

SESSION 2026

---

**AGRÉGATION  
CONCOURS INTERNE  
ET CAER**

**Section : PHYSIQUE CHIMIE**

**COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE  
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION**

Durée : 5 heures

---

*Calculatrice électronique autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.*

*Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire**

**Tournez la page S.V.P.**

A

## INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1500C	101	0385

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1500C	101	0385





# LE CHANT ET LA DANSE DES BULLES

Ce problème explore quelques phénomènes physiques autour des bulles d'air dans l'eau et des bulles de savon (plus généralement des films de savon) en lien avec le domaine de l'acoustique.

Dans une première partie, les caractéristiques du son créé par une bulle d'air dans de l'eau sont analysées expérimentalement et théoriquement. Dans un second temps, on s'intéresse à la propagation d'une onde sonore au sein d'un milieu bulleux à partir de l'étude de l'expérience connue sous le nom d'«*effet chocolat chaud*». Enfin, ce sujet se conclura par l'étude du comportement d'un film de savon en présence d'une onde acoustique.

Les questions sont posées à l'aide d'un ou plusieurs verbes d'action en **gras**. L'évaluation tient compte du respect de chacune des consignes ainsi formulées.

Des questions pédagogiques et didactiques reliées aux concepts abordés dans les différentes parties sont insérées dans le corps du texte. Elles sont signalées par l'indication **QP** et représentent environ vingt pour cent du total des points attribués.

Certaines questions sont repérées par une barre noire dans la marge gauche. Leur résolution demande une prise d'initiative de la part du candidat ou de la candidate. L'évaluation des réponses par le jury porte tout particulièrement sur l'analyse physique des situations étudiées, l'intelligibilité et la clarté de la rédaction, ainsi que la mise en place d'une démarche raisonnée de résolution.

## Table des matières

<b>I</b>	<b>Le chant d'une bulle d'air dans l'eau</b>	<b>3</b>
I.1	Montage électrique . . . . .	4
I.2	Préliminaires sur les ondes acoustiques dans un fluide . . . . .	6
I.3	Oscillations libres d'une bulle dans un fluide incompressible . . . . .	9
I.4	Oscillations libres d'une bulle dans un fluide compressible . . . . .	11
I.5	Oscillations forcées d'une bulle dans un fluide compressible . . . . .	12
<b>II</b>	<b>Propagation du son dans un milieu bulleux</b>	<b>16</b>
II.1	Cavité résonante . . . . .	17
II.2	Modèle de Wood . . . . .	18
<b>III</b>	<b>Interaction d'une onde acoustique avec un film de savon</b>	<b>19</b>
III.1	Mesure optique de l'épaisseur d'un film de savon . . . . .	19
III.2	La danse du film de savon . . . . .	21

## Données numériques

Toutes les données nécessaires aux applications numériques sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

Coefficient de compressibilité isentropique de l'eau	$\chi_e = 5,0 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$
Coefficient de compressibilité isentropique de l'air	$\chi_a = 7,1 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$
Coefficient adiabatique de l'air	$\gamma = 1,4$
Pression atmosphérique	$P_0 = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$
Masse volumique de l'eau ( $P_0, 20^\circ\text{C}$ )	$\mu_e = 1,0 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Masse volumique de l'air ( $P_0, 20^\circ\text{C}$ )	$\mu_a = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

# I Le chant d'une bulle d'air dans l'eau

Dans cette partie, on se propose d'étudier les caractéristiques du son émis par une bulle d'air dans l'eau. Le champ d'application est excessivement vaste. En effet, la plupart des bruits associés à des écoulements d'eau (ruisseaux, vagues de l'océan, cascades) sont provoqués par la présence de bulles d'air.

Un des premiers scientifiques à avoir mené une étude expérimentale et théorique du son émis par une bulle est Marcel Minnaert dans un article intitulé «*On musical air-bubbles and the sounds of running water*» paru en 1933<sup>1</sup>. Le dispositif expérimental utilisé par Minnaert est décrit figure 1. De l'eau versée dans l'entonnoir (AB) pousse l'air contenu dans le tube (CD), ce qui forme une bulle à la sortie du tube. Minnaert détermine la note émise par la bulle à l'aide d'un diapason.

L'expérience peut être reproduite aujourd'hui avec du matériel contemporain : une bulle est créée dans un récipient rempli d'eau à l'aide d'une seringue et le bruit généré après sa formation est enregistré grâce à un hydrophone situé à une distance  $d$  de la bulle. Le signal électrique issu de l'hydrophone est ensuite amplifié, filtré puis envoyé sur un oscilloscope. Le signal électrique délivré par l'hydrophone est directement proportionnel à la surpression perçue par ce dernier.

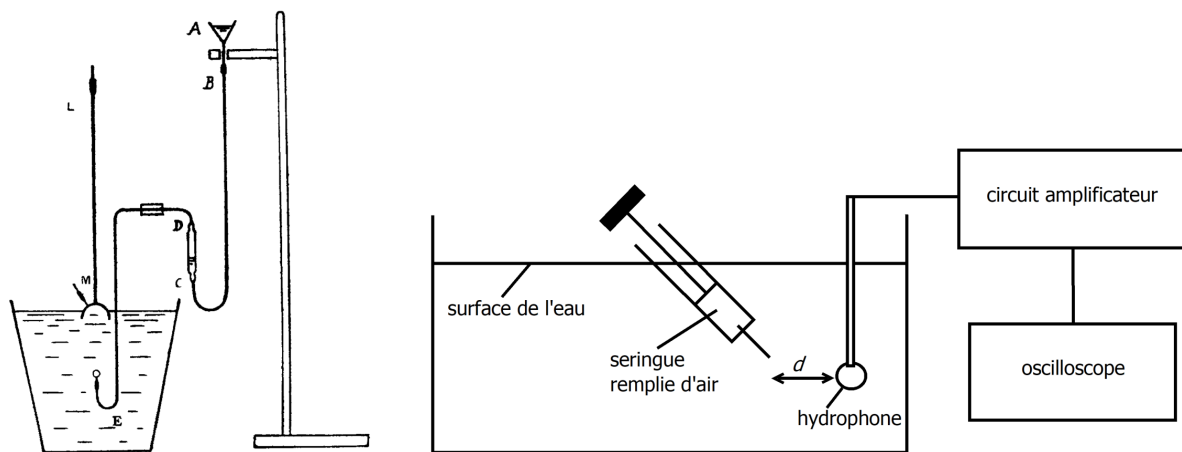


FIGURE 1 – À gauche : dispositif historique<sup>1</sup> de l'expérience de Minnaert (1933). À droite : dispositif expérimental utilisé pour ce sujet.

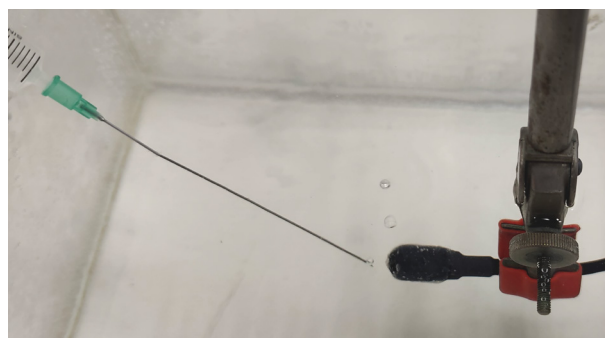


FIGURE 2 – Photographie vue du dessus de la seringue et de l'hydrophone dans le dispositif expérimental utilisé pour ce sujet.

1. M. Minnaert, « *On musical air bubbles and the sounds of running water* », Phil. Mag. 16, 235 (1933).

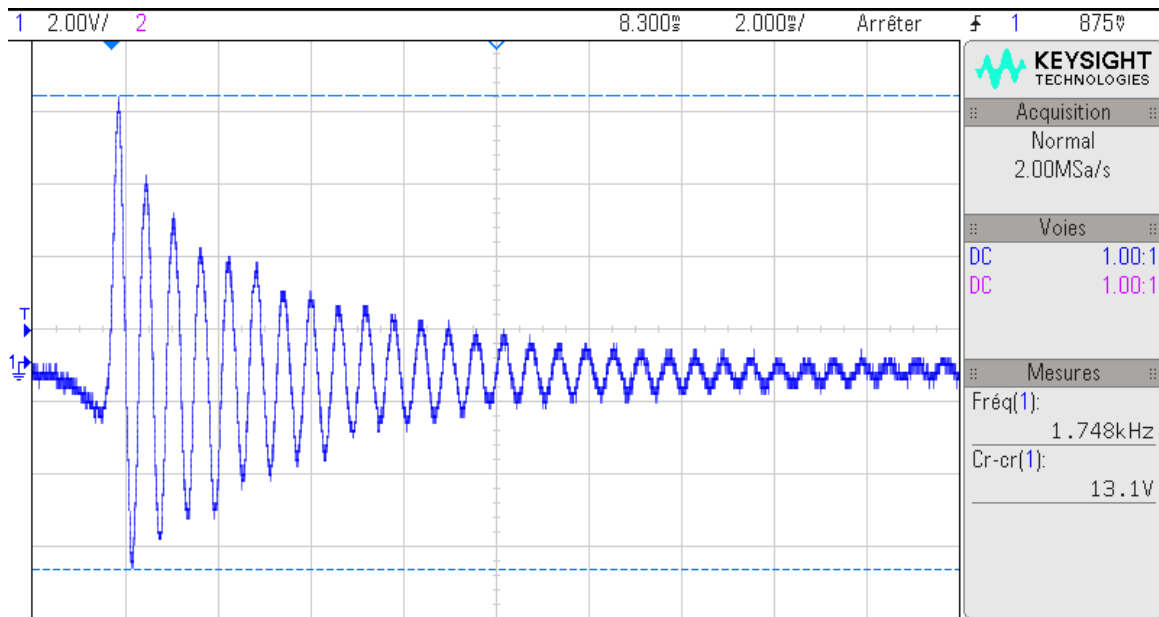


FIGURE 3 – Signal observé sur l’oscilloscope (pour ce signal, une pipette Pasteur a été utilisée à la place de la seringue) avec une base de temps de 2 ms/carreau.

