

SESSION 2017

---

**AGRÉGATION  
CONCOURS INTERNE  
ET CAER**

**Section : PHYSIQUE - CHIMIE**

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

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.*

*Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.*

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.**

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

## Exactitude et stabilité de la mesure du temps

La "seconde" est aujourd'hui l'unité de mesure définie avec la meilleure précision. Le développement de la navigation et des transports puis des télécommunications et de la localisation et aujourd'hui la vérification de lois de physique fondamentale ont nécessité la définition d'un temps universel et la construction d'horloges de plus en plus précises et exactes.

L'objectif de la première partie de ce sujet est de s'interroger sur la notion d'étalon : définition de la seconde et performances des étalons de temps.

Suit une étude chronologique de trois systèmes de mesure de durées :

- l'horloge à balancier (partie II) ;
- l'horloge à quartz (partie III) ;
- l'horloge atomique (partie IV).

L'étude de ces trois systèmes permet d'aborder pour ces horloges les processus physiques, les incertitudes théoriques, les contraintes et limites dans leur mise en œuvre ainsi que quelques applications.



Cadran solaire de Saint-Blaise, Briançon

Les calculs doivent être menés sous forme littérale avec pour objectif d'obtenir, selon les cas, une valeur numérique précise ou un ordre de grandeur.

Les questions de nature pédagogique sont identifiées par le symbole (QP). Elles représentent environ un tiers du total des points attribués. Les candidats sont invités à y consacrer le temps nécessaire.

Les différentes parties sont indépendantes.

### Données et définitions

Vitesse de la lumière dans le vide :  $c_0 = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Constante de Planck :  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  et  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

Constante de Boltzmann :  $k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$

Unité de masse atomique :  $1 \text{ u.m.a.} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Intensité du champ de pesanteur terrestre à Paris :  $g = 9,8097 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Masses volumiques :  $\rho_{\text{acier}} = 7,8 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ;  $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Températures de changement d'état du césium 133 à une pression de  $10^5 \text{ Pa}$  :

$T_{\text{ébullition}} = 670^\circ\text{C}$  ;  $T_{\text{fusion}} = 29^\circ\text{C}$

Fréquences de transitions hyperfines d'atomes neutres :

Hydrogène :  $1\,420\,405\,751 \text{ Hz}$

Rubidium :  $6\,834\,682\,610 \text{ Hz}$

Césium :  $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$

En notation complexe, le champ électrique d'une onde harmonique de pulsation  $\omega_0$  s'écrit :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0(\vec{r}) \exp(-i\omega_0 t)$$

# I. Étalons de temps : histoire, performances

## A. Histoire et définitions

- Q1. L'étalon de mesure du temps, la seconde, a connu trois définitions successives. Citer et placer ces définitions sur une frise chronologique.
- Q2. Quelle autre unité de base du système international est aujourd'hui reliée à la seconde ? Depuis quelle date ? Donner sa définition.
- Q3. Qu'appelle-t-on temps atomique international ? Comment est-il construit ?
- Q4. **QP.** Un professeur souhaite utiliser la figure ci-dessous (**figure I.1**) dans le cadre de son enseignement de physique-chimie au cycle 4 du collège (voir **annexe 1**). Proposer une question ouverte qui permette à des élèves de cycle 4 de réinvestir les notions de vitesse, de durée et de distance.

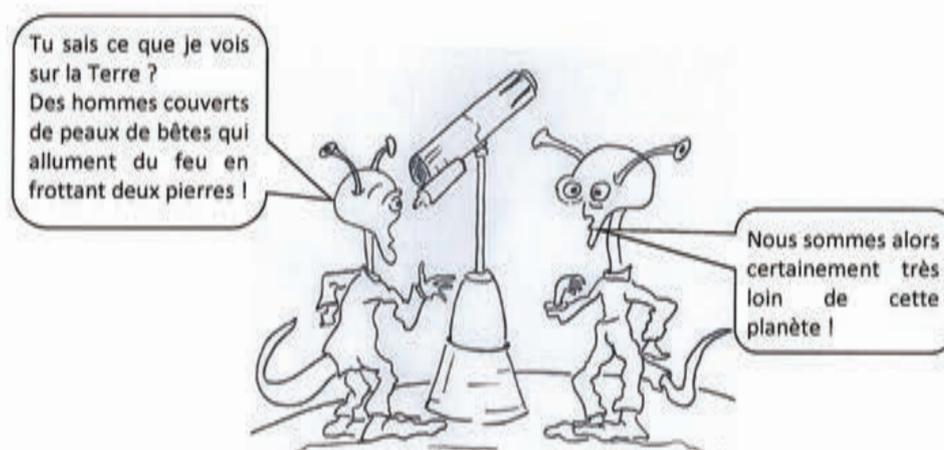


Figure I.1

Rédiger, en une dizaine de lignes, un exemple de réponse attendue pour cette question ouverte. Porter un regard critique sur l'activité proposée et sur les hypothèses implicites contenues dans la situation présentée.

## B. Exactitude

Une horloge doit non seulement être précise, mais aussi être exacte.

- Q5. En s'appuyant sur les schémas de la **figure I.2** où chaque lancer sur la mire d'un jeu de fléchettes correspond à une mesure d'un temps étalon, expliquer, en comparant les quatre situations proposées, la différence entre ces deux notions : précision et exactitude.

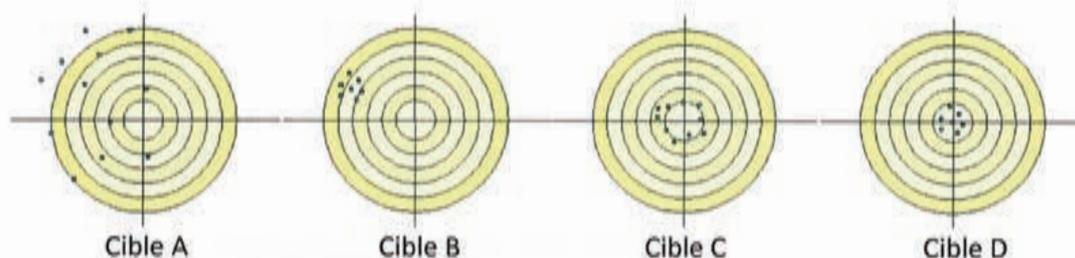


Figure I.2. Analogie de la cible. D'après "Systèmes de mesure (imac.epfl.ch)"

- Q6. Les horloges actuelles sont des oscillateurs. Leur précision est reliée à leur facteur de qualité  $Q = \nu/\Delta\nu$  où  $\nu$  est la fréquence moyenne de l'oscillateur et  $\Delta\nu$  sa bande passante. Quelle stratégie peut-on développer pour augmenter cette précision ?

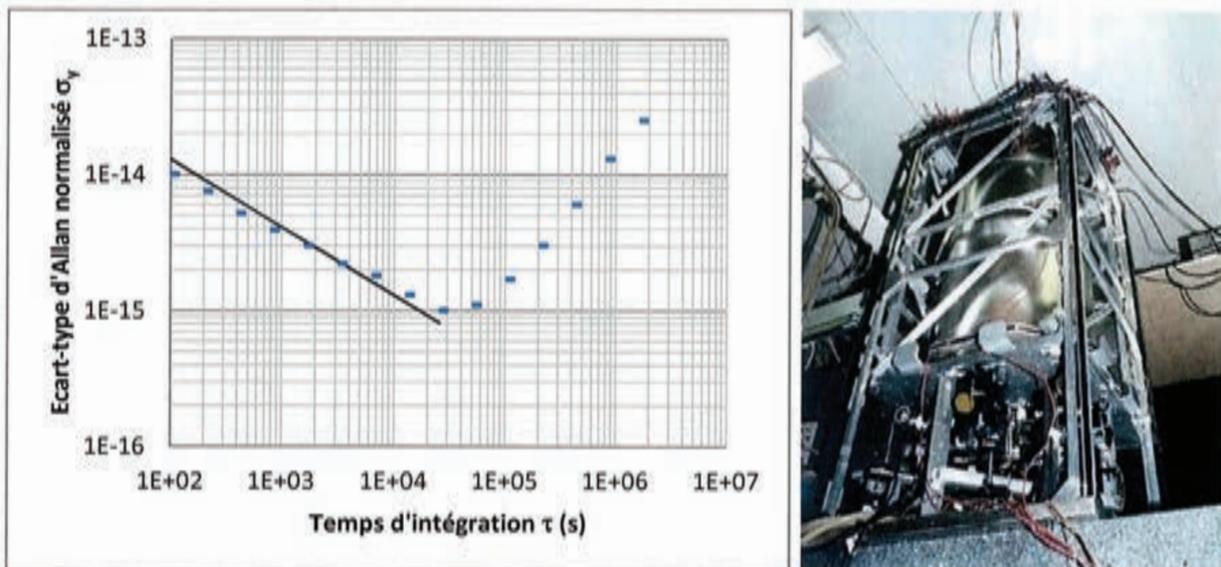
Q7. À partir de votre expérience quotidienne, en supposant l'environnement stable, donner un ordre de grandeur du temps au bout duquel une horloge à balancier n'est plus exacte et se décale d'une seconde. Procéder de même avec une montre à quartz. Qu'en est-il pour les horloges atomiques actuelles ?

