

Propulsion d'un bateau par moteur pop-pop



Contribution à la connaissance du fonctionnement du moteur pop-pop

Avertissement : Ce document a été rédigé dans sa version originale en février 2005. Quelques compléments et corrections y ont été apportés mais il n'a pas fait l'objet d'une refonte générale. Voir les documents ultérieurs.

Sommaire

0. Préambule
1. Architecture d'un moteur pop-pop.
2. Description.
3. D'où vient le bruit "pop-pop" ?
4. Petits rappels de mécanique et thermodynamique
 - 4.1. Moteur thermique
 - 4.2. Propriétés physiques de l'eau
 - 4.3. Energie cinétique
 - 4.4. Vapeur surchauffée
5. Comment le moteur pop-pop propulse-t-il le bateau ?
6. Fonctionnement simplifié du moteur pop-pop
7. Facteurs influençant les performances
8. Analyse de l'existant
 - 8.1 Mesures physiques
 - 8.2. Expériences
 - 8.3. Dédutions
 - 8.3.1. Fréquence.
 - 8.3.2. Course du piston liquide.
 - 8.3.3. Rendement
 - 8.3.4. Température de la canalisation
 - 8.3.5. Pressions.
 - 8.3.6. Puissance massique
9. Lois physiques/modèles mathématiques
 - 9.1. Ballon
 - 9.2. Canalisation
 - 9.3. Tuyère
 - 9.4. Bateau
10. Réponse probable (en l'absence de moyens de mesure)
11. Mesures et résultats complémentaires.
12. Fonctionnement détaillé du moteur pop-pop.
13. Pourquoi est-ce que le bateau vibre ?
 - 13.1. Résonateur de Helmholtz ?
 - 13.2. Résonateur simple.
 - 13.3. Résonateur à deux masses.
14. Quelle est la nature de l'écoulement dans la canalisation ?
15. Le moteur pop-pop idéal ?
- Annexe 1. Caractéristiques du générateur de bruit.

0. Préambule :

Sans vraiment m'y intéresser j'avais déjà vu des moteurs pop-pop depuis des décennies. En janvier 2005 un de mes enfants m'a rapporté d'Inde le jouet photographié page précédente. Je me suis vraiment pris au jeu... sous l'aspect scientifique. Curiosité, disponibilité (préretraite), formation et expérience des machines thermique ont fait le reste.

La consultation de dizaines de sites Web (en français et en anglais) sur les moteurs pop-pop montre que la plupart ont un contenu presque exclusivement mercantile. On y voit surtout des petits bateaux jouets fabriqués à l'étranger, notamment en Inde et proposés en Europe 10 à 50 fois plus chers que localement. Quelques sites d'amateurs enthousiastes sont plus intéressants. Enfin, quelques très rares sites se présentent sous un jour scientifique. Malheureusement les explications données (résonateur de Helmholtz, moteur Stirling, cycle de Rankine ou autre Carnot...) n'ont souvent qu'un lointain rapport avec notre sujet ou sont incomplètes. Ces sites ont le mérite d'exister, et en s'unissant...

Si la quantification du phénomène physique qui régit le moteur pop-pop est difficile, sa description est tout de même simple (cf. §6). Cependant aucun des sites consultés début 2005 n'expliquait comment à un certain moment du cycle il se crée un vide dans la chaudière. Il y manquait en règle générale deux notions scientifiques fondamentales : l'énergie cinétique et la vapeur surchauffée. Il y a aussi beaucoup d'autres détails qui ne sont pas mentionnés. Nous allons essayer autant que possible de combler ces lacunes tout en donnant des exemples et des analogies pour que ce soit compréhensible par tous.

Outre le fait que le rendement d'un moteur pop-pop est lamentable, quand on connaît les problèmes de qualité et de traitement de l'eau utilisée dans un cycle eau-vapeur il est irréaliste d'envisager de confectionner un moteur pop-pop à grande échelle pour utilisation industrielle car l'eau qu'il utilise est celle sur laquelle navigue le bateau. Cependant le sujet - même pour la réalisation de jouets - ne manque pas d'intérêt. Alors, pour ceux qui voudraient aller jusqu'au bout on donnera une méthode de calcul et les formules qui régissent les phénomènes physiques et thermodynamiques concernés. Il y a de quoi s'occuper !

Quelques sites intéressants :

www.eclecticspace.netT

www.sciencetoymaker.org/boat/index.html (le meilleur, et de loin),

www.chez.com/llegoff/poppop (a le même bateau indien que le mien en illustration)

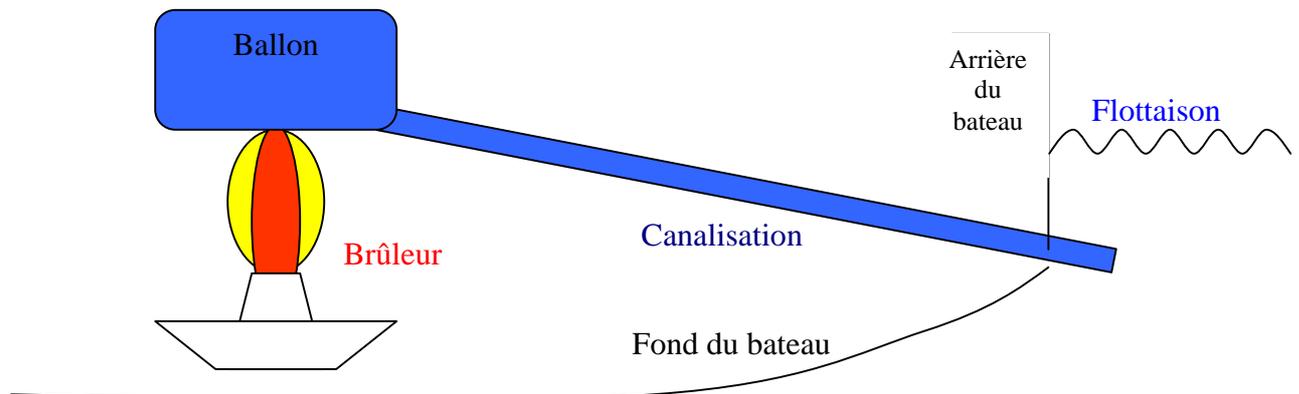
www.galepp.com/boat/popboat.htm (idem)

http://ourworld.compuserve.com/homepage/jp_perroud/poppop.htm

<http://membres.lycos.fr/moudge>

Un dernier site intéressant pour le côté historique et excentrique mais qui me dégoûte par son côté mercantile : www.pop-pop.fr . Mais après tout, si l'INPI a accepté en 1995 l'enregistrement du nom commercial « bateau à moteur pop-pop » à l'usage exclusif d'un privilégié, c'est surtout l'INPI qu'il faut blâmer car les engins flottants à moteur pop-pop - dont une majorité appelés communément bateaux - existaient déjà depuis bien des lustres. C'est comme si aujourd'hui un vendeur d'automobiles déposait le nom commercial « voiture à moteur diesel » pour tenter de verrouiller le marché à son profit. Le présent document n'a pas de finalité commerciale ; cependant, pour éviter tout malentendu le groupe de mots soit disant déposé ne sera pas réemployé.

1. Architecture d'un moteur pop-pop :



2. Description :

Bien qu'il existe de nombreuses variantes, le moteur pop-pop est un modèle de simplicité. Il n'y a aucune pièce en mouvement. La réalisation la plus classique utilise deux tubes parallèles pour des facilités de remplissage, mais pour le raisonnement une seule canalisation suffit. (Nous le démontrerons). Cette canalisation qui projette de l'eau vers l'arrière du bateau (effet hydrojet pulsé) est alimentée par un ballon de vapeur. Celui-ci n'a de ballon que le nom. Il n'a pas la forme habituelle d'un ballon de chaudière car il sert en même temps de ballon et de corps de chauffe et doit avoir une grande surface interne pour favoriser la vaporisation. Et pour que ça fasse pop-pop le ballon comporte une membrane métallique déformable. La chaleur nécessaire à la vaporisation est fournie le plus souvent par une bougie ou une petite coupelle remplie d'alcool.

Il existe d'après un des sites Web examinés une version améliorée avec condenseur. Le condenseur est un simple morceau de coton hydrophile imbibé d'eau froide et posé sur la canalisation un peu après le ballon. Le coton hydrophile est aussi sensé faire office de pompe de cale par capillarité. Il fallait oser !...

3. D'où vient le bruit "pop-pop" ?

Parlons-en pour ne plus avoir à y revenir. Le bruit caractéristique est dû à la déformation d'une petite membrane métallique (comme le couvercle de certains bocaux de conserves) tantôt convexe, tantôt concave. Cette membrane métallique fait partie intégrante du ballon et se déforme sous l'effet de la variation alternative de pression engendrée dans celui-ci. Le bruit est d'autant plus fort que la transition entre les états convexe et concave est brutale. Pour ce faire, au repos la membrane est généralement concave et légèrement précontrainte. Le bruit est un plus pour l'observateur, mais sa génération n'est pas nécessaire au bon fonctionnement du moteur. Au contraire ! La variation de volume du ballon engendrée par la déformation de la membrane nuit au rendement de l'ensemble. Mais le rendement du moteur pop-pop ne semble soucier personne (sauf un site*).

Pour un petit complément éventuel concernant le générateur de bruit du jouet étudié, voir annexe 1.

Nota* : Un seul site Web consulté parle de rendement. Et quel rendement ! 60% ! 60% de quoi ? Quand on connaît l'énergie dépensée par des savants depuis des décennies pour arriver à un rendement voisin de 50% sur un moteur diesel turbocompressé, et à beaucoup moins sur une turbine on croit rêver. Voir §8.3.3.

4. Petits rappels de mécanique et thermodynamique :

4.1. Moteur thermique :

Ne peut fonctionner qu'entre deux sources de chaleur à des températures différentes. On connaît de nombreux cycles théoriques (simplifiés): Carnot, Rankine, Beau de Rochas, Sabathé, Stirling, Lenoir, Diesel... Aucun d'eux ne correspond à notre application. Mais on retrouve toujours 4 étapes principales:

1. Compression d'un gaz
2. Addition de chaleur
3. Détente et production d'énergie mécanique
4. Refroidissement

4.2. Propriétés physiques de l'eau :

A la pression atmosphérique et à 100°C la masse volumique de l'eau est 958kg/m³. Celle de la vapeur est 0,59kg/m³. Une goutte d'eau qui se vaporise occupe donc 1650 fois plus de place.

