

L'effet Doppler

Cours de sciences physiques - niveau Terminale

Quand une ambulance te dépasse, sa sirène passe brusquement d'un son aigu à un son grave, alors que le conducteur n'a rien changé. Ce n'est pas une illusion : c'est l'**effet Doppler**. La fréquence reçue dépend du mouvement relatif entre la source et le récepteur, et cette idée simple permet de mesurer la vitesse d'une voiture, le flux du sang ou l'éloignement des galaxies.

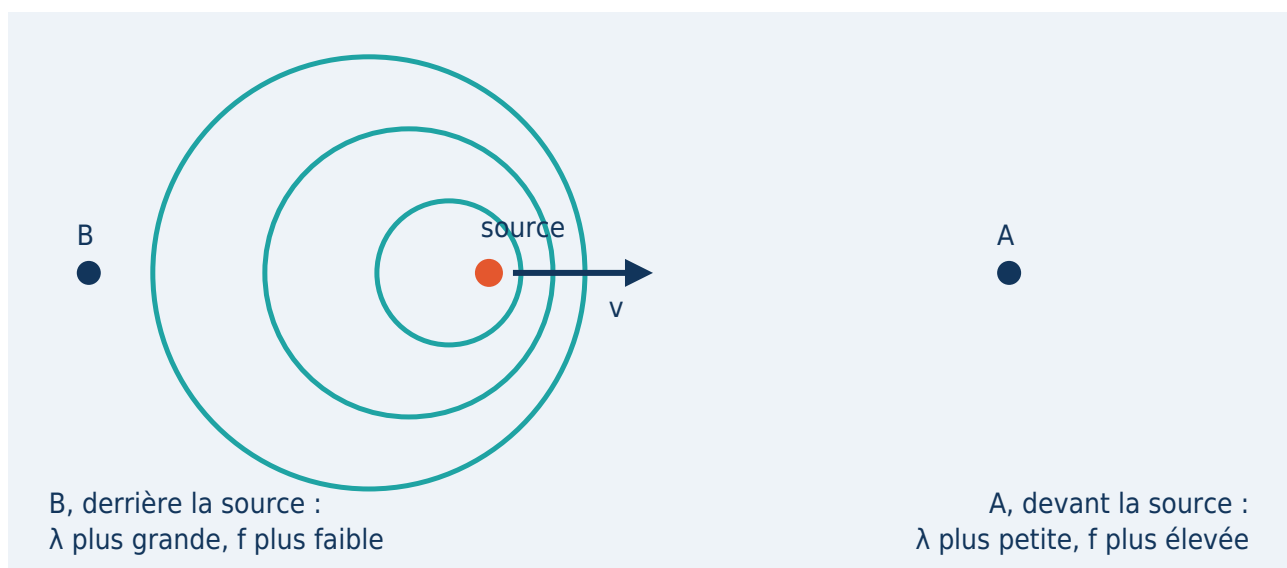
Ce cours est à **télécharger en PDF et à imprimer gratuitement** : le bouton se trouve en bas de la page, sans inscription.

Le décalage Doppler : de quoi s'agit-il ?

Une source émet une onde périodique de fréquence f_e (fréquence d'émission). Un récepteur reçoit cette onde avec une fréquence f_r (fréquence reçue). Si la source et le récepteur sont immobiles l'un par rapport à l'autre, $f_r = f_e$. Dès qu'ils se rapprochent ou s'éloignent, les deux fréquences diffèrent.

DÉFINITION

Le **décalage Doppler** est la différence $\Delta f = f_r - f_e$ entre la fréquence reçue et la fréquence émise, due au mouvement relatif de la source et du récepteur le long de la droite qui les joint. Si la distance diminue, $\Delta f > 0$; si elle augmente, $\Delta f < 0$.



La source (en rouge) avance : les fronts d'onde sont comprimés devant elle et étirés derrière.

Émetteur mobile et récepteur fixe

Dans un milieu donné (l'air pour le son), l'onde se propage à la célérité v , qui ne dépend que du milieu et non du mouvement de la source. Pendant une période $T_e = 1 \div f_e$, la source qui s'approche à la vitesse v_s parcourt $v_s \times T_e$ dans le sens de l'onde. Deux fronts successifs ne sont donc plus séparés de $\lambda_e = v \times T_e$, mais de $\lambda_r = (v - v_s) \times T_e$. Le récepteur fixe reçoit un front tous les λ_r , d'où $f_r = v \div \lambda_r$.

