IPhO 2021 - Terminale

Épreuve de présélection française

31 mars 2021

Durée de l'épreuve : 3 heures

Calculatrices autorisées

L'épreuve comporte quatre parties différentes et indépendantes les unes des autres, dont la nature et les temps à accorder conseillés sont donnés dans le tableau ci-dessous :

		Temps conseillé
PARTIE **A**	QCM	**1 heure**
PARTIE **B**	1er exercice	**30 min**
PARTIE **C**	2ème exercice	**30 min**
PARTIE **D**	Problème	**1 heure**

CONSIGNE pour la rédaction

Les réponses sont à rédiger sur les feuilles d'énoncé, dans les emplacements prévus.
Si le candidat a besoin de feuilles supplémentaires, il utilisera les feuilles vierges fournies dont les en-têtes doivent être impérativement complétés.

IMPORTANT

Toutes les feuilles à rendre doivent comporter le nom, le prénom,
le numéro de téléphone et le lycée du candidat.
Tout oubli pourra entrainer l'absence de correction de la feuille concernée.

Données générales pour l'ensemble de l'épreuve

Nom	Symbole	Valeur
Célérité de la lumière dans le vide	c	299 792 458 $m \cdot s^{-1}$
Constante de Planck	h	$6{,}626 \times 10^{-34}$ J·s
Charge élémentaire	e	$1{,}602 \times 10^{-19}$ C
Perméabilité magnétique du vide	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ $H \cdot m^{-1}$
Permittivité diélectrique du vide	ε_0	$8{,}854 \times 10^{-12}$ $F \cdot m^{-1}$
Constante gravitationnelle	G	$6{,}675 \times 10^{-11}$ $m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$
Accélération normale de la pesanteur à la surface de la Terre	g_0	9,81 $m \cdot s^{-2}$
Température du point triple de l'eau	T_0	273,16 K ou 0,01 °C
Constante d'Avogadro	N_A	$6{,}022 \times 10^{23}$ mol^{-1}
Masse du proton	m_p	$1{,}673 \times 10^{-27}$ kg
Masse de l'électron	m_e	$9{,}109 \times 10^{-31}$ kg
Constante de Boltzmann	k ou k_B	$1{,}381 \times 10^{-23}$ $J \cdot K^{-1}$
Constante des gaz parfaits	R	8,314 $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
Distance Terre-Soleil	d_{TS}	$1{,}499 \times 10^{8}$ km
Masse du Soleil	M_S	$1{,}989 \times 10^{30}$ kg
Rayon de la Terre	R_T	$6{,}4 \times 10^{3}$ km
Masse de la Terre	M_T	$5{,}974 \times 10^{24}$ kg
Masse volumique de l'air	ρ_a	1,20 $kg \cdot m^{-3}$ à T=20°C et P=$1{,}0 \times 10^{5}$Pa
Masse molaire de l'air	M	28,96 $g \cdot mol^{-1}$
Masse volumique de l'eau	ρ_e	$1{,}00 \times 10^{3}$ $kg \cdot m^{-3}$

Partie A
Questionnaire à choix multiples

Durée conseillée : 1 heure.

Pour chaque question, les candidats entoureront la réponse de leur choix. Il n'y a qu'une réponse correcte par question.

Q1. Si un contenant pèse avec son contenu d'eau l'équivalent de 10 litres d'eau et que le contenu pèse le tiers de son contenant, quel est le volume V d'eau contenue ?

(a) $V = 2,5\,\mathrm{L}$;
(b) $V = 3,3\,\mathrm{L}$;
(c) $V = 7,5\,\mathrm{L}$;
(d) $V = 10\,\mathrm{L}$.

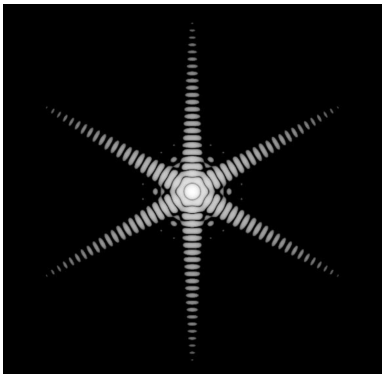
Q2. Quelle est la résistance électrique du fil électrique d'une ampoule luminescente de 55 W du plafonnier ?

(a) $R = 4,0\,\Omega$;
(b) $R = 0,88\,\mathrm{k}\Omega$;
(c) $R = 12\,\mathrm{k}\Omega$;
(d) $R = 2,6\,\mathrm{M}\Omega$.

Q3. On dispose d'un échantillon de césium 137 de demi-vie $t_{1/2} = 30$ ans. Quelle proportion de noyaux radioactifs reste-il au bout de 300 ans ?

