

Banc d'essai de tuyères pour moteurs pop-pop

Par Jean-Yves

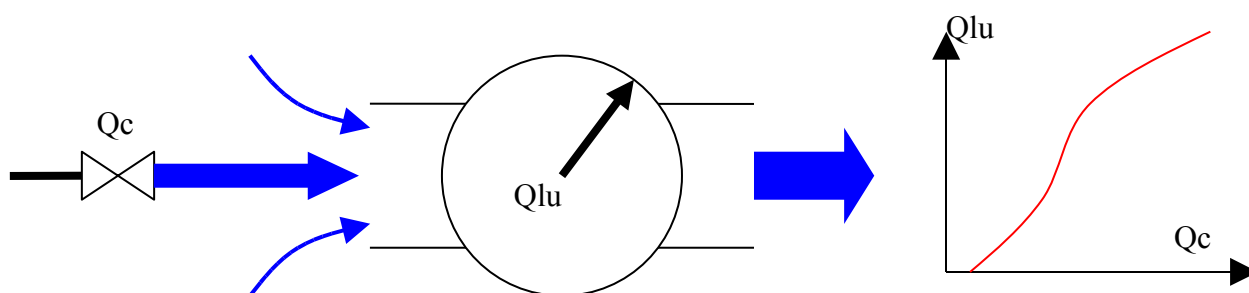
But ultime : pouvoir mesurer et optimiser les performances hydrauliques de moteurs pop-pop.

Pour ce faire, il fallait construire et calibrer un banc d'essai. Etant donné qu'auparavant divers essais de balances de poussée n'avaient pas donné des résultats assez fiables, une autre direction a été recherchée : celle de la mesure du "débit efficace" d'un hydrojet pulsé. Ce qu'on appelle ici "débit efficace" d'un jet pulsé c'est la valeur de débit continu Q_c qui donnerait le même résultat global que le débit alternatif étudié Q_a en terme d'eau déplacée. (On peut faire une comparaison avec courant continu et courant alternatif en électricité).

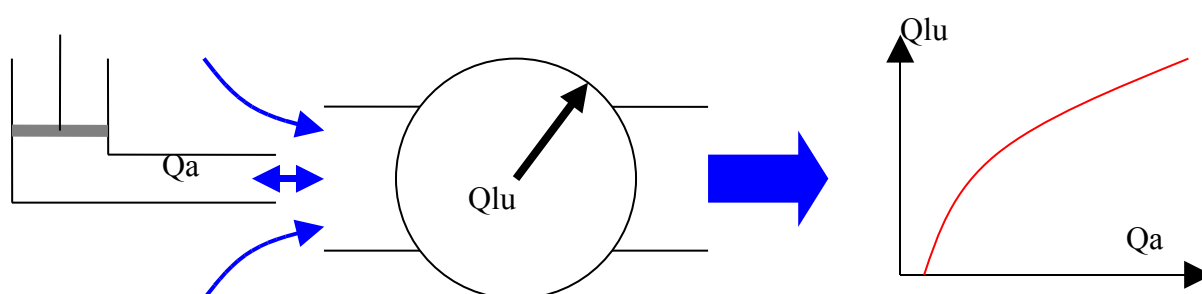
En hydraulique, c'est peut-être quelque chose de connu de quelques spécialistes, mais nous n'avons pas trouvé de publication sur ce sujet. Alors il a fallu *se prendre par la main et faire avec les moyens du bord*. La récupération d'un compteur d'eau lors de la rénovation d'un appartement a été le point de départ de ce banc d'essai.

1°) Principe de la mesure.

1.1. Etalonnage en débit continu



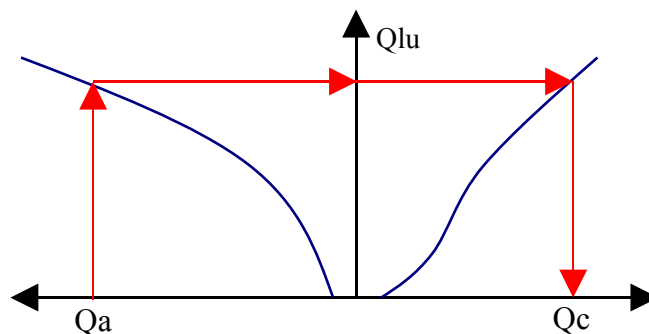
1.2. Etalonnage en débit alternatif



1.3. Comparaison

On connaît la valeur du débit continu Q_c et celle du débit alternatif Q_a qui génèrent chaque valeur du débit lu Q_{lu} .