4.3. Energie cinétique :

Tout objet en mouvement à la vitesse V (en m/s) possédant une masse (m en kg) est caractérisé par une énergie cinétique (en joules) qui s'exprime par $E = \frac{1}{2}mV^2$.

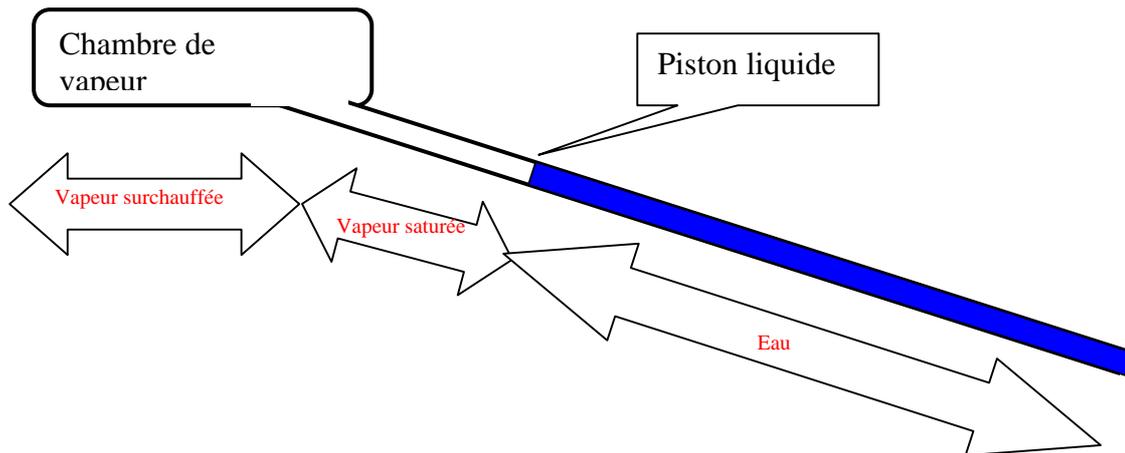
Tout changement de vitesse de ce mobile requiert un transfert d'énergie entre lui et le milieu extérieur. Le terme *objet* est à prendre ici au sens large. Ce n'est pas nécessairement un solide. Pour l'application qui nous concerne, ce sera le liquide : l'eau contenue dans la canalisation.

4.4. Vapeur saturée ou surchauffée :

Tout le monde connaît la vapeur improprement appelé saturée. C'est celle qu'on voit se dégager au-dessus de la casserole d'eau bouillante ou s'échapper de la cocotte minute. En fait elle se voit car c'est un mélange de vapeur (gaz) et de micro-gouttelettes d'eau (liquide) en suspension. Il existe une forme moins connue et peu intuitive de la vapeur : c'est la vapeur surchauffée. Elle ne se voit pas. Elle s'utilise couramment pour alimenter les turbines à vapeur ; par exemple à 60 bars et 515°C, alors que la température d'ébullition de l'eau à cette pression n'est que (!) 275°C.

Quand on surchauffe une masse de vapeur on lui augmente son énergie (son enthalpie) sans pour autant changer sa pression. Par exemple, à la pression atmosphérique l'enthalpie de la vapeur saturée à 100°C est 2672 kJ/kg alors qu'à cette même pression mais avec une surchauffe à 150°C le volume est multiplié par 1,13 (rapport des températures en °K) et elle devient 2777 kJ/kg.

Ce qu'il est important de comprendre pour la suite, c'est qu'il est possible simultanément d'augmenter la température et diminuer la pression de vapeur surchauffée. Pour ce faire, il suffit de chauffer un récipient à volume variable. Par exemple un cylindre muni d'un piston. En chauffant on augmente la température et donc l'enthalpie car la masse de vapeur qu'il contient ne change pas. En agissant sur le piston on augmente la cylindrée et ce faisant on diminue la pression. Dans un moteur pop-pop il n'y a pas de piston métallique, mais la surface libre de l'eau dans la canalisation se déplace et fait office de piston.



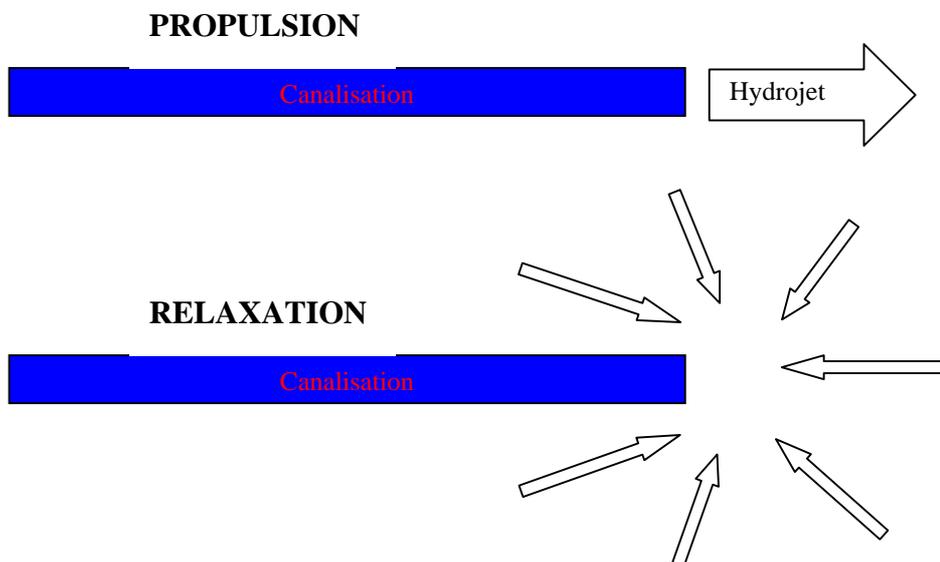
5. Comment le moteur pop-pop propulse-t-il le bateau ?

L'eau contenue dans la canalisation est alternativement poussée et tirée (aspirée) par le ballon. Nous verrons plus loin pourquoi. A partir de là, 3 phénomènes de dissymétrie contribuent ou peuvent contribuer à la propulsion du bateau.

1°) La coque du bateau a des formes asymétriques, qui favorisent son déplacement vers l'avant lorsqu'il est soumis à des sollicitations alternatives. Ce n'est certainement pas le facteur le plus important. Quand on se balance d'avant en arrière sur une prame avec un tableau arrière et une étrave assez fine on arrive à la faire avancer, mais en utilisant la même énergie pour manier un aviron de godille le résultat est nettement meilleur.

2°) Le mouvement alternatif de l'eau dans la canalisation n'est pas symétrique. En effet, l'eau peut aller plus vite vers l'arrière que vers l'avant car la pression dans le ballon peut être forte tandis que la dépression ne peut pas excéder celle de la tension de vapeur d'eau qui a des limites (0,023 bar absolu au niveau de la mer, avec pression atmosphérique normale). Là encore on peut douter de l'importance de cette dissymétrie sauf dans un cas évoqué au §11.

3°) L'écoulement à l'extrémité de la canalisation n'est pas réversible. Dans la phase de propulsion le jet est dirigé vers l'arrière (propulsion par hydrojet). Dans la phase de relaxation l'eau aspirée provient de toutes les directions. Ceci est bien décrit sur de nombreux sites.



On peut faire une analogie avec un moteur 2 temps qui est caractérisé par un temps de propulsion pendant la phase de détente et un temps de freinage –moindre – pendant la phase de compression.

Pour éliminer tout a priori, un essai sur notre jouet indien en plaçant deux coudes en sortie des canalisations pour orienter les jets latéralement a permis de démontrer que les effets 1 et 2 étaient absolument négligeables. Le bateau n'avancé plus du tout malgré un bon fonctionnement du moteur.

Pour ceux que ça intéresse, nous avons réalisé un petit document spécifique pour expliquer le "fonctionnement d'un hydrojet pulsé".

6. Fonctionnement simplifié du moteur pop-pop :

La décomposition chronologique est la suivante :

- Situation initiale : ballon et canalisation remplis d'eau.
- Allumage du foyer.
- Vaporisation de l'eau dans le ballon.
- La vapeur repousse l'eau dans la canalisation.
- Le serpent d'eau situé dans la canalisation est en mouvement.
- Le ballon ne contient qu'un résidu de vapeur que le foyer surchauffe.
- Le serpent d'eau – en raison de son inertie – continue sa progression et crée un vide partiel dans le ballon. Le vide est accentué par le fait qu'en progressant dans la canalisation la vapeur se condense. Ceci freine le piston liquide, puis inverse son mouvement.
- De l'eau arrive dans le ballon et se vaporise quasi-instantanément (flashing) au contact du métal....

Et ce jusqu'à l'extinction de la flamme. Puis le ballon se refroidit, la vapeur se condense et on retrouve la situation initiale avec ballon et canalisation remplis d'eau.

Cette description qualitative illustre parfaitement le fonctionnement du moteur pop-pop, mais elle n'a rien de quantitatif et s'il est facile de justifier le fonctionnement en régime stabilisé, il est difficile d'expliquer pourquoi ça démarre. Comment arrive-t-on dès les premières secondes à donner assez de vitesse à l'eau contenue dans la canalisation pour que par inertie elle "tire au vide" le ballon ? La réponse n'est pas simple. En réalité dès que l'ébullition commence la vapeur repousse l'eau (à environ 100°C). La vapeur qui s'éloigne se refroidit, d'une part par contact avec la canalisation, d'autre part par conduction et mélange avec celle qui est plus loin dans la canalisation. Le refroidissement entraîne une condensation de la vapeur située près de la surface de séparation. Ceci fait remonter l'eau... Nous tenterons une explication plus détaillée au chapitre 12.

Notre moteur pop-pop indien semble trouver sa fréquence dès les 2 ou 3 premières secondes, mais son amplitude de vibration augmente pendant les 2 ou 3 secondes suivantes.