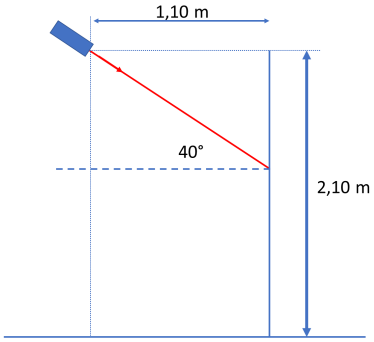
(a) 0,05 % ;
(b) 0,1 % ;
(c) 1 % ;
(d) 5 %.

Q4. On considère la figure de diffraction suivante, obtenue à partir d'un objet inconnu. Quelle est la forme géométrique de cette fente ?



(a) triangle ;
(b) étoile ;
(c) hexagone ;
(d) octogone.

Q5. On considère un faisceau laser qui est dirigé vers un miroir sur lequel il se réfléchit. Dans la géométrie présentée ci-dessous, à quelle distance du miroir le laser va-t-il toucher le sol ?



(a) 50 cm ;
(b) 66 cm ;
(c) 1,1 m ;
(d) 1,4 m.

Q6. Une lentille convergente a une distance focale de 25 cm. Où doit-on placer un objet pour obtenir une image 3 fois plus grande que l'objet si l'image est renversée ?

(a) 17 cm devant la lentille ;
(b) 25 cm devant la lentille ;
(c) 33 cm devant la lentille ;
(d) ce n'est pas possible.

Q7. On utilise une grue pour déplacer des blocs de béton de dimension $0,4\ \text{m} \times 0,4\ \text{m} \times 3\ \text{m}$. Ces blocs sont attachés par une corde, supposée idéale. Ils sont déplacés de la terre ferme vers le fond de la mer (ils sont alors complètement immergés). On s'intéresse à la tension dans la corde en présence d'un bloc de béton à l'extrémité. Quelle est la différence de tension dans la corde dans le cas où le bloc est totalement immergé et où il ne l'est pas du tout ? La masse volumique de l'eau de mer est supposée égale à 1025 kg/m^3 et celle du bloc de béton de 2300 kg/m^3.

(a) $4,8.10^2$ N ;
(b) 1,1 kN ;
(c) 4,8 kN ;
(d) 11 kN.

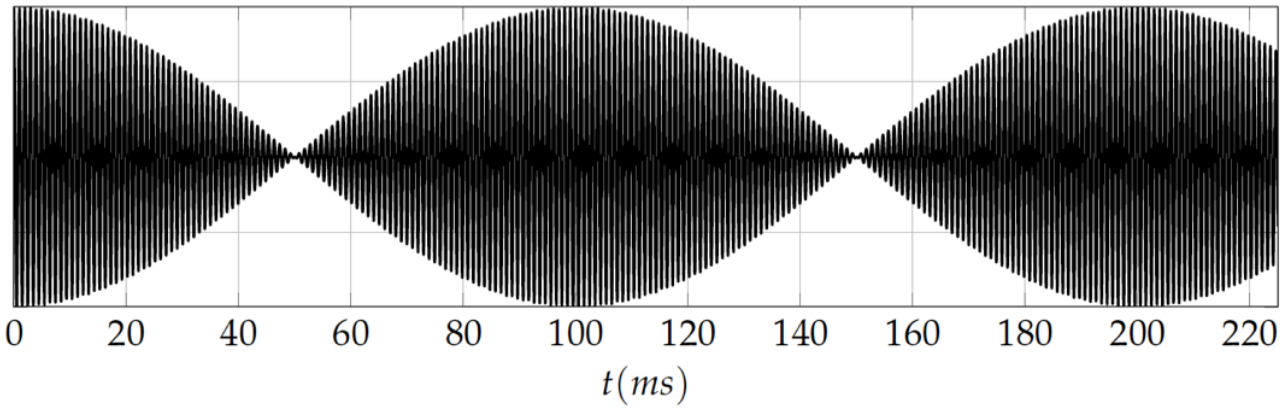
Q8. Dans la ceinture d'astéroïdes principale, Cérès est une planète naine quasi-sphérique de rayon $R = 475$ km dont la masse représente environ le tiers de la masse totale des astéroïdes $M = 3.10^{21}$ kg. Un astéroïde 100 fois plus léger que Cérès est en orbite basse autour de Cérès. Quelle est sa période de révolution ?

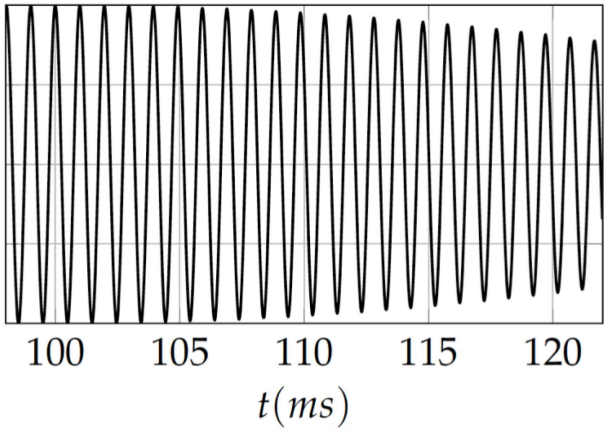
(a) Environ 1/2 heure ;
(b) Environ 2 heures ;
(c) Environ 22 heures ;
(d) Environ 24 heures.

