

LP 5 – Effet Doppler

Manon LECONTE - ENS de Lyon

Dernière mise à jour : 23 juin 2020

Merci à Bénédicte Grebille et Lucile Favreau pour leur précieuse aide.

Mots-clé : effet Doppler, radar, échographie Doppler, effet Doppler-Fizeau.

Niveau : terminale S

Pré-requis :

- Ondes mécaniques (lien entre vitesse, fréquence et longueur d'onde) [TS]
- Ondes sonores (hauteur, vitesse, fréquence, ...) [TS]
- Propriétés des ondes (caractère progressif, sinusoïdal) [TS]
- Ondes électromagnétiques, spectres d'émission et d'absorption de la lumière [1S]
- Analyse dimensionnelle [TS]
- Incertitudes [TS]

Bibliographie :

- Hachette TS [Niveau : *]
- Nathan TS [Niveau : *]
- Fruchart, *Physique expérimentale : optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique* [Niveau : **]
- Cours de J.-F. Récoché sur l'effet Doppler [Niveau : *]
- Côte, *Physique-Chimie BCPST 2e année* [Niveau : ***]

Plan proposé

I - Présentation de l'effet Doppler	2
A/ Formule du décalage Doppler	2
B/ Détermination d'une vitesse par effet Doppler	3
II - Applications de l'effet Doppler	4
A/ Les radars	4
B/ Echographie Doppler	4
C/ Effet Doppler-Fizeau	5

Liste de matériel

Détermination d'une vitesse par effet Doppler

- Banc Doppler ;
- Emetteur à ultrasons ;
- Récepteur à ultrasons ;
- GBF ;
- Système d'acquisition du signal du récepteur.

Introduction pédagogique

La notion d'onde est abordée tout au long du lycée : en seconde avec les signaux périodiques et les ondes électromagnétiques ; en première avec les spectres d'émission et d'absorption. En terminale S, on introduit les ondes mécanique et on décrit plus finement les ondes. Ce cours suit celui sur les ondes sonores.

On va retrouver en partie la formule de l'effet Doppler par l'expérience et en faisant attention aux incertitudes.

Difficultés :

- signe du décalage Doppler : il faut bien définir le mouvement relatif entre l'émetteur et le récepteur (et penser à l'exemple de l'ambulance pour le retrouver vite) ;
- raisonnement sur l'éloignement ou le rapprochement d'une étoile à partir de son spectre d'émission.

Exemple de TD : activité documentaire sur une application (calcul de la vitesse d'une étoile par effet Doppler-Fizeau).

Exemple de TP : mesure d'une vitesse sur un banc Doppler.

Introduction

Lorsqu'une ambulance se rapproche dans la rue, le son que l'on perçoit est plus aigu que lorsqu'elle s'éloigne. Cela est dû à l'effet Doppler.

Animation – Effet Doppler créé par une voiture en mouvement (**Source** : GeoGebra).

La période spatiale perçue par l'observateur est plus faible que la période émise lorsque la voiture se rapproche. C'est l'inverse quand elle s'éloigne.

Définition – **Effet Doppler** : décalage entre la fréquence perçue par un observateur et celle émise par une source d'un signal ondulatoire dû au mouvement de l'observateur ou de la source.

Cet effet, proposé par Doppler en 1842, est en fait beaucoup utilisé dans des situations quotidiennes (radars) ou plus scientifiques (échographie Doppler en médecine, effet Doppler-Fizeau en astronomie).

Objectifs – Savoir utiliser la formule du décalage Doppler pour déterminer une vitesse, par le calcul ou par l'expérience.

I - Présentation de l'effet Doppler

A/ Formule du décalage Doppler

On peut prévoir la valeur de la fréquence perçue par l'observateur en fonction de la vitesse relative entre l'émetteur et le récepteur. Pour cela, on peut utiliser l'expérience.

Expérience – Banc Doppler avec émetteur à ultrasons en mouvement et récepteur fixe.

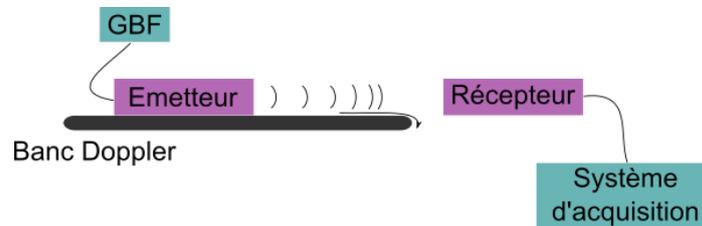


Figure 1 – Schéma du dispositif.