Concernant l'amplitude des mouvements de l'eau dans la canalisation, intuitivement on est amené à penser qu'il faut éviter que de la vapeur sorte, mais que le meilleur correspond au renouvellement de pratiquement toute l'eau à chaque cycle. Il y a donc un bon compromis à trouver entre la puissance de chauffe, et les dimensions de cet appareil propulsif.

7. Facteurs influençant les performances :

Température et puissance de la source chaude
Température (et puissance) de la source froide
Surfaces et coefficients d'échanges thermiques
Forme du ballon
Flexibilité de la membrane
Position et forme de la jonction ballon-canalisation
Inertie thermique du ballon

Inertie thermique de la canalisation
Longueur de la canalisation
Diamètre de la canalisation
Diamètre et forme de la tuyère (l'orifice)

On peut ajouter que pour l'adaptation à la propulsion d'un bateau d'autres facteurs jouent :

Forme de coque
Déplacement (masse)
Position du centre de gravité
Inclinaison de la canalisation
Profondeur d'immersion de la tuyère
Hauteur du ballon par rapport à la flottaison

En théorie on devrait aussi tenir compte de la pression dynamique due à la vitesse du bateau, mais celle-ci est extrêmement faible et donc négligeable.

8. Analyse de l'existant :

Quelques enseignements tirés des essais jusque là non destructifs d'un jouet :

8.1 Mesures physiques :

- Masse du bateau : 30g (y compris le moteur, mais vide d'eau)
- Masse du ballon : environ 4g
- Epaisseur du corps de chauffe : 0,4mm (fer blanc étamé)
- Matériau : acier (fer blanc) pour tout sauf la membrane qui est en laiton.
- Diamètre interne des 2 canalisations : 3,3mm. Epaisseur 0,2mm.
- Longueur de chacune des canalisations : 86mm
- Volume total ballon+canalisations : environ 2,2cm³

8.2. Expériences :

- La fréquence du cycle est quasi indépendante de la puissance de chauffe ; au-delà d'un minimum. Des essais ont été réalisés dans un rapport voisin de 1 à 10.
- La puissance mécanique restituée croît avec la puissance de chauffe. Cela se voit aux vibrations et à l'amplitude des vagues générées. Cela se sent très bien quand on immobilise la maquette avec la main.
- La vitesse de la maquette (de 0,2m/s en marche avant à 0,2m/s en marche arrière ; marche forcée à la main) n'influence pratiquement pas la fréquence
- La hauteur géométrique du ballon par rapport à la surface de l'eau (passer de 2 à 6cm en soulevant l'avant du bateau) n'influence pas la fréquence de façon sensible et ne perturbe pas la génération des pop-pop.
- Quand on bouche une des deux canalisations la fréquence diminue. Dès qu'on la débouche on retrouve le régime initial.
- Allonger les canalisations de 50% change peu la fréquence.

- Même après une longue période de marche les canalisations sont froides au toucher là où elles sont accessibles.

- La fréquence de "croisière" est 7 à 8 Hz.

- A très faible puissance (lorsque la bougie s'éteint mais que la mèche est encore rouge) le moteur fait encore pop-pop mais il faut être tout près pour l'entendre car la membrane ne fait plus son office.

- La puissance de chauffe F restituée est environ 28W. (Le foyer de notre chaudière est constitué d'une petite bougie de gâteau d'anniversaire dont nous avons évalué la puissance en chauffant une quantité d'eau connue et en mesurant le gradient de température. Photos du montage d'essai et fichier des mesures disponibles.)

- La "vitesse de croisière" V est environ 0,15m/s (0,54km/h)

- Le remorquage à cette vitesse nécessite un effort de traction d'environ 2mN (2 milliNewtons). C'est infime. C'est tellement infime que c'est la mesure sur laquelle planait la plus grande incertitude. De nombreux essais complémentaires ont été faits avec de meilleurs moyens de mesure pour améliorer la précision de la connaissance.

8.3. Dédutions :

8.3.1. Fréquence :

Elle semble peu influencée par la plupart des paramètres. C'est un peu comme un pendule dont l'amplitude varie facilement mais la fréquence est constante tant qu'on ne change ni la longueur de la corde, ni la masse en mouvement.

8.3.2. Course du piston liquide :

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 pas cycle supérieure à V. $v_{\max} > V$

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

$v_{\max} = 2\pi F a > V$. Avec F=8Hz et V=0,15m/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.

8.3.3. Rendement :

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 d'une propulsion par moteur pop-pop et d'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: $0,2 \times 2 \times \pi \times 10 = 12,6$ 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 $1,8 \cdot 10^{-2}$ 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.

Nota : 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. Cependant, il reste très médiocre. Voir le document "Rendement d'un moteur pop-pop".

8.3.4. Température de la canalisation :

Le rendement étant ce qu'il est, pratiquement tout (plus de 99%) passe en chaleur ; c'est-à-dire en élévation de la température de l'eau. A ce stade il nous manque des données. Supposons que l'oscillation de l'eau dans les canalisations se produise sur 40 mm (la seule certitude c'est que $6,4 \ll a < 86$). Le volume d'eau renouvelé à chaque cycle est

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \times 40 \times 2 = 0,68 \text{ cm}^3$$
. A 7 à 8 Hz cela correspond à un débit moyen de $5 \text{ cm}^3/\text{s}$. Cette

eau étant prélevée là où évolue le bateau, par exemple à 20°C elle s'élève de

$$\Delta\theta = \frac{F}{Q \times c} = \frac{28}{5 \times 10^{-3} \times 4185} = 1,3^\circ\text{C}$$
 et devient 21,3°C. En fait, compte tenu du

renouvellement d'une partie de l'eau seulement, et de l'agitation perpétuelle, la température est progressivement plus élevée quand on se rapproche du ballon, mais ceci justifie le fait que les tubes qu'on touche là où ils sont accessibles semblent froids. Ceci repose sur une hypothèse plausible, mais non vérifiée. Si on prend une hypothèse plus pessimiste correspondant à une course de 10mm au lieu de 40 (rapport 4), la température devient 25,3°C. C'est encore froid au toucher. On en reparlera plus loin dans ce rapport.

8.3.5. Pressions :

En fonctionnement la pression effective dans le ballon évolue à 8 Hz entre un minimum inférieur à -20mmCE et un maximum supérieur à $66+40=106$ mmCE.

Nota : Nous avons fait des mesures de pression mini et maxi avec d'autres moteurs. Il s'avère qu'en valeur absolue la dépression est toujours inférieure à la pression maxi. Le cycle n'est donc pas sinusoïdal.

8.3.6. Puissance massique.

En fonctionnement la masse totale du moteur (ballon + tuyauteries + eau) est environ 8 grammes (hors combustible). Ce moteur produit une puissance mécanique de 0,3mW (2mNx0,15m/s). La puissance massique est donc de 37,5W/tonne.

Comparons avec la propulsion d'un bateau de plaisance. Pour 37,5kW (51CV) la masse de l'ensemble moteur+réducteur+arbre+hélice est environ 250kg. La puissance massique de notre moteur pop-pop est donc environ 500 fois plus faible que la puissance massique d'une propulsion classique. C'est lamentable.

Pour être honnête il faut avouer que l'industrie nous a appris que les extrapolations apportent quelquefois des surprises. Le facteur d'échelle entre le jouet et le bateau de plaisance est tellement grand que la réalité serait peut-être meilleure, mais la probabilité d'égaliser une propulsion classique est extrêmement faible. Et on vous laisse imaginer la quantité de combustible qu'il faudrait transporter.

9. Lois physiques/modèles mathématiques :

Remarques :

1°) Le meilleur rendement d'une propulsion par hydrojet correspond à une vitesse de sortie d'eau qui est presque le double de celle du bateau; cette eau étant projetée (horizontalement) dans l'air. Or ce principe n'est pas applicable ici car il faut impérativement que la canalisation trempe dans l'eau pour ne pas aspirer d'air.

Nota 1: Dans la première version de cette étude nous avons écrit ce qui suit en italiques. *Pour vous convaincre que c'est moins efficace, il est facile de faire une petite expérience. Installez-vous dans le jardin avec le tuyau d'arrosage et un grand récipient contenant de l'eau. Pour tenir l'extrémité du tuyau d'arrosage il faut exercer un certain effort dans la direction où va le jet. (Vous contrez la force propulsive d'un hydrojet.) Maintenant, plongez l'extrémité du tuyau dans l'eau et vous constaterez que l'effort nécessaire pour maintenir la lance est beaucoup moindre.* Ceci est subjectif et faux. Dans l'air le bruit est beaucoup plus important mais la poussée est quasiment la même. Nous avons réalisé une expérience spécifique pour le mesurer.

Nota 2: Mathématiquement on démontre que le meilleur rendement d'un turboréacteur d'avion correspond à une vitesse d'éjection des gaz très voisine de celle de l'avion. Pour un bateau le problème est différent car l'eau qu'il aspire n'est pas immobile. Démonstration comparative disponible sur demande.

2°) Le moteur pop-pop est d'une simplicité apparente déconcertante mais calculer un tel moteur requiert des moyens de calculs qui n'existaient pas lors de sa découverte. Nous sommes en présence d'un phénomène périodique en régime diphasique (eau et vapeur) très complexe. Pour l'analyser il suffit (doux euphémisme) d'écrire les équations à l'instant « t » pour déterminer la valeur des paramètres à l'instant « t+Δt », puis de recommencer pour « t+2Δt »... C'est un travail bestial qu'un PC fait très bien et vite, à condition de lui donner tous les algorithmes et les conditions initiales.

3°) Compte tenu de la fréquence relativement élevée des pulsations générées par le moteur pop-pop (souvent plusieurs hertz, voire plusieurs dizaines de hertz) certains paramètres peuvent être considérés constants ; ce qui simplifie un peu le problème. Nous noterons "Hn" les hypothèses simplificatrices qui semblent raisonnables.

Reste à écrire les équations qui régissent chaque sous-ensemble, puis à les faire interagir. Nous n'irons pas jusqu'à la résolution du problème car il y a une infinité de possibilités en fonction des matériaux utilisés, de la géométrie des éléments, de la puissance du foyer... Notre propos est juste de montrer qu'une modélisation mathématique est possible; et qu'à partir de là on pourrait optimiser un moteur pop-pop, par exemple en adaptant la puissance de chauffe et/ou la longueur de la canalisation à la température de l'eau.

