Epreuve de Physique A

Durée 4h

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de calculatrices est interdit.

AVERTISSEMENT

La **présentation**, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la **rédaction, la clarté et la précision** des raisonnements entreront pour une **part importante** dans **l'appréciation des copies**. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats de leurs calculs.

CONSIGNES :

- Composer lisiblement sur les copies avec un stylo à bille à encre foncée : bleue ou noire.
- L'usage de stylo à friction, stylo plume, stylo feutre, liquide de correction et dérouleur de ruban correcteur est interdit.
- Remplir sur chaque copie en MAJUSCULES toutes vos informations d'identification : nom, prénom, numéro inscription, date de naissance, le libellé du concours, le libellé de l'épreuve et la session.
- Une feuille, dont l'entête n'a pas été intégralement renseigné, ne sera pas prise en compte.
- Il est interdit aux candidats de signer leur composition ou d'y mettre un signe quelconque pouvant indiquer sa provenance

Tournez la page S.V.P

Dans le vingt-et-unième album de la série *Les Aventures de Tintin*, intitulé *Les Bijoux de la Castafiore*, cette dernière offre un perroquet au capitaine Haddock et serait en mesure de faire exploser un verre par la simple utilisation de sa voix. Le présent sujet se penche sur les aspects physiques de ces phénomènes : couleurs du perroquet et endommagement d'un verre par une onde sonore.

Ce sujet comporte un document réponse à rendre avec la copie.

I - Couleurs du perroquet

L'extraordinaire diversité des motifs colorés des oiseaux résulte de phénomènes physiques tels que l'absorption de la lumière, la diffusion, les interférences ou encore la diffraction.
Certains motifs peuvent être expliqués soit par une répartition organisée du plumage, on parle alors de couleurs structurales, soit par la présence de pigments dans le plumage, on parle alors de couleurs pigmentaires.

Dans cette sous-partie, on s'intéressera aux couleurs structurales et on expliquera comment la couleur d'un plumage varie selon l'angle d'observation. C'est le cas pour certains perroquets, mais aussi plus couramment à nos latitudes pour le canard colvert mâle.

De façon schématique, une plume est constituée essentiellement d'un rachis sur lequel pousse les barbes sur lesquelles naissent des barbules (figure 1). Le long des barbules prennent naissance à leur tour des crochets.

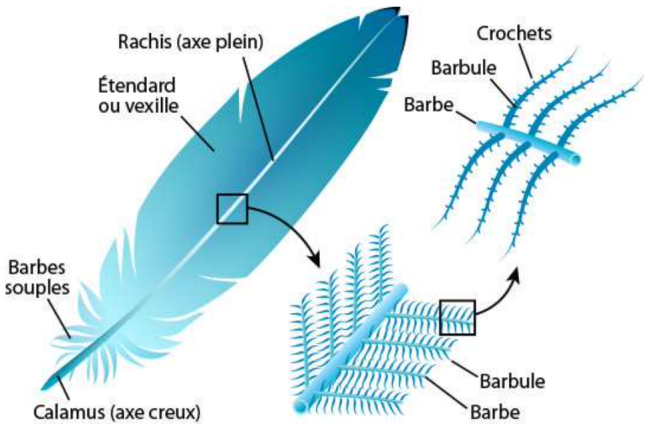


FIGURE 1

Dans notre cas, il faut étudier l'intérieur des barbules, constituées notamment de petites cavités dans lesquelles on trouve de minces lamelles parallèles appelées microlamelles (figure 2).

Chaque microlamelle se comporte comme un petit miroir réfléchissant la lumière. Entre deux lamelles se situe de la mélanine absorbant la lumière. Ainsi ces microlamelles s'apparentent aux traits d'un réseau plan qui peut être modélisé soit par la figure 3,.a soit par la figure 3.b :

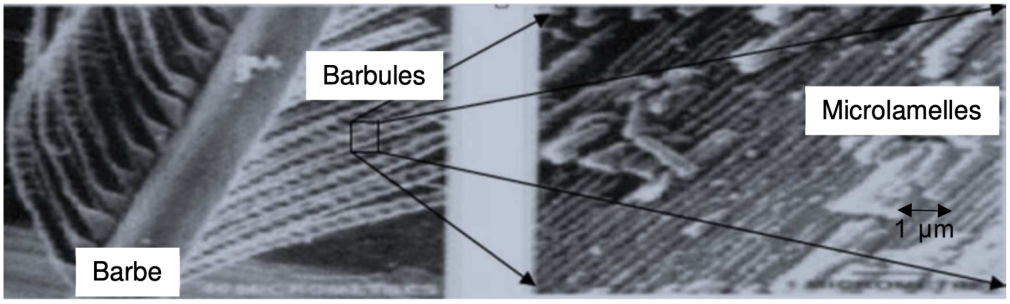
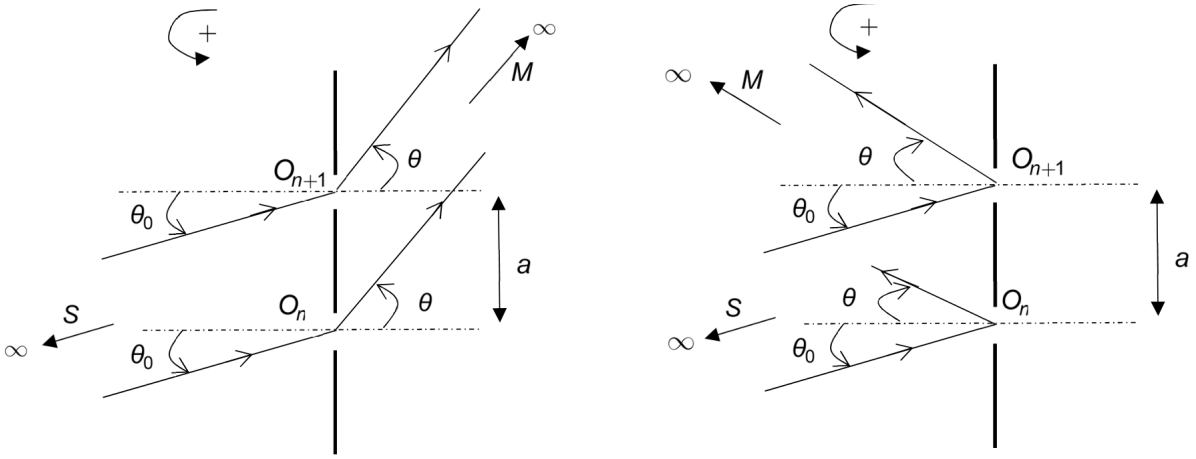


FIGURE 2



(a) - Réseau par transmission (b) - Réseau par réflexion

FIGURE 3

La distance entre deux lamelles est notée a. On donne $a = 0,5\,\mu$m.
S représente une source de lumière monochromatique, de longueur d'onde λ_0, située à l'infini, envoyant un faisceau de rayons cohérents entre eux. L'observation se fait en un point M situé à l'infini.

1. La structure en microlamelles constitue-t-elle un réseau par réflexion ou par transmission ?

2. Déterminer, dans le cas du réseau plan par transmission, la différence de marche $\delta(M) = (SO_{n+1}M) - (SO_nM)$ entre deux rayons, l'un passant par O_{n+1}, l'autre par O_n.

3. Pour quelles valeurs de $\delta(M)$ les ondes interfèrent entre-elles de façon totalement constructive ?

4. Dans le cas des réseaux par réflexion, montrer par analogie que les maximums d'intensité lumineuse sont donnés pour des angles θ_k tels que :

$$\sin(\theta_k) + \sin(\theta_0) = k\frac{\lambda_0}{a}$$

avec k un entier relatif.

5. On suppose que deux observateurs regardent le perroquet, dont les. microlamelles sont éclairées en incidence normale par des rayons provenant du Soleil. L'observateur A se situe loin du perroquet et regarde les microlamelles sous un angle de 90°, l'observatrice B regarde sous un angle de 45°.
De quelle couleur les observateurs verront le perroquet ? On justifiera que l'on ne tient compte que des ordres $k = \pm 1$.