Q9. Un proton et un neutron sont soumis à la même différence de potentiel U à partir de leur état de repos. On considère que les masses du proton et du neutron sont égales.

(a) Les deux particules ont la même quantité de mouvement ;
(b) Les deux particules ont la même énergie cinétique ;
(c) Les réponses (a) et (b) sont correctes ;
(d) Les réponses (a) et (b) sont incorrectes.

Q10. On enregistre avec un microphone le son généré par deux haut-parleurs qui émettent des ondes sonores sinusoïdales de fréquences f_1 et f_2. Quelle affirmation est correcte ?





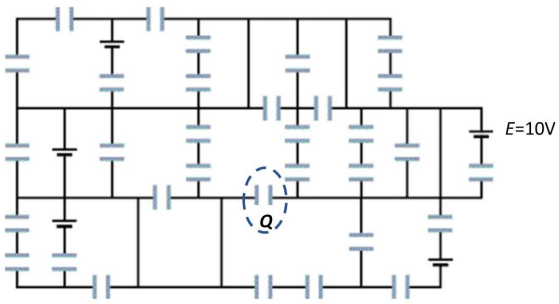
(a) Il s'agit d'un phénomène d'interférences et $f_1 = f_2 \approx 20$ Hz ;

(b) Il s'agit d'un phénomène d'interférences et $f_1 = f_2 \approx 1000$ Hz ;

(c) Il s'agit d'un phénomène de battements et $f_1 \approx f_2 = 20$ Hz ;

(d) Il s'agit d'un phénomène de battements et $f_1 \approx f_2 = 1000$ Hz.

Q11. On considère le circuit électrique présenté ci-dessous. Il est constitué de générateurs idéaux de tension, délivrant une tension de 10 V et de condensateurs de capacité 5 μF. On s'intéresse plus particulièrement au condensateur entouré sur le circuit, dont on veut connaître la charge portée par ses armatures en régime stationnaire. En choisissant une maille adaptée, quelle est la valeur de Q ?



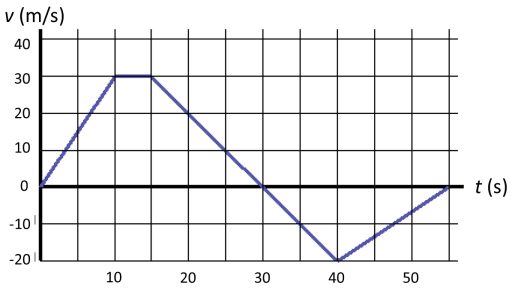
(a) $0,2\ \mu$C ;

(b) $0,5\ \mu$C ;

(c) $2.10^1\ \mu$C ;

(d) $5.10^1\ \mu$C.

Q12. On considère un objet qui se déplace selon un axe orienté $[Ox)$. Le graphique suivant représente la vitesse en fonction du temps de cet objet le long de cet axe. De quelle distance s'est déplacé l'objet sur cet axe entre $t = 0$ s et $t = 35$ s ?

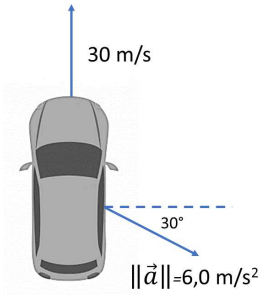


(a) 100 m ;
(b) 500 m ;
(c) 525 m ;
(d) 550 m.

Q13. La diffractométrie de neutrons est une technique d'analyse basée sur la diffraction des neutrons dits « thermiques » par la matière : les neutrons sont utilisés comme sonde pour explorer la matière à l'échelle atomique. À quelle température sont les neutrons ?

(a) $T = 0$ K ;
(b) $T = 4$ K ;
(c) $T = 0\ ^{o}$C ;
(d) Ils sont chauffés à une température supérieure à la température ambiante.

Q14. Une voiture se déplace sur une piste qui présente un virage de rayon de courbure R. Dans ce virage, la vitesse et l'accélération de la voiture sont fournies. Les données sont reproduites sur la figure ci-dessous. Quel est le rayon de courbure R de la route au niveau du virage ?



(a) 5,8 m ;
(b) $1,0.10^{1}$ m ;
(c) $1,7.10^{2}$ m ;
(d) $3,0.10^{2}$ m.

Q15. Gamma Virginis est une étoile de la constellation de la Vierge qui appartient à la séquence principale des étoiles comme le Soleil : elle est de masse environ 1,7 fois celle du Soleil, de température de surface environ 1,3 fois celle du Soleil et de rayon environ 1,4 fois celui du Soleil. Quel est le rapport entre la puissance émise par Gamma Virginis et celle émise par le Soleil ?

(a) 1,6 ;
(b) 6 ;
(c) 10 ;
(d) 16.

