

Lycée Jean Perrin – Lyon

Concours blanc 2026

Épreuve commune – PCSI / MPSI

PHYSIQUE

Jeudi 11 juin 2026

Durée : 4h

Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Consignes :

- L'usage de la calculatrice est **interdit**.
- Le sujet se compose de deux problèmes indépendants, que le candidat **rédigera sur des copies séparées**.
- Les applications numériques attendues sont des ordres de grandeur que l'on pourra exprimer **avec un seul chiffre significatif**, ce qui permettra d'utiliser des arrondis.
- Sauf si la question le demande explicitement, les résultats donnés sans aucun élément d'explication ou de justification ne se verront attribuer **aucun point**.

Appareil photographique

Les appareils photographiques actuels, qu'ils soient intégrés à un smartphone ou non, combinent des technologies relevant à la fois de l'optique géométrique, de la mécanique vibratoire et de l'électronique embarquée. Le choix de l'objectif, l'obtention d'une profondeur de champ suffisante et la maîtrise du flou de bougé imposent une compréhension fine de la formation des images.

Parallèlement, la stabilisation optique moderne repose sur des capteurs inertiels miniaturisés, notamment des accéléromètres MEMS capacitifs, dont le fonctionnement exploite les lois de la mécanique, de l'électrostatique et des circuits oscillants.

Dans ce sujet, on s'intéresse au fonctionnement physique d'un appareil photographique avec stabilisateur d'image : on étudiera d'abord la formation géométrique de l'image et ses contraintes, puis la détection et la correction des vibrations à l'aide d'un capteur capacitif dont la réponse mécanique sera modélisée. Le problème se compose de trois parties indépendantes l'une de l'autre. Un formulaire d'optique géométrique est fourni en fin du problème.

Partie A. Objectif de l'appareil photographique

Cette partie traite de la comparaison entre l'encombrement d'un téléobjectif composé de deux lentilles et d'un objectif composé d'une unique lentille permettant de former une même image d'un objet situé à une grande distance du photographe. On modélise l'objectif d'un appareil photographique par une lentille L_1 que l'on associe à un capteur CCD de taille $15,8 \times 23,6 \text{ mm}^2$.

La lentille L_1 est convergente de vergence $5,0\delta$. Cet appareil photographique est utilisé pour photographier un animal de hauteur 80 cm situé à 200 m.

I.1) À quelle distance de la lentille d'entrée L_1 faut-il placer le capteur pour former une image nette ?

I.2) Réaliser un schéma représentant la situation, on fera apparaître la lentille L_1 , ses foyers objet et image, ainsi que le capteur CCD que l'on placera en accord avec la question précédente.

I.3) Quelle est la taille de l'image obtenue sur le capteur ?

On remplace l'objectif simple par un téléobjectif constitué de la même lentille d'entrée L_1 associée à une seconde lentille L_2 placée à une distance 15,5 cm derrière la lentille d'entrée L_1 . Cette seconde lentille est divergente, de vergence -20δ . La distance entre la lentille L_1 et le capteur, notée Δ , est appelée encombrement du téléobjectif. On photographie le même animal de hauteur 80 cm toujours situé à 200 m.

I.4) À quelle distance de la lentille L_2 faut-il placer le capteur pour former une image nette ? On donnera un résultat à deux chiffres significatifs.

I.5) Réaliser un schéma représentant la situation, on fera apparaître les lentilles L_1 et L_2 , leurs foyers objet et image, ainsi que le capteur CCD que l'on placera en accord avec la question précédente. On tracera le cheminement complet d'un rayon.

I.6) Quel est alors l'encombrement Δ du téléobjectif ?

I.7) Quelle est la taille de l'image formée à l'aide du téléobjectif ?

I.8) Quelle serait la distance focale d'un téléobjectif mono-lentille constitué d'une seule lentille convergente et qui permettrait de former une image de la même taille que celle obtenue à l'aide du téléobjectif ? Quel serait l'encombrement d'un tel appareil photographique ? Commenter.

Partie B. Profondeur de champ

L'appareil photographique est désormais utilisé pour photographier l'image d'un objet A placé à 6 cm de l'objectif sur l'axe optique. On modélise l'objectif de l'appareil photographique par une lentille simple de distance focale 2 cm.

I.9) Rappeler ce que sont les conditions de Gauss.

I.10) Définir la notion de stigmatisme rigoureux et approché.

I.11) Réaliser un schéma à l'échelle de la situation décrite ci-dessus en y faisant également apparaître l'image A' conjuguée à l'objet A par la lentille.

I.12) Ajouter sur votre schéma un diaphragme de 6 cm de diamètre centré sur l'axe optique accolé à la lentille, ainsi que le pixel central du capteur placé dans le plan de l'image A' , centré sur l'axe optique et de taille 1 cm.

I.13) Construire graphiquement les positions extrêmes de l'objet A (notées A_1 et A_2) respectant les conditions assurant un stigmatisme approché.

I.14) Mesurer la profondeur de champ p à l'aide de votre schéma.

I.15) Réaliser un nouveau schéma et déterminer la nouvelle profondeur de champ p' pour un diaphragme de diamètre 4 cm centré sur l'axe optique. Quelle est l'influence du diamètre du diaphragme sur la profondeur de champ ?

