

TP 10E – Ondes mécanique et électromagnétique

Corde de Melde, micro-onde et câble coaxial

Problématiques :

Avec le matériel du laboratoire,

- comment mettre en évidence l'existence d'ondes mécanique et électromagnétiques **stationnaires** ?
- comment analyser la **polarisation** d'une onde électromagnétique **progressive** dans le domaine des micro-ondes ?
- comment mettre en évidence l'analogie entre les différentes situations étudiées ?

Compétences expérimentales au programme :

Propagation

Mode d'onde stationnaire

OPPM polarisée rectilignement

Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique, dans le domaine des ondes centimétriques.

Reconnaître une onde polarisée rectilignement.

Rotation TP10 :

	05-mars	19-mars	26-mars
Térence - Charles	E	F	D
Bastien - Lubin -Jules	E	F	D
Zinedine - Laila	E	F	D
Salahaddin - Baptiste	F	D	E
Pauline - Nolann	F	D	E
Noah - Robin	F	D	E
Alexis - Ethan	D	E	F
Mathilde - Laura	D	E	F
Mathis - Adrien	D	E	F

	05-mars	19-mars	26-mars
Gaspard - Timothée	E	F	D
Natoye - Antoine	E	F	D
David - Eliott	E	F	D
Elodie - Margot	F	D	E
Adelin - Nathan C.	F	D	E
Amine - Camille	F	D	E
Charlélle - Nathan L.	D	E	F
Maël - Robin	D	E	F
Armand - Tristan	D	E	F

Organisation de la séance TP10E :

	Gpe i	Gpe j	Gpe k
14h-14h35 / 16h-16h35	I. Onde mécanique	III. Câble coaxial	II. Micro-onde
14h35-15h10 / 16h35-17h10	II. Micro-onde	I. Onde mécanique	III. Câble coaxial
15h10-15h45 / 17h10-17h45	III. Câble coaxial	II. Micro-onde	I. Onde mécanique

A faire pour la séance de TP :

Lire entièrement le sujet et répondre aux questions ✍.



Même si les micro-ondes utilisées dans la 2^e partie ne sont pas très intenses :

- **on ne regardera pas dans le cornet émetteur E ;**
- **le cornet émetteur E ne restera pas pointé en direction d'une personne pendant un long moment.**

1^e partie. Onde stationnaire mécanique – Corde de Melde

Objectif :

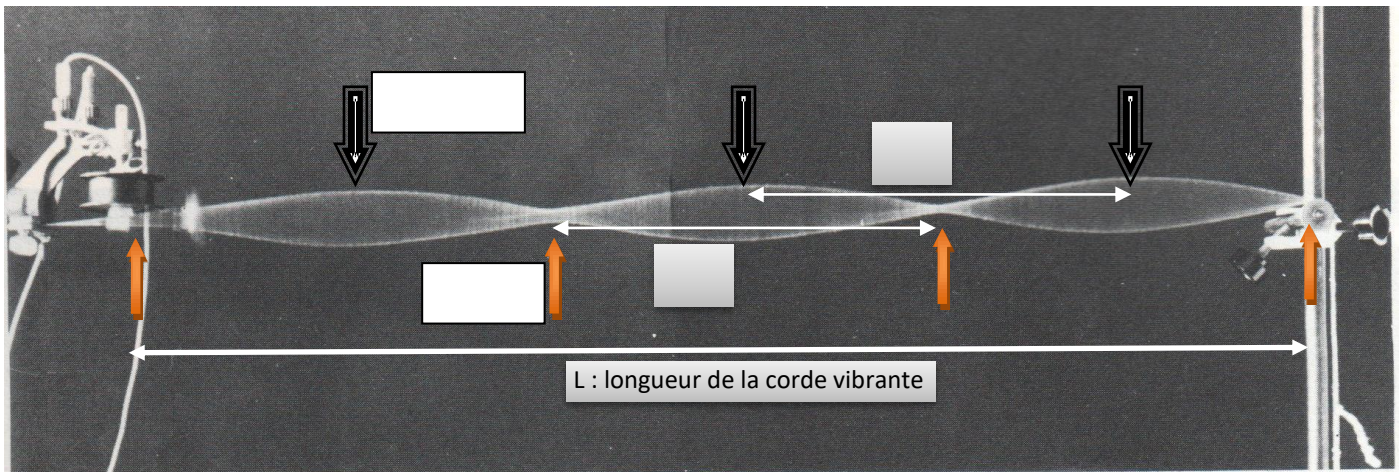
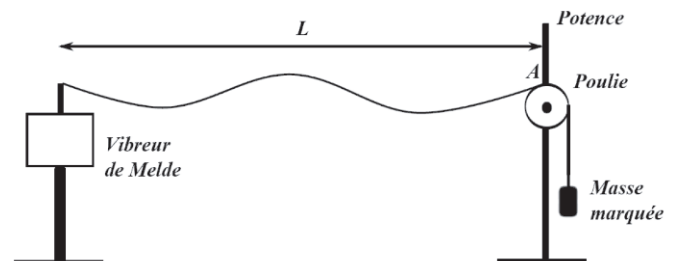
En étudiant les **modes d'ondes stationnaires**, **déterminer** expérimentalement la **célérité** de l'**onde mécanique** perturbant une **corde** horizontale et en déduire la **masse linéique** de la **corde**.