9.1. Ballon

Il reçoit un flux calorifique (une puissance) que l'on peut considérer constant. De même, par convection et rayonnement il transmet une puissance que l'on peut considérer constante. La puissance F résultante sert à chauffer le métal du ballon, et l'eau contenue dans le ballon ou à surchauffer la vapeur qui y reste. (Pour les connaisseurs, voir le diagramme de Mollier).

H1 : la puissance de chauffe F est constante.

L'analyse du cycle va s'avérer beaucoup plus longue que le cycle réel ! Pour simplifier nous allons le décomposer en 3 phases :

- remplissage du ballon. L'eau va de la canalisation vers le ballon.
- expulsion de l'eau du ballon. Elle part dans la canalisation.
- surchauffe de la vapeur. Il n'y a plus de liquide dans le ballon.

9.1.1. Remplissage du ballon.

La puissance de chauffe est transmise au ballon et à ce qu'il y a dedans.

$$F = Q_t \rho \cdot c (\theta_t - T_1) + M \Sigma \frac{d\theta_t}{dt} + m_t c \frac{d\theta_t}{dt} + dm_t \alpha$$

Dans cette formule,

le premier terme correspond à l'élévation de température de l'eau entrant dans le ballon.

le deuxième correspond à la variation de température du métal du ballon.

le troisième à l'élévation de température de l'eau contenue dans le ballon.

le quatrième et dernier terme à la vaporisation d'une partie de l'eau.

Les notations sont les suivantes :

Q_t = débit volumétrique d'eau entrant dans le ballon à l'instant t

ρ = masse volumique de l'eau. (Elle varie un peu avec la température, mais on utilisera $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$)

c = chaleur massique de l'eau. (Elle varie très peu avec la température. On retiendra $c = 4185 \text{ j/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

θ_t = température de l'eau contenue dans le ballon à l'instant t .

T_1 = température de l'eau entrant dans le ballon. (Si le moteur est bien dimensionné pratiquement toute l'eau est renouvelée à chaque cycle. On peut considérer que T_1 est la température de l'eau dans laquelle évolue le bateau. Par exemple 15°C).

M = Masse métallique du ballon

Σ = Chaleur massique du métal (Elle varie un peu avec la température, mais on utilisera $460 \text{ j/kg}^\circ\text{C}$ pour l'acier et $400 \text{ j/kg}^\circ\text{C}$ pour le cuivre)

m_t = masse d'eau à l'état liquide dans le ballon à l'instant t

P_t = pression dans le ballon à l'instant t . (Pour limiter les risques d'erreur, utiliser la pression absolue partout pour les calculs)

α = chaleur de vaporisation de l'eau à la température θ_t .

Par ailleurs, pendant cette phase de remplissage du ballon le mélange est diphasique et la pression et la température sont liées par la courbe de saturation (diagramme de Mollier). Ceci permet de calculer $P_{(t+\Delta t)}$ et $\theta_{(t+\Delta t)}$ à partir de P_t et θ_t . On peut donc suivre l'évolution de la pression dans le ballon à chaque pas de calcul.

9.1.2. Expulsion de l'eau du ballon.

Le ballon contenant à la fois de l'eau et de la vapeur on considérera que celle-ci est saturée. La formule ressemble à la précédente, mais le terme correspondant à l'eau qui rentrait n'a plus lieu d'être. $F = M\Sigma \frac{d\theta_t}{dt} + m_t c \frac{d\theta_t}{dt} + dm_t \alpha$.

En complément il y a une équation correspondant à la variation de masse. Pendant l'espace de temps Δt une partie de l'eau est allée vers la canalisation. Mais ce $\Delta m = m_t - m_{(t+\Delta t)}$ ne sera connu que lors du calcul complet mettant entre autres en œuvre les interactions ballon-canalisation.

Pendant la phase d'expulsion de l'eau du ballon on peut donc calculer $P_{(t+\Delta t)}$ et $\theta_{(t+\Delta t)}$ à partir de P_t et θ_t .

9.1.3. Surchauffe de la vapeur.

Dans cette phase il n'y a plus d'eau sous forme liquide dans le ballon. Du fait que le moteur pop-pop travaille à des pressions relativement faibles la masse de vapeur (affectée de sa chaleur spécifique) est très faible et négligeable devant celle du ballon.

H2. Dans cette phase on peut négliger la masse de vapeur.

La formule se réduit alors à $F = M\Sigma \frac{d\theta_t}{dt}$. L'élévation de température est linéaire. L'énergie thermique accumulée pendant cette phase sera restituée à l'eau lorsqu'elle reviendra.

9.2. Canalisation

Elle contient une quantité d'eau et une quantité de vapeur variables. Compte tenu du relativement bon coefficient de transmission de la chaleur par l'eau et du mauvais coefficient de transmission de la chaleur par la vapeur on constate expérimentalement que la température de la canalisation reste froide quand le moteur se "secoue". Pour le confirmer, il a même été réalisé des moteurs pop-pop utilisant des pailles de bistrot en matière plastique pour canalisations. On peut donc considérer qu'il n'y a pas d'échange thermique à travers la canalisation au-dessus de là où elle est en contact avec l'eau environnante ; mais il y a condensation d'une partie de la vapeur par contact avec le film d'eau qui tapisse la canalisation lorsque le niveau descend.

Le vide étant créé d'une part par la condensation et d'autre part par le déplacement de l'eau sous l'effet de son inertie, il importe de trouver un bon compromis entre l'énergie cinétique ($E = \frac{1}{2} mV^2$) et les pertes de charge ($R = kV^2$) ; c'est-à-dire entre diamètre et longueur de la canalisation. Il va sans dire que tout accident de parcours (coude brusque, changement de diamètre, flexible annelé...) est à proscrire. Pour une même énergie cinétique la minimisation des pertes de charge s'obtient par :

- l'utilisation d'une seule canalisation plutôt que 2 ou plusieurs
- canalisation de section circulaire
- canalisation sans accident de parcours entre le ballon et la tuyère
- bon état de surface interne de la canalisation.

Nota : Il est surprenant de constater que certaines de ces précautions élémentaires ne semblent pas avoir été prises en compte sur bon nombre de maquettes.

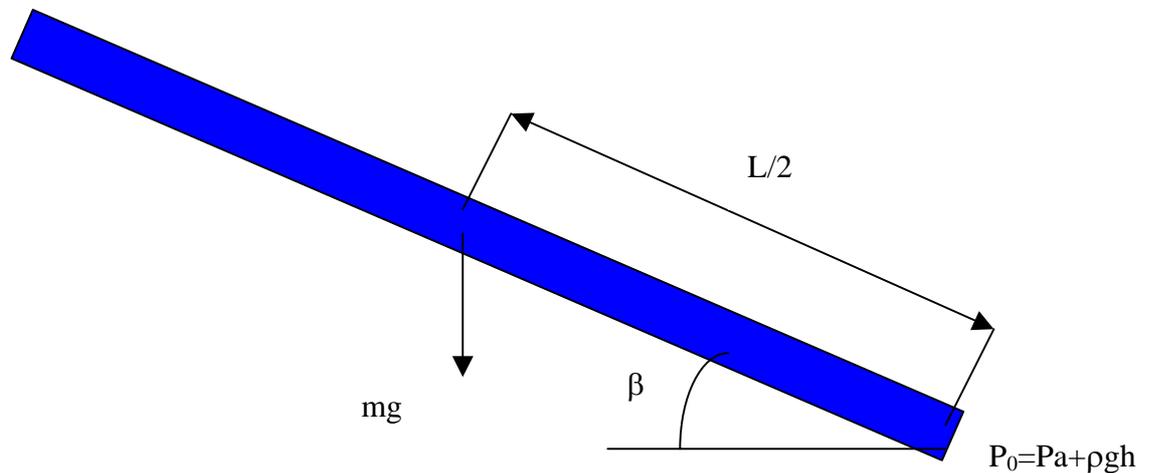
La masse volumique et la viscosité de l'eau sont très différentes de celles de la vapeur.
H3 : On pourra négliger les pertes de charge dans la canalisation dues à la vapeur par rapport à celles qui sont dues à l'eau.

Dans la canalisation il y a un serpent d'eau de masse m soumis en amont à la pression absolue du ballon, en aval à la pression atmosphérique augmentée de la hauteur d'immersion et éventuellement de la perte de charge créée par la tuyère. Ce serpent est en mouvement et il frotte sur les parois de la canalisation. Il faut ajouter à tout cela une inclinaison plus ou moins grande de la canalisation.

Soient :

- S = section de la canalisation
- L_t = la longueur du serpent à l'instant t
- m_t = sa masse à l'instant t
- h = hauteur géométrique entre la tuyère et le plan d'eau
- β = angle d'inclinaison de la canalisation
- V_t = vitesse du centre de gravité du serpent
- χ_t = accélération de ce centre de gravité
- Q_t = débit volumique s'écoulant à travers une section quelconque de la canalisation.

P = pression
ballon



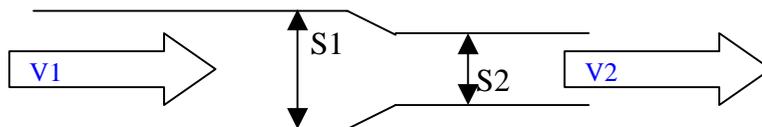
$$V_t = 1/2 Q_t / S$$

$$(P - P_0)S + m_t \cdot g \cdot \sin \beta = m_t \chi_t$$

$$m_{(t+\Delta t)} = m_t - Q_t \rho \cdot \Delta t \quad (\text{Choisir une convention de signe et s'y tenir !})$$

9.3. Tuyère

C'est l'extrémité ouvragée de la canalisation. Elle a pour but d'augmenter la vitesse d'éjection de l'eau.