Partie C. Accéléromètre

L'intégralité des appareils photographiques numériques modernes sont équipés d'accéléromètres afin de stabiliser l'image lors d'une prise de vue. Cet outil est particulièrement utile lors d'une photographie réalisée avec une grande focale afin de compenser les tremblements de la main du photographe. On se propose d'étudier ici un accéléromètre à détection capacitive. Un conducteur suspendu par un ressort constitue l'armature mobile d'un condensateur, tandis que le boîtier de l'appareil photographique (supposé fixe) porte la seconde armature composant le condensateur. La mesure de la capacité du condensateur permet d'estimer le mouvement engendré par les tremblements du photographe.

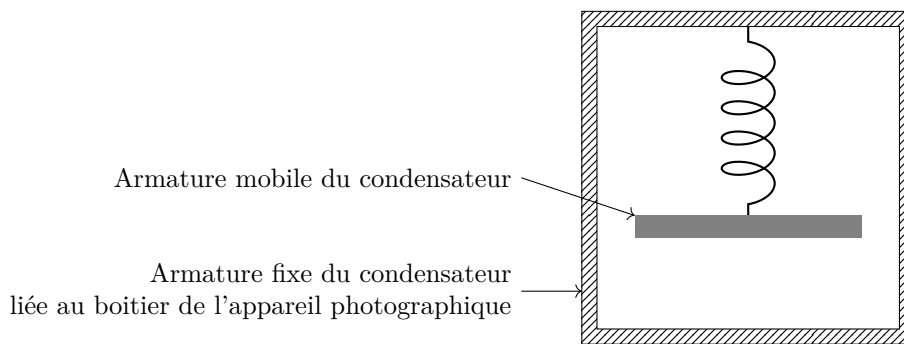


FIGURE 1 – Schéma simplifié de l'accéléromètre

On modélise mécaniquement l'armature mobile par une masse ponctuelle M de masse m , suspendue à un ressort de longueur $\ell(t)$ à l'instant t , de longueur à vide ℓ_0 et de constante de raideur k , dont l'autre extrémité est fixée en A un point solidaire de l'appareil photographique (voir figure 2). Le système d'amortissement est modélisé par une force de frottement de la forme :

$$\vec{F}_f = -\alpha \vec{v}$$

avec $\vec{v} = \frac{d\vec{AM}}{dt}$ la vitesse du point M par rapport au boîtier de l'appareil photographique.

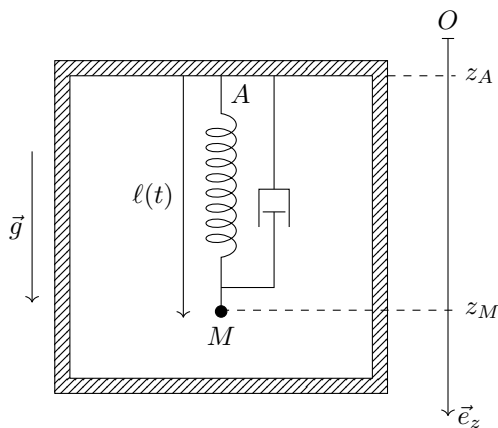


FIGURE 2 – Modélisation mécanique de l'accéléromètre

On cherche à exprimer l'amplitude des vibrations du point M relativement au boîtier, notée Z_M , engendrées par les tremblements de la main du photographe. Les tremblements de la main du photographe sont modélisés par un mouvement sinusoïdal vertical du point A avec une pulsation ω et une amplitude Z_A relativement au point O fixe dans le référentiel terrestre \mathcal{R} supposé galiléen :

$$z_A(t) = Z_A \cos(\omega t).$$

I.16) Déterminer la longueur ℓ_{eq} de ℓ à l'équilibre en l'absence de tremblement (c'est-à-dire $z_A = 0$).

I.17) Établir l'équation différentielle vérifiée par $\ell(t)$ en présence des tremblements. L'équation fera apparaître le coefficient de frottement α , la constante de raideur k , la masse m , la longueur d'équilibre ℓ_{eq} , la pulsation ω et l'amplitude Z_A .

Indication : on exploitera la position de M dans le référentiel terrestre, donnée par $z_M = z_A + \ell$.

Dans la suite on note $Z = \ell - \ell_{eq}$ qui représente le mouvement de la masse M par rapport à sa position d'équilibre dans le boîtier.

I.18) Montrer que l'équation du mouvement de M peut se mettre sous la forme :

$$\ddot{Z} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{Z} + \omega_0^2 Z = Z_A \omega^2 \cos(\omega t).$$

Donner l'expression des paramètres ω_0 et Q .

On s'intéresse désormais au mouvement de la masse M en régime sinusoïdal permanent établi.

I.19) Justifier que la quantité $Z(t)$ peut s'écrire sous la forme :

$$Z(t) = Z_M \cos(\omega t + \phi).$$

Que sont les quantités Z_M , ω et ϕ ?

I.20) À l'aide d'un passage aux complexes, exprimer Z_M en fonction de Z_A , Q et de la pulsation réduite $x = \omega/\omega_0$.

I.21) Quelle est la nature du filtre associé à $Z_M(x)$?

I.22) Montrer que $Z_M(x)$ passe par un maximum en $x = x_r$ si $Q > 1/\sqrt{2}$ et préciser l'expression x_r .