Après avoir étudié quelques caractéristiques du circuit électrique utilisé pour cette expérience, on se propose dans les parties I.2 à I.4 de comprendre l’origine du signal observé et de déterminer en quoi les caractéristiques de ce signal renseignent sur les propriétés de la bulle créée.

### I.1 Montage électrique

Le son émis par une bulle dans l’eau ayant une intensité sonore faible, il est nécessaire d’amplifier et de filtrer le signal reçu par l’hydrophone pour obtenir un bon rapport signal à bruit sur l’oscilloscope.

À cette fin, l’expérimentatrice a utilisé dans son dispositif, entre autres, les deux montages présentés figure 4. L’objectif de cette partie est de caractériser ces deux montages et de comprendre leur rôle respectif.

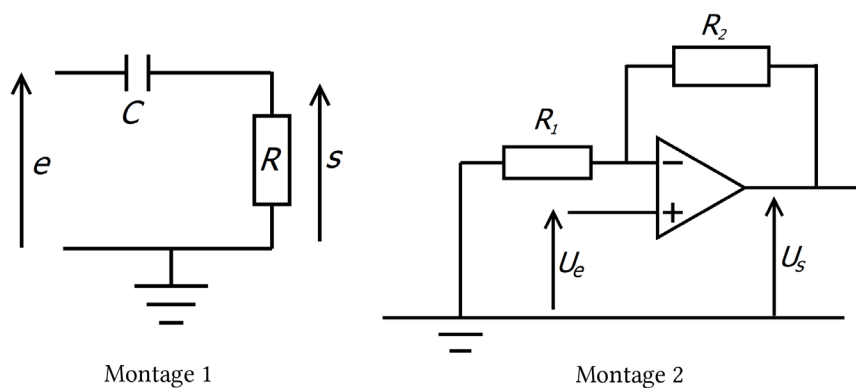


FIGURE 4 – Montages utilisés dans le circuit électrique. A gauche : montage 1 ( $R = 1,5 \text{ k}\Omega$  et  $C = 220 \text{ nF}$ ), à droite : montage 2 ( $R_1 = 3,3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 82 \text{ k}\Omega$ ).

On suppose que l’amplificateur linéaire intégré (ALI) du montage 2 est idéal et fonctionne en régime linéaire. Les résistances et les condensateurs utilisés ont une tolérance de 5% constructeur. Le montage 1 fonctionne en sortie ouverte.

On étudie dans un premier temps le montage 1 de la figure 4.

**Q1.** On se place en régime sinusoïdal forcé à la pulsation  $\omega$ . **Rappeler** les expressions des impédances complexes associées à un conducteur ohmique de résistance  $R$  et à un condensateur de capacité  $C$ . **Donner** le schéma électrique équivalent du condensateur à basses et hautes fréquences. **En déduire** la nature électrique du montage 1.

**Q2.** **Préciser** si les dipôles électriques constituant le montage 1 sont associés en série ou en parallèle et **justifier** la réponse. **Établir** l'expression de la fonction de transfert du montage 1, définie par  $H(\omega) = \frac{s}{e}$ .

**Q3.** **Établir** l'expression du module  $|H(\omega)|$  de cette fonction de transfert. En étudiant les comportements asymptotiques de ce module, **vérifier** la nature du filtre prévue à la question **Q1**.

**Q4.** **Déterminer** l'expression de la pulsation  $\omega_c$  pour laquelle  $|H(\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ , puis la fréquence  $f_c$  correspondante. **Dénommer** cette fréquence. **Calculer** la valeur numérique de  $f_c$ , puis **préciser** le rôle du montage.

On étudie maintenant le montage 2 de la figure 4.

On note  $A$  le rapport  $\frac{U_s}{U_e}$  caractérisant ce montage.

**Q5.** **Rappeler** les caractéristiques des courants d'entrée sur les entrées inverseuse et non inverseuse d'un ALI idéal. **Donner** la condition expérimentale nécessaire (et non suffisante) pour qu'un ALI fonctionne en régime linéaire. **Préciser** ce que l'on peut dire sur la tension différentielle d'entrée d'un ALI idéal, lorsque ce dernier fonctionne en régime linéaire.

**Q6.** **Déterminer** l'expression de  $A$  en fonction de  $R_1$  et  $R_2$ . **Préciser** le rôle de ce montage et **donner** le nom usuel de ce quadripôle.

La figure 5 est issue du document publié sur le site eduscol, intitulé «*Mesure et incertitudes au lycée*»<sup>2</sup>.



FIGURE 5 – Plusieurs voltmètres de la même référence sont branchés en parallèle sur une source de tension. Ils n'affichent pas la même valeur.

2. <https://eduscol.education.fr/1648/programmes-et-ressources-en-physique-chimie-voie-gt>

**QP7. Préciser** la caractéristique de la mesure que cette figure pourrait permettre d'illustrer auprès d'élèves de cycle 4 comme de lycée. **Indiquer** un outil mathématique permettant de rendre accessible visuellement cette caractéristique aux élèves.

On impose un signal sinusoïdal de 1,1 kHz à l'entrée du montage 2. On constate que la tension de sortie de ce montage est également sinusoïdale. On branche un voltmètre en mode AC aux bornes d'entrée du filtre, où se trouve la tension  $U_e(t)$ , puis aux bornes de sortie du filtre, où se trouve la tension de sortie  $U_s(t)$ , et on lit respectivement sur l'appareil 0,3555 V et 8,843 V. L'extrait de la notice du multimètre utilisé est présenté figure 6.

### AC specifications for U1271A

Function	Range	Resolution	Accuracy $\pm$ (% of reading + counts of least significant digit)			
			45 Hz to 65 Hz	30 Hz to 1 kHz	1 kHz to 5 kHz	5 kHz to 20 kHz
True RMS AC Voltage <sup>1</sup>	300 mV	0.01 mV	0.7 + 20	1.0 + 25	2.0 + 25	2.0 + 40
	3 V	0.0001 V	0.7 + 20	1.0 + 25	2.0 + 25	2.0 + 40
	30 V	0.001 V	0.7 + 20	1.0 + 25	2.0 + 25	2.0 + 40
	300 V	0.01 V	0.7 + 20	1.0 + 25	2.0 + 25	–
	1000 V	0.1 V	0.7 + 20	1.0 + 25	–	–
	LPF (low pass filter) enabled, applicable for all voltage ranges and resolution			0.7 + 20	1.0 + 25 @ < 200 Hz 5.0 + 25 @ < 440 Hz	–

FIGURE 6 – Extrait de la notice constructeur dans le cas de mesures en tensions en mode AC avec un multimètre Keysight U1271A.

**Q8. Préciser** ce que mesure un voltmètre en mode AC puis **présenter** le résultat des deux mesures effectuées avec le voltmètre avec leur incertitude-type de mesure, avec deux chiffres significatifs pour l'incertitude.

**Q9. Calculer** le gain mesuré expérimental  $A_{\text{exp}}$  ainsi que son incertitude. **Présenter** le résultat sous la forme académique usuelle, avec deux chiffres significatifs pour l'incertitude.

On peut calculer la valeur du gain théorique  $A_{\text{th}}$  attendu pour le montage 2. En tenant compte des incertitudes constructeur des composants, on montre que  $A_{\text{th}} = 25,8 \pm 1,0$ .

**Q10. Vérifier** que la valeur du gain théorique  $A_{\text{th}}$  est compatible avec celle du gain mesuré  $A_{\text{exp}}$ , en effectuant une comparaison quantitative.

## I.2 Préliminaires sur les ondes acoustiques dans un fluide

**QP11. Rappeler** les ordres de grandeurs des fréquences audibles par l'être humain que les élèves doivent connaître en fin de cycle 4. **Préciser** également le domaine de fréquences des ultrasons et des infrasons. **Justifier** l'usage des préfixes « ultra » et « infra ».

**QP12. Rappeler** la définition de la période et de la fréquence. **Justifier** la pertinence de l'introduction de la grandeur « fréquence » en plus de la grandeur « période » pour des élèves de lycée, en appuyant votre explication sur des ordres de grandeur.

**QP13.** Il est indiqué dans le programme de cycle 4 du BOEN n° 31 du 30 juillet 2020 que « *les activités proposées [doivent permettre] de sensibiliser les élèves aux risques auditifs* ». **Rappeler** les ordres de grandeur du niveau d'intensité sonore (en dB) à présenter à cet effet aux élèves dès le cycle 4.

On modélise la propagation d'une onde sonore dans un fluide à l'aide d'un champ de pression  $P(M, t)$ , d'un champ de vitesse  $\vec{v}(M, t)$  et d'un champ de masse volumique  $\mu(M, t)$ . On suppose qu'en l'absence d'onde sonore le fluide est au repos et caractérisé par des champs de pression et de masse volumique uniformes :  $P(M, t) = P_0$ ,  $\vec{v}(M, t) = \vec{0}$  et  $\mu(M, t) = \mu_0$ . En présence d'une onde sonore, on écrit :

$$\begin{aligned} P(M, t) &= P_0 + p_1(M, t) \\ \mu(M, t) &= \mu_0 + \mu_1(M, t) \\ \vec{v}(M, t) &= \vec{v}_1(M, t). \end{aligned}$$

**Q14. Rappeler** en quoi consiste l'approximation acoustique. **Rappeler** également les hypothèses d'étude usuelles lorsque l'on souhaite mettre en équation la propagation d'ondes sonores dans un fluide.

