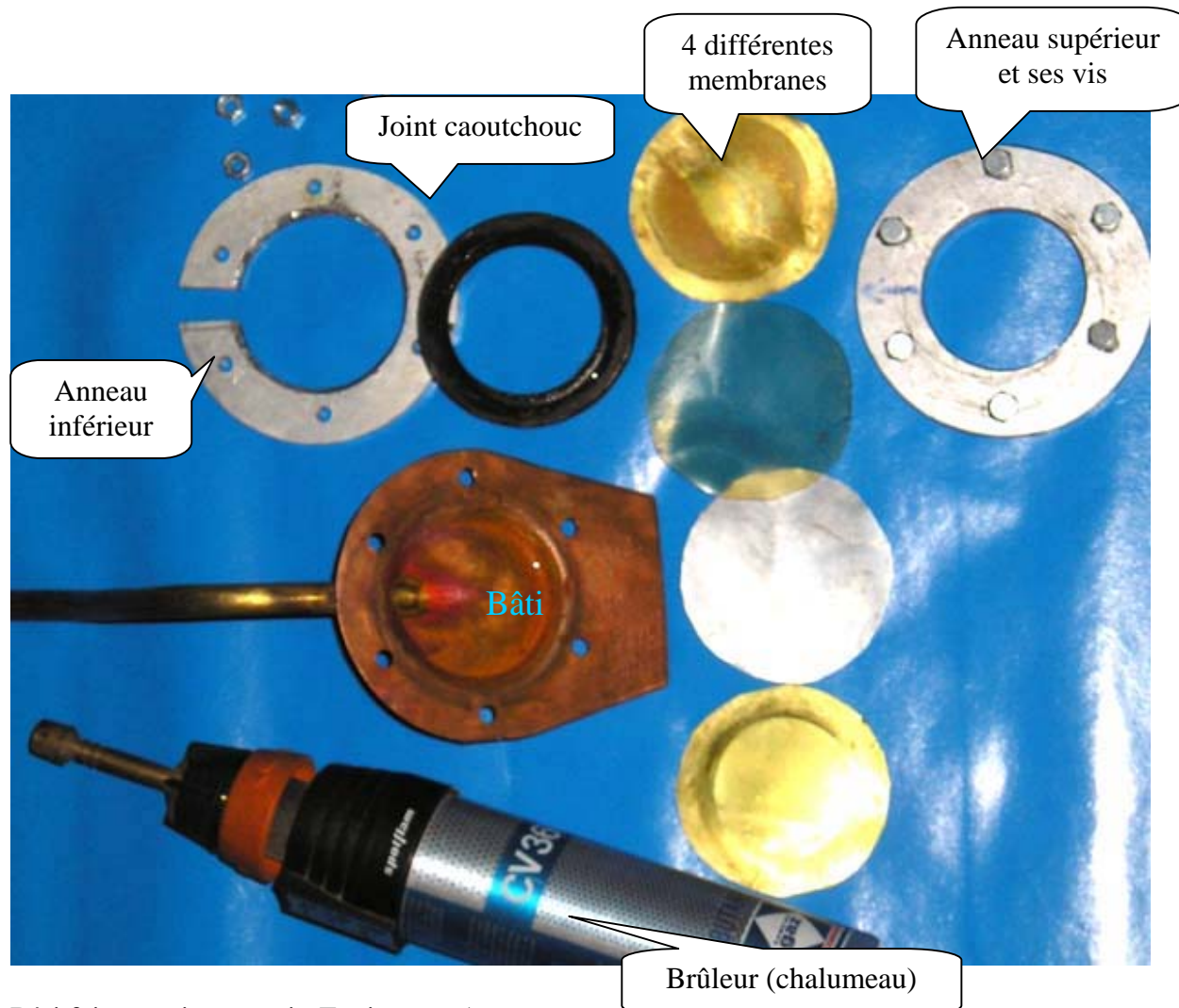


Moteur pop-pop à membrane

Par Jean-Yves

En fonction de connaissances acquises avec les moteurs précédents on a décidé d'en construire un nouveau afin de tester différentes membranes. A cette fin, alors que la membrane est habituellement pincée par un repli de la tôle du bâti, ici l'assemblage est fait par vis et écrous.



