

SESSION 2022

**AGRÉGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : PHYSIQUE CHIMIE

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

Durée : 5 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

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.

Tournez la page S.V.P.

A

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 interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1500C	101	0385

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1500C	101	0385

MÉCANIQUE DES FLUIDES CONFINÉS

La machine à force de surface (SFA) est un appareil de mesure de forces de surface qui a été initialement imaginée par D. Tabor, R.H.S. Winterton et J.N. Israelachvili à l'Université de Cambridge. Cet appareil, représenté schématiquement sur la figure 1, permet de mesurer la force qui s'exerce entre deux surfaces (en l'occurrence une sphère de rayon millimétrique et un plan) entre lesquelles est introduit un fluide tout en contrôlant la distance entre celles-ci, à une fraction de nanomètre près. Le SFA offre notamment la possibilité de déterminer de façon fiable et précise les comportements de fluides confinés entre des surfaces séparées de quelques diamètres moléculaires. En mode dynamique, la sphère est excitée, dans la direction normale au plan, par une vibration sinusoïdale de petite amplitude (typiquement 1 nm) appliquée au moyen d'une *céramique piezoélectrique*. Le plan est monté sur un bilame élastique dont la déformation est mesurée grâce à un *capteur optique qui ne sera pas étudié dans ce problème*. La force exercée par le bilame sur le plan est simplement reliée à la déformation du bilame multipliée par sa raideur. Le bilame constitue ainsi un *capteur de force*. Le déplacement relatif entre la sphère et le plan est, quant à lui, mesuré par un *capteur capacitif*.

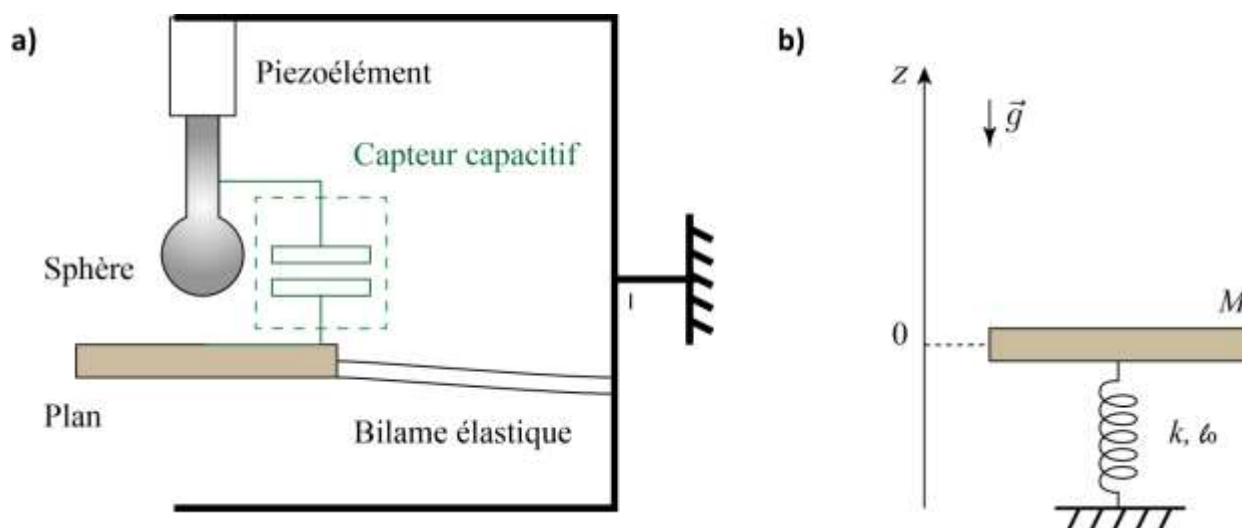


Figure 1: a) Schéma de l'appareil à force de surface dynamique. b) Modèle mécanique du capteur de force.

Dans la partie 1 de ce problème, on étudie le capteur de force. La partie 2 est consacrée au capteur capacitif. Les parties 3 et 4 sont consacrées à deux applications de l'appareil à force de surface. **Les parties sont largement indépendantes.** Des questions pédagogiques reliées aux concepts abordés dans les différentes parties sont insérées dans le corps du texte. Elles sont signalées par l'indication « QP » et représentent environ vingt pour cent du total des points attribués.

Table des matières

MÉCANIQUE DES FLUIDES CONFINÉS.....	1
1. Mesure de forces.....	3
2. Mesure du déplacement.....	5
2.1 Condensateur plan.....	5
2.2 Mesure du déplacement par capteur capacitif.....	6
2.3 Déplacement par céramique piézoélectrique.....	10
3. Application à l'étude de la condensation capillaire.....	10
4. Application à la nanorhéologie.....	13
4.1 Généralités sur la mécanique des fluides.....	13
4.2 Ecoulement entre une sphère et un plan.....	15
Annexe 1 : Extraits de programmes de cycle 3 et cycle 4.....	18
Annexe 2 : Activité élève.....	19
Annexe 3 : Extrait du programme de Terminale spécialité physique-chimie.....	21
Annexe 4 : Extrait du programme de Terminale STL SPCL.....	22
Annexe 5 : Extrait de programmes Terminale spécialité physique-chimie.....	23
DOCUMENT REPONSE A RENDRE AVEC LA COPIE.....	24

Valeurs numériques :

Accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Constante de gravitation universelle : $G = 6,67430(15) \times 10^{-11} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$

Permittivité diélectrique du vide : $\epsilon_0 = 8,854\,187\,82 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$

Tension superficielle de l'eau : $\gamma_{\text{eau}} = 72,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$

Tension superficielle de l'heptane : $\gamma_{\text{heptane}} = 20,5 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$

Masse volumique de l'eau : $\rho_{\text{eau}} = 0,997 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Masse volumique du platine : $\rho_{\text{platine}} = 2,15 \cdot 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Masse volumique du verre : $\rho_{\text{verre}} = 2,50 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Masse volumique de l'Octaméthyl-trichlorosilane (OMCTS) : $\rho_{\text{OMCTS}} = 0,96 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

1. Mesure de forces

On peut modéliser le bilame élastique qui sert de capteur de force par un ressort de raideur k et de longueur à vide ℓ_0 (figure 1b). On note M la masse du plan déposé sur le ressort susceptible de se déplacer suivant un axe vertical Oz orienté par le vecteur unitaire, noté \vec{e}_z , dirigé vers le haut. Le point O ($z=0$) est choisi à la position d'équilibre du plan quand la sphère n'exerce aucune force sur le plan. Le déplacement du plan est mesuré grâce à un dispositif optique qui n'est pas étudié dans ce problème. Dans cette partie, le capteur de force est étudié en l'absence de force exercée par la sphère sur le plan.

1. [QP] Mécanique au collègue

- En vous appuyant sur les attendus du programme dont des extraits sont proposés en annexe 1, indiquer deux fausses conceptions initiales que l'on retrouve chez de nombreux élèves en cycle 3 et début du cycle 4 concernant la notion de vitesse et la notion de relativité des mouvements.
 - Proposer, en une vingtaine de lignes maximum, une séquence pédagogique pour faire émerger une de ces deux conceptions initiales et y apporter une réponse. On y intégrera une expérience de cours à préciser.
- Rappeler ce qu'est un référentiel. Définir « référentiel galiléen ».
 - En l'absence de force exercée par la sphère sur le plan, identifier les forces qui s'appliquent sur le système mécanique constitué par le plan. Pour un plan de masse typique $M = 30,0$ g et un ressort de raideur typique $k = 1,00 \cdot 10^3$ N.m⁻¹, calculer la valeur de l'enfoncement du ressort à l'équilibre.
 - Appliquer le principe fondamental de la dynamique au système constitué par le plan de masse M , en déduire l'équation différentielle du mouvement reliant la position z du plan, à ses différentes dérivées temporelles \dot{z} et \ddot{z} . Montrer que cette équation différentielle peut s'écrire sous la forme :

$$\ddot{z} + \omega_0^2 z = 0$$

Exprimer la pulsation propre ω_0 en fonction de k et M . À partir des dimensions de k et de M , justifier l'homogénéité de cette relation.

- Exprimer la solution générale de cette équation. Indiquer combien il faut de conditions initiales pour la déterminer entièrement. On suppose qu'on écarte le plan d'une quantité z_0 et qu'on le lâche avec une vitesse initiale nulle, établir alors l'équation horaire du mouvement.
- Pour déterminer la valeur de la raideur k , une technique consiste à rajouter des masselottes de masse m à la masse M . On observe que la pulsation propre du système $M + m$ est désormais ω_1 . Exprimer ω_1 en fonction de k , M et m . Sur la figure 2, on représente les valeurs de $1/\omega_1^2$ en fonction de m . Estimer un ordre de grandeur de la valeur de la raideur k et de la valeur de la masse M correspondant à ces mesures.

