LP 5 : Effet Doppler

Introduction

I) **Description**
   1) Historique
   2) Démonstration

II) **Applications**
   1) Cinémométrie Doppler
   2) Effet Doppler – Fizeau en astrophysique
   3) Echographie Doppler

Niveau : Terminale S

Pré-requis : 2nde signaux périodiques et spectres, ondes sonores

Introduction

Avant d'introduire l'effet Doppler à proprement parler, les élèves devront traiter ce qui concerne les caractéristiques des ondes càd définir une onde progressive comme un phénomène de propagation d'une perturbation sans transport de matière mais avec transport d'énergie.

Ils devront savoir établir la relation entre la période, la longueur d'onde et la célérité qui sera indispensable à la compréhension de l'effet Doppler.

Enfin, les élèves devront posséder des connaissances sur les différents types d'ondes sur lesquelles l'effet Doppler aura des conséquences dont les principales seront :

- **les ondes sonores** que l'on caractérise comme une onde mécanique longitudinale de compression-dilatation à 3 dimensions.

- **les ondes électromagnétiques** qui sont dues à des oscillations très rapides d'un champ électromagnétique dans une gamme de fréquence propre à chaque espèce.

Il faut savoir que l'effet Doppler s'applique à toutes les ondes dans tous les milieux. Pour cela, je vais commencer par définir et décrire cet effet puis nous verrons dans quels types de domaines cet effet peut être utilisé et quelle en est son importance.

I) Description

1) Historique

En 1842, le physicien autrichien Christian Doppler observa une variation de la fréquence d'une onde émise par un corps en mouvement par rapport à un observateur. Il publia alors un article décrivant ce phénomène et, en 1845, une expérience réalisée par Buys Balot confirma cette théorie.

(Des musiciens furent placés dans un train et les expérimentateurs se placèrent au bord de la voie à des intervalles bien déterminés. Quand le train arriva, les musiciens d'instruments à vent retentirent et la hauteur des sons émis sembla diminuer quand le train fut passé comme l'avait prédit Christian Doppler.)

L'effet Doppler mis en évidence dans le domaine des ondes sonores, a pu être exploité dans le domaine des ondes électromagnétiques en 1848 par le Français Hippolyte Fizeau. Il démontra que si une étoile ou une galaxie s'éloigne ou s'approche de la Terre, alors on observera un décalage de ses raies d'absorptions. La mesure de ce décalage permettrait de calculer la vitesse radiale de l'étoile.

2) Démonstration

L'effet Doppler correspond donc au changement de fréquence associé au mouvement relatif d'une source sonore S et d'un récepteur placé au point M.

Plusieurs cas peuvent être envisagés :
- Emetteur et Récepteur tous deux en mouvement.
- Emetteur en mouvement et Récepteur immobile
- Emetteur immobile et Récepteur en mouvement.

Dans chaque cas il peut être envisagé que l'émetteur et l'observateur s'éloignent ou se rapprochent l'un de l'autre.

Cas choisi : Emetteur mobile se rapprochant du récepteur fixe

Animation

Source S mobile émet des « bips » sonores à intervalles de temps réguliers dont la période d'émission est notée Te. Le signal sonore se propage à la célérité c par rapport au référentiel terrestre.

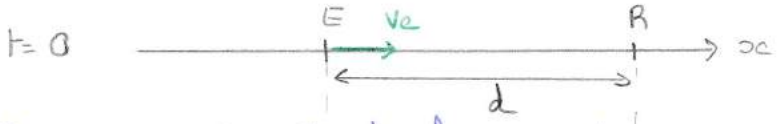
- D'après cette animation, on remarque que les ondes émises par une source en mouvement sont comprimées en avant et étirées en arrière.

- On met ici en évidence un phénomène de la vie quotidienne d'une sirène sur une ambulance qui donne un son :

* aigu quand le véhicule avance car l'onde est courte, la période petite donc la fréquence élevée

* grave quand le véhicule s'éloigne car les ondes sont plus longues et la fréquence plus petite

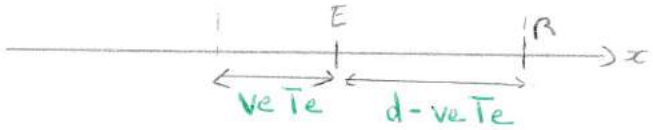
Démonstration



- Source émet trois sonores séparés de la période $Te = \frac{1}{fe}$

À $t = 0$: signal émis

Reçu par R à $t_1 = \frac{d}{c}$



- Ambulance a parcouru la distance $Ve\,Te$
- Nouveau signal reçu à $t_2 = Te + \frac{d - Ve\,Te}{c}$

Période pour le récepteur :

$Tr = t_2 - t_1$

$Tr = Te + \frac{d - Ve\,Te}{c} - \frac{d}{c}$

$Tr = Te\left(1 - \frac{Ve}{c}\right)$

Sait $fr = fe \frac{1}{\left(1 \ominus \frac{Ve}{c}\right)} = fe \frac{c}{c - Ve}$: $fr > fe$ (Son aigu)

↑ s'approche.

