

Nom:..... Prénom:..... Classe:..... Date:

Mesurer une vitesse grâce à l'effet Doppler: la chauve-souris.

✔ Objectifs	👤 Classe
<input type="checkbox"/> Effet Doppler. Décalage Doppler. <input type="checkbox"/> Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler. <input type="checkbox"/> Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques. <input type="checkbox"/> Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse.	Terminale Spé
	🕒 Durée
	2h

✂ Sur la paillasse

- Un oscilloscope numérique ;
- Un émetteur et un récepteur d'ultrasons ;
- Deux adaptateurs fiche BNC ;
- 3 câbles noirs et 3 rouges de grande taille ;
- Réglette adaptée au matériel à ultrasons.
- Un générateur de courant continu réglé sur 15 V.

Le système sonar que les chauves-souris utilisent pour se diriger et localiser leurs proies a longtemps semblé aussi rudimentaire que la canne d'un aveugle. C'est faux : les chauves-souris poursuivent et capturent les papillons de nuit avec une facilité et une précision qui font pâlir de jalousie les ingénieurs de l'aérospatiale !

Non seulement le sonar des chauves-souris leur indique à quelle distance se trouve une proie ou un obstacle, mais il leur révèle également des détails précis de cet objet. Du retard de l'écho par rapport aux sons qu'elles émettent, les chauves-souris déduisent la distance aux objets. En détectant les variations de fréquence de l'écho par rapport au son émis, par effet Doppler, elles perçoivent la vitesse relative d'un insecte en vol.

En Guyane on a recensé plus de 100 espèces de chauve-souris. En fonction de paramètres divers (communication, régime alimentaire), les cris émis par les individus (signal continu ou variable, gamme de fréquence, durée d'émission, présence d'harmoniques...) ainsi que leur utilisation diffèrent fortement¹.

Source : article *Pour La Science*, Nobuo Suga

📄 Document 1: L'écholocation

L'écholocation, ou écholocation, consiste à envoyer des sons et à écouter leur écho pour localiser, et dans une moindre mesure identifier, les éléments d'un environnement. Elle est utilisée par certains animaux, notamment des chauves-souris et des cétacés, et artificiellement avec le sonar.

Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Écholocation>

📄 Document 2: À quelle vitesse les papillons peuvent-ils voler ?

Les lépidoptères (papillons) ne se déplacent pas tous à la même vitesse :

- la noctuelle *Agropis epsilon* est capable d'atteindre $96,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ à $112,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;
- la noctuelle *Helicoverpa zea* se déplace à : $28,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;
- le monarque (*Danaus plexippus*) vole à une vitesse comprise entre $32 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ et $40,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;
- le sphinx *Manduca sexta* se déplace au maximum à $80,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Source : <http://www.insectes.org/>

1. Activité basé sur le travail de l'académie de Guyane

Document 3: Caractéristiques d'une chauve-souris

En Guyane Française, on trouve deux espèces de chauves-souris, insectivores, qui peuvent être rencontrées au sud de Régina.

Elles correspondent à deux types phoniques distincts pour l'espèce pteronotus : les groupes alitonus et rubiginosus.

Pour communiquer et chasser, des ultrasons de fréquence continue sont émis. La fréquence d'émission est de 53 kHz pour les individus du groupe rubiginosus.



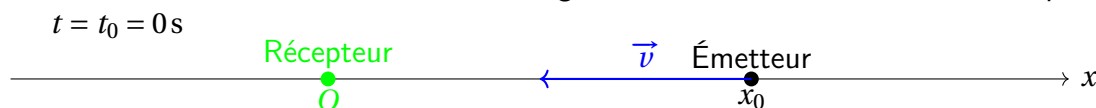
FIGURE 1 – Une chauve-souris de l'espèce des grands murins (*Myotis myotis*) en plein vol. Source : *National Geographic*

Source : www.plume-de-naturalistes.fr

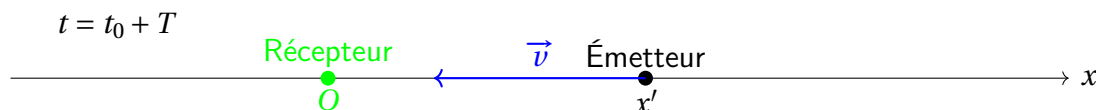
Document 4: L'effet Doppler

L'effet Doppler se manifeste par un décalage en fréquence entre l'émetteur et le récepteur lorsque ceux-ci sont en mouvement l'un par rapport à l'autre.

On considère un émetteur se déplaçant à la vitesse v vers un récepteur immobile placé en O . À la date $t_0 = 0$ s, l'émetteur est situé à l'abscisse x_0 émet un signal sonore, de célérité c , vers le récepteur.