### C. Stabilité

Une autre caractéristique importante pour une horloge est sa stabilité au cours du temps. Certaines variations des conditions ambiantes sont mesurables et leurs effets sur la marche de l'horloge peuvent être calculés et corrigés. D'autres variations ont un caractère aléatoire, ce qui limite la stabilité de l'horloge.

Q8. Sur un exemple d'horloge au choix, citer trois grandeurs physiques qui doivent rester constantes pour que l'horloge reste stable. Préciser sur quel(s) paramètre(s) de l'horloge ces grandeurs influent.

Pour caractériser la stabilité en fréquence d'une horloge, les physiciens en mesurent régulièrement la fréquence à l'aide d'une horloge de référence très stable. Sur des intervalles consécutifs de durée  $\tau$ , ils calculent la fréquence moyenne  $f_1(\tau), f_2(\tau) \dots f_n(\tau) \dots$ . Les fluctuations de cette fréquence moyenne sont caractérisées par l'écart-type d'Allan qui est la moyenne quadratique des écarts  $f_{i+1}(\tau) - f_i(\tau)$ . La courbe de la **figure 1.3** représente l'écart-type d'Allan normalisé par la valeur moyenne de la fréquence de l'horloge en fonction du temps d'intégration  $\tau$  pour une horloge à fontaine atomique au césium.



**Figure 1.3. Écart-type d'Allan normalisé par la valeur moyenne de la fréquence d'horloge pour une horloge à fontaine atomique au césium en fonction du temps d'intégration  $\tau$**   
(D'après une thèse du laboratoire SYRTE, photo laboratoire SYRTE, Observatoire de Paris)

- Q9. Quel est l'ordre de grandeur de l'écart-type d'Allan normalisé de cette horloge à fontaine atomique au césium sur une journée ? En déduire l'écart-type d'Allan (en hertz).
- Q10. Sur la **figure 1.3**, pour des temps d'intégration courts, comment évolue quantitativement l'écart-type d'Allan normalisé en fonction de  $\tau$  ? Quelle hypothèse statistique permettrait de justifier cette évolution ?
- Q11. Pour des temps d'intégration longs, comment évolue l'écart-type d'Allan normalisé ? Comment appelle-t-on cette évolution ?

## II. Horloge à balancier

Au XVII<sup>ème</sup> siècle, devant la nécessité d'avoir des références de temps de plus en plus précises, notamment pour la navigation maritime, C. Huygens a construit la première horloge à balancier.

### A. Modèle du pendule simple

Le balancier d'une horloge est schématisé dans un premier temps par un pendule simple composé d'un fil sans masse, de longueur  $\ell_0$ , auquel est accrochée une masse quasi-ponctuelle  $m$ . On appelle  $\theta$  l'angle que fait le pendule avec la verticale orientée vers le bas.  $\theta$  est algébrique et augmente positivement dans le sens trigonométrique. Le point d'attache du fil est fixe dans le référentiel terrestre.

- Q12. En l'absence de frottement, effectuer le bilan des forces s'appliquant sur la masse  $m$  et écrire l'équation différentielle vérifiée par l'angle  $\theta$ .
- Q13. Résoudre cette équation dans l'approximation des petites oscillations et donner l'équation horaire du mouvement  $\theta(t)$  si, à  $t = 0$ , on lâche le pendule sans vitesse initiale à partir d'un angle  $\theta_0$ . En déduire l'expression de la période  $T_0$  d'oscillation du pendule.
- Q14. Toujours dans l'approximation des petits angles, comment, et avec quelle précision, faut-il choisir la masse  $m$  et la longueur  $\ell_0$  du pendule simple pour qu'il "batte la seconde" avec une précision inférieure à 1 s par jour dans un environnement stable ? Calculer  $\ell_0$  à Paris. On rappelle qu'un pendule qui « bat la seconde » possède une période de 2 secondes.
- Q15. Comment doit-on modifier les paramètres du pendule simple si l'horloge ainsi modélisée retarde ?

### B. Modèle du pendule pesant



Horloge comtoise de 1782, musée comtois de la Citadelle de Besançon

Le balancier de l'horloge est maintenant modélisé par un pendule pesant composé d'une tige homogène de masse négligeable et de longueur  $\ell_1$  voisine de  $\ell_0$ , oscillant autour d'une de ses extrémités et d'un disque plein homogène, de masse  $m$  d'épaisseur  $b$  et de rayon  $R$ , fixé en son centre à l'autre extrémité de la tige et dont l'axe de symétrie est parallèle à l'axe de rotation du pendule (de direction  $\vec{e}_z$ ).

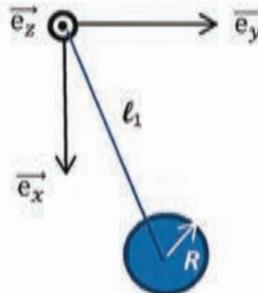


Figure II.1. Pendule pesant

On admet que le moment d'inertie  $J_\Delta$  du pendule par rapport à l'axe de rotation s'écrit :

$$J_\Delta = m \left( l_1^2 + \frac{R^2}{2} \right)$$

- Q16. En formulant les hypothèses adaptées, écrire l'équation différentielle du mouvement du pendule dans le cas du pendule pesant et en déduire l'expression de la période  $T_1$  des petites oscillations.

Q17. Le rayon  $R$  du disque est supposé très petit devant  $\ell_1$ . Établir la relation entre  $\ell_1$  et  $\ell_0$  dans le cas où l'on souhaite avoir  $T_1 = T_0$ . Évaluer alors l'écart  $(\ell_1 - \ell_0)$  en fonction de  $R$  et  $\ell_0$ . Effectuer l'application numérique à Paris pour une horloge à balancier, type horloge comtoise, pour laquelle le disque a une masse de 290 g et un diamètre de 165 mm. Commenter.

### C. Entretien du mouvement

En reprenant le modèle du pendule simple précédent de longueur  $\ell_0 \approx 1$  m et de masse  $m \approx 290$  g, on considère maintenant que le pendule est soumis à un frottement fluide modélisé par un couple résistant de moment :

$$\vec{\Gamma} = -f \frac{d\theta}{dt} \vec{e}_z$$

où  $f$  est une constante.

Q18. Quelles peuvent être les origines de ce frottement ?

Q19. On lâche le pendule sans vitesse initiale à partir d'un angle  $\theta_0$ . Montrer que, dans l'hypothèse des oscillations de faible amplitude et d'un amortissement faible, le mouvement est décrit par l'équation :

$$\theta(t) = \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T_2}\right)$$

Exprimer  $\tau_2$  et  $T_2$  en fonction de  $\ell_0, g, f$  et  $m$ .

Quelle est l'influence qualitative de l'amortissement sur la « période » du pendule ?

Q20. Pour l'horloge étudiée, on compte que l'amplitude des oscillations est divisée par  $e = 2,718$  au bout de  $n = 150$  oscillations. En déduire l'expression de  $\tau_2$  puis celle de  $f$  en fonction de  $g, n$  et des paramètres du pendule.

### Q21. Résolution de problème

Cet amortissement se traduit par une perte d'énergie à chaque oscillation. Un « poids » relié au mécanisme descend régulièrement pour compenser cette perte d'énergie et ainsi entretenir le mouvement. Lorsque ce « poids » est descendu d'un mètre, il faut « remonter l'horloge ». Proposer et mettre en œuvre un modèle permettant d'évaluer au bout de combien de temps il faudra « remonter l'horloge ».

*Pour résoudre cette question, le candidat sera conduit à proposer des valeurs numériques pour une ou plusieurs grandeurs physiques. Le barème tenant compte de la durée nécessaire à la résolution de cette question, le candidat est invité à y passer un temps suffisant en explicitant correctement sa démarche.*

### D. Étude expérimentale en classe de terminale S

Q22. **QP.** Un professeur souhaite préparer ses élèves de Terminale S à l'épreuve d'évaluation des compétences expérimentales (ECE) du baccalauréat. À cette fin, il reprend un protocole de travaux pratiques qu'il avait mis en œuvre avec ses classes il y a quelques années. Le protocole figure dans l'**annexe 2**, les résultats expérimentaux obtenus par un groupe d'élèves sont notés **en caractères gras**.

- Répondre aux questions posées dans ce protocole.
- Porter un regard critique en termes de compétences attendues et évaluées au regard des programmes actuels de Terminale S (**annexe 3**).
- Proposer des axes de modifications de ce protocole afin qu'il réponde aux exigences d'une épreuve d'évaluation des compétences expérimentales de Terminale S, session 2017 (**annexe 4**).
- Élaborer une grille d'évaluation selon les modalités de l'épreuve d'ECE.

