

# DEVOIR N° 14

Pour le vendredi 24 janvier

## Gravure ionique réactive

CCP

### Étude d'un dispositif de gravure ionique réactive

La gravure ionique réactive est un procédé couramment utilisé dans l'industrie micro-électronique pour réaliser l'attaque de couches minces de métaux et d'oxydes. L'intérêt du procédé est sa forte anisotropie qui permet de réaliser des gravures présentant des flancs très verticaux. Pour réaliser une telle gravure on utilise un faisceau d'ions de densité importante mais de vitesse modérée qui vient bombarder la surface du substrat que l'on désire graver. Des réactions physico-chimiques complexes prennent alors naissance et conduisent à la gravure anisotrope recherchée. Dans un tel processus, il est utile de pouvoir disposer d'un système permettant d'accélérer des ions en nombre important, puis de les ralentir afin de contrôler leur action sur le substrat. On utilise pour cela un système à trois grilles (figure 1) qui permet de contrôler séparément l'intensité du courant ionique et l'énergie cinétique des ions.

On donne  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ ,  $\mathcal{N}_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

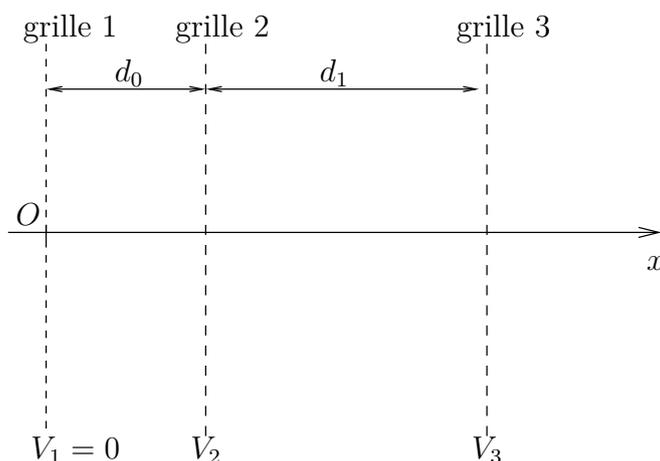


FIGURE 1 – Dispositif de gravure ionique réactive

Les trois grilles métalliques de la figure (1) sont assimilées à des plans métalliques infinis placés dans le vide, portés aux potentiels  $V_1 = 0$ ,  $V_2$  et  $V_3$  avec  $0 > V_3 > V_2$ . Elles créent pour  $x \in [0, d_0 + d_1]$  un champ électrostatique  $\vec{E}(x)$ . En dehors de cette région, le champ électrique est nul. Tout effet de bord est négligé. On étudie pour l'instant le mouvement d'une charge électrique unique entre les grilles.

1. Déterminer le potentiel électrostatique  $V(x)$  dans le dispositif et représenter ses variations.
2. Faire de même pour  $\vec{E}(x)$ .
3. Déterminer les densités surfaciques de charges  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  portées par chacune des trois grilles.
4. On place un ion positif de masse  $m$  et de charge  $e$  dans le dispositif, sans vitesse au niveau de la grille 1. Par une méthode énergétique, donner la vitesse  $v(x)$  de l'ion et montrer qu'il subit une phase d'accélération et une phase de décélération durant le trajet entre la grille 1 et la grille 3. Tracer l'allure de  $v(x)$ . Préciser la valeur de la vitesse maximale de l'ion et la position pour laquelle elle est atteinte.

### Fonctionnement du bâti en présence d'un flux d'ions

Le dispositif met en œuvre un flux constitué de nombreux ions. On appellera  $\rho(x)$  la densité de charge volumique due à ce flux ionique. Le système est étudié en régime permanent. Le but de cette partie est d'établir la relation entre la densité de courant ionique  $J(x)$  et la ddp appliquée entre les grilles 1 et 2. Le processus d'accélération a lieu dans le vide (de permittivité  $\epsilon_0$ ). La différence essentielle avec l'étude des questions précédentes est qu'il règne maintenant entre les grilles une densité de charge  $\rho(x)$  due à la présence des ions.

