

DS

TSI2

Physique

4h

23 janvier 2026

Ce sujet est en quatre parties indépendantes.

Chaque partie sera traitée sur une copie séparée.

L'ensemble des feuilles seront numérotées dans l'ordre du sujet en fin d'épreuve (1/20, 2/20, etc).

Le mot FIN sera écrit sur la dernière feuille.

I. Des oiseaux haut en couleurs – Les couleurs structurales (CCINP TPC 2023)

II. Machine à eau pétillante (CCINP TSI 2024)

III. Plaque à induction (CCINP TSI 2024)

IV. Bouteille de vin (CCINP TSI 2024)

Recommandations importantes

La plus grande attention sera apportée au soin, à la présentation et à la qualité de la rédaction.

Les résultats doivent être mis en valeur et exclusivement exprimés avec les notations de l'énoncé.

Si on introduit des notations personnelles, elles doivent toujours être soigneusement définies.

Un résultat non justifié ne sera, au mieux, que partiellement pris en compte.

Même si une valeur numérique est demandée, vous devez avant tout donner l'expression littérale.

Le calcul de la valeur numérique n'est jamais que la toute dernière étape.

Les résultats numériques doivent être accompagnés de leur unité.

Les exercices peuvent être traités dans un ordre quelconque, mais respectez la numérotation des questions.

Lisez l'énoncé en entier avant

(Calculatrice NON autorisée)

PROBLÈME 1

Des oiseaux haut en couleur

L'extraordinaire diversité des motifs colorés des oiseaux résulte de phénomènes physiques tels que l'absorption de la lumière, la diffusion, les interférences ou encore la diffraction.

Certains motifs peuvent être expliqués soit par une répartition organisée du plumage, on parle alors de couleurs structurales, soit par la présence de pigments dans le plumage, on parle alors de couleurs pigmentaires. Si le jaune du canari est par exemple pigmentaire, le bleu de la perruche est lui structural.

Certains oiseaux bénéficient des deux types de colorations comme le perroquet Ara qui présente ainsi un plumage très coloré (**photo 1**).



Photo 1 - Perroquets Ara (rouge vert bleu à gauche, bleu jaune à droite)

Pour ce **problème 1**, les intervalles de longueurs d'onde de quelques couleurs sont fournis dans le tableau ci-dessous :

Couleurs	Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Violet
λ en nm	620 - 780	590 - 620	580 - 590	500 - 580	450 - 500	380 - 450

On donne, pour une lentille conjuguant un objet A et une image A' , la relation de conjugaison avec origine aux foyers F et F' :

$$\overline{F} \cdot \overline{A} \cdot \overline{F'} \cdot \overline{A'} = -f'^2.$$

Partie I - Les couleurs structurales

I.1 - Le bleu de la perruche

À l'origine, la couleur des perruches à l'état sauvage est verte, mais la captivité chez cet oiseau, souvent élevé en nombre, a permis l'émergence de nouvelles couleurs, comme le bleu (**photo 2**). C'est notamment l'appauvrissement en pigments jaunes dans son plumage qui est indirectement responsable de cette coloration si particulière et rare dans le domaine animal.

De façon schématique, une plume est constituée essentiellement d'un rachis sur lequel poussent les barbes sur lesquelles naissent des barbules (**figure 1**). Le long des barbules prennent naissance à leur tour des crochets.



Photo 2 - Perruche bleue

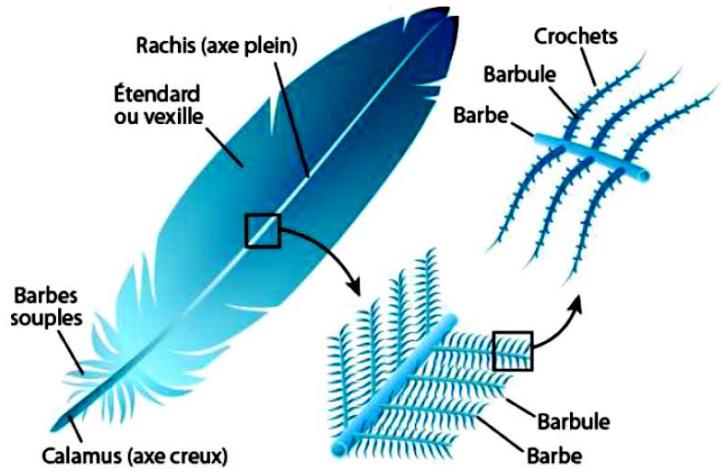


Figure 1 - Constitution d'une plume

Afin de déterminer l'origine physique de cette couleur bleue, on observe une partie AB d'une plume de perruche à l'aide d'un microscope optique.

Pour cela, on dispose :

- d'une première lentille, L_1 (centre O_1 , distance focale $f'_1 = 1,2 \text{ cm}$), qui porte le nom d'objectif ;
- d'une deuxième lentille, L_2 (centre O_2 , distance focale $f'_2 = 2,0 \text{ cm}$), qui porte le nom d'oculaire.

La distance qui sépare le foyer image F'_1 de l'objectif et le foyer objet F_2 de l'oculaire est appelée intervalle optique, noté Δ , avec ici $\Delta = 16 \text{ cm}$ (**figure 2**).

L'observation se fait à l'aide d'un œil emmétrope (œil à vision normale) situé derrière l'oculaire.

