

# Cycle pop-pop

## Théorie et pratique

### 0. Avant propos :

L'étude qui suit concerne le cycle pression-volume d'un moteur pop-pop lors de son fonctionnement *normal* ; c'est-à-dire le fonctionnement moyen qu'il est capable d'assurer pendant plusieurs minutes. Elle fait suite à différentes études "théoriques" prédictives (voir [www.electicspace.net](http://www.electicspace.net), rubrique pop-pop, "La page de Jean-Yves", notamment "Représentation du cycle d'un pop-pop") qu'elle reprend partiellement (1. Théorie) et que surtout elle complète avec l'établissement expérimental, et donc en ce sens "réel", du diagramme pression-volume d'un moteur pop-pop, ce qui jusqu'à maintenant ne semblait pas avoir été fait (2. Pratique).

### 1. Théorie :

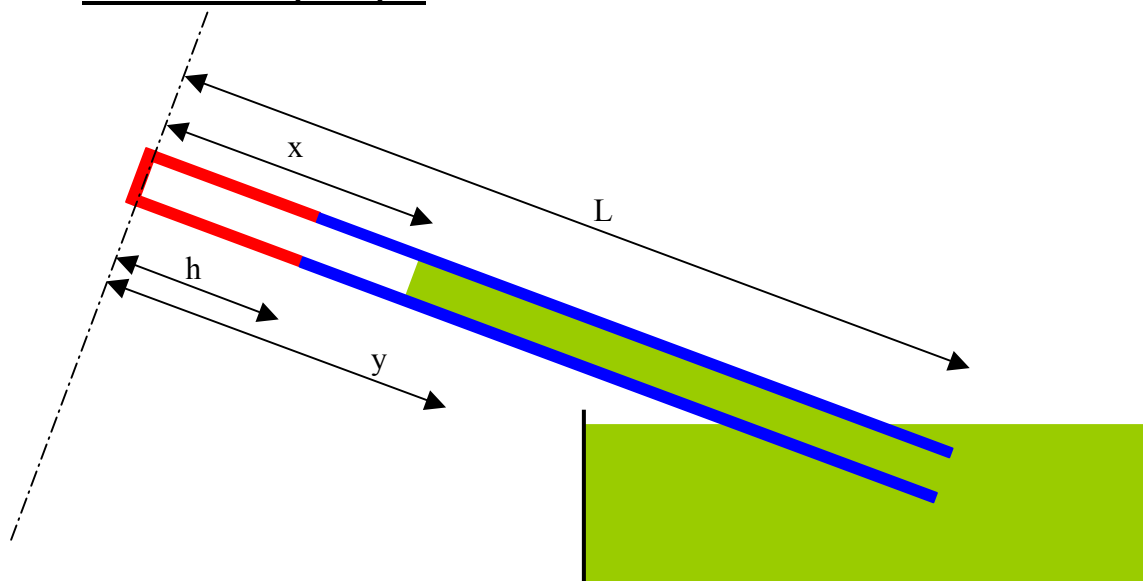
*Cette première partie est l'approfondissement, en cours de réalisation, de l'étude de la prédiction des caractéristiques de fonctionnement d'un pop-pop à partir de ses caractéristiques physiques.*

*En l'état actuel des choses cette partie n'est pas complète et nous vous invitons à vous reporter aux documents "Les mouvements du serpent" et "Représentation du cycle d'un moteur pop-pop" pour cette approche "théorique".*

Un moteur pop-pop est un résonateur dont le mouvement est entretenu par une succession de vaporisations et condensations. Pour ce faire il est constitué d'une partie chaude contenant du gaz (dont de la vapeur, mais pas uniquement de la vapeur) et d'une ou plusieurs canalisations contenant de l'eau. Pour l'étude qui suit on prendra pour modèle le plus simple des moteurs : une canalisation unique fermée à sa partie haute. Ce choix est justifié par le fait que ce qui compte c'est le volume de gaz, et ce volume peut très bien être contenu dans une partie cylindrique.

Pour continuer dans les "simplifications", on supposera que toute la partie chaude (en rouge sur le dessin) est à la même température. Cette simplification est pleinement justifiée pour les moteurs dont le vaporiseur est en cuivre épais. Le long de la paroi qui condense il y a un gradient de température que nous connaissons grâce à des expériences précédentes. Nous en tiendrons compte dans les équations.

#### 1.1. Schéma de principe :



#### 1.2. Notations :

T : Température de la vapeur

P : Pression de vapeur  
 R : Constante des gaz parfaits  
 d : Diamètre intérieur de la canalisation  
 S : section de la canalisation ( $S=\pi.d^2/4$ )  
 L : Longueur totale de la canalisation  
 h : longueur de la partie chaude (température supérieure à 373K)  
 x : longueur de la bulle de vapeur  
 V : Volume gazeux ( $V=S.x$ )  
 $\rho$  : Masse volumique de l'eau  
 A : surface d'échange  
 Tc : Température du condenseur (variable le long de la canalisation)  
 Tv : Température du vaporiseur  
 Tf : Température de la source froide  
 y : Abscisse d'une section de tube. (Servira à étudier les gradients de température)  
 M : Masse de gaz ( $M=Mv+Ma$  : masse de vapeur + masse d'air)

### **1.3. Equations (et leur justification) :**

Aire et température de vaporisation : Pour simplifier on négligera l'opercule de fermeture du tube à sa partie haute. Par hypothèse, et compte tenu de la construction l'interface n'entre jamais dans la partie chaude, excepté une ou deux gouttelettes. L'aire de vaporisation est donc  $A_v=\pi.d.h$  et cette aire est à la température Tv.

