

1<sup>er</sup> sujet: Banque PT 2021, partie C.

Le sujet aborde divers aspects de la mesure du temps. Seule la (longue!!) partie d'électronique a ici été conservée.

## TEMPS – FREQUENCE

*La mesure du temps peut être considérée sur une période longue, donc avec un calendrier, ou plus courte avec des horloges, ou sur des échelles beaucoup plus petites avec des oscillateurs voire des transitions atomiques de nos jours.*

*L'observation du mouvement de la lune autour de la terre a permis d'établir un calendrier en Chine, dit calendrier lunaire, depuis plus de mille ans avant J. C. En fait pour être précis il y avait une association entre l'observation de la lune et du soleil conduisant à un calendrier luni-solaire. De nos jours dans une bonne partie du globe terrestre, en Asie, ce calendrier est encore largement utilisé, et une forme purement lunaire est elle aussi largement utilisée dans d'autres parties du globe.*

*Dans une journée on devait faire des subdivisions, et pour cela on a pu utiliser des horloges hydrauliques pour compter le temps, et cela en Chine dès la dynastie des Hans (206 av. J.-C. – 220 apr. J.-C.). Les clepsydres, basée sur l'écoulement d'un récipient rempli d'eau permettaient la mesure d'un intervalle de temps.*

*De nos jours on utilise couramment des montres à quartz. Les télécommunications font appel à des références de temps, des oscillateurs électroniques de très haute pureté spectrale.*

*L'unité fondamentale de mesure du temps, la seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133, à 0 K. Il en résulte que la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium est égale à 9 192 631 770 Hz.*

### C. Oscillateurs électroniques

Les systèmes étudiés dans cette partie utilisent des amplificateurs linéaires intégrés. Il est important de se rappeler des principales propriétés de ces circuits.

**Q28.** Quelles sont les principales caractéristiques d'un amplificateur linéaire intégré, en le supposant tout d'abord idéal, puis en considérant un amplificateur réel de type standard.

**Q29.** Donner des ordres de grandeurs pour les caractéristiques d'un amplificateur réel standard.

#### C.I. Oscillateur de relaxation

Cet oscillateur est construit autour d'un amplificateur linéaire intégré idéal, noté U0, alimenté sous les tensions  $\pm 15\text{ V}$ . On considère que la tension de saturation est  $V_{sat} = 14\text{ V}$ .

### C.I.1. Comparateur à hystérésis

Dans un premier temps on considère le circuit suivant la Figure F5. On choisit des résistances parmi la série E12 à 10% de précision  $R_1 = 1,8 \text{ k}\Omega$  et  $R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$ .

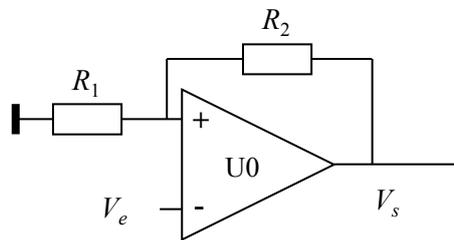


Figure F5. Comparateur à hystérésis

- Q30.** Que peut-on dire du fonctionnement du circuit U0 ?
- Q31.** Exprimer la tension au niveau de l'entrée (+), notée  $V^{(+)}$ , en fonction des éléments du schéma et de la tension  $V_s$ .
- Q32.** La tension  $V_e$  croit de  $-15 \text{ V}$  à  $+15 \text{ V}$ . Montrer qu'il existe une tension de basculement. Tracer la courbe donnant  $V_s$  en fonction de  $V_e$  ; préciser quelques valeurs numériques permettant un tracé relativement satisfaisant de cette courbe.
- Q33.** Même question si maintenant la tension  $V_e$  décroît de  $+15 \text{ V}$  à  $-15 \text{ V}$ . Tracer la courbe donnant  $V_s$  en fonction de  $V_e$ . sur le même graphe qu'à la question précédente, mais avec une couleur différente.
- Q34.** Pourquoi appelle-t-on ce circuit un comparateur à hystérésis ?

Pour tester le comparateur à hystérésis on impose à présent, à l'aide d'un générateur de fonctions, une tension  $V_e(t)$ , triangulaire, symétrique, de période  $T$  et d'amplitude  $E = 15 \text{ V}$  (voir Figure F6).

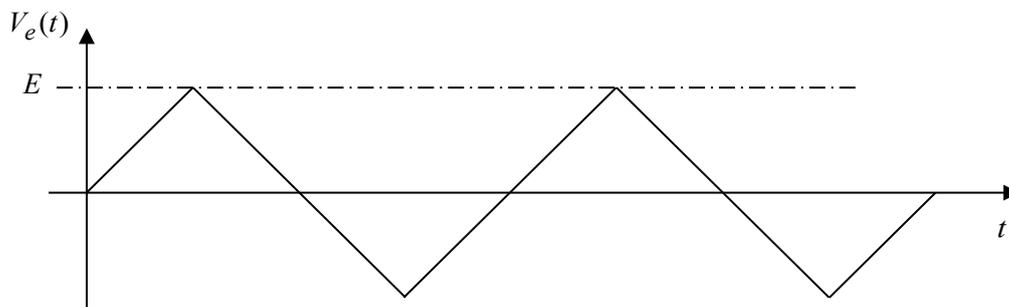


Figure F6. Signal de test appliqué au comparateur.

- Q35.** Reproduire cette courbe sur la copie et y superposer le tracé de la courbe donnant  $V_s(t)$  en fonction du temps, à la même échelle.

### C.I.2. Application du circuit comparateur : oscillateur de relaxation

Le comparateur étudié précédemment est maintenant associé à un circuit RC selon le schéma de la Figure F7.

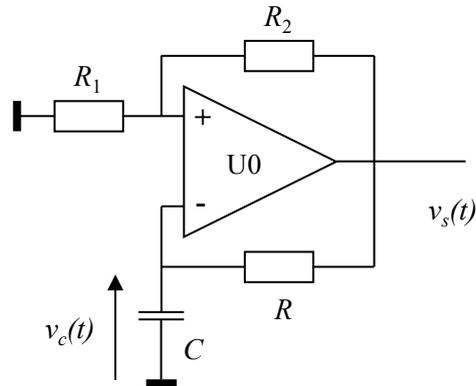


Figure F7. Schéma de l'oscillateur.