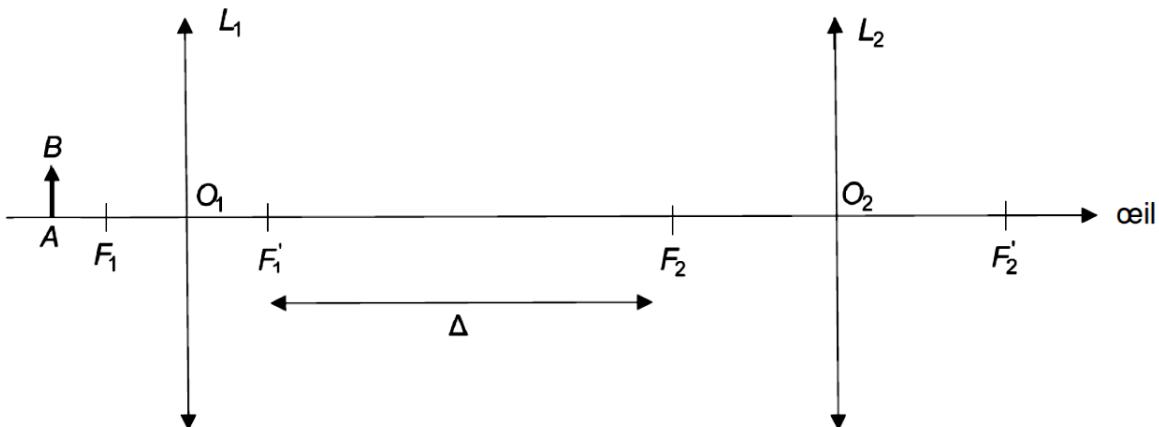


Figure 2 - Schéma du microscope

On se placera pour toute la suite dans les conditions de Gauss et dans l'approximation des petits angles. On note h la taille de l'objet AB observé.

- Q1.** Afin que l'observation puisse s'effectuer sans fatigue visuelle pour l'œil emmétrope, où doit être située l'image finale A_2 en sortie de L_2 ? Dans quel plan se situe donc l'image intermédiaire A_1B_1 ?
- Q2.** Reproduire sur la copie le schéma du microscope et tracer le chemin de deux rayons lumineux passant par l'extrémité B de l'objet, l'un parallèle à l'axe et l'autre passant par O_1 . Faire apparaître sur ce schéma :
 - l'image intermédiaire A_1B_1 ;
 - le diamètre angulaire α' de l'image finale vue par l'œil.

Q3. Montrer que la grandeur $\gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}}$, appelée grandissement transversal de l'objectif, s'écrit :

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

Q4. En déduire l'expression du diamètre angulaire α' de l'image vue par l'observateur au travers du microscope en fonction de f'_1 , f'_2 , h et de Δ .

En l'absence de dispositif, l'œil voit net un objet situé à une distance comprise entre d_m et d_M , avec $d_m < d_M$.

Q5. Quels noms donne-t-on aux points objets correspondant à ces distances ? Donner une valeur à d_m et d_M pour un œil emmétrope.

Q6. Déterminer le diamètre angulaire α de l'objet AB vu sans instrument et situé à une distance d_m de l'œil (**figure 3**).

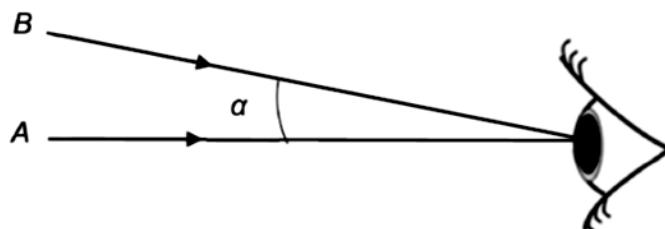


Figure 3 - Diamètre ou distance angulaire

Q7. En déduire que la grandeur $G_C = \frac{\alpha'}{\alpha}$, appelée grossissement commercial du microscope, s'écrit :

$$G_C = \frac{d_m \Delta}{f'_1 f'_2}.$$

Faire l'application numérique avec $d_m = 25$ cm .

Q8. Un œil peut distinguer deux images ou deux objets si la distance angulaire les séparant est supérieure à la limite de résolution angulaire de l'œil $\varepsilon = 1'$ (une minute d'arc). Déterminer quelle sera la distance angulaire minimale α_m entre deux objets vus au travers de ce microscope.

L'image d'une partie d'une plume est donnée ci-après (**photo 3**) :

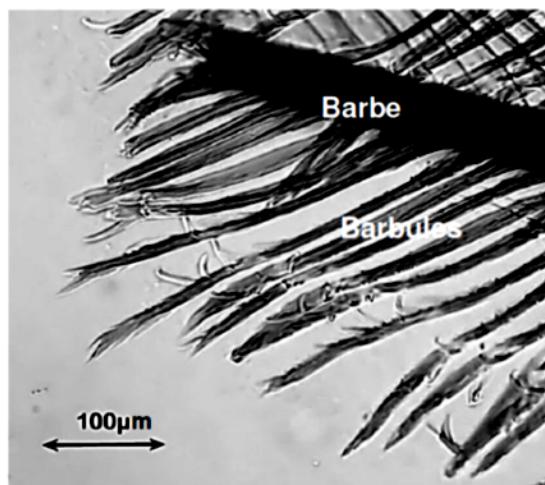


Photo 3 - Image d'une plume de perruche à l'aide d'un dispositif non précisé

Q9. Par mesure sur la **photo 3**, donner une estimation de la distance entre deux crochets situés au bout des barbules.

Q10. On rappelle que la résolution angulaire de l'œil nu est $\varepsilon = 1'$. Ces crochets peuvent-ils être distingués directement sans instruments ? Pourront-ils être distingués avec le microscope utilisé précédemment ?

En explorant davantage la plume, on découvre qu'à l'intérieur des barbes apparaissent des couches fines parallèles et empilées de petits grains appelés microgranules (**figure 4**).