5. Rappeler les équations locales de l'électrostatique. Démontrer alors l'équation de Poisson qui lie entre les grilles  $V(x)$  à  $\rho(x)$ .
6. Quelle est l'énergie cinétique des ions en un point  $x$  compris entre les deux électrodes ? En déduire une condition sur  $\frac{dV}{dx}$  à l'origine sachant que la vitesse des ions en  $x = 0$  est nulle.
7. Quel lien existe-t-il entre la densité de courant ionique  $J(x)$  et la vitesse des ions  $v(x)$  ?
8. En utilisant la conservation de la charge, prouver que la densité de courant  $J(x)$  est indépendante de  $x$ . On notera désormais  $J_0$  sa valeur.
9. En utilisant les résultats des questions précédentes, établir une équation différentielle du second ordre pour  $V(x)$ . L'intégrer une première fois après multiplication par  $\frac{dV}{dx}$ , en tenant compte du résultat de la question 6. Par une seconde intégration, trouver enfin  $V(x)$  pour  $x \in [0, d_0]$ . On admettra que  $V$  est décroissant dans ce domaine.
10. Montrer à partir des résultats précédents que le courant ionique peut effectivement être contrôlé par la ddp appliquée entre les deux premières grilles. Donner l'allure de la courbe  $J_0(-V_2)$ , pour des ions argon de masse molaire  $40 \text{ g.mol}^{-1}$  et des électrodes espacées de  $d_0 = 10 \text{ cm}$ . On rappelle que le potentiel  $V_2$  est négatif. On prendra pour le graphe  $-V_2 \in [0, 1]$  Volt.
11. Expérimentalement, on met en évidence un minimum de vitesse des cations entre la grille 2 et la grille 3. Ce phénomène avait-il lieu dans la question 4 (cas d'une seule charge) ? Expliquer qualitativement le phénomène physique qui induit ce minimum de vitesse des ions entre les grilles dans le cas d'un flux de charge  $J(x)$ .

# Techniques d'analyse du sol

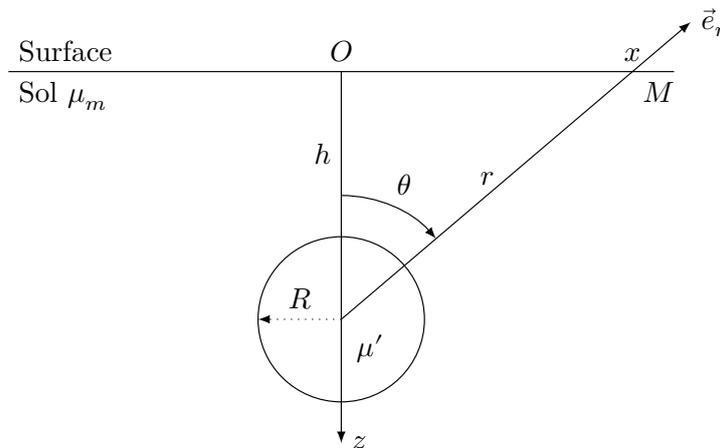
Centrale-Supélec

On rappelle la valeur de la constante de gravitation universelle :  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  SI. Dans ce problème, le champ de gravité est exprimé en gal,  $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ .

## I. Analyse du sol par gravimétrie

La gravimétrie est l'étude des variations du champ de pesanteur dans l'espace et dans le temps. Elle permet de déterminer la répartition des masses au sein de la Terre et d'avoir ainsi accès à sa structure. Par exemple, la gravimétrie est utilisée pour déterminer la forme de la Terre (géodésie), pour détecter des cavités (génie civil ou archéologie), pour suivre les stockages d'eau (hydrologie continentale).

