ÉTUDE D'UN CIRCUIT RLC SÉRIE

On dispose d'une bobine $\mathcal{B}$ que l'on assimilera à l'association série d'une inductance L et d'une résistance r. (L et r sont des constantes positives, indépendantes de la fréquence).

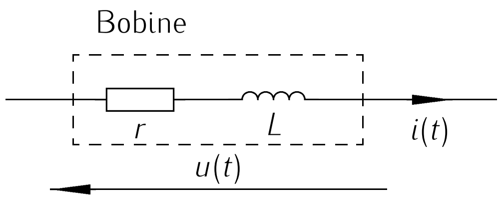


FIGURE 1 – Bobine $\mathcal{B}$

I. Détermination de r

1. La bobine est parcourue par un courant $i(t)$. Exprimer la tension $u(t)$ à ses bornes en fonction de r, L, $i(t)$
Q1 et de sa dérivée par rapport au temps.
2. On réalise le circuit suivant, en plaçant, en série avec la bobine, un résistor de résistance $R = 40\ \Omega$. L'alimentation est un générateur de tension continue, constante, de force électromotrice $E_0 = 1{,}0$ V et de résistance interne $r_0 = 2{,}0\ \Omega$.

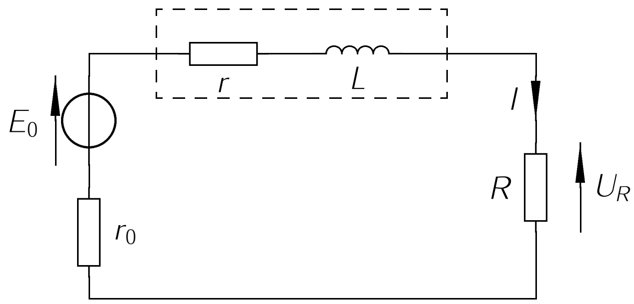


FIGURE 2 – Détermination de r

On mesure, en régime permanent, la tension U_R aux bornes de R.
Q2 Exprimer r en fonction des données de cette question. Calculer r avec $U_R = 0{,}56$ V.

II. Détermination de r et L à partir d'un oscillogramme.

On place, en série avec la bobine, un résistor de résistance $R = 40\ \Omega$ et un condensateur de capacité $C = 10\ \mu$F. Le GBF (générateur basses fréquences) est réglé pour délivrer une tension sinusoïdale de fréquence $f = 250$ Hz (la pulsation sera notée ω) et de valeur crête a crête de 10 V.
Deux tensions sont visualisées sur un oscilloscope numérique.

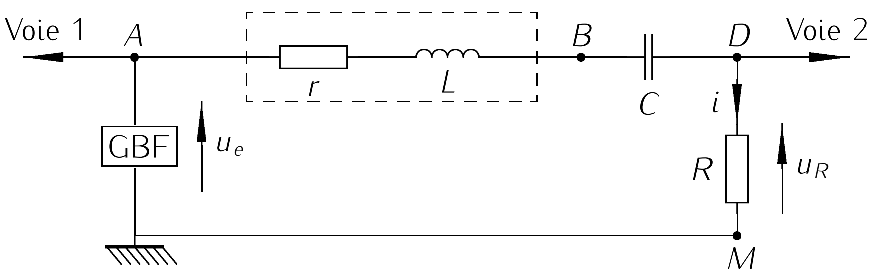


FIGURE 3 – Détermination de r et L

On obtient un oscillogramme équivalent au graphe suivant.

