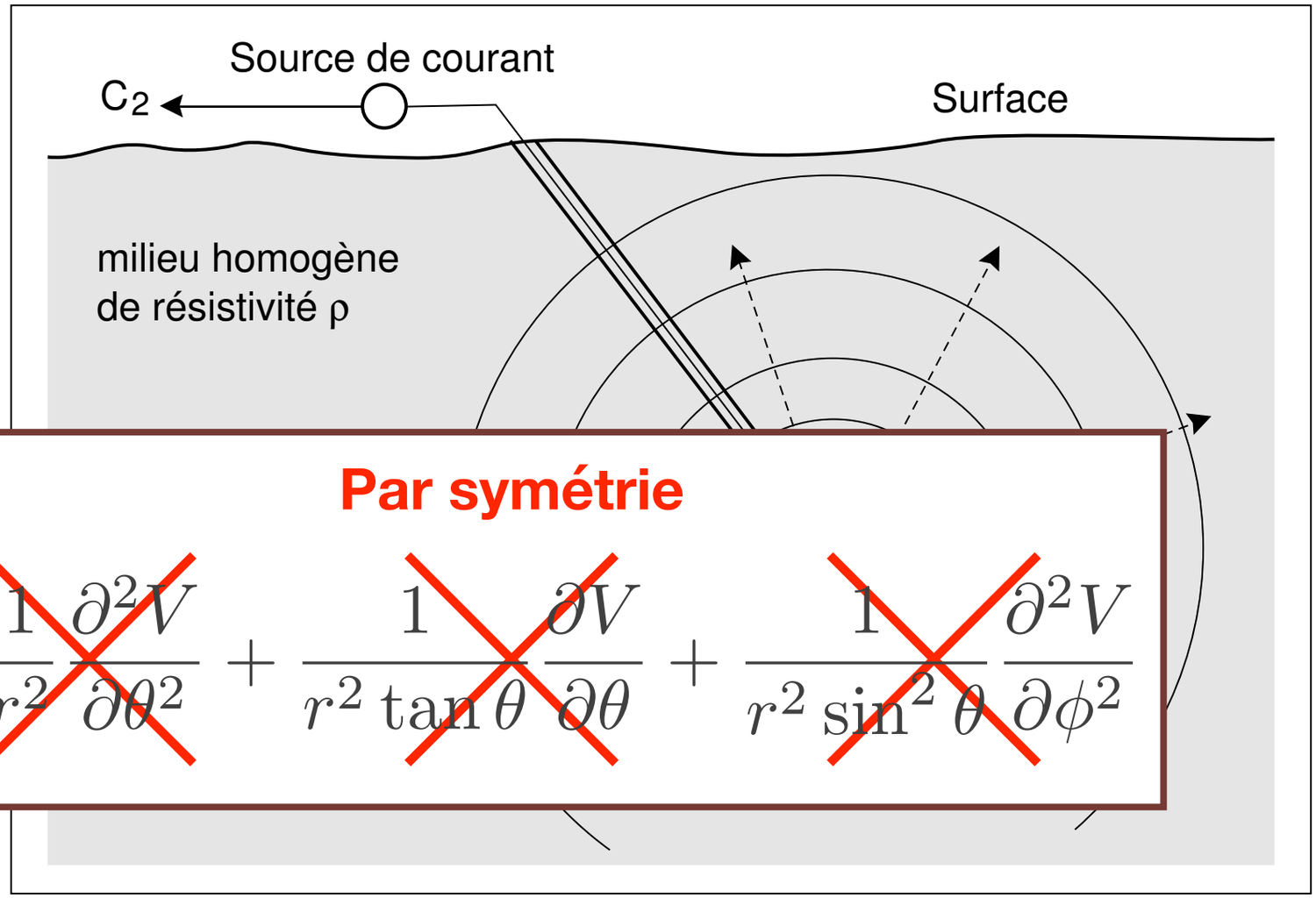
$$\nabla^2 V = 0$$

Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

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

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

Ce qui donne l'équation de



En coordonnées sphériques

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

Par symétrie

$$\nabla^2 V = 0$$

Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

Nous devons résoudre

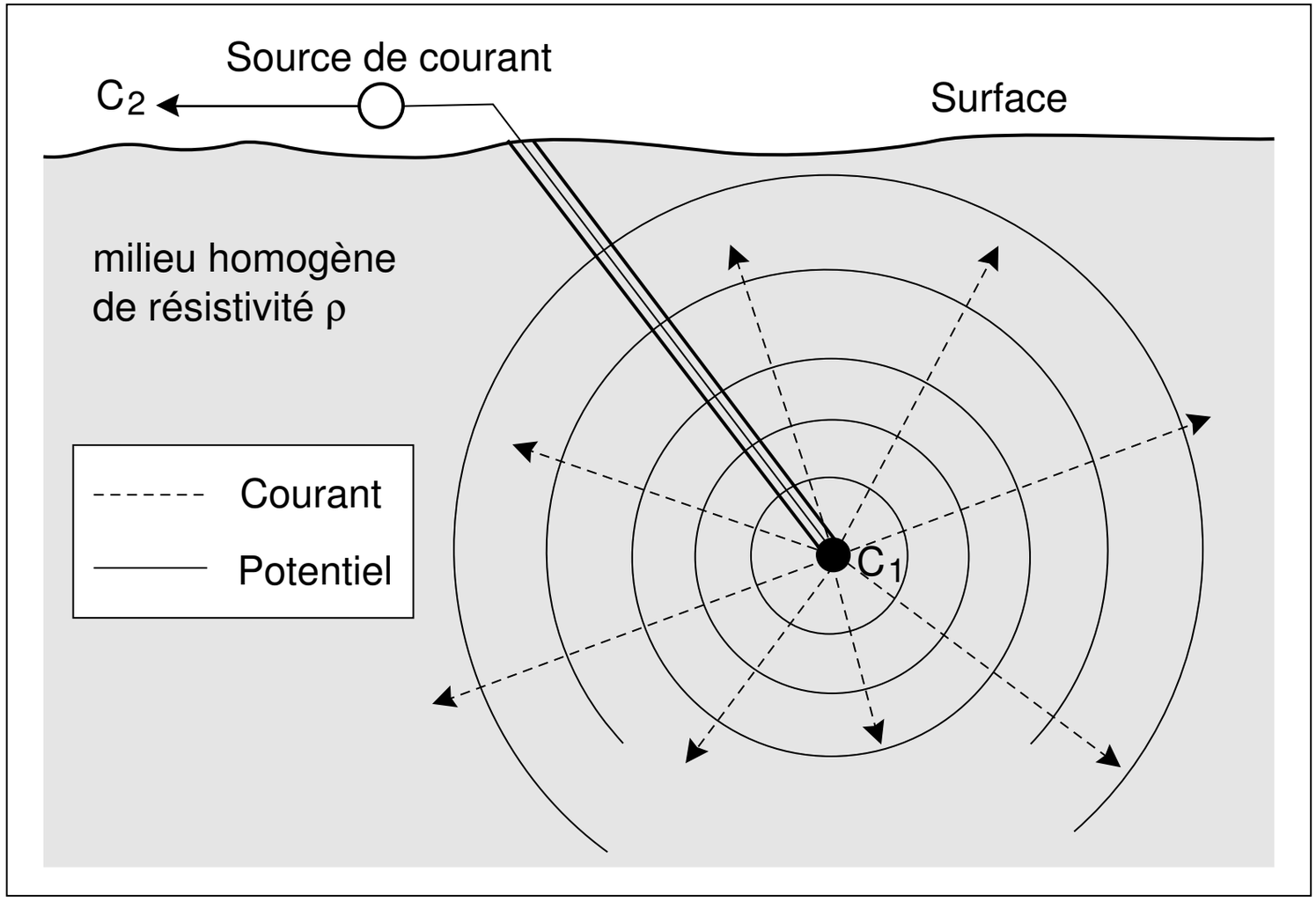
$$\nabla^2 V = 0$$

Par inspection, on trouve la solution:

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

La constante *B* doit être nulle, car

$$r \to \infty, V \to 0$$



Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

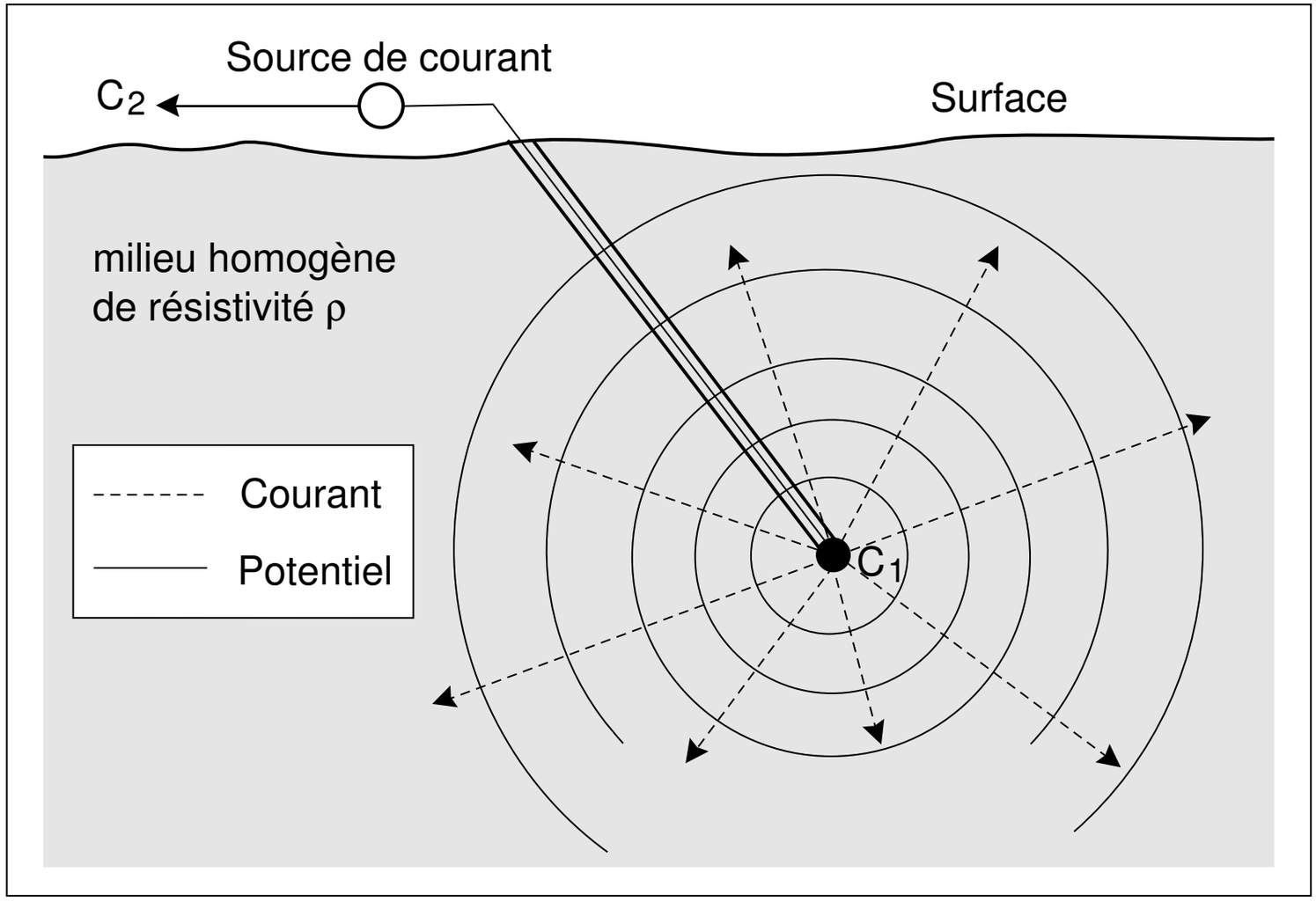
Exercice:

Trouvez la constante A:

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

Réponse:

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



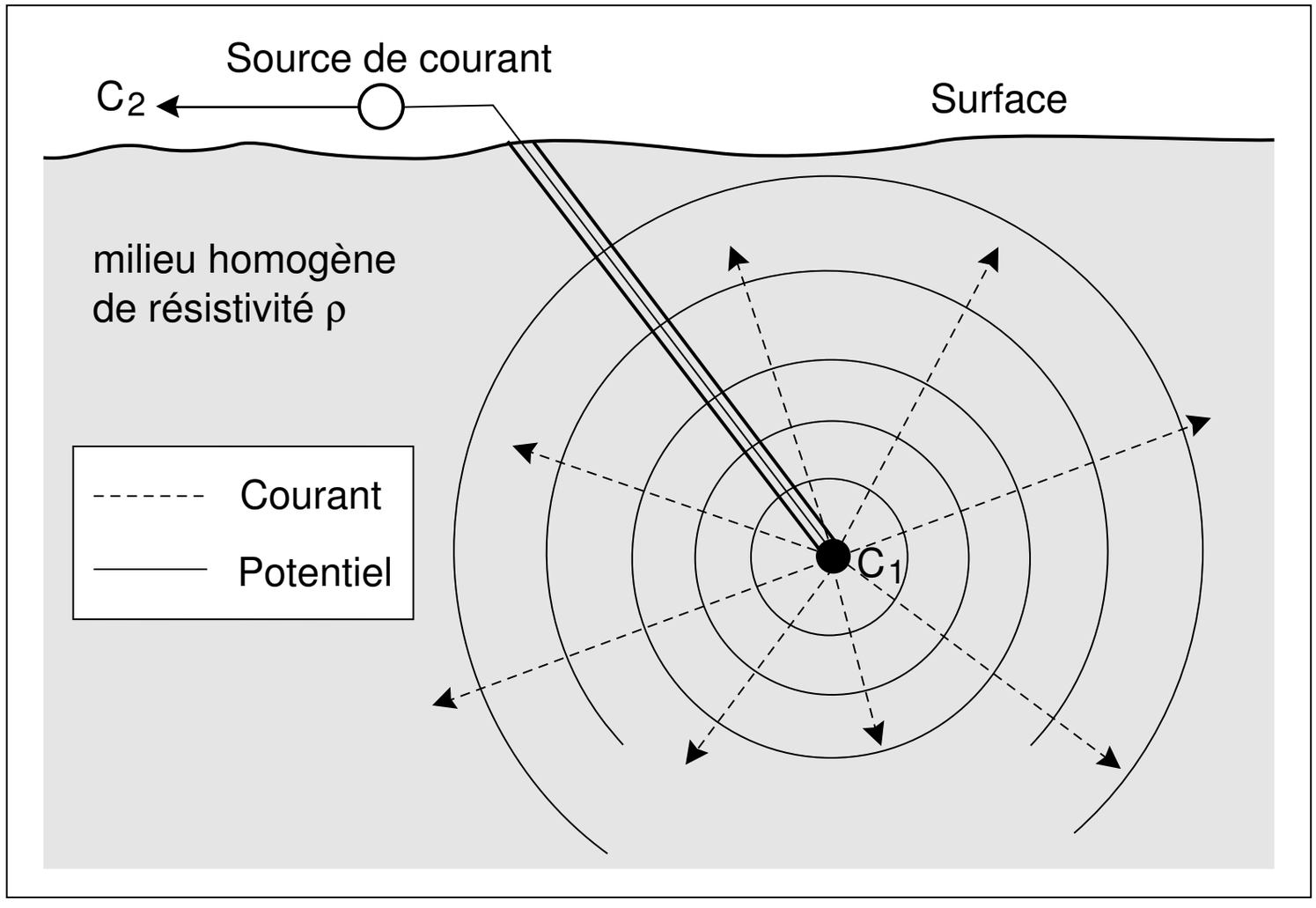
Distribution du potentiel: Milieu infini homogène

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.

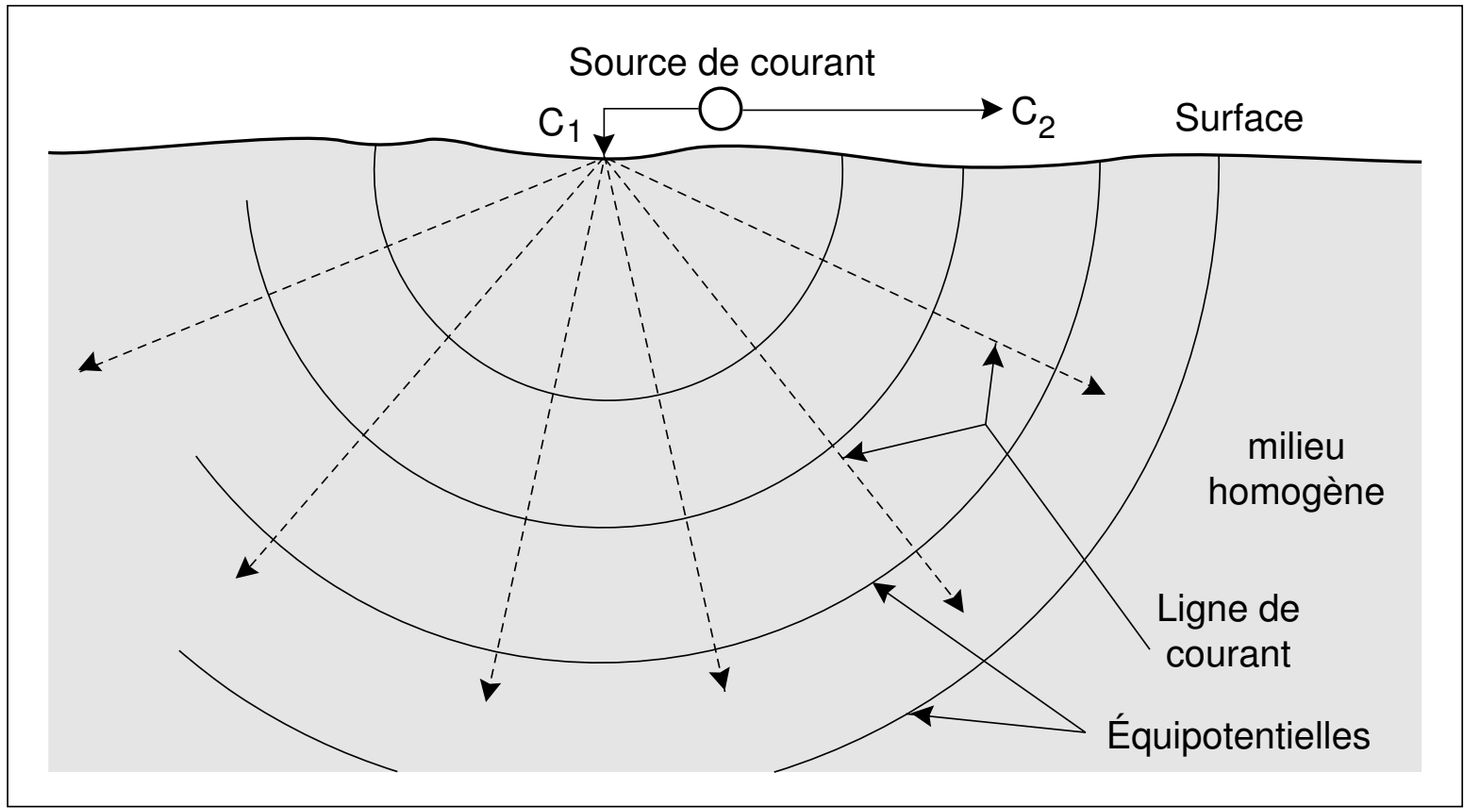


Distribution du potentiel: Électrode en surface

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:

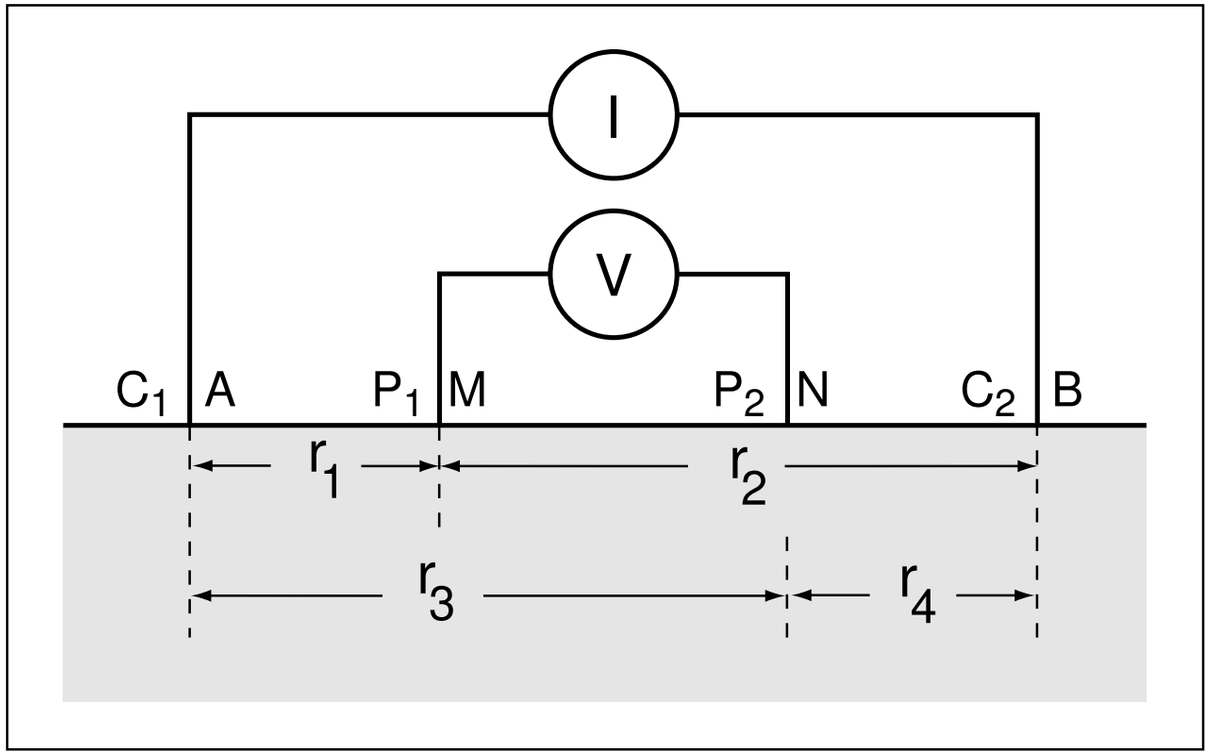
$$\nabla^2 V = 0$$

Si :

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

alors:

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



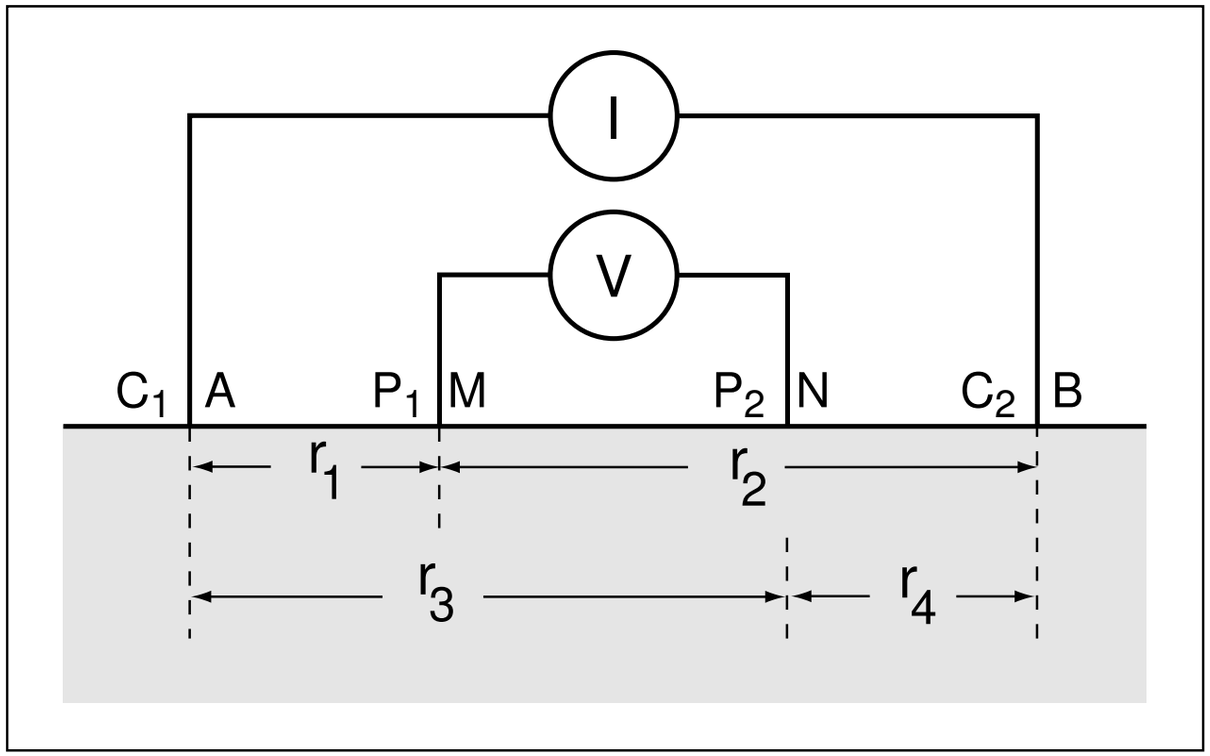
Distribution du potentiel: Plusieurs électrodes

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*:

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

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



Distribution du potentiel: Plusieurs électrodes

Pour 4 électrodes:

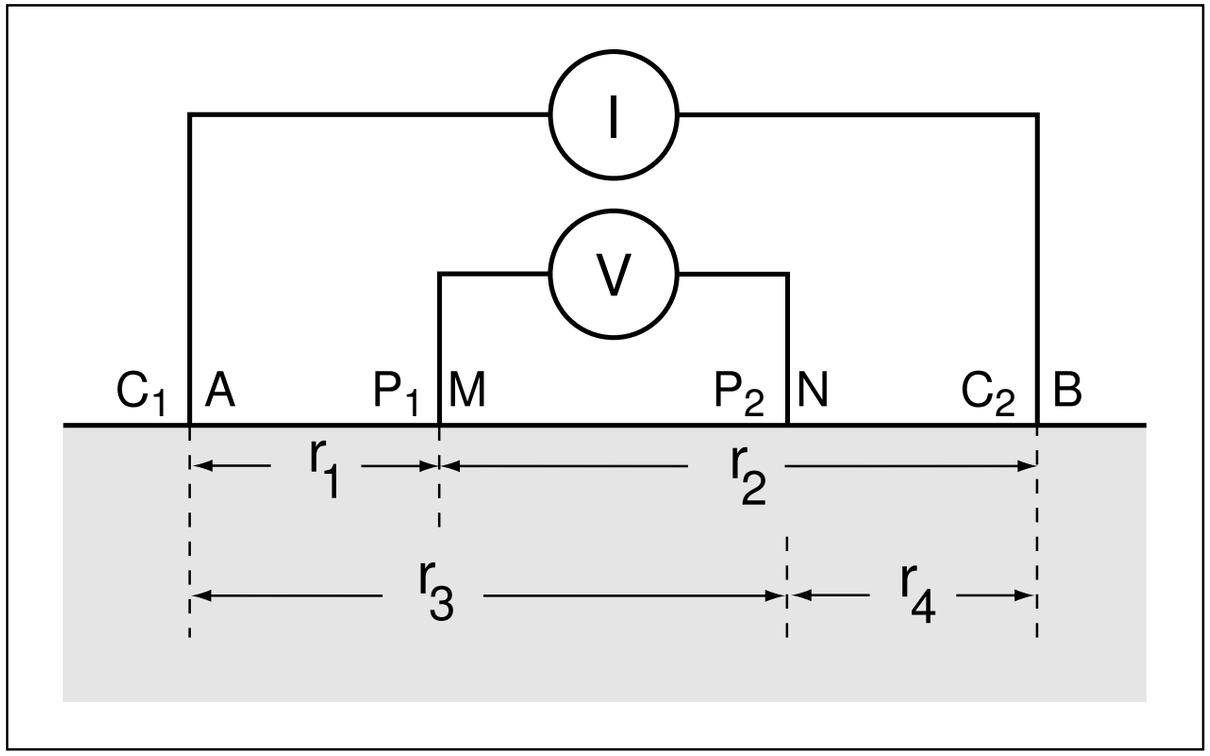
$$\Delta V_{MN} = \frac{I_{AB}\rho}{2\pi}\left(\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}}\right) - \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}}\right)\right)$$

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: $r_1 = r_4 = a$

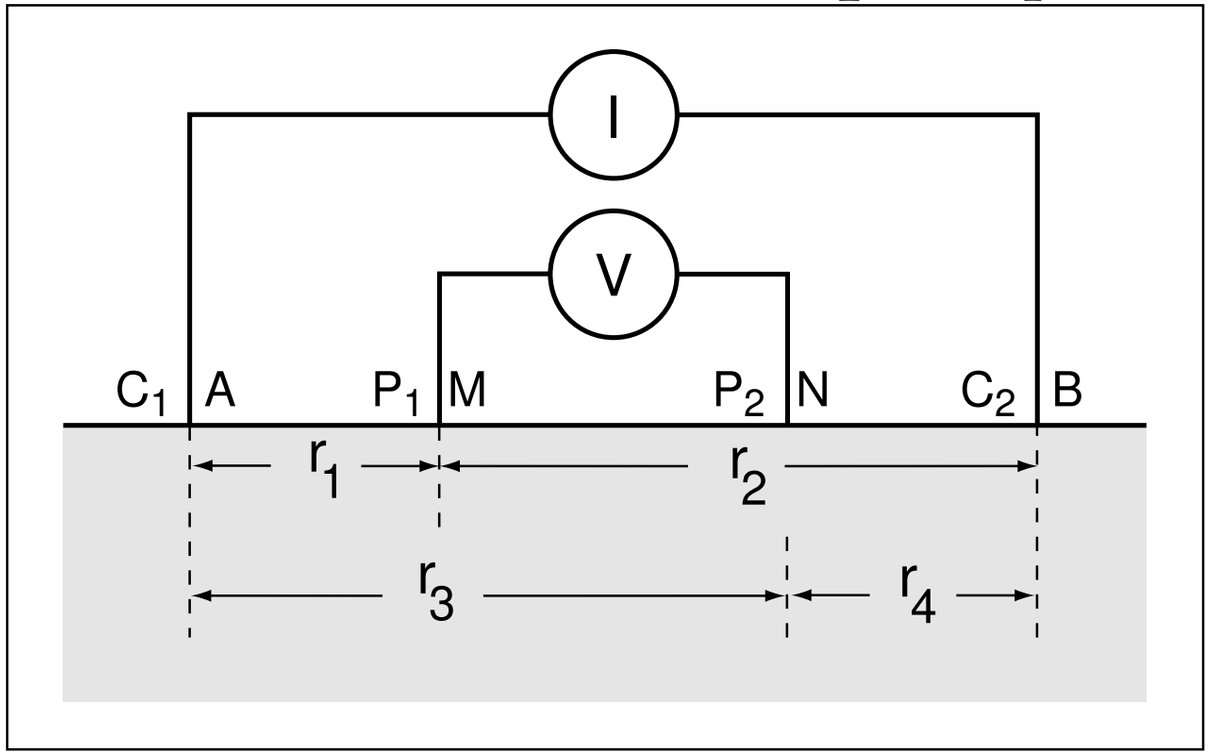
Si la distance entre les électrodes est *a*:

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

Et la résistivité apparente est:

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

$r_1 = r_4 = a$

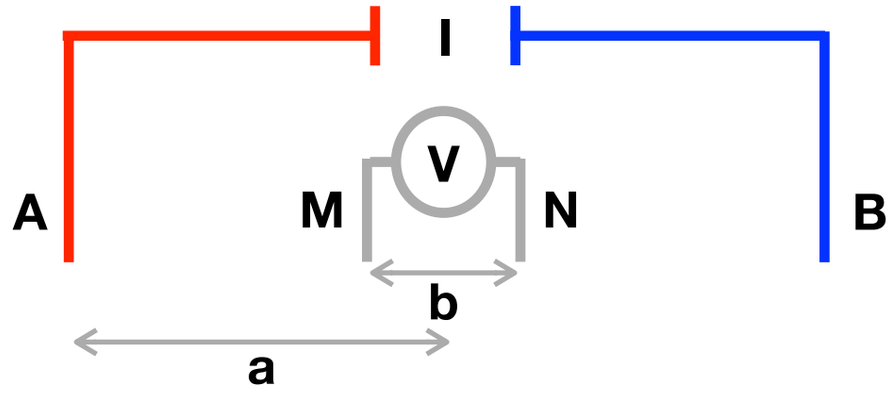


Distribution du potentiel: Plusieurs électrodes

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

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

Schlumberger



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 ?