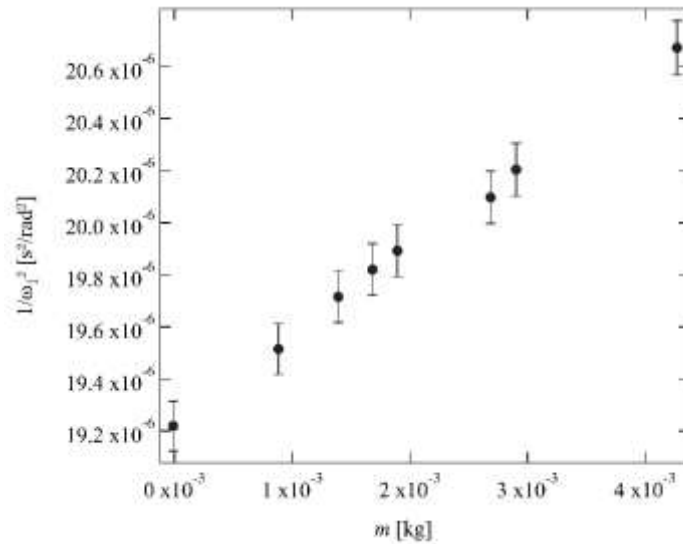


Figure 2: $1/\omega_1^2$ en fonction de la masse m ajoutée à la masse M .

7. On modélise la dissipation dans cet oscillateur par une force de frottement fluide proportionnelle à la vitesse du plan s'écrivant $\vec{F}_f = -\alpha M \vec{v}$. Donner la nouvelle équation différentielle du mouvement.

Dans toute la suite du problème, on supposera que cet amortissement est faible, de sorte que $\alpha \ll \omega_0$. On définit le facteur de qualité Q par : $Q = \frac{\omega_0}{\alpha} \gg 1$.

Dans un premier temps, on s'intéresse aux oscillations libres de ce système mécanique oscillant amorti, on montre que la solution approchée de l'équation différentielle obtenue à la question 7 peut se mettre sous la forme : $z(t) = z_0 e^{-\alpha t/2} \cos(\omega_0 t + \phi)$.

8. La dissipation d'énergie est traitée comme une perturbation par rapport au cas d'un système non amorti. Compte tenu du choix de l'origine de l'axe Oz , établir l'expression de la valeur moyenne temporelle de l'énergie mécanique $\langle \mathcal{E} \rangle$ du système non amorti en fonction de k et z_0 .
9. Montrer qu'au premier ordre en $\frac{1}{Q}$, l'énergie dissipée par frottement pendant une période s'écrit $\Delta \mathcal{E} = \frac{2\pi}{Q} \langle \mathcal{E} \rangle$. En déduire une interprétation énergétique du facteur de qualité Q dans cette limite de faible amortissement.

On s'intéresse maintenant au régime sinusoïdal forcé où le plan est soumis à une force excitatrice supplémentaire que l'on note en représentation complexe $\vec{F} = \underline{F}(\omega) \vec{e}_z = F_0 \exp(i\omega t) \vec{e}_z$ avec $F_0 > 0$. Le régime transitoire n'est pas pris en compte dans cette description. En pratique cette force est appliquée grâce à un petit aimant de masse négligeable, collé sous le plan, placé en face d'une bobine que l'on fait parcourir par un courant sinusoïdal. Ce système bobine-aimant permet de déterminer la fonction de transfert du SFA.

10. Expliquer comment le système bobine-aimant décrit ci-dessus permet d'appliquer une force sinusoïdale sur le plan.
11. Expliciter la propriété de l'équation du mouvement qui justifie l'utilisation de la notation complexe.
12. Exprimer l'amplitude complexe $\underline{z}(\omega)$ des oscillations en fonction de F_0 , M , ω , ω_0 et α .

13. On définit la fonction de transfert complexe $\underline{H}(\omega) = k\underline{z}(\omega) / F_0$. Préciser l'expression du module $|\underline{H}(\omega)|$ et de la phase $\phi(\omega)$ (on fera attention à séparer le cas $\omega < \omega_0$ et $\omega > \omega_0$) de $\underline{H}(\omega)$.
Calculer $|\underline{H}(0)|$, $|\underline{H}(\omega_0)|$ et $|\underline{H}(+\infty)|$
Tracer l'allure de ces fonctions.
14. Sur la figure 3, les expérimentateurs ont choisi de travailler en fréquence plutôt qu'en pulsation et ont tracé le module $|\underline{H}(f)|$ de $\underline{H}(f)$ en fonction de la fréquence f . Estimer l'ordre de grandeur du facteur de qualité à partir de la courbe expérimentale de la figure 3 en s'appuyant sur la question 13.
15. Donner une valeur typique du facteur de qualité d'un diapason, oscillateur mécanique très souvent utilisé en classe. Expliquer comment on peut l'estimer avec un chronomètre. Comparer au facteur de qualité du SFA.

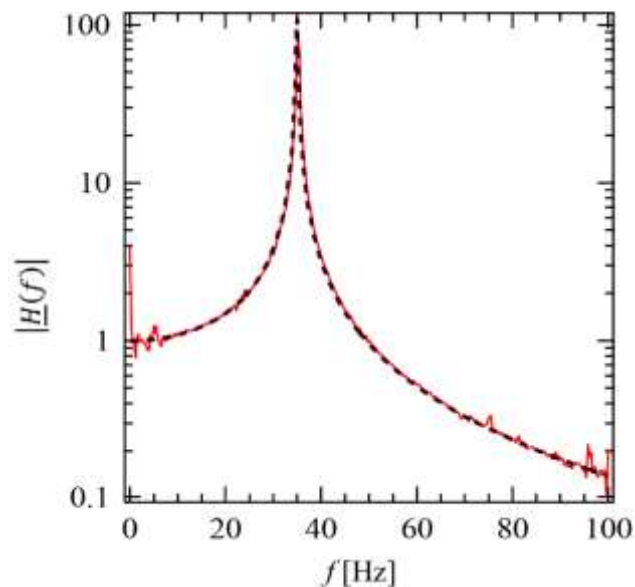


Figure 3: module $|\underline{H}(f)|$ de $\underline{H}(f)$ en fonction de la fréquence f .

16. Expliquer en quoi la connaissance de la fonction de transfert complexe est importante par rapport à la simple connaissance de la raideur k ?

2. Mesure du déplacement

Pour mesurer le déplacement relatif de la sphère et du plan, on fixe rigidement la sphère et le plan à deux disques de duralumin de surface S qu'on approche à une distance e l'un de l'autre en prenant garde au parallélisme. On suppose que le condensateur, ainsi créé, ne perturbe pas le fonctionnement du SFA.

2.1 Condensateur plan

Un tel condensateur est représenté sur la figure 4. On repère l'axe perpendiculaire aux faces du condensateur par un axe Oz , de vecteur unitaire \vec{e}_z . Les dimensions du condensateur permettent de négliger les effets de bord.

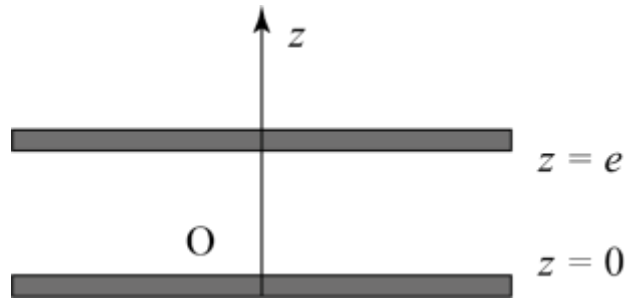


Figure 4 : Condensateur plan.

Considérons que les deux plaques métalliques sont placées aux abscisses respectives $z = 0$ et $z = e$ et portées respectivement aux potentiels V_1 et V_2 . Ces deux plaques forment un condensateur, c'est-à-dire qu'elles portent respectivement les charges Q et $-Q$.

17. Rappeler les équations de Maxwell vérifiées par les champs électrique et magnétique, \vec{E} et \vec{B} , dans le vide. Quelle équation permet de justifier qu'il est possible, en électrostatique, d'écrire le champ \vec{E} sous la forme : $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V)$
18. Etablir l'équation de Laplace vérifiée par le potentiel $V(z)$ entre les plaques du condensateur.
19. Résoudre cette équation en utilisant les potentiels V_1 et V_2 et la distance e .
20. En déduire une première expression du champ électrostatique \vec{E} entre les 2 plaques à l'aide de V_1 , V_2 et e . Tracer, sur un schéma du condensateur, l'allure de quelques lignes du champ \vec{E} . Préciser leur orientation en supposant $V_1 > V_2$.
21. Le champ étant nul à l'extérieur, établir une deuxième expression du champ électrostatique \vec{E} entre les 2 plaques en fonction de Q , S et ϵ_0 où ϵ_0 est la permittivité du vide.
22. En déduire que la capacité d'un tel condensateur plan est :

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{e}$$

2.2 Mesure du déplacement par capteur capacitif

23. On assimile la permittivité diélectrique de l'air à celle du vide ϵ_0 . Donner la valeur de C_0 pour des disques de rayon $R = 3,0$ cm séparés par une distance $e = 10$ μm . Commenter la valeur obtenue.
24. Donner l'expression de la force entre les armatures de ce condensateur si la tension entre les bornes est maintenue fixe. Calculer la valeur de cette force si la tension est maintenue à 5 V.

25. [QP] Etude du condensateur. Classe de terminale. Spécialité physique-chimie.

Un professeur souhaite étudier la charge d'un condensateur à travers un conducteur ohmique. Il propose à ses élèves l'activité fournie en annexe 2.

