EXERCICES CH16 PHENOMENES ONDULATOIRE : EFFET DOPPLER

Bac S 2018 Antilles Guyane http://labolycee.org

EXERCICE I – AUTOUR DU PAPILLON (11 points)

Pour se diriger dans l'obscurité ou chasser des insectes, certaines chauves-souris ont développé un système de sonar fondé sur la production et la réception d'ultrasons : l'écholocation.

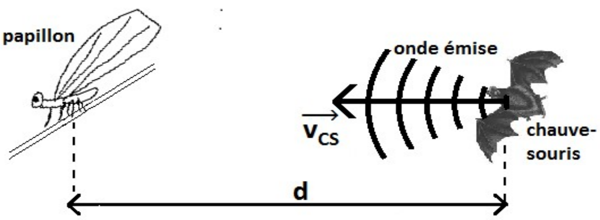


Figure 1. Schéma représentant une situation de chasse par une chauve-souris

Certains papillons « de nuit » sont en mesure d'entendre les émissions sonores des chauves-souris qui cherchent à les repérer. Pour les éviter, ils se laissent alors tomber de la branche sur laquelle ils se trouvent.

Cette tactique semble efficace, car seulement 7% des papillons qui l'utilisent sont capturés contre 50% de ceux qui ne l'utilisent pas (Pro Natura 1999)

D'après un site internet (http://www.futura-sciences.com)

L'objectif de cet exercice est d'étudier le principe de l'écholocation et la tactique de défense des papillons de nuit.

Données :

- la fréquence sonore supposée émise par la chauve-souris est : f_e = 50,0 kHz ;
- vecteur vitesse de la chauve-souris : $\vec{v}_{CS}$;
- vitesse de l'onde émise par la chauve-souris : v_{onde} = 340 m.s^{-1} ;
- intensité de la pesanteur : g = 9,8 m.s^{-2} ;
- masse du papillon : m = 0,50 g ;
- altitude du papillon avant la chute : h = 1,2 m.

1. Étude du sonar de la chauve-souris

1.1. Onde émise par la chauve-souris

1.1.1. À quel domaine de fréquence appartient l'onde émise par la chauve-souris ?

1.1.2. Est-ce une onde mécanique ou électromagnétique ? Justifier.

1.1.3. Cette onde est-elle transversale ou longitudinale ? Justifier.

1.2. Vitesse de la chauve-souris

En utilisant l'effet Doppler, il est possible d'évaluer la vitesse v_{CS} d'une chauve-souris. Pour une chauve-souris se rapprochant d'un récepteur ultrasons, le dispositif mesure une fréquence f_r différente de la fréquence émise par la chauve-souris.

Données :

- fréquence mesurée par le récepteur f_r = 50,8 kHz ;
- pour un émetteur en mouvement se rapprochant d'un récepteur fixe, la relation due à l'effet Doppler entre f_e, fréquence émise par la source, et f_r, fréquence reçue par le récepteur, est donnée par :

$$f_r = f_e \times \frac{v_{onde}}{v_{onde} - v_{émetteur}}$$

1.2.1. Montrer que la valeur de la vitesse de la chauve-souris v_{CS} est proche de 19 $km.h^{-1}$.

1.2.2. Comparer v_{onde} et v_{CS}. Expliquer en quoi ce résultat est important pour le déplacement ou la chasse de la chauve-souris.

1.3. Écholocation

La durée mise par les ondes pour revenir à la chauve-souris permet à cette dernière, après réflexion de l'onde sur une proie, d'apprécier la distance la séparant de cette proie, un papillon par exemple.

Le signal émis par la chauve-souris lui revient après une durée τ = 16,7 ms. Estimer la distance qui sépare la chauve-souris du papillon.

Bac S 2018 Antilles Guyane **Correction ©** http://labolycee.org
EXERCICE I – AUTOUR DU PAPILLON (11 points)

1. Étude du sonar de la chauve-souris

1.1. Onde émise par la chauve-souris

1.1.1.(0,5) L'onde émise par la chauve-souris a une fréquence de 50,0 kHz, comme $f > 20$ kHz elle appartient au domaine des ultrasons.

1.1.2.(0,5) L'onde ultrasonore nécessite un milieu matériel (l'air) pour se propager, il s'agit d'une onde mécanique ; alors qu'une onde électromagnétique peut se propager dans le vide.

1.1.3.(0,5) Cette onde est longitudinale car la direction de la perturbation est la même que la direction de propagation de l'onde.