À la mise sous-tension on observe assez rapidement un régime périodique avec une succession de phases de croissance puis de décroissance de  $v_c$ . La figure F8 ci-dessous donne les enregistrements à l'oscilloscope de  $v_s(t)$  (voie C1) et de  $v_c(t)$  (voie C2) en fonction du temps.

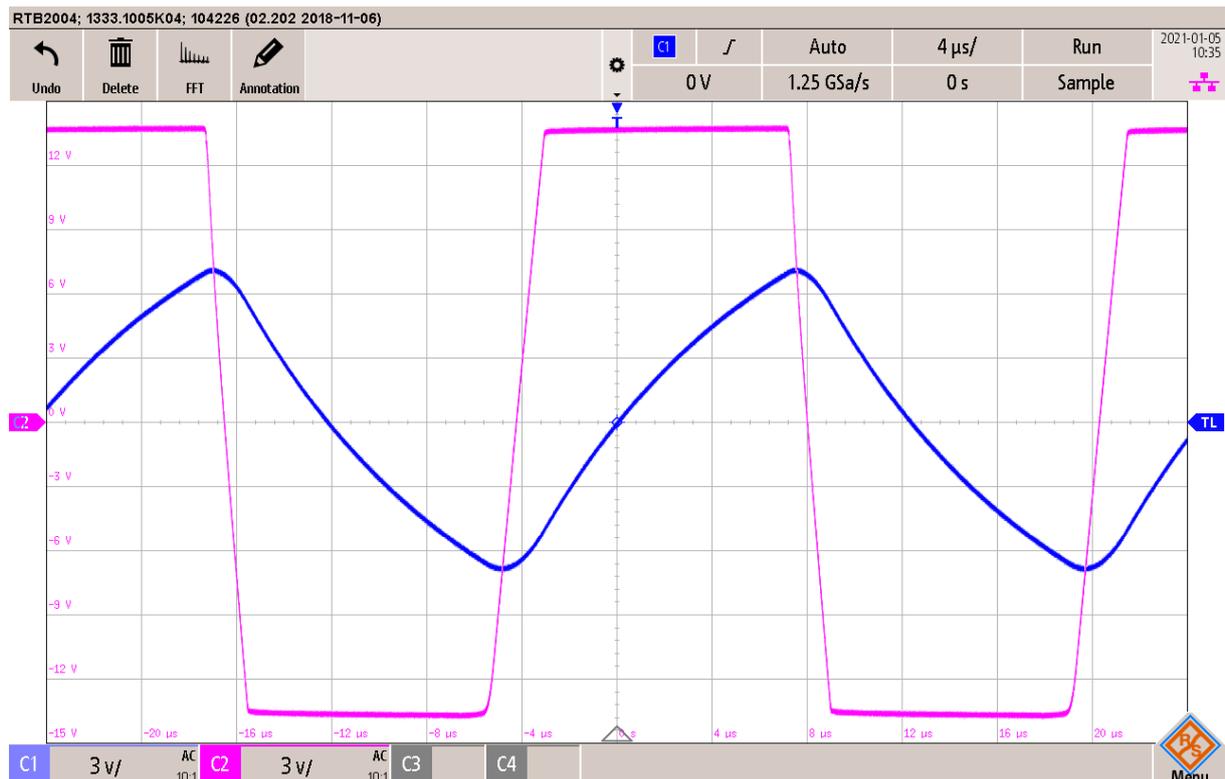


Figure F8. Enregistrement des signaux fournis par l'oscillateur de relaxation. La base de temps est de  $4 \mu\text{s}/\text{div}$  et l'amplification est de  $3 \text{ V}/\text{div}$  pour les deux voies de mesure.

⇒ Étude de la phase de croissance.

**Q36.** On suppose qu'à l'instant  $t=0$  le condensateur est déchargé et que la tension de sortie de l'amplificateur U0 vaut  $+V_{sat}$ . Établir l'équation différentielle régissant la tension  $v_c(t)$ .

**Q37.** En déduire l'équation horaire de  $v_c(t)$  et l'instant  $t_1$  de fin de cette phase.

⇒ **Étude la phase de décroissance.**

**Q38.** Expliquer pourquoi  $v_c$  se met à décroître.

**Q39.** Établir l'équation différentielle de  $v_c$  dans cette phase.

**Q40.** En déduire l'équation horaire de  $v_c(t)$ , et l'instant  $t_2$  de fin de cette phase.

**Q41.** Déterminer, d'après la durée de la deuxième phase, l'expression littérale de la période de  $v_c$ .

**Q42.** Déduire de l'enregistrement de la Figure F8 les valeurs numériques approchées des quantités suivantes :  $V_{sat}$  ; le rapport  $R_2 / R_1$  et le produit  $RC$ . Pour le calcul numérique du logarithme népérien on pourra considérer les nombres entre 2,5 et 3 comme voisins de 2,72.

⇒ **Limites de fonctionnement de l'oscillateur**

**Q43.** Quelles caractéristiques de l'amplificateur peuvent entraîner une possible limitation de la fréquence de cet oscillateur ? Donner un ordre de grandeur de ces limitations.

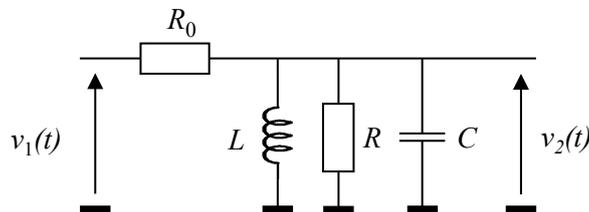
**Q44.** Ces limitations sont-elles visibles sur la Figure F8 ?

## C.II. Oscillateur quasi sinusoïdal

Cet oscillateur sera construit autour d'un filtre et d'un montage amplificateur. Ces deux blocs fonctionnels sont tout d'abord étudiés séparément.

### C.II.1. Étude du filtre

Sur la Figure F9 on donne le schéma d'un filtre. On note  $\underline{H}_F(\omega)$  sa fonction de transfert.



**Figure F9.** Schéma du filtre.

**Q45.** Déterminer l'expression de  $\underline{H}_F(\omega)$  et la mettre sous la forme  $\underline{H}_F = \frac{H_0}{1 + jQ_F \left[ x - \frac{1}{x} \right]}$  avec

$$x = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad \omega_0 \text{ étant la pulsation propre du filtre.}$$

Expliciter littéralement  $Q_F$ ,  $H_0$  et la fréquence caractéristique  $f_0$ .