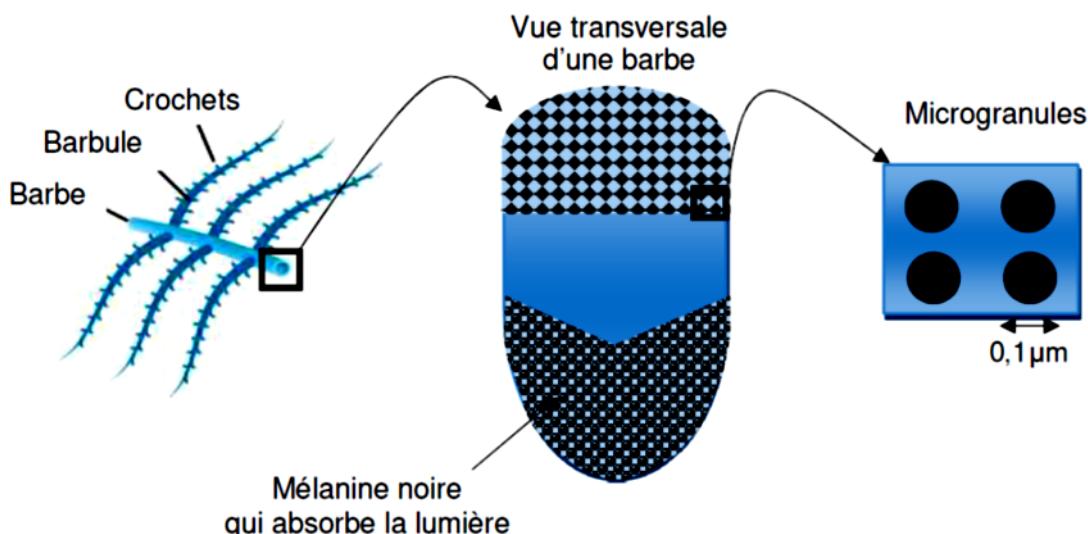


Figure 4 - Coupe transversale d'une barbe

Ces microgranules de petite taille sont responsables d'une diffusion de la lumière incidente (**figure 5**) :

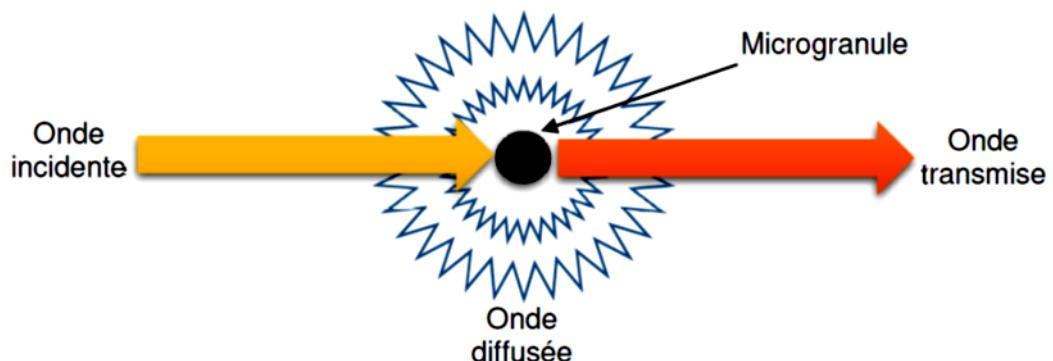


Figure 5 - Diffusion de la lumière par une microgranule

La puissance moyenne diffusée à travers une sphère, de centre une microgranule, est donnée par la formule :

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

avec α une constante de proportionnalité et ω la pulsation du rayonnement incident.

Q11. Expliquer alors la couleur bleue prise par le plumage de la perruche lorsqu'elle est éclairée en lumière blanche. Que deviennent les radiations non diffusées ?

Q12. Par analogie avec un autre domaine de la physique, justifier que le premier étage de la barbe se comporte comme un filtre passe-bas en transmission.

I.2 - Du vert clair au violet pour le canard colvert

Dans certains cas, la couleur d'un plumage varie selon l'angle d'observation. C'est le cas du canard colvert mâle qui possède autour de son cou et de sa tête un plumage dont la teinte varie selon la direction (**photo 4**).



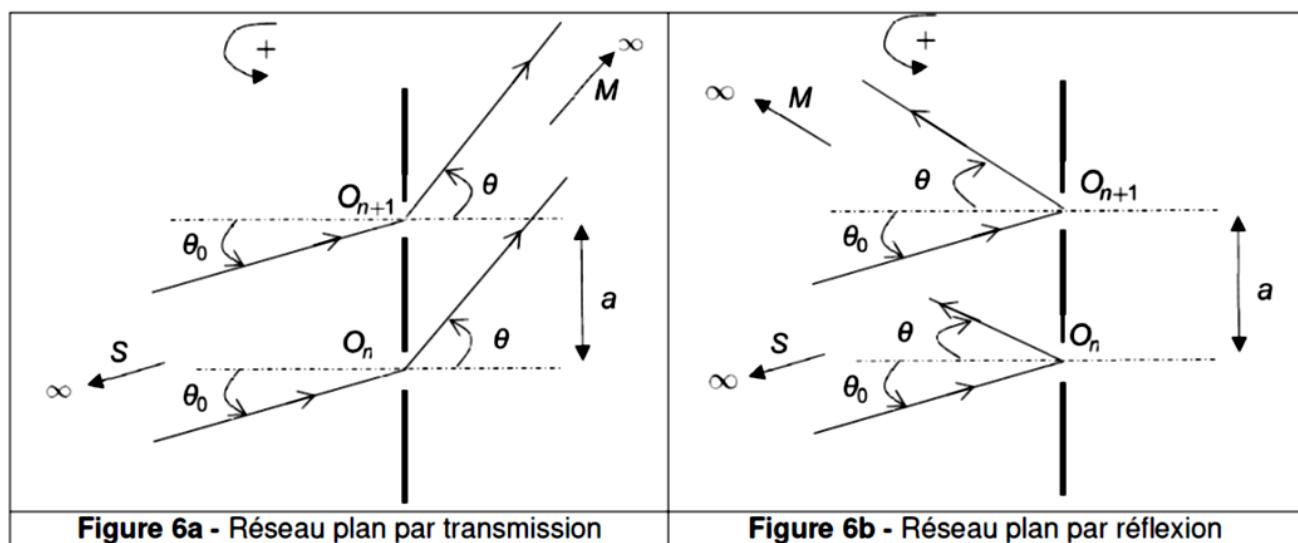
Photo 4 - Teinte variable sur les coups des canards colvert