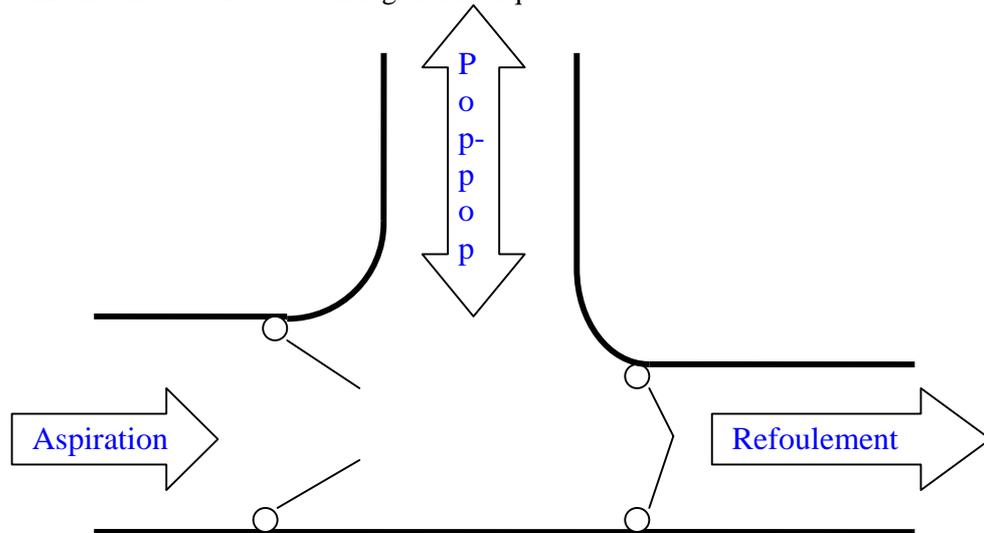


L'application du théorème de Bernoulli permet d'écrire :
$$\frac{P_1}{\varpi} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\varpi} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Et par ailleurs, la phase liquide étant considérée incompressible : $V_1 \times S_1 = V_2 \times S_2$

Si les pulsations n'étaient pas si rapides on pourrait imaginer une amélioration consistant à mettre en parallèle une tuyère et un orifice de plus gros diamètre muni d'un clapet de non retour, voire ajouter aussi un clapet de non retour sur la tuyère pour refouler l'eau vers l'arrière et l'aspirer vers l'avant. Cela mériterait d'être essayé par exemple avec des clapets de type "bec de canard" qui peuvent fonctionner à des fréquences élevées. Voir schéma qui suit. Ainsi, la phase de relaxation serait améliorée par un gavage dû à la vitesse du bateau. Le moteur pop-pop serait alors la machine d'entraînement d'une pompe alternative (sans piston si ce n'est un piston liquide) utilisée pour propulser le bateau.

NDLR : Les schémas ne sont pas ce qu'on aurait aimé qu'ils soient, mais par facilité et pour que tout le monde puisse les lire ils ont été faits avec un logiciel rustique.



Nota : Pour ceux qui seraient tentés par l'expérience, pour la réalisation un simple souplesse en élastomère ayant subi un coup de fer à repasser sur l'extrémité libre peut faire un clapet de non retour à très faible inertie.

Revenons à l'existant ! En pratique il y a rarement une tuyère car une diminution de la section de passage de l'eau se traduirait par une perte de charge supplémentaire avec pour conséquences :

- une diminution de l'énergie cinétique qui crée le vide
- une augmentation du temps de relaxation, donc de la période du cycle.

H4 : pour les premiers calculs on considérera que c'est l'extrémité de la canalisation qui fait office de tuyère. (Pas de changement de section).

9.4. Bateau

Il navigue à une vitesse que l'on peut considérer constante compte tenu de son déplacement (sa masse. Ex : plusieurs dizaines de grammes) relativement grand par rapport à la masse de l'eau en mouvement dans le moteur pop-pop (ex : en moyenne moins de 1,4 grammes).

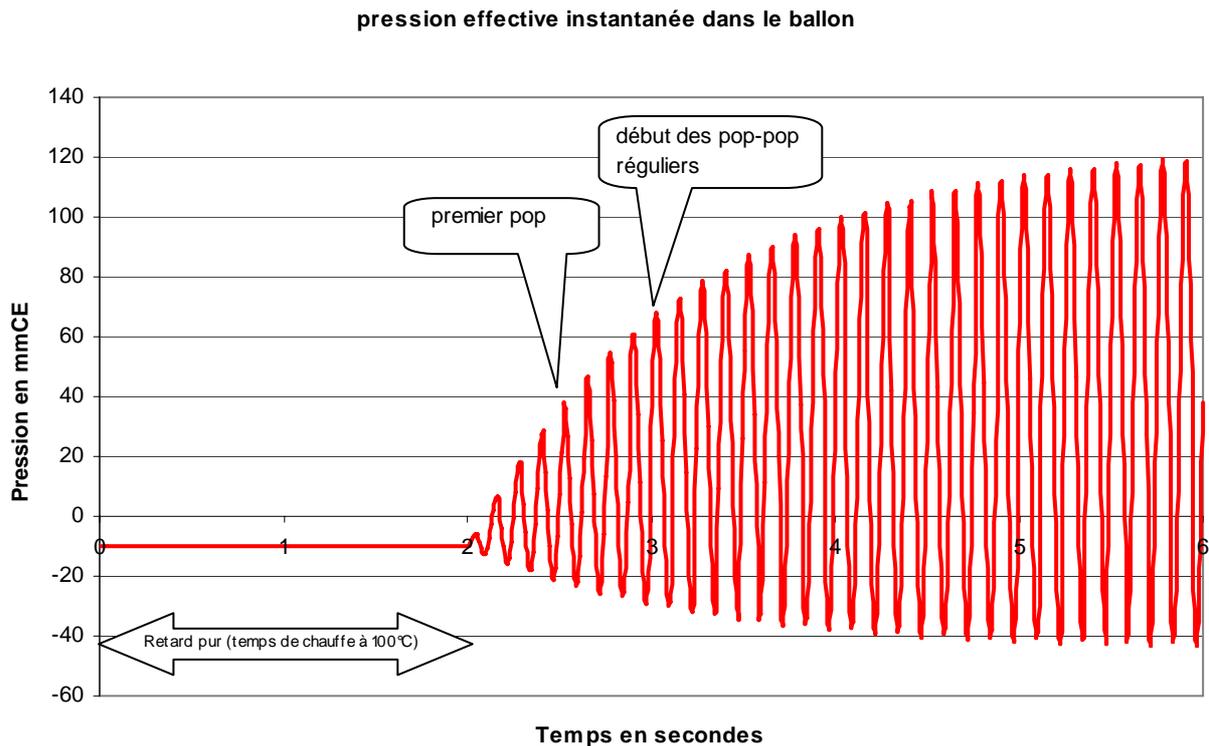
Quand on immobilise une maquette (essais au point fixe) on ne note pas de différence sensible de la fréquence du cycle.

H5 : La vitesse du bateau est constante et trop faible pour influencer les performances du moteur pop-pop.

Pour valider toutes ces hypothèses simplificatrices, un moteur pop-pop existant devra être modélisé et les résultats des calculs devront être comparés aux mesures réelles.

10. Réponse probable (en l'absence de moyens de mesure) :

D'après tout ce qui a pu être vu ou entendu, la réponse d'un moteur pop-pop doit ressembler à ce qui suit.



A $t=0$ le foyer est allumé

A $t=2$ le ballon atteint 100°C

A $t=2,6$ le premier pop apparaît. Puis les pops ont lieu une fois par cycle

A $t=3,4$ le pop-pop devient régulier. (Deux pops par cycle.)

A $t=5$ le moteur donne pratiquement toute sa puissance.

Les temps et pressions sont donnés à titre indicatif. Ils peuvent varier avec bien des paramètres.

11. Mesures et résultats complémentaires :

Cinq moteurs pop-pop (2 petits et 3 gros) possédant chacun une seule canalisation ont d'abord été réalisés et testés avec différents matériaux, différents diamètres et différentes longueurs de cette canalisation. Photos et fichier de mesure disponibles. A chaque nouvel essai un seul paramètre était changé. Les moteurs n°1 et n°2 avaient de nombreuses caractéristiques de ballon quasiment identiques (masse, volume, surface de chauffe). Les moteurs n°3, 4 et 5 ont été faits avec de gros ballons ($24,6\text{cm}^3$) en vue d'obtenir des fréquences basses pour mieux observer le pompage. Ensuite, de nombreux autres moteurs ont été construits et testés. Les enseignements sont les suivants :

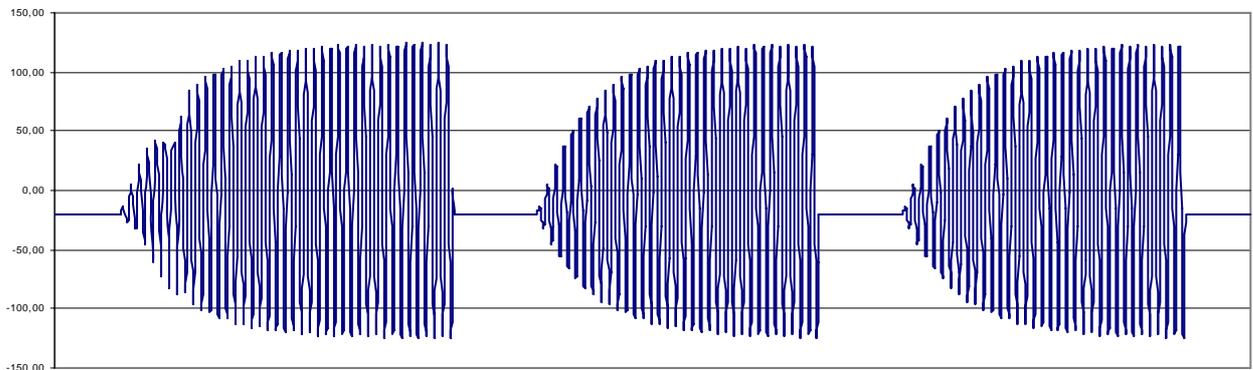
- Il se confirme qu'une seule canalisation suffit. (Cependant c'est plus dur à remplir).

