

LP 19 : EFFET DOPPLER

Introduction Pédagogique

Bibliographie

1. Côte, Physique-Chimie BCPST 2e année
2. Fruchart

Niveau : BCPST 2

Prérequis :

1. Effet Doppler secondaire
2. Filtrage BCPST 1
3. Projection en mécanique BCPST 1
4. Développement limité

Objectifs :

1. Démontrer l'expression de l'effet de Doppler
2. Comment mesurer une vitesse grâce à l'effet Doppler.

Difficultés :

1. Attention à l'orientation des vecteurs

TD :

1. TD sur des applications de l'effet Doppler.

Expérience :

1. Mesure d'une vitesse par effet Doppler

Table des matières

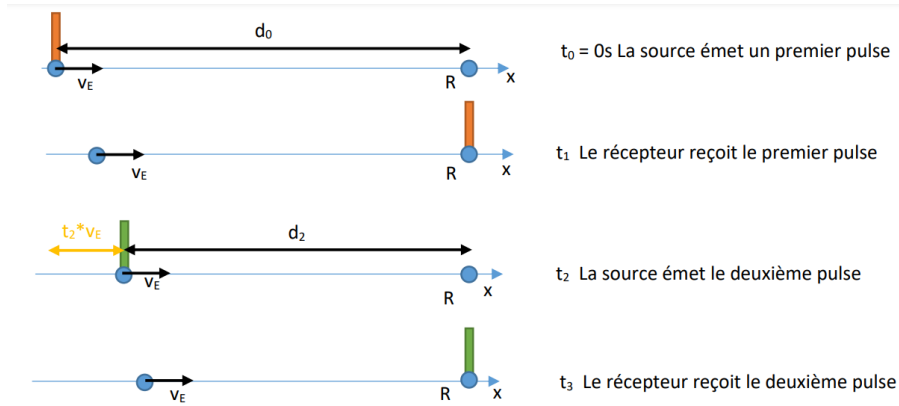
1	Introduction	2
2	Origines de l'effet Doppler	2
2.1	Positionnement du problème	2
2.2	Application directe : mesure d'une vitesse	3
2.3	Généralisation	3
3	Application de l'effet Doppler	3
3.1	Application en médecine : échographie Doppler Artérielle	4
3.2	Effet Doppler Fizeau : application à l'astronomie	6
4	Questions / Remarques	8
4.1	Questions	8
4.2	Remarques	8

1 Introduction

2 Origines de l'effet Doppler

2.1 Positionnement du problème

On considère la situation où la source se déplace rectilignement vers le récepteurs



source : émet un signal de période T_E , possède une vitesse v_E

récepteur : Situé initialement à la distance d_0

La source émet un signal à $t=t_0$. Le récepteur le reçoit à la date $t_1 = t_0 + \frac{d_0}{c}$

Le second signal est émis à $t_2 = t_0 + T_E$: à cette date la distance entre la source et le récepteur est désormais de $d_1 = d_0 - v_E T_E$

Le récepteur reçoit alors le signal à la date $t_3 = t_0 + T_E + \frac{d_1}{c} = t_0 + T_E + \frac{d_0}{c} - \frac{v_E T_E}{c}$

Le récepteur voit alors un signal émis avec la période :

$$\begin{aligned}
 T_R &= t_3 - t_1 \\
 &= \left(t_0 + T_E + \frac{d_0 - v_E T_E}{c} \right) - \left(t_0 + \frac{d_0}{c} \right) \\
 &= T_E - \frac{v_E T_E}{c} \\
 &= T_E \left(1 - \frac{v_E}{c} \right)
 \end{aligned}$$

soit une fréquence :