### E. Influence d'une variation de pression

- Q23. On suppose que le disque de la **figure II.1** du balancier est homogène de masse volumique  $\rho_{acier}$ . Montrer que la prise en compte de la poussée d'Archimède revient à remplacer dans l'expression de la période l'accélération de la pesanteur  $g$  par  $g_{eff} = g (1 - \rho_{air}/\rho_{acier})$  où  $\rho_{air}$  est la masse volumique de l'air qui varie avec la pression.
- Q24. En supposant que la pression augmente de 2% à température constante, calculer le décalage temporel de l'horloge sur une journée. Commenter le résultat.

### III. Horloge à quartz

Avec un souci de miniaturisation et d'amélioration des performances, les horloges mécaniques ont été remplacées au début du XX<sup>ème</sup> siècle par les horloges à quartz. Le quartz, taillé sous forme d'une lame vibrante, est une structure cristalline dans laquelle se propagent des déformations de différents types (flexion, extension, cisaillement). La taille finie du cristal impose des conditions aux limites qui conduisent à un phénomène de résonance de ces oscillations mécaniques de facteur de qualité élevé. Grâce à l'effet piézoélectrique, cette résonance mécanique peut être entretenue électriquement dans un montage oscillateur par un champ électrique produit entre deux électrodes déposées sur les faces de la lame.



Quartz diapason d'après wikipédia

Q25. Qu'appelle-t-on l'effet piézoélectrique ? À quelle époque et par quels scientifiques cet effet a-t-il été mis en évidence ?

#### A. La seconde du chronomètre

##### 1. Réalisation

L'unité de temps d'un chronomètre est réalisée à l'aide d'un oscillateur Pierce utilisant un quartz piézoélectrique en forme de diapason de fréquence nominale  $f_Q = 32\,768\text{ Hz}$  à  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ . Le signal de sortie de l'oscillateur est transformé en signal « créneau » de fréquence  $f_Q$  à l'aide d'un montage comparateur. Le signal « créneau » est appliqué à l'entrée d'un montage nommé bascule qui passe de 0 V à 5 V sur le front montant du premier créneau puis de 5 V à 0 V sur le front montant du créneau suivant et ainsi de suite. Le signal de sortie de la bascule est ensuite appliqué à l'entrée d'une seconde bascule dont la sortie est appliquée à l'entrée d'une troisième bascule et ainsi de suite.

Q26. Dessiner en fonction du temps les signaux de sortie du montage comparateur et des deux premières bascules. Combien faut-il de bascules pour obtenir une horloge de période 1 s ?

Q27. Quelle imprécision sur la seconde une erreur de 1 hertz sur la fréquence du quartz entraîne-t-elle ?

##### 2. Application au chronométrage sportif

Dans le cadre du thème « La pratique du Sport » en classe de seconde, un professeur donne à ses élèves deux activités illustrant la précision du chronométrage.

###### a) Chronométrage manuel

La première activité s'appuie sur le texte ci-dessous :

*Lors des compétitions sportives, le chronométrage est essentiel pour déterminer précisément qui est le gagnant de l'épreuve. Ainsi, les protocoles de chronométrage sont sans cesse perfectionnés. En 1862, le chronographe à aiguille permet d'obtenir une mesure précise au 1/5<sup>e</sup> de seconde. En 1896, lors des premiers Jeux Olympiques d'Athènes, Thomas Burke remporte l'épreuve de sprint du 100 m en les parcourant en 12,0 s, alors qu'un cinquième de seconde seulement le séparait de son concurrent le plus proche. Une méthode de chronométrage plus précise doit donc être trouvée. La persistance rétinienne, qui fait que l'œil humain ne peut distinguer séparément que deux événements séparés d'au moins un dixième de seconde, limite cependant les performances du chronométrage manuel.*

*Aux Jeux Olympiques de Los Angeles en 1932 sont utilisés des enregistrements électriques précis au centième de seconde, couplés à des caméras. En 1968, aux Jeux Olympiques de Mexico, l'épreuve de sprint du 100 m est chronométrée pour la première fois automatiquement, ce qui permet de départager les concurrents au millième de seconde.*

Le professeur pose à ses élèves les questions suivantes :

Pour chronométrer une course de 100 m, un élève équipé d'un chronomètre au centième de seconde est situé à 50 m de la ligne d'arrivée et à 112 m du starter.

Lui est-il possible de déclencher instantanément le chronomètre quand il entend le coup de feu du starter ?

Lui est-il possible d'arrêter instantanément le chronomètre quand le premier athlète passe la ligne d'arrivée ?

Données : - vitesse de propagation des ondes sonores :  $340 \text{ m.s}^{-1}$

- vitesse de propagation des ondes lumineuses :  $3,0.10^8 \text{ m.s}^{-1}$

Q28. QP. Relever les défauts que présentent ces questions, les reformuler pour qu'elles soient rigoureuses et en proposer une solution.

### b) Photo-finish

La seconde activité propose une amélioration de la précision grâce à la photo-finish. Le professeur fournit à ses élèves le document ci-dessous.

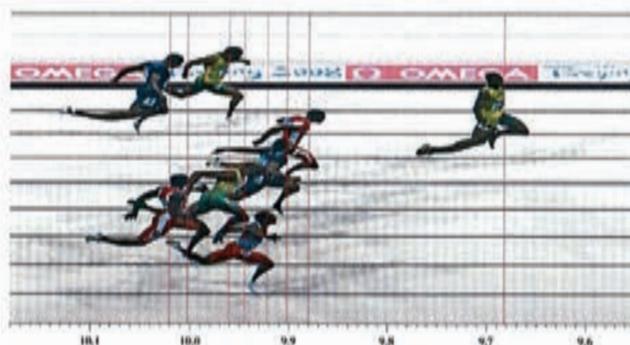


Photo finish

Pour départager les concurrents, la mesure de la durée d'une course est de nos jours réalisée grâce à une photo-finish. Nécessitant une caméra particulière, fixe au niveau de la ligne d'arrivée, elle est obtenue en juxtaposant plusieurs images. La caméra prend jusqu'à 1000 images photographiques par seconde. De chacune, on ne garde que la bande centrale qui correspond à la ligne d'arrivée, sur une largeur d'un pixel et une hauteur de 1 024 pixels. À chaque millièmètre de seconde, le cadenceur du chronographe ajoute la bande centrale de l'image (1 pixel) à la suite de l'image précédente, créant une image non instantanée mais une sorte de « déroulant » du temps. Ceci explique l'aspect déformé des images produites par les caméras de photo-finish. Toutes ces prises de vue assemblées côte à côte reconstituent parfaitement l'ordre d'arrivée des participants avec une précision allant jusqu'au millimètre. Transmise de la caméra à un ordinateur, l'image de l'arrivée est interprétable immédiatement.

Aux Jeux Olympiques de Pékin, Usain Bolt a été le vainqueur du 100 m avec un temps officiel de 9,69 s. [source : wikipedia]

Q29. QP. Proposer une question ouverte qui permette à des élèves de seconde de se familiariser avec les résolutions de problèmes en s'appuyant sur le document ci-dessus. Donner un exemple de solution à la question ouverte proposée.

## B. Le résonateur à quartz

### 1. Impédance équivalente

Le couplage électromécanique et les conditions aux limites liées à la taille finie du cristal conduisent, d'un point de vue électrique, pour le quartz, au schéma équivalent suivant :

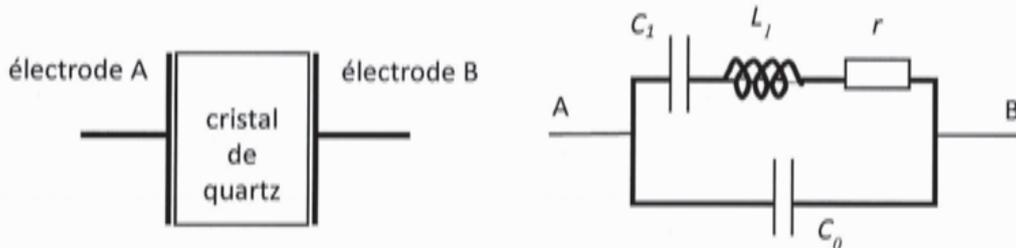


Figure III.1. Représentation et schéma électrique équivalent d'un résonateur à quartz

*Le quartz est de la silice (SiO<sub>2</sub>). [...] C'est un matériau **piézoélectrique**. [...]*

*On utilise beaucoup le quartz pour constituer des oscillateurs très stables de petites dimensions.*

*Une lame de quartz avec deux faces opposées métallisées soumise à une tension alternative vibre à la fréquence de l'excitation. Pour certaines fréquences, on peut obtenir un système d'ondes stationnaires : il y a résonance.*

*Électriquement, ce comportement peut être modélisé par un condensateur C<sub>0</sub> (capacité des électrodes séparées par un diélectrique et des fils de liaisons) en parallèle avec un circuit série r, L<sub>1</sub> et C<sub>1</sub> qui correspondent aux grandeurs motionnelles. Ce circuit série représente le couplage électromécanique lié à l'effet piézoélectrique. Les valeurs numériques des constantes motionnelles ne correspondent pas aux valeurs usuelles des composants électriques.*

*D'après : Ressources Université Le Mans*

Q30. Quelles propriétés physiques du résonateur à quartz sont associées aux composants  $r$ ,  $L_1$  et  $C_1$  du schéma électrique équivalent ?