- a. Schématiser le circuit électrique correspondant au montage donné dans l'activité.
- b. Expliciter la fonction du premier code Arduino fourni par le professeur.
- c. Indiquer comment l'élève effectue le branchement sur le micro-contrôleur pour répondre aux exigences du second code Arduino fourni.
- d. Expliquer la ligne de code « tension=leur*5/1023 ». ».

L'acquisition lors de la charge du condensateur permet de tracer (figure 5) la courbe $\ln(5\text{-tension})$ en fonction de t , ainsi que sa modélisation.

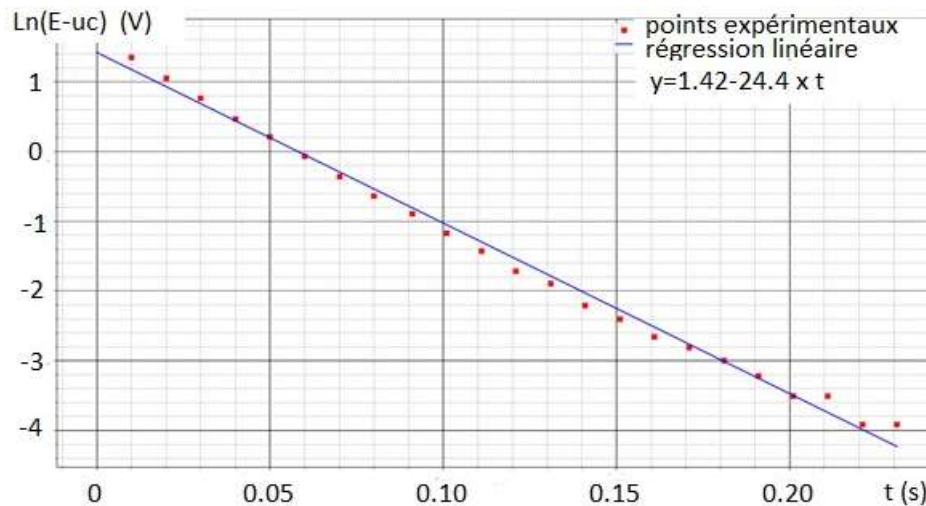


Figure 5 : Courbe *expérimentale* obtenue en TP.

- e. Etablir l'expression donnée dans la question (3) de la partie « exploitation ». Expliciter l'intérêt pédagogique de travailler avec cette expression.
- f. Proposer une question utilisant le graphe obtenu pour répondre aux exigences du programme dont un extrait est fourni en annexe 3. Formuler une réponse cohérente à cette question.

Afin d'explicitier la notion d'équation différentielle et sa réalité physique, le professeur envisage de l'aborder en activité expérimentale de cours en représentant $du_c(t_i)/dt$ en fonction de $u_c(t_i)$. Dans un premier temps, à l'aide du microcontrôleur, il relève les valeurs de tensions successives. Transférées dans un tableur, il détermine la dérivée de $u_c(t_i)$ en calculant $[u_c(t_{i+1})-u_c(t_i)]/\Delta t$.

- g. Représenter $du_c(t_i)/dt$ en fonction de $u_c(t_i)$. Proposer un intérêt didactique de cette représentation.
- h. Quel intérêt scientifique présente le recours à un portrait de phase, c'est-à-dire une représentation $du_c(t_i)/dt$ en fonction de $u_c(t_i)$, lorsqu'on étudie un système dynamique ?

On cherche à mesurer les variations de l'épaisseur e . Une méthode est de transformer une mesure d'épaisseur en une mesure de fréquence beaucoup plus précise. Pour ce faire, le principe consiste à réaliser un oscillateur quasi-sinusoïdal dont la fréquence est reliée à l'épaisseur e . Parmi les oscillateurs possibles, on peut imaginer d'utiliser un oscillateur quasi-sinusoïdal dont le principe est représenté sur la figure 7. Ce circuit utilise un amplificateur linéaire intégré, ou ALI, qui est un composant électronique dont l'alimentation n'est pas représentée, considéré comme idéal et en régime linéaire. En plus de l'ALI, le montage étudié comporte 3 résistances dont une variable, la résistance R_3 .

On commence par étudier une partie du circuit représenté sur la figure 7. Cette sous-partie du circuit est représentée sur la figure 6. Pour un ALI idéal en régime linéaire, on peut écrire que les intensités des courants i^+ et i^- rentrant dans l'ALI sont nulles : $i^+ = i^- = 0$ et que le gain est infini, conduisant, en régime linéaire, à $v^+ = v^-$.

26. Rappeler les lois de Kirchhoff en électrocinétique.

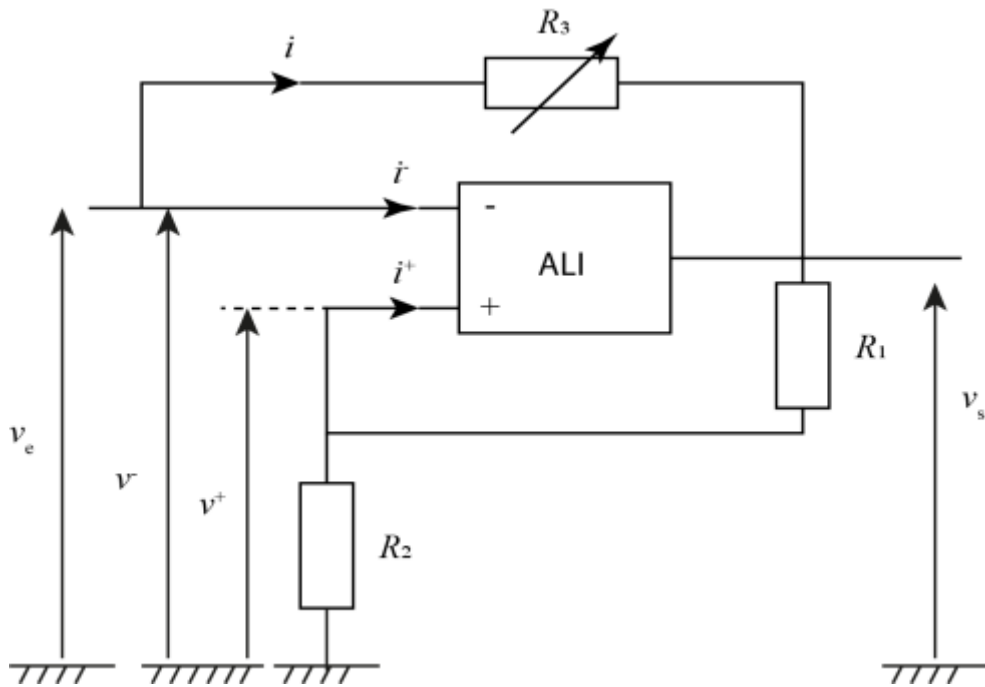


Figure 6 : Résistance négative.

27. Déterminer la relation liant v_e , v_s , R_3 et i .
28. Déterminer la relation liant v_e , v_s , R_1 et R_2 .
29. En déduire que l'on peut écrire $v_e = R_n i$ où R_n est une grandeur négative homogène à une résistance, que l'on exprimera en fonction de R_1 , R_2 et R_3 .

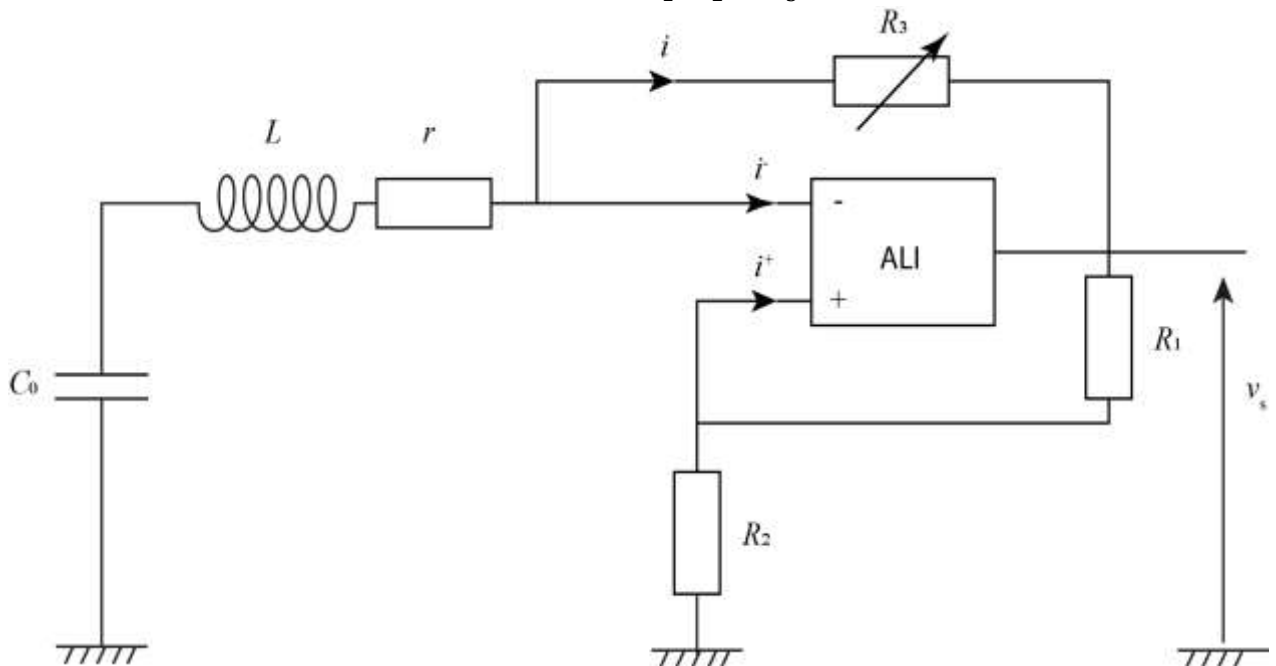


Figure 7: Oscillateur quasi-sinusoidal à résistance négative.

