Les LIDAR

Bac S 2016 Asie (ancien programme) · Exercice 2 **10 points** **Durée conseillée 1 h 40**

1.1 Donner deux propriétés caractéristiques du rayonnement émis par un laser.

Le rayonnement d'un laser est **monochromatique** (une seule longueur d'onde, ici 1064 nm) et **directif** (faisceau très peu divergent).

Deux propriétés parmi : monochromatique, directif, énergie concentrée dans l'espace et dans le temps.

COMPRENDRE
Le laser ne figure plus au programme actuel de spécialité de Terminale. Ces propriétés restent utiles : c'est la directivité du faisceau qui permet de viser un point précis du relief.

1.2 À quoi servent les lampes flash lors du fonctionnement de ce laser ?

Les lampes flash fournissent de l'énergie lumineuse au cristal : en absorbant un photon, un atome passe du niveau fondamental E_0 au niveau excité E_3 (transition $E_{0\to3}$ du diagramme).

Elles réalisent le pompage : leur lumière fait passer les atomes du cristal de E_0 à E_3.

COMPRENDRE
Sans cet apport, les atomes restent au niveau E_0 et aucune émission à 1064 nm n'est possible : l'émission laser correspond à la transition de E_2 vers E_1, qui suppose des atomes excités.

1.3 Le niveau E_0 étant pris comme origine des énergies, quelle longueur d'onde doit être présente dans le spectre de la lumière émise par une lampe flash ?

Données utiles $E_3 = 2{,}458 \times 10^{-19}$ J ; $E_0 = 0$ J ; $h = 6{,}62 \times 10^{-34}$ J·s ; $c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m · s^{-1}

Pour passer de E_0 à E_3, l'atome doit absorber un photon d'énergie exactement égale à l'écart entre les deux niveaux :

$$E_3 - E_0 = h\nu = \frac{h\,c}{\lambda} \quad \text{donc} \quad \lambda = \frac{h\,c}{E_3 - E_0}$$

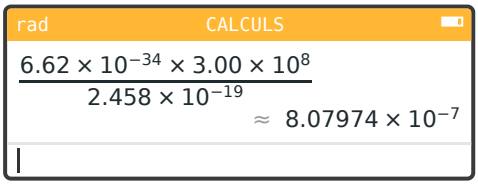
$$\lambda = \frac{6{,}62 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{2{,}458 \times 10^{-19} - 0} = 8{,}08 \times 10^{-7}\ \text{m}$$

$\lambda = 8{,}08 \times 10^{-7}$ m $= 808$ nm (proche infrarouge)

PIÈGE
Répondre 1064 nm. Cette longueur d'onde est celle de la lumière émise par le laser (transition de E_2 vers E_1), pas celle que les lampes doivent fournir pour le pompage.

COMPRENDRE
Trois chiffres significatifs : h et c en ont trois, même si E_3 en a quatre. Le résultat ne peut pas être plus précis que la donnée la moins précise.

À LA CALCULATRICE



1.4 En supposant négligeable devant H la distance parcourue par l'avion pendant Δt, montrer que $\Delta t = \dfrac{2 \times (H - h)}{c}$.

L'avion étant considéré comme immobile pendant Δt, l'impulsion descend verticalement de l'avion (altitude H) jusqu'au relief (altitude h), puis remonte par le même chemin.

Distance parcourue : $d = 2 \times (H - h)$.

L'impulsion se propage à la célérité c : $c = \dfrac{d}{\Delta t}$, d'où

$\Delta t = \dfrac{d}{c} = \dfrac{2 \times (H - h)}{c}$, relation attendue.

PIÈGE
Oublier le facteur 2 : la durée mesurée est celle d'un aller-retour. Et la distance avion-relief vaut $H - h$, pas H : les deux altitudes sont comptées depuis le niveau de la mer.

1.5 Parmi les graphiques a et b, indiquer celui qui correspond à la situation étudiée. Justifier brièvement.

D'après $\Delta t = \dfrac{2 \times (H - h)}{c}$, avec H et c constants, Δt diminue quand l'altitude h du relief augmente.

La courbe $\Delta t(t)$ a donc l'allure du relief survolé, mais renversée : chaque sommet donne un creux de Δt. Le relief commence au niveau de la mer (Δt maximale), puis présente un pic marqué (Δt minimale).

C'est le **graphique a**.

COMPRENDRE
Le graphique b reproduit le profil du relief : il représenterait h en fonction du temps, et non la durée Δt de l'aller-retour.

1.6 Lors du survol du Puy de Dôme, on mesure $\Delta t = 13{,}6$ µs. Estimer l'altitude du Puy de Dôme par rapport au niveau de la mer.

