

U.S.T.A

1 ex

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

Dpt. Génie MECANIQUE

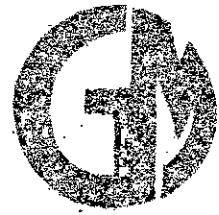
مدرسة هندسة العلوم الهندسية
مكتبة

PROJET NATIONAL DE FIN D'ETUDE
BIBLIOTHEQUE

Etude de l'adaptation d'un
Moteur à essence au gaz naturel

Sujet proposé par
Mr. C. DOBRE

étudié par
Mr. A. ABDELMOUMEN



promotion Janvier 1980

U.S.T.A

Ecole

Nationale

Polytechnique d'Alger

Dpt

Mecanique

PROJET de fin d'ETUDES

*Etude de l'adaptation d'un
moteur à essence au G.N*

sujet proposé par :
C. DOBRE

étudié par
A. ABDELMOUMEN

promotion : 1980

Je remercie vivement:-

- Mr. C. DOBRE qui m'a chargé de cette étude et qui l'a suivie avec benvoillance.

- Mr. A. Hamlati qui m'a aidé dans cette recherche.

- Mr. M. Boufroua mécanicien qui a su accomplir sa tâche

- Mr. M. Santadji : Tourneur

- Mr. A. Benafra : Magasinier

- Mr. A. Idir : - " -

Et toutes les personnes qui ont contribué à ma formation

Table des matieres

avant propos	1
chap I: Generalite sur les Combustibles Gazoux	2
chap II Etude Thermique	9
chap III Etude Carburation	31
chap IV Essais et mesures	36
chap V Interpretation et Suggestion	62
Conclusion	67
Bibliographie et annexes en fin de Volume	

Il est un problème important, et dont on ne parle pas tellement. C'est le problème des carburants de substitution.

On parle des énergies nouvelles; géothermie, solaire, et nucléaire; génératrices de chaleur et/ou d'électricité, en pensant que les solutions pour les carburants « suivront ».

En fait, ces solutions sont nombreuses, sinon toujours faciles et (ou) économiques: de l'acétylène aux huiles végétales. Mais il semble qu'il n'y ait pas d'urgence.

Quand ils seront nécessaires, les carburants de substitution seront sans doute bien au point, et la TRANSITION devrait se faire sans heurt.

Les réserves mondiales de Gaz Naturel, chiffrées par les Experts à la Conférence d'Istanbul sont du même ordre que les réserves de pétrole conventionnel: 70 GTep (70.10⁹ tonne, équivalent pétrole) prouvées; 200 GTep à découvrir, mais une partie bien inférieure des réserves prouvées sont utilisées, car, là encore, on se heurte à des limites économiques.

L'objet de notre sujet consiste non seulement à l'étude de la conversion d'un moteur à essence au gaz, mais d'essayer une utilisation plus rationnelle, c'est-à-dire une étude sur les mélanges pauvres.

Généralités sur les Combustibles gazeux.

I Introduction

Les moteurs à combustions internes peuvent être alimentés par les différents gaz industriels combustibles ; qui, suivant leur pouvoir calorifique peuvent influencer sur la puissance utile pour une cylindrée donnée.

Les principaux gaz utilisés sont :

- Les gaz de Hauts fourneaux.
- Le gaz de Gazogène (anthracite).
- Le gaz de Gazogène (coke).
- Le gaz de four à Coke
- Et le gaz de forage appelé Gaz Naturel.

II Composition chimique des Gaz combustibles :-

II-1 Le Gaz Naturel :-

Le principal composant du Gaz naturel est le Méthane, il se trouve en forte proportion (de 60 à 90% environ) et imprime donc ses propriétés au Gaz. En ALGERIE, il existe quatre (4) sortes de Gaz naturels dont nous donnerons les compositions massiques sur le tableau suivant.

Constituants	Gaz N. d'Arzew	G.N de Skikda	G.N de SONEGAZ	G.N brut de Hassi R'mel
N ₂	0.5	1.0	7.83	6.64
CO ₂	-	-	0.43	0.38
CH ₄	87.8	92.8	73.11	53.48
C ₂ H ₆	8.4	5.4	12.12	9.50
C ₃ H ₈	2.4	0.6	4.9	7.24
iso C ₄ H ₁₀	0.4	0.1	0.53	1.53
n C ₄ H ₁₀	0.5	0.1	0.85	2.72
iso C ₅ H ₁₂	0.05	-	0.12	1.11
n C ₅ H ₁₂	0.05	-	0.12	1.47
C ₆ H ₁₄	-	-	-	2.16
C ₇ H ₁₆	-	-	-	2.39
C ₈ H ₁₈	-	-	-	2.19
C ₉ H ₂₀	-	-	-	2.02
C ₁₀ H ₂₂	-	-	-	1.64
C ₁₁ H ₂₄	-	-	-	1.40
C ₁₂ H ₂₆	-	-	-	4.13

(Ces chiffres sont purements indicatifs , pour de plus amples renseignements consulter la Sonatrach.)

II-2 Le G.N.L (gaz naturel liquéfié).
 Le G.N.L est obtenu par liquéfaction du gaz naturel. Parmi ses dérivés, les plus importants, on retient le G.N.L humide, car il contient des hydrocarbures lourds ayant des P.C.I élevés.

II-3 Les Gaz de Pétrole

Ces gaz sont essentiellement constitués de propane (C_3H_8) et de butane (C_4H_{10}); et ils proviennent soit :-
 - de la distillation du pétrole brut
 - de degazolinage des Gaz Naturels.

III Le Pouvoir Calorifique.

Le pouvoir calorifique d'un combustible gazeux est un des paramètres du plus importants, il dépend de la composition du gaz et est donné par la formule suivante :-

$$P_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n p_c (\text{kcal/mole})_i \times X_i}{\sum_{i=1}^n (V_{m_i} \cdot X_i)}$$

avec :-

P_{cg} = pouvoir calorifique du G.N.
 p_c = " " " " du corps "i"
 X_i = fraction molaire du corps "i"
 V_{m_i} = Volume molaire " " " "

A titre indicatif pour les gaz Algériens on peut voir sur le Tableau suivant les différents valeurs de p.c.i

Gaz		Pci
G.N. Arzew		11816 kcal/kg
G.N. Skikda		11798 " "
G.N. SONELGAZ		10837 " "
G P L	Propane commercial	21915 kcal/m ³ N
	Butane commercial	28000 kcal/m ³ N

IV Phénomène d'Inflammabilité.

Lorsqu'on considère un mélange gazeux d'un combustible

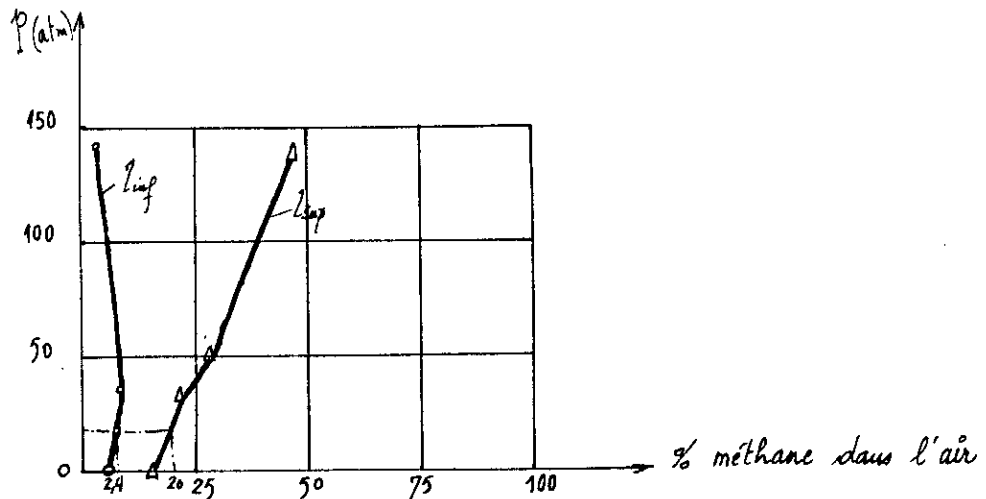
(Composé réducteur) et d'un comburant (Composé oxydant) - Les Limites d'inflammabilité sont conventionnellement définies comme étant les POURCENTAGES EXTREMES EN COMBUSTIBLE entre lesquels le mélange est inflammable -

On distingue donc une limite supérieure et une limite inférieure d'inflammabilité - Et cette définition reste encore valable lorsqu'un gaz totalement inerte (ex: N_2) est également présent dans le mélange.

Pour des conditions normale, d'après (Van TIGGLEN), les limite de mélange (Air + Méthane) sont :-

- limite inférieure d'inflammabilité = 5.0 %
- " supérieure - " - " - " = 15 %
- Température d'auto inflammation = 580°C.

Ces limites varient avec la Pression de la façon suivante.



On peut interpoler pour notre cas critique de feu de compression, où notre mélange (Air + GN) atteint l'ordre de 15 atm, d'où les valeurs suivantes :-

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{inf} = 2,4 \% \\ L_{sup} = 20 \% \end{array} \right.$$

d'où les contraintes sur les dosages :-

la limite inférieure d'inflammabilité du mélange correspond à un dosage φ inférieur tel que :-

$$\varphi_{mi} = \frac{L_{mini} \cdot 2,4}{100} = \frac{16,109 \cdot 2,4}{100} = 0,38$$

De même qu'un dosage maximum de

$$\varphi_{max} = \frac{L_{min} \cdot 20}{100} = 3,22$$

Au delà de ces deux valeurs de dosage φ_{min} , φ_{max} , le mélange en feu de compression ne sera pas inflammable au contact d'une étincelle électrique.

Les essais réalisés sur le banc, ont confirmés ces propos.

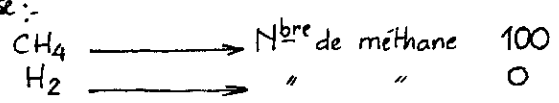
↓ Indice d'octane des carburant gazeux.

La tendance au cliquetis d'un combustible gazeux nous renseigne sur le Nombre d'octane, elle dépend de la nature de la molécule.
 D'une manière générale, l'indice d'octane décroît du côté des Hydrocarbures lourds.

Pour des raisons de logique, on exprime le pouvoir antidetonant des gaz combustible par le « Nombre de méthane » que par le nombre d'octane (qui est réservé aux combustibles liquides).

On compare ainsi un combustible gazeux à un mélange de référence composé de méthane et d'hydrogène, la teneur en méthane du mélange de référence donnant la même intensité de cogement sur un moteur C.F.R. (Coopérative - Fuel - Research). Que le combustible testé, définit le nombre de METHANE.

Par définition On pose :-



Et le Nombre de méthane d'un mélange de gaz est donné par la formule suivante :-

$$\text{Nbre de Methane} = \sum_{i=1}^n Y_i N_{mi}$$

N_{mi} = Nbre de méthane du composant "i"
 Y_i = pourcentage en volume du composant "i"

Et pour les différents gaz on peut dresser le tableau suivant :-

combustibles gazeux	Nombre de méthane
méthane CH ₄	100
Ethane C ₂ H ₆	44
Propane C ₃ H ₈	34
butane C ₄ H ₁₀	10
Propylène C ₃ H ₆	19
Hydrogène	0

Pour le Gaz Naturel SONELGAZ le nombre de Methane est :-

N.M. = 88,65

II Avantages Généraux des combustibles gazeux.

Les différentes propriétés physiques des gaz, offrent des avantages séduisants, comparativement aux combustibles et carburants traditionnels.

En premier lieu, on dira que la marche au gaz d'un moteur présente l'avantage de sa PROPRETE.

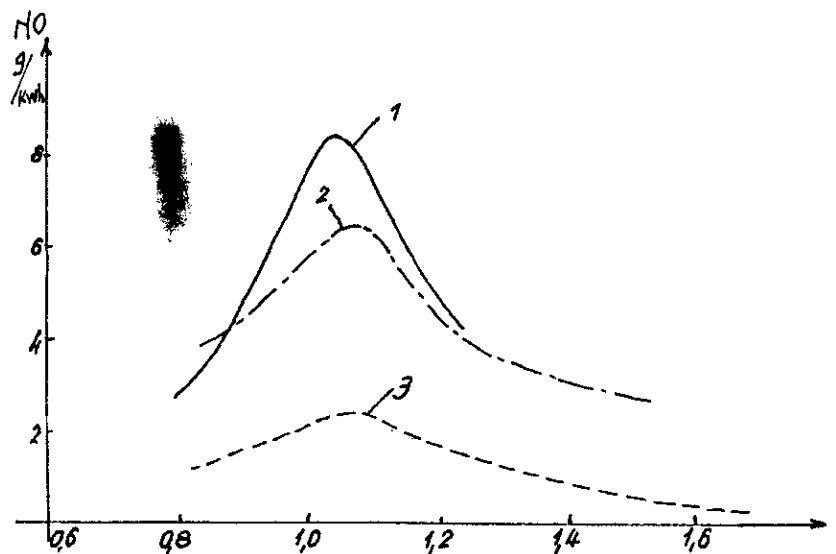
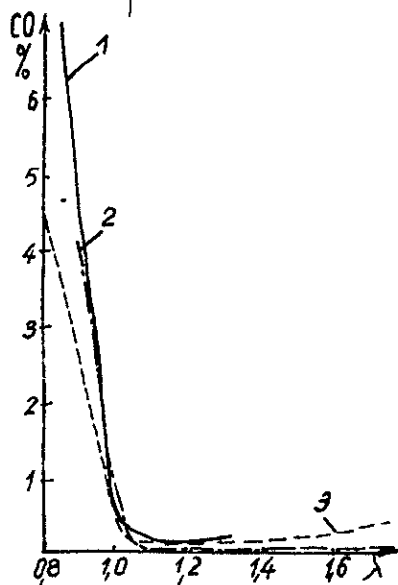
En effet la combustion du gaz donne moins d'imbrulés qu'un carburant liquide, et de même l'excès d'air de combustion pouvant en général être réduit.

A l'intérieur des chambres, les produits de combustion ne comportent pratiquement pas de résidus solide, soufrés, ou carbonnés \Rightarrow les dépôts de Calamine sont réduits.

En outre la propreté du gaz et l'absence d'imbrulés, nous laisse supposer à la réduction assez nette de l'Usure, du fait que le graissage est correcte et que la dilution de l'huile est pratiquement inexistante.

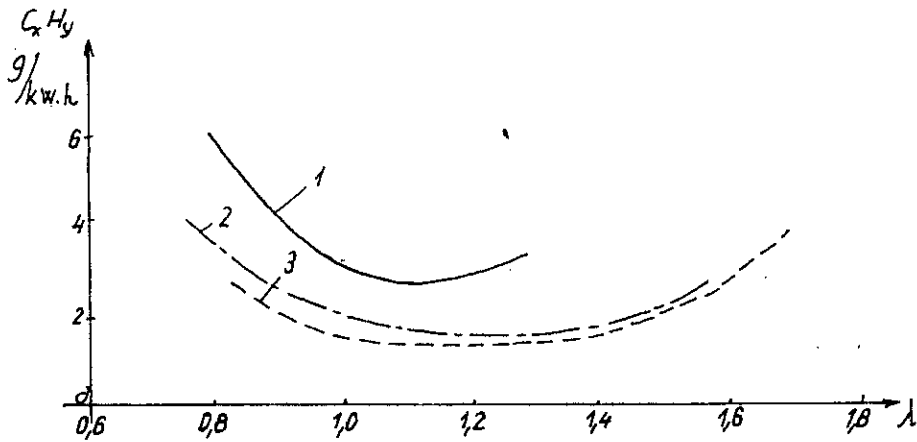
La volatilité du gaz entraîne une répartition équitable de la charge entre les cylindres, et une bonne régularité de marche.

Un autre facteur important, qui favorise la marche au gaz relativement à d'autres combustibles, est la réduction de la teneur de CO , NO_x et C_xH_y dans les gaz d'échappement; Les courbes suivantes nous permettent de mieux réaliser cette comparaison.



Ces courbes ont été établies pour les 3 gaz suivants :-

- 1 - Essence
- 2 - Gaz Méthane
- 3 - Gaz de Gazogène .



pour notre cas où le combustible utilisé est du Gaz Naturel, la teneur maximale des gaz toxiques dans l'échappement (avec $\lambda = 1,1$) est :-

- moins de 0.2% pour le CO
- moins de 4.5 g/ch.h pour le NO
- moins de 3 g/ch.h pour les Hydrocarbures C_xH_y .

Tandis que pour l'essence (avec $\lambda = 0.9$) elles se montent à :-

- près de 5% pour le CO
- plus de 6 g/ch.h pour le NO
- et d'avantage pour les Hydrocarbures (plus de 5 g/ch.h).

On voit bien l'importance de l'utilisation du gaz naturel; de nos jours où le cri d'alarme, de par le monde, est lancé, afin de réduire les éléments polluants.

Le gaz Naturel, est le combustible qui répond le mieux aux restrictions les plus sévères imposées dans certains pays développés, et qui sont déjà au stade de l'application.

VII Choix du Combustible

Le choix du combustible gazeux dépend principalement de la disponibilité du gaz; et de facilités d'approvisionnement.

Dans le cas où plusieurs gaz satisfont ces deux critères, le choix serait subordonné aux pouvoirs calorifiques (p.c.i), à la composition et bien entendu à la propreté relative, ... etc.

La disponibilité du gaz de ville à travers le territoire National nous permet de le choisir, bien que sa teneur en Azote soit plus élevée que celles des G.P.L. ou G.N.L.

Ce gaz de distribution offre plusieurs commodités technologiques qui sont assez importantes, en effet, les problèmes posés par le stockage sont moindres.

VIII Équipement pour l'alimentation au Gaz.

La conversion des véhicules au G.N.C n'est pas une opération complexe. Elle consiste à installer les pièces suivantes :-

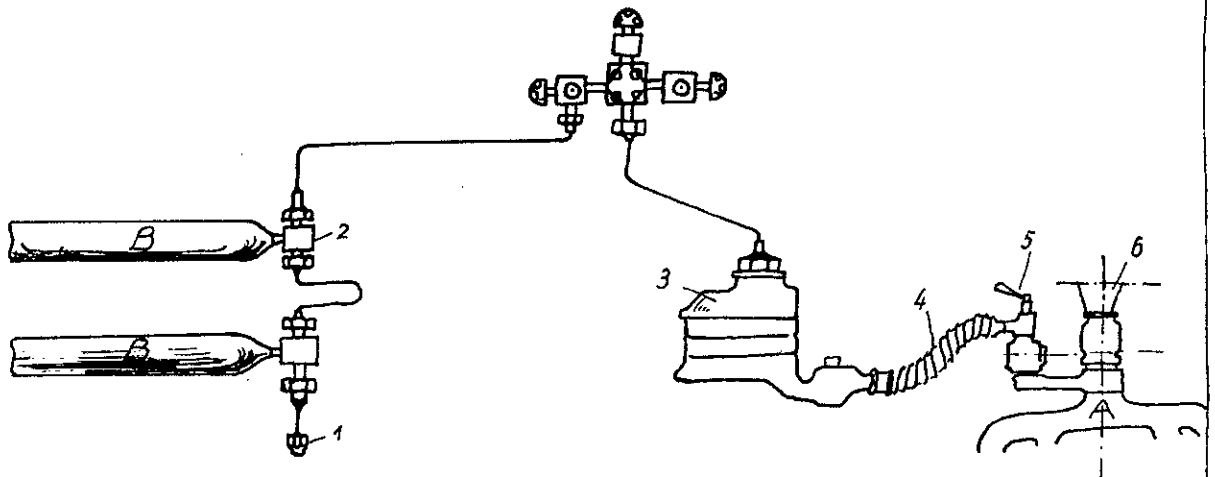
- Un réservoir cylindrique :- en métal rigide qui est placé (suivant le type de véhicule) dans le coffre. Celui-ci est muni d'une jauge de mesure et d'une soupape de sûreté.

- Un réducteur de pression :- appelé parfois détendeur ou vaporisateur (dans le cas de la conversion au G.P.L). Il comprend généralement 2 ou 3 chambres, et, est réchauffé par de l'eau chaude provenant du radiateur. Dans ce réducteur, existe une vis de réglage qui sert à ajuster le débit de sortie en fonction de la puissance du moteur.

- Un mélangeur :- qui est placé à l'entrée du carburateur. Il sera étudié en détail dans le chapitre "Carburateur".

- Un Commutateur :- placé à portée de la main du Conducteur. Ce commutateur actionne deux (2) électrovannes et sert à commander l'arrivée du G.N. comprimé ou celle de l'Essence comme carburant pour le moteur.

La distribution du G.N.C ou G.P.L se fait dans les stations service ordinaires, équipées d'un volucompteur de G.P.L (ou G.N.C) à l'entrée par une citerne. L'apparence extérieure du volucompteur de gaz est la même que celle des volucompteurs distribuant de carburants classiques.



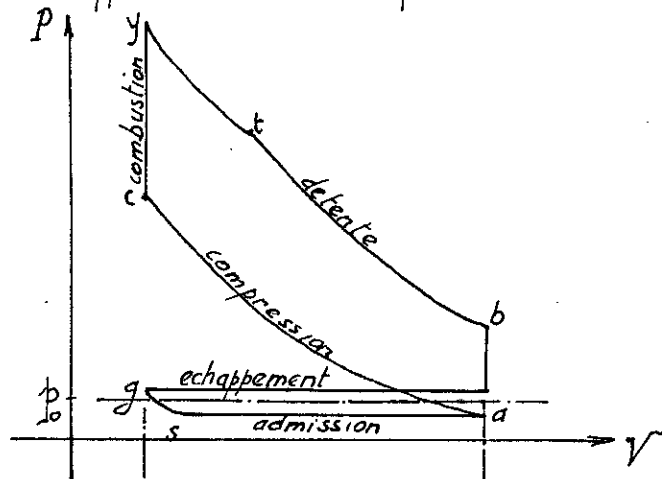
- A - admission moteur
- B - Bouteille G.N.C (H.P).
- 1 - Ecrou borgne
- 2 - Té de bouteille
- 3 - Détendeur
- 4 - Tuyau caoutchouc
- 5 - Mélangeur Gaz
- 6 - Carburateur Essence.

