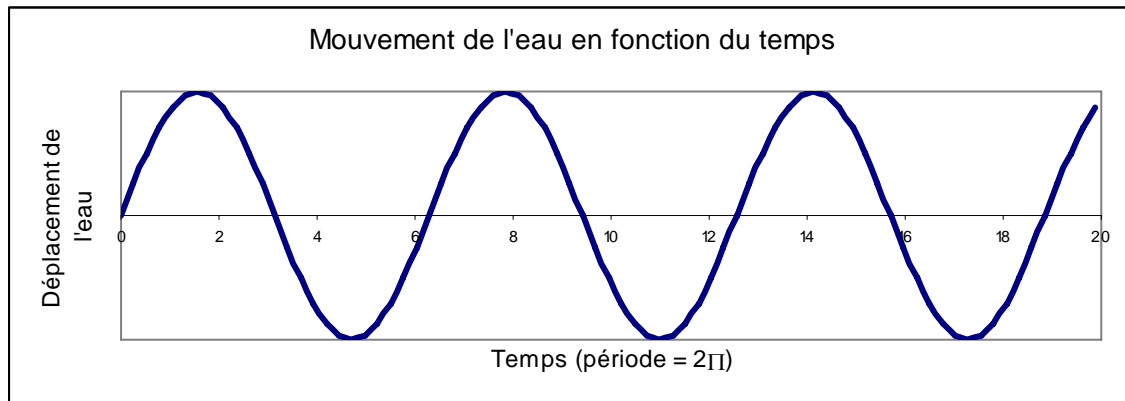


Moteur pop-pop et analogie électrique

Par Jean-Yves

Il est raisonnable de penser que le mouvement de l'eau dans la canalisation d'un moteur pop-pop est sinusoïdal. Cette hypothèse est confortée – grâce à des expériences menées sur des canalisations transparentes – par l'observation de l'interface eau-vapeur et par l'observation du déplacement de particules en suspension dans l'eau.



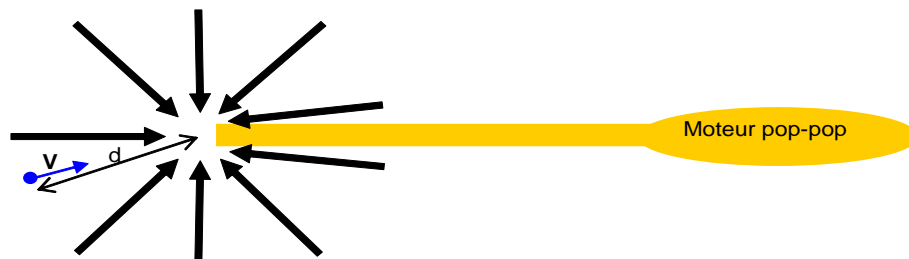
Le Professeur Le Bot a fait des mesures de poussée, et nous avons fait des mesures de débit à 1 ou 2 cm de l'extrémité de la canalisation. Ni la balance de poussée, ni le débitmètre ne voient la partie négative de la sinusoïde. On peut le justifier par l'explication suivante.

Phase de propulsion :



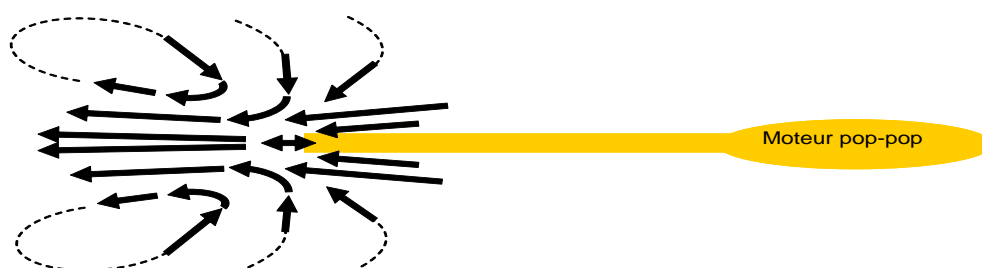
L'eau sortant entraîne l'eau avoisinante dans la même direction. Dans l'axe de la tuyère la vitesse est élevée.