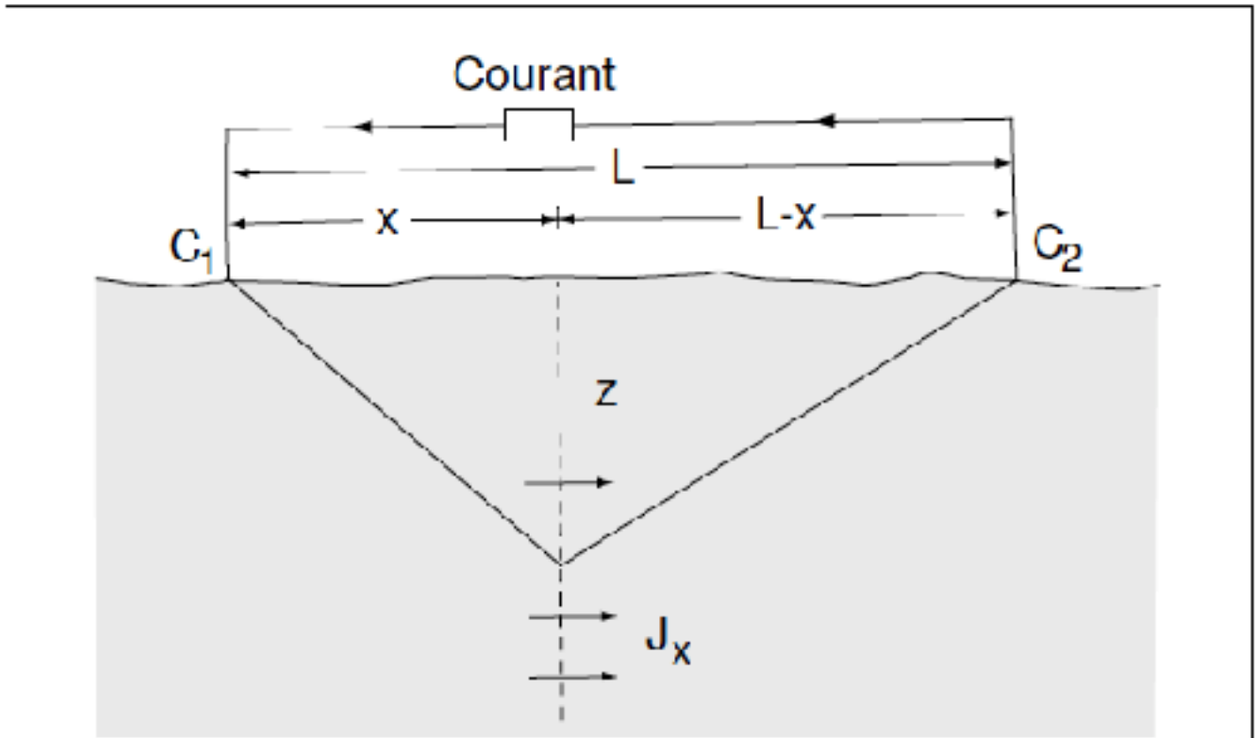
Profondeur d'investigation

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

On peut montrer (voir notes de cours):

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

Ainsi, la densité de courant diminue avec la profondeur !



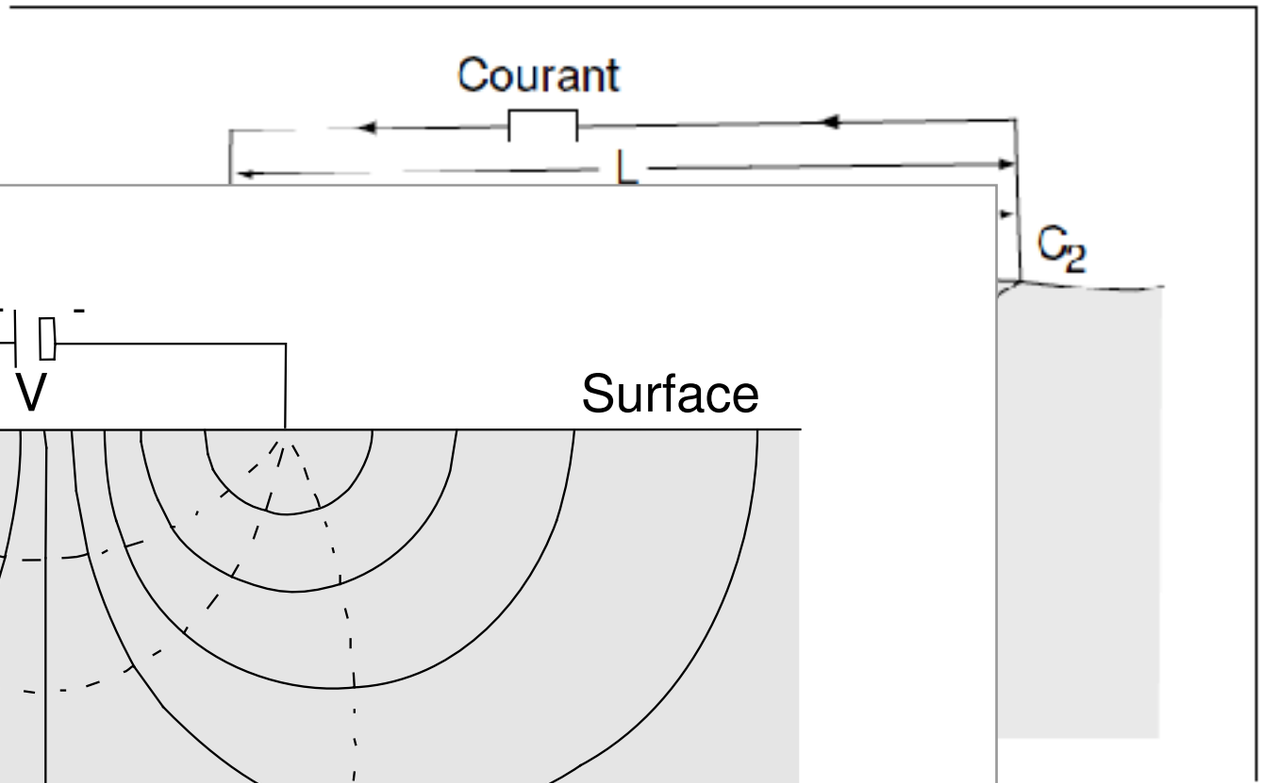
Profondeur d'investigation

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

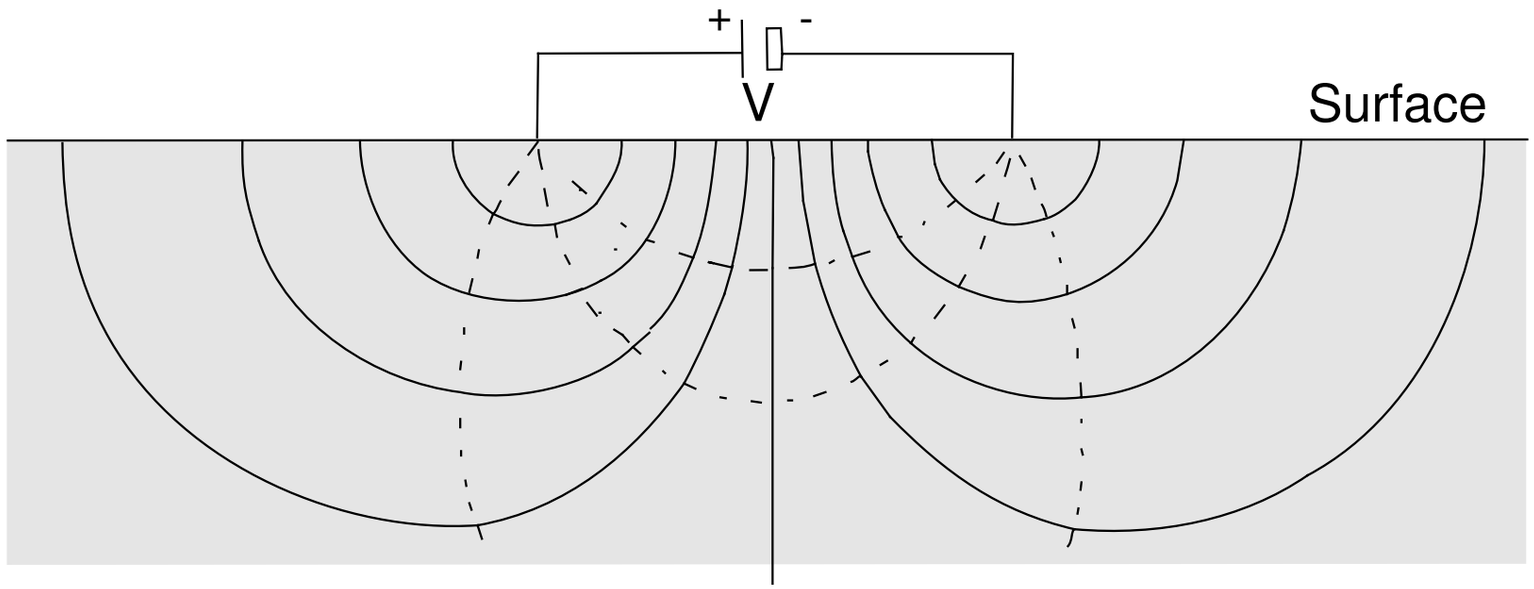
On peut montrer (voir notes de cours):

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

Ainsi, la
avec la p



Graphiquement



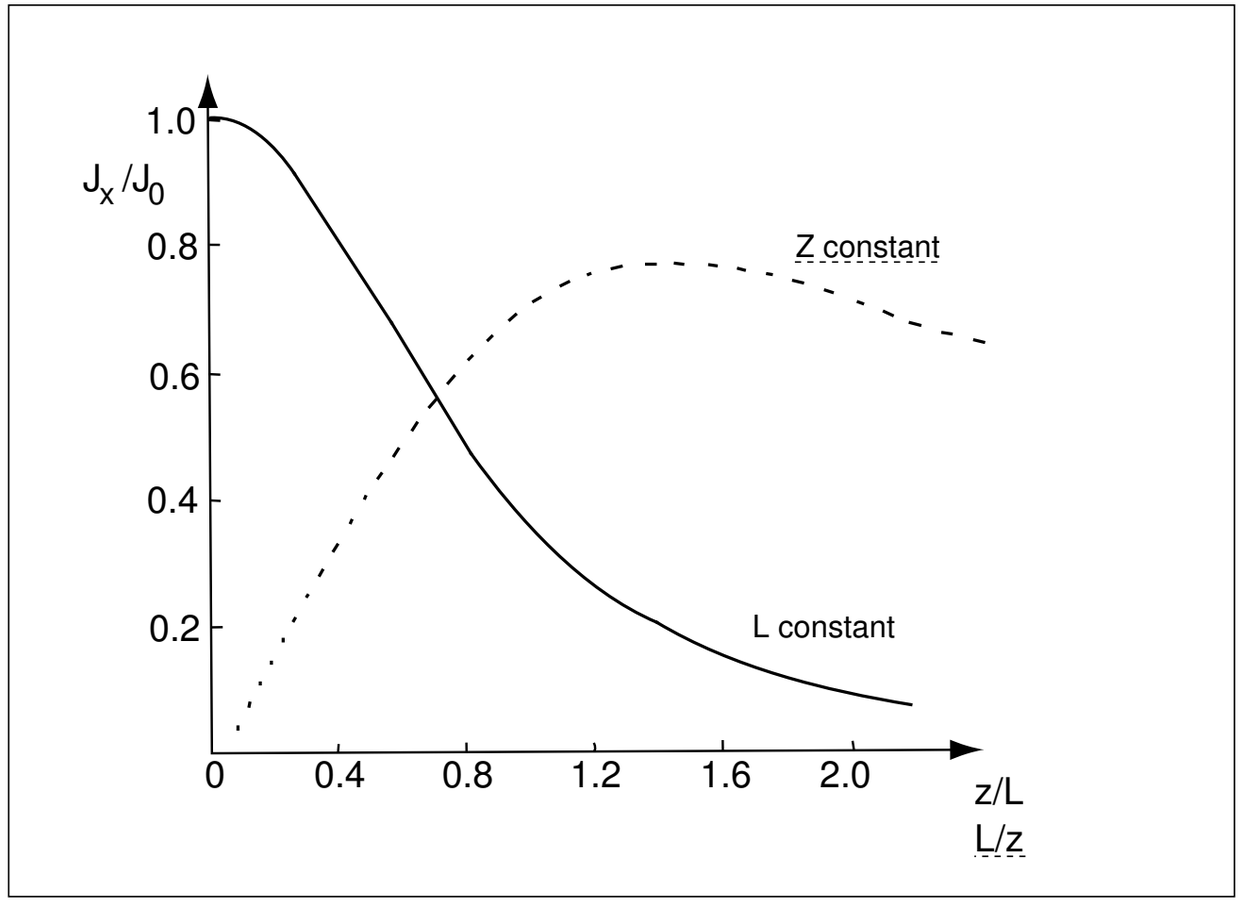
Profondeur d'investigation

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

On peut montrer (voir notes de cours):

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

Ainsi, la densité de courant diminue avec la profondeur !



Profondeur d'investigation

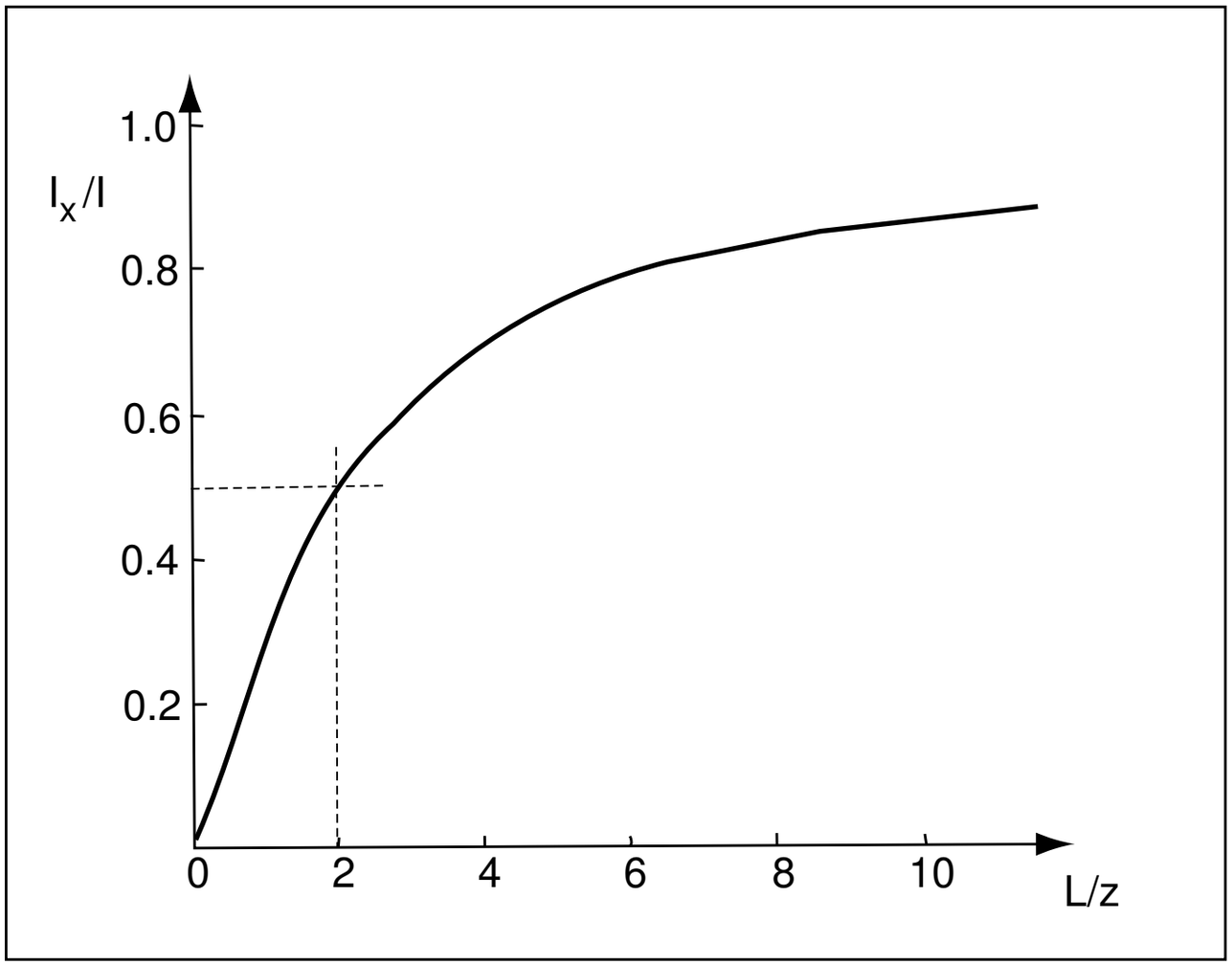
- Pour une profondeur donnée, la densité de courant est maximale pour un écartement L

- 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

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

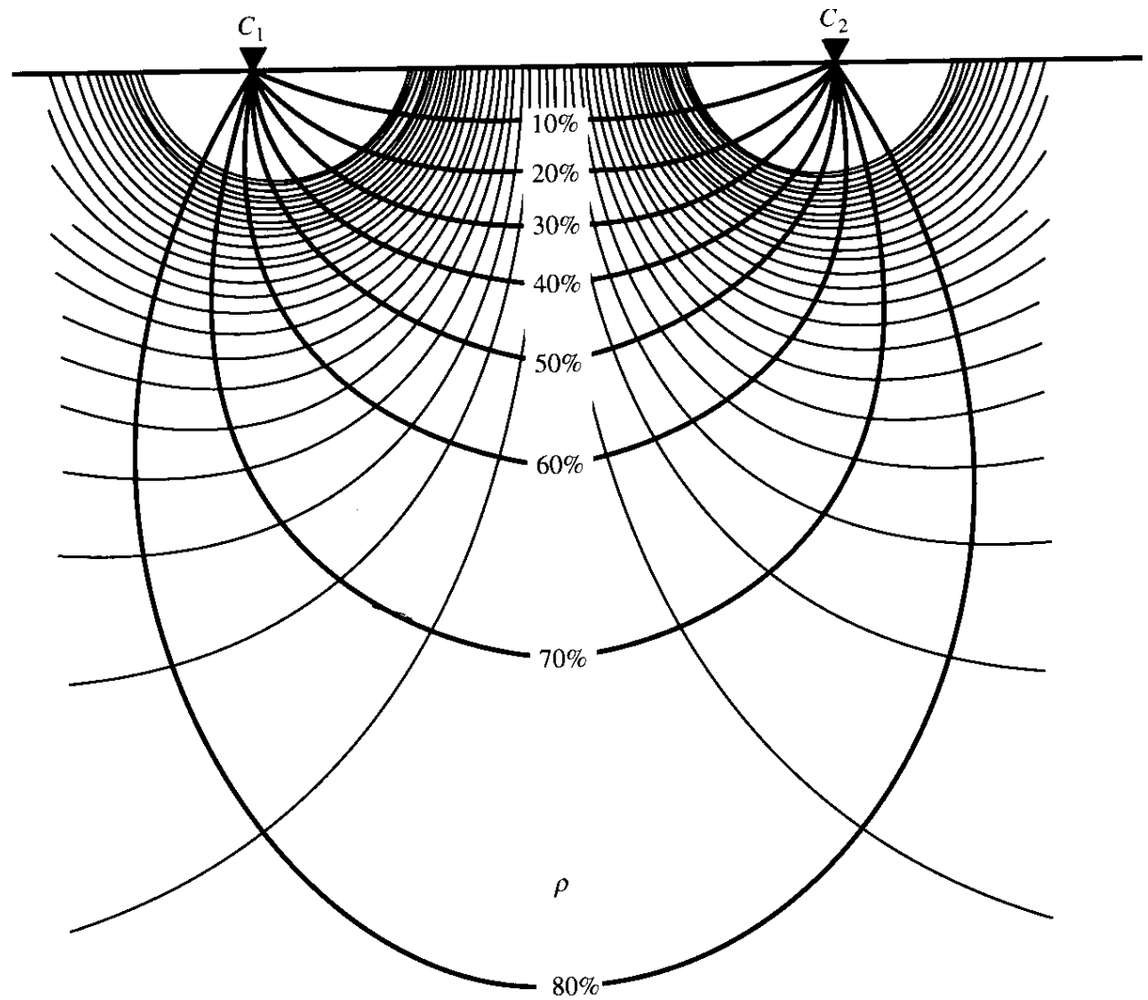
La moitié du courant passe entre la surface et z = L/2!



Profondeur d'investigation

- Pour une profondeur donnée, la densité de courant est maximale pour un écartement L

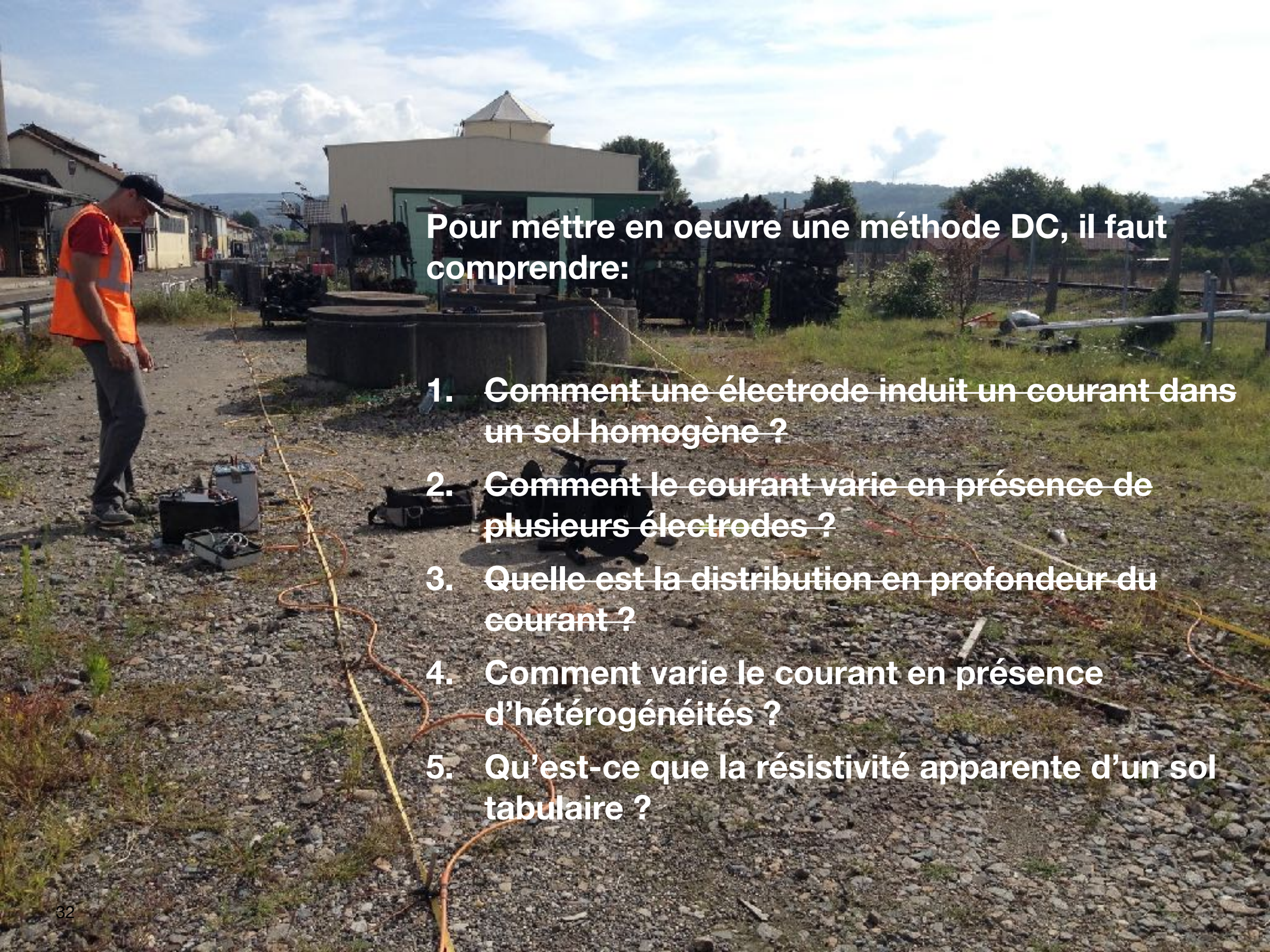
- Plus l'écartement L est grand, plus les lignes de courant pénètrent en profondeur



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!



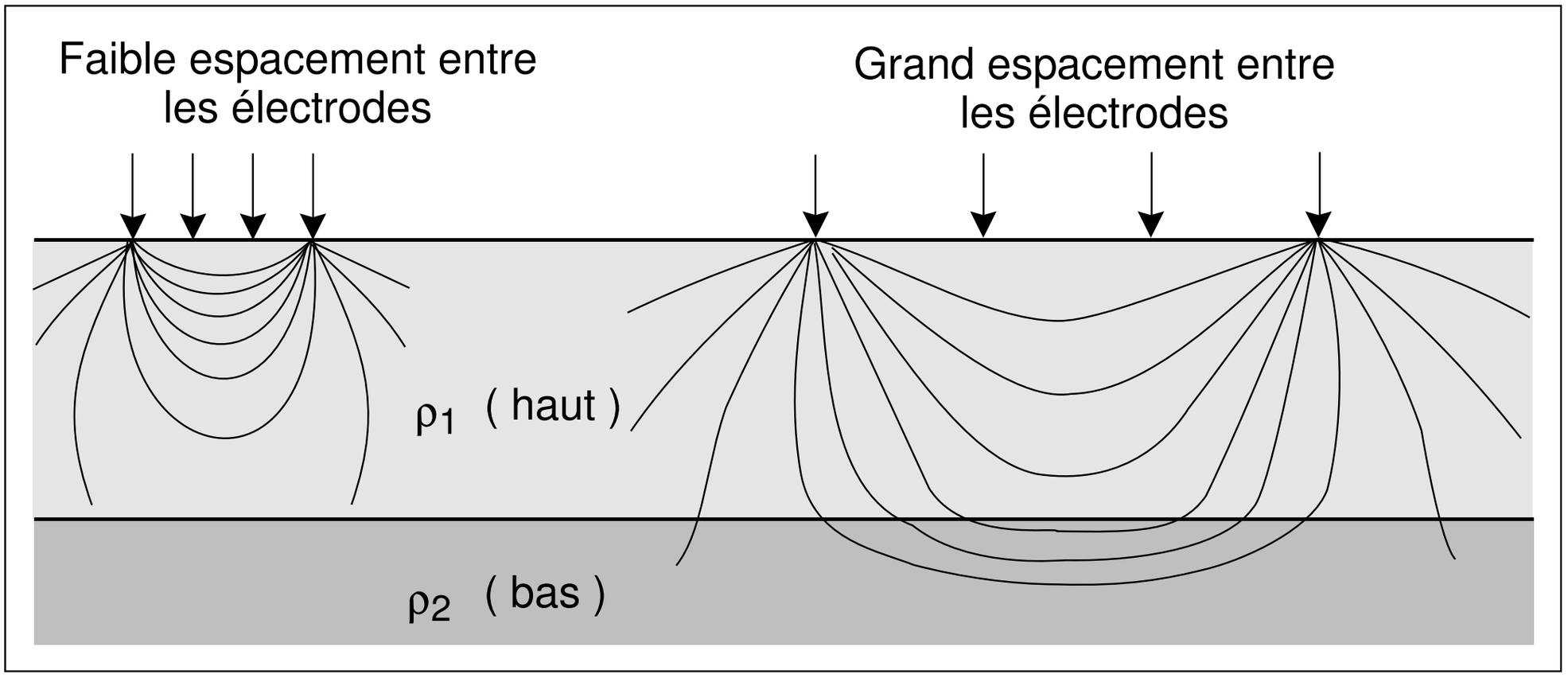
Pour mettre en oeuvre une méthode DC, il faut comprendre:

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 ?

Déviation des lignes de courants

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

Considérons un sol tabulaire à deux couches.



Déviation des lignes de courants

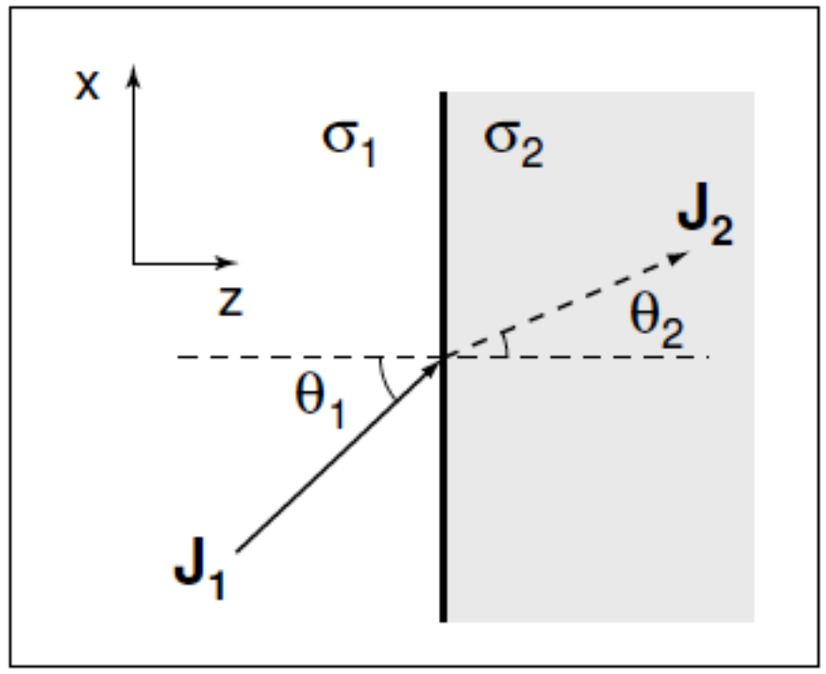
Qu'arrive-t-il au courant lorsque le sol n'est pas homogène ?

Deux conditions frontières s'appliquent:

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

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

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



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

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

Déviation des lignes de courants

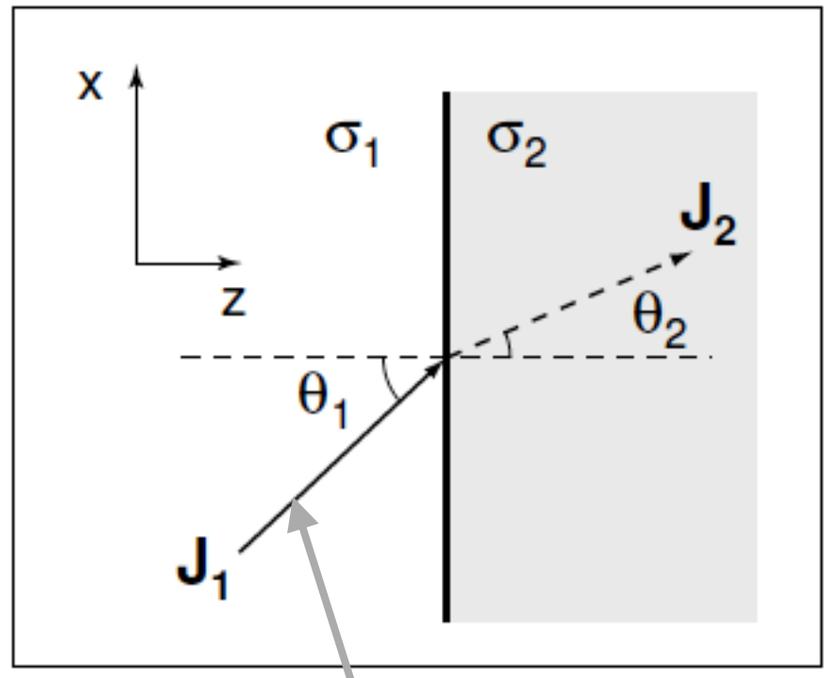
Qu'arrive-t-il au courant lorsque le sol n'est pas homogène ?