Etude Thermique

L'objet de cet exposé étant l'adaptation d'un moteur essence pour la marche au gaz ; C'est en quelques sortes, une comparaison de performance pour ces deux combustibles. Il nous paraît assez important de faire une étude thermique détaillée, qui, à son tour fournira des outils de démonstration appréciables.

Cette étude s'étalera sur différents points, entre autres, le calcul de pression et de température pour tout les points du cycle ainsi que l'évaluation des différents paramètres.

Le cycle cherché est évidemment le cycle de "Beau-de-Rochas", et en première approximation on prendra le modèle suivant.



Les paragraphes étudiés seront pour les différents cycles.

- I) Calcul du processus d'admission
- II) Paramètres en fin de compression
- III) " - " après combustion
- IV) " - " en fin de détente
- V) Calcul de la pression indiquée et de la Puissance

- Etude du cycle à Gaz ($\lambda_1 = 1,1$)

I Calcul du processus d'admission.

I.1 Hypothèses :

on fait les suppositions suivantes :-

- la charge admise est un gaz parfait, et inerte du point de vue chimique
- l'écoulement est isentropique (adiabatique réversible).
- L'énergie cinétique des gaz frais se transforme totalement en chaleur.
- L'Admission est isobare.
- On considère les ouvertures et les fermetures des soupapes avec avance ou retard par rapport au P.M.
- La charge fraîche se chauffe dans le collecteur d'admission
- Le fluide moteur est formé de mélange des gaz résiduels ainsi que de la charge fraîche.
- La vitesse d'écoulement moyenne est constante.

I.2 Calcul de la pression d'admission.

Par combinaison des équations de conservation d'énergie, d'écoulement ainsi que celle de continuité, on tire l'équation donnant la pression d'admission p_a en fonction de différents paramètres.

$$p_a = \frac{p_0}{\sigma} \left(1 - \frac{N^2}{1800 \cdot g \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot p_0 v_0} \cdot \frac{1}{(\lambda_a \varphi_a)^2} \left[\frac{\varepsilon - \gamma \cdot p}{\varepsilon - 1} \right]^2 \cdot \frac{1}{\left(\frac{f_{ma}}{\sqrt{V_c}} \right)^2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Avec :-

$$p_0 = 101300 \text{ Pa} ; \quad \gamma = \text{coefficient adiabatique} = 1,4 ; \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\text{on tire ; } 1800 g \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot p_0 v_0 = 5,2 \cdot 10^8 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$\lambda_a \varphi_a = \text{coefficient de debit} = 0,7 ; \quad \gamma = \text{coefficient de volume de gaz résiduel} = 0,95$$

$$\varepsilon = 0,6 ; \quad \beta = \text{coefficient de balayage} = 1 ; \quad \sigma = \text{coeff. de moyennage} = 0,98$$

$$f_{ma} = \text{section moyenne de soupape} = 3,63 \text{ cm}^2 ; \quad \sqrt{V_c} = \text{volume de la cylindrée} = 0,365 \text{ l}$$

enfin l'on tire p_a :-

$$p_a = 0,83 \text{ kgf/cm}^2$$

I-3 Calcul du rendement volumétrique.

Compte tenu de ce qui a été dit précédemment, le rendement volumétrique est donné par la formule suivante :

$$\eta_v = \frac{v}{\theta} \cdot \frac{1}{\gamma(\epsilon-1)} \cdot \frac{p_a}{p_0} \left(\epsilon + (\delta-1)(\epsilon-1)\sigma - \frac{p_g}{p_a} \cdot p \right)$$

avec :-

v = coefficient de charge supplémentaire = 1,1

$\theta = \frac{T_0 + \Delta T}{T_0} = 1,12$

$p = T_0$ pression des gaz à l'échappement = 1,10 kgf/cm²

σ = coefficient de balayage = 1

on trouve :

$$\eta_v = 0,775$$

I-4 Calcul de la température en fin d'admission.

Celle-ci est donnée par :-

$$T_a = T_0 \cdot \frac{p_a}{p_0} \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon-1} \cdot \frac{1}{\eta_v \left(\frac{1}{C_p} + \frac{1}{\gamma} - 1 \right)}$$

avec :-

$T_0 = 298^\circ\text{K}$

$p_a = 0,83 \text{ kgf/cm}^2$

$p_0 = 1,013 \text{ kgf/cm}^2$

$\epsilon = 8,5$

$\eta_v = 0,775$

$v = 1,1$

et

en fin

$C_p =$ coefficient de pureté

qui est donnée par :-

$$C_p = \frac{1}{1 + p \cdot \frac{p_g}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T_g} \cdot \frac{1}{(\epsilon-1)\eta_v}}$$

En remplaçant les différents facteurs par leur valeur, l'on tire C_p

$$C_p = 0,95$$

et en fin l'on trouve T_a :-

$$T_a = 405,6^\circ\text{K}$$

II Paramètres en fin de compression

II-1 Hypothèses

on considère que la compression est une transformation polytrophique à coefficient m_c constant.

II-2 Calcul de la pression p_c et de la température T_c .

$$- p_c = p_a \varepsilon^{m_c} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} m_c = 1,35 \\ p_a = 0,83 \text{ kgf/cm}^2 \\ \varepsilon = 8,6 \end{cases}$$

d'où

$$- T_c = T_a \varepsilon^{m_c - 1}$$

$$p_c = 15,15 \text{ kgf/cm}^2$$

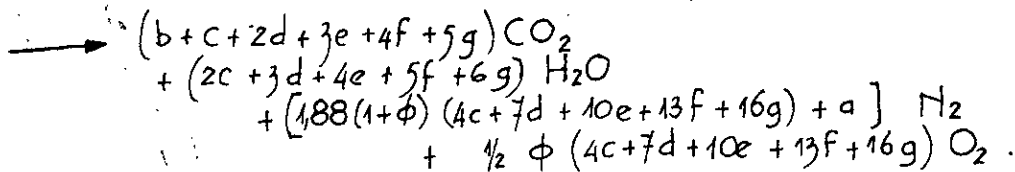
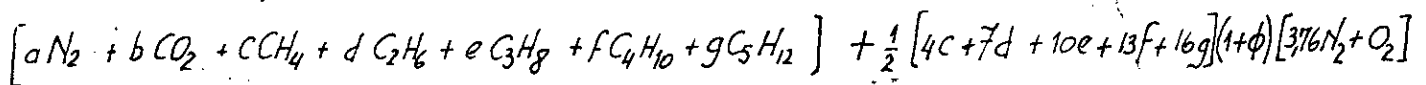
$$T_c = 860^\circ\text{K}$$

III Paramètres d'Etat après combustion

III-1 Hypothèses

- On a des transformations simples (isotherme + isochore).
- Les chaleurs spécifiques varient avec la température
- On tiendra compte de la chaleur échangée avec les parois
- On admet que le changement de la composition chimique du fluide moteur a lieu à la fin de compression.
- Le gaz de combustion n'est pas considéré comme dissocié.
- Tout l'oxygène de l'air est utilisé pendant la combustion.

III-2 Equation ou Réaction de combustion :-



Les coefficients (a, b, c, d, e, f, g) correspondent aux pourcentages relatifs de chaque élément constituant le gaz Naturel.

Et dans 100 moles de G.N on a :-

a = 5,18 moles de N_2 ; b = 0,18 moles de CO_2 ; c = 84,62 moles de CH_4
 d = 7,48 moles de C_2H_6 ; e = 2,06 moles de C_3H_8 ; f = 0,44 mole de C_4H_{10}
 et enfin g = 0,06 moles de C_5H_{12} .

Dans ce cas la masse moléculaire du gaz naturel sera :-

$$M_{\text{mol}} = (5,18 \cdot 28) + (0,18 \cdot 44) + (0,462 \cdot 16) + (7,48 \cdot 30) + (2,06 \cdot 44) + (0,44 \cdot 58) + (0,06 \cdot 72)$$

d'où $M_m = 18,51 \text{ gr/mole}$

III-3 Concentration massique des différents éléments constituant le G.N

III-3-1. le Carbone :- [C]

$$\% C = \frac{0,18 + 0,462 + 2(7,48) + 3(2,06) + 4(0,44) + 5(0,06)}{18,51} \cdot 12 \Rightarrow [C] = 69,99 \%$$

ou :- $[C] = 0,6999 \text{ kg/kg de G.N.}$

III-3-2. l'oxygène :- [O]

$$\% O = \frac{2 \cdot 0,18 \cdot 16}{18,51} \Rightarrow [O] = 0,3111 \%$$

ou :- $[O] = 0,00311 \text{ kg/kg de G.N.}$

III-3-3. l'Hydrogène :- [H]

$$\% H = \frac{(4 \cdot 84,62) + (6 \cdot 7,48) + (8 \cdot 2,06) + (10 \cdot 0,44) + (12 \cdot 0,06)}{18,51} \cdot 1 \Rightarrow [H] = 21,87 \%$$

ou :- $[H] = 0,2187 \text{ kg/kg de G.N.}$

III-3-4. l'Azote :- [N].

$$\% N = \frac{2 \cdot 5,18 \cdot 14}{18,51} \Rightarrow [N] = 7,835$$

ou :- $[N] = 0,0783 \text{ kg/kg de G.N.}$

III-4 Calcul de la quantité d'air.

III-4-1 Air théorique :- L_{th}

$$L_{thé} = \frac{1}{0,21} \left(\frac{[C]}{12} + \frac{[H]}{4} - \frac{[O]}{32} \right)$$

d'où

$$L_{thé} = 0,5376 \text{ kmole Air/kg G.N.}$$

III-4-2 Air réellement Utilisé :-

$$L = \lambda L_{thé} \quad \text{avec} \quad \lambda = 1,1$$

d'où $L = 0,5376 \cdot 1,1$

$$L = 0,59136 \text{ kmole Air/kg G.N.}$$

III 5. Composition des gaz de Combustion

$$n_{CO_2} = \frac{[C]}{12} = \frac{0.6999}{12} \quad \text{d'où} \quad \underline{n_{CO_2} = 0.05832 \text{ kmole/kg de G.N}}$$

$$n_{H_2O} = \frac{[H]}{2} = \frac{0.2187}{2} \quad \text{d'où} \quad \underline{n_{H_2O} = 0.10935 \text{ kmole/kg de G.N}}$$

$$n_{O_2} = [0.21 L_{the} (\lambda - 1) = 0.21 \cdot 0.5376 (0.1)] \quad \underline{n_{O_2} = 0.01128 \text{ kmole/kg de G.N}}$$

$$n_{N_2} = 0.79 \lambda L_{the} = 0.79 \cdot 1.1 \cdot 0.5376 \quad \underline{n_{N_2} = 0.46717 \text{ kmole/kg de G.N}}$$

Et le nombre total de mole en fin de combustion

$$n_f = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{O_2} + n_{N_2}$$

d'où

$$\boxed{n_f = 0.646125 \text{ kmole/kg de G.N.}}$$

De même le coefficient chimique de variation molaire sera :

$$\mu_{ch} = \frac{n_f}{n_0} \quad \text{avec} \quad n_0 = \lambda L_{the} + \frac{1}{18.51} = 0.64538 \text{ kmole/kg de G.N.}$$

d'où

$$\boxed{\mu_{ch} = 1.0011}$$

III 6. Participation molaire de chaque constituant dans les Gaz d'échappement

$$r_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_f}$$

$$\underline{r_{CO_2} = 0.0902}$$

$$r_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_f}$$

$$\underline{r_{H_2O} = 0.169}$$

$$r_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_f}$$

$$\underline{r_{O_2} = 0.0174}$$

$$r_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n_f}$$

$$\underline{r_{N_2} = 0.723}$$

III 7 Bilan Énergétique

le bilan énergétique du point "c" au point "t" s'établit comme suit :

$$Q_r = \Delta U_{c-t} + A L_{c-t} + Q_p$$

avec :

Q_r = chaleur de réaction chimique

ΔU_{c-t} = Variation d'énergie interne de "c" à "t"

$A L_{c-t}$ = Travail échangé

Q_p = chaleur échangée avec les parois

en prenant :

$$Q_r = Q_i = 10837 \text{ kcal/kg de G.N}$$

et

$$\Delta U_{c-t} = \Delta U_{c-y} + \Delta U_{y-t} = \Delta U_{c-y} \quad \text{car la transformation (y-t) est une isotherme et } \Delta U_{y-t} = 0$$

on considère aussi que : $AL_{c-t} = AL_{c-y} + AL_{y,t} = AL_{y,t}$ car la transformation (c-y) est isochore ($v = c^{ste}$) et par conséquent le travail engendré est nul. donc

$$AL_{c-t} = AL_{y-t} = \frac{Q_y}{t} \frac{Q_r}{Q_r}$$

avec

$\frac{Q_y}{t}$ = coefficient de dégagement isothermique de la chaleur
 et $\frac{Q_r}{Q_r} = 1$ d'utilisation de la chaleur.

et de la même manière on prendra :

$$\Delta U_{c-y} = \frac{Q_y}{t} Q_r (1 - \frac{Q_r}{Q_r})$$

et enfin $Q_{p-c-t} = -\frac{Q_y}{t} Q_r + Q_r = Q_r (1 - \frac{Q_r}{Q_r})$.

En revenant à l'énergie interne on dira :

$$\begin{aligned} \Delta U_{c-y} &= [U_y - U_0]_{g.comb} - [U_c - U_0]_{mélange\ frais} \\ &= n_f (u_y - u_0)_{finale} - n_i (u_c - u_0)_{initiale} \end{aligned}$$

avec : n_f = nombre de moles finales
 n_i = " " " initiales
 u = Energie interne spécifique [kcal/kmole].

n_i sera :

$$n_i = n_{mf} + n_{gr} = n_{mf} (1 + \delta_r) \quad \text{avec } \delta_r = \text{coefficient de Gaz résiduels}$$

$$\delta_r = \frac{1}{C_p} - 1 \quad \text{comme } C_p = 0.95 \text{ (voire page) donc } \delta_r = 0.05263$$

et comme $n_f = n_{mf} (\nu + \delta_r)$ on tirera le coefficient de variation totale de mole (reel) : ν_t

$$\nu_t = \frac{n_f}{n_i} \Rightarrow \nu_t = \frac{\nu + \delta_r}{1 + \delta_r}$$

et en remplaçant chaque élément par sa valeur on obtient :

$$\boxed{\nu_t = 1.001}$$

Et en Définitive l'Equation de réaction s'écrira :-

$$\frac{\frac{Q_y}{t} Q_r (1 - \frac{Q_r}{Q_r})}{n_{mf} (1 + \delta_r)} + (u_c - u_0)_i = \nu_t (u_y - u_0)_f$$

et en prenant : $\frac{Q_y}{t} = 0.25$; $\frac{Q_r}{Q_r} = 0.9$; $Q_r = 10837$ kcal/kg de GN

et $n_{mf} = 1 \text{ L thé} + \frac{1}{18.51} = 0.04538$ kmole de Gaz frais ; l'Equation

de réaction deviendra :-

$$10767,97 + (u_c - u_0)_i = 1,001 (u_y - u_0)_f \quad (i)$$

Cette équation nous permet de déterminer T_y . car $du = C_v dT$ or C_v change avec T et on la prendra comme une fonction quadratique du 4^e degré en fonction de T ; $C_v = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + \dots$ et par intégration on obtiendra pour le premier membre de (i) :

$$(u_c - u_0)_i = a_i [T_c - T_0] + \frac{b_i}{2} [T_c^2 - T_0^2] + \frac{c_i}{3} [T_c^3 - T_0^3] + \frac{d_i}{4} [T_c^4 - T_0^4] + \frac{e_i}{5} [T_c^5 - T_0^5].$$

et de la même manière pour le second membre :

$$(u_y - u_0)_f = a_f [T_y - T_0] + \frac{b_f}{2} [T_y^2 - T_0^2] + \frac{c_f}{3} [T_y^3 - T_0^3] + \frac{d_f}{4} [T_y^4 - T_0^4] + \frac{e_f}{5} [T_y^5 - T_0^5].$$

III - 7 - 1 Détermination des coefficients (a_i, b_i, \dots, e_i).

$$\begin{cases} a_i = a_{air} \tau_{air} + a_{GN} \cdot \tau_{GN} \\ b_i = b_{air} \tau_{air} + b_{GN} \cdot \tau_{GN} \\ c_i = c_{air} \tau_{air} + c_{GN} \cdot \tau_{GN} \\ d_i = d_{air} \tau_{air} + d_{GN} \cdot \tau_{GN} \\ e_i = e_{air} \tau_{air} + e_{GN} \cdot \tau_{GN} \end{cases}$$

$$\text{or } \tau_{air} = \frac{\lambda L_{thé}}{\lambda L_{thé} + \frac{1}{18,51}} = 0,9162.$$

$$\tau_{GN} = \frac{1/18,51}{\lambda L_{thé} + \frac{1}{18,51}} = 0,0837$$

Pour le méthane et pour une plage de Température $[225^\circ K - 1150^\circ K]$

$C_v = [23,925 + 33,496 \cdot 10^{-3} t]$ $\left\{ \begin{array}{l} [C_v] = \text{kJ/k mole}^\circ K \\ [t] = ^\circ C \end{array} \right.$
 et pour avoir C_v en Kcal/kmole $^\circ K$ et t en $^\circ K$ on fait la transformation suivante

$$C_v = \frac{23,925}{4,18} + \frac{33,496}{4,18} \cdot 10^{-3} [T - 273] \quad \text{et on obtient en définitive :-}$$

$$C_v = 3,535 + 8,033 \cdot 10^{-3} T$$

Avec un extrait sur les valeurs des coeff. (a_{air}, b_{air}, \dots) et pour la même plage de Température on peut dresser le Tableau suivant :-

Coefficient	a	b	c	d	e
Air	4,9150	-0,33 10^3	2,272 10^6	0,912 10^9	0
G. N	3,535	8,033 10^3	0	0	0

d'ici on peut dire :-

$$\begin{cases} a_i = 4,799 \\ b_i = 0,33 \cdot 10^{-3} \\ c_i = 2,081 \cdot 10^{-6} \\ d_i = 0,835 \cdot 10^{-9} \\ e_i = 0 \end{cases}$$

III-7-2

Détermination des coefficients (a_f, b_f, \dots, e_f)

$$\begin{cases} a_f = a_{CO_2} r_{CO_2} + a_{H_2O} r_{H_2O} + a_{N_2} r_{N_2} + a_{O_2} r_{O_2} \\ b_f = b_{CO_2} r_{CO_2} + b_{H_2O} r_{H_2O} + b_{N_2} r_{N_2} + b_{O_2} r_{O_2} \\ c_f = c_{CO_2} r_{CO_2} + c_{H_2O} r_{H_2O} + c_{N_2} r_{N_2} + c_{O_2} r_{O_2} \\ d_f = d_{CO_2} r_{CO_2} + d_{H_2O} r_{H_2O} + d_{N_2} r_{N_2} + d_{O_2} r_{O_2} \\ e_f = e_{CO_2} r_{CO_2} + e_{H_2O} r_{H_2O} + e_{N_2} r_{N_2} + e_{O_2} r_{O_2} \end{cases}$$

les participations molaire de chaque éléments sont calculées en III.6, page. et soit l'extrait de Tableau sur les différentes valeurs de coefficients (a, b, c, d, e, f).

Coefficient	a	b 10^3	c 10^{-6}	d 10^9	e 10^{12}	r
CO ₂	3,114	15,012	-9,848	2,952	0,3294	0,0902
H ₂ O	5,8092	-0,218	4,388	-3,495	2,077	0,169
N ₂	3,7905	3,249	-1,204	0,162	0	0,723
O ₂	4,1810	0,3358	-1,450	0,242	0	0,0174

d'où les Valeurs suivantes :-

$$\begin{cases} a_f = 4,0759 \\ b_f = 3,681 \cdot 10^{-3} \\ c_f = -1,042 \cdot 10^{-6} \\ d_f = -0,203 \cdot 10^{-9} \\ e_f = 0,380 \cdot 10^{-12} \end{cases}$$

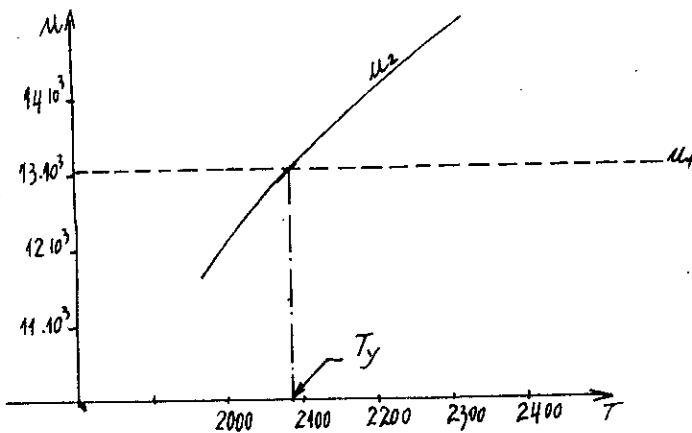
III-7-3 Détermination de la température de fin de Combustion T_y .

en sachant que la température de fin de Compression $T_c = 860^\circ K$ et en prenant comme référence $T_0 = 500^\circ K$ on pourra écrire :-

$$(u_c - u_0)_c = 2251,8 \text{ kcal/kmole} \quad \text{l'équation (i) deviendra :-}$$

$$13019,7 = 1,001 (u_y - u_0)_f \quad \text{(ii)}$$

et comme $(u_y - u_0)_f = 4,075 (T_y - 500) + \frac{3,681}{2} 10^3 (T_y^2 - 500^2) + \dots + \frac{0,38}{5} 10^{12} (T_y^5 - 500^5)$.
en traçant les courbes $u_1 = (13019,7)/1,001 = f(T)$ et $u_2 = (u_y - u_0)_f = f(T)$, leur intersection nous donnera T_y .



$$T_y = 2090^\circ K$$

II - 7 - 4 Détermination de P_y .

