LP 5 : Effet Doppler

Élément imposé : échographie Doppler

Biblio : - Fruchart (effet doppler par détection synchrone)
- Hachette TS
- Nathan TS
- http://maths-sciences-lp.ac-amiens.fr/IMG/dossier_radar/doppler_dossier.pdf
- http://naxos.biomedicale.univ-paris5.fr/diue/wp-content/uploads/2013/05/35-26232.pdf
- http://www.cochlea.org/entendre/la-sirene-d-ambulance-effet-doppler
- http://scphysiques.free.fr/animations/anims/ondes/Doppler.swf
- https://www.geogebra.org/m/MhXH3vcu

Niveau : TS

Pré-requis : - Ondes mécaniques, lien entre vitesse, fréquence et longueurs d'onde (TS)
- Ondes sonores (hauteur, vitesse, fréquence...) (TS)
- Propriétés des ondes (caractère progressif, sinusoïdal d'une onde) (TS)
- Ondes électromagnétiques, spectre de la lumière (1e S)
- Spectre d'émission et d'absorption (1e S)
- Analyse dimensionnelle (TS)
- Incertitudes (TS)

Intro péda :
On se place pour cette leçon en TS dans le thème observer : ondes et matière.

Notion d'onde abordée depuis la seconde. Les élèves ont déjà abordé la notion de signal périodique, de fréquence et d'onde électromagnétique en seconde. En 1ere S, revu la notion et ont vu la notion de spectre d'émission et d'absorption des étoiles.
En TS, les élèves ont vu avant cette leçon des outils pour une description plus fine des ondes, comme la notion d'onde progressive, d'onde sinusoidale et la relation fréquence, longueur d'onde et célérité. Ce cours suit un cours sur les ondes sonores (où les caractéristiques des ondes sonores ont été présentées : hauteur, vitesse, fréquence...) . Il va réinvestir toutes ces connaissances pour décrire l'effet Doppler.
Dans ce cours on va insister aussi sur les nombreuses applications de l'effet Doppler, dans la vie de tous les jours (radar) ou moins fréquemment mais tout aussi importante (ex échographie Doppler)

<u>Objectifs</u> : - Mettre en œuvre une démarche scientifique expérimentale
- Connaître la formule du décalage Doppler, son domaine d'application et savoir l'utiliser pour remonter à une vitesse

Choix pédagogique : Trouver la formule de l'effet Doppler par l'expérience → nécessite analyse dimensionnelle et incertitudes

Difficultés : Utilisation mathématiques du décalage en fréquence dans une situation donnée : identification de l'émetteur, du récepteur et du mouvement relatif + angle quand il y en a un → exemples pour illustrer la démarche avec images et schémas

TD:Activité documentaire sur une application ex : calcul vitesse d'une étoile par effet Doppler Fizeau.
TP : Réaliser une mesure de vitesse avec un banc Doppler

Intro :
Vous avez déjà tous entendu la sirène d'une ambulance qui passe devant vous et vous avez certainement déjà remarqué que quand l'ambulance se rapproche alors que nous sommes immobiles on perçoit un son plus aigu (donc une fréquence plus élevée) et quand elle s'éloigne, le son est plus grave (donc fréquence plus basse). Phénomène étudié dès 1842 par Christian Doppler et on l'appelle donc l'effet Doppler.

Effet Doppler : phénomène selon lequel une onde émise avec une fréquence fe est perçue avec une fréquence différente fr si l'émetteur et le récepteur sont en déplacement relatif.

Historique (cf diapo) :

- en 1842 : Christian Doppler découvre l'effet Doppler
- 1845 Buys Ballot (expérience avec les ondes sonores, train-musiciens).
- 1848 : Hippolyte Fizeau met en évidence ce phénomène dans le cadre des ondes lumineuses ce qui a permis (et permet toujours) de l'utiliser en astrophysique, cet effet est appelé souvent l'effet Doppler Fizeau en son honneur.

Pourquoi le son est-il plus aigu quand l'ambulance s'approche de nous ? Pourquoi on étudie autant cet effet, qu'est ce qu'il peut nous apporter ?

