

## Le moteur pop-pop idéal ?

Le moteur pop-pop idéal (théorique) a un évaporateur de volume minimum et le piston liquide a une course maximum ; c'est-à-dire qu'au point mort haut le volume de gaz est nul et qu'au point mort bas il occupe toute la tuyauterie. En d'autres termes, et avec les notations suivantes :

S=section de la canalisation.

L=longueur de la canalisation.

$\rho$ =masse volumique de l'eau.

- le volume moyen de gaz est égal à la moitié du volume de la tuyauterie.  $V=1/2 SL$
- La masse moyenne d'eau en mouvement est  $M=1/2 \rho SL$

Sachant que la pression moyenne qui règne dans l'évaporateur est voisine de la pression atmosphérique, et que l'eau en mouvement est globalement à une température à peine supérieure à celle du réservoir, on prendra pour les calculs  $P=10^5 \text{Pa}$  et  $\rho=1000 \text{kg/m}^3$ . En utilisant les unités légales (L en m et S en  $\text{m}^2$ ) et en considérant que la fréquence propre du moteur est celle d'un résonateur classique on obtient :

La fréquence (Hz)  $F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P \cdot S^2}{MV}} = \frac{10}{\pi L}$  qui ne dépendrait donc que de la longueur.

La poussée maxi (N)  $T = \frac{\rho \pi^2}{4S} (SLF)^2 = \frac{10^5}{4} S$  qui ne dépendrait donc que de la section.

Rappel : ceci ne concerne que le moteur « idéal » c'est-à-dire sans ballon de vapeur.

Comparons la théorie avec les résultats de quelques uns de nos meilleurs moteurs.

Diamètre intérieur (mm)	Fréquence max théorique (Hz)	Fréquence mesurée (Hz)
4 (L=300)	10,6	8
6 (L=480)	6,6	5
8,2 (L=580)	5,5	3
12 (L=745)	4,3	2,4

L'ordre de grandeur est là, mais les fréquences mesurées sont toutes inférieures au maxi théorique. Cela se justifie (entre autres ?) par le fait que l'évaporateur n'a pas un volume négligeable. Même au point mort haut il reste du gaz. On a pu l'observer à maintes occasions sur des moteurs transparents.

Pour la poussée, le résultat est beaucoup plus décevant.

Diamètre intérieur (mm)	Poussée max théorique (mN)	Poussée mesurée (mN)
4	314	17
6	707	44
8,2	1320	48
12	2827	72

D'autant plus décevant que la balance de poussée utilisée majore un peu la réalité comme on a pu le vérifier (voir « Pourquoi mesure-t-on plus que la théorie ? »).

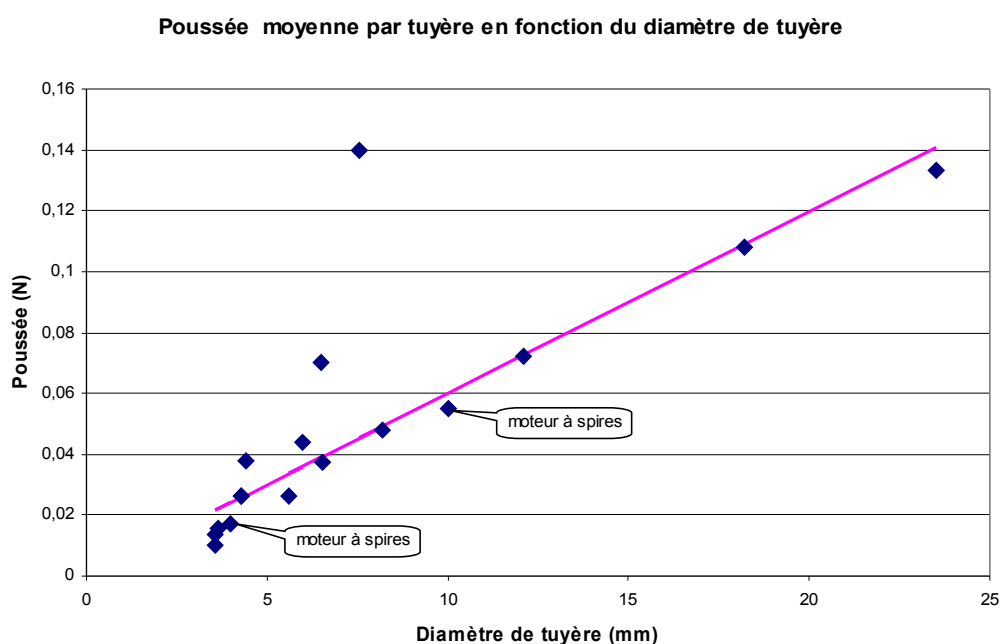
Causes d'erreur :

- Course réelle inférieure à L.  
D'après observations visuelles peut expliquer un rapport de l'ordre de 2 pour un petit moteur. On ne sait pas pour un gros moteur.
- Fréquence réelle inférieure à la théorie.  
Intervient au carré. Peut expliquer un rapport 3. Combinée à l'erreur précédente, ( $2 \times 3 = 6$ ) on est encore loin du compte pour un petit moteur.
- Hypothèses simplificatrices trop osées.
- Autres ??? (émulsion, masse volumique inférieure à  $1000 \text{ kg/m}^3$ ...)

Le moteur idéal n'existe donc pas.

Pour ce qui est de la fréquence, on peut obtenir volontairement un résultat inférieur en munissant le moteur d'un gros évaporateur, mais on ne peut pas augmenter la fréquence au-delà de la valeur théorique calculée selon la formule précédente.

Pour ce qui est de la poussée, plus la section de la canalisation est grande et plus le moteur est performant. On peut voir l'évolution sur le graphe suivant.