1.2. Vitesse de la chauve-souris

1.2.1. On identifie v_{CS} à $v_{émetteur}$, à extraire de la relation donnée : $f_r = f_e \times \dfrac{v_{onde}}{v_{onde} - v_{émetteur}}$

$f_r \times \left(v_{onde} - v_{émetteur}\right) = f_e \times v_{onde}$ $\qquad$ $f_r \times v_{onde} - f_r \times v_{émetteur} = f_e \times v_{onde}$

$-f_r \times v_{émetteur} = f_e \times v_{onde} - f_r \times v_{onde}$ $\qquad$ $-v_{émetteur} = \dfrac{v_{onde} \times (f_e - f_r)}{f_r}$

(0,5) $v_{émetteur} = \dfrac{v_{onde} \times (f_r - f_e)}{f_r}$

$$v_{émetteur} = \frac{340 \times (50{,}8 - 50{,}0)}{50{,}8} = 5{,}35 \text{ m.s}^{-1} = 5{,}35 \times 3{,}6 \text{ km.h}^{-1} = 19{,}3 \text{ km.h}^{-1}$$

La vitesse de la chauve-souris est bien proche des 19 km.h^{-1} annoncés.

1.2.2.(0,75) $\dfrac{v_{onde}}{v_{émetteur}} = \dfrac{340}{5{,}35} = 63{,}6$ donc $v_{onde} \gg v_{émetteur}$, ce qui très important pour la chauve-souris qui se repère par écholocation : si ces deux vitesses étaient proches, la chauve-souris risquerait de rencontrer un obstacle avant de recevoir et de traiter l'écho.

1.3. Écholocation

Vu que le sujet demande d'**estimer** la distance, nous allons négliger la distance parcourue par la chauve-souris pendant la durée τ correspondant à l'aller-retour de l'onde.

Si on note ***D*** la distance séparant la chauve-souris de sa proie, on peut écrire :

$v_{onde} = \dfrac{d}{\Delta t} = \dfrac{2D}{\tau}$ ici à cause de l'aller-retour du signal émis par la chauve-souris

(0,25) Donc $D = \dfrac{v_{onde} . \tau}{2}$

(0,25) $D = \dfrac{340 \times 16{,}7 \times 10^{-3}}{2} = 2{,}84 \text{ m}$

Bac S 2015 Antilles Guyane **EXERCICE II**

La mesure de vitesse intervient dans un très grand nombre de procédés technologiques dans des domaines très variés : industrie, médecine, sport, transport, aérospatiale, …

Les dispositifs de mesure de vitesse sont généralement appelés cinémomètres. Les cinémomètres les plus courants peuvent être classés en deux catégories : les « cinémomètres Doppler » et les « cinémomètres laser ».

Cet exercice s'intéresse à certains aspects du fonctionnement et de l'utilisation de ces deux types d'appareils pour mesurer la valeur de la vitesse d'une « cible » dont la nature dépend du domaine d'application.

1. Cinémomètre Doppler

Ce type d'appareil utilise une onde électromagnétique monochromatique. Il comprend essentiellement : un émetteur qui génère une onde de fréquence f_0 = 24,125 GHz, un récepteur qui reçoit cette onde après réflexion sur la " cible " et une chaine de traitement électronique qui compare le signal émis et le signal reçu.
Si la " cible " visée a une vitesse non nulle par rapport au cinémomètre, l'appareil produit un signal périodique dont la fréquence, appelée « *fréquence Doppler* », est proportionnelle à la vitesse de la " cible ".

Données :

- Relation, en première approximation, entre la « fréquence Doppler » et la vitesse de la " cible " :

$$f_D = \frac{2.f_0.v_r}{c}$$

f_D : fréquence Doppler
f_0 : fréquence de l'émetteur
v_r : vitesse relative à la "cible" par rapport à l'émetteur
c : vitesse de la lumière dans le vide

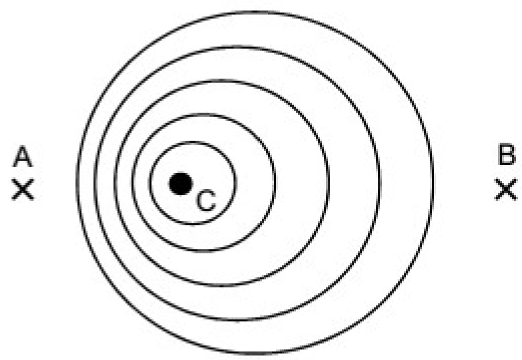
- Célérité des ondes électromagnétiques dans le vide ou dans l'air :

$$c = 3{,}00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

1.1. Les cinémomètres Doppler utilisent l'effet Doppler. Expliquer en quelques lignes en quoi consiste ce phénomène.

Un cinémomètre Doppler immobile est utilisé pour mesurer la vitesse d'une " cible " qui s'approche de lui. Les ondes électromagnétiques émises sont réfléchies par la " cible " avant de revenir au cinémomètre.