Pour expliquer ce phénomène, il faut étudier l'intérieur des barbules, constituées notamment de petites cavités dans lesquelles on trouve de minces lamelles parallèles appelées microlamelles (**photo 5**).



Photo 5 - Observation des microlamelles au microscope électronique

Chaque microlamelle se comporte comme un petit miroir réfléchissant la lumière. Entre deux lamelles se situe de la mélanine absorbant la lumière. Ainsi ces microlamelles s'apparentent aux traits d'un réseau plan qui peut être modélisé soit par la **figure 6a**, soit par la **figure 6b** :



La distance entre deux lamelles est notée a . On donne $a = 0,56 \mu\text{m}$.

S représente une source de lumière monochromatique, de longueur d'onde λ_0 , située à l'infini, envoyant un faisceau de rayons cohérents entre eux. L'observation se fait en un point M situé à l'infini.

Q13. La structure en microlamelles constitue-t-elle un réseau par réflexion ou par transmission ?

Q14. Déterminer, dans le cas du réseau plan par transmission, la différence de marche $\delta(M) = (SO_{n+1}M) - (SO_nM)$ entre deux rayons, l'un passant par O_n , l'autre par O_{n+1} .

Q15. Pour quelles valeurs de $\delta(M)$ les ondes interfèrent entre-elles de façon totalement constructive ?

Q16. Dans le cas des réseaux par réflexion, montrer par analogie que les maximums d'intensité lumineuse sont donnés pour des angles θ_k tels que :

$$\sin \theta_k + \sin \theta_0 = k \frac{\lambda_0}{a}$$

avec k un entier relatif.

Q17. Application : de quelle couleur apparaît la tête d'un canard colvert, dont les microlamelles sont éclairées en incidence normale par des rayons provenant du Soleil, d'une part pour l'observateur A et d'autre part pour l'observateur B supposés suffisamment éloignés (**figure 7**) ? On justifiera que l'on ne tient compte que des ordres $k = \pm 1$. Commenter en lien avec la **photo 4**.

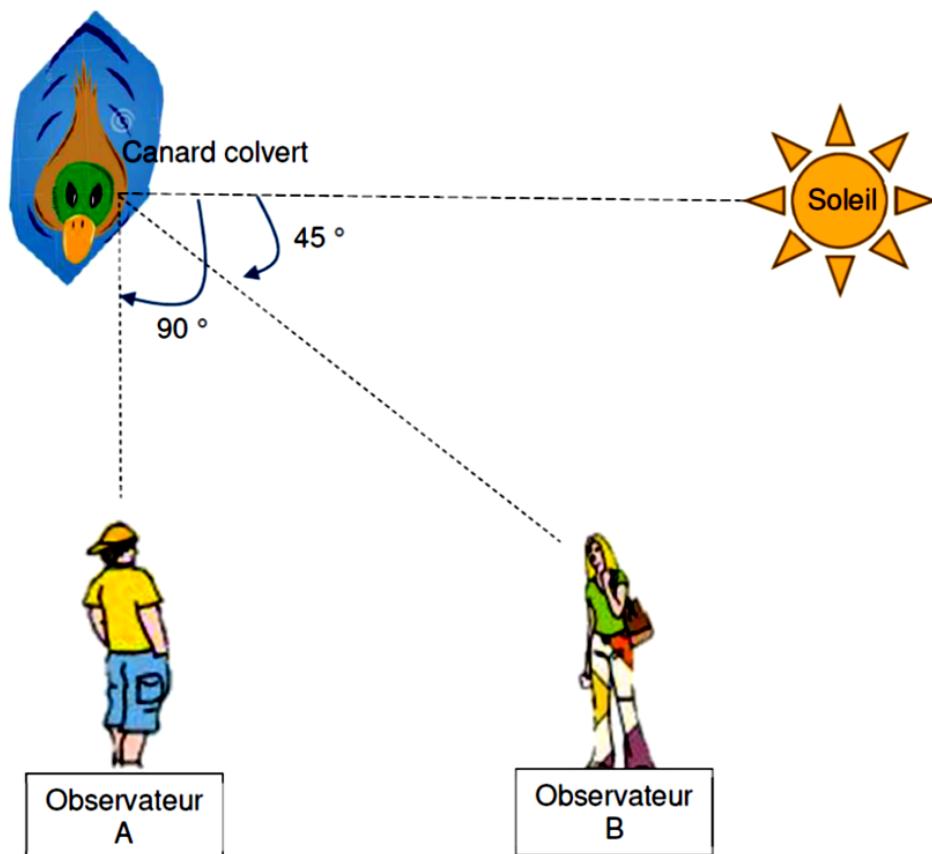


Figure 7 - Canard colvert éclairé par le soleil

I.3 - Le colibri aux mille couleurs

Le colibri est un oiseau-mouche possédant la faculté de faire jaillir des couleurs très vives qu'il ne possède pas à l'origine.

