

Effet Doppler

En 1842, l'Autrichien Christian Doppler. Cet effet est vérifié pour les ondes sonores par le Néerlandais Buys-Ballot et généralisé aux ondes électromagnétiques par le Français Hippolyte Fizeau en 1848. Il a aujourd'hui de nombreuses applications dans des domaines aussi variés que la médecine, la sécurité routière ou l'astrophysique...

1 - Qu'est-ce que l'effet Doppler ?

1.1 - Un phénomène courant

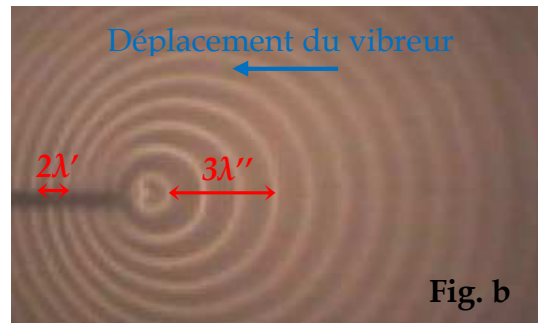
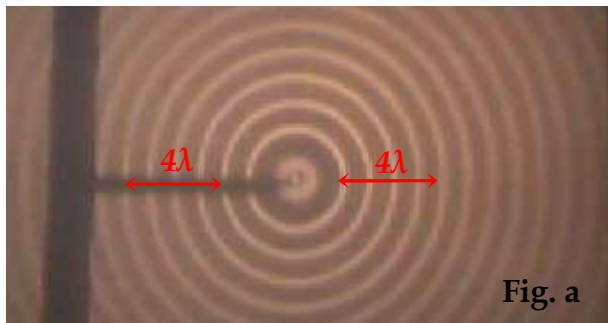
Ecouter le son produit par une ambulance ou une Formule 1 enregistré par une caméra.

Sur YouTube : « Doppler shift using car horn », "Big Bang Theory Doppler"

→ Que constatez-vous ?

1.2 - Etude sur la cuve à ondes

On s'intéresse aux ondes circulaires créées par un vibreur de fréquence propre $f = 32 \text{ Hz}$ à la surface de la cuve (Fig. a). On déplace le vibreur de la droite vers la gauche (Fig. b).



1. Quand la source se rapproche de l'observateur, celui-ci perçoit-il la même fréquence que la source ? une fréquence plus faible ? plus élevée ? Justifier.
2. Utiliser SalsaJ et les clichés [cuve_repos.jpg](#) et [cuve_mvt.jpg](#) pour déterminer et comparer les longueurs λ , λ' et λ'' .
3. Calculer $x_1 = \lambda - \lambda'$ et $x_2 = \lambda'' - \lambda$. Comparer ces grandeurs et conclure.

1.3 - Modélisation de l'effet Doppler

Christian Magnan, professeur au Collège de France, explique l'effet Doppler en ces termes.

Supposons que je vous envoie des balles à intervalle régulier, intervalle de temps que nous noterons T_{em} et qui constitue la période du phénomène, telle que je la mesure à l'émission. La vitesse des balles sera notée c de sorte que la distance entre deux balles (c'est-à-dire la longueur d'onde du phénomène périodique) est égale à $c.T_{em}$. Si vous vous éloignez de moi dans la même direction que les balles (avec une vitesse qualifiée de « radiale »), vous allez cependant recevoir ces balles à une cadence inférieure car chaque balle aura à parcourir, du fait de votre éloignement, une distance *supérieure* à la longueur du trajet effectué par la balle qui la précède.

La distance supplémentaire qu'une balle doit parcourir par rapport à la précédente est la distance que vous allez couvrir (vous, le récepteur) dans l'intervalle de temps qui sépare la réception de la première balle et la réception de la deuxième. Nous conviendrons d'appeler T_{rec} cet intervalle de temps, lequel constitue en fait la *période* du phénomène telle que vous l'observez à la réception. [...]

Supposons que ce soit moi maintenant qui me déplace, en m'éloignant de vous à la vitesse v . Les balles seront plus espacées les unes des autres car pendant le temps T_{em} qui sépare deux lancers, j'aurai reculé de la distance $v.T_{em}$. Cette quantité mesure l'accroissement de l'intervalle de distance entre les balles, lequel passera donc de $c.T_{em}$ à $(c+v).T_{em}$, quantité qui représente la nouvelle longueur d'onde du phénomène $c.T_{rec}$.

Source : <http://www.lacosmo.com/doppler.html>

Cas n°1 : source fixe et récepteur mobile

1. Etablir l'expression de la distance totale parcourue par la deuxième balle pendant le temps T_{rec} de deux façons différentes.
2. En déduire l'expression de T_{rec} en fonction de T_{em} lorsque l'observateur s'éloigne. Que devient cette relation si l'observateur se rapproche de la source ?
3. Transposer ces relations en termes de longueurs d'onde et en termes de fréquences.

