

## Exercices 11, 12 et 14 p 359 (NIVEAU 1 et 2)

**Exercice 1 : DES CINEMOMETRES (D'après Antilles 2015) – NIVEAU 2**

La mesure de vitesse intervient dans un très grand nombre de procédés technologiques dans des domaines très variés : industrie, médecine, sport, transport, aérospatiale, ... Les dispositifs de mesure de vitesse sont généralement appelés cinémomètres. Les cinémomètres les plus courants peuvent être classés en deux catégories : les « cinémomètres Doppler » et les « cinémomètres laser ».

Le cinémomètre Doppler utilise une onde électromagnétique monochromatique, de célérité  $c$ . Il comprend essentiellement : un émetteur qui génère une onde de fréquence  $f_0 = 24,125$  GHz, un récepteur qui reçoit cette onde après réflexion sur la " cible " et une chaîne de traitement électronique qui compare le signal émis et le signal reçu. Si la " cible " visée a une vitesse non nulle par rapport au cinémomètre, l'appareil produit un signal périodique dont la fréquence, appelée « *fréquence Doppler* », est proportionnelle à la vitesse de la " cible ".

**Données :**

- Relation, en première approximation, entre la « fréquence Doppler » et la vitesse de la " cible " :

$$f_D = \frac{2 \cdot f_0 \cdot v_r}{c}$$

$f_D$  : fréquence Doppler  
 $f_0$  : fréquence de l'émetteur  
 $v_r$  : vitesse relative à la "cible" par rapport à l'émetteur  
 $c$  : vitesse de la lumière dans le vide

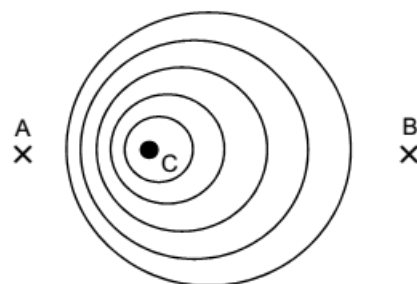
- Célérité des ondes électromagnétiques dans le vide ou dans l'air :  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

- Les cinémomètres Doppler utilisent l'effet Doppler. Expliquer en quelques lignes en quoi consiste ce phénomène.

*Un cinémomètre Doppler immobile est utilisé pour mesurer la vitesse d'une " cible " qui s'approche de lui. Les ondes électromagnétiques émises sont réfléchies par la " cible " avant de revenir au cinémomètre.*

- La figure ci-contre modélise de manière très simplifiée l'allure des ondes réfléchies par cette " cible ", notée C.

Déterminer, en explicitant le raisonnement suivi, si le cinémomètre Doppler est situé au point A ou au point B.



- Un cinémomètre Doppler est utilisé pour mesurer la vitesse des balles de tennis lors des principaux tournois internationaux comme celui de Roland Garros. Au cours de ce tournoi, lors d'un service, l'appareil mesure une fréquence Doppler de valeur  $f_D = 7416 \text{ Hz}$ .

- 3.1. Calculer la valeur de la vitesse de cette balle.



- 3.2. Ce résultat est-il cohérent avec celui affiché sur la photographie ci-dessous prise lors de ce service ?



## Exercice 2 : DE L'EFFET DOPPLER ET DE SES APPLICATIONS (D'après Métropole 2016) – NIVEAU 2

Christian Doppler, savant autrichien, propose en 1842 une explication de la modification de la fréquence du son perçu par un observateur immobile lorsque la source sonore est en mouvement. Buys-Ballot, scientifique hollandais, vérifie expérimentalement la théorie de Doppler en 1845, en enregistrant le décalage en fréquence d'un son provenant d'un train en mouvement et perçu par un observateur immobile.

On se propose de présenter l'effet Doppler puis de l'illustrer au travers d'une application.

	
Christian Doppler (1803- 1853)	Christoph Buys-Ballot (1817-1890)

### 1. Mouvement relatif d'une source sonore et d'un détecteur

Nous nous intéressons dans un premier temps au changement de fréquence associé au mouvement relatif d'une source sonore  $S$  et d'un détecteur placé au point  $M$  (figure 1).

Une source  $S$  émet des « bips sonores » à intervalles de temps réguliers dont la période d'émission est notée  $T_0$ . Le signal sonore se propage à la célérité  $v_{son}$  par rapport au référentiel terrestre.