**Q15. Donner** l'équation d'Euler compte tenu des hypothèses de l'étude, puis **linéariser** cette dernière dans l'approximation acoustique.

On rappelle l'équation de propagation vérifiée par le champ de surpression  $p_1(M, t)$  :

$$\Delta p_1(M, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_1(M, t)}{\partial t^2} = 0,$$

où  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \chi_s}}$ , et  $\chi_s$  est le coefficient de compressibilité isentropique du fluide considéré.

**Q16. Dénommer** cette équation. **Dater** approximativement la découverte de cette équation en donnant le siècle correspondant. **Donner** la signification physique de la grandeur  $c$ .

Dans la suite du sujet, on notera respectivement  $c_e$  et  $c_a$  la grandeur  $c$  dans l'eau et l'air. De même les grandeurs  $\mu_e$  et  $\mu_a$  (respectivement  $\chi_e$  et  $\chi_a$ ) représenteront respectivement les masses volumiques (respectivement les coefficients de compressibilité isentropiques) de l'eau et de l'air.

**Q17. Préciser** comment la masse volumique d'un fluide et le caractère plus ou moins compressible de ce dernier influent sur  $c$ . **Faire** les applications numériques pour  $c_e$  et  $c_a$ . **Commenter**.

**QP18.** En classe de seconde, une évaluation diagnostique est prévue sur la partie «*Émission et perception du son*» du thème «*Ondes et signaux*». **Expliciter**, en quelques lignes, un objectif d'une évaluation diagnostique, le moment le plus opportun pour sa mise en place et les modalités pédagogiques pertinentes à mettre en œuvre (lieu, durée, support).

Dans un article du BUP publié en janvier 1998<sup>3</sup>, les conceptions des élèves sur la propagation d'un signal sonore ont été étudiées grâce à une évaluation diagnostique. Deux d'entre elles sont présentées ci-après, ainsi que les éléments de réponses des élèves interrogés.

3. L. Maurines, « Les élèves et la propagation des signaux sonores », BUP 92, 800 (1998).

**Énoncé du questionnaire :**

Pierre, Marie et Jean sont alignés sur une route rectiligne dans la campagne. Pierre et Jean sont à 100 m de Marie.

Pierre

Marie

Jean

Pierre et Jean regardent Marie et commencent à chanter au même instant. Ils chantent tous les deux la note « La » pendant une seconde mais Pierre chante plus fort que Jean.

**Question :**

Est-ce que Marie commence à entendre Pierre et Jean au même instant ?

- Oui ; Pourquoi ?
- Non ; Qui entend-elle en premier ? Pourquoi ?

L'auteur de l'article relève que «*Beaucoup des élèves interrogés répondent que l'auditeur ne commence pas à entendre les sons émis par les deux sources au même instant : la source de plus grande amplitude sonore est entendue en premier*».

**QP19. Identifier** la difficulté conceptuelle liée à cette réponse.

D'autres conceptions des élèves sont testées avec la question suivante :

**Énoncé du questionnaire :**

On considère quatre tubes : le premier est rempli d'air, le second est rempli d'eau, le troisième est rempli d'acier et dans le quatrième le vide a été fait (il n'y a rien). À une extrémité de chaque tube, un haut-parleur (HP) est branché et à l'autre extrémité se trouve un microphone (M) relié à un magnétophone. Tous les haut-parleurs, microphones et magnétophones sont identiques. Tous les haut-parleurs commencent à émettre la note « La » au même instant et s'arrêtent au même instant.

H.P.  M.    H.P.  M.  
H.P.  M.    H.P.  M.

**Question :**

Quels sont les microphones qui enregistrent un son et quels sont ceux qui n'enregistrent pas ? Expliquer pour chaque tube pourquoi.

**QP20. Identifier** les conceptions initiales des élèves que cherche à tester cette deuxième question.

Les verbatims suivants des justifications proposées par les élèves ont été relevés :

« oui pour le vide : le son ne rencontre aucune opposition »

« oui, sauf l'acier plein parce que le son ne pourra pas traverser le tube plein pour être enregistré, et l'eau »

« sauf acier, car c'est un métal compact qui ne laisse passer ni l'air ni l'eau donc les sons ne pourront passer »

**QP21. Proposer** une correction pour l'ensemble des verbatims ci-dessus.

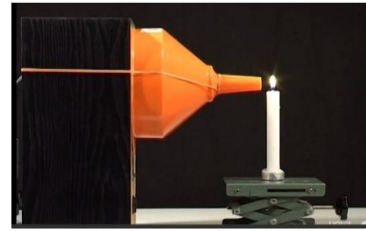
Afin de surmonter les difficultés des élèves évoquées précédemment, on considère l'expérience classique destinée à mettre en évidence la propagation des ondes sonores dans l'air. Une flamme de bougie est placée à proximité d'un haut-parleur émettant un signal sonore. Un exemple d'activité<sup>4</sup> donnée en cycle 4 est reproduit ci-après.

**Expérience**

Placer une bougie allumée devant un haut-parleur qui émet un son :

- Qu'observe-t-on ?
- Décrire le mouvement de l'air lors de la propagation du son.

Source : <http://phymain.unisciel.fr/la-bougie-musicale/>



**QP22. Identifier** une limite pédagogique de cette expérience et une idée fautive qu'elle pourrait involontairement renforcer.

**I.3 Oscillations libres d'une bulle dans un fluide incompressible**

On considère une bulle d'air dans de l'eau de masse volumique  $\mu_e$ . On suppose que la bulle est sphérique et son rayon à l'équilibre est noté  $R_0$ . On suppose que la pression de l'air à l'intérieur de la bulle est uniforme et on note  $P_0$  cette pression à l'équilibre. On néglige la pesanteur, les phénomènes de tension superficielle et on considère l'air comme un gaz parfait de coefficient adiabatique  $\gamma$ . On suppose que le centre de la bulle, noté  $O$ , reste fixe.

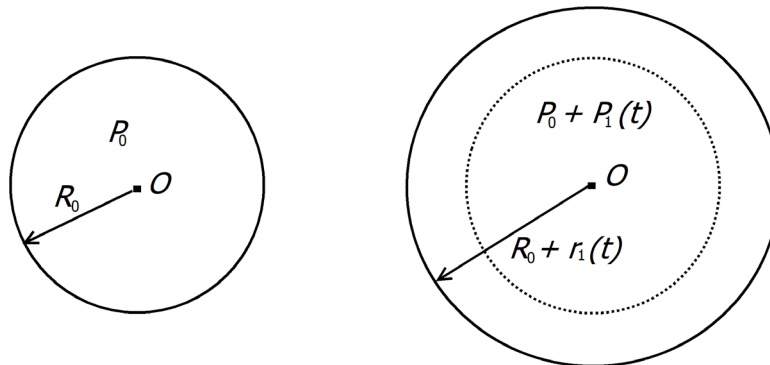


FIGURE 7 – Bulle d'air considérée (à gauche : au repos, à droite : hors équilibre).

Hors équilibre, on considère des petites oscillations radiales de la bulle. On décrit l'évolution du rayon de la bulle de la manière suivante :  $R(t) = R_0 + r_1(t)$  (avec  $|r_1(t)| \ll R_0$ ). On suppose également que le champ de pression de l'air à l'intérieur de la bulle reste uniforme et prend la forme suivante :  $P(t) = P_0 + P_1(t)$  (avec  $|P_1(t)| \ll P_0$ ).

Dans cette partie, on assimile l'eau autour de la bulle à un fluide incompressible sans viscosité et de très grand volume devant le volume de la bulle. On suppose que la pression loin de la bulle est égale à  $P_0$ . On suppose enfin que l'air à l'intérieur de la bulle subit une transformation adiabatique réversible.

4. <https://www.pedagogie.ac-nantes.fr/physique-chimie/college/cycle-4/des-signaux-pour-observer-et-communiquer-les-signaux-sonores-1269864.kjsp>

**Q23. Expliquer** comment l'hypothèse d'une transformation adiabatique est habituellement justifiée. **Rappeler** la loi de Laplace pour un gaz parfait. **En déduire** une relation entre la pression  $P(t)$  et le rayon de la bulle  $R(t)$  puis en linéarisant cette équation, **en déduire** que :

$$P_1(t) = -\frac{3\gamma P_0}{R_0} r_1(t).$$

Dans la suite, tous les calculs seront menés à l'ordre le plus bas non nul en  $\frac{r_1(t)}{R_0}$ .

Lors de la variation du rayon de la bulle, les forces de pression s'exerçant sur le volume d'eau entourant la bulle travaillent. On admet, pour la suite, que le travail des forces de pression extérieures sur le volume d'eau entourant la bulle s'écrit :  $\delta W = P_1(t) dV_a$ , où  $V_a = \frac{4}{3}\pi R^3(t)$  représente le volume de la bulle d'air.

**Q24. En déduire** que le travail des forces de pression extérieures s'exerçant sur l'eau entourant la bulle peut s'écrire  $\delta W = -dE_p$ , avec  $E_p(r_1) = \frac{1}{2}K r_1^2$  et  $K = 12\pi\gamma P_0 R_0$ .