Nota : La poussée moyenne considérée est la moyenne mesurée pendant 15 minutes consécutives. Des poussées instantanées jusqu'à 30 fois supérieures ont été mesurées, mais elles sont rares et n'influencent pas la moyenne car généralement suivies de poussées quasiment nulles pendant plusieurs secondes.

Ce graphe met en évidence une quasi-linéarité entre le diamètre (en abscisse) et la poussée (en ordonnée), et non entre section et poussée comme je l'espérais. Dommage !

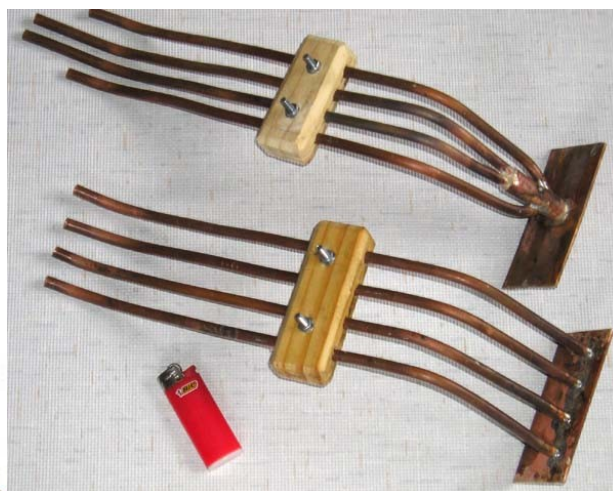
Donc deux canalisations de section S sont plus performantes qu'une seule canalisation de section 2S. Même si cette constatation me déçoit, elle me semble évidente dans l'état actuel des choses. Le bateau pop-pop birman avec 3 canalisations ou celui de Daryl avec 4 canalisations se sont révélés des pistes intéressantes à poursuivre. Depuis, j'ai construit des moteurs avec jusqu'à 8 tuyaux, et Daryl est allé jusqu'à 10.

La théorie du résonateur ne me semble pas très en cause. Le problème principal est au niveau de la thermodynamique. Comment exciter le résonateur à grande échelle et obtenir une grande course ? La difficulté provient du fait que tout n'évolue pas comme l'échelle. Par exemple, d'un côté la masse augmente comme le cube de l'échelle tandis que la surface de vaporisation n'augmente que comme le carré. De l'autre côté, le refroidissement est assuré principalement par le tuyau et par le dépôt d'une mince pellicule d'eau pendant la descente du serpent liquide. Il y a du travail à faire au niveau de l'évaporateur.



Sur un moteur à canalisation unique j'ai essayé un évaporateur muni de tuyaux à l'intérieur pour augmenter la surface de la source chaude. Rien de positif ou négatif à signaler.

Ensuite j'ai essayé de comparer deux moteurs ayant chacun 4 canalisations, l'un avec manifold et l'autre avec raccordements individuels sur l'évaporateur. Pas de différence visible quant à la poussée.



Depuis, on travaille à des conceptions différentes.

Daryl qui fait les moteurs les plus performants que je connaisse a mis en évidence le fait que certains matériaux sont meilleurs que d'autres. Ses meilleurs moteurs ont un évaporateur en cuivre relié à des tubes en laiton prolongés par des tubes en aluminium. L'acier inoxydable semble aussi intéressant. Et l'épaisseur de tubes joue aussi un rôle. Il y a tellement de matériaux et de paramètres qu'il n'est pas facile de faire une analyse comparative sérieuse.

D'une part, le refroidissement du tube d'un moteur pop-pop par l'air ambiant n'a pas beaucoup d'importance. Nous l'avons prouvé en faisant fonctionner un moteur dont le tube était isolé. D'autre part, puisque des moteurs pop-pop dont le tube est fin et mauvais conducteur de la chaleur fonctionnent, ce qui condense/refroidit le gaz c'est essentiellement la couche d'eau qui se dépose lors de la descente de la colonne. La capacité de condensation/réfrigération dépend donc de 3 paramètres :

- 1°) L'épaisseur de la couche d'eau qui adhère à la paroi.
- 2°) La température de l'eau qui s'y dépose.
- 3°) La surface interne de la paroi qui sert de condenseur/réfrigérant.

L'influence de l'adhérence de la couche d'eau a été démontrée par Guus avec ses moteurs en verre. Le même moteur selon qu'il ait été traité ou non avec de l'acide phosphorique donnait des performances très différentes. Il serait intéressant pour faire un

revêtement de l'intérieur du tube de trouver un matériau poreux ou à effet capillaire capable de retenir une couche d'eau optimale.

En fonctionnement le haut de la colonne d'eau semble être toujours voisin de 60-70°C d'après toutes les mesures que nous avons pu faire. Et ce, quelle que soit la température de l'eau du bac. Il suffit de le savoir et de créer l'épaisseur de la couche d'eau en conséquence.

Pour une même section de canalisation(s) la surface interne de la paroi qui sert de condenseur/réfrigérant s'augmente facilement en diminuant le diamètre des tubes et en augmentant leur nombre. Des essais concluants ont également été faits avec des tubes de section carrée. Des essais moins concluants ont été faits à l'aide de tubes plus ou moins aplatis. Mais le manque de rigueur ne permet pas de faire des essais comparatifs (car matériaux différents, épaisseurs différentes, sections différentes...). On peut comprendre que pour un même volume et une même longueur les tubes carrés ont à la fois une surface interne plus grande et retiennent plus facilement de l'eau dans les angles. Si c'est bien le cas on doit pouvoir faire encore mieux avec une section en étoile avec 5, 6, voire davantage de branches.

A suivre...