

**CONCOURS ATS**  
**-SESSION 2021-**

**ÉPREUVE DE**  
**SCIENCES PHYSIQUES**

**CALCULATRICE INTERDITE**

**CODE ÉPREUVE : 957**

**DURÉE DE L'ÉPREUVE : 3H**

## Etude de quelques expériences à l'aide d'un smartphone

Ce sujet propose l'étude de quelques expériences que l'on peut réaliser avec les capteurs présents sur nos téléphones portables actuels. En effet des applications libres, comme FizziQ ou Phyphox, donnent accès aux résultats de mesures de ces nombreux capteurs permettant ensuite une exploitation des résultats.

Certaines questions, repérées par une barre en marge, ne sont pas guidées et demandent de l'initiative de la part du candidat. Les pistes de recherche doivent être consignées par le candidat sur sa copie ; si elles sont pertinentes, elles seront valorisées. Le barème tient compte du temps nécessaire pour explorer ces pistes et élaborer un raisonnement, il valorise ces questions de façon très significative.

### I- Etude d'un mouvement de chute avec un smartphone

#### a) Etude du capteur d'accélération présent sur les smartphones

On se propose dans un premier temps d'étudier le principe de fonctionnement des accéléromètres présents dans nos téléphones. Les avancées des nanotechnologies ont permis l'élaboration de ces accéléromètres à MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems), ces derniers sont fixés sur les cartes électroniques de nos smartphones. Dans toute la suite :

- On note  $R_T$  le référentiel terrestre supposé galiléen, de centre  $O$  et muni d'un repère orthonormé direct  $(O, \vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$  fixe dans ce référentiel. On note  $g$  l'intensité du champ de pesanteur terrestre, on prendra  $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$ .
- On note  $R$  le référentiel lié au téléphone. Dans un premier temps,  $R$  est astreint à un mouvement de translation selon la direction  $Ox$ .

On donne ci-dessous une schématisation simplifiée de l'accéléromètre étudié :

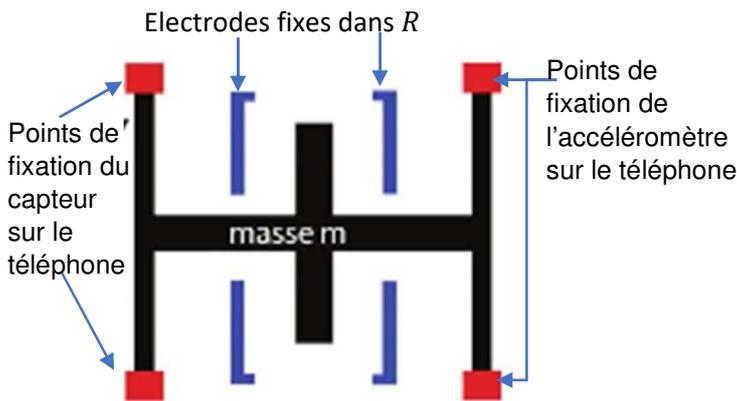


Figure 1 : Smartphone immobile dans  $R_T$

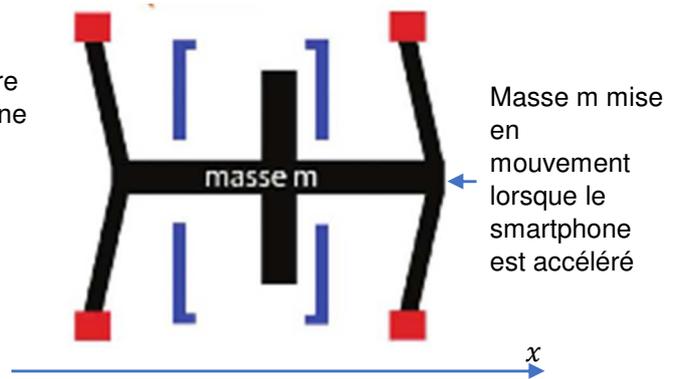
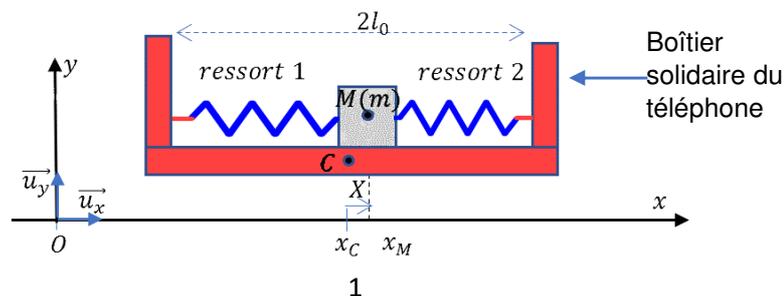


Figure 2 : Smartphone accéléré dans  $R_T$

Source : « *Smartphonique* » d'Ulysse Delabre (Dunod)

Pour cette étude mécanique, nous ne prendrons pas en compte les électrodes du capteur, fixes dans  $R$ . Lorsque le téléphone est accéléré horizontalement selon  $Ox$  (figure 2), le bloc de masse  $m$  du capteur est mis en mouvement. Il s'en suit des oscillations de la masse  $m$  qui peuvent être décrites de manière analogue à un système mécanique de type {masse-ressorts}. Dans la suite, nous allons donc modéliser l'accéléromètre en l'assimilant à une masse  $m$  repérée par le point  $M$  et reliée à deux ressorts. Ces deux ressorts sont fixés à un boîtier de centre  $C$  qui est lui-même solidaire du téléphone :



