

SESSION 2020

---

**CAPES  
CONCOURS EXTERNE  
ET CAFEP**

**SECTION PHYSIQUE-CHIMIE**

**COMPOSITION**

Durée : 5 heures

---

*Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

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

*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.**

## 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 externe du CAPES de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B E	1 5 0 0 F	1 0 1	0 4 3 0

► **Concours externe du CAFEP/CAPES de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B F	1 5 0 0 F	1 0 1	0 4 3 0

## ÉPREUVE DE COMPOSITION

### Remarques générales

*Les questions proposées sont de natures variées : restitution de connaissances, question ouverte, analyse de documents, résolution de problème, etc. Le barème tient compte de la durée nécessaire à la résolution des différentes questions.*

*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.*

## Études de quelques expériences déterminantes en physique – Applications

Ce sujet porte sur l'étude de quelques expériences importantes en physique. Après la description de chaque expérience, le sujet aborde des applications concrètes des théories développées à la suite de ces expérimentations et pouvant servir de supports lors d'un enseignement de la physique-chimie.

### I- Expériences sur la chute des corps

Dans toute cette première partie, le référentiel terrestre est supposé galiléen. On note  $t$  la variable associée au temps et  $g$  l'intensité du champ de pesanteur terrestre (on prend  $g \approx 10 \text{ m.s}^{-2}$  et on considère ce champ uniforme). On néglige également l'effet de la poussée d'Archimède.

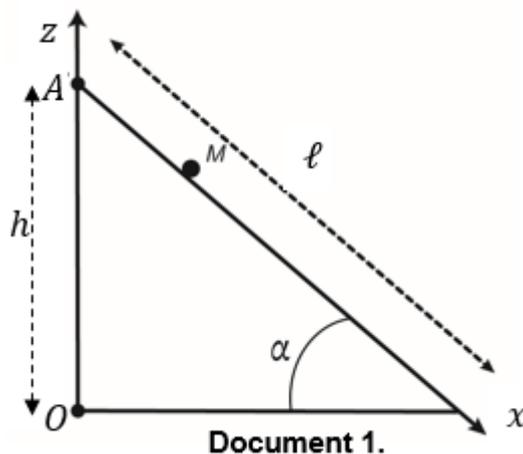
#### a) Quelques aspects historiques

Pour Aristote, la vitesse de chute d'un mobile est proportionnelle à son poids. Cependant, Galilée proposa l'expérience de pensée suivante :

[...]. *Considérons deux masses  $m_1$  et  $m_2 < m_1$  en chute libre. D'après Aristote, la masse  $m_1$  atteint le sol avant la masse  $m_2$ . En reliant, à l'aide d'un fil, les masses  $m_1$  et  $m_2$ , on obtient alors un système ( $S$ ) plus lourd que la masse  $m_1$  seule et donc a priori plus rapide pendant sa chute. Cependant ce système ( $S$ ) est ralenti par la masse  $m_2$  ( $m_2$  plus lente faisant l'effet « d'un parachute »). ( $S$ ) est donc plus lent que la masse  $m_1$  seule alors qu'il est plus lourd, il y a donc un paradoxe....*

Étienne Klein, *extrait d'une conférence intitulée « De quoi l'énergie est-elle le nom ? »*

En 1602, Galilée a l'intuition que le mouvement de chute libre (c'est-à-dire sans frottement) d'un corps dans le champ de pesanteur terrestre est indépendant de la masse de ce corps. Mais il se heurte à l'impossibilité de mesurer précisément la vitesse d'un corps tombant à la verticale. Galilée entreprit alors d'étudier le mouvement de chute de corps à l'aide d'un plan incliné d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontale. On note  $Oz$  l'axe vertical ascendant et  $Ax$  l'axe confondu avec la ligne de plus grande pente du plan incliné. On pose  $OA = h$  (cf. document 1).

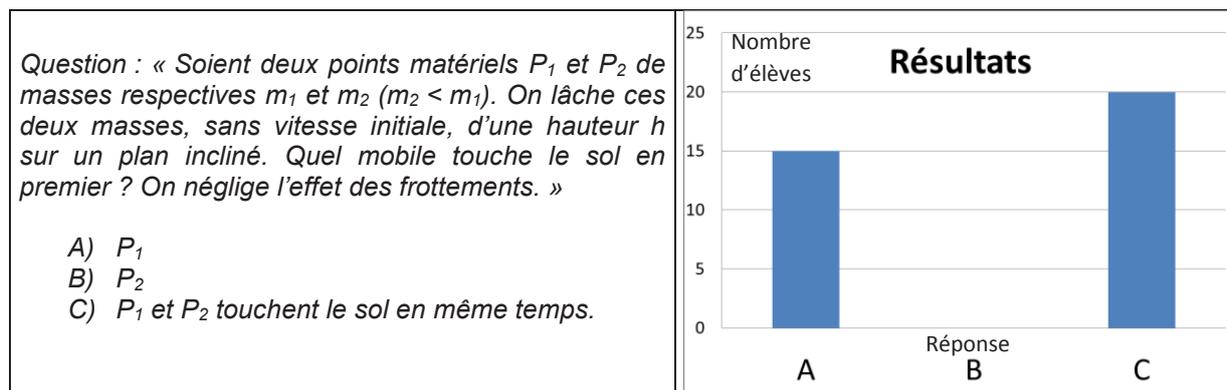


On souhaite étudier cette expérience de Galilée en analysant le mouvement d'un mobile, assimilé à un point matériel de masse  $m$  repéré par le point  $M$ , lâché sans vitesse initiale depuis le point  $A$ . On néglige tout frottement lors de cette chute s'effectuant sur le plan incliné présenté dans le document 1.

**Q1.** Déterminer, à l'aide de la relation fondamentale de la dynamique, l'accélération  $\ddot{x}(t)$  du point  $M$  en fonction de  $g$  et  $\alpha$ .

**Q2.** Exprimer le temps de chute  $t_0$  nécessaire pour parcourir, suivant la ligne de plus grande pente, la distance  $l$  en fonction de  $g$ ,  $h$  et  $l$ . Commenter.