Si E s'éloigne $Ve < 0$ $\Rightarrow$ $fr = fe \frac{c}{c + Ve}$: $fr < fe$ (Son grave)

Expérience avec train :

But : mesurer la vitesse d'une locomotive à l'aide de l'effet Doppler.

On utilise le phénomène de battement : $\Delta f = f_r - f_e$.

1e cas : E mobile / R fixe ⇒ train avance

* Pour 4

$\Delta f = f_r - f_e \Rightarrow f_r = \Delta f + f_e$

$= 48,5$ Hz $=$

$$v_T = c\,\frac{f_r - f_e}{f_r} = c\,\frac{(\Delta f + f_e) - f_e}{\Delta f + f_e} = c\,\frac{\Delta f}{\Delta f + f_e}$$

$v_T = 0,41$ m/s > 0

Loi de propagation des incertitudes

$$\frac{\Delta v_T}{v_T} = \sqrt{\frac{\Delta T_b^2}{T_b}} \qquad \Delta T_b = 0,2 \cdot 10^{-3}\ s \qquad T_b = 20,8 \cdot 10^{-3}\ s$$

$$\Delta v_T = v_T\,\frac{\Delta T_b}{T_b}$$

$= 4,71 \cdot 10^{-3}$ m/s

0,41 → 100

$4,71 \cdot 10^{-3}$ → 1,1 %

$v_T = 41 \pm 0,471$ cm.s^{-1}

2e cas : Train recule. $v < 0$

$\Delta f = f_{batt} = 43,5$ Hz

$$v_T = c\,\frac{f_e - f_r}{f_r} = c\,\frac{-\Delta f}{\Delta f + f_e}$$

$v_T = -0,37$ m.s^{-1} < 0.

$v_T = -37 \pm 0,322$ cm.s^{-1}.

Position 7 :
$\Delta f = 65,5$ Hz

II) Applications

1) Cinémométrie Doppler

Certains radars de contrôle de vitesse installés sur le bord des routes sont des cinémomètres (appareil mesurant la vitesse d'un véhicule) utilisant l'effet Doppler-Fizeau pour calculer la vitesse d'un véhicule.

Principe : ces radars émettent en continu **une onde électromagnétique** de fréquence 24 GHz et mesurent la différence de fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie par le véhicule en mouvement, puis calculent la vitesse instantanée du véhicule.

Pour que les mesures réalisées par les radars (fixes ou mobiles) soient exactes, ceux-ci doivent être réglés à 25° par rapport à l'axe du déplacement.

Démonstration :

Radar : émet signal de fréquence f_e

① Fréquence perçue par le véhicule : f_V

$$f_V = f_e \left(1 + \frac{v_v}{c}\right)$$

② Véhicule réfléchi le signal ⇒ source en mvt

Fréquence perçue par le radar :

$$f_r = f_V \frac{1}{1 - \frac{v_v}{c}} \quad \text{d'où} \quad f_r = f_e \frac{c + v_v}{c - v_v}$$

On considère $v_v \ll c \Rightarrow c - v_v \sim c$

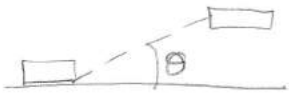
$$f_r = f_e \frac{c + v_v}{c} \quad \text{soit} \quad v_v = c \frac{\Delta f}{f_e} \quad \text{avec} \quad \Delta f = f_r - f_e$$

⚠ L'onde réceptionnée a parcouru un aller/retour ⇒ coefficient 1/2

$$v_v = \frac{c}{2} \frac{\Delta f}{f_e}$$

⚠ Tenir compte de l'angle de 25° p/r à la valeur

$V_v = \frac{V_{radiale}}{\cos\theta}$



$$V_v = \frac{c}{2\cos\theta}\,\frac{\Delta f}{f_e}$$

Application

Village => limitation à (50) => la voiture est elle en excès ?

Radar : $f_e = 24\ GHz$ $\Delta f = 2500\ Hz$ $\theta = 25°$

$$V = \frac{c}{2\cos\theta}\,\frac{\Delta f}{f_e} = \frac{3.10^8 \times 2500}{2\cos 25 \times 24.10^9} = 17,2\ m.s^{-1}$$

$V = 17,2 \times 3,6 = 62\ km.h^{-1}$ => infraction

2) Effet Doppler – Fizeau en astrophysique

L'effet Doppler est fort important en astronomie car il nous permet de déterminer la vitesse des objets célestes par rapport à la Terre.

En effet, si une étoile s'éloigne ou se rapproche de nous, on va observer un décalage de ses raies d'absorptions.

Si l'étoile s'éloigne, le décalage sera vers les grandes longueurs d'onde ce qui correspondra un décalage vers le rouge que l'on nomme « **redshift** ».