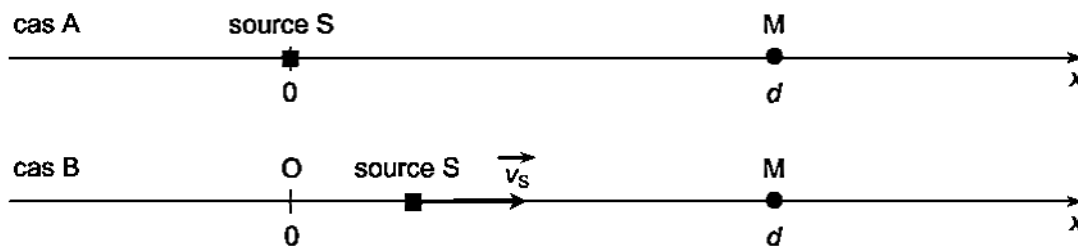


Figure 1. Schéma représentant une source sonore immobile (cas A), puis en mouvement (cas B).

**1.1.** Cas A : la source  $S$  est immobile en  $x = 0$  et le détecteur  $M$ , situé à la distance  $d$ , perçoit chaque bip sonore avec un retard lié à la durée de propagation du signal.

**1.1.1.** Définir par une phrase, en utilisant l'expression « bips sonores », la fréquence  $f_0$  de ce signal périodique.

**1.1.2.** Comparer la période temporelle  $T$  des bips sonores perçus par le détecteur à la période d'émission  $T_0$ .

**1.2.** Cas B : la source  $S$ , initialement en  $x = 0$ , se déplace à une vitesse constante  $v_s$  suivant l'axe  $Ox$  en direction du détecteur immobile. La vitesse  $v_s$  est inférieure à la célérité  $v_{son}$ . On suppose que la source reste à gauche du détecteur.

$$T' = T_0 \left( 1 - \frac{v_s}{v_{son}} \right)$$

Le détecteur perçoit alors les différents bips séparés d'une durée :

Indiquer si la fréquence  $f'$  des bips perçus par le détecteur est inférieure ou supérieure à la fréquence  $f_0$  avec laquelle les bips sont émis par la source  $S$ . Justifier.

## 2. La vélocimétrie Doppler en médecine

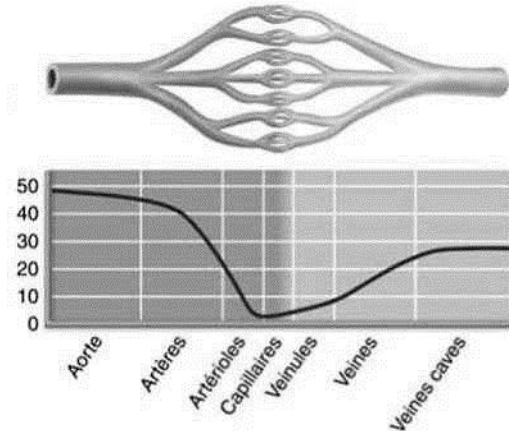
La médecine fait appel à l'effet Doppler pour mesurer la vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux sanguins (figure 2).

Un émetteur produit des ondes ultrasonores qui traversent la paroi d'un vaisseau sanguin. Pour simplifier, on suppose que lorsque le faisceau ultrasonore traverse des tissus biologiques, il rencontre :

- des cibles fixes sur lesquelles il se réfléchit sans modification de la fréquence ;
- des cibles mobiles, comme les globules rouges du sang, sur lesquelles il se réfléchit avec une modification de la fréquence ultrasonore par effet Doppler (figure 3).

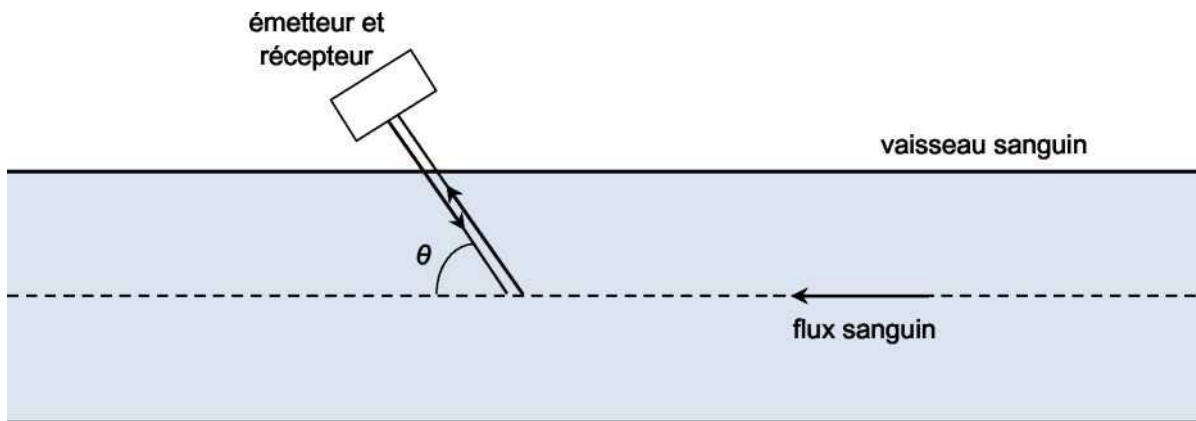
différents  
vaisseaux du  
lit vasculaire