I) Présentation de l'effet Doppler

Dans le cas de l'ambulance: Slide, on voit que la période spatiale (longueur d'onde) perçue par A est plus faible que la période émise, or on sait que λ_A=v(son)/f_A < λ=v(son)/fe ➔ f_A > fe
Quand ambulance ne bouge pas → on recoit bien fréquence émise

A) Influence de la vitesse

exp : Présentaion du banc à effet Doppler :
Banc à effet Doppler, utilisation d'émetteur et récepteur à ultrason, émetteur en mouvement avec table traçante.
-> Traitement du signal (multiplieur + filtre passe bas) → Δf (traitement nécessaire car Δf<<<fe et fr)
Mesure de Δf à différentes vitesses, on trace Δf=f(v) = fe - fr

- Résultat :

On a bien Δf proportionnelle à Δv

Transition : Pour cette étude la fréquence de l'émetteur n'a pas changé. Mais a-t-elle une influence ?

B) Influence de la fréquence d'émission

exp :on fait varier fe (voir si possible car fréquence dépend du piezoélectrique et de sa freq de résonnance soit rester autour soit changer de piezo) et on mesure Δf. On trace f=f(fe)
On obtient aussi une droite
Donc Δf est aussi proportionnelle à fe

Transition : L'expérience permet de mettre en avant des dépendances entre les paramètres d'étude. On va maintenant chercher à mettre en équation ce phénomène et trouver la constante.

C) Formule du décalage Doppler

On a montré que Δf est proportionnelle à fémis*v par analyse dimensionnel, il faut ajouter une vitesse b au dénominateur.
Paramètres du système : fe et v seulement
Si on reprend les mesures de $\Delta f = f(v)$ à 41 +/- 0,1 kHz et on prend la pente de la droite a
On a a = fe/b et d'après les mesures, a = 116 +/- 3 m^{-1} donc b = fe/a = 353,4 m/s (à 20 °C)

En fait cela correspond à un dernier paramètres que l'on n'a pas changé = célérité de l'onde (ici célérité du son dans l'air, valeur tabulée à 20°C = 347,5 m/s donc pas exactement même valeur, et si on prenait les incertitudes en compte !)

On a Δa = 3 m-1 et Δf = 0,1 kHz
Donc on a $\Delta c_{son} = c_{son} * \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2} = 9$ m/s
Donc c_{son} = 353 +/- 9 m/s → cohérent (intervalle de cohérence)

Ainsi, la vrai formule est $\Delta f = fe*v/c$
avec $\Delta f = fe - fr$; c = célérité de l'onde et v = vitesse de l'émetteur

Limitation :
Cette formule n'est valable qu'à $v \ll c$

Slide : Schéma front d'onde Hachette TS p70
Rq : v<0 si l'élément mobile se rapproche du récepteur
v>0 si s'éloigne

Qd source se rapproche on a bien fe + Δf et quand elle s'éloigne fe - Δf

Transition : On a donc un lien entre écart de fréquence et vitesse, on peut appliquer cet effet pour la mesure de vitesse. Effet Doppler est caractéristique à toutes les ondes, donc pas que aux ondes mécaniques

II) Application : mesure de vitesses

A) Les radars

Utilisation de microondes (onde centimétrique).
→ Radar = émetteur + récepteur et voiture = réflecteur

2 particularités :
- Le signal émis par le radar est réfléchi par la voiture, et le signal est reçu par le radar après avoir fait un aller-retour ➔pour prendre ça en compte en multiplie par un facteur 2
- Le radar et la voiture ne sont pas alignés, mais forme un angle α slide Nathan TS

Ainsi la formule se réécrit :
$2 v_v \cos(\alpha) = c*(\Delta f/fE)$
$v_v = (c*\Delta f / fE*2*\cos(\alpha))$

Les radars sont généralement calibrés pour prendre les vitesses lorsque le radar est orienté suivant un angle de 25° par rapport à l'axe de circulation des véhicules contrôlés. Cette notion est importante car un petit écart à cette valeur peut entraîner des modifications significatives sur les valeurs de vitesse mesurées .

