

# Électromagnétisme et capteurs

## Travaux Pratiques

Campus de Saint-Jérôme, bâtiment Pierre Rouard, salle 102

Année universitaire 2018-19

### TP 1 Potentiel, conductivité

Les objectifs de ce TP sont :

- la mesure et la cartographie d'un système de surfaces équipotentielles et des lignes de champ électriques en dérivant,
- l'estimation de la conductivité de l'eau du robinet à l'aide de mesures de résistance ohmique.

**Ce TP doit être préparé à l'avance ; un compte-rendu par binôme doit être rendu en fin de séance.**

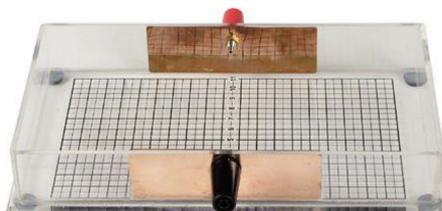
#### 1 Matériel

Le matériel à disposition comprend :

- une alimentation électrique stabilisée, éventuellement modèle ELC AL 841B,
- une cuve rhéographique avec deux électrodes plates,
- un multimètre numérique, éventuellement un des modèles suivants : HIOKI 3200 et HIOKI 3256



ELC AL 841B



HIOKI 3200



HIOKI 3256

- Un récipient gradué à remplir d'eau et à vider au robinet.

#### 2 Manipulations

Remplir la cuve d'eau à mi-hauteur. Brancher les deux électrodes sur les bornes de l'alimentation stabilisée, réglée pour délivrer une tension continue de 12 V ou 15 V.

**Cartographie du potentiel électrique** Connecter la borne négative du voltmètre à l'électrode négative à l'aide d'un fil banane; cette électrode est alors prise pour potentiel de référence. Utiliser un fil sonde sur la borne positive du voltmètre pour tester un point de la cuve; la tension indiquée par le voltmètre vaut alors le potentiel en ce point.

Pour cinq valeurs du potentiel  $V(x,y)$  :

- 2,0 V, 4,0 V, 6,0 V, 8,0 V puis 10,0 V pour une tension d'alimentation de 12 V,
- 2,5 V, 5,0 V, 7,5 V, 10,0 V puis 12,5 V pour une tension d'alimentation de 15 V,

relever dans la cuve les ordonnées  $y$  d'une série de points de mesure pour des abscisses  $x$  tous les centimètres d'un bord de la cuve à l'autre.

Préparer un graphique aux mêmes dimensions que la cuve sur une feuille de papier millimétré. Y tracer les deux électrodes, les points de mesure, et en reliant ces points de mesure les cinq équipotentielles.

Rajouter sur ce graphique, en utilisant de préférence une autre couleur, une série de lignes de champ électriques reliant les deux électrodes, perpendiculaires aux équipotentielles et orientées suivant les potentiels décroissants.

Rechercher les axes de symétrie et d'antisymétrie du potentiel et des lignes de champ. Les relier aux symétries et antisymétries des charges.

**Observations à l'aide d'un conducteur cylindrique** Insérer un conducteur cylindrique creux au centre de la cuve.

- Décrivez comment les équipotentielles sont modifiées à l'extérieur du conducteur.
- Relever le potentiel en différents points sur les surfaces intérieures et extérieures du conducteur, et commenter.
- Décrivez comment varie le potentiel à l'intérieur de la cavité formée par le conducteur creux.

Conclure sur le champ électrostatique dans la cavité, et dans l'espace séparant les électrodes et le conducteur creux.

**Mesures de la conductivité de l'eau du robinet** Vérifier la ddp  $U$  entre les deux électrodes à l'aide du multimètre, réglé en tension continue sur le calibre 20 V. L'incertitude relative sur cette mesure est de  $\frac{\Delta U}{U} = 0,5\%$  (HIOKI 3200 :  $\pm 0,5\%$  rdg  $\pm 1$  dgt).

Brancher en série avec l'alimentation et la cuve le multimètre en intensité continue sur le calibre 20 mA. Pour 3 valeurs du volume d'eau  $\tau$  dans la cuve, mesurer l'intensité continue  $I$  dans le circuit. L'incertitude relative sur cette mesure est de  $\frac{\Delta I}{I} = 1,0\%$  (HIOKI 3200 :  $\pm 1,0\%$  rdg  $\pm 1$  dgt).