I.23) Étudier les asymptotes basse et haute fréquences de $Z_M(x)$ puis tracer sur un même graphique l'allure de la courbe $Z_M(x)$ pour $Q_1 < 1/\sqrt{2}$ et $Q_2 > 1/\sqrt{2}$.

I.24) La main d'un photographe vibre de 2 mm à une fréquence de 10 Hz, quelle est l'amplitude du mouvement du capteur Z_M dans ces conditions ? On prendra $\omega_0 = 2 \times 10^3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ et $Q = 20$ pour l'application numérique. Commenter.

Rappel : changer de copie pour rédiger l'autre problème

Formulaire : optique géométrique

Soit une lentille mince de centre optique O , de foyer principal image F' et de foyer principal objet F , donnant d'un objet AB une image transverse $A'B'$, A et A' étant sur l'axe optique.

□ Relations de conjugaison

$$\text{Descartes : } \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{OF'} = \frac{1}{f'} \quad \text{Newton : } \overline{F'A'} \cdot \overline{FA} = \overline{F'O'} \cdot \overline{FO} = -f'^2$$

□ Relations du grandissement $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$

$$\text{Descartes : } \gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \quad \text{Newton : } \gamma = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}} = \frac{\overline{FO}}{\overline{FA}}$$

PROBLÈME II

Métrologie des masses

La métrologie des masses est la science de la mesure des masses. La réforme de la définition du kilogramme, en 2019, a été accompagnée du développement de nouvelles technologies de pesées. Ce sujet en esquisse le fonctionnement dans les parties I et II. La partie III présente des éléments sur une méthode de mesure de la pesanteur. Ces parties sont indépendantes, tout comme le sont, dans une certaine mesure, les sous-parties.

Données :

- Masse molaire de l'air : $M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Constante des gaz parfaits : $R = 8,3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
- Pesanteur terrestre : $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
- Rayon terrestre : $R_T = 6400 \text{ km}$.
- Permittivité diélectrique du vide : $\epsilon_0 = 8,9 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$.
- Écart normalisé entre deux mesures x_1 et x_2 , d'incertitudes-types $u(x_1)$ et $u(x_2)$: $\frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2}}$.

Concernant les applications numériques demandées, il est attendu une valeur approchée.

Partie A. Balance de Kibble : pesée primaire à l'échelle du kilogramme

Usuellement, une balance est étalonnée en usine à l'aide d'autres masses qui servent de référence. Au contraire de cela, une balance de Kibble est une balance qui permet de peser une masse sans utiliser d'autre masse de référence. Elle produit des masses de référence (aussi dites masses primaires). Nous allons détailler son fonctionnement. Dans la suite, m est la masse à peser.

Mode statique

Le principe est le même que pour toute balance de laboratoire de précision : le poids qui s'exerce sur le plateau est compensé par la force de Laplace qui s'exerce sur un conducteur parcouru par un courant immergé dans un champ magnétique (figure 3).

Le conducteur est usuellement une spire ou une bobine. Mais ici, dans un souci de simplification, nous supposons qu'il s'agit d'une tige rectiligne, en contact glissant sur deux rails parallèles alimentés par un générateur de courant (figure 3). Le dispositif est similaire aux rails de Laplace.

On note $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_y$ le champ magnétique, supposé uniforme, et a l'écartement entre les rails.

II.1) Exprimer la résultante vectorielle \vec{F}_L des forces de Laplace qui s'exerce sur la tige, en fonction entre autres de B_0 et de a .

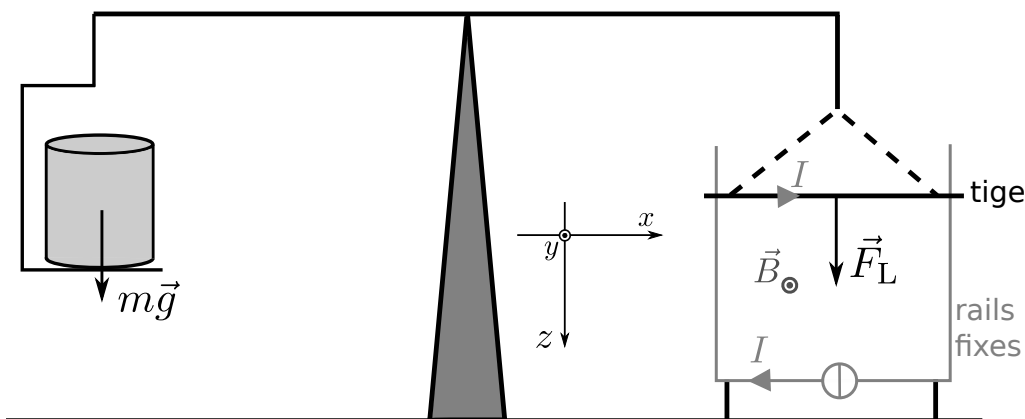


FIGURE 3 – Schéma de la balance de Kibble en mode statique. Le courant I imposé par le générateur est constant, il est choisi pour que la balance soit à l'équilibre. Les rails sont fixes par rapport au bâti.

La tige peut glisser sans frottement sur les rails fixes, tout en maintenant un contact électrique avec ceux-ci.

À l'équilibre, $\|\vec{F}_L\| = mg$.