Connaissant $T_y \Rightarrow$ Calculons P_y :-

$$P_y V_y = m_y R T_y \quad \text{et} \quad P_c V_c = m_c R T_c$$

d'où l'on tire

$$P_y = \mu_t P_c \cdot \frac{T_y}{T_c}$$

$$P_y = 36,8 \text{ kgf/cm}^2$$

III - 8. Paramètres d'état en "t"

La transformation $y \rightarrow t$ étant isotherme on a évidemment

$$T_t = T_y = 2090^\circ\text{K}$$

Et on note avec δ_t le rapport volumétrique $\frac{V_t}{V_y}$
or on sait que :-

$$A L_{y-t} = A P_y V_y \ln \frac{V_t}{V_y} = \frac{C_p}{\gamma_t} \frac{C_p}{\gamma} Q_r \quad \text{avec } AR = 1,986$$

$$\text{et } P_y V_y = \gamma R T_y$$

$$\text{d'où} \quad \delta_t = e^{\frac{C_p Q_r}{1,986 \gamma T_y}}$$

donc

$$\delta_t = 2,48$$

et enfin

$$P_t = \frac{P_y}{\delta_t}$$

d'où

$$P_t = 14,82 \text{ kgf/cm}^2$$

IV Paramètres en Fin de détente. "b"

$$P_b = P_t \left(\frac{\delta_t}{\epsilon} \right)^{m_d}$$

$$T_b = T_t \left(\frac{\delta_t}{\epsilon} \right)^{m_d - 1}$$

avec un coefficient polytropique de $m_d = 1,3$

d'où l'on tire

$$P_b = 2,94 \text{ kgf/cm}^2$$

$$T_b = 1439,2^\circ\text{K}$$

et enfin la pression à l'échappement se monte à :-

$$P_g = 1,10 \text{ kgf/cm}^2$$

Maintenant que tout les points du cycle ont été déterminés, essayons d'évaluer les autres paramètres qui déterminent la caractéristique d'un moteur.

1) Calcul de la Pression indiquée et de la Puissance, par planimétrie du cycle tracé à une échelle déterminée (cf. page) , on trouve une pression moyenne indiquée telle :-

$$p_{mi} = 6,32 \text{ kgf/cm}^2$$

La Puissance indiquée sera :-

$$P_i = \frac{p_{mi} \cdot V_c \cdot i \cdot N}{225 \tau}$$

avec

$$\begin{cases} V_c = \text{Volume de cylindrée} = 0,36 \text{ l} \\ i = 4 \text{ cylindres} \\ \tau = 4 \text{ temps} \\ N = 5000 \text{ tr/mn} \end{cases}$$

$$P_i = 8,15 \cdot 6,32 \quad \text{d'où}$$

$$P_i = 51,5 \text{ CV}$$

Le rendement indiqué sera :-

$$\eta_i = 1,986 \frac{p_i}{p_0} \frac{\eta_{mf}}{\eta_v} \cdot \frac{T_0}{Q_i}$$

$$\eta_i = 0,307$$

Et en prenant un rendement mécanique $\eta_m = 0,8$ le rendement effectif sera :-

$$\eta_e = \eta_m \cdot \eta_i$$

$$\eta_e = 0,245$$

La Puissance effective sera :-

$$P_e = P_i \cdot \eta_m$$

$$P_e = 41,2 \text{ CV}$$

La consommation spécifique indiquée sera :-

$$C_{si} = \frac{632 \cdot 10^3}{\eta_i \cdot Q_i}$$

$$C_{si} = 189,9 \text{ g/ch.h}$$

La consommation spécifique effective de :-

$$C_{se} = C_{si} \cdot \frac{\eta_i}{\eta_e}$$

$$C_{se} = 237,9 \text{ g/ch.h}$$

En première conclusion on peut dire que les résultats sont assez explicatifs et pour un travail orientatif on va essayer d'établir un autre calcul thermique correspondant à une puissance de 1/2 charge.
On va essayer de chercher un nouveau λ répondant à ce critère.

Les conditions stœchiométriques sont :-

$\frac{1}{18,51}$ kmole de G.N + $0,5376 \cdot 1,1$ kmole d'Air.
c'est-à-dire :-
 $0,054$ kmole de G.N pour $0,59136$ kmole d'Air

Le volume occupé par (m_0 = nombre de mole de la charge gracie) est

$$V_0 = \sum V_i = 0,775 \cdot 367,4 \text{ cm}^3 = 284,7 \text{ cm}^3$$

Dans ce volume une partie V_1 est occupé par $\frac{1}{18,51}$ kmole de Gaz Naturel

$$V_1 = \frac{V_0 \cdot \frac{1}{18,51}}{1,1 \cdot 0,5376 + 0,054} = 23,8 \text{ cm}^3$$

Pour le Nouveau λ_2 , le volume disponible est toujours $284,7 \text{ cm}^3 = V_0$ et le volume correspondant à la demi-charge est $V_1/2$.
d'où les relations suivantes :-

$$\begin{array}{l} \lambda_2 \cdot 0,5376 + 0,054 \longrightarrow V_0 \\ 0,054 \longrightarrow V_1/2 \end{array}$$

$$\lambda_2 = \left[\frac{284,7 \cdot 0,054}{11,91} - 0,054 \right] \cdot \frac{1}{0,5376}$$

d'où

$$\boxed{\lambda_2 = 2,3}$$

Etude du cycle au Gaz ($\lambda_2 = 2,3$)

I - Calcul du processus d'admission.

ou a évidemment les mêmes paramètres du moment qu'il s'agit du même gaz.

$$p_a = 0.83 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\eta_v = 0.775$$

$$T_a = 405.6 \text{ }^\circ\text{K}.$$

II Paramètres en fin de compression

De même que pour ces paramètres :-

$$p_c = 15.15 \text{ kgf/cm}^2$$

$$T_c = 860 \text{ }^\circ\text{K}$$

III Paramètres d'état en fin de combustion :-

les équations de combustion ainsi que les hypothèses restent les mêmes

III - 1 - Quantité d'Air :-

L'air réellement utilisé est :-

$$L = \lambda L_{thé} = 2,3 \cdot 0,5376$$

$$L = 1,23648 \text{ kmole Air/kg de GN}$$

III - 2 - Composition des gaz d'échappements

$$n_{CO_2} = \frac{[C]}{12}$$

$$n_{CO_2} = 0.058325 \text{ kmole/kg de GN}$$

$$n_{H_2O} = \frac{[H]}{2}$$

$$n_{H_2O} = 0.10935 \text{ --- " --- " ---}$$

$$n_{O_2} = 0,21 L_{thé} (\lambda - 1) = 0,21 \cdot 0,5376 \cdot 1,3$$

$$n_{O_2} = 0.1467 \text{ --- " --- " ---}$$

$$n_{N_2} = 0,79 \cdot \lambda L_{thé} = 0,79 \cdot 1,23648$$

$$n_{N_2} = 0.9768 \text{ --- " --- " ---}$$

Nombre total de mole en fin de combustion :-

$$n_f = \sum_1^4 n_i = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{O_2} + n_{N_2}$$

$$n_f = 1,291175 \text{ kmole/kg GN}$$

Le coefficient chimique de variation molaire est :-

$$\mu_{ch} = \frac{1,291175}{1,2905}$$

$$\mu_{ch} = 1,0005$$

III-3 Participation molaire de chaque constituant dans les G. d'échappement

$$r_{CO_2} = 0.045172$$

$$r_{H_2O} = 0.08469$$

$$r_{O_2} = 0.113617$$

$$r_{H_2} = 0.75652$$

III-4 Bilan Énergétique

le nombre de mole final n_{mf} sera :-

$$n_{mf} = 1 L_{th} + 1/18.51$$

$$n_{mf} = 1.2905 \text{ kmole de G. frais}$$

Le coefficient de variation totale de mole est :-

$$v_t = \frac{n_f}{n_i} = \frac{v_{ch} + \delta_r}{1 + \delta_r}$$

$$v_t = 1.0005$$

L'Equation de réaction s'écrit :-

$$5385.07 + (m_c - m_o)_i = 1.00 (m_y - m_o)_f \quad (i)$$

III-4-1 Détermination des coefficients (a_i, b_i, \dots, e_i).

comme r_{air} change et devient : $r_{air} = 0.9581$

et $r_{GN} = 0.0418$

Dans ce cas

$$\begin{cases} a_i = 4,8568 \\ b_i = -0.0215 \cdot 10^{-3} \\ c_i = 2,176 \cdot 10^{-6} \\ d_i = 0.0737 \cdot 10^{-9} \\ e_i = 0 \end{cases}$$

III-4-2 Détermination des coefficients (a_f, b_f, \dots, e_f)

De même ces coefficients seront

$$\begin{cases} a_f = 3,975 \\ b_f = 3,155 \cdot 10^{-3} \\ c_f = -1,148 \cdot 10^{-6} \\ d_f = 0.258 \cdot 10^{-9} \\ e_f = 0.19 \cdot 10^{-12} \end{cases}$$

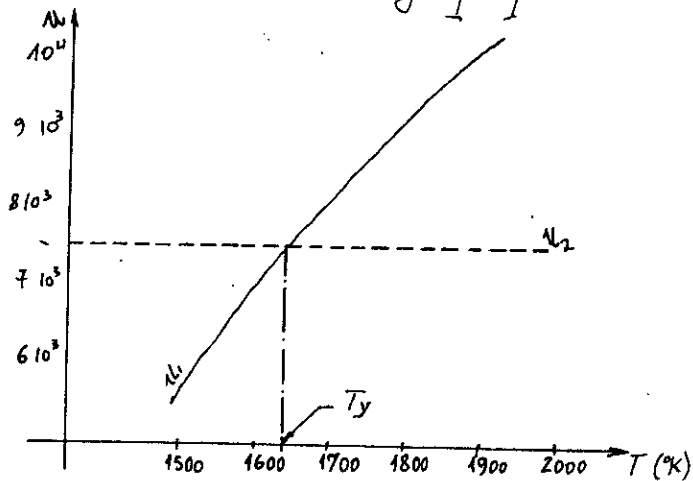
III - 4-3 Détermination de la température de fin de combustion T_y pour une référence de 500°K et $T_c = 850^\circ\text{K}$

$(u_c - u_0)_i = 2219,68 \text{ kcal/kmole}$ et l'équation (i) deviendra

$$7604,7 = 1,00 (u_f - u_0)_f \quad (ii)$$

$$(u_f - u_0)_f = 3,99 (T_y - 500) + \frac{3,15}{2} 10^{-3} (T_y - 500)^2 - \frac{4,15}{3} 10^{-6} (T_y - 500)^3 + \frac{0,24}{4} 10^{-9} (T_y - 500)^4 + \frac{0,19}{5} 10^{-12} (T_y - 500)^5$$

De même la résolution graphique donnera



$$T_y = 1640^\circ\text{K}$$

III - 4-4 Détermination de p_y .

De la même manière $p_y = p_c \frac{T_y}{T_c}$

$$p_y = 28,98 \text{ kgf/cm}^2$$

III - 5 Paramètres d'état en "t"

Le coefficient $\delta_t = \frac{V_t}{V_y} = e^{\frac{4,98 \cdot p_c \cdot Q_c}{1,98 \cdot n_f \cdot T_y}}$ sera

$$\delta_t = 1,78$$

et

$$T_t = T_y = 1640^\circ\text{K}$$

et

$$p_t = 16,22 \text{ kgf/cm}^2$$

IV Paramètres en fin de détente

De la même manière avec $m_d = 1,3$

$$p_b = 2,1 \text{ kgf/cm}^2$$

et

$$T_b = 1023,3^\circ\text{K}$$

↓ Calcul de la Pression indiquée et de la Puissance
La planimétrie nous donne :-

$$p_{mi} = 3,94 \text{ kgf/cm}^2$$

D'où une puissance indiquée de

$$P_i = 32,10 \text{ CV}$$

Le rendement indiqué sera :-

$$\eta_i = 0,386$$

et le rendement effectif de :-

$$\eta_e = 0,309$$

La consommation spécifique indiquée de :-

$$c_{si} = 151,08 \text{ g/ch.h}$$

et la consommation effective de :-

$$c_{se} = 180,7 \text{ g/ch.h}$$

Etude du cycle à essence ($\lambda = 0,9$)

Afin de compléter notre comparaison, on se propose dans une troisième phase de faire une étude thermique du cycle à essence, avec un excès d'air de $\lambda = 0,9$. La méthode de calcul est évidemment la même, et on se bornera uniquement aux résultats.

I Etude du Processus d'Admission.

Les paramètres d'admission ne changent guère relativement au cycle à gaz, car il s'agit du même moteur, et donc des mêmes dimensions.

$$p_a = 0,83 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\eta_v = 0,775$$

$$T_a = 405,5 \text{ }^\circ\text{K}$$

II Paramètres en fin de compression.

Du fait de la non homogénéité du mélange (Air + Essence), le coefficient (n) polytropique n'est plus le même; Il en résulte donc une différence au niveau des paramètres p_c et T_c .

on prend $m_c = 1,38$ et on aura :-

$$p_c = 0,83 \cdot (8,6)^{1,38}$$

$$T_c = 405,6 \cdot (8,6)^{0,38}$$

$$p_c = 16,16 \text{ kgf/cm}^2$$

$$T_c = 918,5 \text{ }^\circ\text{K}$$

III Paramètres après combustion.

Les données pratiques pour l'essence (C_7H_{14}).

III - 1 - 1 Concentration massique des différents éléments constituant l'essence

celles-ci sont les suivants :-

$$[C] = 0,854 \text{ kg de Carbone / kg d'Essence}$$

$$[H] = 0,142 \text{ kg d'Hydrogène / kg d'Essence}$$

$$[O] = 0,004 \text{ kg d'Oxygène / kg d'Essence.}$$

III-1.2 Quantité d'Air utilisée pour la combustion.

- La quantité d'Air théorique à la combustion est :-

$$L_{the} = 0,5073 \text{ kmole d'Air/kg d'Ess}$$

La quantité d'Air réellement utilisée est :-

$$L = \lambda L_{the} \quad \lambda = 0,9$$

⇒

$$L = 0,4565 \text{ kmole/kg d'Ess.}$$

III-2 Composition des Gaz d'Échappement.

Du point de vue chimique la formation du monoxyde de carbone est inévitable, car la combustion est incomplète du fait qu'elle se fait avec un défaut d'oxygène.

Et la composition des gaz de combustion va être la suivante :-

$$n_{CO_2} = \frac{[C]}{12} - 0,42(1-\lambda)L_{the} = \frac{0,854}{12} - 0,42 \cdot 0,9 \cdot 0,5073$$

$$n_{CO_2} = 0,0498 \text{ kmole/kg Ess}$$

$$n_{H_2O} = \frac{[H]}{2} = \frac{0,142}{2}$$

$$n_{H_2O} = 0,071 \text{ — " —}$$

$$n_{CO} = 0,42(1-\lambda)L_{the} = 0,42 \cdot 0,9 \cdot 0,5073$$

$$n_{CO} = 0,02130 \text{ — " —}$$

$$n_{H_2} = 0,79 \lambda L_{the} = 0,79 \cdot 0,9 \cdot 0,5073$$

$$n_{H_2} = 0,36039 \text{ — " —}$$

Le nombre total de mole en fin de combustion sera

$$n_f = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{CO} + n_{H_2}$$

$$n_f = 0,502 \text{ kmole/kg d'Ess}$$

et le coefficient chimique de variation molaire est :-

$$\mu_{ch} = \frac{n_f}{n_0}$$

$$\mu_{ch} = 1,076$$

III-3 Participation molaire de chaque constituant dans les G.d.E.

$$z_{CO_2} = 0,0992$$

$$z_{CO} = 0,0424$$

$$z_{H_2O} = 0,1454$$

$$z_{H_2} = 0,710$$

III-4 Bilan Énergétique :-

III-4-1 Chaleur de réaction.

$Q_r = Q_i - 13800 (1-d)$, la quantité 13800(1-d) tient compte de la formation de CO, car ce dernier oblige l'évacuation d'une certaine quantité d'énergie.

avec $d=0,9$; $q_i = 10400 \text{ kcal/kg}$

$$Q_r = 9020 \text{ kcal/kg.}$$

III-4-2 Équation de Réaction.

Le nombre total de mole final n_{mf} sera :-

$$n_{mf} = \lambda L_{thé} + \frac{1}{114}$$

$$n_{mf} = 0,4653 \text{ kmol/kg}$$

Le coefficient de variation totale de mole est :-

$$\mu_t = \frac{p_{ch} + \delta_z}{1 + \delta_z}$$

$$\mu_t = 1,072.$$

d'où l'équation globale :-

$$\frac{0,9 \cdot 9020 (1-0,25)}{0,4653 \cdot (1 + 0,0526)} + (m_c - m_o)_i = \mu_t (m_y - m_o)_f$$

d'où :-

$$12831,22 + (m_c - m_o)_i = 1,072 (m_y - m_o)_f. \quad (i)$$

III-4-3 Détermination des coefficients (a_i, b_i, \dots, e_i).

on a :- $r_{air} = \frac{\lambda L_{th}}{\lambda L_{thé} + \frac{1}{114}}$;

$$r_{air} = 0,98123$$

$$r_{ess} = \frac{\frac{1}{114}}{\lambda L_{thé} + \frac{1}{114}}$$
 ;

$$r_{ess} = 0,01885$$

les coefficients pour l'essence sont :-

$$a_{ess} = 5,485 ; b_{ess} = 148 \cdot 10^3 ; c_{ess} = -51,5 \cdot 10^6 ; d_{ess} = e_{ess} = 0$$

Dans ce cas :-

$$\left\{ \begin{array}{l} a_i = 4,926 \\ b_i = 2,423 \cdot 10^{-3} \\ c_i = 1,258 \cdot 10^{-6} \\ d_i = 0,894 \cdot 10^{-9} \\ e_i = 0 \end{array} \right.$$

III-4-4. Détermination des coefficients (a_f, \dots, e_f) .

ces coefficients sont :

$$\begin{cases} a_f = 3,997 \\ b_f = 3,994 \cdot 10^{-3} \\ c_f = -1,2950 \cdot 10^{-6} \\ d_f = -0,0820 \cdot 10^{-9} \\ e_f = 0,3263 \cdot 10^{-12} \end{cases}$$

III-4-5 Détermination de la température en fin de combustion T_y .

Comme la température de compression $T_c = 918,5 \text{ °K}$, et en prenant une référence à $T_0 = 500 \text{ °K}$, on a obtenu :-

De ce fait l'équation (i) deviendra :-

$$16629,5 = 1,07 (u_y - u_0)_f \quad (i \ i)$$

La résolution de :-

$$(u_y - u_0)_f = 3,997(T-500) + \frac{3,994}{2} 10^{-3}(T^2-500^2) + \frac{1,295}{3} 10^{-6}(T^3-500^3) - \frac{0,082}{4} 10^{-9}(T^4-500^4) + \frac{0,3263}{5} 10^{-12}(T^5-500^5)$$

et de (ii) nous donne par la méthode graphique :-

$$T_y = 2290 \text{ °K.}$$

III-4-6 Détermination de p_y

$$p_y = p_c \cdot \frac{T_y}{T_c}$$

$$p_y = 43,18 \text{ kgf/cm}^2$$

III-5 Paramètres en "t"

$$\delta_t = e^{\frac{4,4 \text{ Ar}}{1,98 \cdot n_f \cdot T_y}} = \frac{v_t}{v_y}$$

$$\delta_t = 2,56$$

et comme $p_t = \frac{p_y}{\delta_t}$

$$p_t = 16,86 \text{ kgf/cm}^2$$

et puisque on est sur l'isotherme :-

$$T_t = T_y = 2290 \text{ °K.}$$

III Paramètres en fin de détente.

avec un coefficient polytropique de $m_d = 1,3$ on obtient :-

$$p_b = 3,51 \text{ kgf/cm}^2$$

$$T_b = 1591,9 \text{ °K.}$$

↓ Pression indiquée, puissance, consommation et rendements.

par plaminetrie on obtient :-
une pression moyenne indiquée p_{mi} de

$$p_{mi} = 7,02 \text{ kg/cm}^2$$

Dans ce cas la puissance indiquée est

$$P_i = \frac{0,367 \cdot 4 \cdot 5000 \cdot p_{mi}}{4 \cdot 225}$$

$$P_i = 63,73 \text{ cv.}$$

Le rendement indiqué sera :-

$$\eta_i = 1,986 \frac{7,02 \cdot 0,4653 \cdot 298}{1,013 \cdot 0,775 \cdot 10400}$$

$$\eta_i = 0,206$$

En adoptons toujours un rendement mécanique de $\eta_m = 0,8$, on obtient une puissance à l'arbre (effective) de :-

$$P_e = \eta_m P_i$$

$$P_e = 50,9 \text{ cv.}$$

De même que le rendement effectif sera :-

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m$$

$$\eta_e = 0,228$$

Les consommations spécifiques indiquées et effective seront :-

$$C_{si} = 212,4 \text{ g/cv.h}$$

et

$$C_{se} = 266,4 \text{ g/cv.h}$$

II. Conclusions, Générales

D'après les résultats obtenus on pourra dire que pour une même quantité (volumétr.) de mélange, "Air-G.N." ou "Air-Essence", la perte de puissance enregistrée par la marche au Gaz est largement compensée par un gain de rendement thermique.

La qualité du mélange "Air-Gaz Naturel" peut avoir influé sur la pression moyenne indiquée, ainsi que sur le rendement. En effet avec un excès d'air important, la puissance se voit chuter tandis que le rendement s'améliore.

Le tableau récapitulatif suivant permet de faire une meilleure comparaison.

	marche Essence ($\lambda=0.9$)	marche G.N ($\lambda=1.1$)	marche G.N ($\lambda=2.3$)
Pression moyenne indiquée P_{mi}	7.82 kgf/cm ²	6.32 kgf/cm ²	3.94 kgf/cm ²
Puissance effective P_e	50.9 CV	41.2 CV	25.6 CV.
Rendement effectif η_e	0.228	0.245	0.309
Consomm. Spécif. effe. C_{se}	266.4 g/cv.h	237.9 g/cv.h	188.7 g/cv.h
Températ. fin de Combustion T_y	2290 °K	2090 °K	1640 °K

La perte de puissance relative à la marche au gaz ($\lambda=1.1$) est de l'ordre de 19%.