En effet, comme on le voit sur la **photo 6**, le plumage de cet oiseau peut passer du rouge rubis au bleu cuivré en une fraction de seconde.



Photo 6 - Photos de deux colibris aux couleurs changeantes
(rouge rubis à gauche, bleu cuivré à droite)

(Pour le lecteur, de nombreuses vidéos capturent un tel effet, par exemple ici <https://youtu.be/Tmok46hXzgU>).

Afin d'interpréter ces couleurs vives, il est nécessaire de s'intéresser davantage aux microlamelles des plumes de cet oiseau.

Une photographie obtenue au microscope électronique à balayage est fournie **photo 7**.

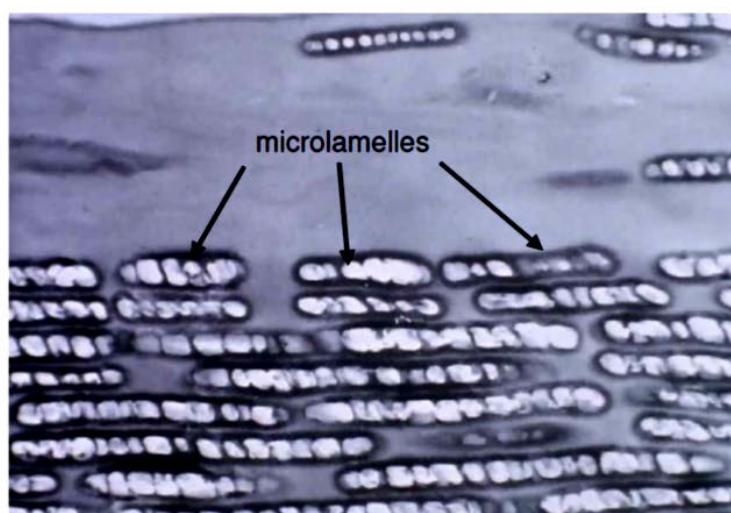


Photo 7 - Image obtenue au microscope électronique de quelques microlamelles
(grandissement x6000)

On peut y voir le réseau de microlamelles décrit dans la partie précédente mais aussi l'intérieur de chaque lamelle qui n'est pas totalement opaque et laisse passer la lumière par réfraction.

Ainsi, chaque microlamelle peut se comporter comme une lame à faces parallèles d'épaisseur e (**figure 8**) :

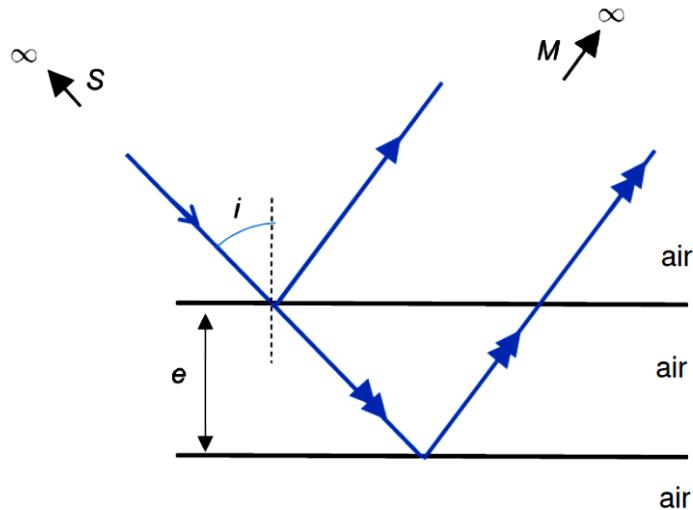


Figure 8 - Modélisation d'une microlamelle par une lame d'air à face parallèle

Q18. Montrer que la différence de marche entre les deux rayons de la **figure 8** partant d'une source S et atteignant un point M , tous deux à l'infini, s'écrit :

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

Q19. Par mesure sur la **photo 7**, déterminer la valeur de l'épaisseur e d'une microlamelle.

Q20. Pour un observateur éloigné, estimer le temps nécessaire au colibri pour que le plumage de sa tête passe du rouge au bleu lors de la rotation de celle-ci.

Pour cette question, à traiter dans le cadre d'une résolution de problème, on pourra supposer que :

- seul l'ordre $p = 1$ est à considérer ;
- l'alimentation du colibri en petits insectes et en nectar de fleurs lui procure en moyenne une dizaine de kilocalories par jour ;
- la rotation de sa tête nécessite un cent millième de son énergie journalière ;
- le couple résultant exercé sur le cou du colibri est de l'ordre de $0,01 \cdot 10^{-3}$ Nm lors d'une rotation.

On rappelle que :

- $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J} ;$

- la puissance reçue par un solide en rotation à la vitesse $\vec{\Omega}$ de la part d'un couple $\vec{\Gamma}$ s'écrit $P = \vec{\Gamma} \cdot \vec{\Omega}$.

II. Machine à eau pétillante

Une machine à eau pétillante permet aux consommateurs de transformer facilement l'eau du robinet en eau pétillante en quelques secondes. Elle permet également de transformer une boisson sucrée quelconque en soda.

Ces machines offrent une alternative économique et écologique à la consommation de boissons gazeuses en bouteilles plastiques à usage unique.