Bâti fait en cuivre recuit. Epaisseur : 1mm.

Anneaux inférieur et supérieur faits en duralumin (AG4). Epaisseur : 4mm.

Tuyau en laiton. Diamètre interne : 6,0mm. Longueur : 480mm.

1. Essais conventionnels

Première membrane testée : laiton de 13/100mm.

Observations : Fréquence : 3,0 Hz. Poussée jusqu'à 22mN.

En prolongeant le tuyau par un plus petit (DI 4mm) la fréquence devint 1,4Hz.

Retour à la disposition initiale. Nouvelle fréquence : 2,1Hz.

Fuite. Réparation. Nouvel essai. Fréquence: 2,05Hz.

Deuxième membrane testée : laiton de 13/100mm légèrement déformée pour augmenter le bruit.

Observations : Fréquence : 2,4 Hz. Poussée jusqu'à 22mN.

Après arrêt du brûleur le moteur a marché encore pendant 26 secondes en raison de la surchauffe.

Troisième membrane testée : mylar.

Observations : Fréquence 1,65Hz. Poussée jusqu'à 12mN mais la puissance de chauffe (d'une bougie) a semblé insuffisante pour obtenir la poussée maximum.

Quatrième membrane testée : aluminium. 10/100mm.

Observations : Fréquence 2,2 Hz. Poussée jusqu'à 14mN. Ensuite, burnout par surchauffe. Refroidissement du moteur par aspersion d'eau. Nouvel essai. 3 Hz. 14mN.

Essai du moteur à l'envers. Fréquence 3,9Hz.

Le moteur a ensuite été essayé à différents angles et différentes hauteurs. Dans toutes les positions le moteur a marché correctement, mais la fréquence et la poussée étaient différentes.

Commentaires :

La fréquence basse (1,65Hz) obtenue avec la membrane en mylar peut être expliquée par sa souplesse et par la variation de volume de la chambre.

La relativement haute fréquence (3,9Hz) obtenue avec le moteur sur le dos peut être expliquée par le petit volume de gaz, l'évaporateur étant chauffé par-dessus. La membrane était couverte de liquide.

Une chose n'est pas Claire. Pourquoi y a-t-il eu un changement soudain d'environ 2Hz à environ 3Hz ? Pendant tous ces essais le son était fort et clair. On ne peut pas s'être trompé en comptant les impulsions.

2. Moteur PPVG (PopPop Variable Geometry !!)

Là, on arrive à la raison d'être de ce moteur.

- Etude de poussée et fréquence en fonction du volume du ballon
- Mesure de la plus haute pression au cours du cycle
- Mesure de la plus basse pression au cours du cycle

Pour atteindre ces objectifs on a conçu et construit le moteur PPVG. PP pour pop-pop et VG pour géométrie variable (en anglais). Il est muni d'une membrane spéciale.



Cette membrane (au milieu de la photo) est faite en caoutchouc avec une partie centrale rigide. Une vis au centre permet de régler la position verticale de la membrane ; c'est-à-dire le volume.

Le volume est réglé à l'aide de l'écrou sur la vis centrale (ou des deux vis latérales). Un tour complet de l'écrou (et de son contre écrou) correspond à 0,7mm vers le haut ou le bas.

Le diamètre du piston est 40mm.