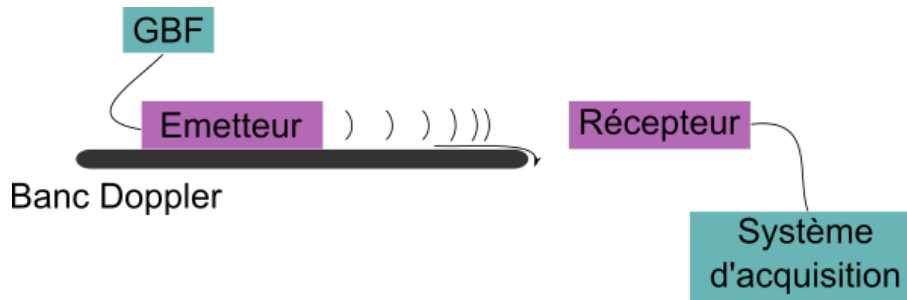
$$\begin{aligned}
 f_R &= \frac{1}{T_R} \\
 &= \frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} f_E \\
 &= \left(1 + \frac{v_E}{c} \right) f_E
 \end{aligned}$$

Avec un développement limité à l'ordre 1 en $\frac{v_E}{c}$

Ainsi :

- si $v_E > 0$, la source se rapproche du récepteur : $f_R > f_E$: le signal reçu est plus aigu que le signal émis, il a une longueur d'onde plus courte
- si $v_E < 0$, la source s'éloigne du récepteur : $f_R < f_E$: le signal reçu est plus grave que le signal émis, il a une longueur d'onde plus longue

2.2 Application directe : mesure d'une vitesse



On met en mouvement l'émetteur sur le banc, on mesure le signal du récepteur à l'oscilloscope. L'écart de fréquence entre le signal émis et reçu s'écrit :

$$\begin{aligned}\delta f &= f_R - f_E \\ &= \frac{v_E}{c} f_E\end{aligned}$$

Soit :

$$v_E = c \frac{\delta f}{f_E}$$

On pourrait mesurer directement f_R mais comme le signal émis a une fréquence de 40 kHz, que l'écart de fréquence attendu est de 4 Hz, l'incertitude sur la fréquence émise écrase cet écart. Pour mesurer l'écart de fréquence avec une plus grande précision : on utilise un multiplieur qui va multiplier le signal émis et le signal reçu :

$$\begin{aligned}\sin(2\pi f_E t) \times \sin(2\pi f_R t) &\propto \sin(2\pi(f_E - f_R)t) + \sin(2\pi(f_E + f_R)t) \\ &\propto \sin(2\pi\delta f t) + \sin(2\pi(f_E + f_R)t)\end{aligned}$$

Un filtre RC avec $R = 1M\Omega$; $C = 1\mu F$ permet de ne garder que le signal de fréquence δf : on mesure cette écart de fréquence à l'oscilloscope. Pour $\delta f = 7$ Hz on a $v = 6$ cm/s

2.3 Généralisation

Dans le cas où la source est fixe et le récepteur possède une vitesse v_R , la fréquence au niveau du récepteur s'écrit :

$$f_R = \left(1 - \frac{v_R}{c}\right) f_E$$

Dans le cas où les 2 se déplacent. En notant \vec{u} le vecteur unitaire de l'axe source-récepteur dirigé de la source vers le récepteur, et en notant \vec{v}_E et \vec{v}_R les vecteurs vitesses de la source et du récepteur. Le décalage doppler s'écrit :

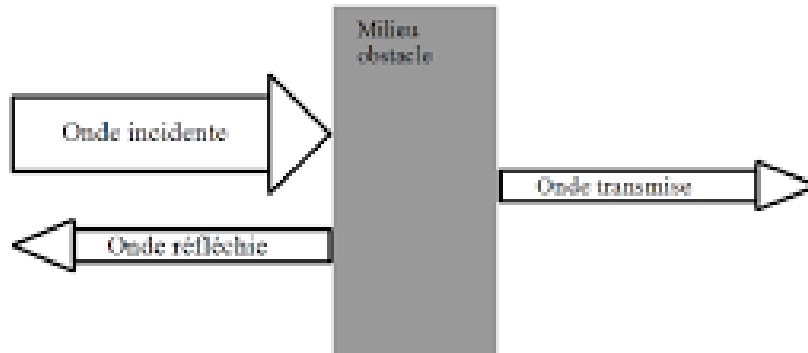
$$f_R = f_E \frac{1 - \frac{\vec{v}_R \cdot \vec{u}}{c}}{1 - \frac{\vec{v}_E \cdot \vec{u}}{c}}$$