Fin de la partie A

Nom : Téléphone :

Prénom : Lycée :

Partie A
QCM — document réponse

Durée conseillée : 1 heure.

*Pour chaque question, les candidats **entoureront** la réponse de leur choix sur ce document.*
Il n'y a qu'une réponse correcte par question.

Q1. (a) (b) (c) (d)

Q2. (a) (b) (c) (d)

Q3. (a) (b) (c) (d)

Q4. (a) (b) (c) (d)

Q5. (a) (b) (c) (d)

Q6. (a) (b) (c) (d)

Q7. (a) (b) (c) (d)

Q8. (a) (b) (c) (d)

Q9. (a) (b) (c) (d)

Q10. (a) (b) (c) (d)

Q11. (a) (b) (c) (d)

Q12. (a) (b) (c) (d)

Q13. (a) (b) (c) (d)

Q14. (a) (b) (c) (d)

Q15. (a) (b) (c) (d)

Fin de la partie A

Partie B
Exercice 1
ITER : vers la production d'énergie par fusion nucléaire

Durée conseillée : 30 minutes.

Dans la recherche de nouvelles sources d'énergie, la fusion nucléaire, bien que très prometteuse, est encore balbutiante. Pour l'instant, la fusion nucléaire contrôlée nécessite un apport d'énergie plus élevé que ce que les réactions de fusion produisent. Le réacteur expérimental ITER, actuellement en cours de construction, sera, s'il fonctionne, le premier à produire plus d'énergie qu'il n'en consommera. Il s'agit d'un *tokamak*, c'est-à-dire une chambre à vide de forme toroïdale où les réactifs sont sous la forme d'un plasma à très haute température, comme expliqué ci-dessous.

Le but de cet exercice est d'en étudier quelques aspects.

Dans tout cet exercice, on appliquera les lois de la dynamique non relativiste.

Données :

Charge élémentaire : $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C.

Force électrostatique entre deux charges ponctuelles : $F = k\dfrac{|q_1 q_2|}{d^2}$ avec $k = 8,99 \cdot 10^9$ N·m^2·C^{-2}.

Masses en kg :

			noyaux			
électron	proton	neutron	deutérium=$^2_1$H	tritium=$^3_1$H	$^3_2$He	$^4_2$He
$9,11 \cdot 10^{-31}$	$1,673 \cdot 10^{-27}$	$1,675 \cdot 10^{-27}$	$3,35 \cdot 10^{-27}$	$5,01 \cdot 10^{-27}$	$5,01 \cdot 10^{-27}$	$6,65 \cdot 10^{-27}$

1 Barrière coulombienne

À des distances supérieures à 10^{-15} m, la force nucléaire, qui maintient les nucléons ensemble dans un noyau, est négligeable, de sorte qu'on considérera que la seule force entre deux noyaux au-dessus de 10^{-15} m est la répulsion électrostatique.

1. On considère un système constitué d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium initialement au repos et infiniment éloignés l'un de l'autre. Calculer l'énergie minimale à apporter pour les approcher à 10^{-15} m l'un de l'autre. L'exprimer en eV (1 eV $= 1,60 \cdot 10^{-19}$ J).

Pour obtenir une telle énergie, il faudra donc chauffer très fortement un mélange de deutérium et de tritium, afin qu'une proportion significative des noyaux atteigne l'énergie requise. Il ne sera pas nécessaire que l'énergie cinétique *moyenne* d'un noyau soit aussi élevée, mais son ordre de grandeur devra tout de même atteindre une dizaine de keV, soit une température d'ordre de grandeur 10^8 K. Sachant que l'énergie nécessaire pour arracher son électron à un atome d'hydrogène est d'environ 13,6 eV (indépendamment de l'isotope), il n'y a pas d'atomes à cette température, mais un mélange de noyaux et d'électrons qui se déplacent indépendamment les uns des autres : un *plasma*.

2 Réaction entre le deutérium et le tritium

La réaction entre un noyau de deutérium et un noyau de tritium produit un neutron et un noyau.

2. Écrire cette réaction. Vous indiquerez la nature du noyau produit, en précisant les lois que vous aurez utilisées.

3 Confinement du plasma

Vu sa température, il n'est pas question que le plasma touche les parois du réacteur. Il faut donc le *confiner*, c'est-à-dire le contraindre à rester dans une zone limitée à l'intérieur du réacteur.

Puisque le plasma est constitué d'entités électriquement chargées, on peut le manipuler grâce à un champ magnétique.

Dans un premier temps, on considère une particule de charge q et de masse m dans un champ magnétique uniforme et constant $\vec{B}$, avec un mouvement perpendiculaire à $\vec{B}$. La force magnétique qu'elle subit, appelée *force de Lorentz*, est orthogonale à sa vitesse $\vec{v}$ et au champ magnétique ; sa norme vaut $|q|vB$; son sens est donné par la *règle de la main droite* : si $q\vec{v}$ est le long du pouce droit et $\vec{B}$ le long de l'index, alors le majeur, placé perpendiculairement au pouce et à l'index, donne le sens de la force. On suppose qu'il n'y a pas d'autre force que la force de Lorentz.

