

IPhO 2025 - Terminale

Sciences à l'École

Épreuve de présélection française

26 mars 2025



Durée de l'épreuve : 3 heures

Calculatrices autorisées

L'épreuve comporte quatre parties différentes et indépendantes les unes des autres, dont la nature et les temps à accorder conseillés sont donnés dans le tableau ci-dessous :

		Temps conseillé
PARTIE A	QCM	1 heure
PARTIE B	1 ^{er} exercice	30 min
PARTIE C	2 ^{ème} exercice	30 min
PARTIE D	Problème	1 heure

CONSIGNE pour la rédaction

*Les réponses sont à rédiger sur les feuilles d'énoncé, dans les emplacements prévus.
Si le candidat a besoin de feuilles supplémentaires, il utilisera les feuilles vierges fournies dont les en-têtes doivent être impérativement complétés.*

IMPORTANT

*Toutes les feuilles à rendre doivent comporter le nom, le prénom,
et le lycée du candidat.
Tout oubli pourra entraîner l'absence de correction de la feuille concernée.*

Données générales pour l'ensemble de l'épreuve

Nom	Symbole	Valeur
Célérité de la lumière dans le vide	c	$299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Constante de Planck	h	$6,626 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$
Charge élémentaire	e	$1,602 \times 10^{-19}\text{ C}$
Électron-volt	1 eV	$1,602 \times 10^{-19}\text{ J}$
Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène dans son état fondamental	E_H	$13,6\text{ eV}$
Perméabilité magnétique du vide	μ_0	$1,257 \times 10^{-6}\text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$
Permittivité diélectrique du vide	ε_0	$8,854 \times 10^{-12}\text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$
Constante gravitationnelle	G	$6,675 \times 10^{-11}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
Accélération normale de la pesanteur à la surface de la Terre	g_0	$9,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
Température du point triple de l'eau	T_0	$273,16\text{ K}$ ou $0,01\text{ }^\circ\text{C}$
Constante d'Avogadro	N_A	$6,022 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
Masse du proton	m_p	$1,673 \times 10^{-27}\text{ kg}$
Masse du neutron	m_n	$1,675 \times 10^{-27}\text{ kg}$
Masse de l'électron	m_e	$9,109 \times 10^{-31}\text{ kg}$
Constante de Boltzmann	k ou k_B	$1,381 \times 10^{-23}\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
Constante des gaz parfaits	R	$8,314\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
Distance Terre-Soleil	d_{TS}	$1,499 \times 10^8\text{ km}$
Masse du Soleil	M_S	$1,989 \times 10^{30}\text{ kg}$
Rayon de la Terre	R_T	$6,4 \times 10^3\text{ km}$
Masse de la Terre	M_T	$5,974 \times 10^{24}\text{ kg}$
Masse volumique de l'air	ρ_a	$1,20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ et $P=1,0 \times 10^5\text{ Pa}$
Masse molaire moyenne de l'air	M	$28,96\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Masse volumique de l'eau	ρ_e	$1,00 \times 10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

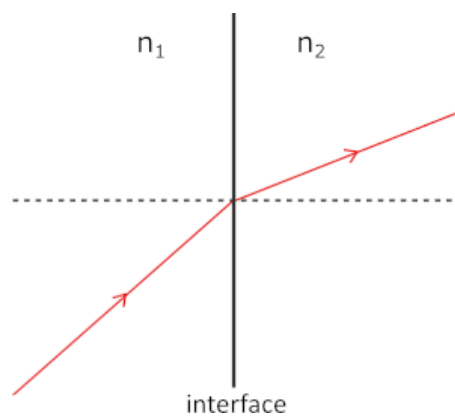
Partie A

Questionnaire à choix multiples

Durée conseillée : 1 heure.

Pour chaque question, les candidats entoureront la réponse de leur choix sur le document réponse.
Il n'y a qu'une réponse correcte par question. Aucune justification n'est demandée.

Q1. On considère l'interface entre deux plaques de plastique transparentes homogènes sur laquelle est envoyée un rayon lumineux. On présente ci-dessous sa trajectoire :



Indiquer les indices optiques possibles pour les deux plaques permettant d'obtenir cette situation :

- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| (a) $n_1 = 1,25$ et $n_2 = 1,00$; | (c) $n_1 = 1,65$ et $n_2 = 1,35$; |
| (b) $n_1 = 1,35$ et $n_2 = 1,65$; | (d) $n_1 = 1,00$ et $n_2 = 1,25$. |

Q2. Un photon vient ioniser un atome d'hydrogène au repos. Quelle est la condition nécessaire et suffisante sur la longueur d'onde λ de ce photon ?

- | | |
|--|--|
| (a) $\lambda < 3,5 \times 10^2 \text{ nm}$; | (c) $\lambda < 9,1 \times 10 \text{ nm}$; |
| (b) $\lambda > 3,5 \times 10^2 \text{ nm}$; | (d) $\lambda > 9,1 \times 10 \text{ nm}$. |

Q3. On plonge une barre d'acier de 600 g chauffée dans un calorimètre contenant 0,5 L d'eau à température ambiante ($\theta_{amb} = 25^\circ\text{C}$). On considère que l'ensemble forme un système isolé et on néglige les transferts thermiques avec les parois.

Les capacités thermiques massiques entrant en jeu sont : $c_{eau} = 4185 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $c_{acier} = 440 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Quelle est la température θ minimale de l'acier pour amener l'eau à ébullition ?

- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| (a) $\theta = 109^\circ\text{C}$; | (c) $\theta = 594^\circ\text{C}$; |
| (b) $\theta = 494^\circ\text{C}$; | (d) $\theta = 694^\circ\text{C}$. |

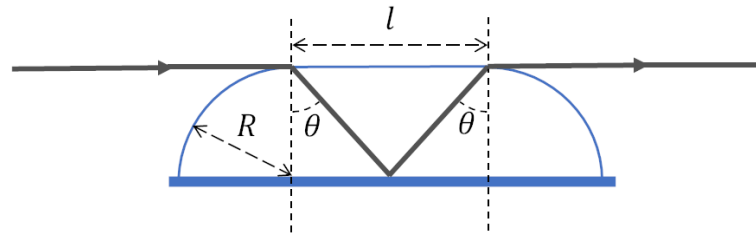
Q4. On considère 3 condensateurs de capacités identiques. On charge l'un des condensateurs avec un générateur idéal de tension E . Une fois chargé, on le place dans un circuit électrique fermé, en série avec les deux autres condensateurs identiques. Ces deux condensateurs sont initialement déchargés.

On indique que la capacité équivalente de deux condensateurs de capacité respective C_1 et C_2 en série est donnée par : $\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$.

Que vaut, en régime permanent, la tension aux bornes du condensateur initialement chargé ?

- (a) $\frac{E}{2}$; (c) $\frac{E}{3}$;
 (b) $\frac{3E}{2}$; (d) $\frac{2E}{3}$.

Q5. On considère un bloc de verre d'indice optique n qui possède une surface inférieure plane parfaitement réfléchissante, mais dont les côtés gauche et droit sont incurvés en forme de quart de cercle de rayon R . La face supérieure possède une longueur l (voir la figure ci-dessous).



Il est plongé dans l'air, dont on supposera l'indice optique égal à 1.

On considère un faisceau incident de lumière, qui arrive en incidence rasante par rapport à la face supérieure. On cherche la condition sur l , pour qu'il ressorte du bloc toujours en incidence rasante par rapport à la face supérieure.

- (a) $l = \frac{2R}{\sqrt{n^2-1}}$; (c) $l = \frac{R}{\sqrt{n^2+1}}$;
 (b) $l = \frac{2R}{\sqrt{n^2+1}}$; (d) $l = \frac{R}{\sqrt{n^2-1}}$.

Q6. Une particule ponctuelle chargée est placée sans vitesse initiale dans une région de l'espace où règne un champ électrique uniforme $\vec{E}$ et un champ magnétique uniforme $\vec{B}$. On suppose que $\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont parallèles. Quelle va être l'allure de la trajectoire de la particule ?