Vu la symétrie sphérique du problème, on utilise les coordonnées sphériques  $(r, \theta, \phi)$  associées à la base sphérique  $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_\phi)$  d'origine  $O$ , centre de la bulle d'air supposé fixe. On rappelle, dans ce cas, que  $r$  est la distance entre le point d'observation  $M$  et le centre  $O$  de la bulle et que le vecteur unitaire  $\vec{u}_r$  est égal à  $\frac{\vec{OM}}{r}$ . On suppose alors que le champ de vitesse est radial et a pour expression  $\vec{v}_1(M, t) = v_1(r, t)\vec{u}_r$ . L'eau étant supposée être un fluide incompressible, le champ des vitesses autour de la bulle est à flux conservatif.

**Q25.** En utilisant cette dernière propriété, **démontrer** que le champ des vitesses  $v_1(r, t)$  s'exprime de la manière suivante :

$$v_1(r, t) = \frac{R_0^2}{r^2} \dot{r}_1(t).$$

**Q26. Déterminer** l'expression de l'énergie cinétique de toute l'eau autour de la bulle. **Exprimer** le résultat sous la forme suivante :  $E_c = \frac{1}{2}\mathcal{M} \dot{r}_1^2$  où  $\mathcal{M} = 4\pi\mu_e R_0^3$ . Pour ce faire, on pourra effectuer une intégration en volume de l'énergie cinétique volumique du fluide en considérant des coquilles sphériques d'épaisseur  $dr$ . On rappelle que l'on suppose que le volume d'eau autour de la bulle est très grand devant le volume de la bulle.

**Q27.** En faisant un raisonnement énergétique soigneusement justifié, **montrer** que l'équation différentielle régissant l'évolution du rayon de la bulle  $r_1(t)$  s'écrit :  $\ddot{r}_1 + \frac{K}{\mathcal{M}} r_1 = 0$ .

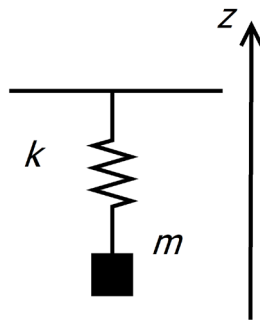


FIGURE 8 – Modélisation des oscillations d'une bulle d'air dans l'eau.

Pour expliquer les caractéristiques du son émis par une bulle de gaz dans un liquide, Minnaert

montra en 1933 à travers une série d'expériences, qu'une bulle de gaz se comporte comme un oscillateur harmonique (« *pulsation theory* »).

**Q28. Justifier** que le système { bulle + eau } peut être modélisé par un ressort vertical de raideur  $k$  sur lequel est accrochée une masse  $m$  supposée ponctuelle. On notera  $\varepsilon(t)$  la position de la masse par rapport à sa position d'équilibre et on pourra appliquer le principe fondamental de la dynamique à la masse  $m$ . **Décrire** ce que représentent les grandeurs  $\varepsilon(t)$ ,  $k$  et  $m$ , dans cette analogie, pour l'étude des oscillations de la bulle d'air.

**Q29. Donner** la forme de la solution générale de l'équation obtenue à la question **Q27**, sans chercher à calculer les constantes d'intégration. Cette solution fait apparaître une pulsation caractéristique  $\omega_M$ , appelée pulsation de Minnaert. **Donner** son expression en fonction de  $\mu_e$ ,  $\gamma$ ,  $P_0$  et  $R_0$ . **Exprimer** de la même façon la fréquence caractéristique  $f_M$  correspondante, appelée fréquence de Minnaert.

**Q30. Prévoir** qualitativement la forme du signal reçu par le microphone dans le cadre de ce modèle développé dans cette partie I.3. **Comparer** à ce qui est visualisé sur l'oscilloscope figure 3 et **commenter**.

**Q31.** Dans le cadre de ce modèle et en supposant que la prise en compte de facteurs d'amortissement des oscillations de la bulle d'air ne change pas la fréquence des pseudo-oscillations, **calculer** la valeur du rayon  $R_0$  de la bulle générée dans l'expérience en utilisant la figure 3. **Commenter**. On pourra prendre comme valeur numérique pour  $P_0$  celle de la pression atmosphérique.

**QP32. Proposer** une définition d'un modèle, telle qu'elle pourrait être donnée aux élèves de cycle 4 ou de lycée.

**QP33.** Il est habituellement reconnu qu'un modèle possède plusieurs fonctions. **Citer** deux de ces fonctions. **Proposer** une activité, expérimentale ou non, qui pourrait être envisagée avec les élèves au lycée pour illustrer ces deux fonctions.

## I.4 Oscillations libres d'une bulle dans un fluide compressible

Dans cette partie, on se propose de modéliser la propagation dans l'eau des ondes sonores générées par les oscillations de la bulle d'air, en considérant cette fois le caractère compressible de l'écoulement d'eau autour de la sphère, que l'on suppose parfait. On néglige la viscosité de l'eau et la pesanteur.

On reprend les notations des parties I.2 et I.3 pour modéliser la propagation de l'onde sonore. En particulier la masse volumique de l'eau n'est a priori plus uniforme ni constante dans le temps :  $\mu(M, t) = \mu_e + \mu_1(M, t)$ .

On modélise la bulle d'air comme une sphère pulsante de rayon moyen  $R_0$  :  $R(t) = R_0 + r_1(t)$ . Cette sphère pulsante génère une onde sonore se propageant dans le fluide extérieur à la bulle.

Comme dans la partie I.3, on utilise la base et les coordonnées sphériques d'origine  $O$ , centre de la bulle, supposé fixe.

On suppose que le champ de surpression dans l'eau  $p_1(M, t)$  ne dépend que de la variable spatiale  $r$  et du temps  $t$  :  $p_1(M, t) = p_1(r, t)$ . On suppose également que le champ des vitesses respecte la symétrie sphérique et a pour expression générale :  $\vec{v}_1(M, t) = v_1(r, t)\vec{u}_r$ .

On rappelle l'équation de propagation que doit vérifier le champ de surpression dans l'eau, comme évoqué dans la question **Q15** :  $\Delta p_1(M, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_1(M, t)}{\partial t^2} = 0$ .

On admet l'expression mathématique suivante du Laplacien :  $\Delta p_1(M, t) = \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r p_1(r, t))$ .

**Q34. Montrer** qu'une expression du champ de surpression de la forme  $p_1(r, t) = \frac{1}{r}g\left(t - \frac{r-R_0}{c_e}\right)$ , où  $g(x)$  est une fonction quelconque réelle a priori d'une variable réelle  $x$ , est bien une solution de l'équation de propagation.

**Q35. Caractériser** la nature de ce type d'onde. **Donner** une interprétation physique du terme  $\frac{r-R_0}{c_e}$ .

**Q36.** Comme on néglige les phénomènes de tension superficielle, il y a continuité de la pression à l'interface bulle/air en  $r = R(t) \simeq R_0$ . **Exprimer** alors la fonction  $g(t)$  en fonction de  $r_1(t)$ ,  $\gamma$  et  $P_0$ , puis **montrer** que le champ de pression  $p_1(r, t)$  a pour expression :

$$p_1(r, t) = -\frac{3\gamma P_0}{r} r_1 \left( t - \frac{r - R_0}{c_e} \right).$$

Compte tenu de l'émission de cette onde sonore dans l'eau, l'équation différentielle régissant l'évolution de la bulle obtenue à la question **Q27** est modifiée. D'après les conditions aux limites cinématiques traduisant l'imperméabilité de la bulle d'air, on admet alors que :

$$v_1(R(t), t) = \dot{r}_1 \simeq v_1(R_0, t).$$

**Q37. Projeter** l'équation d'Euler linéarisée obtenue à la question **Q15** sur le vecteur  $\vec{u}_r$ , puis en utilisant la question **Q36** et en se plaçant juste au-dessus de l'interface de la bulle en  $R(t) \simeq R_0^+$ , **montrer** que la nouvelle équation différentielle régissant l'évolution du rayon  $r_1(t)$  s'écrit :

$$\ddot{r}_1 + \frac{\omega_M}{Q} \dot{r}_1 + \omega_M^2 r_1 = 0 \text{ avec } Q_e = \frac{c_e}{R_0 \omega_M}.$$

**Q38. Interpréter** physiquement la présence du deuxième terme  $\frac{\omega_M}{Q} \dot{r}_1$ . **Proposer** un autre exemple en physique où un tel terme peut apparaître.

**Q39. Donner** l'expression de la solution générale de l'équation établie dans la question **Q37** dans le cas où  $Q > \frac{1}{2}$  (on ne cherchera pas à déterminer les constantes d'intégration). **En déduire** l'expression approchée du champ de surpression au niveau de l'hydrophone. **Préciser** qualitativement si le modèle de cette partie I.4 permet d'interpréter le signal de la figure 3.

**Q40.** En utilisant la valeur numérique du rayon obtenu à la question **Q31**, **estimer** la valeur numérique du facteur de qualité  $Q$  attendu dans le cadre de ce modèle. **Justifier** a posteriori l'approximation qui a été faite dans la question **Q31**, en assimilant la pulsation de Minnaert à la pseudopulsation.

**Q41.** En utilisant l'oscillogramme de la figure 3, **estimer** la valeur numérique expérimentale du facteur de qualité  $Q$ . **Conclure** quant à la validité du modèle élaboré. **Proposer** deux autres sources possibles d'amortissement.