Après avoir présenté la résolution de la question Q2 à une classe de Terminale S, un enseignant pose la question à choix multiple du document 2. Cet enseignant dénombre ensuite sur un histogramme le nombre d'élèves ayant proposé les réponses A, B et C :

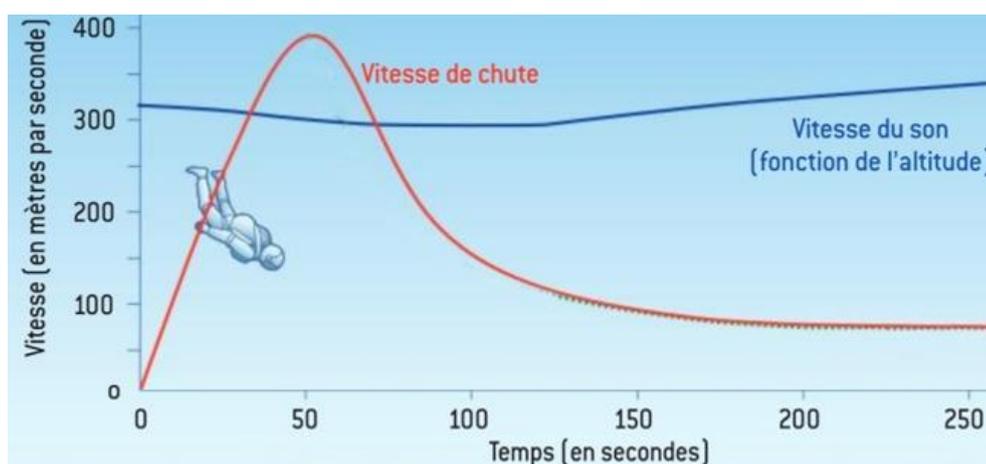


### Document 2

**Q3.** En considérant que tous les élèves sont attentifs lors de la présentation de la résolution, donner une raison possible expliquant ces résultats et proposer, en quelques lignes, une remédiation.

#### b) Saut en chute libre de Felix Baumgartner

Le 14 Octobre 2012, s'élevant en ballon à 39 kilomètres d'altitude pour effectuer un saut en chute libre, l'Autrichien Felix Baumgartner quittait la troposphère, la première couche de l'atmosphère terrestre. [...]. Il est incontestable que F. Baumgartner a franchi le mur du son. Cependant, [...] il est peu probable que cela ait créé une onde de choc notable [...]. Il est par ailleurs mentionné que ce saut pourra alimenter la réflexion sur les procédés de survie des astronautes lors d'un retour sur Terre : au lieu d'attendre la destruction de leur vaisseau spatial dans les hautes couches de l'atmosphère, ne peuvent-ils pas sauter sur Terre et revenir comme F. Baumgartner ?



**Document 3 :** Extrait de « la physique surprise » de J.M. Courty et E. Kierlik

**Q4.** Estimer, à l'aide du document 3 et en explicitant la méthode, l'épaisseur  $\delta$  de l'atmosphère dans laquelle F. Baumgartner est en chute libre (mouvement de chute pour lequel on néglige les frottements).

L'étude du mouvement de chute pendant les 250 premières secondes nécessite de prendre en compte les frottements de l'air : dans ces conditions la vitesse de chute d'un mobile est fonction de la masse de ce mobile. En effet, lorsque F. Baumgartner atteint sa vitesse limite

pour  $t = 200 \text{ s}$ , il se trouve à 10 km d'altitude et à une pression atteignant déjà 20 % de la pression au niveau du sol égale à  $1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Pour  $t \leq 250 \text{ s}$ , on supposera l'atmosphère isotherme et à la température  $\theta_0 = -50 \text{ }^\circ\text{C}$  (on donne également la valeur de la masse molaire  $M$  de l'air :  $M = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  et on rappelle la valeur de la constante des gaz parfaits  $R = 8,3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). Pendant cette étude, le champ de pesanteur pourra toujours être considéré uniforme et égal à  $g$ . F. Baumgartner, de masse  $m$ , est animé d'une vitesse  $\vec{v}(t) = v(t)\vec{u}_z$  par rapport au référentiel terrestre (le vecteur  $\vec{u}_z$  est associé à un axe  $Oz$  vertical et ascendant, l'origine  $O$  étant prise au niveau du sol). Si nécessaire, il est possible de modéliser l'action de l'air sur F. Baumgartner par une force de traînée dont la puissance est donnée par l'expression  $P_f(t) = \frac{1}{2}\rho(z)ACv^3$  où  $\rho(z)$  est la masse volumique de l'atmosphère terrestre,  $A$  est la surface apparente de F. Baumgartner et  $C$  est le coefficient de traînée dans l'air ( $A$  et  $C$  sont supposés constants).

**Q5.** Résolution de problème : estimer la valeur de la masse volumique de l'air ainsi que celle de la cote verticale  $z_0$  de F. Baumgartner lorsqu'il atteint sa vitesse maximale. Pourquoi les auteurs du document 3 estiment que l'onde de choc émise en  $z_0$  n'est pas « notable » ?

*La réponse à cette question nécessite de l'initiative. Le candidat est invité à consigner ses pistes de recherche et à y consacrer un temps suffisant. La qualité de la démarche choisie et son explicitation seront évaluées tout autant que le résultat final.*

## II- Expérience des trous d'Young

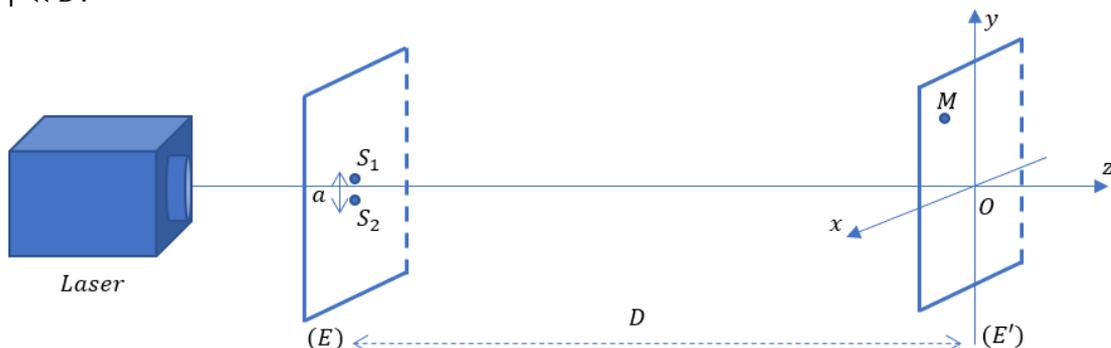
Dans toute cette partie, l'air possède des propriétés optiques supposées assimilables à celles du vide.

### a) Quelques aspects historiques

En 1801, T. Young entreprend une expérience d'interférences visant à démontrer que la lumière visible peut être décrite comme une onde scalaire : on parle de vibration lumineuse. L'observation expérimentale de cette figure d'interférences a permis de remettre en cause le modèle particulaire de la lumière que Newton avait proposé au 17<sup>e</sup> siècle.