Coefficient d'échange : Certains moteurs relativement performants ont une chaleur bien répartie (cas des moteurs dont la partie chaude est réalisée en cuivre épais). D'autres ont un point très chaud (cas des moteurs en fer blanc chauffés par une bougie). Dans l'un ou l'autre cas la performance dépend des formes et dimensions et de la puissance de chauffe. Quand un moteur marche, quel que soit son design, c'est qu'il consomme l'énergie qui lui est fournie. Pour l'étude et plus tard pour la vérification expérimentale on considérera une chaleur uniformément répartie. Sur la courbe de Nukiyama on supposera un fonctionnement dans la zone comprise entre  $10\text{kW/m}^2$  pour un  $\Delta T$  de 5K et  $100\text{kW.m}^{-2}$  pour un  $\Delta T$  de 10K. Moyenne géométrique :  $\Delta T$  de 7,07K pour  $31,6\text{kW.m}^{-2}$  soit un coefficient  $\lambda = 4,5\text{kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . Si les mesures sur le banc d'essai montrent une température de la chaudière très différente de  $107^\circ\text{C}$  il sera toujours temps de prendre en compte la nouvelle valeur.

Aire et température de condensation : L'aire de condensation est  $A_c=\pi.d.(x-h)$ . Mais, pour la raison exposée au paragraphe 1.1 il faut tenir compte du gradient de température. Lorsque la colonne d'eau descend dans le moteur la tranche de température moyenne  $\theta_y$  qui à l'instant t était à la position y se retrouve à l'instant  $t+\Delta t$  à la position  $y+\Delta y$  en contact avec la couche limite un peu plus froide laissée par la tranche précédente, elle-même descendue à la position  $y+2\Delta y$ . Cela explique pourquoi et comment l'essentiel de la chaleur fournie dans le haut du moteur transite vers la source froide. Au-dessus de l'interface la couche qui commence à se déposer est à environ  $100^\circ\text{C}$ , mais plus la colonne d'eau descend et plus la température de cette couche limite diminue. Des mesures sur différents moteurs nous ont montré que dès qu'on s'éloignait un tant soit peu de la zone chaude (celle en rouge sur le dessin de la page 1) la température moyenne était beaucoup plus faible. Voir « Gradient de température le long d'un moteur pop-pop ». La surface de condensation est donc globalement de plus en plus grande et de plus en plus froide lorsque la colonne d'eau descend. La température à la distance y du haut du moteur est donnée par la formule approximative suivante :

$$\theta_y = T_f + (373 - T_f) e^{-10 \frac{(y-h)}{(L-h)}}$$

La section du tube étant constante, cela nous autorise à définir une température moyenne en fonction de  $x$  :  $T_{mc} = \frac{1}{x-h} \int_h^x \theta_y dy$ . Quelques décennies plus tôt je me serais creusé pour trouver la primitive de  $\theta_y$ , mais avec un tableur le résultat s'obtient tellement facilement...

Coefficient d'échange : Pour le coefficient de condensation on prendra  $\lambda_c = \text{***Etude à poursuivre dès que possible}$

Du fait de la présence permanente d'une interface liquide on supposera que la vapeur reste saturée. Et plus tard pour le moteur d'essai, afin de satisfaire cette condition, on réalisera la partie chaude en cuivre et on la chauffera sur une grande surface.

La relation entre la pression  $p$  de vapeur, son volume  $V$ , sa température  $T$  et le nombre de moles  $n$  est régie par l'équation  $p \times V = n \times R \times T$

$R$  (constante des gaz parfaits) vaut  $8,3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Le nombre de moles d'eau  $n$ , quelle que soit sa forme physique, est directement lié à la masse. La masse molaire de l'eau est  $18 \text{ g}$  ; soit  $18 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ .

Ce qui permet d'éliminer  $n$  de l'équation initiale qui devient  $p \cdot V = 462 \cdot M \cdot T$

La vapeur d'eau n'est pas un gaz parfait mais les pressions et températures en jeu dans un moteur pop-pop sont suffisamment faibles pour qu'on se satisfasse de cette formule.

Mais !!! Il ne faudra pas oublier que la bulle de gaz n'est pas constituée que de vapeur. Quand un moteur pop-pop délivre sa meilleure poussée il y a avec la vapeur d'eau une part importante d'oxygène et surtout d'azote, ces deux gaz provenant soit d'une introduction volontaire d'air, soit de l'évaporation de gaz dissous initialement dans l'eau. Quelle que soit l'origine du gaz les proportions entre azote et oxygène sont voisines de celles de l'air. Pour la suite on supposera que c'est de l'air. Cette hypothèse est d'autant plus justifiée que pour gagner du temps lors des essais du moteur instrumenté on introduira volontairement de l'air avant de chauffer ce moteur.

Mouvement de la colonne d'eau :

La masse d'eau contenue dans le tuyau est  $m_e = S \cdot \rho \cdot (L - x)$

La colonne d'eau est soumise à la différence des pressions qui s'exercent sur chacune de ses extrémités. Dans le bas, c'est la hauteur statique due à la pression atmosphérique complétée par celle due à l'immersion de la tuyère (quelques centimètres d'eau). Dans le haut c'est la pression absolue de vapeur. En dynamique il faut tenir compte de la masse de la colonne d'eau et des pertes de charge. Ces dernières dépendent du type d'écoulement qui lui-même dépend du nombre de Reynolds ( $Re$ ).