II - Briser un verre avec sa voix

Nous tenterons ainsi de déterminer les circonstances dans lesquelles il est effectivement possible de réaliser une telle prouesse et nous nous pencherons sur les rôles joués par les différents paramètres physiques susceptibles d'influer sur ces circonstances.

Les trois parties de cette partie sont largement indépendantes, mais les données numériques fournies ou calculées dans les différentes parties sont susceptibles d'être utilisées dans toutes les parties.

A - Analyse expérimentale des vibrations du verre

Il est extrêmement facile, en frappant un verre à pied, d'entendre le son que celui-ci émet. On se propose dans cette partie de déterminer, à partir d'une modélisation simple, quelques propriétés des oscillations libres d'un verre mis ainsi en vibration.

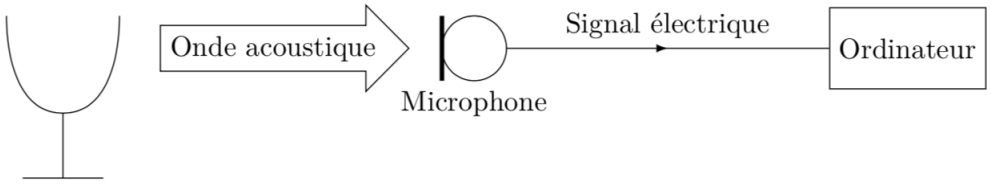


FIGURE 4

Un verre à pied, d'un diamètre de 12 cm, est frappé, à l'instant $t = 0$, au niveau du bord supérieur à l'aide d'un petit marteau. Le son émis est enregistré par ordinateur. Son analyse spectrale peut alors être réalisée à tout moment de l'enregistrement. Le microphone utilisé pour l'enregistrement présente une courbe de réponse en fonction de la fréquence donnée sur la figure 5.

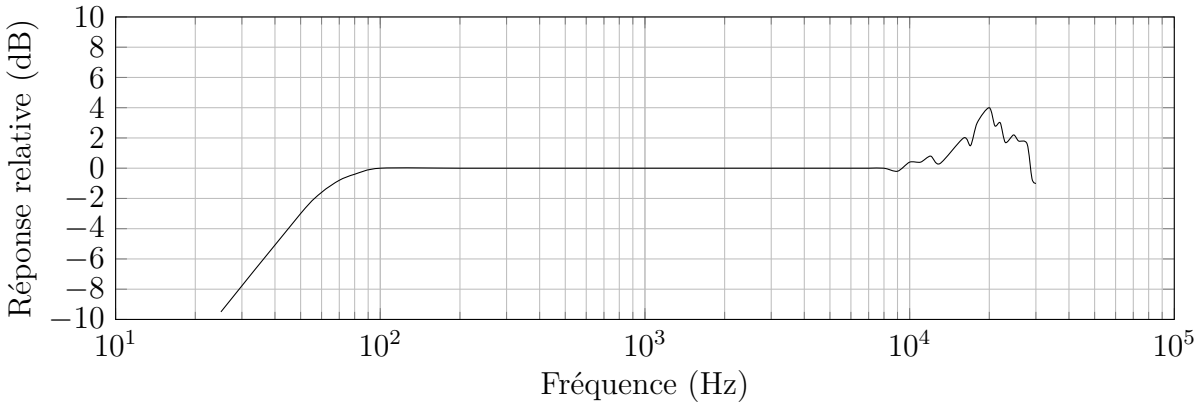


FIGURE 5 – Réponse relative du microphone en fonction de la fréquence

La figure 6 représente le chronogramme de cet enregistrement et la figure 7 une analyse spectrale réalisée peu après le début de l'enregistrement. La figure 8 présente son analyse spectrale aux dates $t = 1.0$, 2.0, 3.0 et 4.0 s.

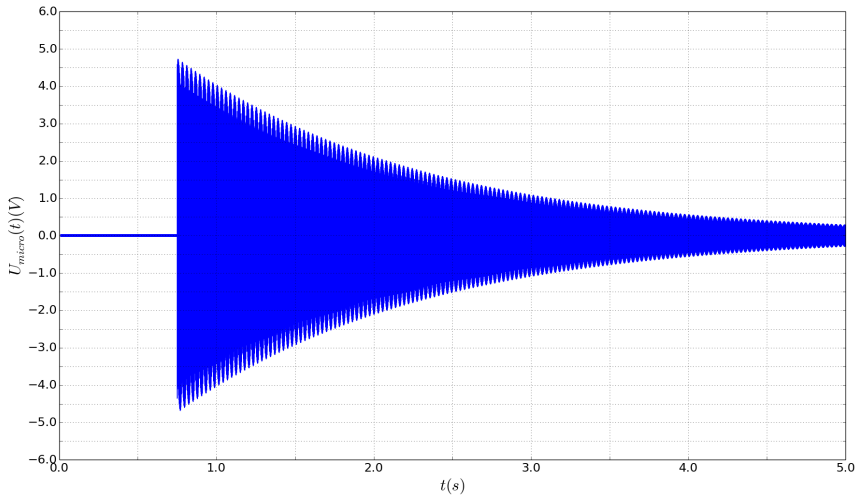


FIGURE 6 – Chronogramme de l'enregistrement sonore du verre

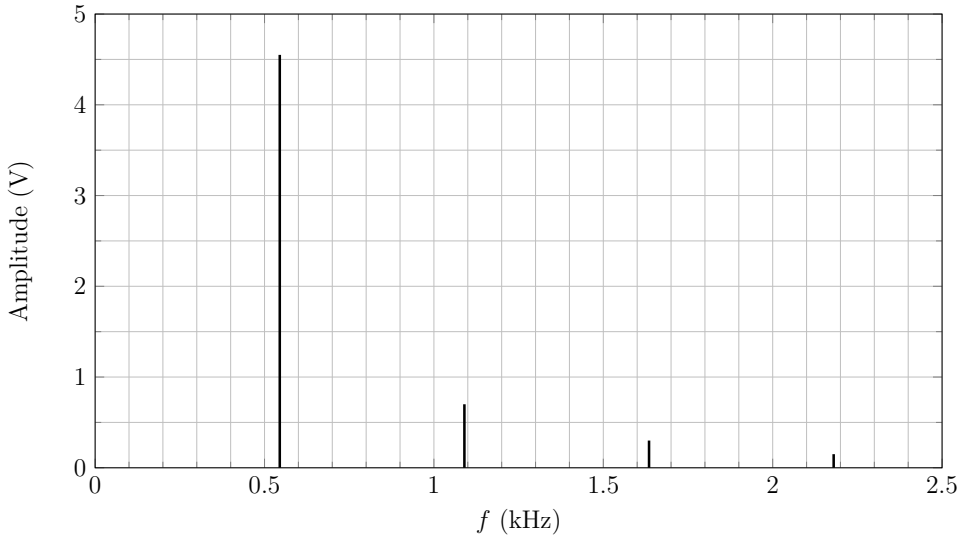


FIGURE 7 – Analyse spectrale du son réalisée peu après la frappe du verre

A.1 - Analyse qualitative de l'enregistrement

Les « pics » représentés dans les analyses spectrales correspondent à des modes propres de vibration du verre.

6. Que signifie la présence de modes propres dans le signal enregistré ? Comment peut-on les nommer ?

7. Quelle est la fréquence du signal enregistré ?

8. Quelle caractéristique de la courbe de réponse du microphone est essentielle pour réaliser un enregistrement et une analyse spectrale représentant correctement le phénomène étudié ?