- (a) une droite ; (c) une parabole ;
 (b) un cercle ; (d) une hélicoïde.

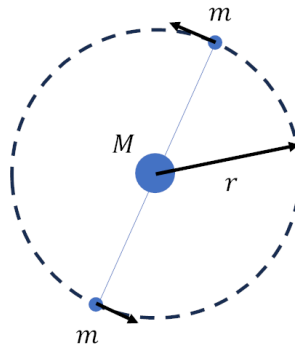
Q7. On cherche à déterminer la demi-vie d'une espèce radioactive. Pour cela, on mesure le nombre de désintégrations vers une autre espèce en une seconde. Pour un instant t_1 , on mesure 2 761 désintégrations en une seconde. Pour l'instant $t_2 = t_1 + 1$ j, on mesure 2 280 désintégrations en une seconde.

Quel est le temps de demi-vie de l'espèce considérée ?

- (a) $t_{1/2} = 3,62$ j ; (c) $t_{1/2} = 5,22$ j ;
 (b) $t_{1/2} = 6,62$ h ; (d) $t_{1/2} = 6,62$ s.

Q8. On considère deux planètes de masses m assimilées à des points matériels. Leur orbite est circulaire de rayon r , centrée sur une étoile supposée ponctuelle, de masse M . On suppose qu'à chaque instant les 2 planètes ont des positions diamétralement opposées. La période de rotation des planètes sur l'orbite est de la forme

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM'}}.$$



Comment peut-on écrire M' , intervenant dans la période T , en fonction de M et m ?

- (a) $M' = M + m$; (c) $M' = M + m/2$;
 (b) $M' = M + 2m$; (d) $M' = M + m/4$.

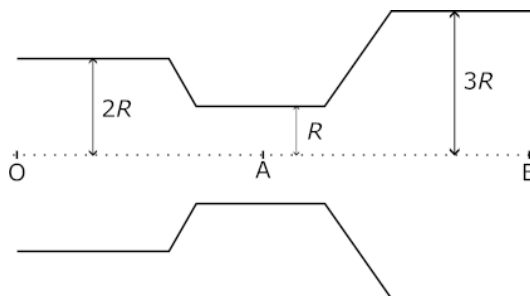
Q9. Un poisson produit une bulle d'air sphérique, de volume $2,0 \text{ mm}^3$ à une profondeur de 15 m. On suppose que la température est uniforme dans tout l'espace et que la pression atmosphérique est égale à 1,0 bar. On considérera que l'air dans la bulle est un gaz parfait.

On rappelle que la pression hydrostatique au sein d'un fluide de masse volumique ρ à une profondeur h est égale à $P = P_0 + \rho gh$.

Quel est le volume de la bulle quand elle atteint la surface ?

- (a) 2 mm^3 ; (c) 30 mm^3 ;
 (b) 5 mm^3 ; (d) 10 mm^3 .

Q10. On étudie un écoulement de fluide considéré comme incompressible dans un tuyau circulaire horizontal dont la section est variable. On donne ci-dessous le profil de ce tuyau.

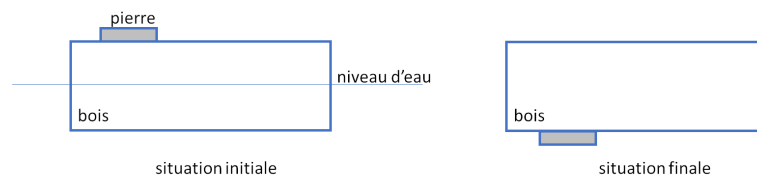


Au point O, on considère que la pression est $P_O = 3,00 \times 10^5 \text{ Pa}$, la section du tuyau est $S_O = 6,00 \text{ cm}^2$ et la vitesse de l'écoulement est $v_O = 2,0 \times 10^1 \text{ m/min}$. Le fluide en écoulement a une masse volumique $\rho = 1,00 \text{ kg/L}$. On précise que dans ce tuyau, la vitesse de l'écoulement est inversement proportionnelle à la section du tuyau. Indiquer la valeur de la pression au point A et au point B.

- (a) $P_A = 3,0 \times 10^5 \text{ Pa}$
et $P_B = 4,6 \times 10^5 \text{ Pa}$;
(b) $P_A = 6,0 \times 10^5 \text{ Pa}$
et $P_B = 1,5 \times 10^5 \text{ Pa}$;

- (c) $P_A = P_B = P_O = 3,0 \times 10^5 \text{ Pa}$;
(d) $P_A = 1,5 \times 10^5 \text{ Pa}$
et $P_B = 4,5 \times 10^5 \text{ Pa}$.

Q11. On colle une pierre sur un morceau de bois. L'ensemble flotte. On fait l'hypothèse qu'exactement la moitié du morceau de bois est immergée à l'équilibre (figure de gauche). On retourne l'ensemble (figure de droite) et on se demande quelle fraction du morceau de bois est maintenant immergée.

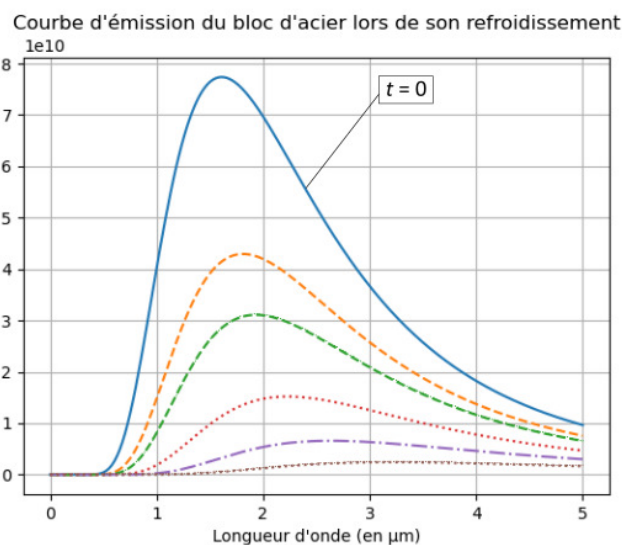


- (a) moins de la moitié;
(b) plus de la moitié;
(c) la moitié;
(d) l'ensemble.

Q12. On réalise une expérience avec deux fentes d'Young éclairées uniformément par un laser. On observe la figure d'interférence. Puis, on opacifie l'une des deux fentes, de telle sorte que seule la moitié de l'intensité lumineuse incidente est transmise par cette fente. L'autre fente est inchangée. Que pouvez-vous conclure ?

- (a) On n'observe plus de figure d'interférence;
(b) Les franges sombres le restent et les franges brillantes s'assombrissent;
(c) Les franges sombres sont plus brillantes et les franges brillantes s'assombrissent;
(d) La figure d'interférence est inchangée.

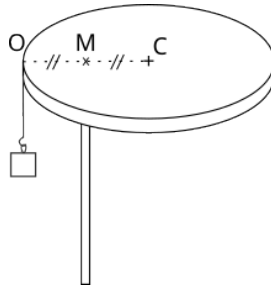
Q13. On chauffe un morceau de fer à une température $T_0 = 1\,800 \text{ K}$. À cette température, le fer est dit chauffé à blanc, c'est à dire qu'il brille et apparaît presque blanc. Une fois cette température atteinte, on retire le fer du feu et on mesure régulièrement sa courbe de rayonnement (on considère l'arrêt du chauffage comme l'instant $t = 0$) :



En supposant que le morceau d'acier peut être considéré comme un corps noir, à quelle température approximative arrêtera-t-il de briller ?

- (a) $T \approx 950 \text{ K}$;
 (b) $T \approx 2\,000 \text{ K}$;
 (c) $T \approx 1\,300 \text{ K}$;
 (d) $T \approx 700 \text{ K}$.

