

Physique : DM9

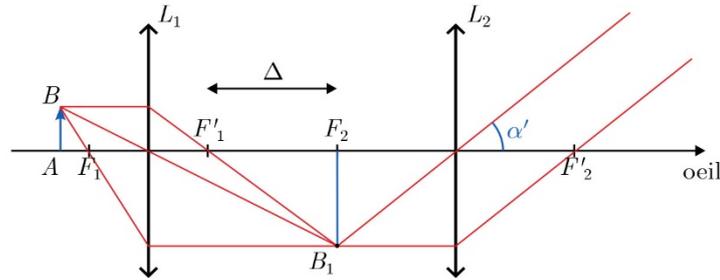
Problème 1 : Des oiseaux haut en couleur

1 Les couleurs structurales

1.1 Le bleu de la perruche

Q1. Un œil observe sans fatigue un objet situé à l'infini. On souhaite donc ici l'image finale A_2 en sortie de L_2 doit se situer à l'infini. Alors l'image intermédiaire A_1B_1 doit se situer dans le plan focal objet de la seconde lentille. Il faut notamment que $A_1 = F_2$.

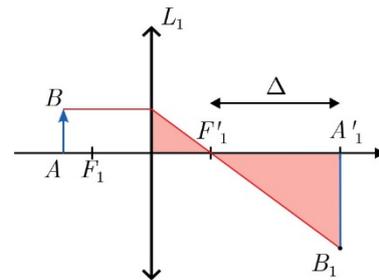
Q2. Schéma optique des rayons lumineux :



Q3. Grandissement transversal de l'objectif :

$$\gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{F'_1A_1}}{\overline{F'_1O}} = \frac{\overline{F'_1F'_2}}{-\overline{OF'_1}}$$

$$\gamma_1 = -\frac{\Delta}{f'_1}$$

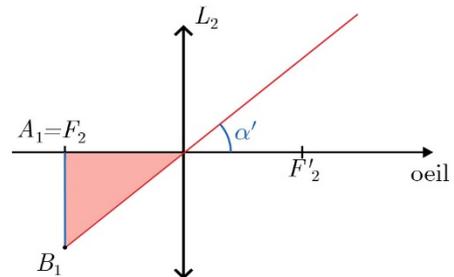


Q4. Diamètre angulaire d'observation

$$\tan(\alpha') \simeq \alpha' \quad \text{dans les conditions de Gauss}$$

$$\alpha' = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2A_1}} = \frac{\gamma_1 \times \overline{AB}}{\overline{O_2F_2}} = \frac{-\Delta \times h}{f'_1 \times (-f'_2)}$$

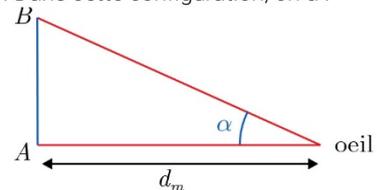
$$\alpha' = \frac{h\Delta}{f'_1 f'_2}$$



Q5. $d_m \simeq 25$ cm correspond au *punctum proximatum*, point le plus proche auquel l'œil peut voir net. d_M correspond au *punctum remotum*, point le plus éloigné auquel l'œil peut voir net, qui se situe à l'infini pour un œil sans défaut.

Q6. Au *punctum proximatum*, l'objet est vu sous le plus grand diamètre angulaire. Dans cette configuration, on a :

$$\tan(\alpha) \simeq \alpha = \frac{h}{d_m}$$



Q7. Grossissement commercial du microscope :

$$G_c \triangleq \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{h\Delta}{f'_1 f'_2} \times \frac{d_m}{h} = \frac{d_m \Delta}{f'_1 f'_2} \quad (1)$$

Application numérique : $G_c \simeq 167$

Q8. La résolution angulaire de l'œil est $\varepsilon = 1'$. La distance angulaire minimale vue à travers le microscope est donc : $\alpha_m = G_c \times \varepsilon = 167' = 2,8^\circ$.