Pour avoir fait de nombreuses mesures et de nombreux calculs sur d'autres moteurs nous savons que la vitesse maxi de l'écoulement est de l'ordre de  $3 \text{ m/s}$  ; ce qui correspond (même pour les petits diamètres) à un écoulement turbulent. Nombre de Reynolds très supérieur à  $2500$ . De plus, le mouvement alternatif favorise ce type d'écoulement.

La perte de charge ( $\Delta P$ ) est fonction de la vitesse instantanée ( $x'$ ) de la colonne d'eau, de sa longueur instantanée ( $L-x$ ) et de la rugosité de la paroi interne du tube. Elle est donnée approximativement par la formule :

$$p_r = \frac{\lambda \cdot (L-x) \cdot x'^2 \cdot \rho}{2 \cdot d} \text{ avec } \lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \text{ et } Re = \frac{x' \cdot d}{\nu}$$

Attention ! Lors de la résolution numérique il faudra veiller au signe de la  $\Delta P$ . En effet, la perte de charge devra être toujours un frein au mouvement. Le signe de la  $\Delta P$  devra donc s'inverser en même temps que celui de la vitesse  $x'$ .

On admettra que la densité  $\rho$  est constante, et pour la viscosité  $\nu$  on prendra une valeur moyenne ( $0,75$ ) compte tenu de la température variable tout le long de la colonne d'eau. Avec ces hypothèses, l'équation du mouvement de la colonne d'eau devient :

$F = m_e \cdot \gamma = m_e \cdot x'' = S \cdot (p - p_0 - p_r)$  ; ce qui donne pour l'accélération  $x'' = \frac{S}{m_e} (p - p_0 - p_r)$ . En

intégrant une première fois on obtient la vitesse  $x' = \int x'' dt$  et en intégrant une seconde fois on obtient le déplacement  $x = \int x' dt$

x étant la position de l'interface, le volume de gaz est :  $V = \pi \frac{d^2}{4} x$

$$\frac{P}{T} = \frac{m_d \cdot R}{V}$$

#### **1.4. Résolution :**

Malgré les hypothèses simplificatrices utilisées, nous n'avons même pas cherché à intégrer ces fonctions. C'est tellement facile grâce à l'informatique et à un tableur. Il suffit d'imposer des pas de calcul assez petits (en l'occurrence 10ms). On ne connaît pas a priori le temps de cycle, mais compte tenu de la dimension du moteur qui servira aux essais on sait que ce sera de l'ordre de la seconde. L'observation de la pression et/ou du volume permettront de déterminer ce temps.

Dans le tableur, toutes les données numériques seront déclarées comme des variables. Ainsi, plus tard, si le besoin s'en fait sentir, il sera très facile d'analyser le cycle d'un moteur différent.

Les valeurs numériques retenues pour cette première application sont celles du moteur qui servira plus tard (au chapitre 2) à faire des essais ; à savoir (avec les unités légales) :  
 $d=18,1 \times 10^{-3} \text{ m}$ .  $S=2,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ .  $L=1,670 \text{ m}$ .  $h=0,3 \text{ m}$ .

##### **1.4.1. Pression calculée en fonction du temps**

[Etude à poursuivre dès que possible](#)

##### **1.4.2. Volume calculé en fonction du temps**

[Etude à poursuivre dès que possible](#)

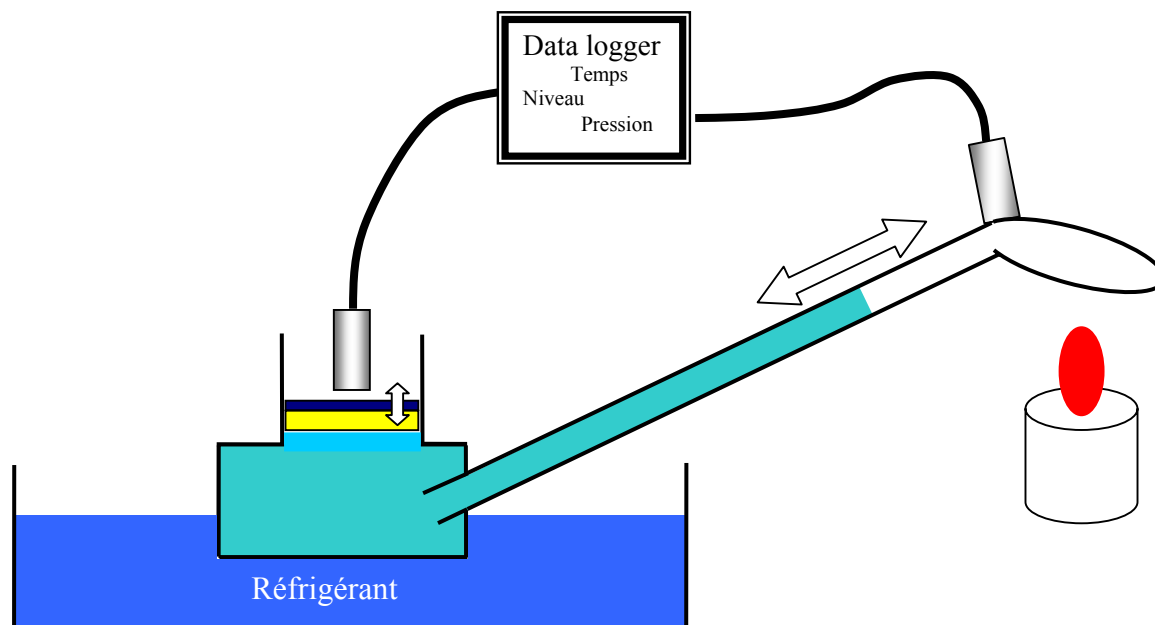
##### **1.4.3. Cycle pop-pop calculé**

[Etude à poursuivre dès que possible](#)

## 2. Pratique :

### 2.1. Principe de la mesure :

Enregistrement à l'aide d'un data logger de la pression et du volume de gaz (essentiellement vapeur+azote+oxygène) en fonction du temps.