3. On admet que le mouvement est circulaire.

a) Montrer qu'il est uniforme.

b) Montrer que sa fréquence doit prendre une valeur appelée *fréquence cyclotron* que vous exprimerez en fonction de q, B et m.

c) Dans ITER, le champ magnétique atteindra $B = 5,3$ T. Calculer alors la fréquence cyclotron pour les électrons et vérifier qu'elle est voisine de 150 GHz.

On admet que lorsque le mouvement n'est pas perpendiculaire au champ magnétique, il est la combinaison du mouvement circulaire uniforme étudié ci-dessus et d'un mouvement uniforme parallèle au champ magnétique. Ainsi, la trajectoire est une hélice enroulée autour d'une ligne de champ magnétique, et donc les particules restent au voisinage d'une ligne de champ magnétique.

Le moyen le plus simple pour obtenir un champ magnétique uniforme est un solénoïde, c'est-à-dire un fil électrique enroulé autour d'un cylindre et dans lequel passe un courant électrique. On obtient alors à l'intérieur du cylindre un champ magnétique uniforme parallèle à l'axe du cylindre.

4. Expliquer pourquoi, dans ce cas, le plasma n'est pas complètement confiné, en indiquant par où il peut sortir.

Ce problème ne se pose pas si on referme le solénoïde sur lui-même pour obtenir un tore ; telle est la disposition adoptée dans un tokamak. Bien sûr, le champ magnétique n'est alors plus uniforme. On admettra qu'en première approximation les résultats ci-dessus demeurent néanmoins valides : les particules chargées ont une trajectoire hélicoïdale autour d'une ligne de champ, avec la même expression pour la fréquence cyclotron.

4 Chauffage du plasma

Comme indiqué précédemment, il faut fortement chauffer le plasma pour permettre les réactions de fusion.

Un des moyens pour y parvenir est le *chauffage par résonance cyclotron des électrons*. Cela consiste à envoyer dans le plasma une onde électromagnétique à une fréquence judicieusement choisie.

Dans cette partie, on suppose que le champ magnétique vaut $B = 5,3$ T, comme précédemment.

5. On admet que les orbites des électrons autour des lignes de champ magnétique ont des niveaux d'énergie régulièrement espacés, l'écart entre deux niveaux consécutifs étant hf_c, où h est la constante de Planck et f_c est la fréquence cyclotron. Calculer la fréquence la plus basse absorbée par un électron.

6. On utilise aussi le chauffage par résonance cyclotron des noyaux, qui fonctionne selon le même principe sur les noyaux au lieu des électrons. Donner un ordre de grandeur de la fréquence la plus basse utilisée.

Fin de la partie B

Partie C
Exercice 2
Aberration de la lumière relativiste

Durée conseillée : 30 minutes.

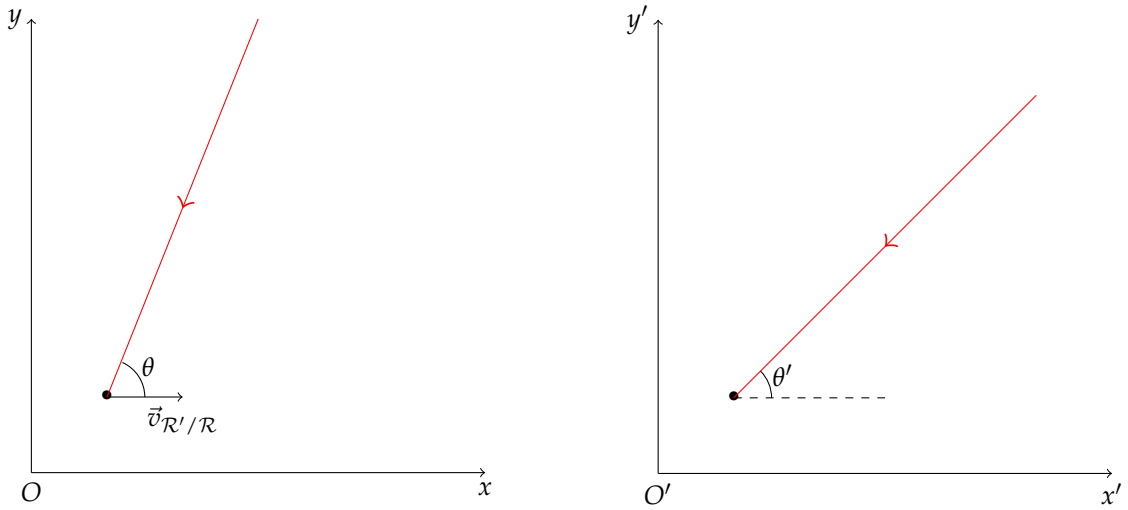


FIGURE 1 : *Rayon lumineux arrivant sur un objet immobile dans $\mathcal{R}'$, vu dans $\mathcal{R}$ sur la figure de gauche et dans $\mathcal{R}'$ sur celle de droite.*

Lorsqu'un corps est en mouvement, la direction apparente de tout objet ou signal est modifiée. Dans le cas de la lumière cet effet a été observé pour la première fois en 1680 par Jean Picard, bien que mal interprété. Il a fallu attendre les observations de James Bradley en 1725 pour avoir une interprétation correcte de cette déviation.