3 Application de l'effet Doppler

3.1 Application en médecine : échographie Doppler Artérielle

Principe de l'échographie :

Réflexion, transmission et absorption d'une onde sur un milieu obstacle



On envoie des ultrasons sur une zone du corps du patient : les ultrasons se reflètent sur différents tissus du corps : on mesure les différents écho pour reconstituer une image des zone d'intérêt.

Echographie Doppler Artérielle

Utilise la variation de fréquences des différents échos reçu pour mesurer des vitesses.

- Permet de mesurer la vitesse du sang
- L'intensité du signal permet de remonter à la quantité de globule rouge = hématie
- Permet de remonter à la morphologie des vaisseaux si couplée à une échographie standart

Il s'agit d'une méthode indolore et non invasive : peut être utilisé en routine sur tous les individus contrairement au scanner, à l'IRM ou encore d'autre techniques d'imagerie fonctionnelle.

Application à la détection de l'anévrisme

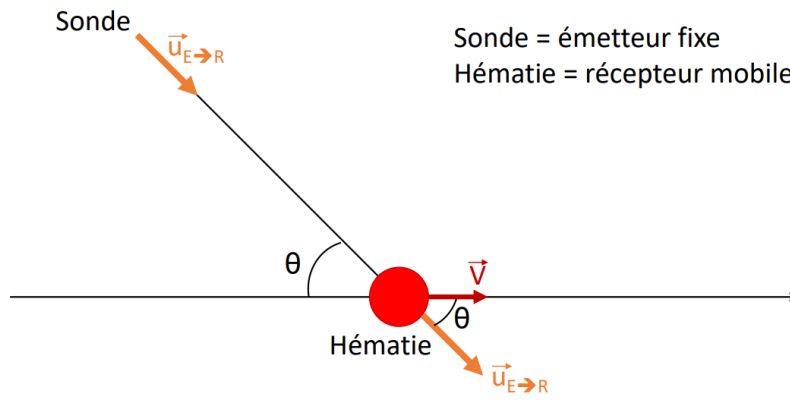
Anévrisme : dilatation des parois des artères. Danger pour le patient : risque de rupture d'anévrisme = rupture de l'artère : AVC ne pouvant être soignée que par chirurgie. Il est donc nécessaire de les détecter rapidement.

On peut détecter les anévrismes en mesurant une vitesse anormale des hématies dans les artères. On utilise ainsi l'échographie Doppler artérielle.

Positionnement du problème : hématie de vitesse v , l'onde ultrasonore est réfléchi par l'hématie. L'effet Doppler intervient 2 fois :

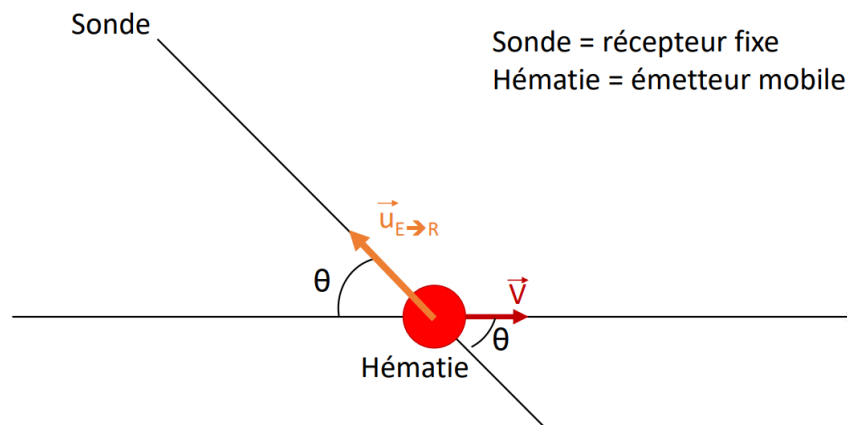
1. L'hématie perçoit un décalage de fréquence par rapport à l'onde émise à cause de son mouvement.
2. Un nouveau décallage due au mouvement de l'hématie en tant que source