Si l'on trace l'écart de fréquence $\Delta f = f_e - f_r$ en fonction de la vitesse de l'émetteur, on obtient une fonction linéaire.

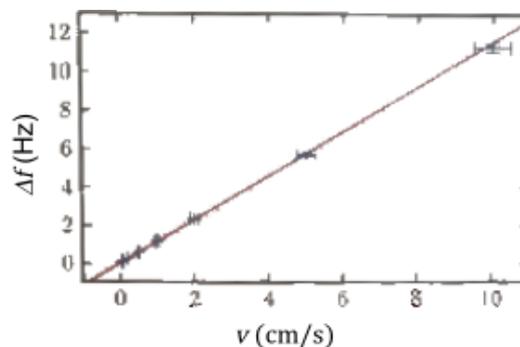


Figure 2 – Tracé de l'écart de fréquence Δf en fonction de la vitesse de l'émetteur v (Source : Fruchart).

On en déduit que Δf est proportionnelle à la vitesse de l'émetteur. C'est pourquoi on perçoit mieux l'effet Doppler pendant une course de formule 1 qu'au passage d'une ambulance.

La **formule du décalage Doppler** est donnée par :

$$|\Delta f| = \frac{v f_e}{c} \quad (1)$$

avec f_e la fréquence de l'émetteur et c la célérité de l'onde.

Le signe de l'écart de fréquence dépend du déplacement relatif de l'émetteur et du récepteur :

- s'ils s'éloignent, $\Delta f = f_e - f_r > 0$;
- s'ils se rapprochent, $\Delta f < 0$.

B/ Détermination d'une vitesse par effet Doppler

On peut reprendre le dispositif expérimental pour déterminer la vitesse de l'émetteur sur le banc Doppler.

II - Applications de l'effet Doppler

A/ Les radars

Le radar est à la fois un émetteur et un récepteur d'ondes électromagnétiques, appartenant au domaine des micro-ondes. Les voitures jouent le rôle de réflecteurs. L'onde envoyée est en fait une série de *pulses* à la fréquence f_e .

La formule du décalage Doppler s'exprime dans ce cas :

$$|\Delta f| = \frac{2 v \cos \alpha}{c} f_e \quad (2)$$

Ici, il faut prendre en compte le fait que la voiture n'est pas alignée avec le radar mais qu'elle forme un angle α avec l'axe de la visée. Cet angle est usuellement fixé à 25° pour les radars. En outre, le signal fait un aller-retour entre le radar et la voiture, d'où le facteur 2 dans la formule.

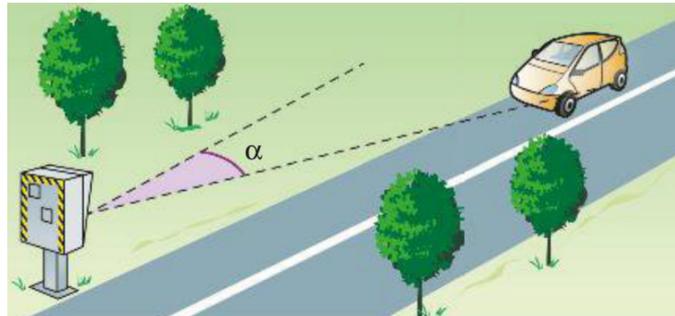


Figure 3 – Représentation de l'angle α entre la visée du radar et la voiture (Source : Nathan TS (p. 67)).

Considérons une voiture roulant sur une route limitée à 90 km/h. Le radar émet à une fréquence $f = 34,0$ GHz et mesure un décalage Doppler $|\Delta f| = 5,0 \times 10^6$ Hz.

On en déduit la vitesse de la voiture : $v = 2,4 \times 10^4$ m/s = 88 km/h.

Si le radar avait été mal réglé, avec un angle de 30° , la vitesse mesurée aurait été $v = 2,5 \times 10^4$ m/s = 92 km/h. La voiture aurait donc été considérée en excès de vitesse. Pour éviter des erreurs de mesure de la vitesse, dues à un mauvais angle entre la ligne de visée du radar et la voiture (par exemple si elle se déporte), les radars admettent une tolérance.