- La hauteur du ballon par rapport à la flottaison n'est pas un critère important. Cela influe sur la pression dans le ballon et sur la température d'ébullition, mais ne change pas le reste de façon visible (dans les limites de la longueur de la canalisation). Des essais ont été faits avec dénivelé positif jusqu'à 30 centimètres et négatif jusqu'à 15 centimètres.
- Une bonne conduction thermique entre le ballon et la canalisation dégrade le fonctionnement. En effet, d'une part la surchauffe est difficile et d'autre part l'eau située près du ballon est chaude et sa vaporisation n'est pas franche. L'interposition d'une petite liaison isolante améliore les choses.
- Le ballon doit être placé plutôt vers le haut du moteur et il est nécessaire d'avoir une certaine inclinaison de la canalisation là où se situe l'interface.
- La longueur de la canalisation a peu d'influence sur la fréquence de pompage.
- Avec une canalisation courte le pompage est difficile à obtenir et irrégulier, voire impossible à obtenir.
- La fréquence augmente avec la puissance de chauffe mais pas beaucoup.
- L'amplitude du mouvement alternatif de l'eau dans la canalisation croît avec la puissance de chauffe.
- A volume égal, le démarrage et l'entretien du pompage sont plus faciles, et les amplitudes plus fortes avec un ballon à grande surface de vaporisation.
- La fréquence semble dépendre uniquement du volume du ballon et du diamètre de la canalisation dans toute sa partie en contact avec la vapeur. La formule pourrait être de la forme $F = \alpha \sqrt{\frac{n}{V}} \times \left[\text{Log}(1,5 * \phi^2 + 1) \right]$ dans laquelle V représente le volume du ballon en cm³ et ϕ le diamètre de canalisation en mm, et n le nombre de canalisations. Selon nos premières estimations, le coefficient α serait 5,3. Des essais complémentaires avec des moyens de laboratoire seraient nécessaires pour définir α avec précision ou pour trouver une formule plus appropriée. Dans les moteurs à spires (avec la canalisation enroulée en spirale au milieu et chauffée à cet endroit) il est difficile de dire où se termine le ballon et où commence la canalisation pour appliquer la formule. Ce qui est sûr, c'est que le volume qui joue le rôle de ballon est petit et qu'il en résulte une fréquence élevée. La plupart de ces réalisations sont en cuivre; ce qui présente l'inconvénient d'une grande conduction thermique entre la partie chaude et la partie froide. Une des réalisations (cf. www.eclecticspace.net) a été faite avec un tube de verre. Pour ce qui concerne la conduction thermique c'est assez mauvais ($\lambda=1\text{W/m}^\circ\text{K}$ alors que pour le cuivre $\lambda=390\text{W/m}^\circ\text{K}$), mais pour l'observation c'est excellent. On y note un temps de démarrage très long, puis une fréquence élevée (25Hz) due au faible volume de ce qui fait office de ballon.
- Lorsqu'on utilise une canalisation isolante (plastique) de faible diamètre la température de l'eau croît régulièrement depuis la tuyère jusqu'au ballon.
- Lorsqu'on interpose un ajutage à la sortie du ballon la longueur et le diamètre de la canalisation qui suit sont sans importance, pour autant que le diamètre soit supérieur à celui de l'ajutage. La fréquence ne dépend alors que du ballon et de la longueur et du diamètre de l'ajutage. Le mouvement alternatif de la surface de séparation eau-vapeur exprimé en cylindrée (diamètre de la canalisation multiplié par la course du piston liquide) semble ne dépendre que de la puissance de chauffe.
- La présence d'air dans le ballon augmente les performances (fréquence et amplitude).
- En régime de croisière la surface libre de l'eau dans la canalisation est + ou - éloignée du ballon. L'eau ne rentre jamais à l'état liquide dans le ballon. C'est l'interface entre vapeur saturée (plus ou moins titrée) et vapeur surchauffée qui rentre et sort du ballon.

Il n'y a que des microgouttelettes. En effet, une seule goutte (0,05cm³) en se vaporisant occuperait environ 82cm³ et chasserait toute l'eau du ballon et de la canalisation.

- Lorsqu'on arrête la chauffe le moteur continue à marcher (pendant 15 à 30 secondes pour nos deux premiers prototypes) en raison de l'inertie thermique du ballon. La surface de séparation entre l'eau et la vapeur se rapproche du ballon. Si on refroidit le moteur chaud par arrosage, à l'extérieur l'eau bout; preuve que le moteur était à plus de 100°C. Puis dès que la température du ballon avoisine les 100°C on voit et on entend l'eau y remonter brutalement à travers la canalisation ; preuve que le ballon contenait de la vapeur surchauffée. Si on laisse le ballon se refroidir naturellement cela prend un peu plus de temps mais le résultat est le même. Quand une goutte d'eau rentre dans le ballon, c'est parce que sa température est inférieure à 100°C et toute la vapeur se condense instantanément. Il y a alors un coup de bélier qui propulse le bateau.
- Il faut un minimum de puissance pour que ça démarre. En deçà, il se crée un équilibre statique stable avec la surface libre de l'eau au ras du ballon.
- Pour une même puissance de chauffe on peut remarquer un rapport d'environ 12 entre les quantités de mouvement du premier moteur avec canalisation de 6, course 25 et fréquence 4 et du deuxième avec canalisation de 3, course 10 et fréquence 3,3. Il faut donc chercher à utiliser le plus grand diamètre possible pour la canalisation... mais il semble y avoir des limites pratiques au rapport S/V (section de la canalisation/volume de gaz ; ce volume étant supérieur à celui du ballon quand l'interface se situe dans la canalisation). Ces limites sont approximativement telles que pour qu'un moteur marche il faut $\frac{1}{2000} < \frac{S}{V} < \frac{1}{100}$ avec S en mm² et V en mm³.
- Quelques essais ont été faits en ajoutant un condenseur. Nous n'avons pas noté d'amélioration. Quand un moteur marche bien (relativement haute fréquence et grande course), l'eau dans la canalisation est tellement agitée que sa température est progressivement de plus en plus élevée à mesure qu'on s'approche du ballon, mais elle est assez froide pour ne pas se vaporiser dans la canalisation.
- Il a été fait une série d'essais au point fixe pour déterminer la poussée développée par différents moteurs pop-pop alimentés chacun par une petite bougie. Notre jouet indien (2 canalisations de diamètre 3,3) se place très bien. Nous avons obtenu la même poussée ou un petit peu mieux dans seulement 3 cas, chacun avec une seule canalisation.
 - diamètre 6 terminée par une tuyère de 5,2.
 - diamètre 5,2 terminée par une tuyère de 4,4.
 - diamètre 4,2 sans tuyère.
- Plusieurs sites Web parlent d'un phénomène de burning out qui serait dû à une entrée d'air. Ne pas confondre air et vapeur surchauffée ! Certains de nos essais ont duré plusieurs dizaines de minutes sans que nous ne rencontrions ce problème. Par contre, lorsqu'on attend assez longtemps on observe quelquefois qu'en plus du pompage HF (lors des premiers essais, 4 Hz pour notre moteur n°1 et 3,3Hz pour le n°2) il y a un pompage BF (période 25 secondes pour le n°1 et 220 secondes pour le n°2) très asymétrique. Si la canalisation est assez volumineuse il y a périodiquement un coup violent d'hydrojet, puis l'eau remonte doucement. Si la canalisation est peu volumineuse il y a une chasse de vapeur, puis l'eau remonte lentement jusqu'au ballon, puis très vite dans le ballon (dès qu'il se refroidit au contact de l'eau). Graphiquement le résultat (pression dans le ballon en fonction du temps) ressemble à

ce qui suit. Les temps morts correspondent à la remontée à 100°C de l'eau froide qui a rempli le ballon.



Concernant la présence d'air, quelques essais "accidentels" ou de très longue durée (plusieurs heures) ont été instructifs.

1°) La présence d'air (ou autre gaz) augmente la fréquence et l'amplitude.

2°) L'air s'élimine naturellement en cas de burning out.

Pourquoi ? Nous n'avons pas de certitudes, mais de fortes présomptions liées au fait que nous avons vu très nettement, en quelques occasions au cours desquelles le moteur ne voulait pas entrer en pompage, le gaz (air et vapeur) repousser toute la colonne d'eau et des bulles s'échapper (à 10 ou 15cm sous la surface de l'eau) et remonter à la surface. S'il s'était agi de vapeur il y aurait eu condensation. Après réflexion, l'air a une masse atomique d'environ 29 alors que celle de la vapeur est environ 18. L'air est donc plus lourd et s'accumule vers le bas lorsqu'il n'y a pas pompage. Il en est peut-être de même lorsque le moteur pompe. Quoi qu'il en soit, la présence d'air accumulé ou mélangé à la vapeur modifie l'échange entre la vapeur et le film d'eau.

12. Fonctionnement détaillé du moteur pop-pop :

Pour examiner le phénomène il a été construit 3 types de moteurs "transparents". Ceux de Jeff (persuadé que tout se passait dans le ballon) ont un couvercle en plastique transparent sur le ballon. Loïc en a réalisé un avec serpentin en verre pour tout voir. Les moteurs de Jean-Yves (persuadé que tout se passait dans la canalisation) ont une canalisation en plastique transparent. Ceux qui avaient des préjugés (antagonistes) ont eu chacun confirmation qu'ils avaient raison. Pourquoi ? Parce que les moteurs n'étaient pas comparables. Le résultat dépend des matériaux utilisés, de la puissance de chauffe, et de la géométrie du moteur.

Les moteurs de Jeff ont un ballon mince et pas très bon conducteur de la chaleur, avec couvercle isolant et des canalisations en cuivre. La source chaude est localisée à l'endroit où la flamme lèche le ballon. La source froide remonte jusqu'en haut des canalisations. Résultat : quand Jeff observe, tout se passe dans le ballon. La bulle de vapeur se forme au-dessus de la flamme et sa dimension varie à la fréquence du pop-pop.

Les moteurs de Jean-Yves ont un ballon massif en cuivre et une canalisation isolante. Tout le ballon est soumis à la source chaude ; tandis que la source froide est loin en aval de la canalisation. Résultat : l'interface (oscillante) vapeur/eau est située dans la canalisation. Lors de certains essais avec canalisation de petit diamètre la position de l'interface a été mesurée jusqu'à 20cm du ballon.

Le moteur de Loïc étant isolant partout, l'interface se forme quelque part entre l'endroit chauffé et la source froide. Et il y a pompage autour d'une position moyenne.