Q9. En mesurant sur la photo 3 du sujet, on peut estimer la distance entre deux barbules à environ $30 \mu\text{m}$.

Q10. Pour $d_m = 25 \text{ cm}$, cela correspond à un diamètre angulaire à l'œil nu de : $\alpha \simeq \frac{30 \mu\text{m}}{25 \text{ cm}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ rad} = 0,4'$. Ceci est en dessous de la limite de résolution angulaire $\varepsilon = 1'$.

En revanche, avec un grossissement $G_c = 167$, le diamètre angulaire sera $\alpha' \simeq 20 \text{ mrad} \simeq 69'$: on peut distinguer les barbules au microscope.

Q11. Lors du passage de l'onde lumineuse pour les microgranules, il y a diffusion Rayleigh de la lumière avec une puissance moyenne diffusée à travers une sphère :

$$\langle P \rangle = \alpha \omega^4$$

Lorsqu'on éclaire avec de la lumière blanche, le bleu (avec $\omega_{\text{bleu}} \sim 2 \times \omega_{\text{rouge}}$) est alors environ $2^4 = 16$ fois plus diffusé que le rouge ! Ce sera donc le bleu et le violet qui seront les couleurs dominantes observées en diffusion.

Les autres radiations de plus faible pulsation / fréquence qui sont moins diffusées, sont principalement transmises comme indiqué sur la figure 5 de l'énoncé.

Q12. On a donc une meilleure transmission des ondes de faibles fréquences (rouge, orange, jaune...), et une perte de puissance des radiations de hautes fréquences (bleu, violet) qui sont diffusées sur les côtés. On peut donc dire que cette partie du plumage agit comme un filtre passe-bas en transmission.

1.2 Du vert clair au violet pour le canard colvert

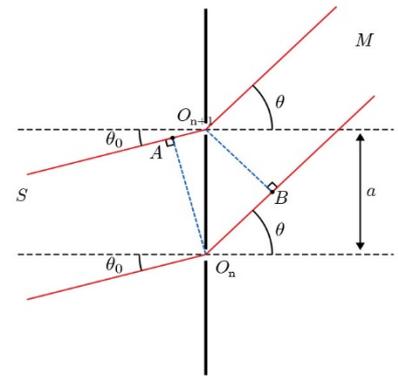
Q13. Les documents nous précisent que « chaque microlamelle se comporte comme un petit miroir réfléchissant la lumière ». La structure constitue donc un réseau par réflexion.

Q14. Expression de la différence de marche entre deux ouvertures pour un réseau en transmission. Le théorème de Malus permet de compléter le schéma et d'écrire l'égalité entre les chemins optiques suivants :

$$\begin{cases} (SA) & = (SO_n) \\ (O_{n+1}M) & = (BM) \end{cases}$$

On exprime alors la différence de marche avec des relations trigonométriques :

$$\begin{aligned} \delta(M) &= (SO_{n+1}M) - (SO_nM) \\ &= (SO_{n+1}) + (O_{n+1}M) - (SO_n) - (O_nM) \\ &= (AO_{n+1}) - (O_nB) \\ \delta(M) &= a \sin(\theta_0) - a \sin(\theta) \end{aligned}$$



Q15. Les ondes interfèrent toutes constructivement si : $\delta(M) = k \times \lambda_0$ avec λ_0 la longueur d'onde et k un entier relatif.

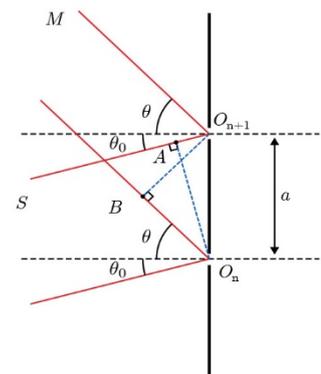
Q16. Dans le cas d'un réseau par réflexion, le calcul est modifié par un signe \oplus dans le calcul de la différence de marche, conformément à ce schéma.