Etude de la Carburation

I Principe et Généralités

Le principe de fonctionnement d'un moteur à gaz est identique à celui d'un moteur à essence, toute fois, la différence apparaît au niveau de l'alimentation.

Dans les moteurs à gaz, le combustible est introduit à l'état gazeux dans un "mélangeur" au lieu de l'état liquide pour l'essence. Ceci nous permet de penser que le mélange "air-gaz" est plus homogéné que le mélange "air-essence".

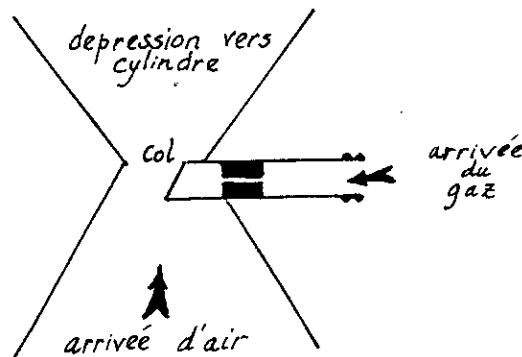
La richesse du mélange carburé d'un moteur est un des paramètres essentiels; la pression moyenne effective (p_{me}) est maximale aux environs d'une richesse de $\phi = 1,1$, mais le rendement effectif est max pour $\phi \approx 0,9$ d'où l'intérêt de faire un réglage en régime légèrement pauvre.

Le pouvoir calorifique par volume du mélange air-gaz baisse relativement au mélange air-essence. Cette diminution d'énergie thermique disponible par unité de volume du mélange est due au fait que les gouttelettes d'essence ont un volume négligeable par rapport au gaz.

En pratique, pour avoir une combustion avec un minimum de polluants à l'échappement, on fera le réglage de carburation avec excès d'air.

II Le Mélangeur.

a) schéma de principe



Le mélange carburé air-gaz est dosé au moyen d'un mélangeur du type Venturi - (cf schéma).

La vitesse de l'air aspiré par le moteur est maximale au col de la buse du mélangeur.

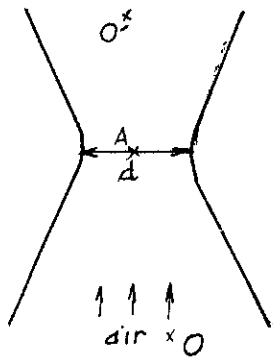
b) Fonctionnement.

- Le mélangeur s'adapte aux carburateurs essence.
- La variation du débit de gaz se fait mécaniquement au moyen d'un papillon solidaire de celui du carburateur. Le mélangeur comprend une prise de gaz, et une prise d'air pour le ralenti, ces deux prises sont réglées par deux "vis pointeaux".
- Le passage d'un combustible à l'autre s'effectue simplement par manœuvre manuelle.

c) Dimensionnement de la buse d'amener d'air.

Hypothèses :-

- l'écoulement est continu.
- la vitesse d'écoulement est uniformément répartie dans la section.
- l'air est un fluide incompressible (par hypothèse).
- la dépression maximale admise est environ $\Delta p_{\max} = 1200 \text{ mm H}_2\text{O}$



soient les points A et O

$$A \begin{cases} P_A \\ w_A \\ \rho_A = \rho_0 \end{cases} \quad O \begin{cases} P_0 \\ w_0 = 0 \\ \rho_0 \end{cases}$$

d'après Bernoulli :-

$$\frac{P_0}{\rho_0} + \frac{w_0^2}{2} = \frac{P_A}{\rho_0} + \frac{w_A^2}{2} + J_A$$

* en prenant $J_A = 0$ (pertes de charge négligeable); φ_w = coeff. de vitesse.

$$\Delta p_d = |P_A - P_0| \quad \text{donc} \quad w_A = \left[\frac{2}{\rho_0} \Delta p_d \right]^{1/2} \cdot \varphi_w$$

Le débit d'air est :-

$$q_{\text{air}} = \epsilon_A \cdot S_A \cdot w_A \cdot \rho_0 \cdot 3600 \quad (\text{kg/h}).$$

donc :-

$$q_{\text{air}} = \epsilon_A \cdot \varphi_w \cdot S_A \cdot (2 \rho_0 \Delta p_d)^{1/2} \cdot 3600$$

$$\begin{cases} S_A = \pi d^2 / 4 \\ \epsilon_A = \text{coeff. de contraction de la veine.} \end{cases}$$

et en prenant $\mu_d = \epsilon_A \cdot \varphi_w$ = coefficient de débit

φ_c = coefficient de compressibilité de l'air

donc

$$q_{\text{air}} = \varphi_c \cdot \mu_d \cdot S_A \cdot (2 \rho_0 \Delta p_d)^{1/2} \cdot 3600 \quad (\text{kg/h}) \quad (I)$$

Comme la consommation d'air est :-

$$(II) \quad q_{\text{air}} = V_c \cdot i \cdot \eta_v \cdot \gamma_0 \cdot n \cdot \frac{60}{\tau/4} \quad \text{avec}$$

V_c = volume de cylindrée
 i = nombre de cylindre = 4
 η_v = rendement volumétrique
 $\gamma_0 = 1,29 \text{ kg/m}^3$
 $n = 5000 \text{ tr/min}$
 $\tau = 4 \text{ courses/cycle.}$

en écrivant (I) \Rightarrow (II) on tire d = diamètre au col de la buse.

$$d = \left(\frac{V_c \cdot \eta_v \cdot \gamma_0 \cdot n \cdot 30 \cdot 4 \cdot 4}{3600 \cdot \pi \cdot \mu_d (2\gamma_0 \cdot \Delta p_d)^{1/2}} \right)^{1/2}$$

en consultant le graphe $\mu_d = f(\Delta p_d)$ on tire $\mu_d = 0,8$ pour $\Delta p_d = 1200 \text{ mm H}_2\text{O}$

on trouve un diamètre de :-

$$d = 22,8 \text{ mm.}$$

d) Dimensionnement du jeteur gaz.

identiquement au calcul pour la buse d'air, la vitesse d'écoulement du gaz est :-

$$w_g = C_g \left(2/\gamma_g \cdot \Delta p'_d \right)^{1/2}$$

en supposant en 1^{ère} approximation $C_c \approx C_g \approx 1$ et $p'_g = p_0$
 on obtient un rapport de vitesse.

$$\frac{w_d}{w_g} = \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_0} \right)^{1/2} = \left(\frac{0,82}{1,29} \right)^{0,5} \approx 0,79.$$

donc pour $w_{\text{air}} = 80 \text{ à } 100 \text{ m/s} \Rightarrow w_g = 60 \text{ à } 75 \text{ m/s.}$

et en tenant compte de la compressibilité du gaz, on tire le débit de gaz.

$$q_g = \mu_g S_g \cdot \left(2 \cdot \gamma_g \cdot \Delta p'_d \right)^{0,5} \cdot 3600 \text{ (kg/h)} \quad (I)$$

et l'exédent d'air est exprimé de la façon suivante :-

$$\lambda = \frac{q_{\text{air}}}{q_g \cdot L_{\text{min}}}$$

avec $\lambda = \text{excès d'air}$
 $L_{\min} = \text{pouvoir comburivor (kg d'air/kg de combustible)}$.

et comme $q_{\text{air}} = V_c \cdot i \cdot \eta_v \cdot \gamma_0 \cdot n \cdot \frac{60}{\tau/2}$
 $q_{\text{air}} = 213,2 \text{ kg/R.}$

or $L_{\min} = 0,5376 \text{ (kmole d'air/kg de G.N)}$
 $= 0,5376 \cdot 29,966 = 16,109 \text{ (kg d'air/kg de G.N)}$

donc $q_g = \frac{q_{\text{air}}}{\lambda \cdot L_{\min}} = \frac{213,2}{1,1 \cdot 16,109}$

$$q_g = 12,03 \text{ kg/h.}$$

or d'après (1)

$$d_j = \left(\frac{4 \cdot q_g}{\pi \cdot \mu_g \cdot \varphi_g (2 \gamma_g \cdot \Delta p'_d)^{1/2} \cdot 3600} \right)^{0,5}$$

\Rightarrow

$$d_j = 6,18 \text{ mm.}$$

e) Dessin d'ensemble.

(cf page. 35)

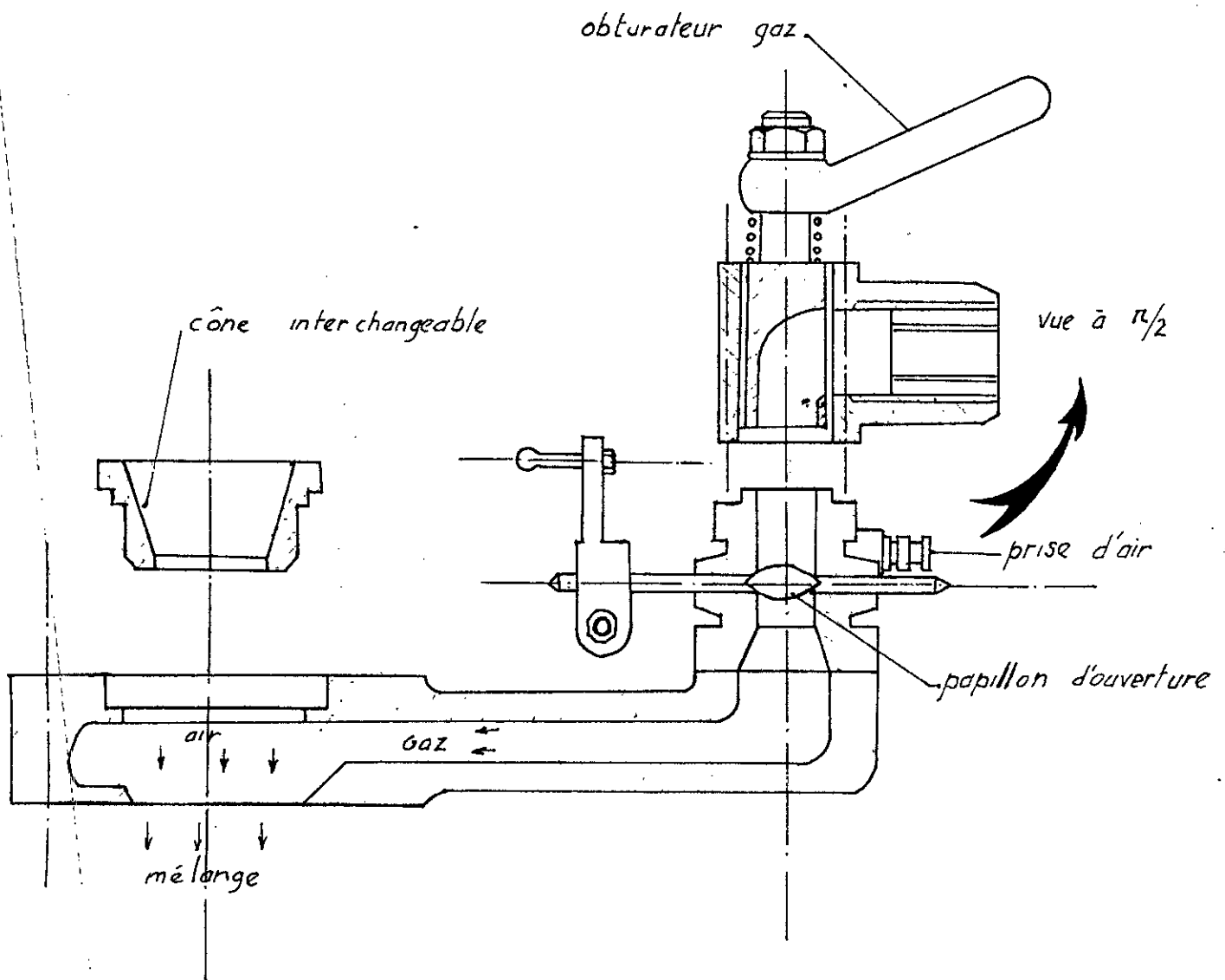


Fig Le Mélangeur

Essais et Mesures

Avant d'aborder ce chapitre, je voudrais attirer l'attention des responsables sur l'état actuel du matériel existant au Sabo-moteur.

En effet, on a constaté tout d'abord la defectuosité du moteur existant. Il nécessitait beaucoup de réparations, les plus urgentes (nécessaires à l'élaboration des Essais) étaient le rodage de soupapes, ainsi que le remplacement du tendeur de chaîne existant. On a effectué ces opérations le 10 et le 11 Novembre 1979.

Les instruments de mesures (balance, tachymètre, ...) sont quasiment hors d'usage, ils faussaient presque toutes mesures.

Toutes fois on a essayé de faire des manipulations avec autant de rigueurs que possible.

Le moteur dont nous devons effectuer la transformation est un moteur R16 du type 697 essence R1150. dont les Caractéristiques fournies par le constructeur sont les suivantes.

Alésage	76 mm
Course	81 mm
Cylindrée	1470 cm ³
Taux de compression	8,6/1
Puissance fiscale	8 CV
Puissance Effective à 5000 tr/mn	
CV - DIN	58,5
CV - SAE	62,6
Couple Maximum à 2800 tr/mn	
m.kg - DIN	10,8
m.kg - SAE	10,75

I Méthode de calcul pour tout paramètres.

Les paramètres que l'on désire connaître sont, C_e = le couple effectif, P_e = puissance effective, la consommation horaire, C_h ainsi que la consommation spécifique C_s .
Ces se ne peuvent être liés directement sur les appareils de mesure, ils nécessitent donc un calcul préalable.

- Couple effectif : C_e
 F = force liée sur la balance

$$C_e = F \cdot 0.7162 \text{ kgf.m.}$$

- Puissance effective : P_e
 F = force liée sur la balance
 n = nombre de tours/min liés sur tachymètre

$$P_e = F \cdot n \cdot 10^{-3} \text{ CV}$$

- Consommation horaire - C_h pour l'essence.
 t = temps d'écoulement de la quantité v .
 $v = 100 \text{ ml.}$

$$C_h = 3,6 \frac{v}{t} \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

- Consommation horaire - C_h pour le Gaz Naturel
on reporte les valeurs liées sur le débitmètre à gaz, sur une graphie préalablement étalonné, et donnant les consommations horaires en fonction de ces valeurs. en g/s

- Consommations spécifiques, C_s .
avec $[C_h] = \text{g/s.}$

$$C_s = 3600 \cdot \frac{C_h}{P_e} \frac{\text{g}}{\text{CV.h}}$$

- Rendement global du moteur η_g

P_{ci} = pouvoir calorifique inférieur
= 10200 (pour l'essence) kcal/kg
= 10837 (pour le G.N) — " —

$$\eta_g = \frac{635 \cdot 10^3}{C_s \cdot P_{ci}}$$

II Programme d'Etude sur le banc.

En premier lieu on va essayer d'établir les caractéristiques du moteur fonctionnant à l'essence, et cela pour différentes ouvertures du papillon du carburateur.

On aura ainsi : $P_e = f(n)$, $C_e = f(n)$, $C_h = f(n)$ et $\eta_g = f(n)$.
On notera par "X" la pleine ouverture du papillon; et $\frac{3}{4}X$, une ouverture au $\frac{3}{4}$, ... ainsi de suite.

Les courbes se trouvent en pages (39, 40; 41, 42)

charge maximale X

CP (t/min)	F (kgf)	Pe (cv)	Ge (m.kg)	t (s)	Ch (l/h)	Cs (g/cch)	?
1000	13,6	13,6	9,74	68	5,29	290	0,214
1500	14	21	10,02	48,8	7,37	261,7	0,237
2000	14,4	28,8	10,31	38,3	9,39	245,1	0,256
2500	14,2	35,5	10,17	29,9	12,04	252,6	0,240
3000	13,5	40,5	9,7	25,5	14,11	259,6	0,239
3500	12,8	44,8	9,2	23	15,6	260,2	0,239
4000	12	48	8,6	20,8	17,3	268,6	0,231
4500	11	49,5	7,87	18	20	301,01	0,206
5000	10,3	51,5	7,37	15,5	23,22	335,98	0,185
5500	8,6	48,9	6,3	13,4	26,8	409,3	0,152
6000	8	48	5,7	12	30	465,6	0,133

Essai du 12/11/79

Carburant : Essence Super
 $\rho_{ci} = 10400 \text{ kcal/kg}$
 $\rho = 0,74 \text{ g/cm}^3$

Gicleurs

Ess : 145
 Air : 40

pression d'huile maxi
 $P_h = 3,6 \text{ (kg/cm}^2)$

Temperature Maximale
 des G. d'Echap^t

$T_g = 750^\circ\text{C}$

Temperature Max d'Entree
 d'eau $T_e = 72^\circ\text{C}$

Temperature Max de
 Sortie d'eau

$T_s = 82^\circ\text{C}$

Temperature Max
 de sortie d'huile :
 $T_h = 92^\circ\text{C}$

charge 0,75 X

CP (t/min)	F (kgf)	Pe (cv)	Ge (m.kg)	t (s)	Ch (l/h)	Cs (g/cch)	?
1200	10,4	12,48	7,44	67	5,37	320,75	0,194
1800	10,8	19,6	7,8	56	6,42	244,3	0,254
2000	11	22	7,87	46	7,8	265,01	0,234
2500	10,6	26,5	7,59	34	10,5	297,66	0,209
3000	10,0	30,1	7,2	24,8	14,51	358,58	0,173
3500	9,35	32,7	6,7	20,	18	409,5	0,152
4000	8,7	34,8	6,32	18	20	428,1	0,145
4500	8	36	5,92	15,8	22,7	471,5	0,132
5000	7,1	35,5	5,08	13	27,6	581,1	0,107

charge 0,5 X

CP (t/min)	F (kgf)	Pe (cv)	Ge (kg.m)	t (s)	Ch (l/h)	Cs (g/cch)	?
1000	9,4	9,4	6,73	69	5,2	413,5	0,150
1500	9,2	13,8	6,59	56	6,42	347,04	0,179
2000	8	16	5,73	49	7,34	342,09	0,181
2500	6	15	4,29	42,8	8,41	417,75	0,149

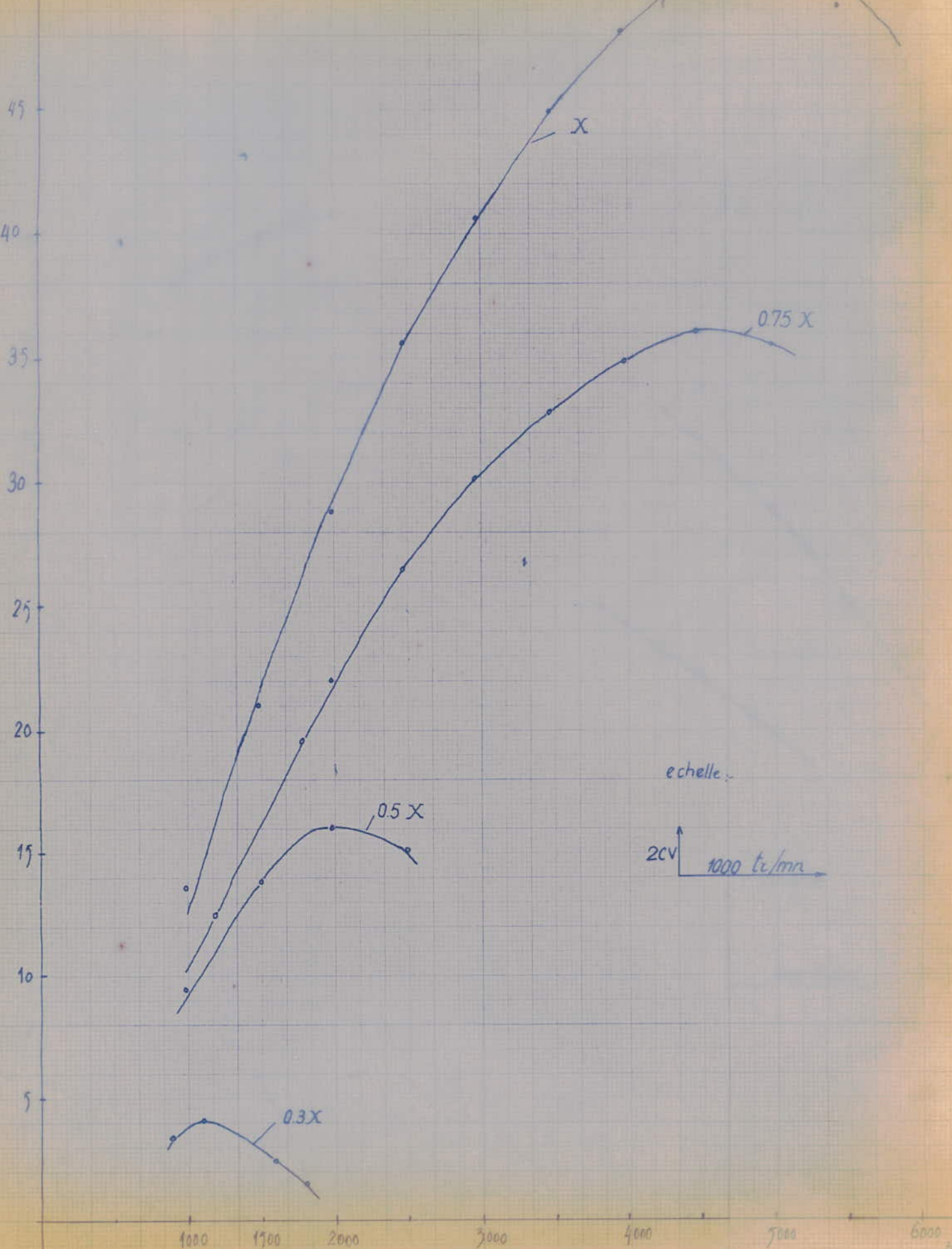
charge (mini) 0,3 X

CP (t/min)	F (kgf)	Pe (cv)	Ge (kg.m)	t (s)	Ch (l/h)	Cs (g/cch)	?
900	3,8	3,42	2,72	126,6	2,84	619,4	0,1005
1200	3,35	4,02	2,39	122,7	2,93	543,7	0,114
1600	1,5	2,4	1,07	112,2	3,20	9,95,9	0,062
1800	0,8	1,44	0,57	105,2	3,42	1770,4	0,035

Ces quatre tableaux ont été pris le 12/11/79.
 la temperature d'Essai etait de $T_e = 16^\circ\text{C}$
 Et la pression barometrique de $P_e = 753 \text{ mm Hg}$.