L'eau pétillante est obtenue par dissolution de dioxyde de carbone sous haute pression dans l'eau initialement plate (sans gaz). Le dioxyde de carbone est stocké dans une bonbonne métallique sous haute pression. Les données relatives à la partie II sont indiquées ci-après.

Données - Partie II

Numéros atomiques et masses molaires atomiques

Élément	H	C	O
Numéro atomique	1	6	8
Masse molaire ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	1,0	12	16

Électronégativité dans l'échelle de Pauling

L'électronégativité de l'hydrogène vaut 2,2 et celle de l'oxygène vaut 3,4.

Enthalpies standard de formation à 298 K

$$\Delta_f H^\circ(\text{CO}_{2(\text{g})}) = -393,5 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$\Delta_f H^\circ(\text{CO}_{2(\text{aq})}) = -413,8 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$\text{Relation de Van't Hoff : } \frac{d \ln(K^\circ)}{dT} = \frac{\Delta r H^\circ}{RT^2}$$

Masse volumique du thé liquide : $\rho = 1,0 \text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$

Masse d'un glaçon : $m \approx 10 \text{ g}$

Capacité thermique massique du thé liquide et de l'eau liquide : $c_{\text{liq}} \approx 4,0 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$

Capacité thermique massique de la glace : $c_g \approx 2,0 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$

Enthalpie massique de fusion de la glace à 0 °C : $L_{\text{fus}} = 3,3 \cdot 10^2 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

II.1 - Étude des molécules d'eau et de dioxyde de carbone

Q19. Donner les schémas de Lewis des molécules d'eau et du dioxyde de carbone.

La molécule d'eau est coudée alors que le dioxyde de carbone est une molécule linéaire.

Q20. Expliquer qualitativement cette différence.

Q21. Représenter, justifications à l'appui, le vecteur moment dipolaire de la molécule d'eau sur un schéma de celle-ci. Préciser le qualificatif donné en conséquence à cette molécule.

Q22. En expliquant la démarche suivie, déterminer quelle espèce, parmi l'eau ou le dioxyde de carbone, possède la température d'ébullition la plus élevée sous une pression de 1 bar.

II.2 - Équilibre chimique de gazéification de l'eau

Lors de la gazéification de l'eau, le dioxyde de carbone gazeux, supposé parfait, se dissout suivant l'équation (1) :



Q23. Déterminer l'enthalpie standard de réaction de l'équilibre (1). Préciser si la transformation est exothermique ou endothermique.

Q24. Indiquer l'influence d'une augmentation de température sur l'équilibre (1). Justifier la réponse apportée.

On donne dans le **tableau 1** quelques valeurs de la solubilité du CO₂ dans l'eau :

Température (°C)	0	10	20	30	40	50
Solubilité du dioxyde de carbone (g·L ⁻¹)	3,35	2,32	1,69	1,26	0,97	0,76

Tableau 1 - Solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau à différentes températures sous 1 bar

Q25. La réponse à la question précédente est-elle en accord avec les valeurs expérimentales du **tableau 1** ? Justifier la réponse apportée.

Q26. Déterminer l'expression du quotient de réaction Q_r associé à l'équilibre précédent en fonction notamment de la pression partielle p_{CO₂} en dioxyde de carbone gazeux et de la concentration [CO_{2(aq)}] en dioxyde de carbone dissous.

Q27. Préciser l'influence d'une augmentation isotherme de la pression en dioxyde de carbone gazeux sur le quotient de réaction. Dans quel sens le milieu réactionnel évoluera-t-il pour retourner vers l'équilibre ?

Q28. Donner l'expression du potentiel chimique du dioxyde de carbone gazeux supposé parfait, μ_{CO_{2,g}} à la température T et pour une pression partielle p_{CO₂} en CO₂.

Q29. Donner l'expression du potentiel chimique du dioxyde de carbone dissous, soluté supposé infiniment dilué, μ_{CO_{2,aq}}, à la température T, en fonction de la concentration en quantité de matière en CO₂ dissous.

Lorsqu'une espèce chimique est dans un état d'équilibre entre deux phases, son potentiel chimique est le même dans chacune des phases.

Q30. Montrer alors, lorsque l'équilibre (1) est établi à la température T et sous une pression totale P fixée, qu'il est possible d'écrire :

$$[\text{CO}_{2(\text{aq})}] = k p_{\text{CO}_2}$$

où k est une constante ne dépendant que de la température T dont vous donnerez l'expression littérale.

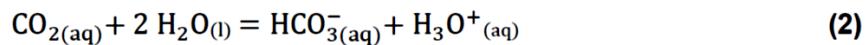
Dans les conditions de l'expérience, la constante k a pour valeur : k = 0,025 mol·L⁻¹·bar⁻¹.

Q31. Calculer la valeur de la concentration en quantité de matière en dioxyde de carbone dissous, à 298 K, en équilibre avec une phase gazeuse dont la pression partielle en CO₂ est égale à 4,0 bar.

Q32. En déduire la masse de CO₂ contenue dans 1,0 L d'eau.

II.3 - pH de l'eau gazéifiée

Le dioxyde de carbone dissous dans l'eau pure donne lieu à l'équilibre (2) suivant, à 298 K :



dont la constante d'équilibre thermodynamique K_2° vaut $10^{-6,4}$ à 298 K.

- Q33.** En considérant que la concentration en dioxyde de carbone dissous $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ de l'eau gazéifiée est égale à $0,10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, déterminer le pH de la solution.

II.4 - Thé glacé pétillant

Un étudiant souhaite réaliser un thé glacé pétillant bien rafraîchissant. Dans un thermos, il ajoute 100 cL de thé pétillant à la température de 20°C , ainsi que des glaçons à la température de -15°C .