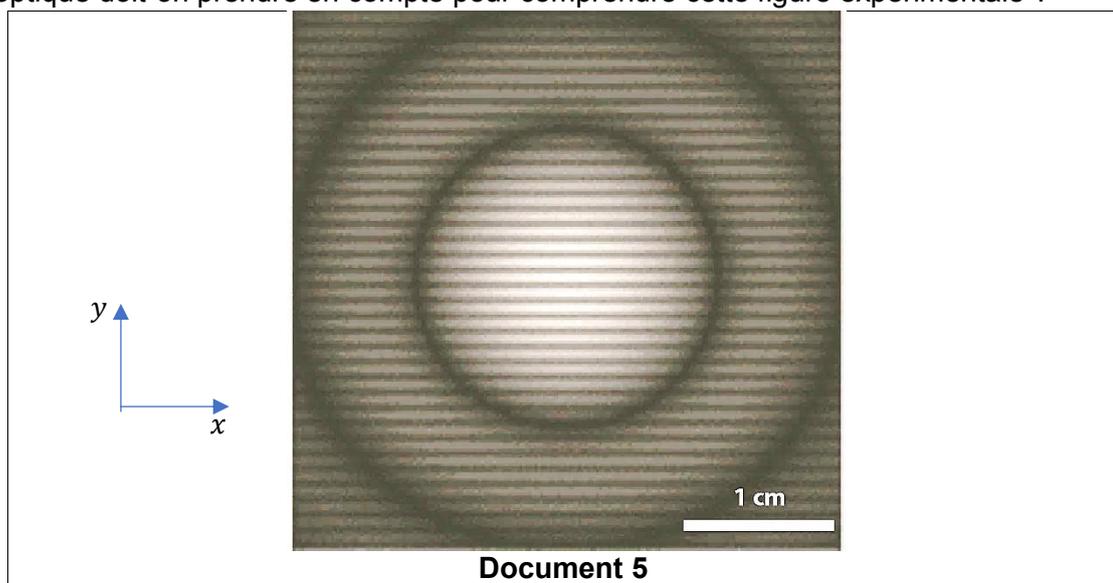
En classe, on peut facilement mettre en évidence l'interférence à deux ondes lumineuses à l'aide du montage représenté ci-dessous (document 4). Il est constitué :

- d'un laser émettant un faisceau lumineux cylindrique d'axe  $Oz$ . Cette source lumineuse est supposée monochromatique, de pulsation  $\omega$  et de longueur d'onde  $\lambda_0$  ;
- d'un plan  $(E)$  percé de deux trous circulaires, identiques, de rayon  $b$ , distants de  $a$  et centrés sur les points  $S_1(0, +\frac{a}{2}, -D)$  et  $S_2(0, -\frac{a}{2}, -D)$ ). Le faisceau du laser éclaire entièrement et de manière uniforme ces deux trous sources ;
- d'un écran de projection  $(E')$  parallèle à  $(E)$  et situé à une distance  $D$  de  $(E)$  telle que  $D \gg a$  (on choisit typiquement  $D = 1 \text{ m}$ ,  $a = 0,5 \text{ mm}$ ). Un point  $M$  quelconque de l'écran  $(E')$  est repéré par les variables  $(x, y, 0)$ . Le champ d'observation est tel que  $|x| \ll D$  et  $|y| \ll D$ .



**Document 4**

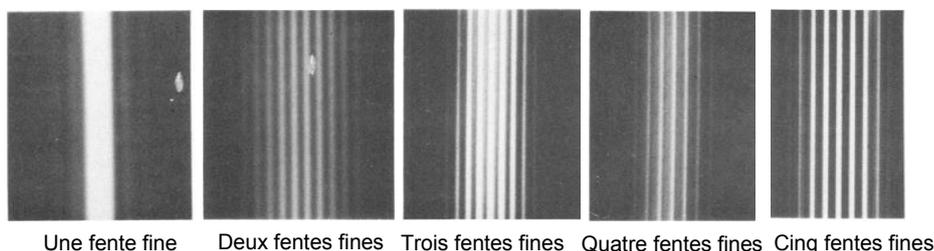
- Q6.** Montrer que l'éclairement  $\mathcal{E}(M)$  en M est donné par  $\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi ay}{\lambda_0 D}\right)\right)$ , si on considère que les vibrations lumineuses au point M, issues des trous sources  $S_1$  et  $S_2$ , sont décrites respectivement par les expressions  $s_1(M, t) = S_0 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} S_1 M\right)$  et  $s_2(M, t) = S_0 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} S_2 M\right)$  ( $S_0$  étant une constante). On note ici  $\mathcal{E}_0$  l'éclairement qui serait obtenu en masquant l'un des deux trous. Décrire la figure d'interférences.
- Q7.** Comparer l'éclairement calculé à la question précédente avec la figure ci-dessous obtenue expérimentalement sur l'écran ( $E'$ ) (document 5). Quel autre phénomène optique doit-on prendre en compte pour comprendre cette figure expérimentale ?



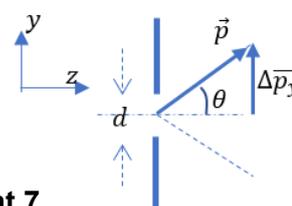
- Q8.** Montrer que la figure ci-dessus (document 5) permet d'estimer les valeurs de la longueur d'onde  $\lambda_0$  et de  $b$ .

b) Applications

La physique quantique associe aux particules une longueur d'onde et leur confère des propriétés ondulatoires. Afin de mettre en évidence le caractère ondulatoire des particules, C. Jönsson réalisa en 1961 des expériences consistant à envoyer des électrons à travers une ou plusieurs fentes. Les figures données dans le document 6 sont obtenues sur un écran fluorescent.



Soit un électron auquel on associe une longueur d'onde  $\lambda_e$  arrivant en incidence normale sur une fente fine. On suppose qu'après avoir franchi cette fente fine, son vecteur quantité de mouvement  $\vec{p}$  s'inscrit dans un cône de demi-angle au sommet  $\theta$ .

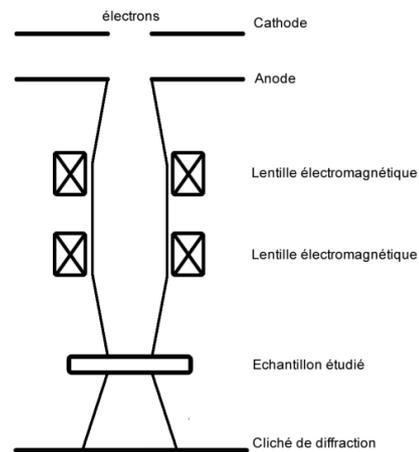


Il existe donc, pour cet électron, une indétermination sur la composante  $\Delta p_y$  de  $\vec{p}$  (cf. document 7). De même, l'électron qui passe par la fente fine, de largeur  $d$ , possède une certaine indétermination spatiale  $\Delta y$  dont la valeur peut être estimée par  $d$ .

**Q9.** On donne la relation d'indétermination d'Heisenberg qui relie  $\Delta y$  et  $\Delta p_y$  telle que  $\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{h}{4\pi}$  (où  $h$  est la constante de Planck). Montrer, en utilisant la relation de de Broglie, que la physique quantique prévoit bien l'existence d'un écart angulaire minimum  $\theta_m$  de diffraction fonction de  $d$  et  $\lambda_e$ .