Dans cette partie, nous allons déterminer, par une analyse gravimétrique, les dimensions d'un corps sphérique enterré dans un sol de masse volumique moyenne  $\mu_m$  (figure 7).



**Figure 7**

**Q 28.** En utilisant le théorème de Gauss gravitationnel, déterminer l'expression du champ de pesanteur en un point  $M$  situé à l'extérieur d'une sphère homogène de rayon  $R$  et de masse volumique  $\mu' = \mu_m + \Delta\mu$  en fonction de  $\mu_m$ ,  $\Delta\mu$ ,  $G$ ,  $R$ ,  $r$ , distance de  $M$  au centre de la sphère, et du vecteur unitaire  $\vec{e}_r$  (figure 7).

Le corps sphérique se trouve à une profondeur  $h$  dans le sol. Loin de la sphère (pour  $r \gg R$ ), le champ de pesanteur est vertical selon  $Oz$  de valeur  $g_0$ .

**Q 29.** Déterminer  $g_{Bz}$ , la composante verticale du champ de pesanteur créé par la boule au point  $M$  situé à une distance  $x$  de la verticale.

**Q 30.** Montrer que l'anomalie gravimétrique  $\Delta g = g_z - g_0$ , qui fait varier le champ de pesanteur apparent en un lieu, est identique au champ de pesanteur  $g'_z$  créé par une sphère de masse volumique  $\Delta\mu$ .

**Q 31.** Montrer que l'anomalie gravimétrique s'écrit

$$\Delta g = \frac{4\pi G \Delta\mu R^3 h}{3(x^2 + h^2)^{3/2}}$$

**Q 32.** Tracer l'allure de la courbe  $\Delta g$  en fonction de  $x$  pour des sphères identiques enterrées à deux profondeurs différentes  $h_1$  et  $h_2 > h_1$ .

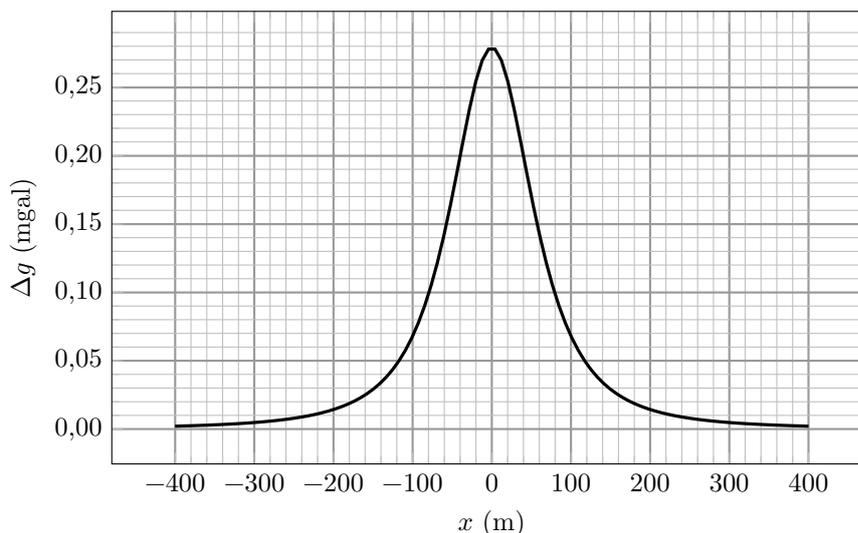
**Q 33.** Quel est le lien entre la profondeur  $h$  et la largeur à mi-hauteur de la courbe ? Que vaut l'anomalie gravimétrique maximale ?

