

EXERCICE N°1 : LES APPLICATIONS DE L'EFFET DOPPLER

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 de deux applications.

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). Le référentiel d'étude est le référentiel terrestre dans lequel le détecteur est immobile. 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.

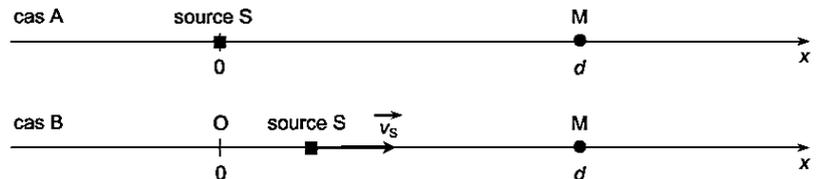


Figure 1. Schéma représentant une source sonore immobile (cas A), puis en mouvement (cas B).

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.

Le détecteur perçoit alors les différents bips séparés d'une durée $T' = T_0 \left(1 - \frac{v_s}{v_{son}} \right)$

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

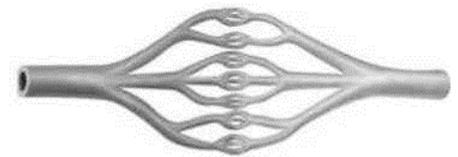
La médecine fait appel à l'effet Doppler pour mesurer la vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux sanguins (figure 2).

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).

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

différents vaisseaux du lit vasculaire



vitesse de l'écoulement sanguin (cm/s)

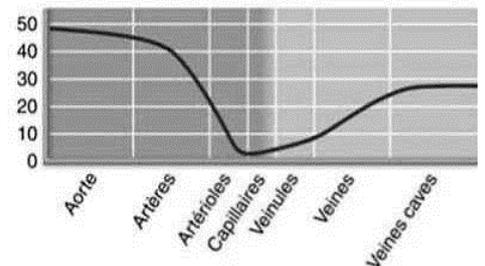


Figure 2. Vitesse moyenne du sang dans différents vaisseaux sanguins.

©2011 Pearson

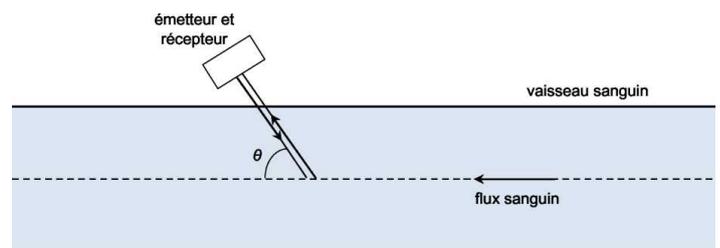


Figure 3. Principe de la mesure d'une vitesse d'écoulement sanguin par effet Doppler (échelle non respectée).

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

Δf est le décalage en fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie, $v_{ultrason}$ la célérité des ultrasons dans le sang et θ l'angle défini sur la figure 3. On donne $v_{ultrason} = 1,57 \times 10^3 \text{ m.s}^{-1}$ et $\theta = 45^\circ$.