Ce modèle suppose que les deux ressorts sont identiques, de raideur  $k$ , de longueur à vide  $l_0$ . On note  $\vec{f}_1$  la force qu'exerce le ressort 1 sur  $M$  et  $\vec{f}_2$  la force qu'exerce le ressort 2 sur  $M$ . Le boîtier est de longueur  $2l_0$ . Le point  $C$ , repéré par l'abscisse  $x_c(t)$  est animé d'un mouvement rectiligne et accéléré par rapport à  $R_T$  et son accélération sera notée  $\vec{a}_c = a_c \vec{u}_x$ . La masse  $m$ , dont la position est repérée par le point  $M$  d'abscisse  $x_M(t)$  à l'instant  $t$ , est astreinte à un mouvement horizontal. Dans la suite, on pose  $X = x_M - x_c$ , ainsi  $X = 0$  si l'accéléromètre est immobile ou en mouvement rectiligne uniforme par rapport au référentiel terrestre.

1) Exprimer  $\vec{f}_1$  puis  $\vec{f}_2$  en fonction de  $k$  et  $X$ .

Le mobile  $M$  subit donc une force  $\vec{f}_1 + \vec{f}_2 = -2kXu_x$  de la part des ressorts et subit également la réaction normale du support, son poids ainsi qu'une force de frottement donnée par  $\vec{f}_3 = -\alpha(\dot{x}_M - \dot{x}_c)\vec{u}_x$  (où  $\alpha$  est une constante).

2) En utilisant le principe fondamental de la dynamique pour étudier le mouvement de  $M$  dans le référentiel terrestre, montrer que  $X(t)$  vérifie l'équation différentielle suivante :

$$\ddot{X} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{X} + \omega_0^2 X = -a_c$$

Où  $\omega_0$  et  $Q$  sont deux constantes dont on précisera les expressions en fonction des données du sujet.

3) Donner l'unité de  $\omega_0$  et  $Q$  ainsi que la signification physique de ces deux grandeurs.

Dans la suite, nous allons chercher à déterminer les conditions pour lesquelles le déplacement  $X$  est proportionnel à l'accélération  $a_c$  que l'on cherche à mesurer. Pour cela, on va étudier la réponse du capteur en régime sinusoïdal forcé tel que  $a_c = a_m \cos(\omega t)$  où  $\omega$  est la pulsation à laquelle oscille le téléphone et  $a_m > 0$  est une constante. Dans ces conditions, on écrit  $X(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi)$  où  $X_m > 0$  et  $\varphi$  sont des constantes pour une valeur de  $\omega$  donnée. En utilisant la notation complexe, on écrit  $\underline{X} = X_m e^{j(\omega t + \varphi)}$  et  $\underline{a}_c = a_m e^{j(\omega t)}$ .

4) En posant  $u = \frac{\omega}{\omega_0}$ , montrer que :  $X_m = \frac{a_m}{\omega_0^2 \sqrt{(1-u^2)^2 + (\frac{u}{Q})^2}}$

Dans la suite, on prendra  $Q = 5$  et  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 5$  kHz.

5) Montrer qu'il est possible d'observer un phénomène de résonance en élongation à la fréquence

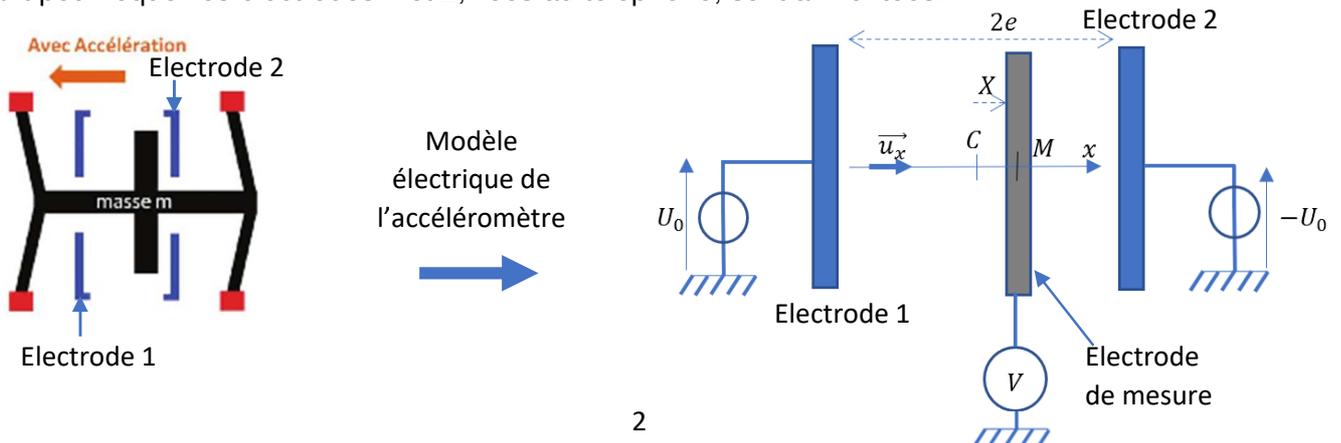
$$f_r = f_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$$

6) Proposer une estimation de la valeur de  $f_r$ .