Les résultats de C. Jönsson mettent aussi en évidence que la résolution de la figure d'interférence, c'est-à-dire la précision maximale avec laquelle on peut faire des pointés, augmente lorsque le nombre  $N$  de fentes augmente. Cette propriété est mise à profit dans les microscopes électroniques en transmission. Les électrons, initialement immobiles, sont accélérés grâce à une tension  $U > 0$  entre une cathode et une anode. Ces électrons sont supposés non relativistes. Ils sont associés à une longueur d'onde d'environ un ordre de grandeur plus petit que la distance interatomique  $d_e$ .

Après accélération et focalisation, ces électrons atteignent un nombre important d'atomes d'un très mince échantillon (cf. document 8). L'analyse de la figure de diffraction peut permettre ensuite d'étudier la structure cristalline de l'échantillon.



**Document 8**

On donne la constante de Planck  $h \approx 7 \times 10^{-34}$  J.s, la masse de l'électron  $m_e \approx 9 \times 10^{-31}$  kg et la charge élémentaire  $e \approx 2 \times 10^{-19}$  C.

**Q10.** Résolution de problème : donner une estimation de la valeur de la tension  $U$  nécessaire pour analyser un solide cristallin par l'étude de la figure de diffraction électronique ? Commenter *a posteriori* l'hypothèse non relativiste des électrons.

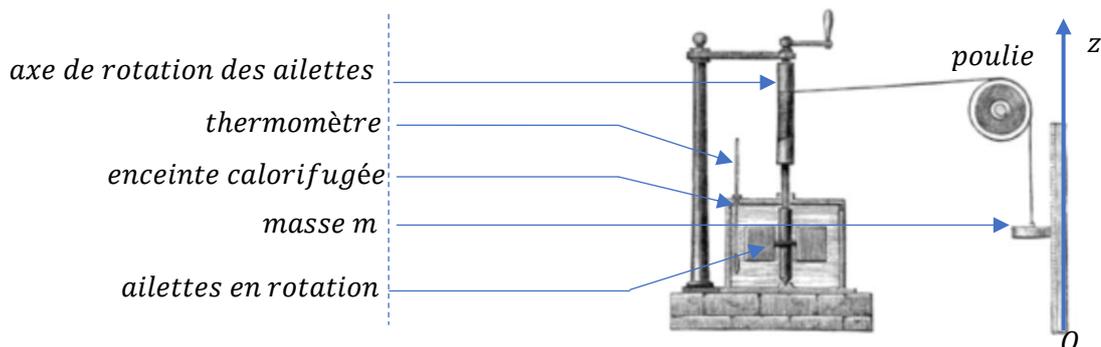
*La réponse à cette question nécessite de l'initiative. Le candidat est invité à consigner ses pistes de recherche et à y consacrer un temps suffisant. La qualité de la démarche choisie et son explicitation seront évaluées tout autant que le résultat final.*

### III- Expérience de Joule

#### a) Quelques aspects historiques

En 1843, James Prescott Joule proposa une expérience permettant de mesurer l'équivalent mécanique de la chaleur. Cette expérience est décrite de manière simplifiée au document 9. Une masse  $m = 3 \times 10^1$  kg, initialement immobile à une hauteur  $H = 2$  m, entraîne la rotation d'ailettes lors de son mouvement de chute. Ce mouvement de translation de la masse  $m$  est converti en mouvement de rotation à l'aide d'un fil inextensible, encastré dans une poulie et enroulé autour de l'axe de rotation des ailettes. Les ailettes sont dans une enceinte supposée calorifugée et remplie d'eau (l'eau est supposée être initialement au repos). On note  $T$  la température de la masse d'eau présente dans l'enceinte et mesurée à l'aide d'un thermomètre. On néglige tous les frottements sauf ceux associés à la viscosité de l'eau

présente dans le calorimètre. On note  $g$  l'intensité du champ de pesanteur terrestre (avec  $g = 1 \times 10^1 \text{ m.s}^{-2}$ ).



**Document 9** – d'après [https://fr.wikipedia.org/wiki/James\\_Prescott\\_Joule](https://fr.wikipedia.org/wiki/James_Prescott_Joule)

Le travail des forces de viscosité de l'eau est à l'origine d'une augmentation de la température  $T$ . J.P. Joule associe cette élévation de température à un transfert thermique équivalent  $Q$  exprimé en calorie (cal). La capacité thermique de l'ensemble du calorimètre (eau, ailettes et enceinte) vaut  $C = 5 \text{ kcal.K}^{-1}$ . J.P. Joule effectue à 20 reprises le mouvement de chute de la masse  $m$  sur une hauteur  $H$  et note une variation de température  $\Delta T = 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . On note  $W$  le travail mécanique du poids, exprimée en joule (J), mis en jeu lors des mouvements de chute et  $A$  la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur tel que  $A = \frac{W(J)}{Q(cal)}$ .

**Q11.** Déterminer la valeur de  $A$  et interpréter la valeur obtenue.

b) Autre exemple de conversion d'un travail en transfert thermique : la bouilloire

L'activité expérimentale présentée dans le document 10 est proposée à une classe de Terminale S dans le cadre d'une démarche d'investigation.

**Activité expérimentale : conversion d'un travail électrique en transfert thermique**

Vous avez à disposition :

- une bouilloire ;
- un thermomètre, un puissance-mètre, une balance ;
- un chronomètre.



Proposer puis réaliser un protocole permettant d'obtenir le rendement de la bouilloire à disposition.

Données :

- capacité thermique massique de l'eau :  $c_{eau} = (4185 \pm 1) \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$  ;
- soient trois grandeurs physiques  $a, b$  et  $c$  telles que  $a = bc$ . On note  $u(b)$  l'incertitude-type associée à une mesure de  $b$  et  $u(c)$  l'incertitude-type associée à une mesure de  $c$ . L'incertitude-type associée à la valeur de  $a$  est donnée par :

$$u(a) = a \sqrt{\left(\frac{u(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{u(c)}{c}\right)^2} ;$$

- soient trois grandeurs physiques  $a, b$  et  $c$  telles que  $a = b - c$ . On note  $u(b)$  l'incertitude-type associée à une mesure de  $b$  et  $u(c)$  l'incertitude-type associée à une mesure de  $c$ . L'incertitude-type associée à la valeur de  $a$  est donnée par :

$$u(a) = \sqrt{u(b)^2 + u(c)^2} .$$

**Document 10**

Les mesures faites par l'enseignant sont données dans le tableau ci-dessous.

Température initiale : $T_i(^{\circ}C)$	Température finale : $T_f(^{\circ}C)$	Masse d'eau : $m(kg)$	Temps de chauffage $\Delta t(s)$	Puissance moyenne consommée ( $W$ )
$T_i(^{\circ}C) = (30,0 \pm 0,5)^{\circ}C$	$T_f(^{\circ}C) = (48,5 \pm 0,5)^{\circ}C$	$m = (1,670 \pm 0,005) kg$	$\Delta t = (67,0 \pm 0,5) s$	$P = (2515 \pm 5) W$

**Q12.** En utilisant les résultats expérimentaux ci-dessus, déterminer la valeur du rendement  $\eta$  de la bouilloire avec une estimation de son incertitude-type  $u(\eta)$ . Commenter la valeur obtenue.