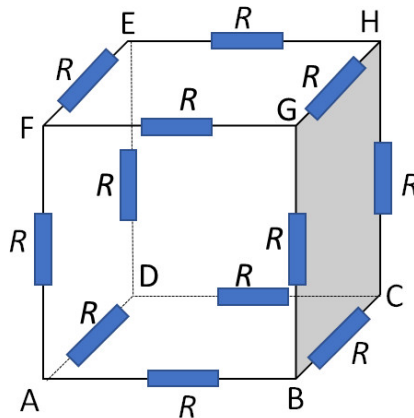
Q14. On considère un disque homogène de masse m auquel on accroche un contrepoids de masse m' sur le bord (le point d'attache est nommé O). L'ensemble est placé en équilibre sur un fin cylindre. Le point de contact M est décalé par rapport au centre C tel que $CM = OM$ (voir schéma ci-dessous).



On considère la masse du fil négligeable. Quel doit être la masse m' du contrepoids pour que le disque soit en équilibre ?

- (a) $m' = m$;
 (b) $m' = \frac{m}{2}$;
 (c) On manque de données pour conclure;
 (d) $m' = \frac{m}{4}$.

Q15. On considère un cube constitué de résistances. Chaque arête du cube est formée par une résistance de valeur $R = 1,0 \cdot 10^3 \Omega$. Quelle est la résistance équivalente entre les points A et H ?



- (a) $R = 7,5 \times 10^2 \Omega$;
 (b) $R = 8,3 \times 10^2 \Omega$;
 (c) $R = 5,8 \times 10^2 \Omega$;
 (d) $R = 5,0 \times 10^2 \Omega$.

Fin de la partie A



Partie A

QCM — document réponse

Durée conseillée : 1 heure.

Pour chaque question, **entourer** la réponse de son choix sur ce document.
Il n'y a qu'une réponse correcte par question.

Q1. (a) (b) (c) (d)

Q2. (a) (b) (c) (d)

Q3. (a) (b) (c) (d)

Q4. (a) (b) (c) (d)

Q5. (a) (b) (c) (d)

Q6. (a) (b) (c) (d)

Q7. (a) (b) (c) (d)

Q8. (a) (b) (c) (d)

Q9. (a) (b) (c) (d)

Q10. (a) (b) (c) (d)

Q11. (a) (b) (c) (d)

Q12. (a) (b) (c) (d)

Q13. (a) (b) (c) (d)

Q14. (a) (b) (c) (d)

Q15. (a) (b) (c) (d)

Fin de la partie A



Partie B

Exercice 1

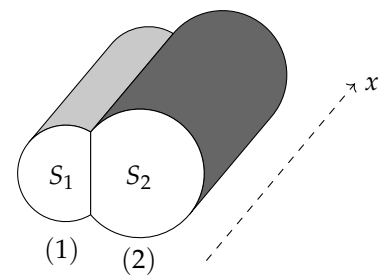
Fils conducteurs accolés

Durée conseillée : 30 min.

En électrocinétique, on a l'habitude de considérer des contacts électriques ponctuels : on considère très souvent des composants dipolaires, connectés au reste du circuit par deux nœuds. On cherche ici à étudier un cas différent, où le contact entre deux conducteurs est continu, comme représenté ci-dessous.

On considère deux fils métalliques parallèles accolés, repérés par leurs indices 1 et 2 et représentés ci-contre. Les sections de ces fils sont respectivement d'aires S_1 et S_2 , et l'on supposera ici $S_1 \leq S_2$. On note I_1 et I_2 les intensités des courants qui les parcourent. Des électrons peuvent passer d'un fil à l'autre en traversant la surface qu'ils partagent, si bien que les intensités I_1 et I_2 dépendent de la position longitudinale dans les fils, repérée sur l'axe d'un des fil par la coordonnée x .

Dans cette partie, on cherche à établir les équations couplées vérifiées par les intensités $I_1(x)$ et $I_2(x)$.

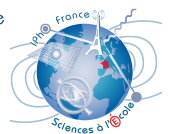


Dans tout l'énoncé, le symbole $\propto$ signifie « être proportionnel à ». Ainsi, $X \propto Y$ signifie qu'il existe une constante de proportionnalité k telle que $X = kY$.

On commence par supposer les deux fils indépendants.

Q1. En s'appuyant éventuellement sur une analogie électrocinétique, justifier qualitativement que la résistance R d'un fil conducteur seul de longueur ℓ est proportionnelle à sa longueur. Par analyse dimensionnelle, déterminer l'expression de la résistance R d'une longueur ℓ de fil de section S et de résistivité r , exprimée en $\Omega \cdot \text{m}$.

Q2. En déduire les expressions des résistances R_1 et R_2 de deux petits tronçons de longueur δx des fils 1 et 2, de même résistivité r , en fonction de leurs sections respectives S_1 et S_2 , de r et de δx .

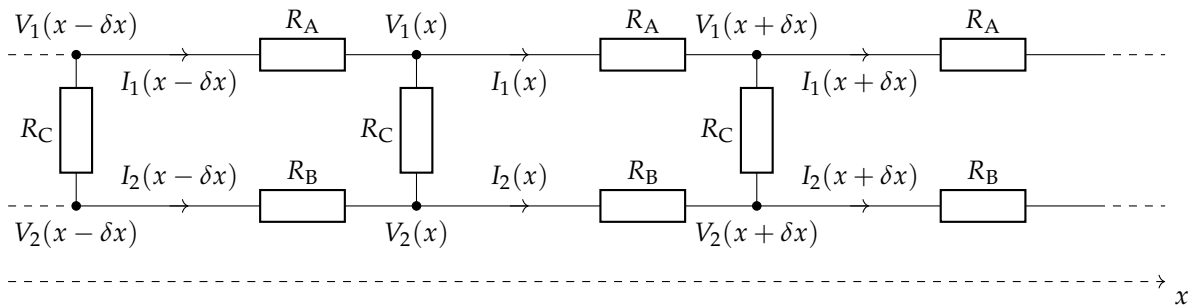


Considérons maintenant ces deux tronçons en contact l'un avec l'autre. Les échanges électriques autorisés par ce contact latéral sont associés à une résistance électrique de contact, notée R_{12} . Cela permet à un courant électrique latéral de s'établir d'un fil à l'autre.

Q3. Justifier qualitativement que cette résistance de contact est inversement proportionnelle à la longueur de contact entre les tronçons δx de chaque fil.

On l'écrira par la suite : $R_{12} = r_c / \delta x$, où r_c est une constante que l'on ne cherchera pas à exprimer.

Pour modéliser les deux fils dans leur totalité (et pas seulement sur un tronçon), il suffit de mettre bout à bout des tronçons de fils de longueur δx , en série. Le circuit électrique équivalent est indiqué ci-dessous, où les pointillés indiquent une répétition du motif tout du long des deux fils. $V_1(x)$ et $V_2(x)$ sont les potentiels électriques le long des fils.



Q4. Associer les résistances R_A , R_B et R_C du schéma électrique équivalent aux résistances des questions précédentes.

Q5. Montrer que, dans la limite où δx tend vers 0, on a :

$$I_1(x) \propto -\frac{dV_1(x)}{dx}, \quad I_2(x) \propto -\frac{dV_2(x)}{dx}, \quad (1)$$

et exprimer les constantes de proportionnalité en fonction de r , S_1 et S_2 .



Q6. Montrer que, dans la limite où δx tend vers 0, on a :

$$\frac{dI_1(x)}{dx} \propto V_2(x) - V_1(x), \quad \frac{dI_2(x)}{dx} \propto V_1(x) - V_2(x), \quad (2)$$

et exprimer les constantes de proportionnalité en fonction des propriétés des deux fils.

En déduire que la somme des intensités $I_1 + I_2$ est constante le long des fils. Était-ce prévisible ?

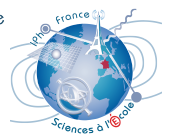
Q7. Finalement, montrer que, dans la limite où δx tend vers 0, on peut mettre les équations d'évolution couplées entre les intensités des courants électriques I_1 et I_2 sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{d^2 I_1(x)}{dx^2} = \frac{I_1(x)}{d_1^2} - \frac{I_2(x)}{d_2^2}, \\ \frac{d^2 I_2(x)}{dx^2} = \frac{I_2(x)}{d_2^2} - \frac{I_1(x)}{d_1^2}, \end{cases} \quad (3)$$

où d_1 et d_2 sont deux constantes à exprimer en fonction de r, r_c, S_1 et S_2 .