7) Expérimentalement, on stimule le capteur à des fréquences  $f \ll f_r$ , montrer alors que  $X_m \approx Ka_m$  où  $K$  est une constante qu'on exprimera en fonction des données du sujet.

8) Pour cette question, on impose une accélération  $a_c$  constante telle que  $a_c = g$  et on fera l'approximation  $\pi^2 \approx 10$ . Estimer alors la valeur finale de  $X$  en nm.

On s'intéresse à présent à la conversion du déplacement  $X$  en tension. On propose alors le modèle électrique suivant pour lequel les électrodes 1 et 2, liées au téléphone, sont alimentées.



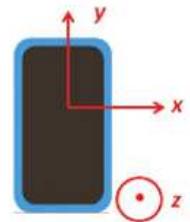
La masse  $m$  en translation, toujours repérée par le point  $M$ , est maintenant assimilée à une électrode mobile dans  $R$  permettant de mesurer le potentiel électrique (on admettra que la présence de cette électrode mobile ne perturbe pas le champ électrique créé par les électrodes 1 et 2).

L'électrode 1 est au potentiel  $U_0$  et l'électrode 2 au potentiel  $-U_0$ . Les électrodes 1 et 2 sont distantes de  $2e$  et de surface en regard  $S$ . Les dimensions de la cellule étudiée permettent de négliger les effets de bords et ainsi de considérer les électrodes 1 et 2 comme des plans infinis uniformément chargés en surface. On note  $+\sigma$  la densité surfacique de l'électrode 1 et  $-\sigma$  celle de l'électrode 2. Entre les électrodes, le milieu possède les propriétés électriques du vide et est caractérisé par une permittivité diélectrique notée  $\epsilon_0$ . Le point  $C$ , solidaire du téléphone, est à mi-distance des deux électrodes et reste donc à un potentiel nul.

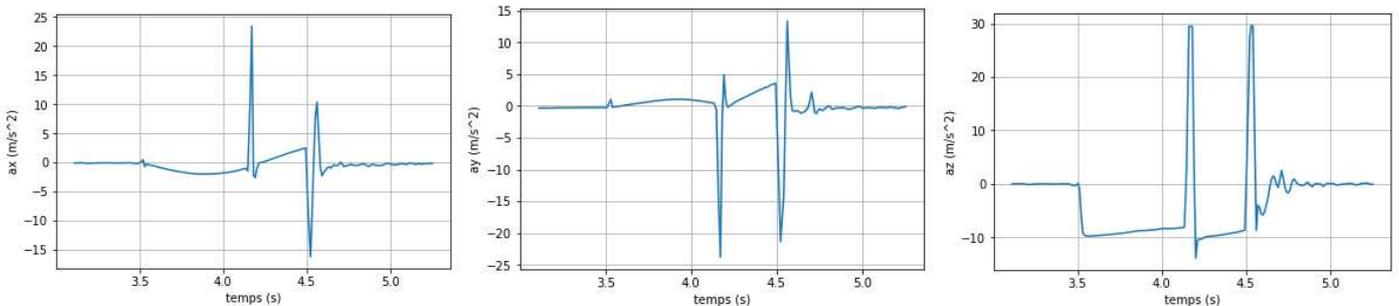
- 9) Énoncer le théorème de Gauss en nommant les grandeurs introduites et en rappelant leur unité respective.
- 10) Après une analyse des symétries et invariances de la distribution de charges et une utilisation du théorème de Gauss appuyée d'un schéma, montrer que l'électrode 1 prise isolément crée un champ électrique  $\vec{E}_1$  donné par  $\vec{E}_1 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{u}_x$  dans le demi espace situé à sa droite.
- 11) En l'absence de l'électrode de mesure, déterminer l'expression du champ électrique  $\vec{E}$  total dans le volume compris entre les électrodes 1 et 2 et montrer que  $\vec{E}$  est uniforme.
- 12) Montrer alors que le potentiel électrostatique  $V$  au niveau de l'électrode de mesure est  $V(X) = -\frac{U_0}{e} X$ .
- 13) Calculer la valeur de  $V$  affichée par le voltmètre lorsque  $a_c = g$ ,  $e = 1 \mu\text{m}$  et  $U_0 = 1 \text{ V}$ .

b) Etude d'un mouvement de chute

Les téléphones sont munis de 3 accéléromètres permettant d'apprécier l'accélération du téléphone suivant les trois directions de l'espace. Sur l'application Phyphox, il est possible d'afficher ces 3 accélérations :  $a_x$  (accélération suivant  $x$ ),  $a_y$  (accélération suivant  $y$ ),  $a_z$  (accélération suivant  $z$ ).



On donne ci-dessous, les relevés d'accélération d'un téléphone en chute libre, lâché sans vitesse initiale depuis une hauteur  $h$ . Les axes temporels sont gradués entre 3,5 s et 5,0 s. On indique qu'à la fin de sa chute, le téléphone rebondit sur un matelas posé au sol.



- 14) Estimer la hauteur  $h$  en explicitant votre démarche (graphe(s) utilisé(s), hypothèse(s), calculs, ...).