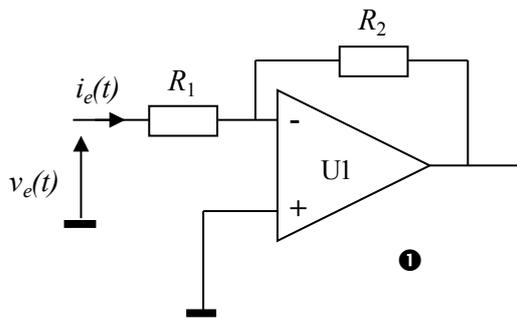
**Q46.** Donner l'expression reliant le facteur de qualité, la fréquence propre et la bande passante à -3 dB.

On choisit  $R_0 = 470 \, \Omega$ ,  $R = 120 \, \Omega$ ,  $L = 50 \, \mu\text{H}$  et  $C = 50 \, \text{nF}$  de sorte que :  $H_0 \approx 0,2$ ,  $f_0 \approx 100 \, \text{kHz}$  et  $Q_F \approx 3$ .

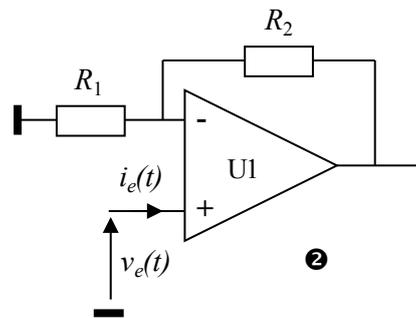
- Q47.** Faire une représentation graphique approchée du gain en décibel  $G_{dB}$  en fonction de  $\log(x)$  ; préciser quelques valeurs sur ce graphe. Faire apparaître sur ce graphe la "bande passante à -3 dB".

### C.II.2 Étude de l'amplificateur

On considère deux structures possibles à placer en sortie du filtre pour amplifier le signal (Figures F10 et F11). Le circuit U1 est un amplificateur linéaire intégré supposé idéal.



**Figure F10.** Structure amplificatrice n°1.



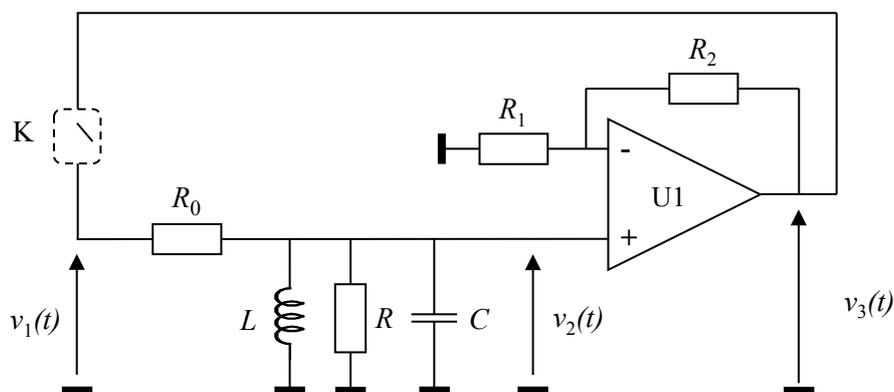
**Figure F11.** Structure amplificatrice n°2.

- Q48.** Déterminer, en précisant bien les hypothèses faites, les fonctions de transfert de ces deux structures, notées respectivement  $\underline{A}_1$  et  $\underline{A}_2$ .
- Q49.** Déterminer les impédances d'entrée  $Z_{e1}$  et  $Z_{e2}$  de chaque montage et expliquer pourquoi la structure n°2 est a priori un meilleur choix pour l'application envisagée.
- Q50.** En déduire alors l'expression de la fonction de transfert globale du montage associant les deux blocs fonctionnels filtre puis amplificateur en la mettant sous la forme  $\underline{H}_{FA} = \frac{H_1}{1 + jQ \left[ x - \frac{1}{x} \right]}$  ; expliciter  $H_1$  et  $Q$ .

### C.II.3 Étude des oscillations

On associe maintenant les deux blocs en connectant la sortie du montage amplificateur à l'entrée du filtre, réalisant le système dont le schéma est donné Figure F12.

La sortie de l'amplificateur U1, toujours supposé dans un premier temps comme idéal, est connectée à l'entrée du filtre au travers d'un interrupteur K.



**Figure F12.** Structure bouclée associant le filtre et l'étage amplificateur.

À l'instant  $t = 0$  on ferme l'interrupteur K, le condensateur  $C$  étant déchargé.

**Q51.** Déterminer l'équation différentielle régissant l'évolution de la tension  $v_3(t)$  ; on fera apparaître dans cette équation la pulsation propre, le facteur de qualité et le gain maximal.

On désire obtenir à la fermeture de l'interrupteur des oscillations pseudo-périodiques d'amplitude croissante.

**Q52.** À quelle condition sur  $H_1$  cela sera-t-il possible ?

**Q53.** Que vaut la fréquence d'oscillation pendant la phase de démarrage ?

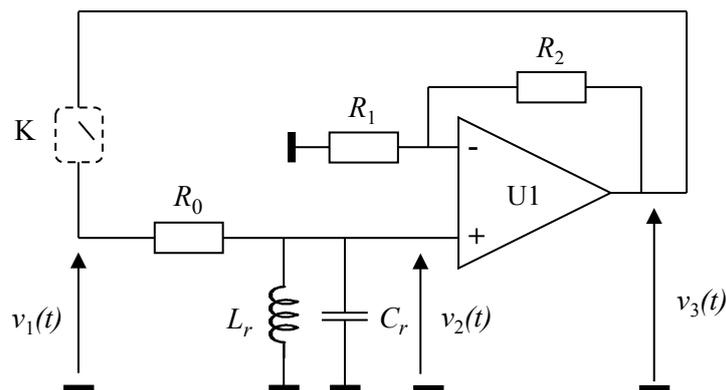
**Q54.** À quelles conditions la fréquence des oscillations peut-elle être considérée comme égale à la fréquence propre du filtre ?

**Q55.** En considérant d'une part l'étude précédente, et d'autre part le fait que le circuit U1 n'est pas idéal expliquer pourquoi il est préférable que le gain de l'étage amplificateur ne soit pas trop grand.

## C.II.4 Oscillateur réel et modélisation de dipôle

### C.II.4.1 Schéma réel de l'oscillateur

Le schéma réel de l'oscillateur est donné figure F13, indiquant les composants réactifs *réels* à implémenter sur un circuit imprimé.