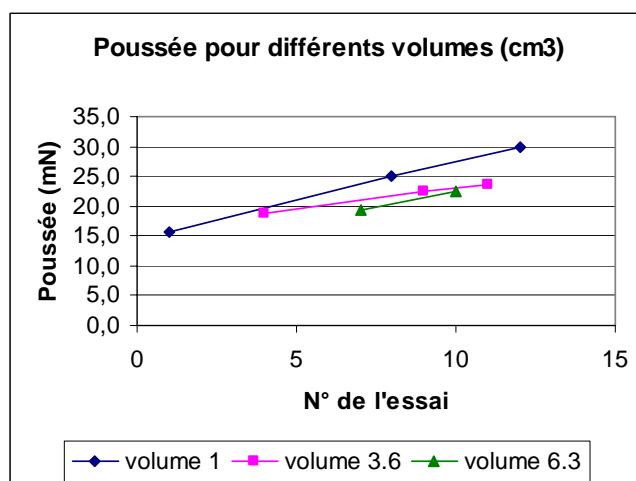
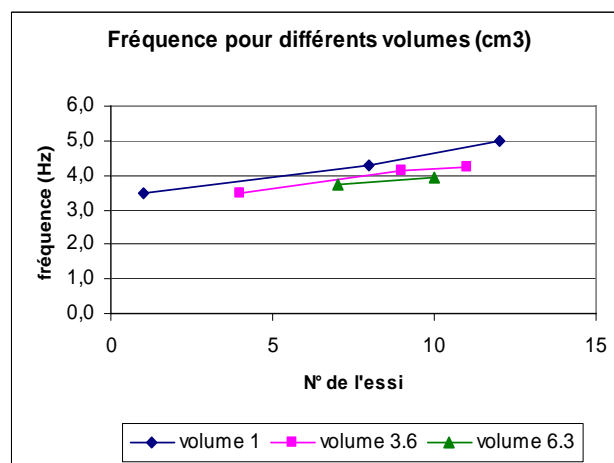
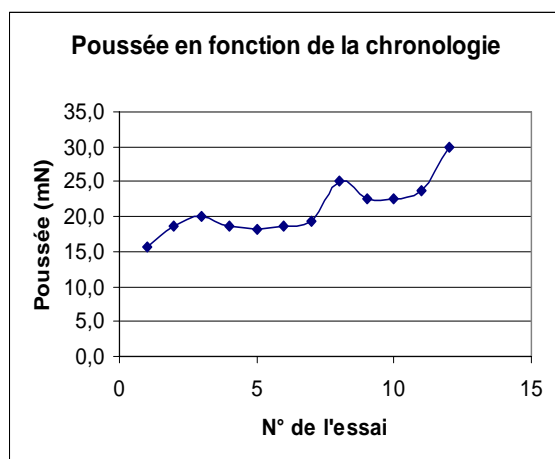


2.1. Poussée et fréquence en fonction du volume du ballon

12 essais consécutifs furent réalisés avec changement de volume.

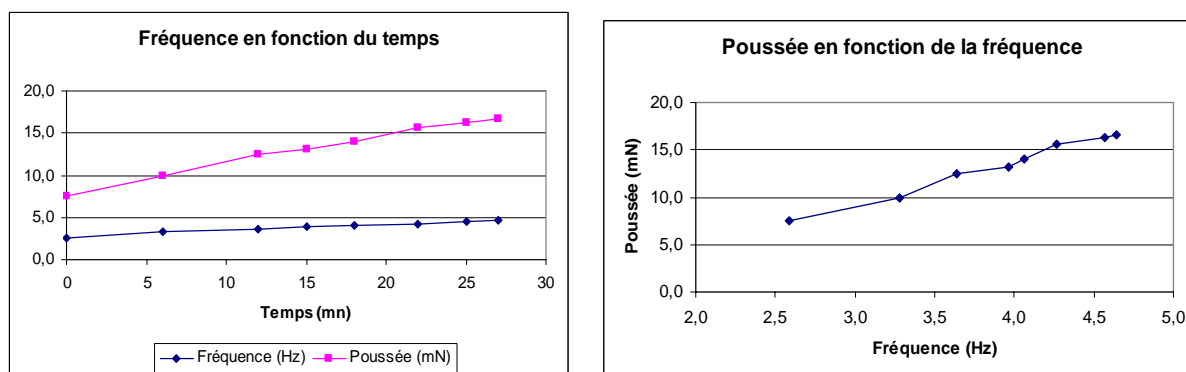
Chronologie	Volume (cm ³)	Féquence (Hz)	Poussée (mN)
1	1,0	3,5	15,6
2	1,9	3,5	18,8
3	2,8	3,8	20,0
4	3,6	3,5	18,8
5	4,5	3,7	18,1
6	5,4	3,5	18,8
7	6,3	3,7	19,4
8	1,0	4,3	25,0
9	3,6	4,1	22,5
10	6,3	3,9	22,5
11	3,6	4,2	23,8
12	1,0	5,0	30,0

Les 12 essais ont été réalisés à la suite l'un de l'autre sans arrêter la chauffe. Durée totale environ une demi-heure.