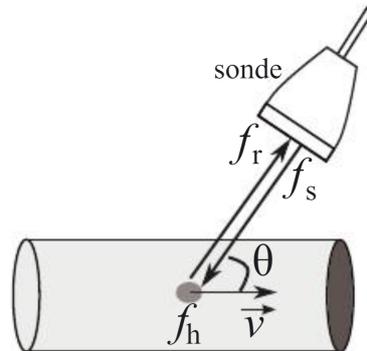
B/ Echographie Doppler

| **Source** – Côte (p. 512).

Pour mesurer la vitesse du sang et anticiper des problèmes de tension artérielle (infarctus, rupture d'anévrisme), les médecins ont recours à l'échographie Doppler. Son fonctionnement est semblable à celui du radar.

Les ondes émises sont des ultrasons de fréquence comprise entre 2 et 10 MHz. La sonde joue à la fois le rôle d'émetteur et de récepteur. Les ultrasons sont réfléchis par

les hématies contenues dans le sang. La formule du décalage Doppler est la même que dans l'exemple du radar.



Pour avoir la plus grande précision sur le signal, on essaye de mettre la sonde dans l'axe du réseau, en minimisant l'angle θ .

L'échographie Doppler permet non seulement de déterminer la vitesse du sang dans un vaisseau sanguin, mais également de déterminer la quantité d'hématies dans le vaisseau (proportionnelle à l'intensité du signal) et de mesurer le diamètre des vaisseaux si elle est couplée à une imagerie par échographie. On peut alors déterminer le débit sanguin des vaisseaux.

Il s'agit d'une méthode d'analyse indolore et non invasive, ce qui fait qu'elle peut être utilisée en routine et sur des individus sensibles (les femmes enceintes).

C/ Effet Doppler-Fizeau

| **Source** – Hachette TS (p. 71)).

L'effet Doppler a été découvert pour les ondes sonores. Fizeau l'étend aux rayonnements électromagnétiques au milieu du XIX^{me} siècle.

Grâce à cet effet, on peut mesurer la vitesse d'éloignement ou de rapprochement d'une étoile, à partir de son spectre d'émission. En effet, ce spectre présente des raies caractéristiques des gaz présents dans son atmosphère. Si une étoile se rapproche, les fréquences des raies que l'on perçoit sont supérieures à celles émises. Puisque $c = \lambda f$, on en déduit que les longueurs d'onde perçues sont inférieures à celles émises. Cela se traduit par un décalage vers le bleu. Ce phénomène est appelé **blueshift**.

Si au contraire les deux corps s'éloignent, on observe un **redshift**, comme on peut le voir sur la figure 4.

| **Remarque** – La vitesse est mesurée sur l'axe entre la Terre et l'étoile.

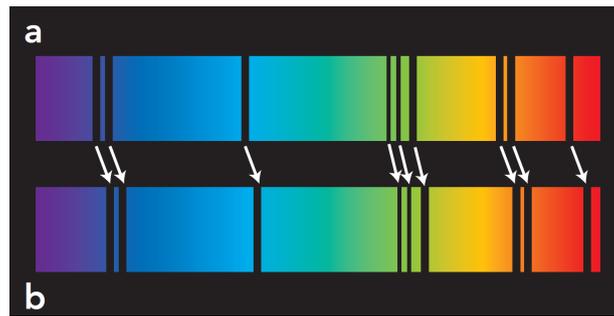


Figure 4 – Spectres d'émission d'une étoile a : émis ; b : perçu sur Terre.

Conclusion

L'effet Doppler correspond à un écart de fréquence entre le signal reçu par un observateur et celui émis par une source lorsque l'un ou l'autre est en mouvement. Si on considère des ondes sonores, on perçoit un son plus aigu si la source et l'observateur se rapprochent. Si on considère des ondes électromagnétiques, on perçoit un décalage vers le rouge (*redshift*) si la source et l'observateur se rapprochent.

L'effet Doppler a d'autres utilités en astronomie. Il permet de déterminer la vitesse de rotation d'une planète (ce qui peut être fait en exercice), ou de détecter la présence d'exoplanètes.