Pour les deux questions suivantes, on néglige la résistance  $r$  du schéma électrique équivalent du quartz de la **figure III.1**.

Q31. Montrer que l'expression simplifiée de l'impédance complexe du quartz peut se mettre sous la forme :

$$\underline{Z}_Q(j\omega) = \frac{1}{jC_{eq}\omega} \left( \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2} \right)$$

Donner les expressions de  $C_{eq}$ ,  $\omega_1$  et  $\omega_2$  en fonction de  $C_0$ ,  $C_1$  et  $L_1$  et comparer  $\omega_1$  et  $\omega_2$ .

Quelle est l'impédance du quartz à très basse fréquence, à  $\omega_1$  et à  $\omega_2$  ?

Q32. Tracer l'allure du module  $|\underline{Z}_Q|$  et de l'argument  $\arg(\underline{Z}_Q)$  de  $\underline{Z}_Q$  en fonction de  $\omega$ .

Q33. Justifier qu'à la résonance (c'est-à-dire au voisinage de  $\omega_1$ ), la branche ( $L_1$ ,  $C_1$ ,  $r$  série) suffit à modéliser le résonateur à quartz.

### 2. Étude de la résonance

On souhaite observer la résonance du résonateur à quartz utilisé dans un chronomètre et mesurer les paramètres caractéristiques de son modèle équivalent simplifié défini à la question précédente. On réalise à cette fin le montage de la **figure III.2** où on appelle  $R$  la résistance de  $47 \text{ k}\Omega$  et  $u_g$  l'amplitude de la tension délivrée par le générateur.

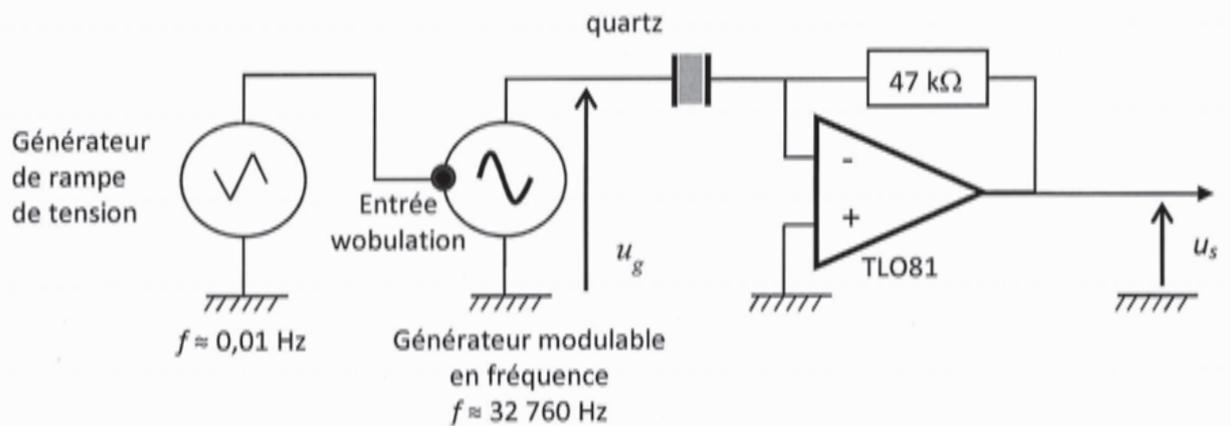


Figure III.2. Montage expérimental (d'après BUP 799, p.2023)

Le circuit noté TLO81 dans le schéma ci-dessus est un amplificateur linéaire intégré idéal, en régime linéaire. Dans les conditions de fonctionnement du circuit, les deux courants d'entrée sur les entrées notées + et - sont nuls et la différence de potentiel entre ces entrées + et - est également supposée nulle.

Pour le quartz du chronomètre, la courbe représentant l'amplitude de sortie de l'amplificateur linéaire intégré en fonction de la fréquence est donnée sur la figure III.3 :

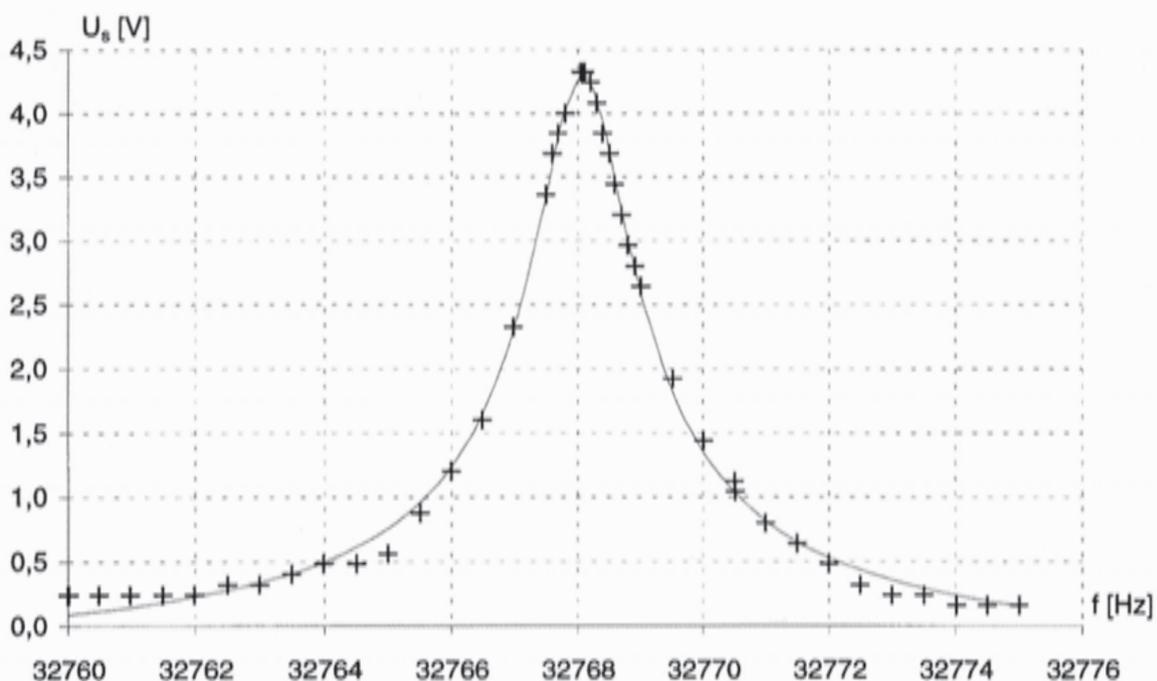


Figure III.3. Courbe de résonance du quartz (BUP 799, p.2023)

- Q34. Montrer que  $\underline{u}_s = -R \frac{\underline{u}_g}{Z_Q(j\omega)}$  où  $\underline{u}_s$  et  $\underline{u}_g$  sont les amplitudes complexes associées aux tensions  $u_s$  et  $u_g$ . En déduire la valeur de la résistance  $r$  figurant sur le schéma équivalent du quartz sachant que l'amplitude  $U_g = 0,20$  V.
- Q35. Déterminer les valeurs numériques de la fréquence de résonance  $f_0$ , du facteur de qualité de la résonance  $Q_0$ , de l'inductance  $L_1$  et de la capacité  $C_1$ . Commenter les valeurs numériques obtenues.

### C. L'oscillateur à quartz

Lorsque le quartz oscille librement, ses oscillations s'amortissent au cours du temps.

Q36. Pour un quartz de chronomètre de fréquence nominale  $f_0 = 32\,768$  Hz et de facteur de qualité typique de 20 000, excité à  $t = 0$  s, estimer l'ordre de grandeur de la durée d'amortissement. Commenter la valeur obtenue.

#### 1. Étude générale d'un oscillateur

Le résonateur à quartz est placé dans un montage oscillateur composé d'un amplificateur de gain  $K$  tel que  $v_1 = K \cdot v_2$  avec  $K$  réel et d'un montage contenant le quartz de fonction de transfert  $H(j\omega)$ . Le schéma général de ce montage est représenté sur la **figure III.4**.

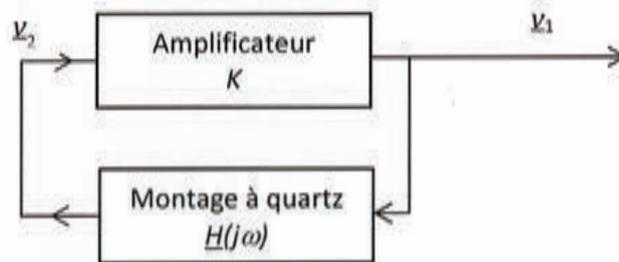


Figure III.4. Schéma fonctionnel du montage oscillateur

Q37. À quelle condition sur  $K$  et  $H(j\omega)$  le système se met-il en auto-oscillation ? Détailler cette condition en phase et en amplitude.