Données utiles $H = 3{,}50\ \text{km} = 3{,}50 \times 10^3$ m ; $\Delta t = 13{,}6 \times 10^{-6}$ s ; $c = 3{,}00 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (air)

De $\Delta t = \dfrac{2 \times (H - h)}{c}$, on tire $H - h = \dfrac{c\,\Delta t}{2}$, soit

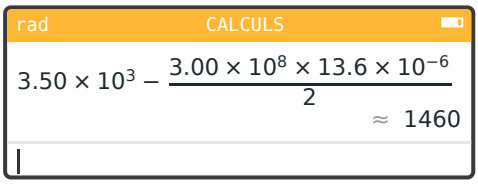
$$h = H - \frac{c\,\Delta t}{2}$$

$$h = 3{,}50 \times 10^3 - \frac{3{,}00 \times 10^8 \times 13{,}6 \times 10^{-6}}{2} = 3{,}50 \times 10^3 - 2{,}04 \times 10^3$$

$h = 1{,}46 \times 10^3$ m : le Puy de Dôme culmine à environ 1460 m.

PIÈGE
Laisser H en kilomètres ou Δt en microsecondes. Autre erreur fréquente : s'arrêter à $\dfrac{c\,\Delta t}{2} = 2{,}04$ km, qui est la distance avion-sommet et non l'altitude demandée.

À LA CALCULATRICE



1.7 Dans le cas de la mesure de l'altitude du Puy de Dôme, l'hypothèse faite à la question 1.4 est-elle vérifiée ?

Données utiles $v = 450\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; $\Delta t = 13{,}6 \times 10^{-6}$ s ; $H = 3{,}50 \times 10^3$ m

Vitesse de l'avion : $v = \dfrac{450}{3{,}6} = 125\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Distance parcourue par l'avion pendant l'aller-retour de l'impulsion :

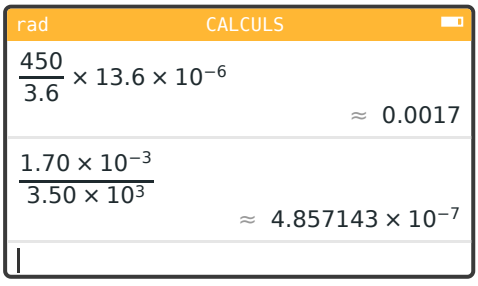
$$d_{\text{avion}} = v\,\Delta t = 125 \times 13{,}6 \times 10^{-6} = 1{,}70 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

soit 1,70 mm, à comparer à $H = 3{,}50 \times 10^3$ m : $\dfrac{d_{\text{avion}}}{H} \approx 5 \times 10^{-7}$.

$d_{\text{avion}} = 1{,}70$ mm $\ll H$: l'hypothèse est vérifiée.

MÉTHODE
Valider une hypothèse « négligeable devant » : calculer les deux grandeurs dans la même unité, puis former leur rapport. Un rapport très inférieur à 1 % justifie l'approximation.

À LA CALCULATRICE



2.1 Les longueurs d'onde des deux lasers sont 532 nm et 1064 nm. Attribuer, en justifiant, la longueur d'onde à chacun des deux lasers.

Le domaine visible s'étend d'environ 400 nm à 800 nm ; l'infrarouge correspond aux longueurs d'onde supérieures à 800 nm.

532 nm appartient au visible (le vert se situe au milieu du spectre visible) ; 1064 nm est supérieure à 800 nm.

Laser vert : $\lambda = 532$ nm ; laser infrarouge : $\lambda = 1064$ nm.

2.2 Expliquer pourquoi il est plus judicieux d'utiliser le laser vert, plutôt que le laser infrarouge, pour détecter le fond de l'eau.

Sur le spectre n°1, le coefficient d'absorption de l'eau est très faible vers 532 nm (ordre de grandeur 10^{-4}, près du minimum de la courbe), alors qu'il est environ mille fois plus élevé à 1064 nm (ordre de grandeur 10^{-1}).

L'eau absorbe donc très peu la lumière verte, qui peut atteindre le fond et en revenir, tandis que l'infrarouge est fortement absorbé.

Le vert traverse l'eau presque sans être absorbé, contrairement à l'infrarouge : lui seul permet de détecter le fond.

PIÈGE
L'axe vertical est logarithmique : une graduation correspond à un facteur 10. Deux points qui semblent proches verticalement peuvent différer d'un facteur 1000.

2.3 En vous appuyant sur un schéma expliquant le principe de la mesure, estimer la profondeur de l'eau à l'endroit où la mesure du document n°2 a été effectuée.

Données utiles document n°2 : retours à 2,840 µs et 2,875 µs ; célérité de la lumière dans l'eau $v_{\text{eau}} = 2{,}26 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Les deux impulsions partent en même temps et parcourent le même aller-retour dans l'air. L'infrarouge est renvoyé par la surface (premier retour) ; le vert parcourt en plus un aller-retour dans l'eau, de longueur $2p$ si p est la profondeur (deuxième retour).

