Comment la pollution sonore peut-elle devenir génératrice d'électricité ?

Ondes et signaux, modéliser l'action d'un fluide

La pollution sonore est une préoccupation croissante dans les grandes villes, où le bruit des trains à grande vitesse et des autoroutes contribue de manière significative à l'environnement sonore. Les effets néfastes de cette pollution sur la santé humaine sont bien documentés, incluant des risques accrus de maladies cardiovasculaires, de perturbations du sommeil et de stress.

Heureusement, il existe par exemple des mesures de réduction du bruit qui sont installées le long de voies ferroviaires. Ces murs antibruit permettent d'atténuer l'intensité sonore environnante.

Or, il ne faut pas oublier que ce flux sonore important implique un transport d'énergie. On pourrait donc se demander si la pollution sonore des transports d'aujourd'hui pourrait-être convertie en énergie électrique permettant ainsi d'économiser en consommation d'électricité.

En effet, tout son est en réalité une onde mécanique, c'est-à-dire la propagation d'une perturbation de proche en proche sans transport global de matière, mais avec transport d'énergie. Je mets l'emphase sur le dernier terme, car il y aurait alors possibilité de convertir telle énergie en énergie électrique.

Pour cela, on peut tirer profit d'un phénomène qui s'appelle la “Résonance de Helmholtz”.

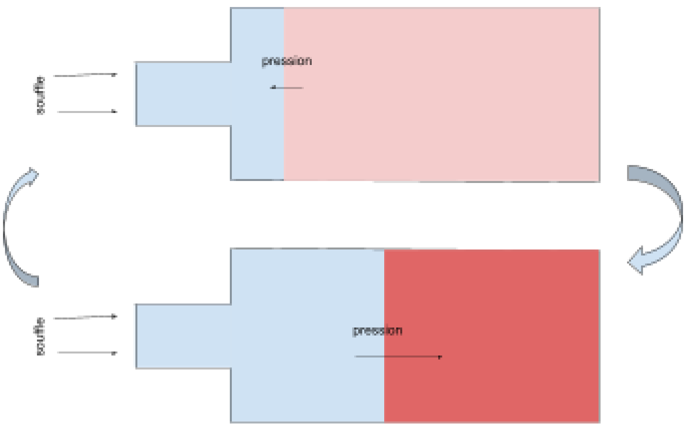
Ce phénomène est souvent observable en vraie vie. L'exemple le plus courant est de souffler dans une bouteille. En soufflant dans la cavité sous un angle spécifique, un son peut se produire, qui varie en fonction de la bouteille. Une grosse bouteille produirait une fréquence basse donc un son grave, alors qu'une petite bouteille produirait une fréquence haute donc un son aigu.

C'est en 1862 que Hermann von Helmholtz décrit dans son livre les étapes nécessaires afin de créer un résonateur de Helmholtz.

Il faut forcément une cavité fermée de volume V, qui communique avec l'extérieur par l'intermédiaire d'un petit tube de longueur L et de section A, que l'on appelle le col du résonateur.

Description suivie par les bouteilles qu'on retrouve dans notre quotidien.

Mais alors, pourquoi un son est-il produit quand on souffle dans un résonateur ?



À chaque souffle, la pression à l'intérieur de la bouteille s'élève, puis, par réaction, doit diminuer, causant une compression trop basse, ce qui par réaction surélève encore une fois la pression vers l'arrière. Ceci se répète jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'énergie et que les pressions se compensent. Une belle analogie de ce concept est un ressort qui est tendu, puis qui se détend plus que son état initial et qui va donc se retendre à nouveau.

C'est ce cycle d'air qui entre et qui sort à une fréquence constante, que Helmholtz modélise par une formule. En effet, ce changement de pression est semblable à une onde mécanique qui traverse la bouteille : d'où le son qui en ressort. On obtient donc la fréquence sonore en utilisant les dimensions de la bouteille :

$$f = \frac{v}{2\pi}\sqrt{\frac{A}{V \times L}}$$

f: fréquence, v: vitesse du son (dans l'air), A: section, V: volume, L: longueur du col

On en déduit donc que chaque forme de bouteille a sa propre fréquence de résonance, que l'on nomme sa fréquence naturelle.

Pour trouver cette fréquence, on peut par exemple s'enregistrer en soufflant dans la bouteille et avec un logiciel relever la fréquence du son.

