

B.O. Effet Doppler. Décalage Doppler.

I. L'effet Doppler.

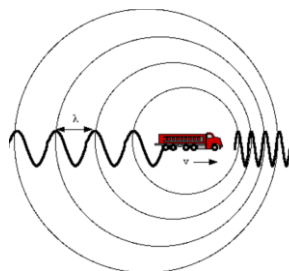
A partir de la vidéo suivante : La science du klaxon : <https://www.youtube.com/watch?v=Bz5wr3GhvUQ>
 Résumer en quelques lignes l'effet Doppler.

Résumé

Définition de l'effet Doppler : Modification de la fréquence d'un signal reçu par un observateur lorsque l'émetteur du signal se déplace relativement à l'observateur.



Source au repos
 Les ondes sonores reçues sont identiques pour les deux observateurs.



La source sonore s'éloigne de l'observateur X. La longueur d'onde du signal reçu est plus grande. La fréquence diminue.

Relations à savoir exploiter mais à ne pas connaître :

$$f_r = f_e \cdot \frac{c-v_r}{c-v_e} \quad v = \frac{|\lambda_{astre}-\lambda_{ref}|}{\lambda_{ref}} \cdot c \quad v = \frac{c}{2 \cdot \cos\theta} \cdot \frac{f_{Doppler}}{f_e} \quad v = \frac{|f_r-f_e|}{2f_e} \cdot c \quad (\text{cas de l'utilisation d'un écran réflecteur})$$

Applications :

- Calcul de vitesse d'un mobile (radar)
- Mesure du débit sanguin
- Recherche d'exoplanètes par le calcul de la vitesse radiale.

II. Cinémométrie Doppler ultrasonores.

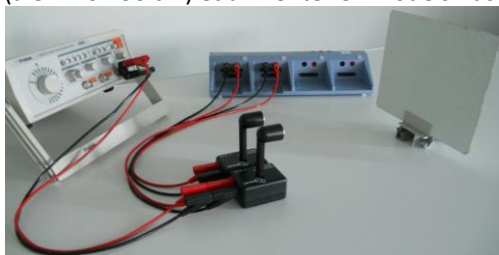
But : Appliquer l'effet Doppler dans le domaine ultrasonore à la détermination d'une vitesse.

Matériel :

- générateur basses fréquences
- interface d'acquisition de mesures
- deux capteurs ultrasonores
- écran

Manipulation :

- Connecter les capteurs ultrasonores sur deux voies de l'interface, renommées Ue et Ur.
- Placer les, côte à côte, face à un écran (à environ 30 cm) et alimenter en mode sinusoïdal celui qui joue le rôle d'émetteur (Ue).



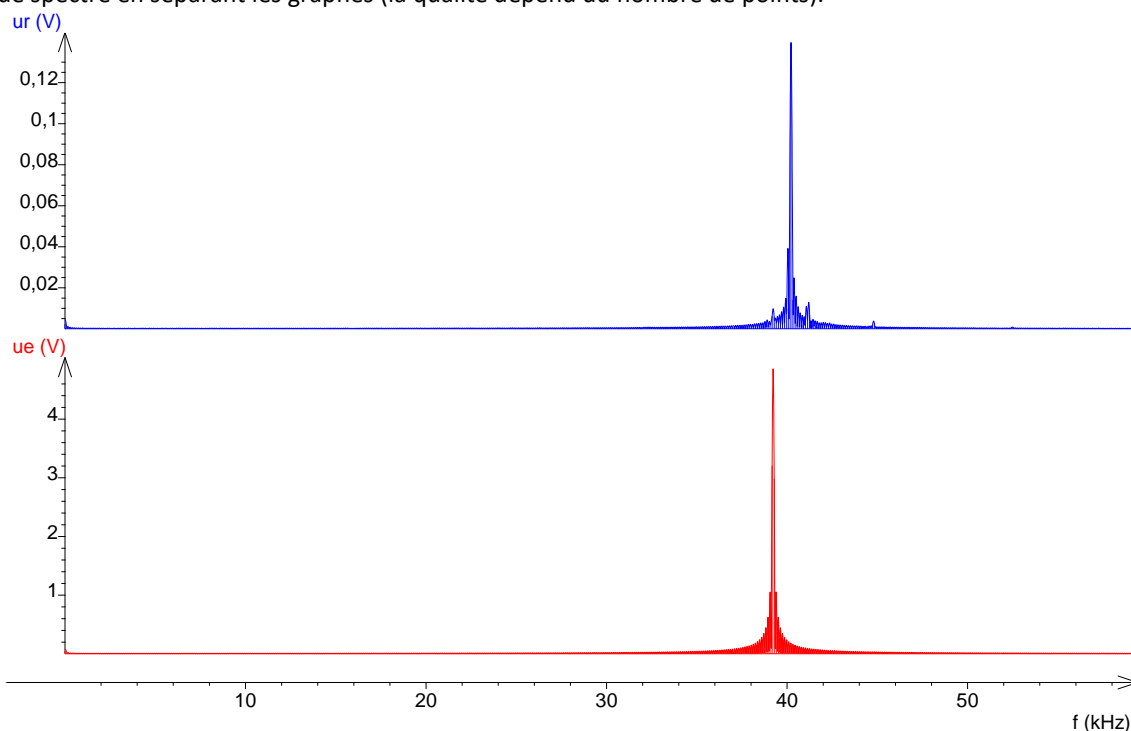
- Régler la fréquence à environ 40 kHz et affiner le réglage de la fréquence de sorte que la réception soit maximale en amplitude. Relever l'amplitude obtenue au niveau du récepteur Ur(t) et celle émise par l'émetteur Ue(t).
- Prendre l'écran à la main assez loin des capteurs puis le déplacer rapidement.