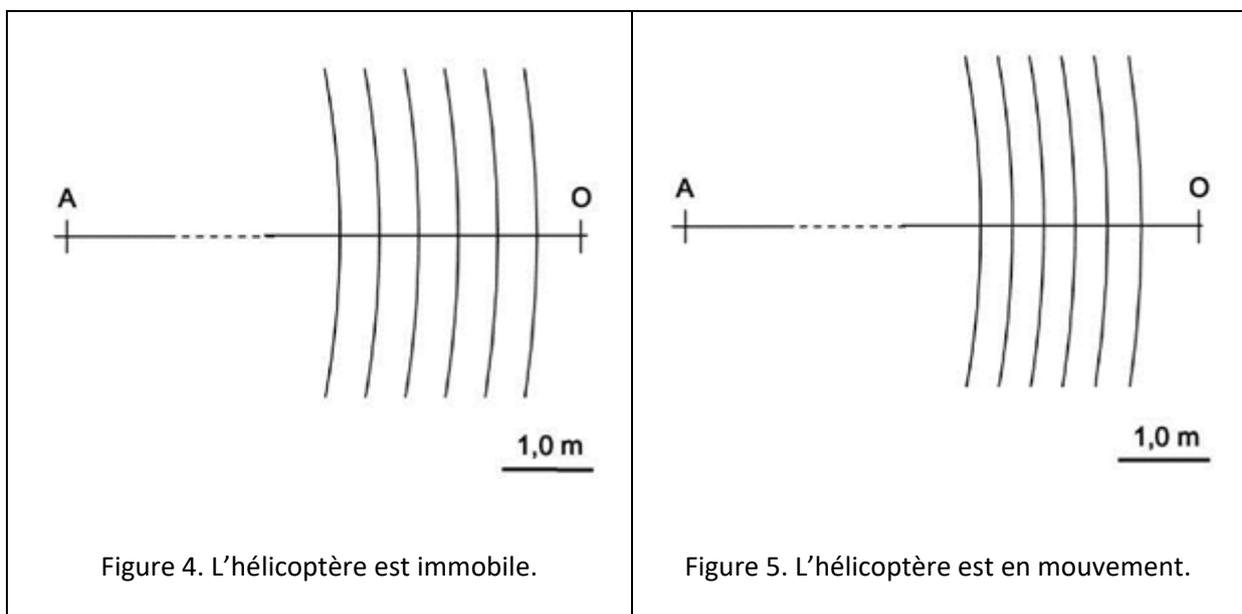
2.1. Le décalage en fréquence mesuré par le récepteur est de 1,5 kHz. Identifier le(s) type(s) de vaisseaux sanguins dont il pourrait s'agir.

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 Δf . Justifier.

3. Détermination de la vitesse d'un hélicoptère par effet Doppler

On s'intéresse à un son émis par un hélicoptère et perçu par un observateur immobile. La valeur de la fréquence de l'onde sonore émise par l'hélicoptère est $f_0 = 8,1 \times 10^2 \text{ Hz}$. On se place dans le référentiel terrestre pour toute la suite de cette partie.

Les portions de cercles des figures 4 et 5 ci-dessous donnent les maxima d'amplitude de l'onde sonore à un instant donné. Le point A schématise l'hélicoptère. Dans le cas de la figure 4, l'hélicoptère est immobile. Dans le cas de la figure 5, il se déplace à vitesse constante le long de l'axe et vers l'observateur placé au point O. La célérité du son dans l'air est indépendante de sa fréquence.



3.1. Déterminer, avec un maximum de précision, la longueur d'onde λ_0 de l'onde sonore perçue par l'observateur lorsque l'hélicoptère est immobile, puis la longueur d'onde λ' lorsque l'hélicoptère est en mouvement rectiligne uniforme.

3.2. En déduire une estimation de la valeur de la célérité de l'onde sonore. Commenter la valeur obtenue.

3.3. Déterminer la fréquence du son perçu par l'observateur lorsque l'hélicoptère est en mouvement. Cette valeur est-elle en accord avec le résultat de la question 1.2. ? Comment la perception du son est-elle modifiée ?

3.4. En déduire la valeur de la vitesse de l'hélicoptère. Cette valeur vous paraît-elle réaliste.

3.5. Exploitation d'une série de mesures d'une grandeur X :

Pour une série de mesures pour lesquelles on suppose les conditions de répétabilité vérifiées, on admet que :

- la meilleure estimation de la valeur x de la grandeur X est égale à la moyenne \bar{X} des N valeurs mesurées ;
- la meilleure estimation de l'incertitude de mesure de la grandeur X, avec un niveau de confiance de 95%

s'écrit :

$$U_x = 2 \times \frac{s_{n-1}}{\sqrt{N}}$$

N : nombre de valeurs disponibles
 s_{n-1} : écart-type expérimental tel que :
 $s_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \times \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$

Dans un processus de production industrielle, un radar en cours de réglage a effectué très rapidement une série de 10 mesures de la vitesse de cet hélicoptère. On obtient les résultats suivants :

| | | | | | | | | | | |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Mesure n° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| v (km/h) | 233 | 237 | 232 | 234 | 236 | 230 | 240 | 236 | 232 | 231 |

3.5.1. Évaluer le résultat de la mesure en faisant apparaître la valeur de l'incertitude avec un niveau de confiance de 95% et présenter le résultat sous la forme :

$$v = \bar{v} \pm u_v$$

v : vitesse du véhicule
 \bar{v} : meilleure estimation de la valeur de la vitesse
 u_v : meilleure estimation de l'incertitude associée à la mesure

3.5.2. Pour le processus considéré, on souhaite disposer d'une incertitude relative inférieure ou égale à 3%. Cette condition est-elle vérifiée pour le résultat précédent ?