On notera f_E la fréquence de l'émetteur, f_h la fréquence ressentie par l'hématie et f_R la fréquence de l'onde a son retour au niveau du récepteur.



$$\vec{v} \cdot \vec{u}_{E \rightarrow R} = v \cdot \cos(\theta)$$

$$f_h = \left(1 - \frac{v}{c} \cos(\theta)\right) f_E$$



$$\vec{v} \cdot \vec{u}_{E \rightarrow R} = -v \cdot \cos(\theta)$$

$$f_R = \frac{1}{1 + \frac{v}{c} \cos(\theta)} f_h$$

$$f_R = \frac{1 - \frac{v}{c} \cos(\theta)}{1 + \frac{v}{c} \cos(\theta)} f_E$$

On mesure alors l'écart de fréquence :

$$\begin{aligned}\Delta f &= f_E - f_R \\ &= \left[1 - \frac{1 - \frac{v}{c} \cos(\theta)}{1 + \frac{v}{c} \cos(\theta)} \right] f_E \\ &= \left[\frac{2 \frac{v}{c} \cos(\theta)}{1 + \frac{v}{c} \cos(\theta)} \right] f_E \\ &= 2 \frac{v}{c} \cos(\theta) f_E\end{aligned}$$

Avec un développement limité à l'ordre 0 en $\frac{v}{c}$ du dénominateur.

Applications avec les paramètres suivants :

- $\Delta f = 2\text{kHz}$
- $\theta = 60^\circ$
- $c = 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $f_E = 3,0 \text{ MHz}$

On trouve une vitesse $v \approx 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La vitesse normale des globules rouge dans l'artère aorte étant de $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ le patient est atteint d'anévrisme qu'il faudra traiter.

3.2 Effet Doppler Fizeau : application à l'astronomie

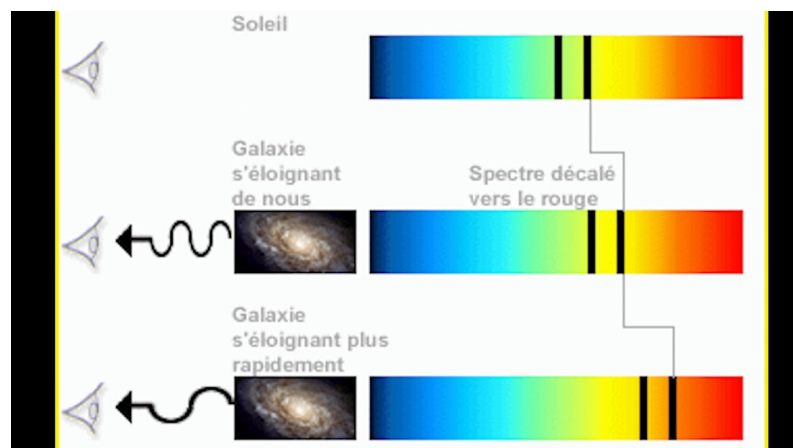
L'effet Doppler ne concerne pas uniquement les ondes sonores mais également les ondes électromagnétiques. Ainsi :

- Si un objet se rapproche de nous, son spectre est décalé vers les hautes fréquences donc vers les petites longueur d'onde : on parle de décalage vers le bleu
- Si un objet s'éloigne de nous, son spectre est décalé vers les faibles fréquences donc vers les grandes longueur d'onde : on parle de décalage vers le rouge