1) Principe de fonctionnement de la corde de Melde

Un vibreur crée une perturbation sinusoïdale, dont on peut faire **varier la fréquence**, à l'une des extrémités de la corde. L'autre extrémité est reliée à une masse afin de tendre la corde.

Lorsqu'on fait varier la fréquence, la corde vibre en général de manière désordonnée avec une faible amplitude.

Pour **certaines valeurs de fréquences**, la corde vibre avec une forte amplitude : c'est le phénomène de **résonance**. On voit alors apparaître des **modes d'ondes stationnaires**.



2) Résultats théoriques

- ✎ ➡ 1. Légender la photo ci-dessus en utilisant le vocabulaire et les propriétés des ondes stationnaires. A quel mode de vibration correspond cette photo ?
- ✎ ➡ 2. Rappeler la relation entre la fréquence f_n du mode propre n , la longueur L de la corde vibrante et la célérité c des ondes mécaniques.
- ✎ ➡ 3. La célérité des ondes mécaniques se propageant sur la corde dépend de la tension T de la corde et de sa masse linéique μ . Par analyse dimensionnelle, exprimer la célérité c en fonction de ces deux grandeurs, on admettra que la constante multiplicative adimensionnée vaut 1.

3) Manipulations

- ✎ ➡ Réaliser le montage et rechercher les premiers modes propres de vibration.
- ➡ 4. Noter les fréquences des 1^{ers} modes propres. En déduire la célérité des ondes mécaniques sur cette corde.
- ➡ 5. Déterminer la masse linéique de la corde.

2^e partie. Micro-onde – Ondes progressives et stationnaires

Objectifs :

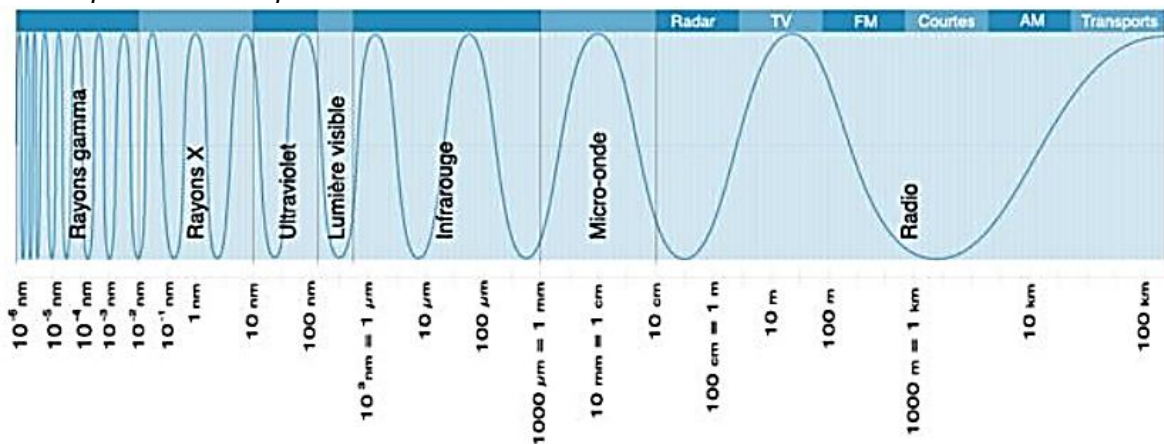
- Caractériser la propagation et la réflexion des micro-ondes.
- A l'aide d'« objets » conducteurs, mettre en évidence l'existence d'ondes électromagnétiques stationnaires et analyser la polarisation d'une onde électromagnétique dans le domaine centimétrique : direction de polarisation d'une onde polarisée rectilignement.
- En étudiant les modes d'ondes stationnaires, déterminer expérimentalement la fréquence de l'onde centimétrique.