Lecture du document n°2 : le premier maximum est à $2{,}840$ µs, le second à $2{,}875$ µs environ. Le retard vaut

$$\tau = 2{,}875 - 2{,}840 = 0{,}035 \text{ µs} = 3{,}5 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Ce retard est la durée du trajet $2p$ dans l'eau : $v_{\text{eau}} = \dfrac{2p}{\tau}$, donc

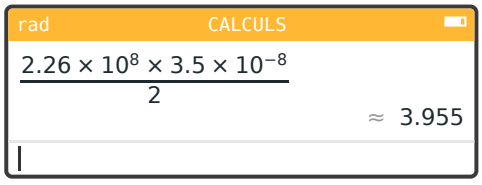
$$p = \frac{v_{\text{eau}}\,\tau}{2} = \frac{2{,}26 \times 10^8 \times 3{,}5 \times 10^{-8}}{2}$$

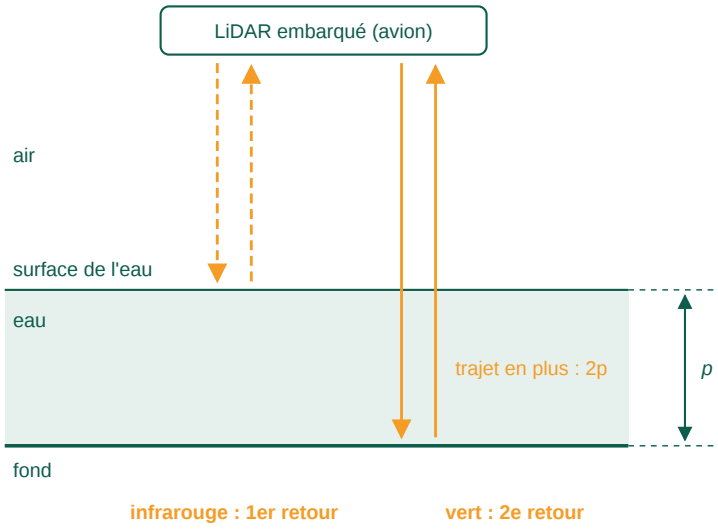
$p \approx 4{,}0 \text{ m}$

PIÈGE
Utiliser $3{,}00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$: le trajet supplémentaire se fait dans l'eau, où la lumière est plus lente. Ne pas oublier non plus le facteur 2 de l'aller-retour.

COMPRENDRE
Le retard est lu à quelques millièmes de microseconde près : deux chiffres significatifs suffisent, et un résultat compris entre 3,5 m et 4,5 m est acceptable.

À LA CALCULATRICE





2.3 · Principe de la mesure : les deux impulsions font le même trajet dans l'air, la verte parcourt en plus $2p$ dans l'eau (schéma pas à l'échelle)

3.1 Citer une différence entre les ondes utilisées par un LiDAR et celles utilisées dans ces deux expériences.

Le LiDAR émet de la lumière laser : c'est une onde électromagnétique, qui peut se propager dans le vide. Le dispositif du professeur utilise des ultrasons : ce sont des ondes mécaniques, qui ont besoin d'un milieu matériel pour se propager.

LiDAR : onde électromagnétique ; expériences : onde mécanique (ultrasons).

COMPRENDRE
Autre différence acceptée : la célérité dans l'air, $3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour la lumière contre $3{,}40 \times 10^{2}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour les ultrasons.

3.2 Pour l'expérience n°1, déterminer la valeur de la vitesse de déplacement du chariot, notée v_{exp1}, et exprimer le résultat en tenant compte de l'incertitude associée.

Données utiles $d = 30{,}0 \pm 0{,}5$ cm ; dix durées du tableau ; $\sigma_{n-1} = 2{,}35 \times 10^{-2}$ s ; $U(\tau) = \dfrac{2{,}26 \times \sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$; $\dfrac{U(v)}{v} = \sqrt{\left(\dfrac{U(\tau)}{\tau}\right)^2 + \left(\dfrac{U(d)}{d}\right)^2}$

Durée moyenne sur les $n = 10$ mesures : $\tau = \dfrac{20{,}78}{10} = 2{,}078$ s.

Vitesse : $v_{\text{exp1}} = \dfrac{d}{\tau} = \dfrac{30{,}0 \times 10^{-2}}{2{,}078} = 0{,}144\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Incertitude sur la durée : $U(\tau) = \dfrac{2{,}26 \times 2{,}35 \times 10^{-2}}{\sqrt{10}} = 1{,}7 \times 10^{-2}$ s

Incertitude sur la vitesse :

$$U(v_{\text{exp1}}) = 0{,}144 \times \sqrt{\left(\frac{1{,}7 \times 10^{-2}}{2{,}078}\right)^2 + \left(\frac{0{,}5}{30{,}0}\right)^2} = 2{,}7 \times 10^{-3}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

L'incertitude est arrondie par excès à un chiffre significatif : $0{,}003\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$v_{\text{exp1}} = (0{,}144 \pm 0{,}003)\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

PIÈGE
Dans le rapport $\dfrac{U(d)}{d}$, les deux grandeurs doivent être dans la même unité (cm et cm). Pour le calcul de v, en revanche, d doit être convertie en mètres.