On peut donc établir une relation entre Q_a et Q_c .



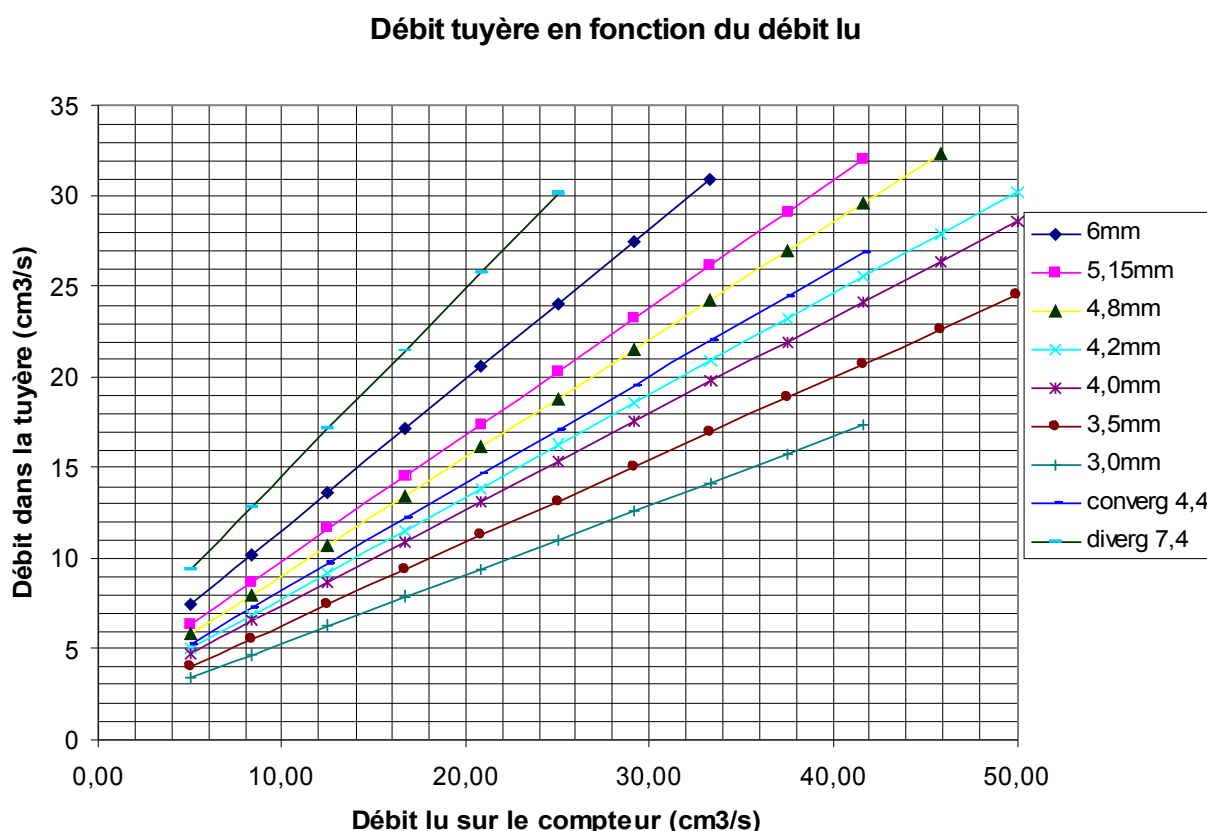
1.4. Test d'un moteur pop-pop.

Ce n'est pas le but de ce document. Ce sera pour plus tard. Le débit alternatif sera alors celui d'un moteur pop-pop. On en reparlera.

2°) Etalonnage en débit continu.