On a alors

$$\delta(M) = a \sin(\theta_0) + a \sin(\theta) \quad (2)$$

Donc pour des interférences constructives avec $\delta = k\lambda_0$

$$\sin(\theta_k) + \sin(\theta_0) = k \frac{\lambda_0}{a} \quad \text{avec } k \in \mathbb{Z} \quad (3)$$



Q17. Pour le schéma de l'énoncé, le canard est éclairé par le soleil en incidence normale sur les plumes ($\theta_0 = 0$). On observe à deux angles différents. On peut en première approche ne considérer que les ordres $k = \pm 1$ de diffraction, car ce sont ceux dont la luminosité est la plus puissante. Par ailleurs on pourra voir par le calcul que considérer les ordres supérieurs ne donnent des interférences constructives que pour des rayonnements hors du domaine du visible.

– Pour l'observateur A placé à $\theta = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$; la couleur correspondant à des interférences constructives pour $k = 1$

est telle que :

$$\sin(90^\circ) = 1 = \frac{\lambda_0}{a}$$

On trouve $\lambda_0 = a = 560 \text{ nm}$, qui correspond à du vert.

- Pour l'observateur B placé à $\theta = 45^\circ = \frac{\pi}{4}$; la couleur correspondant à des interférences constructives pour $k = 1$ est telle que :

$$\sin(45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{\lambda_0}{a}$$

On trouve $\lambda_0 = 396 \text{ nm}$, qui correspond à du violet.

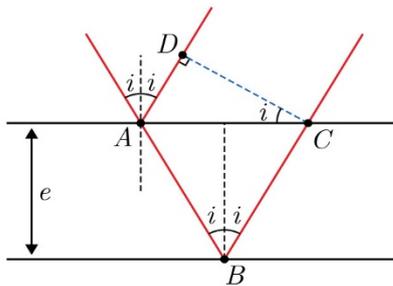
On doit ici faire le lien avec la photo 4 de l'énoncé. Ce n'est pas forcément très explicite car les canards photographiés ne sont pas dans le même sens que sur le schéma de la figure 7, et que l'on ne connaît pas la direction d'éclairage.

En supposant que les canards sont éclairés parallèlement à l'image, depuis la droite, on voit que le canard au centre qui fait face à la droite serait alors observé à 90° et que son plumage de tête est bien vert. En revanche, le canard à droite de l'image qui fait face aux trois quarts à la photographique, correspondrait alors à une observation à 45° , et que son plumage de tête est bien violet sous cet angle.

1.3 Le colibri aux milles couleurs

Q18. Le calcul de différence de marche est celui de l'interféromètre de Michelson en configuration lame d'air. Il peut se faire de deux façons :

Avec le théorème de Malus en différents points :



Dans le triangle ABC composé de deux triangles rectangles identiques :

$$AB = BC = \frac{e}{\cos(i)}$$

$$AC = 2e \tan(i)$$

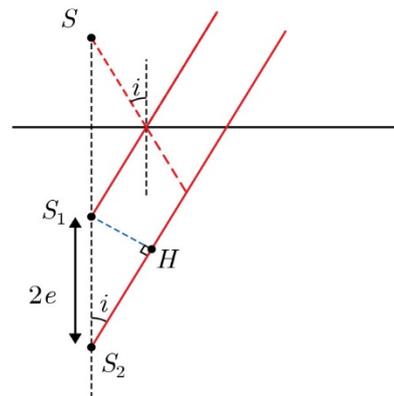
Dans le triangle ACD rectangle en D

$$AD = AC \sin(i) = 2e \tan(i) \sin(i)$$

Pour la différence de marche :

$$\begin{aligned} \delta &= (SM)_2 - (SM)_1 \\ &= AB + BC - AD \\ &= \frac{2e}{\cos(i)} - 2e \tan(i) \sin(i) \\ &= \frac{2e}{\cos(i)} - \frac{2e \sin(i)^2}{\cos(i)} \\ \delta &= 2e \cos(i) \end{aligned}$$

Avec des sources secondaires S_1 et S_2 séparées d'une distance $2e$ suite aux réflexions sur les différentes faces de la lame.



$$\delta = (S_2M) - (S_1M)$$

$$\delta = 2e \cos(i)$$

avec le théorème de Malus.

