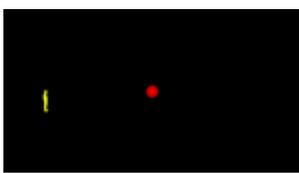
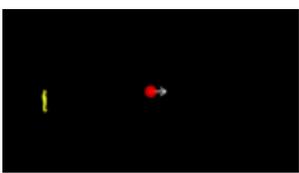
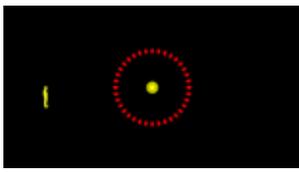
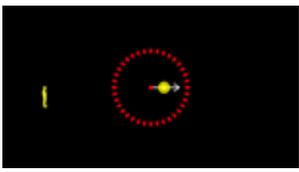
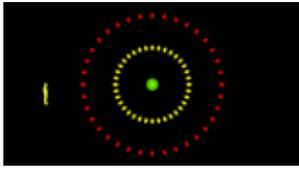
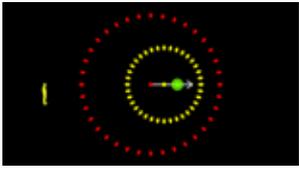
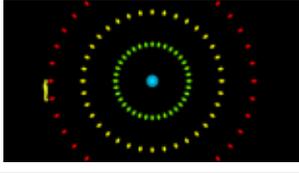
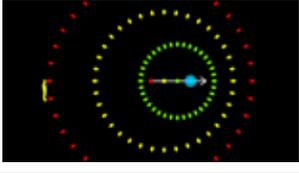
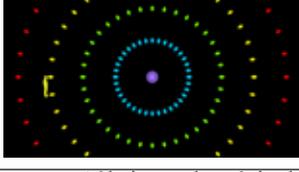
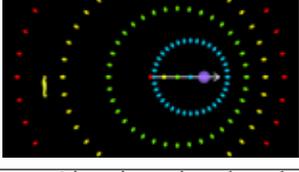


## L'effet Doppler-Fizeau

Pierre Causeret, Esbarres

L'astronomie utilise très souvent l'effet Doppler-Fizeau comme vous pourrez le constater dans plusieurs des articles de ce numéro. Voici un petit résumé de cet effet. Les aspects historiques sont rappelés dans l'article de François Mignard.

Cet effet s'applique à tout phénomène périodique lorsqu'une source s'approche ou s'éloigne de l'observateur (ou lorsque l'observateur s'approche ou s'éloigne de la source). Nous utiliserons ici un exemple simple, un objet qui émet un bip sonore toutes les secondes. L'observateur est fixe. Dans le cas n° 1, à gauche, la source est fixe, dans le cas n° 2, à droite, elle s'éloigne de l'observateur.

t = 0 s	 <p><b>Cas n° 1</b> Premier bip. L'onde sonore, représentée en rouge, commence à se propager dans l'air.</p>	 <p><b>Cas n° 2</b> Premier bip. La source commence à s'éloigner.</p>
t = 1 s	 <p>Une seconde plus tard, deuxième bip (en jaune). L'onde sonore du premier bip s'est propagée (en rouge).</p>	 <p>L'onde sonore du premier bip s'est propagée (en rouge), la source s'est éloignée et émet son 2<sup>e</sup> bip (point jaune).</p>
t = 2 s	 <p>Après deux secondes, nouveau bip (en vert). Les bips précédents ont continué à se propager dans l'air.</p>	 <p>Nouveau bip (en vert). Les deux bips précédents ont continué à se propager dans l'air.</p>
t = 3 s	 <p>Après trois secondes, 4<sup>e</sup> bip. L'onde sonore du premier bip (en rouge) arrive enfin à votre oreille.</p>	 <p>Après trois secondes, l'onde sonore du premier bip vous arrive (en rouge).</p>
t = 4 s	 <p>Une seconde plus tard, l'onde du deuxième bip arrive jusqu'à vous (en jaune). On entend ensuite un bip par seconde.</p>	 <p>L'onde sonore du 2<sup>e</sup> bip (jaune) n'est encore pas arrivée. Il se passe plus d'une seconde entre la perception des 2 premiers bips.</p>

Quand la source s'éloigne, la période augmente pour l'observateur. Si on imagine dans le cas n° 2 un observateur situé à droite de l'image, pour lui, la source se rapproche et la période diminue.

### La formule

Nous nous plaçons dans le cas n° 2 (la source s'éloigne) avec une période  $T$  quelconque. On appelle  $c$  la vitesse de propagation de l'onde,  $v$  la vitesse d'éloignement de la source et  $d$  la distance source-observateur au départ (à  $t = 0$ ).

$t = 0$ . Émission du 1<sup>er</sup> bip. L'observateur reçoit le signal à l'instant  $t_1 = d/c$ , le temps que l'onde parcoure la distance  $d$ .

$t = T$ . Émission du 2<sup>e</sup> bip. La distance source-observateur a augmenté, elle est maintenant de :

$d' = d + vT$ . Le temps pour que l'observateur reçoive le signal est égal à  $d'/c$  ou  $(d + vT)/c$ .

L'observateur reçoit donc le signal à l'instant  $t_2 = T + (d + vT)/c$  ou encore  $t_2 = T + d/c + vT/c$ .

Entre les deux bips, il s'est écoulé pour l'observateur un temps égal à  $t_2 - t_1 = T + vT/c$ .

