

Fréquence d'un moteur pop-pop

Par Jean-Yves

Selon quelques-unes de mes expériences il m'est apparu que le fonctionnement était beaucoup plus facile, plus stable, plus long...avec une grande canalisation. Mais ce n'est pas le côté le plus intéressant. Une longue canalisation peut conduire à différentes fréquences et poussées.

L'expérience et le calcul montrent que la poussée augmente avec le produit Fréquence x Cylindrée. Dans ce qui suit nous allons examiner comment maîtriser la fréquence.

Je pense que le moteur pop-pop est un oscillateur entretenu régi par l'équation de Van der Pol. La puissance de chauffe ne sert qu'à stimuler cet oscillateur. Malheureusement, nous ne connaissons pas la valeur numérique des paramètres qui permettraient d'étudier le modèle de Van der Pol. Alors, partons du plus simple des oscillateurs : une masse et un ressort. Dans un moteur pop-pop il y a un ressort qui est le gaz (vapeur d'eau et autres gaz) contenu dans l'évaporateur. Et il y a une masse qui est celle du serpent d'eau qui oscille dans la canalisation. Le volume de gaz et la masse du serpent d'eau varient tout le temps. Cependant, pour chacun d'eux en régime "établi" il y a une valeur moyenne qui devrait nous donner une estimation du résultat.

Soit V le volume moyen de gaz, M la masse moyenne du serpent d'eau, S la section de la canalisation, et T la température du gaz (en °K). La fréquence de résonance de l'oscillateur

ainsi constitué est approximativement : $F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{nRTS^2}{MV^2}}$ (Sera justifié plus loin).

Quand le volume de gaz augmente (que la raison soit une augmentation de la puissance de chauffe ou autre) la masse d'eau diminue car l'interface eau/gaz descend dans la canalisation. Quand l'interface est plus basse, d'une part le ressort est plus souple et d'autre part la masse est plus faible. Lequel de ces deux facteurs est prédominant dépend de la conception du moteur. Si l'évaporateur a un volume relativement important, la fréquence et la course sont plus importantes. Ce dernier point est clairement visible sur la vidéo du moteur en verre de Loïc (www.eclecticspace.net, celui fait avec un tube à essais et une pipette).

En première approximation on peut dire que n évolue comme V car $PV=nRT$ et on travaille au voisinage de la pression atmosphérique et à environ 373°K (100°C). On peut donc

simplifier et écrire que $F = \frac{k}{\sqrt{MV}}$ avec $k = \frac{S}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{R}}$ qui est une constante pour un moteur

donné. Continuons avec le moteur en pyrex de Loïc. V varie assez peu car le ballon est grand vis-à-vis de la canalisation tandis que M est divisée approximativement par deux quand l'interface est au milieu de la canalisation au lieu d'être en haut. Le rapport entre les fréquences de ces deux extrêmes devrait être la racine carrée de 2. Maintenant examinons mon papier intitulé *Gas in a pop-pop engine*. Le résultat étant à peu près celui-là, cela incite à poursuivre le raisonnement.

Si on utilise des grosses canalisations et un évaporateur à faible volume le résultat pourra être différent. Peut-être un rapport de 2 ou 3, mais je ne peux pas imaginer qu'il puisse être très élevé car l'observation de moteurs transparents montre que le moteur n'oscille correctement qu'au delà d'un certain volume de gaz.

A partir de l'hypothèse que le moteur pop-pop est avant tout régi par la résonance du système masse-ressort je me suis livré à quelques calculs pour les moteurs sans membrane.

Pour le calcul de la fréquence de démarrage j'ai pris pour hypothèse simplificatrice que toute l'eau de l'évaporateur était transformée en vapeur. C'est ce qu'on observe grosso modo avec les moteurs qui le permettent. L'amplitude est faible et l'interface reste au ras de l'évaporateur.

Pour la fréquence à plein régime j'ai pris pour hypothèse simplificatrice que l'interface oscillait autour d'une position moyenne située au milieu de la canalisation.

Le but n'est pas de donner plusieurs chiffres significatifs. C'est seulement, sans autre prétention, d'estimer l'ordre de grandeur.

Notations :

V=volume de l'évaporateur

d=diamètre de canalisation

S=aire du piston liquide (section de la canalisation)

L=longueur de canalisation

n=nombre de canalisations

ρ =masse volumique de l'eau (La température moyenne étant faible on a pris $\rho=1000\text{kg/m}^3$)

x=position de l'interface dans la canalisation

P=pression dans l'évaporateur

La loi d'Avogadro ($P.V=n.R.T$) nous conduit à écrire $dP = \frac{P}{V} dV$; or, $dV=Sdx$ et $dF=SdP$.

d'où la raideur : $k = \frac{dF}{dx} = \frac{P.S^2}{V}$ et la fréquence $F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P.S^2}{M.V}}$ avec les unités légales (F en Hz, P en Pa, M en kg et V en m^3).