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

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



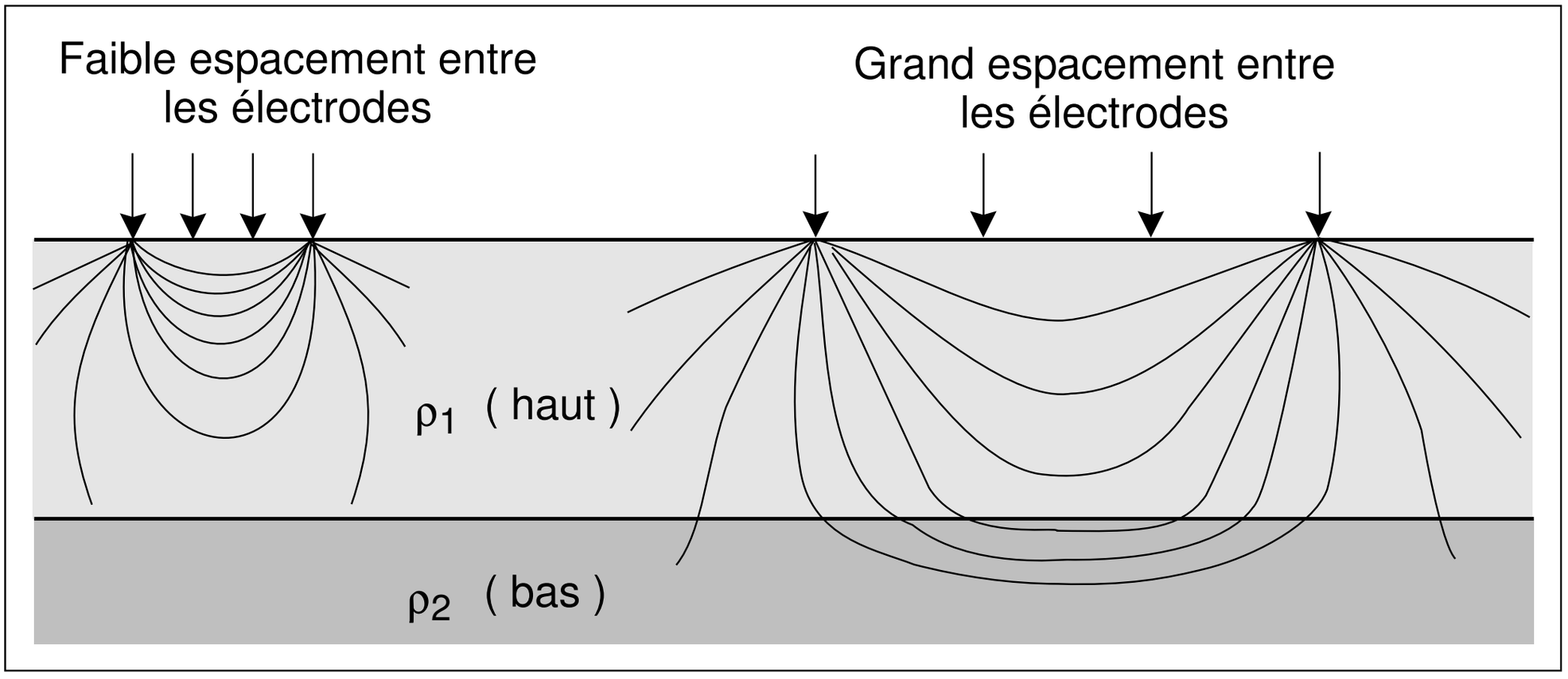
$$\tan\theta = \frac{J_x}{J_z}$$

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

Déviation des lignes de courants

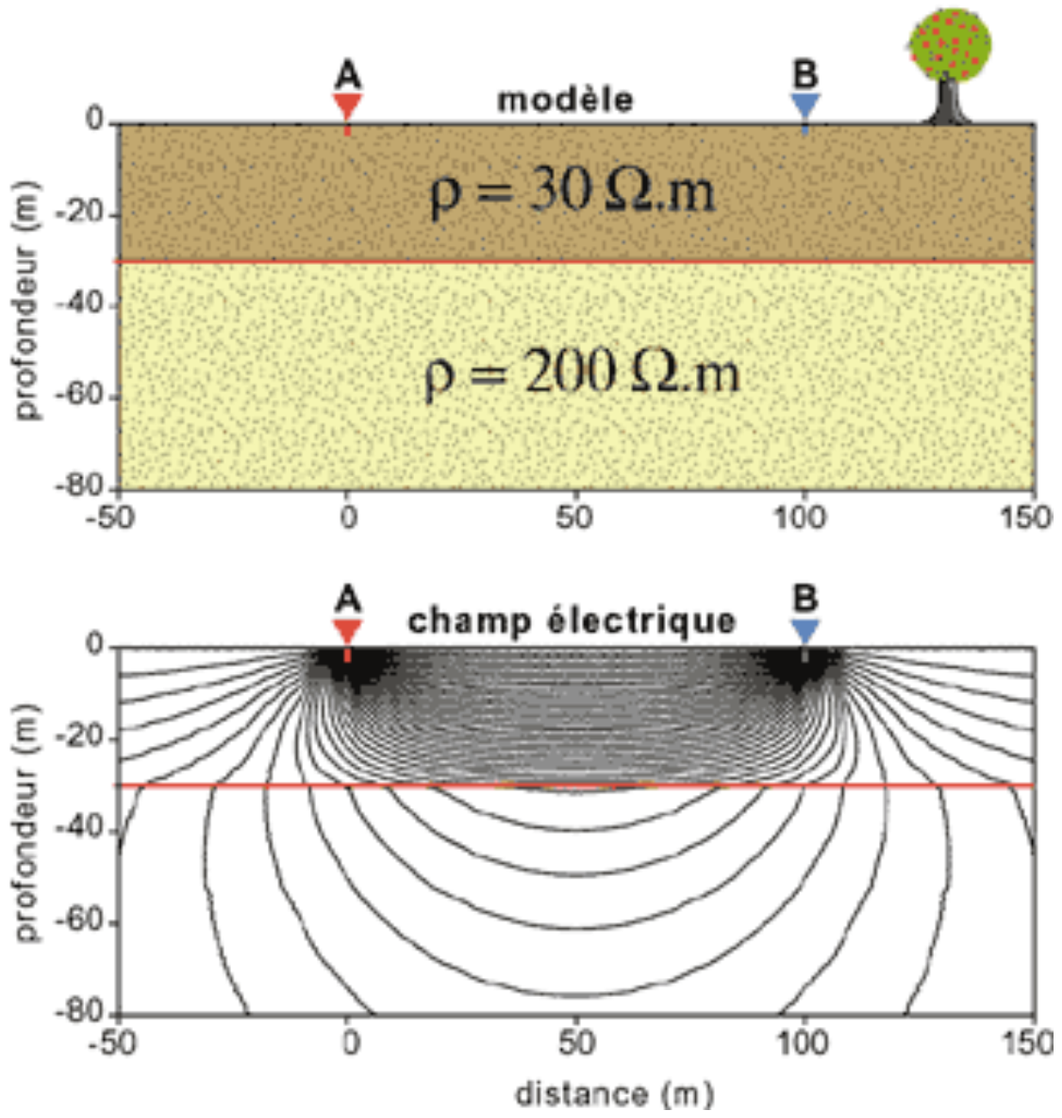
Qu'arrive-t-il au courant lorsque le sol n'est pas homogène ?

Quelle est la couche la plus conductrice ?



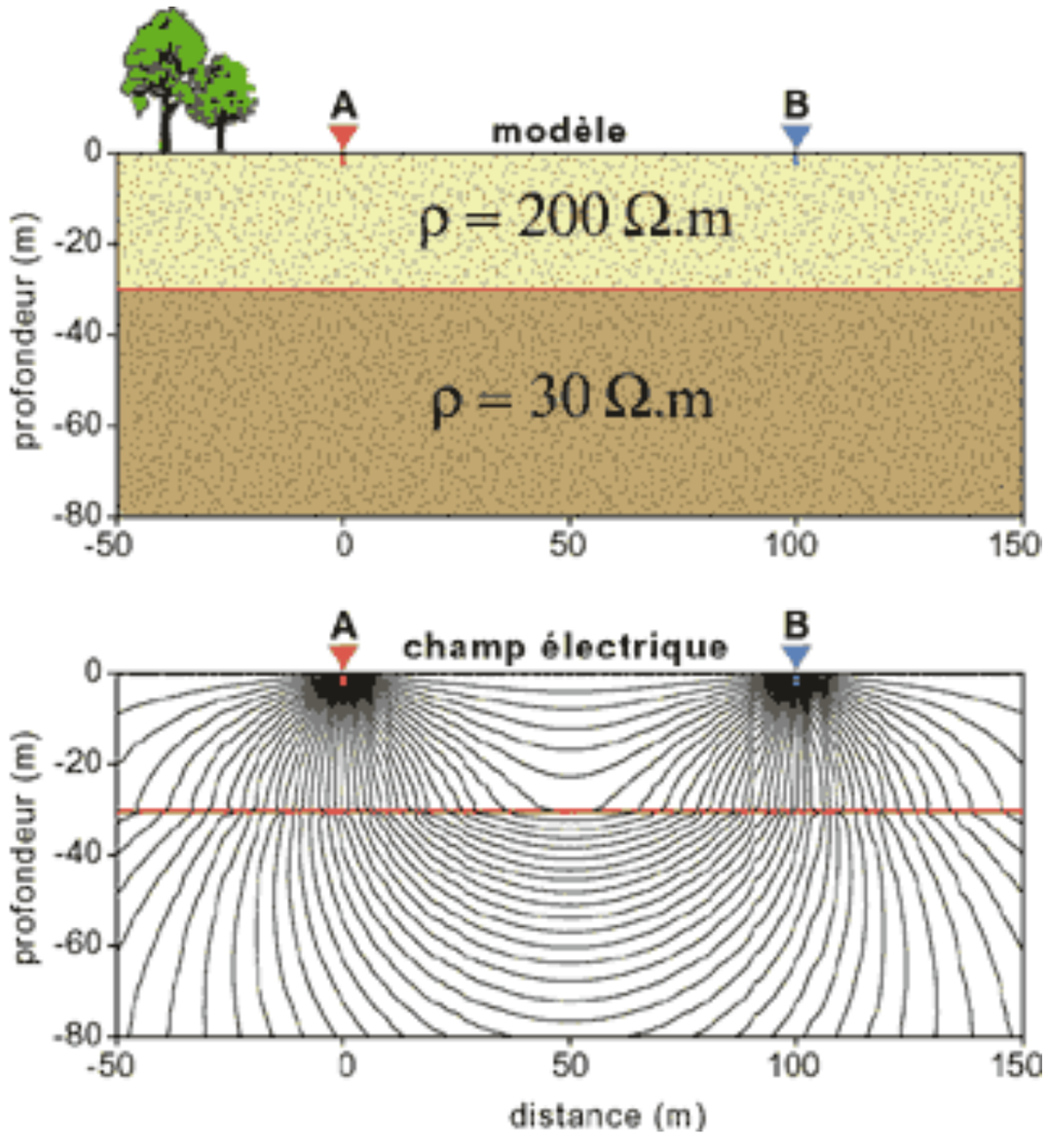
Déviation des lignes de courants

- Cas 1: $\rho_2 > \rho_1$
- La courant a tendance à vouloir rester dans la couche 1 (moindre 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: $\rho_a > \rho_1$



Déviation des lignes de courants

- Cas 2: $\rho_2 < \rho_1$
- La courant a tendance à vouloir aller dans la couche 2 (moindre 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: $\rho_a < \rho_1$



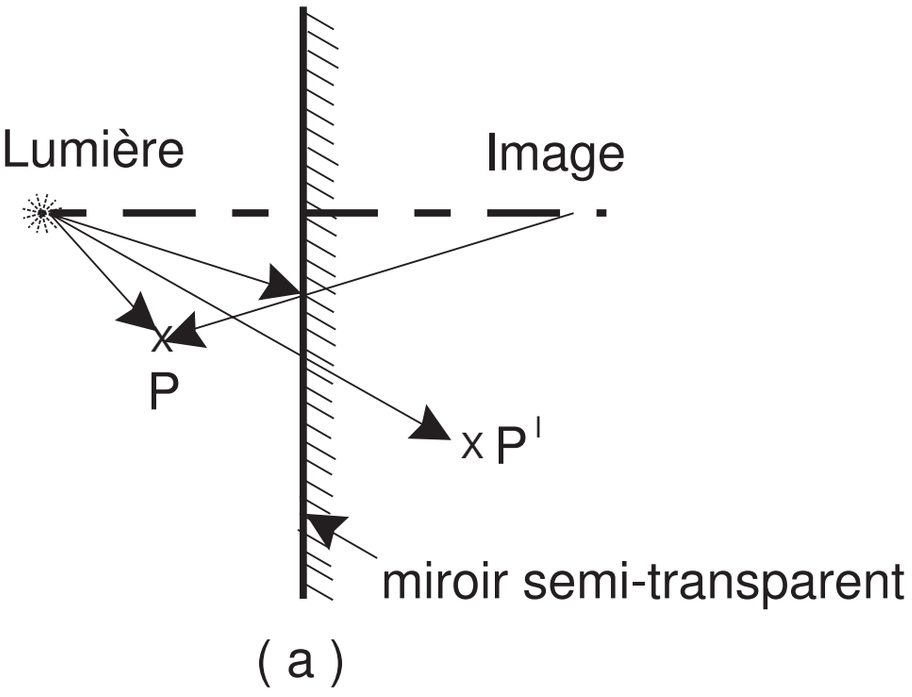
Modification du potentiel: méthode des images

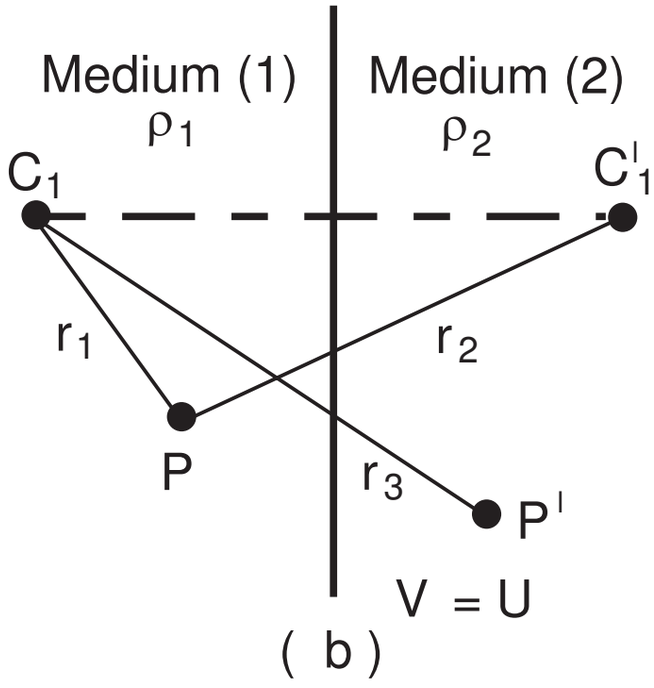
Comment le potentiel est affecté par les hétérogénéités ?

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

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

Le coefficient de réflection est entre -1 et 1.

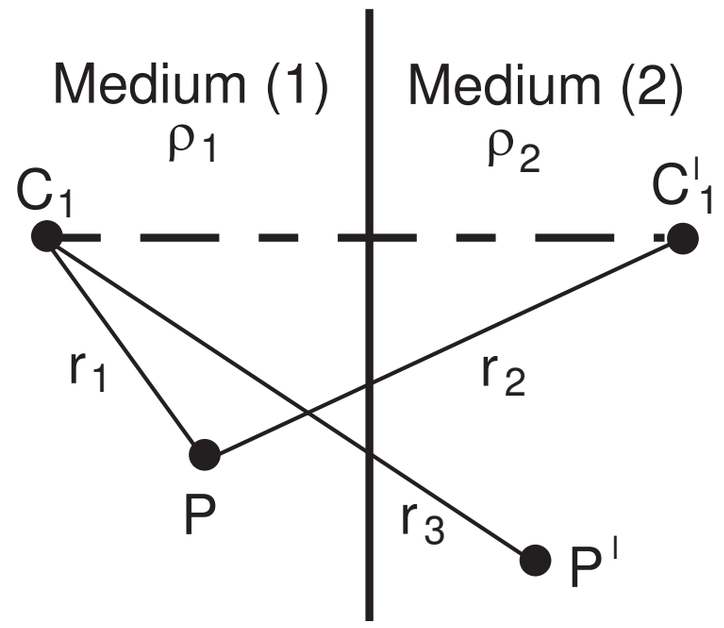




Modification du potentiel: méthode des images

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 ?

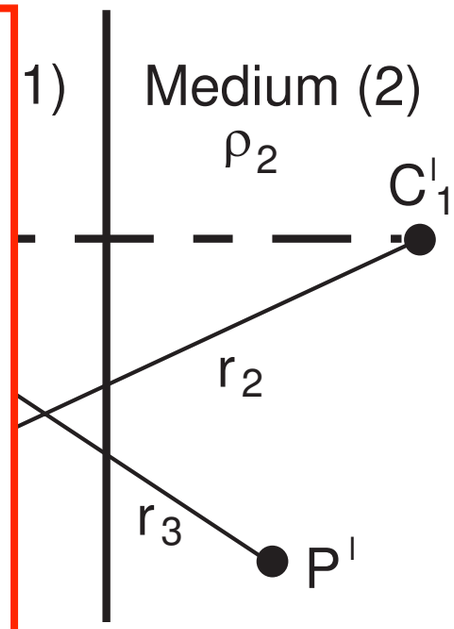
Exemple: P

Le potentiel

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

Au point P:

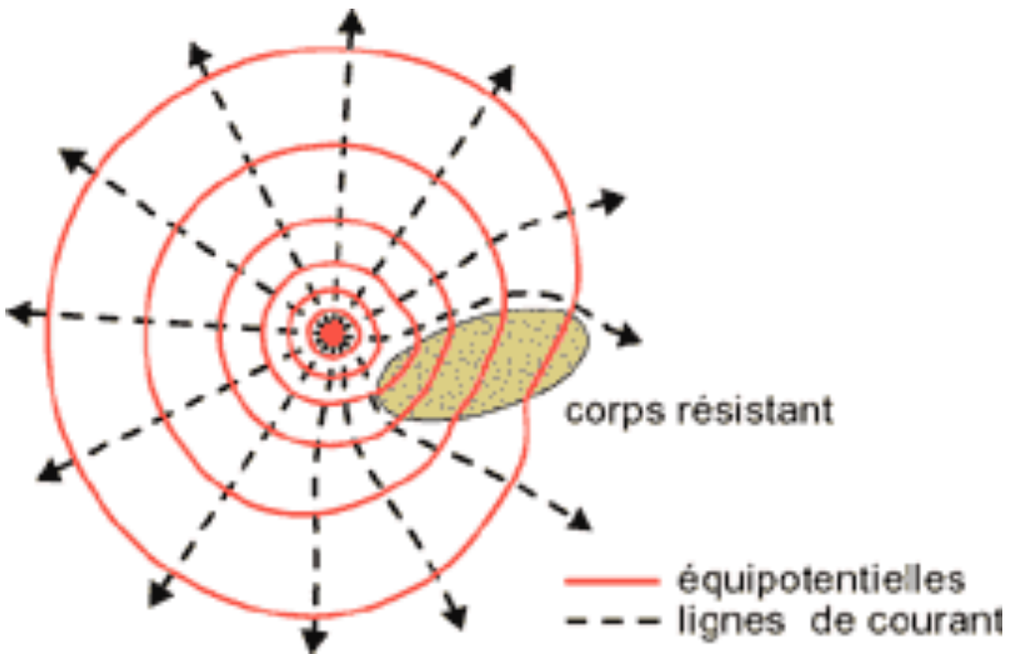


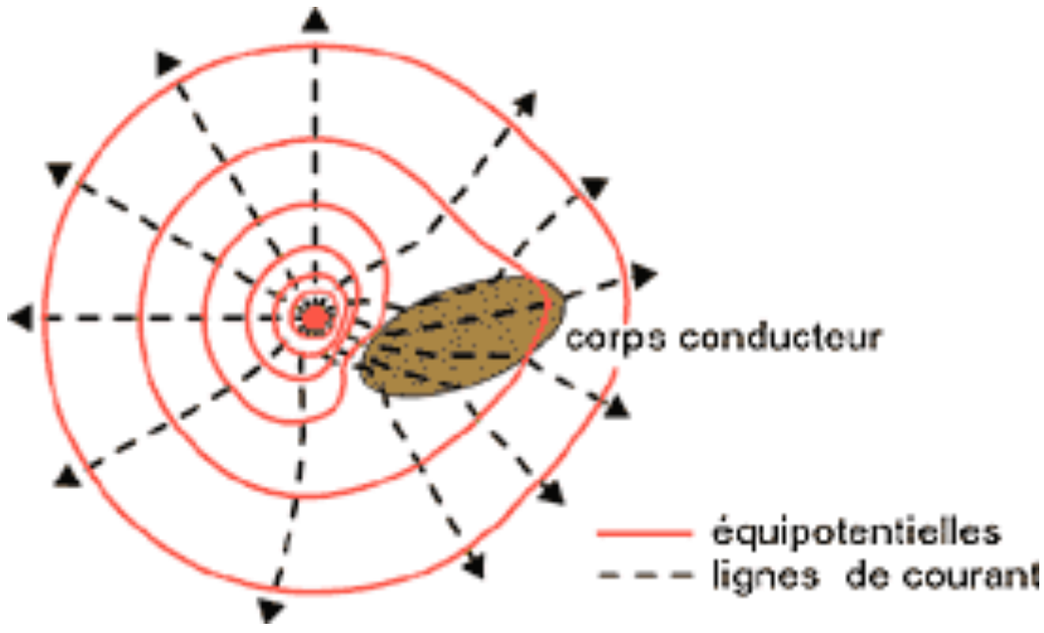
$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi r_1} + k\frac{\rho I}{4\pi r_2} \longrightarrow k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Déviation du courant et du potentiel

En présence d'hétérogénéités:

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

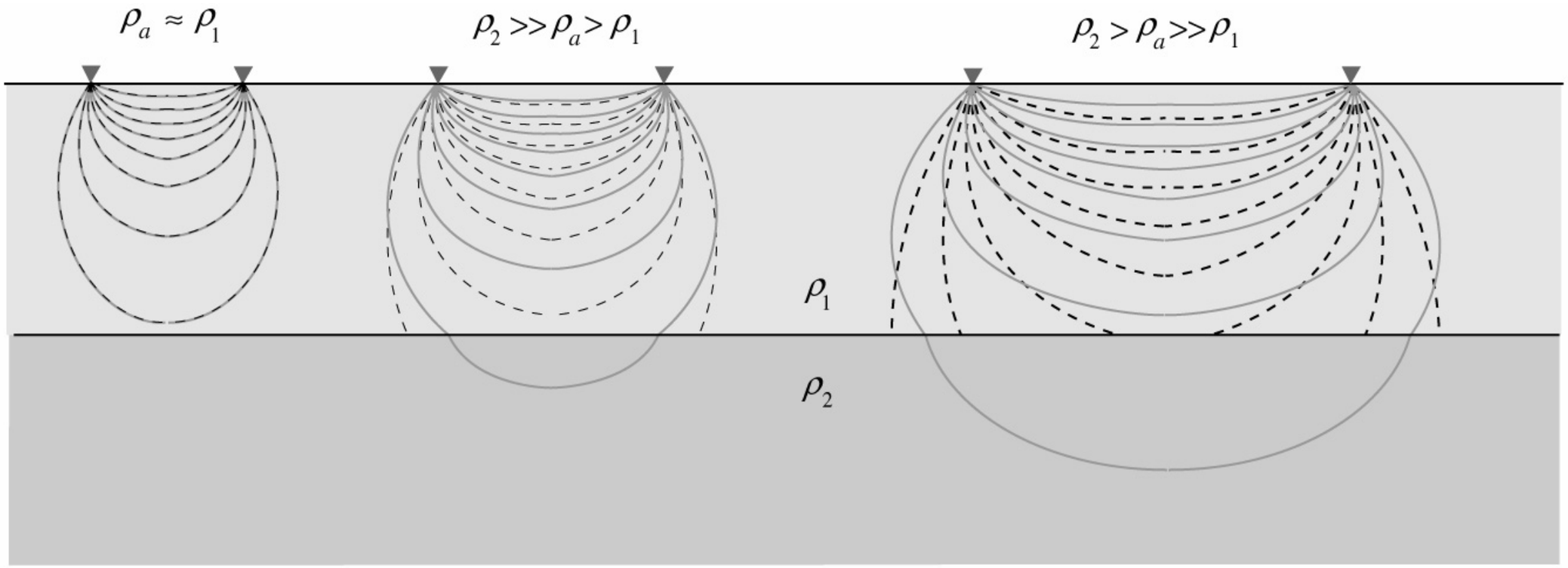




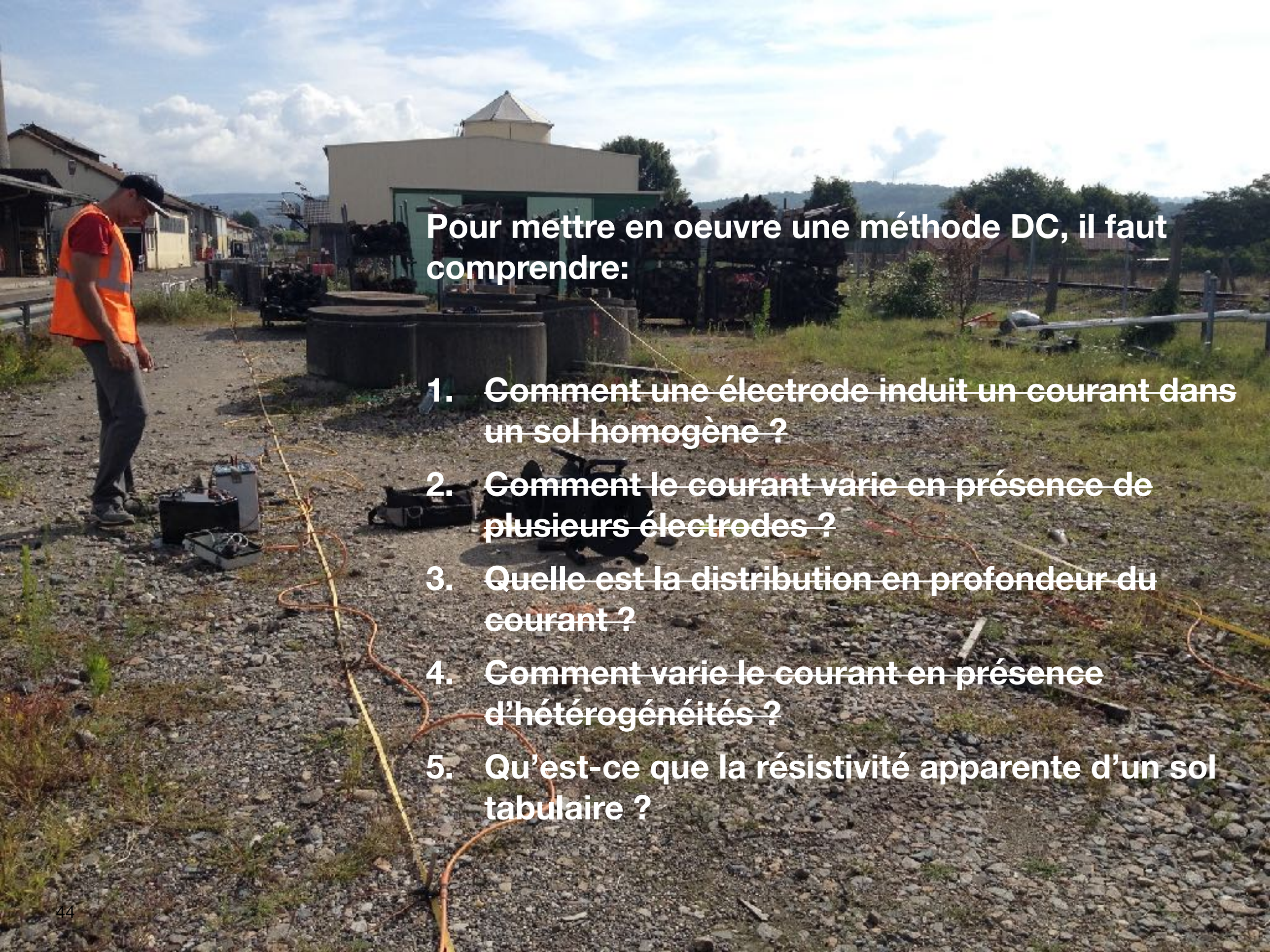
En résumé

La déformation des équipotentiels affectera la résistivité apparente

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



(Burger et al. 2005)



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

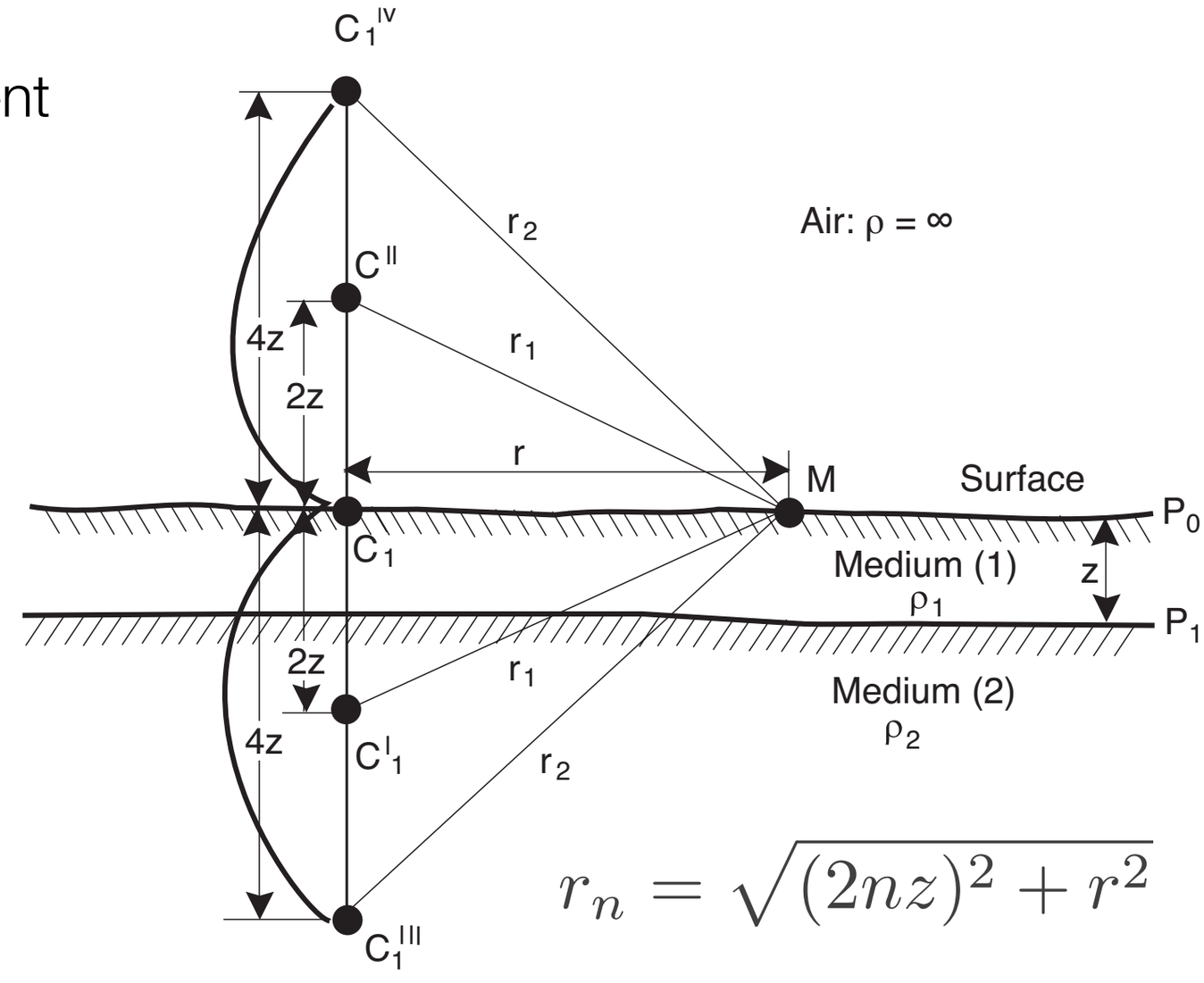
1. ~~Comment une électrode induit un courant dans un sol homogène ?~~
2. ~~Comment le courant varie en présence de plusieurs électrodes ?~~
3. ~~Quelle est la distribution en profondeur du courant ?~~
4. ~~Comment varie le courant en présence d'hétérogénéités ?~~
5. Qu'est-ce que la résistivité apparente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

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



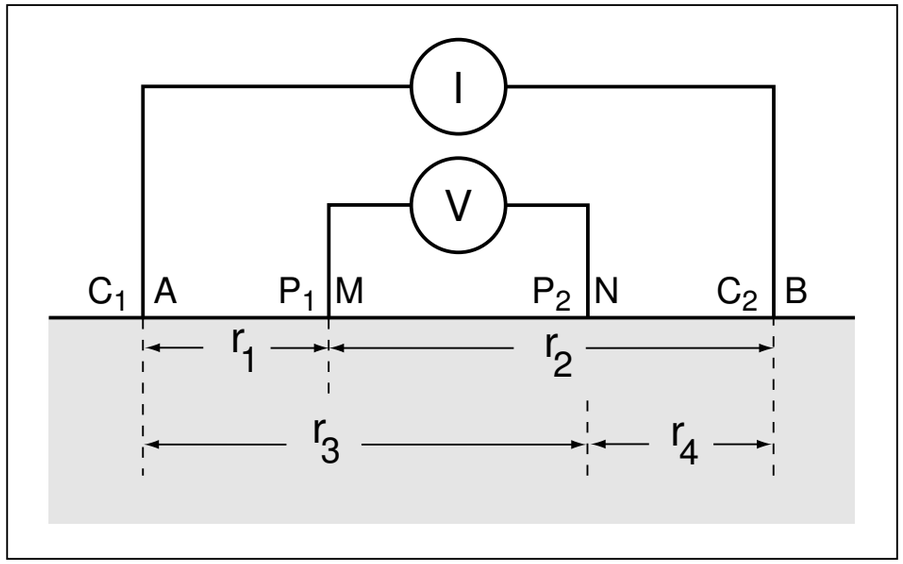
$$r_n = \sqrt{(2nz)^2 + r^2}$$

Résistivité apparente: méthode des images

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

Pour une électrode:

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



$$r_1 = r_4 = a$$

Pour 4 électrodes en dispositif Wenner:

