

LP 18 : Effet Doppler (supérieur)

Élément imposé possible : Différentes applications : radar, vitesse d'étoile, détection d'exoplanète, vitesse du sang...

Niveau : Supérieur, BCPST 2

Prérequis :

- Ondes, surfaces d'ondes, propagation (L1)
- Ondes progressives sinusoïdales, double périodicité (TS)
- Effet Doppler (TS)
- Spectre d'émission et d'absorption des étoiles (1e S)
- Analyse spectrale par transformée de Fourier ()
- Développement limité(L1)
- Incertitudes
- Filtre passe-bas (L1)

Biblio :

Grecias, compétences prépa BCPST2

Hachette TS

Fruchart

http://physiquecarnotsupiv.blog.free.fr/public/Travaux_pratiques/TP_ondes/Effet_Doppler.pdf

<http://www.cochlea.org/entendre/la-sirene-d-ambulance-effet-doppler>

<http://scphysiques.free.fr/animations/anim/ondes/Doppler.swf>

<https://www.geogebra.org/m/MhXH3vcu>

Intro pédagogique :

Effet Doppler a été déjà abordé en classe de TS, les étudiants ont donc déjà eu une première approche du phénomène, cependant la démonstration de l'expression du décalage n'avait pas été vu, on va le faire dans cette leçon.

Aborder en BCPST 2 dans le thème signal et rayonnement

- Compétences exigibles: démonstration + mesure de vitesse (compétence expérimentale)
- Exemple au programme : échographie Doppler

Toujours dans la continuité des programmes de lycée, les ondes avaient été vues pour la première fois dans le cursus scientifique en seconde dans le cadre d'un thème sur la santé, et en BCPST on revient sur les techniques d'imageries médicales mettant les ondes à profit notamment pour mesurer la vitesse d'écoulement sanguin

Contexte : dans séquence sur les ondes, avant cours sur les autres propriétés des ondes (diffraction, interférences). Déjà vu ondes acoustiques.

Ici description du phénomène et description de certaines applications physiques.

On va traiter le cas du récepteur fixe et de l'émetteur mobile pour la démo. Toujours à une dimension dans le cadre du programme. Cas réciproques admis par analogies.

Pour les applications, on fait aussi démo pour une.

TP : contrôle de vitesse d'un mobile par effet Doppler à comparer avec une technique de pointage

TD : Étude d'autres cas de figure et d'autres applications en étude documentaire.

Difficultés : la démonstration, les expressions mathématiques. On appuiera la démo de schéma .

De plus fonctionnement echo/radar peut être source d'incompréhension →signal fait aller-retour. On va détailler l'aller puis le retour en faisant la démo.

Objectifs :

Être capable de démontrer la formule du décalage Doppler en fréquence
Mettre en application un protocole de mesure de vitesse par effet Doppler
Connaître les domaines d'applications de l'effet Doppler

Introduction

Dans la vie quotidienne on entend souvent l'effet Doppler : ex: Son d'une ambulance en mouvement

→ La fréquence perçue change lorsque l'ambulance est en mouvement :

- plus aigu quand elle se rapproche
- plus grave quand elle s'éloigne. On a une piste audio

On a vu que chaque type d'onde se propage dans un milieu homogène non dispersif à vitesse constante qui ne dépend que des propriétés physiques de ce milieu. Cependant, la fréquence et la longueur d'onde d'une onde peuvent être modifiées par un mouvement relatif entre la source et le détecteur : c'est l'effet Doppler.

Effet Doppler = décalage en fréquence entre onde émise par la source et onde reçue par le récepteur lorsqu'ils sont en mouvement relatif.

Il a été démontré en 1842 par Johann Doppler et vérifié en 1845 par Buys Ballot qui a fait jouer des trompettistes dans un train et des musiciens les écouter sur la terre ferme.

I. Description de l'effet Doppler

A. Lien entre vitesse et décalage en fréquence

SLIDE. Lorsque l'émetteur aura dépassé le récepteur, les fronts d'onde ont de plus en plus de distance à parcourir pour atteindre le récepteur. L'intervalle de temps entre deux fronts d'onde à la réception est maintenant supérieur à l'intervalle réel lors de l'émission.

On va établir une expression du décalage en fréquence entre la fréquence émise et celle reçue.