Pour l'alimentation de la tuyère représentant la sortie d'un moteur pop-pop (voir annexe 2), il a été confectionné un château d'eau (5 litres) situé environ 1,5m au-dessus du débitmètre et muni de graduations de volume. Entre ce château d'eau et la tuyère se trouvait une vanne de réglage de débit et une vanne de sectionnement. A chaque essai le château d'eau était rempli, la vanne de réglage ouverte d'un nombre de tours connu, puis la vanne de sectionnement ouverte, et après stabilisation du débit le chronomètre était déclenché entre deux graduations du château d'eau et le débit mesuré sur le compteur.

Le résultat sous forme graphique est le suivant :



Et il peut se résumer approximativement par une seule formule mathématique :

$$Q_c = (0,15 \times D - 0,07)(Q_{lu} + 4)$$

Avec Q_c = débit continu à travers la tuyère en cm³/s.

Q_{lu} = débit vu par le débitmètre en cm³/s.

D = diamètre de la tuyère en mm.

Nota 1 : Le terme 4 représente le débit minimum en dessous duquel le compteur ne tourne pas.

Nota 2 : La formule est donnée pour information seulement, car les coefficients qu'elle comporte sont spécifiques de ce banc d'essai.

Nota 3 : Les courbes sont volontairement limitées aux valeurs figurant sur ce diagramme car au-delà elles ne sont plus linéaires.

Des essais de flux inversé ont été faits avec quelques tuyères. (Cela signifie qu'on a aspiré de l'eau au lieu d'en refouler). Malgré des débits quelquefois importants (plus de $40 \text{ cm}^3/\text{s}$) le compteur (intrinsèquement rigoureusement réversible) n'a jamais tourné. Il était visible que l'eau était essentiellement aspirée latéralement. La surface libre creusait au-dessus de l'extrémité de la tuyère... jusqu'à aspirer de l'air dans les cas extrêmes par les ouïes (trous latéraux de diamètre 9. Voir photos et dessin).

3°) Etalonnage en débit alternatif

Après deux tentatives douteuses avec des pompes à membranes l'étalonnage a été réalisé à l'aide d'une pompe alternative à piston à cylindrée connue entraînée par un système bielle-manivelle très long afin de reproduire un mouvement pratiquement sinusoïdal. Le montage réalisé a permis de tester 4 courses différentes de piston ; donc 4 cylindrées.

Pour chaque essai nous avons pu mesurer :

Fréquence (F)

Indication du débitmètre (Q_{lu})

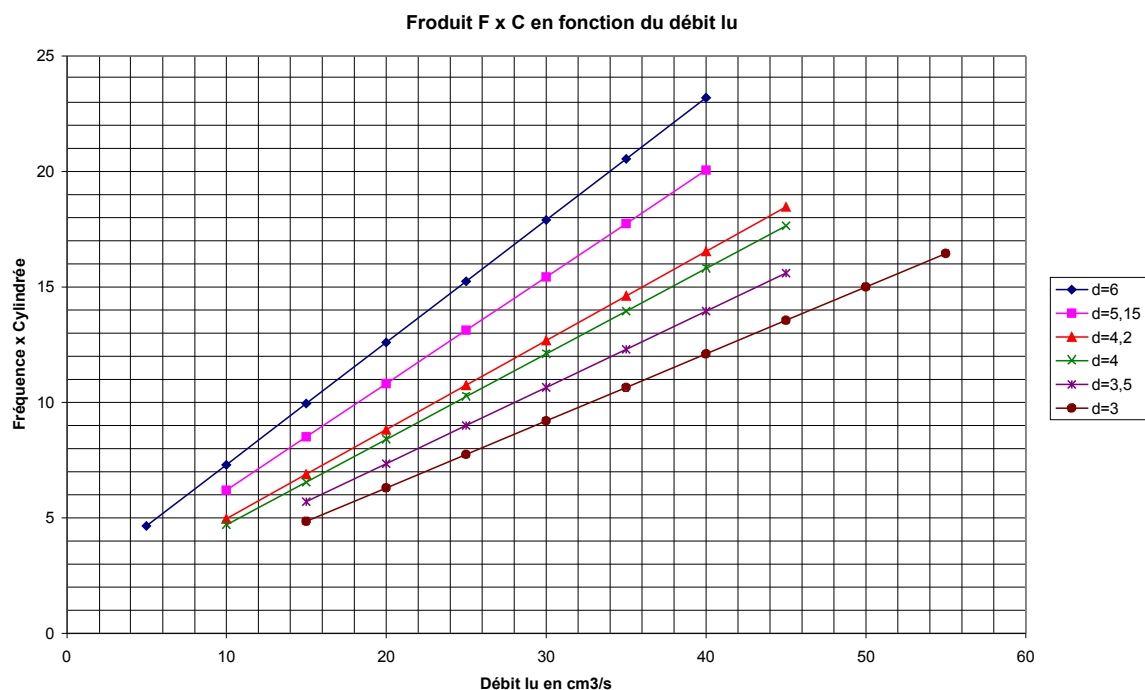
et nous connaissions la **cylindrée** et le **diamètre de tuyère**.