1) Spectre électromagnétique – Ondes hyperfréquences / Micro-ondes

Le domaine des ondes hyperfréquences, encore appelées micro-ondes*, correspond à une certaine partie du spectre des ondes électromagnétiques, celle des ondes subméttriques jusqu'aux ondes millimétriques, i.e. $f \in [300 \text{ MHz}, 300 \text{ GHz}]$ ou $\lambda \in [1 \text{ mm}, 1 \text{ m}]$.

Elles sont donc comprises entre l'infrarouge et les ondes radio.

* Le terme « micro-onde » provient du fait que ces ondes ont une longueur d'onde plus courte que celle des ondes utilisées par les radars pendant la Seconde Guerre mondiale.



2) Présentation du matériel

On étudie ici une onde hyperfréquence et plus précisément une onde centimétrique i.e. que sa longueur d'onde est de l'ordre de 1 cm.

✋ Connecter le cornet « transmitter » / émetteur E à la borne « sender » de l'unité de contrôle. E permet la propagation dans l'air de l'onde électromagnétique.

Connecter le cornet* « receiver » / récepteur R à la borne « receiver » de l'unité de contrôle. R permet de détecter cette onde en fournissant une tension proportionnelle au carré du champ électrique.

Brancher un voltmètre aux bornes « voltmeter » de l'unité de contrôle.

Choisir « 0 » pour « Modulator » et niveau « amplification » moyen.

* Pour l'expérience du § 5, on utilisera une antenne réceptrice à la place du cornet récepteur.



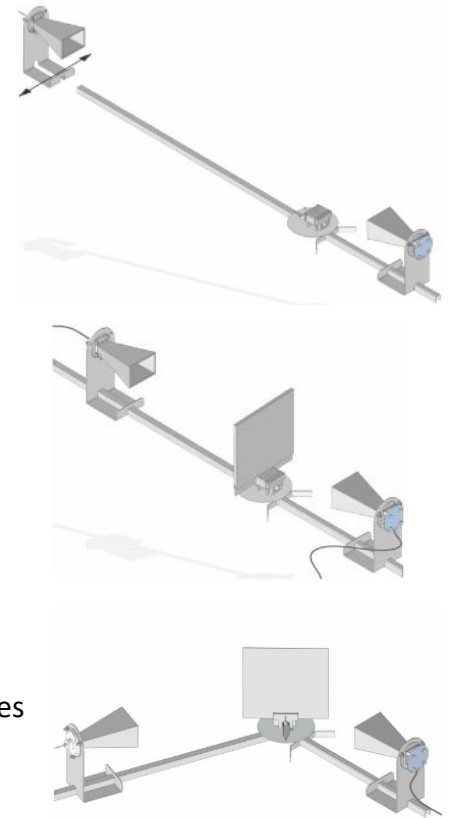
Placer E et R face à face et vérifier que la tension mesurée est non nulle (proche de 10 V).

3) Propagation de l'onde dans différents milieux

✎ Placer E sur le banc et R face à E en dehors du banc. Déplacer R à l'extérieur du banc, perpendiculairement à celui-ci. Vérifier que la tension est maximale lorsque R est en face de E.

✎ Placer une plaque en bois dans le porte-plaque entre E et R. Faire de même avec la plaque en métal.

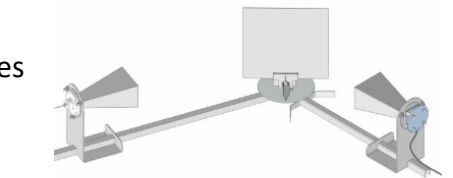
➡ 6. Interpréter vos observations.



4) Loi de la réflexion

✎ A l'aide du pied articulé, vérifier la loi de la réflexion (pour des ondes EM visibles, on parlerait de la loi de Descartes pour la réflexion).