A l'aide de ces graphes on a confirmation de "rumeurs" ou suppositions : **Pour une surface donnée de l'évaporateur, la poussée augmente quand le volume diminue.**

Une autre série d'essais sans changer le volume a conduit aux courbes suivantes :



Malheureusement l'essai a été interrompu par manque de butane dans le brûleur. Cependant on peut déduire les lois suivantes :

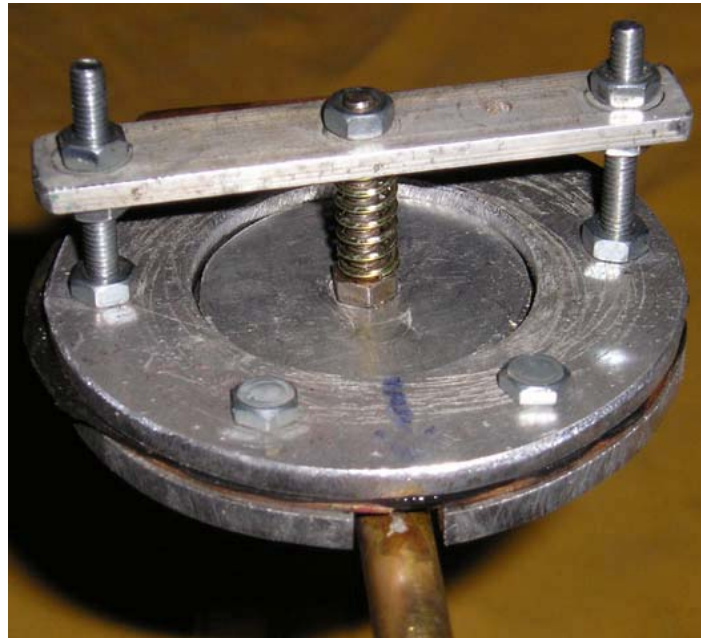
1°) **La poussée augmente avec le temps.** C'est une confirmation de ce qu'on avait observé avec des moteurs à spires. C'est probablement dû au volume de gaz dans le moteur. Il n'y en avait pas du tout au début des essais. Après 27 minutes de chauffe le volume de gaz, une fois refroidi, était 2cm^3 .

2°) **La poussée et la fréquence augmentent quand le volume du ballon diminue.**

3°) **La poussée augmente (linéairement?) avec la fréquence.**

2.2. Haute pression maximum au cours du cycle

Afin de déterminer (pour ce moteur particulier) la HP maximum au cours du cycle on a modifié la liaison entre la membrane et le bâti.



Un ressort a été ajouté. Au repos le ressort est comprimé. L'effort de compression est réglable grâce à l'écrou central. La membrane est dans une position fixe réglable à l'aide des écrous latéraux.

Quand la pression est assez élevée pour exercer une force supérieure à celle du ressort, la vis centrale et son écrou se soulèvent et on peut le voir.

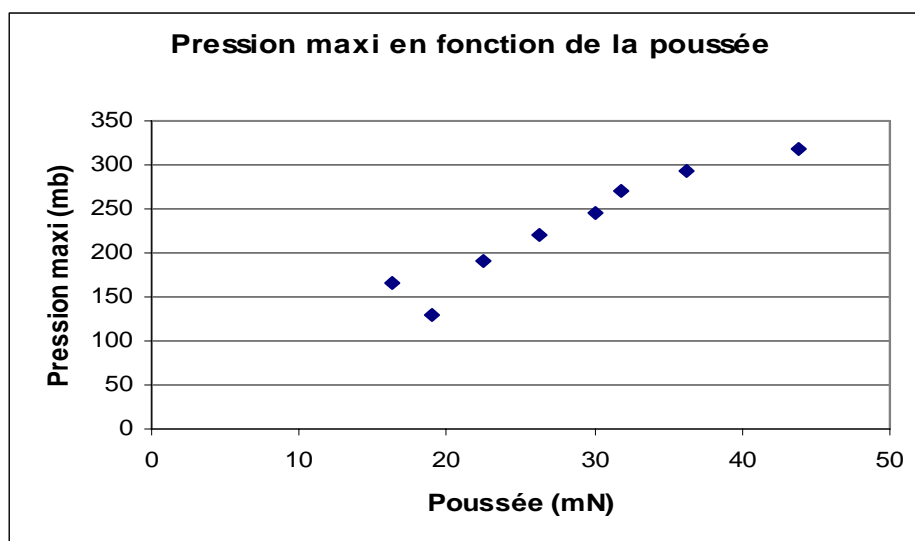
Nota: Le poids de la membrane est négligeable par rapport à la compression du ressort. Et son inertie est négligeable à de si basses fréquences.