Or, notre but est d'atténuer les basses fréquences dont les trains et transports sont à l'origine, allant de 20Hz à 500Hz.

De plus, on souhaite tirer profit de la résonance de notre résonateur qui sert de module antibruit pour la convertir en électricité.
Si l'on plaçait un mur de nos résonateurs de Helmholtz à côté d'une ligne ferroviaire par exemple, ils pourraient absorber le son, car leur dimension serait adaptée à la fréquence émise par les trains qui passent.
On va donc se concentrer sur un résonateur individuel.

Pour en faire de l'électricité, on utilise le fait qu'un résonateur relâche un peu de vent à travers le col lorsqu'il y a résonance[1]. Ce vent serait utilisé pour actionner une turbine à éolienne et convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

Pour commencer, on peut trouver les dimensions idéales de notre résonateur. En transformant l'équation de la fréquence, on peut isoler le volume V sur un côté de l'équation. On obtient alors :

- $V = (\frac{vr}{2f\sqrt{\pi L}})^2$

Il faut cependant choisir quelques valeurs par nous-mêmes comme le rayon et la longueur du col. Ainsi, on fixe le rayon à 3 cm et la longueur 10 cm.
Pour une fréquence très grave de 20 Hz, le volume est de $2,1 \cdot 10^5 cm^3$ alors que pour une fréquence de 500 Hz, le volume est de $3,3 \cdot 10^2 cm^3$. En effet, le volume est inversement proportionnel au carré de la fréquence, c'est-à-dire qu'il est plus petit pour des sons plus aigus.
Pour le reste de nos calculs, on considérera $f = 500Hz.$

Désormais, il faut calculer la vitesse de du changement de pression de l'air.
On considère la cavité comme cylindrique de longueur l=10 cm, section $S_{cavité}$=100 cm^2
$v_{cavité}$ vitesse à l'intérieur de la cavité. On peut supposer que la variation de pression allant de l'arrière de la cavité au devant provoque la formation de vent. La durée de traversée correspond au demi d'une période[2]. On en déduit donc que :
$v_{cavité} = \frac{l}{T/2} = \frac{l}{\frac{1}{f}/2} = 2lf$ avec T la période.
Or, d'après la conservation de débit volumique, on sait que $v_{col}S_{col} = v_{cavité}S_{cavité}$ car le fluide ici, l'air, est en écoulement permanent et sa densité est constante au voisinage de la surface de la Terre.
En obtient donc
$\Leftrightarrow v_{col} = \frac{2lfS_{cavité}}{\pi r^2}$ en remplaçant $v_{cavité}$ avec sa valeur trouvée précédemment.

Désormais on peut déduire la puissance théorique générée par une éolienne, en utilisant une formule commune pour calculer la puissance générée :
$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A_{pales} \times v_{col}$ avec $\rho = 1,23\, kg \cdot m^{-3}$ masse volumique de l'air et $A_{pales} = \pi r_{pales}^2$ pour une valeur fixée du rayon des pales de l'éolienne expérimentale $r_{pales} = 5\, cm$
donnant une puissance finale de 1,71W.
Il faut néanmoins noter que le rendement n'est jamais à 100%. Dans le cas d'une éolienne, il existe la limite de Betz qui indique que la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à $\frac{16}{27}$ de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne, donc on obtient une valeur finale de puissance théorique de 1,0 W.
Si une fréquence de 500Hz était émise continuellement, on aurait une énergie de 1,0 Wh en sachant que $E_{théorique} = P_{théorique} \times \Delta t.$
En matière de comparaison, un lampadaire public a une consommation de 116,8 kWh.

Pour conclure, il y a encore beaucoup d'opportunités d'optimisation. Fondamentalement, au lieu d'utiliser une éolienne, on pourrait placer un film sensible aux vibrations dans la cavité[3], dont le mouvement serait converti en énergie électrique, augmentant le rendement.
Il faut aussi noter que ces valeurs théoriques sont probablement fort au-dessus de la valeur qui serait générée en vraie vie, car beaucoup de facteurs dérangeant l'expérience ont été omis.