Calculer pour chaque valeur de  $\tau$  la résistance  $R$  en ohms, son incertitude relative  $\frac{\Delta R}{R}$  et absolue  $\Delta R$  à partir des formules :

$$R = \frac{U}{I} \quad \frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2} \quad \Delta R = \frac{\Delta R}{R} R$$

Une fois ces mesures terminées, vider la cuve, mesurer les dimensions des électrodes, la hauteur séparant le fond de la cuve des électrodes, et la distance  $\ell$  qui sépare ces électrodes, afin de calculer pour chaque valeur de  $\tau$  l'aire  $S$  de la partie immergée des électrodes. Estimer les incertitudes absolues  $\Delta \ell$  et  $\Delta S$  associées. En déduire les incertitudes relatives  $\frac{\Delta \ell}{\ell}$  et  $\frac{\Delta S}{S}$ .

Calculer pour chaque valeur de  $\tau$  la conductivité  $\gamma$  (S/m) de l'eau, son incertitude relative  $\frac{\Delta \gamma}{\gamma}$  et absolue  $\Delta \gamma$  à l'aide des formules

$$\gamma = \frac{\ell}{RS} \quad \frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \ell}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2} \quad \Delta \gamma = \frac{\Delta \gamma}{\gamma} \gamma$$

Compiler ces résultats dans un tableau.

Commenter ces mesures.

## TP 2 Courant continu et champ magnétique

Le but de ce TP est la mesure et l'étude du champ magnétique créé par différents dispositifs électriques – bobines plates, solénoïdes – alimentés en courant continu.

**Ce TP doit être préparé à l'avance ; un compte-rendu par binôme doit être rendu en fin de séance.**

### 1 Matériel

Le matériel à disposition comprend :

- Une alimentation continue stabilisée en tension et en courant, éventuellement un parmi ces deux modèles :

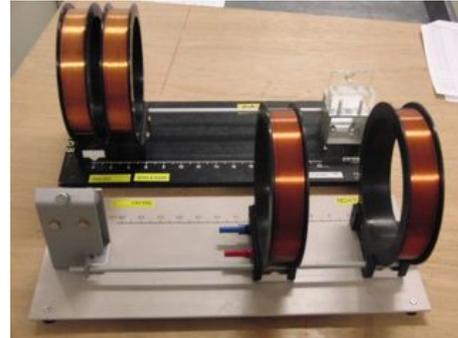


M10-SP-305E



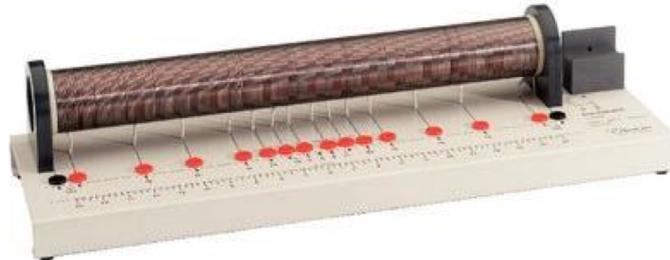
M10-SP-3010E

- Deux bobines plates identiques comportant chacune  $N = 95$  spires de rayon  $r = 65$  mm, et d'écartement variable



Nouveau modèle - épaisseur  $\ell = 30$  mm    Ancien modèle - épaisseur  $\ell = 25$  mm

- Un solénoïde formé de deux enroulements de  $\ell = 400$  mm de long comportant  $N = 200$  spires de rayon  $r = 25$  mm. On utilisera l'enroulement dont les bornes sont noires.



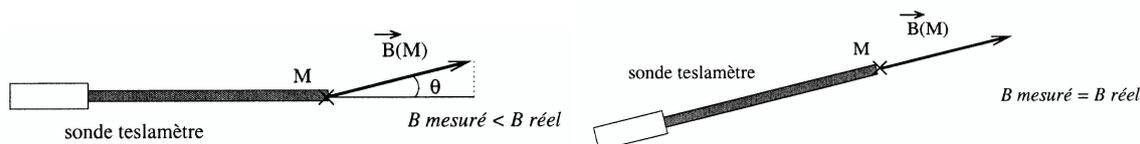
- Une sonde à effet Hall et son boîtier, ou teslamètre.