L'**annexe 2 à rendre avec la copie** propose un compte rendu d'élève répondant à cette activité expérimentale.

**Q13.** Corriger ce compte rendu en écrivant directement sur l'**annexe 2 à rendre avec la copie**. Pour cette correction, il convient de repérer les éventuelles erreurs de l'élève et de compléter la correction par des remarques pertinentes pour la progression de l'élève. On peut également se référer à l'**annexe 1**.

#### IV- Expérience de Hertz

Dans la suite on note :

- $\mu_0$  la perméabilité magnétique du vide ;
- $\varepsilon_0$  la permittivité électrique du vide ;
- $\vec{B}$  le champ magnétique et  $\vec{E}$  le champ électrique ;

$$- \Delta \vec{a} = \begin{pmatrix} \Delta a_x \\ \Delta a_y \\ \Delta a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 a_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a_x}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 a_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a_y}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 a_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a_z}{\partial z^2} \end{pmatrix} \text{ le laplacien vectoriel d'un champ de vecteurs}$$

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \text{ dans une base cartésienne } (\vec{u}_x; \vec{u}_y; \vec{u}_z)$$

On donne le résultat de l'analyse vectorielle :  $\overrightarrow{rot}(\overrightarrow{rot}\vec{a}) = \overrightarrow{grad}(\text{div}\vec{a}) - \Delta\vec{a}$ .

On supposera également que les constantes diélectrique et magnétique de l'air s'identifient à celle du vide.

##### a) Quelques aspects historiques

En 1865, James Clerk Maxwell proposa un formalisme condensé unifiant les phénomènes électromagnétiques.

**Q14.** Rappeler les équations de Maxwell dans le vide.

**Q15.** Établir l'équation de propagation vérifiée par  $\vec{E}$  sous la forme  $\Delta\vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}$ . On donnera l'expression de  $c$  en fonction de  $\mu_0$  et  $\varepsilon_0$ .

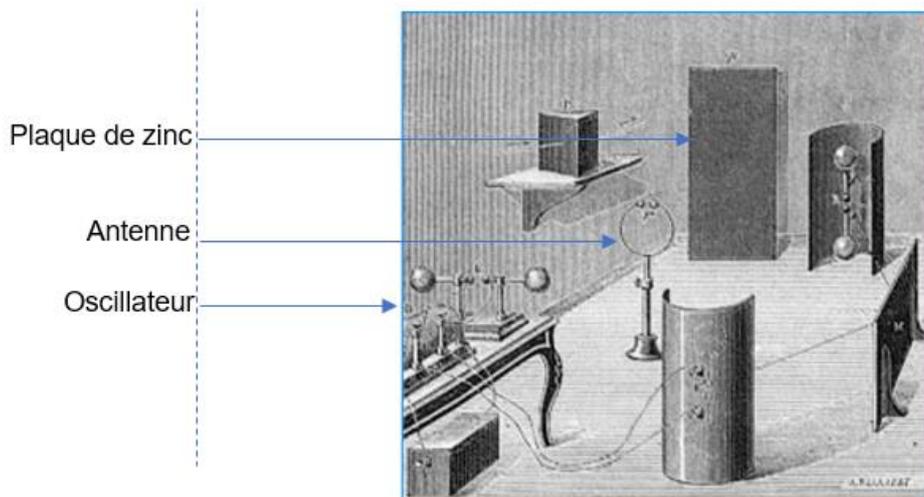
Dans l'équation précédente  $c$  représente la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique. Pour comprendre ce qu'implique cette équation linéaire, on considère une structure particulière telle que  $\vec{E} = E(z, t)\vec{u}_x$ .

**Q16.** Écrire l'équation aux dérivées partielles vérifiée par  $E(z, t)$ .

On montre alors qu'une des solutions  $E(z, t)$  est de la forme  $E(z, t) = f\left(t - \frac{z}{c}\right)$  où  $f$  est une fonction décrivant les variations temporelles de  $E$  en  $z = 0$ . Cette solution traduit la propagation d'une onde plane et progressive.

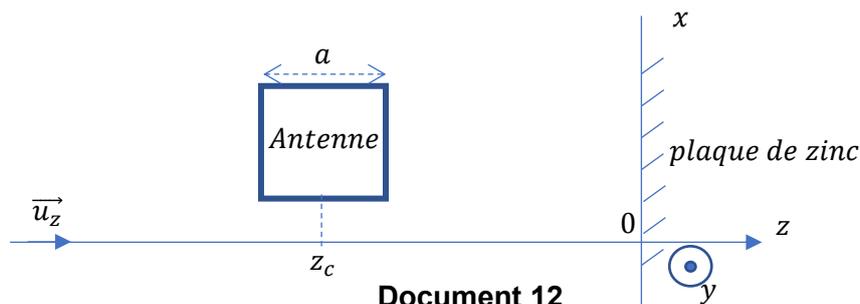
**Q17.** Préciser, en vous aidant éventuellement d'un schéma, les caractéristiques de l'onde plane progressive définie par  $E(z, t) = f\left(t - \frac{z}{c}\right)$ .

En 1888, Hertz proposa un dispositif permettant de démontrer le caractère ondulatoire des phénomènes électromagnétiques en utilisant un oscillateur (à l'origine de l'émission d'une onde électromagnétique supposée quasi-sinusoidale et de fréquence  $\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ ), une antenne de réception et des plaques de zinc (cf. document 11).



**Document 11** – D'après « Construction de la preuve en physique » de Dominique Pestre

La présence d'une plaque de zinc en  $z = 0$ , supposé être un métal parfaitement conducteur, permet une réflexion des champs électromagnétiques dans l'espace  $z < 0$  (document 12). Hertz pensait que si le champ électromagnétique était une onde alors, comme dans le cas de la corde de Melde, la formation d'une onde stationnaire était possible dans l'espace  $z < 0$  par superposition d'une onde incidente décrite, en représentation complexe, par l'expression  $\vec{E}_i = E_0 e^{j(\omega_0 t - k_0 z)} \vec{u}_x$  et d'une onde réfléchie décrite par  $\vec{E}_r = E_{0,r} e^{j(\omega_0 t + k_0 z + \phi)} \vec{u}_x$  où  $E_0, \phi, E_{0,r}$  sont des constantes réelles et  $k_0 = \frac{\omega_0}{c}$  est le nombre d'onde (on rappelle que  $j^2 = -1$ ).



**Document 12**

**Q18.** En admettant que la relation de passage vérifiée par le champ électrique totale  $\vec{E}$  s'écrive  $\vec{E}(z = 0^-, t) = \vec{E}(z = 0^+, t)$  et que le champ électrique soit nul dans le métal, montrer que l'on peut choisir  $\begin{cases} E_0 = -E_{0,r} \\ \phi = 0 \end{cases}$  et en déduire que le champ magnétique résultant est donné par l'expression :  $\vec{B} = \frac{2E_0}{c} \cos(k_0 z) \cos(\omega_0 t) \vec{u}_y$ .