II- Etudes thermodynamiques à l'aide d'un smartphone

a) Vérification de la loi de Newton

Certains téléphones sont également munis d'un capteur de température (pour certains smartphones il est aussi possible d'utiliser le capteur de température prévu pour surveiller la température de la batterie). Nous allons nous intéresser ici au temps de réponse d'un capteur de température présent dans un smartphone. Dans la suite, nous allons assimiler ce capteur à une phase solide idéale (indilatable et incompressible) de capacité thermique  $C$ . On admettra la loi de Newton décrivant la puissance thermique  $P$  algébriquement reçue par le capteur à la température  $T$  de la part du milieu extérieur à la température  $T_{ext}$  :

$$P = -a(T - T_{ext}) \text{ où } a > 0 \text{ est une constante.}$$

- 15) Exprimer le transfert thermique élémentaire  $\delta Q$  algébriquement reçu par le capteur de la part du milieu extérieur pendant l'intervalle de temps  $dt$  en fonction de  $P$ .
- 16) Rappeler l'unité de la capacité thermique  $C$  et donner l'expression de la variation élémentaire  $dU$  de l'énergie interne du capteur lors d'une variation élémentaire  $dT$  de sa température.
- 17) En appliquant le 1<sup>er</sup> principe des systèmes fermés au capteur de température, démontrer que :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_{ext}}{\tau}$$

où  $\tau$  est une constante dont on précisera l'expression en fonction des données du sujet.

On souhaite tester le modèle précédent. On place alors le téléphone étudié dans un réfrigérateur à la température  $T_0 = 5\text{ °C}$  suffisamment longtemps pour que le capteur atteigne cette température  $T_0$ . A  $t = 0$ , on expose le téléphone à une température  $T_{ext} = 20\text{ °C}$ .

- 18) Donner l'expression de  $T(t)$  en fonction de  $T_{ext}$ ,  $T_0$  et  $\tau$ . Quel est la signification physique de  $\tau$  ?

Les valeurs des températures mesurées depuis l'instant  $t = 0$  sont reportées dans un fichier nommé mesures.csv.

Sous Scilab, on peut récupérer ces données dans un tableau, appelée M, avec la ligne de code ci-dessous :

```
M=csvRead("mesures.csv");
```

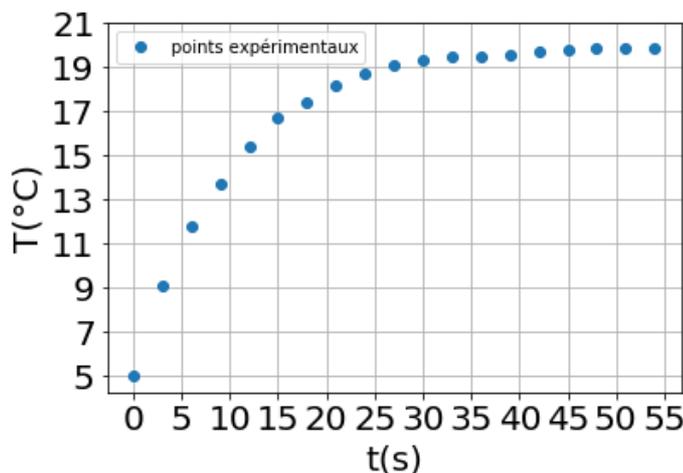
```
--> M
M =
0.    5.
3.    9.1
6.   11.8
9.   13.7
12.  15.4
15.  16.7
18.  17.4
21.  18.2
24.  18.7
27.  19.1
30.  19.3
33.  19.5
36.  19.5
39.  19.6
42.  19.7
45.  19.8
48.  19.9
51.  19.9
54.  19.9
```

Ci-contre est affiché le tableau M.

La première colonne contient les instants d'acquisition et la deuxième colonne contient les températures associées à ces instants d'acquisition.

- 19) Ecrire un programme permettant :
- d'obtenir deux tableaux à une dimension appelés  $t$  et  $T$  contenant respectivement les valeurs des temps d'acquisition et les valeurs des températures mesurées ;
  - d'afficher le graphe expérimental  $T(t)$ .

On obtient le graphe expérimental ci-dessous :



- 20) En déduire une valeur approchée de la constante  $\tau$ , préciser la méthode utilisée pour déterminer  $\tau$ .
- 21) Indiquer le type de filtre auquel est équivalent le capteur et estimer sa fréquence de coupure.

b) Détermination de l'efficacité d'une pompe à chaleur

On souhaite étudier une pompe à chaleur en mode chauffage. Le fluide frigorigène utilisé est le R410A. Cette machine est cyclique, ditherme et nous supposons qu'elle impose au fluide frigorigène le cycle suivant (on note  $T_i, P_i, h_i$  respectivement la température, la pression et l'enthalpie massique au point  $i$ ) :

- En  $A\{T_A, P_A\}$  le fluide est un gaz saturé et entre dans un compresseur.
- La transformation  $A \rightarrow B$  imposé par le compresseur est une compression supposée adiabatique et mécaniquement réversible, en  $B\{T_B, P_B\}$  on obtient une vapeur sèche.