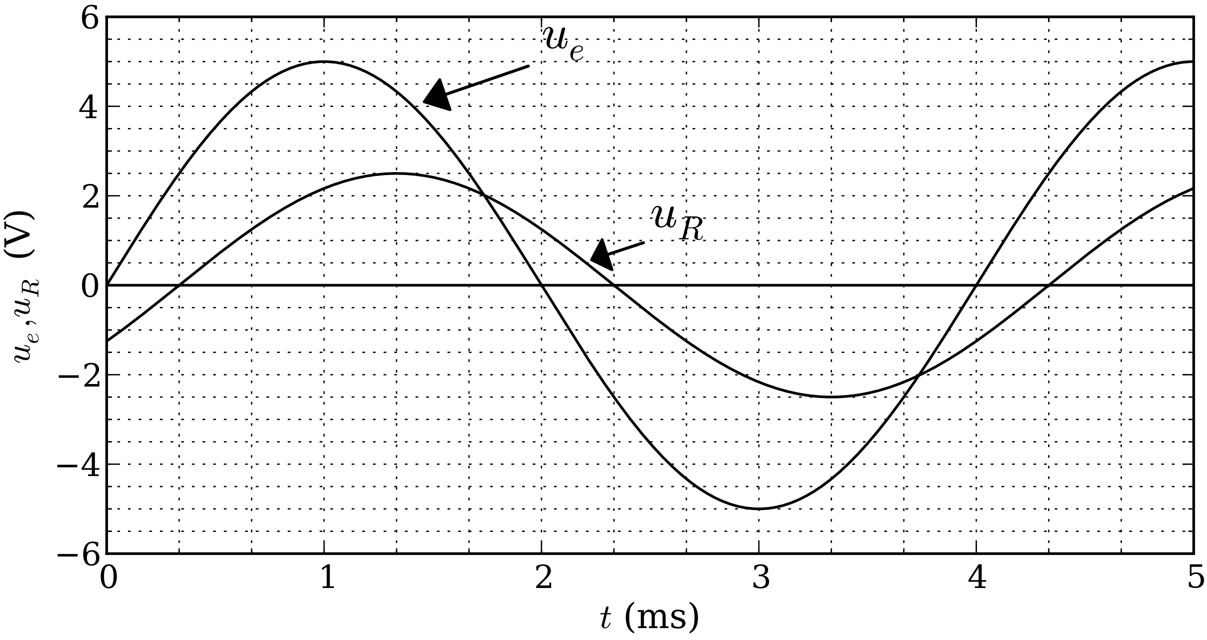


FIGURE 4 – Oscillogramme

Q3 1. Déterminer l'amplitude U_e de la tension u_e et l'amplitude U_R de la tension u_R.

Q4 2. Déterminer l'amplitude I du courant i.

3. Rappeler l'expression générale de l'impédance Z d'un dipôle quelconque (module de l'impédance complexe).
Q5 Calculer alors l'impédance Z_{AM} du dipôle AM (valeur numérique).

Q6 4. Des deux tensions, $u_R(t)$ et $u_e(t)$, laquelle, et pourquoi d'après l'oscillogramme, est en avance sur l'autre ?

5. Déterminer précisément, à partir de l'oscillogramme, le déphasage $\varphi_{u_e/i}$ entre u_e et i, (c'est-a-dire entre u_e
Q7 et u_R).

Q8 6. Écrire l'expression générale de l'impédance complexe $\underline{Z}_{AM}$ en fonction de r, R, L, C et ω.

Q9 7. Écrire l'expression de l'impédance complexe $\underline{Z}_{AM}$ en fonction de son module Z_{AM} et du déphasage $\varphi_{u_e/i}$.

Q10 8. Exprimer r en fonction de R, Z_{AM} et $\varphi_{u_e/i}$. Calculer sa valeur.

Q11 9. Exprimer L en fonction de C, ω, Z_{AM} et $\varphi_{u_e/i}$. Calculer sa valeur.

COMMENT ACCORDER UNE GUITARE

A. Recherche des solutions en ondes stationnaires

On considère une corde homogène initialement au repos et confondue avec l'axe Ox, inélastique, de masse linéique μ (masse par unité de longueur), tendue par une tension pratiquement uniforme et constante T (en N). La corde est tendue par une masse par l'intermédiaire d'une poulie. La corde est fixée au point O et un guidage impose $y = 0$ à chaque instant à l'abscisse $x = L$.
On étudie les petits mouvements transversaux de la corde dans le plan xOy, autour de la position d'équilibre.
L'élongation transversale à l'instant t du point M d'abscisse x est notée $y(x,t)$.

1. Une étude de l'équation d'onde (non demandée) montre que l'on peut chercher les fonctions $y(x,t)$ sous la forme suivante, avec $k = \frac{\omega}{c}$:

$$y(x,t) = y_0 \sin(kx + \varphi_1) \sin(\omega t + \varphi_2)$$

Q12 (a) Quelle est le nom de la constante k ? Donner sa dimension puis son unité. Justifier.

Q13 (b) Donner la relation entre k et λ la période spatiale de l'onde. Justifier.

Q14 (c) Que peut-on dire de l'élongation aux points $x = 0$ et $x = L$ à chaque instant ?

Q15 (d) En déduire que k ne peut prendre qu'une série de valeur discrètes k_n, appelées valeurs propres. Définir n.

Q16 (e) En déduire l'expression de L en fonction de λ_n.

Q17 (f) Exprimer la fréquence propre f_n en fonction de c et L.