Par exemple : l'onde est émise à 15GHz, pour un angle de 25° ; on a toujours la célérité de l'onde électromagnétique de C= 299 792 458 m/s le décalage mesuré est de 2.72 10^6 Hz = 2.7 10^{-6} GHz.
On trouve une vitesse de 108 km/h
Si l'angle est modifié de 5° : on a désormais un angle de 30° avec l'axe de la route : On trouve une valeur de vitesse de 113 km/h !
Admettons la voiture roule sur une route limitée à 110 km/h ; il serait en infraction d'après le radar.
→ existence de norme en vigueur pour prendre en compte cette erreur.

Tr : ce principe est également utilisé dans le domaine médical

B) L'échographie Doppler

Début dans les années 60 (freq utilisée = qq MHz → pas trop d'attenuation dans corps)
L'échographie Doppler est très importante en médecine. Elle permet de mesurer la vitesse de circulation du sang et ainsi de détecter des anomalies (comme des problèmes de tension artérielle, des artères bouchées ou gonflées (anévrisme)).

Le principe est le même que pour le radar mais cette fois-ci avec des ultrasons :
On a un appareil (cf diapo) qui émet des ultrasons qui seront ensuite réfléchies par les globules rouges et l'onde réfléchie est captée par le récepteur (même appareil qu'émetteur).

On a donc toujours la formule : $v_{sang} = (c*\Delta f / fE*2*\cos(\alpha))$
(avec toujours le facteur 2 car on a l'aller-retour)

Cependant, différences par rapport au radar : l'angle alpha n'est pas fixe et on doit le déterminer pendant l'examen (examen couplé avec échographie)

Il existe 2 types d'échographie Doppler (cf diapo) :
- continue (sonde est composé d'un émetteur et d'un récepteur) : permet de mesurer une gamme très large de vitesse
- pulsée (sonde = alternativement émetteur et récepteur) : permet de savoir à quelle profondeur on sonde

Tr ; l'effet Doppler est aussi utilisé en astrophysique

(C) L'effet Doppler Fizeau)

→ Apport de Fizeau en 1848 : l'effet Doppler se retrouve aussi pour la lumière
→ c = λf → si f augmente alors λ diminue (c est une constante)

→ Observation des raies du spectre d'émission :
Les étoiles comme le soleil sont des sources de lumière → émettent des ondes électromagnétiques
On peut observer des spectres d'absorption caractéristiques de composition chimique d'une étoile
Vous le savez peut-être, mais les étoiles sont en mouvement les unes par rapport aux autres. En utilisant la différence de fréquence Δf, on peut savoir si une étoile s'éloigne ou se rapproche : L'expression de Δf change selon la situation (émetteur ou récepteur mobile ou fixe), mais elle dépend toujours de la vitesse de l'émetteur et du récepteur.
Si l'on regarde par rapport à la Terre, ie. on considère la Terre fixe, et l'étoile mobile. On a alors la formule suivante pour la longueur d'onde (c'est ce qui est intéressant ici) :

$$\lambda r=\lambda e\left(1\pm\frac{ve}{c}\right)$$

Si la source se rapproche (-), λ r<λe, λ augmente, décalage vers le bleu : blueshift

Si l'étoile s'éloigne (+), λ diminue décalage vers le rouge = redshift
slide
Attention, on ne mesure que la vitesse par rapport à l'axe d'observation (= vitesse radiale)

Conclusion :
Bilans avec les différents cas
Applicable à toutes les ondes
Ouverture : Application à la détection d'exoplanète .. (cf:leçon effet Doppler dans le supérieur) ;
Il y a aussi d'autres phénomènes liés aux ondes que l'on peut voir dans la vie de tous les jours comme la diffraction → prochain cours.

<u>Rq :</u> - OdG cson dans corps = 1540 m/s

- Effet Doppler Fizeau permet aussi étude expansion univers
- multiplieur + passe-bas = détection synchrone
- Intensité sonore → savoir qq OdG sur seuil (seuil de risque 85 dB, 100dB = douleur, limite boite nuit = 105 dB, salle classe bruyante 70 dB)
- Echographie, adaptation d'impédances
- si v = c → effet Doppler relativiste et formation cone de Mack à l'arriere ou les ondes se propagent
- Homogénéiser les notations