- Un multimètre.
- Une boussole.

N'oubliez pas d'éteindre tous les appareils en fin de mesure : pour de fortes intensités, les matériels chauffent rapidement, et les multimètres à main fonctionnent sur piles.

**Teslamètre** Alimenter le boîtier du teslamètre, et vérifier que'il est réglé sur le calibre 10 mT ; l'incertitude relative sur la mesure est alors de 5%. Le teslamètre indique la valeur algébrique de la projection du champ magnétique suivant l'axe de la sonde au niveau de l'extrémité marron de la sonde.



Le champ magnétique terrestre est de l'ordre de 0,05 mT. Une fois la sonde positionnée, le teslamètre doit indiquer zéro en l'absence de courant ; un petit potentiomètre sur le boîtier permet de régler le zéro du teslamètre, et d'éviter ainsi une erreur systématique.

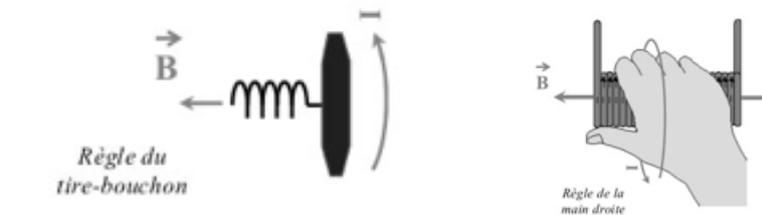
**Alimentation électrique** Les intensités délivrées par l'alimentation sont relativement élevées (quelques ampères). Bien que les tensions utilisées soient faibles, de tels courants peuvent provoquer une élévation de température importante des conducteurs et un endommagement irréversible des appareils. Il est donc nécessaire d'effectuer les mesures du champ magnétique assez rapidement lorsque le courant délivré excède 2 A et de couper l'alimentation dès que les mesures sont finies. **Ne dépasser en aucun cas 4 A.**

Avant de mettre l'alimentation sous tension, régler le potentiomètre de tension (VOLTAGE) au maximum et le potentiomètre d'intensité au minimum (CURRENT). Il est aussi conseillé de remettre l'intensité à zéro avant d'éteindre l'alimentation.

On lit directement la valeur de l'intensité  $I$  courant sur l'affichage de l'alimentation. L'incertitude sur cette intensité est  $\Delta I = 0,1$  A.

## 2 Manipulations

**Étude qualitative** Brancher le solénoïde ou la bobine plate fixe sur l'alimentation et régler l'intensité sur  $I = 2,0$  A. Étudier qualitativement la direction et le sens du champ magnétique en fonction du sens du courant dans les spires à l'aide de la boussole et du teslamètre. Le champ magnétique est produit par les charges électriques en mouvement. C'est le cas notamment lorsqu'un courant circule dans un conducteur. Lorsque le conducteur est enroulé et forme une spire, le sens du champ magnétique produit obéit à la règle du tire-bouchon.



**Étude en intensité** Placer la sonde du teslamètre au centre du solénoïde ou de la bobine plate fixe à l'aide du support prévu à cet effet. Faites varier l'intensité  $I$  entre 0,0 A et 4,0 A par pas de 0,5 A et relever l'amplitude  $B$  du champ magnétique. Faire un tableau, tracer la courbe  $B = f(I)$  et conclure.

Pour une incertitude relative  $\frac{\Delta B}{B} = 5\%$ , calculer l'incertitude absolue  $\Delta B$  pour une intensité de  $I = 1,0$  A.

**Champ au centre** Mesurer pour une intensité de  $I = 2,0$  A l'amplitude  $B_s$  du champ magnétique au centre du solénoïde et celle  $B_b$  du champ au centre d'une bobine plate. Pour une incertitude relative  $\frac{\Delta B_s}{B_s} = \frac{\Delta B_b}{B_b} = 5\%$ , calculer les incertitudes absolues  $\Delta B_s$  et  $\Delta B_b$ .

Pour chacun des deux dispositifs, calculer

$$B_1 = \mu_0 \frac{N}{L} I \quad \Delta B_1 = \mu_0 \frac{N}{L} \Delta I \quad B_2 = \mu_0 \frac{N}{2R} I \quad \Delta B_2 = \mu_0 \frac{N}{2R} \Delta I$$

où  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m est la perméabilité de l'air,  $N$  est le nombre de spires,  $L$  la longueur ou l'épaisseur du dispositif, et comparer les deux valeurs théoriques  $B_1$  et  $B_2$  à la mesure.