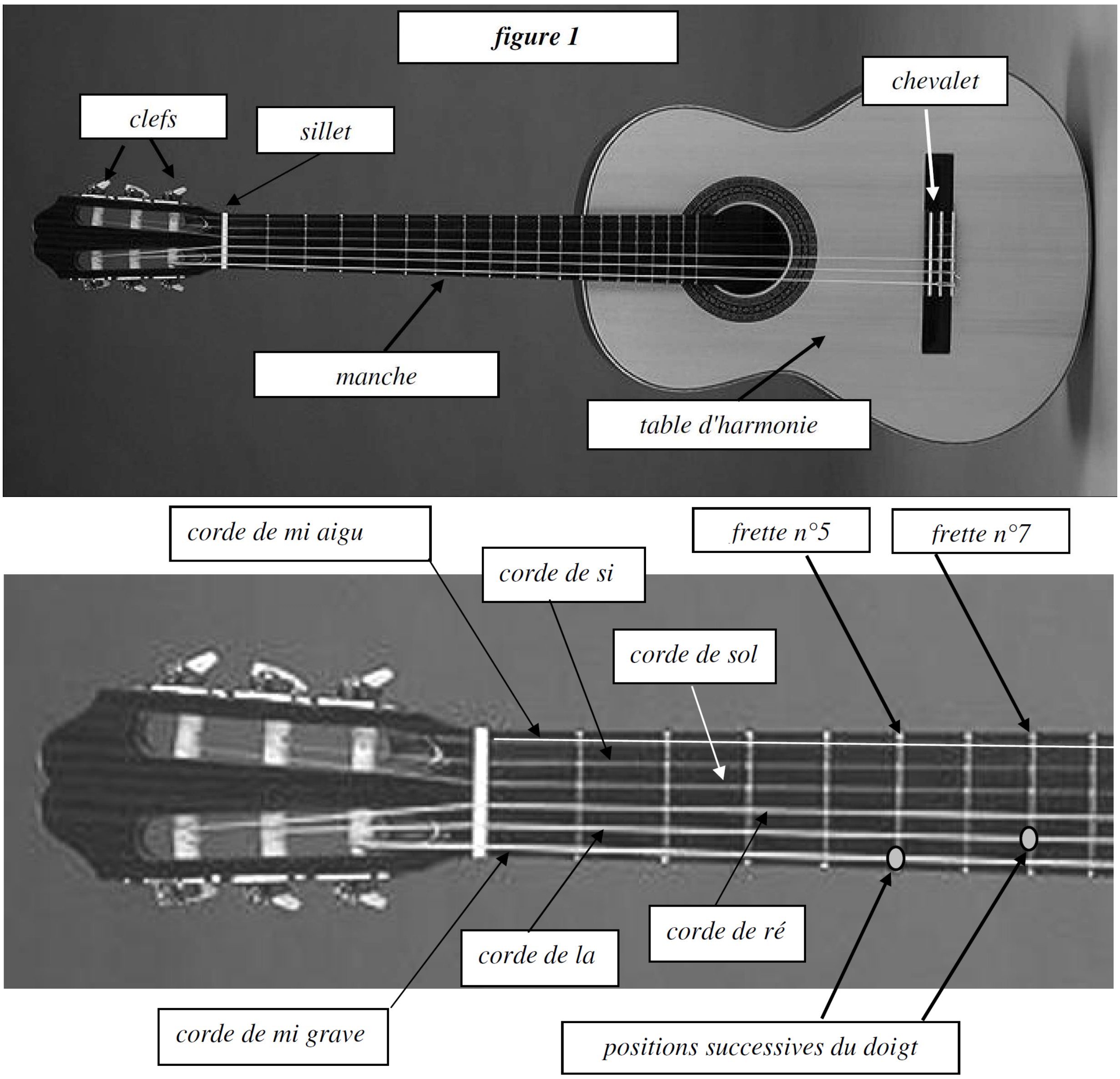
2. À chaque valeur de f_n correspond un mode propre. Le mode $n = 1$ (correspondant à la plus petite fréquence non nulle définie ci-dessus) est appelé mode fondamental. Les modes correspondant à n supérieur à 1 sont les harmoniques.

Q18 Exprimer l'élongation $y_n(x,t)$ du mode d'indice n avec les variables n, c, L et φ_2.
Donner une représentation graphique de la corde en mouvement (à un instant donné) pour le fondamental et les deux premiers harmoniques. Montrer la position des noeuds et des ventres.

Q19 3. Proposer une expérience permettant de mesurer les fréquences propres d'une corde.

B. Application à une corde de guitare

Les frettes placées le long du manche d'une guitare permettent au musicien de modifier la hauteur du son produit par la corde. En pressant la corde contre une frette, il diminue sa longueur, provoquant une augmentation de la fréquence fondamentale de la vibration de la corde.



Q20 1. À l'aide de la partie précédente, donner la fréquence de vibration fondamentale d'une corde de longueur L le long de laquelle les ondes se propagent à la célérité c.

2. La note monte d'un demi-ton lorsque la fréquence est multipliée par $2^{1/12}$. Pour cela, comment faut-il modifier
Q21 la longueur de la corde ?

3. En plaçant le doigt sur les frettes successives, on monte chaque fois la note d'un demi-ton. Combien de frettes peut-il y avoir au maximum, sachant que la distance d entre la dernière frette et le point d'accrochage
Q22 de la corde doit être supérieure à $\frac{L}{4}$?

4. On cherche la formule de la célérité c de propagation de l'onde le long de la corde. Une étude qualitative montre qu'elle peut s'écrire sous la forme $c = A.m^{\alpha}.L^{\beta}.T^{\gamma}$, avec A une constante sans dimension, m la masse de la corde, L sa longueur et T la tension de la corde.

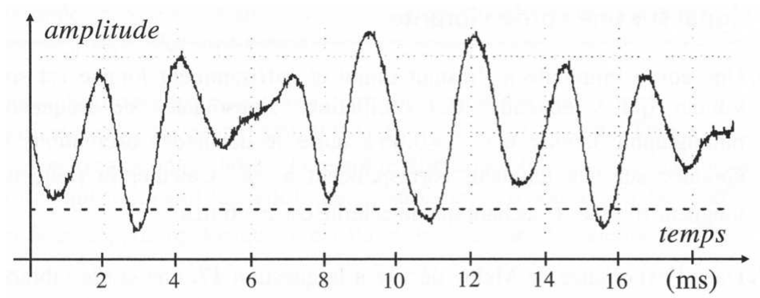
   (a) Déterminer α, β, et γ par analyse dimensionnelle.
Q23 On donne $A = 1$, conclure en donnant la formule finale de la célérité c en fonction de T et de la masse linéique μ de la corde.

Q24 (b) Calculer la tension T de la corde mi_3 dont la fréquence fondamentale est $f_1 = 330$ Hz. On donne la longueur de la corde $L = 63$ cm et sa masse linéique $\mu = 0{,}55$ g.m^{-1}.