Nous allons nous intéresser ici à la direction apparente de propagation de la lumière émise par une étoile très lointaine et observée par un observateur terrestre.

On considère deux observateurs, c'est-à-dire deux référentiels $\mathcal{R}$ et $\mathcal{R}'$ qu'on suppose galiléens, et en translation l'un par rapport à l'autre à une vitesse constante $\vec{v}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} = u\,\vec{e_x}$ (voir figure 1).

On pourra introduire $\beta = \dfrac{u}{c}$ et $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$. Les quatre coordonnées spatio-temporelles d'un évènement mesurées dans $\mathcal{R}$ sont notées x, y, z, t et celles du même évènement, mesurées dans $\mathcal{R}'$ sont notées x', y', z', t'. Enfin les origines de nos deux repères coïncident : pour l'évènement $(x,y,z,t) = (0,0,0,0)$ on a $(x,y,z,t) = (x',y',z',t')$.

1. Écrire les transformations de Lorentz pour les quatre coordonnées d'espace-temps : on exprimera x', y', z' et t' en fonction de x, y, z et t. Si vous ne savez pas répondre à cette question il est toujours possible d'utiliser les formules données question 3 pour répondre à la fin de l'exercice.

2. En déduire les variations spatio-temporelles $\delta t'$, $\delta x'$, $\delta y'$ et $\delta z'$ en fonction de δt, δx, δy et δz ainsi que de c et u.

3. On considère un objet se déplaçant à une vitesse $\vec{v} = v_x\vec{e_x} + v_y\vec{e_y}$ dans $\mathcal{R}$. En remarquant que par exemple les composantes selon $\vec{e_x}$ de sa vitesse $\vec{v}$ dans $\mathcal{R}$ et de sa vitesse $\vec{v}'$ dans $\mathcal{R}'$ sont définies par $v_x = \lim\limits_{\delta x \to 0} \dfrac{\delta x}{\delta t}$ et $v'_x = \lim\limits_{\delta x' \to 0} \dfrac{\delta x'}{\delta t'}$, montrer que $v'_x = \dfrac{v_x - u}{1 - \frac{uv_x}{c^2}}$, $v'_y = \dfrac{v_y}{\gamma\left(1 - \frac{uv_x}{c^2}\right)}$ et $v'_z = 0$.

4. Dans le cas d'un rayon lumineux que valent $||\vec{v}||$ et $||\vec{v}'||$?
Dans le référentiel $\mathcal{R}$ ce rayon lumineux est situé dans le plan (Oxy) et fait un angle θ par rapport à l'axe Ox. Dans quel plan se situe ce rayon dans le référentiel $\mathcal{R}'$? Si on appelle θ' l'angle que fait ce rayon lumineux avec l'axe $O'x'$ dans le référentiel $\mathcal{R}'$, déterminer $\cos(\theta')$ en fonction de θ et β. Il en résulte une déviation $\theta' - \theta$ du rayon lumineux selon qu'il est observé dans $\mathcal{R}$ ou dans $\mathcal{R}'$. Cet effet est appelé aberration de la lumière.

5. Sachant que la Terre se déplace à 30 km·s^{-1} autour du Soleil, calculer la déviation, due à l'aberration de la lumière, $|\theta' - \theta|$ d'une étoile fixe dans le référentiel du Soleil située à la perpendiculaire de la Terre au dessus du plan de l'écliptique (on rappelle que le plan de l'écliptique est le plan de la trajectoire de la Terre autour du Soleil). Le résultat sera exprimé en seconde d'arc ($''$) $\left(1'' = \dfrac{1}{3600}\right)$.

La mesure des distances des étoiles proches est réalisée par la méthode de la parallaxe, en déterminant l'évolution de la position angulaire de l'étoile à 6 mois d'intervalle (soit un déplacement angulaire de 2α de l'étoile représentée sur la figure 2, où la parallaxe de l'étoile est l'angle α).