A.2 - Le microphone électrostatique

Le microphone électrostatique, dont la courbe de réponse est donnée figure 5, est constitué d'une membrane P_1 de surface S, extrêmement légère de masse m_e. Celle-ci, réalisée en métal (ou en polyester rendu conducteur par un saupoudrage de métal), est mobile et constitue l'une

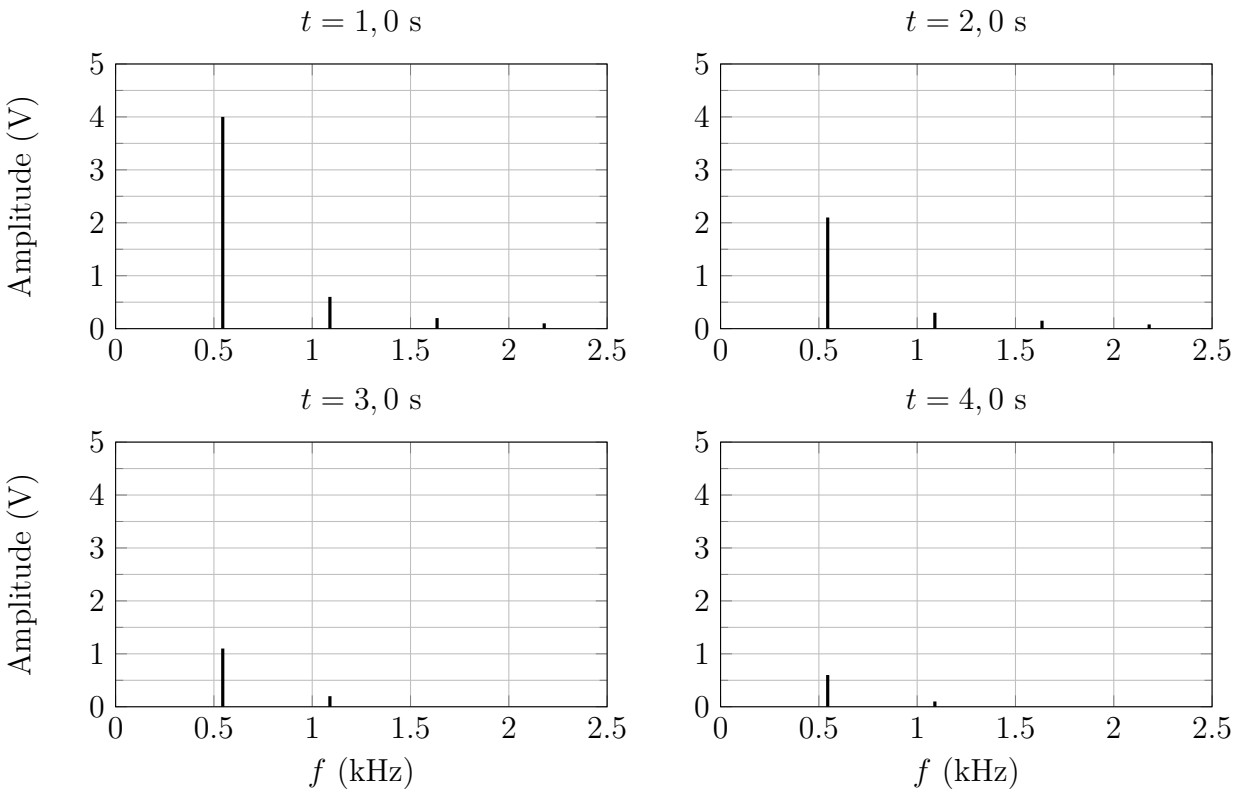


FIGURE 8 – Analyse spectrale du son à différents instants après la frappe du verre

des armatures d'un condensateur plan. L'espace entre la membrane P_1 et l'armature fixe P_2 est entièrement rempli d'air de permittivité électrique ε_0. Au repos, la distance entre les deux armatures parallèles est notée e. En mouvement, la liaison entre l'isolant et la membrane peut être modélisée par une force de rappel élastique de constante de raideur k_e.

Les variations de pression provoquées par l'onde sonore font varier la distance entre les deux armatures par un déplacement de la membrane parallèlement à l'axe Ox. Ce déplacement induit une variation de la capacité et cet effet est exploité dans le circuit électrique de la figure 9 de manière à récupérer le signal $u(t)$ aux bornes de la résistance $R = 10$ kΩ. Les variations de $u(t)$ sont à l'image de celles de la pression acoustique.

La membrane P_1 et l'armature fixe P_2 sont chargées uniformément par les charges $+q$ et $-q$. On associe à P_1 et P_2 les densités surfaciques uniformes de charges $+\sigma = +q/S$ pour P_1 et $-\sigma = -q/S$ pour P_2. De plus, on assimile les deux plaques à des plans infinis afin de négliger par la suite les effets de bord.

A.2.1 - Capacité du condensateur au repos

9. Montrer, par des considérations de symétrie et d'invariance, que le champ électrique $\vec{E}_1(M)$ créé par la plaque P_1 en tout point de l'espace est perpendiculaire à ce plan et ne dépend que d'une variable d'espace.

10. Justifier que $\vec{E}_1(M) = -\vec{E}_1(M')$ où M et M' sont deux points placés symétriquement par rapport au plan P_1.

11. En appliquant le théorème de Gauss sur une surface clairement indiquée, exprimer le champ électrique $\vec{E}_1(M)$.

12. Déduire du résultat précédent l'expression du champ électrique total $\vec{E}(M) = \vec{E}_1(M) + \vec{E}_2(M)$ créé par les deux plaques P_1 et P_2 en tout point de l'espace.

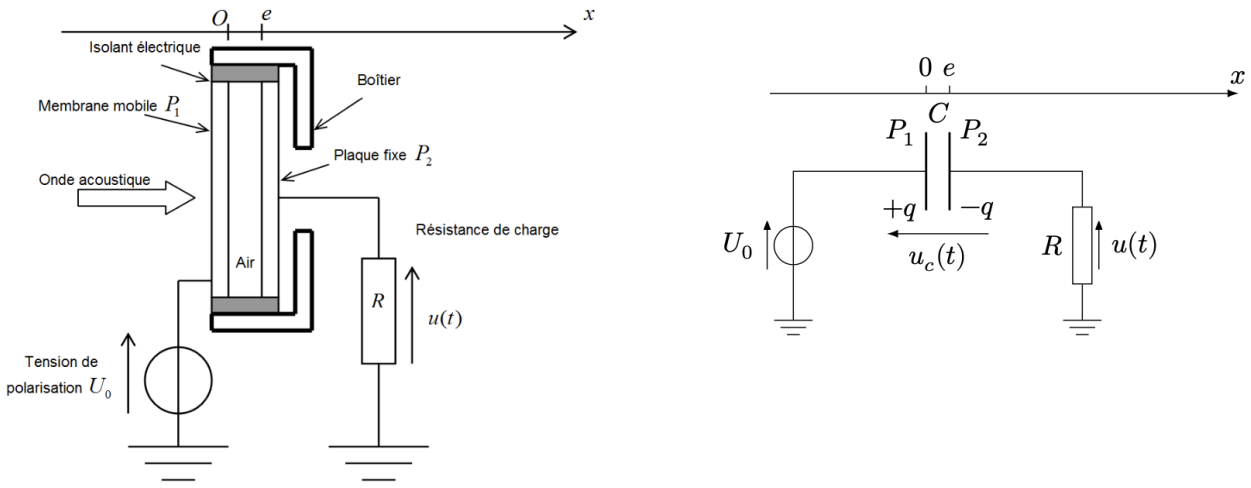


FIGURE 9 – Microphone électrostatique

13. Montrer que la différence de potentiel entre les deux plaques s'exprime par $u_c = V_{P_1} - V_{P_2} = q/C_0$ avec $C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{e}$, la capacité du condensateur au repos.

A.2.2 - Réponse du circuit électrique en régime permanent sinusoïdal

En raison d'une surpression sinusoïdale de pulsation ω, la membrane mobile P_1 oscille autour de sa position d'équilibre O selon l'équation $x_1(t) = X_1 \cos(\omega t)$ avec l'amplitude du déplacement $X_1 \ll e$.

14. À l'aide d'un développement limité, montrer que la capacité $C(t)$ du condensateur s'exprime par $C(t) = C_0 + C_1 \cos(\omega t)$. Préciser l'expression de C_1 en fonction de C_0, X_1 et e.

15. On note $u(t)$ la tension aux bornes de la résistance R et U_0 la tension de polarisation du condensateur. Établir la relation liant $u(t)$, U_0, R et $C(t)$.

16. En déduire, en précisant les approximations faites, l'équation différentielle traduisant l'évolution temporelle de la tension $u(t)$ sous la forme $\dfrac{du}{dt}(t) + \omega_0 u(t) = \omega A \cos\left(\omega t + \dfrac{\pi}{2}\right)$, avec $A = \dfrac{U_0 X_1}{e}$ et $\omega_0 = \dfrac{1}{RC_0}$.