C. Étude spectrale d'un son

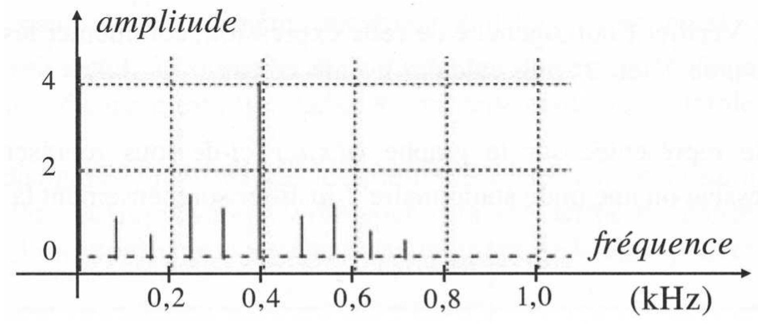
Dans l'enregistrement du son produit par une guitare au moyen d'un microphone et d'un amplificateur, c'est la tension produite par l'amplificateur qui est en fait enregistrée. Dans l'étude ci-dessous, la corde de mi_1 (de fréquence 82,4 Hz) est frappée près du chevalet.

1. Le premier enregistrement concerne la courbe d'amplitude du signal en fonction du temps.



Q25 (a) Comment peut-on décrire ce signal ? Est-ce un signal sinusoïdal ?
Q26 (b) Évaluer la fréquence principale qui correspond à la composante de plus grande amplitude.

2. Le second enregistrement est une analyse spectrale du signal précédent.

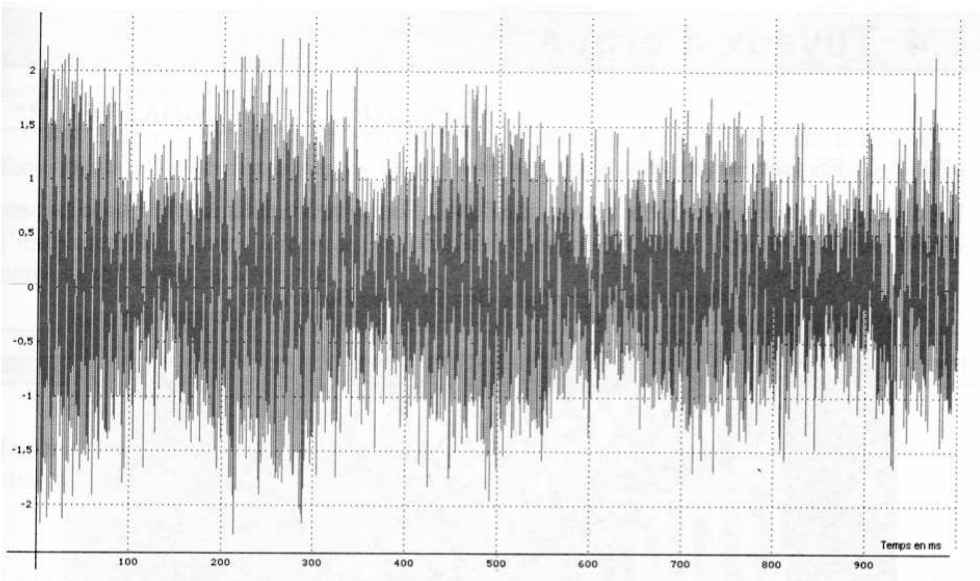


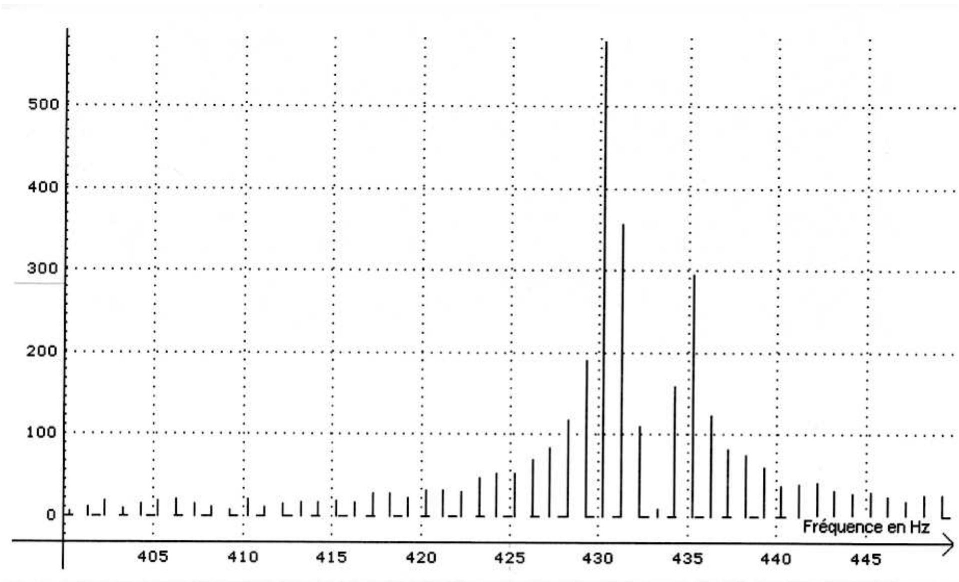
Q27 (a) Comme s'appelle l'opération mathématique qui permet d'obtenir le spectre du signal ?
Q28 (b) Décrire le spectre. Est-il en accord avec la fréquence calculée précédemment à la question 1b) ?
Q29 (c) Comment s'y prend le guitariste pour jouer d'autres notes sur cette même corde ?