Ceci permet le calcul de :

$$\text{Fréquence de démarrage } F_1 = \frac{10d}{4} \sqrt{\frac{1}{\pi.V.L.n}}$$

$$\text{Fréquence à plein régime } F_2 = \frac{10d}{4} \sqrt{\frac{n}{\pi \frac{L}{2} (V + \pi \frac{d^2 L.n}{8})}}$$

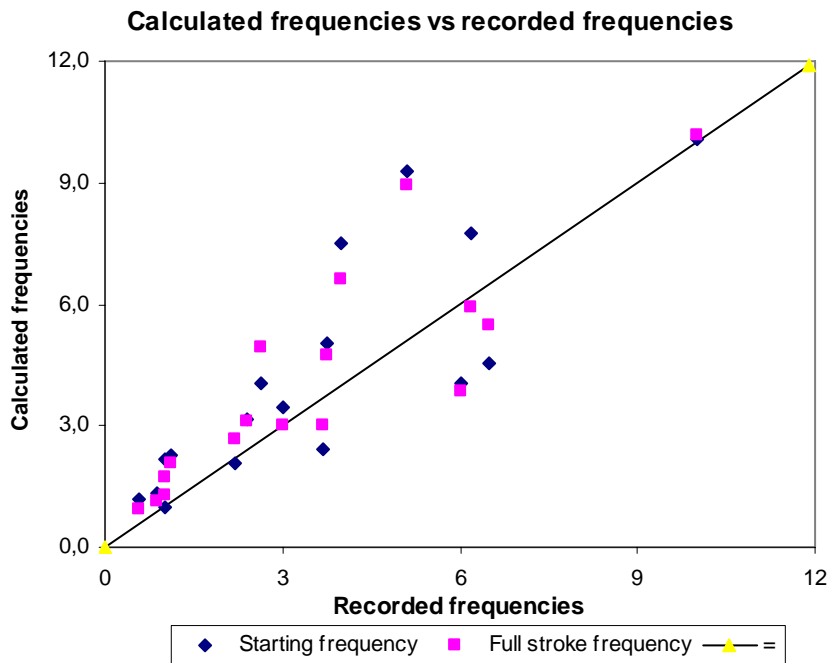
Calculons ce que cela donne et comparons avec des mesures faites sur quelques-uns nos moteurs (prises au hasard) :

V (cm^3)	24,6	3,4	4,2	2	3,2	24,6	13,1	252	30,8	18,1	2,84
L (mm)	500	375	500	450	260	500	330	1060	820	840	220
n	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
D (mm)	5,2	6	5,2	5,2	6	6	6	11,1	12,1	9,5	4
F1 (Hz)	2,1	7,5	5,1	7,7	9,3	2,4	4,1	1,0	3,4	3,4	10,1
F2 (Hz)	2,7	6,6	4,8	5,9	9,0	3,0	4,9	1,2	3,0	3,0	10,2
F (Hz)	2,2	4	3,75	6,2	5,1	3,67	2,65	1	2,4	3,0	10

F1 et F2 sont les fréquences théoriques calculées. F est la fréquence mesurée.

Tous ces moteurs sans exception (et ils n'ont pas été choisis spécialement faire le tableau) ont une fréquence de fonctionnement qui est bien du même ordre de grandeur que la fréquence calculée. Aucune n'atteint la moitié ou le double.

On peut faire une représentation graphique en utilisant les chiffres du tableau et ceux de quelques autres moteurs.



Sur le graphe ci-contre on peut vérifier que les ordres de grandeur sont bien respectés.

On peut aussi observer que la fréquence pratique est dans l'ensemble un peu inférieure à celle que donne le calcul.

Les moteurs analysés ne sont pas assez nombreux et les mesures pas assez précises pour qu'on fasse parler davantage les chiffres.

Conclusion :

- En fonction des caractéristiques géométriques d'un moteur pop-pop on peut prédire l'ordre de grandeur de sa fréquence de fonctionnement.
- La fréquence est *grosso modo* proportionnelle au diamètre de la canalisation et inversement proportionnelle à la racine carrée du volume de l'évaporateur ainsi qu'à celle de la longueur de la canalisation.
- Comme en pratique sur les moteurs performants l'évaporateur a un petit volume et le rapport longueur/diamètre évolue très peu avec la taille des moteurs, lorsque le fonctionnement est optimal **la fréquence est approximativement inversement proportionnelle au diamètre** du ou des tuyaux.

$$F \approx \frac{25}{d} \text{ avec } F \text{ en Hz et } d \text{ en mm.}$$

Merci à ceux qui connaissent les caractéristiques (V, n, d, L et F) d'autres moteurs de me les communiquer pour conforter ou corriger ce document. Adresse email : [boite.de.j-y\(at\)wanadoo.fr](mailto:boite.de.j-y(at)wanadoo.fr) en remplaçant (at) par @.

Nota : ce document ne s'applique pas aux moteurs à membranes. Les moteurs de ce type marchent à des fréquences plus basses ou beaucoup plus basses que les mêmes moteurs munis de parois rigides à la place des membranes.