11 tuyères ont été testées à fréquence variable et cylindrée $3,6 \text{ cm}^3$. 5 d'entre elles jugées les plus représentatives ont été testées avec 4 cylindrées différentes. Et à chaque fois une dizaine de mesures. Toutes les mesures sont cohérentes.

Comme lors de l'étalonnage avec un débit continu nous avons alors obtenu pour chaque série de mesure des points alignés à la précision des mesures près.

Lors d'une analyse détaillée il est apparu que les tuyères particulières (convergent, divergent, tuyau épais) étaient plutôt moins performantes que les autres. Nous ne les avons pas représentées sur le graphe final car il serait inutile d'employer de telles tuyères lors de la conception d'un moteur pop-pop. Par ailleurs, en dessous de $F \times C = 5 \text{ cm}^3/\text{s}$ les points n'ont pas été pris en considération car pour toute tuyère ils s'éloignent de la zone de linéarité.

Le résultat sous forme graphique est le suivant :



L'ensemble de ce graphique peut se résumer approximativement par une la formule mathématique suivante :

$$F \times V = 0,095 \times D \times Q_{lu} + 0,5 \times D - 1$$

Avec F= Fréquence en Hz

V= cylindrée en cm³.

Q_{lu}= débit vu par le débitmètre en cm³/s.

D = diamètre de la tuyère en mm.

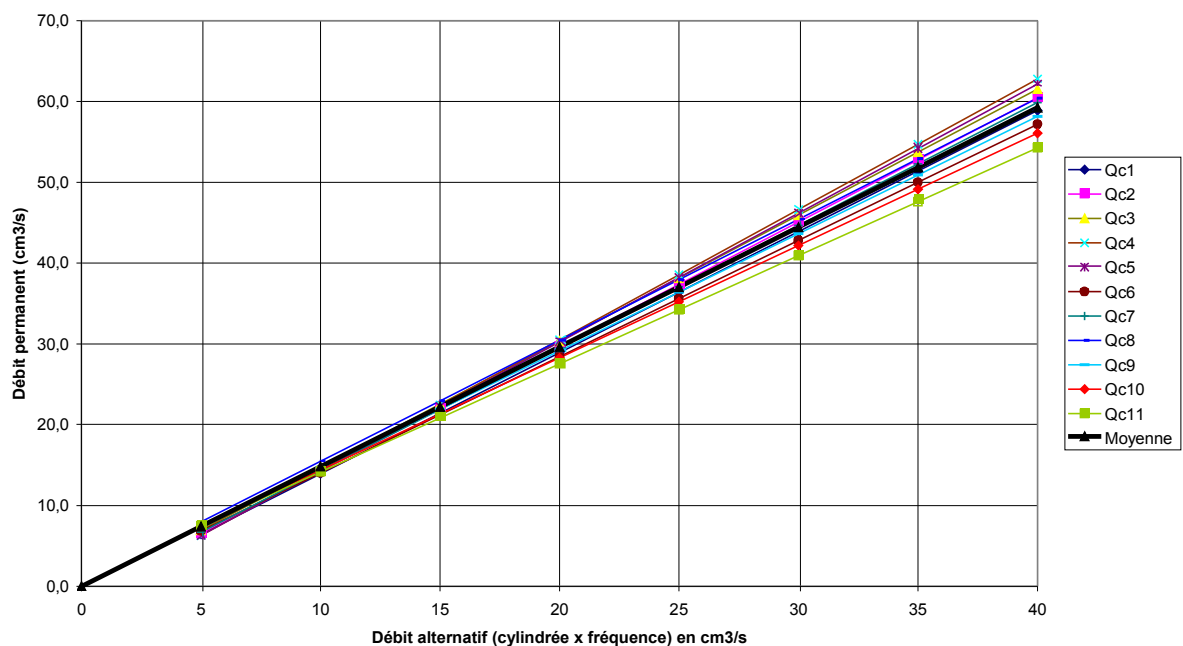
Grâce à cet étalonnage, nous disposons d'un outil qui nous permettra plus tard de tester des moteurs pop-pop. L'indication "Q_{lu}" du compteur et le diamètre de tuyère nous permettront de connaître le produit "Cylindrée x Fréquence". Et la mesure de la fréquence conduira à la connaissance de la cylindrée.

