

# Rendement d'un moteur pop-pop

Par Jean-Yves

Notre première estimation fut faite début 2005 avec un petit bateau indien. Les premières lignes qui suivent sont une recopie des écrits de l'époque.

## Petit bateau indien :



Le bateau allant à la vitesse  $V$ , de par le système de propulsion la vitesse de sortie de l'hydrojet est au moins une fois par cycle supérieure à  $V$ .  $v_{\max} > V$

Supposons le débit parfaitement sinusoïdal. Tout point du serpent liquide se déplace de  $d = a \sin \omega t = a \sin 2\pi Ft$   $F$  étant la fréquence du cycle. En dérivant cette équation on obtient la vitesse de déplacement de l'eau dans la canalisation.  $v = 2\pi Fa \cos 2\pi Ft$

$v_{\max} = 2\pi Fa > V$ . Avec  $F = 8\text{Hz}$  et  $V = 0,15\text{m/s}$  on obtient  $a > 3,2 \cdot 10^{-3}\text{m}$   $a > 3,2\text{mm}$

$a$  étant la demi-amplitude du déplacement, la course totale est supérieure à 6,4mm.

Ces trois dernières valeurs permettent de calculer le rendement global qui est la puissance mécanique restituée (égale au produit de la force de traction par la vitesse) divisée par la puissance fournie qui est celle de la bougie :  $r = \frac{T \times V}{F}$  Pour cette application

$r = \frac{0,002 \times 0,15}{28} = 0,0011\%$ . C'est lamentable ! Les mesures n'étant pas des mesures de

laboratoire, l'incertitude relative sur certaines d'entre elles est grande ; mais il n'y en a que trois. En supposant qu'on ait été très mauvais ou très malchanceux et qu'on se soit trompé partout dans le même sens, et du simple au double (c'est tout de même énorme), le rendement deviendrait 0,0088%. En ajoutant le fait que lors des essais "d'endurance" la flamme de la bougie n'était pas maximale, et en admettant au pire une puissance presque 10 fois moindre, on arrive au mieux à un rendement de 0,088%. A comparer aux 35% d'une propulsion classique (50% pour le moteur et 70% pour l'hélice). Cela reste très très médiocre et justifie qu'il n'y a jamais eu de débouchés industriels du moteur pop-pop.

## Comparaison avec une propulsion mécanique (ressort+hélice) sur des jouets de même taille :

1°) Ressort. Pour le bander il faut faire une dizaine de tours de clé avec un couple de 200mNm (0,2Nm). Travail correspondant:  $0,2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10 = 12,6\text{Joules}$ . C'est ridiculement petit. Ce moyen propulse le bateau pendant environ 12,6 secondes (pour simplifier). La puissance fournie est donc de 1W. Avec le rendement mécanique et le rendement d'hélice la puissance restituée est encore plus petite. Disons 0,5W.

2°) Bougie. Aussi surprenant que cela puisse paraître, la puissance et l'énergie d'une bougie sont relativement importantes. Une petite bougie de gâteau d'anniversaire (masse: 1 gramme) dégage environ 35W en chaleur et se consume en 10 minutes. Energie correspondante: 21kJ. Avec deux grammes en 5 minutes (chiffres du professeur Le Bot), cela fait 42kJ et 140W.

3°) Rendements. Le rendement d'un jouet mécanique est probablement environ 10 fois moins bon que celui d'un grand navire ; soit 3,5%. Le professeur Le Bot a mesuré des

poussées du même ordre avec une propulsion mécanique ( $1W\ 3,10^{-2}N$ ) et une propulsion pop-pop ( $140W\ 1,8.10^{-2}N$ ). On trouve un rapport de 233 en faveur de la propulsion mécanique. En divisant 3,5% par 233 on obtient 0,015% et on peut vérifier que c'est inférieur au 0,088% calculé précédemment par excès. Cela conforte nos mesures et calculs.

### Expériences ultérieures :

Des expériences spécifiques menées en 2006 avec une source chauffante électrique ont permis d'affiner la connaissance du rendement et de l'améliorer dans certaines conditions. Un moteur pop-pop peut accepter tout type de chauffage. Le chauffage électrique est réservé aux bancs d'essais. Il permet de bien connaître et maîtriser la puissance consommée.