Mode dynamique

Le terme aB_0 est difficile à mesurer précisément. Une balance classique est étalonnée : en plaçant une masse de référence connue sur son plateau, on en déduit le terme aB_0 . Mais une balance de Kibble ne peut pas fonctionner ainsi, car son objectif est de peser sans utiliser d'autres masses de référence.

L'idée est alors d'utiliser un second mode, le mode dynamique, qui va permettre une mesure de aB_0 . Dans ce mode, le générateur de courant n'est plus utilisé. Il est remplacé par une résistance R (et on négligera toute résistance autre que celle-ci).

La tige est mise en mouvement à une vitesse $\vec{v} = v_0 \vec{e}_z$ imposée, constante et connue précisément (figure 4).

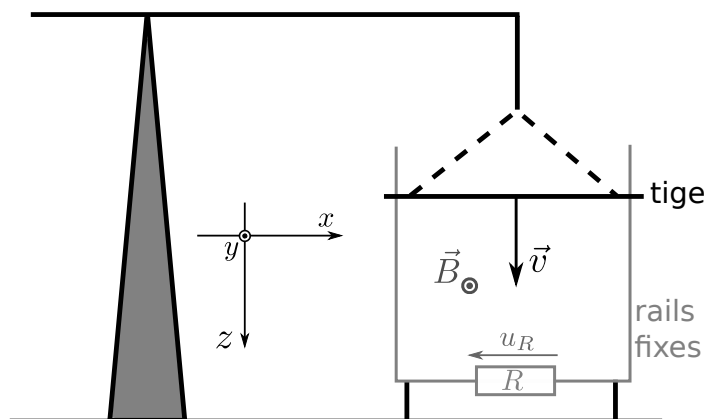


FIGURE 4 – Balance de Kibble en mode dynamique.

II.2) Faire un schéma des rails et de la tige, et préciser l'orientation que vous choisissez pour le courant induit I_d . En déduire l'expression du vecteur normal au circuit {résistance+rails+tige}.

II.3) Exprimer la force électromotrice induite e , en fonction de v_0 , a et B_0 . On pourra supposer la tige initialement en $z = 0$ et noter L_0 la distance verticale initiale entre la tige et le bas du circuit.

II.4) Exprimer aB_0 en fonction de la tension u_R mesurée aux bornes de la résistance et d'autres paramètres mesurés.

Mise ensemble

II.5) Exprimer la masse m pesée en fonction des grandeurs mesurées avec précision : I en phase statique, v_0 et u_R en phase dynamique, ainsi que g .

L'intensité I et la tension u_R sont mesurées en utilisant des phénomènes quantiques, sans référence à d'autres masses. L'expression précédente permet donc bien une mesure directe et précise de m . Il existe une dizaine de telles balances dans le monde.

Partie B. Balance électrostatique : pesées primaires à l'échelle du milligramme

Les balances de Kibble permettent de produire des masses de référence de l'ordre de 1 kg. Pour descendre vers des masses plus petites, il est nécessaire de faire des comparaisons : par exemple comparer deux masses de 0,5 kg, prises ensemble, à une masse de référence de 1 kg, afin d'en obtenir une mesure précise. Descendre ainsi la chaîne des masses jusqu'au milligramme nécessite beaucoup d'étapes. Il en résulte une perte de précision rédhibitoire. Une solution à ce problème est l'utilisation de la balance électrostatique qui, tout comme celle de Kibble, permet une pesée sans utiliser d'autre masse de référence, mais qui est conçue pour fonctionner aux petites masses.

Le principe de la balance électrostatique est d'utiliser la force électrostatique F_e qui s'exerce entre les deux plaques d'un condensateur, afin de compenser l'action du poids mg sur la masse à peser.

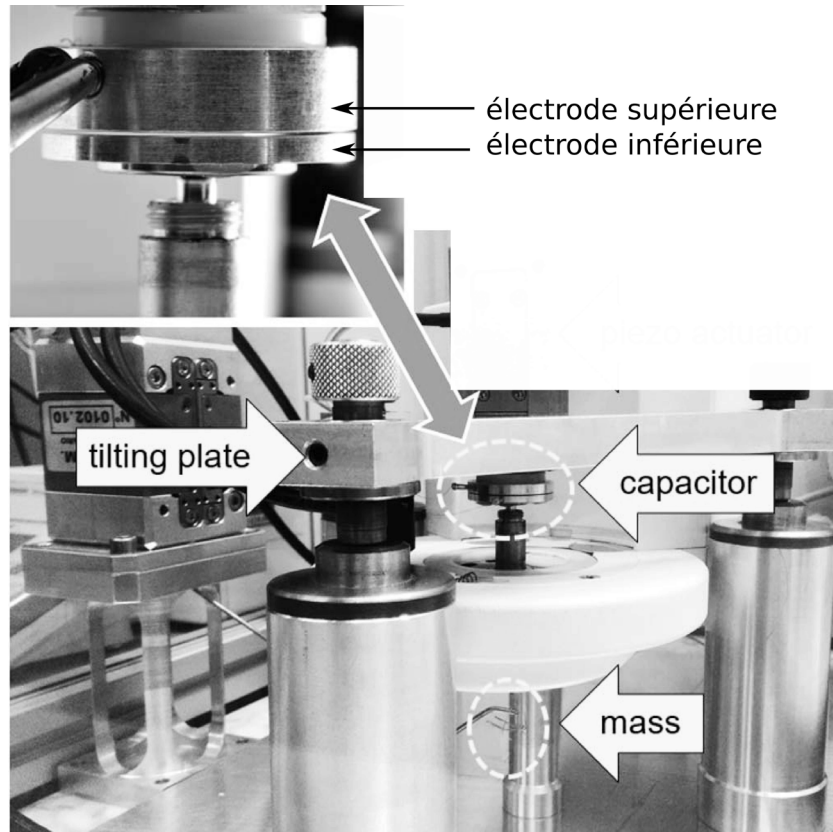


FIGURE 5 – Photographie de la balance (source : doi 10.1109/TIM.2018.2890747).