Traitement :

- On superpose les graphes Ue(t) et Ur(t) et on réalise un spectrogramme. Ce spectrogramme permet de distinguer les fréquences du signal émis f_E de celui du signal reçu f_R .

On détecte ainsi la différence entre les fréquences émises et reçues, on peut les comparer mais également réaliser la mesure des périodes sur ce graphe.

On passe en mode spectre en séparant les graphes (la qualité dépend du nombre de points).



Questions :

- L'écran est-il rapproché ou éloigné de l'émetteur-récepteur ? Justifier.
- Mesurer avec précision les fréquences f_e et f_r . (On peut faire une moyenne de l'ensemble des valeurs trouvées par les élèves).
- En déduire la vitesse de déplacement de l'écran avec la relation $v = \frac{|f_r - f_e|}{2f_e} \cdot c$, avec c célérité des ultrasons (340 m.s^{-1}).

Réponses :

- La fréquence du son reçu par le récepteur est plus élevée donc l'écran se rapproche.
- $f_e \approx 39,5 \text{ kHz}$ et $f_r = 40 \text{ kHz}$
- $v = \frac{|40 - 39,5|}{2 \times 39,5} \times 340 = 2,12 \text{ m.s}^{-1} = 7,7 \text{ km.h}^{-1}$

III. Relation générale entre la fréquence du signal reçu et la vitesse relative du mobile sonore.

a. Rappel.

La relation entre la fréquence et la longueur d'onde d'un signal périodique est :

$f = \frac{c}{\lambda}$ où c est la célérité du signal. Ce qui se traduit par le fait que plus la longueur d'onde est courte, plus la fréquence est élevée.

Un son de fréquence élevé est plus aigu qu'un son de fréquence faible.

b. Expression de la fréquence du signal reçu par effet Doppler.

Soit f_e la fréquence du son émis, c la célérité du signal et v_e la vitesse du mobile sonore par rapport à l'observateur immobile.

Soit v_e la vitesse de l'émetteur et v_r la vitesse du récepteur

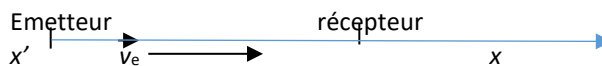
Il existe une relation qui est toujours vraie s'il on utilise les valeurs algébriques de v_e et de v_r

$$f_r = f_e \cdot \frac{c - v_r}{c - v_e} \quad \text{l'axe } x'x \text{ ayant la même direction que } c.$$

On considère que l'observateur et le récepteur sont sur un même axe.

Exemple : un émetteur se rapproche ($v_e > 0$) d'un récepteur immobile en émettant un son de célérité c

La formule devient $f_r = f_e \cdot \frac{c}{c - v_e}$ (on retrouve bien la formule vue plus haut).



Quand le mobile sonore se rapproche la fréquence f_r du signal reçu est $f_r = f_e \cdot \frac{c}{c - v_e}$.