Lors du premier essai la vis s'est légèrement soulevée lorsque la poussée a atteint 19mN. D'une part on a mesuré la longueur du ressort (16,95mm) et ensuite la force correspondante. On a chargé le ressort avec 1,620kg c'est-à-dire 15,9N. Etant donné que la surface de la membrane est $12,56\text{cm}^2$, cela signifie que la pression la plus forte était 12700Pa. D'autre part, on a exercé dans le ballon une pression hydrostatique juste suffisante pour décoller l'écrou. La hauteur de la colonne d'eau était 135cm, ce qui correspond à 13200Pa. Les deux mesures sont cohérentes : environ 0,13bar.

Plus tard on a fait une série d'essais et pour chaque cas de fonctionnement on a ajusté la longueur du ressort afin que l'écrou soit juste libre à la poussée maximum.

On a obtenu les résultats suivants :

Longueur du ressort (mm)	Valeur mesurée (mm)	Effort maxi (N)	Pression maxi (Pa)	Poussée (mN)
16	130	20,937	16661	16
15,3	180	23,9526	19061	23
14,4	210	27,8298	22146	26
13,7	240	30,8454	24546	30
13	255	33,861	26946	32
12,3	290	36,8766	29345	36
11,6	350	39,8922	31745	44



Ensuite, on a amélioré la précision en ajoutant une mince bande de plastique entre la traverse et l'écrou. Ainsi, dès qu'il y avait du jeu entre l'écrou et la traverse c'était facile à détecter car la bande de plastique était libre et on pouvait la bouger.



Nota: Aux basses pressions la précision n'est pas très bonne car la membrane qui est faite en caoutchouc a aussi un effet de ressort.

On a enregistré les valeurs suivantes :

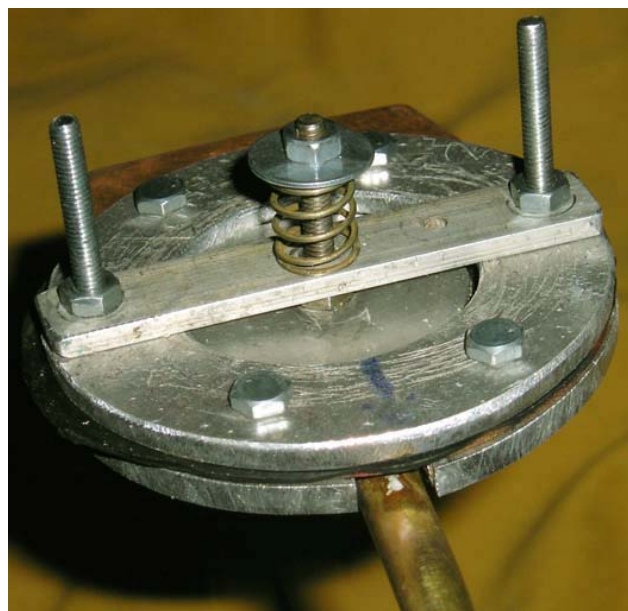
Longueur du ressort (mm)	Valeur mesurée (mm)	Effort maxi (N)	Pression maxi (Pa)	Poussée (mN)
15	60	9,05	7202	8
14,3	60	10,429	8299	8
13,6	72	11,808	9397	9
12,9	105	13,187	10494	13
12,2	140	14,566	11591	18
11,5	155	15,945	12689	19
10,8	172	17,324	13786	22
10,1	215	18,703	14883	27
9,4	295	20,082	15981	37
14,3	65	10,429	8299	8
15	55	9,05	7202	7
15,7	47	7,671	6104	6
16,4	21	6,292	5007	3

Nota 1: Le volume de la chambre n'était pas exactement le même que lors de la première série d'essais.