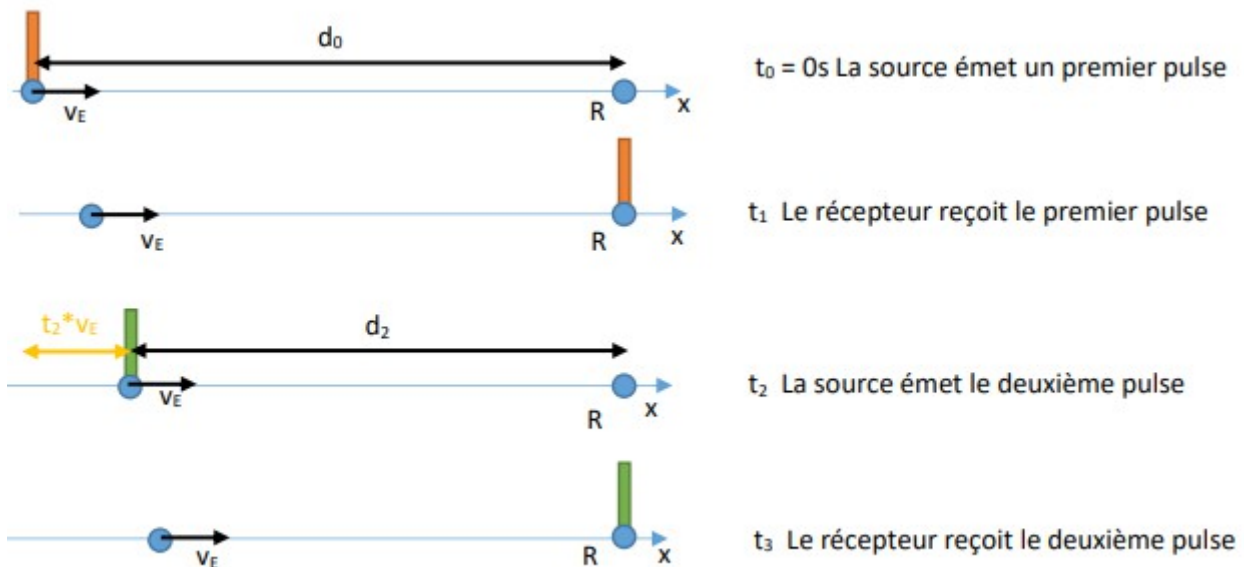
On fait que le cas unidimensionnel. Hypothèse : $v_e \ll c$ vitesse de l'onde

Émetteur Mobile, récepteur fixe :

On a un émetteur sonore mobile, un récepteur fixe, on choisit la vitesse de l'émetteur et sa fréquence, on peut mesurer la fréquence reçue par le récepteur.

Démonstration schéma rectiligne (GRECIAS ROSE p391)

Au tableau schéma + démo :



L'émetteur émet un signal avec une période $T_e = t_2 - t_0$ (temps entre deux pulses)

Le récepteur reçoit un signal avec une période $T_r = t_3 - t_1$ (temps entre la réception des deux pulses)

On cherche T_r en fonction de T_e

Le premier pulse a parcouru une distance d_0 en t_1 s à la vitesse c . $t = d/v \rightarrow t_1 = d_0/c$

Le second pulse, a parcouru une distance d_2 en $t_3 - t_1$ s à la vitesse $c \rightarrow t_3 - t_2 = d_2/c$

Graphiquement :

$$d_2 = d_0 - t_2 \cdot v_E$$

$$\text{Donc } t_3 - t_2 = \frac{d_0 - t_2 \cdot v_E}{c} \rightarrow t_3 = \frac{d_0}{c} + (1 - \frac{v_E}{c})t_2$$

$$t_2 = T_e$$

$$\text{Soit } T_r = (1 - \frac{v_E}{c})T_e$$

$$\text{En fréquence } f_r = (1 - \frac{v_E}{c})^{-1} \cdot f_e$$

$$\text{Comme } v_E \ll c, \text{ DL à l'ordre 1 } \rightarrow f_r = (1 + \frac{v_E}{c})f_e$$

On peut généraliser la démo dans le cas où la source s'éloigne en considérant des vitesses algébriques.

On peut expliquer les fréquences perçues comme l'ambulance passe.

Transition : $v \ll c$ donc $\Delta f/f$ est très faible, comment le mesurer ?

B. Mise en pratique : mesure d'une vitesse

Expérience : Fruchart p539

Mesure sur banc Doppler, émetteur et récepteur ultrasonore, dispositif de translation rectiligne.

Mesure avec multiplieur + filtre RC (aux bornes de C)

En sortie \rightarrow un signal de fréquence Df

En préparation : le faire avec plusieurs vitesses \Rightarrow droite d'étalonnage

En leçon : avec une vitesse inconnue

http://physiquecarnotsupiv.blog.free.fr/public/Travaux_pratiques/TP_ondes/Effet_Doppler.pdf

Transition : Vélocimétrie par effet Doppler est exploitée dans de nombreux domaines.

II. Effet Doppler comme outils d'analyse (à choisir en fonction de l'élément imposé)

A. Calcul de la vitesse du sang

GRECIAS ROSE p12, BUP 798 p1927

Mesure de la vitesse d'un écoulement sanguin : une sonde ultrasonore émet un signal qui se propage à la célérité c , et qui atteint une hématie, qui renvoie ce signal à la sonde qui cette fois joue le rôle de récepteur. SLIDE Le décalage entre la fréquence envoyée par la sonde et la fréquence qu'elle reçoit va nous permettre de remonter à la vitesse de l'hématie.