4°) Comparaison

Nous avons repris les courbes individuelles et à chaque valeur Q_a nous avons associé la valeur Q_c donnant la même indication Q_{lu} sur le débitmètre.

Les points d'abscisse Q_a et d'ordonnée Q_c ont été représentés sur un graphique.

Débit permanent qui donnerait le même résultat qu'un débit alternatif (pour différentes tuyères).



Il était évident a priori, mais ce graphique le montre, que (à la précision des mesures près) les courbes passent par zéro. N'ayant rien mesuré en dessous de 0,8Hz (et les mesures en dessous de 5 cm³/s étant douteuses ou nulles, aussi bien en débit continu qu'en débit alternatif), nous avons ajouté le point d'abscisse et d'ordonnée zéro et effectué la moyenne géométrique.

Pour l'ensemble des 11 tuyères testées, Q_c=1,48xQ_a à mieux que 10% près.

5°) Conclusions :

1°) Si on définit le débit d'un hydrojet pulsé par le produit *Cylindrée x Fréquence*, son efficacité est supérieure à celle d'un hydrojet continu. Le rapport entre les deux est approximativement 1,5 quel que soit le diamètre de la tuyère.

2°) Les nombreuses mesures effectuées montrent que ce facteur tend à augmenter avec le diamètre de tuyère. Les extrêmes mesurés sont 1,56 avec tuyère divergente de diamètre 7,4 mm, et 1,35 avec tuyère cylindrique de diamètre 3 mm. L'évolution est trop faible et l'incertitude sur les mesures trop grande pour définir raisonnablement une loi.

3°) Cela ne faisait pas partie du but recherché, mais lors des essais nous avons remarqué ce qui suit. Pour un débit donné, l'efficacité d'un hydrojet continu ne dépend que du diamètre intérieur de la tuyère. Par contre, un hydrojet alternatif est plus performant quand la tuyère est mince et dégagée (afin de favoriser la relaxation).

4°) Maintenant nous disposons d'un outil qui permettra de tester des moteurs pop-pop. L'indication du compteur nous permettra de connaître le produit "*Cylindrée x Fréquence*". Pour les moteurs à membrane il sera facile de connaître la fréquence et donc d'en déduire la cylindrée. Pour les moteurs à spires, et pour ceux qui ont un ballon sans membrane il reste à trouver un moyen (simple) de faire la même chose. Merci d'avance pour vos suggestions.

Nota : Toutes les mesures permettant d'arriver à cette conclusion ne sont pas des mesures faites avec des appareils certifiés. Cependant, les mêmes outils ont été utilisés pour toutes les mesures et quelques essais ont été répétés plus tard et ont donné mes mêmes résultats.