Q8. On note I_0 la valeur en $x = 0$ de l'intensité du courant total entrant dans les deux fils ($I_0 = I_1(0) + I_2(0)$). Montrer qu'il existe une répartition de ce courant entre les deux fils telle que les échanges électriques entre les deux fils s'annulent (autrement dit, telle que les intensités I_1 et I_2 restent chacune constantes le long du fil). Exprimer les intensités $I_1^{\text{éq}}$ et $I_2^{\text{éq}}$ de ces courants d'équilibre en fonction de I_0, S_1 et S_2 .

Le courant électrique se répartit-il de préférence dans le fil de plus grosse section, ou dans celui de plus petite section ? Commenter.



On connecte les deux bornes du fil (1) à une source idéale de courant, d'intensité I_0 . Le fil (2) n'est branché à rien, mais reste en contact latéral avec le fil (1) tout du long. Pour simplifier les prochains calculs, on supposera les fils de même section, de sorte que $d_1 = d_2 = d$. En notant L la longueur des fils, on supposera également les fils suffisamment longs : $L \gg d$.

Q9. Écrire les conditions limites pour I_1 et I_2 en $x = 0$ et $x = L$. Résoudre le système d'équations différentielles couplées, et montrer que :

$$\begin{cases} I_1(x) \approx \frac{I_0}{2} \left[1 + e^{-\sqrt{2}x/d} + e^{\sqrt{2}(x-L)/d} \right] \\ I_2(x) \approx \frac{I_0}{2} \left[1 - e^{-\sqrt{2}x/d} - e^{\sqrt{2}(x-L)/d} \right]. \end{cases} \quad (4)$$

Nom :

Lycée :

Prénom :



Q10. Représenter graphiquement l'allure de ces deux intensités le long du fil, et commenter.

Fin de la partie B

Partie C

Exercice 2

Disques protoplanétaires et vents magnétiques

Durée conseillée : 30 minutes.

Les planètes se forment dans des disques de gaz, en orbite autour d'une étoile jeune. Ces disques gazeux sont appelés *disques protoplanétaires* (figure 1). En plus du mouvement de rotation dû à la gravité de l'étoile centrale, la matière du disque tombe radialement en direction de l'étoile : c'est le phénomène d'accrétion. Par ailleurs, il arrive qu'une partie de la matière gazeuse soit éjectée de part et d'autre du disque (figure 2). Plusieurs mécanismes théoriques sont étudiés en astrophysique pour expliquer l'origine du phénomène d'accrétion. L'objectif de cet exercice est d'établir quelques propriétés de l'un de ces modèles, basé sur la présence de vents magnétiques dans le disque.

Les parties 1, 2 et 3 sont entièrement indépendantes les unes des autres. Aucune notion sur les champs magnétiques n'est nécessaire pour répondre aux questions.

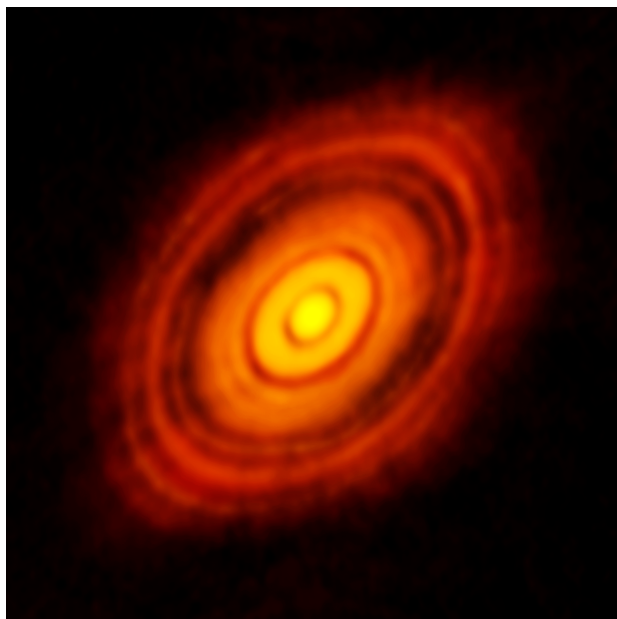


FIGURE 1 – Disque protoplanétaire autour de la source HL Tau. L'étoile au centre est masquée. Crédits : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

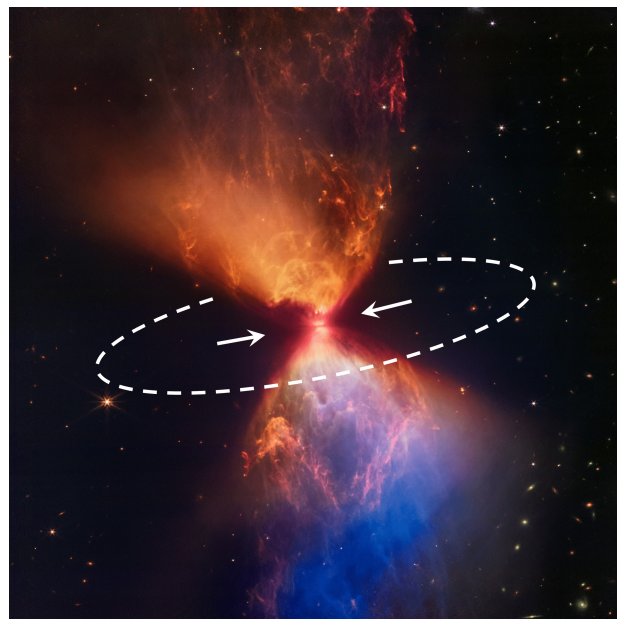
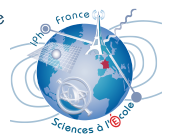
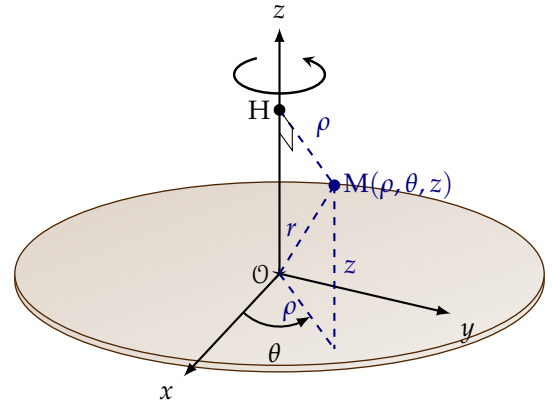


FIGURE 2 – Disque présentant une éjection de matière autour de la source L1527. Vu par la tranche, le disque se situe entre les flèches, dans le plan repéré par les pointillés. Crédits : NASA, ESA, CSA, STScI.



Modélisation et notations

Le schéma ci-contre modélise un disque protoplanétaire en rotation autour d'une étoile de masse $M_\star$, repérée par un point matériel $\mathcal{O}$. On note $(\mathcal{O}z)$ l'axe de rotation (perpendiculaire au disque) et on définit le vecteur unitaire $\vec{e}_z$ ascendant, de sorte que la rotation a lieu dans le sens direct. On note $\mathcal{R}$ le référentiel lié au centre de masse de l'étoile, supposé galiléen, dans lequel le disque est en rotation. On munit le référentiel $\mathcal{R}$ du repère cartésien direct $(\mathcal{O}, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$. Le plan $(\mathcal{O}xy)$ est appelé plan médian du disque, et partage le disque de manière symétrique. On suppose le disque fin de sorte qu'on néglige son épaisseur, sa surface se confondant avec son plan médian.



Dans la suite, un point M de l'espace sera repéré par ses coordonnées cylindriques (ρ, θ, z) , où ρ désigne la distance de M à l'axe $(\mathcal{O}z)$, soit $\rho = \|\vec{HM}\|$ avec H le projeté orthogonal de M sur cet axe. On définit les vecteurs unitaires $\vec{e}_\rho = \vec{HM}/\rho$ et $\vec{e}_\theta$ pour former la base cylindrique directe $(\vec{e}_\rho, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$. On note enfin $r = \|\vec{OM}\|$ la distance entre le point M et l'étoile centrale, et on définit le vecteur unitaire associé $\vec{e}_r = \vec{OM}/r$.