➡ 7. Préciser la nature de la plaque utilisée.

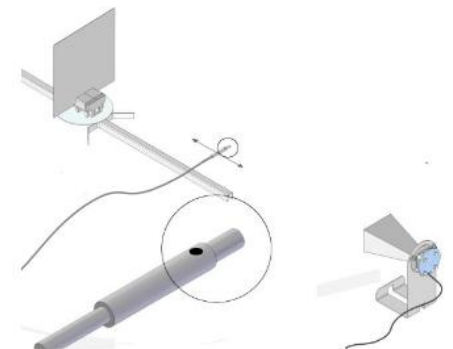


5) Onde stationnaire – Détermination de la fréquence de l'onde

✎ Placer une plaque en métal dans le porte-plaque à 40 cm en face de E et choisir un niveau « amplification » élevé. Déplacer l'antenne réceptrice (la marque sur la pointe de l'antenne doit être placée en haut) entre E et la plaque.

➡ 8. Notez vos observations et interprétez les en termes de réflexion et d'onde stationnaire.

➡ 9. Déterminer la fréquence de l'onde électromagnétique émise. Analyser le résultat.



6) Analyse de la polarisation de l'onde

✎ Disposer les cornets E et R face à face.

➡ 10. Noter la tension obtenue.

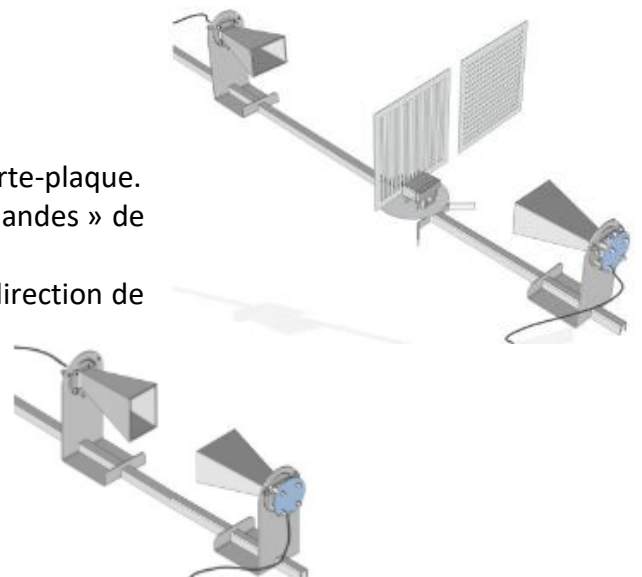
✎ Entre les deux, placer la grille de polarisation dans le porte-plaque.

➡ 11. Noter la tension obtenue selon la direction des « bandes » de la grille.

➡ 12. Conclure quant à la nature de la polarisation et la direction de polarisation de l'onde émise par le cornet E.

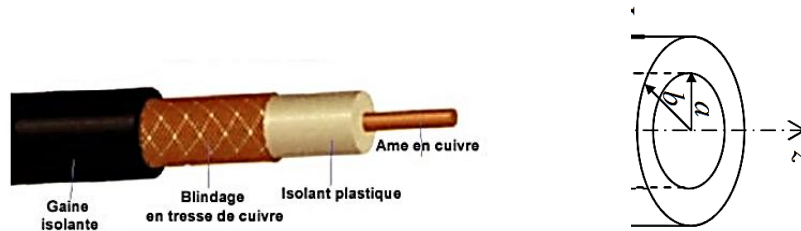
✎ Retirer la grille, tourner le cornet R d'un quart de tour.

➡ 13. Notez vos observations et interprétez.



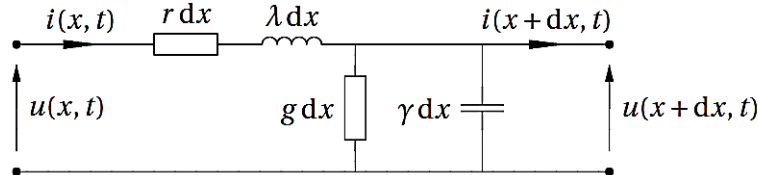
3^e partie. Propagation d'ondes EM dans un câble coaxial – Réflexion et ondes stationnaires

On dispose d'un câble coaxial de longueur $L \approx 100 \text{ m}$. Il est constitué de deux conducteurs cylindriques de même axe, une âme (rayon a) et un blindage (rayon b), séparés par un isolant dont la permittivité relative ϵ_r est comprise entre 2 et 5.