Nota 2: On a utilisé un ressort différent (visible sur la photo).

2.3. Basse pression minimum au cours du cycle

Pour déterminer (pour ce moteur particulier) la BP minimum au cours du cycle on a modifié à nouveau la liaison entre la membrane et le bâti.

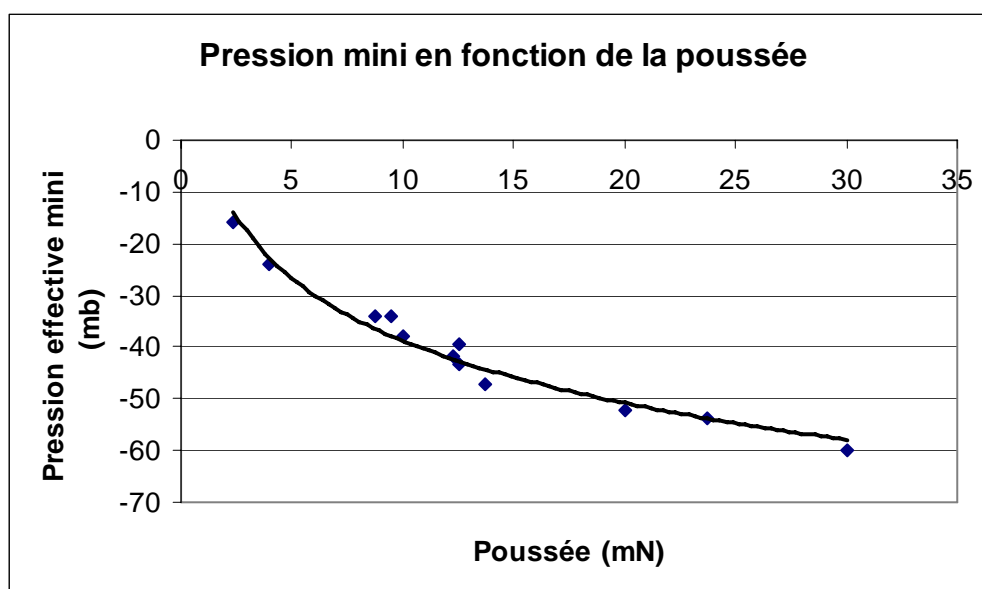


Un autre ressort (plus souple) a été utilisé. Au repos le ressort est comprimé. La force de compression est réglable à l'aide de l'écrou central. La membrane est dans une position fixe. Son écrou inférieur est en butée contre la traverse. Quand la pression baisse suffisamment pour que la dépression exerce un effort supérieur à celui du ressort la vis centrale et son écrou descendent et le déplacement est visible (et audible).

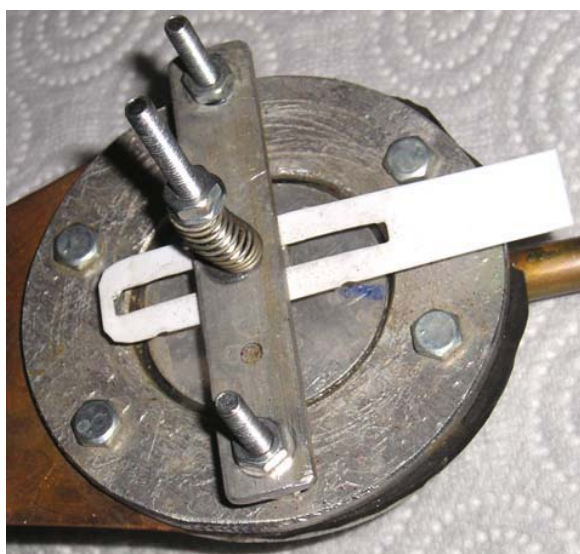
Nota : En complément de la force du ressort, il y en a une autre (petite) venant du caoutchouc de la membrane. Elle peut avoir eu une influence relativement importante aux très faibles dépressions.