1.2. La figure ci-contre modélise de manière très simplifiée l'allure des ondes réfléchies par cette " cible ", notée C. Déterminer, en explicitant le raisonnement suivi, si le cinémomètre Doppler est situé au point A ou au point B.



1.3. Un cinémomètre Doppler est utilisé pour mesurer la vitesse des balles de tennis lors des principaux tournois internationaux comme celui de Roland Garros. Au cours de ce tournoi, lors d'un service, l'appareil mesure une fréquence Doppler de valeur f_D = 7416 Hz.

1.3.1. Calculer la valeur de la vitesse de cette balle.

1.3.2. Ce résultat est-il cohérent avec celui affiché sur la photographie ci-dessous prise lors de ce service ?

2. Cinémomètre laser

Le principe de la mesure de vitesse grâce à cet instrument est basé sur une mesure de la distance séparant la "cible" du cinémomètre laser. On mesure le temps mis par une impulsion laser pour atteindre la "cible" visée et revenir au cinémomètre après réflexion. Un compteur électronique de temps est déclenché lorsque l'impulsion est émise par le laser et arrêté lorsque l'impulsion « retour » est détectée. Connaissant la durée d'un aller-retour ainsi que la vitesse de la lumière, on en déduit la distance laser-cible. Pour connaître la vitesse de la "cible", il suffit de répéter le processus de mesure de distance à des intervalles de temps fixes.

Données :

- Valeur de la longueur d'onde de l'onde électromagnétique utilisée par un cinémomètre laser :
$$\lambda = 904 \text{ nm}$$
- Durée entre l'émission de deux impulsions laser consécutives :
$$T = 100 \ \mu\text{s}$$
- Exploitation d'une série de mesures d'une grandeur X :

Pour une série de mesures pour lesquelles on suppose les conditions de répétabilité vérifiées, on admet que :

- la meilleure estimation de la valeur x de la grandeur X est égale à la moyenne $\overline{x}$ des N valeurs mesurées ;
- la meilleur estimation de l'incertitude de mesure de la grandeur X, avec un niveau de confiance de 95% s'écrit :

$$U_x = 2 \times \frac{s_{n-1}}{\sqrt{N}}$$

N : nombre de valeurs disponibles

s_{n-1} : écart-type expérimental tel que :

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \times \sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})^2}$$

2.1. Expliquer le principe de l'émission stimulée et donner les principales propriétés du laser.

2.2. À quel domaine spectral appartient l'onde électromagnétique utilisée dans le radar laser étudié ?

2.3. Dans un processus de production industrielle, un cinémomètre laser en cours de réglage a effectué très rapidement une série de 10 mesures à intervalle de temps fixe. On obtient les résultats suivants :

Mesure n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v (m.s^{-1})	3,4	3,8	3,9	3,7	3,6	3,7	3,5	3,8	3,7	3,6

2.3.1. Évaluer le résultat de la mesure en faisant apparaître la valeur de l'incertitude avec un niveau de confiance de 95% et présenter le résultat sous la forme :

$$v = \bar{v} \pm u_V \quad \left| \begin{array}{l} v : \text{vitesse du véhicule (m.s}^{-1}) \\ \bar{v} : \text{meilleure estimation de la valeur de la vitesse (m.s}^{-1}) \\ u_V : \text{meilleure estimation de l'incertitude associée à la mesure (m.s}^{-1}) \end{array} \right.$$

2.3.2. Pour le processus considéré, on souhaite disposer d'une incertitude relative inférieure ou égale à 3%. Cette condition est-elle vérifiée pour le résultat précédent ?

2.4. Afin de déterminer la vitesse d'une "cible", le cinémomètre radar réalise plusieurs mesures de durée de parcours d'impulsions lumineuses.