3. On se propose d'illustrer un moyen commode pour accorder les cordes entre elles en prenant l'exemple de l'accordage de la corde $ré_2$, à partir de la corde la_1. Le guitariste s'arrange pour jouer la « même »note sur ces deux cordes (il place ses doigts et pince les cordes comme il faut, les explications ne sont pas nécessaires

ici). Ensuite, il règle la tension de la corde *ré*$_2$ de manière à ce que les deux cordes produisent la même note.

Les figures suivantes représentent la tension délivrée par un microphone (en V) en fonction du temps (un carreau correspond à 100 ms) ainsi que le spectre du signal lors d'un essai d'accordage des cordes *la*$_1$ et *ré*$_2$ par la méthode précédente.





Q30 (a) Comment s'appelle le phénomène observé ? De quelle façon se manifeste-t-il dans le son entendu par l'oreille ?

Q31 (b) Montrer que les deux graphiques expérimentaux sont compatibles **de manière quantitative**.

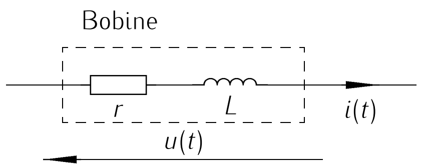
Q32 (c) Comment doit-on alors procéder pour accorder les cordes entre elles ?

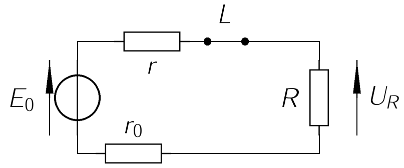
ÉTUDE D'UN CIRCUIT RLC SÉRIE

Petites Mines 2009

I. Détermination de r

1. Par application des lois constitutives pour le résistor r et l'inductance pure L en convention récepteur (figure
Q1 ci-dessous à gauche), on obtient $\boxed{u(t) = ri(t) + L\frac{di(t)}{dt}}$





2. En régime permanent la tension aux bornes de l'inductance pure est nulle, cette dernière est équivalente à
Q2 un interrupteur fermé (figure ci-dessus à droite). On obtient alors un pont diviseur de tension et

$$U_R = \frac{RE_0}{R + r + r_0} \Rightarrow \boxed{r = \left[\frac{E_0}{U_R} - 1\right]R - r_0 \simeq 29\ \Omega}$$

II. Détermination de r et L à partir d'un oscillogramme.

Q3 1. Par lecture directe, on détermine $\boxed{U_e = 5\ \text{V et } U_R = 2{,}5\ \text{V}}$

Q4 2. À tout instant $u_R(t) = R.i(t)$ grandeurs sinusoïdales en phase d'où $\boxed{I = \frac{U_R}{R} = 0{,}063\ \text{A}}$

3. D'après la loi d'Ohm généralisée, en notation complexe, $\underline{U} = \underline{Z}.\underline{I}$ relation qui lie les amplitudes complexes de la tension et du courant appliqués au dipôle en convention récepteur.

En passant au module, on obtient $U = Z.I \Rightarrow \boxed{Z = \frac{U}{I}}$.

Pour le dipôle AM traversé par le courant $i(t)$ quand la tension à ses bornes est $u_e(t)$, on a donc
Q5 $\boxed{Z_{AM} = \frac{U_e}{I} = 80\ \Omega}$.

4. Sur l'oscillogramme, on voit que la tension $u_e(t)$ passe par son maximum environ 0,33 ms avant $u_R(t)$. Par
Q6 conséquent, $\boxed{u_e(t) \text{ est en avance sur } u_R(t)}$.

5. La période des tensions est $T = \frac{1}{f} = 4$ ms (12 carreaux sur l'oscillogramme) alors que le décalage temporel est $\Delta t = 0{,}33$ ms (1 carreau).
Une règle de trois permet d'en déduire $\varphi = \frac{\Delta t}{T} \times 360 = 30°$ et comme u_e est en avance sur u_R,
Q7 $\boxed{\varphi_{u_e/u_r} = \varphi_{u_e/i} = +30°}$ soit $\frac{\pi}{6}$.

6. En notation complexe $\underline{Z}_{AM}$ est l'impédance équivalent à l'association en série des résistors, la bobine idéale
Q8 et le condensateur. On a ainsi $\boxed{\underline{Z}_{AM} = r + jL\omega + \frac{1}{jC\omega} + R = r + R + j\left[L\omega - \frac{1}{C\omega}\right]}$

Q9 7. Par définition $\underline{Z}_{AM} = \frac{\underline{u_e}}{\underline{i}} = \frac{U_e}{I}.\exp[j(\varphi_e - \varphi_i)] \Rightarrow \boxed{\underline{Z}_{AM} = Z_{AM}.\exp(j\varphi_{u_e/i})}$.

8. D'après ce qui précède, $\varphi_{u_e/i}$ est l'argument de $\underline{Z}_{AM} = r + R + j\left[L\omega - \frac{1}{C\omega}\right]$.
Q10 On en déduit $\cos\varphi_{u_e/i} = \frac{\Re(\underline{Z}_{AM})}{Z_{AM}} = \frac{R+r}{Z_{AM}}$ et $\boxed{r = Z_{AM}\cos\varphi_{u_e/i} - R \simeq 29\ \Omega}$.