- Q34.** En détaillant la démarche suivie, déterminer la masse de glaçons à ajouter pour obtenir une température finale de 10°C . Commenter.

III. Plaque à induction

Dans une plaque à induction, une bobine est placée sous une plaque en vitrocéramique. Lorsque cette bobine est parcourue par un courant électrique alternatif, un champ magnétique variable induit un champ électrique qui entraîne la circulation de courants électriques dans le métal du récipient posé sur la plaque. Ces courants électriques, appelés "courants de Foucault", génèrent de l'énergie thermique par effet Joule.

Nous nous intéresserons tour à tour au champ magnétique créé par un fil rectiligne de longueur infinie, puis par une spire circulaire.

Ensuite, nous nous intéresserons au phénomène d'induction dans le fond de la casserole et à l'effet Joule associé.



Figure 1 - Plaque à induction

Source : *La physique par les objets quotidiens – Cédric Ray et Jean-Claude Poizat*

Données - Partie I

Théorème de Stokes :

$$\oint_{(C)} \vec{A} \cdot d\vec{l} = \iint_{\Sigma} \vec{\text{rot}}(\vec{A}) \cdot d\vec{S} \text{ où } \Sigma \text{ est une surface qui s'appuie sur le contour fermé } C \text{ orienté.}$$

Conductivité thermique de l'acier : $\lambda = 16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Capacité thermique massique de l'acier : $c = 1,0 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Masse volumique de l'acier : $\rho = 8\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Une plaque à induction comporte une bobine (P) de rayon r_1 permettant de créer un champ magnétique. La bobine (P) est parcourue par un courant sinusoïdal d'intensité $I(t) = I_0 \cos(\omega t)$ et de fréquence $f = 60 \text{ kHz}$. On modélise la casserole métallique posée sur la plaque par une spire (S) circulaire de rayon $r_2 < r_1$. Elle est parcourue par un courant d'intensité $i(t)$.

Les sens des courants sont arbitrairement ceux mentionnés sur la **figure 4**.

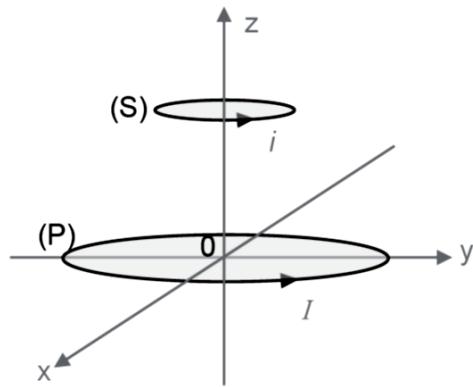


Figure 4 - Représentation de la bobine (P) et de la spire (S)

On considère les hypothèses simplificatrices suivantes :

- la casserole posée sur la plaque à induction est à une distance z_0 de la bobine ;
- le champ magnétique auquel est soumis la casserole est uniforme et son expression est donnée par : $\vec{B} = B_0 \cos(\omega t) \vec{u}_z$ où B_0 est une constante ;
- la spire (S) a une résistance électrique R et son inductance propre est négligée.

- Q9.** Déterminer l'expression du flux Φ du champ magnétique qui traverse la spire (S).
- Q10.** En déduire l'expression de la force électromotrice induite e apparaissant dans la spire (S).
- Q11.** Déterminer l'expression du courant induit $i(t)$ dans la bobine.
- Q12.** Déterminer l'expression de la puissance instantanée $P(t)$ dissipée par effet Joule dans la spire (S).
- Q13.** En utilisant les résultats des questions précédentes, montrer que la puissance moyenne P_{moy} dissipée par effet Joule dans la spire (S) est égale à :
- $$P_{moy} = \frac{(\omega B_0 \pi r_2^2)^2}{2R}.$$
- Q14.** Par quel phénomène physique l'énergie thermique transmise au fond de la casserole par effet Joule est-elle transmise au contenu de la casserole ?
- Q15.** Citer un intérêt d'une plaque à induction par rapport à une plaque de cuisson électrique fonctionnant à l'aide d'une résistance électrique.
- Q16.** Déterminer l'ordre de grandeur des longueurs que r_1 , r_2 et z_0 ne doivent pas dépasser pour permettre de considérer que l'approximation des régimes quasi-stationnaires est justifiée. Commenter.

Une poêle en acier est posée sur la plaque à induction en fonctionnement. On s'intéresse à présent à la conduction thermique au sein du manche en acier de la poêle.

Ce dernier a une longueur $L = 20$ cm et est modélisé par un cylindre représenté sur la **figure 5**.

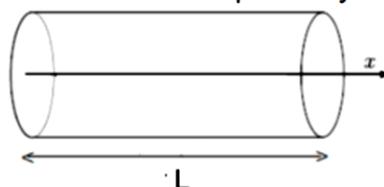


Figure 5 - Modélisation du manche en acier de la poêle

Le champ de température est de la forme $T(x, t)$. L'équation de la diffusion thermique à une dimension en coordonnées cartésiennes s'écrit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

- Q17.** En utilisant l'équation précédente, justifier qualitativement l'irréversibilité du phénomène de diffusion thermique.

Soit τ la durée caractéristique du phénomène de diffusion thermique.

- Q18.** En expliquant la démarche suivie, déterminer un ordre de grandeur de cette durée τ . Commenter.

IV Bouteille de vin

Dans le monde du vin, une " bouteille carrée " est à la fois rare et originale. Des vignerons du sud de la France ont commercialisé du vin dans une bouteille de forme parallélépipédique à base carrée modélisée à la **figure 8**.