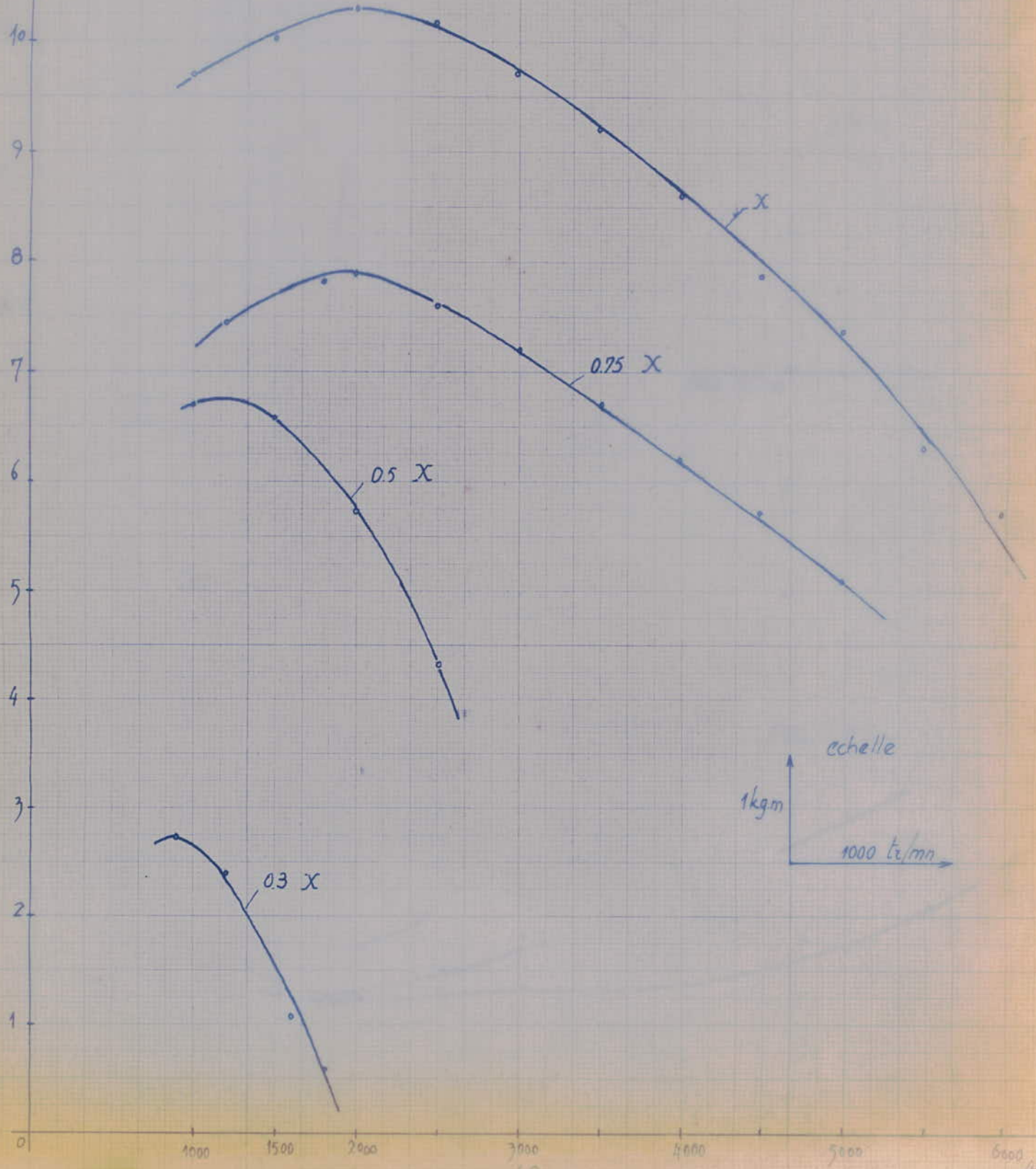
Essai à l'Essence

$\eta_{Je} (\%)$

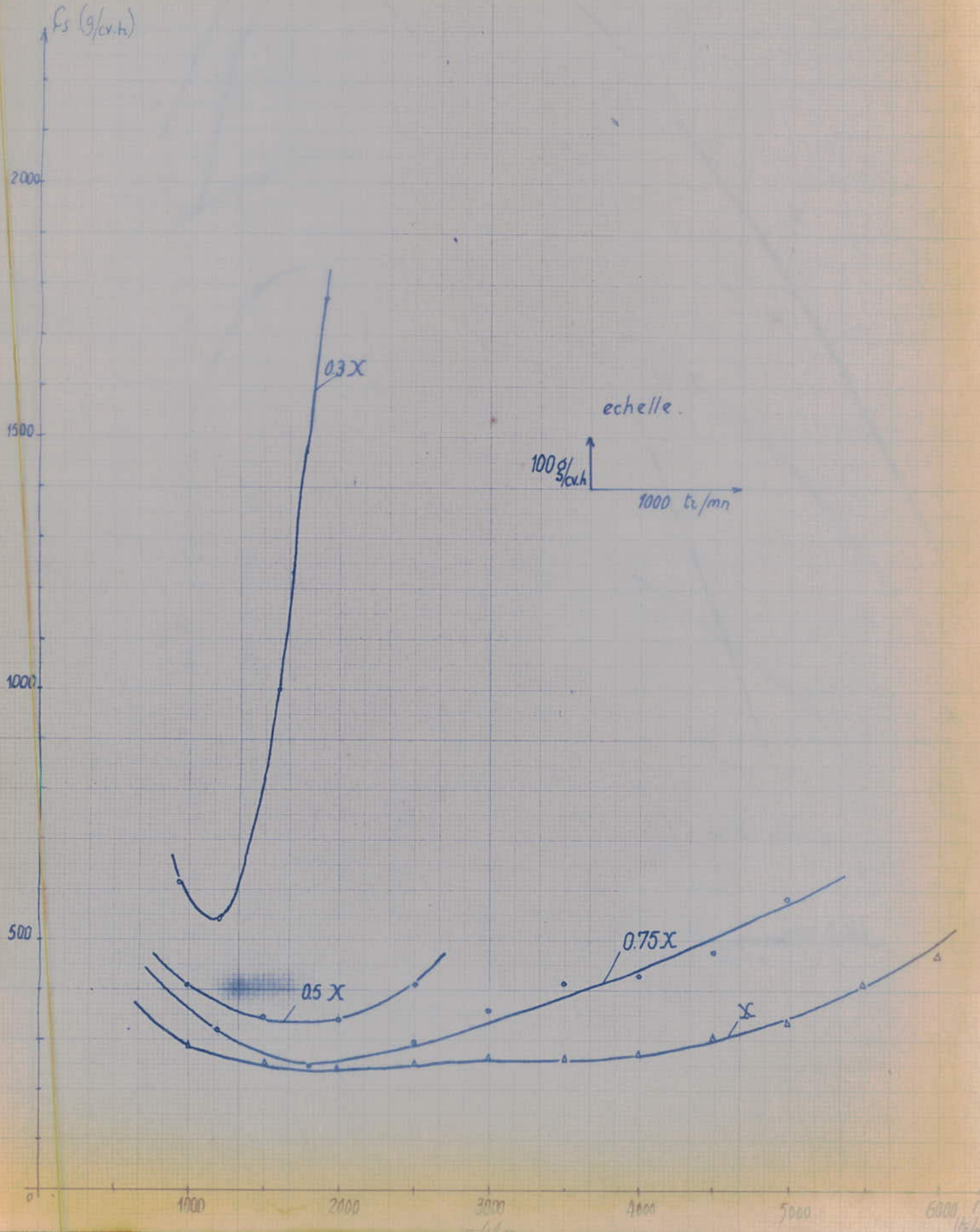


ρ_{O_2} (kg/m)

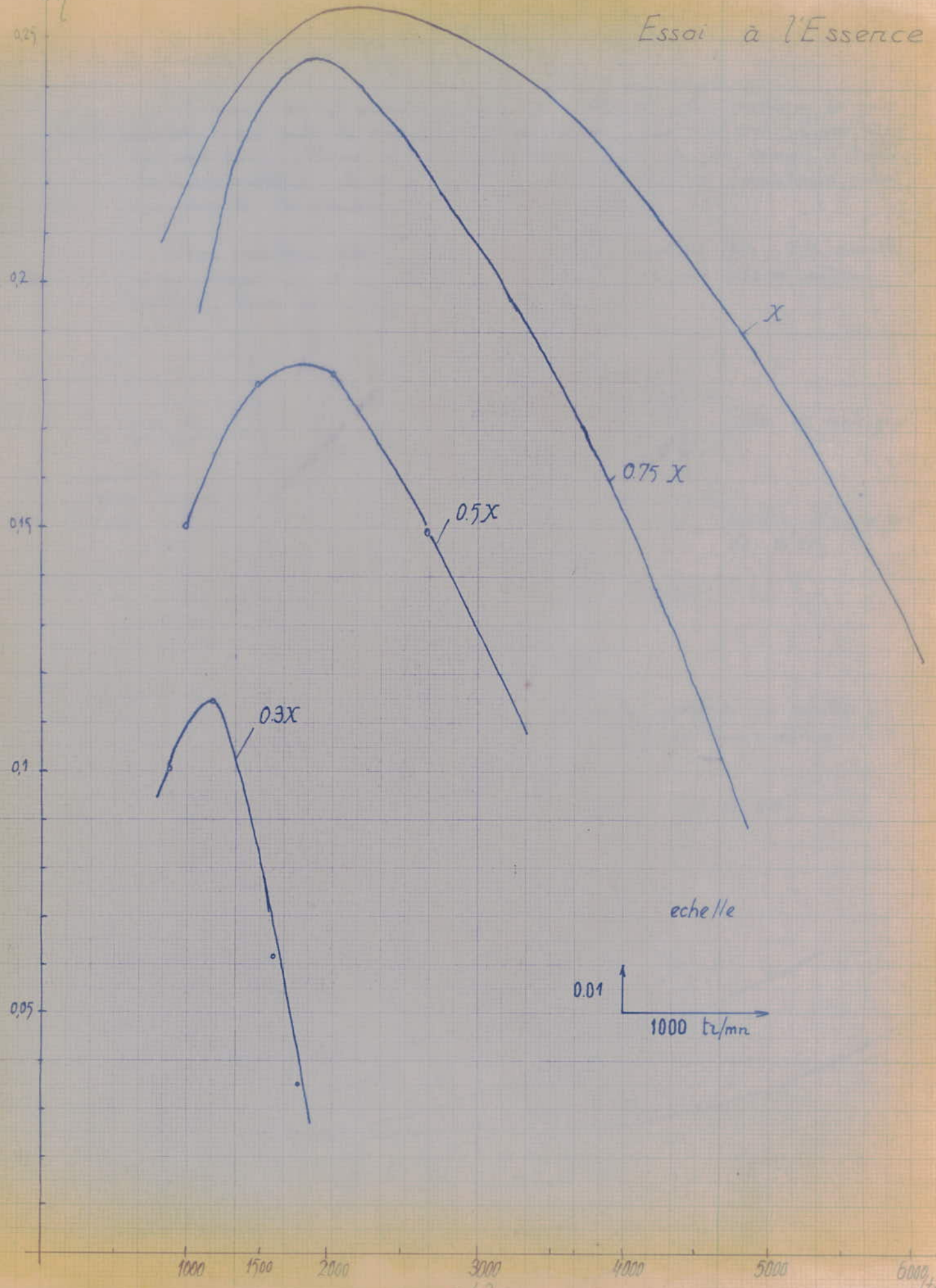
Essai à l'Essence



Essai à l'Essence



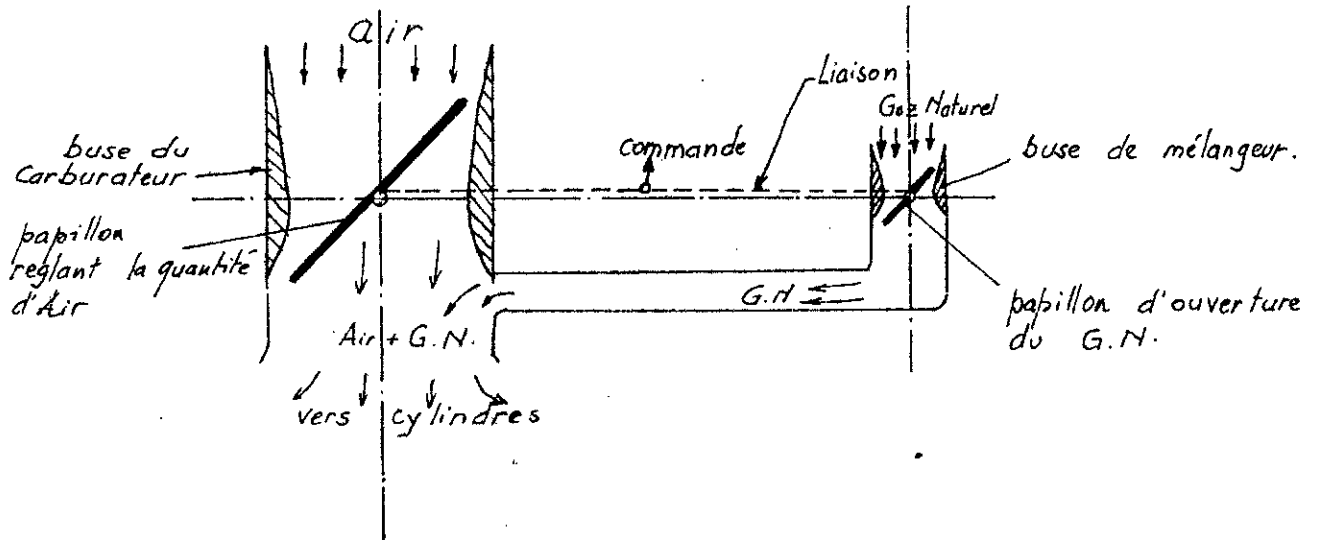
Essai à l'Essence



III Essais au Gaz Naturel

Comme on l'avait signalé au départ, la pression moyenne effective (par suite la puissance) est maximume aux environs d'une richesse de $\phi=1,1$. Donc dans un premier temps on va essayer d'établir la caractéristique de ce moteur pour cette richesse (maintenue autant que possible constante).

Pour réaliser ceci on avait relié les papillons (Air, - G.N.) ensemble après avoir effectué le réglage de cette richesse. Le schéma suivant explique mieux cette situation



On avait effectué des mesures pour différentes ouvertures du papillon gaz que nous avons noté par Y pour la pleine ouverture, $3/4 Y$ pour une ouverture à 0,75 du maximum, ... et ainsi de suite.

Les courbes ainsi définies se trouvent en pages: 45; 46; 47; 48.

charge maximale Y

NP (kg/m ³)	F (kgf)	Pe (C.v)	Ge (kg.m)	Ca g/s	Cs (g/cv.h)	Ze
1000	5	5	3.58	0.6	271	0.21
1300	9.4	12.2	6.73	0.62	182.9	0.32
1450	9.95	14.4	7.1	0.65	162.5	0.36
1650	10.9	18	7.8	0.69	138	0.42
1800	11.1	20	7.94	0.71	127.8	0.45
2000	11.6	23.2	8.30	0.72	111.7	0.48
2500	11.52	28.8	8.25	1.01	122	0.48
3000	11.2	33.6	8.02	1.38	147.8	0.39
3250	10.8	35.1	7.73	1.52	155.8	0.37
3900	8.7	34.2	6.2	2.1	219.5	0.26
4100	8.1	33.2	5.8	2.5	239.8	0.24
4500	7	31.7	5.01	3.2	291.2	0.20
5000	5.8	29.4	4.15	-	-	-

Essais du 14/11/79
carburant: G.M

Température d'essai
Te = 17°C

Pression Barométrique

Pe = 756 mm Hg

{ pci = 10837 kcal/kg
p = 0.83 g/cm³

Gicleur

{ G.M : 57
Oir : 40

pression max d'huile
pk = 3.6 kgf/cm²

Temp. Max de Sortie
d'huile Th = 70°C

Temp. Max d'Eau
entrée Te = 60°C
sortie Ts = 70°C

Temp. Max des G.E.
Tg = 750°C

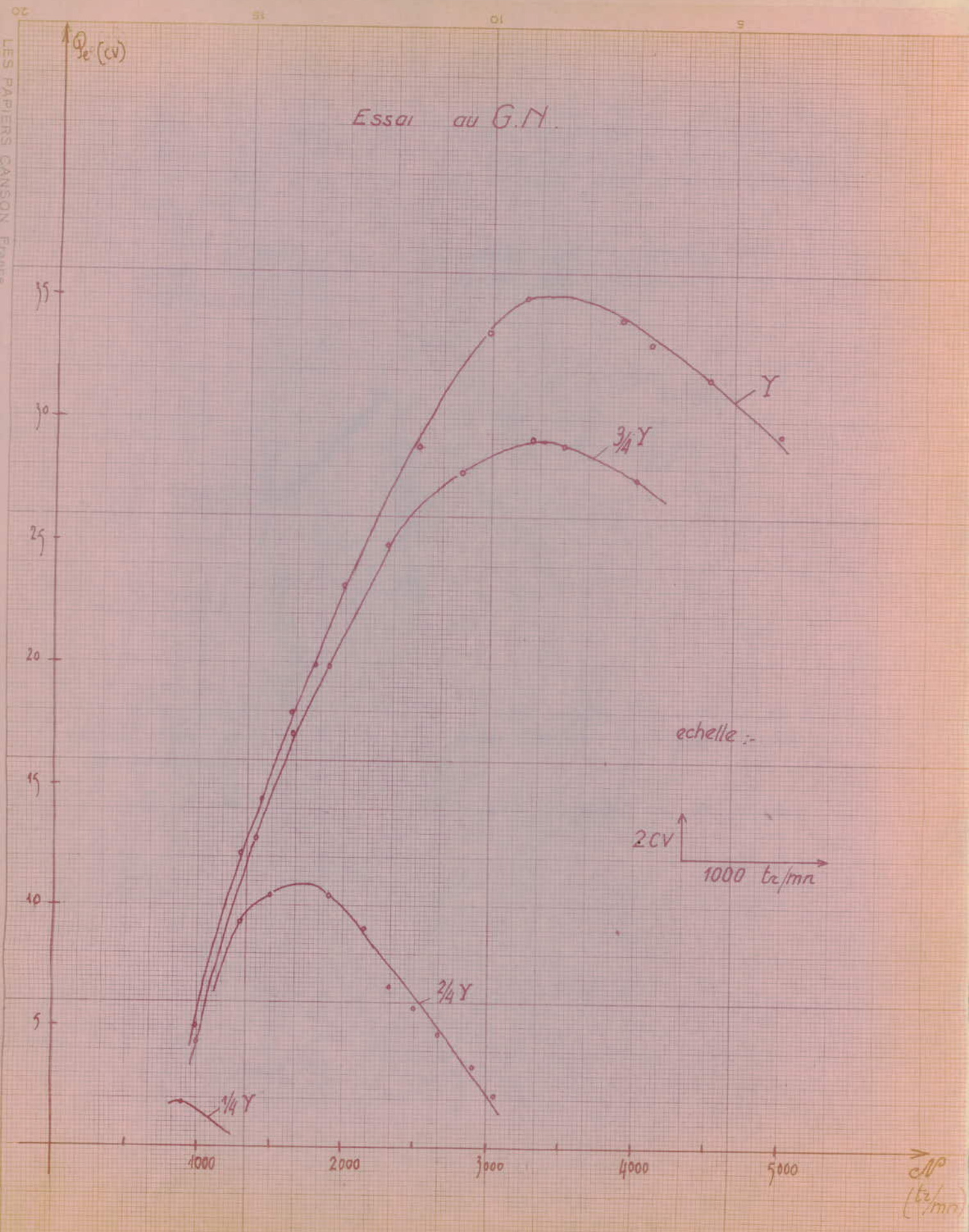
charge à 3/4 Y

NP (kg/m ³)	F (kgf)	Pe (C.v)	Ge (kg.m)	Ca g/s	Cs (g/cv.h)	Ze
1000	4.4	4.4	3.15	0.93	420	0.13
1400	9.1	12.8	6.5	0.95	267.1	0.22
1650	10.35	17.0	7.41	1.04	219.3	0.26
1900	10.45	19.8	7.48	1.09	197.6	0.29
2300	10.85	24.9	7.77	1.2	173.1	0.33
2800	9.9	27.9	7.09	1.33	171.4	0.34
3300	8.9	29.3	6.37	1.4	171.6	0.34
3500	8.3	29.3	5.94	1.62	199.8	0.29
4000	6.9	27.6	4.94	2.03	265	0.22

charge à 2/4 Y

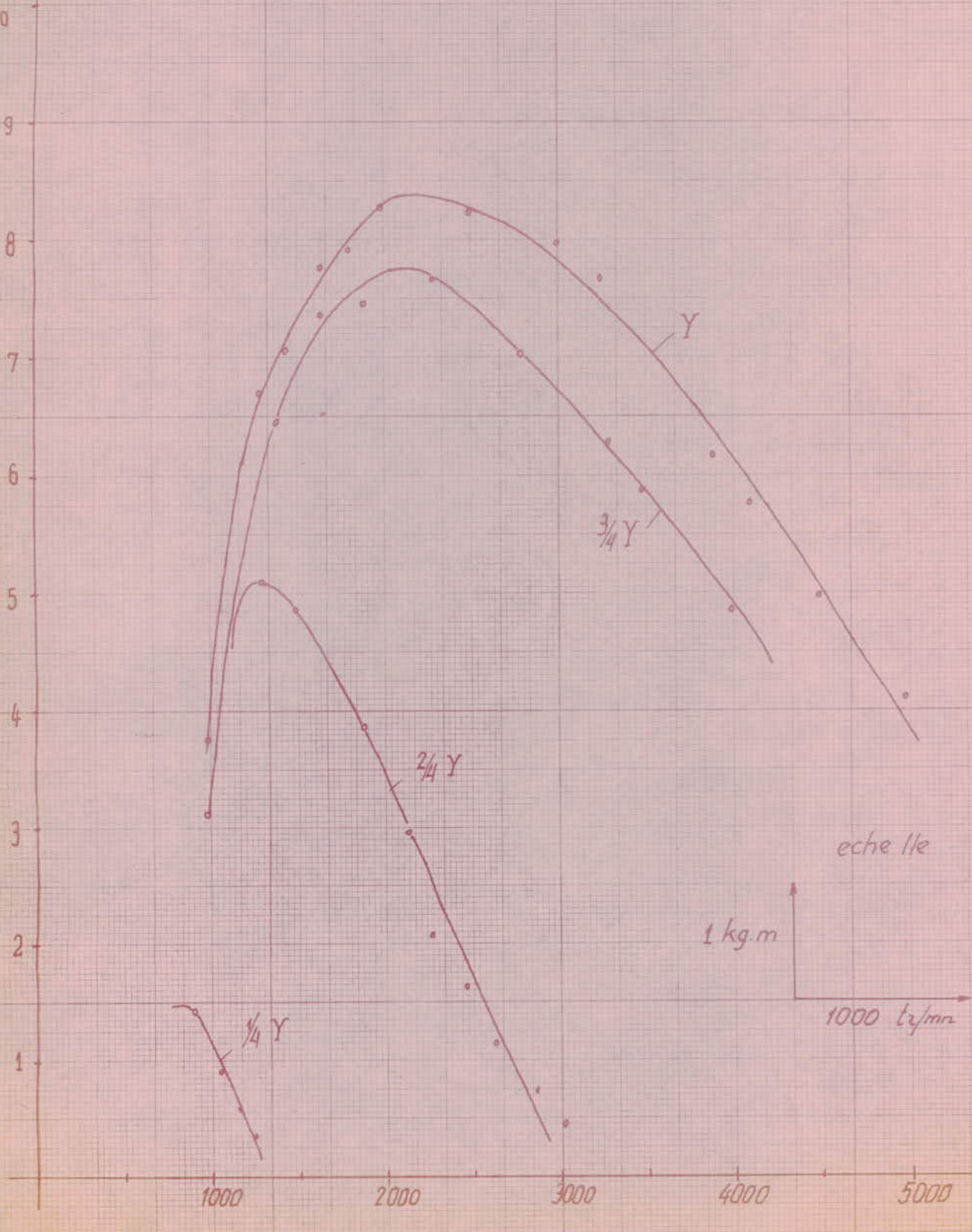
NP (kg/m ³)	F (kgf)	Pe (C.v)	Ge (kg.m)	Ca (g/s)	Cs (g/cv.h)	Ze
1100	7.3	8.03	5.22	0.72	322.7	0.18
1300	7.15	9.29	5.12	0.72	299.0	0.21
1500	6.9	10.35	4.94	0.78	271.3	0.215
1900	5.45	10.35	3.9	0.8	278.2	0.21
2300	3	6.75	2.14	0.77	410.6	0.14
2500	2.32	5.8	1.66	0.77	477.9	0.12
2660	1.78	4.7	1.27	0.75	571.5	0.10
2900	1.2	3.48	0.8	0.75	745.8	0.08