**Champ sur l'axe** La sonde étant placée sur son support, mesurer pour une intensité de  $I = 2,0 \text{ A}$  et tracer le champ magnétique  $B = f(x)$  en fonction de la position  $x$  de la sonde sur l'axe des dispositifs suivants :

- une bobine plate,
- les deux bobines plates en configuration de Helmholtz, c'est-à-dire écartée d'une distance égale à leur rayon et alimentées en série de sorte que les deux champs soient dans le même sens.
- le solénoïde long.

Commencer par repérer la zone sur laquelle le champ magnétique n'est pas négligeable, puis faire les relevés en une passe, en espaçant les points d'1 cm ou de 2 cm, suivant la vitesse de variation du champ.

Comparer les champs magnétiques produits par ces trois dispositifs.

## TP 3 Courant alternatif et induction

Les objectifs de ce TP sont :

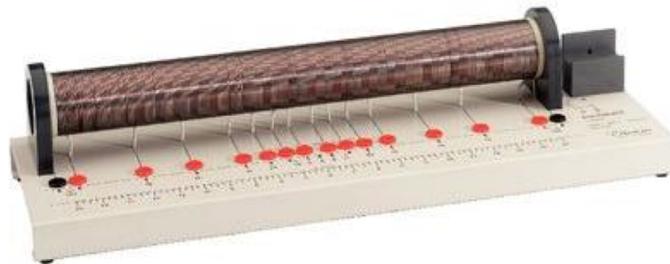
- l'observation des phénomènes d'induction de Neumann et Lorentz,
- la prise en compte de l'induction de Neumann dans les montages d'électricité en régime alternatif sinusoïdal.

**Ce TP doit être préparé à l'avance ; un compte-rendu par binôme doit être rendu en fin de séance.**

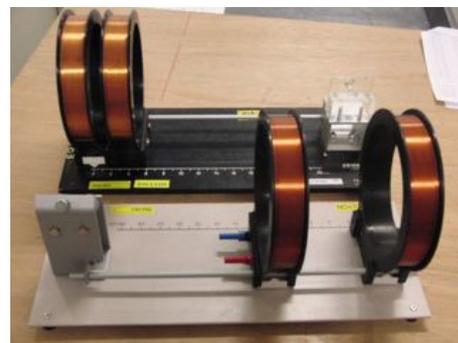
### 1 Matériel

Commencez par identifier les matériels.

- Un aimant droit, une aiguille aimantée sur un axe et une bobine plate.
- Un oscilloscope numérique à deux voies.
- Un solénoïde formé de deux enroulements. L'enroulement dont les bornes sont noires fait  $\ell = 400 \text{ mm}$  de long et compte  $N = 200$  spires de rayon  $r = 25 \text{ mm}$  et de résistance  $R_i = 1 \Omega$ . L'autre enroulement présente différents connecteurs (bornes rouges) permettant de faire varier le nombre de spires dans lesquelles circule le courant.



- Une plaquette à deux bobines plates identiques comportant chacune  $N = 95$  spires de rayon  $r = 65 \text{ mm}$ , et d'écartement variable



Nouveau modèle - épaisseur  $\ell = 30 \text{ mm}$     Ancien modèle - épaisseur  $\ell = 25 \text{ mm}$

- Un générateur de tensions alternatives basse fréquence (GBF) modèle FI 4320.
- Une boîte de résistances.

## 2 Manipulations

**Observation des inductions de Neumann et Lorentz** Brancher la bobine sur une voie de l'oscilloscope, réglé en mode *roll* ou *déroule*.

- Bobine fixe, observer l'induction de Neumann en déplaçant l'aimant puis l'aiguille au voisinage de la bobine.
- Aimant fixe, observer l'induction de Lorentz en déplaçant la bobine au voisinage de l'aimant.

**Observation de la loi de Faraday** On utilise ensuite la plaquette à deux bobines plates. Brancher en série le GBF, la bobine fixe et la boîte de résistance, en plaçant l'une des bornes de la boîte de résistance sur la masse du GBF. Brancher la voie CH1 de l'oscilloscope aux bornes de la boîte de résistance, de telle sorte que les masses du GBF et de l'oscilloscope soient reliées.