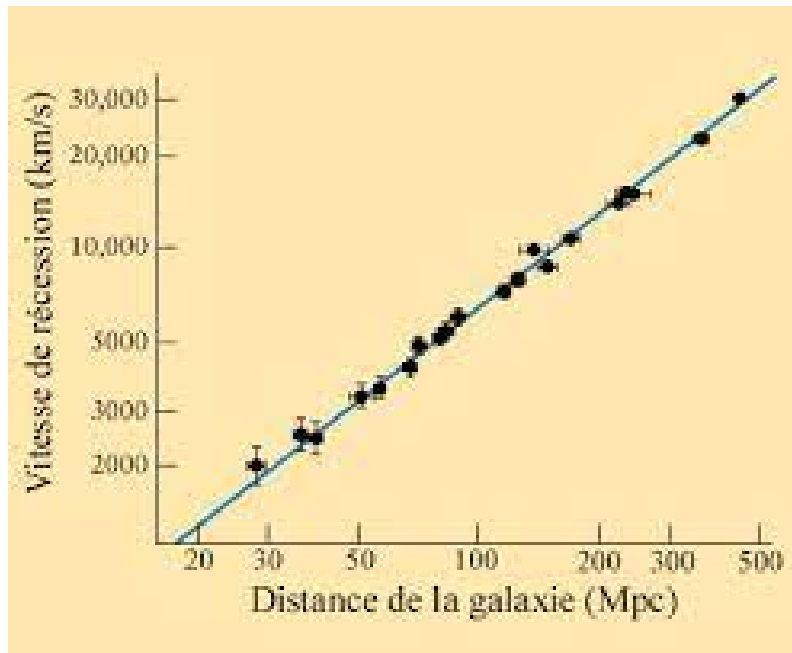
L'effet Doppler permet de mesurer les vitesses des objets celeste. Pratique puisqu'on a que leurs lumières a analyser. Ainsi, on a pu déterminer que la galaxie d'Andromède, voisine de la voie lactée se rapproche de nous et devrait fusionner avec notre galaxie dans 4 à 5 milliards d'années.

Mesures de la vitesse des galaxies :

Même si Andromède se rapproche de nous, on observe que globalement, les galaxies s'éloignent de nous et s'éloignent d'autant plus vite qu'elles sont loin.



Cette éloignement est caractérisée par la loi de Hubble :



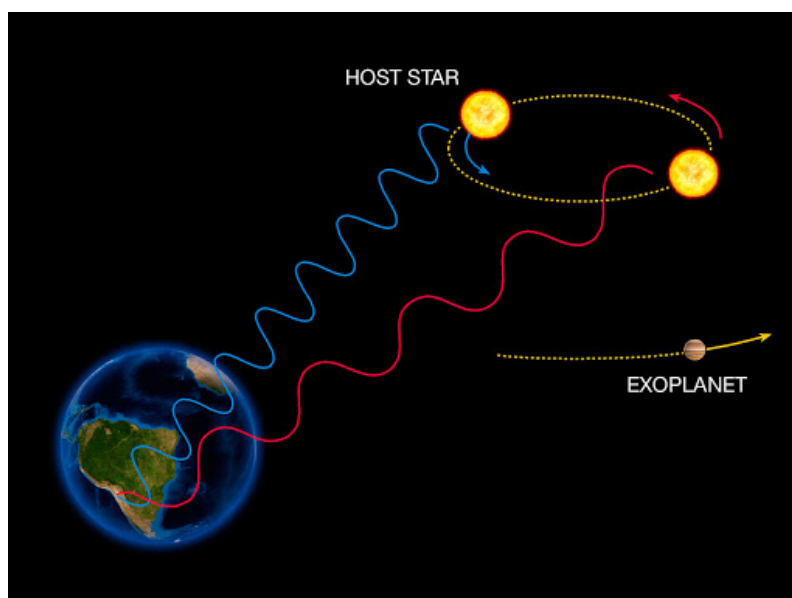
Plus une galaxie est lointaine (distance en MégaParsec en abscisse) plus la vitesse de récession est élevée en suivant un comportement linéaire, soit la loi de Hubble :

$$v = Hd$$

Avec H la constante de Hubble

Détection d'exoplanète

La présence d'exoplanète autour d'une étoile déplace le centre de gravité du système stellaire : l'étoile est alors en rotation autour de ce centre engendrant un décalage vers le bleu de son spectre quand elle se rapproche de nous et un décalage vers le rouge quand elle s'éloigne de nous.