Q19. Par mesure sur la photo 7, on estime l'épaisseur d'une microlamelle à 3 mm sur le dessin, soit avec un grossissement de $\times 6000$, $e \simeq 500 \text{ nm}$.

Q20. Résolution de problème.

- Angle dont doit tourner la tête du colibri pour passer du rouge ($\lambda \sim 700$ nm) au bleu ($\lambda \sim 475$ nm), tous deux correspondant alors à des interférences constructives. Pour l'ordre d'interférence $p = 1$:

$$\begin{aligned} \text{Rouge : } \delta(i_r) &= \lambda_{\text{rouge}} = 2e \cos(i_r) \implies i_r \simeq 45^\circ \\ \text{Bleu : } \delta(i_b) &= \lambda_{\text{bleu}} = 2e \cos(i_b) \implies i_b \simeq 60^\circ \end{aligned}$$

On cherche donc le temps nécessaire pour faire une rotation d'environ 15°

- Énergie dépensée par le colibri pour la rotation de sa tête (de quel angle ?) : un cent millième de son énergie journalière, qui est d'une dizaine de kilocalories.

$$E_{\text{rot}} = \frac{10 \text{ kcal}}{10^5} \simeq 0,418 \text{ J}$$

- Couple résultant exercé sur sa tête pour la rotation : $\Gamma \sim 10^{-5}$ N.m.

Remarque : À ce stade, le correcteur n'a pas pu déterminer quelle était la réponse attendue. Il lui semble manquer une donnée pour ne pas « tourner en rond ».

2 Les couleurs pigmentaires

Remarque : Les réponses ci-dessous s'appuient sur le schéma de la molécule donnée par l'énoncé. Le correcteur signale cependant que la molécule dessinée est erronée par rapport à la véritable molécule de β -carotène, qui présente 12 doubles liaisons conjuguées ([référence ici](#)).

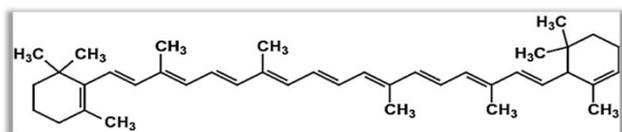


FIGURE 1 – Molécule dessinée dans le sujet distribué

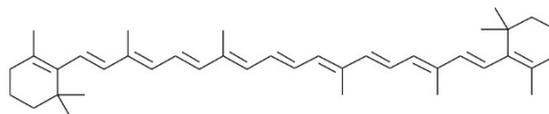


FIGURE 2 – Molécule correcte de β -carotène

Q21. Dans la molécule de β -carotène donnée, il y a 11 doubles liaisons π , dont un totale de 22 électrons π . Cependant on suppose que la réponse attendue concerne plutôt le nombre d'électrons π conjugués, et dans ce cas seulement 10 doubles liaisons sont concernées. On prendra donc dans la suite $N = 20$.

Q22. Le système conjugué est constitué de 20 atomes de carbones, donc il y a 19 fois la distance entre deux atomes de carbones : $d_{CC} = 0,14$ nm. La longueur sur laquelle les électrons délocalisés peuvent se déplacer est donc :

$$L = 19 \times d_{CC} = 2,66 \text{ nm} \quad (4)$$

Q23. Au fond du puits de potentiel, l'énergie de la particule est uniquement son énergie cinétique puisque $V = 0$. On a donc :

$$E = E_c = \frac{p_x^2}{2m_e} \quad (5)$$

Q24. Pour l'énergie moyenne de l'électron :

$$\begin{aligned} \langle E \rangle &= \left\langle \frac{p_x^2}{2m_e} \right\rangle = \frac{\langle p_x^2 \rangle}{2m_e} = \frac{(\Delta p_x)^2 + \langle p_x \rangle^2}{2m_e} \geq \frac{(\Delta p_x)^2}{2m_e} \quad \text{car } \langle p_x \rangle^2 \geq 0 \\ \text{donc } \langle E \rangle &\geq E_{\min} = \frac{(\Delta p_x)^2}{2m_e} \end{aligned}$$

Il existe une valeur minimale possible de l'énergie liée à l'indétermination quantique.