Phase de relaxation :



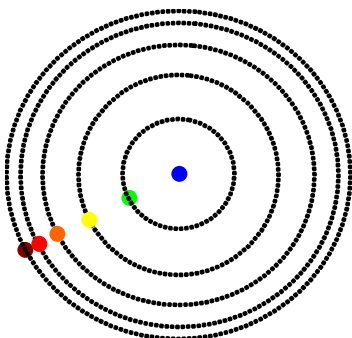
Il se crée une dépression qui attire de toutes parts l'eau avoisinante. Si l'on excepte la canalisation elle-même, on peut considérer que dans toute direction on trouve deux mouvements de sens opposé dont les actions s'annulent. De plus, dès qu'on s'éloigne de l'orifice d'aspiration la vitesse devient faible.

Superposition :

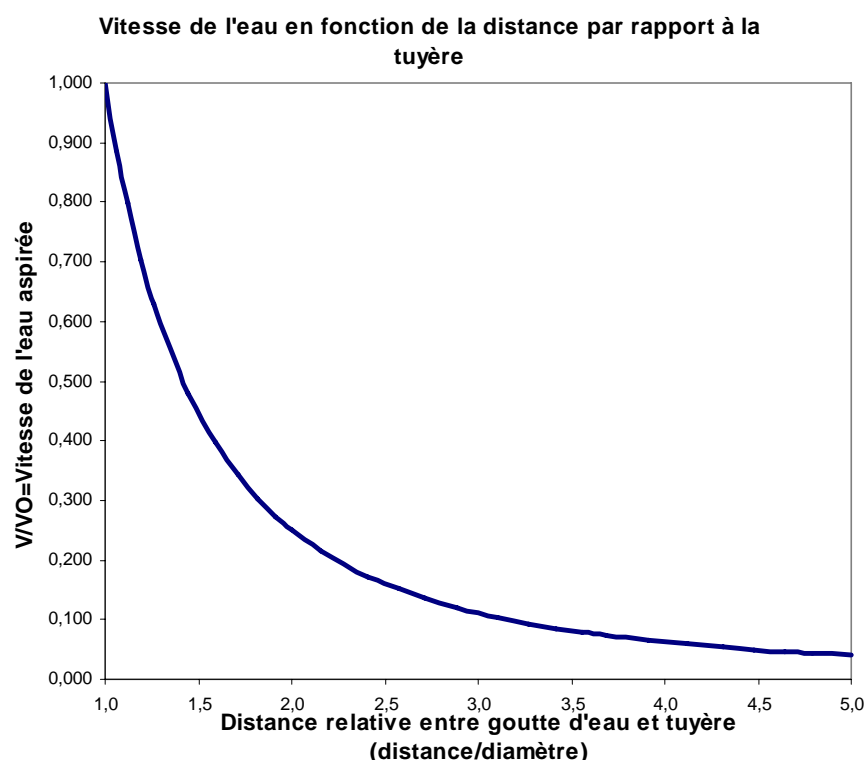


1°) Approche mathématique de la phase de relaxation :

L'eau étant incompressible, lorsqu'une petite quantité est aspirée par la canalisation (une sphère de rayon R , volume $4/3\pi R^3$), celle-ci est remplacée par l'eau provenant de la sphère de volume initial double qui l'entourait, et l'eau de celle-ci par celle de la sphère de volume initial triple qui l'entourait, et ainsi de suite.



Considérons une goutte d'eau (en couleur sur le schéma). A chaque intervalle de temps successif elle occupe les positions représentées en marron, puis, rouge, orange, jaune, vert et bleu. A l'instant "t" elle est située à une distance "d" du *trou noir* qui l'attire. Pour simplifier, on négligera dans l'application numérique le petit volume d'intersection entre la sphère et la canalisation. La goutte est animée d'une vitesse "V" qui est la dérivée de "d" par rapport au temps. On peut représenter l'évolution de cette vitesse en fonction de la distance de la goutte d'eau par rapport au centre de la dépression.



Ce graphique montre par exemple qu'à une distance de 3 fois le diamètre de la tuyère la vitesse est déjà divisée environ par 10.