30. On place le montage de la figure 6 en série avec une bobine d'inductance propre L et de résistance interne r et le condensateur décrit précédemment de capacité C_0 comme représenté sur la figure 7. Établir une inégalité entre R_1 , R_2 et R_3 et r exprimant la condition pour laquelle on peut observer l'apparition d'oscillations spontanées dans le circuit électrique. Exprimer la fréquence f_0 de ces oscillations en fonction de L et C_0 . Pour une valeur de $L = 2,0$ mH, calculer la valeur de cette fréquence de résonance pour la valeur de C_0 calculée à la question 23.

31. En général, les ALI ont des défauts. Citer deux défauts des ALI généralement rencontrés.
32. Connaissant l'expression de $C_0(e)$ qui a été rappelée à la question 22, établir la relation entre la variation de fréquence de résonance Δf_0 et la variation de distance Δe pour une variation $\Delta e \ll e$: on exprimera Δf_0 en fonction de Δe , f_0 et e . Déterminer l'incertitude-type acceptable sur la mesure de f_0 nécessaire pour mesurer la distance e avec une incertitude de 0,1 nm.
33. Lorsque les armatures se déplacent suivant une loi $\Delta e = a \cos(2\pi f_1 t)$ avec $f_1 \ll f_0$ représenter l'allure du signal en sortie de l'oscillateur ? Citer une technique qui permet de mesurer a .

34. [QP] Niveau Terminale STL SPCL Systèmes oscillants

Un professeur de terminale STL propose d'inclure dans la séquence consacrée aux oscillateurs, dans une activité de cours sur les circuits L-C, le programme "python" suivant :