Q25. En utilisant l'inégalité de Heisenberg fournie

$$\Delta x \Delta p_x \gtrsim \hbar \quad \rightarrow \quad (\Delta p_x)^2 \gtrsim \left(\frac{\hbar}{\Delta x} \right)^2 \quad \rightarrow \quad \langle E \rangle \geq E_{\min} \gtrsim \frac{\hbar^2}{2m_e (\Delta x)^2}$$

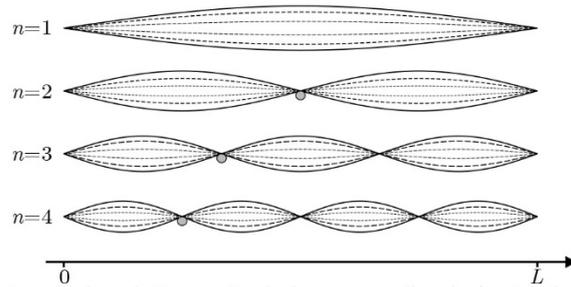
Q26. Dans la même situation classique, l'énergie minimale correspondrait à une vitesse nulle $v_x = 0$, et donc à une énergie cinétique nulle et une énergie potentielle nulle. On aurait donc $E_{\min} = 0$.

Pour une particule quantique, le confinement spatiale entraîne toujours une quantification des niveaux d'énergie, dont un niveau d'énergie minimale non nulle, liée à l'indétermination quantique.

Q27. Pour une corde vibrante de longueur L fixée à ses extrémités, il apparaît des modes propres de vibrations quantifiés. Si elle est fixée aux deux bords, cela impose deux nœuds de vibration en $x = 0$ et en $x = L$. À partir du graphique ci-dessous, on retrouve la relation :

$$L = n \times \frac{\lambda_n}{2} \quad (6)$$

$$\text{donc } \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad \text{avec } n \in \mathbb{N}^* \quad (7)$$



Il en sera de même pour l'électron π confiné dans le puits infini, pour la relation entre la longueur d'onde λ et la largeur du puits L .

Q28. Avec la relation de de Broglie :

$$E_n = \frac{p_{x,n}^2}{2m_e} = \left(\frac{h}{\lambda_n}\right)^2 \frac{1}{2m_e} = \left(\frac{n}{2L}\right)^2 \frac{h^2}{2m_e} = \frac{n^2 \times 4\pi^2 \hbar^2}{4L^2 \times 2m_e}$$

$$E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e L^2} \quad \text{avec } n \in \mathbb{N}^*$$

Q29. On place les $N = 20$ électrons π sur le diagramme d'énergie ci-contre, en respectant la règle de Pauli. Tous les niveaux jusqu'à E_{10} sont donc remplis; la première transition électronique possible est le passage $E_{10} \rightarrow E_{11}$.

Q30. Le photon correspondant à cette absorption d'énergie vérifie la relation de Planck-Einstein : $\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$. On a donc une longueur d'onde :

$$\frac{hc}{\lambda} = \Delta E = E_{11} - E_{10} = (11^2 - 10^2) \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e L^2} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{8cm_e L^2}{h(11^2 - 10^2)} \quad (9)$$

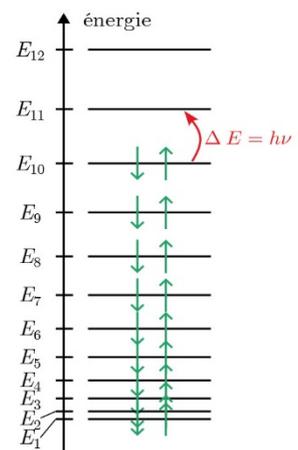
Q31. Avec $L = 2,66 \text{ nm}$, on obtient : $\lambda \simeq 1110 \text{ nm}$

Cette radiation se situe dans l'infrarouge, ce qui n'est pas cohérent avec le spectre d'absorbance présenté sur la figure 9 qui est plutôt autour de 475 nm dans le visible.