**Q 34.** Déterminer, à l'aide la courbe de la figure 8, la profondeur  $h$  et le rayon  $R$  de la sphère enterrée.

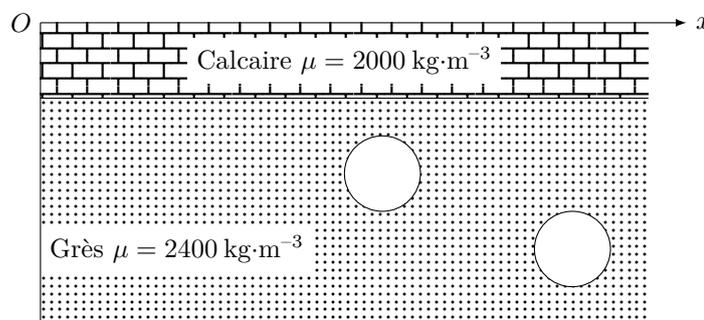
**Q 35.** Comment rendre indétectable par analyse gravimétrique de l'or stocké dans une grotte sphérique ?

**Q 36.** La grotte de 1 m de rayon est à 4 m de profondeur. Quelle masse d'or est-il possible de cacher par cette méthode ? Pour information, la masse volumique de l'or est  $\rho_{\text{or}} = 19\,300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

**Q 37.** Une étude archéologique préalable prévoit la disposition de deux grottes sphériques de même dimension (figure 9). Tracer l'allure de la courbe de l'anomalie gravimétrique attendue  $\Delta g = f(x)$ .



**Figure 8** Anomalie gravimétrique  $\Delta g$  pour une sphère enterrée avec  $\Delta\mu = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$



**Figure 9**

## II. Prospection électrique

La prospection électrique est l'une des plus anciennes méthodes de prospection géophysique. Elle repose sur l'interprétation de la résistance électrique du terrain. Ces mesures doivent être réalisées *in situ*, cette mesure ne pouvant être réalisée en laboratoire sur un échantillon sorti de son environnement. Elles sont particulièrement adaptées à l'étude des faibles profondeurs.

### V.A – Sol homogène

**Q 38.** Exprimer la résistance électrique d'un parallélépipède homogène de longueur  $L$ , de section  $A$  et de résistivité  $\rho = 1/\sigma$  où  $\sigma$  est la conductivité électrique du matériau (figure 11).

Pour déterminer la résistance électrique d'un terrain on impose la circulation d'un courant continu d'intensité  $I$  à la surface du sol qui se répartit en profondeur. Cette opération est réalisée grâce à des électrodes que l'on plante dans le sol aux points  $A$  et  $B$  (figure 12). La tension est mesurée à l'aide d'un voltmètre entre les points  $M$  et  $N$ .