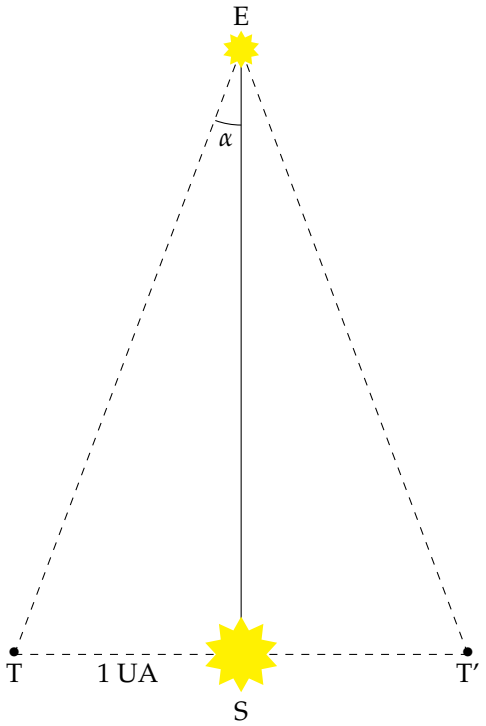


FIGURE 2 : *Schéma de principe de la mesure de la distance d'une étoile par la méthode de la parallaxe. (1 UA = 1 unité astronomique $\simeq 150 \cdot 10^6$ km)*

6. Calculer, pour l'étoile la plus proche de nous (Proxima Centauri, située à une distance 1,3 pc où 1 pc = 1 parsec $= 3,1 \cdot 10^{16}$ m), la parallaxe α et l'exprimer en seconde d'arc. Pour mesurer la parallaxe d'une étoile, il est donc très important de corriger. Est-il important de tenir compte de l'aberration de la lumière pour utiliser la méthode de la parallaxe ?

Fin de la partie C

Nom : Téléphone :

Prénom : Lycée :

Partie D
Problème
Autour des plumes d'oiseaux

Durée conseillée : 1 heure.

Les plumes d'oiseaux sont constituées à plusieurs échelles de structures périodiques. Au niveau macroscopique, les barbes de la plume (**figure 2**) sont régulièrement espacées, d'une distance que l'on notera a dans la suite du problème. A leur surface, on retrouve également des microstructures périodiques, dont la longueur caractéristique sera notée b dans la suite du problème. Ces microstructures peuvent être responsables des irisations observées sur certains oiseaux, comme les pigeons.

Ce problème aborde l'étude de ces structures périodiques en les assimilant à des réseaux de diffraction. La première partie portera sur l'étude des barbes et la seconde sur les microstructures.

Figure 1 : plume d'oiseau

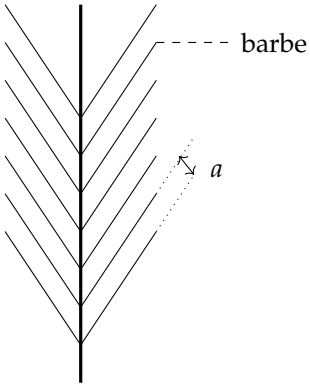


Figure 2 : vue de près d'une plume

1 Etude des barbes d'une plume

Au niveau macroscopique, on assimilera la plume étudiée à un réseau de diffraction de pas moyen a, représentant l'écart entre les barbes. On souhaite mesurer l'écart a entre ces barbes.

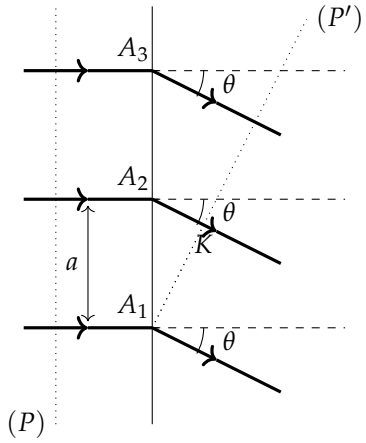


Figure 3 : réseau de diffraction éclairé en incidence normale

La plume est éclairée en incidence normale par des rayons lumineux, de longueur d'onde λ. Le passage à travers la plume entraîne une déviation des rayons lumineux, d'un angle θ. On s'intéresse à deux rayons successifs, passant par les points A_1 et A_2 par exemple. On note K le projeté orthogonal de A_1 sur le rayon émergent passant par A_2. Le plan (P) est un plan orthogonal à la direction de propagation des rayons avant le réseau. Le plan (P') est le plan orthogonal à la direction de propagation des rayons après le réseau passant par les points A_1 et K.

On admettra que les temps de parcours de la source au plan (P) d'une part et du plan (P') au point d'observation d'autre part sont identiques quel que soit le rayon lumineux considéré.

Q 1. Le temps de parcours entre les plans (P) et (P') est-il le même pour tous les rayons ?

Q 2. En déduire alors que la différence de marche δ entre les deux rayons successifs, c'est-à-dire la différence de longueur entre les chemins suivis par la lumière sur chaque trajet, s'écrit $\delta = a \sin\theta$.

Q 3. Pour quelles valeurs θ_k de θ (k étant un nombre entier relatif) peut-on observer des interférences destructives ?

On admettra que la superposition de tous les rayons émergents de la plume ne modifie pas les valeurs θ_k de l'angle θ pour lesquelles des interférences destructives sont observées. Expérimentalement, l'étude a été réalisée en éclairant la plume par un laser rouge, de longueur d'onde $\lambda = 650$ nm. La figure d'interférence est observée sur un écran placé à une distance $D = 1,0$ m de la plume.