1) Etude théorique (cf TD EM4-5-6)

On considère une portion de câble de longueur dx modélisée par une ligne à constantes réparties :



Pour la suite, on considèrera un modèle de **ligne sans pertes** : $r = 0$ et $g = 0$.

On peut établir les expressions de la capacité linéique γ et de l'inductance linéique λ :

$$\gamma = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(b/a)} \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(b/a)$$

Sur la portion de câble de longueur dx , les lois de Kirchhoff permettent d'établir l'équation aux dérivées partielles vérifiée par la tension :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \gamma \lambda \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

Il s'agit de l'équation de d'Alembert. On en déduit la célérité des ondes dans le câble (qui coïncide avec la vitesse de phase) :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\gamma\lambda}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{avec} \quad c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

On cherche une solution générale en onde plane progressive monochromatique :

$$\underline{v}(x, t) = V \cdot e^{j(\omega t - kx)} + \frac{V'}{R_c} \cdot e^{j(\omega t + kx)} \quad (1)$$

$$\underline{i}(x, t) = \frac{V}{R_c} \cdot e^{j(\omega t - kx)} - \frac{V'}{R_c} \cdot e^{j(\omega t + kx)} \quad (2)$$

Avec $k = \frac{\omega}{c}$ et $R_c = \sqrt{\frac{\lambda}{\gamma}}$ qui est la résistance caractéristique de la ligne, on a $R_c \approx 80 \Omega$.

Si on branche une charge résistive R_u en bout de câble, on a $\underline{v}(x = L, t) = R_u \cdot \underline{i}(x = L, t)$.

✎➡ 14. Montrer que les équations (1) et (2) conduisent à l'expression suivante du coefficient de réflexion complexe en tension :

$$\underline{\rho} = \frac{V'}{V} = \frac{R_u - R_c}{R_u + R_c} \cdot e^{-2jkL} = \rho_0 \cdot e^{-2jkL}$$

✎➡ 15. En éliminant $\underline{V}'$ dans les équations (1) et (2), exprimer $\underline{v}(x, t)$ et $\underline{i}(x, t)$ en fonction de V , R_c et ρ_0 . On notera ces équations (3) et (4).

✎➡ 16. En déduire que :

- si $R_u = R_c$ (on parle de charge adaptée) alors $\underline{v}(x, t) = V \cdot e^{j(\omega t - kx)}$: seule une onde progressive dans le sens des x croissants se propage dans le câble : le câble se comporte comme une ligne illimitée (il y a absence de réflexion) ;
- si $R_u = 0$ (sortie en court-circuit) alors $\rho_0 = -1$: l'onde réfléchie (aussi appelée « écho ») à une amplitude égale à celle de l'onde incidente et est en opposition de phase avec l'onde incidente en bout de ligne ;
- si $R_u \rightarrow \infty$ (sortie en boucle ouverte) alors $\rho_0 = 1$: l'onde réfléchie (aussi appelée « écho ») à une amplitude égale à celle de l'onde incidente et est en phase avec l'onde incidente en bout de ligne.

Dans la suite, on travaillera avec une **sortie en boucle ouverte**.

✎➡ 17. Montrer qu'avec une sortie en boucle ouverte, les équations (3) et (4) se simplifient et qu'en prenant les parties réelles on obtient :

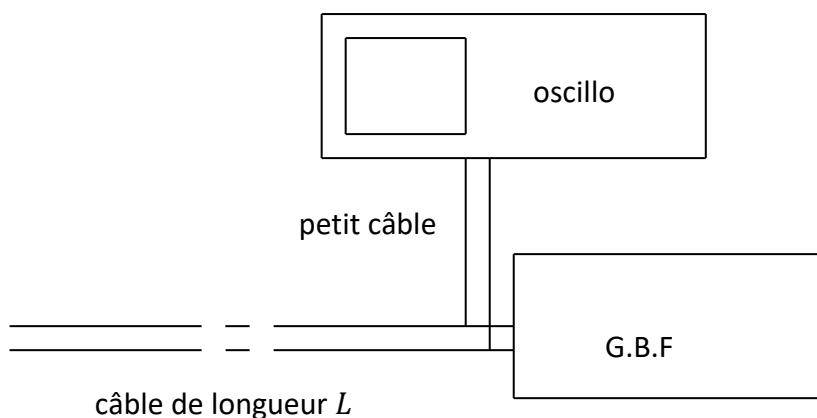
$$v(x, t) = 2 \cdot V \cdot \cos(k(L - x)) \cdot \cos(\omega t - kL) \quad (3')$$