**Q 39.** Dans la pratique on utilise un courant alternatif très basse fréquence. Pour quelle raison ?

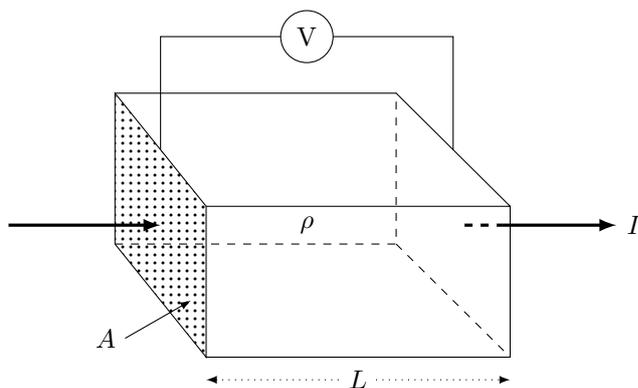


Figure 11

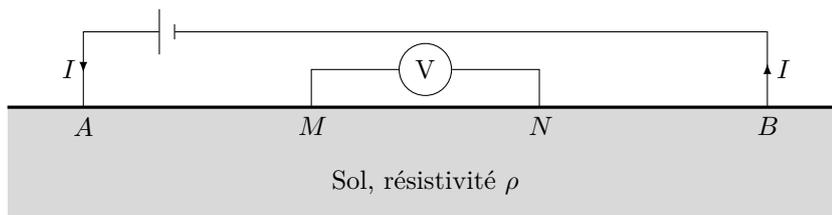


Figure 12

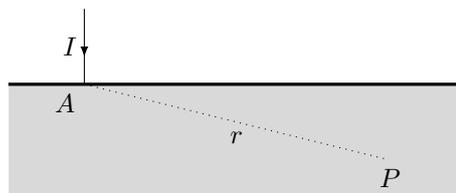


Figure 13

**Q 40.** Considérons seulement l'électrode placée en  $A$  (figure 13). On note  $\vec{j}(r)$  le vecteur densité volumique de courant au point  $P$ . La terre est considérée comme homogène. Quelle est la forme des lignes de courant dans la terre ? Donner l'expression de  $\vec{j}(r)$  en fonction notamment de l'intensité du courant  $I$  et de  $r$ .

**Q 41.** Exprimer le champ électrique  $\vec{E}(r)$  et le potentiel électrique  $V_A(r)$  au point  $P$  en fonction de  $I$ ,  $r$  et  $\rho$ . On suppose que la valeur du potentiel est nulle à grande distance.