Q32. Avec les corrections nécessaires, on a en fait $L_{\text{cor}} = 1,8 \text{ nm}$. Avec cette valeur, on trouve : $\lambda \simeq 509 \text{ nm}$.

Cette radiation se situe dans le visible, au niveau du vert. Ceci est plus cohérent avec le spectre de la figure 7.

Puisque la carotène présente dans le plumage absorbe le vert, la couleur visible sera principalement due aux couleurs restantes, notamment le rouge et le bleu. Cela explique donc la teinte principalement rose des flamands roses.



Problème 2 : Suspension de voiture

Q33. Un exemple de référentiel est le référentiel terrestre, ou « référentiel du laboratoire », lié au solide Terre supposé immobile. Il peut être considéré comme galiléen pour une expérience courte (inférieure à l'heure par exemple) dans laquelle les effets de la rotation terrestre ne se font pas sentir.

Un référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen l'est lui-même.

Q34. La masse M est répartie de façon équivalente sur quatre amortisseurs en parallèle, donc chaque amortisseur supporte une masse : $m = \frac{M}{4}$.

1 Suspension passive

1.1 Suspension sans amortissement

Q35. À l'équilibre, les différentes forces se compensent (première loi de Newton) :

$$\text{Poids : } \vec{P} = -mg\vec{e}_z \quad (10)$$

$$\text{Force de rappel : } \vec{F}_{el} = -k(l - l_0)\vec{e}_z \quad (11)$$

Donc à l'équilibre :

$$\vec{P} + \vec{F}_{el} = \vec{0} \Leftrightarrow -mg - k(l_{eq} - l_0) = 0 \Leftrightarrow l_{eq} = l_0 - \frac{mg}{k} \quad (12)$$

Q36. Le système est un oscillateur harmonique, de pulsation propre :

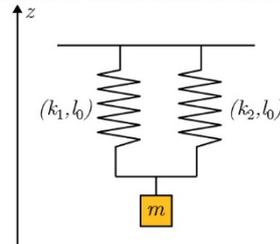
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (13)$$

avec k la constante de raideur du ressort en $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$ et m la masse en kg . La pulsation propre s'exprime en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (dimension T^{-1}).

On peut sinon retrouver ce résultat par une mise en équation simple avec un PFD.

Q37. Pour une association de deux ressorts en parallèle, on peut écrire la force totale subie sous la forme :

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \\ &= k_1(l - l_0)\vec{e}_z + k_2(l - l_0)\vec{e}_z \\ &= (k_1 + k_2) \times (l - l_0)\vec{e}_z \\ \vec{F} &= k_p(l - l_0)\vec{e}_z \end{aligned}$$



Donc on a bien additivité des raideurs : $k_p = k_1 + k_2$

Q38. Pour un véhicule à 4 roues, les quatre amortisseurs sont en parallèle, donc pour l'ensemble du véhicule, la raideur équivalente est :

$$k_v = 4k \quad (14)$$

Q39. Alors la pulsation propre de l'oscillateur constitué par le véhicule est :

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k_v}{M}} = \sqrt{\frac{4k}{4m}} = \sqrt{\frac{k}{m}} = \omega_0 \quad (15)$$

1.2 Suspension avec amortissement

Q40. On applique le principe fondamental de la dynamique (PFD) sur le système masse m en référentiel galiléen, subissant les forces suivantes :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_{el} + \vec{F}_f$$

En projection sur l'axe z :