Cas n°2 : source mobile et récepteur fixe (cas le plus fréquent)

1. Etablir l'expression de la distance totale parcourue par la deuxième balle pendant le temps T_{rec} de deux façons différentes.
2. En déduire l'expression de T_{rec} en fonction de T_{em} lorsque la source s'éloigne. Que devient cette relation si la source se rapproche du récepteur ?
3. Transposer ces relations en termes de longueurs d'onde et en termes de fréquences. Retrouvez les résultats observés sur la cuve à ondes.

2 – Vélométrie par effet Doppler

2.1 – Détermination expérimentale de la vitesse d'une voiture

On enregistre l'émission sonore du klaxon d'une voiture qui roule à vitesse constante en ville (fichier [klaxon_mouvement.wav](#)). Le son du klaxon immobile est donné dans le fichier [klaxon_arret.wav](#).

A l'aide du logiciel Audacity, déterminer si le conducteur peut être sanctionné pour excès de vitesse. Vous expliquerez votre démarche en détail.

A l'issue de la démarche, vous proposerez une analyse critique résultats obtenus et proposerez éventuellement des améliorations possibles.

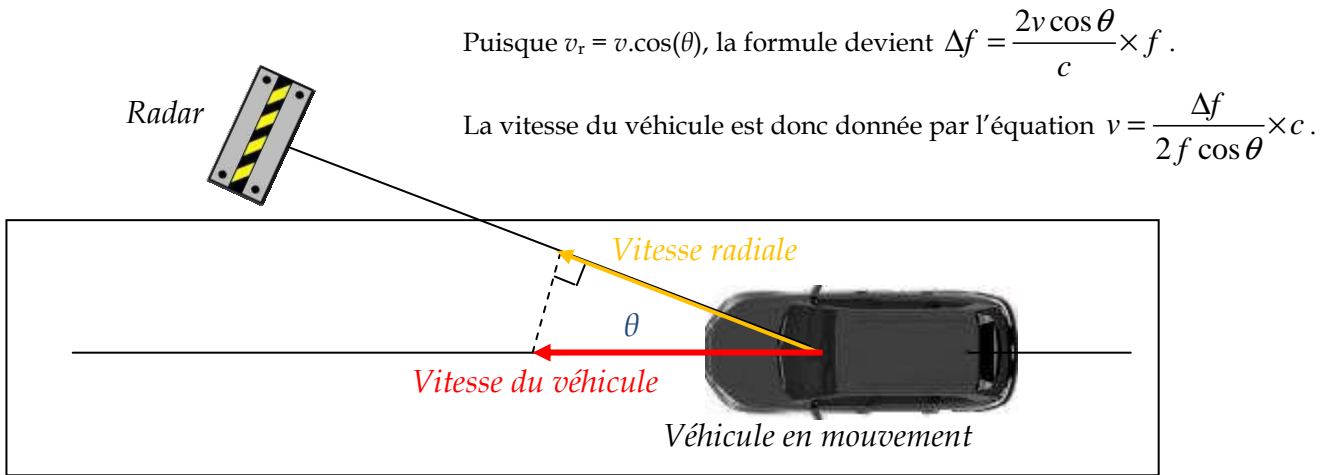
2.2 – Principe du radar routier

Le radar émet des ondes électromagnétiques de fréquence f (elles se déplacent dans l'air à la vitesse c) en direction d'un véhicule s'approchant à la vitesse v . A cause de sa vitesse, le véhicule reçoit cette onde avec une fréquence f' . Il réfléchit une partie de ces ondes vers le radar, se comportant à son tour comme une source mobile se déplaçant à la vitesse v en émettant des ondes de fréquence f'' . Le radar capte cette onde réfléchie à la fréquence f'' .

1. A partir des résultats de la partie précédente, exprimer f' en fonction de f , v et c
2. Exprimer ensuite f'' en fonction de f' , v et c
3. A partir des deux expressions précédentes, montrer que $f'' = \frac{c+v}{c-v} \times f$
4. En déduire que $v = \frac{f'' - f}{f'' + f} \times c$
5. Lors d'un contrôle radar, quelles sont les ondes utilisées ? Comparer leurs vitesses à celle des véhicules contrôlés.
6. Montrer que si la vitesse v du véhicule est petite devant la vitesse c des ondes dans l'air, alors le décalage fréquentiel est proportionnel à la vitesse du véhicule et peut s'écrire

$$\Delta f = \frac{v}{c} \times (f + f'') \approx \frac{2v}{c} \times f$$
7. Expliquer pourquoi l'onde émise doit avoir une fréquence élevée.

Remarque : Dans le cas réel d'un radar installé au bord d'une route, l'appareil mesure la vitesse radiale v_r du véhicule.



2.3 – Applications



Un radar automatique émet des ondes électromagnétiques dont la fréquence est égale à 34,250 GHz. Au passage d'un véhicule arrivant face à lui, il mesure un écho dont la fréquence est décalée de $\Delta f = 8,2$ kHz. Sachant que les ondes électromagnétiques se déplacent à la vitesse de la lumière ($c = 3,00 \times 10^8$ m.s⁻¹) et que l'angle θ du radar par rapport à la route est égal à 25 degrés, déterminer si ce véhicule roulant sur l'autoroute est en infraction.