**Q 42.** Dans le cas des deux électrodes (figure 14), exprimer le potentiel électrique  $V$  au point  $P$  en fonction de  $\rho$ ,  $r_A$ ,  $r_B$  et  $I$ . On suppose que la valeur du potentiel est nulle à grande distance. Quelle relation définit les équipotentielles ?

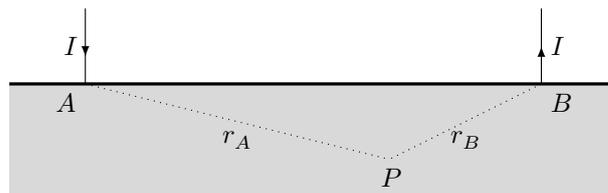


Figure 14

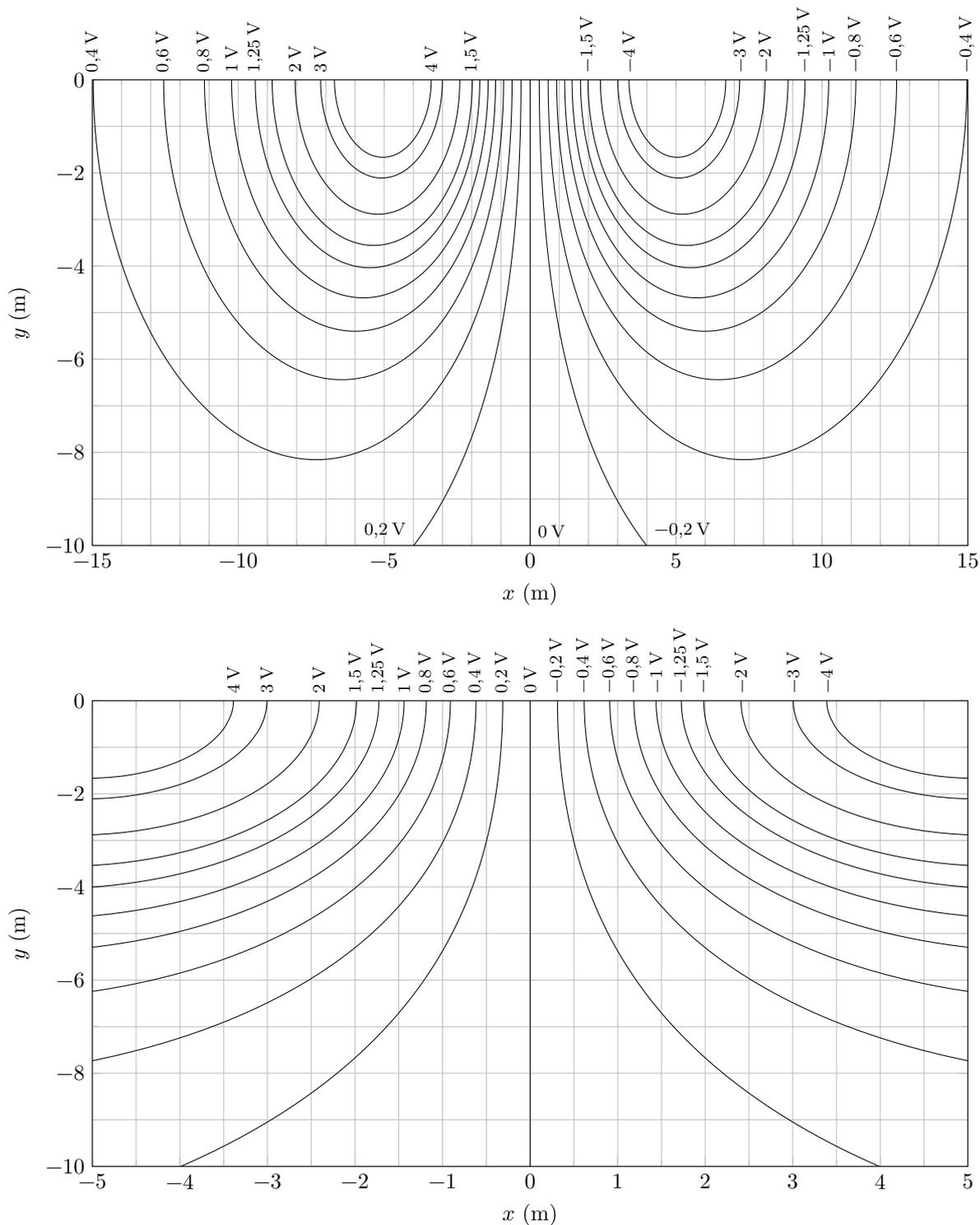
**Q 43.** Exprimer la différence de potentiel  $\Delta V = V_M - V_N$  lue sur le voltmètre (figure 12). Montrer que la résistivité s'écrit  $\rho = \frac{2\pi\Delta V}{If}$  où  $f$  est le facteur géométrique à exprimer en fonction des distances  $MA$ ,  $MB$ ,  $NA$  et  $NB$ .