## I.5 Oscillations forcées d'une bulle dans un fluide compressible

Dans les parties précédentes, on a étudié les oscillations libres d'une bulle à partir de conditions initiales où la bulle n'est pas à l'équilibre (lorsque par exemple, elle sort de la seringue). On peut également forcer le mouvement de la bulle, en la soumettant à une onde sonore générée par un haut-parleur. On peut montrer que si la bulle est soumise à une surpression  $P_{ext}(t)$  par rapport à

la pression  $P_0$  à l'équilibre, l'équation différentielle régissant le rayon de la bulle (en supposant que cette surpression est uniforme sur la surface de la bulle) est donnée par :

$$\ddot{r}_1 + \frac{\omega_M}{Q} \dot{r}_1 + \omega_M^2 r_1 = \frac{P_{ext}(t)}{\mu_e R_0}.$$

**Q42. Déterminer** la dimension du terme de droite de l'équation, indépendamment de celle-ci, puis **vérifier** l'homogénéité de l'équation.

**Q43.** Dans le cas où  $P_{ext}(t) = B \cos(\omega t)$ , **donner** la forme générale de la solution de cette équation différentielle. Pour le régime sinusoïdal forcé, on prendra soin de bien donner l'amplitude complexe  $\underline{r}_1$  associée au rayon  $r_1(t)$ , définie comme  $r_1(t) = \Re(\underline{r}_1)$ , où  $\Re(\underline{r}_1)$  représente la partie réelle du nombre complexe  $\underline{r}_1$ .

On peut montrer que, sous l'effet de cette oscillation forcée à la pulsation  $\omega$ , la bulle rayonne également une onde sonore à la même pulsation  $\omega$ . Lorsque l'on néglige les termes de propagation, cette onde est associée à un champ de surpression à la distance  $d$  du centre de la bulle caractérisée par l'amplitude complexe  $\underline{p}_{ray}$  suivante :

$$\underline{p}_{ray} = B e^{i\omega t} \frac{R_0}{d} \frac{\omega^2}{\omega_M^2 - \omega^2 + i\omega \frac{\omega_M}{Q}}.$$

**Q44. Dessiner** l'allure de l'amplitude de la surpression rayonnée par la bulle et recueillie par l'hydrophone en fonction de la pulsation  $\omega$ . On admet qu'en régime forcé, compte tenu de l'ordre de grandeur du facteur de qualité  $Q$ , il existe une pulsation de résonance égale à la pulsation de Minnaert  $\omega_M$  introduite à la question **Q29**.

Le dispositif expérimental utilisé dans la thèse de V. Leroy<sup>5</sup> pour étudier les oscillations d'une bulle en régime forcé est représenté figure 9.

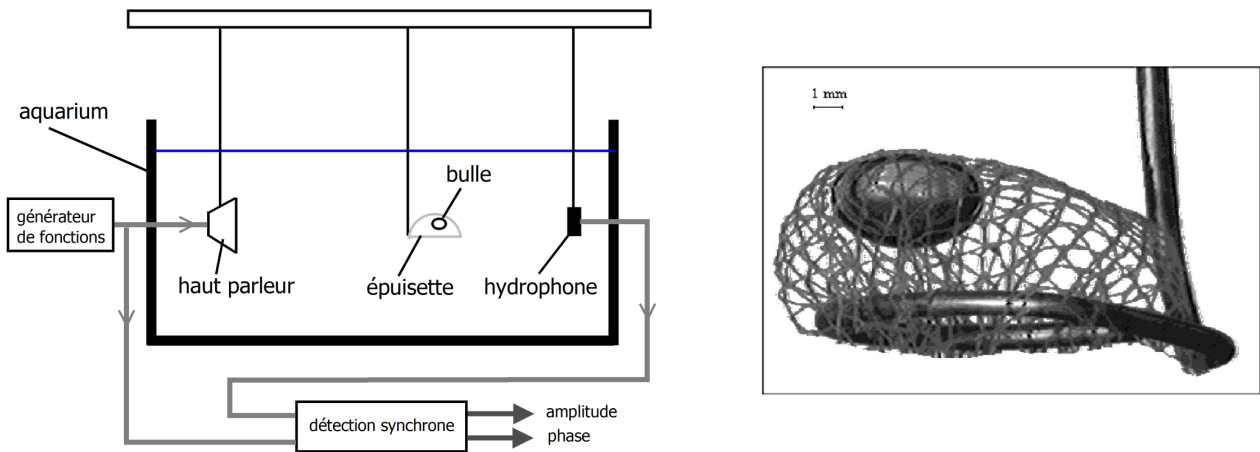


FIGURE 9 – Dispositif expérimental utilisé par V. Leroy<sup>5</sup>. À gauche : schéma du dispositif. À droite : un exemple de bulle piégée dans l'épaissette (petit axe = 1,9 mm ( $\pm 5\%$ ) et grand axe = 2,5 mm ( $\pm 5\%$ ), rayon de la sphère équivalente en volume = 2,3 mm).

**Q45.** Pour réaliser les expériences, une épuisette a été nécessaire. En **expliquer** la raison. **Discuter** les intérêts et les limites de l'utilisation de l'épaissette.

5. Thèse de Valentin Leroy, Université Paris 7, 29 octobre 2004, « *Bulles d'air dans l'eau : couplage d'oscillateurs harmoniques et excitation paramétrique* ».

**Q46.** À l'aide du dispositif présenté figure 9, **proposer** une méthode pour mesurer la pulsation de Minnaert  $f_M$  en régime forcé. **Préciser** les précautions à prendre pour avoir accès uniquement à la surpression acoustique rayonnée.

Les résultats des expériences en régime forcé<sup>6</sup> sont présentés figure 10.

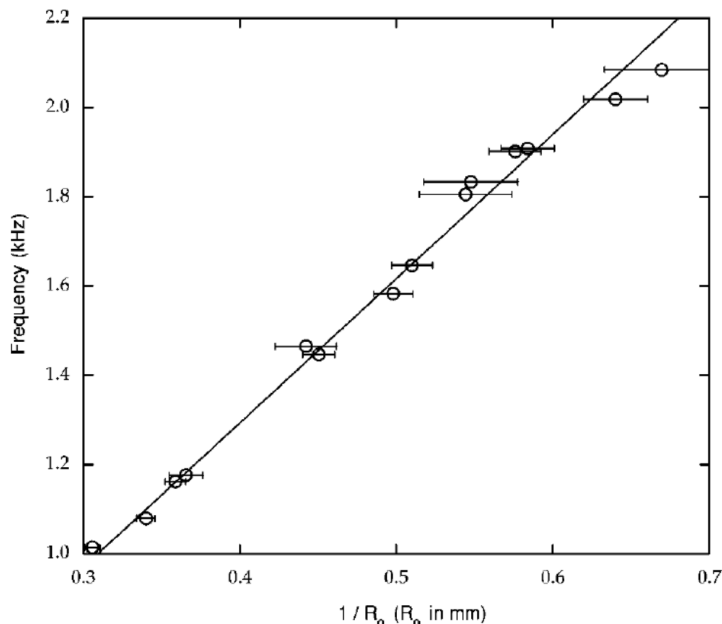


FIGURE 10 – Résultats expérimentaux. Fréquence de résonance en fonction de l'inverse du rayon de la bulle à l'équilibre (rayon équivalent d'une bulle sphérique). En trait plein, le résultat de la régression linéaire (pente  $3,23 \pm 3\%$  kHz.mm)

**Q47. Prévoir** la pente attendue dans le cadre du modèle étudié (question **Q29**) en utilisant les mêmes unités que celles de la figure 10. On prendra  $P_0 = 1,0 \times 10^5$  Pa. **Commenter** la qualité de l'ajustement réalisé par régression linéaire. **Conclure** quant à la validité de la formule donnant l'expression de la fréquence de Minnaert dans le cadre de ce modèle.

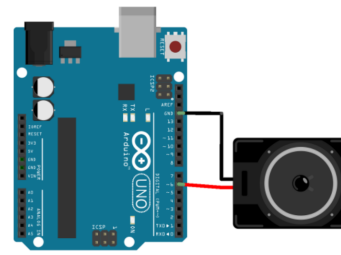
Dans le cadre du programme de la classe de seconde, la capacité exigible suivante est indiquée « Utiliser un dispositif comportant un microcontrôleur pour produire un signal sonore ». Il est possible de faire travailler cette capacité exigible aux élèves sur un microcontrôleur de type Arduino. Il s'agit d'un circuit électronique qui permet grâce à des instructions d'exécuter des actions (allumer une LED, émettre un signal, etc.), comme dans l'activité expérimentale<sup>7</sup> illustrée figure 11.

6. V. Leroy, M. Deavud, J-C Bacri, « The air bubble : experiments on an unusual harmonic oscillator », American Journal of Physics 70, 1012–1019 (2002).

7. <http://sciences-physiques.ac-besancon.fr/2020/01/08/2nde-produire-un-son-a-laide-dun-microcontroleur>

Dans le cadre de l'activité expérimentale visant à travailler la capacité exigible *Utiliser un dispositif comportant un micro-contrôleur pour produire un signal sonore*, on peut utiliser sa capacité à émettre des signaux qui seront ensuite envoyés sur un haut-parleur et ainsi jouer la mélodie.

Le montage est représenté ci-contre.



- La sortie utilisée est une sortie numérique ; cela signifie que le signal émis (à destination) du haut-parleur est le suivant :
- 50% du temps le signal possède sa valeur maximale, on dit qu'il est en état haut (HIGH en anglais)
  - 50% du temps le signal possède sa valeur minimale (nulle), on dit qu'il est en état bas (LOW en anglais)

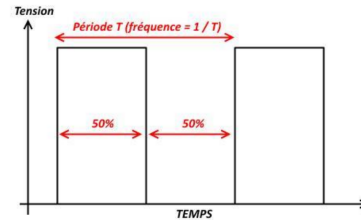


FIGURE 11 – Extrait de l'activité donnée aux élèves.