Expliquer pourquoi lorsque l'on étudie la lumière provenant d'une étoile, son spectre est d'autant plus décalé vers le rouge que cette étoile s'éloigne rapidement.



Spectre d'émission « réel » de l'étoile

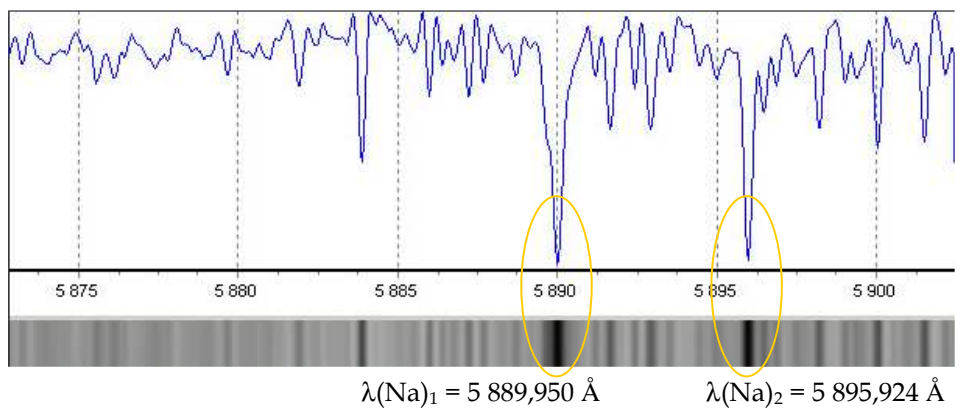


Spectre observé

3 – Effet Doppler-Fizeau : applications à l'astrophysique

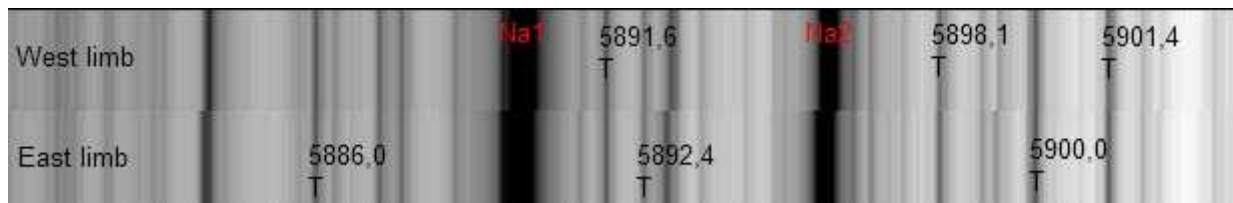
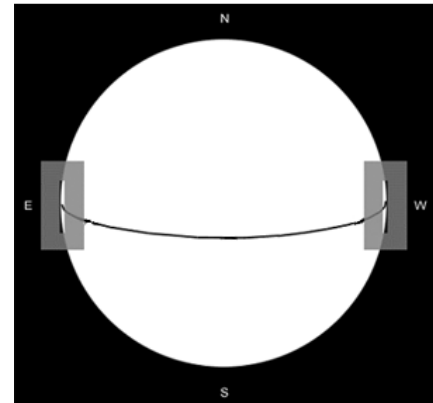
2.1 – Vitesse de rotation solaire

Une partie du spectre visible de l'atome de sodium du laboratoire est donné ci-dessous. On y remarque le doublet caractéristique de cet élément.



A l'aide d'un spectrographe monté sur télescope, on étudie le spectre du Soleil. Une fente permet de cibler la lumière en provenance de la zone équatoriale Est et de la zone équatoriale Ouest de l'étoile (voir schéma ci-contre).

Les deux spectres obtenus sont calibrés et superposés. Afin de les étalonner, on repère la position de quelques raies telluriques T bien connues. Le résultat est donné ci-dessous et dans le fichier [spectre_Soleil_doubletNa.jpg](#).



1. A quoi correspondent ces raies telluriques ? Pourquoi sont-elles parfaitement superposées dans les deux spectres, alors que les deux raies du sodium sont décalées ?
2. Déterminer (en justifiant) le sens de rotation de notre étoile, et l'indiquer sur le schéma ci-dessus.
3. A l'aide de ce spectre et du logiciel SalsaJ, déterminer la vitesse de rotation du Soleil sur lui-même, et la comparer à celle de la Terre, au niveau de l'équateur. Vous expliquerez votre démarche puis commenterez la précision du résultat en proposant éventuellement des améliorations possibles.

2.2 - La loi de Hubble

Voir l'activité complémentaire « Un Univers en expansion ».

Les objets astronomiques nous transmettent des informations (électromagnétiques pour la plupart) que leur mouvement modifie par effet Doppler. La connaissance de cet effet, combiné parfois à ceux de la Relativité (généralisée), est nécessaire pour pouvoir appréhender l'Univers qui nous entoure.

Dans le courant de l'année, lorsque nous aurons progressé en mécanique, nous pourrons également tenter de comprendre comment l'effet Doppler est utilisé par les astronomes dans la détection d'exoplanètes, ou bien encore comme son utilisation permet de conduire les mesures mettant en évidence la présence de matière sombre au sein des galaxies...