Q11 9. De même,

$$\sin\varphi_{u_e/i} = \frac{\Im(\underline{Z}_{AM})}{Z_{AM}} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{Z_{AM}} \Rightarrow \boxed{L = \frac{1}{\omega}\left[Z_{AM}\sin\varphi_{u_e/i} + \frac{1}{C\omega}\right] \simeq 0{,}066\ \text{H}}$$

COMMENT ACCORDER UNE GUITARE

A. Recherche des solutions en ondes stationnaires

Q12 1. (a) k est appelé vecteur d'onde. La dimension de l'argument du sinus est 1 (et son unité est le radian) donc $[kx] = 1$ or $[x] = L$ d'où $\boxed{[k] = L^{-1}}$. Avec le même raisonnement pour l'unité, on a $\boxed{\text{unité de } k = \text{rad.m}^{-1}}$ (ou tout autre unité d'angle divisé par une unité de longueur).

(b) Si λ est la période spatiale de l'onde, on doit avoir $\forall x \backslash y(x,t) = y(x+\lambda,t)$ soit $\sin(kx+\varphi_1) = \sin[k(x+\lambda)+\varphi_1]$ d'où $k\lambda = 2\pi \times n$ avec n un entier. Le $\forall x$ permet d'exclure l'autre condition d'égalité de deux sinus : $kx + k\lambda + \varphi_1 = \pi - kx - \varphi_1$ ne peut pas être vérifiée quelque soit x.

On en déduit $k\lambda = 2\pi$ (car λ est le plus petit réel positif permettant de vérifier cette relation) $\boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda}}$

Q13

Attention, ne partez pas des relations $k = \frac{\omega}{c}$ ou $\lambda = c/f$ qui ne sont valable que dans des milieux non dispersifs non absorbant. La relation $k = 2\pi/\lambda$ est plus générale.

Q14 (c) La corde est fixe en ses deux extrémités donc $\boxed{y(0) = y(L) = 0}$ pour tout t. L'élongation est donc $\boxed{\text{nulle}}$.

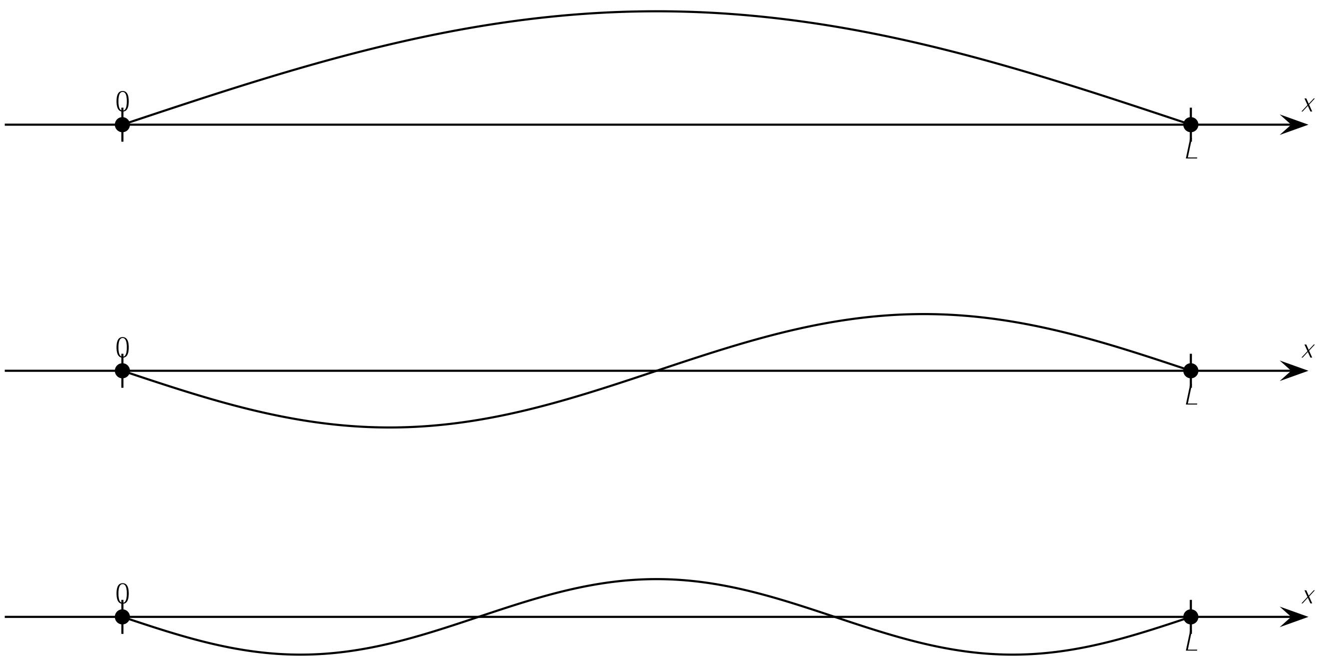
Q15 (d) La première condition impose $\sin(\varphi_1) = 0$ d'où $\varphi_1 = 0$. La deuxième condition donne $\sin(kL) = 0$ d'où $kL = n\pi$ avec n entier non nul (car ni k ni L ne sont nuls). D'où $\boxed{k_n = \frac{n\pi}{L}}$.