vitesse de  
l'écoulement  
sanguin  
(cm/s)



**Figure 2.** Vitesse moyenne du sang dans différents vaisseaux sanguins.

©2011 Pearson



**Figure 3.** Principe de la mesure d'une vitesse d'écoulement sanguin par effet Doppler (Echelle non respectée).

L'onde ultrasonore émise, de fréquence  $f_E = 10 \text{ MHz}$ , se réfléchit sur les globules rouges qui sont animés d'une vitesse  $v$ . L'onde réfléchie est ensuite détectée par le récepteur.

La vitesse  $v$  des globules rouges dans le vaisseau sanguin est donnée par la relation  $v = \frac{v_{\text{ultrason}}}{2 \cos \theta} \cdot \frac{\Delta f}{f_E}$  où  $\Delta f$  est le

décalage en fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie,  $v_{\text{ultrason}}$  la célérité des ultrasons dans le sang et  $\theta$  l'angle défini sur la figure 3.

On donne  $v_{\text{ultrason}} = 1,57 \times 10^3 \text{ m.s}^{-1}$  et  $\theta = 45^\circ$ .

**2.1.** Le décalage en fréquence mesuré par le récepteur est de 1,5 kHz. Identifier le(s) type(s) de vaisseaux sanguins dont il pourrait s'agir.

**2.2.** Pour les mêmes vaisseaux sanguins et dans les mêmes conditions de mesure, on augmente la fréquence des ultrasons émis  $f_E$ . Indiquer comment évolue le décalage en fréquence  $\Delta f$ . Justifier.

### Exercice 3 : DETECTION D'UNE EXOPLANÈTE – NIVEAU 2

Une nouvelle exoplanète a été détectée, le 15 septembre 2005, par une équipe européenne d'astronomes. La planète HD 189733b de la constellation du petit renard a pu être détectée et étudiée simultanément par la combinaison de deux méthodes : vitesse radiale et occultation. Elle est une des rares exoplanètes dont les chercheurs ont, à ce jour, pu déterminer à la fois la masse exacte et le rayon et conclure qu'il s'agit d'un « gros Jupiter chaud ». De ce fait, et compte-tenu de la proximité (environ 60 années-lumière de la Terre), l'exoplanète HD 189733b offre à la communauté scientifique de riches horizons d'études complémentaires.

(<http://www.insu.cnrs.fr>)

Cet exercice aborde certains aspects du principe de détection de cette exoplanète.