À la date $t = t_0 + T$ (soit une période plus tard), l'émetteur, situé à l'abscisse x' émet un nouveau signal sonore, toujours de célérité c , vers le récepteur.



On montre que le décalage en fréquence Δf vaut :

$$\Delta f = f_R - f_E = \frac{v \times f_E}{c} \quad (1)$$

où f_E est la fréquence de l'émetteur ; f_R la fréquence mesurée par le récepteur ; v la vitesse de l'émetteur et c la célérité de l'onde.

Document 5: Mesurer la fréquence d'un signal à l'aide d'un oscilloscope à mémoire

Pour déterminer la fréquence d'un signal périodique à l'aide de l'oscilloscope, on peut :

- Mesurer la période du signal puis en déduire sa fréquence (pour une meilleure précision, compter une dizaine de périodes...);
- Utiliser la fonction "mesures" qui permet d'afficher, de manière instantanée, la fréquence du signal ;
- Utiliser la fonction "maths", qui permet d'afficher la somme de deux signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ de fréquences f_1 et f_2 proches, correspondant au son émis par l'émetteur et au son capté par le récepteur. Le signal obtenu, appelé battements, possède une enveloppe dont la fréquence vaut : $f = (f_1 - f_2)/2$.

Problématique : Avec quelle précision les chauves-souris localisent-elles une proie et déterminent sa vitesse grâce à leur cri ?

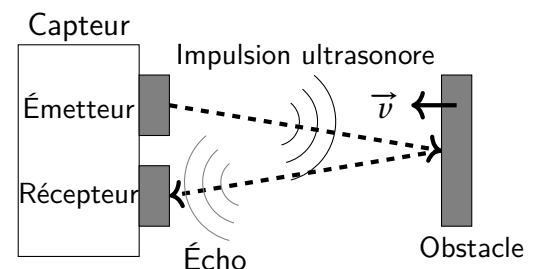
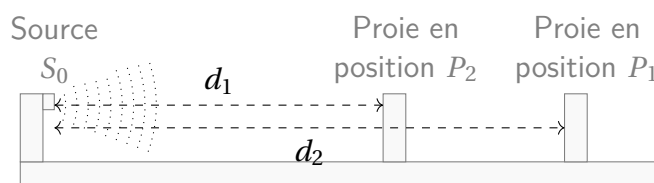
Afin de modéliser la chauve-souris et sa proie, on peut considérer, pour simplifier, que :

- la chauve-souris reste immobile, seule la proie se déplace ;
- la chauve-souris joue à la fois le rôle de l'émetteur et du récepteur ;
- la chauve-souris émet un cri de fréquence constante et unique (f_C) égale à 40 kHz ;
- on se trouve dans la situation où un écho est réfléchi sur un objet en mouvement, tout se passe donc comme si l'émetteur et le récepteur étaient en mouvement, l'un vers l'autre, mais à la même vitesse v , de sorte que l'effet Doppler est doublé par rapport au cas d'un émetteur en mouvement avec un récepteur fixe.

1 Écholocation

1. Schématiser l'expérience et proposer un protocole permettant de modéliser le système d'écholocation d'une chauve-souris repérant sa proie, considérée comme fixe, située à une distance de 30 cm.

Solution:



2. Quelle relation mathématique permet à la chauve-souris de mesurer la distance la séparant de sa proie ? Peut-on déterminer les grandeurs nécessaires à l'aide du matériel mis à disposition ?

Solution: Il s'agit de la relation de la vitesse :

$$v = \frac{d}{\Delta t} \iff d = v \times \Delta t \quad (2)$$

Il faut déterminer la vitesse du son. On peut effectuer ce travail à l'aide de deux récepteurs séparés d'une distance d connue et dont on mesure le retard τ .

3. Réaliser plusieurs mesures pour mesurer la célérité c du son dans l'air dans les conditions expérimentales (température, pression, humidité de l'air) ainsi que l'incertitude-type associée par une approche statistique (10 mesures au moins).

Solution: On effectue les mesures de distances et de retard associés qu'on compile dans le tableau suivant :

d (cm)	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0	44,0	48,0
τ (s)	$360,0 \times 10^{-6}$	$480,0 \times 10^{-6}$	$640,0 \times 10^{-6}$	$760,0 \times 10^{-6}$	$840,0 \times 10^{-6}$	$920,0 \times 10^{-6}$	$1,080 \times 10^{-3}$	$1,200 \times 10^{-3}$	$1,280 \times 10^{-3}$	$1,440 \times 10^{-3}$
v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	333	333	333	333	313	316	333	348	333	333

On approche l'erreur de la mesure par une approche statistique (Note : on aurait également pu faire une

mesure unique et déterminer l'incertitude de la mesure grâce à la formule $\frac{u(v)}{v} = \sqrt{\left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(\tau)}{\tau}\right)^2}$.