Dans un 1er temps, on considère l'aller de l'onde = la sonde est un émetteur fixe, l'hématie est un récepteur mobile, on utilise donc cette expression pour déterminer la fréquence reçue par l'hématie.

Comme la sonde est placée à un angle θ de l'hématie, la norme de la vitesse est la projection du vecteur V sur la droite reliant la sonde à l'hématie, cela revient à $V\cos\theta$

$$f_r(\text{hématie}) = (1 - V\cos\theta/c) \cdot f_e(\text{sonde})$$

Dans 2nd temps, l'hématie renvoie l'onde et agit donc comme une source mobile de vitesse V .

La sonde agit comme un récepteur fixe. Maintenant on a $-V\cos\theta$ SLIDE

$$f_r(\text{sonde}) = 1/(1 + V\cos\theta/c) f_e(\text{hématie})$$

$$\text{Soit finalement } f_r(\text{sonde}) = (1 - v\cos\theta/c) / (1 + V\cos\theta/c) f_e(\text{sonde})$$

DL du dénominateur $\rightarrow 1 - V\cos\theta/c$

$$f_r(\text{sonde}) = (1 - v\cos\theta/c)^2 f_e(\text{sonde})$$

refait DL

On peut exprimer la vitesse en fonction du décalage en fréquence

$$V = c\Delta f / 2f_e(\text{sonde})\cos\theta$$

AN : d'après CCP PC2017

$\theta = 45^\circ$, décalage de $-3,8\text{Hz}$ et une fréquence émise de $4 \cdot 10^6 \text{ Hz}$ \rightarrow vitesse de 1m/s \rightarrow correspond à aorte

Transition : Pas que pour les ondes sonores, aussi onde électromag : effet Doppler-Fizeau

B. Mesure de la vitesse d'une étoile

Compétence prépa CPST 2, analyse documentaire p407

Étoiles = source de lumière, émettent donc des ondes électromagnétiques, l'ensemble des ondes émises est qualifié de spectre électromag et on a déjà vu les spectres d'émission et d'absorption des étoiles.

Schéma ?

On va essayer de déduire grâce à l'effet Doppler la vitesse de rotation d'une étoile.

On a la relation : $\lambda_r = \lambda_e - \Delta\lambda$

$$\text{Det DL } \lambda_r = \lambda_e (1 - \Delta v/c)$$

$$\text{Décalage en longueur d'onde } \Delta\lambda = -\lambda\Delta v/c$$

Définition de l'effet Doppler-Fizeau, décalage vers le rouge ou le bleu.

Si source s'éloigne, $v_e > v_r$ donc $\Delta v < 0$ donc $\Delta\lambda > 0$ et le spectre est décalé vers le rouge par rapport à un récepteur qui ne serait pas mobile par rapport à elle.

On peut alors calculer la vitesse avec laquelle s'éloigne Andromède exercice 20 p 66 Nathan TleS

Méthode utilisée pour la détection d'exoplanète : si le décalage en longueur d'onde $\Delta\lambda$ est périodique dans le temps alors il y a rotation d'un corps autour de cette étoile.

C. Radar

Radio Detection and ranging

Utilise onde centimétrique

on peut trouver la démonstration : Dunod PC/PC* p 946

http://maths-sciences-lp.ac-amiens.fr/IMG/dossier_radar/doppler_dossier.pdf

L'antenne diffuse vers une cible potentielle l'onde électromagnétique produite par un émetteur. Réfléchi par la cible, captée par l'antenne (qui joue donc un double rôle), cette onde est transmise au récepteur. Le changement de fréquence du signal par effet Doppler, permet de mesurer vitesse et position de la cible.

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.

Une antenne émet une onde électromagnétique dans le domaine des ondes radio, qui se réfléchit sur les véhicules.

Par effet Doppler, la fréquence de l'onde réfléchi diffère de celle de l'onde incidente.

L'antenne capte ensuite la fréquence de l'onde réfléchi.

Pour connaître la vitesse du véhicule, on compare la fréquence des deux ondes.

Modèle courant : $f = 24,125 \text{ GHz}$ et $\theta = 25^\circ$.

Vitesse réglementaire : 130 km/h .

Un radar mesure 5690 Hz . Excès de vitesse ?

AN : $140 \text{ km/h} \Rightarrow$ infraction.

[Physique-chimie Tle S, Bordas, p 85]

D. Possibilités de détailler la détection d'exoplanète, mesure de la vitesse d'expansion de l'univers, sonar, lidar..

Conclusion

Phénomène qui s'applique à tous les types d'onde

Effet Doppler pour la mesure de vitesse puisque Δf est lié à v .

Ouverture: autres applications

Valable pour des vitesses inférieurs à celle de l'onde : avions supersoniques indétectables par ultrasons