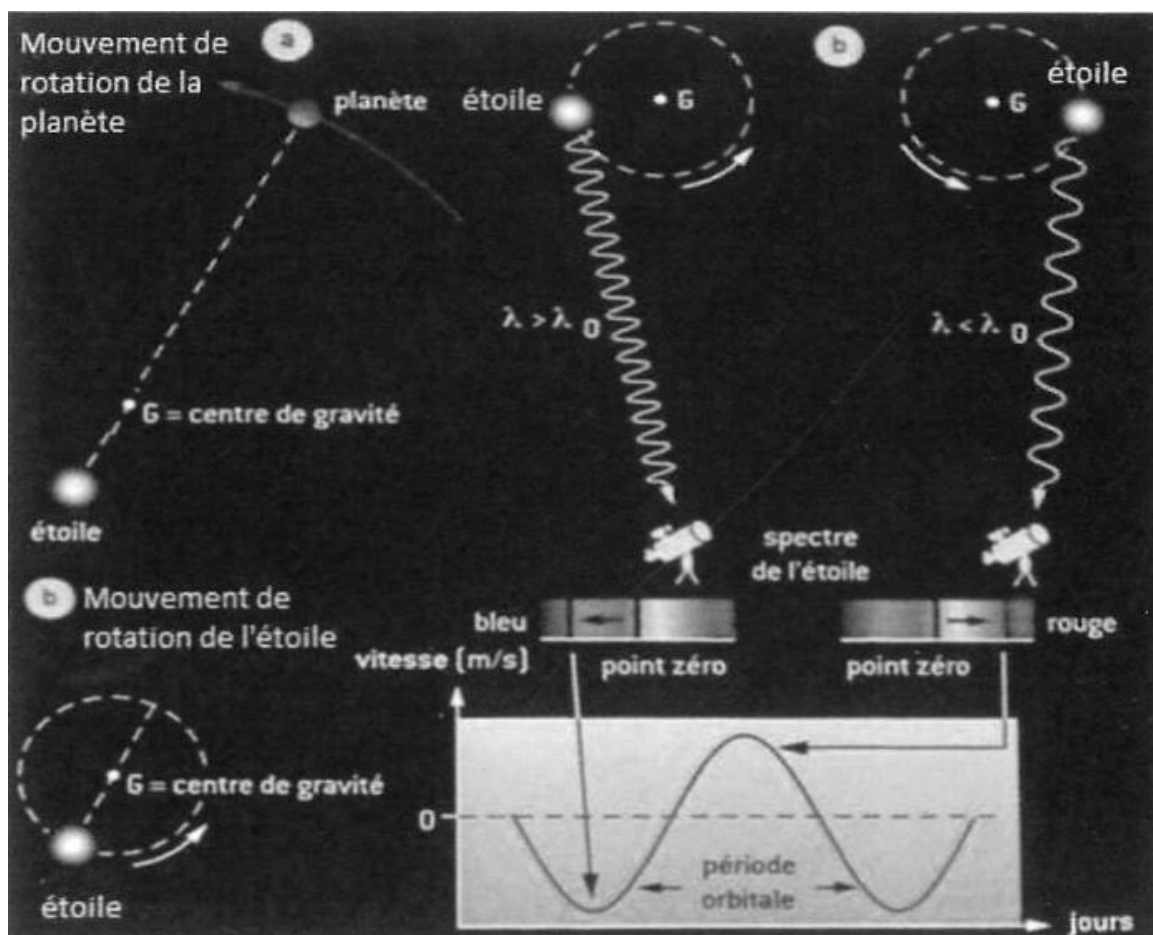
#### Illustration du principe de détection par vélocimétrie

Une exoplanète est une planète qui tourne autour d'une étoile autre que le Soleil. L'ensemble des deux est appelé système {étoile-planète}. Ces systèmes peuvent être repérés par la méthode de vélocimétrie basée sur l'effet Doppler. Son principe s'appuie sur l'étude de la trajectoire de l'étoile autour d'un point G appelé centre de gravité du système {étoile-planète}. Les documents ci-dessous présentent des informations que nous sommes en mesure d'exploiter à partir de la méthode vélocimétrique et exposent les résultats de mesures effectuées pour le système HD 189733.

#### Document 1 : Principe de la méthode de vélocimétrie

Dans un système {étoile-planète}, la planète et l'étoile sont en mouvement de rotation autour du centre de gravité G du système. On enregistre les spectres de raies de l'étoile sur des cycles de plusieurs nuits, ce qui permet de mettre en évidence des oscillations périodiques de la longueur d'onde des raies observées. Ces oscillations peuvent être reliées, grâce à l'effet Doppler, au mouvement de rotation de l'étoile autour du centre de gravité du système. **La vitesse radiale de l'étoile (vitesse suivant l'axe d'observation Terre-étoile) peut alors être déterminée par cette étude.** Elle est composée d'une vitesse moyenne (vitesse du système par rapport à l'observateur terrestre) à laquelle s'ajoute une perturbation qui varie périodiquement. La période de la perturbation donne la période du mouvement de l'étoile qui est aussi la période du mouvement de la planète.