Une bouteille de vin, choisie dans la cave à une température de $T_i = 8,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ est apportée dans la cuisine dont la température vaut $T_A = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$.

La bouteille est assimilée à un parallélépipède de longueur $L = 20 \text{ cm}$, de largeur $l = 7,5 \text{ cm}$ et dont l'épaisseur e du verre est égale à $e = 3,0 \text{ mm}$.

Dans cette modélisation simple, les échanges thermiques entre l'extérieur et le vin se font uniquement au niveau des surfaces latérales de la bouteille.

La température T_i du vin est supposée uniforme à l'intérieur de la bouteille. On se place en régime quasi-stationnaire.

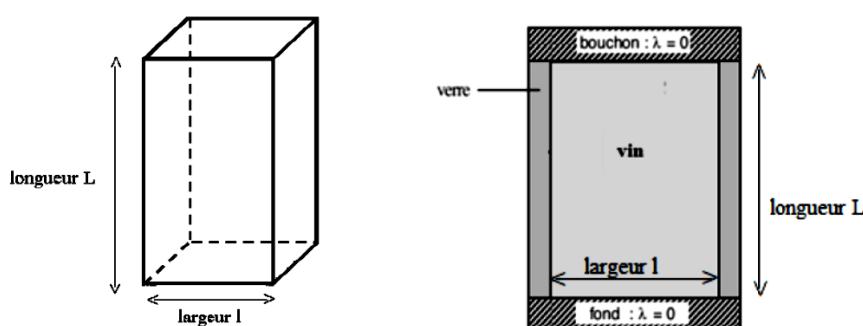


Figure 8 - Modélisation de la bouteille de vin
(Schéma de gauche : vue en 3D - Schéma de droite : vue d'une face)

Données - Partie IV

Conductivité thermique du verre : $\lambda = 1,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Capacité thermique du système {vin + bouteille} : $C = 3,0 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}$

Masse volumique du vin (approximée à celle de l'eau) : $\rho = 1\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Coefficient conducto-convectif : $h = 10 \text{ (SI)}$

On étudie, dans les questions **Q47 à Q50**, le phénomène de conduction thermique à travers une des surfaces latérales de la bouteille, d'épaisseur e et de surface S . On notera T_S la température de la surface extérieure du verre, égale à T_A en l'absence de convection.

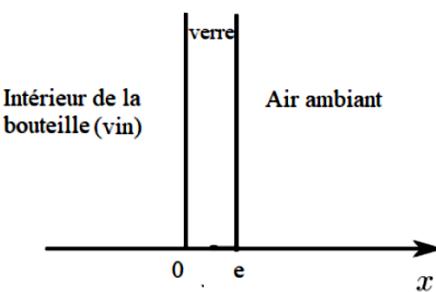


Figure 9 - Modélisation d'une surface latérale de la bouteille de vin

- Q47.** Énoncer la loi de Fourier dans un cas unidimensionnel en coordonnées cartésiennes et préciser, sur le schéma de la **figure 9** à reproduire sur votre copie, le sens réel du vecteur densité de flux thermique.

- Q48.** En vous basant sur une analogie électrique, donner les correspondances entre les trois grandeurs thermiques suivantes *température T*, *résistance thermique R_{th}*, *flux thermique φ* et les grandeurs électriques analogues.
- Q49.** En déduire l'expression littérale de la résistance thermique en fonction de T_i, T_s et du flux thermique.

- Q50.** Après avoir rappelé la relation entre le flux thermique et le vecteur densité de flux thermique, montrer que la résistance thermique R_{th} associée à la surface latérale de la bouteille d'épaisseur e et de surface S, représentée sur la **figure 9**, s'écrit :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S}.$$

- Q51.** En déduire l'expression littérale de la résistance thermique totale R₁ relative à la totalité des faces latérales de la bouteille, puis faire l'application numérique.

En plus de la conduction thermique étudiée ci-dessus, on doit tenir compte des échanges thermiques superficiels entre le verre et l'air. Une surface de verre de surface S, à la température T_s, échange avec l'air, à la température T_A, le flux thermique $\varphi = hS(T_s - T_A)$ où h est le coefficient conducto-convectif, constant et uniforme sur toute la surface S (avec h > 0).

- Q52.** Déterminer l'unité de h.
- Q53.** Exprimer la résistance thermique de convection R₂ relative à la totalité des surfaces latérales de la bouteille en fonction de h, L et de l.
- Q54.** Donner l'expression de la résistance thermique totale R_{tot} d'échange entre le vin et l'air extérieur, puis faire l'application numérique. Conclure.

Chamber un vin est une pratique ancienne, qui consiste à remonter de la cave les vins rouges pour les ramener doucement à la température de la pièce, avant de les servir. En réalité, la température du système {vin + bouteille} dépend lentement du temps (d'où l'hypothèse d'un régime quasi-stationnaire) et elle sera notée T(t) par la suite. Pour une dégustation optimale, le vin doit atteindre une température de 16 °C.

- Q55.** À l'aide du premier principe de la thermodynamique, montrer que la température T(t) du système {vin + bouteille} vérifie une équation différentielle de la forme :
- $$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = K.$$
- Préciser également les expressions littérales des constantes τ et K.
- Q56.** Sachant que $\tau = 5,4 \cdot 10^3$ s et $\tau K = 295$ K, exprimer, puis calculer la durée nécessaire pour que le vin atteigne sa température optimale de dégustation T_D = 16 °C. On donne : $\ln(\frac{7}{3}) \approx 0,8$.
- Q57.** Déterminer le sens d'évolution de cette durée dans le cas où le coefficient conducto-convectif h augmente. Justifier.