**Figure F13.** Schéma réel de l'oscillateur.

**Q56.** Quelle différence voit-on entre les schémas des figures F12 et F13 ?

**Q57.** Quel composant du schéma Figure F13 peut expliquer, par une étude de son modèle physique, le fait que les deux schémas des Figures F12 et F13 puissent être bien équivalents ?

### C.II.4.2 Réalisation d'une inductance

On considère une bobine de longueur  $l_B$  comportant  $N_{sp}$  spires jointives de section  $S_B$ .

Une expression approchée de l'inductance d'une bobine est la suivante : 
$$L_{sp} = \frac{\mu_0 N_{sp}^2 S_B}{l_B}.$$

On donne  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ .

Cette inductance peut par exemple être fabriquée avec du fil de cuivre, enrobé d'un isolant. On pourrait choisir par exemple un fil de référence AWG-38, correspondant, selon la norme américaine ASTM-B258 très largement utilisée même en Europe, à un diamètre  $d_{Cu} = 101 \mu\text{m}$ . L'isolant a une épaisseur

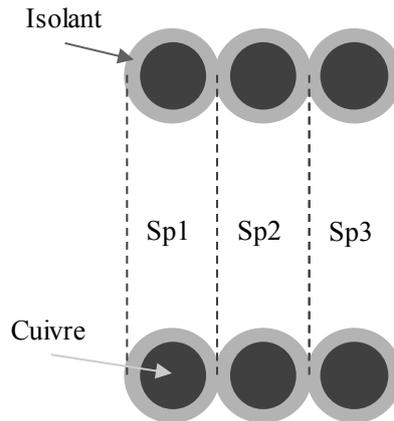
$t_i = 7,5 \mu\text{m}$ . La conductivité du cuivre est  $\sigma_{\text{Cu}} = 5,88 \times 10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ . Les valeurs numériques sont seulement données à titre d'exemple.

Le rôle de l'isolant est d'éviter que les spires jointives ne se court-circuitent entre elles.

**Q58.**

**Q59.** Expliquer pourquoi on peut considérer que deux spires adjacentes forment un condensateur.

On considère trois spires successives, Sp1, Sp2 et Sp3 comme indiquées sur la Figure F14. On appelle  $C_i$  la capacité d'un condensateur formé par deux spires adjacentes.



**Figure F14.** Trois spires adjacentes, Sp1, Sp2 et Sp3.

**Q60.** En considérant comment sont placés les condensateurs formés par {Sp1-Sp2} d'une part et {Sp2-Sp3} d'autre part, déterminer la capacité résultant de l'ensemble des spires.

**Q61.** Comment tenir compte de ce condensateur, que l'on peut qualifier de "parasite", dans un nouveau schéma équivalent complet de la bobine.

**Q62.** Quelles sont les conséquences de la présence de ce condensateur parasite ?

## C.II.5 Stabilité de l'oscillateur

La stabilité d'un oscillateur est un critère fondamental de sa qualité, qu'il est indispensable de prendre en compte selon la précision nécessaire pour une application. On considère en général la stabilité à court-terme et la stabilité à long-terme.

### C.II.5.1 Oscillateur quasi-sinusoïdal

On considère (Figure F15) le schéma théorique de l'oscillateur comme à la Figure F12. On suppose qu'il fonctionne en régime permanent et pour simplifier on fait l'hypothèse que l'oscillateur est de type quasi-sinusoïdal. Les signaux  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  et  $v_3(t)$  sont alors considérés comme sinusoïdaux, on peut donc raisonner dans l'espace des fréquences et noter les signaux  $\underline{V}_1$ ,  $\underline{V}_2$  et  $\underline{V}_3$  en représentation complexe.

Le filtre (entrée  $\underline{V}_1$ , sortie  $\underline{V}_2$ ) a pour fonction de transfert  $\underline{H}_F$ .

L'amplificateur (entrée  $\underline{V}_2$ , sortie  $\underline{V}_3$ ) a pour fonction de transfert  $\underline{A}$ .

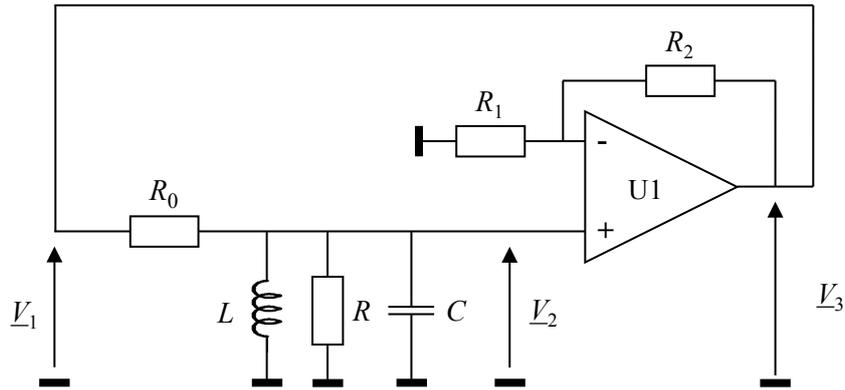


Figure F15. Oscillateur considéré en fonctionnement sinusoïdal.

**Q63.** Exprimer  $V_2$  en fonction de  $V_1$ ,  $V_3$  en fonction de  $V_2$  et  $V_1$  en fonction de  $V_3$ . En déduire une relation entre  $A$  et  $H_F$  valable s'il y a effectivement oscillation. Cette relation est appelée condition d'oscillation.

**Q64.** Montrer que la condition d'oscillation conduit à la relation  $\text{Arg}[H_F(\omega)] = 0$ .

### C.II.5.2 Stabilité à court-terme

On suppose maintenant qu'en sortie de l'amplificateur il y a une petite fluctuation de phase, exprimée par le gain de l'amplificateur  $A' = A_0 e^{j\delta\psi}$  où  $A_0$  est un réel positif.

**Q65.** Quelle est la nouvelle condition d'oscillation relative à la phase de  $H_F(\omega)$  ?

On considère que la fluctuation de phase  $\delta\psi$  induit une fluctuation  $\delta\omega$  de la pulsation d'oscillation, petite par rapport à la pulsation propre. On pourra donc écrire que  $\omega = \omega_0 + \delta\omega$  dans l'expression de  $H_F$  sous forme canonique.