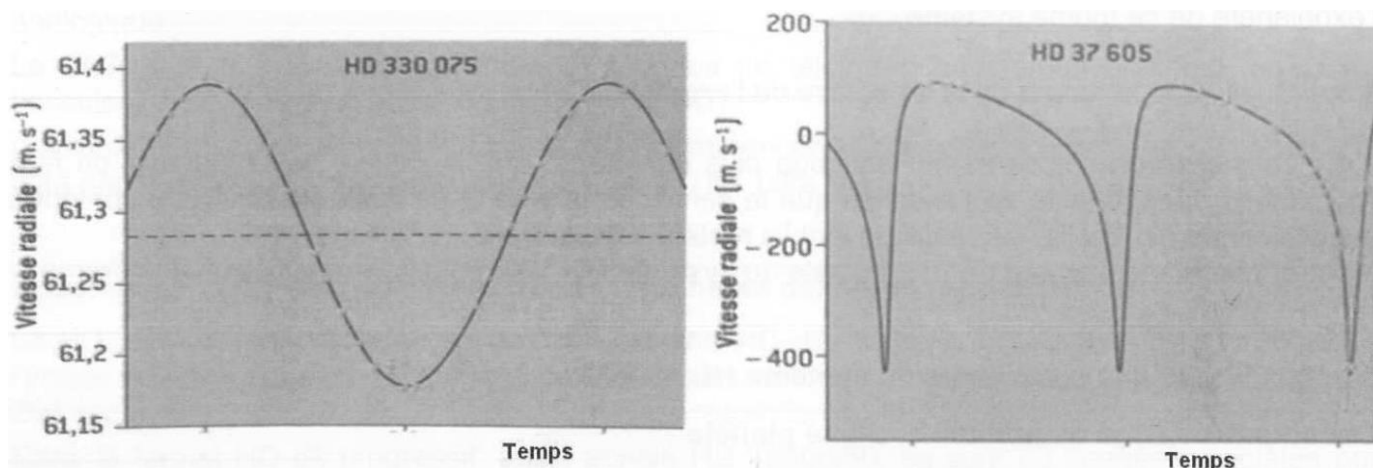
D'après <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr>





La méthode des vitesses radiales utilisée permet de distinguer assez facilement les orbites circulaires des orbites elliptiques. Les planètes en orbite circulaire correspondent à des étoiles dont les variations de vitesse radiale sont régulières et symétriques en forme de sinusoïde (graphe de gauche). Lorsque la trajectoire est une ellipse allongée, il apparaît des « pics » dans la courbe de vitesses (graphe de droite).

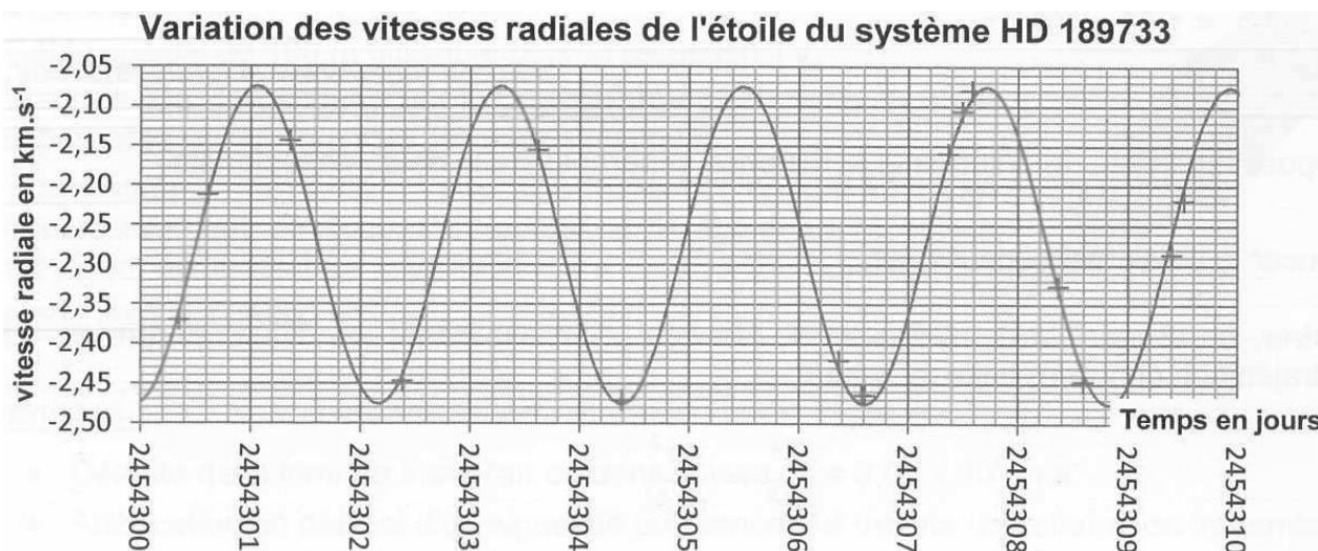
D'après F. Casoli & T. Encrenaz, Planètes extrasolaires, 2005



## Document 2 : Système {étoile-exoplanète} HD 189733

Le graphe ci-dessous représente une modélisation des variations de la vitesse radiale de l'étoile du système HD 189733 autour de sa vitesse moyenne obtenue à partir de mesures réalisées à l'observatoire de Haute Provence par une équipe de chercheurs en juillet 2008.