**Q 44.** Dans le cas de la configuration dite de Wenner (figure 15), les points  $A$ ,  $M$ ,  $N$  et  $B$  sont équidistants espacés de la longueur  $\ell$ . Exprimer le facteur géométrique  $f$ .



Figure 15

**Q 45.** Les courbes de la figure 16 présentent le résultat de la simulation des équipotentielles tracées pour deux électrodes distantes de 10 m situées en  $\pm 5,0$  m plantées dans un terrain de résistivité  $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ . L'intensité du courant est  $I = 0,50$  A. Que vaut le facteur géométrique correspondant dans la configuration de Wenner ? Cette valeur est-elle en accord avec la simulation de la figure 16 ?

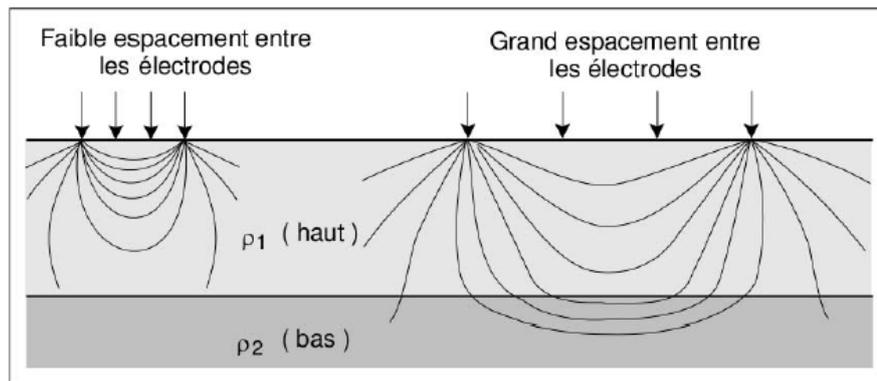


**Figure 16**

**Q 46.** Tracer, en expliquant votre démarche, l'allure des lignes de courant.

### **V.B – Modèle à deux terrains**

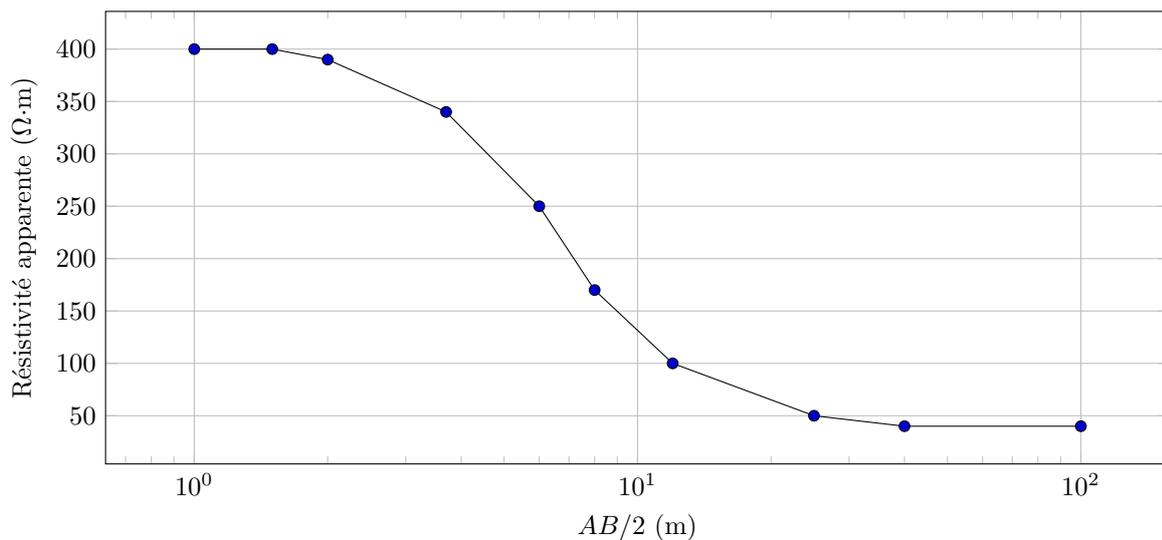
Dans le cas d'un milieu inhomogène on parle de résistivité apparente. Dans le modèle dit à deux terrains, le sol est constitué de deux couches superposées de résistivité  $\rho_1$  et d'épaisseur  $h_1$  pour la couche supérieure et de résistivité  $\rho_2$  et d'épaisseur infinie pour la couche inférieure (figure 17). La résistivité apparente est mesurée pour différents espacements entre électrodes (distance  $AB$  variable).



**Figure 17** Illustration du sondage électrique (d'après Chouteau et Giroux (2006)), allure des lignes de courant

**Q 47.** Vers quelle valeur tend à priori la résistivité apparente lorsque  $AB$  est faible ? lorsque  $AB$  est très grande ?

**Q 48.** La courbe de la figure 18 représente la résistivité apparente  $\rho_a$  mesurée expérimentalement en fonction de la distance  $AB/2$ . Déterminer la résistivité  $\rho_1$  et  $\rho_2$  des terrains ainsi qu'une estimation de la valeur  $h_1$ , épaisseur de la couche supérieure. On s'aidera de l'abaque CH1 donné figure 19 qui représente  $\rho_a/\rho_1$  en fonction de  $AB/2h_1$  en échelle bi-logarithmique. Chaque courbe de cet abaque correspond ainsi à la courbe d'un sondage électrique exécuté sur un sous-sol composé de deux terrains où la première couche a une épaisseur  $h_1$  et une résistivité  $\rho_1$ .