#### 2. L'oscillateur Pierce

Le résonateur à quartz, modélisé par un circuit  $(L, C_1)$  série, est monté dans un oscillateur Pierce dont le schéma est représenté sur la **figure III.5** et dans lequel le condensateur de capacité  $C_2$  est ajustable autour de 47 pF et  $C_3 = 20$  pF.

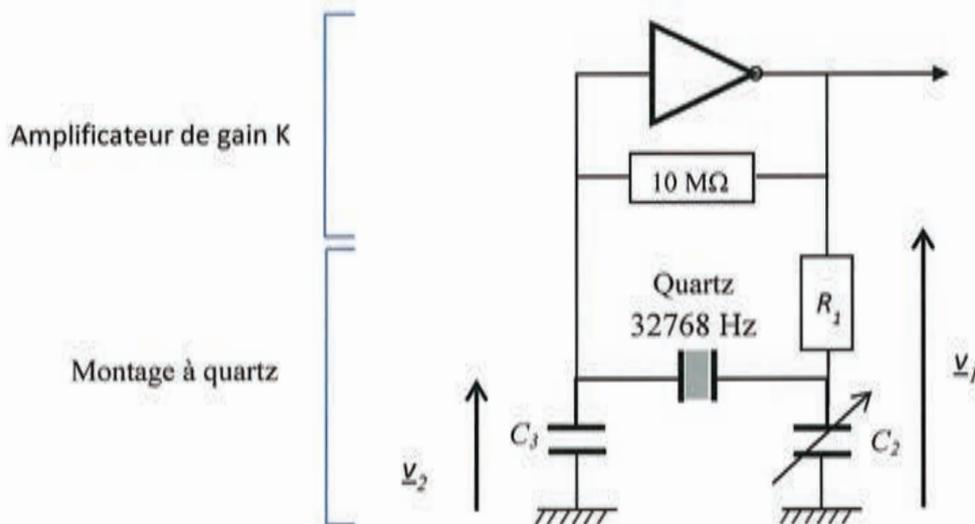


Figure III.5. Oscillateur de Pierce à quartz

À proximité de la résonance et en négligeant les pertes électriques, la fonction de transfert  $\underline{H}(j\omega)$  du montage à quartz s'écrit :

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{Re(\omega) + j Im(\omega)}$$

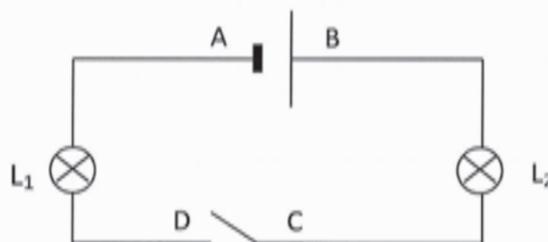
avec  $Re(\omega) = 1 + \frac{C_3}{C_1} - L_1 C_3 \omega^2$  et  $Im(\omega) = R_1 C_2 C_3 \omega \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} - L_1 \omega^2 \right)$ .

Q38. En déduire l'expression de la fréquence d'oscillation. Quel est le rôle du condensateur de capacité variable  $C_2$  ?

Q39. Montrer que, pour que le système oscille, le gain  $K_{seuil}$  au seuil doit être négatif. Déterminer sa valeur absolue. Expliquer qualitativement comment se comporte le système si la valeur absolue  $|K|$  du gain de l'amplificateur est supérieure à cette valeur « seuil ».

#### D. Retour sur l'électricité au collège

Un professeur de collège présente à des élèves de première année de cycle 4 le schéma de montage électrique suivant :



Le professeur précise que les deux lampes sont identiques. Il demande aux élèves de décrire *a priori* les phénomènes observés dans la situation où l'interrupteur est ouvert. Trois réponses d'élèves figurent en **annexe 5**.

Q40. **QP**. Analyser les réponses des élèves et proposer des pistes pédagogiques pour remédier aux éventuelles erreurs relevées dans les trois réponses.

## IV. Horloge atomique

Pour limiter l'influence des dérives en fréquence du quartz, il est possible de l'asservir sur un oscillateur plus stable. C'est le principe des horloges atomiques dites « passives ».

### A. Horloges et utilisations

#### 1. Horloge à césium

Dans une horloge atomique fondée sur l'atome de césium, la radiation de référence correspond à la transition entre les deux niveaux hyperfins  $F = 4$  et  $F = 3$  de l'état électronique fondamental de l'atome de césium 133. Cette radiation correspond à une onde de fréquence  $f_{Cs}$  telle que :

$$f_{Cs} = \omega_{Cs}/2\pi = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$$

Le schéma des niveaux de l'atome de césium est proposé en **annexe 6**.

Q41. Que signifient les termes : état électronique fondamental, niveaux hyperfins ?

Q42. Quel est l'ordre de grandeur de la longueur d'onde  $\lambda_{Cs}$  dans le vide associée à cette transition ? À quel type d'ondes cette radiation correspond-elle ? Quelle est l'énergie  $E_{Cs}$  des photons associés à cette transition ?

#### 2. Vers les horloges optiques

Aujourd'hui, les horloges les plus précises utilisent des fréquences dans le domaine optique comme, par exemple, l'horloge à strontium à 429 THz ou l'horloge à ytterbium à 518 THz.

Q43. Vérifier que ces fréquences sont bien dans le domaine optique. À quelles couleurs correspondent-elles ?

Q44. Quel est l'avantage d'utiliser des fréquences optiques pour les horloges atomiques ? Dans ces horloges, l'oscillateur n'est plus un quartz. Quel est-il ?

#### 3. Horloge en mouvement

L'activité suivante a été conçue pour des élèves d'une classe de Terminale S :

*Dans le film Avatar, le réalisateur a essayé de rester scientifiquement plausible, notamment concernant le voyage interstellaire entre la Terre et la lune Pandora. Celle-ci orbite autour de l'étoile Alpha Centauri A, située à 4,36 années-lumière de notre système solaire. Pour ce voyage, James Cameron et son consultant scientifique Charles Pellegrino ont imaginé un vaisseau, l'ISV Venture Star, qui ne dépasse pas la vitesse de la lumière, respectant ainsi le postulat établi par Albert Einstein en 1905 qui dit qu'« il existe une vitesse limite, égale à la célérité de la lumière  $c$  dans le vide, qui ne peut être dépassée par aucun signal transportant une information, ni aucune autre particule. »*

1. Durant leur voyage vers Pandora, le vaisseau se déplace par rapport à la Terre en moyenne à 60,04 % de la vitesse de la lumière.

a. En déduire la vitesse moyenne du vaisseau durant son voyage vers Pandora.

b. Sachant qu'une année-lumière (a.l.) équivaut à la distance parcourue par la lumière en une année, donner sa valeur en mètres.

c. Calculer la durée  $\Delta T'$  du voyage en secondes puis en années.

2. D'après la théorie de la relativité, la durée  $\Delta T'$  du voyage, mesurée par un observateur terrestre, entre les deux événements « départ de la Terre » et « arrivée sur Pandora », est différente de la durée  $\Delta T_0$  entre ces deux mêmes événements, mais mesurée dans un référentiel lié au vaisseau spatial en mouvement. La durée  $\Delta T'$  et la durée propre  $\Delta T_0$  sont liées par la relation de dilatation des durées :  $\Delta T' = \gamma \cdot \Delta T_0$  avec le coefficient  $\gamma$  donné par la relation suivante où  $v$  est la vitesse relative du vaisseau par rapport à la Terre (question 1.a.) :  $\gamma = 1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$ .

a. Calculer le coefficient  $\gamma$  moyen pour le vaisseau Venture Star.

b. Au début du film, on apprend que les passagers ont été cryogénisés pendant 5 ans, 9 mois et 22 jours. Retrouver la durée propre  $\Delta T_0$  du voyage, mesurée à bord du vaisseau.

3. En supposant qu'un élève doit effectuer une mission de six ans sur Pandora, quelle différence d'âge aura-t-il avec les élèves restés sur Terre à son retour, en tenant compte de son voyage aller à bord du Venture Star, de sa mission de six ans sur Pandora, puis de son retour sur Terre avec le Venture Star ?

Donnée : vitesse de la lumière  $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

Q45. **QP.** Porter un regard critique sur cette activité, en matière de contenu scientifique. En proposer des améliorations.

Q46. **QP.** Pour permettre aux élèves de comprendre l'origine de l'expression du coefficient  $\gamma$  et donc du phénomène de dilatation des durées, des professeurs s'appuient sur "l'expérience de l'horloge de lumière". Cette « expérience » est décrite dans l'**annexe 8**.

Expliciter le raisonnement à mettre en œuvre pour établir la formule dite « de dilatation des durées ».