Mesures (les essais ont été conduits dans l'ordre chronologique défini dans le tableau suivant, c'est-à-dire que la compression du ressort a tantôt été augmentée et tantôt diminuée) :

Longueur du ressort (mm)	Valeur mesurée (mm)	Effort maxi (N)	Pression maxi (Pa)	Poussée (mN)
23	100	4,947	-3937	13
20	110	5,925	-4715	14
15	240	7,555	-6012	30
18	160	6,577	-5234	20
21,5	100	5,436	-4326	13
23,5	80	4,784	-3807	10
25	70	4,295	-3418	9
29	32	2,991	-2380	4
32	19	2,013	-1602	2
17,5	190	6,74	-5364	24
22	98	5,273	-4196	12
25	76	4,295	-3418	10



Comme pour la détection de la HP maxi on a utilisé une bande fine de plastique pour améliorer la précision.



Et on a fait une série d'essais (avec un volume qui n'était pas exactement le même que lors de la première série).

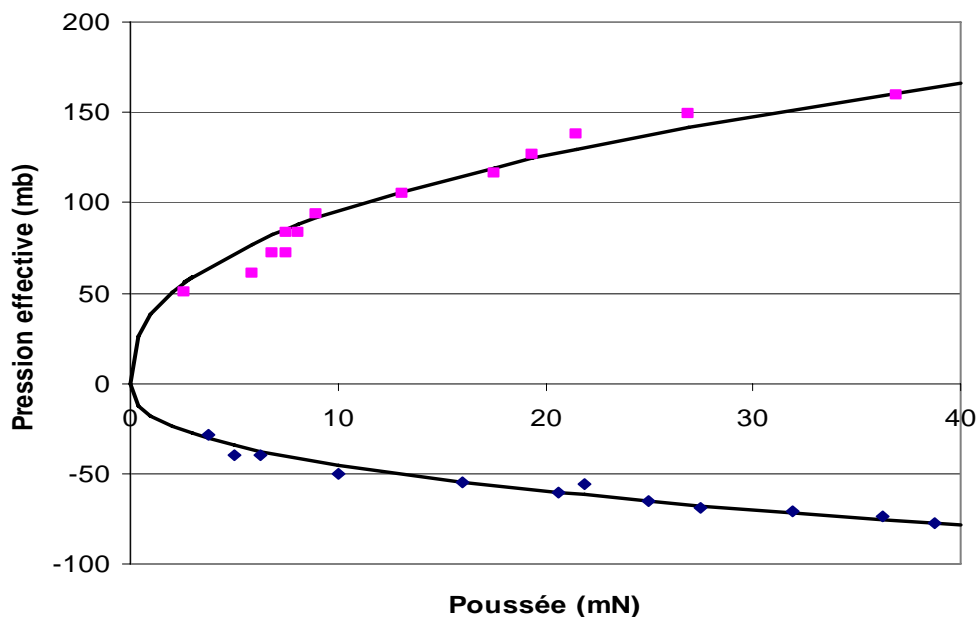
Mesures :

Longueur du ressort	Valeur mesurée	Effort maxi	Pression maxi	Poussée
(mm)	(mm)	(N)	(Pa)	(mN)
11,5	220	8,696	-6920	28
8,5	310	9,674	-7698	39
15	165	7,555	-6012	21
19	80	6,251	-4974	10
23	40	4,947	-3937	5
27	30	3,643	-2899	4
13	200	8,207	-6531	25
16,5	175	7,066	-5623	22
23	50	4,947	-3937	6
9,7	290	9,2828	-7387	36
11	255	8,859	-7050	32
17	128	6,903	-5493	16

2.4. Compilation

Les deux courbes (pressions maxi et mini) peuvent être tracées sur un graphique commun.

Pressions maxi et mini en fonction de la poussée



Là, on voit que **la valeur absolue de la pression maxi (positive) est supérieure à celle de la pression mini (négative)**.

Conséquences :

- 1°) Notre modèle (voir "Moteur pop-pop et analogie électrique") est à réviser. La pression n'évolue pas de façon sinusoïdale.
- 2°) Notre banc d'essai hydraulique est à modifier en conséquence. (Voir "Banc d'essai hydraulique" et "Mesure de poussée au point fixe").
- 3°) En raison de la dissymétrie de la pression l'utilisation d'une tuyère convergente devrait améliorer l'efficacité.