EXERCICE N°2 : LE MONDE SELON HUBBLE

Document 1 : Le télescope spatial Hubble

Le télescope spatial Hubble (HST pour Hubble Space Telescope) a été nommé en l'honneur d'Edwin Powell Hubble (1889-1953), l'un des grands pionniers de l'astronomie moderne.

Lancé dans l'espace le 24 Avril 1990 depuis Cap Canaveral et mis sur orbite par la navette spatiale Discovery (STS-31), le HST a été placé sur une orbite circulaire de type LEO (Low Earth Orbit) inclinée à 28,5 degrés à l'équateur. Hubble accomplit ainsi le tour de la Terre en environ 100

minutes (presque 1,5 heure) à 600 km au-dessus de notre planète (soit environ 42 000 km de circonférence). Cette position dans l'espace permet au télescope d'effectuer des observations avec une très haute résolution, en infrarouge ou ultraviolet, sans les contraintes dues à l'atmosphère terrestre.

Le HST a révolutionné l'astronomie moderne ; il est non seulement un outil extraordinaire pour explorer notre univers, mais il est également leader dans la recherche astronomique de précurseurs organiques (acides aminés dans des météorites, comètes, etc.).

L'œil rivé au plus profond de l'espace, le HST a collecté pour les scientifiques une immense quantité de données numériques, apportant par exemple la preuve de l'existence des trous noirs, ou validant la théorie de l'expansion de l'Univers émise en 1929 par Edwin Hubble.

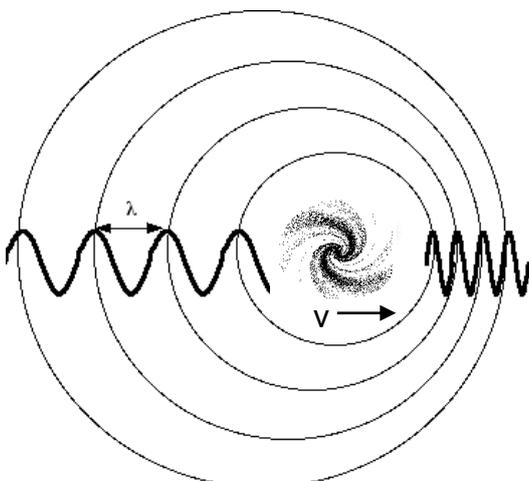


Document 2 : L'effet Doppler

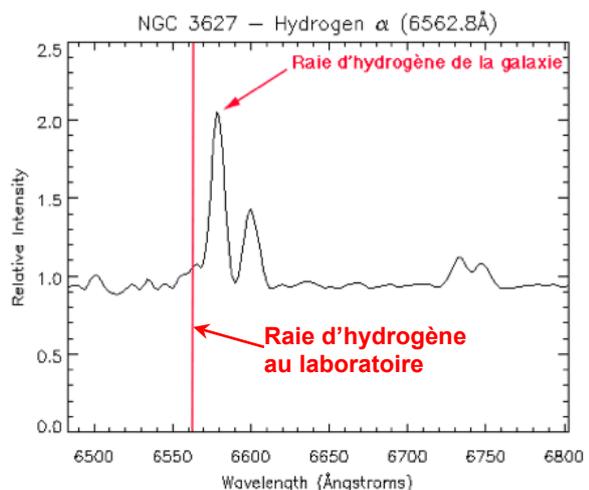
L'effet Doppler (ou Doppler-Fizeau) traduit le décalage de longueur d'onde (ou de fréquence) perçu par un observateur lorsque une onde est reçue en provenance d'un émetteur en mouvement par rapport à la situation où ce même corps est immobile.

Il peut être montré que ce décalage est proportionnel à la vitesse du corps et dépend du sens du mouvement. Si le corps s'éloigne, la longueur d'onde d'une lumière visible émise par ce corps est décalée vers le rouge (la fréquence diminue), s'il se rapproche, elle est décalée vers le bleu (la fréquence augmente).