La fréquence augmente, le son est plus aigu.

Quand le mobile sonore s'éloigne la fréquence f_r du signal reçu est $f_r = \dots f_e \cdot \frac{c}{c + v_e}$.

La fréquence diminue, le son est plus grave.

Question : déterminer l'expression de la fréquence f_r quand l'émetteur se déplace vers la droite avec une vitesse v_e et le récepteur se déplace vers la gauche avec une vitesse v_r .

Réponse : La formule générale $f_r = f_e \cdot \frac{c - v_r}{c - v_e}$ devient $f_r = f_e \cdot \frac{c + v_r}{c - v_e}$ car la vitesse v_r se déplace dans le sens opposé à c .

IV. Application de l'effet Doppler-Fizeau à la détection d'exoplanète.

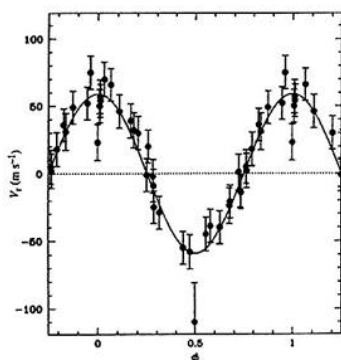
A partir du film (3 min 38 s) sur les exoplanètes répondre aux questions suivantes :

<https://www.youtube.com/watch?v=eykdOaWHS DY>

1. Qu'est-ce qu'une exoplanète ?
Une exoplanète est une planète qui tourne autour d'une étoile autre que le Soleil
2. Comment sont réparties les planètes légères (telluriques) et les planètes massives (géantes gazeuses) dans notre système solaire ?
Dans notre système solaire, les planètes légères (telluriques) sont proches du Soleil tandis que les planètes massives sont plus éloignées.
3. Citer les quatre catégories d'exoplanètes détectées.
 - Les Neptunes chauds (planètes gazeuses)
 - Les Jupiters chauds (très proches de leur étoile)
 - Les supers-Terres (planètes telluriques plus grandes la Terre)
 - Les Terres jumelles (proche des caractéristiques de la Terre)

4. La répartition des exoplanètes dans les autres systèmes stellaires est-elle similaire à celle de notre système solaire ?
Non, elles diffèrent par la position des géantes gazeuses (par exemple : les Jupiters chauds).
5. Énoncer les différentes techniques de détection des exoplanètes.
 - La vitesse radiale.
 - L'imagerie directe
 - L'astrométrie
 - Les microlentilles gravitationnelles
 - Le transit
6. Combien d'exoplanètes ont été confirmées à ce jour ?
4 000 exoplanètes
7. Découverte de la première exoplanète.

Courbe de vitesse de l'étoile 51 Pegase (1995)



Cette courbe est historique, car elle correspond à la première détection d'une exoplanète autour d'une étoile de type solaire. En abscisse, est représentée la période relative et en ordonnée la valeur de la vitesse radiale de l'étoile, c'est-à-dire de la planète qui orbite autour.

Cette observation a été réalisée à l'Observatoire de Haute-Provence, par Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève.

Crédit : (M.Mayor & D.Queloz)

La relation entre la vitesse radiale (vitesse mesurée dans l'axe de visée) de l'étoile et le décalage de longueur d'onde est

$$\Delta\lambda = \frac{v_{radiale}}{c} \cdot \lambda_0$$

Célérité de la lumière dans le vide $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$

La longueur d'onde de la raie spectrale de référence est $\lambda_0 = 604,142717 \text{ nm}$

Mayor et Queloz (Prix Nobel de Physique 2019) ont trouvé une longueur d'onde pour l'étoile en mouvement (vitesse radiale maximale) de $604,142847 \text{ nm}$.

Questions :

- Quelle est la valeur de la vitesse mesurée sur le graphique ?
- Déterminer la valeur de la vitesse radiale à partir de la relation $\Delta\lambda = \frac{v_{radiale}}{c} \cdot \lambda_0$

Réponses :

- Sur le graphique on peut lire $v_{radiale} = 60 \text{ m.s}^{-1}$ soit environ 216 km.h^{-1}
- $v_{radiale} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c = \frac{604,142847 - 604,142717}{604,142717} \times 299\,792\,458 = 64,5096240 \text{ m.s}^{-1}$