Présenter les avantages et inconvénients, pédagogiques ou scientifiques, qu'il y a à s'appuyer sur cette expérience.

### **B. Principe physique d'une horloge à césium : les étapes clés**

Dans la suite, le candidat est invité à se référer aux **annexes 6 et 7**.

#### **1. Les atomes de césium**

Dans l'horloge à césium, les atomes sont éjectés à l'état vapeur d'un four chauffé à  $T_{\text{four}} = 120^\circ\text{C}$ .

Q47. Sur quel paramètre physique a-t-on agi pour que les atomes de césium soient à l'état gazeux ? Justifier la réponse.

Q48. Le césium pouvant être considéré comme un gaz parfait monoatomique, déterminer la valeur de la vitesse quadratique moyenne des atomes, liée à l'agitation thermique au niveau du four. On notera cette vitesse  $v_0$ .

Une ouverture dans le four permet d'obtenir en sortie un jet d'atomes qui, diaphragmé, a une direction bien définie et une vitesse moyenne que l'on prendra, pour simplifier, égale à  $v_0$ .

#### **2. Préparation des atomes dans le niveau $F = 3$**

À l'équilibre thermodynamique, les atomes sont répartis à parts égales dans les deux sous-niveaux hyperfins  $F = 3$  et  $F = 4$  du niveau fondamental. Avant d'être interrogés, les atomes sont préparés dans un seul des deux sous-niveaux hyperfins, le niveau  $F = 3$ .

Cette préparation se fait aujourd'hui par pompage optique, technique qui met en jeu un état excité de l'atome de césium, état qui se décompose en 4 sous-niveaux  $F' = 2, 3, 4, 5$ . On note « ' » les états excités. Un laser à 852 nm résonnant avec la transition entre le sous-niveau fondamental  $F = 4$  et le sous-niveau excité  $F' = 3$  permet d'exciter quasi-instantanément les atomes du niveau  $F = 4$  vers le niveau  $F' = 3$ . Les atomes excités du niveau  $F' = 3$  se désexcitent spontanément après un temps moyen de  $\tau_{sp} = 30 \text{ ns}$ , pour parts quasi-égales dans les deux sous-niveaux  $F = 3$  et  $F = 4$ .

Q49. Quel physicien français a reçu le prix Nobel pour l'invention de la technique du pompage optique ?

Q50. En supposant qu'à chaque cycle absorption-émission, tous les atomes du niveau  $F = 4$  sont excités, calculer le nombre de cycles nécessaires et le temps moyen  $t_p$  pour que plus de 99% des atomes se retrouvent dans le niveau  $F = 3$ .

En réalité, à chaque cycle, seulement la moitié des atomes du niveau  $F = 4$  est excitée. Le temps  $t_p$  est alors de 420 ns.

Q51. Le laser d'excitation est perpendiculaire au jet d'atomes. Sa taille transverse est  $d = 3 \text{ mm}$ . Quelle est la vitesse maximale que peuvent avoir les atomes qui traversent le faisceau laser pour y rester

suffisamment longtemps pour satisfaire à la condition de la question précédente ? Commenter le résultat obtenu.

Q52. Quels intérêts cette technique de préparation des atomes présente-t-elle par rapport à la technique par déflexion magnétique utilisée dans les premières horloges à césium ?

### 3. Interrogation microonde des atomes

Un atome de césium de vitesse typique  $v_0$  selon l'axe du jet, préparé dans l'état "a" ( $F = 3$ ), traverse la cavité microondes de longueur  $\ell$  dans laquelle règne un champ électromagnétique de pulsation  $\omega_0$  proche de la pulsation  $\omega_{cs}$  de la transition d'horloge, champ que l'on modélise par une onde plane d'amplitude complexe  $E_0 \cdot \exp(-i\omega_0 t)$ . Pendant la traversée, l'atome est susceptible d'absorber un photon microonde et de passer dans l'état "b" ( $F = 4$ ). On appelle  $P_{a \rightarrow b}(\omega_0)$  la probabilité, fonction de la pulsation  $\omega_0$  de l'onde, que l'atome subisse cette transition et sorte de la cavité dans l'état b.

L'atome ne ressent l'effet du champ que pendant le temps  $\tau_c$  de la traversée. Pour modéliser l'interaction atome-microonde, on considère que la perturbation ressentie par l'atome lors de la traversée de la cavité est modélisée par la fonction associée à une onde électromagnétique plane de pulsation  $\omega_0$  multipliée par une enveloppe gaussienne de largeur de l'ordre de  $\tau_c$ , et nulle pour  $t = +\infty$  et  $t = -\infty$ . Le champ vu par l'atome s'écrit alors en notation complexe :

$$f_{\omega_0}(t) = E_0 \cdot \exp(-t^2/\tau_c^2) \cdot \exp(-i\omega_0 t)$$

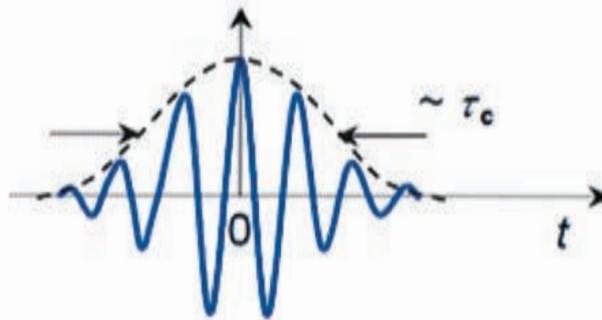


Figure IV.1. Champ vu par l'atome en fonction du temps

Le calcul quantique montre que la probabilité de transition est proportionnelle au carré du module de la transformée de Fourier de la perturbation calculée pour la valeur  $\omega_{cs}$  de la pulsation de la transition atomique :

$$P_{a \rightarrow b}(\omega_0) = K_0 \left| \int_{-\infty}^{+\infty} f_{\omega_0}(t) \exp(i\omega_{cs} t) dt \right|^2 \quad \text{où } K_0 \text{ est une constante}$$

Ce calcul, dans le cas d'une perturbation  $f_{\omega_0}(t)$  d'enveloppe gaussienne, donne :

$$P_{a \rightarrow b}(\omega_0) = K_1 \exp[-2(\omega_{cs} - \omega_0)^2 \tau_c^2 / 4] \quad \text{où } K_1 \text{ est une constante.}$$

Q53. La forme de  $P_{a \rightarrow b}(\omega_0)$  est une gaussienne centrée sur la pulsation atomique  $\omega_{cs}$  avec une largeur  $\Delta\omega$  de l'ordre de  $1/\tau_c$ . Commenter ce résultat.

Q54. À la fréquence de transition du césium, il est difficile de faire des cavités microondes où règne un champ homogène qui soient plus grandes que 3 cm.

Pour des atomes de vitesse moyenne  $v_0 = 300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , calculer le temps d'interaction  $\tau_c$  et l'ordre de grandeur de la largeur de la probabilité de transition.

Q55. En déduire un ordre de grandeur du facteur de qualité de la probabilité de transition.

Afin d'augmenter le temps d'interaction, N. Ramsey a proposé d'utiliser deux cavités séparées d'une distance  $L \gg \ell$ . Les 2 cavités sont alimentées par la même source microonde. L'atome est soumis à une perturbation ayant la forme d'une porteuse de fréquence  $\omega_0$  multipliée par deux

enveloppes gaussiennes respectivement centrées en  $-\tau_L/2$  et  $+\tau_L/2$ , instants de passage des atomes dans les deux cavités. Le champ vu par l'atome s'écrit alors en notation complexe :

$$f'_{\omega_0}(t) = E_0 \cdot [\exp(-\left(t - \frac{\tau_L}{2}\right)^2 / \tau_c^2) + \exp(-\left(t + \frac{\tau_L}{2}\right)^2 / \tau_c^2)] \cdot \exp(-i\omega_0 t)$$

Q56. Montrer que la probabilité de transition devient,  $K'$  étant une constante :

$$P_{a \rightarrow b}(\omega_0) = K' \exp[-2(\omega_{Cs} - \omega_0)^2 \tau_c^2 / 4] \cdot \cos^2[(\omega_{Cs} - \omega_0) \tau_L / 2]$$

Q57. Tracer l'allure de  $P_{a \rightarrow b}(\omega_0)$  en fonction de  $\omega_0$ , en faisant apparaître les temps caractéristiques.

Quelle est l'analogie optique de cette technique ? En quoi ces deux phénomènes se différencient-ils ?

Q58. Pour  $L = 1$  m et des atomes de vitesse moyenne  $v_0 = 300$  m.s<sup>-1</sup> calculer le temps  $\tau_L$ . En déduire la largeur à mi-hauteur de la raie centrale et un nouvel ordre de grandeur du facteur de qualité de la probabilité de transition.

Une autre façon d'augmenter le temps d'interaction est de réduire la vitesse des atomes en les refroidissant. Dans une fontaine atomique, les atomes sont refroidis et piégés puis sont lancés vers le haut. Ils traversent la cavité microonde avec une vitesse d'environ  $v_1 = 3$  m.s<sup>-1</sup>, montent puis retombent et retraversent la cavité.