En régime sinusoïdal forcé, la solution est de la forme $u(t) = U \cos(\omega t + \varphi_u)$.

17. Exprimer l'amplitude U en fonction de ω, ω_0, X_1, e et U_0.

18. Montrer, qu'en dessous de 10 kHz, le graphe $20 \log U$ en fonction de ω est compatible avec la réponse relative du microphone en fonction de la fréquence donnée figure 5.

19. Estimer alors l'ordre de grandeur de C_0.

Le modèle étudié précédemment ne prend pas en considération le couplage électromécanique du système dans les hautes fréquences. Celui-ci, devient prépondérant au-delà de 10 kHz, la réponse du microphone présente alors une résonance causée par les oscillations de la membrane au voisinage de sa position d'équilibre.

20. Donner un ordre de grandeur de $\sqrt{k_e/m_e}$.

A.3 - Estimation du facteur de qualité Q de la vibration du verre

Quand le verre est en vibration, son bord supérieur oscille autour de sa position au repos. Afin d'estimer le facteur de qualité du verre, on le modélise par une masse m mobile sur l'axe (Ox) horizontal associée à un ressort de raideur k, de longueur à vide nulle (figure 10). Les frottements seront, quant à eux, modélisés par un frottement fluide de type $\overrightarrow{f} = -\alpha\overrightarrow{v}$ où $\overrightarrow{v}$ désigne le vecteur vitesse de la masse m.

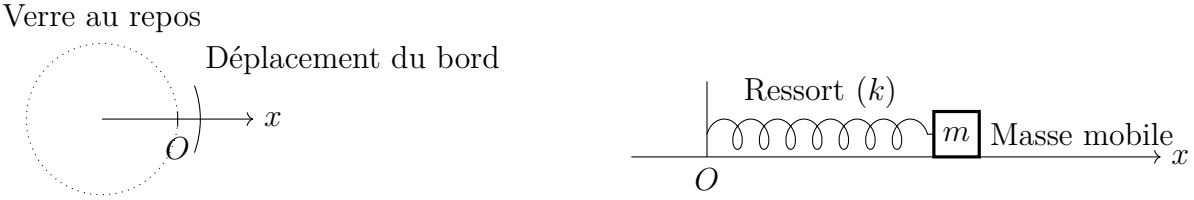


FIGURE 10 – Modèle mécanique du déplacement

21. Montrer que l'équation différentielle traduisant l'évolution temporelle de $x(t)$ s'écrit de la façon suivante, avec ω_0 et Q deux constantes que l'on exprimera en fonction de α, k et m :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q}\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$$

22. Compte tenu du choc initial avec le marteau, déterminer, dans le cas d'un frottement « faible », l'expression approchée de la solution $x(t)$ avec les conditions initiales $x(0) = 0$ et $\dfrac{dx}{dt}(0) = V_0$. Représenter son allure.

23. En quoi, l'enregistrement de la figure 6 est-il en accord à la modélisation par un frottement fluide ?

24. Proposer, à partir de l'évolution temporelle du mode 1 sur les analyses spectrales, un ordre de grandeur du facteur de qualité Q. On rappelle que $\ln 2 \simeq 0,7$

B - Étude de la résonance en amplitude en régime sinusoïdal forcé

On souhaite étudier plus finement la réponse en amplitude du verre au voisinage de la fréquence de résonance du mode 1 précédemment déterminée.

Un hautparleur relié à un générateur basse fréquence produit une onde sonore sinusoïdale de fréquence f. Le verre, placé à proximité du hautparleur (figure 11), est ainsi placé en régime sinusoïdal forcé.

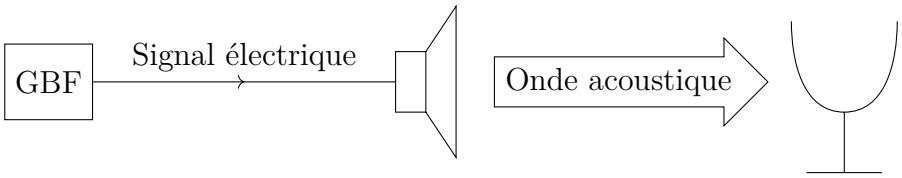


FIGURE 11

B.1 - Approche théorique

L'équation différentielle traduisant l'évolution temporelle de $x(t)$ est alors de la forme suivante, avec $\omega = 2\pi f$ la pulsation et Φ la phase du signal acoustique délivré par le générateur basse fréquence :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q}\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = A_0 \cos(\omega t + \Phi)$$

En régime sinusoïdal forcé, la solution est de la forme $x(t) = X\cos(\omega t + \varphi)$. Comme en électrocinétique, on introduit la grandeur complexe associée $\underline{x}(t) = \underline{X}\exp(j\omega t)$ avec $j^2 = -1$.

25. Comment nomme-t-on la grandeur $\underline{X}$? Que représente son module, son argument ?

26. Établir l'expression du module de $\underline{X}$ en fonction de ω, ω_0, A_0 et Q.

27. À partir d'une étude qualitative, justifier le numéro de graphe de la figure 12 compatible avec le tracé du module de $\underline{X}$ en fonction de la pulsation ω.

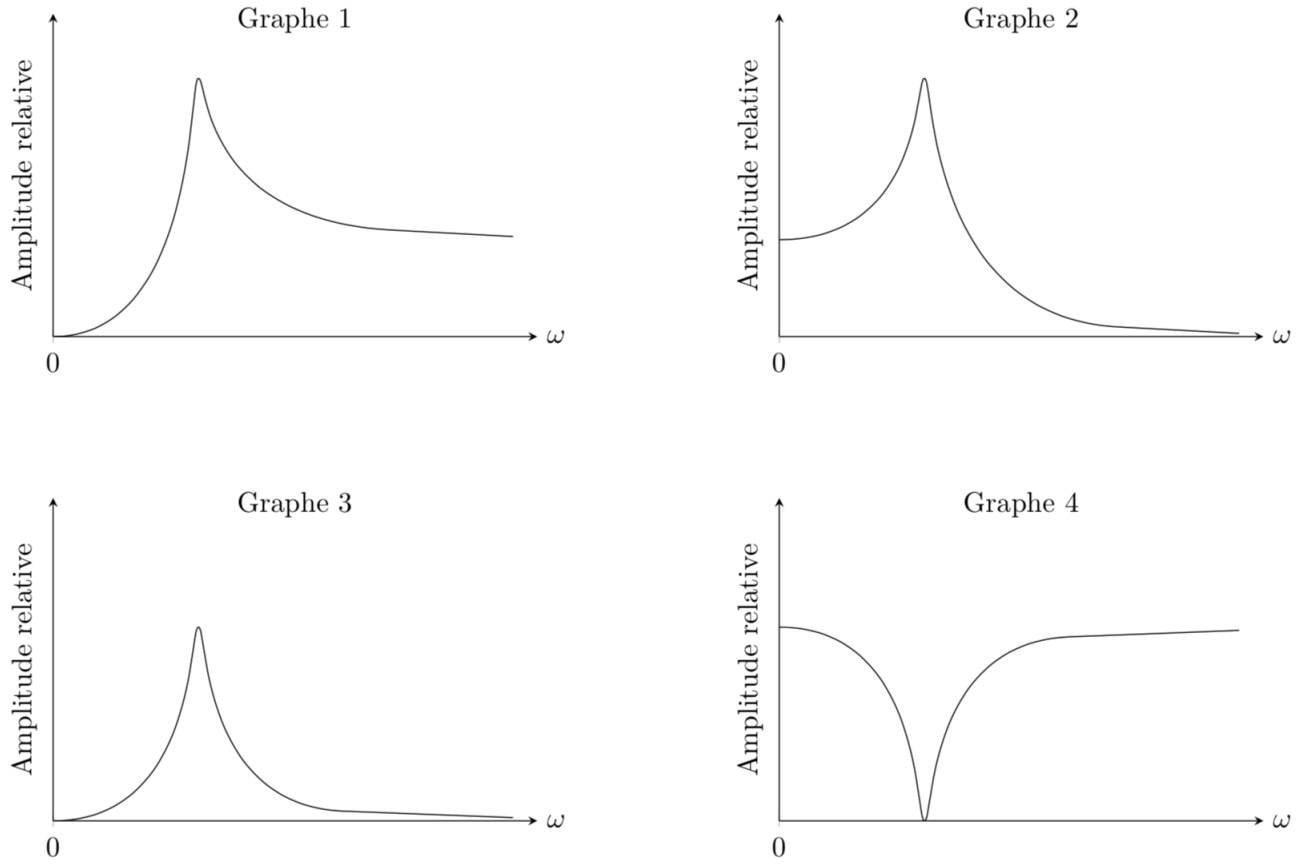


FIGURE 12 – Module de $\underline{X}$ en fonction de ω

28. À quelle condition sur le facteur de qualité peut-on envisager une résonance d'amplitude ?