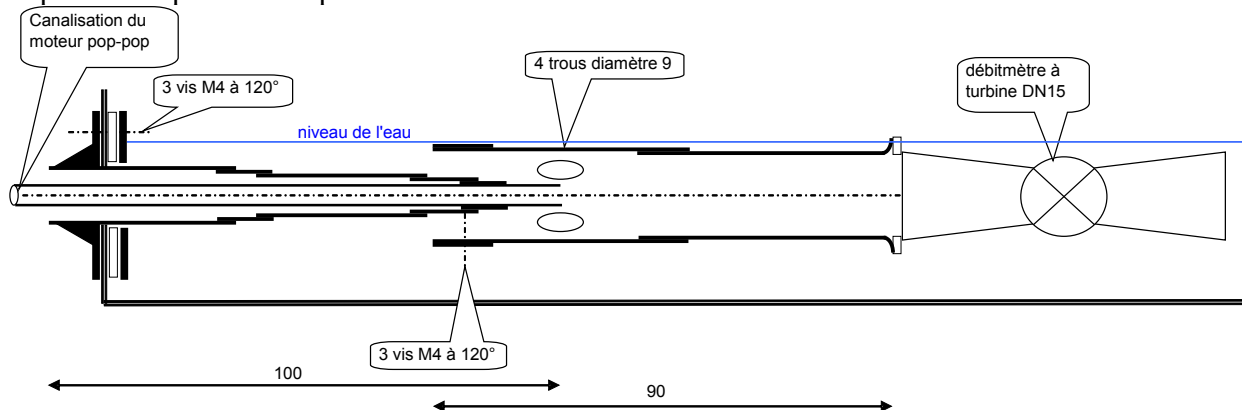
Le banc d'essai avec ses moyens d'étalonnage sera conservé quelques temps en l'état pour répondre à des propositions éventuelles d'essais complémentaires.

Annexe 1

Conception du banc d'essai.

Le cœur du banc d'essai est un compteur d'eau, mais ce n'est pas suffisant. Après quelques tâtonnements, nous avons confectionné à l'entrée du débitmètre une pièce d'adaptation destinée à recevoir le jet de la tuyère. Telle que cette pièce a été finalement réalisée, le résultat est peu influencé par un mauvais centrage ou une mauvaise orientation de la tuyère.

Le plan de la pièce d'adaptation est donné ci-dessous.



C'est la pièce qui fait 90mm de long. La pièce située sur sa gauche sera utilisée plus tard avec des moteurs pop-pop. La partie immergée de la canalisation est très courte, et cette canalisation est quasiment horizontale comme c'est généralement le cas sur les bateaux pop-pop.

Le plan est à l'échelle. En partant de la gauche les tuyaux cuivre brasés les uns dans les autres font respectivement 14x1, 12x1, 10x1, 8x1, 6x1 et 5x0,4 pour la canalisation en laiton représentant celle du moteur pop-pop (dans ce cas).

Pour la pièce d'entrée du débitmètre : 24x1, 22x1 et 20x1. La bague de 24x1 a juste pour but de doubler l'épaisseur pour les trous taraudés M4.



Ensemble de mesure hors de l'eau

Ainsi, grossièrement, le débitmètre voit la quantité positive de mouvement de l'eau, et il ne voit rien durant la phase de relaxation.

Annexe 2 :

Influence de forme et dimension de tuyère.

11 tuyères différentes ont été testées afin d'avoir une cartographie des performances en fonction des formes et dimensions. Il s'avère que les formes importent très peu. Seule la section de l'orifice de sortie compte (dans la mesure où convergent ou divergent respectent les petits angles usuels en hydraulique).



Caractéristiques des tuyères:

Repère	diamètre intérieur	diamètre extérieur	forme de l'extrémité
#1	6	8	coupe droite
#2	6	8	chanfrein intérieur à 45°
#3	6	8	chanfrein extérieur à 45°
#4	6/4,4	8/6,4	convergent de 6 à 4,4 à faible conicité
#5	6/7,4	8/9,1	divergent de 6 à 7,4 à faible conicité
#6	5,15	6	coupe droite
#7	4,8	8	coupe droite (tube épais)
#8	4,2	5	coupe droite
#9	4	4,4	coupe droite (tube mince)
#10	3,5	4	coupe droite (tube mince)
#11	3	4	coupe droite

Etalonnage en débit continu.

En amont, la tuyère à tester était montée sur un support amovible muni d'un dispositif de changement rapide.



Le bac (blanc) est horizontal et plein. Il déborde sur les deux côtés pour éviter une re-circulation.

Annexe 3.

Génération d'un hydrojet pulsé.