NP (kg/m ³)	F (kgf)	Pe (C.v)	Ge (kg.m)	Ca (g/s)	Cs (g/cv.h)	Ze
900	2	1.8	1.43	0.41	820	0.071
1050	1.25	1.31	0.89	0.41	1676	0.034
1140	0.8	0.9	0.57	0.43	1720	0.032
1250	0.5	0.62	0.35	0.42	2438	0.024

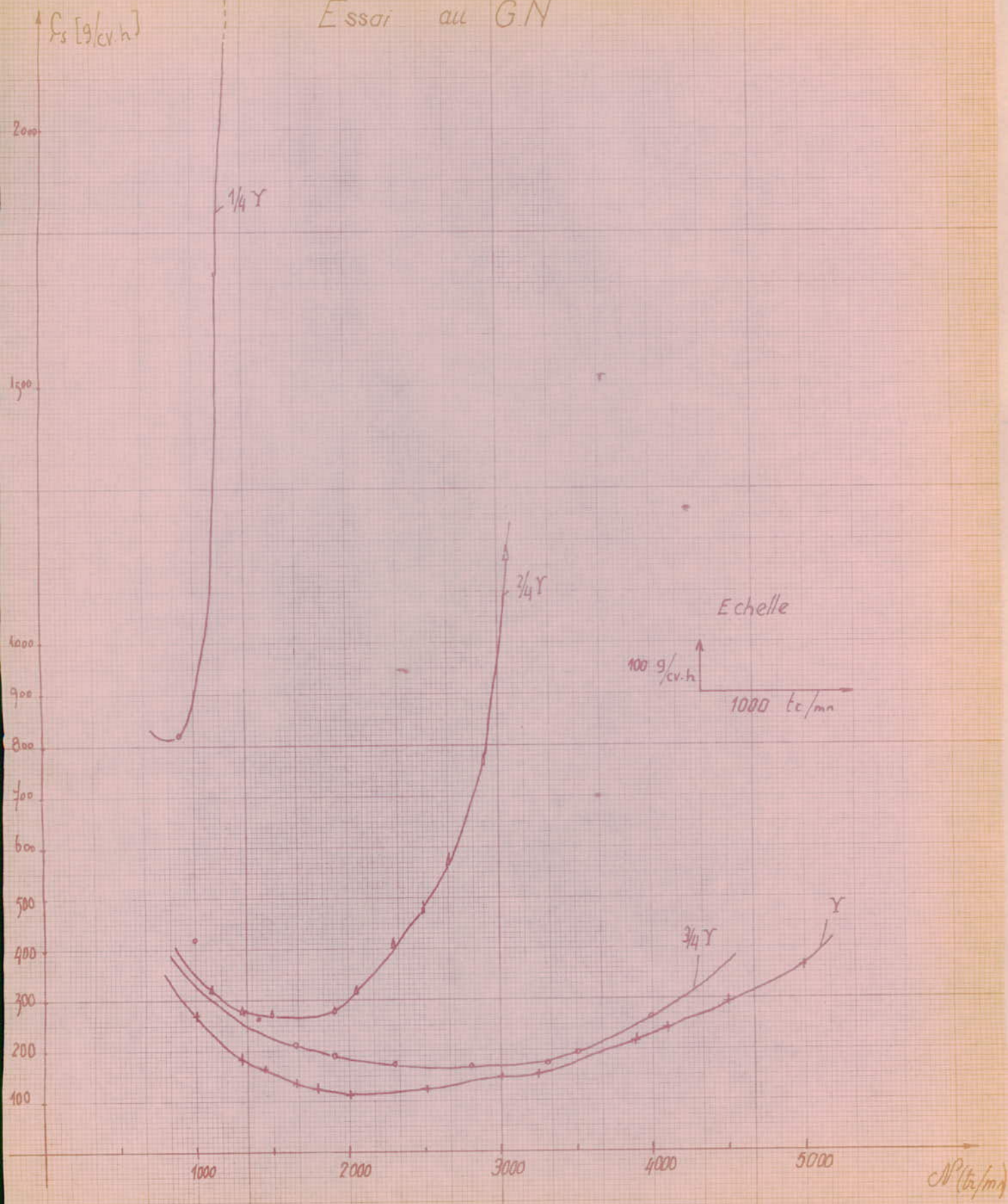


Essai au GN

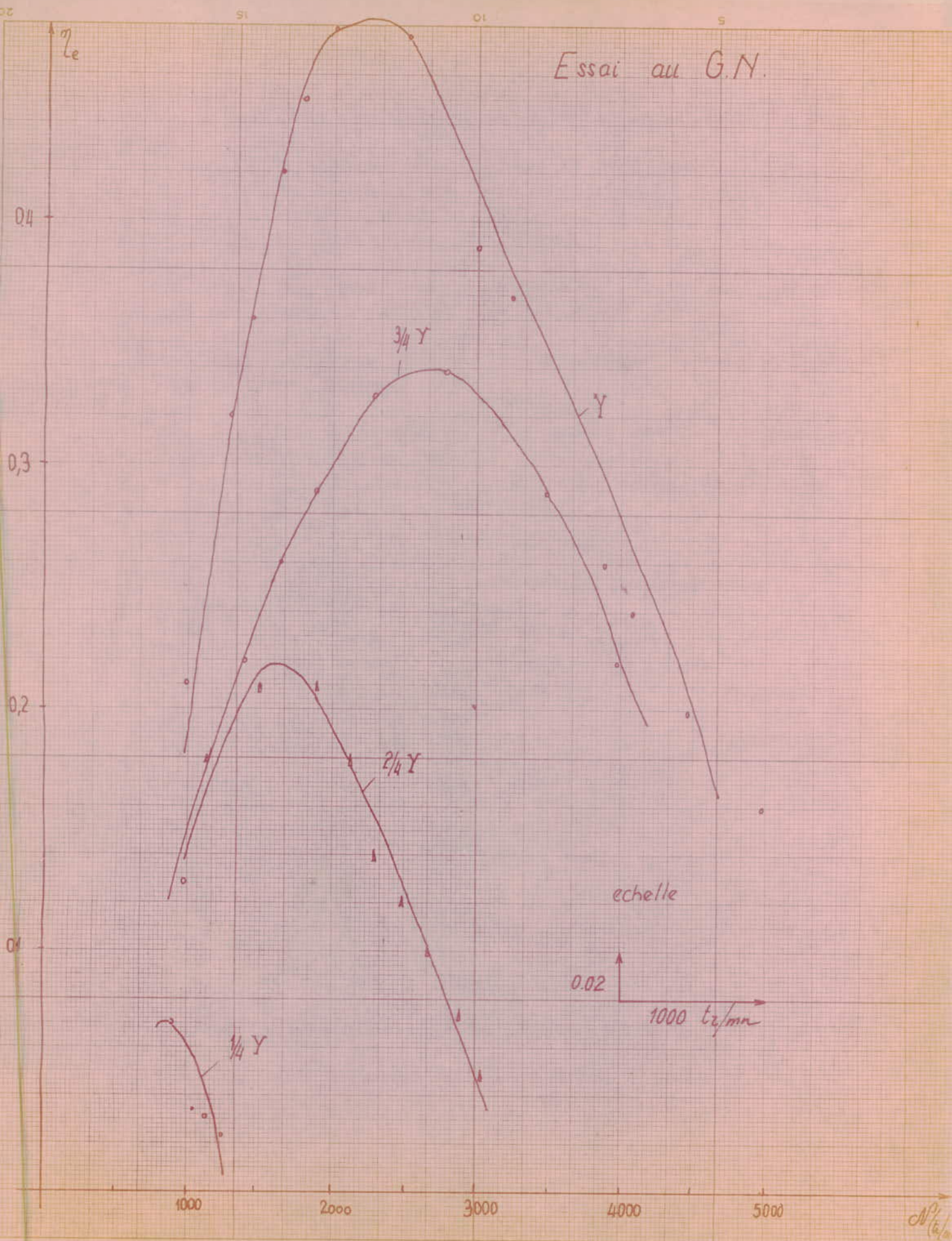
$\Delta \rho_{Oe} [m.kg]$



Essai au G.N



Essai au G.N.



Dans cette deuxième étape d'essai au Gaz Naturel, on va essayer d'établir les variations (en fonction de la vitesse de rotation) des paramètres suivants :-

- L_{ng} = Consommation horaire de Gaz Naturel
- P_e = Puissance effective
- λ = Excès d'air
- C_s = Consommation spécifique.

Ceci étant fait pour une même quantité (en volume) de mélange, mais avec des proportions d'Air et de Gaz Naturel différentes.

Bien entendu ceci sera fait pour les charges $Y(\max)$, $3/4 Y$, ainsi que pour la demi charge.

Afin d'éviter de surcharger les courbes, on les a réparties en deux ensembles :- le premier comporte la consommation horaire ainsi que les puissances, tandis que le second, les consommations spécifiques et l'Excès d'air.

• Charge (Air + GN) à $3/4 Y$. (L_{ha} = consommation horaire d'Air en g/s)

N^o (tr/mn)	P_e (cv)	L_{ng} (g/s)	L_{ha} (g/s)	L_s (g/cv.h)	λ
1100	8.03	0.72	10.4	322.7	0.89
1500	10.35	0.70	12.01	271.3	0.95
1900	10.35	0.80	12.01	278.2	0.93
2300	6.75	0.77	12.74	410.6	1.02
2500	5.8	0.76	13.43	478	1.09
2900	3.40	0.74	13.4	775	1.12
3100	2.2	0.72	13.4	1178.1	1.15

1^{re} série de mesures

Carburant: G.N.
 $\left\{ \begin{array}{l} p.c.i = 10837 \text{ kcal/kg} \\ \rho = 0.83 \text{ g/cm}^3 \end{array} \right.$

N^o (tr/mn)	P_e (cv)	L_{ng2} (g/s)	L_{ha} (g/s)	L_s2 (g/cv.h)	λ_2
1000	2.4	0.51	9.2	765	1.11
1500	7.8	0.52	12.8	240	1.52
2000	8.6	0.52	16.4	219.7	1.93
2200	7.4	0.53	17.8	257.8	2.08
2500	4.8	0.53	19.9	397.5	2.33

2^{de} série de mesures

Les courbes représentatives de ces données se trouvent en page - 52 -

Ces deux séries de mesures ont été prises le 17/11/79.
 La température ambiante était de $T_a = 16^\circ\text{C}$
 La pression barométrique était aussi de $p_a = 756 \text{ mm Hg}$.

- Charge (Air + G.N) à $3/4 Y$

C/P (t/min)	P_{e1} (CV)	L_{hg1} (g/s)	L_{ha} (g/s)	L_{s1} (g/cv.h)	λ_1
1000	4.4	0.93	14.4	420	1.75
1400	12.8	0.95	14.7	267.1	0.96
1650	17.0	1.04	16.9	219.3	1.00
1900	19.8	1.09	18.0	197.6	1.02
2300	24.9	1.2	20.8	173.1	1.07
2800	27.9	1.33	23.2	171.1	1.08
3300	29.3	1.4	25.5	171.6	1.13

1°
S
E
R
I
E

Carburant :- G.N

$$\begin{cases} p.c.i = 10037 \text{ kcal/kg} \\ \rho = 0.83 \text{ g/cm}^3 \end{cases}$$

Gicleur :-

$$\begin{cases} \text{G.N} : 57 \\ \text{Air} : 40 \end{cases}$$

C/P (t/min)	P_{e2} (CV)	L_{hg2} (g/s)	L_{ha} (g/s)	L_{s2} (g/cv.h)	λ_2
1000	6.2	0.51	11.1	299.0	1.3
1500	15	0.54	15.2	129.6	1.74
2000	20.2	0.59	19.2	105.1	2.02
2200	21.2	0.63	20.8	106.9	2.04
2500	21.5	0.70	23.4	117.2	2.07

2°
S
E
R
I
E

pres. Max de Sortie d'huile

$$p_h = 3.1 \text{ kgf/cm}^2$$

Temperature Max de Sortie d'huile

$$T_h = 86^\circ\text{C}$$

Temperature Max d'Eau

$$\text{entree } T_e = 75^\circ\text{C}$$

$$\text{Sortie } T_s = 86^\circ\text{C}$$

Temperature des G.E

$$T_g = 540^\circ\text{C}$$

C/P (t/min)	P_{e3} (CV)	L_{hg3} (g/s)	L_{ha} (g/s)	L_{s3} (g/cv.h)	λ_3
1000	5.4	0.53	12.8	356.6	1.48
1500	12.4	0.56	15.8	162.5	1.75
2000	16.6	0.59	19.2	129.0	2.00
2200	17.3	0.62	20.4	129.0	2.04
2500	17.6	0.66	22.4	136.0	2.09
2800	16.2	0.73	24.2	162.2	2.05
3000	14.4	0.78	25.6	192.2	2.02

3°
S
E
R
I
E

Ces trois series de mesures ont été prises le 17/11/79

$$T_{amb} = 16^\circ\text{C}$$

$$p_{amb} = 756 \text{ mm Hg}$$

Les courbes representatives se trouvent en page -53-54-

• Charge (Air + G.N) maximale Y

N° (tr/min)	P_{e1} (CV)	C_{hg1} (g/s)	C_{ha} (g/s)	C_{s1} (g/h)	λ_1
1300	12.2	0.62	16.9	182.9	1.70
1450	14.4	0.65	18.0	162.5	1.72
1650	18.0	0.69	19.9	138	1.79
1800	20.0	0.71	20.8	127.8	1.81
1980	23.2	0.72	22.4	111.7	1.93
3000	33.6	1.38	29.4	147.8	1.32
3250	35.1	1.52	30.0	155.8	1.22
3900	34.2	2	35.0	219.5	1.08
4100	33.2	2.5	36.0	239.8	0.89

Carburant G.N.

$$\left\{ \begin{array}{l} p.c.i = 10837 \text{ kcal/kg} \\ \rho = 0.83 \text{ g/cm}^3 \end{array} \right.$$

Gicleur

$$\left\{ \begin{array}{l} G.N : 57 \\ \text{Air} : 40 \end{array} \right.$$

$$P_h = 2.8 \text{ kgf/cm}^2$$

$$T_h = 80^\circ \text{C}$$

$$T_e = 65^\circ \text{C}$$

$$T_s = 75^\circ \text{C}$$

$$T_g = 450^\circ \text{C}$$

N° (tr/min)	P_{e2} (CV)	C_{hg2} (g/s)	C_{ha} (g/s)	C_{s2} (g/h)	λ_2
1000	8	0.43	11.4	195.7	1.62
1500	14.8	0.45	14.8	110.6	2.01
2000	22.4	0.51	18.2	81.9	2.21
2200	24.4	0.53	19.4	78.1	2.27
2500	26.8	0.58	21.4	74.9	2.29
2800	28.7	0.63	23.4	79.6	2.28
3000	29.8	0.64	24.8	81.5	2.28
3200	28.5	0.73	26.1	92.8	2.20
3500	27.7	0.86	28.2	111.7	2.0

N° (tr/min)	P_{e3} (CV)	C_{hg3} (g/s)	C_{ha} (g/s)	C_{s3} (g/h)	λ_3
1000	8.45	0.50	12.8	215.0	1.58
1500	14.7	0.53	16.8	129.7	1.96
2000	19.4	0.59	20.8	109.4	2.18
2500	22.8	0.69	24.6	108.9	2.21
3000	24	0.86	28.8	129	2.0

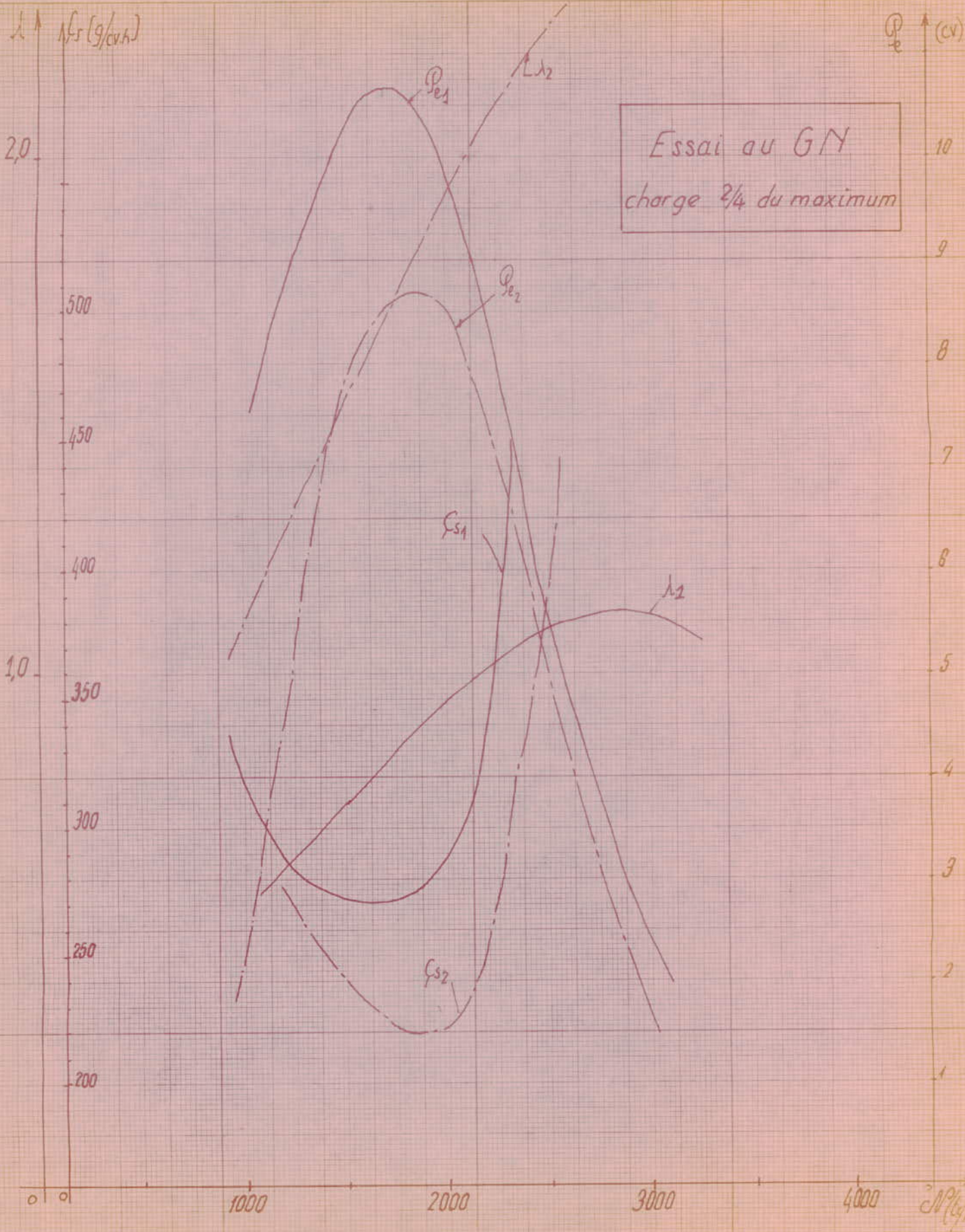
Date de prise de mesure : Dimanche 18/11/1979.
la température ambiante a été de