Pour utiliser la balance, il est nécessaire de mesurer la capacité C du condensateur pour une distance donnée entre les électrodes. Nous étudions l'une parmi les méthodes classiques de mesure de capacité.

On considère le circuit ci-contre. Pour $t < 0$, le condensateur est déchargé, et le générateur de tension délivre une tension nulle. Pour $t \geq 0$, le générateur délivre une tension constante $E = 10 \text{ V}$.

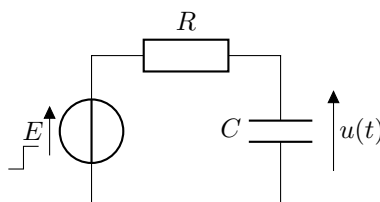


FIGURE 6 – Circuit RC .

Premier modèle

II.6) Établir l'équation différentielle suivie par la tension $u(t)$ aux bornes du condensateur, pour $t \geq 0$.

On notera τ le temps caractéristique $R \times C$.

II.7) Résoudre cette équation pour obtenir l'expression de $u(t)$.

II.8) L'acquisition de la figure 7 a été réalisée avec une résistance $R = 1 \text{ k}\Omega$. L'exploiter afin d'en déduire la valeur de C . On détaillera la démarche.

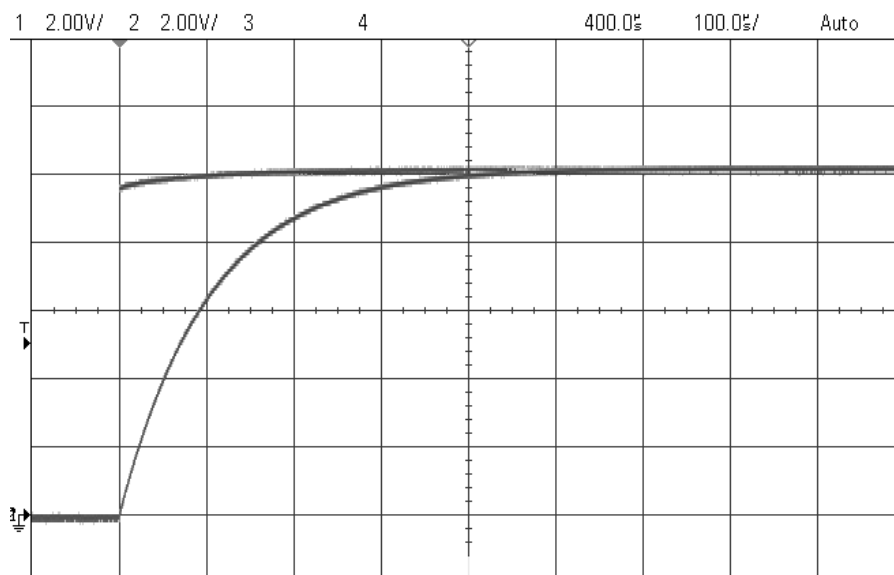


FIGURE 7 – Acquisition à l'oscilloscope de la tension aux bornes du générateur et de la tension $u(t)$. L'échelle horizontale est de $100 \mu\text{s}$ par carreau, les deux échelles verticales de 2 V par carreau.

Pour plus de précision, on répète la mesure avec différentes valeurs de la résistance R . On garde toujours la même capacité C . Le tracé du temps caractéristique τ , mesuré à l'aide de l'oscilloscope, en fonction de R , est représenté figure 8 (gauche).