L'antenne de réception est modélisée par un circuit filiforme de géométrie carrée (côtés de longueur  $a$ ). On repère par  $z_c$  le centre de l'antenne (cf. document 12).

**Q19.** Expérimentalement, on fixe  $k_0 a \ll 1$ , justifier que l'on puisse approcher le champ magnétique par l'expression  $\vec{B} \approx \frac{2E_0}{c} \cos(k_0 z_c) \cos(\omega_0 t) \vec{u}_y$  en tout point de la surface carrée délimitée par le contour de l'antenne.

**Q20.** Déterminer l'expression de la force électromotrice induite  $e$  qui apparaît dans l'antenne en utilisant la loi de Faraday et les grandeurs présentées dans le sujet.

**Q21.** En déduire l'expression de la distance  $d_m$  entre deux points consécutifs de l'axe  $Oz$  où l'amplitude de la force électromotrice induite  $e$  est maximale.

Hertz, en observant ces maxima de tension (qui se traduisaient par la présence d'étincelles au niveau de l'antenne) valida la théorie ondulatoire des champs électromagnétiques. Il mesura typiquement  $d_m = 5,0 \text{ m}$ .

**Q22.** Donner la valeur de la fréquence  $\nu_0$  en MHz de l'onde électromagnétique que Hertz devait détecter.

b) Étude d'une transmission hertzienne

Un enseignant de physique-chimie propose à ses élèves de Terminale S l'activité documentaire ci-dessous (document 13) afin de débiter l'étude de la partie du programme sur le thème « Procédés physiques de transmission ».

**Activité documentaire Terminale S : principe d'un bilan de liaison**

**Document A : schéma de principe d'une communication entre deux antennes**

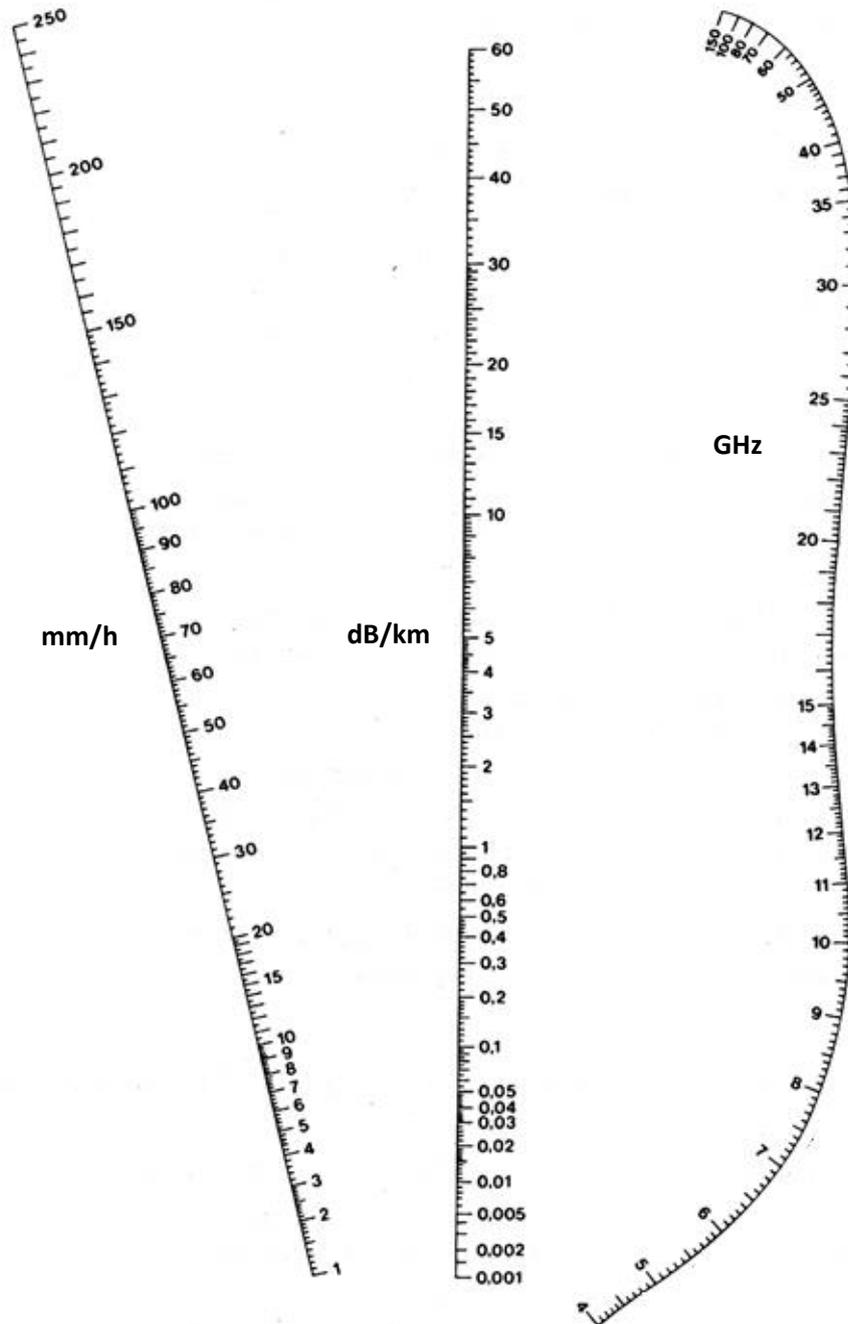
On considère une antenne d'émission rayonnant une puissance  $P_e$  en direction d'une antenne de réception captant une puissance  $P_s$ . La puissance  $P_s$  détectée doit être supérieure à une puissance notée  $P_{ref}$  afin que la liaison hertzienne puisse être possible (il est donc essentiel de maîtriser la valeur de  $P_s$ ). Ces deux antennes sont distantes d'une distance  $d$  et on note  $\lambda \ll d$  la longueur de l'onde électromagnétique émise.

Même sans obstacle (espace libre), la puissance  $P_s$  captée ne représente qu'une fraction de la puissance  $P_e$  rayonnée dans l'espace. Dans la situation envisagée, on a :

$$\frac{P_s}{P_e} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Document B : affaiblissement lié à la pluie

Le monogramme ci-après permet la lecture du coefficient d'amortissement  $\alpha$  (exprimé en  $dB/km$ ) associé à l'effet des précipitations en fonction de la fréquence de l'onde et de l'intensité de ces précipitations (en  $mm/h$ ).



Questions

Soit  $d = 10,0 \text{ km}$  la distance entre les deux antennes, on réalise une communication hertzienne à la fréquence de  $8,00 \text{ GHz}$ .