1 Disque gazeux en rotation

Dans cette partie, on souhaite déterminer la vitesse de rotation d'un point matériel M_0 appartenant au disque gazeux. Situé à l'altitude $z = 0$, et à la distance ρ_0 de l'étoile centrale, le point M_0 est repéré par ses coordonnées cylindriques $(\rho = \rho_0, \theta, z = 0)$. Il est solidaire du disque en rotation, et décrit donc un mouvement circulaire de rayon ρ_0 autour de l'axe $(\mathcal{O}z)$.

Q1. Exprimer $\vec{F}_g(M_0)$ la force gravitationnelle exercée par l'étoile centrale sur une masse ponctuelle m_0 située en M_0 en fonction de G (la constante gravitationnelle, donnée en début d'énoncé), $M_\star$, m_0 , ρ_0 et $\vec{e}_\rho$ exclusivement.

Q2. En supposant que la masse m_0 n'est soumise qu'à l'attraction gravitationnelle exercée par l'étoile (on néglige l'effet du reste de la matière gazeuse), montrer que la vitesse angulaire du point M_0 , notée Ω_0 , s'exprime selon

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{GM_\star}{\rho_0^3}}.$$

Q3. En déduire l'expression de la période de rotation T_0 du point M_0 en fonction de ρ_0 , G et $M_\star$. Nommer la loi ainsi démontrée, dans le cas particulier d'un mouvement circulaire.

2 Éjection de matière en présence d'un vent magnétique

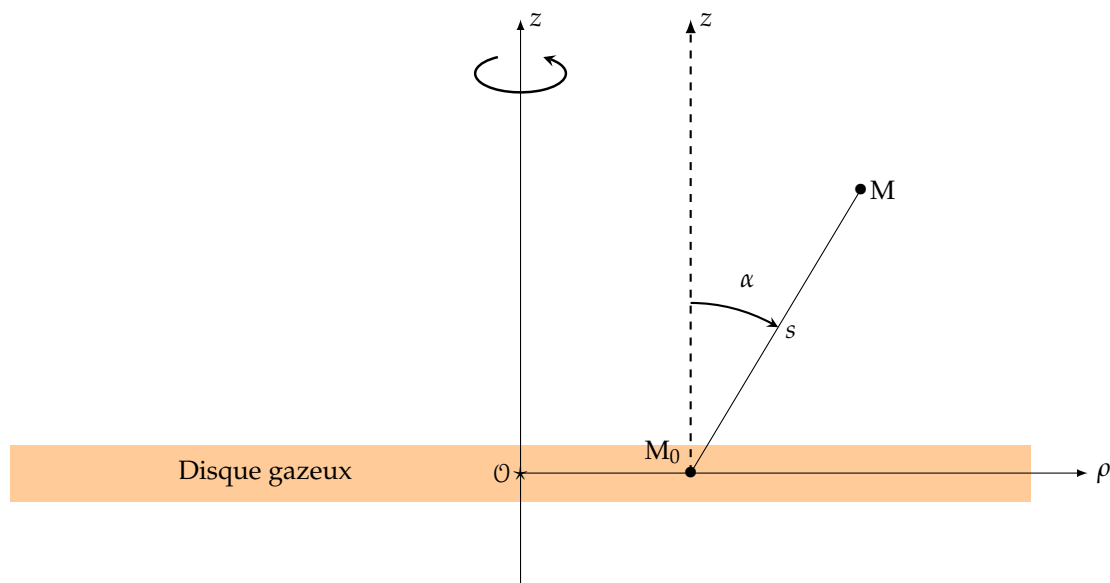
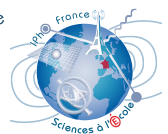


FIGURE 3 – Schéma du disque (représenté par la tranche) avec une ligne de champ magnétique reliant les points M_0 et M .

Dans cette partie, le disque protoplanétaire possède un vent d'origine magnétique, qui permet à une partie de la matière de s'échapper du disque, entraînée par le vent. On admet que la matière ainsi éjectée suit les lignes de champ magnétiques, assimilables à des droites à proximité de la surface du disque. Le schéma en figure 3 représente l'une de ces lignes de champ, partant de la surface du disque, et formant un angle α par rapport à l'axe (z) (ou par rapport à l'axe (M_0z))¹. La ligne est ancrée dans le disque en M_0 , de coordonnées cylindriques $(\rho_0, \theta, 0)$, situé à une distance

1. Le problème de l'inclinaison des lignes de champ peut être retrouvé dans le cours « [Physical Processes in Protoplanetary Disks](#) » de Philip J.



ρ_0 de l'étoile centrale et est en permanence contenue dans le plan $(M\rho z)$.

On considère une masse ponctuelle m de gaz éjectée suivant cette ligne de champ magnétique, repérée par un point M de coordonnées cylindriques (ρ, θ, z) . On note $\vec{r} = \overrightarrow{OM}$ la distance entre le point M et l'étoile centrale. On introduit également la distance $s = \|\overrightarrow{M_0M}\|$ ainsi que le vecteur unitaire associé $\vec{e}_s = \overrightarrow{M_0M}/s$. On admettra que le point M est astreint à se déplacer suivant la ligne de champ magnétique, contenue dans le plan tournant $(\vec{e}_\rho, \vec{e}_z)$. Autrement dit, à tout instant, les points M_0 et M sont repérés par la même position angulaire θ .

Q4. Placer les distances ρ_0 , ρ et r sur le schéma de la figure 3.

2.1 Énergie potentielle gravitationnelle

On se place dans le référentiel $\mathcal{R}$ lié à l'étoile située en $\mathcal{O}$, supposé galiléen. On note $\vec{F}_g(M)$ la force gravitationnelle exercée par l'étoile centrale sur la masse m de gaz située en M . On définit l'énergie potentielle gravitationnelle de cette masse m située en M , notée $E_g(r)$, telle que :

$$\vec{F}_g(M) = -\frac{dE_g(r)}{dr} \vec{e}_r \quad \text{avec} \quad E_g(r) \xrightarrow{+\infty} 0$$

Q5. Exprimer $E_g(r)$ en fonction de m , $M_\star$, G et r uniquement.

2.2 Étude dans le référentiel $\mathcal{R}_0$ lié au disque

On se place désormais dans le référentiel $\mathcal{R}_0$ lié au point d'ancrage M_0 . Solidaire du disque gazeux, le référentiel $\mathcal{R}_0$ effectue une rotation circulaire uniforme dans $\mathcal{R}$, à la vitesse angulaire $\Omega_0 = \sqrt{\frac{GM_\star}{\rho_0^3}}$.

Q6. Le référentiel $\mathcal{R}_0$ est-il galiléen ? Justifier votre réponse en deux lignes au maximum.

On définit l'accélération d'inertie d'entraînement, notée $\vec{a}_{ie}$, comme l'accélération qu'aurait le point M dans le référentiel $\mathcal{R}$ s'il était fixe dans le référentiel $\mathcal{R}_0$.

Q7. Calculer $\vec{a}_{ie}(M)$, l'accélération d'inertie d'entraînement du point M . On exprimera $\vec{a}_{ie}$ en fonction de ρ , Ω_0 et $\vec{e}_\rho$ uniquement.

Armitage, page 49. Il s'agit d'une approche simplifiée du mécanisme dit de Blandford & Payne.



Par analogie avec l'énergie potentielle gravitationnelle $E_g(r)$, on définit l'énergie potentielle d'inertie d'entraînement, notée $E_{ie}(\rho)$ telle que :

$$\vec{f}_{ie} = -m \vec{a}_{ie} = -\frac{dE_{ie}}{d\rho} \vec{e}_\rho \quad \text{avec} \quad E_{ie}(0) = 0.$$

La force $\vec{f}_{ie}$ dérivant de l'énergie potentielle E_{ie} est la force d'inertie d'entraînement, qui dans ce cas prend la forme d'une force centrifuge qui tend à éloigner la matière de son axe de rotation.