COMPRENDRE
Le facteur 2,26 donne un intervalle de confiance à 95 % pour dix mesures. Le programme actuel utilise plutôt l'incertitude-type $u(\tau) = \dfrac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$, sans ce facteur d'élargissement.

MÉTHODE
Écrire un résultat avec incertitude : arrondir U par excès à un chiffre significatif, puis arrêter la valeur au même rang décimal. Ici U porte sur le millième, donc v s'écrit avec trois décimales.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\frac{2.08+2.05+2.06+2.13+2.08+2.07+2.09+2.05+2.08+2.09}{10} \approx 2.078$

$\frac{30.0\times10^{-2}}{2.078} \approx 0.1443696$

$\frac{2.26\times2.35\times10^{-2}}{\sqrt{10}} \approx 0.01679486$

$0.1443695861\times\sqrt{\left(\frac{0.01679485665}{2.078}\right)^2+\left(\frac{0.5}{30.0}\right)^2} \approx 0.002674152$

3.3 Lors de l'expérience n°2, le chariot se rapproche-t-il ou s'éloigne-t-il de l'ensemble « émetteur-récepteur » ? Justifier.

Données utiles chariot immobile : $f_1 = 42\,170$ Hz ; chariot en mouvement : $f_2 = 42\,134$ Hz

Quand le chariot est immobile, la fréquence reçue est égale à la fréquence émise : $f_{\text{ém}} = f_1$.

Quand il est en mouvement, $f_2 < f_1$: la fréquence reçue après réflexion est plus faible que la fréquence émise. D'après l'effet Doppler, une fréquence perçue plus basse correspond à un obstacle qui s'éloigne.

Le chariot **s'éloigne** de l'ensemble émetteur-récepteur.

COMPRENDRE
Même situation qu'une sirène d'ambulance : le son paraît plus grave quand elle s'éloigne, plus aigu quand elle se rapproche.

3.4 L'incertitude relative sur la vitesse déterminée dans l'expérience n°2 est de 5 %. Les deux expériences donnent-elles des valeurs de vitesse compatibles ?

Données utiles $f_{\text{ém}} = f_1 = 42\,170$ Hz ; $f_2 = 42\,134$ Hz ; célérité des ultrasons dans l'air $3{,}40\times10^2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $v_{\text{exp1}} = (0{,}144 \pm 0{,}003)\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (3.2)

Variation de fréquence : $|\Delta f| = |f_2 - f_1| = 42\,170 - 42\,134 = 36$ Hz.

De $|\Delta f| = \dfrac{2\times v\times f_{\text{ém}}}{c}$, où c est ici la célérité des ultrasons dans l'air :

$$v_{\text{exp2}} = \frac{|\Delta f|\times c}{2\times f_{\text{ém}}} = \frac{36\times3{,}40\times10^2}{2\times42\,170} = 0{,}145\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Incertitude : $U(v_{\text{exp2}}) = 0{,}05\times0{,}145 = 7{,}3\times10^{-3}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, arrondie par excès à $0{,}008\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

$v_{\text{exp2}} = (0{,}145 \pm 0{,}008)\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, soit $0{,}137 \leqslant v_{\text{exp2}} \leqslant 0{,}153$; pour l'expérience n°1 : $0{,}141 \leqslant v_{\text{exp1}} \leqslant 0{,}147$ (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Les deux intervalles se recouvrent : les valeurs $0{,}144$ et $0{,}145\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ sont **compatibles**.

PIÈGE
Prendre pour c la célérité de la lumière : l'expérience utilise des ultrasons dans l'air, donc $c = 3{,}40\times10^2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Avec $3{,}00\times10^8$, la vitesse trouvée serait absurde.

COMPRENDRE
Ici l'intervalle de l'expérience n°1 est entièrement contenu dans celui de l'expérience n°2 : la mesure au chronomètre est la plus précise des deux (2 % contre 5 %).

MÉTHODE
Comparer deux mesures : écrire chaque résultat sous forme d'intervalle, puis regarder si les intervalles ont une partie commune. Comparer seulement les deux valeurs, sans les incertitudes, ne permet pas de conclure.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\frac{(42\,170-42\,134)\times3.40\times10^2}{2\times42\,170} \approx 0.1451269$

$0.05\times0.1451268674 \approx 0.007256343$