On note Q_0 cette condition.

29. Dans le cas d'une résonance d'amplitude, exprimer la pulsation correspondante, notée ω_r en fonction de ω_0 et Q.

Dans la suite, on suppose $Q \gg Q_0$.

30. On note X_r le module de $\underline{X}$ pour $\omega = \omega_r$. Établir son expression en fonction de ω_0, A_0 et Q, dans l'approximation d'un grand facteur de qualité.

31. Étant donné l'ordre de grandeur de Q, que peut-on dire du pic de résonance ? Quelle difficulté cela impose-t-il à celui qui veut casser un verre avec sa voix ?

32. Sachant qu'un verre de mauvaise qualité se brisera si la déformation dépasse 5 mm et qu'une cantatrice ou un chanteur expérimenté est capable d'imposer un forçage d'amplitude A_0 jusqu'à 30 m.s^{-2}, est-il possible de casser le verre avec la voix ?

B.2 - Tracé expérimental

Le verre utilisé présente, en guise de décoration, une bande de dépôt métallique placée près du bord supérieur. Son rôle de miroir va permettre la réflexion d'une source lumineuse. Le verre est ici localement considéré plat dans le cadre de cette réflexion. Le dispositif réalisé va permettre la mesure des amplitudes de vibration par interférométrie.

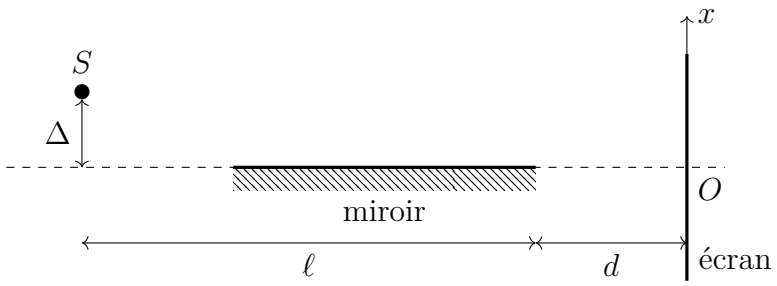


FIGURE 13 – Dispositif interférentiel (échelle non respectée)

La fente source monochromatique S (perpendiculaire au plan de la figure), de longueur d'onde $\lambda = 633$ nm, est placée à la distance Δ du plan du miroir afin que celui-ci soit utilisé sous incidence rasante. La distance source – bord droit du miroir est notée $\ell = 20$ cm et la distance entre le miroir et l'écran $d = 30$ cm (figure 13).

33. Sur le schéma de la figure 1 du document réponse, S' représente l'image de la source S à travers le miroir. À l'aide d'une construction géométrique, faire apparaitre sur l'écran l'ensemble des points où il peut y avoir interférence.

34. On considère un point M d'abscisse x, situé sur l'écran dans le champ d'interférence. En supposant que $\Delta \ll \ell + d$ et $|x| \ll \ell + d$, déterminer la différence de chemin géométrique δ_g entre un rayon issu de S après réflexion sur le miroir (donc semblant venir de S') et un rayon issu directement de S, au point M. Sachant que lors d'une réflexion air – miroir il y a un déphasage supplémentaire de π, exprimer la différence de chemin optique δ.

35. Décrire la figure d'interférences observée sur l'écran. Établir l'expression de l'interfrange i : $i = \frac{\lambda(\ell+d)}{2\Delta}$.

36. Le bord du verre, représenté par le miroir, est animé, en régime sinusoïdal forcé, d'un mouvement de translation dans la direction de l'axe (Ox), d'équation $x_m(t) = X\cos(\omega t + \varphi)$. Déduire l'expression de l'évolution temporelle de l'interfrange en prenant en considération les paramètres de la vibration.

37. Pour une valeur de ω donnée, l'interfrange peut prendre une infinité de valeurs comprises entre deux extrêmes notés $i_{\min}$ et $i_{\max}$. Exprimer X, amplitude des oscillations, en fonction de d, ℓ, λ, $i_{\min}$ et $i_{\max}$.

38. Dans l'expérience menée avec le verre, peut-on envisager de suivre à l'œil nu l'évolution de l'interfrange sur l'écran ?

Afin de pouvoir réaliser des mesures dans de bonnes conditions d'observation, on met en œuvre une méthode de stroboscopie en utilisant le capteur d'image CMOS d'une caméra rapide dont la fréquence de prise des images f_i est réglable jusqu'à 100 images par seconde. Le capteur est placé directement dans le champ d'interférence à la place de l'écran. On précise que la résolution du capteur CMOS (taille du pixel) est de $1\,\mu$m $\times 1\,\mu$m.

39. On cherche à observer une immobilité de la figure d'interférence sur l'image. Exprimer la(les) fréquence(s) de prise de vue f_i possible(s) en fonction de la pulsation ω du générateur basse fréquence.

40. Une fois l'immobilité apparente réalisée sur l'image, expliquer pourquoi la mesure de l'interfrange nécessite de pouvoir régler la phase φ du générateur basse fréquence.

Les images données figure 14, représentant un carré de 100 pixels de coté, ont été réalisées pour une pulsation ω proche de la résonance. Seule la phase φ du générateur basse fréquence est différente pour chacune d'entre elles.