2°) Approche visuelle :

Nous avons observé des particules solides en suspension dans l'eau.

Lorsqu'on procède à une aspiration permanente, on les voit de toutes parts se rapprocher très lentement, puis un peu plus vite et enfin rapidement pénétrer dans la tuyère ; ce qui confirme ou justifie l'approche mathématique.

Lorsque le fonctionnement est alternatif (cas d'un moteur pop-pop), les particules éloignées latéralement ont un mouvement plus ou moins elliptique (comme les deux boucles fermées sur l'image de superposition). On a pu à plusieurs reprises les observer tourner ainsi pendant plus d'une dizaine de minutes. Les particules qui pénètrent dans le col de la tuyère sont animées d'un mouvement alternatif. Mais dès qu'elles s'éloignent un tant soit peu du col dans le prolongement immédiat de la tuyère elles sont animées d'un mouvement axial (vers la gauche sur le dessin) dont l'amplitude et la vitesse dépendent de la distance.

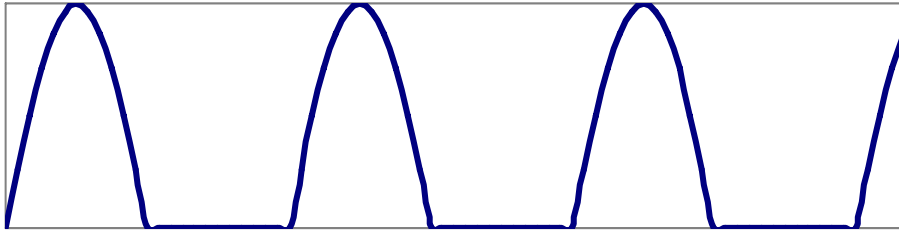
Enfin, ajoutons (même si nous n'en tiendrons pas compte par la suite) que du fait de l'incompressibilité et de la masse volumique importante de l'eau, et du fait que les tuyères de moteurs pop-pop sont peu immergées les amplitudes et vitesses de déplacement sont en réalité un peu plus importantes près de la surface que latéralement ou sous la tuyère. Lorsque l'aspiration est

importante (qu'elle soit continue ou alternative) il se forme une déclivité à la surface de l'eau au-dessus de la tuyère.

Tout ceci avait pour but de montrer la profonde dissymétrie de l'écoulement en dehors de la canalisation. En pratique lors de la phase de relaxation on ne mesure ni poussée ni débit dès qu'on s'éloigne un tout petit peu de la tuyère.

3°) Débit utile en fonction du temps :

Le débit utile (pour la propulsion) en fonction du temps peut donc se représenter de la façon suivante.



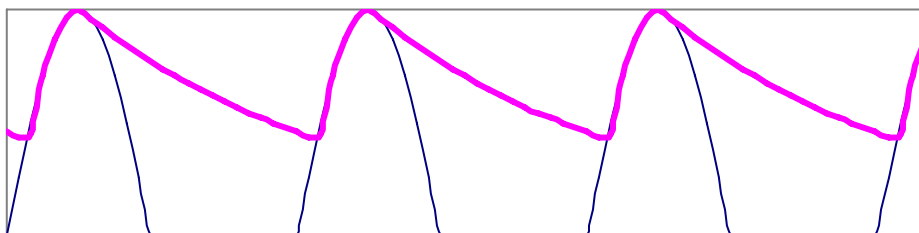
Le débit maximum de l'hydrojet sinusoïdal est $Q_{\max} = \pi \cdot \text{Cylindrée} \cdot \text{Fréquence}$

Analogie électrique :

En courant alternatif, la courbe ci-dessus ressemble à celle que délivre un redresseur simple alternance (une seule diode). Nous allons pousser plus loin l'analogie électrique. La valeur moyenne de la vitesse est $v_0 = \frac{C.F}{S}$, et le débit volumique moyen est $Q_{\text{moy}} = \frac{\pi}{2} C.F$, mais quelle sont les valeur efficaces ? Ce sont celles qui donneraient le même résultat qu'un jet continu quant à la poussée sur une longue période d'observation (ou sur un nombre entier de périodes).

$$V_{\text{eff}} = \frac{\pi}{2} v_0 \quad Q_{\text{eff}} = \frac{\pi^2}{4} S \cdot v_0$$

Mais en pratique, le débit vu par le débitmètre (ou la poussée vue par la palette) ressemble à la tension après un redresseur simple alternance, suivi par un condensateur et une résistance. Quand la fréquence est élevée le débit (ou la tension) est près du débit de crête. Quand la fréquence diminue le débit aussi.