Q59. Calculer la hauteur  $H$  atteinte par les atomes au-dessus de la cavité microonde et le temps  $\tau_L$  entre les deux passages dans la cavité microonde. Quel est le nouvel ordre de grandeur du facteur de qualité ?

Q60. Sachant qu'il est possible de pointer le sommet de la courbe de réponse atomique à 1/10000 de la largeur, quelle est la précision du signal obtenu dans chacun des 3 cas traités ?

- Cas 1 : atomes de vitesse  $v_0 = 300$  m.s<sup>-1</sup> et interrogation microonde.
- Cas 2 : atomes de vitesse  $v_0 = 300$  m.s<sup>-1</sup> et double interrogation microonde.
- Cas 3 : fontaine à césium.

**Annexe 1 : Extrait du programme du cycle 4 du collège**  
*Extrait de l'annexe au Bulletin officiel spécial n° 11 du 26 novembre 2015*

### Mouvements et interactions

#### Attendus de fin de cycle

- Caractériser un mouvement.
- Modéliser une interaction par une force caractérisée par un point d'application, une direction, un sens et une valeur.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
<b>Caractériser un mouvement</b>	
Caractériser le mouvement d'un objet. Utiliser la relation liant vitesse, distance et durée dans le cas d'un mouvement uniforme. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vitesse : direction, sens et valeur.</li> <li>• Mouvements rectilignes et circulaires.</li> <li>• Mouvements uniformes et mouvements dont la vitesse varie au cours du temps en direction ou en valeur.</li> <li>• Relativité du mouvement dans des cas simples.</li> </ul>	L'ensemble des notions de cette partie peut être abordé à partir d'expériences simples réalisables en classe, de la vie courante ou de documents numériques. Utiliser des animations des trajectoires des planètes, qu'on peut considérer dans un premier modèle simplifié comme circulaires et parcourues à vitesse constante. Comprendre la relativité des mouvements dans des cas simples (train qui démarre le long d'un quai) et appréhender la notion d'observateur immobile ou en mouvement.

### Des signaux pour observer et communiquer

#### Attendus de fin de cycle

- Caractériser différents types de signaux (lumineux, sonores, radio...).
- Utiliser les propriétés de ces signaux.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
<b>Signaux lumineux</b> Distinguer une source primaire (objet lumineux) d'un objet diffusant. Exploiter expérimentalement la propagation rectiligne de la lumière dans le vide et le modèle du rayon lumineux. Utiliser l'unité « année-lumière » comme unité de distance. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lumière : sources, propagation, vitesse de propagation, année-lumière.</li> <li>• Modèle du rayon lumineux.</li> </ul>	L'exploitation de la propagation rectiligne de la lumière dans le vide et le modèle du rayon lumineux peut conduire à travailler sur les ombres, la réflexion et des mesures de distance. Les activités proposées permettent de sensibiliser les élèves aux risques d'emploi des sources lumineuses (laser par exemple). Les élèves découvrent différents types de rayonnements (lumière visible, ondes radio, rayons X...)

## Annexe 2 : Protocole de travaux pratiques sur l'étude d'un pendule (Terminale S)

Au cours d'une manipulation, on observe l'influence de quelques paramètres sur la période  $T_0$  d'oscillation d'un pendule simple. Un fil de longueur  $\ell$  est fixé à un support en un point O. À l'extrémité inférieure du fil est accrochée une sphère S de masse  $m$  qui se déplace dans un plan vertical. On note  $\theta$  l'angle du fil avec la verticale. On peut régler la longueur du fil et choisir des sphères de plomb de différentes masses. On dispose en outre d'un chronomètre. Le fil reste tendu au cours du mouvement. La sphère est écartée d'un angle  $\theta_m$  par rapport à sa position d'équilibre, puis lâchée sans vitesse initiale.



1. Au vu du matériel disponible (potence, fil, règle, chronomètre, sphères de masses connues), proposer, en justifiant vos choix, une méthode permettant de mesurer avec la meilleure précision la valeur de la période  $T_0$ .

### 2. Manipulation n°1

Une sphère de masse  $m = 100$  g est écartée d'un angle  $\theta_m = 10^\circ$  par rapport à la verticale. On fait seulement varier la longueur  $\ell$  du fil. Déterminer la période des oscillations et compléter le tableau de valeurs.

$\ell$ (m)	0,20	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,80	1,1	1,3
$T_0$ (s)	0,91	1,10	1,19	1,24	1,33	1,42	1,49	1,54	1,80	2,14	2,30

### 3. Manipulation n°2

La même bille qu'à la manipulation n°1 est suspendue à un fil de longueur fixe  $\ell = 30$  cm. On fait seulement varier  $\theta_m$ . Déterminer la période des oscillations et compléter le tableau de valeurs.

$\theta_m$ (°)	5°	10°	15°	20°
$T_0$ (s)	1,10	1,09	1,09	1,10

### 4. Manipulation n°3

Des sphères de masses différentes sont écartées d'un angle  $\theta_m = 10^\circ$  par rapport à la verticale. La longueur du fil reste égale à 30 cm. On obtient les résultats suivants :

$m$ (g)	50	100	150	200
$T_0$ (s)	1,08	1,10	1,10	1,08

### 5. Exploitation des manipulations

5.1. Tracer la courbe représentant les variations du carré de la période en fonction de la longueur du fil. En déduire une relation entre  $T_0^2$  et  $\ell$ . Cette relation fait intervenir un coefficient qui sera noté A. Déterminer la valeur de ce coefficient, déterminer son unité et citer une grandeur à laquelle ce coefficient est homogène.

5.2. On propose, pour expression de la période d'oscillation du pendule,  $T_0 = B (\ell/g)^{1/2}$ , B étant une constante sans dimension. Montrer que l'expression proposée ici pour la période  $T_0$  est compatible avec les résultats des trois premières manipulations.

5.3. À l'aide de l'étude qui vient d'être faite, déterminer la valeur de B.

**Annexe 3 : Extrait du programme de Terminale S**  
*Extrait de l'annexe au Bulletin officiel spécial n° 8 du 13 octobre 2011*

**Temps, mouvement et évolution**

<b>Notions et contenus</b>	<b>Compétences exigibles</b>
<p><b>Mesure du temps et oscillateur, amortissement</b></p> <p>Travail d'une force.            Force conservative ; énergie potentielle.</p> <p>Forces non conservatives : exemple des frottements.</p> <p>Énergie mécanique.</p> <p>Étude énergétique des oscillations libres d'un système mécanique.</p> <p>Dissipation d'énergie.</p> <p>Définition du temps atomique.</p>	<p><i>Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- les différents paramètres influençant la période d'un oscillateur mécanique ;</li> <li>- son amortissement.</li> </ul> <p>Établir et exploiter les expressions du travail d'une force constante (force de pesanteur, force électrique dans le cas d'un champ uniforme).</p> <p>Établir l'expression du travail d'une force de frottement d'intensité constante dans le cas d'une trajectoire rectiligne.</p> <p>Analyser les transferts énergétiques au cours d'un mouvement d'un point matériel.</p> <p><i>Pratiquer une démarche expérimentale pour étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique d'un oscillateur.</i></p> <p>Extraire et exploiter des informations sur l'influence des phénomènes dissipatifs sur la problématique de la mesure du temps et la définition de la seconde.</p> <p>Extraire et exploiter des informations pour justifier l'utilisation des horloges atomiques dans la mesure du temps.</p>
<p><b>Temps et relativité restreinte</b></p> <p>Invariance de la vitesse de la lumière et caractère relatif du temps.            Postulat d'Einstein. Tests expérimentaux de l'invariance de la vitesse de la lumière.            Notion d'événement. Temps propre.            Dilatation des durées.            Preuves expérimentales.</p>	<p>Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.</p> <p>Définir la notion de temps propre.</p> <p>Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée.</p> <p>Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte.</p>

**Annexe 4 : Compétences à évaluer à l'épreuve d'évaluation des compétences expérimentales  
du baccalauréat S.**

*Extrait du « Cahier des charges pour la conception des sujets pour l'ECE en TS  
Évaluation des Compétences Expérimentales »*

Le sujet doit permettre de mobiliser et évaluer certaines des compétences suivantes dont l'explicitation des contours est fournie dans le tableau ci-après :