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -mg - k(l(t) - l_0) - h \frac{dz}{dt}$$

avec $l(t) = z(t) + l_0 - \frac{mg}{k}$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -mg - k(z(t) + l_0 - \frac{mg}{k} - l_0) - h \frac{dz}{dt}$$

$$\Leftrightarrow \frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{k}{m} z(t) - \frac{h}{m} \frac{dz}{dt}$$

$$\Leftrightarrow \frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{h}{m} \frac{dz}{dt} + \frac{k}{m} z(t) = 0 \quad (16)$$

avec par identification avec la forme canonique suivante :

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{\partial z}{\partial t} + \omega_0^2 z(t) = 0 \quad (17)$$

les expressions de la pulsation propre et du facteur de qualité :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad Q = \frac{\sqrt{km}}{h} \quad (18)$$

Q41. La valeur limite du facteur de qualité Q donnant lieu au régime critique est $Q = \frac{1}{2}$, ce qui correspond à une valeur limite de la raideur :

$$k_c = \frac{h^2}{2m} \quad (19)$$

Q42. D'après l'expression précédente, Q augmente avec la masse m . Donc une masse plus élevée (chargement du véhicule) permet au système de passer en régime pseudo-périodique ($Q > \frac{1}{2}$).

Q43. Le graphique présenté ci-dessous est un tracé de l'amplitude des oscillations (en mètres) en fonction de la fréquence d'excitation (en hertz).

Q44. La courbe correspondant à la masse la plus élevée est la courbe 4, qui correspond à la plus grande résonance, donc au facteur de qualité le plus élevé (régime pseudo-périodique).

2 Origine de la force de l'amortisseur

2.1 Force due à la pression

Q45. Lorsque le piston avance selon \vec{e}_z , vitesse $v\vec{e}_z$ avec $v > 0$, la cavité de droite a un volume qui diminue, donc la pression P_2 augmente; à l'inverse la cavité de gauche voit son volume diminuer, donc la pression P_1 diminue. On a donc pour $v > 0$, $P_2 > P_1$ donc $\Delta P = P_1 - P_2 < 0$.

Donc s'il y a proportionnalité $v = \alpha \times \Delta P$, on a $\alpha < 0$.

Q46. La force de pression résultante est alors :

$$\vec{F}_p = (P_1 S - P_2 S) \vec{e}_z = \Delta P S \vec{e}_z = \frac{v}{\alpha} S \vec{e}_z$$

Donc pour une écriture équivalente, on a : $\vec{F}_p = -h_1 \vec{v}$ avec $h_1 > 0$.

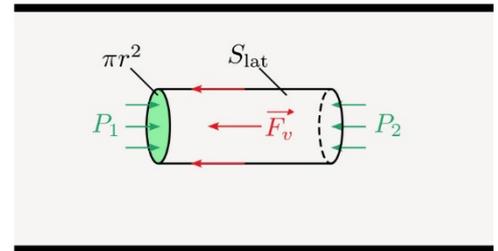
2.2 Force due à la viscosité : écoulement de Poiseuille

Q47. Le système est à symétrie cylindrique, avec une invariance par rotation d'angle θ , et une invariance par translation d'axe z (hypothèse de grande dimension dans la direction z). Alors avec le principe de Curie, on peut justifier que la vitesse du fluide ne dépende que de la coordonnée r :

$$\vec{v}_f(r, \theta, z) = \vec{v}_f(r)$$

Q48. On fait un bilan de quantité de mouvement entre t et $t + dt$ pour le système présenté, fluide compris dans un cylindre de rayon r et de longueur L .

$$\begin{aligned}\vec{p}(t + dt) - \vec{p}(t) &= \sum \vec{F} \times dt \\ &= \left(P_1 \times \pi r^2 \vec{e}_z - P_2 \times \pi r^2 \vec{e}_z + \eta \frac{dv_f}{dr} \times 2\pi r L \vec{e}_z \right) \times dt \\ &= \left(\Delta P \pi r^2 + 2\pi \eta r L \frac{dv_f}{dr} \right) \times dt \vec{e}_z\end{aligned}$$