2.4.1. Pour deux impulsions successives émises par le cinémomètre laser, montrer que la vitesse de la "cible" s'écrit :

$$v = c.\frac{|\tau - \tau'|}{2T} \quad \left| \begin{array}{l} v : \text{vitesse du véhicule cible} \\ c : \text{vitesse de la lumière} \\ T : \text{durée écoulée entre deux impulsions successives} \\ \tau : \text{durée mise par la première impulsion pour parcourir un aller-retour} \\ \tau' : \text{durée mise par la deuxième impulsion pour parcourir un aller-retour} \end{array} \right.$$

2.4.2. Dans le cas étudié à la question 2.3, montrer en raisonnant sur les ordres de grandeur, qu'il est techniquement très difficile de réaliser une mesure de la différence de durées $| \tau - \tau'|$. Expliciter le raisonnement

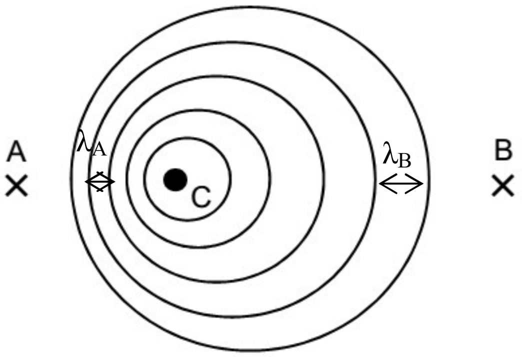
Bac S 2015 Antilles Guyane Correction

EXERCICE III. DES CINÉMOMÈTRES (5 POINTS)

1. Cinémomètre Doppler

1.1. (0,5) Une source d'onde de fréquence f_{source} est perçue par un récepteur en mouvement à une fréquence différente $f_{récepteur}$. La fréquence perçue dépend de la vitesse relative du récepteur par rapport à la source émettrice.
Si la source et le récepteur sont en approche relative alors $f_{récepteur} > f_{source}$. Si la source émet des ondes sonores, elles seront perçues plus aigües par le récepteur en mouvement relatif.
Si la source et le récepteur s'éloignent relativement alors $f_{récepteur} < f_{source}$. Si la source émet des ondes sonores, elles seront perçues plus graves par le récepteur en mouvement relatif.
Ce phénomène est appelé effet Doppler. Il s'applique également aux ondes électromagnétiques dont la lumière.

1.2. (0,5) Sur la figure présentée la cible réfléchit les ondes du cinémomètre. La cible joue alors le rôle de l'émetteur (ou source). Tandis que le cinémomètre (en A ou B) est le récepteur.
Comme la cible s'approche de l'émetteur alors $f_{récepteur} > f_{source}$ soit dans le contexte $f_{AouB} > f_{source}$.



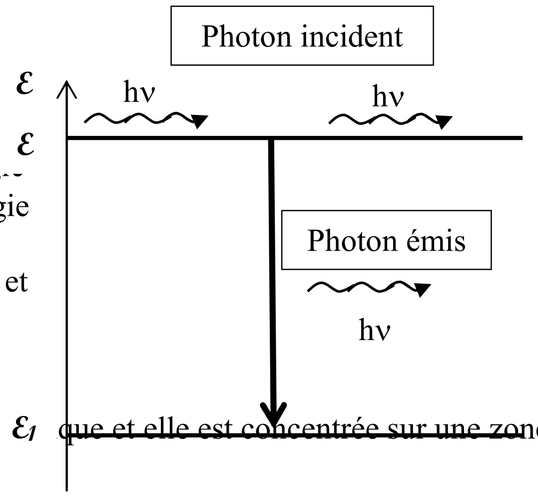
L'observation du schéma montre que A perçoit une onde de longueur d'onde λ_A inférieure à celle λ_B perçue par B.
$\lambda_A < \lambda_B$
Comme $\lambda = \dfrac{v}{f}$ et que l'onde possède partout la même célérité v alors $\dfrac{v}{f_A} < \dfrac{v}{f_B}$. On en déduit que $f_A > f_B$.
Ainsi pour A, il perçoit $f_A > f_{source}$, c'est que la cible s'approche de lui.
Pour B, $f_B < f_{source}$, la cible s'éloigne de B.
Le cinémomètre est situé en A puisque la cible s'approche de lui.

1.3.1. (0,25) $f_D = \dfrac{2.f_0.v_r}{c}$ donc $v_r = \dfrac{f_D.c}{2.f_0}$ **(0,25)** $v_r = \dfrac{7416 \times 3{,}00 \times 10^8}{2 \times 24{,}125 \times 10^9} = 46{,}1\ \text{m.s}^{-1}$

1.3.2. (0,25) On convertit en km/h en multipliant le résultat précédent par 3,6.
$v_R = 166\ \text{km.h}^{-1}$ valeur conforme à celle affichée par le cinémomètre photographié.