Depuis, Joao Cordero, Christophe, Loïc, Guus et Jean-Yves ont construit des moteurs en verre et chaque expérience complète ou confirme les autres.

Malgré les différences visibles, dans chacun de ces moteurs le processus est le même. Dès que l'ébullition commence la vapeur repousse l'eau. A une extrémité de la poche de vapeur il y a surchauffe et augmentation de volume, tandis qu'à l'autre extrémité la vapeur se refroidit par contact avec le matériau et avec la surface libre de l'eau. Ce refroidissement entraîne désurchauffe avec diminution de volume, et condensation de la vapeur située près de la surface de séparation. Et là, selon les circonstances et les moteurs on peut assister à des phénomènes temporels très différents. Le pompage peut être soit immédiat, soit apparaître après une grande "hésitation" du moteur (quelquefois plus de 30 secondes). Ce dernier cas est le résultat d'un quasi équilibre entre l'augmentation de volume liée à la surchauffe de la vapeur au voisinage de la source chaude, et la diminution de volume liée au refroidissement et à la condensation du côté de la source froide car dans cette phase lente, voire très lente, l'énergie cinétique est négligeable.

Lorsque l'interface vapeur/eau inverse sa course elle se rapproche assez rapidement de la source chaude. L'inertie joue alors un rôle non négligeable. La poche de vapeur diminue en volume, tandis que la source chaude augmente son énergie. La pression a donc deux raisons d'augmenter. Elle freine la remontée de la colonne d'eau, inverse son mouvement... Le mouvement alternatif est alors entretenu jusqu'à disparition de la source chaude.

Remarque 1 : en apportant au moteur de Jeff une énergie supérieure à l'habituelle nous avons fait fonctionner le ballon "à sec" comme les nôtres. Même si le fonctionnement a été de courte durée (car le plastique n'a pas résisté) cela confirme s'il en était besoin que les moteurs sont tous régis par les mêmes lois de la mécanique et de la thermodynamique. Le volume moyen de la poche de vapeur dépend – entre autres - de la puissance de chauffe.

Remarque 2 : sur nos moteurs la température du ballon en cuivre épais est généralement comprise entre 110 et 130°C. L'interface vapeur/eau ne pénètre jamais dans le ballon. La chaleur est échangée par conduction, convection, rayonnement entre les différentes couches de vapeur. Cet échange est favorisé par le mouvement alternatif des molécules. Pour simplifier disons que c'est l'interface (invisible) entre vapeur saturée (et titrée) et vapeur surchauffée qui se déplace à l'entrée du ballon. Sauf incident l'eau n'y pénètre pas sous la forme purement liquide.

Une très grosse surchauffe est possible. Des essais non destructifs ont été fait par Guus avec un moteur à spires jusqu'à environ 700 ou 800°C. Nous avons fait les mêmes essais sur l'un de nos moteurs à spires pour confirmer.

13. Pourquoi est-ce que le bateau vibre ?

Il est évident que l'effet pulsatoire de l'hydrojet contribue à faire vibrer le bateau, mais il y a surtout un effet de résonance ou de pendule.

13.1. Résonateur de Helmholtz ?

Certains ont cherché une analogie entre le moteur pop-pop et le résonateur de Helmholtz. Ce dernier est simplement constitué d'une capacité (de volume V) prolongée par un tube de section S et de longueur L . La fréquence propre d'un tel résonateur est

donnée par $f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}}$; c étant la célérité du son dans le gaz contenu dans la capacité.

Le plus classique des résonateurs de Helmholtz, c'est la bouteille + ou - vide dans le goulot de laquelle on souffle en biais et qui émet une note de musique fonction du volume d'air. Pour notre application la capacité est le ballon de vapeur, le tube est la canalisation et le gaz est la vapeur d'eau. Il est vrai d'après la plupart de nos expériences que la fréquence évolue avec $\sqrt{\frac{S}{V}}$. Par contre, le reste est moins évident. Quel c et quel L

choisir ? A faible pression et relativement basse température (c'est notre cas) on peut assimiler la vapeur à un gaz parfait et calculer c en appliquant la formule de Laplace :

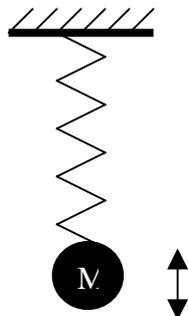
$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M_{mol}}} \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,32. \quad R = \text{constante des gaz parfaits} = 8314 \text{ J/kmol} \cdot ^\circ\text{C}. \quad T =$$

température en $^\circ\text{K} = 373$ à 400°K selon la surchauffe pour notre ballon. M_{mol} = masse molaire de l'eau = somme des masses atomiques de ses constituants : $\text{H}_2\text{O} = 15,9994 + 2 \times 1,0079 = 18,0152$. Ce qui donne $c \approx 485$.

Nous avons fait toute une série d'essais avec en sortie de ballon ($3,2 \text{ cm}^3$) un ajustage de 3mm de diamètre et 11mm de long prolongé ensuite par une canalisation + ou - longue et de + ou - gros diamètre. La fréquence était toujours la même : environ 4,7Hz. Or, l'application stricte de la formule de Helmholtz donnerait $f = 1290 \text{ Hz}$. Nous sommes très loin du compte ! Le moteur pop-pop n'est assurément pas un résonateur de Helmholtz ; ou s'il l'est, c'est invisible pour ce qui nous intéresse car c'est avec une fréquence élevée et une amplitude insignifiante.

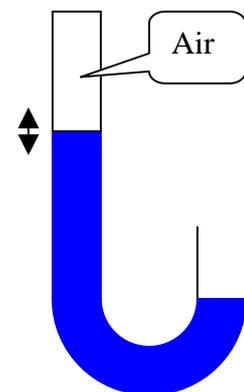
Depuis, nous avons fait d'autres mesures et rédigé un petit document sur le sujet. Voir "Moteur pop-pop et résonateur de Helmholtz".

13.2. Résonateur simple :



En mécanique le plus simple des résonateurs nécessite un point fixe auquel on suspend une masse M par l'intermédiaire d'un ressort de raideur k . Il suffit de déplacer un peu l'équilibre pour que ça se mette à vibrer à la fréquence $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$. Dans la pratique le mouvement s'amortit en raison des frottements avec l'air ambiant.

En hydraulique on peut faire la même chose en remplaçant le ressort par un gaz et la masse solide par une masse liquide. Le gaz et le liquide les plus disponibles sont l'air et l'eau. Il suffit d'emprisonner de l'air dans un tuyau dont on bouche l'une des extrémités. L'amortissement est plus important que pour le pendule précédent en raison des frottements de l'eau sur le tuyau.



13.3. Résonateur à deux masses :

Le point fixe des résonateurs décrits ci-dessus est une masse infinie. Lorsqu'un point fixe n'est pas disponible on a affaire à un résonateur à deux masses.

Du point de vue de la mécanique vibratoire on peut schématiser notre moteur pop-pop par deux masses couplées par un ressort. L'une des masses (M1) est celle du bateau (30g dans notre exemple) et l'autre est la masse moyenne de l'eau (M2) contenue dans la canalisation (environ 1,5g). Le ressort c'est la vapeur.



Dans un tel ensemble, quand M1 se déplace d'une distance d_1 vers la gauche, M2 se déplace vers la droite d'une distance $d_2 = d_1 \frac{M_1}{M_2}$. Les vibrations de l'eau dans la canalisation sont donc nettement plus importantes (en amplitude) que les vibrations visibles du bateau. Dans notre exemple il y a un facteur d'environ 20. Ceci permet de « voir » ce qui se passe dans la canalisation. Pour cela, il suffit de mettre à la place d'une tuyère un coude orienté vers le bas (ou mieux, 2 coudes orientés de part et d'autre si le moteur est muni de deux canalisations). Ainsi, l'hydrojet ne propulse plus le navire. En observant alors (avec une camera compte tenu de la fréquence) les vibrations du bateau on peut connaître par calcul l'amplitude des mouvements de l'eau dans la canalisation.

On peut aussi calculer la raideur apparente du ressort constitué par la vapeur puisqu'on connaît la fréquence (dans notre exemple 8Hz) en appliquant la formule d'un tel pendule.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k(M_1 + M_2)}{M_1 M_2}}$$

Pour notre exemple cela donne une raideur de l'ordre de 2,5N/m.

Remarques :

- Une telle démarche peut permettre de comparer différents moteurs pop-pop entre eux, ou d'évaluer les performances d'un moteur en fonction des réglages.
- La présence d'air mélangé à la vapeur peut selon le volume conduire à une diminution ou augmentation de fréquence. Des mesures ultérieures ont montré que c'était surtout la variation de longueur du serpent d'eau qui influençait la fréquence.
- A première vue le moteur pop-pop ressemble à un résonateur idéal puisqu'il n'y a pas d'amortissement, mais en réalité il est beaucoup plus compliqué qu'un simple résonateur car il y a un apport d'énergie par le foyer.
- Connaissant la pression moyenne (1 atmosphère – ρgh moyen de la surface libre de l'eau dans la canalisation), la raideur, la section de la canalisation et la course (2d) on peut calculer la pression mini ("piston" au point mort bas) et la pression maxi ("piston" au point mort haut). $P_{\max} = P_{atm} + \rho gh + \frac{kd}{S}$ et $P_{\min} = P_{atm} + \rho gh - \frac{kd}{S}$.

Pour notre jouet cela donne $P_{\max} < 103.10^3 \text{Pa}$ et $P_{\min} > 97.10^3 \text{Pa}$; c'est-à-dire des variations crête à crête de moins de $6000 \text{Pa} = 60 \text{mbar}$ soit environ 600mmCE.

14. Quelle est la nature de l'écoulement dans la canalisation ?

Pour le savoir il suffit de calculer le nombre de Reynolds. $\Re_e = \frac{VD}{\nu}$

Dans cette formule V est en m/s, D en m et ν est la viscosité cinématique en Stokes (m^2/s).