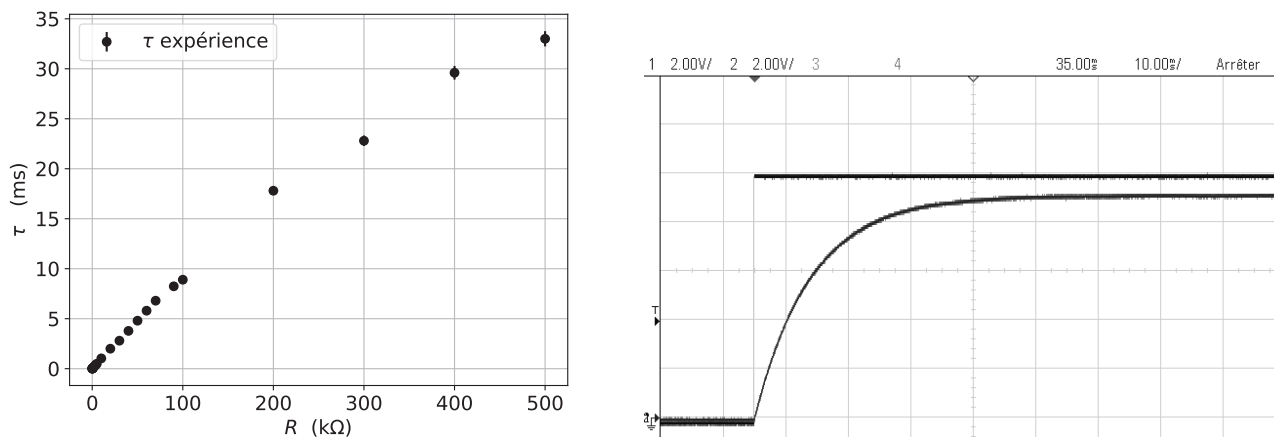


FIGURE 8 – Gauche : tracé des mesures de τ pour différentes valeurs de R . Les barres verticales, à peine visibles, sont les incertitudes-types.

Droite : un exemple d'acquisition pour $R = 100 \text{ k}\Omega$ (tension aux bornes du générateur et tension $u(t)$).

II.9) Expliquer en quoi le graphique de gauche n'est pas en accord avec la modélisation précédente (questions II.6) et II.7)) du circuit RC .

De même, quelle particularité du graphique de droite le rend incompatible avec cette modélisation ?

Second modèle

Pour tenter d'améliorer le modèle et de rendre compte de la figure 8, on prend en compte la résistance d'entrée de l'oscilloscope, $R_e = 1\text{ M}\Omega$. Ceci donne le modèle de la figure 9.

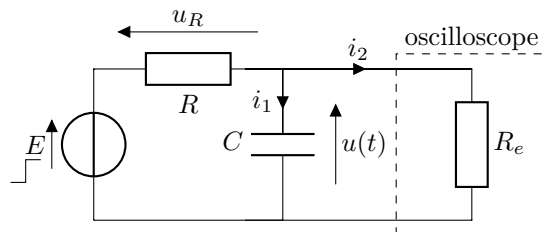


FIGURE 9 – Modélisation prenant en compte la résistance d'entrée de l'oscilloscope.

II.10) Exprimer le courant i_1 en fonction de u et/ou de sa dérivée, et de grandeurs parmi R , R_e et C .

Faire de même pour le courant i_2 .

Enfin, faire de même pour la tension u_R .

II.11) À l'aide d'une loi des mailles, montrer que la tension $u(t)$ vérifie :

$$\frac{E}{RC} = \frac{du}{dt} + \frac{u}{\tau'} \tag{1}$$

avec τ' à exprimer en fonction de R , R_e et C .

L'expression ainsi établie de $\tau'(R)$ est tracée figure 10 et est en bon accord avec l'expérience.

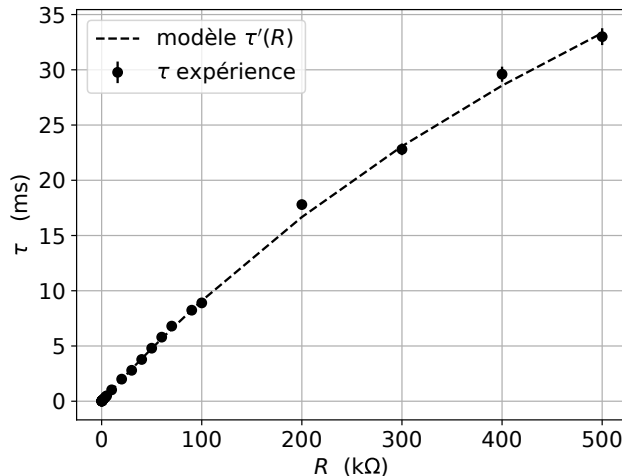


FIGURE 10 – Mesures de τ (les mêmes que figure 8 gauche) et comparaison avec le modèle $\tau'(R)$.

II.12) En partant de l'équation (1), établir l'expression de la valeur vers laquelle tend la tension u aux temps longs.

Faire l'application numérique dans le cas de la figure 8, droite, et expliquer cette figure.

Restriction aux petites valeurs de R

Afin de pouvoir utiliser le premier modèle (où τ est proportionnel à R , questions II.6) à II.8)), et donc de s'affranchir de l'influence de la résistance d'entrée de l'oscilloscope, on se place à des petites valeurs de R . Ceci donne le graphique de la figure 11.

II.13) Le modèle $\tau = aR + b$ est-il compatible avec les mesures de τ sur cette plage de valeurs de R ?

On attend une justification basée sur la figure 11.