Mesure de pression à l'aide d'un transmetteur de pression absolue.

Mesure de volume. Une mesure directe s'avérant impossible nous avons utilisé la solution représentée sur le dessin. Le moteur pop-pop est relié en partie basse à un réservoir dont la partie haute est à section constante. De ce fait, les mouvements verticaux du plan d'eau sont proportionnels aux variations de volume de gaz dans le moteur pop-pop. Un flotteur situé sur le plan d'eau en suit les mouvements. Un détecteur de proximité situé au-dessus du flotteur délivre un signal évoluant avec la position verticale du flotteur.

### 2.2. Quelques précautions :

- Pour éviter un filtrage indésirable des mesures les transmetteurs de pression et de position retenus ont des temps de réponse très courts (quelques millisecondes) et le moteur pop-pop réalisé a une fréquence très basse (de l'ordre de 1Hz).
- Pour éviter une détérioration du transmetteur de pression par surchauffe, un écran thermique a été interposé et le transmetteur a été légèrement éloigné et relié au moteur par un tuyau en plastique et un petit réfrigérant.
- Pour éviter une détérioration mécanique du capteur de déplacement en cas d'élévation accidentelle de niveau, ce dernier a été monté sur un support maintenu en position seulement par son poids.
- Afin d'avoir une assez bonne idée du volume de la partie chaude, celle-ci a été réalisée en cuivre. Le reste du moteur est en acier inox.
- Le réservoir utilisé pour la mesure est relativement large et haut en partie basse pour ne pas perturber le fonctionnement du moteur pop-pop. Diamètre et hauteur : environ 7 fois le diamètre du moteur. En partie haute il est prolongé par une section cylindrique réduite (diamètre environ 4 fois celui du moteur) afin que les variations de niveau soient mesurables avec assez de précision.
- Le raccordement entre la partie basse et la partie haute a été fait par troncs de cônes pour éviter que de l'air soit piégé et perturbe la mesure.
- Le réservoir était prévu être immergé dans un grand bac servant de réfrigérant. Pour quelques heures de fonctionnement il n'y a pas eu besoin de réfrigération.

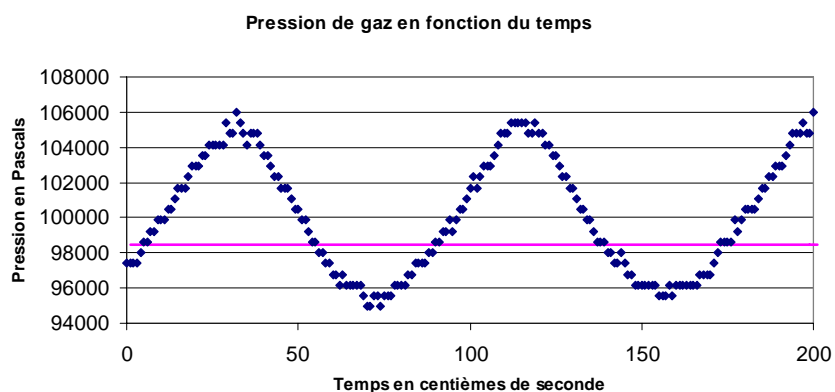
- Etalonnage en statique. Le signal électrique du transmetteur de position varie avec la distance entre ce transmetteur et le flotteur. Hélas ! nous avons eu la désagréable surprise de constater que le signal électrique ne variait pas linéairement avec la distance. Nous avons dû déterminer la relation exacte entre signal et distance. Elle est de la forme  $D=D_0+k.Arcsin(\theta(U-U_0))$ . Pour l'étalonnage nous avons fait varier le niveau par paliers en ajoutant à chaque fois une quantité mesurée d'eau. Le zéro a été déterminé juste avant le début de l'essai, alors que le moteur pop-pop était rempli d'eau.
- Avec le temps, l'azote et l'oxygène qui étaient dissous dans l'eau se sont dégagés et le volume de gaz a augmenté. Il en a résulté une augmentation du niveau moyen dans le réservoir de mesure. Pour garder la mesure à peu près centrée il a été procédé à quelques ponctions mesurées avec une seringue.
- Afin de maîtriser la puissance de chauffe, la bougie symbolisée sur le dessin a été remplacée par une résistance électrique (pour ce faire nous avons sacrifié un fer à repasser).

### **2.3. Mesures complémentaires :**

Bien que cela ne concerne pas la mesure du cycle, lors de ces essais il a été installé 8 sondes de température, une au niveau de la chaudière et les 7 autres réparties le long du tuyau. Les résultats correspondants serviront à compléter le document « Gradient de température le long du tuyau d'un moteur pop-pop ». En effet, l'étude avait été limitée à un petit moteur (diamètre 3,5mm) et à un gros moteur (diamètre 23,5mm). Celui-ci (diamètre 18,1mm) se situe bien entre les deux.