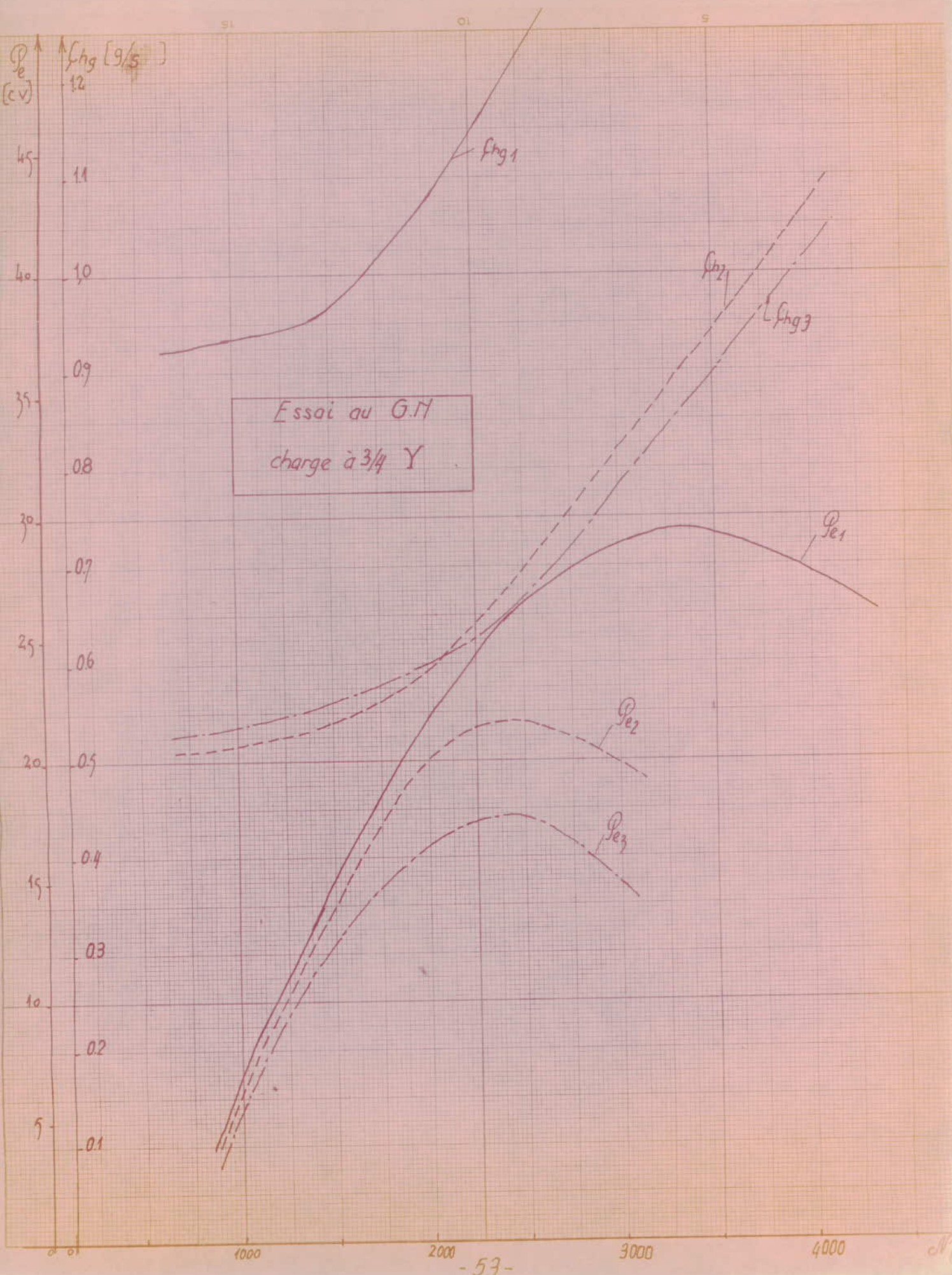
$$T_{am} = 19^\circ \text{C}$$

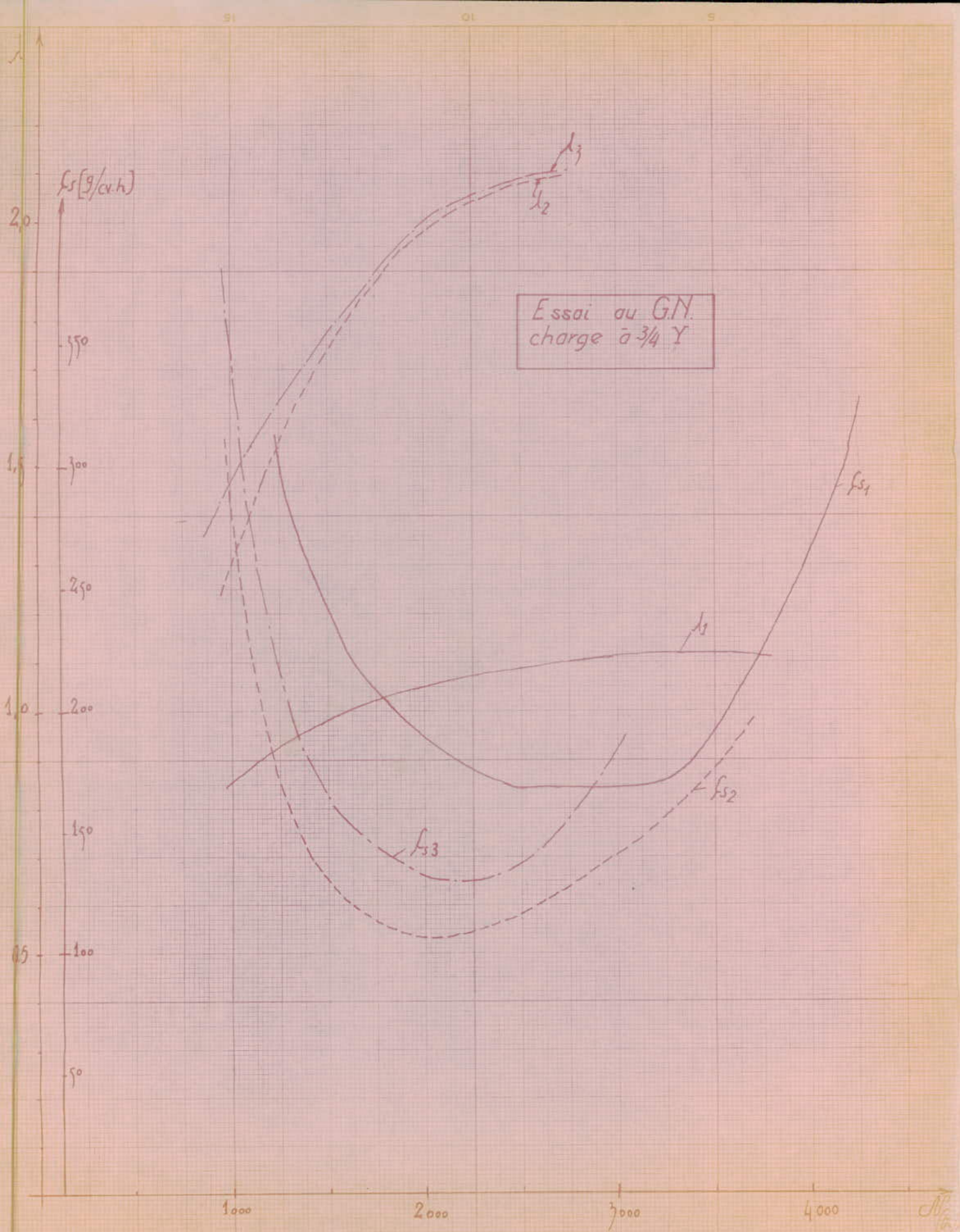
et la pression barométrique de

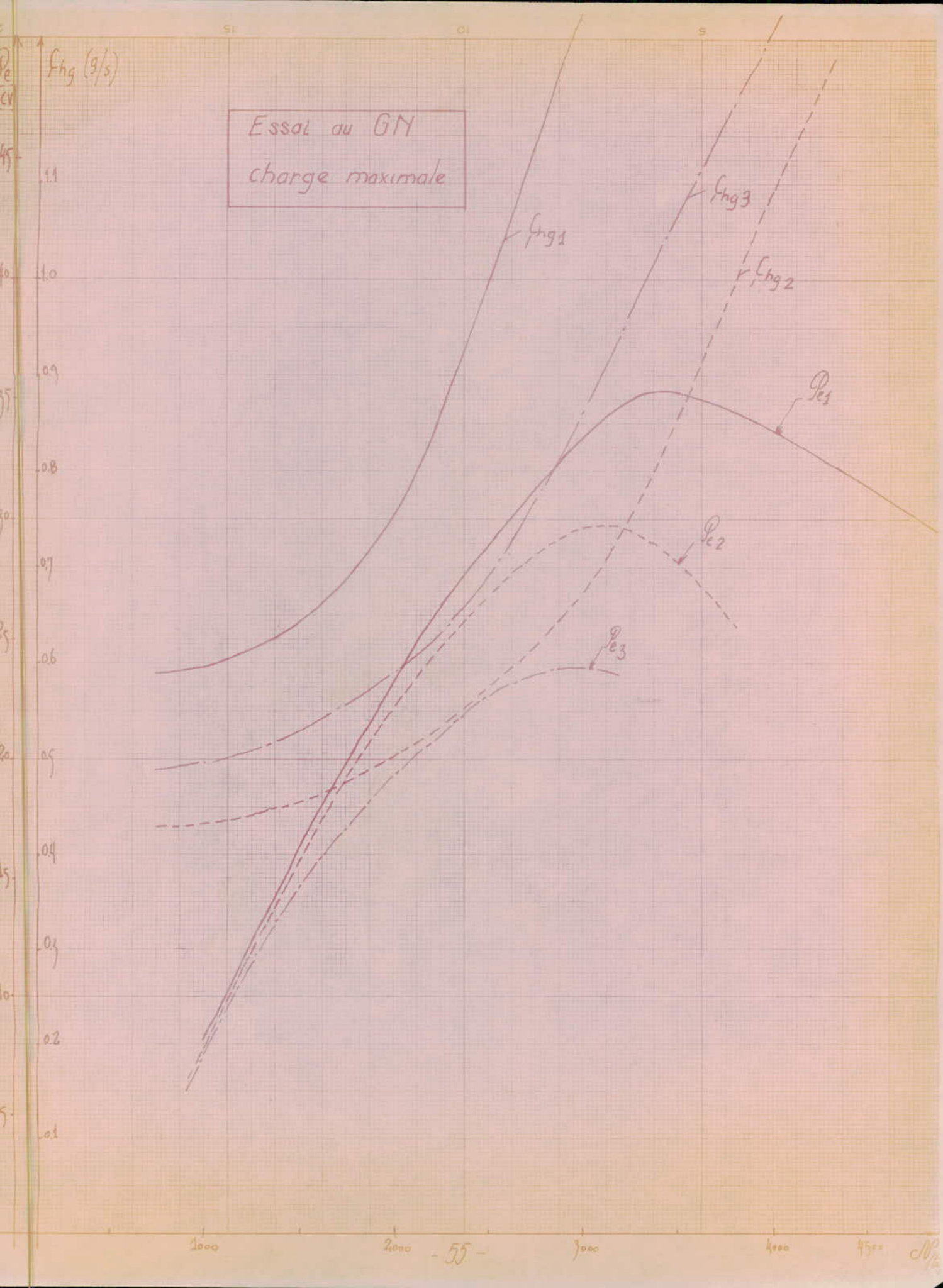
$$P_b = 759 \text{ mm Hg}$$

les courbes représentatives se trouvent en page :- 55-56.

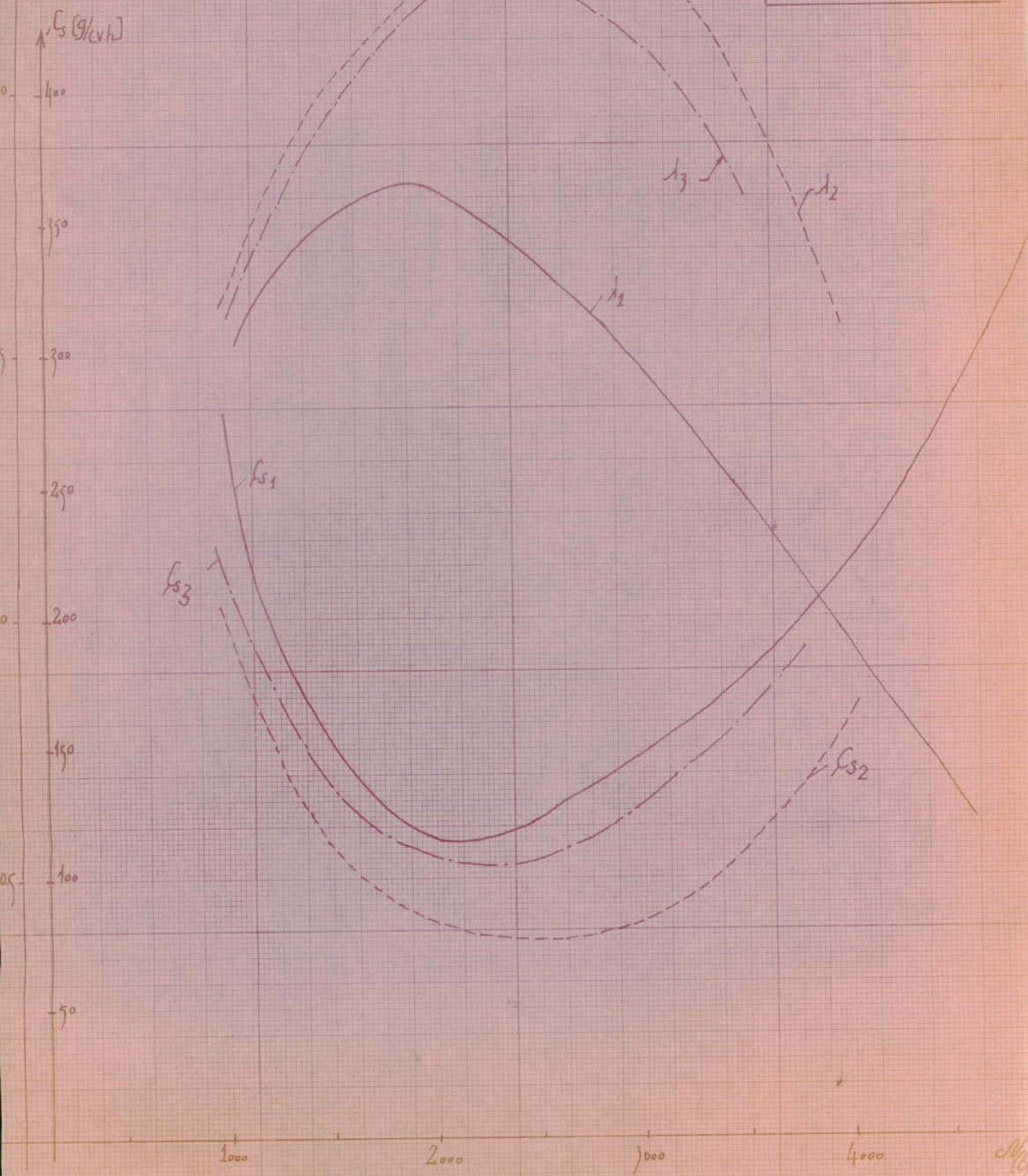








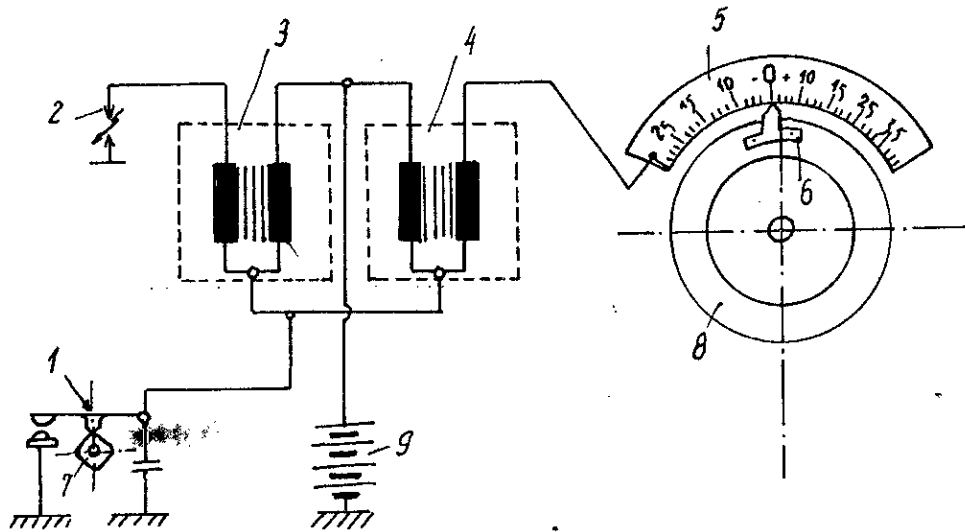
Essai au GM
charge maximale



Dans ce dernier chapitre d'essai au gaz Naturel, on se propose d'étudier l'influence de "l'avance" à l'allumage sur les paramètres principaux.

Par nécessité, on a été obligé d'installer un dispositif, qui à son tour nous permettra d'effectuer les mesures d'"Avances".

Ce dispositif est simple et est décrit dans le schéma suivant :-



- 1 - Rupteur
- 2 - Bougie
- 3 - Bobine initiale
- 4 - Bobine supplémentaire
- 5 - Secteur gradué et monté fixe sur bloc moteur
- 6 - Aiguille montée sur volant moteur
- 7 - Came
- 8 - Volant moteur
- 9 - Batterie

IV Mesures

IV-1. Avances à Ouverture du papillon de G.N fixe.

On a pris la position maximale (Y) d'ouverture du papillon (maintenue fixe pendant toute la durée d'essai) et par petites rotations manuelles sur l'allumeur, on déterminait ainsi une courbe de puissance en fonction de l'angle d'avance (ceci bien entendu à des vitesses fixées au départ.).

Les familles de courbes obtenues se trouvent en page :- 60 et ont été établies pour les vitesses suivantes :-

$$n = 1500 \text{ tr/mn}$$

$$n = 2000 \text{ " -}$$

$$n = 2500 \text{ " -}$$

$n = 1500 \text{ tr/min} \cdot Y$

θ°	F (kgf)	P_e (CV)
8	8.2	12.3
12	9.1	13.65
18	10	15
25	10.8	16.2
33	11.2	16.8
44	11	16.5
53	9.1	13.6

$n = 2000 \text{ tr/min} \cdot Y$

θ°	F (kgf)	P_e (CV)
7	4.7	9.4
12	6.85	13.7
20	9.2	18.4
29	10.2	20.4
34	10.8	21.4
47	10.5	21
55	9	18

$n = 2500 \text{ tr/min} \cdot Y$

θ°	F (kgf)	P_e (CV)
23	9.5	23.7
29	10.2	25.5
33	10.7	26.7
40	11.3	28.2
49	11.5	28.7
55	10.8	27
59	9.6	24

Essais effectués le : 20/11/79

la température ambiante a été de : $T_a = 17^\circ\text{C}$

la pression barométrique " " " : $P_b = 759 \text{ mm Hg}$

Carburant GM

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{ci} = 10837 \text{ kcal/kg} \\ \rho = 0.83 \text{ g/cm}^3 \end{array} \right.$$

$$\text{Gicleurs } \left\{ \begin{array}{l} \text{GM} : 57 \\ \text{Air} : 40 \end{array} \right.$$

Pression max de sortie d'huile

$$P_h = 2,8 \text{ kg/cm}^2$$

$$T_h = 60^\circ\text{C}$$

Températures Maxi pour l'Eau

$$\text{Entrée } T_e = 44^\circ\text{C}$$

$$\text{Sortie } T_s = 54^\circ\text{C}$$

Température Maxi des G. E

$$T_g = 450^\circ\text{C}$$

IV.2. Avances à vitesse constante.

pour cela, on avait pris une vitesse ($n=1500$ tr/min) que l'on maintenait constante, puis on recommençait les petites rotations manuelles sur l'allumeur. Pour chaque position du papillon du Gaz Naturel, on déterminait une courbe donnant la consommation spécifique en fonction de l'angle d'avance.

Cette famille de courbes se trouve en page: 61.