**Q66.** Déduire, à partir de la condition d'oscillation et de l'expression de  $H_F$  simplifiée grâce à l'hypothèse précédente, l'expression de la variation  $\delta\omega$  de la pulsation. Calculer alors la fluctuation de fréquence pour  $\delta\psi = 1^\circ$ .

**Q67.** Que se passe-t-il si la fluctuation  $\delta\psi$  varie au cours du temps mais avec une amplitude faible ? Quel serait alors l'aspect du spectre du signal de l'oscillateur ?

**Q68.** Conclure sur la façon d'améliorer la qualité de l'oscillateur.

Fin de la partie

## Étude de quelques phénomènes naturels et environnementaux

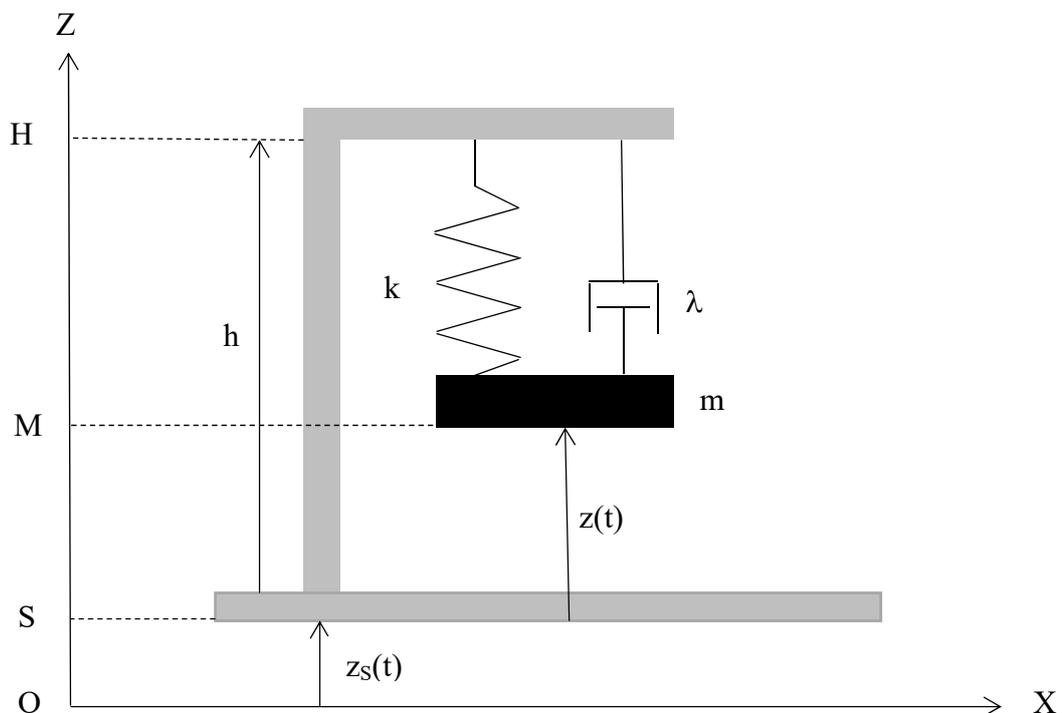
### Partie I - Séisme

Un séisme ou tremblement de terre est une secousse du sol résultant de la libération brusque d'énergie accumulée par les contraintes exercées sur les roches. Cette libération d'énergie provient de la rupture des roches le long d'une faille préexistante, d'une activité volcanique. Elle peut être aussi d'origine artificielle (explosions par exemple). Les mouvements des roches engendrent des vibrations élastiques qui se propagent, sous la forme de paquets d'ondes sismiques, autour et au travers du globe terrestre.

Les mouvements du sol sont étudiés par l'intermédiaire de sismographes. L'acquisition et l'enregistrement du signal s'obtiennent dans une station sismique regroupant, outre les sismographes eux-mêmes, des enregistreurs, des numériseurs, des horloges et des antennes GPS.

#### I.1 - Étude du sismographe

Un sismographe simple (**figure 1**) est constitué d'un support rigide de hauteur  $h$ , auquel on suspend une masse  $m$ , supposée ponctuelle, par l'intermédiaire d'un ressort de masse négligeable de raideur  $k$ , de longueur à vide  $l_0$  et d'un amortisseur de coefficient de frottement  $\lambda$ . Cet amortisseur exerce sur la masse  $m$  une force :  $\vec{F}_a = \lambda \frac{d(h-z)}{dt} \vec{e}_z = -\lambda \frac{dz}{dt} \vec{e}_z$ .



**Figure 1 - Sismographe**

Un mouvement vertical du sol déclenche un mouvement vertical de la masse  $m$  caractérisé par la fonction  $z(t)$  dans le référentiel lié au sol.

On pose :  $z(t) = z_{\text{éq}} + u(t)$ . La position  $z = z_{\text{éq}}$  correspond à la position d'équilibre de la masse  $m$  en l'absence de séisme et  $u(t)$  représente l'écart par rapport à l'équilibre.

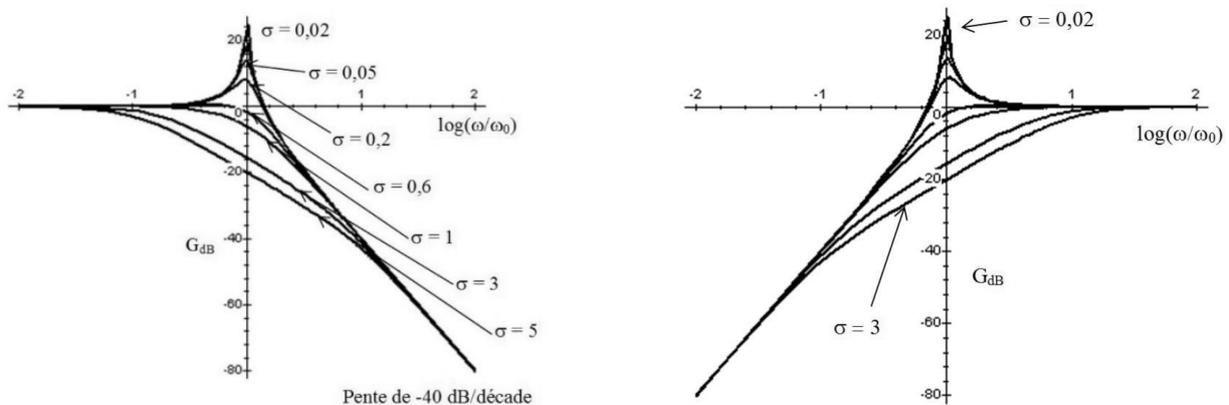
On modélise une composante en fréquence de la vibration verticale du sol par rapport à un référentiel galiléen  $(O, X, Y, Z)$  au moyen de la fonction :  $z_s(t) = Z_0 \cos(\omega t)$ .