Schéma général de l'effet Doppler

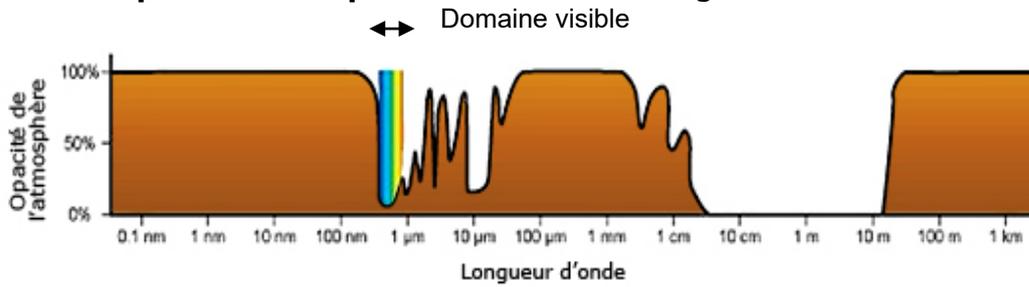


Extrait du spectre d'émission de la galaxie NGC 3627



Wavelength : longueur d'onde 1 Ångström = 0,1 nm

Document 3 : Absorption de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde

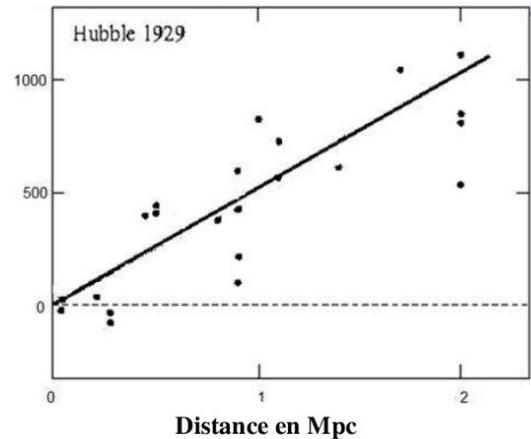


Document 4 : Résultats historiques de Edwin Hubble

Dès 1929, Edwin Hubble a remarqué que la vitesse à laquelle semblaient s'éloigner les galaxies qu'il observait était proportionnelle à leur distance à la Terre. La constante de proportionnalité a ensuite été appelée "constante de Hubble". La figure ci-dessus indique les premiers résultats obtenus par Edwin Hubble en 1929, pour des galaxies très proches (distance inférieure à 2 Mpc*).

* Le mégaparsec noté Mpc est une unité de longueur utilisée couramment en astronomie

Vitesse en km.s^{-1}



Document 5 : La loi de Hubble en 1996 (Vitesse des galaxies en fonction de leur distance à la Terre jusqu'à 500 Mpc).

1. Intérêt du satellite

1.1. Indiquer les limites en longueur d'onde de la partie visible du spectre électromagnétique.

1.2. Justifier précisément l'expression «...en infrarouge ou ultraviolet, sans les contraintes dues à l'atmosphère terrestre. ».

1.3. Citer une source de rayonnement ultraviolet extraterrestre détectable par le HST.

2. Expansion de l'Univers

2.1. L'effet Doppler est observé dans le cas des ondes sonores (par exemple une sirène d'ambulance en mouvement).

Indiquer dans le cas d'une source sonore s'éloignant de l'observateur si le son perçu par celui-ci est plus aigu ou plus grave que le son perçu lorsque la source est immobile. Justifier la réponse.

2.2. La galaxie NGC 3627 s'éloigne-t-elle ou se rapproche-t-elle de la Terre ?

2.3. Commenter la phrase « Edwin Hubble a remarqué que la vitesse à laquelle semblaient s'éloigner les galaxies qu'il observait était proportionnelle à leur distance à la Terre ».

2.4. La constante de proportionnalité dite « constante de Hubble » est notée en général H_0 .

2.4.1. À partir du graphique du document 4, estimer la valeur de H_0 proposée par Edwin Hubble. On précisera l'unité associée à cette valeur.

En réalité des mesures plus récentes réalisées en partie par le télescope Hubble ont permis d'obtenir des mesures plus précises sur des galaxies plus éloignées (voir document 5).

2.4.2. Discuter de la validité de la loi de Hubble et comparer la valeur actuelle de H_0 à celle proposée par Edwin Hubble.

2.5. Expliquer pourquoi l'application de cette loi pour une galaxie située à 10 000 Mpc se heurterait à un principe fondamental de la physique.