**Figure 18** Mesure deux terrains

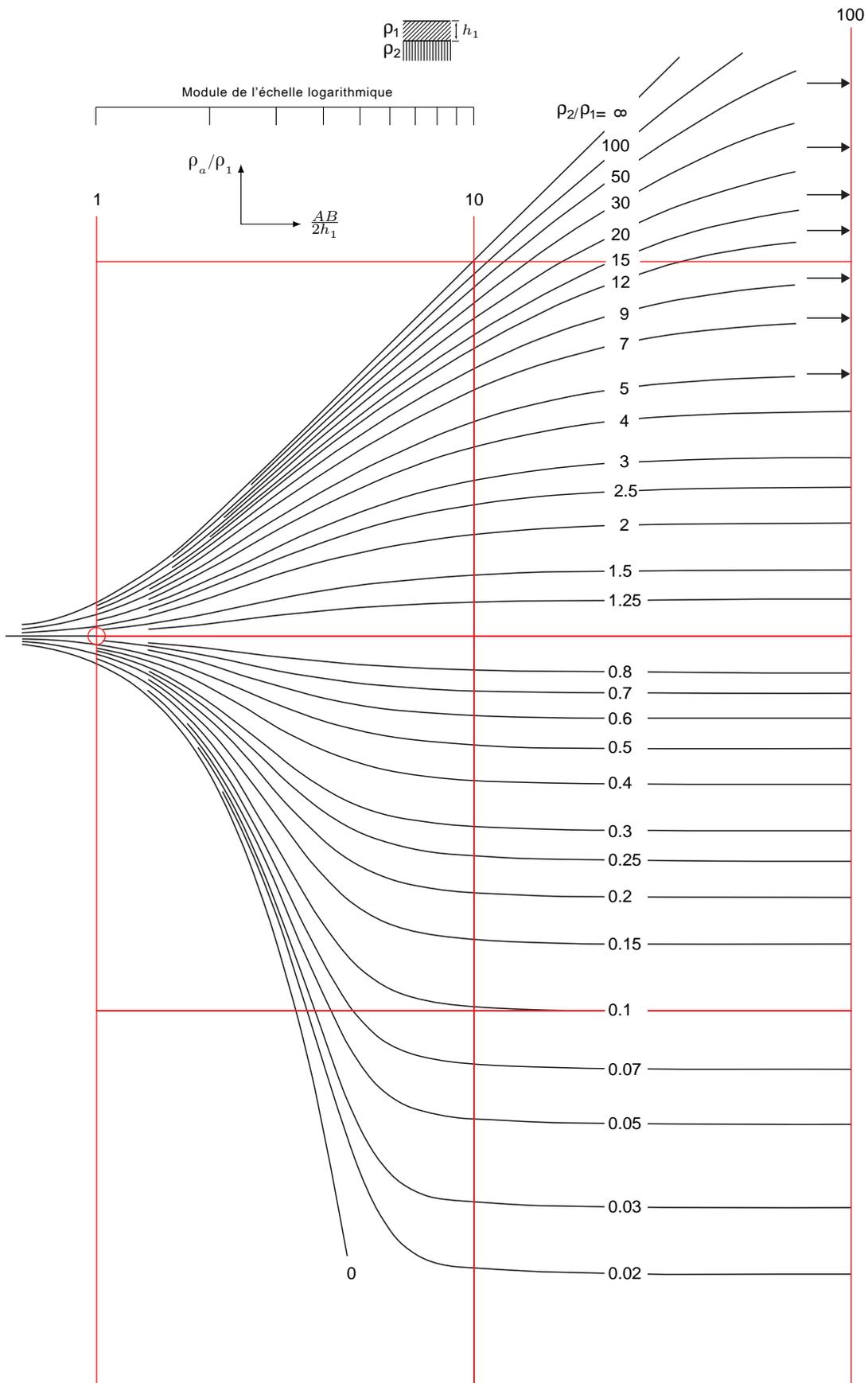


Figure 19 Abaque CH1