**Q1.** Écrire l'équation différentielle qui relie  $z(t)$ ,  $z_s(t)$ ,  $m$ ,  $g$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ,  $k$  et  $l_0$ . Préciser l'expression de  $z_{\text{éq}}$ , puis l'équation différentielle qui relie  $u(t)$ ,  $z_s(t)$ ,  $m$ ,  $\lambda$  et  $k$ .

Le sismographe peut être assimilé à un système linéaire de fonction de transfert :

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{u(t)}{z_s(t)}.$$

On donne sur la **figure 2** les diagrammes de Bode en amplitude pour des filtres du second ordre.



$$\underline{H}(j\omega) = \frac{H_0}{1 + 2j\sigma \frac{\omega}{\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{H_0 \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}{1 + 2j\sigma \frac{\omega}{\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

**Figure 2** - Diagrammes de Bode en amplitude

- Q2.** Déterminer l'expression de la fonction de transfert du sismographe en fonction de  $m$ ,  $k$ ,  $\lambda$ ,  $\omega$  et  $j$ , nombre complexe tel que  $j^2 = -1$ . De quel type de filtre s'agit-il ?
- Q3.** Préciser l'expression de l'amplitude  $U$  de la réponse verticale  $u(t)$  du régime forcé de la masse  $m$  en fonction de  $Z_0$ ,  $m$ ,  $k$ ,  $\lambda$  et  $\omega$ .
- Q4.** Écrire deux conditions portant sur la fréquence et les rapports  $\frac{k}{m}$  et  $\frac{\lambda}{m}$  pour que l'amplitude  $U$  du mouvement de la masse  $m$  soit égale à l'amplitude  $Z_0$  du sol. La suspension est-elle qualifiée de souple ou de rigide ? La masse  $m$  vibre-t-elle en phase, en quadrature de phase ou en opposition de phase avec le sol ?
- Q5.** Le cahier des charges du sismographe impose d'éviter tout phénomène de résonance, ce qui impose une condition supplémentaire sur la grandeur sans dimension  $\frac{\lambda}{\sqrt{k \cdot m}}$ . Préciser cette condition supplémentaire à l'aide d'une inégalité.

## I.2 - Spectre d'un signal numérique

Nous nous proposons ici d'illustrer quelques impacts de la numérisation du signal sismique sur son spectre. Pour des raisons de facilité, cette étude est menée à plus haute fréquence avec le matériel usuel du laboratoire de sciences physiques du lycée. Elle se généralise à tout enregistrement numérique.

Rappels sur le fonctionnement de l'oscilloscope numérique

- Lors d'un enregistrement, l'oscilloscope numérique discrétise et enregistre un signal sur une durée égale à la durée de balayage, soit  $10 \text{ carreaux} \times \text{base de temps}$ .
- Le nombre d'échantillons enregistrés est toujours le même et égal à 2 480. La période d'échantillonnage dépend ainsi de la durée d'enregistrement et donc de la base de temps.
- Un menu permet l'affichage du spectre du signal échantillonné. Pour tous les spectres fournis dans cet énoncé, les amplitudes relatives des différentes composantes en fréquence sont représentées sur une échelle en dB en ordonnées. L'échelle des abscisses est linéaire, graduée de  $f = 0 \text{ Hz}$  jusqu'à une fréquence  $f_{\text{max}}$  qui dépend de la base de temps. Deux curseurs verticaux, dénommés X1 et X2, permettent de pointer deux fréquences pour une lecture aisée de leur valeur sur l'écran.

Expérience 1

Un signal sinusoïdal est délivré par le GBF et est envoyé sur l'oscilloscope numérique. Il a été enregistré avec une base de temps de  $250 \mu\text{s}$  par division comme indiqué en bas de l'écran. Il est à la fois représenté dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel sur l'oscillogramme 1 de la **figure 3**.

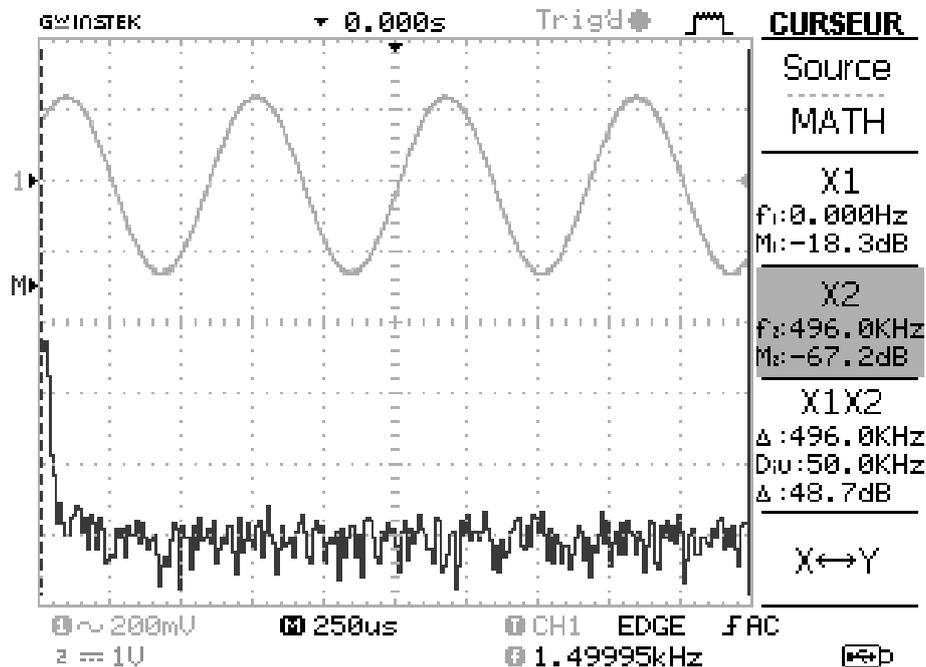
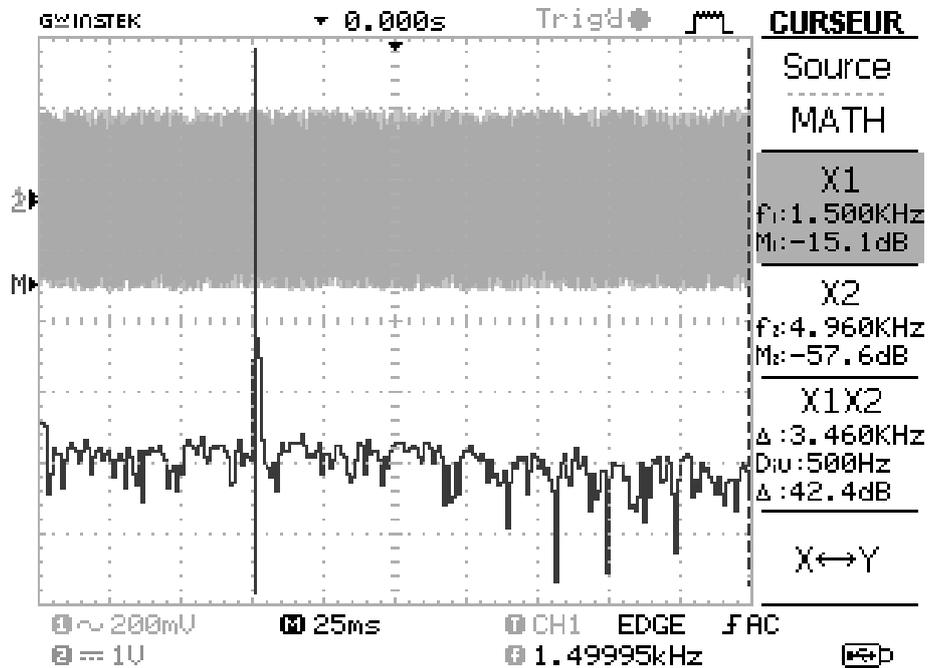