1. Déterminer, en l'absence de précipitation, la valeur de l'affaiblissement  $A$  donné par  $A(dB) = 10 \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right)$  lors d'une transmission entre les deux antennes présentées au document A.
2. À l'affaiblissement  $A$  calculé précédemment vient s'ajouter un affaiblissement dû aux précipitations. Déterminer la nouvelle valeur de l'affaiblissement  $A'$  en présence de précipitations dont l'intensité est de  $100 \text{ mm/h}$ .

Document 13

**Q23.** En utilisant l'extrait du programme de Terminale S **en annexe 1**, préciser la (ou les) compétence(s) du programme que le professeur de physique-chimie cherche à faire travailler par ses élèves ?

Peu d'élèves ont été capables de répondre correctement aux deux questions du document 13 utilisé comme activité introductive de la partie « Procédés physiques de transmission ».

**Q24.** Proposer une correction de l'activité du document 13 en identifiant les obstacles à l'origine des difficultés rencontrées par les élèves découvrant cette partie du programme puis proposer des modifications à apporter à ce document afin qu'il soit plus adapté.

c) Principe d'une transmission hertzienne

Dès les années 1920 ont été établies les premières radio-télécommunications. Le principe de ces communications consistait à transmettre un signal utile et analogique  $u(t)$  à l'aide d'un autre signal  $p(t)$  appelé porteuse. Avec un modulateur (réalisant une modulation d'amplitude), on obtient un signal modulé  $s(t)$  qui peut facilement être rayonné par une antenne après amplification (cf. document 14). Une antenne de réception suivie d'un circuit électronique de réception permet ensuite de récupérer le signal  $u(t)$ .

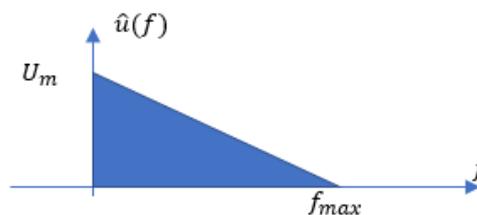


**Document 14**

**Q25.** Posons : 
$$\begin{cases} u(t) = U_m \cos(\omega_u t) \\ p(t) = P_m \cos(\omega_p t) \\ s(t) = u(t) \times p(t) \end{cases}$$
 où  $U_m, P_m, \omega_u$  et  $\omega_p > \omega_u$  sont des constantes.

Représenter le spectre  $\hat{s}(f)$  du signal  $s(t)$  (où  $f$  est la fréquence). On précisera l'amplitude et la fréquence de chaque raie.

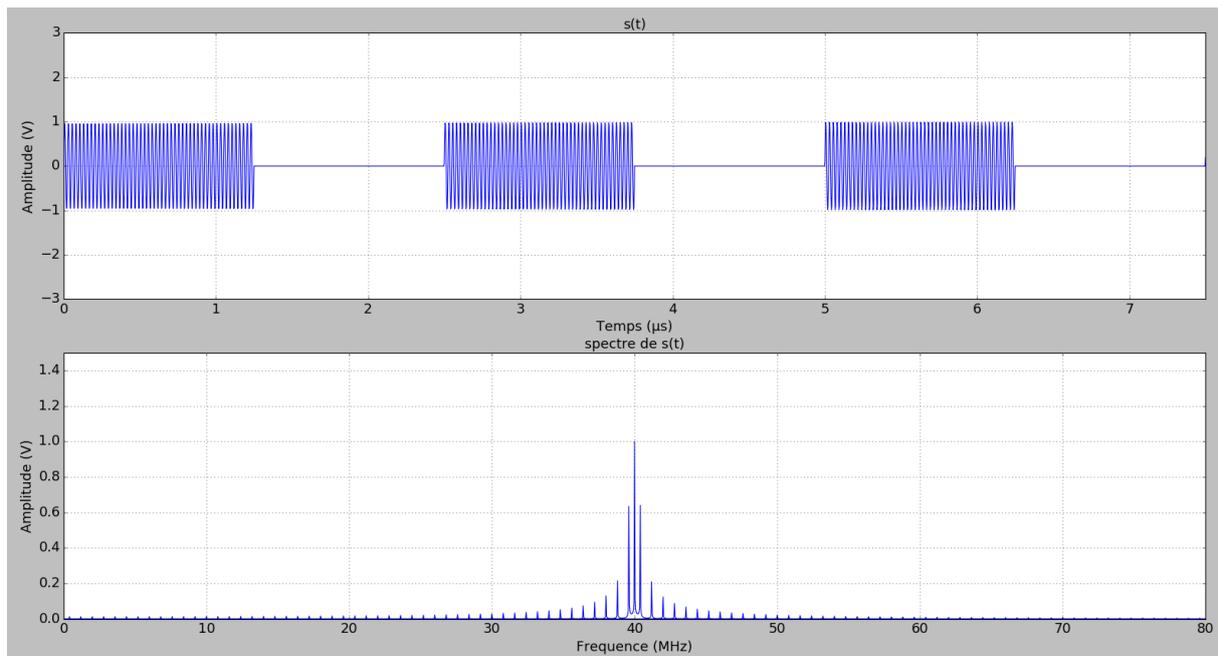
**Q26.** Dessiner l'allure du spectre de  $s(t)$  dans le cas où  $u(t)$  est maintenant un signal complexe dont le spectre  $\hat{u}(f)$  est représenté sur le document 15.



**Document 15**

Actuellement, les modulations d'amplitude sont utilisées pour des communications de courtes distances et utilisent des signaux  $u(t)$  numériques moins sensibles aux bruits. Les modulations d'amplitudes de type OOK (On Off Keying) sont les plus simples car un état haut de  $u(t)$  impose  $s(t) = p(t)$  et un état bas de  $u(t)$  impose  $s(t) = 0$ .

On donne au document 16, l'oscillogramme et le spectre d'un signal  $s(t)$  issue d'une modulation de type OOK que l'on souhaite transmettre par voie hertzienne.



**Document 16**

Ce signal  $s(t)$  est rayonné par une antenne d'émission et sa réception se fait au moyen d'une antenne et d'un circuit de réception. Ce circuit de réception contient, entre autres, un filtre passe bande permettant de conserver  $s(t)$  et d'atténuer les signaux de fréquences différentes que l'antenne de réception a pu capter.

**Q27.** Résolution de problème : On suppose que le filtre de réception utilisé est constitué uniquement d'un dipôle résistif de résistance  $R = 100 \Omega$ , d'une bobine d'inductance  $L$  et d'un condensateur de capacité  $C$ . Ce système sélectif présente un gabarit tel que sa bande passante à  $-3 \text{ dB}$  vaut  $10 \text{ MHz}$ . Proposer un schéma du filtre, en précisant les valeurs possibles de  $L$  et de  $C$ , permettant de respecter ce gabarit.