Inversement, lors d'un **rapprochement d'une étoile**, on observera un décalage vers les petites longueurs d'onde => décalage vers le bleu **« blueshift »**

On peut aussi utiliser l'effet Doppler pour mesurer la rotation d'un objet comme une galaxie. En effet, lorsqu'un objet tourne, un de ses cotés se rapproche de la Terre tandis que l'autre s'éloigne. On va alors avoir un décalage vers le bleu et le rouge dû à **la vitesse du mouvement des particules qui entre en collisions** superposés à un décalage vers le bleu et le rouge dû à la **vitesse de déplacement de l'objet.**

Animation : vitesse radiale des étoiles

https://lycee.editions-bordas.fr/9782047329313/asset/732931_P1S4_act6_p73_html5/index.html

Pour déterminer la vitesse radiale d'une étoile on va faire appel à une formule :

$$V = c \left| \frac{\lambda_{spectre} - \lambda_{ref}}{\lambda_{ref}} \right|$$

obtenue à partir de l'expression $f_R = f_e \frac{c}{c + v_e}$ (E s'éloigne)

et $\lambda = \frac{c}{f}$.

$$V = 3.10^8 \left| \frac{621 - 537}{537} \right|$$

$V = 47.10^3$ km.s^{-1} > 0 s'éloigne

Spectre 3

$V = |-47.10^3|$ km.s^{-1} < 0 ⇒ rapprochement blueshift

Détection des exoplanètes

Les exoplanètes sont des planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil.

Détecter une exoplanète de manière directe n'est pas facile :

- une planète ne produit pas de lumière : elle ne fait que diffuser celle qu'elle reçoit de son étoile
- la distance qui nous sépare de l'étoile est de loin bien plus importante que celle qui sépare l'exoplanète et son étoile : le pouvoir séparateur des instruments de détection doit donc être très élevé pour pouvoir les distinguer.

C'est grâce à l'effet Doppler-Fizeau et la méthode de la vitesse radiale que l'on va pouvoir les détecter. Cependant pour que la perturbation soit détectable, l'exoplanète doit être suffisamment massive et proche de son étoile pour pouvoir en modifier le mouvement de manière significative.

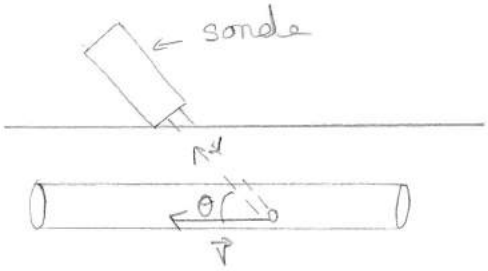
La 1ere exoplanète fut découverte en 1995 autour de l'étoile 51 Pegasi.

3) Echographie Doppler

La médecine fait appel à l'effet Doppler pour mesurer la vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux sanguins afin de voir s'il y a un rétrécissement des vaisseaux.

Cette application médicale n'est réalisée que vers les années 1960, avec l'utilisation d'ondes ultrasonores.

Schéma :



L'échographe est à la fois un émetteur et un récepteur d'ultrasons.

L'émetteur produit des **ondes ultrasonores** qui traversent la paroi d'un vaisseau sanguin. Pour simplifier, on suppose que lorsque le faisceau ultrasonore traverse des tissus biologiques, il rencontre :

- des cibles fixes sur lesquelles il se réfléchit sans modification de la fréquence ;
- des cibles mobiles, comme les globules rouges du sang, sur lesquelles il se réfléchit avec une modification de la fréquence ultrasonore par effet Doppler.

On va alors pouvoir obtenir le décalage en fréquence et remonter à la vitesse par cette formule :

$\Delta f = fr - fe = 2\ fe\ V \cos\theta / C$ $\Rightarrow$ $V = \frac{C}{2\cos\theta} \frac{\Delta f}{fe}$

Fe : fréquence d'émission de la sonde (comprise entre 2 et 10 MHz)

Fr : fréquence de réception de la sonde ;

V : vitesse des globules rouges dans le vaisseau

θ : angle entre l'axe du vaisseau et l'axe du faisceau ultrasonore = 45 °

C : vitesse moyenne des ultrasons dans le corps humain (1 540 m/s)

Conclusion

A travers cette leçon, nous venons de voir ce que l'effet Doppler pouvait apporter à la science. Nous sommes restés dans le cadre de la physique classique pour le niveau Terminale, cependant cet effet peut être étudié en relativité restreinte dans l'enseignement supérieur. En effet, les vitesses considérées ici sont beaucoup plus faibles que celle de la lumière mais dès qu'une source se déplace plus vite que 0.1c alors l'effet de ralentissement apparaît et il faut alors introduire le facteur de Lorentz γ dans l'équation qui va nous amener à cette équation :

D'où vient la loi de propagation ?

v_T = vitesse transversale

Phénomène de battement.

⚠ Chiffre significatif ; Incertitude

Vitesse transversale : comparer avec chronomètre à la main

Niveau supérieur : Notions connues ⇒ développement limité ⇒ retrouver formule de Taylor

Quadrupôle onde