

1 Expérience de Ballot

En 1842, le physicien autrichien Christian Doppler modélise un phénomène caractéristique des ondes émises par des sources en mouvement, et le présente à l'Académie royale des sciences de Bohême. En 1845, le physicien autrichien Christoph Buys-Ballot réalise une expérience pour tester la théorie de Doppler.

→ Comment Ballot a-t-il mis l'effet Doppler en évidence en 1847 ?

Objectifs

Interpréter les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler. Établir et exploiter l'expression du décalage Doppler.

Doc. 1 Abaissement de ton au passage d'un train



Kevin Parrish, *Standard Splendour*, 2008.

On peut observer, à chaque station de chemin de fer, un effet de ce genre extrêmement instructif, au moment du passage d'un train à grande vitesse. Pendant qu'il approche, les ondes émises par le sifflet sont virtuellement ou équivalement raccourcies, parce qu'il en arrive un plus grand nombre à l'oreille, dans un temps donné.

Quand il s'éloigne au contraire, les ondes sonores sont virtuellement ou équivalement rendues plus longues. La conséquence de ce raccourcissement et de cet allongement est que, lorsque le train s'approche, le sifflet rend un son plus aigu, et que lorsqu'il s'éloigne le sifflet rend un son plus grave que lorsque le train est au repos.

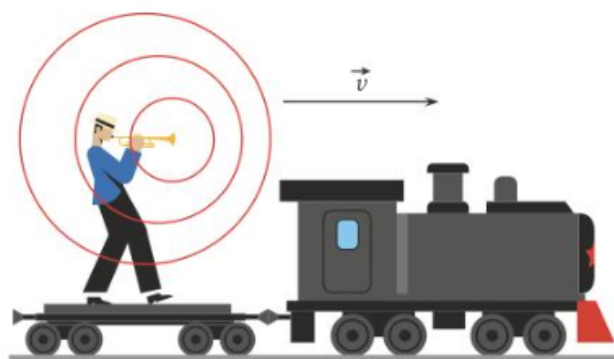
On perçoit donc à chaque passage du train un abaissement de ton. Des expériences de ce genre ont été faites sur les chemins de fer hollandais par M. Buys-Ballot, et plus tard en Angleterre par M. Scott-Russel.

John Tyndall, *Le son : cours expérimental fait à l'Institution Royale*, 1869, p. 83.

Numérique

Retrouvez la vidéo du passage d'un train sur un quai sur [LLS.fr/PCTP466](https://lls.fr/PCTP466)

Doc. 2 Expérience de Buys-Ballot



Le 3 juin 1845, afin de tester les théories de Christian Doppler, Christoph Buys-Ballot place des musiciens sur un train et leur demande de jouer un la_3 .

Il place sur le quai, à intervalles réguliers, des groupes d'autres musiciens capables de distinguer très finement les différences de hauteur de notes. Lorsque le train s'est approché, les musiciens restés à quai ont affirmé avoir entendu un sib_3 , soit une note plus aiguë d'un demi-ton.

Doc. 3 Effet Doppler

Lorsqu'un émetteur d'onde est en mouvement à une vitesse v par rapport à un récepteur fixe, la fréquence f_{rec} reçue par le récepteur diffère de la fréquence f_{em} émise selon les formules suivantes :

- si l'émetteur et le récepteur se rapprochent :

$$f_{\text{rec}} = \frac{f_{\text{em}} \cdot v_{\text{onde}}}{v_{\text{onde}} - v}$$

- si l'émetteur et le récepteur s'éloignent :

$$f_{\text{rec}} = \frac{f_{\text{em}} \cdot v_{\text{onde}}}{v_{\text{onde}} + v}$$

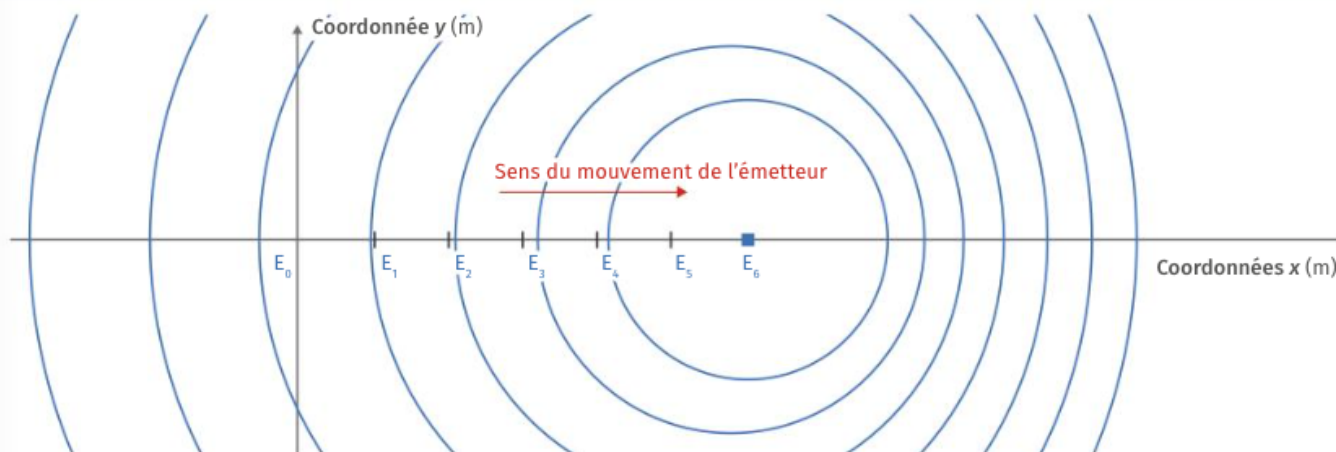
f_{rec} : fréquence reçue par le récepteur (Hz)