L'étoile du système HD 189733 est une étoile dont les caractéristiques sont assez proches de celle du Soleil : les températures de surface, notamment, sont voisines.



**1.1.** Le décalage spectral est lié au mouvement de rotation de l'étoile autour du centre de gravité G. On rappelle que le décalage spectral  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_{mesurée}$ , où  $\lambda$  est une longueur d'onde de référence et  $\lambda_{mesurée}$  sa valeur perçue depuis la Terre, permet de déterminer la vitesse  $v$  de déplacement du système par la relation :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \quad \left| \begin{array}{l} c : \text{célérité de la lumière dans le vide} \\ \lambda : \text{longueur d'onde de la raie de référence} \\ (\lambda = 656,2 \text{ nm}) \end{array} \right.$$

Quelles mesures, réalisées par l'observatoire de Haute Provence, ont permis de tracer la courbe du document 2 ? Expliquer la démarche des chercheurs.

**1.2.** Pour détecter la présence d'une planète extrasolaire, on repère une certaine périodicité dans la variation de vitesse radiale : ceci permet d'affirmer qu'il existe bien un système exoplanétaire.

Déterminer la période de révolution de l'étoile du système HD 189733 ainsi que celle de l'exoplanète de ce même système.

**1.3.** Quelle est la nature de la trajectoire de l'exoplanète autour du centre de gravité G ?

**11 Connaître l'effet Doppler**

•  $f_R > f_E$  est équivalent à  $T_R < T_E$ .

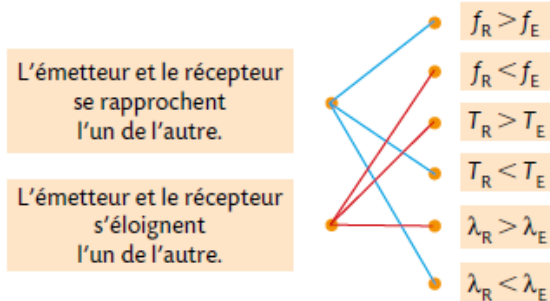
Cela implique  $\lambda_R < \lambda_E$  puisque  $\lambda = v_{\text{onde}} \times T$ .

On a alors  $\Delta f = f_R - f_E > 0$ , donc E et R se rapprochent l'un de l'autre.

•  $f_R < f_E$  est équivalent à  $T_R > T_E$ .

Cela implique  $\lambda_R > \lambda_E$  puisque  $\lambda = v_{\text{onde}} \times T$ .

On a alors  $\Delta f = f_R - f_E < 0$ , donc E et R s'éloignent l'un de l'autre.

**12 Identifier une expression (1)**

1. Le décalage Doppler  $\Delta f$  s'exprime en Hz.

Dans le cas où l'émetteur et le récepteur s'éloignent l'un de l'autre, le signe du décalage Doppler est négatif :  $\Delta f < 0$ .

2. • Relation (a) : Il y a homogénéité dans les unités. Comme  $\Delta f < 0$ , il faut que le membre de droite de l'égalité soit aussi négatif ; c'est bien le cas.

• Relation (b) : Il y a homogénéité dans les unités. Le membre de droite de l'égalité n'est pas négatif car  $v_{\text{son}} > v$ . Ce n'est pas la bonne relation.

• Relations (c) et (d) : Il n'y a pas d'homogénéité dans les unités ; ces relations sont fausses.

La bonne relation est la (a).

**14 Calculer une valeur de vitesse**

La valeur de la vitesse du véhicule est donnée par :

$$v = \frac{c \times \Delta f}{2 \times \cos \alpha \times f_E}$$

$$\text{Donc } v = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times 6,451 \times 10^3 \text{ Hz}}{2 \times \cos(20^\circ) \times 3,40 \times 10^{10} \text{ Hz}}$$

soit  $v = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Exercice 1**

1. Une source d'onde de fréquence  $f_{\text{source}}$  est perçue par un récepteur en mouvement à une fréquence différente  $f_{\text{récepteur}}$ . La fréquence perçue dépend de la vitesse relative du récepteur par rapport à la source émettrice.

Si la source et le récepteur sont en approche relative alors  $f_{\text{récepteur}} > f_{\text{source}}$ .

Si la source et le récepteur s'éloignent relativement alors  $f_{\text{récepteur}} < f_{\text{source}}$ .

Ce phénomène est appelé effet Doppler. Il s'applique également aux ondes électromagnétiques dont la lumière.