Dans le langage de programme Arduino, la fonction `tone(X, f, t)` permet de générer un signal électrique périodique de fréquence  $f$  pendant une durée  $t$  (en ms) sur la sortie numérique n°X.

**QP48. Préciser** ce que génère la ligne de code suivante : `tone(2,500,3000)`.

La mélodie « Au clair de la Lune » comporte les 11 premières notes ci-dessous :



On donne aussi les correspondances suivantes

Note/Octave	Fréquence (Hz)
Do	262
Ré	294
Ré#	311
Mi	330
Fa	349
Fa#	370
Sol	392
Sol#	415
La	440
La#	466
Si	494

Une ronde



4 temps

Une blanche



2 temps

Une noire



1 temps

Le code permettant d'émettre la première note est reproduit ci-dessous :

```
1 void setup ()
2 {
3     pinMode (6 ,OUTPUT );
4 }
5 void loop ()
6 {
7     tone (6 ,262 ,400);
8     delay (400);
9 }
```

**QP49. Expliciter** sous la forme de 3 commentaires à destination des élèves les lignes 3, 7 et 8 dans le code ci-dessus.

**QP50. Compléter** le programme précédent pour qu'il puisse jouer les cinq premières notes de la mélodie étudiée.

**QP51.** Il est également possible de piloter la carte à microcontrôleur Arduino en langage Python. **Indiquer** un avantage et un inconvénient de ce pilotage en langage Python.



## II Propagation du son dans un milieu bulleux

Dans la partie précédente, la bulle a été essentiellement étudiée comme un système générant une onde sonore. Dans cette partie, on se propose de voir comment la présence de bulles dans un liquide peut modifier la propagation d'une onde sonore.

Il existe une expérience connue, facilement réalisable à la maison et qui est maintenant diffusée sur les réseaux sociaux, l'« *effet chocolat chaud* », nom donné par le scientifique F. S. Crawford en 1982<sup>8</sup>. Il existe plusieurs variantes de cette expérience : on peut utiliser de la poudre de chocolat ou de café, une boisson gazeuse, un cachet d'aspirine ou tout simplement de l'eau chaude sortant d'un robinet avec suffisamment de pression. La suite du sujet s'intéresse à la dernière modalité. Il s'agit d'utiliser un verre d'eau assez haut et d'y verser de l'eau chaude. On tape ensuite en bas dans le fond du verre avec une cuillère (soit immergée soit en dessous du verre selon les sources) et on écoute le son généré. On constate que la hauteur du son évolue dans le temps au fur et à mesure que l'aspect de l'eau « s'éclaircit » dans le verre, c'est-à-dire au fur et à mesure que les bulles d'air montent dans le verre. Le son devient de plus en plus aigu, autrement dit, la fréquence du son généré augmente. L'effet inverse, qui a lieu au tout début de l'expérience, ne sera pas étudié dans ce sujet.

Pour ce sujet, une expérience a été réalisée avec une éprouvette et de l'eau chaude issue du robinet (voir figure 12). On a tapé régulièrement le fond de l'éprouvette à l'aide d'un bout de bois et le spectre du son émis a été visualisé à l'aide d'un oscilloscope numérique en mode single, ce dernier calculant lui-même la transformée de Fourier (FFT). La figure 13 donne l'évolution de la fréquence du mode fondamental émise en fonction du temps. On se propose, dans cette partie II, d'expliquer cette expérience très ludique et facile à mettre en œuvre à l'aide d'un modèle théorique assez simple.

---

8. F.S. Crawford, « *The hot chocolate effect* », American Journal of Physics 50, 398 (1982).

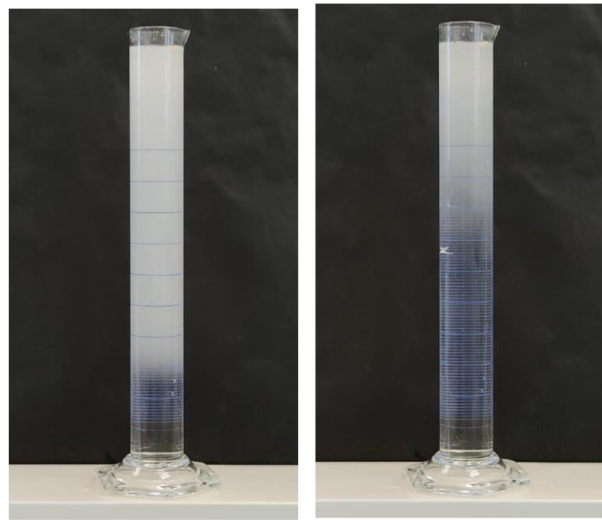
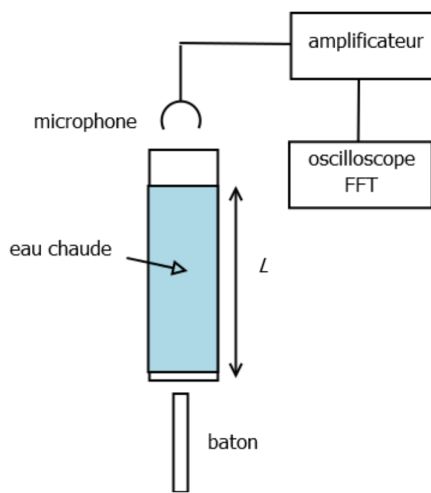


FIGURE 12 – À gauche : dispositif expérimental. À droite : photographie de l'éprouvette remplie d'eau chaude. 40 secondes séparent les deux photographies.

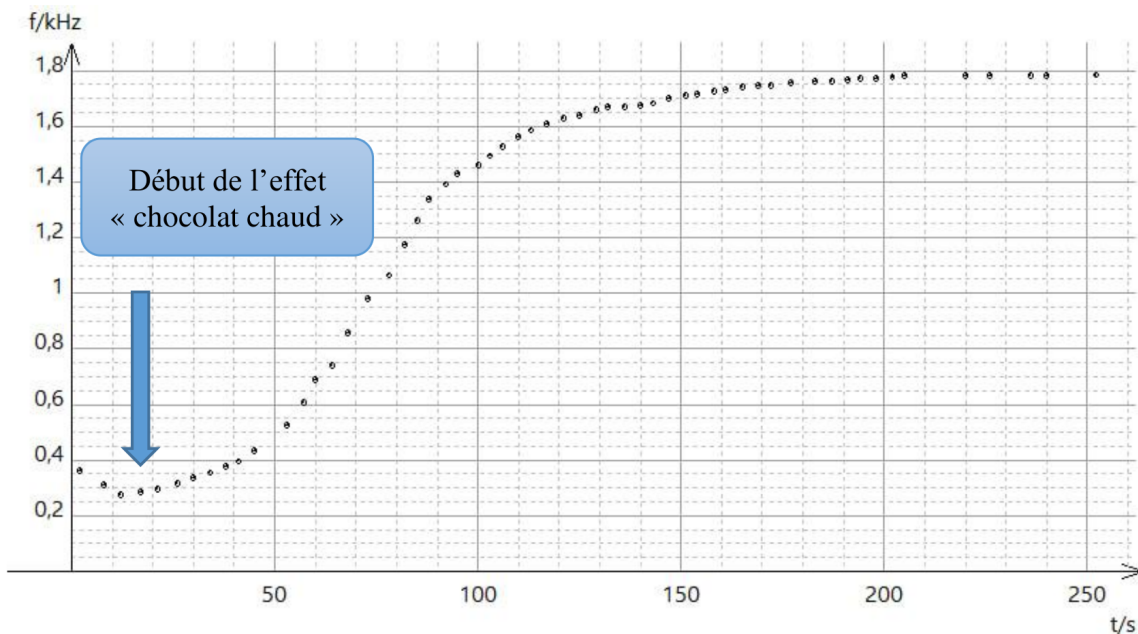


FIGURE 13 – Évolution de la fréquence du mode fondamental (en kHz) en fonction du temps (en s). La mesure de la fréquence a été réalisée avec le curseur de l'oscilloscope sur la FFT. Température de l'eau chaude :  $T = 40,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$  et hauteur de la colonne d'eau  $L = 21,8 \pm 0,1\text{ cm}$ .

## II.1 Cavité résonante

Avant de s'intéresser à l'influence des bulles sur les caractéristiques du son émis, il est important de comprendre dans un premier temps ce qui fixe la hauteur du son émis lorsque le récipient contient uniquement de l'eau chaude sans bulles. On considère donc tout d'abord une éprouvette entièrement remplie d'eau plate sans bulles sur une hauteur  $L$ .

**Q52. Préciser** comment on peut décomposer une onde sonore pouvant être générée dans une colonne d'eau, assimilée à une cavité mixte (ouvert-fermé). **Décrire** les conditions aux limites que

doit vérifier le champ de surpression au fond du verre et à la surface libre de l'eau. **Faire** de même pour le champ de vitesses.

**Q53. Représenter** l'allure du champ de surpression dans la colonne d'eau à un instant donné pour les trois premiers modes longitudinaux.

**Q54. En déduire** la relation entre la hauteur  $L$  de la colonne d'eau et la longueur d'onde  $\lambda_n$  du  $n$ ème mode longitudinal, dans l'hypothèse où un tel mode est présent dans le milieu et avec  $n = 1$  correspondant au premier mode appelé aussi mode fondamental.

**Q55. Exprimer** la fréquence  $f_n$  du  $n$ ème mode longitudinal en fonction de  $c_e$ , de  $n$  et de  $L$ . Puis **en déduire** la fréquence  $f_1$  du mode fondamental.