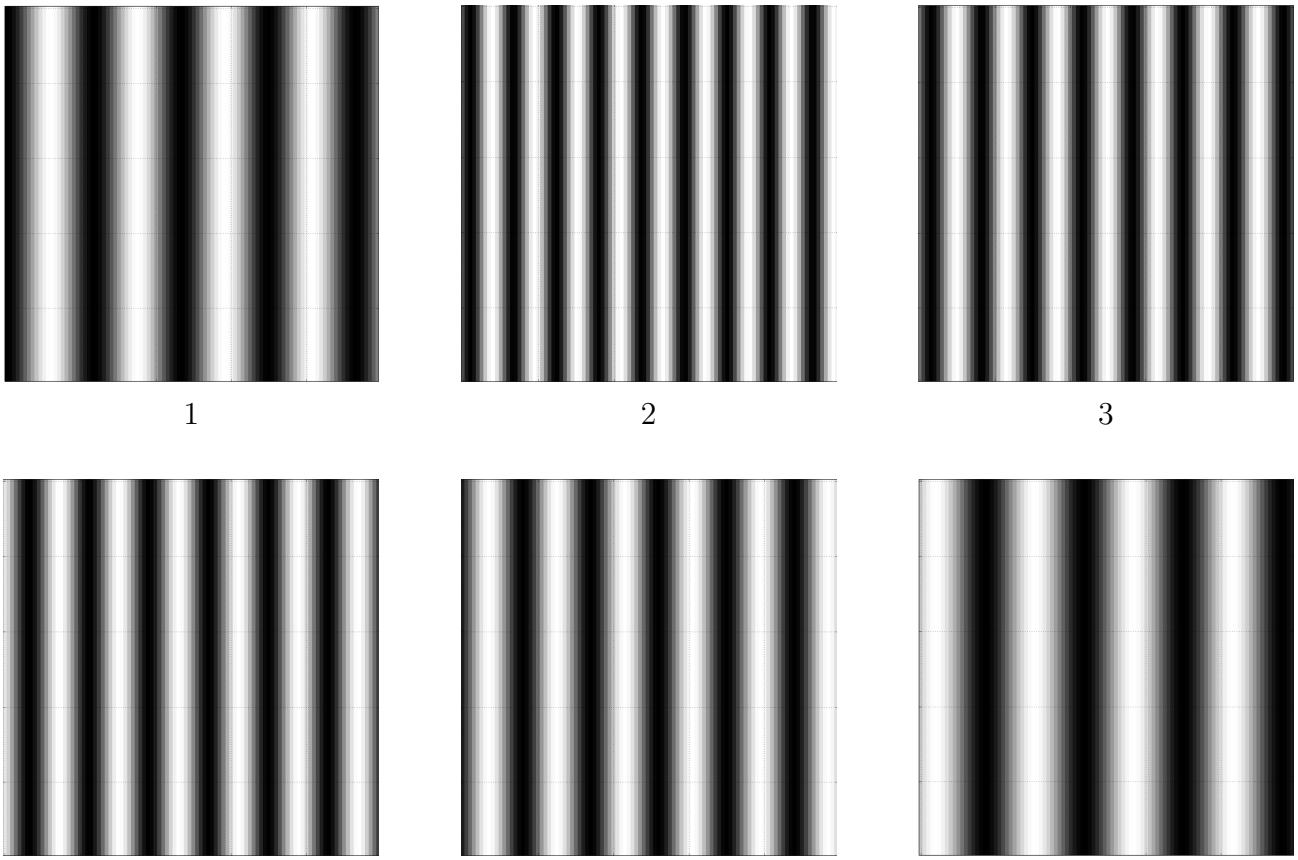


FIGURE 14 – Images du capteur CMOS pour une pulsation ω

41. À partir d'une exploitation des images de la figure 14, estimer l'amplitude des oscillations X du verre pour la pulsation ω.

Une série de mesure de l'amplitude X au voisinage de la résonance permet de tracer le graphe représenté sur la figure 15.

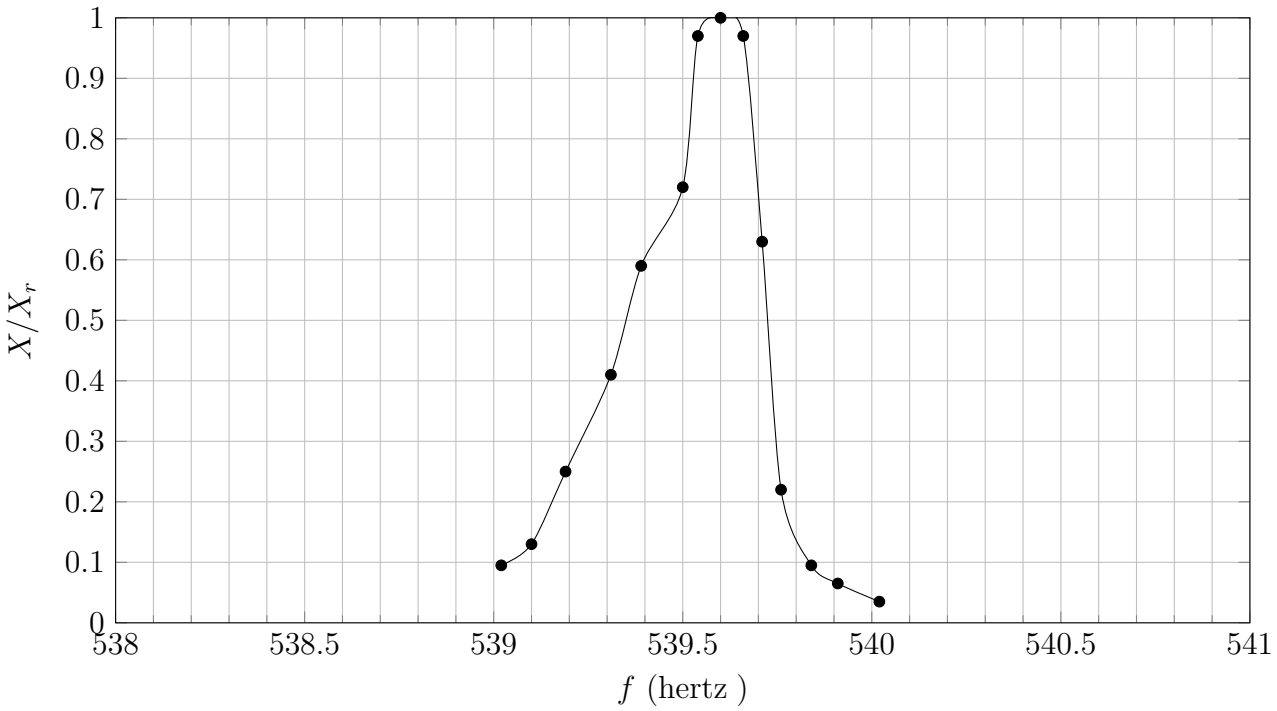


FIGURE 15 – Amplitude relative en fonction de la fréquence

42. Déterminer, à partir de la figure 15, la fréquence de résonance f_r et le facteur de qualité Q du verre dans son mode 1. Comparer ces résultats à ceux du B.I. On rappelle que $\frac{1}{\sqrt{2}} \simeq 0,7$

43. Un générateur basse fréquence disponible au laboratoire présente les caractéristiques données dans le tableau ci-dessous. Est-il réaliste de pouvoir mettre en résonance le verre en utilisant celui-ci ?

Fréquence	0,1 Hz à 2,1 MHz sur 6 gammes
Précision	0,5%
Niveau de sortie	20 V crête-crête en circuit ouvert
	10 V crête-crête sur 50 Ω
Alimentation	115 ou 230 Vc.a., 50-60 Hz
Dimensions	200 × 300 × 150 mm
Poids	1,8 kg

C - Entraînement du chanteur

Un chanteur souhaite s'entraîner à tenir la note permettant de faire vibrer le verre. Pour cela, il s'entraîne avec un accordeur pour produire la note exacte à laquelle vibre le verre naturellement : il règle l'accordeur pour que celui-ci indique si la note émise est celle souhaitée. On notera f_{ref} la fréquence fixée donnée à l'accordeur et f_v la fréquence fondamentale du son émis par le chanteur. On suppose que f_v est proche de f_{ref}.

Principe de l'accordeur

- Sélection de la fréquence souhaitée.
- Création d'un signal carré de référence de fréquence f_{ref} avec un oscillateur de type astable.
- Enregistrement du signal $u_e(t)$ provenant de la voix du chanteur : signal quelconque, d'amplitude assez faible, de fréquence f_v.
- Amplification et filtrage de ce signal.
- Extraction de la fondamentale du signal : obtention d'un signal sinusoïdal de fréquence f_v par l'utilisation d'un filtre à fréquence caractéristique réglable par le signal extérieur de référence.
- Mise en forme de ce signal : obtention d'un signal carré de fréquence f_v.
- On a donc à disposition deux signaux carrés (signaux logiques) de fréquences respectives f_v et f_{ref}. Dans les accordeurs récents le traitement est numérique : les signaux sont envoyés dans un calculateur numérique intégré qui calcule l'écart de fréquence et indique à l'utilisateur quand la note chantée est juste, c'est-à-dire quand $f_v = f_{ref}$.

Ce principe général est schématisé sur la figure 16.

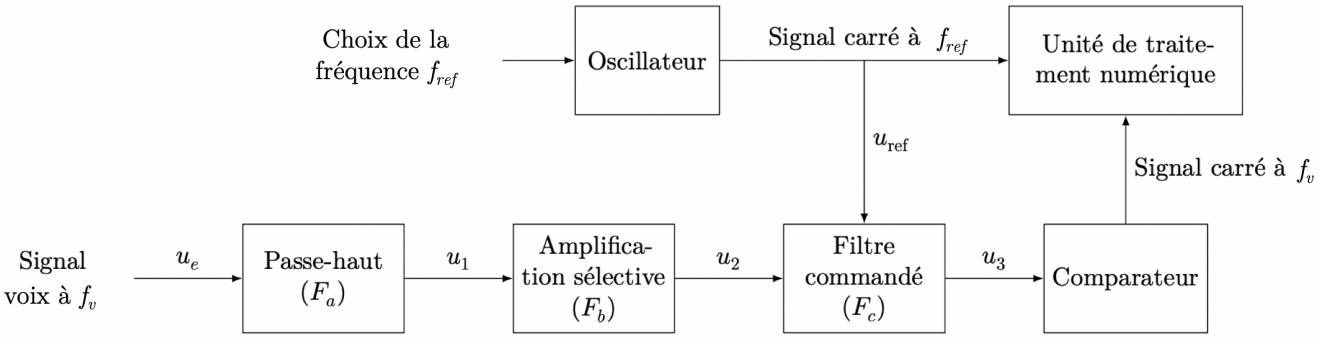


FIGURE 16 – Principe de fonctionnement de l'accordeur

C.1 - Amplification sélective

Dans cette sous-partie, les signaux sont sinusoïdaux et l'amplificateur linéaire intégré (ALI) est supposé idéal et fonctionne en régime linéaire.