---

[1] Question: pourquoi y a-t-il un relâchement de vent ?
[2] Question: pourquoi le demi de la période ?
[3] Question: élaborer le dispositif proposé

CALCULS

$f = \frac{v}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi r^2}{V\times L}}$

On fixe $r = 3cm$ rayon du col, $L = 10\ cm$ longueur du col

$f = \frac{v}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi r^2}{VL}}$ pour $v = 340\ m\cdot s^{-1}$; $f = [20;\ 500]\ Hz$ intervalle des sons graves

$\Leftrightarrow \frac{2\pi f}{v} = \sqrt{\frac{\pi r^2}{VL}} \quad \Leftrightarrow (\frac{2\pi f}{v})^2 = \frac{\pi r^2}{VL} \quad \Leftrightarrow V = \frac{v^2\pi r^2}{4\pi^2 f^2 L} \quad \Leftrightarrow V = (\frac{vr}{2f\sqrt{\pi L}})^2$

$\Leftrightarrow V = (\frac{vr}{2\sqrt{\pi L}})^2 \times \frac{1}{f^2}$

$V_{grave} = (\frac{340\times 3\cdot 10^{-2}}{2\times 20\times\sqrt{\pi\times 10\cdot 10^{-2}}})^2 = 0,21m^3 = 2,1\cdot 10^5 cm^3$ pour $f = 20Hz$

$V_{aigu} = (\frac{340\times 3\cdot 10^{-2}}{2\times 500\times\sqrt{\pi\times 10\cdot 10^{-2}}})^2 = 3,3\cdot 10^{-4} m^3 = 3,3\cdot 10^2 cm^3$ pour $f = 500Hz$

On considère la cavité comme cylindrique de longueur $l = 10\ cm$, section $S_{cavité} = 100\ cm^2$

$v_{cavité} = \frac{l}{T/2} = \frac{l}{\frac{1}{f}/2} = 2lf$ avec T la période.

$v_{col}S_{col} = v_{cavité}S_{cavité}$

$\Leftrightarrow v_{col} = \frac{v_{cavité}S_{cavité}}{S_{col}}$ et $S_{col} = \pi r^2$ donc:

$\Leftrightarrow v_{col} = \frac{2lfS_{cavité}}{\pi r^2}$

$P = \frac{1}{2}\times\rho\times A_{pales}\times v_{col}$ avec $\rho = 1,23\ kg\cdot m^{-3}$ masse volumique de l'air et $A_{pales} = \pi r_{pales}^2$ pour une valeur fixée de $r_{pales} = 5\ cm$

$\Leftrightarrow P = \frac{1}{2}\times\rho\times\pi r_{pales}^2\times\frac{2lfS_{cavité}}{\pi r^2}$

$\Leftrightarrow P = \frac{\rho r_{pales}^2 lfS_{cavité}}{r^2}$

$P = \frac{1{,}23\times(5\cdot 10^{-2})^2\times 10\cdot 10^{-2}\times 500\times 100\cdot 10^{-4}}{(3\cdot 10^{-2})^2} = 1,71W$

$P_{théorique} = \frac{16}{27}P = 1,0W$

$E_{théorique} = P_{théorique}\times\Delta t = 1,0\times 1 = 1,0\ Wh$

Q°1 : "pourquoi y a-t-il un relâchement de vent ?"

La forme du col, qui est toujours plus petit que la cavité de la bouteille, en plus de la résonance, forcent la formation de vent à cause de mouvements spécifiques de l'air.

Explication (que je n'ai pas compris) :

Moving Things With Sound—Helmholtz Resonance Propulsion

Q°2 : "pourquoi le demi de la période ?"

…C'est la partie la plus délicate et approximative du sujet. On ne peut absolument pas admettre que la vitesse du vent correspond au changement de pression mais c'est le seul moyen que j'ai trouvé pour pouvoir trouver des chiffres de puissance. Voici comme je l'aurais expliqué s'il le fallait :

Mieux comprendre : Why Blowing in Bottles Makes Sound and Helmholtz Resonance

<u>Q°2 :</u> "élaborer le dispositif proposé"

Un article scientifique a proposé de placer un matériau piézoélectrique *(le PVDF = Polyfluorure de vinylidène)*, c'est-à-dire un matériau qui génère un potentiel ou une tension électrique lorsqu'on lui applique une force mécanique, à l'intérieur de la cavité. Lorsqu'il y a résonance, le matériau vibre, et ses vibrations peuvent alors être converties en électricité.

Source : A renewable low-frequency acoustic energy harvesting noise barrier for high-speed railways using a Helmholtz resonator and a PVDF film - ScienceDirect