On calcule :

- $\bar{v} = 332 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- $\sigma_{n-1} = 10,76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- $u(v) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{N}} = \frac{9,97}{\sqrt{10}} = 3,40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Donc $v = 332 \pm 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. Calculer le z-score associé à votre mesure et conclure.

Solution:

$$z = \frac{|340 - 332|}{4} = 2$$

La mesure est tout juste compatible avec la valeur théorique. Le protocole peut être amélioré, notamment en détectant avec plus de précision les pics des salves. La valeur théorique dépend également de la température et de la pression de sorte qu'il faudrait adapter la valeur aux conditions du laboratoire lors de la mesure.

5. Avec la chauve-souris que nous avons modélisé, nous sommes capables de mesurer "facilement" un retard Δt l'ordre de 1 ms. Avec quelle précision pouvons-nous localiser un insecte? Comparer avec la précision dont est capable une vraie chauve-souris, qui est de l'ordre 1 μm . Commenter.

Solution: Un retard de $\Delta t = 1 \text{ ms}$ correspond à une distance entre la chauve-souris et la proie de $d = v \times \frac{\Delta t}{2} = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \frac{1 \text{ ms}}{2} = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \frac{1 \times 10^{-3} \text{ ms}}{2} = 17 \text{ cm}$.

Cette distance est beaucoup trop grande ($d \gg 1 \mu\text{m}$) pour que la chauve-souris puisse localiser sa nourriture et donc attraper sa proie.

2 Effet Doppler

6. Proposer un protocole permettant de modéliser la manière dont la chauve-souris mesure la vitesse d'un insecte lorsque celui-ci se rapproche.

Solution:

- On règle la fréquence de l'émetteur précisément sur 40 kHz en plaçant le récepteur en face de l'émetteur et en mesurant la fréquence grâce au mode "measure". On mesurera avec précision f_E grâce au module "measure".
- On place le récepteur à côté de l'émetteur.
- On place un écran en mouvement et se rapprochant de l'émetteur.
- On mesure la fréquence de la l'onde réfléchi par l'écran en mouvement en figeant l'image de l'oscilloscope ("run/stop") puis en utilisant les curseurs. On prendra soin de prendre une dizaine de périodes.

- On calcule Δf et on en déduit la vitesse de l'insecte $v = \frac{\Delta f \times c}{2 \times f_E}$.

7. Mettre en œuvre le protocole et donner un ordre de grandeur de la vitesse de déplacement de l'insecte. En pratique, l'espèce *pteronotus rubiginosus* est capable de capturer des papillons. La chauve-souris modélisée est-elle capable d'une telle performance ?

Aide : Δ Le décalage de fréquence dans le cas de l'expérience est différent du cas présenté dans le document 4 car l'onde fait un aller-retour et non plus un aller

$$\Delta f = f_R - f_E = \frac{2 \times v \times f_E}{c} \quad (3)$$

Solution: L'ordre de grandeur de la vitesse d'un papillon est de 1 mètre par seconde, on déplacera donc l'écran avec cette vitesse.

La période de l'onde réfléchi est de $\Delta T = 25,1 \mu\text{s}$ ce qui correspond à une fréquence de 39893 Hz donc le décalage Doppler est $\Delta f = f_E - f_R = 40060 - 39893 = 167 \text{ Hz}$.

Finalement, on obtient une mesure de la vitesse qui est égale à $v = \frac{\Delta f \times c}{2 \times f_E} = \frac{167 \text{ Hz} \times 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{2 \times 40 \times 10^3 \text{ Hz}} = 0,71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La vitesse de l'obstacle modélisant un insecte est de l'ordre de $0,71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

8. Conclure en indiquant les limites du modèle utilisé et/ou en proposant des hypothèses supplémentaires pour expliquer les performances dont les chauves-souris sont capables.

Solution: Le modèle utilisé a ses limites :

- La chauve souris est fixe ce qui n'est évidemment représentatif de la réalité.
- La chauve-souris est capable d'adapter la fréquence du son émis. En l'accentuant, alors le décalage Doppler est plus grand pour une même vitesse de l'insecte et la mesure est plus facile.

Ainsi, la chauve-souris est capable de calculer la distance où se trouve l'insecte, mais surtout de déterminer sa vitesse, ce qui lui permettra d'anticiper la trajectoire de sa proie et assurer une chasse vertueuse.