- La transformation  $B \rightarrow C\{T_C, P_C\}$  est un refroidissement isobare jusqu'à apparition de la première goutte de liquide. Le transfert thermique mis en jeu au cours de cette transformation contribue au chauffage désiré et se déroule dans un condenseur ne comportant aucune partie mobile.
- La transformation  $C \rightarrow D\{T_D, P_D\}$  est une liquéfaction effectuée à la pression  $P_B$  et aboutissant à un liquide saturé. Le transfert thermique mis en jeu au cours de cette transformation contribue également au chauffage désiré et se déroule dans un condenseur ne comportant aucune partie mobile.
- Le liquide saturé subit ensuite une détente isenthalpique aboutissant à un mélange diphasique représenté par le point  $E\{T_E, P_E\}$  avec  $P_E = P_A$ . Cette transformation se déroule dans un détendeur ne comportant aucune partie mobile.
- On observe ensuite une vaporisation à pression constante jusqu'à l'obtention d'un gaz saturé avec retour au point  $A\{T_A, P_A\}$ . Cette transformation se déroule dans un évaporateur ne comportant aucune partie mobile.

Il est possible de relier un capteur de température à un téléphone et ainsi mesurer des températures de surface. On peut alors apprécier la température  $T_e$  à la surface du tuyau en cuivre alimentant le compresseur en R410A ainsi que la température  $T_s$  à la surface du tuyau en cuivre par lequel ressort ce fluide une fois comprimé. On admettra que les températures de surface  $T_e$  et  $T_s$  s'identifient à celles du fluide frigorigène (respectivement en entrée et en sortie du compresseur).



- 22) On mesure  $T_e = 0^\circ\text{C}$  et  $T_s = 50^\circ\text{C}$ . En tenant compte des hypothèses de travail, dessiner le cycle décrit par l'agent thermique sur le diagramme  $p(h)$  du **document-réponse**. Placer sur ce cycle les points  $A, B, C, D$  et  $E$  (ce document-réponse est à rendre avec votre copie).
- 23) Exprimer l'efficacité  $e$  de cette pompe à chaleur en fonction des enthalpies massiques  $h_A, h_B$  et  $h_D$ . Calculer  $e$ .
- 24) Calculer l'efficacité  $e_{th}$  d'une pompe à chaleur fonctionnant de manière cyclique, réversible et au contact de deux thermostats aux températures  $T_A$  et  $T_D > T_A$  :  $e_{th} = \frac{T_D}{T_D - T_A}$ .
- 25) Commenter le résultat (comparer avec  $e$ ).

### III- Mesurer sa taille avec son smartphone

#### a) Retour sur la loi de la statique des fluides gazeux

On assimile l'atmosphère terrestre à un gaz parfait de masse molaire  $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$  et on note  $R = 8,3 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$  la constante des gaz parfaits. Dans l'espace étudié, on pourra considérer la température  $T_0$  de ce gaz uniforme :  $T_0 = 300 \text{ K}$ . Le sol terrestre est localement plan, on note  $Oz$  l'axe verticale ascendant avec une origine  $O$  prise au niveau du sol. On note  $P(M)$  et  $\rho(M)$  respectivement la pression et la masse volumique en un point  $M$  de l'espace. L'étude sera menée dans le référentiel terrestre supposé galiléen. On note  $\vec{g}$  le vecteur champ de pesanteur terrestre avec  $\|\vec{g}\| = 10 \text{ m.s}^{-2}$ .

- 26) On étudie un volume mésoscopique  $dV$  de gaz. Ce système statique est soumis à son poids et à la résultante des forces pressantes. Donner la relation vectorielle décrivant l'immobilité de ce volume  $dV$ .
- 27) Exprimer  $\rho(M)$  en fonction de  $P(M), R, M$  et  $T_0$ .
- 28) Montrer que  $\frac{dP}{dz} + \frac{P}{\delta} = 0$  où  $\delta = \frac{RT_0}{Mg}$  puis calculer  $\delta$ .
- 29) On note  $P(z=0) = P_0$ , donner l'expression de  $P(z)$  et tracer son allure.

## b) Utilisation du capteur de pression

Les smartphones sont munis d'un capteur de pression. Le jour de l'expérience, un opérateur mesure une pression de 1000,00 hPa au niveau du sol et de 999,80 hPa en posant le téléphone sur sa tête.

30) Estimer, en justifiant l'utilisation d'un développement limité à l'ordre 1, la taille  $H$  de cet opérateur.

Dans la suite, on suppose que l'incertitude-type  $u(H)$  sur la valeur de  $H$  n'est due qu'à l'incertitude-type  $u(P) = 0,02$  hPa sur la lecture des pressions. Afin d'estimer  $u(H)$ , on va utiliser la méthode numérique de Monte Carlo. On donne ci-dessous des renseignements sur quelques fonctions Scilab :

$P = \text{grand}(1, 1, 'nor', P_{mes}, u_P)$  :  $P$  est un nombre tiré au hasard parmi des valeurs réparties selon une distribution de valeur moyenne  $P_{mes}$  et d'écart type  $u_P$ .