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

Résistivité apparente: méthode des images

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

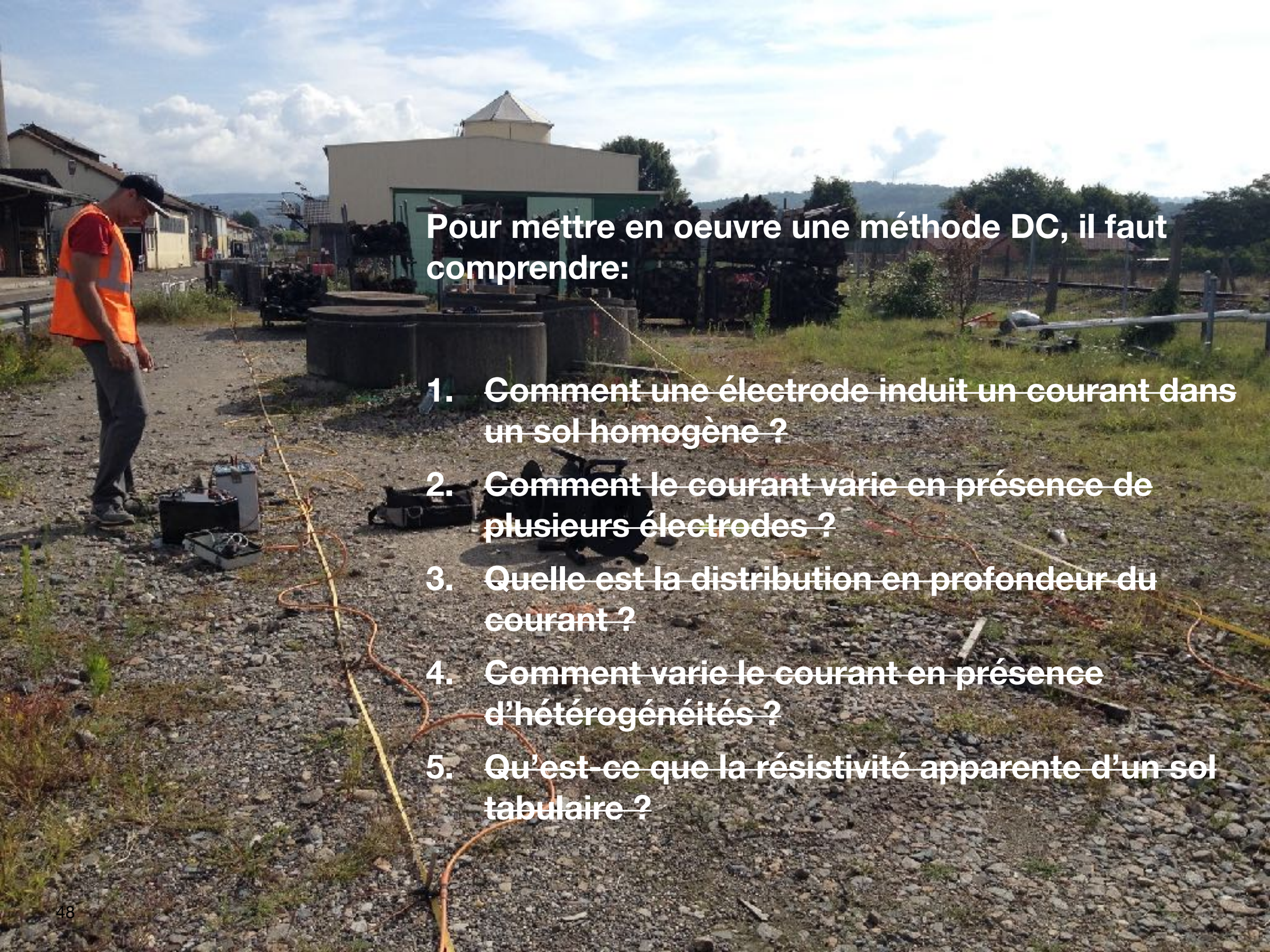
La résistivité apparente pour un milieu homogène était:

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

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:

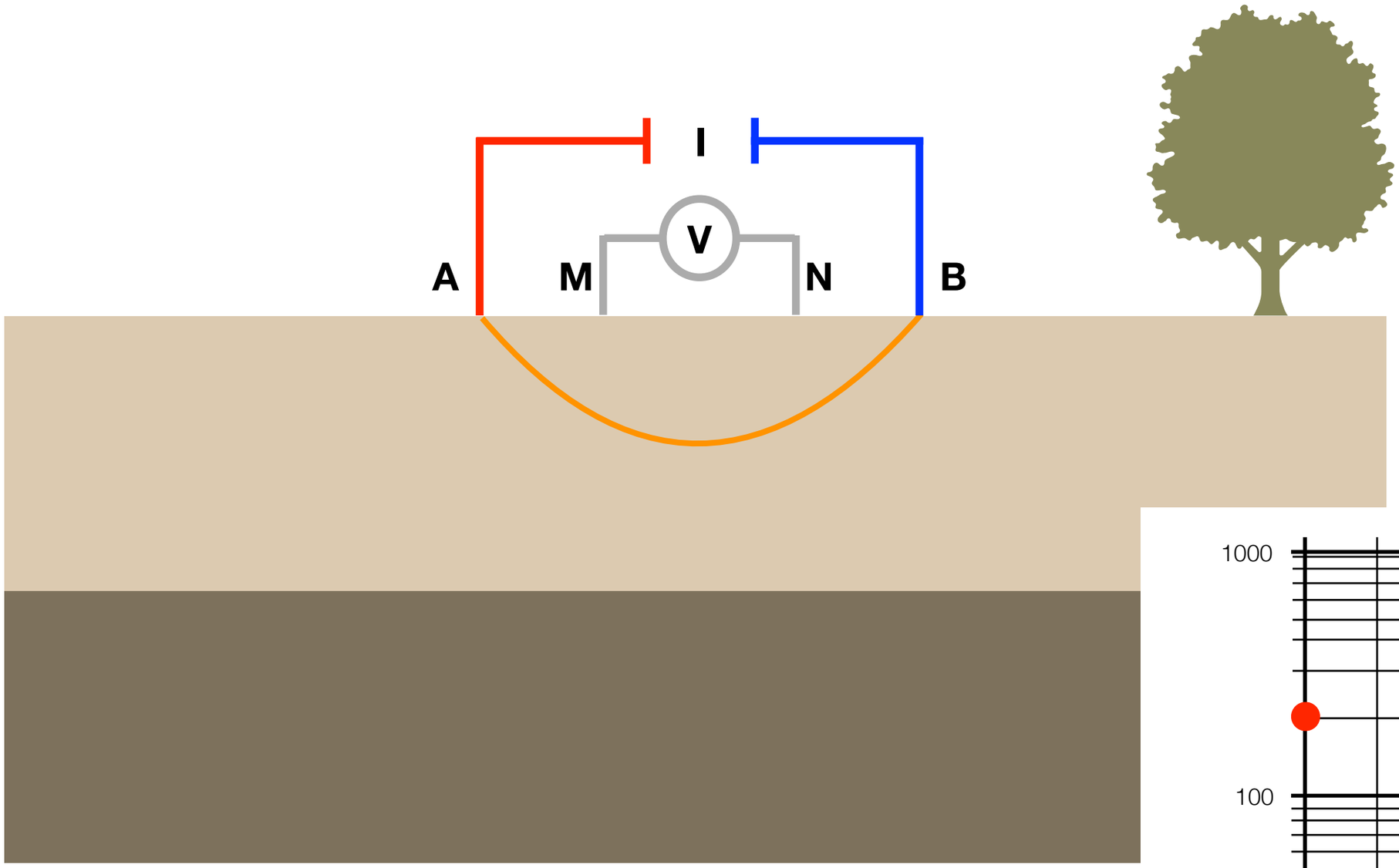
- Les mesures du potentiel généré par un courant permettent d'en déduire une résistivité apparente.

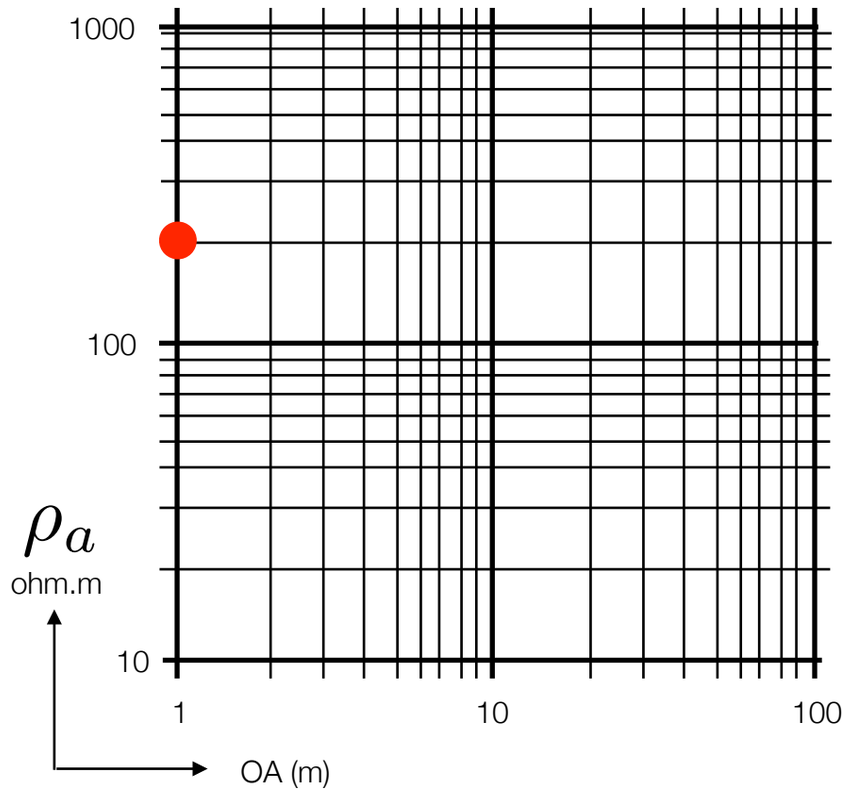
- La résistivité apparente dépend de la distribution des résistivité vraies dans le sol

- Plus la séparation entre les électrodes est grande, plus le courant se propage en profondeur

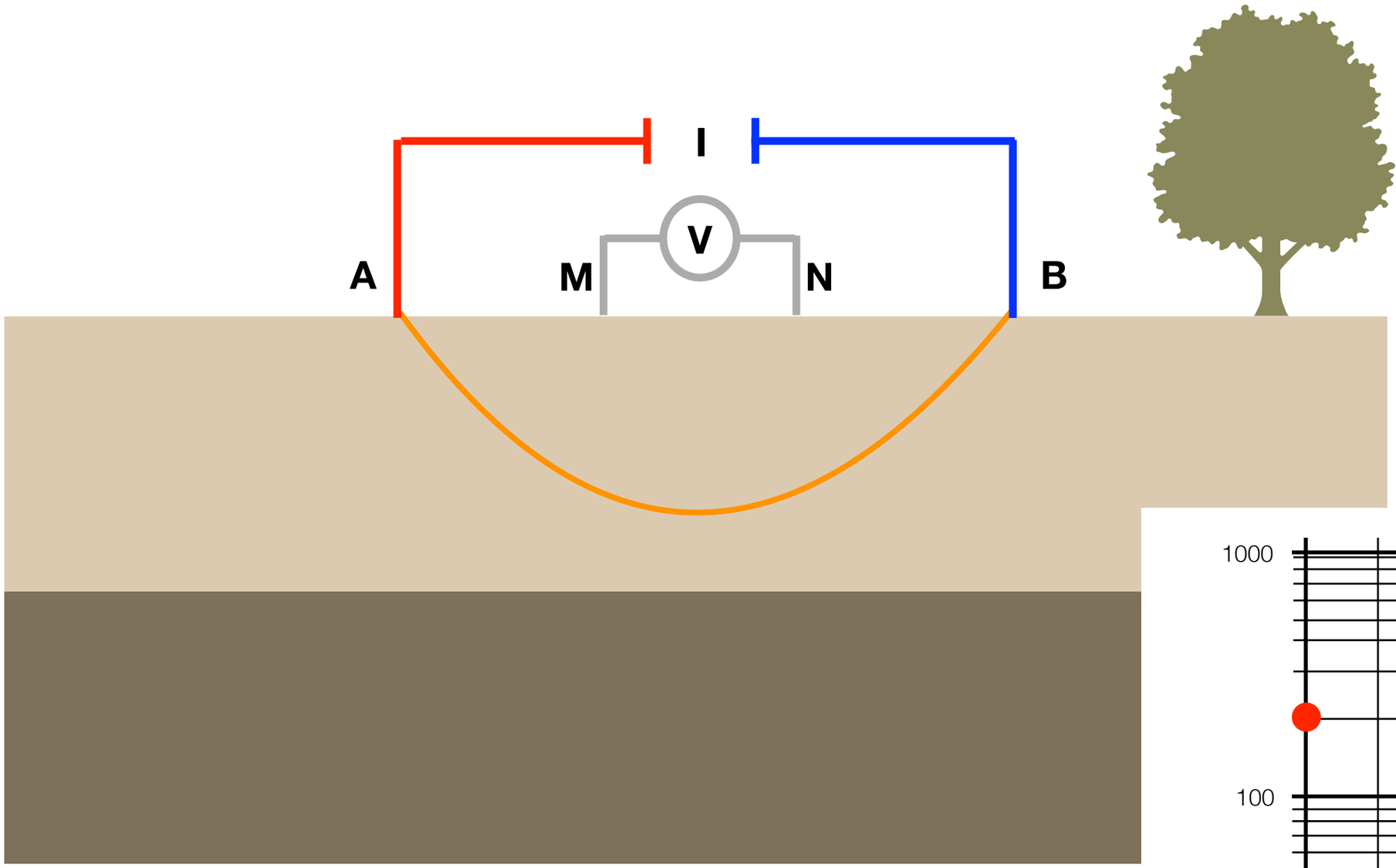
Est-il possible de reconstruire le profil en profondeur d'un sol tabulaire grâce aux mesures de potentiels et de courants ?