Matériel principal utilisé pour générer un hydrojet pulsé :

- Une pompe alternative
- Un système bielle-manivelle
- Une perceuse avec variateur de vitesse

Matériel complémentaire :

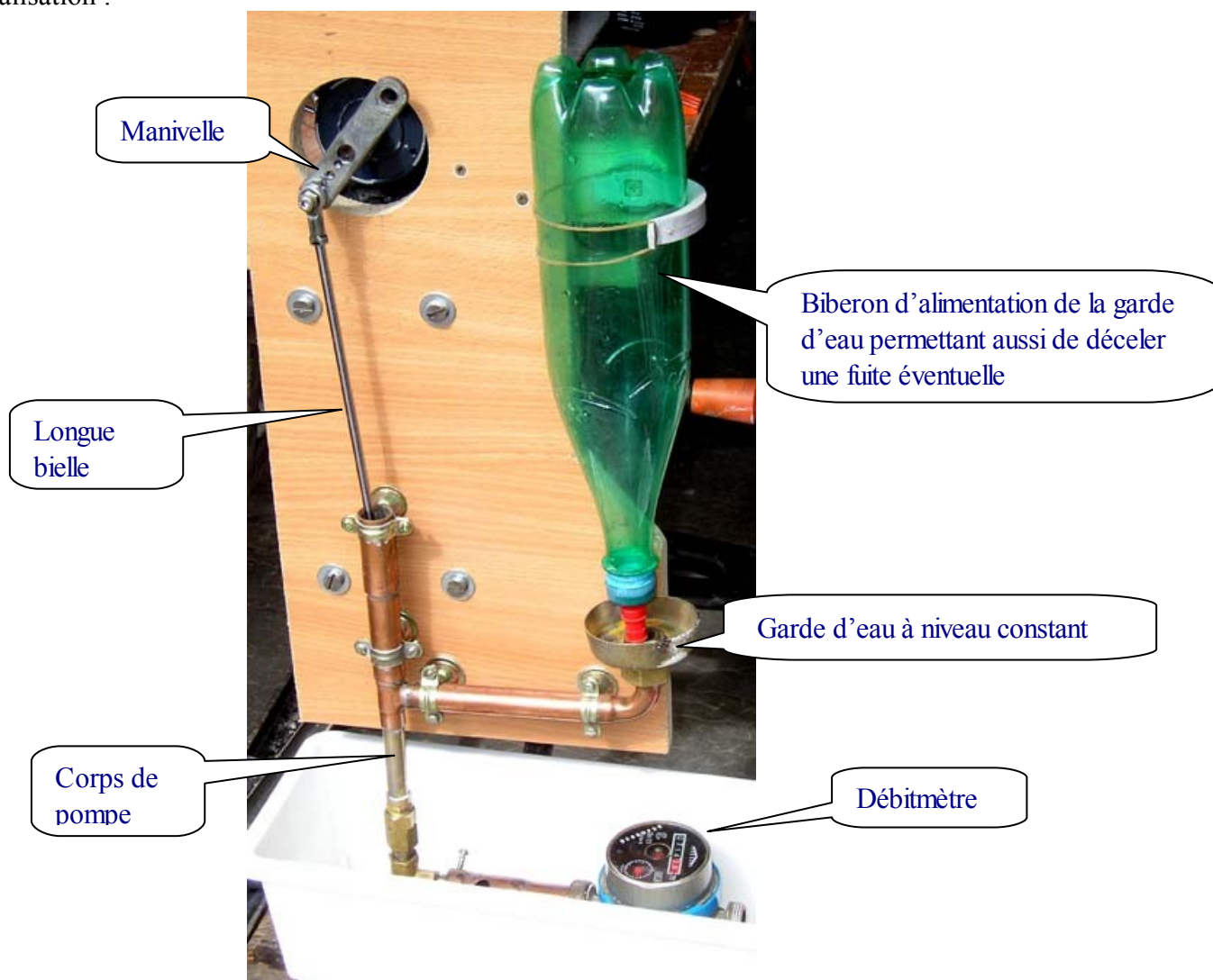
- Un arbre et deux roulements (un vieux touret à meuler) car les roulements à billes de la perceuse ne sont pas faits pour supporter une charge radiale.
- Un cardan (pour compenser un éventuel désalignement)
- Une chaîne de mesure tachymétrique

Compte tenu de problèmes rencontrés avec les pompes à membranes des premiers essais, d'une part il a été conçu une pompe à piston avec garde d'eau d'étanchéité à l'air ; et d'autre part un nouveau banc mécano-soudé plus rigide a été réalisé.