En sortie du filtre de la figure **??** le signal $u_1(t)$ est envoyé sur le filtre de la figure 17 (filtre (F_b)).

44. Exprimer la fonction de transfert $\underline{H_2}$ de ce filtre en fonction de R_2, R_3 et C_2.

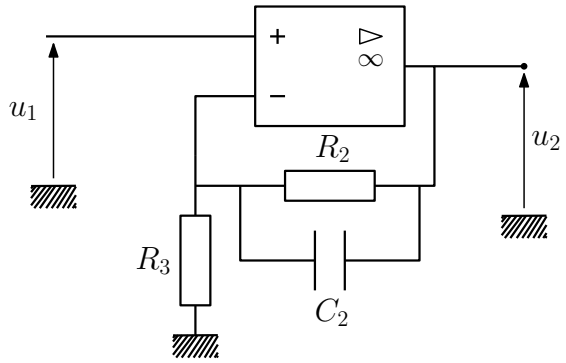


FIGURE 17 – Filtre (F_b)

45. Mettre $\underline{H}_2$ sous la forme

$$\underline{H}_2 = 1 + \frac{G_0}{1 + j\omega/\omega_2}$$

et donner les expressions de G_0 et ω_2.

46. Quelle est la limite de $|\underline{H}_2|$ en basse fréquence ? en haute fréquence ?

47. Calculer numériquement la fréquence caractéristique f_2 correspondant à ω_2 si $R_2 = 200\,\text{k}\Omega$, $R_3 = 2\,\text{k}\Omega$ et $C_2 = 1\,\text{nF}$ ainsi que son gain G_0. Expliquer quel est le rôle de ce second filtre.

C.2 - Filtrage sélectif commandé

On souhaite maintenant sélectionner la fréquence fondamentale f_v du signal u_2, dont la valeur est à priori voisine de celle de la fréquence fondamentale théorique sélectionnée sur l'accordeur (f_{ref}) (on suppose que le chanteur chante légèrement faux). On suppose pour la suite que c'est la fréquence propre du verre que l'on a choisie.

Le principe du filtre (F_c) est que sa fréquence caractéristique soit réglée par le signal de référence de fréquence f_{ref}.

La figure 18 représente le diagramme de Bode relatif au gain du filtre (F_c) tracé à deux échelles différentes.

48. Dire en le justifiant rapidement, de quel type de filtre il s'agit. Quelle est sa fréquence centrale caractéristique ?

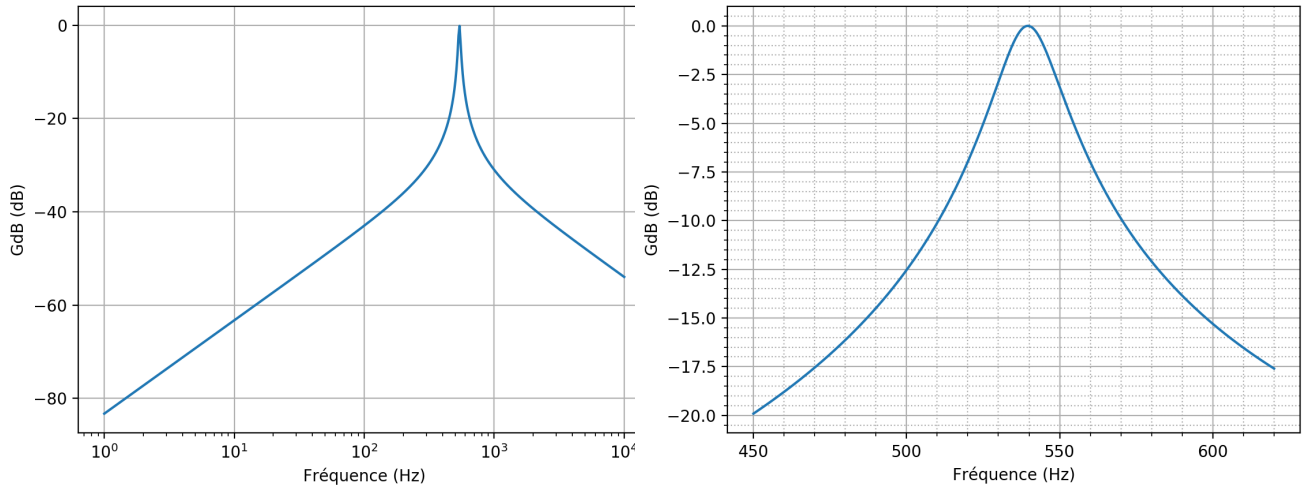
49. Donner une estimation de sa bande-passante après l'avoir définie.

50. Si la note est légèrement fausse à $f_v = 510$ Hz, estimer, en le justifiant, de quel facteur est atténuée sa composante spectrale fondamentale en sortie de ce filtre.

C.3 - Cascade de filtres et mise en forme

51. Donner l'allure du spectre des signaux u_e, u_1, u_2 et u_3 (avec les notations de la figure 16)

À la sortie de l'étage précédent, le signal est donc proche d'un signal sinusoïdal de fréquence f_v et d'amplitude dépendant de la force avec laquelle on a chanté, mais de l'ordre du volt. Pour effectuer un traitement numérique qui permettra de comparer f_v à la fréquence théorique f_{ref} on souhaite fabriquer à partir du signal précédent un signal créneau de fréquence f_v. Pour cela, on utilise un comparateur à hystérésis, représenté figure 19.



(a) (b)

FIGURE 18 – Diagramme de Bode en gain du filtre (F_c)

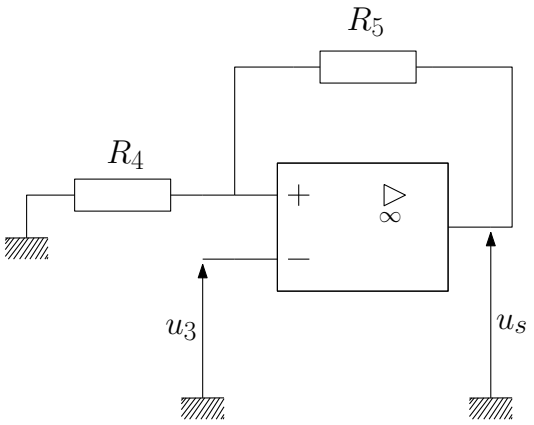


FIGURE 19 – Comparateur à hystérésis

On note U_{sat} la tension de saturation de l'ALI et on suppose que l'ALI est idéal. Le signal u_3 est sinusoïdal alternatif d'amplitude 1 V et de fréquence f_v (c'est le signal sortant du filtre sélectif (F_c)).

52. Qu'est ce qui permet d'être certain que l'ALI fonctionne en régime saturé ? Rappeler les propriétés d'un ALI idéal en régime saturé.

53. Exprimer V^+ le potentiel de la borne non inverseuse de l'ALI en fonction de R_4, R_5 et u_s. En déduire l'expression de $\varepsilon = V^+ - V^-$.

Supposons que u_3 soit suffisamment faible pour que $\varepsilon > 0$.

54. Quelle est la valeur de u_s ? À partir de cette situation, u_3 augmente : exprimer en fonction des données la valeur U_{seuil} de u_3 pour laquelle on observera le basculement de u_s. Quelle est alors la nouvelle expression de ε ?

55. À partir de cette nouvelle situation, traiter le cas où u_3 diminue.

56. Représenter finalement le cycle d'hystérésis de ce montage : $u_s = f(u_3)$.

Dans le cadre de l'accordeur, $R_4 = 1$ kΩ, $R_5 = 10$ kΩ et $U_{sat} = 5$ V.