Régler la boîte de résistances sur  $R_e = 50 \Omega$  et le GBF en tension alternative triangulaire à la fréquence  $f = 1 \text{ kHz}$  pour que la tension  $u_1$  à l'oscilloscope d'amplitude 7 Vcc. Remarquer que cette tension, image  $u_1 = R_e i_1$  de l'intensité dans circuit inducteur, est triangulaire.

Brancher la voie CH2 de l'oscilloscope aux bornes de la bobine mobile, placée contre la bobine fixe.

Faire un schéma électrique du montage.

Observer et interpréter la forme de la tension  $u_2$ . Eloigner la bobine mobile de la bobine fixe, observer les changements sur la tension  $u_2$  et déduire l'influence de la distance entre les bobines sur le coefficient de mutuelle inductance  $M$ .

**Mesure 1 du coefficient de mutuelle induction** Sans modifier le montage électrique, passer le GBF en tension alternative sinusoïdale, avec une tension efficace  $U_1 = 3.5 \text{ Vrms}$ . Que vaut alors l'intensité efficace  $I_1 = U_1/R_e$  dans le circuit inducteur? Mesurer la tension efficace  $U_2$  pour les deux bobines collées, puis pour toutes les valeurs entières de la distance  $x$  (cm) entre les deux bobines. Calculer le coefficient de mutuelle inductance :

$$M = \frac{U_2}{2\pi f I_1}$$

et tracer  $M$  en fonction de  $x$ , puis  $\log(M/100 \mu\text{H})$  en fonction de  $\log(x/1 \text{ cm})$ .

**Mesure 2 du coefficient de mutuelle induction** On remplace dans le montage précédent la plaquette à deux bobines plates par le solénoïde à double enroulement. L'enroulement aux bornes noires du solénoïde, dit inducteur ou enroulement primaire, est branché sur le GBF, tandis que la tension aux bornes de l'enroulement aux bornes rouges du solénoïde, dit induit ou enroulement secondaire, est observée à l'oscilloscope.

Pour  $U_1 = 3.5 \text{ Vrms}$ , mesurer l'amplitude  $U_2$  de la tension au secondaire pour les nombres de spires au secondaire suivants :  $N_2 = 200, 100, 60, 40, 20, 10$ . Calculer le coefficient de mutuelle inductance :

$$M = \frac{U_2}{2\pi f I_1}$$

et le tracer en fonction de  $N_2$ . Comparer la valeur expérimentale  $M$  du coefficient de mutuelle induction à l'expression

$$M' = \mu_0 \frac{N_1}{\ell} N_2 \pi r^2$$

obtenue dans l'approximation du solénoïde infini.

**Mesure du coefficient d'induction propre** Brancher maintenant la voie CH2 de l'oscilloscope aux bornes du GBF et régler la résistance externe sur  $R_e = 10 \Omega$ . Pour chacune des fréquences  $f = 1 \text{ kHz}$ ,  $f = 5 \text{ kHz}$  et  $f = 20 \text{ kHz}$ , régler le GBF sur une tension alternative sinusoïdale d'une valeur efficace de quelques volts, et mesurer les valeurs efficaces  $U_1$  et  $U_2$  des deux tensions et leur déphasage  $\phi$ . Calculer  $I_1 = U_1/R_e$ .

Calculer à partir des caractéristiques du solénoïde l'inductance propre  $L = \mu_0 N_1^2 \pi r^2 / \ell$  de l'enroulement noir, et comparer :

- d'une part  $U_2/I_1$  et  $\sqrt{(R_e + R_i)^2 + (2\pi f L)^2}$  et
- d'autre part  $\tan \phi$  et  $\frac{2\pi f L_1}{R_e + R_i}$ .

## TP 4 Câble coaxial

Les objectifs de ce TP sont :

- l'observation des phénomènes ondulatoires en électricité,
- la caractérisation d'une ligne de transmission.

**Ce TP doit être préparé à l'avance ; un compte-rendu par binôme doit être rendu en fin de séance.**

### 1 Matériel

- Une bobine de fil coaxial de longueur  $\mathcal{L}$  (m).
- Un générateur basse-fréquence (GBF).
- Un oscilloscope numérique à deux voies.
- Un potentiomètre 0 – 400  $\Omega$ .