*La réponse à cette question nécessite de l'initiative. Le candidat est invité à consigner ses pistes de recherche et à y consacrer un temps suffisant. La qualité de la démarche choisie et son explicitation seront évaluées tout autant que le résultat final.*

## Annexe 1 : Extraits du programme de sciences physique de Terminale S

### Mesures et incertitudes

#### Informations destinées au professeur

Le tableau suivant résume les notions et compétences spécifiques relatives aux mesures et à leurs incertitudes que les élèves doivent maîtriser à la fin de la formation du lycée. Elles pourront être approfondies avec profit dans le cadre de la spécialité de physique-chimie de la terminale S.

L'ensemble des activités expérimentales, en italique dans la colonne de droite des programmes de première et de terminale, doit progressivement fournir l'occasion de leur mise en œuvre et de leur acquisition.

L'informatique peut jouer un rôle tout à fait particulier en fournissant aux élèves les outils nécessaires à l'évaluation des incertitudes sans qu'ils soient conduits à entrer dans le détail des outils mathématiques utilisés. L'accent doit être mis sur la prise de conscience des causes de limitation de la précision (sources d'erreurs) et de leurs implications sur la qualité de la mesure.

Dans une perspective de compréhension des bases de la métrologie, le professeur pourra mettre en regard la sémantique de ces bases et les acceptations courantes. Pour ces dernières, le vrai est ce qui est indubitable, l'incertain est ce dont on n'est pas sûr et l'erreur est ce qu'on aurait pu ne pas faire.

Dans le langage de la métrologie, il est question de valeur vraie, celle qu'on aurait obtenue avec une mesure parfaite (de précision illimitée). Cette valeur est donc inconnue, elle est même illusoire, en raison de la variabilité des phénomènes. On aura donc une valeur mesurée, et le résultat final de la mesure sera cette valeur, éventuellement issue d'une moyenne, assortie d'une incertitude (en fait un écart-type) résultant d'erreurs. Ici, l'incertitude et l'erreur sont des concepts scientifiques précis ; cette dichotomie peut entraîner des confusions (comme la masse et le poids) que l'enseignant peut souligner.

#### Formation de l'élève

<b>Notions et contenus</b>	<b>Compétences expérimentales exigibles</b>
Erreurs et notions associées	Identifier les différentes sources d'erreur (de limites à la précision) lors d'une mesure : variabilités du phénomène et de l'acte de mesure (facteurs liés à l'opérateur, aux instruments, etc.).
Incertitudes et notions associées	Évaluer et comparer les incertitudes associées à chaque source d'erreur. Évaluer l'incertitude de répétabilité à l'aide d'une formule d'évaluation fournie. Évaluer l'incertitude d'une mesure unique obtenue à l'aide d'un instrument de mesure. Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude d'une mesure obtenue lors de la réalisation d'un protocole dans lequel interviennent plusieurs sources d'erreurs.
Expression et acceptabilité du résultat	Maîtriser l'usage des chiffres significatifs et l'écriture scientifique. Associer l'incertitude à cette écriture. Exprimer le résultat d'une opération de mesure par une valeur issue éventuellement d'une moyenne et une incertitude de mesure associée à un niveau de confiance. Évaluer la précision relative. Déterminer les mesures à conserver en fonction d'un critère donné. Commenter le résultat d'une opération de mesure en le comparant à une valeur de référence. Faire des propositions pour améliorer la démarche.

## Énergie, matière et rayonnement

Notions et contenus	Compétences exigibles
<p><b>Du macroscopique au microscopique</b></p> <p>Constante d'Avogadro.</p>	<p>Extraire et exploiter des informations sur un dispositif expérimental permettant de visualiser les atomes et les molécules.</p> <p>Évaluer des ordres de grandeurs relatifs aux domaines microscopique et macroscopique.</p>
<p><b>Transferts d'énergie entre systèmes macroscopiques</b></p> <p>Notions de système et d'énergie interne. Interprétation microscopique.</p> <p>Capacité thermique.</p> <p>Transferts thermiques : conduction, convection, rayonnement. Flux thermique. Résistance thermique. Notion d'irréversibilité.</p> <p>Bilans d'énergie.</p>	<p>Savoir que l'énergie interne d'un système macroscopique résulte de contributions microscopiques.</p> <p>Connaître et exploiter la relation entre la variation d'énergie interne et la variation de température pour un corps dans un état condensé.</p> <p>Interpréter les transferts thermiques dans la matière à l'échelle microscopique. Exploiter la relation entre le flux thermique à travers une paroi plane et l'écart de température entre ses deux faces.</p> <p>Établir un bilan énergétique faisant intervenir transfert thermique et travail.</p>

## Transmettre et stocker de l'information

Notions et contenus	Compétences exigibles
<p><b>Procédés physiques de transmission</b></p> <p>Propagation libre et propagation guidée.</p> <p>Transmission :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- par câble ;</li> <li>- par fibre optique : notion de mode ;</li> <li>- transmission hertzienne.</li> </ul> <p>Débit binaire.</p> <p>Atténuations.</p>	<p>Exploiter des informations pour comparer les différents types de transmission.</p> <p>Caractériser une transmission numérique par son débit binaire.</p> <p>Évaluer l'affaiblissement d'un signal à l'aide du coefficient d'atténuation.</p> <p><i>Mettre en œuvre un dispositif de transmission de données (câble, fibre optique).</i></p>



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Annexe 2 à rendre avec la copie

Copie d'élève répondant à l'activité expérimentale du document 10

Détermination du rendement d'une bouilloire

A) Dispositif

Thermomètre  
bouilloire  
masse d'eau connue  
Wattmètre branché sur le secteur et affichant la puissance consommée par la bouilloire.  
prise EDF

B) Mesures

Je mesure une masse  $m$  d'eau.

$$m = (1523 \pm 1) \text{ kg.}$$

Je mesure la température initiale  $T_i$  et la température finale  $T_f$  en attendant l'ébullition de l'eau

$$T_i = (25,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$$
$$T_f = (100,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$$

On a mesuré une puissance électrique  $p$  :

$$p = (2530 \pm 5) \text{ W}$$

On a mesuré également un temps de chauffage  $\Delta t$  :

$$\Delta t = (127 \pm 1) \text{ s}$$

### c) Détermination du rendement.

Le rendement c'est :  $\frac{\text{Ce qu'on veut}}{\text{Ce qui coûte}}$

$$\text{Donc ici : rendement} = \frac{(T_f - T_i) + 273}{p \times t}$$

$$\text{Soit : } \boxed{\text{rendement} = 10,8\%}$$

### d) Calcul d'incertitude

$$\left( \frac{\Delta \text{rendement}}{\text{rendement}} \right) = \sqrt{\left( \frac{\Delta T}{(T_f - T_i)} \right)^2 + \left( \frac{\Delta p}{p} \right)^2 + \left( \frac{\Delta t}{t} \right)^2}$$

$$\frac{\Delta \text{rendement}}{\text{rendement}} = 0,01$$

Donc :  $\boxed{\text{rendement} = (10,8 \pm 0,1)\%}$   
Le rendement de cette bouillotte n'est pas très bon.