$u = \text{stdev}(tab)$  :  $u$  est l'incertitude-type des valeurs du tableau  $tab$

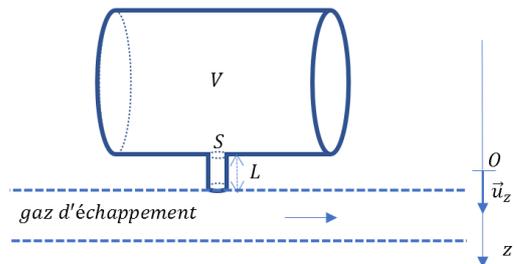
31) Ecrire un programme utilisant une boucle for et permettant d'obtenir un tableau, appelé  $tab_H$ , de  $N = 10000$  valeurs possibles de  $H$  du fait des incertitudes sur les lectures de pression. Compléter ce programme afin d'obtenir  $u(H)$ .

32) On obtient  $u(H) \approx 30$  cm. Sachant que l'opérateur a une taille de 1,75 m, commenter la qualité de cette mesure.

## IV- Etude de l'oscillateur d'Helmholtz à l'aide d'un smartphone

### a) Mise en équation

Le résonateur d'Helmholtz est une cavité ouverte remplie d'air. Ce gaz oscille notablement à une fréquence de résonance au niveau de l'ouverture lorsqu'il est stimulé. On fixe la géométrie de ces cavités pour régler la fréquence de résonance de l'onde acoustique. Ce procédé est utilisé dans certains tuyaux d'échappement afin de générer une onde acoustique à une fréquence souhaitée. On va modéliser ce résonateur par un cylindre de volume  $V \gg SL$  placé sur un autre cylindre de section  $S$  et de hauteur  $L$ . Le gaz contenu dans le cylindre de section  $S$  est affecté d'une masse  $m$ . Il peut être assimilé à un « bloc solide » de masse volumique  $\rho$  en oscillation. Le centre de masse de ce « bloc solide » est repéré par sa cote verticale  $z$ . En l'absence d'oscillation, on a  $z = 0$ .



Le volume  $V$  contient un gaz supposé parfait, à la pression  $P(z) = P_0 + p(z)$  où  $P_0$  représente la pression atmosphérique et  $p(z)$  est la variation algébrique de pression liée aux oscillations, donc  $p(z = 0) = 0$ .

Les parois du récipient sont supposées calorifugées : les compressions et détentes de l'air dans  $V$  sont adiabatiques. Les oscillations sont suffisamment lentes pour être considérées comme mécaniquement réversibles. On travaille dans le référentiel lié au résonateur supposé Galiléen.

33) Justifier que la résultante  $\vec{f}$  des forces de pression s'exerçant sur la masse  $m$  est donnée par  $\vec{f} = p(z)S\vec{u}_z$ .

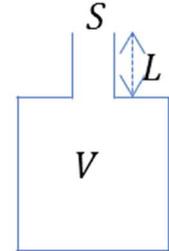
Les hypothèses de travail permettent d'appliquer les lois de Laplace, ainsi le produit  $P(z)(V + Sz)^\gamma$  est une constante pendant les oscillations ( $\gamma$  est le coefficient isentropique du gaz défini comme le rapport des capacités thermiques massiques à pression constante et volume constant).

34) Montrer, en utilisant un développement limité à l'ordre 1, que  $p(z) = -\frac{P_0 \gamma S z}{V}$

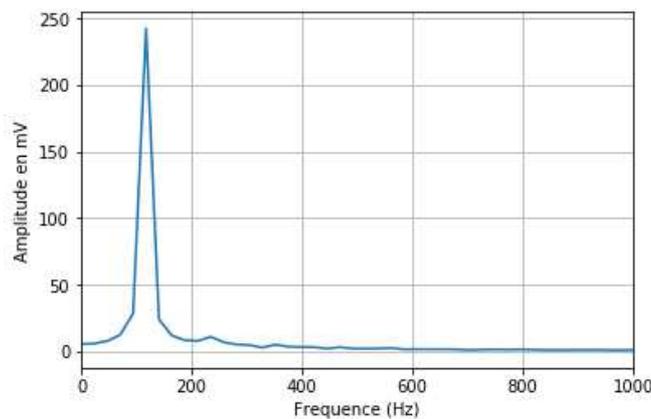
35) En appliquant le principe fondamental de la dynamique à la masse  $m$  et en négligeant son poids ainsi que toute force dissipative, montrer que  $m$  vérifie l'équation différentielle d'un oscillateur harmonique oscillant à la fréquence propre  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_0 S \gamma}{\rho L V}}$ .

b) Vérification expérimentale

On peut réaliser un résonateur d'Helmholtz en utilisant une bouteille ayant le profil ci-contre. En soufflant à son embouchure et en capturant le signal acoustique émis à l'aide du microphone présent sur un téléphone portable, il est possible d'obtenir une tension  $u$  image de ce signal acoustique. Il est alors facile d'avoir le spectre  $\hat{u}(f)$  de cette tension où  $f$  est la fréquence.