### 2 Manipulations

La bobine de fil coaxial est de longueur  $\mathcal{L}$  (m) suffisante pour rendre mesurables la durée de propagation et l'amortissement de certains signaux électriques dans le câble. Brancher la sortie 50  $\Omega$  du GBF à l'entrée A du câble. Les signaux à l'entrée A et en sortie B du câble sont affichés sur les deux voies de l'oscilloscope. On commence par régler le GBF pour qu'il délivre à une fréquence entre 220 et 250 kHz et un signal rectangulaire avec un rapport cyclique minimal. Noter la fréquence  $f$  de travail. Le potentiomètre est placé en bout de ligne.

**Mesure de l'impédance caractéristique de la ligne** Pour différents réglages du potentiomètre, observer les signaux en entrée A et en sortie B. Distinguer en A le signal émis par le GBF du signal réfléchi en bout de ligne. Observer la déformation du signal. Observer que le coefficient de réflexion est positif ou négatif suivant le réglage du potentiomètre.

Pour une impédance  $Z_L$  placée en bout de ligne  $x = \mathcal{L}$ , le coefficient de réflexion  $r$  vaut

$$r = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \qquad Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (1)$$

où  $Z_C$  ( $\Omega$ ) est l'impédance caractéristique de la ligne,  $L$  (H/m) son impédance linéique et  $C$  (F/m) sa capacité linéique.

Régler le potentiomètre pour annuler le signal réfléchi, relever alors à l'ohmmètre la résistance du potentiomètre, et en déduire la mesure de  $Z_C$  l'impédance caractéristique de la ligne. Comparer cette impédance caractéristique à l'impédance de sortie du GBF.

**Mesure de la vitesse de propagation** Adapter l'impédance en bout de ligne à l'impédance caractéristique de la ligne ( $Z_S = Z_C$ ) et mesurer le temps de propagation  $T_1$  du signal d'un bout à l'autre du câble.

Passer la sortie en coupe-circuit ( $Z_S = \infty$ ) puis en court-circuit ( $Z_S = 0$ ) et mesurer les temps  $2T_2$  et  $2T_3$  mis par le signal pour faire l'aller-retour dans le câble.

Calculer la moyenne et l'écart-type de ces trois temps :

$$T = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \qquad \Delta T = \sqrt{\frac{T_1^2 + T_2^2 + T_3^2}{3} - T^2}$$

On utilisera l'écart-type comme incertitude pour le temps  $T$  de propagation sur la longueur  $\mathcal{L}$  de la ligne.

En déduire :

- la vitesse de propagation  $v$  et son incertitude  $\Delta v$ , puis
- l'indice de l'isolant  $n = c/v$ , où  $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = 3 \cdot 10^8$  m/s est la vitesse de la lumière dans le vide, et son incertitude  $\Delta n$ , et enfin
- la constante diélectrique de l'isolant  $\varepsilon_r = n^2$  et son incertitude  $\Delta\varepsilon_r$ .

Calculer ce que serait la longueur d'onde  $\lambda$  dans la ligne d'une onde sinusoïdale à la fréquence de travail  $f$ .

**Mesure de l'amortissement du signal** Le GBF étant maintenant réglé pour délivrer une tension sinusoïdal, et la sortie de la ligne étant chargée avec  $Z_S = Z_C$ , mesurer pour les fréquences multiples de 50 kHz jusqu'à 800 kHz puis tous les 100 kHz les tensions efficaces  $U_A$  en entrée et  $U_B$  en sortie, et le déphasage  $\phi$  entre les deux tensions. Calculer pour chaque fréquence l'indice  $n$  et coefficient d'amortissement  $\alpha$  ( $\text{m}^{-1}$ )

$$n = \frac{c}{2\pi\mathcal{L}} \frac{\phi}{f} \qquad \alpha = \frac{1}{\mathcal{L}} \ln \frac{U_A}{U_B} \qquad A = 100 \frac{20\alpha}{\ln 10}$$

et en déduire l'atténuation  $A$  en dB/hm.

Tracer  $n$  et  $A$  en fonction de la fréquence  $f$ . Comparer l'indice  $n(f)$  à celui trouvé au paragraphe précédent.