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
L=1e-2
C1=2.2e-6
C2=0.1e-6
T1=2*np.pi*(L*C1)**0.5
T2=2*np.pi*(L*C2)**0.5
t = np.linspace(0, T1, 256)
i1 = np.sin((2* np.pi /T1)*t)
i2 = np.sin((2* np.pi /T2)*t)
plt.xlabel("Temps(s)")
plt.ylabel("intensité")
plt.plot(t,i1)
plt.plot(t,i2)
plt.show()
```

Remarque : La fonction « linspace » permet d'obtenir un tableau unidimensionnel allant d'une valeur de début à une valeur de fin avec un nombre donné d'éléments.

- a. Analyser brièvement le programme et dessiner le résultat affiché à l'écran. Indiquer ce qui est implicite dans ce programme et qu'il sera utile de préciser aux élèves pendant l'activité. On attend au moins deux propositions.

Ce professeur souhaite ensuite concevoir un dispositif expérimental pour étudier le régime libre d'un système oscillant électrique en effectuant une acquisition numérique.

- b. Proposer et schématiser un circuit qui pourrait être réalisé par les élèves en activité expérimentale.
- c. Définir le protocole de mesures de la pseudo-période et justifier les critères expérimentaux qui permettent d'obtenir la mesure de la pseudo-période avec la meilleure précision possible.

Pour entamer la seconde partie du cours (systèmes oscillants en mécanique) le professeur propose une évaluation diagnostique des connaissances avec un questionnaire à choix multiples (QCM). Le résultat d'un élève au QCM correspondant est donné dans le document "réponse" à rendre avec le copie. Un extrait du programme est fourni en annexe 4.

- d. Corriger le QCM rendu par l'élève sur le **document-réponse fourni à rendre avec la copie.**

Les résultats de la classe sont les suivants :

Question	Résultat : Pourcentage d'élèves ayant coché (ou entouré) la réponse proposée
1	a- 77 % des élèves interrogés indiquent que la période d'oscillation augmente avec l'allongement initial du ressort b- 32 % c- 42 % d- 85 %
2	a- 34 % des élèves identifient la période des oscillations à 6 s b- 7 % c- 37 % d- Peu de réponses
4	a- 12 % indiquent qu'une valeur élevée de Q correspond à une résonance importante b- 16 % c- 72 %

- e. Analyser succinctement les résultats de cette évaluation, question par question, en identifiant les représentations des élèves ou les erreurs possibles. Indiquer quelles remédiations le professeur peut apporter.

2.3 Déplacement par céramique piézoélectrique

Dans le SFA le déplacement est assuré grâce à la céramique piézoélectrique représentée sur la figure 1.

35. Indiquer l'identité du scientifique qui a découvert la piézoélectricité. Expliquer en quelques mots le principe de la piézoélectricité. Citer une application de la piézoélectricité disponible au laboratoire de physique d'un lycée.

3. Application à l'étude de la condensation capillaire

L'appareil à force de surface est utilisé pour mesurer la force que la sphère exerce sur le plan. La sphère a un rayon $R = 3,29$ mm. Elle est constituée de pyrex et recouverte de platine. Le plan est un disque de pyrex recouvert de platine. L'ensemble du dispositif est placé en présence d'une vapeur d'heptane. La pression partielle en heptane reste inférieure à la pression de vapeur saturante à la température de l'expérience. Dans ces expériences, la sphère est approchée à vitesse lente du plan : typiquement 0,1 nm/s en partant de distances éloignées (supérieures à 100 nm). La valeur de la force enregistrée sur le capteur de force décrit dans la section 1 est enregistrée au cours du temps. La valeur algébrique de cette force est représentée figure 8 en fonction de la distance d'éloignement D , distance mesurée entre l'apex de la sphère et le plan. Une distance négative correspond à la situation où la sphère est rentrée en contact avec le plan, les deux surfaces en contact se déforment alors élastiquement. La convention utilisée pour le signe de la force est qu'une force positive correspond à une force s'appliquant sur le plan, dirigée du plan vers la sphère.

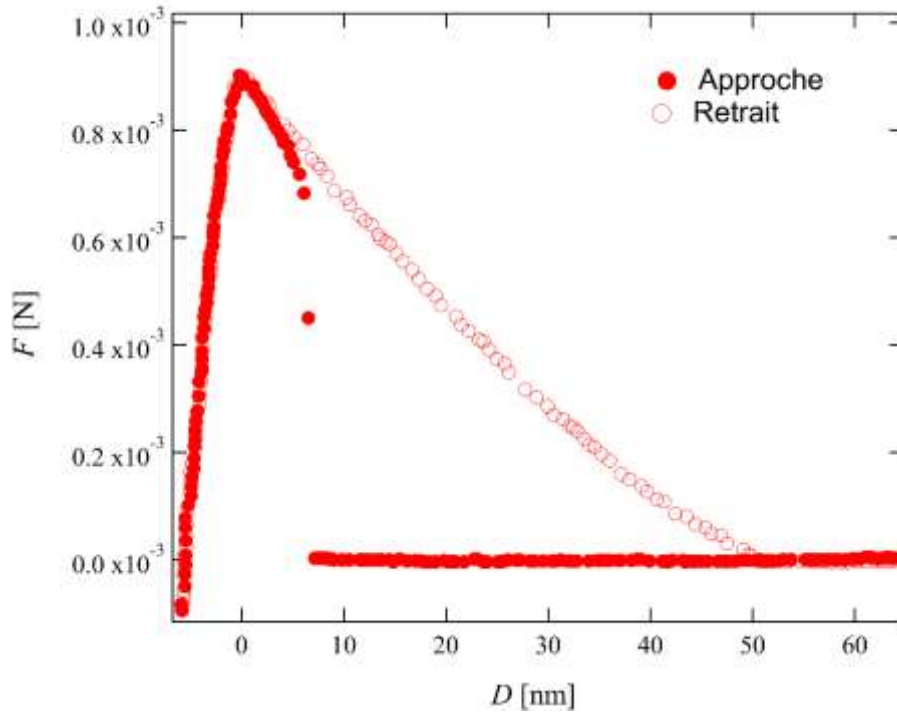


Figure 8 : Force exercée par la sphère de rayon $R = 3,29 \text{ nm}$ sur le plan en présence d'une vapeur d'heptane. Les symboles pleins correspondent à la séquence de l'expérience où la sphère s'approche du plan. Les symboles vides correspondent à la séquence où la sphère après avoir été en contact avec le plan est éloignée. Adapté de Crassous, J., Charlaix, E., and Loubet, J.-L. (1994). Capillary Condensation Between High-Energy Surfaces. An Experimental Study with a Surface Force Apparatus. Europhys. Lett. 28, 37–42.

36. Décrire et commenter le résultat expérimental observé sur la figure 8.
37. En supposant que la sphère et le plan peuvent être modélisées par deux masses ponctuelles de valeur 30 g, calculer la valeur de la force d'attraction gravitationnelle entre les deux masses à une distance de 3,29 cm. Comparer à la force mesurée dans l'expérience.
38. Comparer les forces obtenues dans cette expérience à la force électrostatique due au champ électrique entre les armatures du capteur capacitif calculée à la question 24. Commenter.
39. On observe sur la figure 8 que, pour une distance de séparation donnée entre le plan et la sphère, la valeur de la force que la sphère exerce sur le plan n'est pas la même selon que l'on approche ou que l'on éloigne la sphère. Nommer le phénomène observé et citer une autre situation physique où ce phénomène peut également être observé.

L'existence d'une force d'adhésion entre les surfaces est liée à la condensation capillaire due aux tensions interfaciales. À l'interface entre deux phases 1 et 2, l'énergie interfaciale s'exprime comme :

$$E_{12} = \gamma_{12} A_{12}$$

où γ_{12} est la tension interfaciale (énergie par unité de surface), et A_{12} l'aire de l'interface séparant les milieux 1 et 2. Remarque : quand un des deux milieux est un gaz, la tension interfaciale est aussi appelée tension superficielle.

40. Un protocole classiquement utilisé pour mesurer la tension superficielle $\gamma = \gamma_{LG}$ d'un liquide est la balance d'arrachement dans laquelle un opérateur exerce une force de traction \vec{F} sur une lame solide plongée dans un liquide, jusqu'à l'arrachement comme représenté sur la figure 9. On note Oz, l'axe vertical de vecteur unitaire \vec{e}_z dirigé vers le haut.

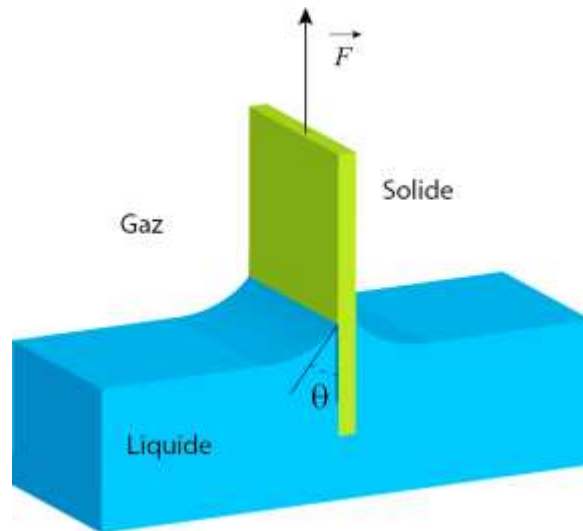


Figure 9: Principe de la balance d'arrachement.

On note p le périmètre du ménisque sur la lame (on se place souvent dans le cas où les lames sont de faible épaisseur et dans ce cas, $p \approx 2L$ où L est la largeur de la lame).

- Énumérer l'ensemble des forces qui s'appliquent sur la lame lorsqu'elle est partiellement immergée.
- Montrer que l'évolution de l'énergie interfaciale totale dE du système {gaz+liquide+solide} lorsque la lame est tirée vers le haut d'une quantité infinitésimale $dz > 0$ en fonction des énergies interfaciales γ_{SL} et γ_{SG} associées respectivement aux interfaces solide-liquide, solide-gaz, du périmètre p et de dz s'exprime comme :

$$dE = 2L(\gamma_{SG} - \gamma_{SL})dz$$

- On identifie la variation d'énergie calculée précédemment au travail de la force que doit exercer un opérateur lors de cette transformation $\vec{F}_l = \frac{dE}{dz} \vec{e}_z$. En utilisant l'expression de la loi de Young-Dupré qui relie les trois énergies interfaciales intervenant au niveau de la ligne triple et l'angle de contact θ du liquide sur le solide (défini sur la figure 9):

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma},$$

calculer \vec{F}_l en fonction de γ , L et $\cos\theta$.

- Calculer la valeur de la norme de la force totale \vec{F} que doit exercer un opérateur, au moment de l'arrachement, pour extraire une lame de platine d'épaisseur $e = 150 \mu\text{m}$ ($\rho_{\text{platine}} = 2,15 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), de largeur $L = 23,85 \text{ mm}$ et de hauteur $H = 10,0 \text{ mm}$ d'un bain d'heptane de tension superficielle $\gamma_{\text{heptane}} = 20,5 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$. On se place en situation de mouillage total : $\theta = 0^\circ$.

41. On admet qu'un ménisque s'est spontanément condensé entre la sphère et le plan quand la sphère et le plan se sont approchés en dessous d'une distance typique de 5 nm déterminée expérimentalement sur la figure 8 et qu'on a représenté sur la figure 10. On se place dans le cas où $z \ll R$. On suppose que h est à peu près constant au cours du déplacement de la sphère, pour des déplacements infinitésimaux.

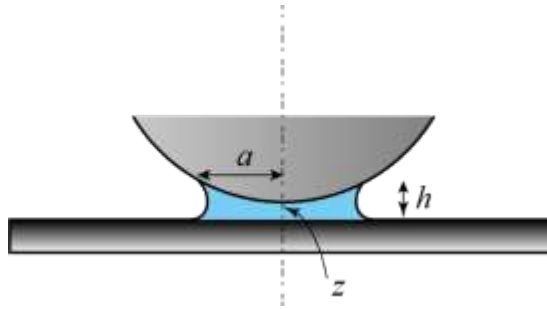


Figure 10 : Ménisque entre un plan et une sphère. On note D la distance entre l'apex de la sphère et le plan et h , la hauteur du ménisque

- Montrer que : $a^2 = R^2 - (R - (h - z))^2$
Simplifier cette expression dans le cadre de l'approximation proposée dans l'énoncé.
- Justifier que lors d'un déplacement infinitésimal de la sphère d'une quantité dz , par rapport au plan, on peut considérer que la variation d'énergie interfaciale du système {solide+liquide+gaz} peut s'écrire :

$$dE = 2\pi a(\gamma_{SL} - \gamma_{SG})da,$$

où da est la variation infinitésimale du rayon a .

- En déduire l'expression de la force \vec{F} exercée par le ménisque sur le plan, liée à la présence du ménisque appelée force d'adhésion en fonction de R , γ et θ .
42. Calculer la valeur de la norme de la force d'adhésion pour une sphère de rayon $R = 3,29$ mm, de l'heptane ($\gamma_{\text{heptane}} = 20,5$ mN · m⁻¹) et un mouillage total. Comparer au résultat expérimental de la figure 8.

43. Résolution de problème.

Le phénomène de condensation capillaire est un phénomène très général d'apparition de ménisques entre des surfaces en contact en présence de vapeur. Il peut se produire dans un tas de billes de verre. Estimer la longueur maximale d'une chaîne verticale de billes de rayon $R_b = 100$ µm maintenues par adhésion capillaire.

Discuter la validité ou la non-validité de ce modèle pour justifier la tenue mécanique des châteaux de sable.

4. Application à la nanorhéologie