Q8. Déterminer $E_{ie}(\rho)$ en fonction de m , Ω_0 et ρ . En déduire que l'énergie potentielle totale $E_{tot} = E_g + E_{ie}$ de la masse m s'écrit comme suit :

$$E_{tot}(r, \rho) = -\frac{GM_\star m}{r} - \frac{1}{2} m \rho^2 \Omega_0^2.$$

2.3 Condition de stabilité et éjection de matière

Q9. Exprimer r^2 en fonction de ρ_0 , s et α uniquement.

Q10. Exprimer par ailleurs l'altitude z du point M en fonction de s et α . En déduire l'expression de ρ^2 , de nouveau en fonction de ρ_0 , s et α .



Q11. Exprimer $E_{\text{tot}}(s)$ l'énergie potentielle totale de la masse m en fonction de la variable s , en ne faisant plus intervenir r et ρ . Les paramètres ρ_0 et α étant fixés, à quelle condition sur la dérivée première de $E_{\text{tot}}(s)$ la masse m est-elle à l'équilibre ? Indiquer les deux forces en compétition et décrire qualitativement cet équilibre.

On admet que cet équilibre est instable dès lors que $\frac{d^2 E_{\text{tot}}}{ds^2} < 0$. Lorsque ce critère est réalisé, une masse m initialement située à la surface du disque en $s = 0$ est alors éjectée le long de la ligne de champ magnétique. On fournit :

$$\frac{1}{GM_\star m} \frac{d^2 E_{\text{tot}}}{ds^2}(s) = (s^2 + 2s\rho_0 \sin \alpha + \rho_0^2)^{-3/2} - 3(s + \rho_0 \sin \alpha)^2 (s^2 + 2s\rho_0 \sin \alpha + \rho_0^2)^{-5/2} - \frac{\Omega_0^2}{GM_\star} \sin^2 \alpha$$

Q12. Montrer que l'éjection de la masse m située en $s = 0$ survient à condition que la ligne de champ soit inclinée au-delà d'une valeur critique $\alpha_c = 30^\circ$.



3 Magnétisation du disque

On considère un disque protoplanétaire dont la matière est assimilée à un gaz parfait à température $T_0 = 10$ K uniforme dans tout le disque. P désigne la pression de ce gaz et μ sa masse volumique, toutes deux sont également supposées uniformes. Une valeur typique de μ est $\mu = 1,4 \times 10^{20} m_p \text{ m}^{-3}$ où m_p désigne la masse du proton. La masse moyenne d'une particule de ce gaz est notée $\bar{m}$ et vaut $\bar{m} = 2,314 m_p$. La vitesse du son dans ce milieu, notée c_s , est donnée par

$$c_s = \sqrt{\frac{P}{\mu}}$$

Q13. Montrer que c_s est bien homogène à une vitesse.

Q14. Montrer que $c_s = \sqrt{\frac{k_B T_0}{\bar{m}}}$.

On introduit le nombre sans dimension β défini par

$$\beta = \frac{2\mu_0 P}{B^2}$$

où B désigne le champ magnétique traversant le disque et μ_0 la perméabilité du vide (sa valeur est donnée dans la page regroupant les constantes physiques).

Q15. Justifier que la grandeur P_B définie par $P_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$ est homogène à une pression.

Nom :

Lycée :

Prénom :



Q16. Dans les modèles de disques présentant un vent magnétique, une valeur typique pour β est $\beta = 10^4$. Faire l'application numérique pour le champ magnétique qui s'exprime en teslas (symbole : T) dans le système international d'unités.

Fin de la partie C

Partie D

Problème 1

Le thermophone à tube à essai

Durée conseillée : 1 heure.

La thermoacoustique est l'étude des phénomènes résultant de l'interaction entre un flux de chaleur et une onde acoustique. Bien que cette thématique de recherche soit peu connue du grand public, les manifestations de l'effet thermoacoustique sont en fait observées depuis longtemps. Les souffleurs de verre constatent par exemple depuis des siècles que leurs tubes produisent parfois de violents sifflements.

Dans ce problème, on étudie la production d'un son musical grâce à l'effet thermoacoustique, par l'introduction d'une source de chaleur localisée dans un tuyau sonore. Le premier instrument de musique fonctionnant sur ce principe était un orgue à flammes construit par K stner en 1873, qu'il appela « pyrophone ». Le pyrophone fut perfectionné dans les années 2000 par Jacques R mus, musicien et plasticien, qui mit au point le « thermophone », dans lequel il remplaça les flammes par des résistances électriques chauffantes. Un thermophone est formé d'un tuyau en acier doux, verre ou aluminium, qui est ouvert au moins à l'une de ses extrémités pour rendre le son audible.   l'intérieur du tuyau, on place un *stack* solide (empilement de plaques ou grilles métalliques, ou réseau de canaux rectangulaires en céramique), et on le chauffe.

Lorsque la température de l'extrémité chaude devient suffisamment élevée, le thermophone se met à chanter ... Il génère un son particulier, puissant et très pur spectralement.

Ce problème s'appuie sur la vidéo « *Do it yourself : Moteur thermoacoustique à base de paille de fer* », publiée par l' cole universitaire de recherche *Institut d'Acoustique Graduate School*, à l'adresse youtu.be/owbjLWrC86g. Il y est présenté une méthode expérimentale pour construire un thermophone de façon très simple, en utilisant uniquement un tube à essai, de la paille de fer et une lampe à alcool. Une capture d'écran du dispositif expérimental de la vidéo est donnée sur la figure 1.

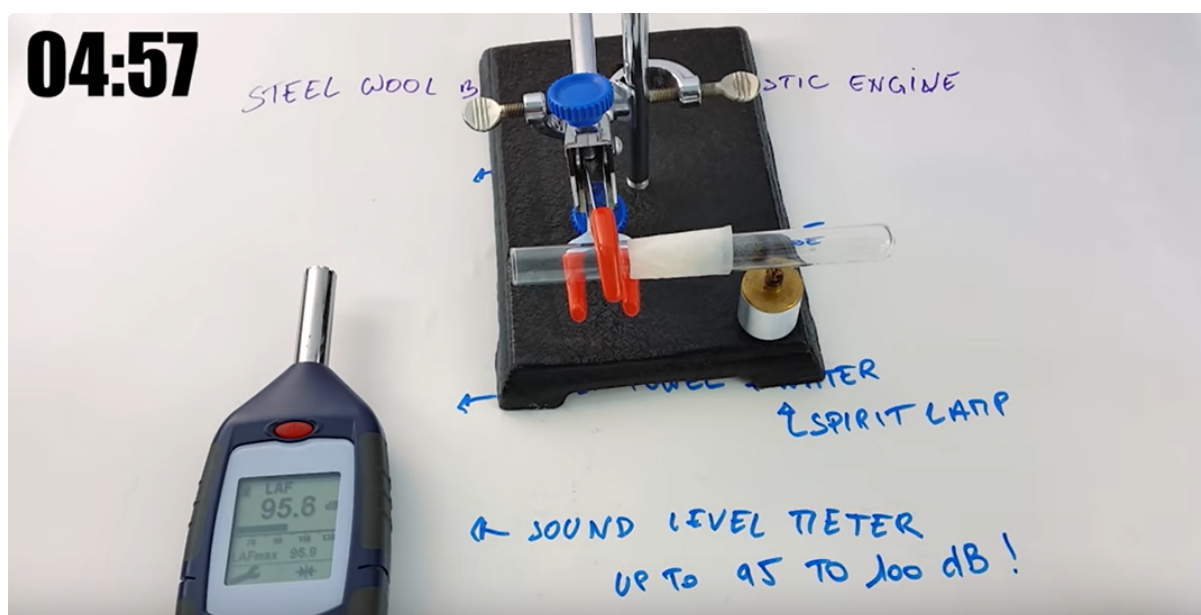


FIGURE 1 – **Construction d'un thermophone artisanal** : un tube à essai rempli d'un milieu poreux à base de paille de fer est chauffé à son extrémité par une lampe à alcool. Le niveau d'intensité sonore du son produit atteint environ 96 dB.