Compétence	Conditions de mise en œuvre	Exemples de capacités et d'attitudes (non exhaustifs)
<b>S'approprier</b>	Cette compétence est mobilisée dans chaque sujet sans être nécessairement évaluée. Lorsqu'elle est évaluée, l'énoncé ne doit pas fournir les objectifs de la tâche.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rechercher, extraire et organiser l'information en lien avec une situation,</li> <li>- énoncer une problématique,</li> <li>- définir des objectifs.</li> </ul>
<b>Analyser</b>	Le sujet doit permettre une diversité des approches expérimentales et le matériel à disposition doit être suffisamment varié pour offrir plusieurs possibilités au candidat. Les documentations techniques seront mises à disposition.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- formuler une hypothèse,</li> <li>- proposer une stratégie pour répondre à la problématique,</li> <li>- proposer une modélisation,</li> <li>- choisir, concevoir ou justifier un protocole / dispositif expérimental,</li> <li>- évaluer l'ordre de grandeur d'un phénomène et de ses variations.</li> </ul>
<b>Réaliser</b>	Le sujet doit permettre à l'examineur d'observer la maîtrise globale de certaines opérations techniques et l'attitude appropriée du candidat dans l'environnement du laboratoire.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- évoluer avec aisance dans l'environnement du laboratoire,</li> <li>- suivre un protocole,</li> <li>- respecter les règles de sécurité,</li> <li>- utiliser le matériel (dont l'outil informatique) de manière adaptée,</li> <li>- organiser son poste de travail,</li> <li>- effectuer des mesures avec précision,</li> <li>- reporter un point sur une courbe ou dans un tableau</li> <li>- effectuer un calcul simple.</li> </ul>
<b>Valider</b>	Le sujet doit permettre à l'examineur de s'assurer que le candidat est capable d'identifier des causes de dispersion des résultats, d'estimer l'incertitude à partir d'outils fournis, d'analyser de manière critique des résultats et choisir un protocole plus approprié parmi deux possibles.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- exploiter et interpréter des observations, des mesures,</li> <li>- utiliser les symboles et unités adéquats,</li> <li>- vérifier les résultats obtenus,</li> <li>- valider ou infirmer une information, une hypothèse, une propriété, une loi,...</li> <li>- analyser des résultats de façon critique,</li> <li>- proposer des améliorations de la démarche ou du modèle,</li> <li>- utiliser du vocabulaire de la métrologie.</li> </ul>
<b>Communiquer</b>	<b>Cette compétence est transversale.</b> Elle est mobilisée sur l'ensemble de l'épreuve sans être nécessairement évaluée. Si on choisit de l'évaluer, le support de communication doit être imposé dans le sujet. Elle ne peut alors se réduire à une observation de la maîtrise de la langue au cours de quelques échanges avec l'examineur. Il s'agit de construire ici une argumentation ou une synthèse scientifique en utilisant l'outil de communication imposé par le sujet (un poster, une ou deux diapositives, un enregistrement sonore ou une vidéo,...). Ce temps de communication ne pourra pas excéder 2 à 3 minutes en cas d'une communication orale imposée. Le contenu devra être en cohérence avec la réflexion et les résultats obtenus par le candidat.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- utiliser les notions et le vocabulaire scientifique adaptés,</li> <li>- présenter, formuler une proposition, une argumentation, une synthèse ou une conclusion de manière cohérente complète et compréhensible.</li> </ul>
<b>Être autonome, faire preuve d'initiative</b>	<b>Cette compétence est transversale.</b> Elle est mobilisée sur l'ensemble de l'épreuve en participant à la définition du niveau de maîtrise des autres compétences.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- travailler seul,</li> <li>- demander une aide pertinente.</li> </ul>

## Annexe 5 : Exemples de réponses d'élèves

### Élève 1

On observe que le courant par de la borne + et la borne - en passant par la lampe L<sub>2</sub> mais l'interrupteur CD est ouvert donc les particules ne peuvent pas passer pour aller jusqu'à la borne - car pour que les lampes s'allument et pour qu'il est de l'électricité, les particules électriques se frottent entre eux pour produire de l'électricité. Mais dans ce schéma ci-dessus l'interrupteur est ouvert donc le schéma ne peut pas fonctionner.

### Élève 2

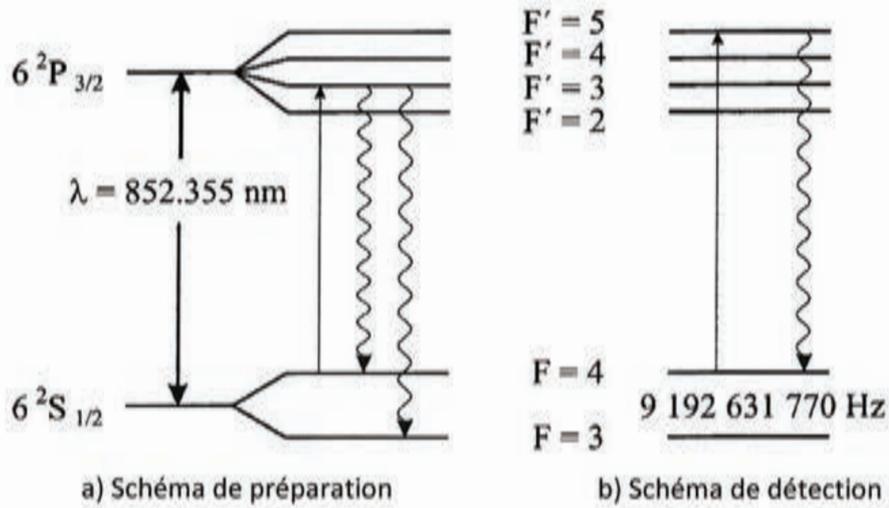
On observe que c'est un circuit simple. La lampe L<sub>2</sub> brûle et que la lampe L<sub>1</sub> est éteinte. La lampe L<sub>1</sub> est éteinte car le courant électrique par de la borne positive (+) de la pile à la borne négative (-). Le courant est arrêté à l'interrupteur car il est ouvert donc le courant ne passe pas par la lampe L<sub>1</sub> et n'arrive pas à la borne -. Le circuit est donc ouvert.

### Élève 3

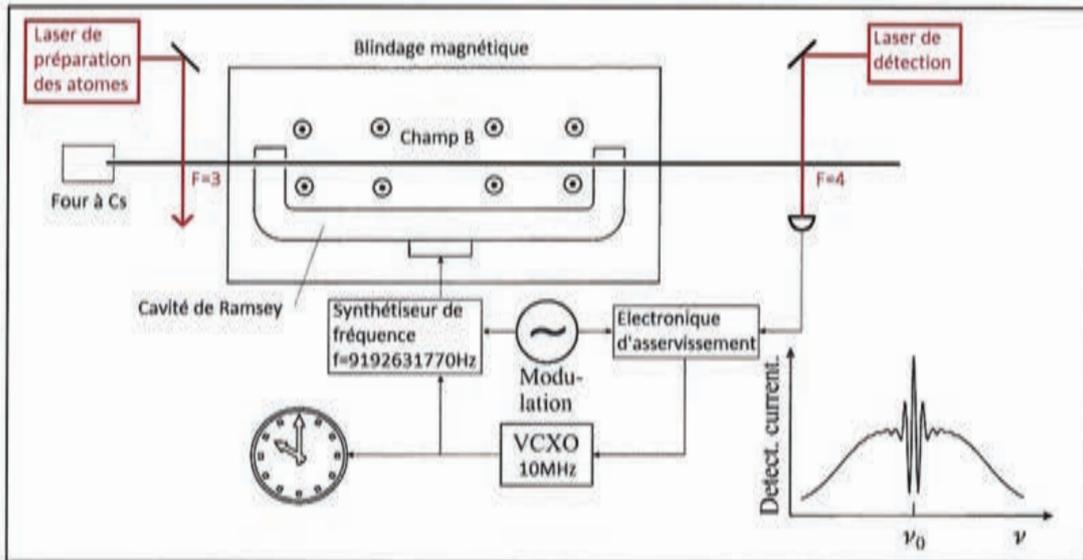
On observe que la borne B va dans le sens de la L<sub>2</sub> ce qui veut donc dire que le courant va dans le mauvais sens. On observe aussi que l'interrupteur est ouvert juste avant la L<sub>1</sub> ce qui veut donc dire que la lampe L<sub>1</sub> ne s'allumera pas. Donc le professeur a branché la pile dans le mauvais sens (il a inversé la borne + avec la borne -). La borne (+) est B. Ainsi que la borne (-) est A. Dans le circuit, seulement la L<sub>2</sub> s'allumera.

## Annexe 6 : Niveaux d'énergie de l'atome de césium

(Extraits de *Frequency Standards*, F. Riehle, ed. WILEY-VCH)



## Annexe 7 : Schéma de principe d'une horloge à jet de césium à pompage optique



## Annexe 8 : Dilatation des durées : « Horloge de lumière »

Une impulsion lumineuse est réfléchiée sur un miroir. On considère deux évènements :

- évènement A : l'impulsion lumineuse est émise ;
- évènement B : l'impulsion lumineuse est reçue après réflexion sur le miroir.

L'ensemble miroir-source-récepteur est mobile à vitesse  $v$  constante par rapport à un référentiel galiléen.

On regarde l'expérience de deux points de vue :

- Point de vue 1 : celui d'un observateur lié à l'ensemble miroir-source-récepteur ;
- Point de vue 2 : celui d'un observateur lié au laboratoire, considéré comme référentiel galiléen.