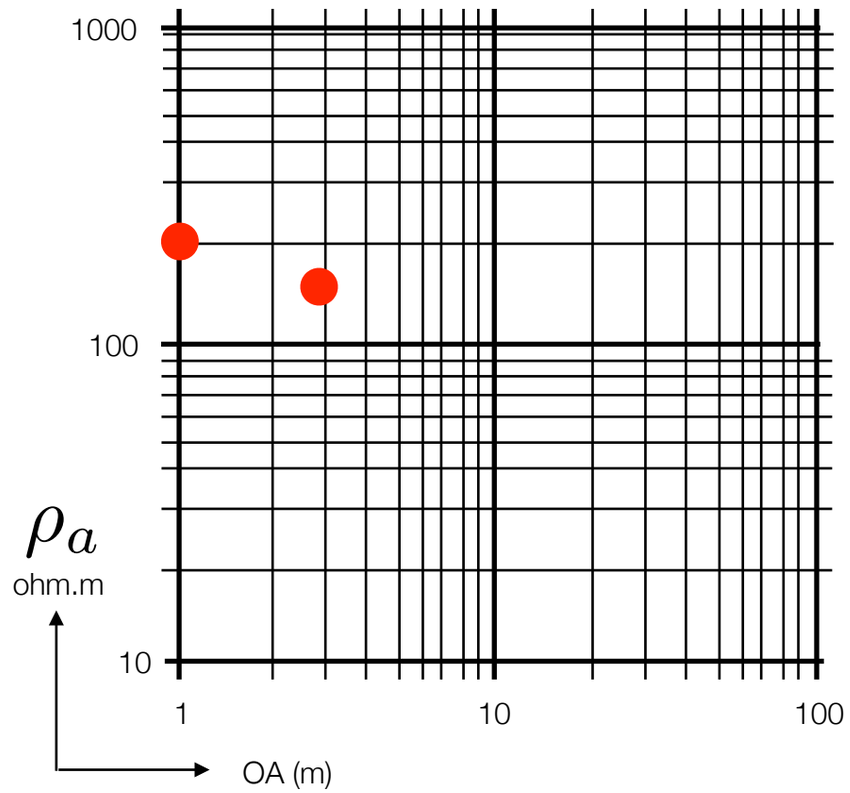
Mise en oeuvre



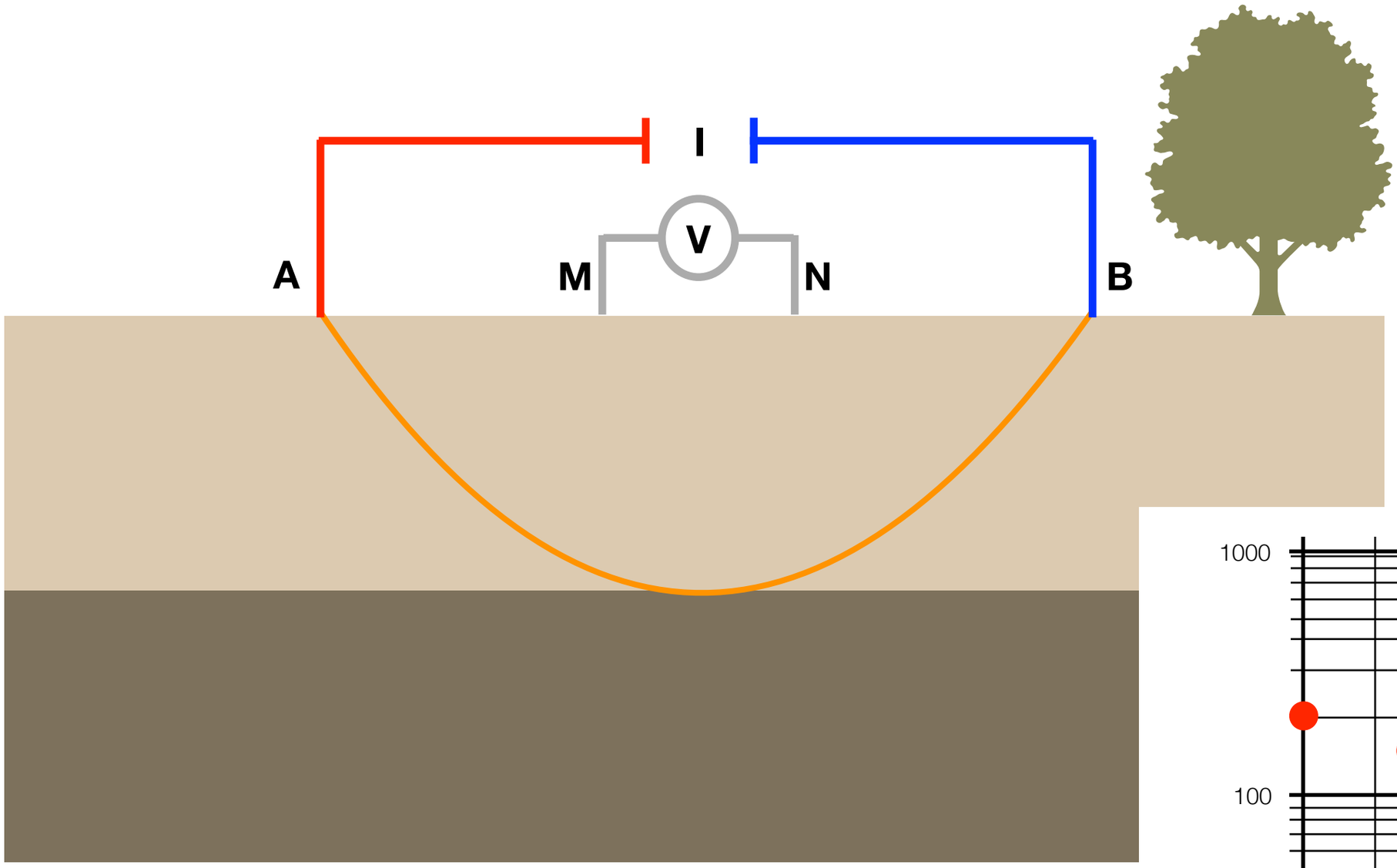


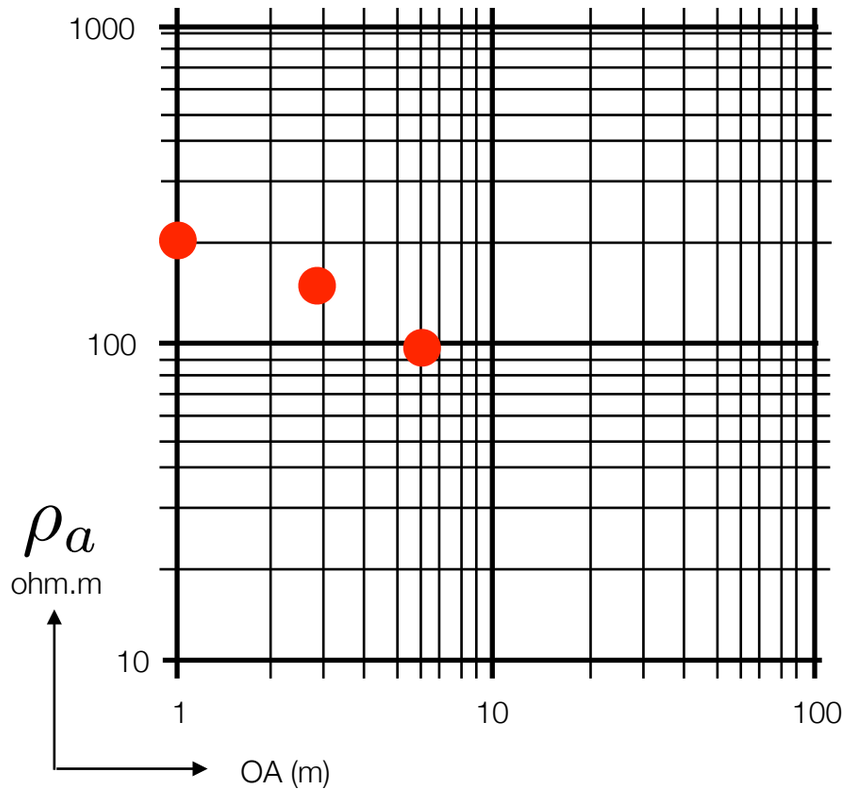
Mise en oeuvre



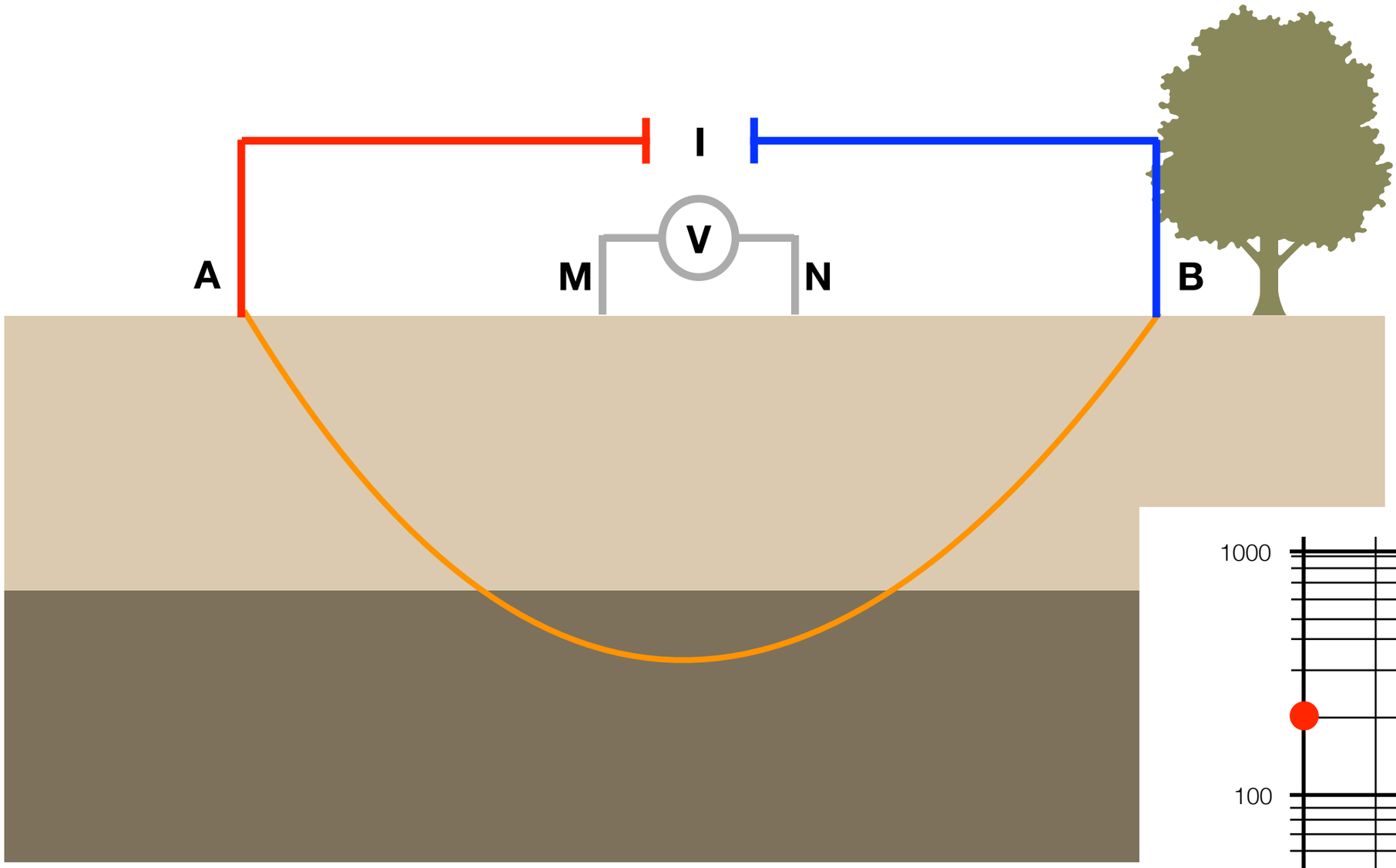


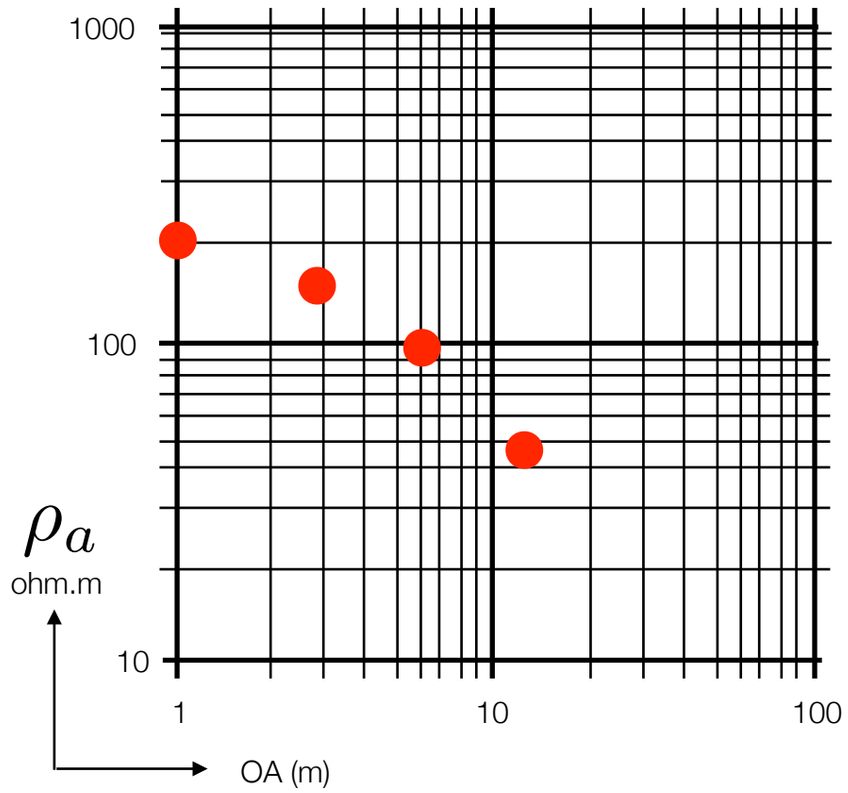
Mise en oeuvre



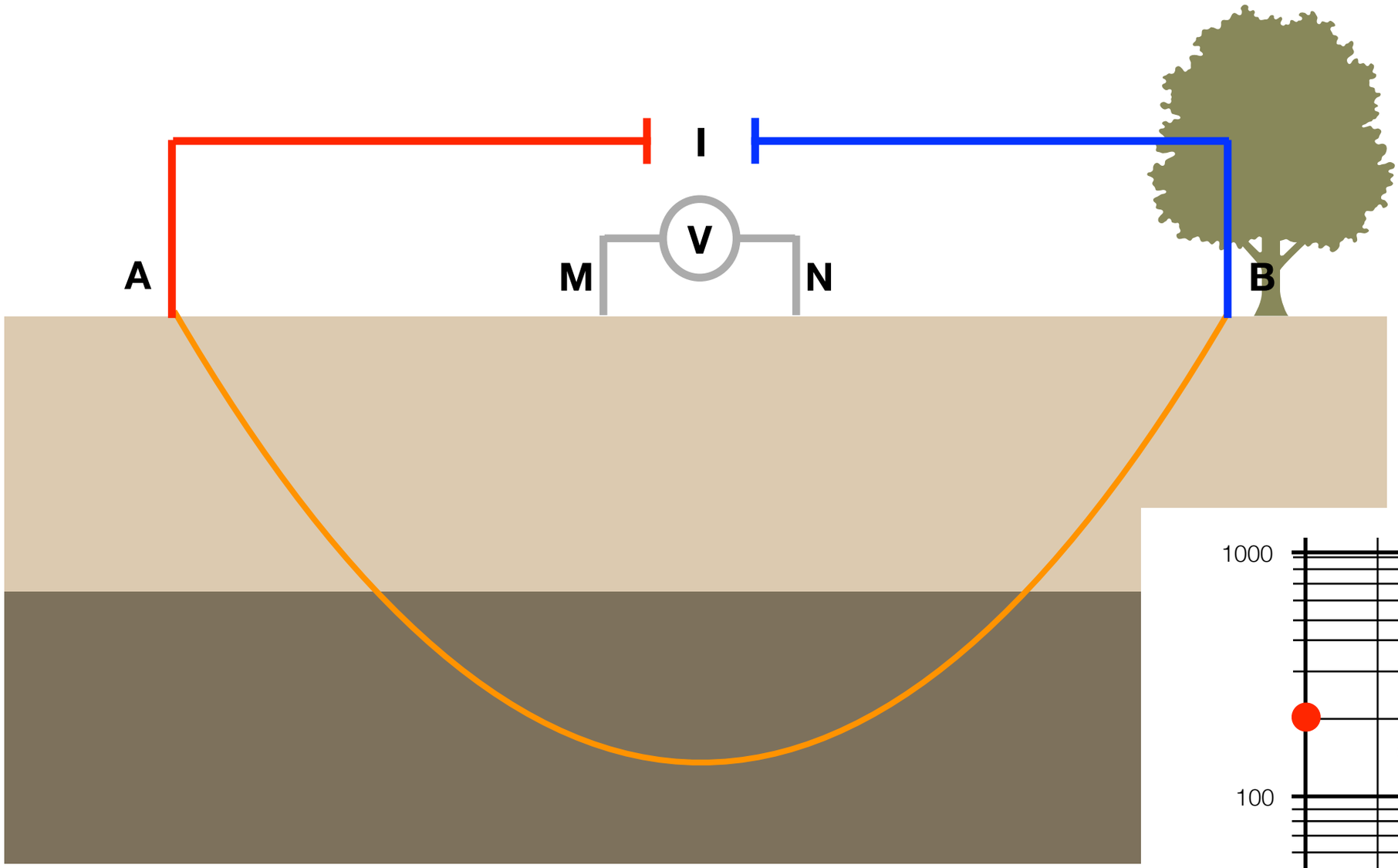


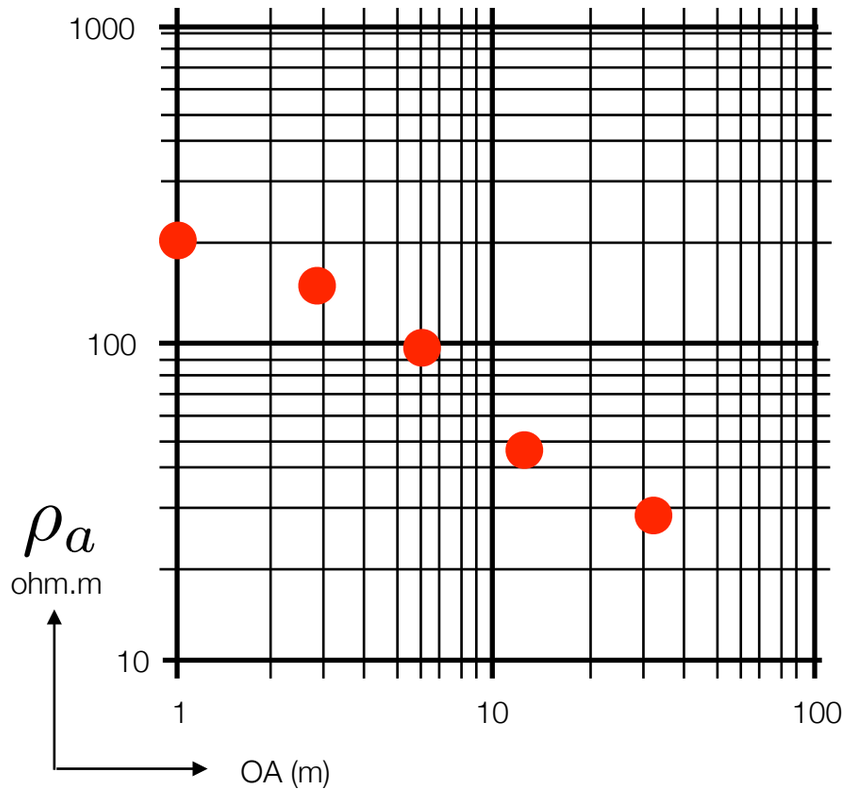
Mise en oeuvre



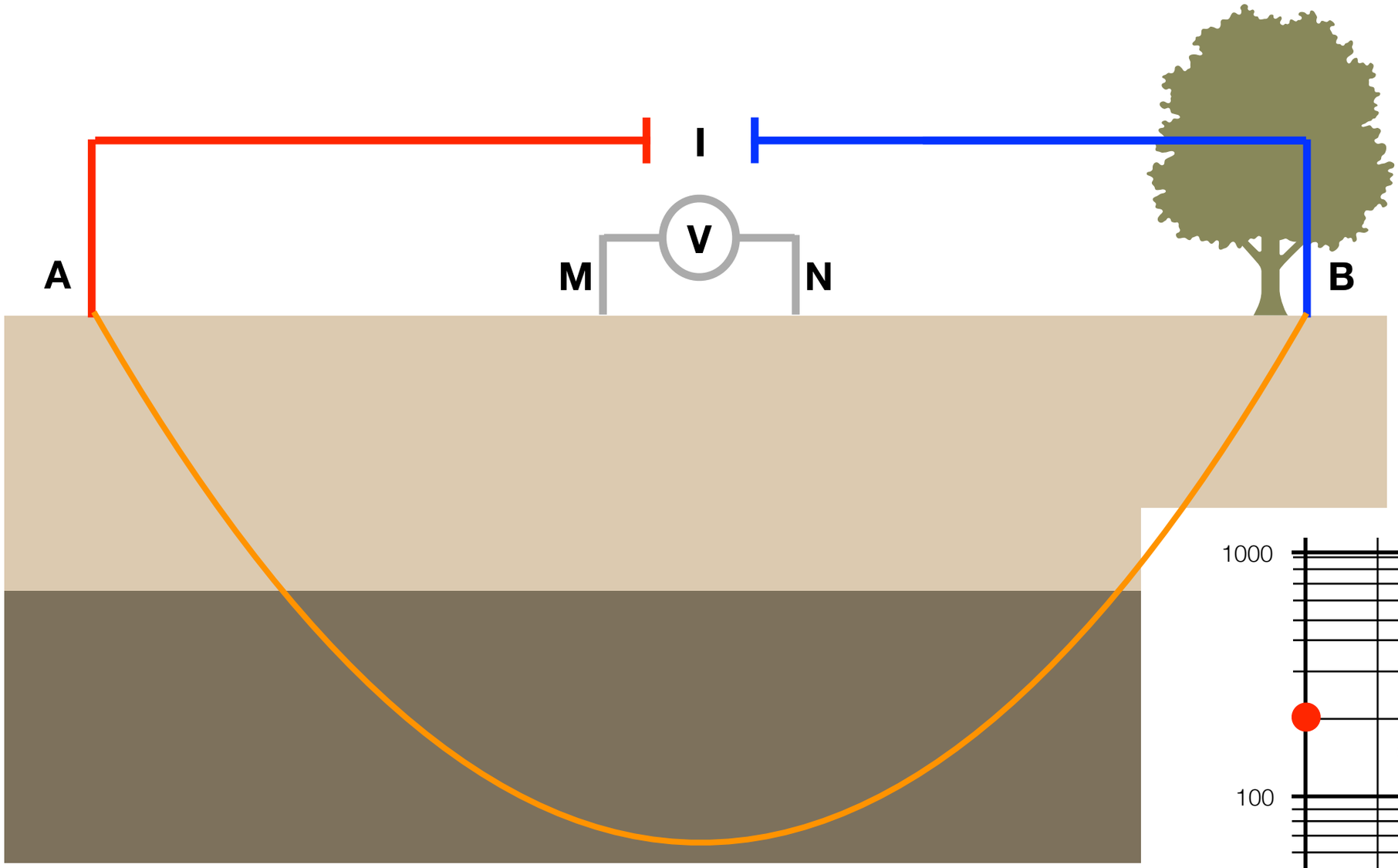


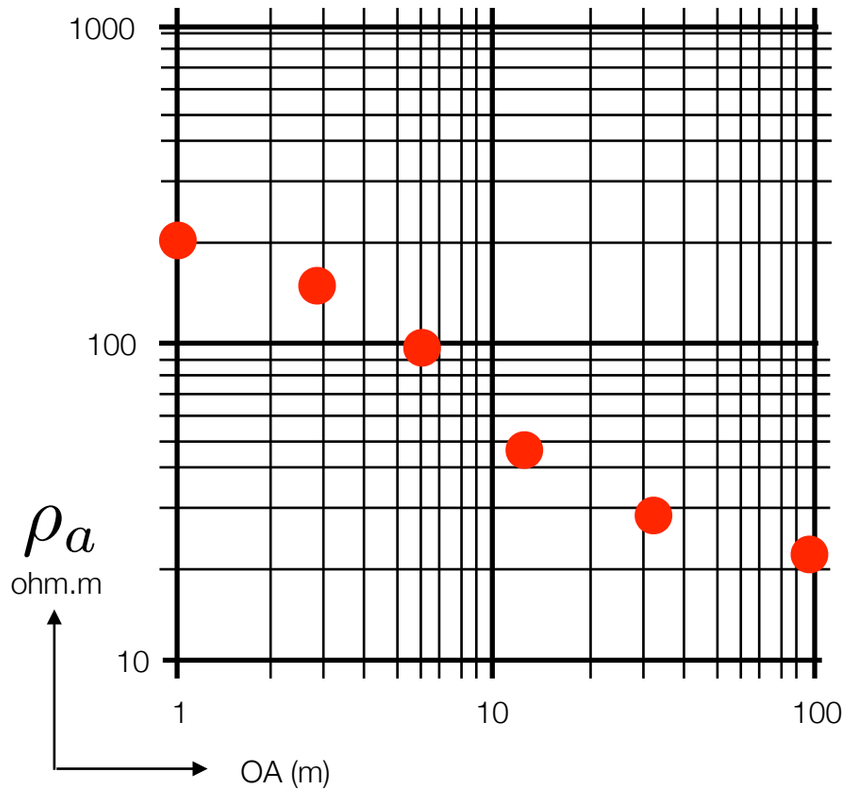
Mise en oeuvre





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,

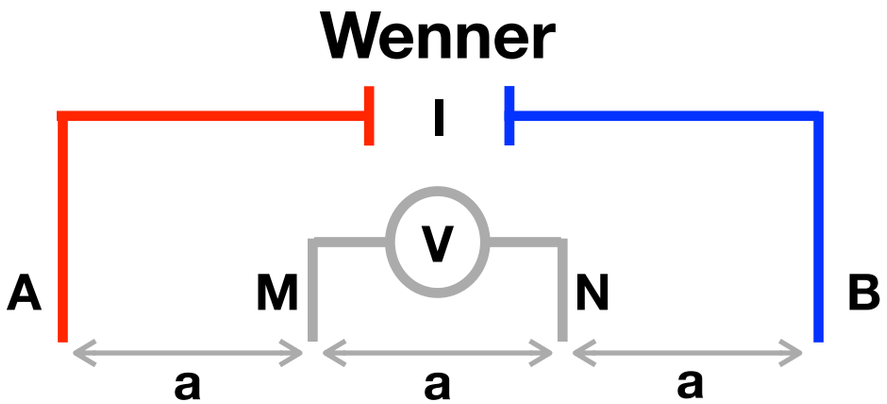
- Ceci donne les variations en profondeur de résistivité apparente au point milieu du dispositif.

Dispositifs

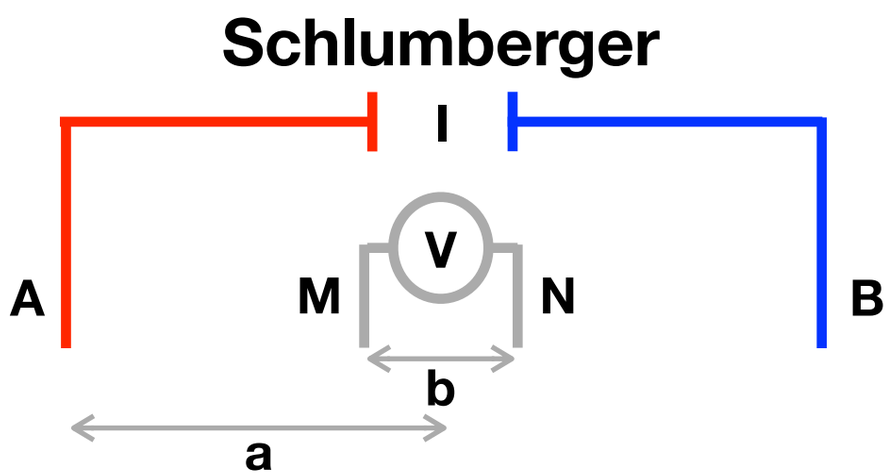
- On se rappelle que la résistivité apparente est donnée par:

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

- 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



$$K = 2\pi a$$



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

Résistance de contact

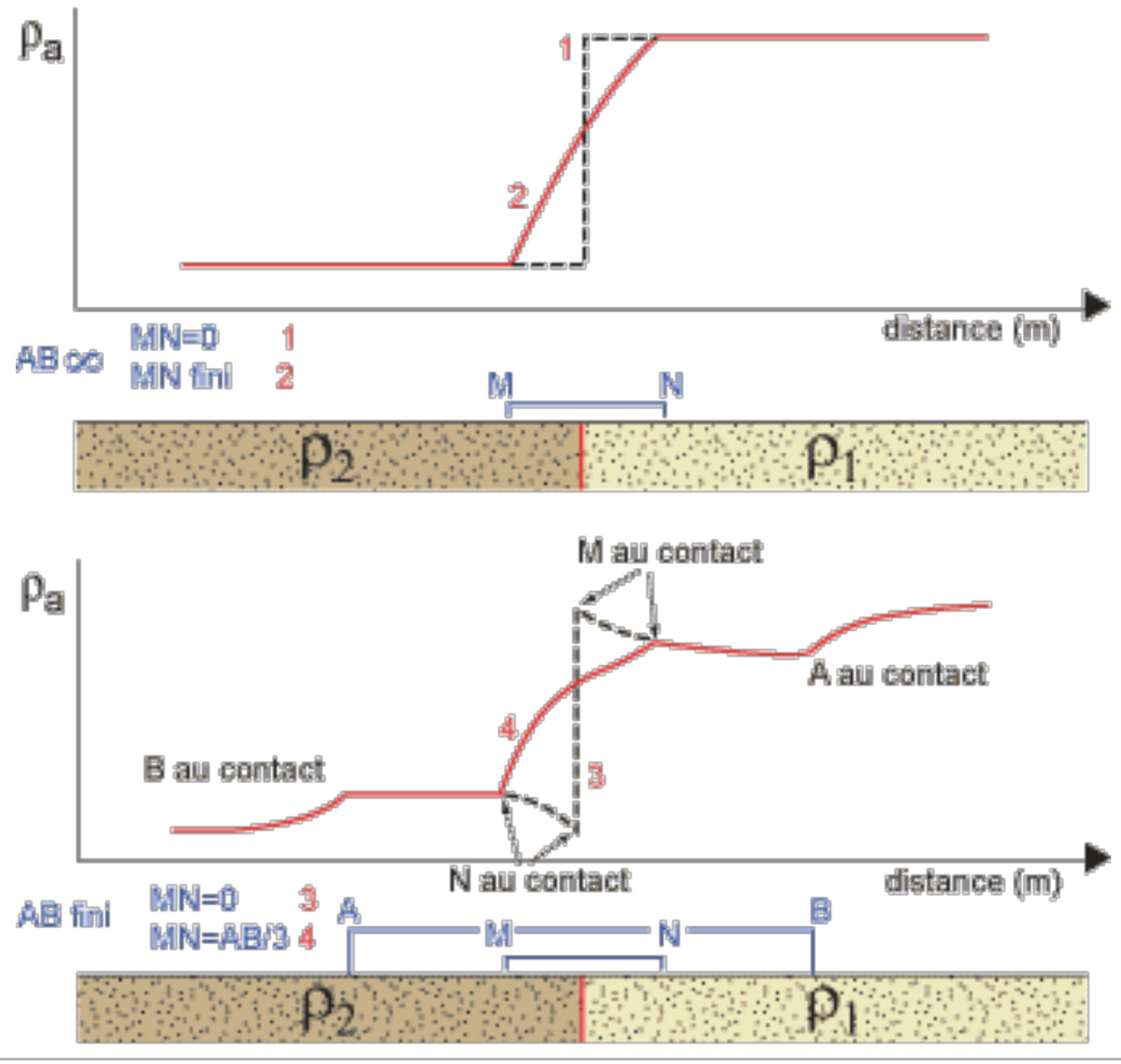
Lorsqu'on plante une électrode, le contact entre le sol et l'électrode possède une résistance, qui diminue le courant que l'on peut injecter.

Pour augmenter le courant

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

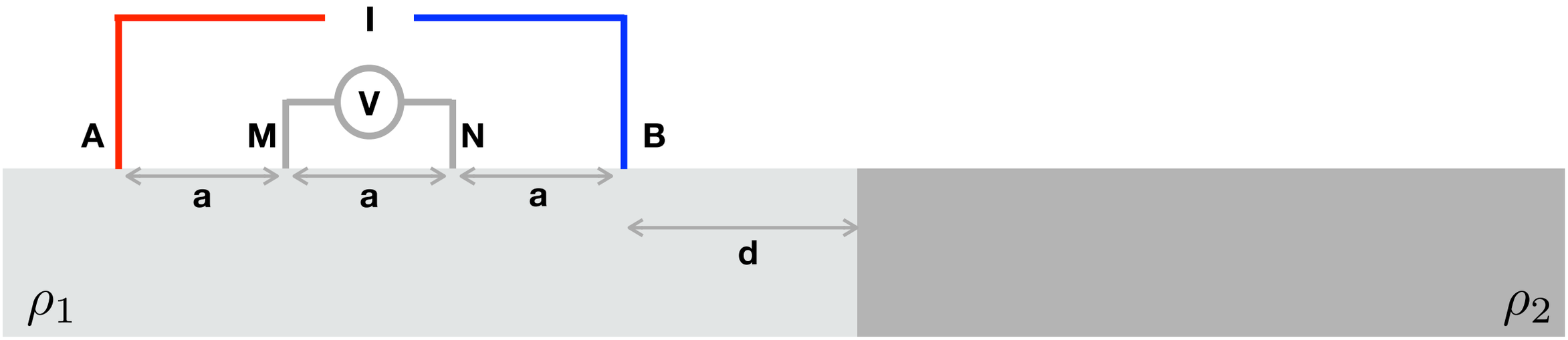
À-coups-de-prise: variations latérales

Les variations latérales de résistivité affectent la résistivité apparente.



Exercice: Méthode des images

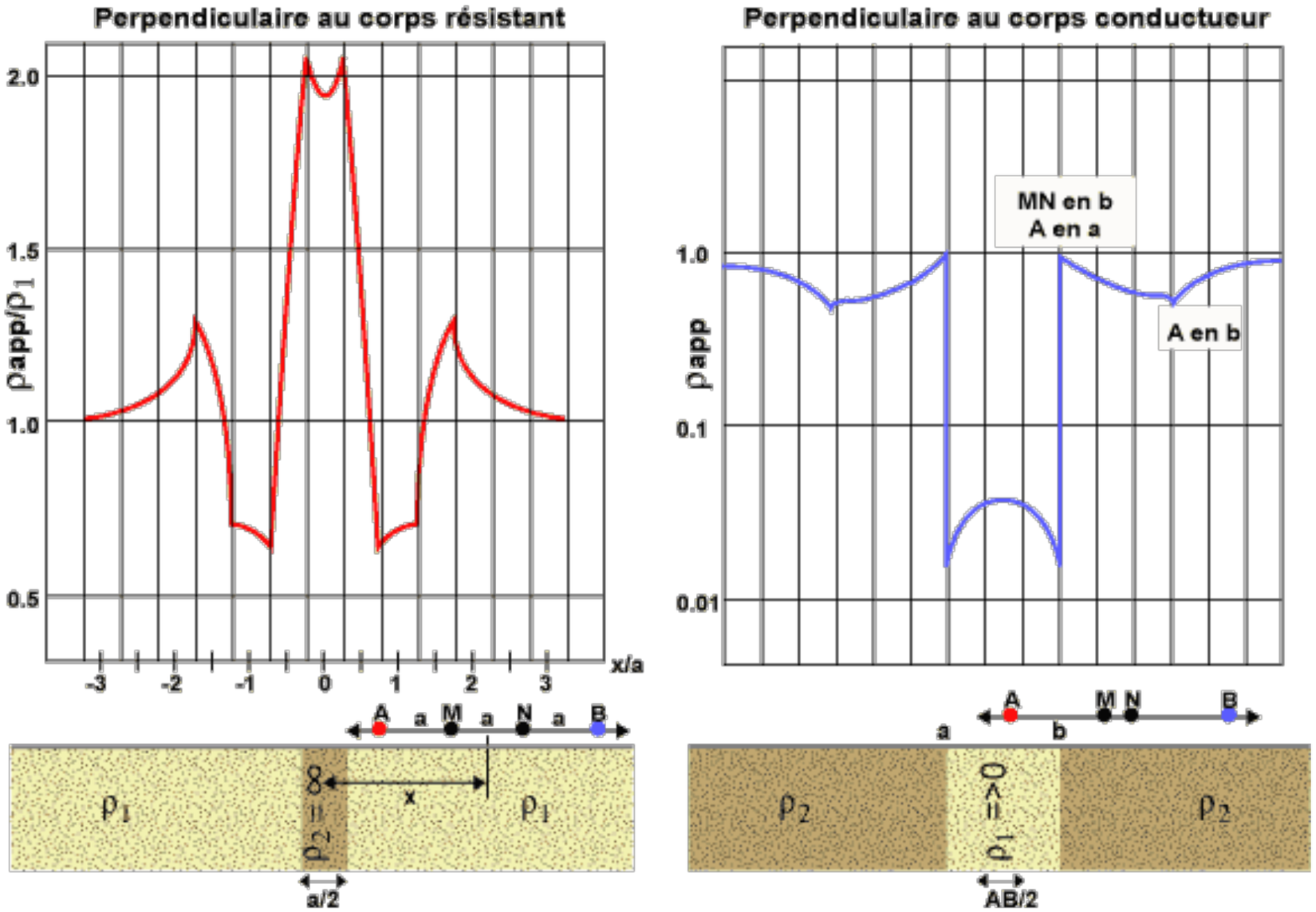
Quelle est la résistivité apparente à proximité d'un contact vertical ?



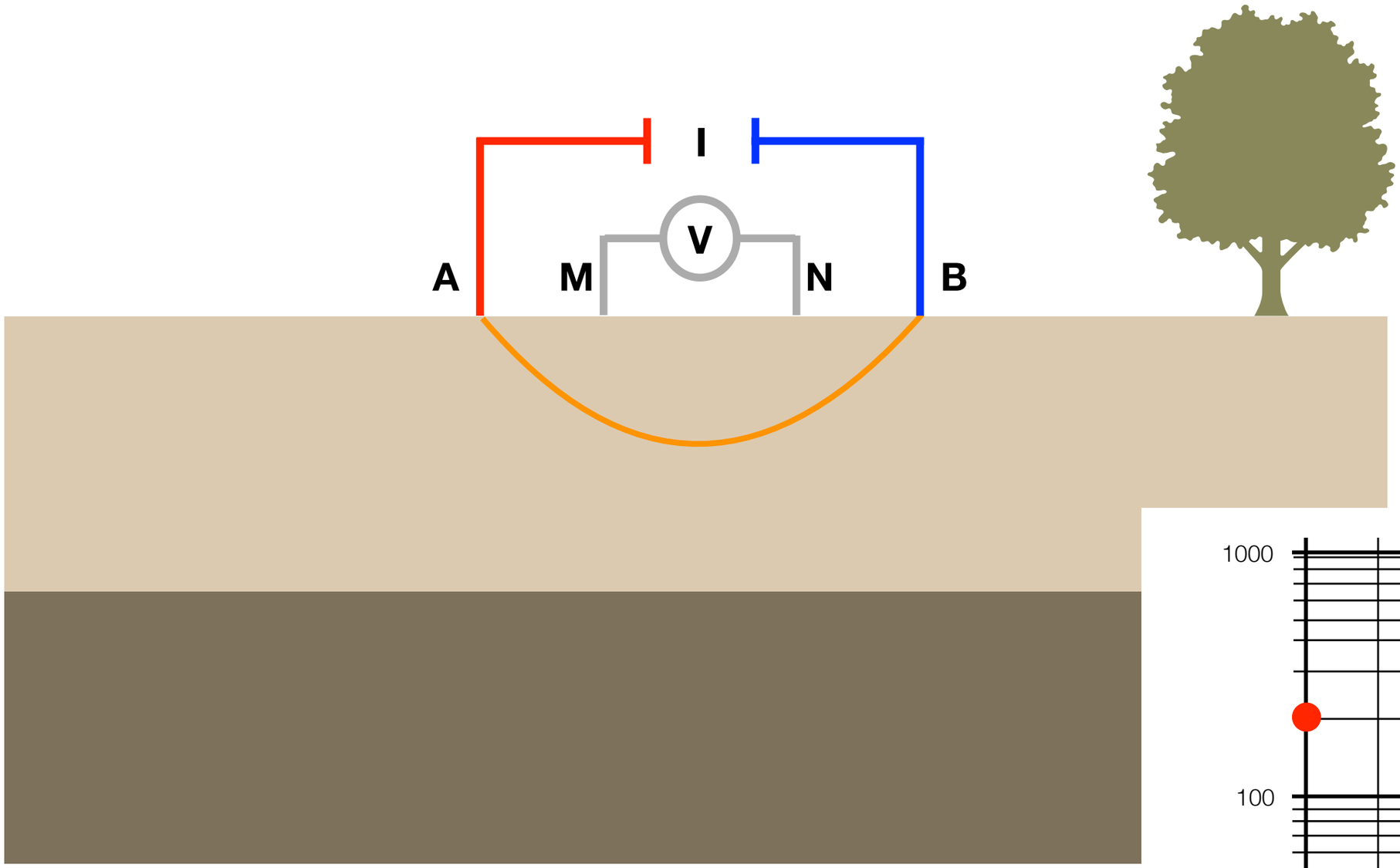
Utilisez la méthode des images pour trouver la résistivité apparente en fonction de *a* et *d*.

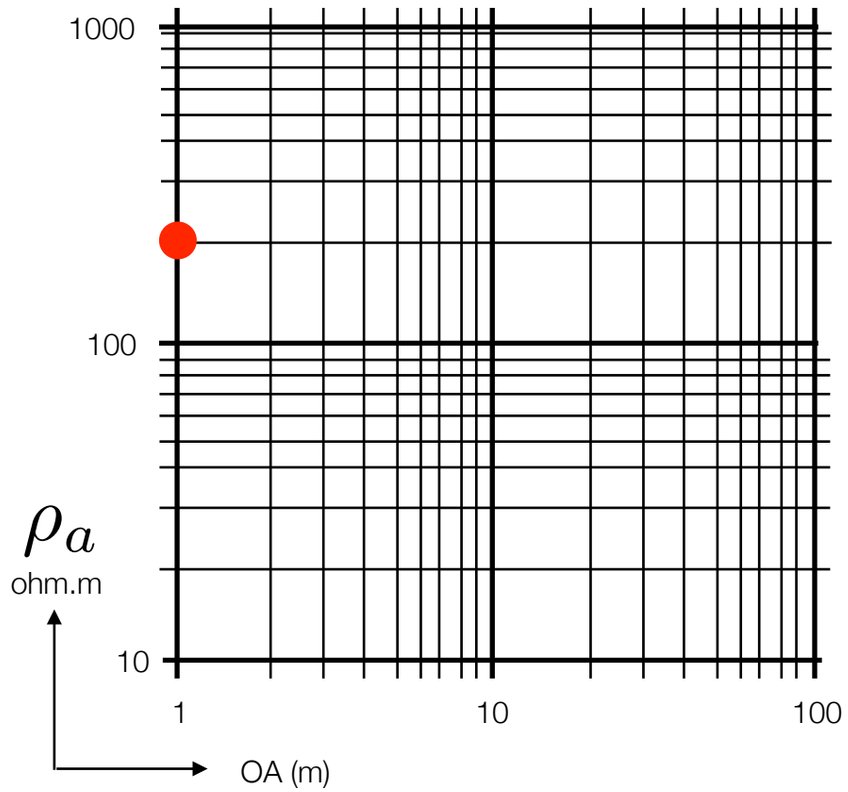
À-coups-de-prise: inclusion de petite taille

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

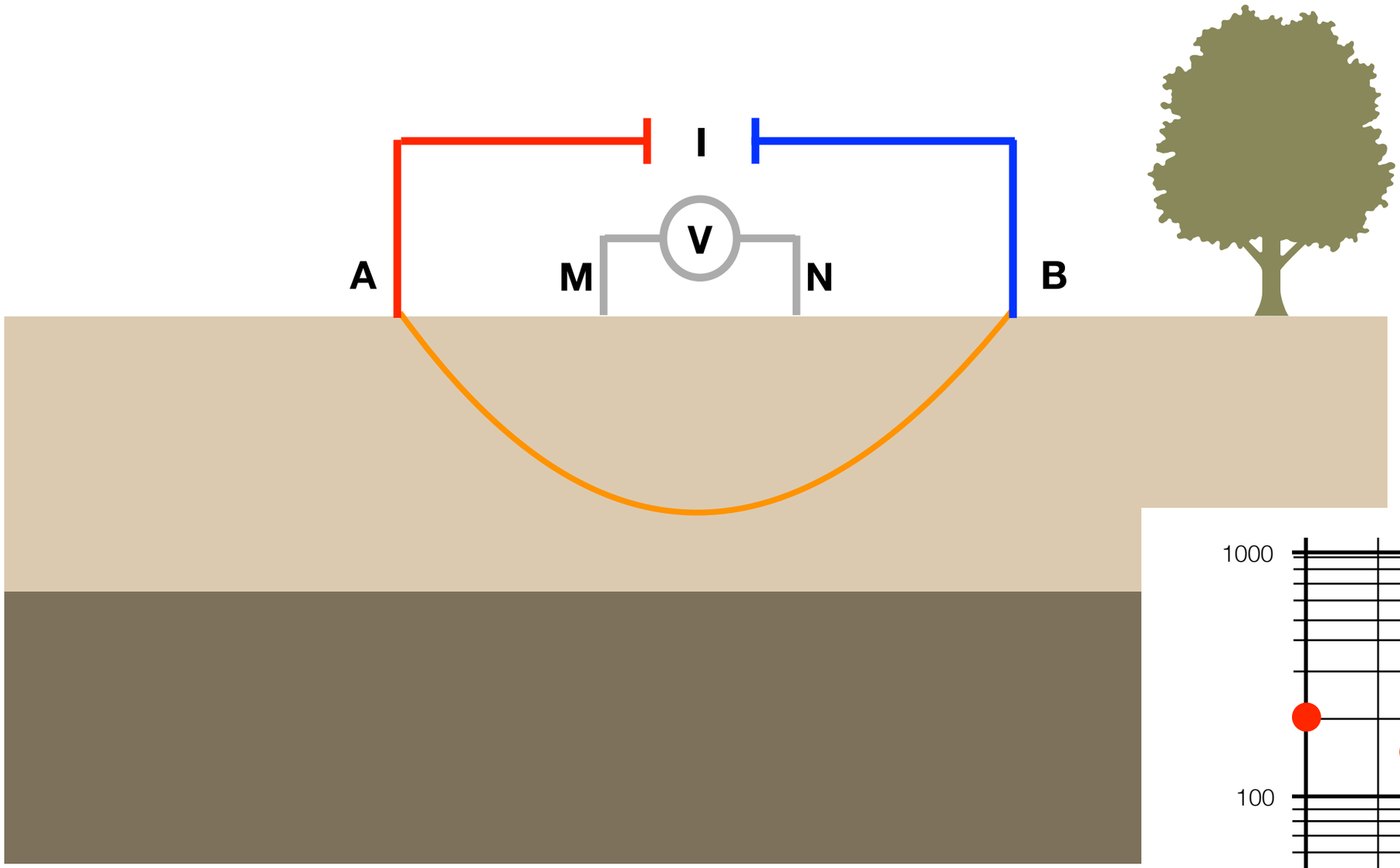


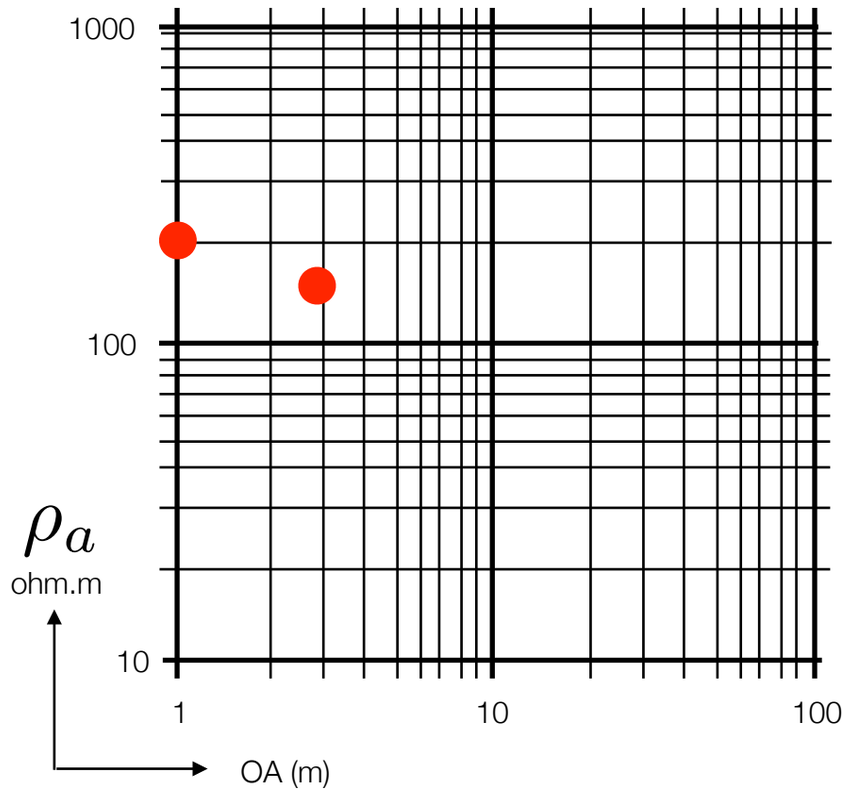
À-coups-de-prise: corrections par débrayage



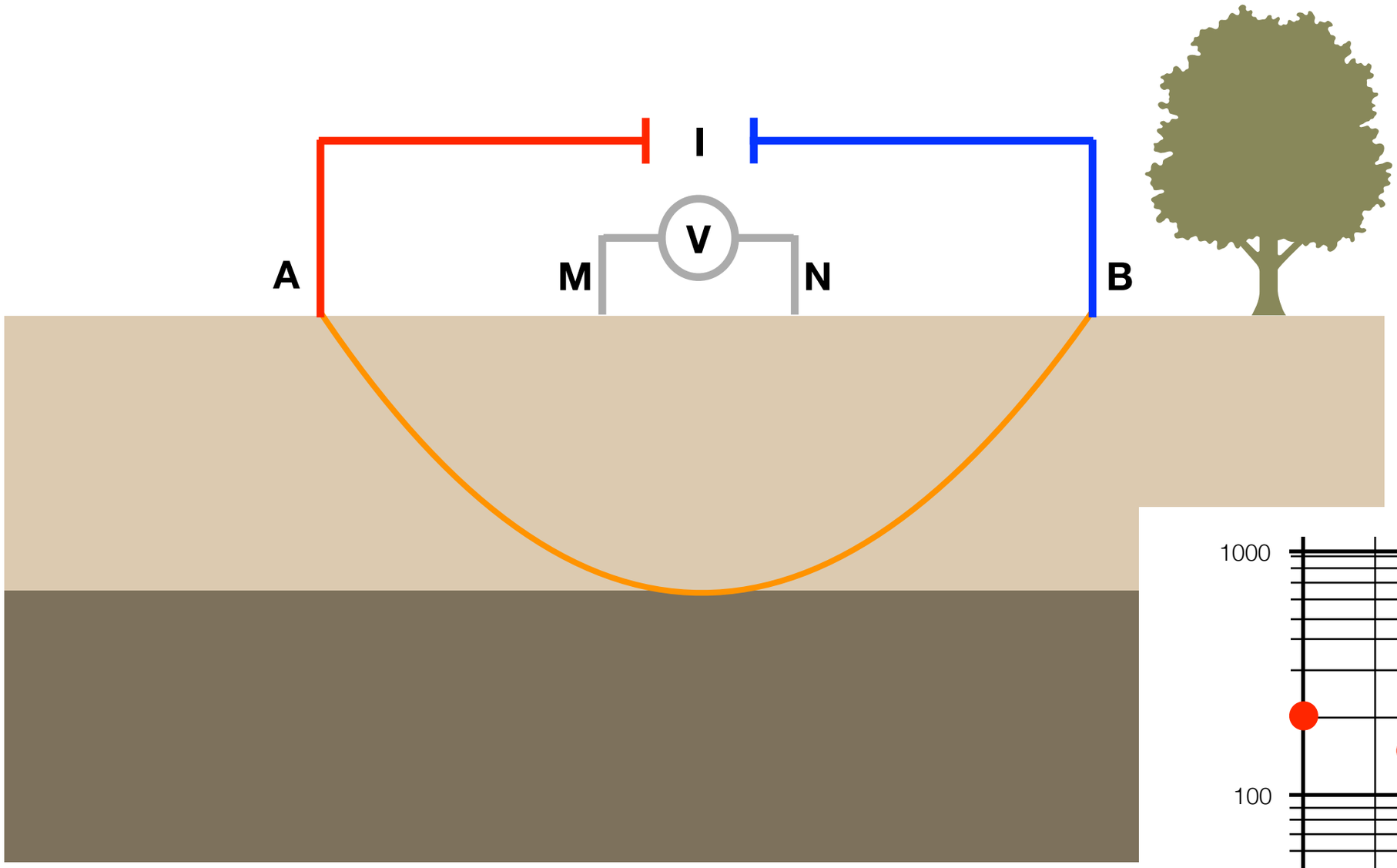


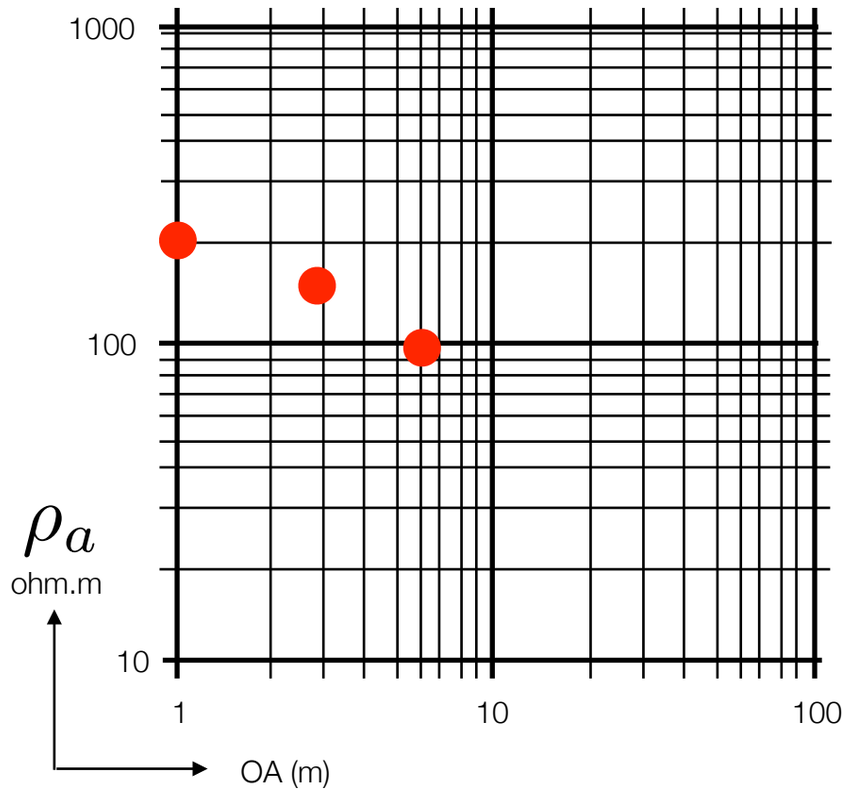
À-coups-de-prise: corrections par débrayage