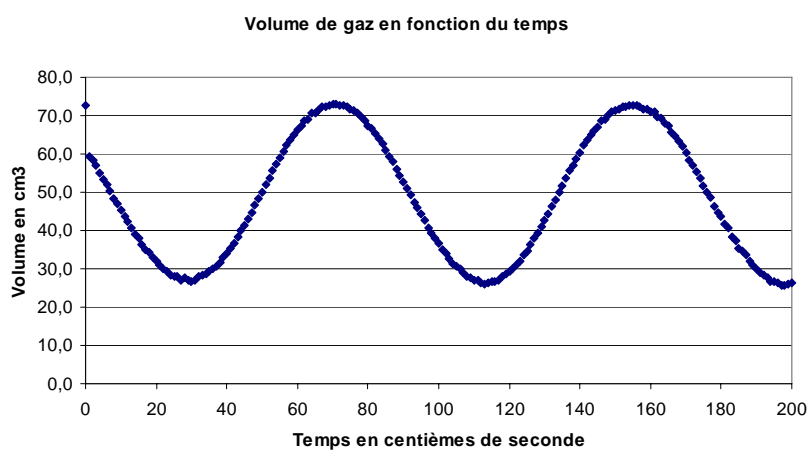
## 2.4. Résultats :

### 2.4.1. Pression mesurée en fonction du temps :



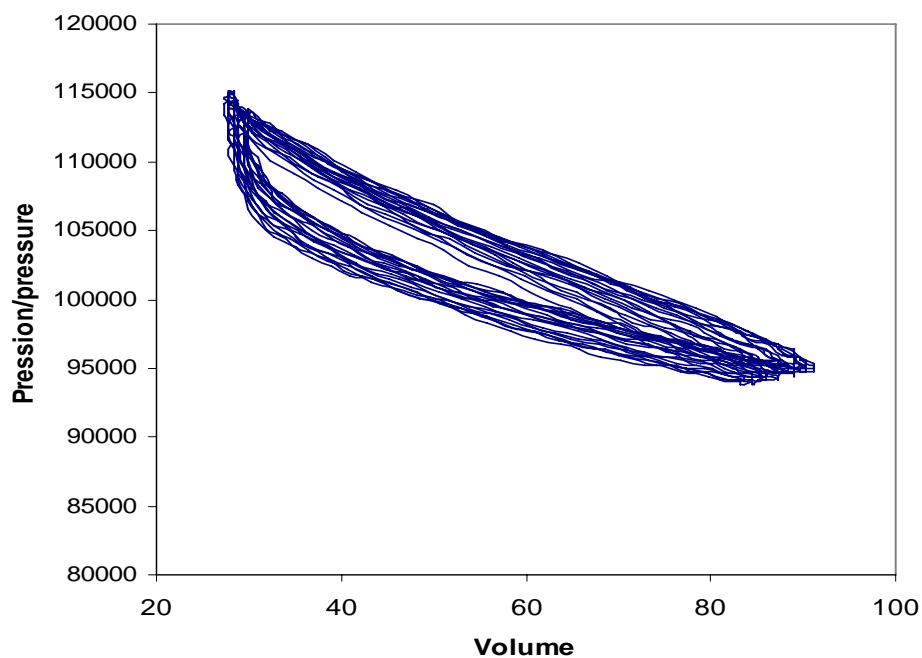
Le trait magenta représente la pression de gaz au repos. Un peu inférieure à la pression atmosphérique (en raison de la hauteur du moteur) elle-même basse le jour de l'essai.

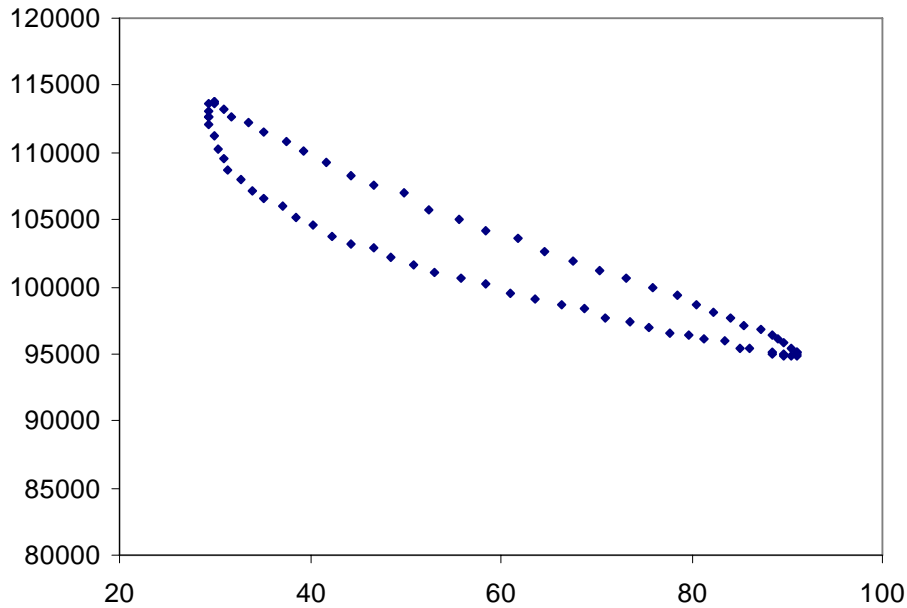
### 2.3.2. Volume mesuré en fonction du temps :