f_{em} : fréquence émise par l'émetteur (Hz)

v_{onde} : vitesse de l'onde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

v : vitesse de rapprochement ou d'éloignement entre l'émetteur et le récepteur ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Doc. 4 Source sonore en mouvement



La représentation spatiale d'une onde dont la source est en mouvement montre que les écarts spatiaux entre les fronts d'onde n'ont pas la même valeur si la source s'approche ou s'éloigne du récepteur.

Doc. 5 Fréquences de quelques notes de musique

Note	sol_3	$sol\sharp_3$	la_3	$si\flat_3$	si_3	do_4	$do\sharp_4$
Fréquence (Hz)	392	415	440	466	494	523	554

Données

- Vitesse du son dans l'air : $v_{\text{son}} = 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Doc. 6 Christian Doppler et Christoph Buys-Ballot



Compétences

- ✓ **RAI/ANA** : Construire un raisonnement
- ✓ **VAL** : Analyser des résultats

- Exprimer la longueur d'onde de l'onde reçue λ_{rec} par l'observateur en fonction de f_{rec} et v_{onde} dans le référentiel terrestre.
 - Exprimer les vitesses v_1 et v_2 de l'onde dans le référentiel lié à l'émetteur en fonction de v_{onde} et v , respectivement dans le cas d'un éloignement et d'un rapprochement entre l'émetteur et le récepteur.
 - En déduire une expression des longueurs d'onde λ_1 et λ_2 (respectivement dans le cas d'un éloignement et d'un rapprochement) de l'onde émise dans le référentiel de l'émetteur en fonction de f_{em} , v_{onde} et v .
 - En écrivant l'égalité entre les longueurs d'onde exprimées dans les deux référentiels, retrouver les formules données dans le **doc. 3**.
- Expliquer pourquoi les musiciens restés à quai ont entendu une note plus aiguë que celle jouée sur le train.
- Calculer la vitesse à laquelle ce train se déplaçait.
- En déduire la note entendue par les musiciens à quai lorsque le train s'éloignait.

Synthèse de l'activité

Calculer la vitesse que le train devrait avoir pour que les musiciens entendent un do_4 . Commenter.

1. a. Dans le référentiel terrestre : $\lambda_{rec} = \frac{v_{onde}}{f_{rec}}$ (1)

b. Lors de l'éloignement du train, l'onde et les musiciens s'éloignent rapidement l'un de l'autre à une vitesse $v_1 = v_{onde} + v$ (2)

À l'inverse, lors du rapprochement du train, l'onde et les musiciens s'éloignent moins rapidement l'un de l'autre. L'onde part vers l'avant, et les musiciens continuent d'avancer vers l'avant. L'onde et les musiciens s'éloignent l'un de l'autre à une vitesse $v_2 = v_{onde} - v$ (3)

c. Éloignement : $\lambda_1 = \frac{v_1}{f_{em}} = \frac{v_{onde}+v}{f_{em}}$ (4)

Rapprochement : $\lambda_2 = \frac{v_2}{f_{em}} = \frac{v_{onde}-v}{f_{em}}$ (5)

d. On pose $\lambda_1 = \lambda_{rec}$ pour l'éloignement et $\lambda_2 = \lambda_{rec}$ pour le rapprochement

Ainsi on peut retrouver les expressions du doc 3

Rapprochement : $\frac{v_{onde}-v}{f_{em}} = \frac{v_{onde}}{f_{rec}}$
 $\Leftrightarrow f_{rec} = f_{em} \times \frac{v_{onde}}{v_{onde}-v}$

Éloignement : $\frac{f_{em}}{v_{onde}+v} = \frac{f_{rec}}{v_{onde}}$
 $\Leftrightarrow f_{rec} = f_{em} \times \frac{v_{onde}}{v_{onde}+v}$

2. Les musiciens restés à quai ont entendu une note plus aiguë que celle jouée sur le train car le train se rapprochait donc les fronts d'onde se rapprochent faisant diminuer la longueur d'onde et augmenter la fréquence du son.

3. $f_{rec} = f_{em} \times \frac{v_{onde}}{v_{onde}-v}$

$\Leftrightarrow v = v_{onde} - \frac{v_{onde} \cdot f_{em}}{f_{rec}} = 340 - \frac{340 \times 440}{466} = 19,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Le train voyage à une vitesse de 19 mètres par seconde

4. Lorsque le train s'éloigne : $f_{rec} = \frac{v_{onde} \cdot f_{em}}{v_{onde}+v} = \frac{340 \cdot 440}{340+19,0} = 417 \text{ Hz}$

Lorsque le train s'est éloigné la note perçue était plutôt un sol#3.