57. Tracer sur les figures 2 et 3 du document réponse l'allure du signal de sortie $u_s(t)$ correspondant aux deux exemples de signal $u_3(t)$ proposés.

58. Que peut-il se passer si le chanteur chante vraiment trop faux ?

Document réponse

FIGURE 1 – Q**33.**

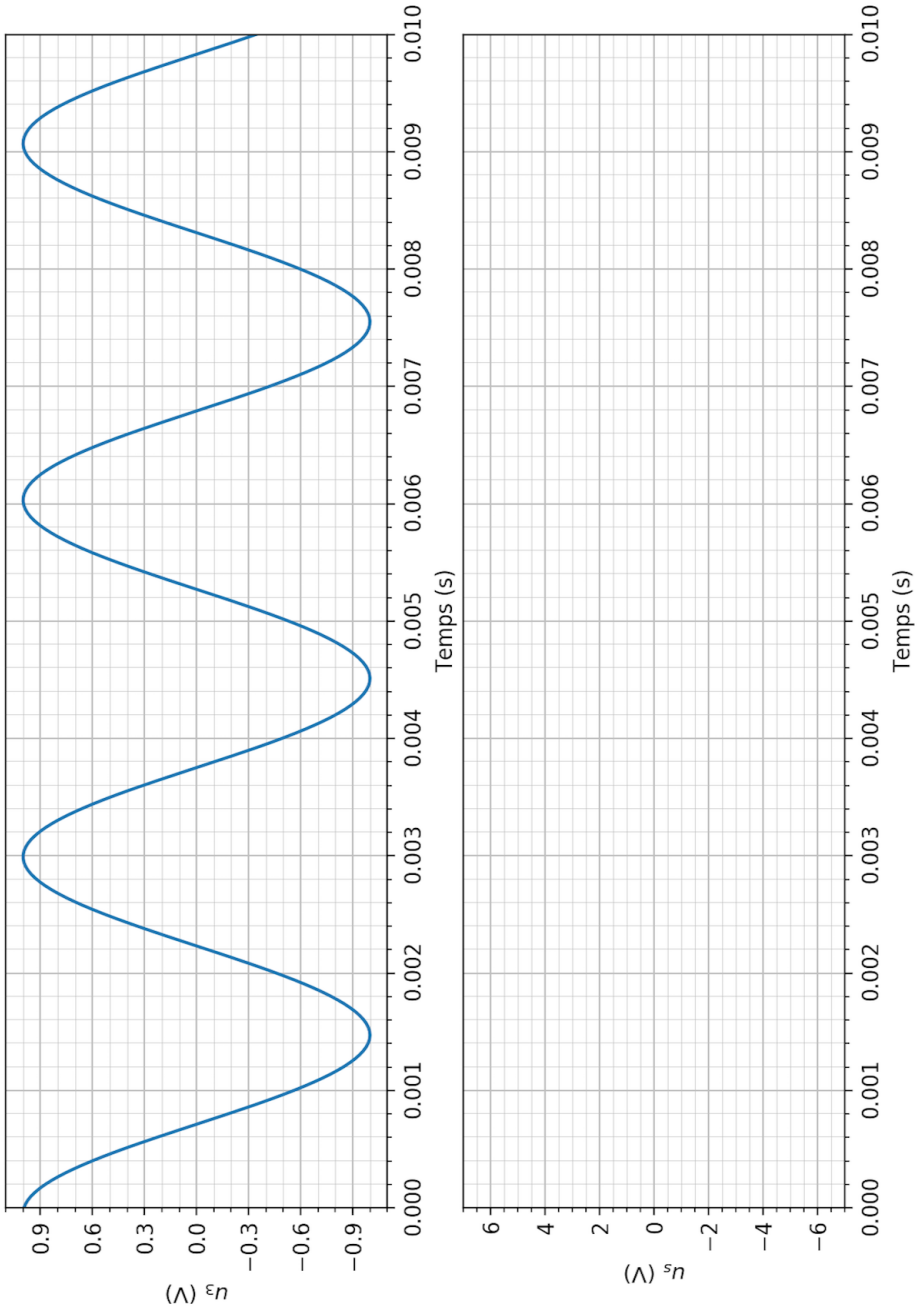


FIGURE 2 – Q**57.** Premier exemple

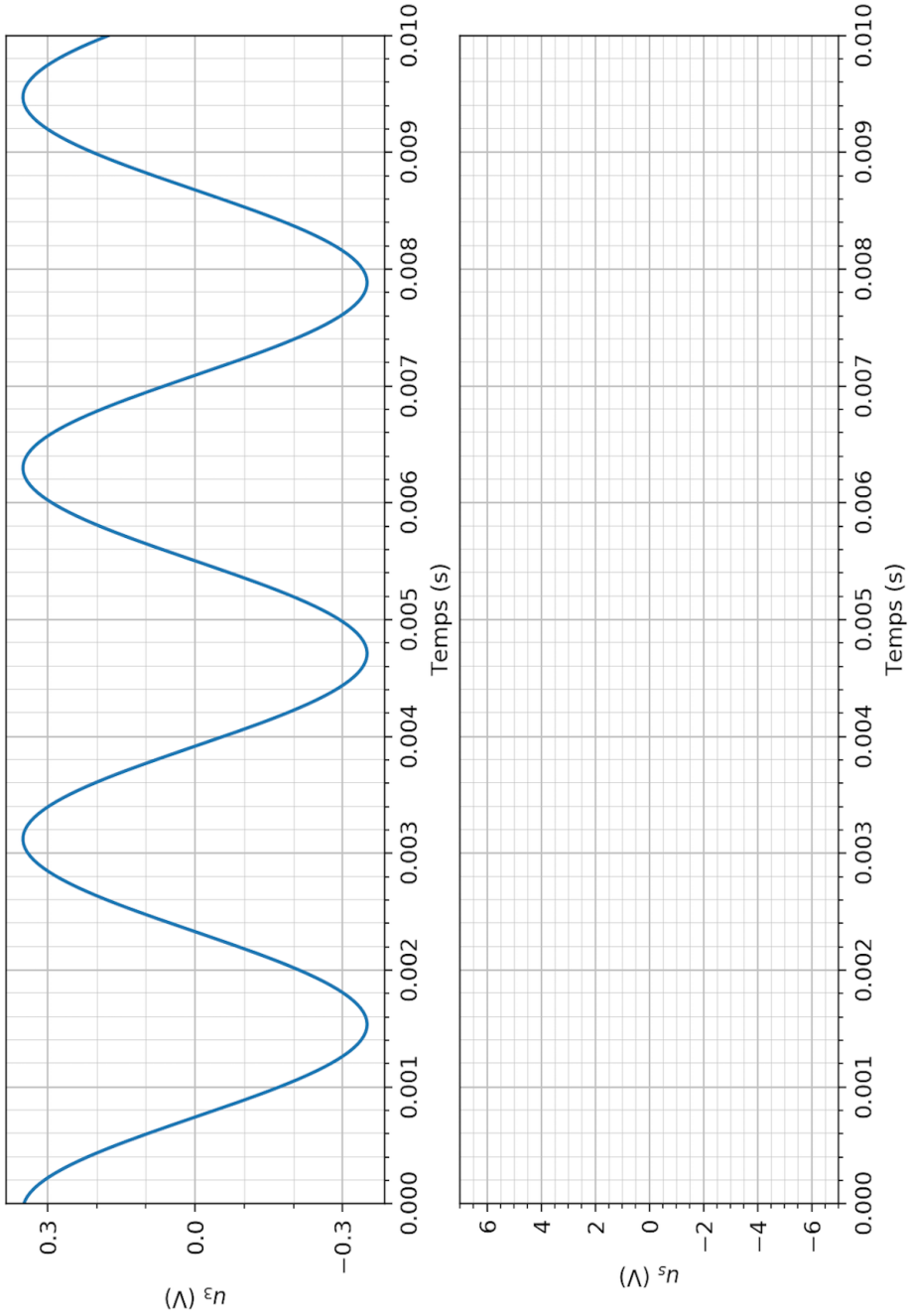


FIGURE 3 – Q**57.** Deuxième exemple