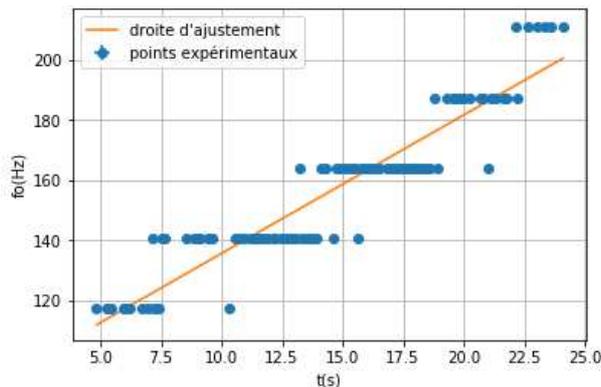


Avec une bouteille vide on obtient les résultats expérimentaux suivants :



36) En analysant le graphe ci-dessus, justifier le modèle de l'oscillateur harmonique établi au paragraphe précédent. En déduire une valeur approchée de la fréquence propre  $f_0$ .

On remplit la bouteille précédente à l'aide d'un mince filet d'eau dont le débit volumique constant est  $D_v$ . Ce remplissage fait vibrer l'air présent dans la bouteille à la fréquence propre  $f_0$ . On enregistre le signal acoustique émis au cours du remplissage de la bouteille initialement vide. On se limite à la situation telle que  $V_{eau} \ll V$  où  $V_{eau}$  est le volume d'eau introduit dans la bouteille. On obtient alors les résultats expérimentaux suivants :



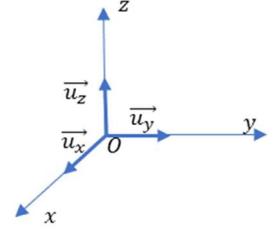
37) A l'aide du graphe ci-dessus, estimer la résolution en fréquence de ces mesures.

38) Etablir l'expression littérale de la fréquence du résonateur  $f_0(t)$  en fonction du temps  $t$  et justifier que cette expression est en accord avec la régression linéaire proposée.

V- Retrouver la loi de Bouguer en utilisant son smartphone

a) Retour sur la propagation des ondes électromagnétiques

On considère une source lumineuse supposée ponctuelle et située en  $O$ , émettant de manière isotrope un rayonnement monochromatique, de pulsation  $\omega$ . Dans la suite on utilisera le repérage cartésien  $(O, \vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$ . On note  $\vec{E}$  le champ électrique et  $\vec{B}$  le champ magnétique associé. Le milieu de propagation est l'air et sera assimilé à du vide dont la permittivité diélectrique est notée  $\epsilon_0$  et la perméabilité magnétique  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ .



39) Énoncer les équations de Maxwell décrivant la situation étudiée.

40) Montrer que l'équation de propagation du champ électrique  $\vec{E}$  est  $\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}$  en posant  $c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$ .

On étudie la propagation de l'onde électromagnétique émise par cette source dans la direction  $\vec{u}_x$ . On suppose que le rapport  $\frac{D}{d}$  de l'extension  $D$  de la zone d'observation et de la distance moyenne  $d$  à la source tend vers 0. Pour  $d - \frac{D}{2} \leq x \leq d + \frac{D}{2}$ , on peut considérer le champ électrique  $\vec{E}$  comme une onde localement plane dont l'amplitude  $E_0(d) = E_0$  est supposée constante et se propageant à la vitesse  $v > 0$ . Dans ces conditions, on décrit le champ électrique par :  $\vec{E}(x, t) = E_0 \cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right) \vec{u}_z$ .

41) Préciser la direction de polarisation de cette onde. Comment pourrait-on le vérifier en pratique ?

42) Vérifier que  $\vec{E}(x, t)$  est effectivement bien solution de l'équation de propagation. En déduire alors la relation entre  $v$  et  $c$ .

43) Donner l'expression du champ magnétique  $\vec{B}(x, t)$  associé.

44) Rappeler l'expression du vecteur de Poynting  $\vec{R}$  ainsi que son unité.

45) Montrer que la valeur moyenne temporelle  $\langle \vec{R} \rangle$  du vecteur de Poynting est  $\langle \vec{R} \rangle = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c} \vec{u}_x$ .

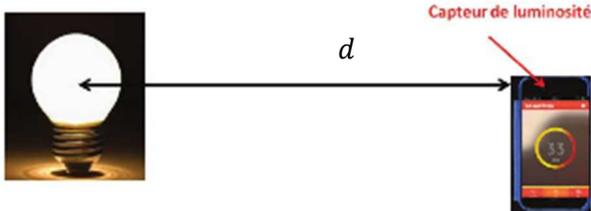
46) A chaque instant, on suppose que la source émet une puissance  $P$  de manière isotrope. Donner l'expression de  $\|\langle \vec{R} \rangle\|$  mesurée à la distance  $d$  de la source en fonction de  $P$ .

47) Montrer alors que la valeur de  $E_0$  en  $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$  est donnée par la formule  $E_0(d) = \frac{\sqrt{60P}}{d}$  où la valeur de  $P$  est en  $\text{W}$  et la valeur de  $d$  en  $\text{m}$ .

b) Mesure de l'éclairement avec un smartphone

L'éclairement énergétique s'identifie à la valeur moyenne de la norme du vecteur de Poynting  $\vec{R}$ . Pour des raisons liées à la sensibilité de l'œil humain, on définit aussi l'éclairement visuel  $\mathcal{E}$  exprimé en lux (lx) qui rend compte également d'une puissance surfacique. C'est cet éclairement visuel  $\mathcal{E}$  en lux que les capteurs d'éclairement présents dans les téléphones mesurent.