Q16 (e) $\lambda_n = \frac{2\pi}{k_n} = \frac{2L}{n}$ $\boxed{L = \frac{n\lambda_n}{2}}$

Q17 (f) T la période spatiale satisfait $\omega T = 2\pi$ d'où $f_n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{kc}{2\pi}$ avec $\omega = kc$ d'où $\boxed{f_n = \frac{nc}{2L}}$.

2. $\boxed{y_n(x,t) = \sin(\frac{n\pi x}{L})\sin(\frac{n\pi ct}{L} + \varphi_2)}$. L'allure de la corde pour le fondamental et les deux premiers harmoniques

Q18 est représentée ci-dessous :



3. Pour mesurer les fréquences propres d'une corde, on peut utiliser un vibreur de fréquence variable fixé à

Q19 une extrémité de la corde de longueur L. L'autre extrémité passe par une poulie et on attache un poids au bout de la corde pour fixer la tension par exemple.

On fait varier la fréquence du vibreur pour observer les différents modes : des faisceaux avec des nœuds et des ventres de grande amplitude. Les fréquences correspondantes sont les fréquences propres de la corde. Pour les autres fréquences, $\sin(kL) \neq 0$ et c'est donc y_0 qui vaut 0.

On peut éventuellement utiliser un stroboscope pour mesurer les fréquences à laquelle on excite la corde si la fréquences d'excitation n'est pas connue. Mais l'utilisation d'un stroboscope seule ne suffit pas à connaitre les modes propres de la corde, mais simplement la fréquence à laquelle le vibreur fonctionne. De plus, lorsque l'on voit une corde immobile, on ne sait pas si on est à la fréquence d'oscillation de la corde f ou à un sous multiple f/n avec n un entier. Cela demande donc des précautions.

Une autre solution serait d'exciter la corde en tapant dessus pour exciter tout les modes propres, puis de regarder la/les fréquences d'oscillations à l'aide d'un stroboscope (ou d'un micro). Puisque seuls les modes propres peuvent se propager, alors on pourra les déterminer. Un problème est que l'on excite différent modes propres de différentes fréquences : on ne verra pas facilement les harmoniques mais seulement le fondamental. De plus, les modes propres excités dépendent de la manière de frapper la corde.

B. Application à une corde de guitare

Q20 1. Pour le mode fondamental, nous avions $L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f_1}$. D'où $\boxed{f_1 = \frac{c}{2L}}$

2. On note f' la nouvelle fréquence associée à L' la nouvelle longueur de corde (f et L étant les anciennes).

Définissez rapidement les notations que vous introduisez.

Q21 Pour monter la note d'un demi-ton : $f' = f \times 2^{1/12}$. Or la note est liée à la fréquence du fondamental, on peut donc utiliser le résultat de la question précédente : $f = \frac{c}{2L}$ et $f' = \frac{c}{2L'}$. On en déduit :
$f' = f \times 2^{1/12} \Rightarrow \frac{c}{2L'} = \frac{c}{2L} \times 2^{1/12}$.
Soit $\boxed{L' = L \times 2^{-1/12}}$
Il faut donc multiplier la longueur de la corde par $2^{-1/12}$ (soit raccourcir la corde).

Ne vous contentez pas de dire qu'il faut raccourcir la corde : ce n'est pas suffisant. On veut savoir de combien (et cela nous servira pour la question d'après).

3. En notant L_n la longueur de la corde lorsque l'on pince la n^{e} frette. On monte d'un demi-ton à chaque fois d'où $L_n = L_{n-1} \times 2^{-1/12}$. D'où par récurrence $L_p = L_0 \times (2^{-1/12})^p$ en notant L_0 la longueur totale (utile) de la corde lorsque l'on utilise pas les frettes.
On souhaite $L_p \geq \frac{L}{4} \Leftrightarrow L \times 2^{-p/12} \geq \frac{L}{4} \Leftrightarrow \ln(2^{-p/12}) \geq \ln \frac{1}{4}$
$\frac{-p}{12} \ln 2 \geq \ln \frac{1}{4} \Leftrightarrow p \leq \frac{-\ln 1/4}{\ln 2} \times 12 = 24$

Q22 Il y a $\boxed{\text{24 frettes au maximum}}$.
Rem : avec 24 frettes, on couvre une étendue de 2 octaves avec une corde (octave : intervalle séparant deux sons dont la fréquence fondamentale du plus aigu est le double de celle du plus grave). $f_{24} = f \times (2^{1/12})^{24} = 4f$

On pouvait vérifier l'ordre de grandeur du résultat en comptant le nombre de frette sur la photo (même si sur la photo, la condition est plutôt $L_p \geq \frac{L}{3}$, le résultat reste similaire). Ainsi, si vous trouvez 3 frettes ou 100 frettes, vous savez que votre résultat est « suspect ».

Q23 4. (a) Voir TP. On trouve $\boxed{c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}}$

(b) $T = \mu c^2 = \mu(\lambda f_1)^2 = \mu(2Lf_1)^2$ car $L = \lambda/2$.