Q49. L'écoulement étant supposé stationnaire, le volume 1 et le volume 2 sont les mêmes, et surtout : $\vec{p}(t + dt) = \vec{p}(t)$.
Donc :

$$\begin{aligned}\vec{0} &= \left(\Delta P \pi r^2 + 2\pi \eta r L \frac{dv_f}{dr} \right) \times dt \vec{e}_z \\ \frac{dv_f}{dr} &= -\frac{\Delta P}{2\eta L} r\end{aligned}\quad (20)$$

Q50. La force de viscosité exercée sur le piston est de la forme suivante :

$$\begin{aligned}\vec{F}_v &= \eta \left(\frac{dv_f}{dr} \right)_{r_1} 2\pi r_1 L \vec{e}_z - \eta \left(\frac{dv_f}{dr} \right)_{r_2} 2\pi r_2 L \vec{e}_z \\ &= 2\pi \eta L \left(-\frac{\Delta P}{2\eta L} r_1^2 + \frac{\Delta P}{2\eta L} r_2^2 \right) \vec{e}_z \\ &= \pi (r_2^2 - r_1^2) \times \Delta P \vec{e}_z \\ &= \frac{\pi (r_2^2 - r_1^2)}{\alpha} v \vec{e}_z \quad \text{avec} \quad r_2 > r_1 \\ \vec{F}_v &= -h_2 \vec{v} \quad \text{avec} \quad h_2 > 0\end{aligned}$$

On a bien une force de type frottements fluides s'opposant au mouvement.

3 Suspension active

Q51. Équation le Maxwell-flux (Maxwell-Thomson) :

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (21)$$

Le champ magnétique est à flux conservatif.

Q52. Les lignes de champ magnétique sont guidées à l'intérieur de la bobine, comme dans le canal d'écoulement le long de la bobine au dessus et en dessous. Les zones de fortes variations du champ magnétique sont situées au bord de la bobine, donc du piston, lorsque le champ magnétique change de direction.

Q53. La forme intégrale de l'équation de Maxwell-flux est, pour tout surface fermée (Σ) :

$$\oint_{(\Sigma)} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (22)$$

Considérons la surface suivante : un cylindre d'axe z , de rayon r_2 et de longueur l , dont une face est contenue dans la bobine et une face est à l'extérieur du dispositif, où le champ magnétique est nul.
Sur la surface extérieure au dispositif :

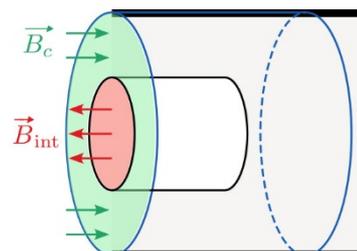
$$\phi = 0$$

Sur la surface entre $r = 0$ et $r = r_1$:

$$\phi = -B_{\text{int}} \times \pi r_1^2$$

Sur la surface entre $r = r_1$ et $r = r_2$:

$$\phi = +B_c \times (\pi r_2^2 - \pi r_1^2)$$



On a donc avec un flux total nul à travers la surface fermée :

$$-B_{\text{int}}\pi r_1^2 + B_c\pi(r_2^2 - r_1^2) \quad \Leftrightarrow \quad B_c = \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} B_{\text{int}}$$

Q54. La force subie par une particule ferromagnétique, se comportant comme un moment magnétique \vec{m} est : $\vec{F} = (\vec{m} \cdot \text{grad}) \vec{B}$. Dans les zones où le champ magnétique est uniforme (intérieur de la bobine, et autour dans le canal d'écoulement), la force est donc nulle. Cette force est maximale dans les zones de fortes variations du champ magnétique, qui se situent avant et après le piston comme indiqué précédemment.

Le mouvement des particules ferromagnétiques dans le fluide permet de modifier alors la viscosité équivalente du fluide, donc de changer les paramètres de la suspension. Cette action se fait plus rapidement qu'une commande mécanique puisque le temps de réponse dépend de phénomènes électromagnétiques rapides.