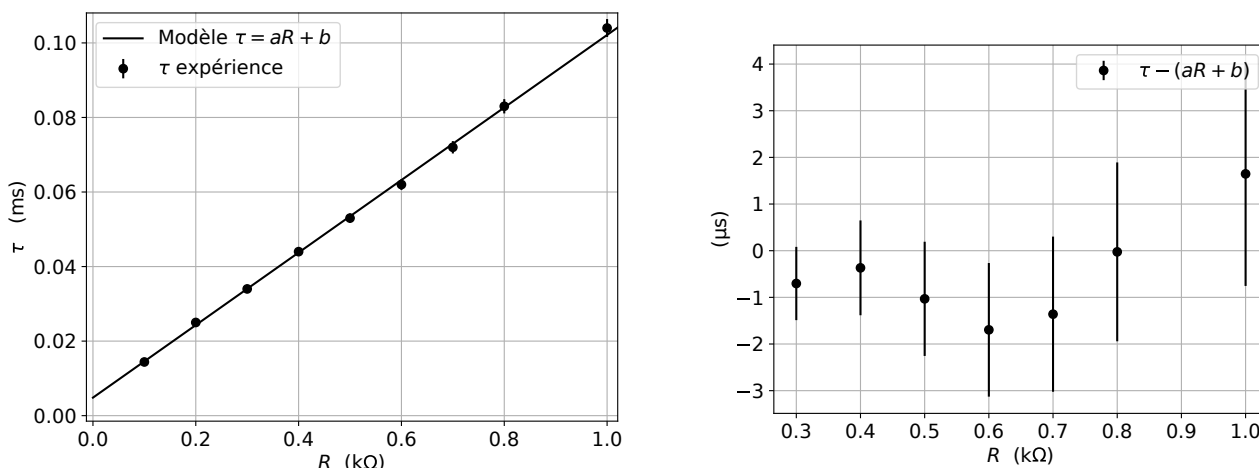


FIGURE 11 – À gauche, zoom sur les valeurs mesurées de τ à petites valeurs de R , et régression linéaire $\tau = aR + b$, avec $a = 97$ nF et $b = 4,8$ μ s.

À droite : tracé de la différence entre les mesures de τ et le modèle $aR + b$ en fonction de R . Les barres sont les incertitudes-types sur τ , estimées à 2% de τ . Celles sur R sont négligeables.

Une procédure de tirage aléatoire permet ensuite d'obtenir $u(a) = 1$ nF et $u(b) = 0,4$ μ s.

II.14) (Résolution de problème) On constate sur la régression linéaire que la valeur du coefficient b n'est pas compatible avec une valeur nulle. Quel élément, non présent dans le second modèle, permet d'expliquer ceci ?

Utiliser la valeur de b pour calculer la valeur de cet élément négligé.

Pour cette question, toute piste de recherche pertinente sera valorisée.

II.15) Dédurre de l'analyse précédente la valeur de la capacité C et son incertitude-type $u(C)$.

Partie C. Mesure de g : gravimètre à chute libre

Les balances précédentes mesurent en réalité le poids de l'objet pesé. Pour en déduire sa masse, il faut au préalable connaître la valeur de la pesanteur terrestre g . Nous voyons ici une méthode pour le faire.

Cette méthode exploite la chute libre, verticale, d'un aimant. On utilise le repère de la figure 12. L'aimant de masse m est lâché sans vitesse initiale en $z = 0$ à l'instant $t = 0$. Les frottements de l'air sont négligés.

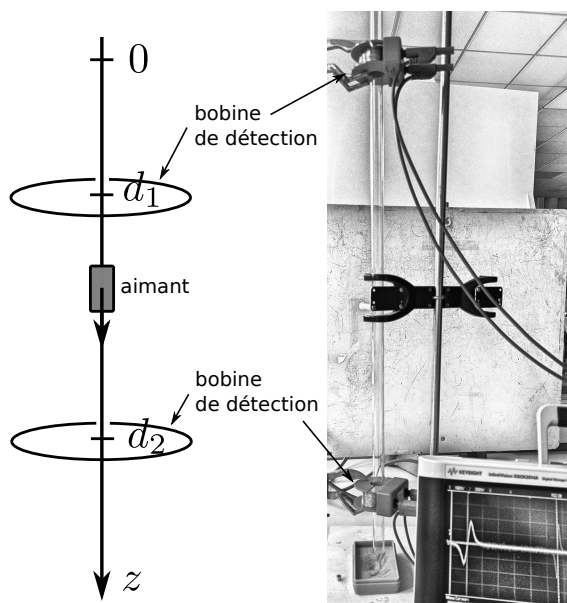


FIGURE 12 – Photographie de l'expérience et schéma de sa modélisation.

Deux bobines permettent de repérer le passage de l'aimant aux points $z = d_1$ (instant t_1) et $z = d_2$ (instant t_2). Ceci permet une mesure précise de la durée $\Delta t = t_2 - t_1$. En revanche, l'instant du lâché n'étant pas connu précisément, les valeurs de t_1 et de t_2 ne sont pas connues.

On mesure par ailleurs les distances d_1 et d_2 .

Modélisation

II.16) Exprimer la position de l'objet en chute libre, $z(t)$, en fonction de g et de t .

II.17) Exprimer le temps de passage t_1 en fonction de d_1 et de g . Faire de même pour t_2 en fonction de d_2 et de g .

II.18) Exprimer enfin g en fonction des grandeurs mesurées que sont d_1 , d_2 et Δt .

Expérience : valeur de g

La mesure de Δt est réalisée avec une acquisition des tensions induites dans les bobines de détection. Un exemple est montré figure 13.