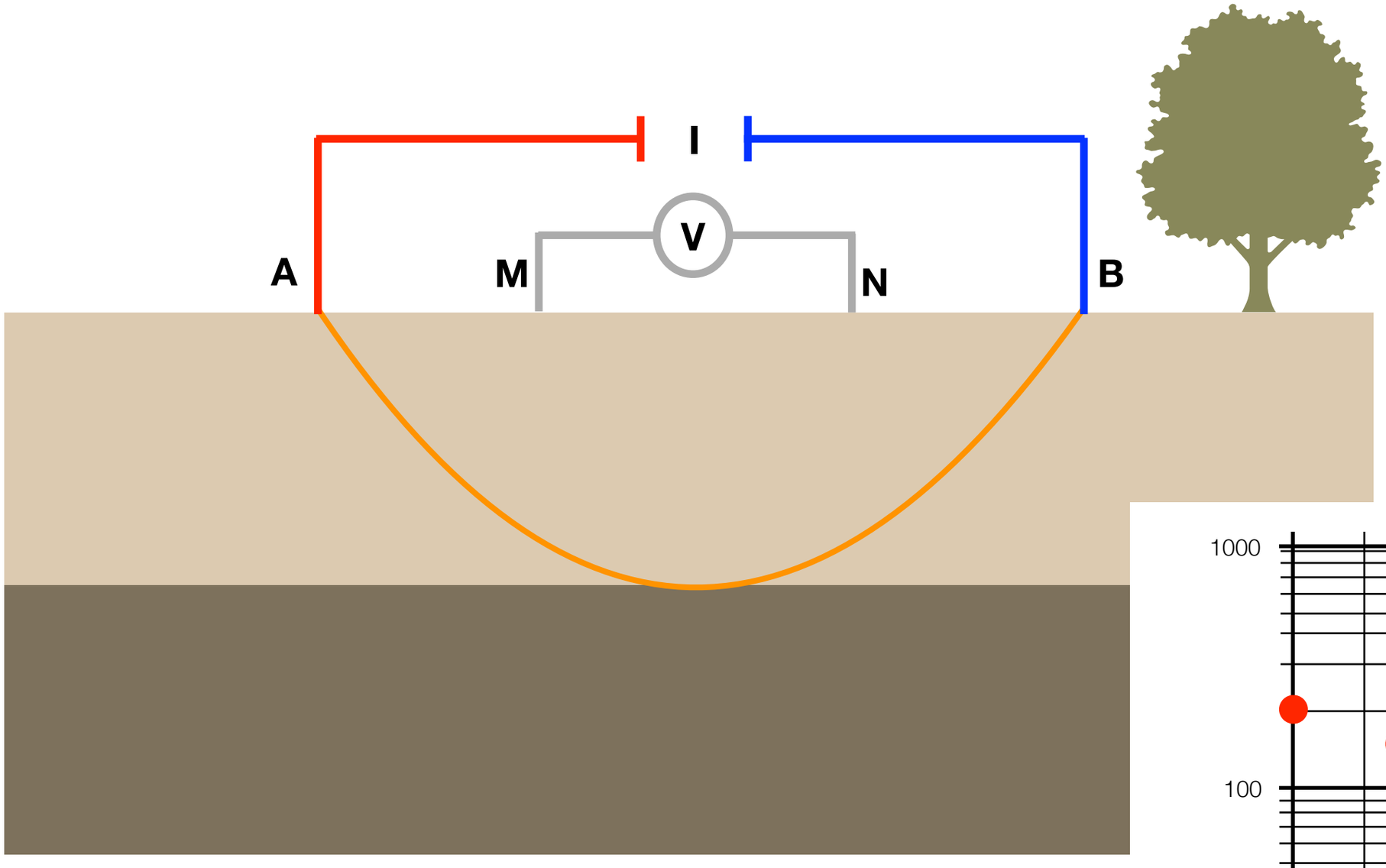


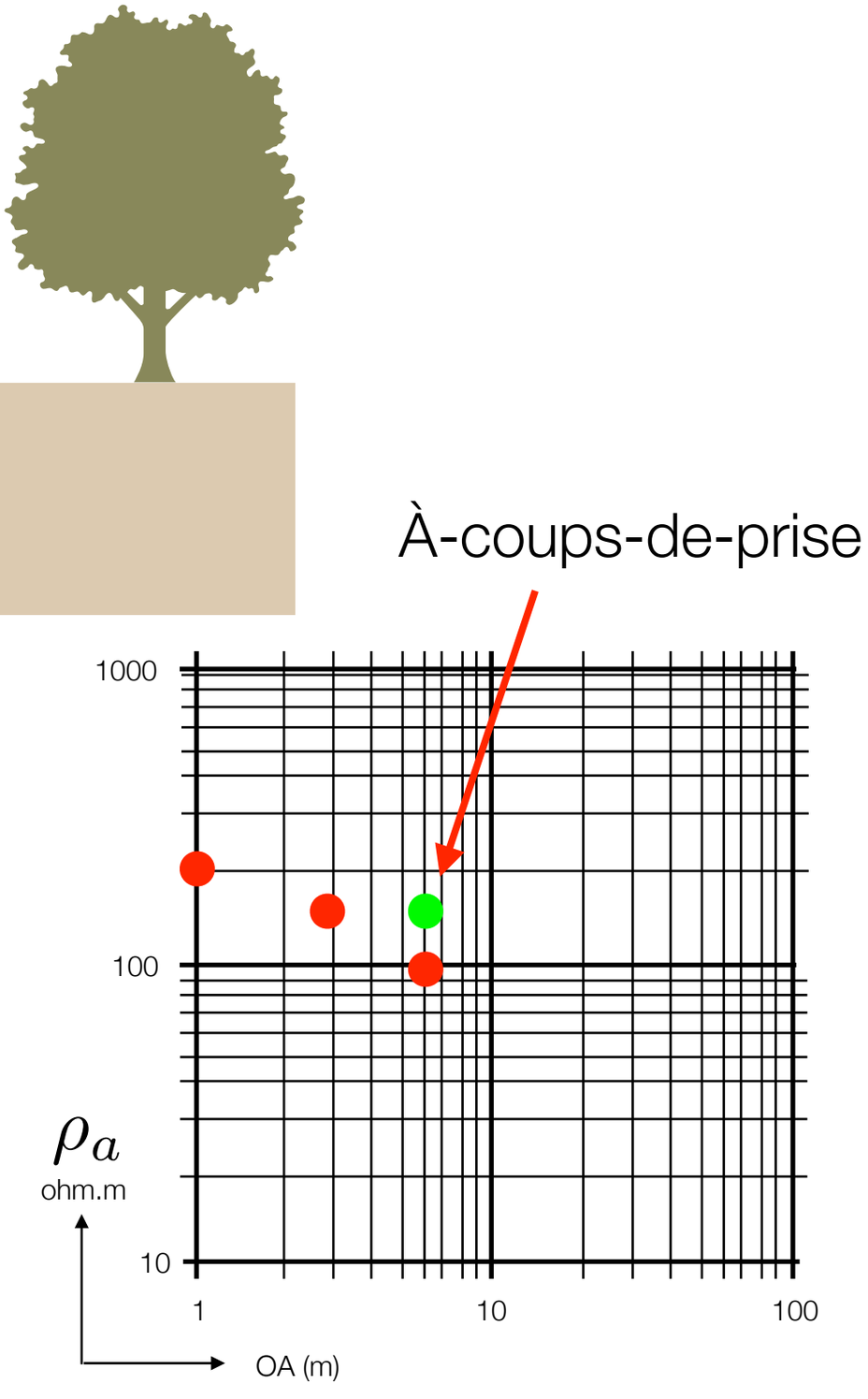
À-coups-de-prise: corrections par débrayage





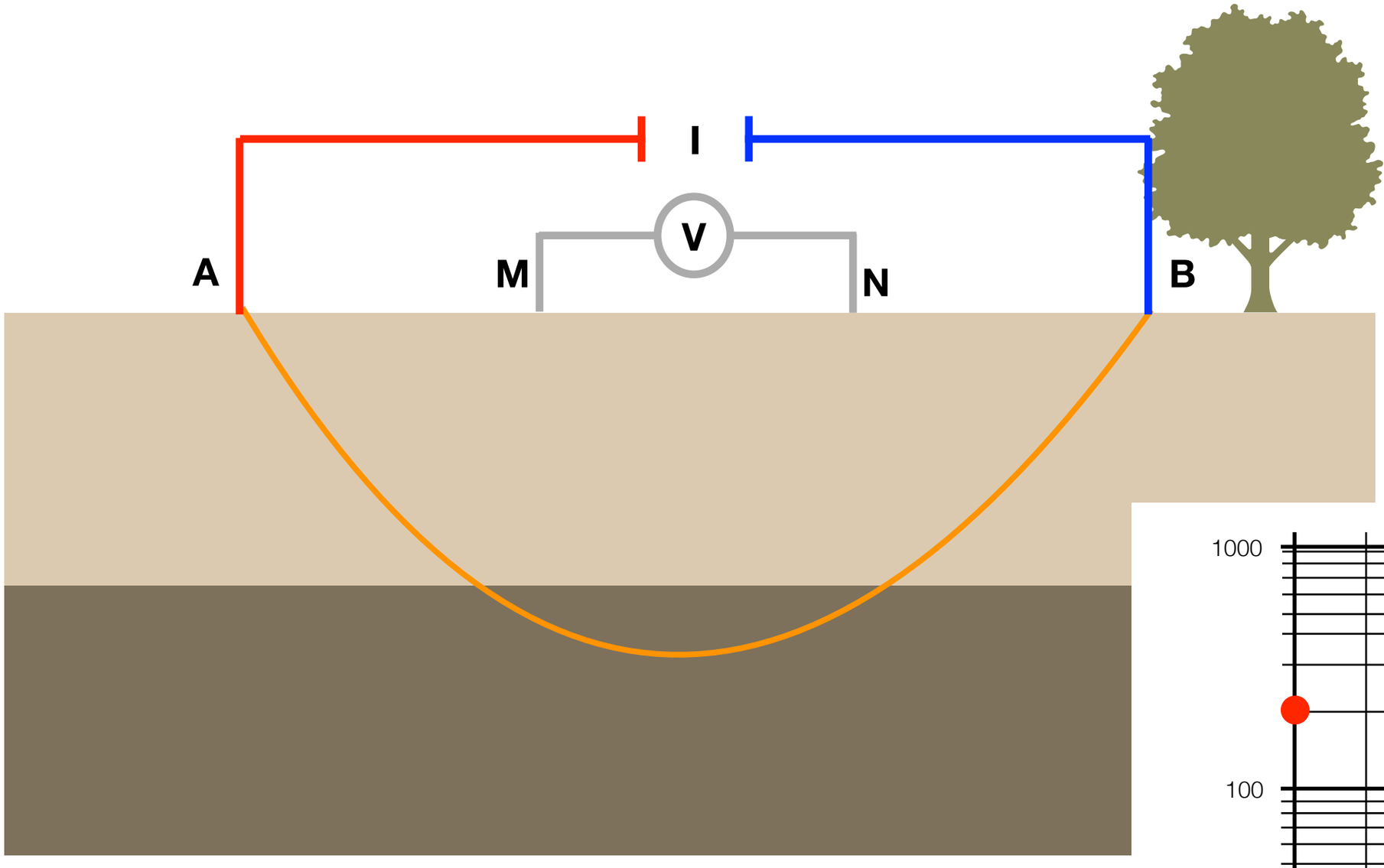
À-coups-de-prise: corrections par débrayage

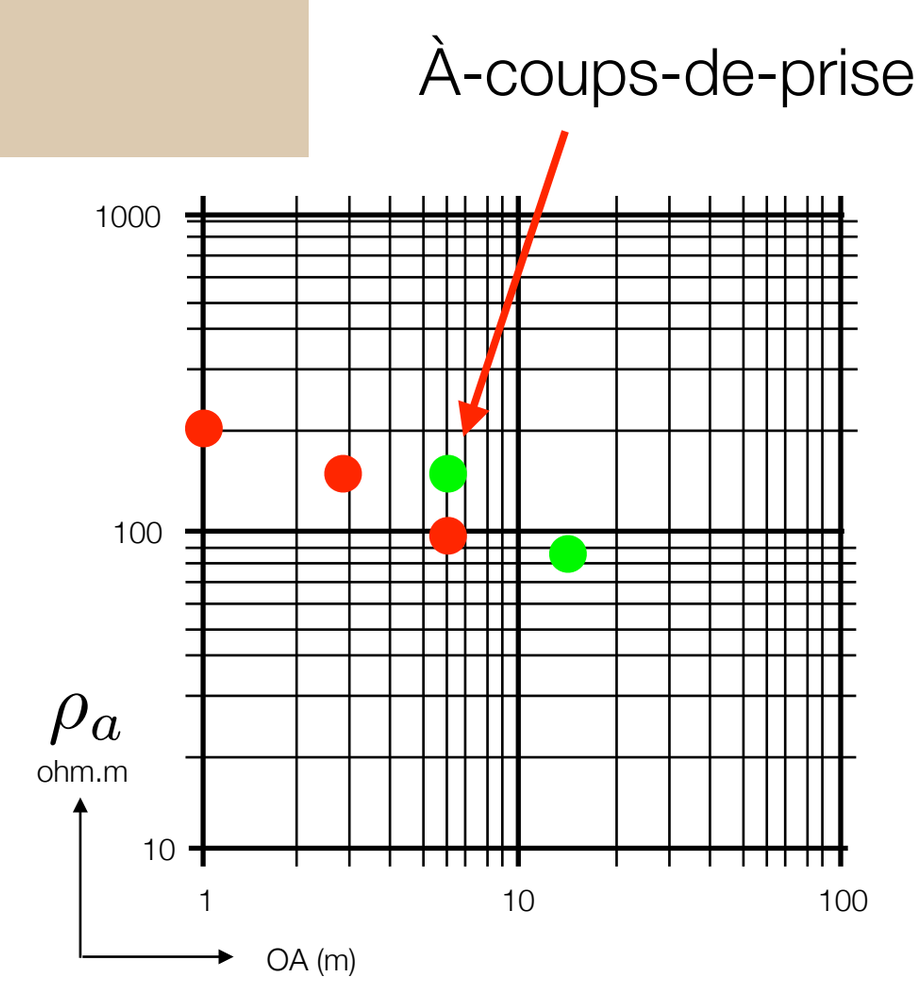




On doit changer l'espacement MN lorsque la tension devient trop faible

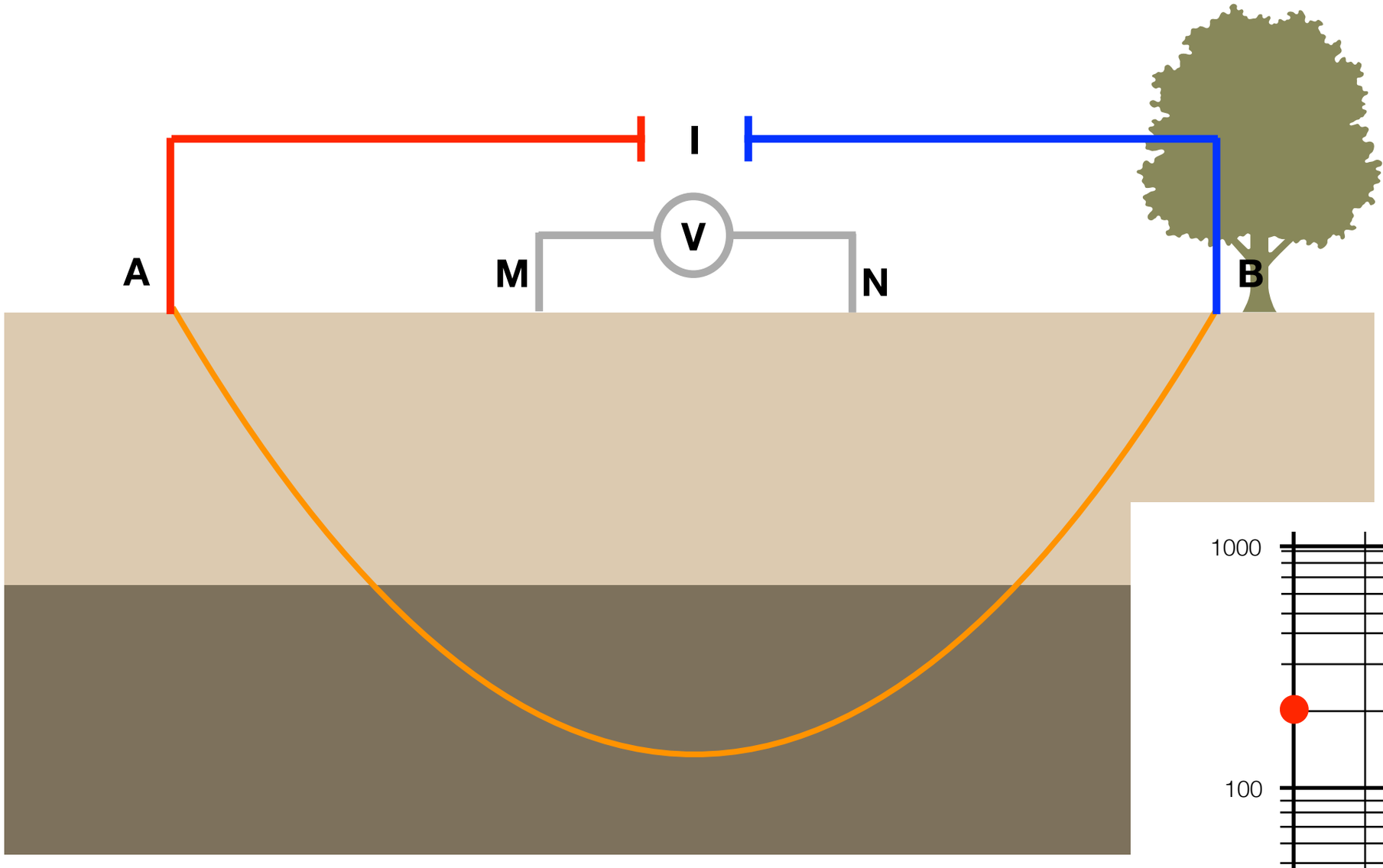
À-coups-de-prise: corrections par débrayage

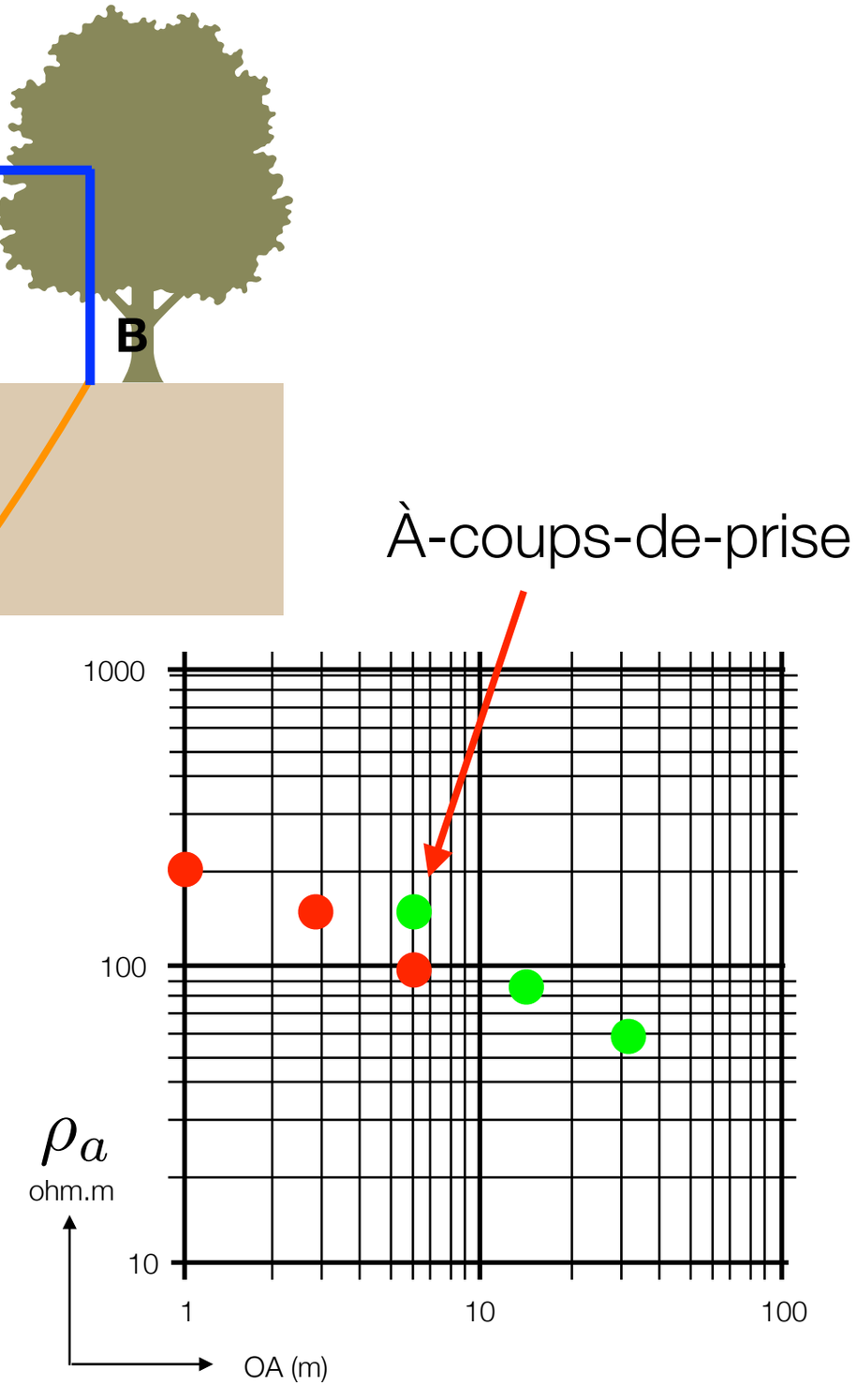




On doit changer l'espacement MN lorsque la tension devient trop faible

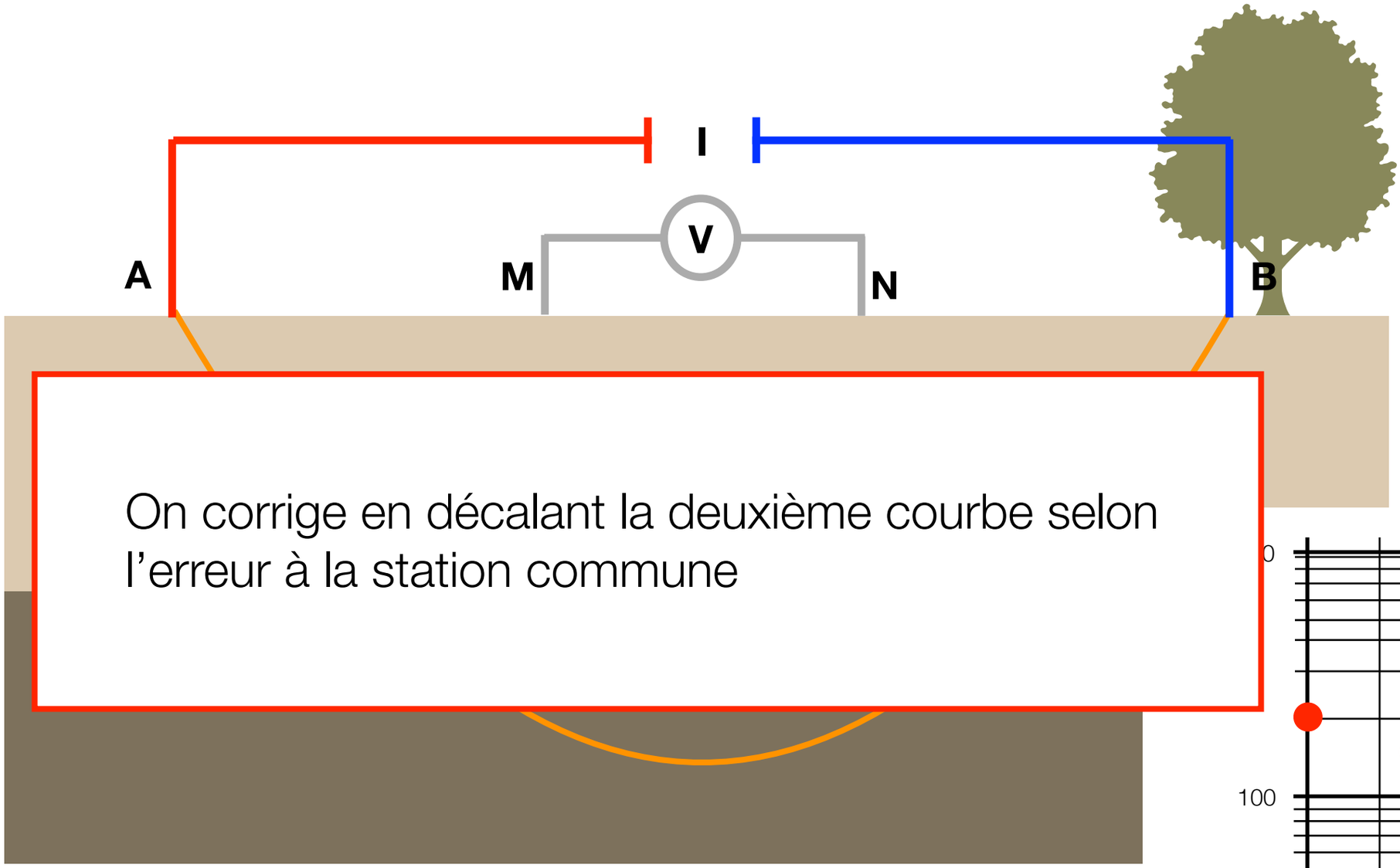
À-coups-de-prise: corrections par débrayage



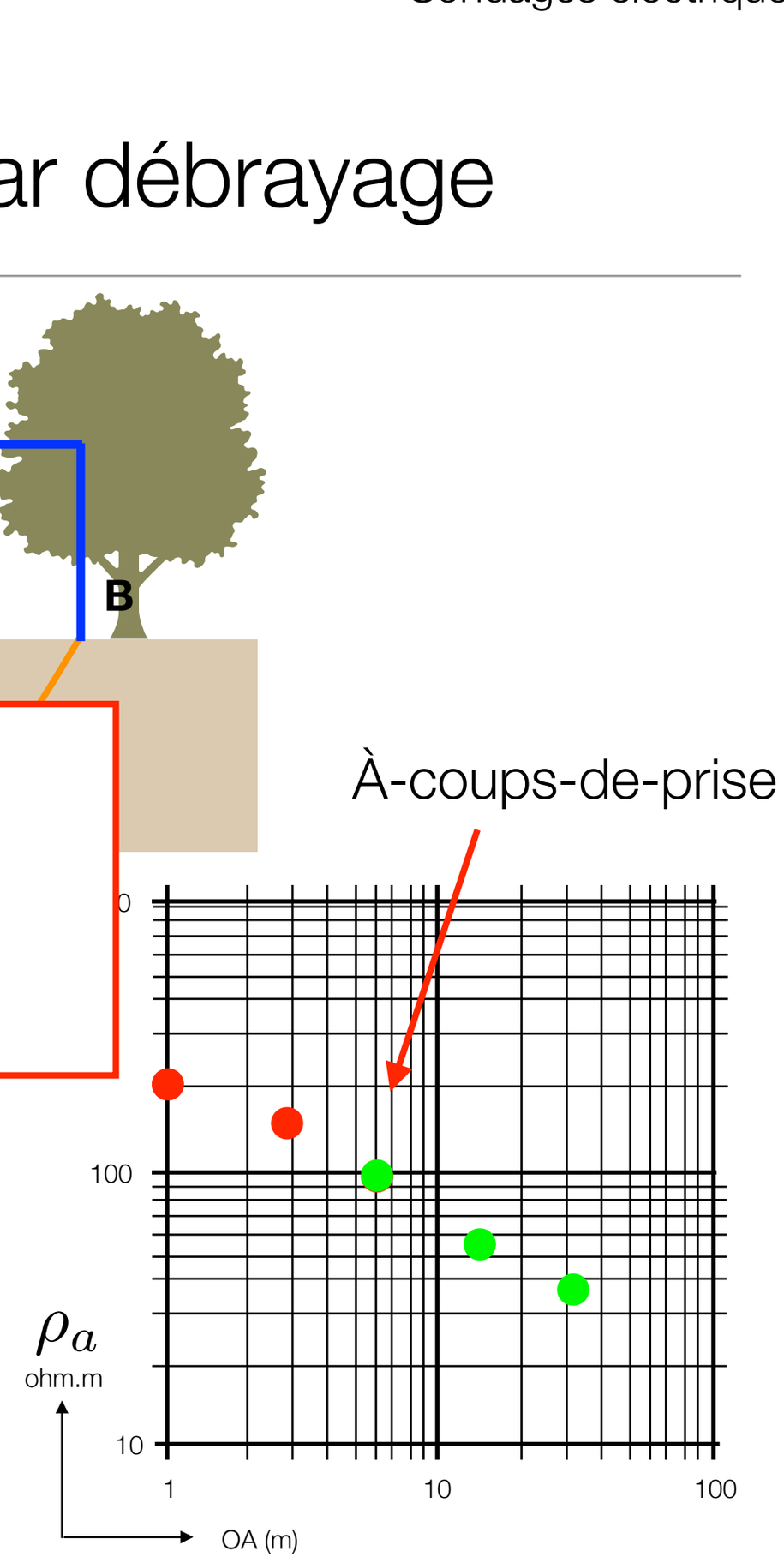


On doit changer l'espacement MN lorsque la tension devient trop faible

À-coups-de-prise: corrections par débrayage



On corrige en décalant la deuxième courbe selon l'erreur à la station commune

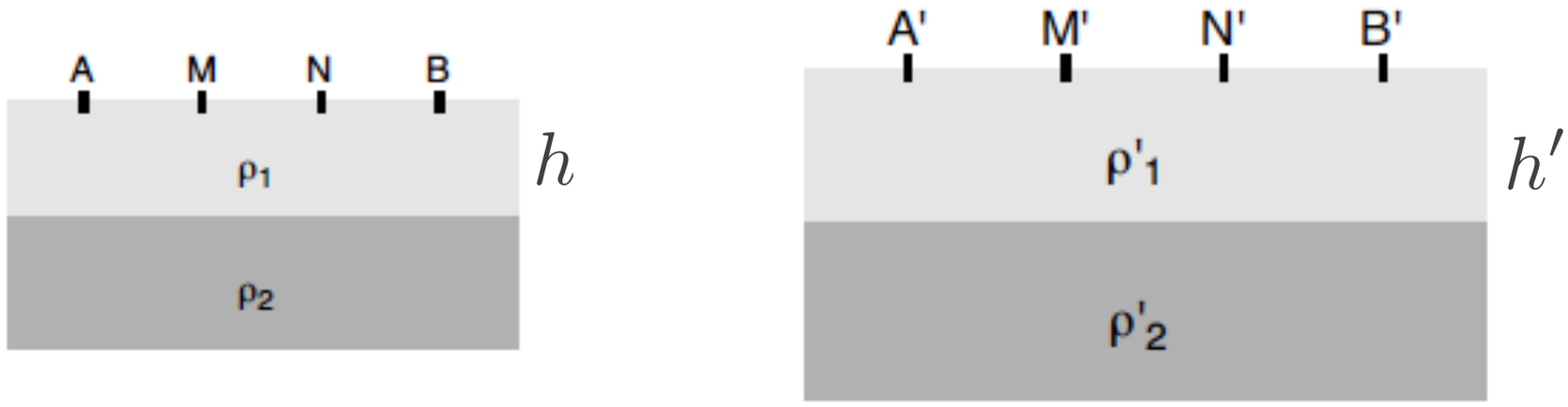


On doit changer l'espacement MN lorsque la tension devient trop faible

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:

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

Alors:

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

Interprétation: Principe de similitude

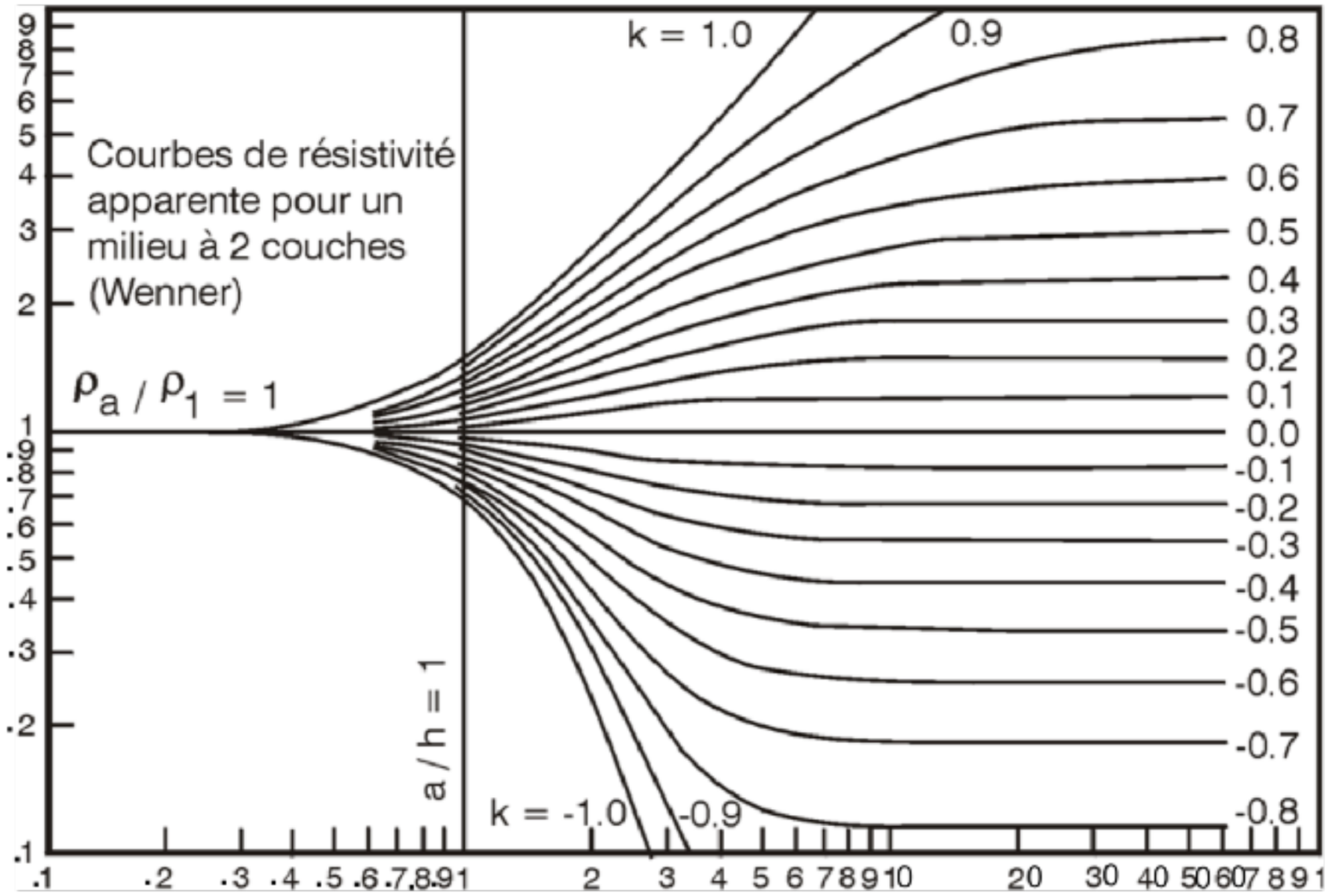
Pour le voir, revenons à la résistivité apparente pour deux couches:

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

- 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

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

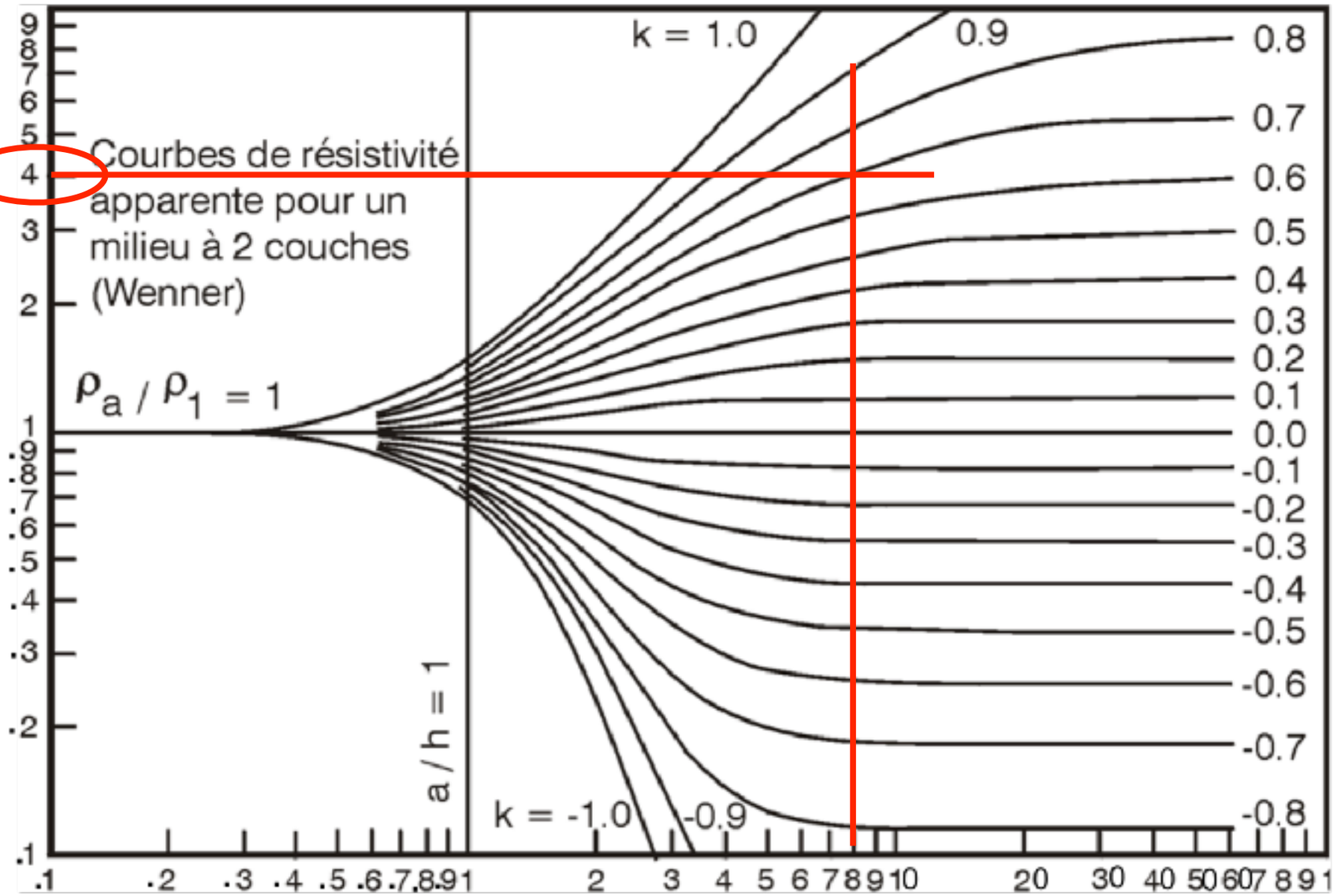
  $= \dfrac{57 - 10}{57 + 10}$

  $= 0.7$

- $\dfrac{a}{h} = \dfrac{64}{8} = 8$

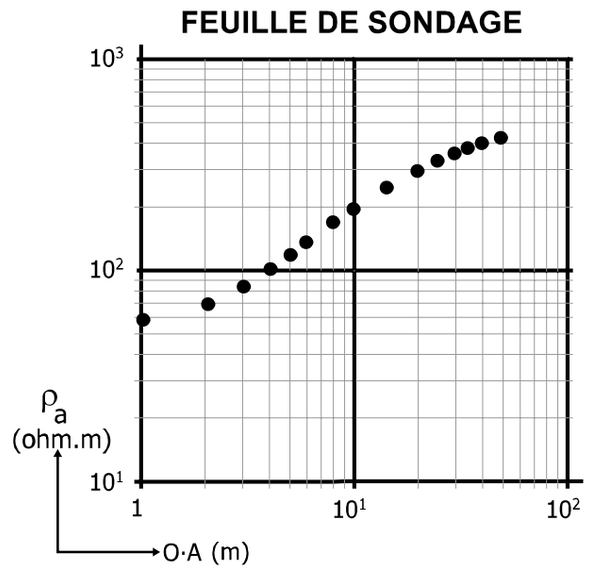
- $\rho_a = 4\rho_1$

  $=$ 40 ohm-m

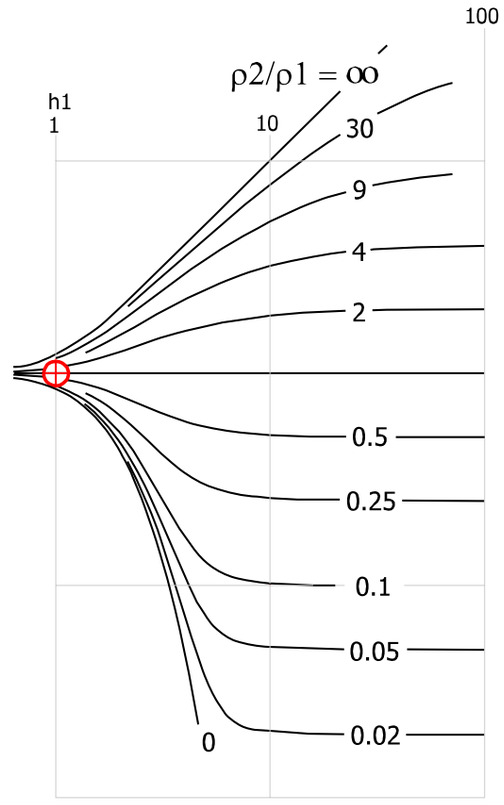


Interprétation 2 couches, Schlumberger

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



OA: Distance AB/2



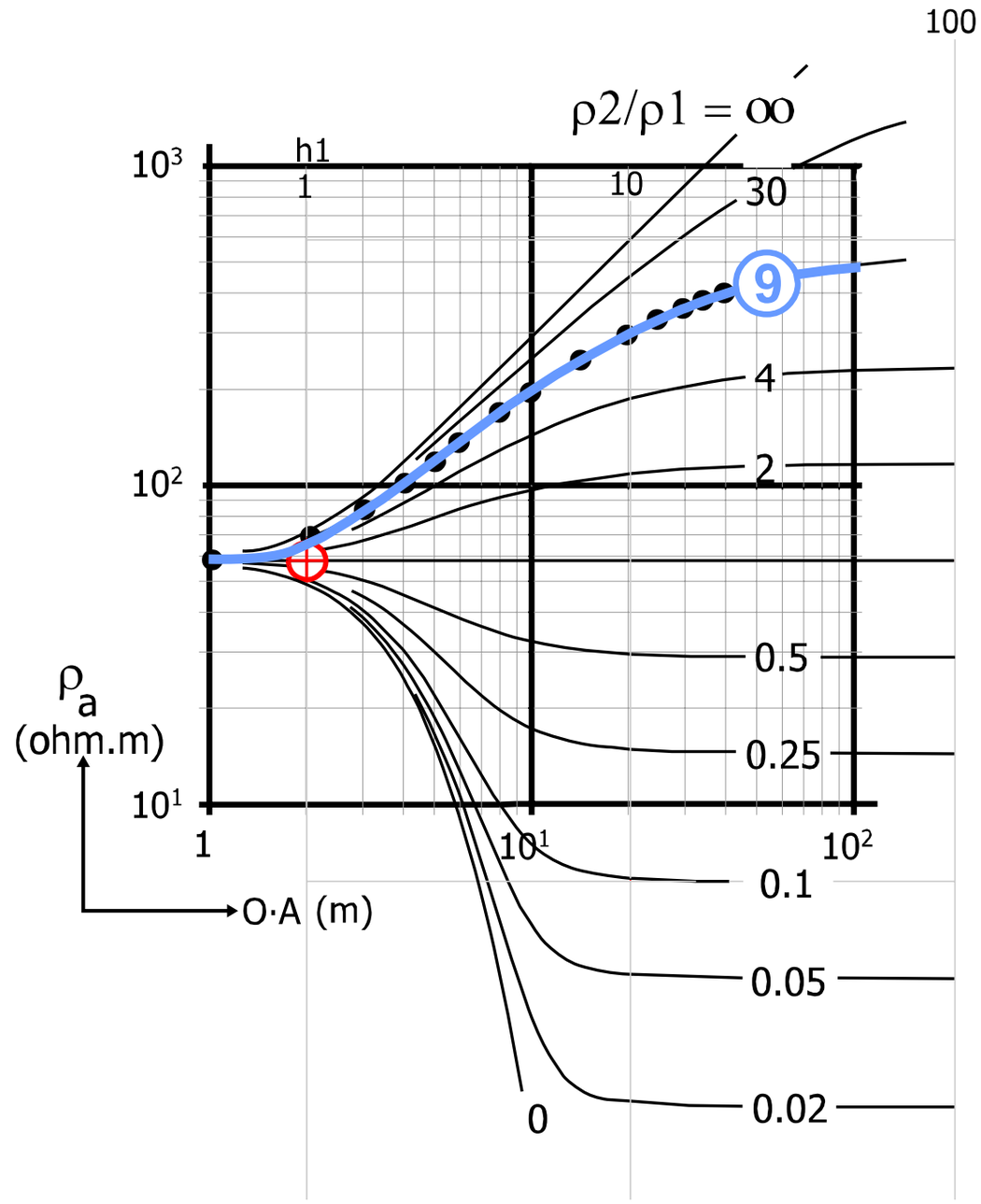
ABAQUE CH1

https://www-ig.unil.ch/c_prof.htm

Interprétation 2 couches, Schlumberger

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

2. Superposer l'abaque pour faire corresponde la courbe de sondage à une des courbes de l'abaque



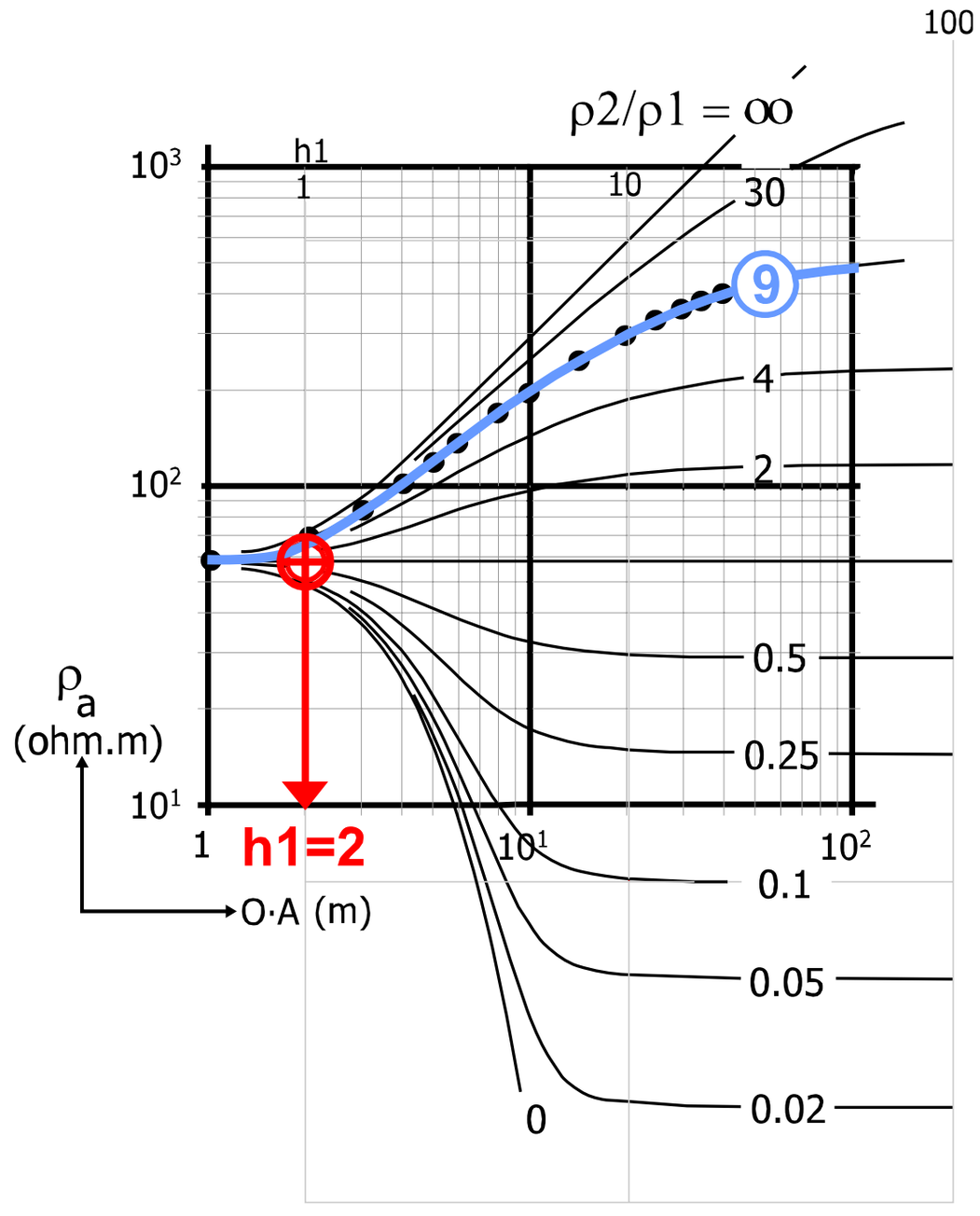
https://www-ig.unil.ch/c_prof.htm

Interprétation 2 couches, Schlumberger

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

2. Superposer l'abaque pour faire corresponde la courbe de sondage à une des courbes de l'abaque

3. Obtenir l'épaisseur du terrain en identifiant l'abscisse de la croix



https://www-ig.unil.ch/c_prof.htm

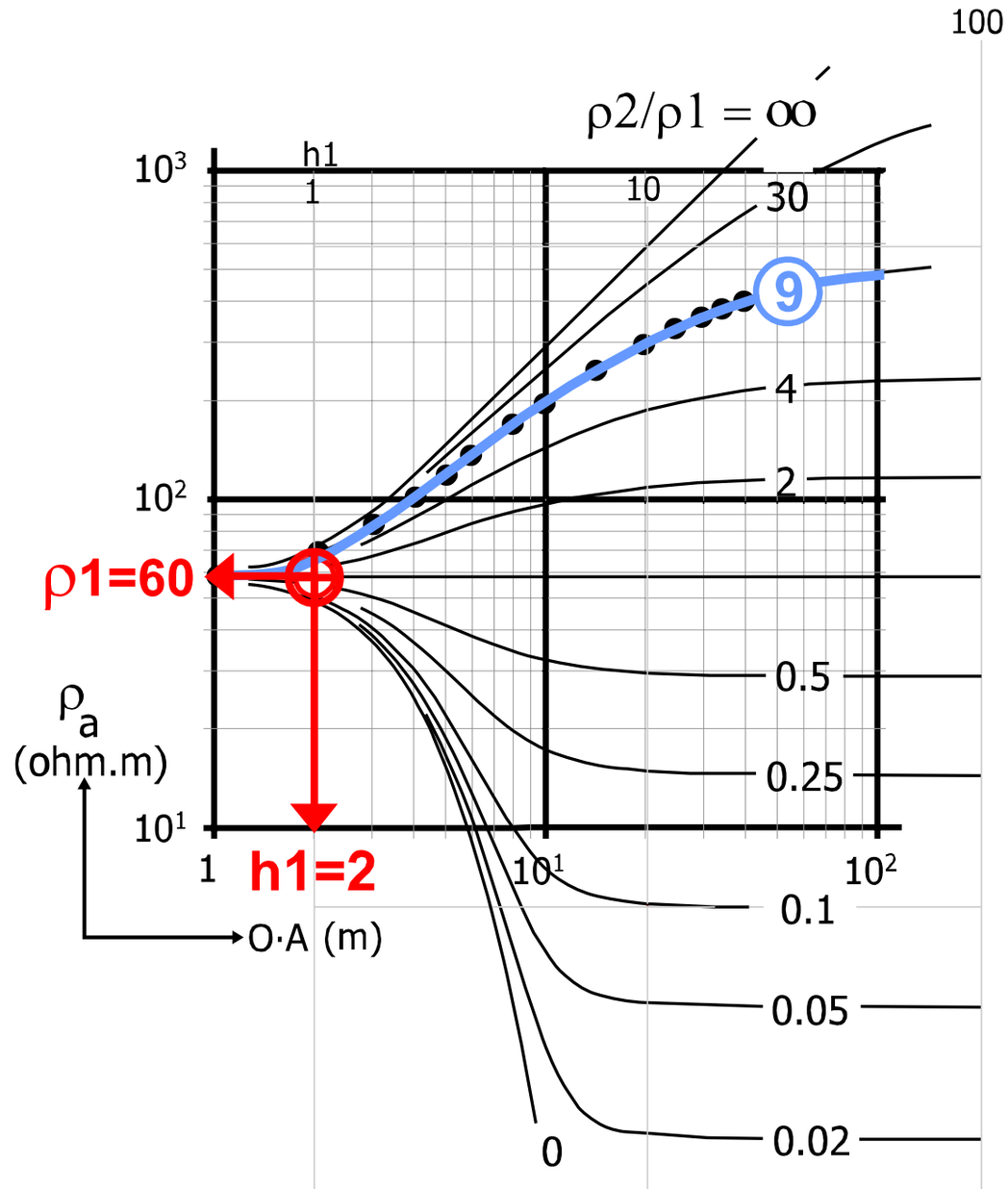
Interprétation 2 couches, Schlumberger

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

2. Superposer l'abaque pour faire corresponde 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



https://www-ig.unil.ch/c_prof.htm

Interprétation 2 couches, Schlumberger

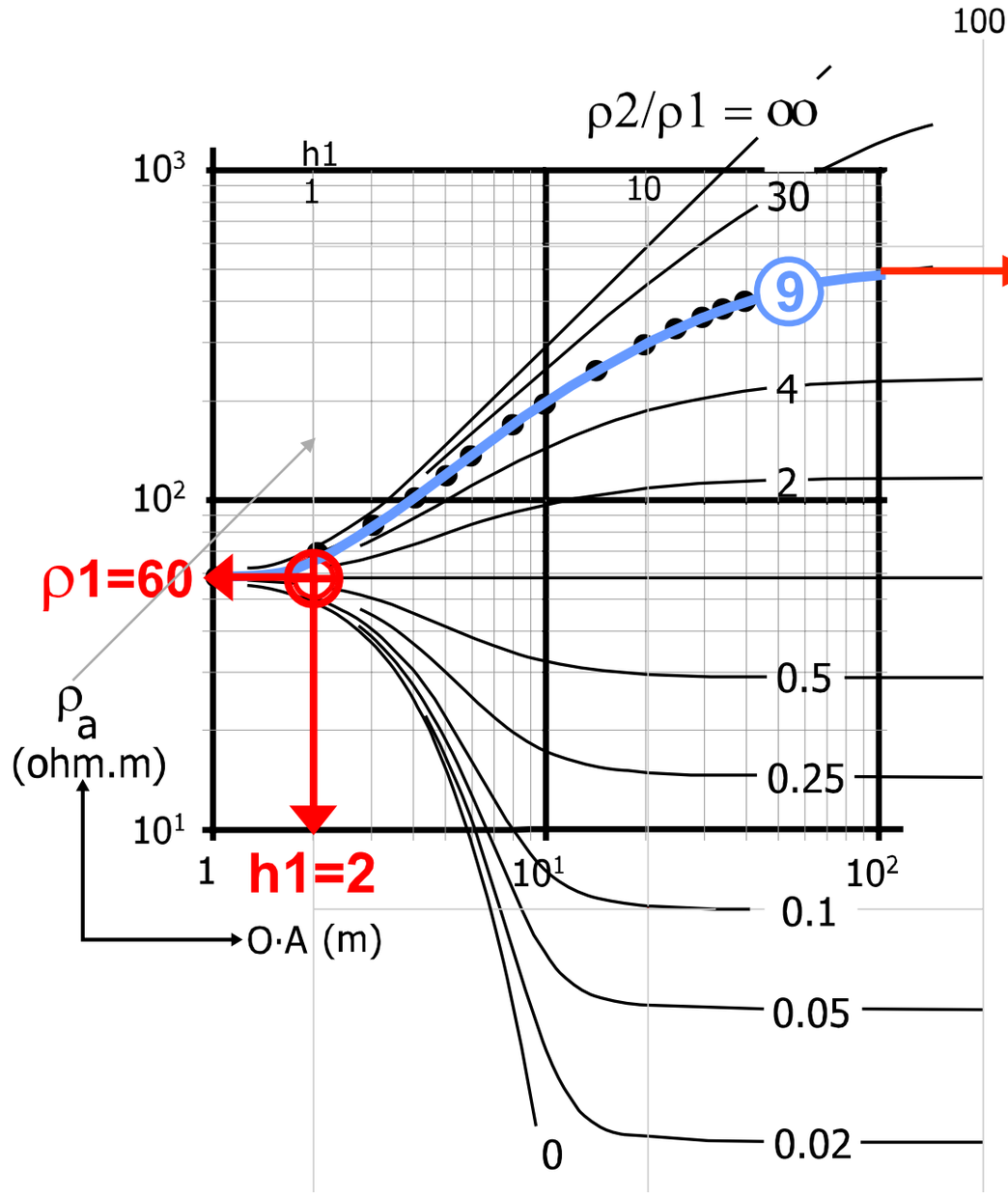
1. Tracer la courbe de sondage sur un graphique bi-logarithmique

2. Superposer l'abaque pour faire corresponde 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



$\rho_2/\rho_1 = 9$

$\rho_2 = 9 * 60$

$= 540\Omega m$

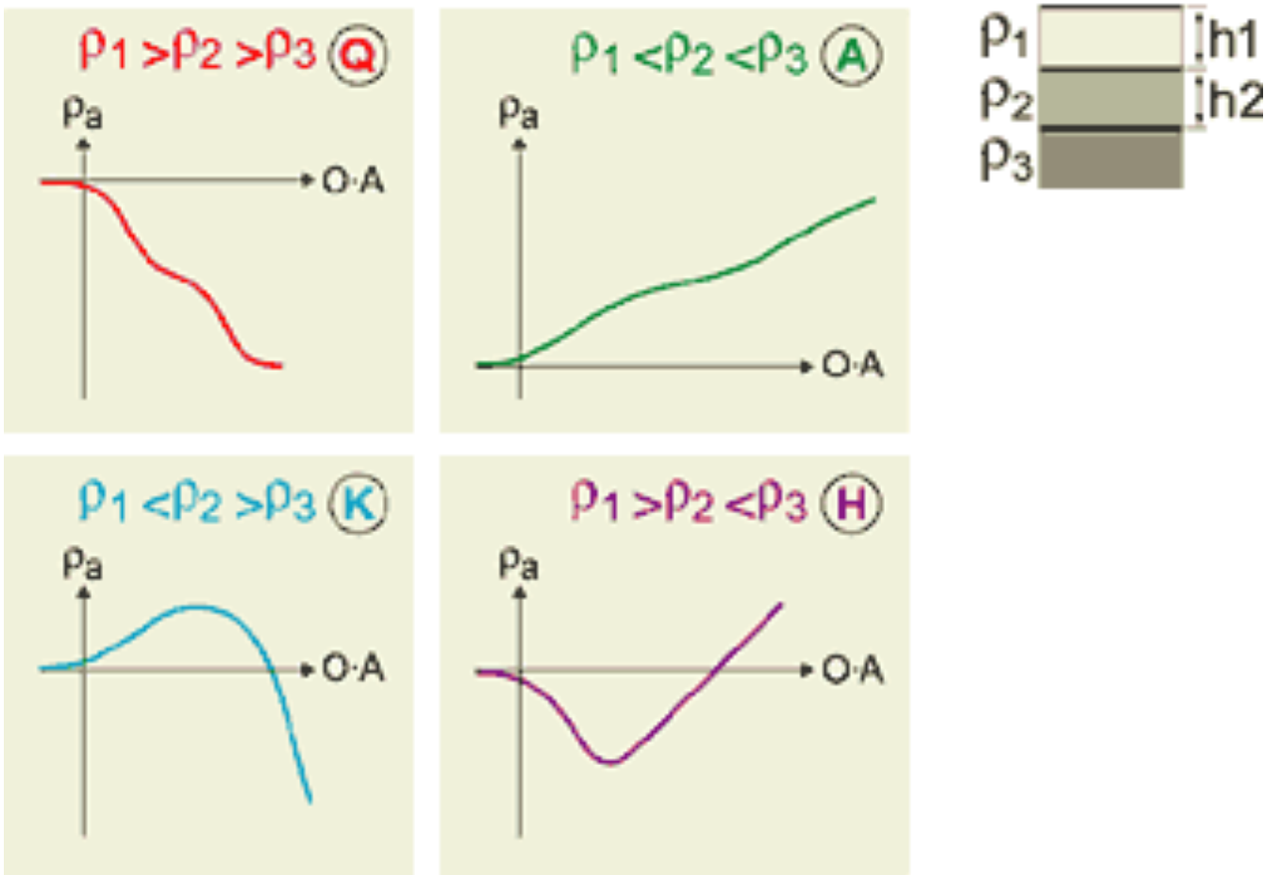
https://www-ig.unil.ch/c_prof.htm

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**!