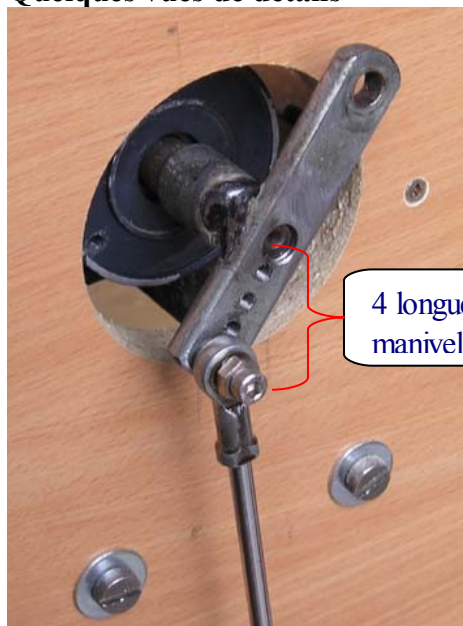
Principe :

Pour ceux que ça intéresse je peux envoyer le fichier « plan de pompe ».

Réalisation :



Quelques vues de détails



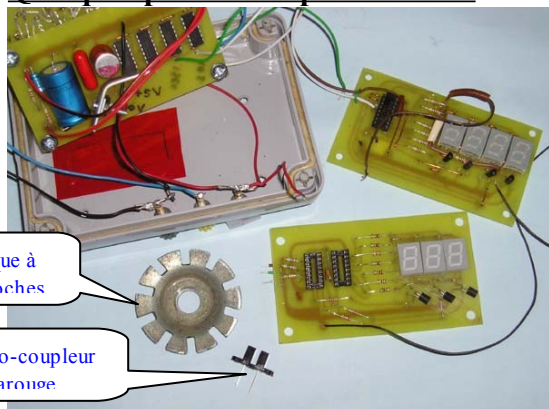
4 longueurs de manivelle



Déversoir de trop-plein

Bac à niveau constant

Quelques photos complémentaires



Disque à encoches

Opto-coupleur infrarouge

La tachymétrie du début
Beaucoup d'énergie pour peu de résultats



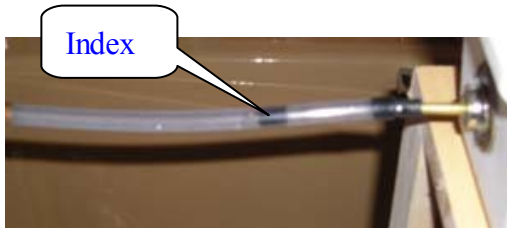
Celle de la fin (cage de Faraday
fournie par Bonduelle ou Cassegrain)



Le coin électronique



La came (en plexiglass) et son graissage
(mèche de lampe à pétrole imbibée d'huile)



Mesure de cylindrée



Cardan d'entraînement (Facom (!))

Annexe 4

Problèmes rencontrés avec la première pompe.

La pompe était une pompe à essence de voiture. Pompe à membrane. Elle était serties. Nous ne savions pas comment c'était fait dedans.

L'analyse des premiers résultats a montré une diminution de la cylindrée apparente lorsque la fréquence augmentait. Nous avons alors mesuré cette évolution de deux manières différentes. 1°) En cours d'essai à l'aide d'un index (petit cylindre en plastique de densité 1) situé dans le tuyau transparent reliant la pompe à la tuyère.

2°) Lors d'un essai spécifique en installant après la tuyauterie une colonne verticale et en observant le déplacement de la surface libre.

Résultat surprenant : après un palier à cylindrée constante, ce paramètre évolue de façon hyperbolique en fonction de la fréquence. Plus tard, lors d'une autopsie destructrice nous avons découvert que cela était dû à la présence volontaire (par construction) d'air qui ne pouvait pas s'échapper.