En utilisant une ampoule, un mètre et un téléphone, on obtient les résultats expérimentaux ci-dessous :

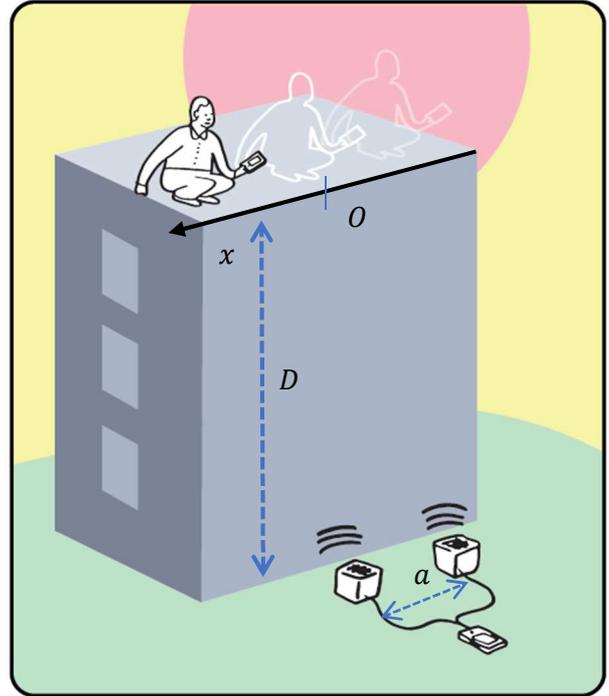
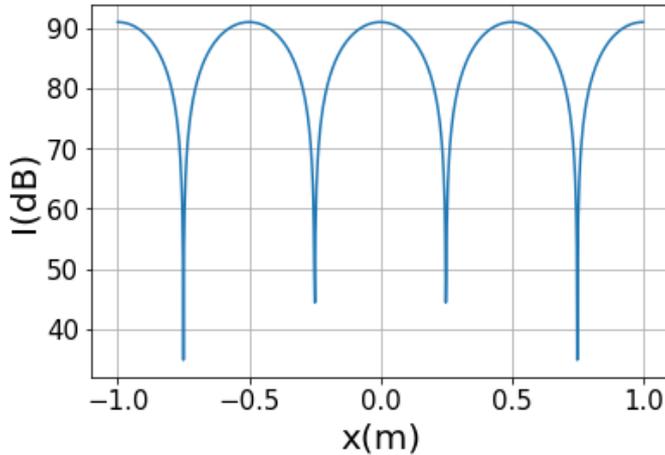


$\mathcal{E}$ (lx)	$d$ (m)	$d^2$ (m <sup>2</sup> )	$d^{-2}$ (m <sup>-2</sup> )
1000	0,1	0,010	100
445	0,15	0,022	44
250	0,2	0,040	25
155	0,25	0,063	16
110	0,3	0,090	11
60	0,4	0,16	6,3

48) Dans son livre intitulé « Essai d'optique sur la gradation de la lumière » édité en 1729, Pierre Bouguer écrit « la force de la lumière doit suivre une raison inverse des carrés de la distance aux corps lumineux ». Proposer une exploitation des résultats expérimentaux ci-dessus permettant de tester cette loi de Bouguer.

## VI- Détermination de la hauteur d'un immeuble avec un smartphone

On considère la situation ci-contre pour laquelle deux haut-parleurs, distants de  $a$  et placés au pied d'un immeuble de hauteur  $D \gg a$ , émettent continuellement des signaux sinusoïdaux identiques et parfaitement en phase de fréquence audible  $f$ . Un opérateur muni d'un téléphone se déplace en haut de l'immeuble selon un axe  $Ox$ . En  $x \ll D$ , les signaux acoustiques émis par les deux haut-parleurs se superposent et le téléphone mesure l'intensité acoustique  $I$  en  $dB$ . On donne le graphe simulé de  $I(x)$  :



Dessin issu d'un travail de l'équipe « la physique autrement »

49) En vous inspirant d'une situation analogue en optique ondulatoire, décrire puis expliquer le phénomène physique à l'origine de l'évolution spatiale de l'intensité acoustique mesurée.

L'onde de pression  $p(x, t)$  mesurée en haut de l'immeuble est donnée par :

$$p(x, t) = p_{eff} \cos\left(2\pi ft - \frac{2\pi D}{c} f\right) \text{ avec } p_{eff} = P_0 \cos\left(\frac{\pi a f x}{cD}\right)$$

où  $P_0$  est une constante.

Et l'intensité sonore est définie par :

$$I(dB) = 20 \log\left(\frac{|p_{eff}|}{2 \times 10^{-5}}\right)$$

50) La fréquence  $f$  de l'onde acoustique est  $f = 6800$  Hz, la célérité  $c$  des ondes acoustiques est  $c = 340$  m.s<sup>-1</sup> et on prend  $a = 1$  m. En déduire la valeur de  $D$ .

51) Proposer une autre méthode qui permettrait de déterminer la hauteur  $D$  de l'immeuble.

\*\*\*

# R410A Ref. Post-Isja equation and DuPont SUVA 9100

DTU Department of Energy Engineering  
 $\rho$  in [kg/m<sup>3</sup>],  $v$  in [m<sup>3</sup>/kg],  $T$  in [°C]  
MJ Group © H.J.H. Koolen 20-09-09