Q24 A.N. : $T = 0{,}55.10^{-3} \times (2 \times 63.10^{-2} \times 330)^2$ $\boxed{T = 95\text{ N}}$

C. Étude spectrale d'un son

Q25 1. (a) Le signal n'est pas « purement sinusoïdal » (il présente des irrégularités). Il est constitué d'un fondamental et d'une série d'harmoniques d'amplitudes variables. La corde, jouée par le guitariste, ne vibre pas dans un mode unique mais dans une superposition de différents modes. Puisque la corde a été frappée très près du chevalet, le mode de plus grande amplitude n'est sans doute pas le fondamental.

(b) ***Attention, il est demandé le mode de plus grande amplitude, pas le fondamental ou la période du signal (ce qui revient au fondamental).***

Q26 Le signal étant malgré tout presque sinusoïdal (ou en tout cas sur certains intervals, il apparait un harmonique prépondérant : entre $t = 8\,\text{ms}$ et $t = 18\,\text{ms}$, on compte approximativement 4 périodes, soit $T \simeq 2{,}5$ ms, ce qui donne $\boxed{f \simeq 400 \text{ Hz}}$.

Comptez plusieurs périodes, expliquez où vous les avez prises. Prenez les dans une zone où le signal a l'air sinusoïdal.

Q27 2. (a) C'est la $\boxed{\text{transformée de Fourier}}$ qui permet d'obtenir le spectre d'un signal temporel.

Q28 (b) On compte 9 harmoniques dans le spectre, celui le plus important n'est pas ici le fondamental mais le 5^e harmonique de fréquence légèrement inférieure à 400 Hz, ce qui est en accord avec la question précédente.

Ces harmoniques sont régulièrement espacés ($f_n = nf_1$). $f_5 \simeq 400$ Hz conduit à $f_1 = 400/5 \simeq 80$ Hz, ce qui est bien en accord avec la donnée de l'énoncé pour la corde mi_1.

Q29 (c) Pour pouvoir jouer d'autres notes (cad changer la hauteur ou la fréquence de la note), comme vu plus haut, le guitariste appuie sur une frette pour changer la longueur vibratoire de la corde. En effet, la note est reliée à la fréquence fondamental $f = \frac{c}{2L}$, ainsi la corde étant plus courte lorsque l'on pince une frette, la nouvelle note sera forcément plus aigüe.

La question est une question de physique et non de musique : justifier votre réponse à l'aide des résultats obtenus.

Q30 3. (a) On observe un phénomène de $\boxed{\text{battements}}$. A l'oreille, il se manifeste par une variation (ou modulation) dans le temps de l'amplitude du son entendu avec une période T_{batt}. Alternativement, les deux signaux issus de deux cordes vont être en phase (maximum local du signal total) puis en opposition de phase (minimum local du signal total).

Q31 (b) **Lecture de fréquences des deux principaux pics** sur le spectre : ils se situent à $f_1 \simeq 430$ Hz et $f_2 \simeq 435$ Hz (incertitude de l'ordre de 1 Hz). Cet écart doit donner des battements comme sur le signal enregistré.

Lecture sur le signal : la mesure de la période des battements donne $T_{batt} \simeq 240$ ms d'où une fréquence $f_{batt} \simeq 4{,}2$ Hz. Or d'après le cours, $f_{batt} = f_2 - f_1$. Cet écart est bien compatible avec les deux fréquences relevées sur le spectre.

Amplitude relatives : Sur les spectres, l'amplitude de la composante à f_1 est deux fois plus grande que celle à f_2. C'est en accord avec le signal où l'on a grossièrement $S_{max} \simeq 2$ V et $S_{min} \simeq 0{,}75$ V (difficile à lire à cause du bruit). On peut en déduire que les amplitudes des deux signaux sont de l'ordre de 1,4 V et 0,7 V, soit à peu près un facteur 2. Cela est cohérent avec le spectre où il y a à peu près un facteur 2 entre les amplitudes. On ne peut pas facilement comparer les valeurs exactes avec le spectres car les amplitudes obtenues sont peu précises (dû à l'élargissement des pics compte tenu de la fenêtre finie d'acquisition).

Enfin, l'existence des harmoniques introduit quelques déformations dans le signal. Cela donne un signal un peu déformé par rapport à celui vu en théorie pour deux signaux purs.

Remarque : il est impossible sur ce signal de mesurer la pseudo-fréquence en comptant les oscillations. De plus, il serait faux de dire que la pseudo-fréquence est la moyenne des fréquences puisque les amplitudes ne sont pas égales.

(c) Pour accorder les cordes, il faut tourner les clés pour changer la tension. Le but est d'obtenir la même fréquence, ainsi lorsque l'on tourne une clé, on peut savoir si on l'a tourné dans le bon sens en écoutant les battements : si la période des battements augmentent, alors c'est que la différence de fréquence diminue, on tourne dans le bon sens. Au contraire, si la période des battements diminue, c'est que les fréquences "s'éloignent" et on tourne dans le mauvais sens.

Lorsque l'on n'entend plus les battements parce que la période est devenue trop grande, c'est-à-dire lorsque l'on entend un son d'amplitude constante qui n'est plus modulée dans le temps, alors c'est que la différence de fréquence est nulle.

Remarque : les deux cordes ne seront pas accordées de manière absolue... mais juste accordées entre
Q32 elles ! Cela permet déjà de rendre le son de la guitare harmonieux.