Dans une publication<sup>9</sup>, les chercheurs utilisent un mug cylindrique en verre à la place de l'éprouvette et la hauteur de la colonne d'eau est comprise entre 73 mm et 76 mm. Grâce à une analyse spectrale, ils ont mesuré la fréquence du mode fondamental lorsque le mug est rempli d'eau chaude sans bulles à une température comprise entre 81°C et 83°C :  $f_1^{\text{exp}} = 5495 \pm 30$  Hz. Ils en déduisent la valeur de la célérité du son déterminée grâce à la formule de question **Q55** :  $c_e^{\text{exp}} = 1627$  m.s<sup>-1</sup>. Les chercheurs ont trouvé, par ailleurs, dans le *Handbook*, la valeur de référence suivante de la vitesse du son dans l'eau à 80°C :  $c_e^{\text{Handbook}} = 1554,4$  m.s<sup>-1</sup>.

Ils en concluent dans leur article que la valeur estimée de la vitesse du son dans l'eau à la température de 80°C est en accord approximativement avec le *Handbook*.

**Q56. Commenter** les conclusions des chercheurs.

## II.2 Modèle de Wood

Le modèle présenté ici n'est valable que si les fréquences des sons émis sont très inférieures aux fréquences de Minnaert des bulles mises en jeu dans le dispositif. Cette hypothèse semble raisonnable dans la mesure où les bulles considérées dans cette expérience ont une taille de l'ordre du micromètre, ce qui correspondrait à une fréquence de Minnaert de quelques MHz.

On rappelle l'expression de la célérité du son dans un fluide introduite dans la partie I.2 :  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \chi_s}}$ , où  $\mu_0$  est la masse volumique du fluide considéré au repos et  $\chi_s$  est le coefficient de compressibilité isentropique du fluide considéré.

On note  $\phi$  la fraction volumique des bulles d'air dans l'eau, définie comme le rapport du volume d'air contenu dans le récipient sur le volume total de l'ensemble eau + bulles d'air.

On peut décrire le milieu eau + bulles, dans la mesure où le nombre de bulles est élevé, comme un milieu effectif constitué d'un mélange eau/gaz, caractérisé par une masse volumique moyenne  $\mu_{eff}$  et un coefficient de compressibilité moyen  $\chi_{eff}$ .

On note  $\mu_e$  (respectivement  $\mu_a$ ) la masse volumique de l'eau (respectivement de l'air) et  $\chi_e$  (respectivement  $\chi_a$ ) le coefficient de compressibilité isentropique de l'eau (respectivement de l'air).

On note  $c_{eff}$  la célérité du son effective dans ce milieu bulleux donné par  $c_{eff} = \frac{1}{\sqrt{\mu_{eff} \chi_{eff}}}$ .

**Q57. Exprimer**  $\mu_{eff}$  en fonction de  $\mu_e$ ,  $\mu_a$  et  $\phi$ . De même, **exprimer**  $\chi_{eff}$  en fonction de  $\chi_e$ ,  $\chi_a$  et  $\phi$ .

**Q58.** On suppose ici que  $\phi \ll 1$ . **Montrer** que l'on peut alors faire les approximations suivantes :  $\mu_{eff} \simeq \mu_e$  et  $\chi_{eff} \simeq \chi_e + \phi \chi_a$ . **En déduire** l'expression de la célérité effective  $c_{eff}$  du son dans le milieu en fonction de  $\mu_e$ ,  $\chi_e$ ,  $\chi_a$  et  $\phi$ .

9. Z. Trávníček, A. I. Fedorchenko, M. Pavelka and J. Hrubý, « Visualization of the hot chocolate sound effect by spectrograms », Journal of sound and vibration 331, 5387 (2012).

**Q59. Expliquer** qualitativement comment le modèle proposé ici permet de comprendre le phénomène de « *l'effet chocolat chaud* » (augmentation de la fréquence du mode fondamental au cours du temps).

**Q60. Exprimer** la fraction volumique  $\phi$  des bulles d'air à l'instant  $t$  en fonction de la fréquence du mode fondamental du son perçue  $f_1$  à cet instant, des coefficients  $\chi_e, \chi_a$  et de la fréquence  $f_1^{fin}$  perçue à la fin de l'expérience. **Évaluer** l'ordre de grandeur de la fraction volumique  $\phi$  d'air dans notre expérience (figure 12) au tout début de « *l'effet chocolat chaud* ». **Commenter**.



### III Interaction d'une onde acoustique avec un film de savon

De nombreux travaux de recherche ont été effectués sur l'étude de la propagation du son dans de la mousse liquide. De telles études peuvent avoir des applications diverses, notamment dans le domaine de l'isolation phonique. Une mousse liquide est un milieu essentiellement composé de bulles d'air, séparées entre elles par des fines membranes liquides, les films de savon. Ces membranes se rejoignent par trois pour former des arêtes liquides appelées « *bords de Plateau* ». Les mousses liquides se différencient des liquides bulleux par la quantité de gaz présent : en général, la fraction volumique de gaz est supérieure à 74%. Les membranes jouant un rôle important dans la propagation du son dans la mousse, il est donc naturel que certains travaux de recherche aient porté sur la réponse acoustique d'un film d'eau savonneuse<sup>10</sup>.

#### III.1 Mesure optique de l'épaisseur d'un film de savon

Pour développer ces études acoustiques, il est important de mesurer de manière indépendante et fiable l'épaisseur  $e$  d'un film de savon. Dans cette partie, une méthode optique de mesure de l'épaisseur  $e$  d'un tel film de savon va être décrite<sup>10</sup>. Ces mesures optiques peuvent être ensuite comparées à des mesures, réalisées de manière indépendante, en étudiant des ondes acoustiques interagissant avec le film. Le dispositif expérimental simplifié qu'on considère dans cette partie pour ces mesures optiques est représenté sur la figure 14. Une fibre optique émet de la lumière blanche sur le film de savon. Puis la lumière réfléchiée par le film est collectée à l'aide d'une autre fibre optique réceptrice, elle-même reliée à un spectromètre. On note  $i$  l'angle d'incidence entre la lumière incidente et la normale au film de savon. La fibre émettrice illumine le film de savon avec un faisceau quasi-parallèle de diamètre 8 mm. L'épaisseur  $e$  déduite de la méthode de mesure est donc une épaisseur moyenne du film de savon sur la surface du faisceau. On note également que le film de savon est horizontal lors de la réalisation de la mesure.

---

10. Thèse de Camille Gaulon, Université de Paris 7, 30 septembre 2019, « *Propagation acoustique dans les mousses liquides et les mousses solides membranaires* ».

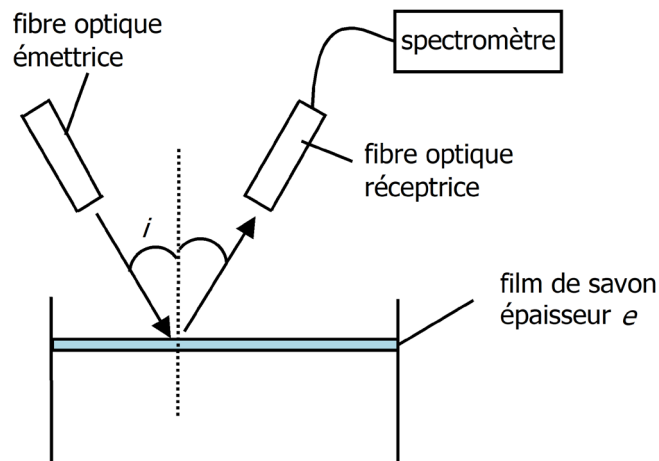


FIGURE 14 – Dispositif expérimental simplifié utilisé pour la mesure optique de l'épaisseur du film de savon.

**Q61. Préciser** le phénomène physique mis en jeu dans le spectrophotomètre et l'élément matériel principal qui le constitue.

On s'intéresse au phénomène d'interférences entre les deux premiers rayons réfléchis par le film de savon assimilé à une lame mince à faces parallèles. On note  $i$  l'angle d'incidence (voir figure 14),  $\theta$  l'angle de réfraction dans le film et  $n$  l'indice optique du film de savon d'épaisseur  $e$ . Ici, on prendra  $n = 1,4$ .

**Q62. Reproduire** sur la copie le schéma de la figure 15 et **dessiner** les deux rayons réfléchis qui interfèrent à l'infini. **Indiquer** également sur le schéma l'angle  $\theta$ .

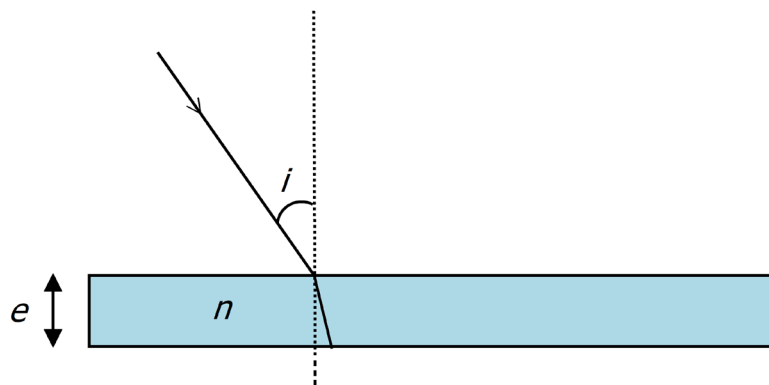


FIGURE 15 – Interférences entre les deux rayons réfléchis par le film de savon.

Dans un premier temps, on fait l'hypothèse que la lumière incidente est monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$ . On admet que la différence de marche géométrique  $\delta$  entre les deux rayons qui interfèrent peut s'écrire :  $\delta = 2ne \cos \theta$ .