4 Questions / Remarques

4.1 Questions

4.2 Remarques

- Plan correct, un peu court peut être
- Pas très clair sur les démos : manque de schémas, de définitions de vecteurs
- Dès le début : dessiner la vitesse de la source vers le récepteur
- Pas de condition du développement limite : pas écrit
- Pour l'expérience : produit de sin sur la droite pas forcément très clair : faire un schéma, définir f_E et f_R .
- Vous posez le gain g comme ça sans préciser
- La mesure est bien, peut être passer un peu plus de temps sur l'incertitude
- Slide avec source fixe et détecteur mobile : il faudrait expliquer dans tous les cas que quand on se rapproche la fréquence augmente
- vitesse axiale : pourquoi axiale ? Discuter d'une composante particulière de la vitesse
- Faire un schéma sur les slides pour montrer qui bouge pour quelle formule
- Applications bien
- Schéma d'exoplanète bien
- Mettre les sources des images et les dates si c'est un site internet
- Plus écrire au tableau : notamment pour l'expérience écrire les valeurs
- Introduction très légère : "vous connaissez l'effet Doppler, on va donc démontrer les formules"
- Couplage écographe/sonde Doppler : peut être plus parler de l'écographe

Questions	Réponses
Comment ca l'effet Doppler ne demande pas beaucoup de ressources ?	Par rapport à d'autres techniques comme l'IRM ou on doit placer des patients dans des champs magnétiques intenses ou dans des rayons X
Défis d'un bon échographe	Le contraste
Principe d'un échographe	***schéma****
Plusieurs couches sur votre schéma : problèmes ?	Problèmes de perte de signal, perte en intensité, éventuellement dédoublement du signal : présence de fantômes
On le pose comme ca ?	Non utilisation d'un gel qui a le même indice que la peau. On essaye d'adapter l'impédance pour avoir le meilleur coefficient de transmission possible
Fonctionnement de la sonde	Sonde ultrason, vibrations de la membrane générée par des céramiques piézo-électrique
Principe du piézoélectrique	Transformer signal électrique en mécanique
Plusieurs piézo	Plusieurs fréquences pour faire plusieurs choses en même temps
Et si on impose la même fréquence ?	Reconstituer des images, on fait une antenne, on focalise
Techniques ultrasonores plus violentes	Densité d'énergie trop forte on peut abîmer les tissus
Ca peut être voulu ?	Dissoudre des solides en chimie avec des ultrasons, on casse des calculs rénaux aussi
D'autres applications	Radars routiers, radars lumineux, chauve-souris
Secteur médical : MHz, contrôle routier ?	Radars lumineux : ondes radios, GHz
Angle theta en radars	Fixé
Pourquoi cette technique de mesure	Technique connue donc on peut insister dessus, ils sont censés être à l'aise avec les filtres
Caractéristiques du filtre	Fréquence de coupure à 160 Hz
Regarder le signal reçu ?	On pourrait et calcul à la main : problème de précision de la mesure : on veut $\Delta f = 7Hz$ et on a 40 kHz de fréquence : très difficile
TF	Permet d'obtenir les fréquences des harmoniques, choisir suffisamment de périodes pour avoir une belle TF
Faire attention à qq chose	Fréquence d'échantillonnage suffisamment grande : critère de Shannon
Changement de référentiel dans effet Doppler	Milieu bouge aussi avec le récepteur mobile