On cherche dans cette partie à comprendre ce qui se passe quand on déplace la sphère par rapport au plan, à l'intérieur d'un liquide. On s'intéresse dans cette partie uniquement à la mécanique des fluides newtoniens en écoulement incompressible dont la viscosité dynamique est notée η et la masse volumique ρ .

4.1 Généralités sur la mécanique des fluides

- Rappeler la dimension de la viscosité dynamique. La viscosité dynamique de l'air est de l'ordre de 10⁻⁵ S.I. dans les conditions usuelles de température et de pression. Donner l'ordre de grandeur de la valeur de la viscosité dynamique de l'eau à température ambiante. Rappeler l'influence de la température sur la viscosité des liquides et des gaz.
- Préciser la définition des fluides newtoniens. Donner un exemple de fluide non newtonien.

46. On note pression $p(M, t)$ le champ eulérien de pression dans le fluide dont le champ eulérien de vitesse est noté $\vec{v}(M, t)$. L'équation locale pour la dynamique d'un fluide newtonien incompressible est de la forme :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) \vec{v} \right) = -\overrightarrow{\text{grad}} p + \rho \vec{g} + \eta \Delta \vec{v} \quad (1)$$

a. Rappeler le nom de cette équation et préciser ce que représente le terme

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) \vec{v}.$$

b. Identifier le terme de transport diffusif et le terme de transport convectif de la quantité de mouvement dans cette équation.

c. Définir le nombre de Reynolds Re . Donner son expression pour un écoulement dans lequel la longueur caractéristique est L , la vitesse caractéristique est U , la viscosité dynamique η et la masse volumique ρ .

47. [QP] Dans la séquence d'enseignement de mécanique des fluides de terminale spécialité physique-chimie, en lien avec la relation de Bernoulli, on s'intéresse à quelques difficultés didactiques à travers deux expériences. L'annexe 5 rappelle l'extrait de programme correspondant.

a. Expérience de Torricelli.

Soit un réservoir de hauteur h , et de section S . On perce un trou en B de section $s \ll S$ (figure 11).

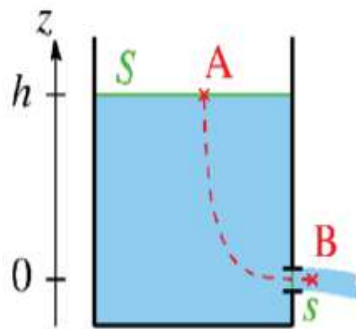


Figure 11 : Figure issue de ressources EDUSCOL. Réservoir percé d'un trou.

La vitesse d'écoulement est donnée par la relation de Torricelli : $v = \sqrt{2gh}$.

Ce résultat est analogue à ce que la mécanique du point annoncerait pour la chute libre. Préciser les raisons de ce constat en analysant le modèle et démontrer la formule de Torricelli.

b. Expérience de Venturi.

Considérons une canalisation avec un rétrécissement central représentée sur la figure 12.

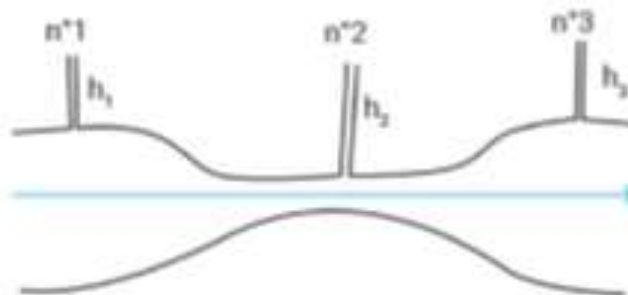


Figure 12: Tube de Venturi. Figure issue d'un document EDUSCOL.

Pour un écoulement homogène, incompressible, permanent et parfait la relation de Bernoulli sur une ligne de courant, prise ici horizontale, permet de conclure que les pressions du fluide sur les prises de mesure 1 et 3 sont égales.

- Schématiser sur votre copie le dispositif en représentant les niveaux h_1 , h_2 et h_3 attendus à la suite de cette analyse.
- Expliciter une difficulté qui apparait pour l'élève lors de la modélisation pour rendre compte de ces niveaux attendus.
- L'expérience est-elle conforme à cet attendu ? Justifier la réponse.

c. Un élève s'interroge sur les applications concrètes de la relation de Bernoulli et les domaines d'application. Citer deux exemples.

4.2 Ecoulement entre une sphère et un plan

48. D'une façon générale, on peut écrire la force de traînée \vec{F}_T que subit une sphère de rayon R qui se déplace dans un fluide à une vitesse $\vec{V} = V \vec{e}_z$ loin d'un obstacle par la relation :

$$\vec{F}_T = -\frac{1}{2}\rho V^2 \pi R^2 C_D \vec{e}_z$$

où ρ est la masse volumique du fluide, C_D le coefficient de traînée qui est une fonction du nombre de Reynolds.

- a. On représente (figure 13) la valeur du coefficient de traînée proposée par Cliff, Grace, and Weber (*Bubbles, Drops, and Particles*, Academic Press, 1978) en fonction du nombre de Reynolds calculé avec le diamètre de la sphère comme longueur caractéristique de la sphère.

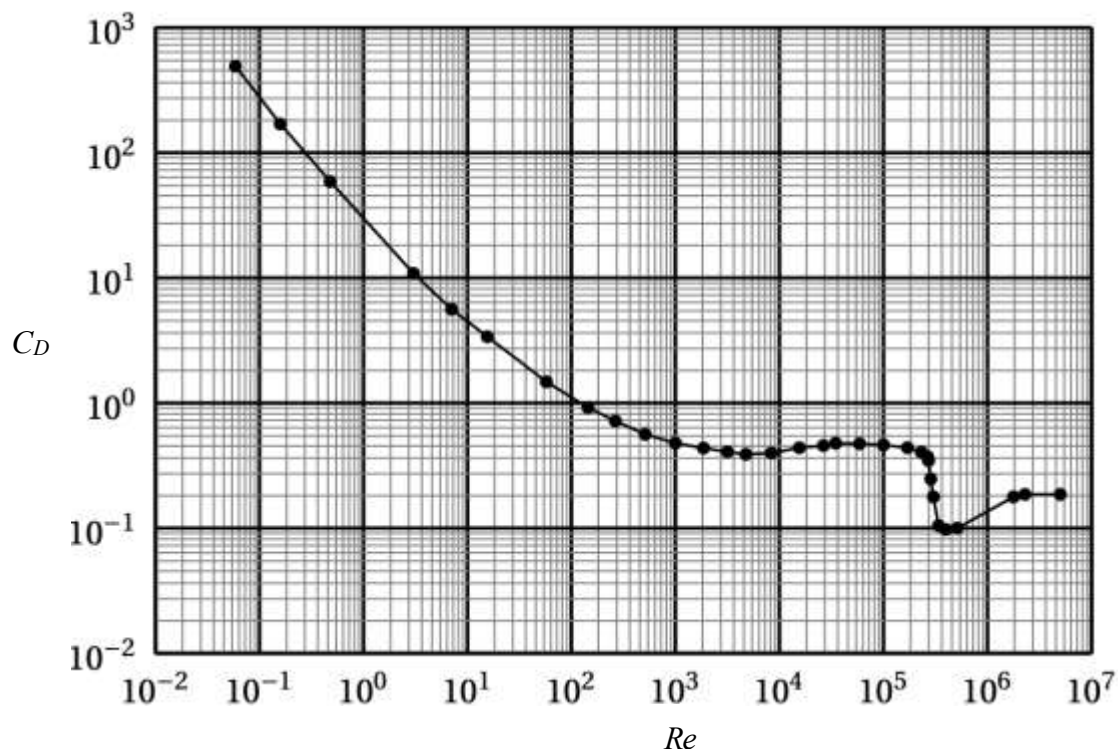


Figure 13: Coefficient de traînée C_D en fonction du nombre de Reynolds construit avec le diamètre comme longueur caractéristique.

Montrer, à partir des données de la figure 13, que pour des nombres de Reynolds faibles, $Re \ll 1$, il est possible de modéliser la fonction $C_D(Re)$ une loi de puissance $C_D = A(Re)^n$ avec n et A que l'on déterminera graphiquement.

b. En déduire l'expression de la force \vec{F}_T pour $Re \ll 1$.

49. L'octaméthyltrichlorosilane (OMCTS) est un liquide dont la viscosité tabulée est d'environ $2 \cdot 10^{-3}$ SI. Sa masse volumique est $\rho_{OMCTS} = 0,96 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Pour une vitesse typique de $V = 5 \text{ nm/s}$ et une sphère de rayon $R = 1,0 \text{ cm}$, calculer la valeur du nombre de Reynolds. En déduire un ordre de grandeur de la valeur de la norme de la force traînée.

50. Pour vérifier si la viscosité des liquides est modifiée à nano-échelle, la sphère et le plan d'un SFA sont plongés dans de l'OMCTS.

La distance D entre l'apex de la sphère de rayon $R = 1,0 \text{ cm}$ et le plan est modifiée continument à vitesse d'approche constante : $V = dD/dt = -5 \text{ nm/s}$ pour des distances D comprises entre 1 et 20 nm. La force F exercée par la sphère sur le plan en fonction de la distance D est représentée sur la figure 14. Décrire cette courbe. Comparer la norme de la force mesurée à la norme de la force de traînée calculée en question 49.

51. En fait, lorsqu'on étudie la force d'approche d'une sphère proche d'une paroi, les lignes de vitesse du fluide autour de la sphère sont modifiées et la force permettant le déplacement est elle aussi modifiée. Pour calculer l'expression de la force entre la sphère et le plan lorsque la distance D est très faible ($D \ll R$), il est naturel de chercher F sous la forme d'une fonction du rayon de la sphère R , de la vitesse d'approche $V = dD/dt$, de la viscosité du liquide η et de la distance sphère-plan D :

$$F = F(V, R, \eta, D)$$

Justifier par une analyse dimensionnelle que la force s'exprime nécessairement comme :

$$F = \eta R V \phi \left(\frac{R}{D} \right)$$

où ϕ est une fonction.

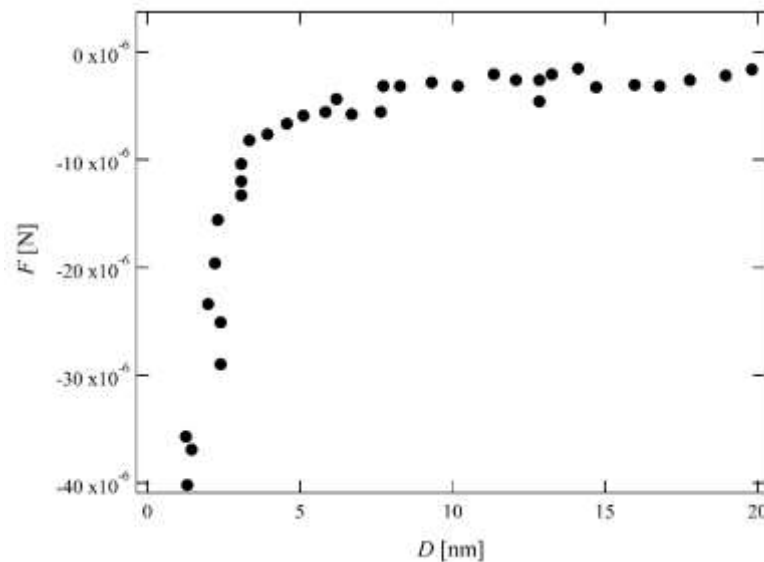


Figure 14 : Force exercée sur le plan lors de l'approche de la sphère de rayon $R = 1,0 \text{ cm}$ en fonction de la distance d'approche D dans un SFA pour lequel la sphère et le plan sont plongés dans de l'OMCTS. Les données viennent de L. Bureau, *Rate effects on layering of a confined linear alkane*, Physical Review Letters. 99 (2007).

52. Préciser à quelle situation physique correspondrait la limite où $x = \frac{R}{D}$ tend vers 0. En utilisant le résultat de la question 48, proposer la limite de $\phi(x)$ quand x tend vers 0 ?
53. Sur la figure 15, on a tracé $1/F$ en fonction de D à partir des données de la figure 14. Interpréter la dispersion des données à grande distance. Expliquer en quoi cette représentation est compatible avec les résultats de la littérature scientifique qui prévoient que $\phi(x) \approx x$ pour $x \geq 1$. Estimer la valeur de la viscosité de l'OMCTS à partir de ces données expérimentales.
54. L'ajustement des données expérimentales n'est pas totalement compatible avec un ajustement linéaire. Il faut plutôt utiliser un modèle affine qui fait apparaître la distance D_0 définie sur la figure 15. Proposer une explication possible à cet écart.

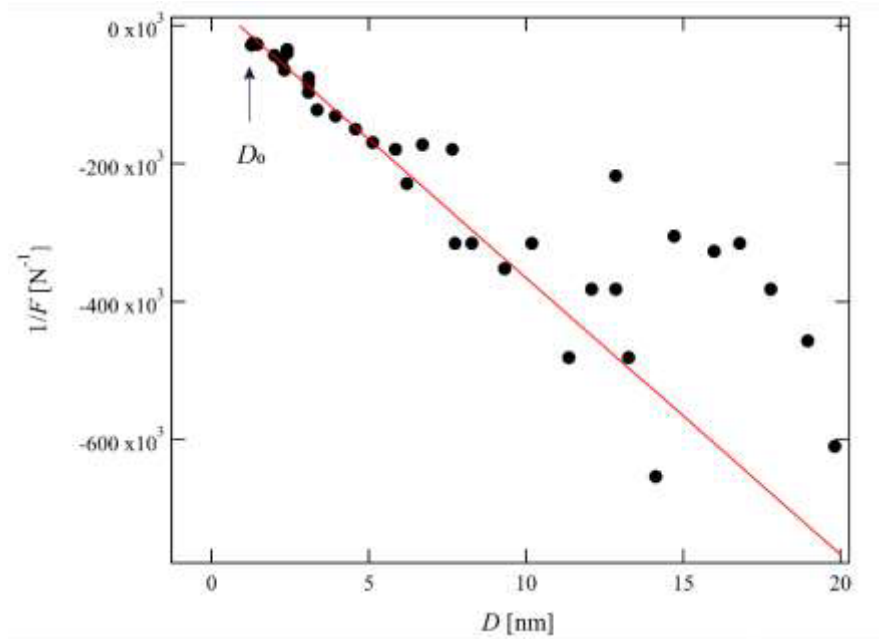


Figure 15 : Inverse de la force F exercée sur le plan (exprimée en N) en fonction de la distance sphère-plan D (en nm). Données de la figure 14.

Annexes

Annexe 1 : Extraits de programmes de cycle 3 et cycle 4

Cycle 3

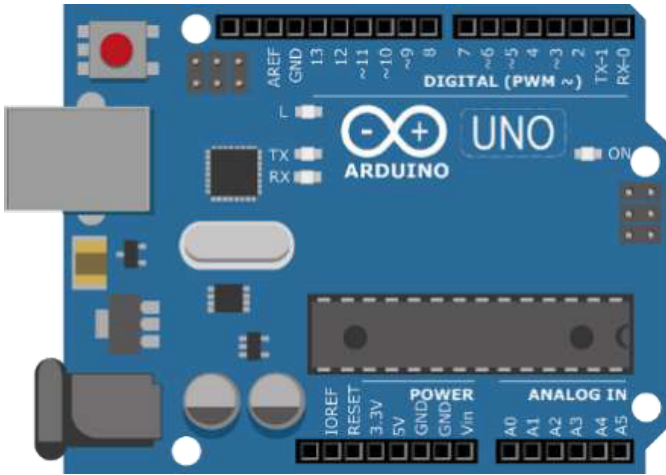
Observer et décrire différents types de mouvements	
<p>Décrire un mouvement et identifier les différences entre mouvements circulaire ou rectiligne.</p> <ul style="list-style-type: none">- Mouvement d'un objet (trajectoire et vitesse : unités et ordres de grandeur).- Exemples de mouvements simples : rectiligne, circulaire. <p>Élaborer et mettre en œuvre un protocole pour appréhender la notion de mouvement et de mesure de la valeur de la vitesse d'un objet.</p> <ul style="list-style-type: none">- Mouvements dont la valeur de la vitesse est constante ou variable (accélération, décélération) dans un mouvement rectiligne.	<p>L'élève part d'une situation où il est acteur en mouvement (courant, faisant du vélo, passager d'un train ou d'un avion), à celles où il n'est qu'observateur immobile (des observations faites dans la cour de récréation ou lors d'une expérimentation en classe, jusqu'à l'observation du ciel : mouvement des planètes et des satellites artificiels à partir de données fournies par des logiciels de simulation).</p>

Cycle 4

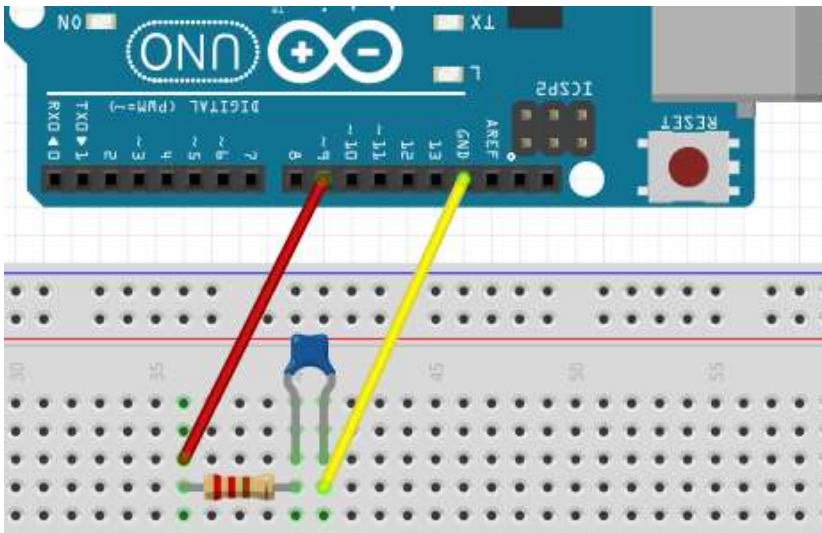
Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
Caractériser un mouvement	
<p>Caractériser le mouvement d'un objet. Utiliser la relation liant vitesse, distance et durée dans le cas d'un mouvement uniforme.</p> <ul style="list-style-type: none">- Vitesse : direction, sens et valeur.- Mouvements rectilignes et circulaires.- Mouvements uniformes et mouvements dont la vitesse varie au cours du temps en direction ou en valeur.- Relativité du mouvement dans des cas simples.	<p>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.</p> <p>Utiliser des animations des trajectoires des planètes, qu'on peut considérer dans un premier modèle simplifié comme circulaires et parcourues à vitesse constante.</p> <p>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.</p>

Annexe 2 : Activité élève

Le montage utilise un microcontrôleur de type Arduino®, pour son alimentation, comme pour l'acquisition.



Le cablage électrique est le suivant :



Expérimentation :

On utilise le code informatique suivant pour alimenter le circuit électrique :