FORMULE À RETENIR

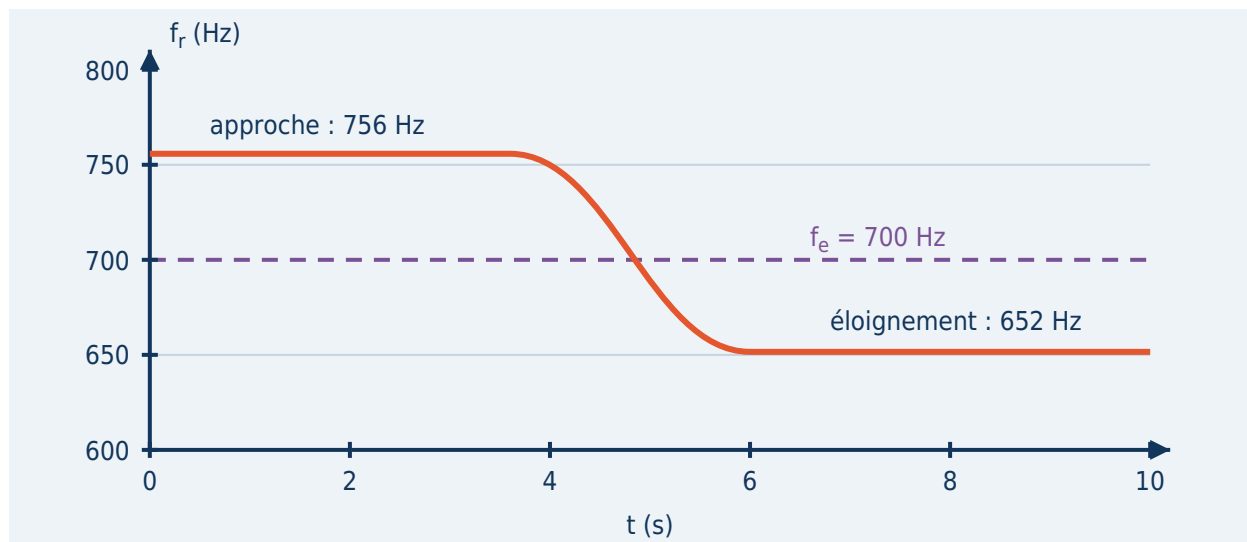
$$f_r = f_e \times v \div (v - v_s) \quad (\text{source qui s'approche})$$

$$f_r = f_e \times v \div (v + v_s) \quad (\text{source qui s'éloigne})$$

f en hertz (Hz), v et v_s en m/s, avec $v_s < v$.

APPLICATION NUMÉRIQUE

Une sirène émet $f_e = 700$ Hz. L'ambulance roule à $v_s = 25$ m/s (90 km/h) ; la célérité du son vaut $v = 340$ m/s. À l'approche : $f_r = 700 \times 340 \div (340 - 25) = 700 \times 340 \div 315 \approx$ **756 Hz**. Quand elle s'éloigne : $f_r = 700 \times 340 \div (340 + 25) = 700 \times 340 \div 365 \approx$ **652 Hz**.



Quand l'ambulance passe devant l'observateur, la fréquence reçue chute de 756 Hz à 652 Hz.

Récepteur mobile et émetteur fixe

Si l'émetteur est fixe et que le récepteur se déplace à la vitesse v_r en direction de la source, il rencontre les fronts d'onde plus souvent : la célérité de l'onde par rapport à lui vaut $v + v_r$ tandis que la longueur d'onde reste $\lambda_e = v \div f_e$. Ainsi $f_r = (v + v_r) \div \lambda_e$.

FORMULE À RETENIR

$$f_r = f_e \times (1 + v_r \div v) \quad (\text{récepteur qui s'approche})$$

$$f_r = f_e \times (1 - v_r \div v) \quad (\text{récepteur qui s'éloigne})$$

APPLICATION NUMÉRIQUE

Un cycliste roule à $v_r = 10$ m/s vers un haut-parleur fixe qui émet $f_e = 440$ Hz. Il entend $f_r = 440 \times (1 + 10 \div 340) \approx \mathbf{453 \text{ Hz}}$, soit un décalage $\Delta f \approx +13$ Hz.