2. Cinémomètre laser

2.1. (0,5) Lors d'une émission stimulée, un photon incident interagit avec un atome dans un état excité. Le photon incident provoque l'émission d'un second photon par cet atome. L'énergie $\mathcal{E} = h.\nu$ du photon incident doit être égale à la différence d'énergie $\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$ entre deux niveaux d'énergie de cet atome. Le photon incident et le photon émis ont même fréquence, même direction et sens de propagation et sont en phase.

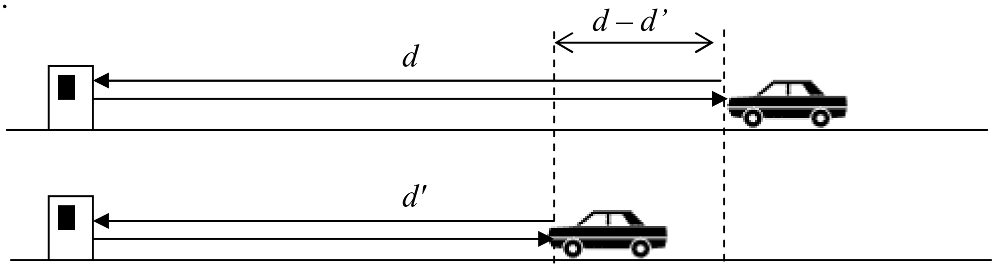


La lumière émise par le laser est directive, cohérente, monochromatique et elle est concentrée sur une zone de l'espace relativement étroite.

2.2. (0,25) Le radar laser possède une longueur d'onde de 904 nm > 800 nm, ce qui correspond au domaine de l'infrarouge.
2.3.1. (0,75) À l'aide de la calculatrice on calcule l'écart-type expérimental s_{n-1} et la moyenne $\overline{v}$.
Voir le diaporama http://fr.slideshare.net/Labolycee/ts-tpc2calculatricemoy-ecart

s_{n-1} = 0,149 m.s^{-1} $\overline{v}$ = 3,67 m.s^{-1} On peut calculer l'incertitude U(v) = $2.\frac{s_{n-1}}{\sqrt{N}}$ U(v) = $2\times\frac{0,149}{\sqrt{10}}$ = 0,094 m.s^{-1} On arrondit par excès à un seul chiffre significatif.
U(v) = 0,1 m.s^{-1}
L'incertitude porte sur les 1/10^{e}, on arrondit donc la moyenne au 1/10^{e} le plus proche
$\overline{v}$ = 3,7 m.s^{-1}. On obtient l'intervalle de confiance avec un niveau de confiance de 95% : ***v* = 3,7 ± 0,1 m.s^{-1}**.
2.3.2. (0,25) L'incertitude relative vaut $\frac{U(v)}{v} = \frac{0,1}{3,7}$ = 0,027 = 2,7%.
(0,25) Elle est inférieure à 3% conformément au souhait indiqué.
2.4.1. (0,75) À la date t = 0 s, la première impulsion est émise.
À la date $t = \tau$, la première impulsion a effectué un aller-retour.
On considère que la voiture est si lente par rapport à la lumière du laser qu'elle n'a pas bougé pendant cette durée τ. La lumière laser a parcouru la distance 2d à la célérité c. On a $c = \frac{2d}{\tau}$.
À la date $t = T$, la deuxième impulsion est émise.
À la date $t = T + \tau'$, elle a parcouru la distance $2d'$ à la célérité c ainsi $c = \frac{2d'}{\tau'}$
La distance d' est plus petite que la distance d car la cible s'est rapprochée d'une distance égale à $d - d'$ à la vitesse v en une durée égale à T.

$v = \frac{d-d'}{T}$



L'expression de la vitesse de la cible proposée ne contient pas d et d'.
Exprimons ces distances en fonction de τ et τ' : $d = \frac{c.\tau}{2}$ et $d' = \frac{c.\tau'}{2}$.

$$v = \frac{\frac{c.\tau}{2} - \frac{c.\tau'}{2}}{T} = \frac{\frac{c}{2}.(\tau - \tau')}{T}$$ On retrouve l'expression proposée : $v = c.\frac{|\tau - \tau'|}{2T}$.

2.4.2. (0,5) D'après l'expression précédente, on obtient $|\tau - \tau'| = v.\frac{2T}{c}$.
En 2.3. on a déterminé que la vitesse est d'environ 4 m.s^{-1}.
$$|\tau - \tau'| = 4\times\frac{2\times100\times10^{-6}}{3,00\times10^{8}} = 3\times10^{-12}\text{ s}$$
Soit une durée de l'ordre de 10^{-12} s.
Cette durée $\tau - \tau'$ est très faible, techniquement elle est très difficile à mesurer.
Il faut disposer d'un chronomètre d'une précision extrême.