```
void setup() {  
  pinMode(9, OUTPUT);  
}  
void loop() {  
  digitalWrite(9, LOW);  
  delay(5);  
  digitalWrite(9, HIGH);  
  delay(5);  
}
```

Il s'agit ensuite de mesurer au cours du temps les valeurs de la tension aux bornes du condensateur et de les envoyer vers le moniteur série. La nécessité de prendre des mesures à intervalle de temps régulier oblige à intégrer des boucles « for » à l'intérieur du « void loop » :
 On transfère ensuite ces valeurs dans le tableur-grapheur (en mode csv)

```
float valeur ;           // définition de la variable « valeur » comme un décimal
float tension ;        // définition de la variable « tension » comme un décimal

void setup() {
  Serial.begin(115200) ; // initialisation de la communication avec le moniteur série
  pinMode(9, OUTPUT) ;  // la broche 9 est définie comme une sortie
}
void loop() {
  digitalWrite(9, LOW) ; // la broche 9 est placée à son niveau bas de tension (0V)

  for (int i=0 ; i<300 ;i++) { // on paramètre une boucle de 300 itérations
    valeur=analogRead(A0) ;
    tension=valeur*5/1023 ;
    Serial.print(tension) ; // la valeur tension est envoyée au port série
    Serial.print(« \t ») ; // met un espace dans les valeurs du moniteur série
    Serial.println(millis()) ;
    delay(5) ; //pause de 5 ms
  }