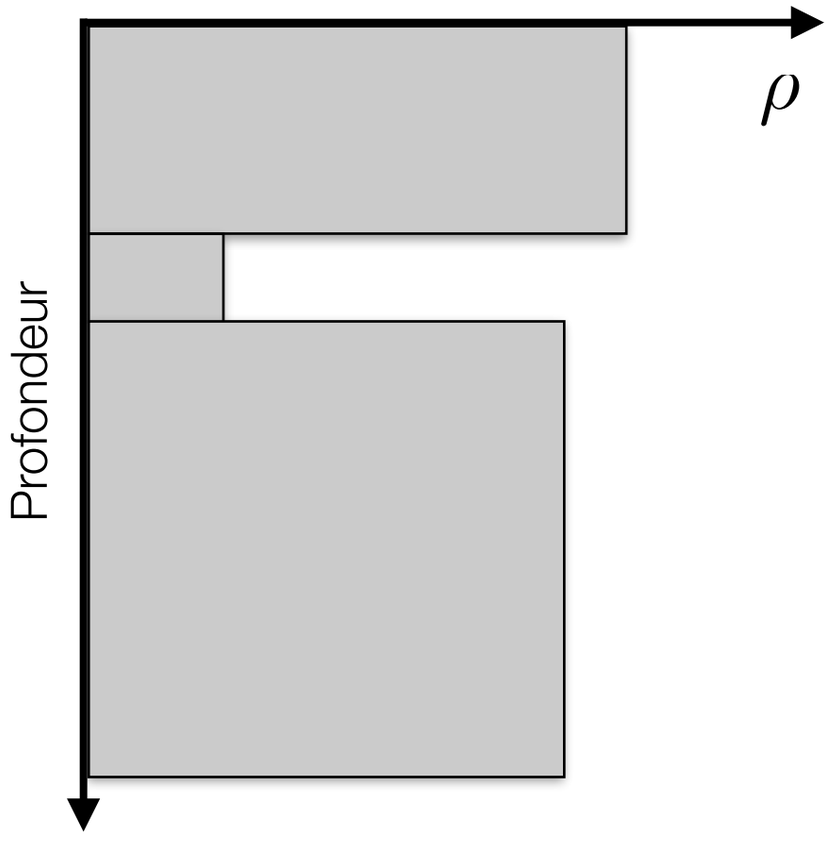


Courbes types pour un modèle à 3 couches

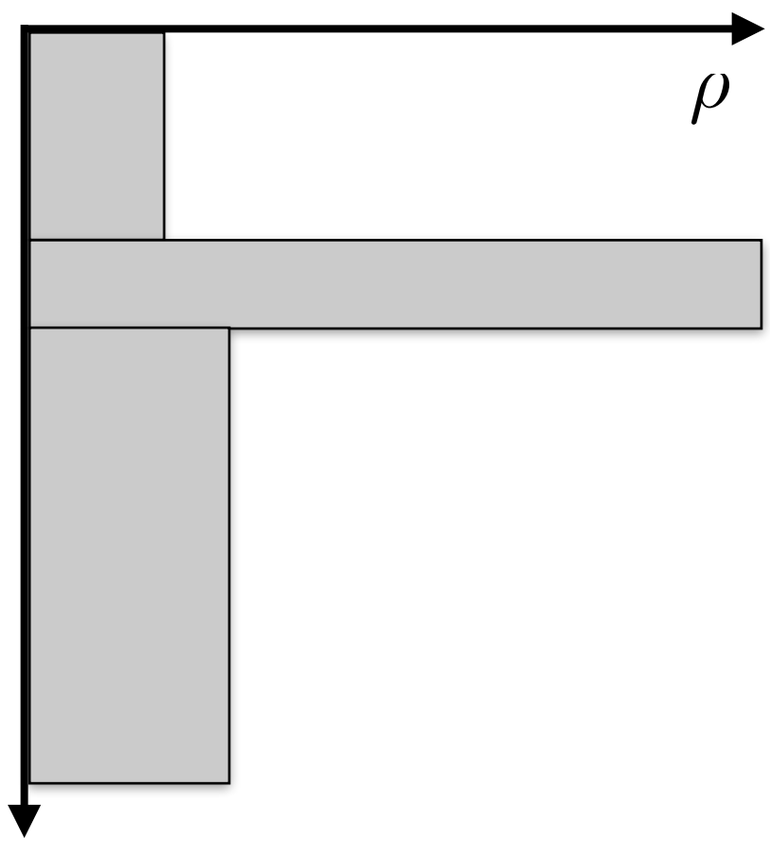
Sondage: Principe d'équivalence

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



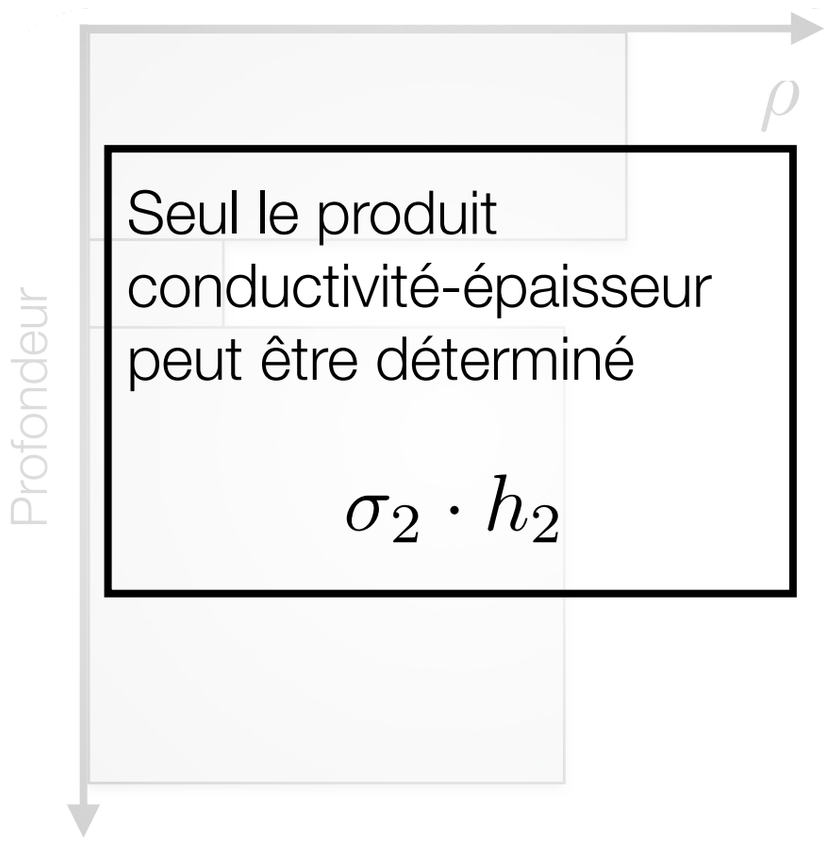
Couche mince résistive entre deux couches conductrices



Sondage: Principe d'équivalence

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

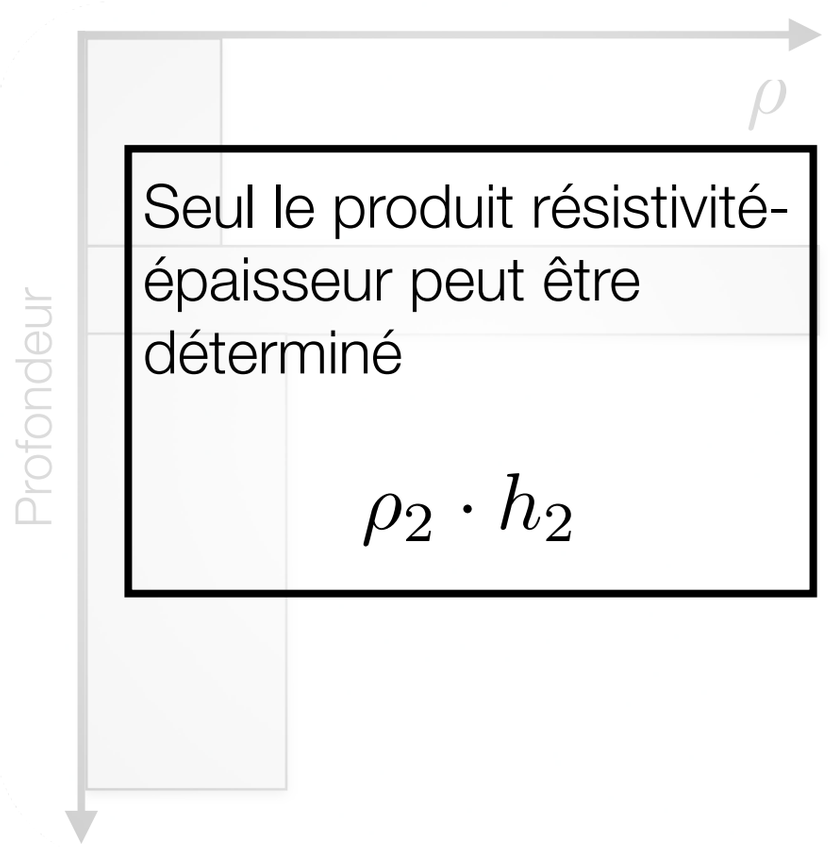
Couche mince conductrice entre deux couches résistives



Seul le produit conductivité-épaisseur peut être déterminé

$$\sigma_2 \cdot h_2$$

Couche mince résistive entre deux couches conductrices



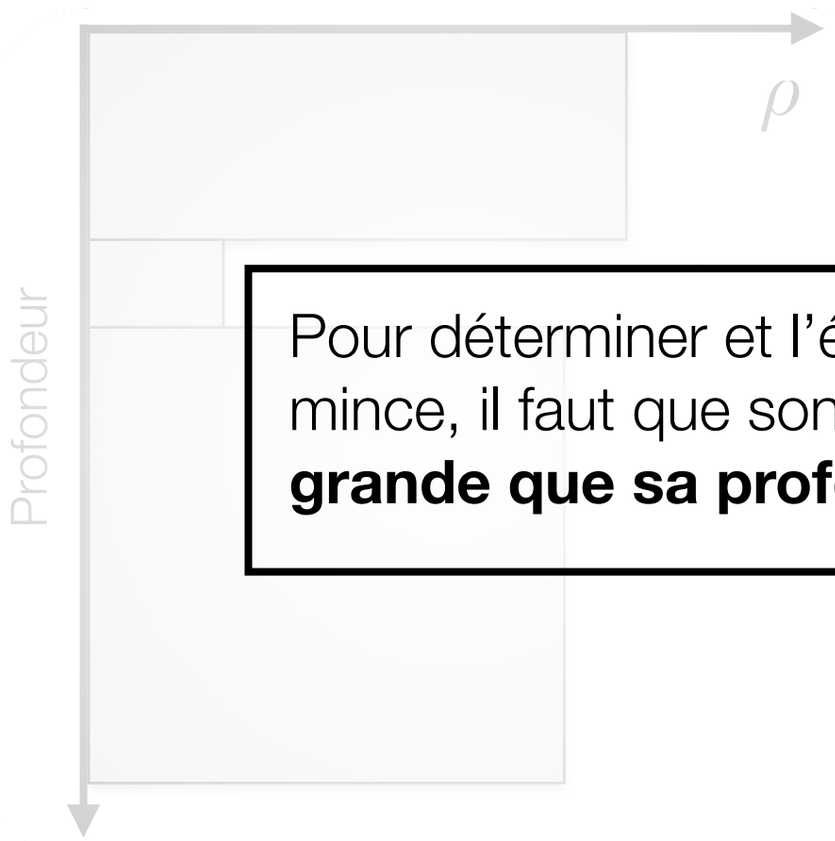
Seul le produit résistivité-épaisseur peut être déterminé

$$\rho_2 \cdot h_2$$

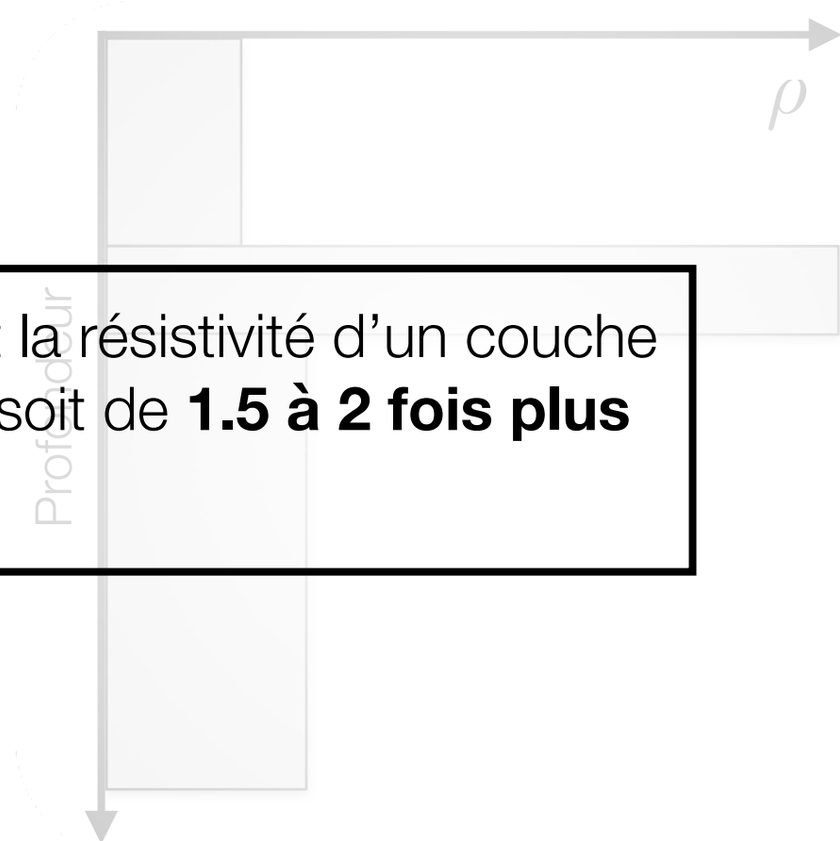
Sondage: Principe d'équivalence

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

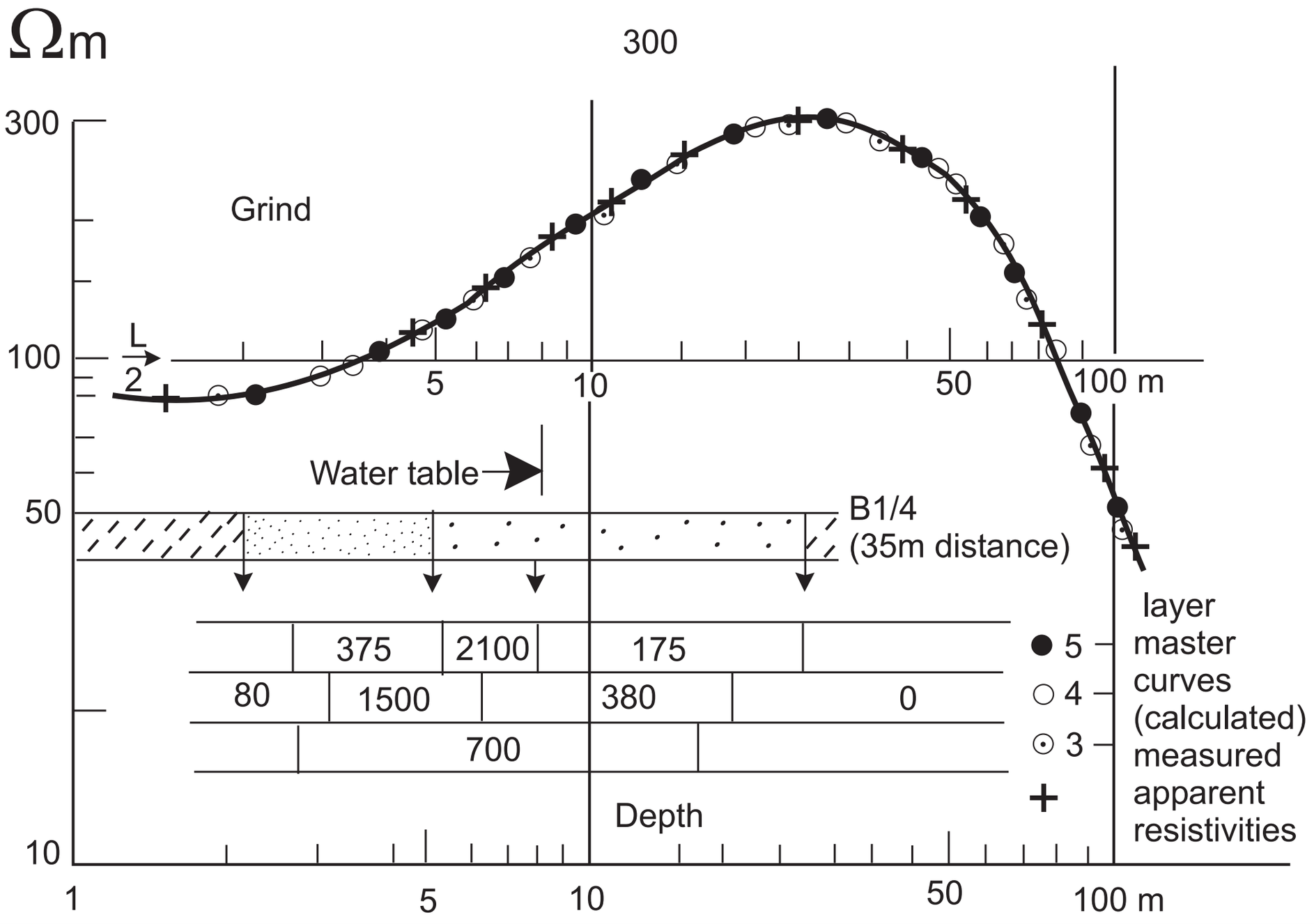


Couche mince résistive entre deux couches conductrices



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

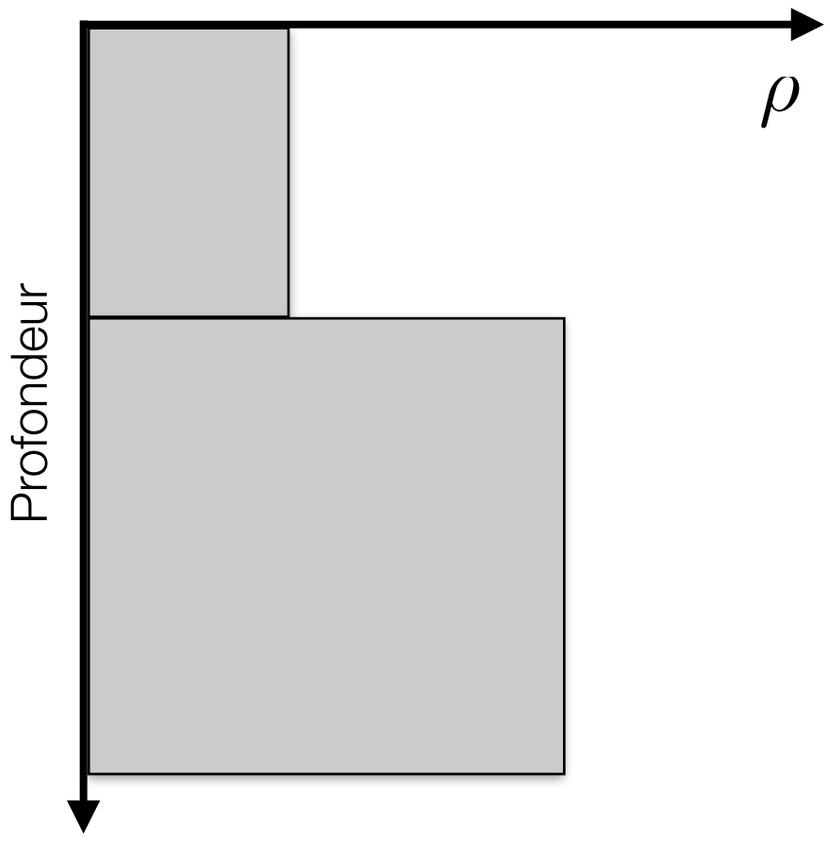
Sondage: Principe d'équivalence



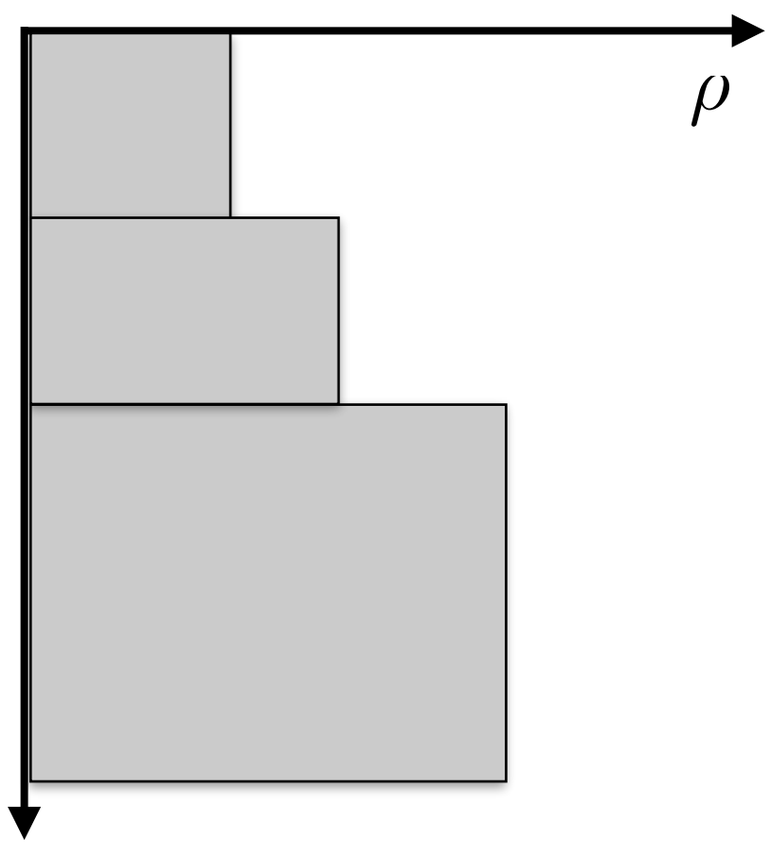
Sondage: Principe de suppression

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

Modèle deux couches



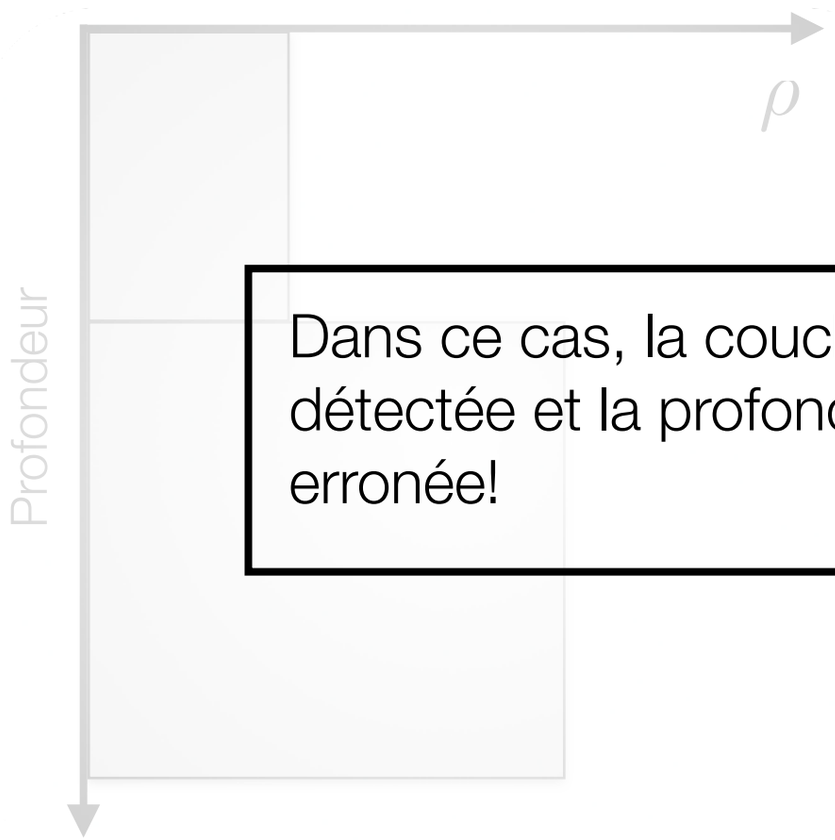
Modèle 3 couches, résistivité intermédiaire



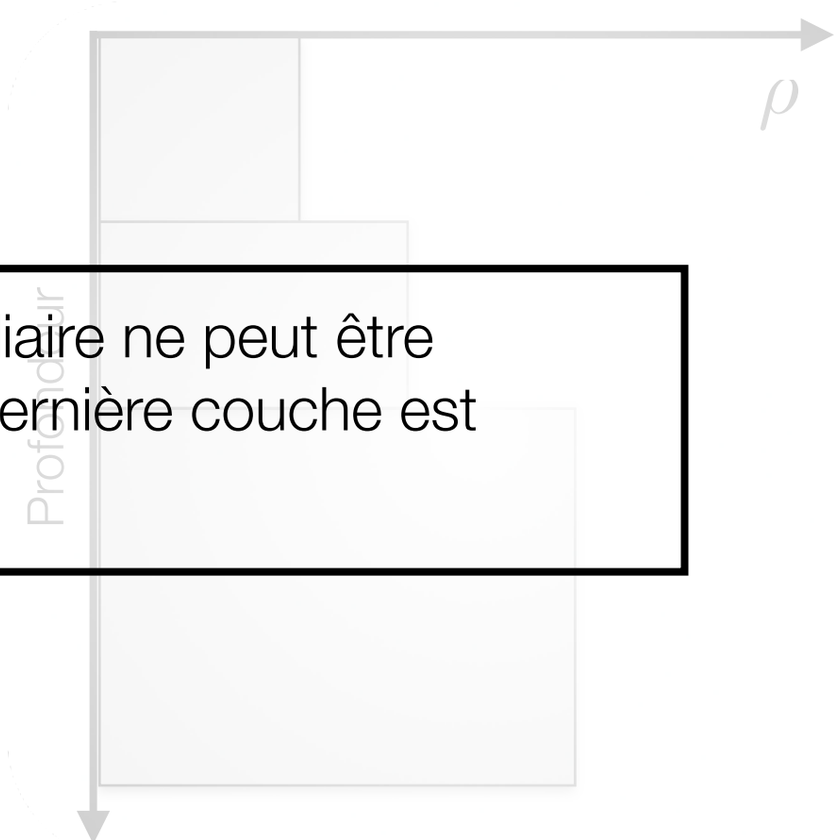
Sondage: Principe de suppression

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

Modèle deux couches



Modèle 3 couches, résistivité intermédiaire



Dans ce cas, la couche intermédiaire ne peut être détectée et la profondeur de la dernière couche est erronée!

Sondage: Principe de suppression

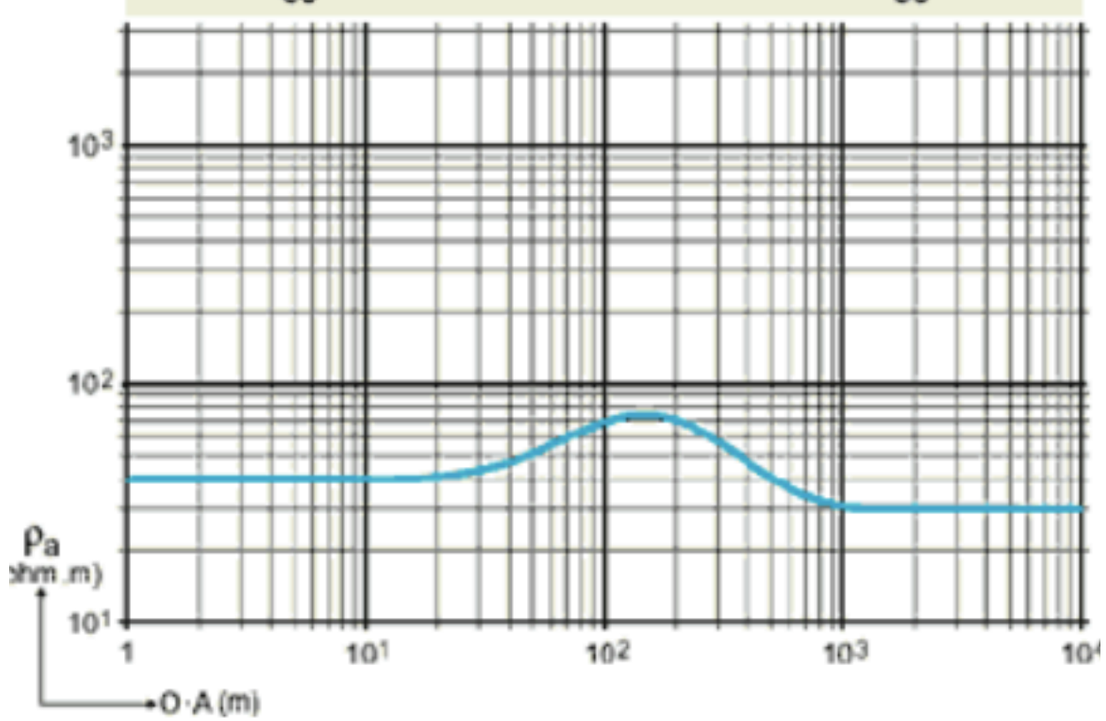
EQUIVALENCE TYPE K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)

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



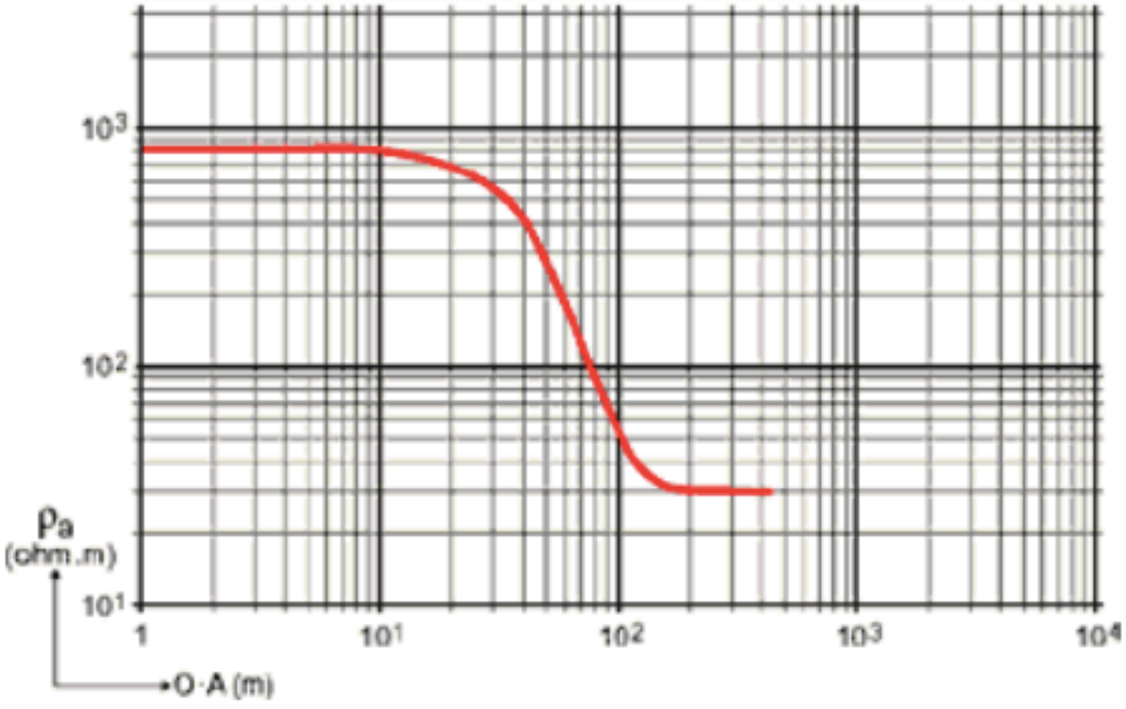
SUPPRESSION TYPE Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$)

INTERPRÉTATION (A)

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

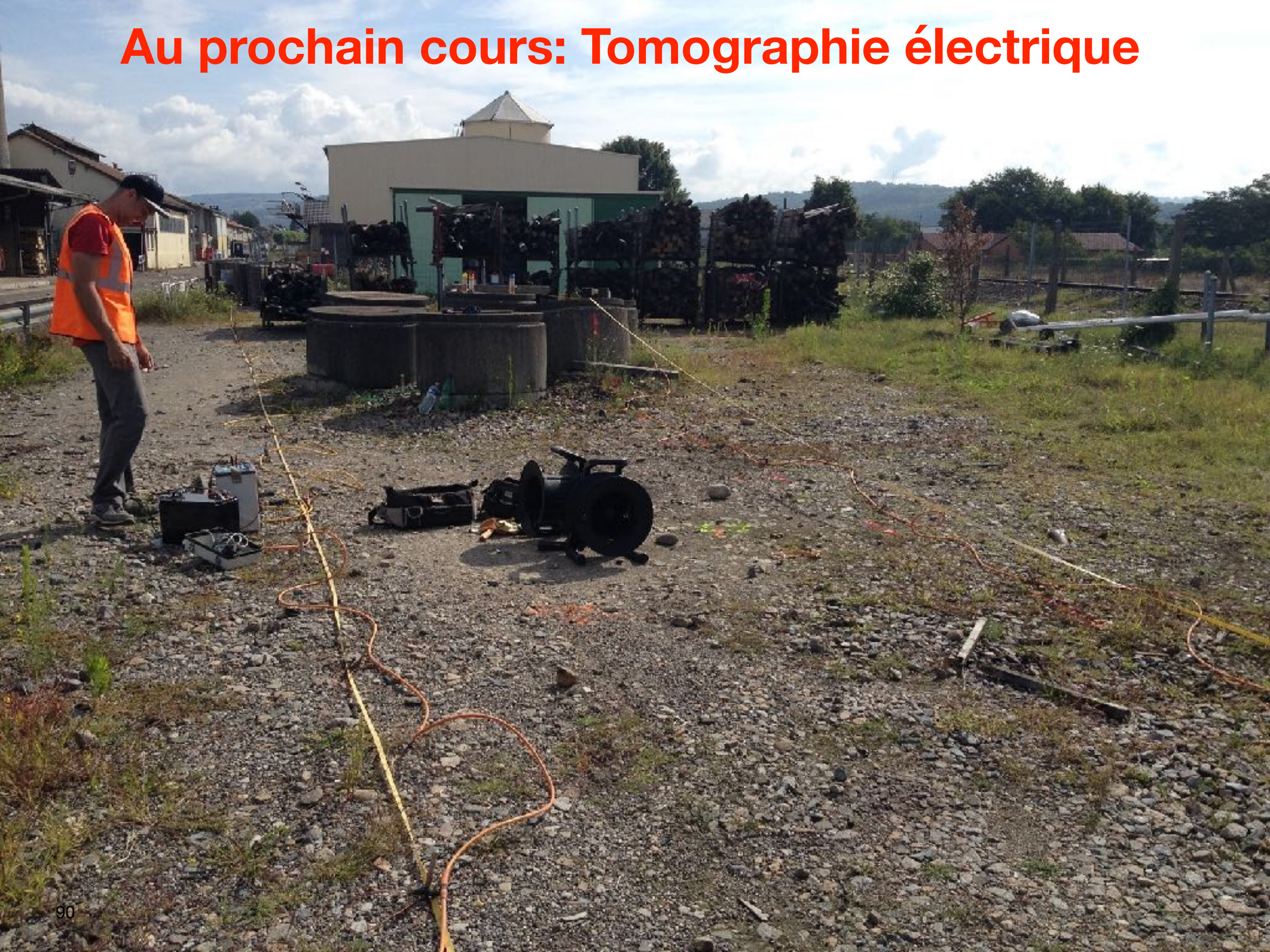
INTERPRÉTATION (B)

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 au 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