L'objectif de ce problème est d'estimer l'écart de température minimal qu'il est nécessaire d'imposer entre les deux extrémités de la paille de fer pour produire un son.

1 Onde acoustique dans un tube à essai

Tout comme une corde de guitare ou de piano, la colonne d'air comprise dans le tuyau d'un instrument à vent peut entrer en vibration pour certaines fréquences particulières. L'objectif de cette partie est d'étudier les vibrations de la colonne d'air dans un tube à essai, comme celui de la vidéo, indépendamment des causes qui leur donnent naissance.

Le tube à essai est assimilé à une enceinte cylindrique indéformable de longueur $L = 14$ cm, de section d'aire S et dont l'axe de symétrie est selon la direction de l'axe (Ox) . L'extrémité fermée du tube est située à l'abscisse $x = 0$ et son extrémité ouverte à $x = L$. Au repos, c'est-à-dire en l'absence d'onde sonore, la température, la pression et la masse volumique de l'air dans le tube sont uniformes notées respectivement T_0 , P_0 et ρ_0 .

Par ailleurs, on néglige tout effet de la pesanteur, ainsi que toutes les interactions visqueuses entre le gaz et les parois du tube de sorte que le mouvement du gaz se fait uniquement dans la direction x . Les propriétés du gaz peuvent alors être considérées uniformes dans les directions transverses y et z à tout instant.

Pour décrire les vibrations de la colonne d'air dans le tube à essai, on la « découpe » en portions mésoscopiques qu'on appelle « particules de fluide ». Le volume de ces particules est suffisamment grand par rapport à l'échelle microscopique pour qu'on puisse y définir une pression, une température et une masse volumique. Mais il est également suffisamment petit par rapport à l'échelle macroscopique pour pouvoir considérer que toutes ces grandeurs y sont uniformes.

Le système étudié à partir de maintenant est une particule de fluide dans le tube (figure 2), d'épaisseur $dx \ll L$, de surface dS et de volume $dV = dx \times dS$. En l'absence de viscosité, cette particule est astreinte à se déplacer longitudinalement, sa position étant repérée par l'abscisse $x(t)$ de sa face gauche. Quand une onde stationnaire se forme dans le tube, la particule oscille autour de sa position d'équilibre notée x_0 . Ainsi

$$x(t) = x_0 + \xi(x, t),$$

avec $\xi(x, t)$ le « déplacement longitudinal » de la particule qu'on admet être de la forme

$$\xi(x, t) = \xi_m \sin(kx) \cos(\omega t),$$

où ξ_m est l'amplitude des oscillations acoustiques, $\omega = 2\pi f$ la pulsation de l'onde et f sa fréquence, $k = 2\pi/\lambda$ son nombre d'onde et λ sa longueur d'onde.

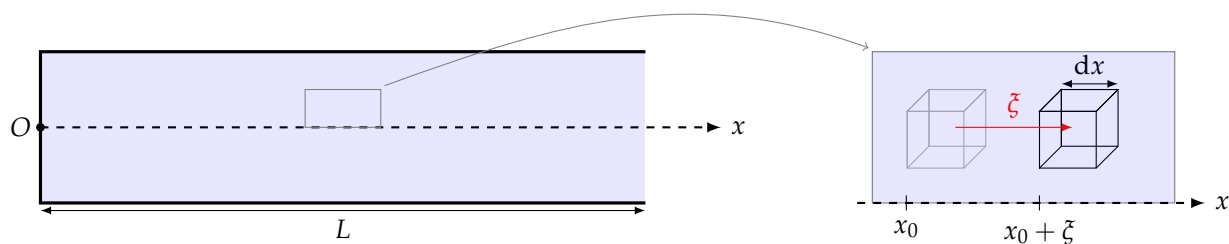


FIGURE 2 – Schéma de la situation à l'échelle macroscopique (à gauche) et à l'échelle mésoscopique (à droite)

Q1. Rappeler la relation liant la célérité c d'une onde, sa fréquence f et sa longueur d'onde λ . En déduire la relation liant ω et k .



En présence de l'onde sonore, on peut montrer que la pression et la température de la particule de fluide à l'abscisse x et à l'instant t s'écrivent en première approximation

$$\begin{cases} P(x, t) = P_0 + p(x, t) & \text{avec } p(x, t) = -p_m \cos(kx) \cos(\omega t) \\ T(x, t) = T_0 + \tau(x, t) & \text{avec } \tau(x, t) = -\tau_m \cos(kx) \cos(\omega t) \end{cases}$$

où $p_m \ll P_0$ est l'amplitude de la surpression acoustique associée à l'onde sonore et $\tau_m \ll T_0$ l'amplitude de la variation de température du fluide. La masse volumique de la particule de fluide s'écrit également sous la forme

$$\rho(x, t) = \rho_0 - \varrho_m \cos(kx) \cos(\omega t).$$

Toutefois, il est possible de montrer que $\varrho_m/\rho_0 \ll p_m/P_0$ et $\varrho_m/\rho_0 \ll \tau_m/T_0$. En première approximation, on considèrera donc que la masse volumique de la particule de fluide reste constante et égale à ρ_0 .

On admet que les propriétés de propagation l'onde sonore dans l'air du tube à essai permettent d'écrire la relation suivante

$$\tau_m = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{p_m}{P_0} T_0,$$

avec $\gamma = 1,4$ le coefficient adiabatique de l'air assimilé à un gaz parfait diatomique.

Q2. À l'instant t , exprimer la force de pression $\vec{F}_g$ exercée par la particule de fluide située juste à gauche (d'abscisse légèrement inférieure à x) de la particule de fluide étudiée. Faire de même pour la force de pression $\vec{F}_d$ exercée par la particule de fluide située juste à droite (d'abscisse légèrement supérieure à $x + dx$).

On suppose que le référentiel d'étude est galiléen et on note $dm = \rho_0 dV$ la masse de la particule de fluide.

Q3. Exploiter la seconde loi de Newton pour montrer que

$$\rho_0 \frac{d^2 \xi}{dt^2} = - \frac{dp}{dx}.$$

Nom :

Lycée :

Prénom :



Q4. En déduire l'expression de p_m en fonction de c , ω , ρ_0 et ξ_m .

Q5. Montrer, en admettant que la surpression acoustique est nulle à l'extrémité ouverte du tube, que le nombre d'onde k est quantifié et que ses valeurs discrètes possibles sont données par

$$k = (2n + 1) \frac{\pi}{2L} .$$

On donne ci-dessous, figure 3, le spectre en fréquences du son émis par le thermophone de la vidéo introductive.

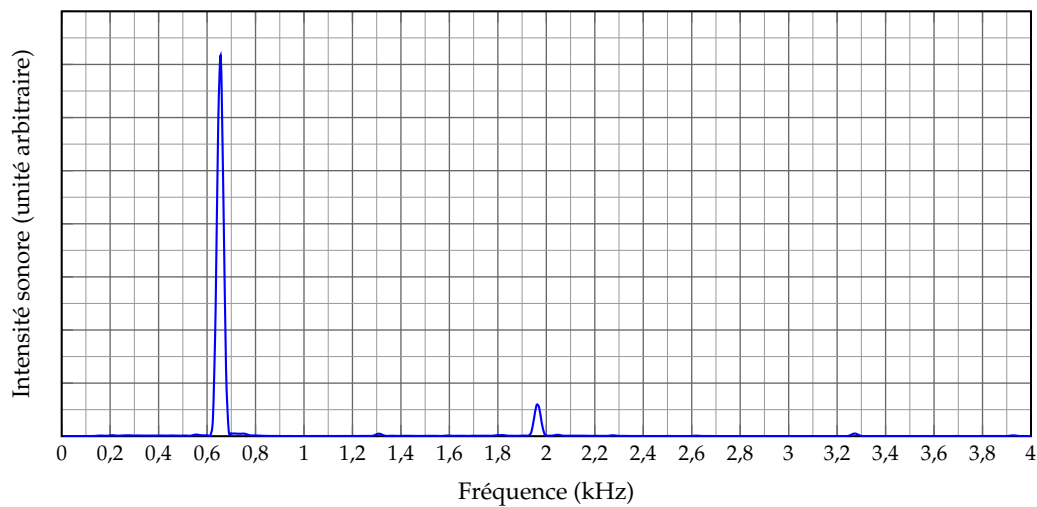


FIGURE 3 – Spectre en fréquences du son produit par le thermophone de la vidéo introductive

Q6. Analyser le spectre en fréquences du son produit par le thermophone.