  digitalWrite(9, HIGH) ;
  for (int i=0 ; i<300 ;i++){
    valeur=analogRead(A0) ;
    tension=valeur*5/1023 ;
    Serial.print(tension) ;
    Serial.print(« \t ») ;
    Serial.println(millis()) ;
    delay(5) ;
  }
} // fin du void loop
```

Exploitation (Partie théorique)

- 1- Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C aux bornes du condensateur lors de sa charge. On suppose le condensateur initialement déchargé.
- 2- Déterminer la solution de l'équation différentielle, équation temporelle de la tension aux bornes du condensateur.
- 3- Montrer que cette solution peut s'écrire également sous la forme :

$$\ln(E - u_C) = \ln E - \frac{t}{\tau}$$

Annexe 3 : Extrait du programme de Terminale spécialité physique-chimie

3. Étudier la dynamique d'un système électrique	
Notions et contenus	Capacités exigibles Activités expérimentales support de la formation
<p>Intensité d'un courant électrique en régime variable.</p> <p>Comportement capacitif.</p> <p>Modèle du condensateur.</p> <p>Relation entre charge et tension ; capacité d'un condensateur.</p> <p>Modèle du circuit RC série : charge d'un condensateur par une source idéale de tension, décharge d'un condensateur, temps caractéristique.</p> <p>Capteurs capacitifs.</p>	<p>Relier l'intensité d'un courant électrique au débit de charges</p> <p>Identifier des situations variées où il y a accumulation de charges de signes opposés sur des surfaces en regard.</p> <p>Citer des ordres de grandeur de valeurs de capacités usuelles.</p> <p>Identifier et tester le comportement capacitif d'un dipôle.</p> <p>Illustrer qualitativement, par exemple à l'aide d'un microcontrôleur, d'un multimètre ou d'une carte d'acquisition, l'effet de la géométrie d'un condensateur sur la valeur de sa capacité.</p> <p>Établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa charge par une source idéale de tension et dans le cas de sa décharge.</p> <p>Expliquer le principe de fonctionnement de quelques capteurs capacitifs.</p> <p>Étudier la réponse d'un dispositif modélisé par un dipôle RC.</p> <p>Déterminer le temps caractéristique d'un dipôle RC à l'aide d'un microcontrôleur, d'une carte d'acquisition ou d'un oscilloscope.</p>

Annexe 4 : Extrait du programme de Terminale STL SPCL

Ondes

- **Ondes mécaniques et électromagnétiques**

Cette partie est une introduction aux propriétés des ondes qu'elles soient électromagnétiques ou mécaniques. Elle présente les notions développées dans les parties suivantes : des ondes pour mesurer, pour agir et pour transmettre. Ces notions sont introduites à partir de situations expérimentales. Après une caractérisation expérimentale des oscillateurs, les propriétés des ondes sont présentées. On s'intéresse ensuite à la production des ondes sonores et électromagnétiques.
 Cette partie est traitée sans développement formel excessif.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Phénomènes vibratoires ; grandeurs vibratoires.	<ul style="list-style-type: none"> - Identifier les grandeurs vibratoires caractérisant le système étudié. <p>Capacité expérimentale :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Concevoir et mettre en œuvre un protocole pour capter un signal vibratoire avec un capteur adapté.
Systèmes oscillants en mécanique et en électricité. Aspects énergétiques ; amortissement. Oscillations auto-entretenues : source de signal.	<ul style="list-style-type: none"> - Caractériser les oscillations libres d'un système : oscillations quasi-périodiques, apériodiques, critiques. - Comparer des oscillateurs dans des domaines différents de la physique ; indiquer les analogies. - Caractériser quantitativement des oscillations harmoniques (amplitude, période propre) et des oscillations amorties (période et temps caractéristique d'amortissement) à partir de résultats expérimentaux. - Identifier les échanges d'énergie mis en jeu dans un phénomène oscillatoire en mécanique et en électricité. - Expliquer le rôle d'un dispositif d'entretien d'oscillations. <p>Capacités expérimentales :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Concevoir et mettre en œuvre un protocole pour étudier le régime libre d'un système oscillant : <ul style="list-style-type: none"> - mesurer la pseudopériode et évaluer le temps caractéristique d'amortissement en régime pseudopériodique ; - effectuer le bilan énergétique du système, l'expression des différentes formes d'énergie étant fournie. <p>Capacités numériques :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Acquérir un signal harmonique et ajuster les paramètres d'un modèle mathématique pour en déterminer les caractéristiques (amplitude, fréquence, période, phase à l'origine). - Utiliser un langage de programmation ou un tableur pour exploiter des données et effectuer un bilan énergétique.
Oscillations forcées. Facteur de qualité. Résonance.	<ul style="list-style-type: none"> - Décrire un phénomène de résonance en électricité et en mécanique et le caractériser par sa fréquence de résonance et son facteur de qualité. - Relier qualitativement facteur de qualité et amortissement en régime libre.

Annexe 5 : Extrait de programmes Terminale spécialité physique-chimie

3. Modéliser l'écoulement d'un fluide	
Poussée d'Archimède. Écoulement d'un fluide en régime permanent.	Expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède. Utiliser l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède. <i>Mettre en œuvre un dispositif permettant de tester ou d'exploiter l'expression de la poussée d'Archimède.</i> Exploiter la conservation du débit volumique pour déterminer la vitesse d'un fluide incompressible.
Débit volumique d'un fluide incompressible. Relation de Bernoulli. Effet Venturi.	Exploiter la relation de Bernoulli, celle-ci étant fournie, pour étudier qualitativement puis quantitativement l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent. <i>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'écoulement permanent d'un fluide et pour tester la relation de Bernoulli.</i>

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DOCUMENT REPONSE A RENDRE AVEC LA COPIE

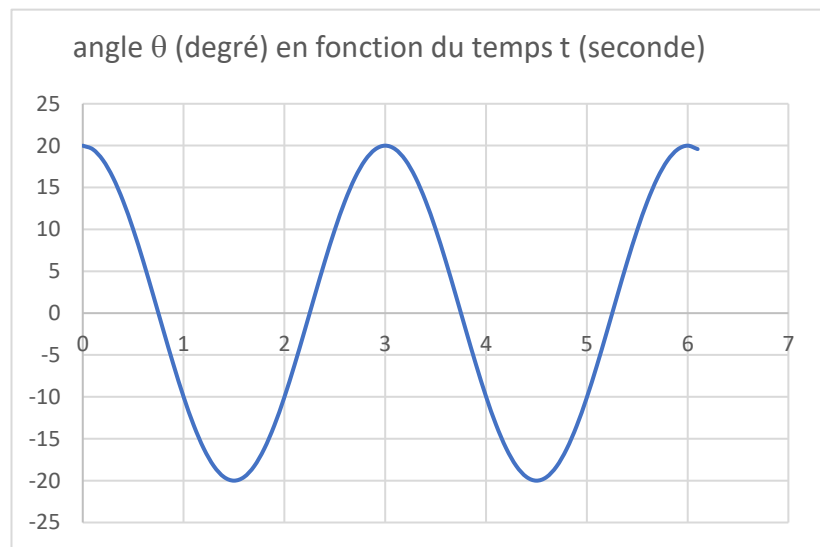
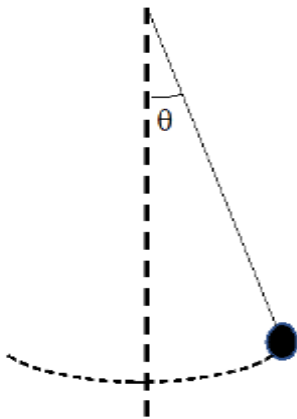
Document Réponse : QCM – copie élève (réponses élève = lettres entourées)

Consigne : entourer les affirmations justes

1- Lors des oscillations libres d'un pendule élastique (masse accrochée à un ressort) :

- a. La période d'oscillation augmente si on allonge un peu plus le ressort avant de le lâcher
- b. La période des oscillations est indépendante de la masse
- c. L'énergie mécanique de l'oscillateur augmente légèrement à proximité du point d'équilibre
- d. Les oscillations sont quasi sinusoïdales

2- On étudie les oscillations d'un pendule pesant en mesurant l'angle qu'il fait par rapport à la verticale :



- a- La période des oscillations est égale à 6 s
- b- L'amplitude des oscillations diminue significativement au cours du temps
- c- A la date $t = 1,5$ s, la vitesse du pendule est maximale
- d- La fonction qui représente l'évolution de l'angle en fonction du temps est :

$$\theta(t) = \theta_{\max} \cos(t)$$

3- On entretient les oscillations d'un système mécanique en utilisant un oscillateur extérieur. On mesure l'amplitude des oscillations pour différentes fréquences d'excitation. Comme pour les oscillateurs électriques une "résonance" apparaît quand la fréquence d'excitation est égale ou proche de f_0 la fréquence propre du système.

On rappelle la définition du facteur de qualité vue dans l'activité « oscillations électriques » :

$$Q = \frac{f_0}{\beta}, \text{ où } \beta \text{ est l'intervalle de fréquences entre lesquelles l'amplitude est supérieure à } \frac{\theta_{\max}}{\sqrt{2}}$$

(bande passante). Une valeur élevée de Q signifie :

- a. Que la résonance est forte
- b. Que la résonance est faible
- c. Je ne sais pas