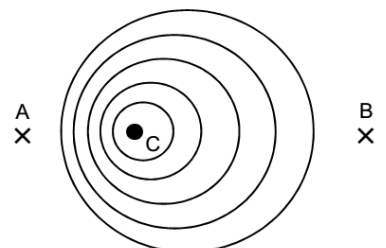
2. Sur la figure présentée la cible réfléchit les ondes du cinémomètre. La cible joue alors le rôle de l'émetteur (ou source). Tandis que le cinémomètre (en A ou B) est le récepteur. Comme la cible s'approche de l'émetteur alors

$f_{\text{récepteur}} > f_{\text{source}}$  soit dans le contexte  $f_{A \text{ ou } B} > f_{\text{source}}$ . L'observation du schéma montre que A perçoit une onde de longueur d'onde  $\lambda_A$  inférieure à celle  $\lambda_B$  perçue par B.  $\lambda_A < \lambda_B$

Comme  $\lambda = \frac{v}{f}$  et que l'onde possède partout la même célérité  $v$  alors  $\frac{v}{f_A} < \frac{v}{f_B}$ . On en déduit que  $f_A > f_B$ .

Ainsi pour A, il perçoit  $f_A > f_{\text{source}}$ , c'est que la cible s'approche de lui.

Pour B,  $f_B < f_{\text{source}}$ , la cible s'éloigne de B. Le cinémomètre est situé en A puisque la cible s'approche de lui.



$$3.1. f_D = \frac{2 \cdot f_0 \cdot v_r}{c} \text{ donc } v_r = \frac{f_D \cdot c}{2 \cdot f_0} \quad v_r = \frac{7416 \times 3,00 \times 10^8}{2 \times 24,125 \times 10^9} = 46,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3.2.  $v_R = 166 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  valeur conforme à celle affichée par le cinémomètre photographié.

**Exercice 2**

1.1.1. La fréquence  $f_0$  est le nombre de « bips sonores » par seconde, elle s'exprime en hertz.

1.1.2. La distance entre la source et le détecteur ne varie pas, ainsi l'effet Doppler ne se produit pas donc  $T = T_0$ .

1.2. Comme  $v_s < v_{\text{son}}$  alors  $\frac{v_s}{v_{\text{son}}} < 1$ , ainsi  $\left(1 - \frac{v_s}{v_{\text{son}}}\right) < 1$  et comme  $T' = T_0 \cdot \left(1 - \frac{v_s}{v_{\text{son}}}\right)$  alors  $T' < T_0$ .

Soit  $\frac{1}{T'} > \frac{1}{T_0}$  Enfin comme  $f = \frac{1}{T}$ , on a  $f' > f_0$ . La fréquence perçue  $f'$  est supérieure à la fréquence émise  $f_0$ .

Remarque : ce résultat est conforme à l'observation de la vie quotidienne, la sirène de l'ambulance semble plus aiguë à l'approche.

2.1. On applique la formule fournie  $v = \frac{v_{\text{ultrason}}}{2 \cdot \cos \theta} \cdot \frac{\Delta f}{f_E}$  avec  $\Delta f = 1,5 \text{ kHz}$ .

$$v = \frac{1,57 \times 10^3}{2 \times \cos 45} \cdot \frac{1,5 \times 10^3}{10 \times 10^6} = 0,1665 \text{ m.s}^{-1} \text{ en ne conservant que deux chiffres significatifs, } v = 0,17 \text{ m.s}^{-1} = 17 \text{ cm.s}^{-1}.$$

La lecture de la figure 2 montre que les vaisseaux pour lesquels les vitesses d'écoulement sanguin sont dans cette gamme, sont les artérioles (un peu plus de  $0 \text{ cm.s}^{-1}$  à  $v = 20 \text{ cm.s}^{-1}$ ), et les veines.

2.2. On a  $v = \frac{v_{\text{ultrason}}}{2 \cdot \cos \theta} \cdot \frac{\Delta f}{f_E}$  ainsi  $\Delta f = \frac{v \cdot 2 \cdot \cos \theta \cdot f_E}{v_{\text{ultrason}}}$  et dans cette formule seule  $f_E$  augmente, les autres paramètres sont inchangés. Comme  $f_E$  est au numérateur alors  $\Delta f$  augmente.