Figure 3 - Oscillogramme 1

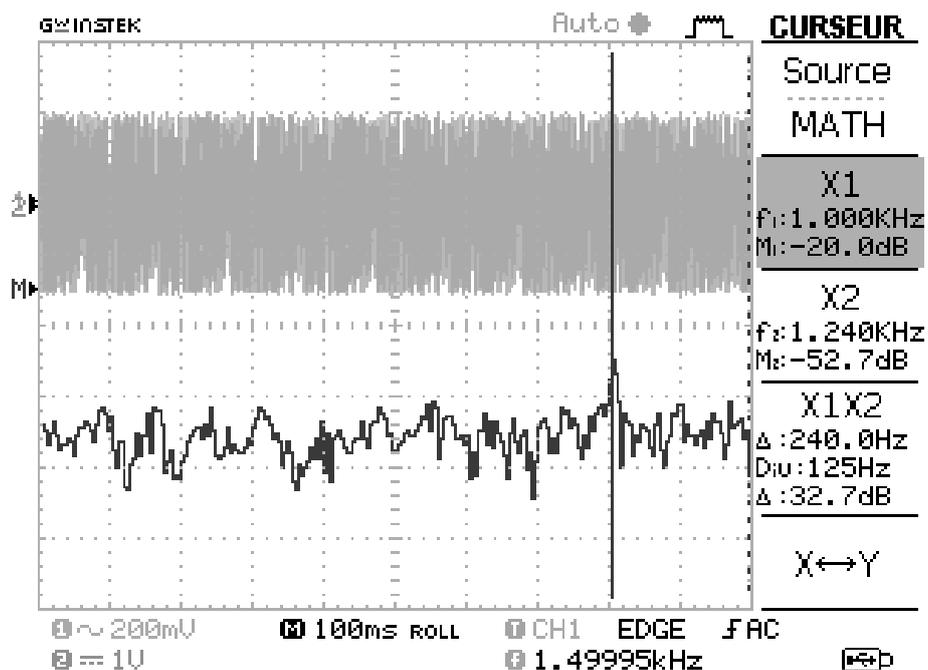
- Q6. Déterminer la période et la fréquence du signal sinusoïdal.  
Déterminer une valeur approchée de la fréquence d'échantillonnage de cet enregistrement.  
Quel lien existe-t-il entre la plus haute fréquence  $f_{\text{max}} = 496 \text{ kHz}$ , repérée par le curseur 2, et la fréquence d'échantillonnage ?

- Q7.** Pour un repérage aisé du pic en fréquence au moyen du curseur X1, il faut dilater l'échelle des fréquences. Quel ajustement proposez-vous de faire sur l'oscilloscope ?  
 Est-ce cohérent avec le nouvel oscillogramme 2 de la **figure 4** ?  
 La nouvelle valeur de la plus grande fréquence  $f_{max}$  de ce spectre était-elle prévisible ? Si oui comment ?



**Figure 4 - Oscillogramme 2**

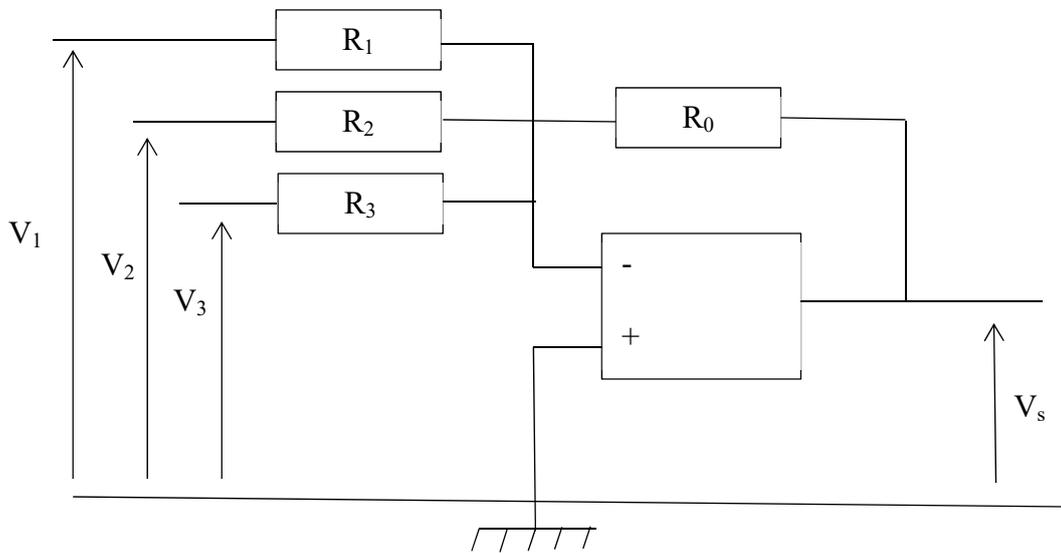
- Q8.** On renouvelle cette opération et on obtient l'oscillogramme 3 de la **figure 5**. Expliquez la valeur  $f = 1$  kHz de la fréquence donnée par le curseur X1.