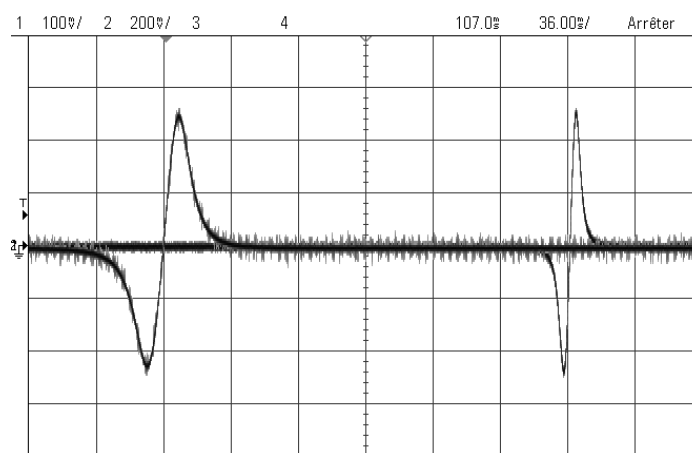


FIGURE 13 – Exemple d'acquisition à l'oscilloscope. Les échelles verticales sont de 100 mV et 200 mV par carreau, l'échelle horizontale est de 36 ms par carreau.

II.19) Représenter l'aimant de la figure 12 sur votre copie, et tracer l'allure des lignes de champ magnétostatique produites par cet aimant. On fera apparaître les pôles nord et sud.

Expliquer l'apparition d'une tension induite dans les bobinages de détection.

II.20) Mesurer la durée Δt sur le signal de la figure 13.

La mesure de Δt est répétée $N = 15$ fois. En langage Python, ces valeurs sont stockées dans la liste `liste_Dt`. On souhaite en réaliser la moyenne `Dt_moy`, à l'aide du script ci-dessous :

```

1 liste_Dt=[0.2165,0.2185,0.219,0.2185,0.2165,0.2165,0.2175,0.216,0.219,0.218,0.2175,
2           0.2175,0.2185,0.2185,0.218] # valeurs de Delta t en s
3 N = len(liste_Dt)
4 somme = 0
5 for i in range(N):
6     # instruction 1
7
8 # instruction 2
9 print(Dt_moy) # affiche la moyenne

```

II.21) Compléter les instructions 1 et 2 de ce script afin que l'algorithme retourne la valeur moyenne de la liste `liste_Dt`.

On mesure $d_1 = 99$ mm et $d_2 = 632$ mm. La formule obtenue précédemment, utilisée avec la moyenne des Δt , donne alors $g = 9,73376 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Ceci semble raisonnable, mais il nous faut estimer l'incertitude associée pour donner un sens à cette valeur.

Estimation de l'incertitude

Concernant les mesures de distances, la demi-étendue d'incertitude de ces mesures est estimée à $\Delta(d_1) = \Delta(d_2) = 1$ mm, c'est-à-dire qu'on estime que d_1 est compris entre 98 mm et 100 mm, et que d_2 est compris entre 631 mm et 633 mm, avec quasi-certitude.

Concernant la moyenne Δt des N valeurs de Δt , sa demi-étendue d'incertitude (qui a la même interprétation que pour d_1 ou d_2) est obtenue en divisant l'écart-type de la liste des valeurs de Δt par \sqrt{N} , puis en multipliant par $\sqrt{3}$ (formule admise) :

```
1 Delta_Dt_moy = np.std(liste_Dt, ddof=1) / N**0.5 * 3**0.5
```

On obtient $\Delta t_{\text{moy}} = 0,44$ ms.

À la question II.18), nous avons exprimé g en fonction des grandeurs d_1 , d_2 et Δt . Ainsi, g est vu comme une fonction de ces grandeurs : $g(d_1, d_2, \Delta t)$. Cette fonction doit être utilisée pour en déduire l'incertitude-type $u(g)$ sur g , à partir de celles sur d_1 , d_2 et Δt . La formule étant complexe, il est adéquat d'utiliser un processus aléatoire par tirage au sort (méthode parfois nommée "Monte Carlo").

```
1 d1 = 99e-3 # d1 en m
2 d2 = 632e-3 # d2 en m
3 Delta_d = 1e-3 # demi-étendue d'incertitude sur d1 et d2, en m
4 g_liste = [] # contiendra les valeurs de g calculées
5
6 for k in range(100000): # répétition des tirages au sort et calcul de g
7     Dt_moy_k = np.random.uniform(Dt_moy-Delta_Dt_moy, Dt_moy+Delta_Dt_moy)
8     d1_k = # instruction 1
9     d2_k = # instruction 2
10    g_liste.append(g(d1_k, d2_k, Dt_moy_k))
11
12 # instruction 3
```

Dans cet algorithme :

- Le module numpy est importé sous le nom `np`.
- La fonction `np.random.uniform(a,b)` tire au sort une valeur comprise entre `a` et `b` avec une probabilité uniforme.
- La fonction `g(d1_k,d2_k,Dt_moy_k)` est déjà supposée être définie, en accord avec la formule de la question II.18). Elle retourne la valeur de g en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.
- La fonction `np.std(L)` retourne l'écart-type des valeurs d'une liste `L`.

II.22) Proposer des instructions 1, 2 et 3 pour que le programme ci-dessus affiche l'incertitude-type sur la valeur mesurée de g .

Le programme retourne la valeur 0.045949. On ne gardera qu'un seul chiffre significatif sur cette valeur de $u(g)$.

II.23) Quelle est l'unité de cette valeur ?

II.24) Enfin, écrire le résultat final (valeur de g et de $u(g)$) de façon cohérente en terme de chiffres significatifs.

Dans les gravimètres absolus de pointe, la chute libre est suivie par un dispositif interférentiel. Ceci permet une mesure de g avec une incertitude-type de l'ordre de $1 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.