- Si $\Re_e < 1000$ l'écoulement est laminaire. La loi de Poiseuille s'applique. La perte de charge est proportionnelle au débit et à la viscosité, et inversement proportionnelle au diamètre à la puissance 4. L'état de surface interne de la canalisation (rugosité) importe peu. La perte de charge linéaire (=par mètre de tuyau) est $\lambda = \frac{64}{\Re_e}$
- Si $1000 < \Re_e < 2500$ l'écoulement est indéterminé. Souvent instable entre laminaire et turbulent.
- Si $\Re_e > 2500$ l'écoulement est turbulent. La perte de charge est approximativement proportionnelle au carré du débit, à la puissance 0,25 de la viscosité et inversement proportionnelle à la puissance 5 du diamètre. Si la paroi interne de la canalisation est lisse, la perte de charge linéaire est approximativement $\lambda = \frac{0,316}{\Re_e^{0,25}}$

Pour l'eau la viscosité cinématique en Stokes est environ 1.10^{-6} à 20°C , $0,66.10^{-6}$ à 40°C , $0,48.10^{-6}$ à 60°C , $0,37.10^{-6}$ à 80°C et $0,30.10^{-6}$ à 100°C . Pour nos exemples, avec une température un peu supérieure à 20°C on prendra $\nu = 0,9.10^{-6}$.

Pour notre jouet, avec amplitude de 40mm la vitesse maxi dans la canalisation est 1m/s. Le nombre de Reynolds correspondant est $\Re_e = 3667$; donc supérieur à 2500. Mais le mouvement étant approximativement sinusoïdal \Re_e oscille entre 0 et 3667.

Pour le prototype n°1 avec une canalisation de 6mm de diamètre nous avons noté une amplitude de 50mm et une fréquence de 4Hz ; ce qui donne une vitesse maxi de 0,625m/s. Le nombre de Reynolds correspondant est $\Re_e = 4166$; donc supérieur à 2500. Mais le mouvement étant sinusoïdal \Re_e oscille entre 0 et 4166.

Ces deux exemples donnent des nombres de Reynolds très voisins. Pour optimiser un moteur pop-pop il faudra donc prendre les précautions correspondant à un écoulement turbulent ; c'est-à-dire avoir la rugosité la plus faible possible dans la canalisation.

Pour le prototype n°2 avec une canalisation de 3mm de diamètre nous avons noté une amplitude maxi de 20mm et une fréquence de 3,3Hz ; ce qui donne une vitesse maxi de 0,1m/s. Le nombre de Reynolds correspondant est $\Re_e = 700$; donc inférieur à 1000. Ecoulement théoriquement laminaire, mais jusqu'à quel point compte tenu du mouvement alternatif ? En pratique on doit pouvoir dire que l'écoulement est laminaire quand dans la moitié supérieure de la canalisation l'eau est chaude, et turbulent quand l'eau est relativement froide.

15. Le moteur pop-pop idéal ?

Le point d'interrogation est intentionnel. A l'origine (lors de la rédaction première de ce document) nous avions des a priori. Maintenant nous avons quelques certitudes mais il reste bien des zones d'ombre. Comment pourrait être constitué le moteur idéal du point de vue rendement ?

Une seule canalisation (pour minimiser les pertes de charge). En fait, c'est assez facile à remplir avec une seringue et un tuyau fin.

Paroi interne de la canalisation lisse.

Ballon en cuivre épais. (Excellente conductibilité thermique : $390\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

Pas de membrane.

Canalisation en acier inoxydable. (Conductibilité thermique nettement moins bonne que celle du cuivre : $15\text{W/m}^\circ\text{K}$)

Bouclier thermique entre foyer et canalisation

Canalisation en pente sur une grande longueur là où va évoluer l'interface.

Petit volume V du ballon (pour que les variations de pression soient plus grandes).

Epaisseur importante et/ou grande surface inférieure du ballon (100 fois S) pour favoriser la vaporisation instantanée.

Section de la canalisation telle que $S \approx \frac{V}{100}$ avec S en mm^2 et V en mm^3 .

Forme de la tuyère : voir document portant ce nom.

Relations entre la longueur de la canalisation et sa section ?

Enfin, l'application idéale consisterait à mettre côte à côte deux moteurs en opposition de phases pour annuler les vibrations du bateau. On est dans le domaine du rêve. Sur une machine aussi simple il n'y a rien qui permette de faire un tel asservissement ; d'autant que ce serait contre nature puisque les mouvements longitudinaux du bateau engendrés par l'un des moteurs ne peuvent que favoriser la mise en phase de l'autre.

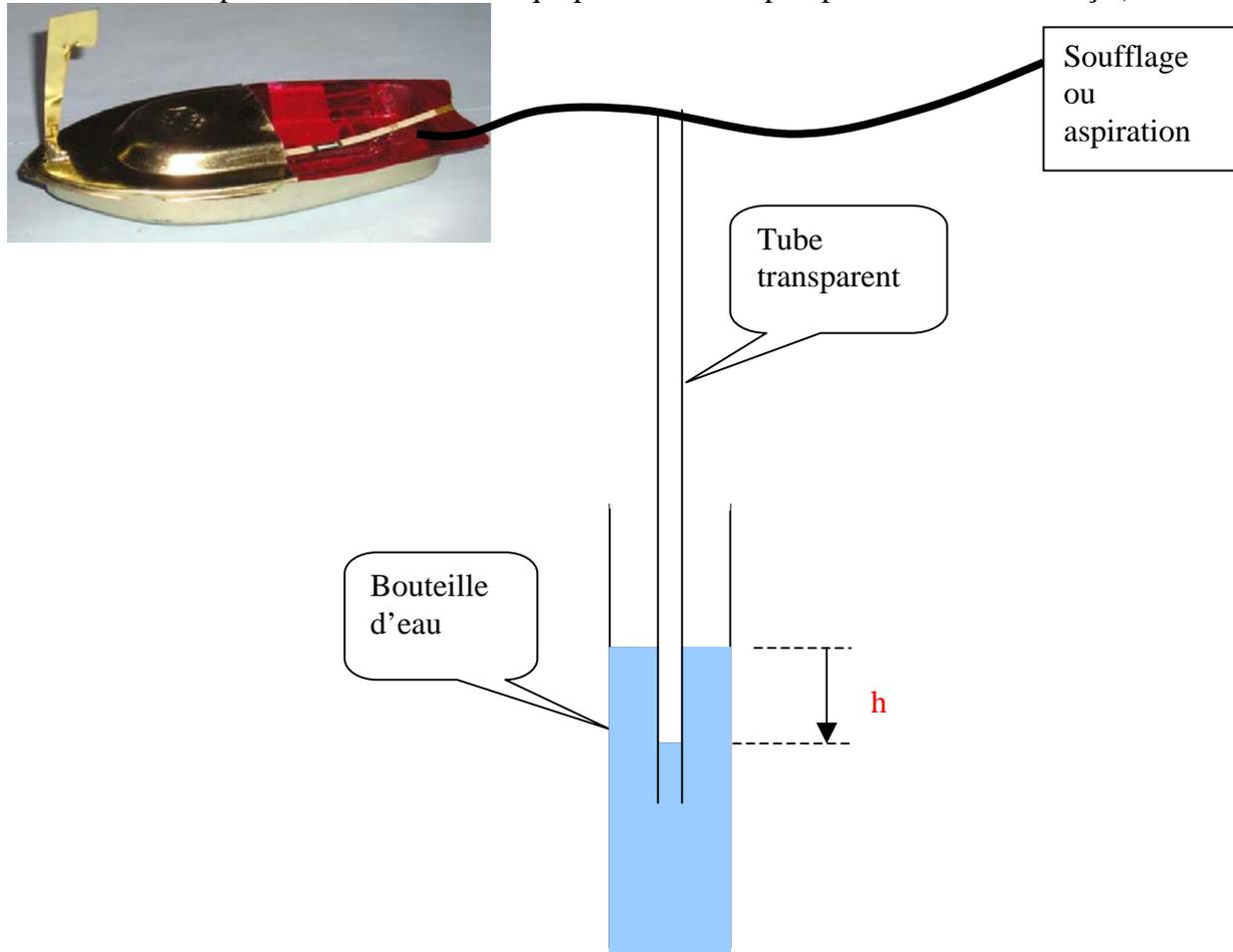
P.S : A l'exception de quelques retouches, tout ceci a été écrit en février 2005 avant de contacter des amateurs et/ou spécialistes de moteurs pop-pop. Il y a encore des choses à clarifier et quelques points de divergence subsistent entre les passionnés.

- Bien que de nombreux essais démontrent à nos yeux la perte de rendement apportée par une membrane il y a encore des partisans inconditionnels de la membrane. Nous y souscrivons seulement pour le côté ludique et pour sa contribution à la facilité de fonctionner du moteur.
- Il existe des moteurs avec ballon « sec » (la plupart des nôtres) et des ballons dans lesquels il y a toujours de l'eau.
- Il y a des moteurs qui refusent de démarrer ou qui n'entretiennent pas leur mouvement sans qu'on sache pourquoi.
- Il y a quelquefois de grandes différences de performances dans des conditions d'essai pourtant a priori similaires.

...Le sujet n'est pas clos.

Caractéristiques du générateur de bruit.

Pour évaluer les pressions mises en jeu pour déformer la membrane le montage suivant a été réalisé et alimenté avec de l'air comprimé. (C'est un peu pompeux, le compresseur étant en l'occurrence les poumons de l'auteur... qui peut-être vous pompe de l'air avec tout ça.)



Résultats :

- Mise sous pression lente. Pour $h=66\text{mm}$ la membrane devient brutalement convexe et émet un pop. Au-delà il ne se passe plus rien.
- Relâchement progressif. Pour $h=36$ la membrane émet un autre pop un peu plus léger et reprend sa position d'origine presque plane.
- Mise en dépression lente. Pour $h=-20$ la membrane devient concave et émet encore un pop. Lorsque la dépression augmente il ne se passe plus rien.
- Relâchement progressif du vide et mise sous pression lente. La membrane se déforme un peu, mais sans bruit. Elle reste légèrement concave, puis passe brutalement convexe pour $h=66\text{mm}$.

Il y a donc une sorte d'hystérésis classique dans un sens et en deux temps dans l'autre. Cela n'est probablement pas volontaire. C'est une conséquence du bricolage artisanal et des précontraintes dans la membrane lors du soudage à l'étain.

Quand on passe brutalement alternativement de pression à dépression on retrouve bien le pop-pop caractéristique. Un pop franc dans chaque sens.