### 2.4.3. Cycle pop-pop mesuré :

**P-V diagram (20 cycles)**





### 3. Conclusions :

Dans la théorie comme dans la pratique :

- Le fonctionnement est périodique
- Le mouvement de l'eau est presque sinusoïdal.
- La pression et le volume sont presque en opposition de phase.
- La valeur absolue de la pression maxi relative est supérieure dans un rapport d'environ 2 à celle de la dépression mini. Sur le moteur PPVG beaucoup plus petit, en octobre 2006, nous avons trouvé un rapport de 2,1. Compte tenu des incertitudes de mesure les valeurs se confirment.
  - Le diagramme ressemble à ce que nous avons conclu dans "Représentation du cycle d'un pop-pop" (le 05/02/08). Dans le plan P-V le cycle a une forme de haricot très aplati avec une concavité vers le haut et la droite.
  - Avec ce matériel il va être possible de voir ce qui se passe dans différentes conditions telles que chauffe insuffisante (annexe 3), surchauffe, introduction de plus ou moins d'air dans le moteur, etc.

## **Annexe 1 : quelques informations sur les matériels utilisés**

### Data logger :

Type PCS10 de chez Velleman raccordé à une prise USB d'un PC portable.

### Alimentations stabilisées :

Deux alimentations 12V-0,5A récupérées sur un vieil ampli. La première alimente les amplificateurs des sondes de température et du capteur de pression en 12V. Son 0V est relié à la masse du data logger (et à celle du PC). La seconde, en série avec la première, alimente en 24V la mesure de volume.

Une petite alimentation 10V. Celle-ci a été bricolée à l'aide du transfo d'un vieux chargeur de batteries de calculette. Elle a été nécessaire pour découpler l'afficheur LCD de l'amplificateur de température.

### Mesure de pression :

Transmetteur MPX2200AP de chez Freescale semiconductor.

Amplificateur « maison » avec un gain de 150 réalisé avec pour composant principal un double amplificateur opérationnel de type « rail to rail ». Référence TLC272 de chez Texas Instruments.

### Mesure de volume :

Transmetteur de déplacement XS4P30AB110 de chez Télémécanique.

Cible : un disque en acier de diamètre 74mm solidaire d'un flotteur en polystyrène expansé de même diamètre.

### Mesures de températures :

7 sondes KTY81-110 de chez Philips Semiconductors. (Limite : 150°C)

Préamplificateur K6001 de chez Velleman

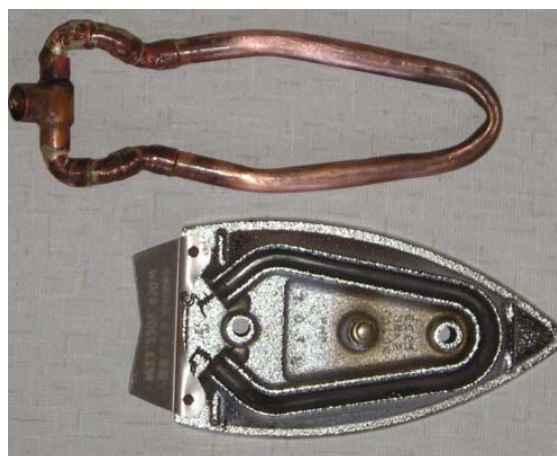
Afficheur LCD PM-428

Pour les températures risquant d'excéder 150°C (chaudière) les mesures ont été faites avec un thermocouple K (limite 1000°C) relié à un multimètre numérique.

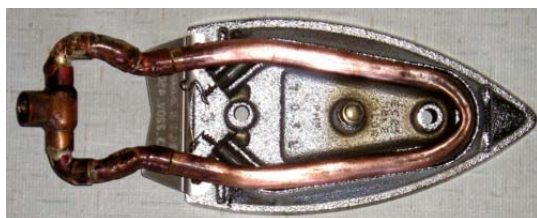
## Annexe 2 : photos

1. Chaudière :

Fer à repasser avant



Tube en boucle de la chaudière



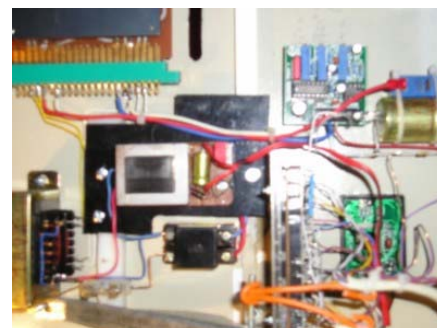
Superposition



Chaudière terminée

2. Pupitre de contrôle-commande :

Vue de dessus...



...et de dessous

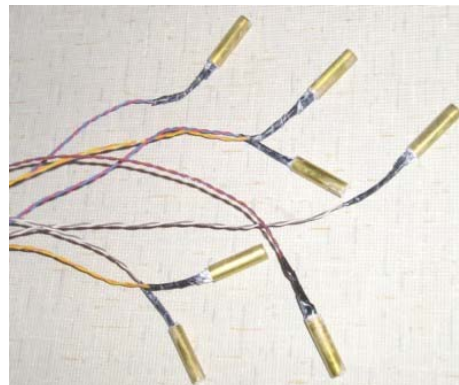
### 3. Instrumentation :