$$i(x, t) = -2 \cdot \frac{V}{R_c} \cdot \sin(k(L - x)) \cdot \sin(\omega t - kL) \quad (4')$$

2) Etude expérimentale

a) Montage expérimental

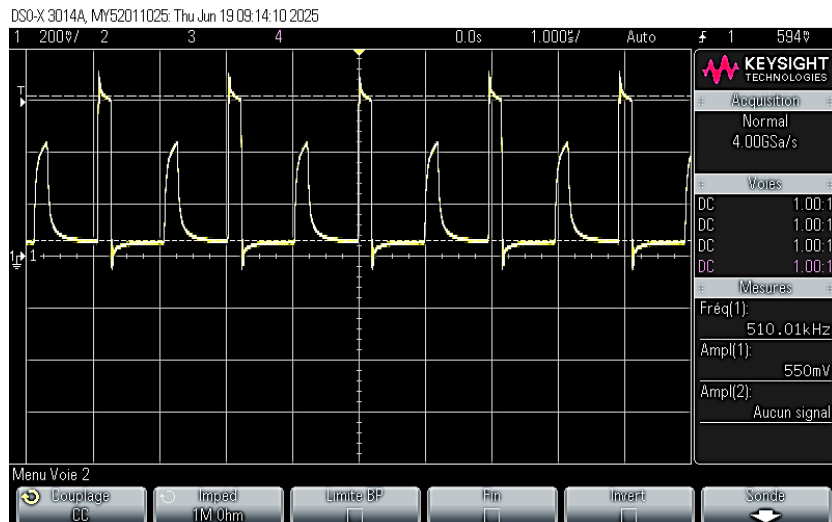
✎ Le G.B.F alimente, d'une part, le câble de longueur L et, d'autre part, un « petit » câble coaxial relié à l'oscilloscope qui mesure donc la tension $v(x = 0, t)$.



b) Mise en évidence de l'onde réfléchie

✎ Dans cette partie, régler le GBF pour qu'il délivre un pulse de fréquence $f = 510 \text{ kHz}$, de tension crête à crête égale à 1 V , de valeur minimale égale à 0 V . Régler *width* à 200 ns et *edge* à $5,0 \text{ ns}$.

La base de temps de l'oscilloscope sera réglée sur $1 \mu\text{s}$ et le niveau de déclenchement sera tel qu'on observe un oscillogramme semblable à celui qui figure ci-dessous.



➡ 18. Interpréter l'oscillogramme obtenu puis mesurer l'intervalle de temps Δt séparant les fronts montants des signaux « de départ » et « de retour ». En déduire une estimation de la célérité c du signal dans le câble. En déduire une valeur de la permittivité relative ϵ_r de l'isolant.

c) Mise en évidence des ondes stationnaires

✎ Dans cette partie, régler le GBF pour qu'il délivre une tension sinusoïdale de fréquence f , de tension crête à crête égale à 1 V et de valeur moyenne nulle.

Les équations (3') et (4') correspondent à des ondes stationnaires.

✎ ➡ 19. Montrer que l'oscilloscope détecte un ventre de la tension $v(x = 0, t)$ pour $f_n = n \cdot \frac{c}{2L} = n \cdot f_1$ avec $n \in \mathbb{N}^*$ et f_1 la fréquence fondamentale.

✎ Commencer avec $f = 5 \text{ MHz}$ puis diminuer progressivement la fréquence.

➡ 20. Relever les fréquences pour lesquelles on observe un ventre de tension en $x = 0$, noter la valeur de la fréquence fondamentale.

➡ 21. En déduire deux nouvelles estimations de la célérité c .

BILAN des 3 parties : Vous noterez **l'analogie** entre les trois situations étudiées dans ce TP !