**Figure 5 - Oscillogramme 3**

Expérience 2

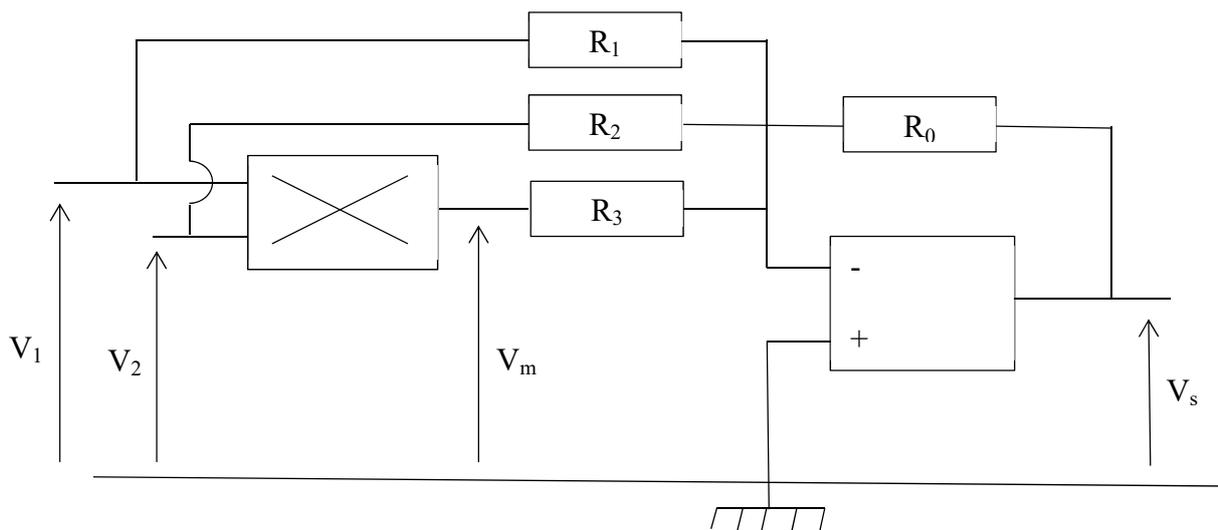
On considère le montage électronique 1 (**figure 6**) où l'A.Li. est considéré comme parfait et fonctionne en régime linéaire.  $V_1, V_2, V_3$  correspondent aux trois tensions d'entrée et  $V_s$  est la tension de sortie.



**Figure 6** - Montage électronique 1

**Q9.** Déterminer l'expression de  $V_s$  en fonction de  $V_1, V_2, V_3, R_0, R_1, R_2$  et  $R_3$ . Proposer un nom à ce montage.

On associe au montage précédent un multiplieur dont les deux tensions d'entrée sont  $V_1$  et  $V_2$ . Il délivre en sortie la tension  $V_m$  avec :  $V_m(t) = kV_1(t)V_2(t)$ , où  $k = 0,1 \text{ V}^{-1}$ . On aboutit au montage électronique 2 de la **figure 7**.



**Figure 7** - Montage électronique 2

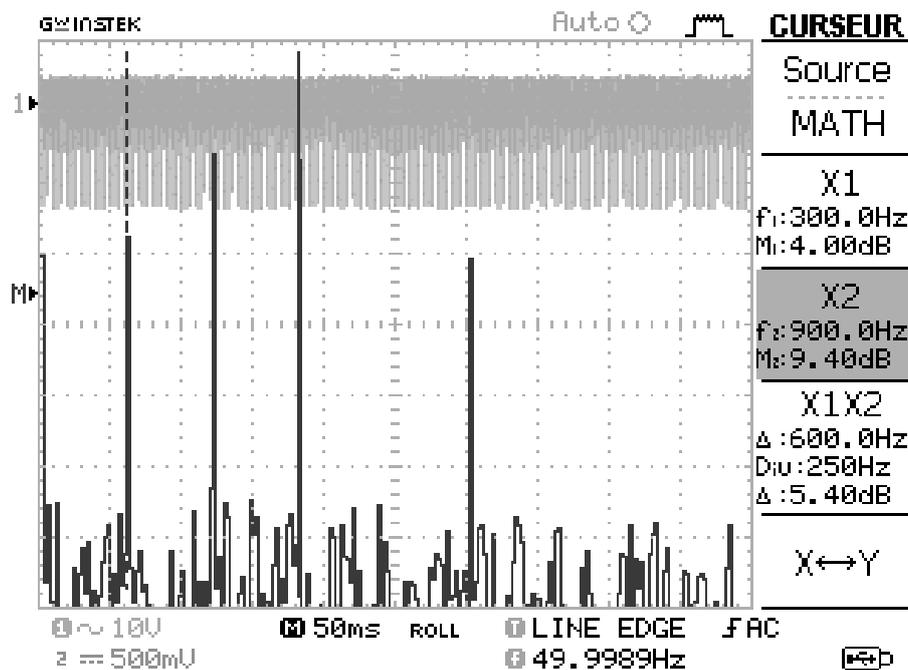
$V_1(t)$  et  $V_2(t)$  sont respectivement deux tensions sinusoïdales de même amplitude maximale  $V_0$  et de fréquence  $f_1$  et  $f_2$ . On pose :  $V_1(t) = V_0 \cos(2\pi f_1 t)$  et  $V_2(t) = V_0 \cos(2\pi f_2 t)$ .

**Q10.** On suppose ici que  $R_0 = R_1 = R_2 = R_3$ .

Tracer l'allure du spectre théorique de la tension de sortie  $V_s$ .

**Q11.** Comment est modifié ce spectre lorsque  $R_0 = R_1 = R_2 = 2R_3$  ?

**Q12.** L'enregistrement du signal  $V_s$  et la détermination de son spectre par l'oscilloscope numérique sont donnés sur l'oscillogramme 4 de la **figure 8**.



**Figure 8** - Oscillogramme 4

Déterminer les valeurs des fréquences  $f_1$  et  $f_2$ .