Transmetteur de niveau

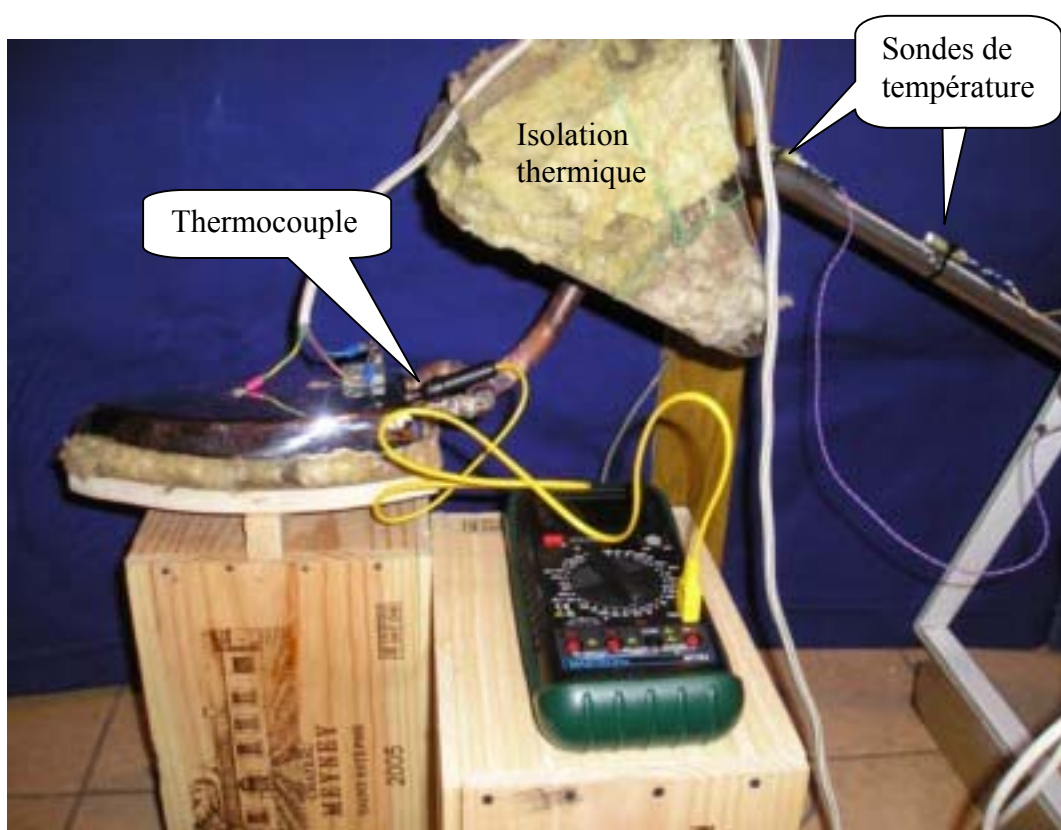


Transmetteur de pression



Sondes de température

### 4. Vue du moteur en cours d'essai :

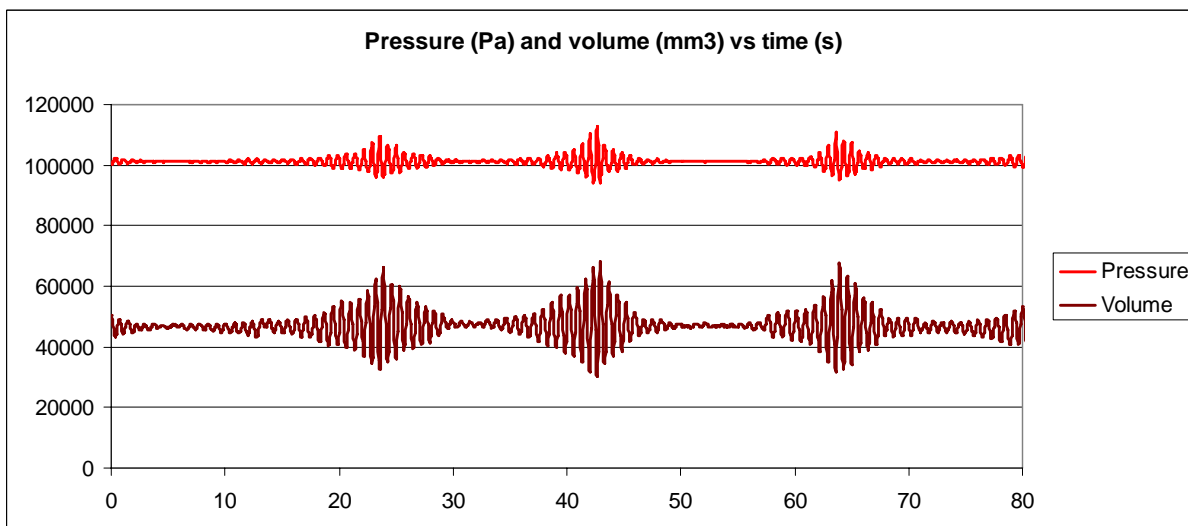


Outre le matelas de laine de verre destiné à protéger le transmetteur de pression, on peut voir que le fer lui-même a été isolé avec de la laine de verre, ceci afin de limiter les déperditions.