L'écart entre la période d'émission ( $T$ ) et la période perçue ( $T + vT/c$ ) est donc de  $vT/c$ . On obtient une variation de période  $\Delta T = vT/c$  ce qui peut encore s'écrire :

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{v}{c} \quad (1)$$

On donne souvent la longueur d'onde  $\lambda$  de la source plutôt que sa période. Les deux grandeurs sont reliées par la formule  $\lambda = cT$ . On a donc :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{c \Delta T}{cT} = \frac{\Delta T}{T}$$

La formule (1) devient alors :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \quad (2)$$

C'est l'écriture la plus courante de l'effet Doppler-Fizeau.

Si la source s'approche au lieu de s'éloigner,  $T$  et  $\lambda$  diminuent,  $\Delta T$  et  $\Delta \lambda$  sont négatifs. Pour que la formule reste identique, il suffit d'écrire les vitesses d'approche avec un signe moins.

Cette formule s'utilise pour tout type d'onde si on reste dans le cadre de la physique classique. Elle est valable pour les ondes électromagnétiques si  $v$  est petit devant la vitesse de la lumière.

## Quelques applications

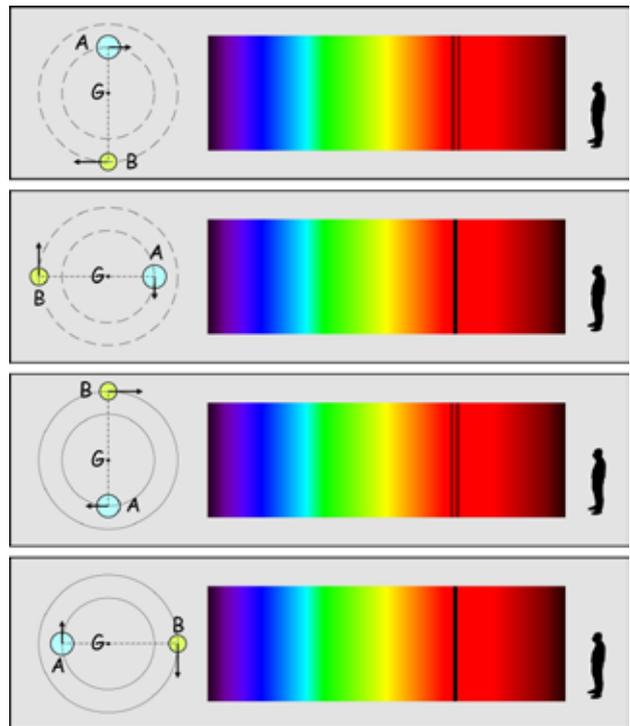
L'exemple le plus courant est donné avec le son. Si une voiture passe devant vous, le bruit du moteur apparaîtra plus aigu lorsqu'elle s'approche ( $\lambda$  plus petit) que lorsqu'elle s'éloigne de vous. Même chose avec une sirène de voiture de pompier. C'est ce même phénomène qui permet à un «Doppler» de mesurer la vitesse d'écoulement du sang (par ultrason) ou à un radar automatique de mesurer la vitesse d'un véhicule (par micro-ondes).

En astronomie, il faudrait des vitesses énormes pour percevoir à l'œil des variations de longueur d'onde donc de couleur de la lumière des étoiles. Pour les étoiles de la Galaxie par exemple, les vitesses sont habituellement de quelques dizaines de km/s. Pour une étoile rapide s'approchant de nous à 300 km/s soit 1/1000 de la vitesse de la lumière, son décalage par effet Doppler-Fizeau sera d'un millième de longueur d'onde donc de l'ordre de 0,6 nm, indétectable à l'œil. De plus, toutes les longueurs d'onde sont décalées, une partie de l'infrarouge passant dans le rouge.

Pour détecter le phénomène, on utilise les raies d'absorption des spectres d'étoiles. Lorsqu'une étoile rayonne, sa lumière traverse l'atmosphère de l'étoile et les éléments présents (principalement de l'hydrogène) absorbent certaines longueurs d'onde. Si l'étoile s'approche, les raies de l'hydrogène par exemple ne seront pas aux longueurs d'onde

attendues mais décalées vers le bleu (vers les courtes longueurs d'onde). Si l'étoile s'éloigne, le décalage est vers le rouge. La mesure de ce décalage par rapport à un spectre de référence permet de calculer la vitesse radiale de l'étoile (vitesse d'approche ou d'éloignement). Dans l'exemple de notre étoile s'approchant à 300 km/s, la raie H alpha de l'hydrogène habituellement à 656,3 nm se retrouvera à 655,6 nm.

La découverte des étoiles doubles spectroscopiques est aussi due à l'effet Doppler. Cette fois, il n'est même pas nécessaire de calibrer le spectre en longueur d'onde. Lorsque deux étoiles tournent l'une autour de l'autre, il arrive que l'une des composantes s'approche alors que l'autre s'éloigne, l'un des spectres est alors décalé vers le bleu, l'autre vers le rouge et les raies d'absorption apparaissent dédoublées. À d'autres moments, ni l'une ni l'autre ne s'approchent ni ne s'éloignent et il n'y a plus de dédoublement (voir figure). On a ainsi découvert des étoiles doubles dont les deux composantes sont trop proches pour être dédoublées optiquement.



Dans le premier schéma, l'étoile A s'approche et B s'éloigne. La raie H $\alpha$  représentée ici est dédoublée.

Même chose sur le 3<sup>e</sup> schéma où B s'approche et A s'éloigne.

Dans les 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> schéma, les étoiles A et B ne s'approchent ni ne s'éloignent de l'observateur, il n'y a pas de décalage spectral.

L'effet Doppler-Fizeau ne détecte que la vitesse radiale d'une étoile et sa mesure est indépendante de sa distance.

Vous trouverez d'autres applications en astronomie dans les articles qui suivent.