Au démarrage d'un moteur pop-pop, le débit et la poussée sont nuls. Mais nous négligerons cette phase qui ne dure pas longtemps. Ensuite, si RCF (constante de temps x Fréquence) était infini le débit serait égal à la valeur de crête. Et si RCF était nul le débit serait la valeur de crête divisée par $2\sqrt{2}$. La réalité se situe entre ces deux extrêmes.

Que peuvent représenter C et R ?

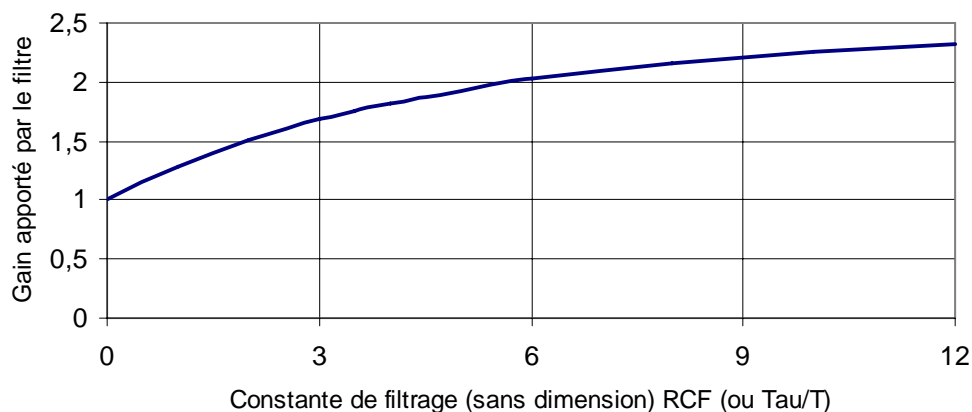
La capacité du condensateur correspond à l'inertie de l'eau en mouvement et à celle de l'appareil de mesure. Le condensateur accumule de l'énergie ($E = \frac{1}{2} \int_0^t QV^2 dt$) quand la vitesse de l'eau sortant de la tuyère augmente, et la restitue quand la vitesse diminue. La résistance représente

les pertes mécaniques dues au brassage (frottements fluides) de l'eau. Cette énergie devient de l'énergie calorifique qui se dissipe dans l'eau avoisinante. (Rien ne se perd, rien ne se crée...).

Si T est la période du pop-pop, le débit efficace peut être défini par analogie avec les formules utilisées en électricité par : $Q_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t)^2 dt$, $Q(t)$ étant le débit à l'instant t .

Lorsqu'on détermine un filtre en électronique il est d'usage de simplifier en prenant la pente de décharge à l'origine, mais notre filtre étant mauvais (on le verra bientôt), et les fonctions sinus et exponentielle étant bien connues, il est facile et plus correct avec un PC de calculer Q_{eff}/Q_p en fonction de RCF. Et comme on sait que $Q_p = \pi(Vol \times F)$, on peut tracer $Q_{eff}/(Vol \times F)$ en fonction de RCF.

Valeur efficace après filtre/valeur efficace avant filtre



Des mesures simultanées de poussée sur une palette et de traction sur l'amarre d'un bateau pop-pop nous ont montré que l'indication fournie par la palette était surévaluée. L'excès d'indication varie suivant les moyens d'essai ; en particulier selon les dimensions du bac et la surface de la palette. Prenons par exemple une surévaluation de 50%. En rentrant 1,5 en ordonnée sur le graphe ci-dessus, on peut déterminer le coefficient RCF qui a pour valeur 1,8. Cela signifie que le débit pratique a l'allure de la courbe suivante.

Débit ou poussée en fonction du temps