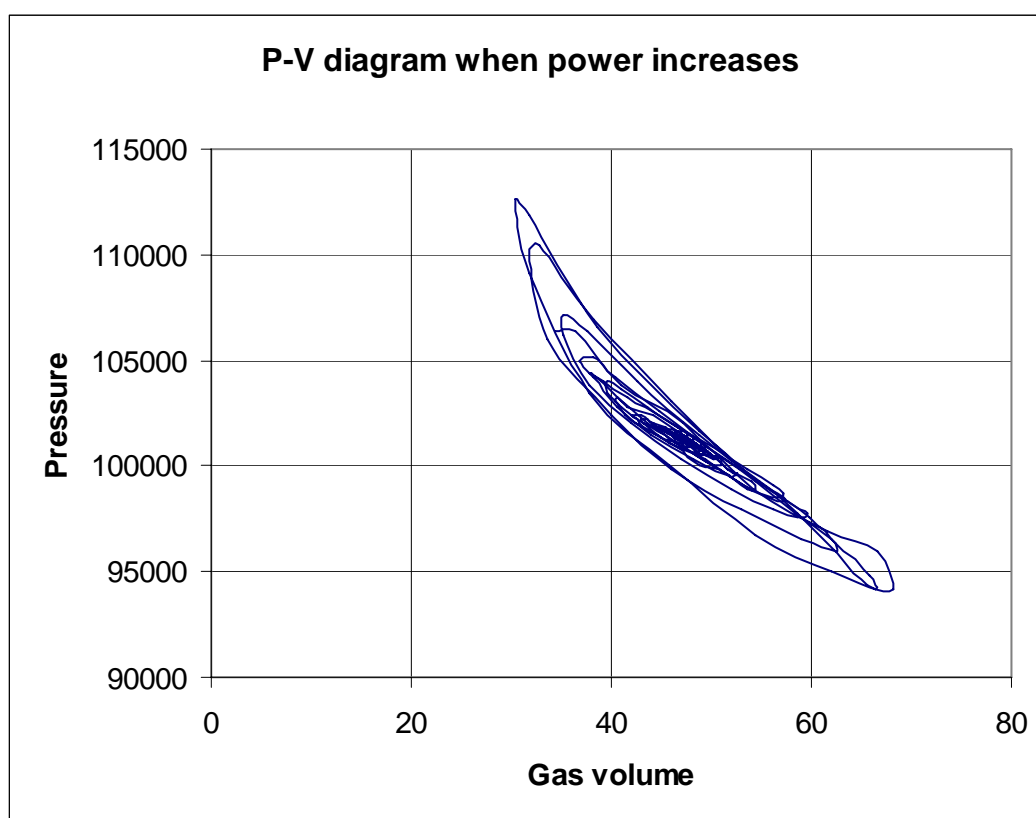
### Annexe 3 : Conséquence d'une puissance de chauffe insuffisante

Quand la puissance de chauffe décline lentement et qu'elle devient juste insuffisante pour garder le fonctionnement continu on obtient une modulation d'amplitude pour la pression et pour le volume. C'est très net quand on représente les deux signaux sur le même graphe.

1°) En fonction du temps :

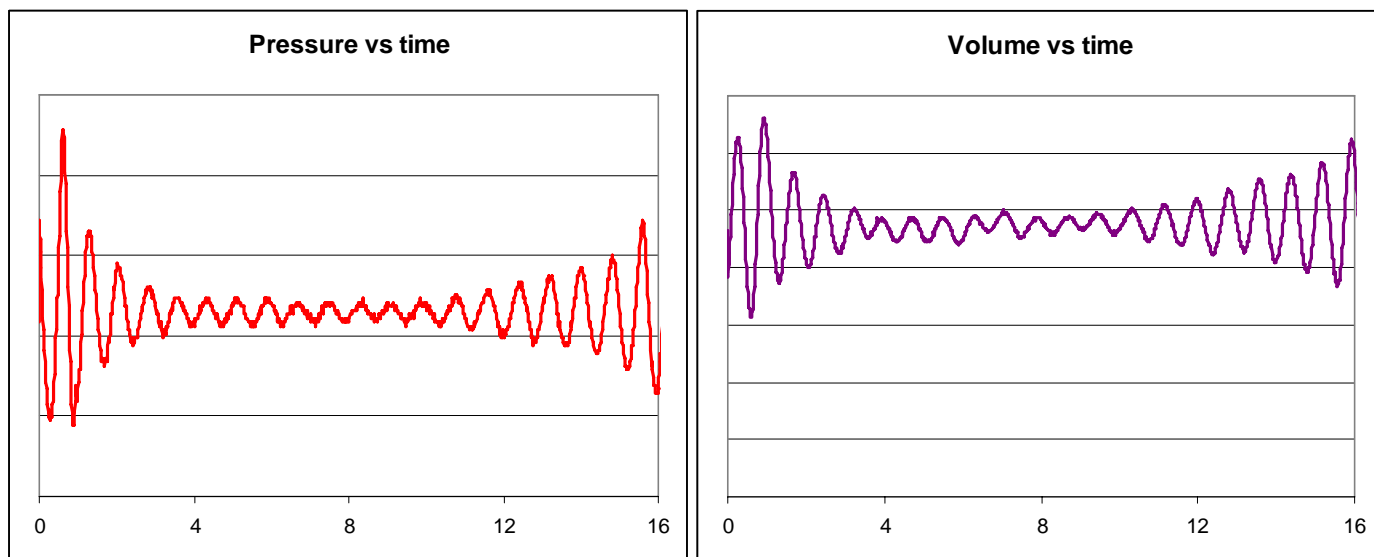


2°) En faisant abstraction du temps (sur le diagramme. En fait, ici entre  $t=31$  et  $t=43$ ).



On observe que le « haricot » grandit autour du point de repos (47cm<sup>3</sup> et 101hPa).

Détail de ce type de modulation (enregistré à un autre moment).



Ici (entre  $t=0$  et  $t=4$  secondes) le "haricot" diminue mais garde encore la même allure.

