

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.

ρ =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 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.

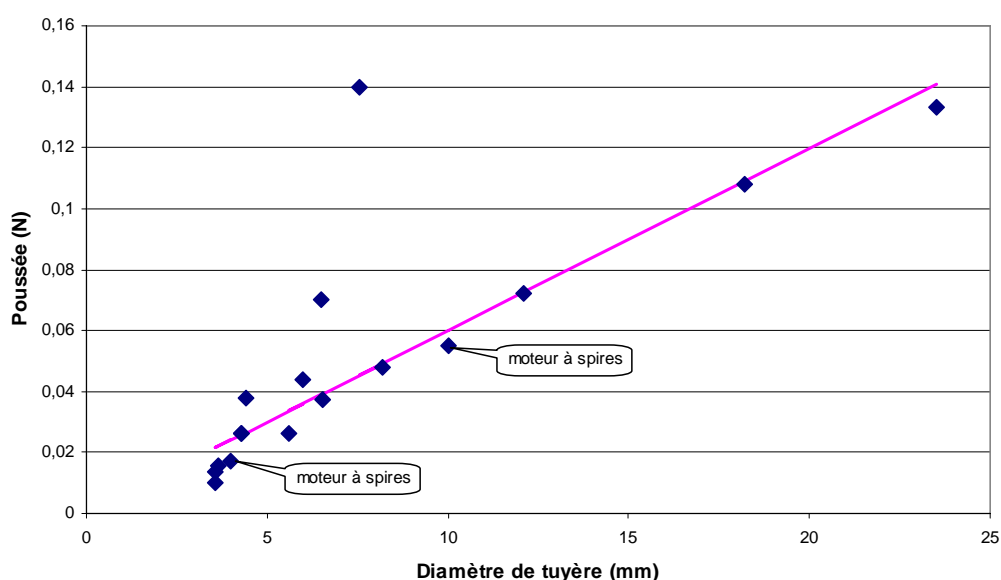
- Hypothèses simplificatrices trop osées.
- Autres ??? (émulsion, masse volumique inférieure à 1000 kg/m^3 ...)

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.

Poussée moyenne par tuyère en fonction du diamètre de tuyère



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 !

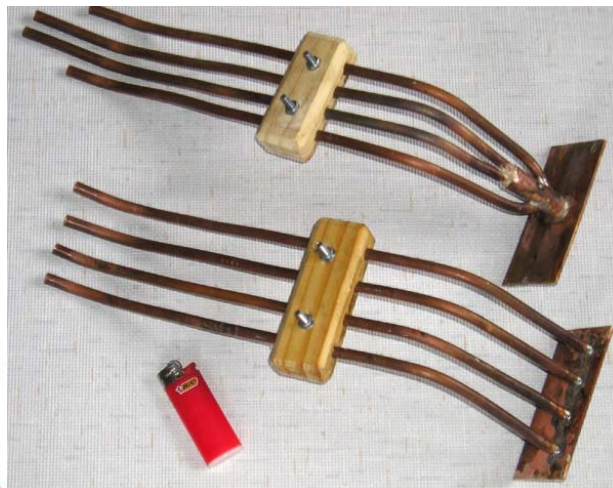
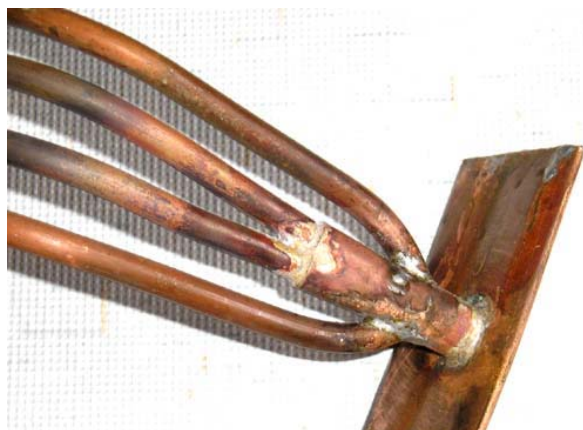
Donc deux canalisations de section S sont plus performantes qu'une seule canalisation de section 2S. Même si cette constatation me déçoit, elle me semble évidente dans l'état actuel des choses. Le bateau pop-pop birman avec 3 canalisations ou celui de Daryl avec 4 canalisations se sont révélés des pistes 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 raccords individuels sur l'évaporateur. Pas de différence visible quant à la poussée.



Depuis, on travaille à des conceptions différentes.

A suivre...

Forme optimale d'un moteur pop-pop ?

(Moteur pop-pop rigide. Par opposition au moteur à membrane)

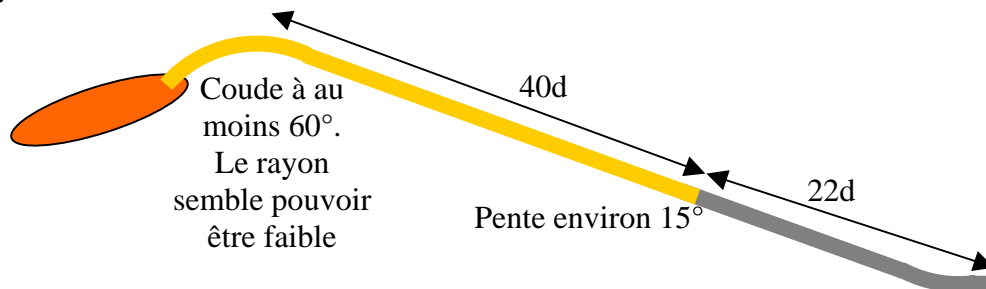
Critères à satisfaire si possible : Certains de ces critères sont susceptibles d'évoluer en fonction des progrès de la connaissance des moteurs pop-pop.

- (1) Evaporateur capable d'emmagasiner de la chaleur (puissance constante).
- (2) Evaporateur capable de restituer de façon intermittente (presque instantanément) beaucoup de chaleur.
- (3) Tuyère (même si physiquement elle est du même diamètre que la canalisation) horizontale pour que la poussée le soit.
- (4) Grande longueur de canalisation en pente descendante (vers la tuyère) pour contenir le « serpent d'eau » et limiter les pertes de gaz.
- (5) Accidents de parcours générateurs de perte de charge à éviter le plus possible dans la partie contenant de l'eau sous forme liquide.
- (6) Limiter les pertes d'énergie par conduction de la canalisation entre source chaude et source froide.
- (7) Limiter le volume de l'évaporateur (car la poussée en dépend inversement)
- (8) Sortie de l'évaporateur vers le haut. En réalité c'est pour faciliter la descente des gouttes d'eau vers l'évaporateur.
- (9) Longueur totale de la canalisation après son point le plus haut égale à environ 62 fois son diamètre.
- (10) Distance entre source froide et source chaude voisine de 40 fois le diamètre.

Application pratique :

- (1) (2) et (7) → Evaporateur en cuivre de grande surface et faible volume.
- (5) → Grand rayon de courbure entre tuyère et canalisation
- (6) → Partie supérieure de la canalisation de faible épaisseur en inox, acier, éventuellement laiton, mais éviter l'aluminium et surtout le cuivre.
- (10) → Partie inférieure de la canalisation en cuivre ou aluminium...ou matériau moins bon conducteur que cela (par exemple identique à celui de la partie supérieure) si cette portion inférieure est immergée.

Dessin :



Le reste est à l'initiative de chacun selon son feeling. Exemple (critiquable) :