ERREUR FRÉQUENTE

Les deux cas ne sont pas symétriques : la formule change selon que c'est la source ou le récepteur qui bouge. Ce qui reste constant, c'est la célérité de l'onde dans le milieu, jamais la fréquence perçue.

Faibles vitesses, radar et échographie

Lorsque la vitesse relative v_{rel} est très inférieure à la célérité v de l'onde, les deux formules se ramènent à une relation unique : $|\Delta f| \approx f_e \times v_{\text{rel}} \div v$. Pour un radar ou une échographie, l'onde est émise, réfléchi par une cible mobile, puis reçue : le mobile joue d'abord le rôle de récepteur puis d'émetteur, donc le décalage est doublé.

FORMULE À RETENIR

$$|\Delta f| \approx 2 \times f_e \times v_{\text{rel}} \div v \quad (\text{onde réfléchi par une cible mobile})$$

v_{rel} est la composante de la vitesse de la cible selon la direction de l'onde ; v est la célérité de l'onde (c pour une onde radar, environ 1 540 m/s dans les tissus mous pour les ultrasons).

APPLICATION NUMÉRIQUE

Un radar émet à $f_e = 24,125$ GHz et vise une voiture à 130 km/h, soit 36,1 m/s. Le décalage vaut $\Delta f \approx 2 \times 24,125 \times 10^9 \times 36,1 \div 3,00 \times 10^8 \approx \mathbf{5,81 \times 10^3 \text{ Hz}}$. Mesurer Δf donne la vitesse : $v = \Delta f \times c \div (2 f_e)$.

L'effet Doppler pour la lumière

Pour une onde lumineuse émise par une source qui s'éloigne à la vitesse v très inférieure à c , la longueur d'onde reçue λ est plus grande que celle mesurée au repos λ_0 : la raie est décalée vers le rouge. Le décalage relatif est d'autant plus grand que la vitesse est élevée.

FORMULE À RETENIR

$$\Delta\lambda \div \lambda_0 \approx v \div c \quad \text{avec} \quad \Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$$

Source au repos : $\lambda_0 = 656,3 \text{ nm}$



La raie H α d'une galaxie qui s'éloigne est décalée de 5,2 nm vers les grandes longueurs d'onde.

APPLICATION NUMÉRIQUE

La raie H α ($\lambda_0 = 656,3 \text{ nm}$) d'une galaxie est mesurée à 661,5 nm : $\Delta\lambda = 5,2 \text{ nm}$. Sa vitesse d'éloignement est $v = c \times \Delta\lambda \div \lambda_0 = 3,00 \times 10^8 \times 5,2 \div 656,3 \approx \mathbf{2,4 \times 10^6 \text{ m/s}}$, soit $2,4 \times 10^3 \text{ km/s}$.

Applications à retenir

- **Radar routier** : le décalage de l'onde réfléchie donne la vitesse de la voiture.
- **Échographie Doppler** : la vitesse du sang dans une artère se déduit du décalage des ultrasons réfléchis par les globules rouges.
- **Astrophysique** : le décalage vers le rouge des galaxies prouve l'expansion de l'Univers ; les variations périodiques d'une raie d'étoile révèlent un compagnon, planète ou étoile.

L'essentiel à retenir

- Le mouvement relatif source-récepteur décale la fréquence : $\Delta f = f_r - f_e > 0$ en rapprochement, < 0 en éloignement.
- Source mobile : $f_r = f_e \times v \div (v \mp v_s)$; récepteur mobile : $f_r = f_e \times (1 \pm v_r \div v)$.
- Aux faibles vitesses, $|\Delta f| \approx f_e \times v_{\text{rel}} \div v$; après réflexion sur une cible, le décalage est doublé.
- Pour la lumière, $\Delta\lambda \div \lambda_0 \approx v \div c$: une source qui s'éloigne a ses raies décalées vers le rouge.
- Seule la composante de la vitesse le long de la droite source-récepteur compte.