Il existe tellement de moteurs pop-pop différents (à membrane ou sans, avec une ou deux canalisations, voire trois, et avec des diamètres et des longueurs variables, avec ou sans tuyère...) que nous n'allons pas tout passer en revue. Nous allons examiner le rendement de deux de nos meilleurs moteurs quant à la poussée, l'un à spires et l'autre à membrane.

L'objet de ce document est l'estimation du rendement. Il importe donc de préciser que ce n'est pas nécessairement quand le moteur développe la plus grande poussée que son rendement est le meilleur. Toutefois, dans les exemples examinés, pour un moteur donné le rendement croissait avec la puissance. Nous en donnerons un exemple.

Les chiffres donnés ci-après correspondent à une moyenne lors d'un fonctionnement régulier sur une durée de plusieurs dizaines de secondes. Sur des durées très courtes on a obtenu des valeurs quelquefois bien supérieures (presque le double) mais compte tenu de l'inertie thermique des différents constituants (moteur et dispositif de chauffe) utiliser ces chiffres serait une tricherie.

#### Moteur à membrane :

Constitution : ballon (évaporateur) dont la paroi inférieure en cuivre a une surface interne de  $12,5\text{ cm}^2$  et de volume  $1\text{ cm}^3$ . Canalisation en laiton de diamètre  $8 \times 1$  (diamètre interne 6 mm). Longueur: 330mm. Extrémité légèrement chanfreinée.



Sur la photo on voit sur la gauche le fer à souder dont la panne modifiée est solidaire du ballon de vapeur.

En bas, vers la droite, la canalisation unique.

Pendant les essais le moteur était enveloppé dans un calorifuge pour limiter les déperditions dans l'air.

Ce moteur a développé une poussée de 30mN pour une consommation électrique de 100W. La même poussée a été obtenue avec une tuyère chanfreinée de même diamètre en utilisant un débit continu de  $24,5\text{ cm}^3/\text{s}$  (cf. document "Mesure de poussée au point fixe").

En divisant le débit par la section de la tuyère on obtient la vitesse : 0,87m/s. Et on obtient la puissance en appliquant la formule  $P = \frac{1}{2} \rho Q_v V^2$  qui dans ce cas est 9,2mW. Le rendement

est le quotient de cette puissance par la puissance fournie ; c'est-à-dire qu'on obtient un rendement de l'ordre de 0,1% (compte tenu de quelque dissipation dans l'air).

### Moteur à spires :

Constitution : moteur en cuivre 6x1 (c'est-à-dire diamètre intérieur 4mm) avec 4 spires jointives formées sur un mandrin de diamètre 12mm. Longueur de chaque canalisation: environ 190mm hors spires. Coupe droite.



Comme on peut le voir sur la photo les deux canalisations sont situées de part et d'autre de la partie chaude. Il s'agissait d'un moteur de banc d'essai.

Ce moteur a développé une poussée de  $2 \times 17 \text{ mN}$  pour 50W. Une tuyère de même diamètre développe  $17 \text{ mN}$  pour un débit continu de  $14 \text{ cm}^3/\text{s}$  ; ce qui correspond à une vitesse de  $1,11 \text{ m/s}$  et à une puissance de  $5,7 \text{ mW}$  ; soit (en multipliant par deux car il y a deux tuyères sur ce moteur) un rendement de  $0,023\%$  qu'on arrondira à  $0,03\%$  car c'est seulement l'ordre de grandeur qui nous intéresse.

A titre indicatif, ce même moteur a développé  $2 \times 12 \text{ mN}$  pour 25W. La même tuyère développe  $12 \text{ mN}$  pour un débit continu de  $9 \text{ cm}^3/\text{s}$  ; ce qui correspond à une vitesse de  $0,72 \text{ m/s}$  et à une puissance de  $2,3 \text{ mW}$  ; soit un rendement de l'ordre de  $0,02\%$ .

Ce rendement peut paraître faible par rapport au précédent car au dénominateur la puissance fournie est la moitié de la précédente, mais au numérateur le débit et la vitesse (qui intervient au carré) sont chacun réduit de près d'un tiers.

### Conclusion :

Il se confirme que le rendement des moteurs pop-pop est "lamentable". Pour cette raison il n'y a jamais eu de débouché industriel du moteur pop-pop et il n'y en aura probablement jamais (sans compter les problèmes d'encrassement due à une eau non dépourvue d'impuretés, dont le sel, etc...).

Mais cette conclusion ne retire rien au côté fascinant de ce petit moteur sans pièce en mouvement !!!