**Q63.** On dénomme « rayon 1 » le rayon qui ne parcourt pas de trajet dans le film de savon et « rayon 2 » l'autre. **Préciser** lequel de ces deux rayons a été choisi comme référence pour le calcul de la différence de marche  $\delta$ . **Justifier** la réponse à l'aide d'un cas limite.

On admet par la suite qu'il existe entre les deux rayons qui interfèrent une différence de marche supplémentaire à prendre en compte égale à  $\lambda/2$ , due à la réflexion du rayon 1 sur l'interface entre l'air et le savon.

**Q64. Rappeler** la formule des interférences à deux ondes dans le cas où les deux ondes ont même amplitude (associée à une même intensité lumineuse  $I_0$ ) et une différence de phase  $\Delta\varphi$ . En supposant que les deux premiers rayons réfléchis sur le film de savon ont même amplitude, associée à une même intensité lumineuse  $I_0$ , **en déduire** l'expression de l'intensité lumineuse détectée au niveau de la fibre réceptrice en fonction de  $I_0$ ,  $n$ ,  $e$ ,  $\lambda$  et  $\theta$ .

La fibre optique émettrice émet maintenant une lumière blanche quasi-parallèle. On néglige le phénomène de dispersion dans le film de savon. Un exemple de signal délivré par le spectromètre et ayant permis une mesure de l'épaisseur de  $e = 2,37 \mu\text{m}$  avec la lumière blanche est présenté sur la figure 16.

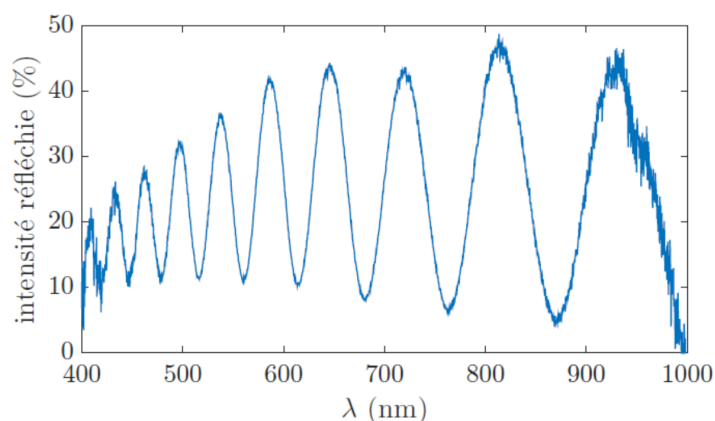


FIGURE 16 – Exemple de signal délivré par le spectromètre.

**Q65. Décrire** la couleur perçue par l'œil humain pour la lumière réfléchie. **Dénommer** le spectre visualisé. **Expliquer** la présence de maxima et de minima sur ce spectre.

**Q66. Proposer** une explication concernant la non nullité des minima. **Proposer** également une explication pour interpréter le fait que les maxima n'ont pas la même amplitude. **Donner** l'équation permettant de déterminer la position des minima de longueur d'onde  $\lambda_m$ , cette équation devant faire intervenir un entier naturel  $m$ .

**Q67.** En exploitant la figure 16 et en utilisant la question précédente **Q66**, **estimer** les valeurs numériques de l'angle de réfraction  $\theta$  puis de l'angle d'incidence  $i$  dans l'expérience réalisée.

### III.2 La danse du film de savon

Au cours d'une conférence de l'ESPCI<sup>11</sup>, une équipe de recherche a présenté une belle expérience permettant de visualiser l'interaction entre de la musique et un film de savon. Ce travail a donné lieu également à la parution d'un article<sup>12</sup>.

Le dispositif utilisé est présenté figure 17. Un tube de plexiglas de longueur  $L' = 35,5 \text{ cm}$  et de diamètre  $D = 26 \text{ mm}$  est placé horizontalement devant un haut-parleur pouvant délivrer de la musique. Un film de savon est présent sur l'ouverture du tube ne faisant pas face au haut-parleur.

11. <https://www.youtube.com/watch?v=XJ-f7tVVPF5k>

12. C. Gaulon, C.Derec, T. Combriat, P. Marmottant and F. Elias, « *Sound and vision : visualization of music with a soap film* », European Journal of Physics 38, 4 (2017).

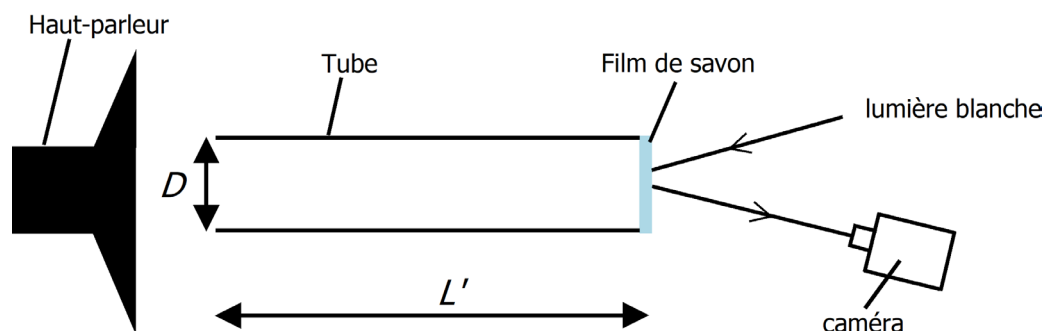


FIGURE 17 – Dispositif expérimental. La source de lumière est créée à l'aide d'une lampe de bureau et du papier calque diffusant.

**Q68. Préciser** le rôle du tube en plexiglas dans le dispositif.

On s'intéresse maintenant aux interférences lumineuses sur la lame d'eau savonneuse. Cette lame est verticale et est éclairée par une lampe blanche. Lorsqu'aucune onde sonore n'est présente, le film d'eau savonneuse présente des franges d'interférences colorées horizontales qui se déplacent lentement verticalement (Figure 18).

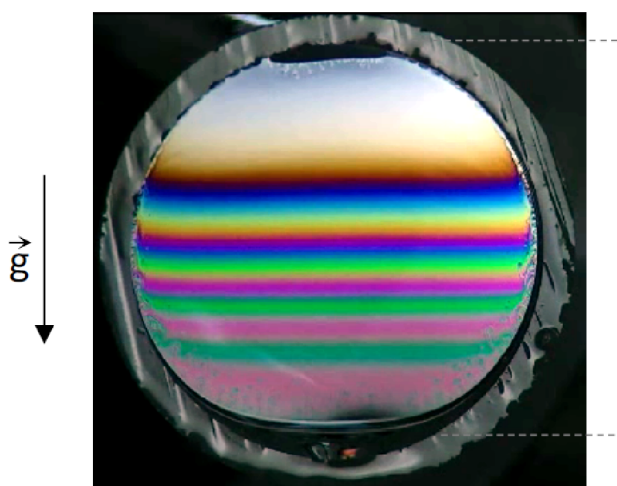


FIGURE 18 – Photographie du film de savon sans la présence d'ondes acoustiques<sup>11</sup>.

**Q69. Expliquer** les observations en l'absence d'onde acoustique (voir Figure 18). **Préciser** la nature des franges et leur localisation. Pour simplifier le raisonnement, on pourra supposer la lumière incidente quasi-parallèle et en incidence quasi-normale, ainsi que le film de savon d'épaisseur lentement variable. On pourra discuter de la longueur de cohérence de la lampe et de la nature de l'écoulement du fluide constituant le film de savon.

**Q70. Commenter** qualitativement la figure observée en présence de l'onde acoustique sur les trois photographies de la figure 19.

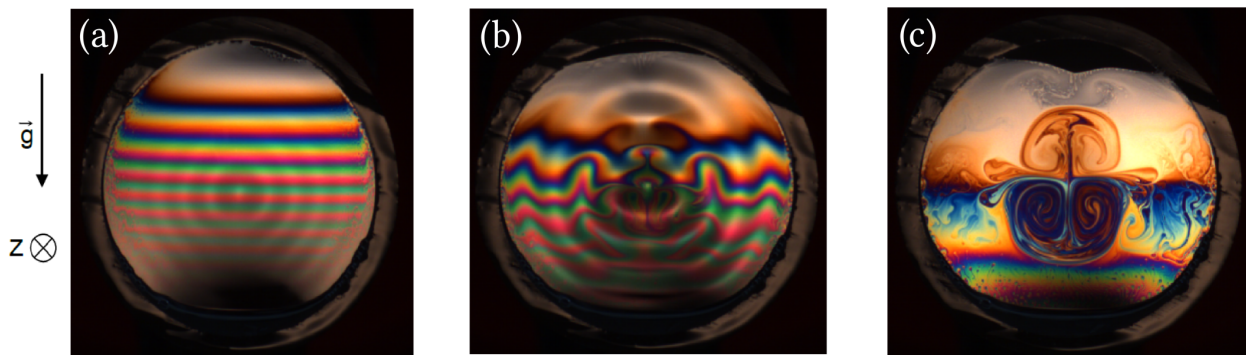


FIGURE 19 – Photographies du film de savon éclairé par une lampe blanche en présence d’ondes acoustiques, issues de la publication mentionnée ci dessus<sup>11</sup>. (a) Onde sonore monochromatique à la fréquence de 860 Hz (amplitude du son pas trop forte). (b) Morceau de musique « *Le bon, la brute et le truand* » d’Ennio Morricone au temps  $t = 7$  s à partir du début du morceau. (c) Morceau de musique « *Le bon, la brute et le truand* » d’Ennio Morricone à temps non précisé.

---

FIN DES QUESTIONS