### Exercice 3

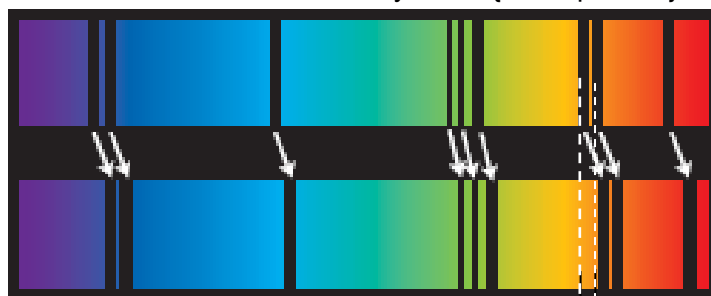
1.1. La vitesse de déplacement  $v$  du système {étoile-planète} par rapport à la Terre est donnée par la relation :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \text{ soit, avec } \Delta \lambda = \lambda - \lambda_{\text{mesurée}}, \text{ on obtient } v = c \cdot \frac{\lambda - \lambda_{\text{mesurée}}}{\lambda}$$

Or  $c$  et  $\lambda = 658,2 \text{ nm}$  sont des constantes donc  $v$  dépend du décalage spectral  $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_{\text{mesurée}}$ .

Pour tracer le graphe du doc.2, les chercheurs ont suivi la démarche suivante :

- ils ont enregistré le spectre de raies de l'étoile au cours de plusieurs nuits ;
- ils ont mesuré le décalage spectral  $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_{\text{mesurée}}$  entre la longueur d'onde mesurée  $\lambda_{\text{mesurée}}$  et la longueur d'onde de référence  $\lambda = 658,2 \text{ nm}$  ;
- ils en ont déduit la vitesse  $v$  du système {étoile-planète}.

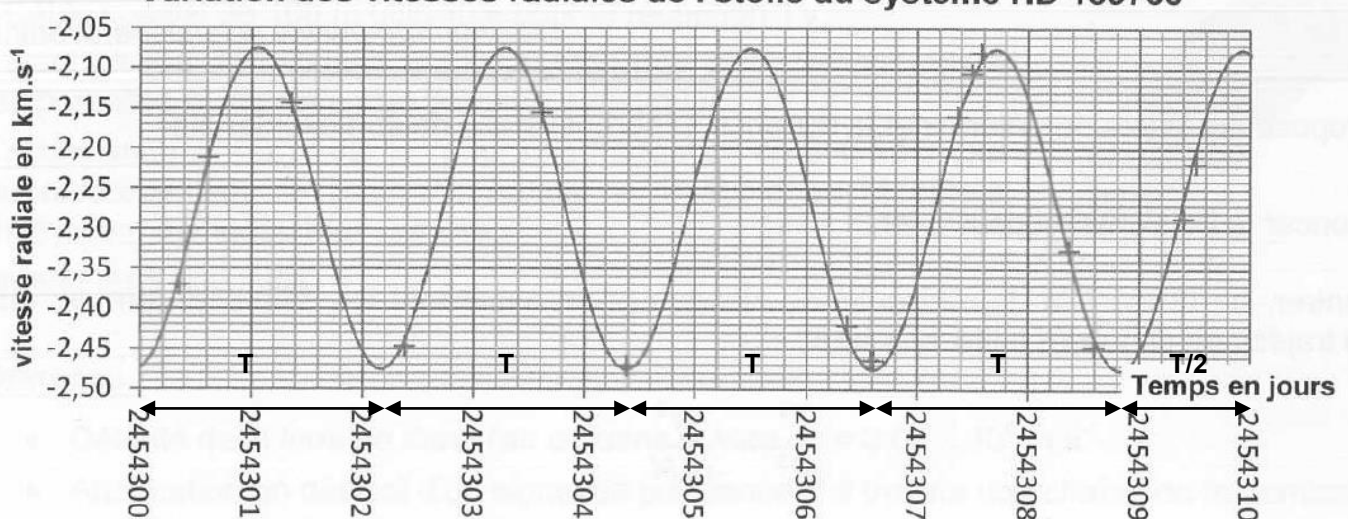


Spectre de raies de référence

Spectre de raies observé

1.2.

Variation des vitesses radiales de l'étoile du système HD 189733



Soit  $T$  la période de révolution de l'étoile autour du centre de gravité  $G$  du système.

En  $2454310 - 2454300 = 10$  jours on mesure  $4,5 \cdot T$  soit :

$$4,5T = 10 \Leftrightarrow T = \frac{10}{4,5} = 2,22 \text{ jours soit } T = 2,22 \times 24 \times 3600 \text{ s} = 1,9 \times 10^5 \text{ s}.$$

L'exoplanète possède la même période de révolution que l'étoile comme l'indique le document 1.

1.3. Le graphe du doc.2 étant **une sinusoïde**, la trajectoire de la planète autour du centre de gravité  $G$  est un **cercle**.