Q7. Montrer, à partir des réponses aux questions 1 et 6, que la fréquence du son produit par le thermophone de la vidéo introductive correspond au mode propre fondamental de vibration du tube. On donne la valeur de la célérité du son dans l'air à une température de 20°C , sous pression atmosphérique : $c = 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Commenter l'écart éventuellement constaté avec la mesure expérimentale.



Le sonomètre de la vidéo introductive mesure un niveau d'intensité sonore maximal d'environ $L = 96$ dB (voir figure 1). C'est un niveau sonore important, comparable à celui produit par un marteau-piqueur à 10 mètres de distance. Niveau d'intensité sonore et surpression acoustique sont liés par la relation

$$L = 20 \log \left(\frac{p_m}{p_0} \right),$$

où $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ est la surpression acoustique au seuil d'audibilité de l'oreille humaine.

Q8. Estimer la valeur de la surpression acoustique p_m dans le tube à essai de la vidéo introductive.

Q9. En déduire un ordre de grandeur de l'amplitude du déplacement acoustique ξ_m et de l'amplitude des oscillations de température τ_m dans le tube à essai de la vidéo. Commenter les valeurs obtenues. On donne les ordres de grandeur $T_0 = 300$ K, $P_0 = 10^5$ Pa et $\rho_0 = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

2 Condition d'amplification thermoacoustique

On place, à l'intérieur de la cavité, un système métallique composé d'un empilement de fines plaques parallèles appelée « *stack* ». Ces plaques sont alignées parallèlement à l'axe (Ox) afin de ne pas obstruer le flux de gaz le long du tube. On suppose qu'il existe un régime d'onde stationnaire dans le mode fondamental du tube et qu'il n'est que très peu modifié par la présence du *stack*. La situation est représentée sur la figure 4 ci-dessous.

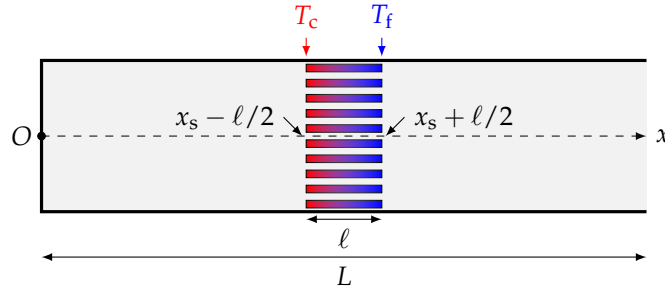


FIGURE 4 – Schéma du thermophone à tube à essai - c'est le milieu poreux à base de paille de fer qui joue le rôle de *stack* dans l'expérience de la vidéo introductive.

L'objectif de cette partie est d'analyser les transferts thermiques entre le fluide et les parois du *stack* pour établir un critère d'amplification de l'onde acoustique.

Le *stack* de longueur ℓ est centré à l'abscisse $x_s = L/2$. Une différence de température ΔT_s est maintenue entre ses deux extrémités :

- celle située à $x_s - \ell/2$, près du bord fermé, est à la température $T_c = T_0 + \Delta T_s/2$;
- celle située à $x_s + \ell/2$, près du bord ouvert, est à la température $T_f = T_0 - \Delta T_s/2$.

La température du *stack* se met alors sous la forme

$$T_s(x) = T_0 + \frac{\Delta T_s}{\ell}(x_s - x) = T_0 + \nabla T_s \times (x_s - x),$$

où $\nabla T_s = \Delta T_s / \ell$ est le « gradient de température du *stack* ».

On étudie le mouvement d'une particule de fluide située au voisinage d'une des parois solides du *stack* et au repos au centre du *stack*, à l'abscisse $x_0 = x_s$. On peut alors considérer que son déplacement longitudinal s'écrit

$$\xi(x, t) = \xi(x_s, t) = \xi_m \sin(kx_s) \cos(\omega t),$$

avec $kx_s = \pi/4$ dans le mode fondamental du tube.

Pour simplifier la modélisation qui suit, le mouvement sinusoïdal de la particule est désormais décomposé en une phase de mouvement rapide ($1 \rightarrow 2$), une phase d'arrêt ($2 \rightarrow 3$), une nouvelle phase de mouvement rapide en sens inverse ($3 \rightarrow 4$) et une dernière phase d'arrêt ($4 \rightarrow 1$). Cette séquence « articulée » de mouvements est représentée ci-dessous.

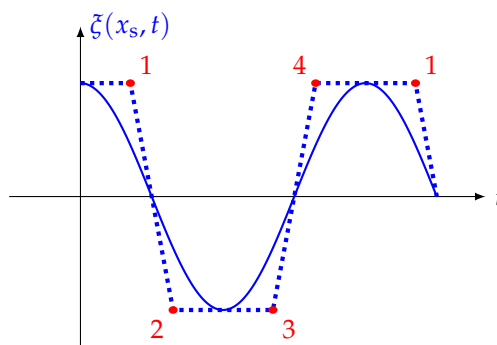


FIGURE 5 – Évolutions temporelles sinusoïdale (trait plein) et « articulée » (trait pointillé) du déplacement de la particule de fluide dans le *stack*



Q 10. Déterminer les positions x_{41} et x_{23} de la particule correspondant aux états d'immobilité 4/1 et 2/3 représentés sur la figure 5 en fonction uniquement de x_s et ζ_m et de valeurs numériques.

Q 11. Montrer alors que les températures $T_{s,41}$ et $T_{s,23}$ du *stack* à ces positions sont, de façon approchée,

$$T_{s,41} = T_0 - \frac{\sqrt{2}}{2} \nabla T_s \times \zeta_m \quad \text{et} \quad T_{s,23} = T_0 + \frac{\sqrt{2}}{2} \nabla T_s \times \zeta_m.$$

Quand la particule de fluide se déplace rapidement le long du *stack*, elle n'a pas le temps d'échanger une quantité significative de chaleur avec la plaque. Sa température à l'issue des phases de mouvement $1 \rightarrow 2$ et $3 \rightarrow 4$ est donc celle associée à l'onde acoustique.

$$T(x, t) = T(x_s, t) = T_0 + \tau(x_s, t) = T_0 - \tau_m \cos(kx_s) \cos(\omega t) \quad \text{avec} \quad kx_s = \frac{\pi}{4}.$$

Q 12. Déterminer les températures T_2 et T_4 de la particule à la fin des phases de mouvement $1 \rightarrow 2$ et $3 \rightarrow 4$ en fonction de T_0 , ∇T_s et τ_m .



Pour que la particule fournisse effectivement un travail au fluide environnant et participe, avec toutes les autres particules dans le *stack*, à amplifier puis entretenir l'onde stationnaire dans le tube, il faut qu'elle reçoive (respectivement qu'elle cède) de la chaleur du *stack* depuis le point de température la plus élevée (respectivement la moins élevée) de son mouvement.

Q13. Montrer alors qu'il y a conversion d'énergie thermique en travail acoustique à condition que le gradient de température du *stack* soit suffisamment grand

$$\nabla T_s > \frac{\tau_m}{\xi_m}.$$

Q14. En déduire la valeur de l'écart de température minimale entre les deux extrémités du *stack* dans l'expérience présentée dans la vidéo introductive. Conclure. On donne $\ell = 2$ cm, ainsi que les ordres de grandeur $\tau_m = 10^{-3}$ K et $\xi_m = 10^{-6}$ m.

Fin de la partie D