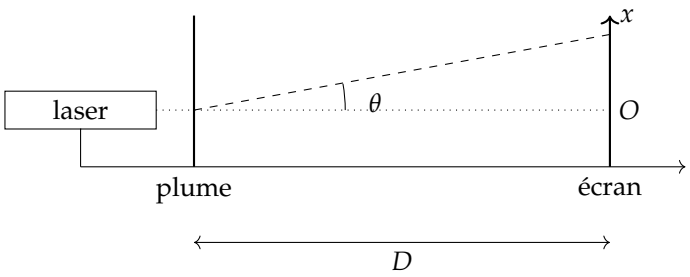


Figure 4 : montage expérimental

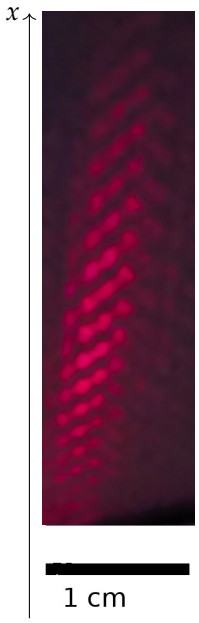


Figure 5 : figure d'interférence observée

Q 4. On note x_k la position sur l'écran de la k^{eme} tache sombre, repérée par rapport à la position du faisceau lumineux en l'absence de plume. Quelle est la relation entre x_k et θ_k ?

Q 5. Lorsque les angles θ considérés sont petits, on a $\sin\theta \simeq \tan\theta \simeq \theta$. En déduire l'expression de x_k en fonction de k, D, a et λ. En utilisant la figure 5 fournie et en détaillant le raisonnement suivi, déterminer la valeur de a. On précise que les échelles horizontale et verticale sont les mêmes.

2 Couleurs structurales

A la surface d'une barbe, on observe des structures périodiques similaires à un réseau de pas moyen b qui peuvent être responsables d'irisations. Les réseaux peuvent aussi permettre d'observer des interférences en réflexion. Les irisations des plumes d'oiseaux sont le plus souvent observées dans ce cas, le soleil se trouvant derrière l'observateur.

On supposera que les rayons lumineux arrivent en incidence normale par rapport au plan de la plume et on notera θ l'angle que font les rayons réfléchis avec ce plan. On observera les rayons réfléchis dans cette direction θ.

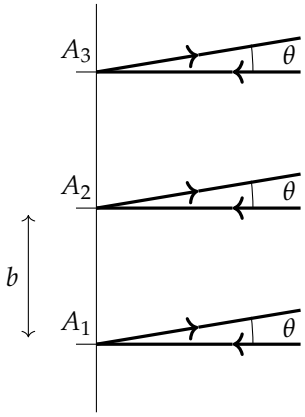


Figure 6 : réseau de diffraction étudié en réflexion

Q 6. Déterminer la différence de marche δ entre deux rayons successifs.

Q 7. Déterminer l'expression des angles θ_k, k étant un entier relatif, sous lesquels les ondes interfèrent constructivement.

Q 8. Rappeler les limites du domaine visible en termes de longueur d'onde.

Q 9. Donner l'expression des valeurs extrêmes k_{min} et k_{max} que peut prendre k pour que les interférences soient visibles par l'observateur.

Q 10. Réaliser les applications numériques pour une plume 1 pour laquelle $b = 10,0\ \mu$m et pour une plume 2 pour laquelle $b = 1,00\ \mu$m.

θ (°)	k_{min}	k_{max}
90		
60		
45		
30		

Plume 1

θ (°)	k_{min}	k_{max}
90		
60		
45		
30		

Plume 2

Q 11. Pourquoi n'observe-t-on pas d'irisations pour la plume 1 ?

Q 12. Pour la plume 2, on souhaite déterminer les couleurs observées lorsqu'un observateur se déplace par rapport à la plume, modifiant ainsi l'angle θ d'observation. Pour toutes les valeurs de k comprises entre k_{min} et k_{max}, calculer la longueur d'onde λ pour laquelle des interférences constructives sont observées dans le visible.

Chaque ligne du tableau suivant pourra comporter plusieurs valeurs de k et donc de λ.

θ (°)	k	λ (nm)
90		
60		
45		
30		

Q 13. En utilisant le tableau ci-dessous, en déduire l'ordre des couleurs observées lorsque l'observateur se déplace par rapport la plume et que θ varie de 90° à 30°.

Couleur	**Longueur d'onde** λ (nm)	**Couleur**	**Longueur d'onde** λ (nm)
Infrarouge	750-1000	Vert-bleu	495-520
Rouge	625-750	Cyan	490-495
Orange	600-625	Bleu azur	465-490
Jaune	585-600	Bleu	440-465
Vert-jaune	575-585	Violet	400-440
Vert	520-575	Ultraviolet	300-400

Fin de la partie D