Regime max (Y) $n = 1500$ tr/min

θ°	F (kgf)	P_e (cv)	L_g (g/s)	L_s (g/cv.h)
24	10.4	15.6	0.62	144.2
30	10.9	16.39	0.6	132.1
42	11.15	16.72	0.57	122.7
49	11	16.5	0.52	118.5
55	10.65	15.9	0.52	118.8

Carburant G.I.T

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{ci} = 10837 \text{ kcal/kg} \\ p = 0.8 \end{array} \right. \cdot g/cm^3$$

Regime $3/4$ Y $n = 1500$ tr/min

θ°	F (kg)	P_e (cv)	L_g (g/s)	L_s (g/cv.h)
11	11.1	16.65	0.525	113.5
20	12.25	18.37	0.537	105.2
28	12.8	19.2	0.525	98.4
36	12.9	19.35	0.537	99.9
42	12.65	18.97	0.55	104.3
45	12.5	18.75	0.56	107.5
48	12.1	18.15	0.59	117.0
53	11.5	17.25	0.6	125.2

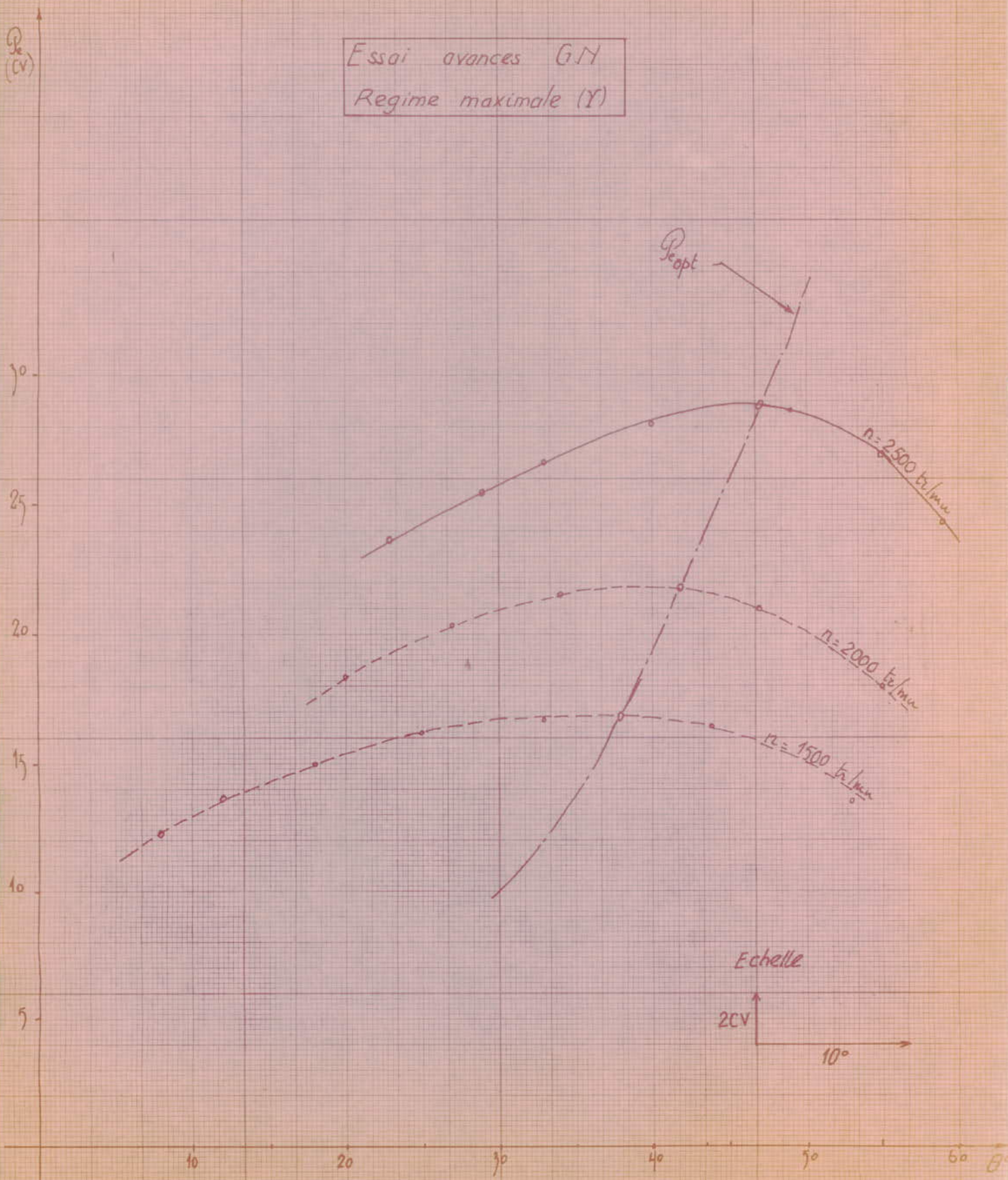
Même conditions
de
Travail que précédemment

Regime $2/4$ Y $n = 1500$ tr/min

θ°	F (kgf)	P_e (cv)	L_g (g/s)	L_s (g/cv.h)
3	9.2	13.8	0.35	90.8
5	9.3	13.98	0.34	87.5
10	9.5	14.29	0.33	83.1
15	9.7	13.95	0.31	80
20	8.8	13.23	0.30	81.6
28	9.1	10.71	0.25	84
32	6.6	9.93	0.24	87
38	5.7	8.60	0.22	92

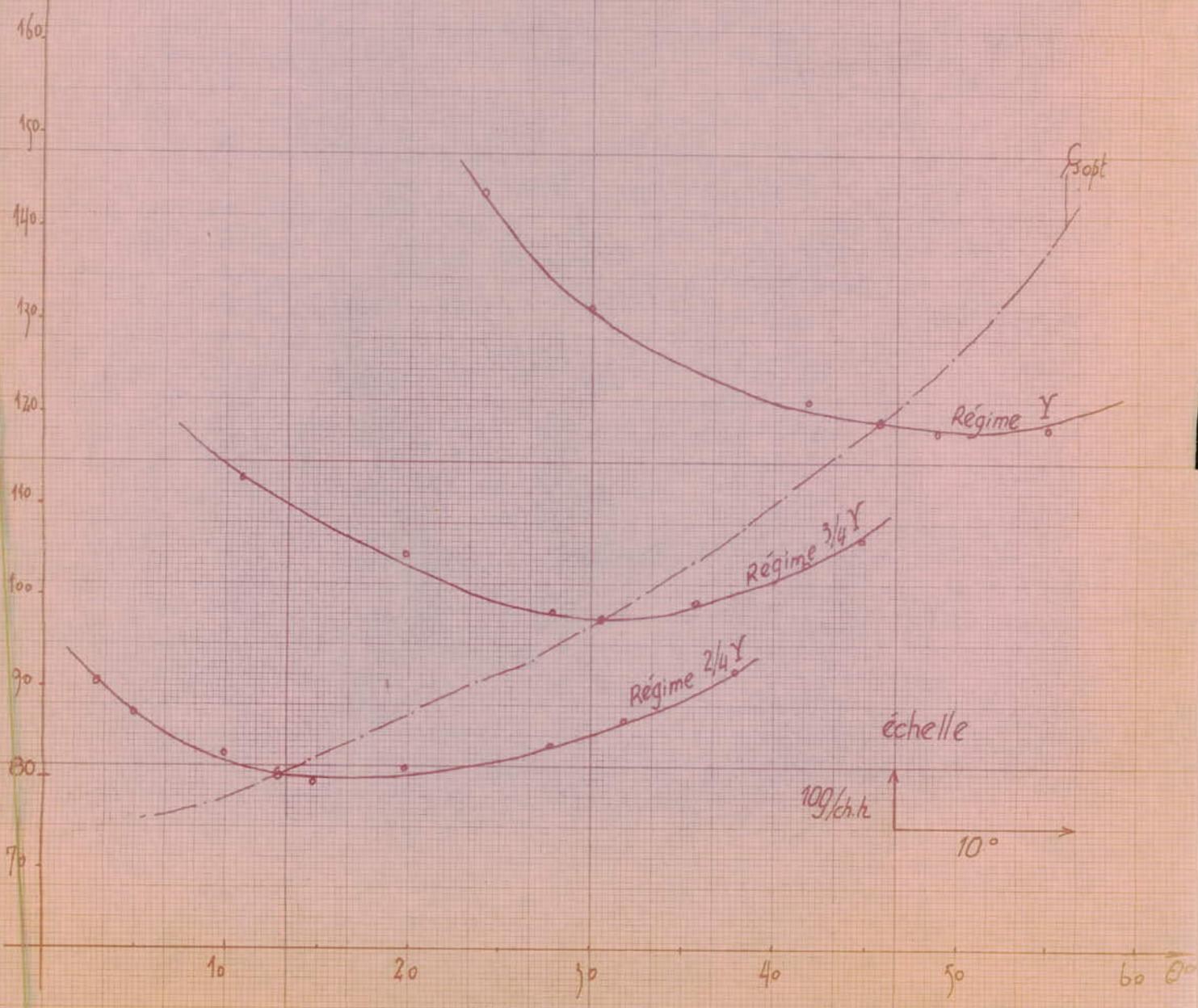
Ces mesures ont été prises le :- 20/11/99
la température était :- $T_a = 17^\circ C$
la pression était :- $p_a = 759$ mm Hg

Essai avances GM
 Regime maximale (Y)



Essai Avance GN
 vitesse C^{te} $n=1500$ tr/min

$\uparrow f_s$ (g/cv.h)



échelle
 \uparrow
 10g/ch.h
 10°

Interpretations et Suggestions

Les résultats obtenus étaient en quelques sortes prévisibles sinon attendus ; Ils sont assez médiocres et ne nous avaient pas permis de faire une meilleure interprétation.

Pour ne pas tomber dans la répétition, on n'a pas détaillé dans les comparaisons G.N - Essence. Car ceci avait fait l'objet de projets dans les années précédentes.

I Comparaison de performances entre fonctionnement au G.N ($d=1.1$) et Essence ($d=0.9$).

I-1 Puissance :-

Les courbes se présentent avec la même allure, cependant on enregistre des pertes relative au G.N qui s'évaluent approximativement à :-

- 50 % aux bas régimes ($N < 2000$ tr/mn).
- 25 % aux régimes moyens ($2000 \leq N \leq 3500$ tr/mn)
- 40 % aux grandes vitesses ($N > 3500$ tr/mn).

I-2 Couple :-

Les courbes changent d'allure aux bas régime, et dans ce cas pour le G.N, l'accroissement est très sensible. Toutefois les pertes enregistrées sont de l'ordre de :-

- 50 % bas régimes
- 10÷20 % régimes moyens
- 30÷40 % Grandes vitesses.

I-3 Consommation Spécifique

Pour de faibles accélérations, les deux courbes sont presque équivalente. Cependant, aux grandes et moyennes vitesses et à pleine ouverture (des papillons) on enregistre un gain appréciable (relatif du G.N par rapport à l'essence) de l'ordre de 10 %

I-4 Rendement

Le rendement global présente des gains à tout les niveaux de fonctionnement, Ceci vérifie la théorie.

I-5 Conclusion

En première conclusion on dira que malgré les gains enregistrés aux consommations spécifiques et aux rendements, les pertes de couple et de puissance restent relativement importants.

Cependant les plus faibles pertes se situent dans la

zone des vitesses de rotations modérées ($2000 \leq N \leq 3500$ tr/min) qui correspondent sur des véhicules à des vitesses linéaires de 60 à 100 km/h.
 Cette fourchette de vitesses est de loin la plus utilisée par les automobilistes.

L'Avance à l'allumage et la Richesse sont deux paramètres qui, suivant leur réglage, peuvent influencer sur les performances du moteur.

II L'Avance à l'allumage.

La vitesse de déflagration du mélange Air-GN est théoriquement inférieure à celle du mélange Air-Essence. Donc pour la transformation idéale, l'avance à l'allumage doit être augmentée.

Certains constructeurs prévoient même de modifier l'arbre à cames afin d'augmenter la durée de séjour du mélange dans le cylindre.

II-1 Constatation

On a constaté en pratique pour la marche au GN, le degré d'avance à l'allumage doit être toujours supérieur à celui de l'Essence (pour une même vitesse).

- D'autre part on a constaté que les Maximum des 2 courbes se trouvent décalés.

- Ainsi pour différentes gammes de vitesses, la différence entre les deux courbes est variable.



De ceci on en déduit que les dispositifs d'avance du moteur ne répondent pas aux exigences du fonctionnement au GN.

II-2 Suggestion

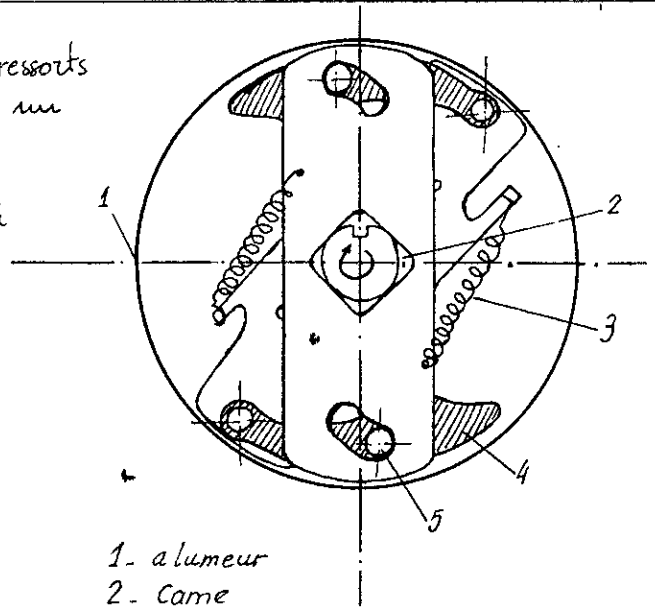
Dans les moteurs, le degré d'avance à l'allumage augmente avec la vitesse de rotation jusqu'à une limite (60° dans notre cas). Cette augmentation est obtenue par l'effet de la force centrifuge, qui cesse à partir d'une certaine vitesse de rotation (3500 tr/min dans notre cas).

Dans le cas du fonctionnement au Gaz Naturel, on doit prévoir un dispositif d'avance permettant un plus grand écartement des masses m_1 ; m_2 .

Pour cela deux solutions se présentent :-

1°) on propose le remplacement des ressorts de rappel par d'autres ressorts ayant un coefficient de raideur moindre.

2°) on rajoute des petites masses à celles existantes m_1 et m_2 .



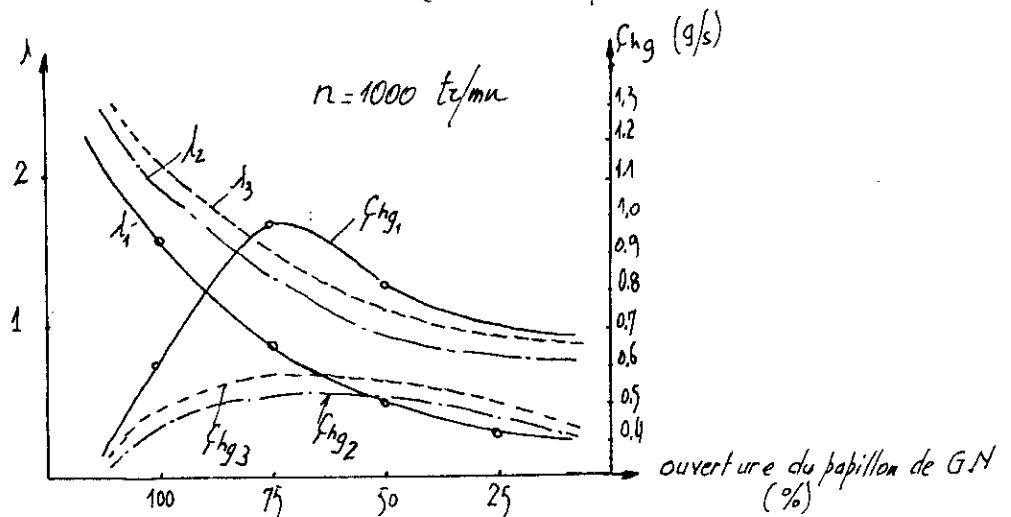
- 1 - allumeur
- 2 - came
- 3 - ressort (2)
- 4 - masse (ote (2)
- 5 - axe de pivotement

III Influence de la richesse -

Comme on l'avait indiqué au début, la richesse d'un mélange est un des paramètres des plus essentiels.

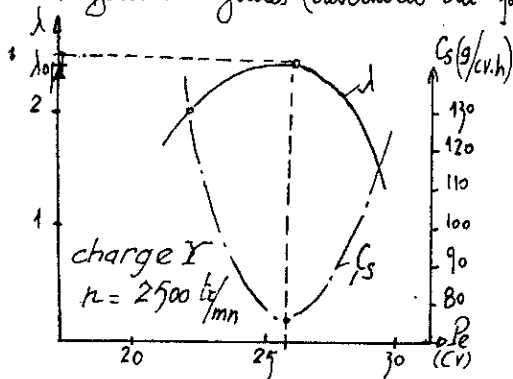
En première remarque on a constaté (à partir des courbes en pages 52-56) que l'excès d'air varie avec l'ouverture du papillon de G.N. (à vitesse E_{5k}). Ceci est contraire à la supposition faite au départ en disant que la richesse reste constante.

Par interpolation, pour une vitesse $n=1000$ tr/mn, on a tracé sur le graphe suivant en fonction de l'ouverture des papillon de G.N., l'excès d'air ainsi que la consommation horaire de G.N. (en 3 manipulations).



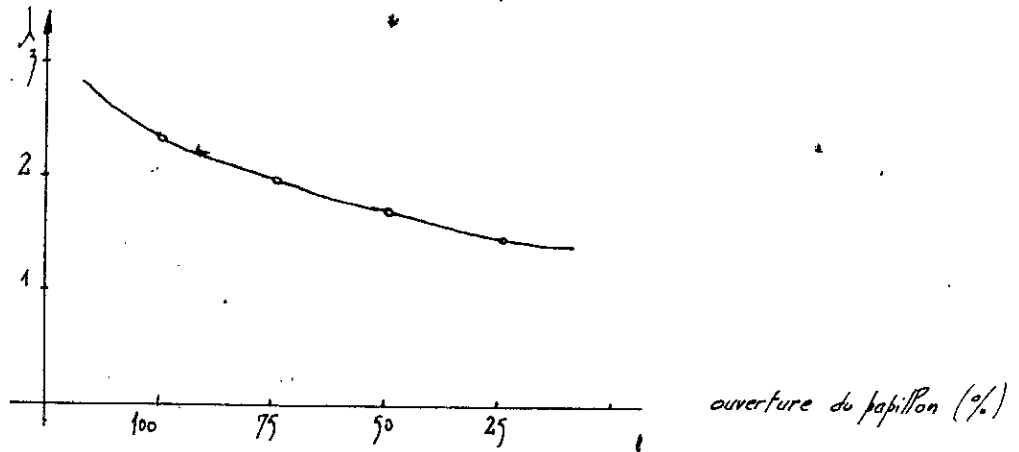
Maintenant qu'on a une idée sur le fonctionnement de ce type de mélangeur, on va essayer d'établir sa caractéristique optimale.

Pour cela on a interpolé des différentes courbes (situées en pages 52-56) les valeurs de la consommation spécifique, de l'Excès d'air, de la puissance pour les différents régimes (ouvertures du papillon de G.M) à vitesse constante.



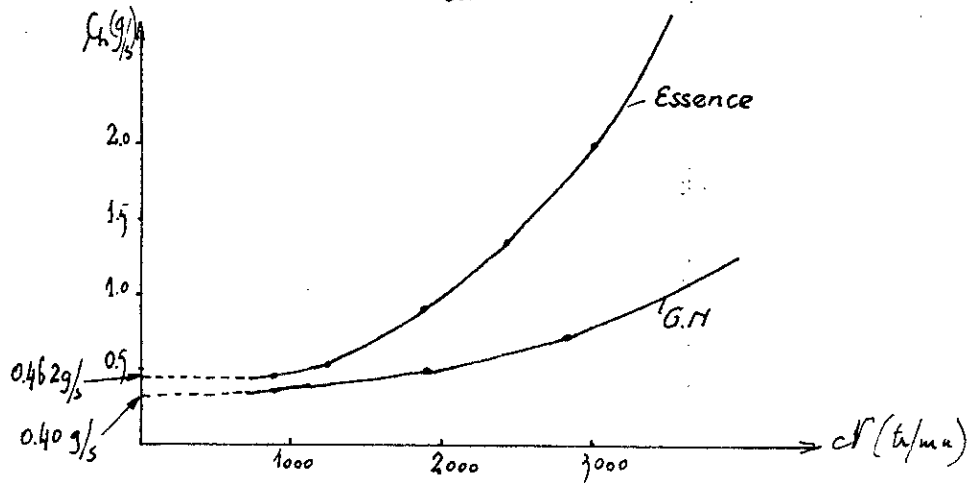
on établit ces ensembles de courbe pour les différentes positions du papillon de gaz. A chaque ensemble correspond un excès d'air optimum donnant une consommation spécifique minimum.

Donc pour une marche économique (en admettant une perte de puissance relative de l'ordre de 10%) le mélangeur doit avoir la caractéristique pour la vitesse de $n = 2500$ tr/mn comme suit :



IV Suggestions Générales.

Avant d'entamer ce chapitre je voudrais attirer l'attention sur le fait suivant : Pour une puissance nulle, la consommation de G.M est faible devant la consommation d'Essence. Ceci est très important car il nous renseigne sur la consommation de ralenti.



Les idées portant sur l'amélioration des performances d'un moteur sont nombreuses, parmi les plus concluantes, on cite l'augmentation du taux de compression " ϵ ".

En effet en supposant un coefficient polytropique constant " m " pour la détente et la compression, le rendement devient :

$$\eta_{\text{thé}} = 1 - \frac{1}{\epsilon^k - 1}$$

Donc si l'on augmente ϵ , η augmente aussi ; mais on ne peut augmenter indéfiniment car il arrive un certain moment où l'autoallumage devient inévitable.

La limite supérieure admise est (pour le G.N) de l'ordre de :- 10

L'augmentation de ϵ est obtenue par la diminution de la chambre de combustion (en volume). Ceci est réalisé par usinage sur la Culasse.

Conclusion

Les qualités de la combustion du Gaz Naturel au démarrage à froid, et à faibles régimes, sont telles que la diminution de la puissance maximale est largement compensée par la souplesse des reprises.

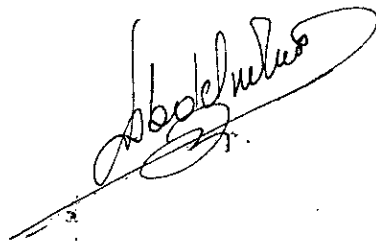
D'autres parts, les écarts de performances entre les versions G.N. et Ess s'accompagnent d'un gain de consommation spécifique et de rendement à puissance égale au profit du G.N.

La principale difficulté de l'utilisation du Gaz Naturel comme carburant pour les véhicules est son stockage. Car il est emmagasiné dans des bouteilles sous hautes pressions, ce qui a pour effet d'augmenter le poids de ces bouteilles. Ceci n'est pas avantageux pour la charge utile du véhicule.

En outre pour des pressions de stockage de 250 b environ, et pour de bouteilles pesants de 80 kg env. On a trouvé, pour un véhicule, roulant à 100 km/h (à plat) une autonomie d'environ 350 km.

Ces chiffres nous donnent une idée de la difficulté en ce qui concerne le stockage de la conversion des véhicules fonctionnant à l'Essence pour la mettre au Gaz Naturel.

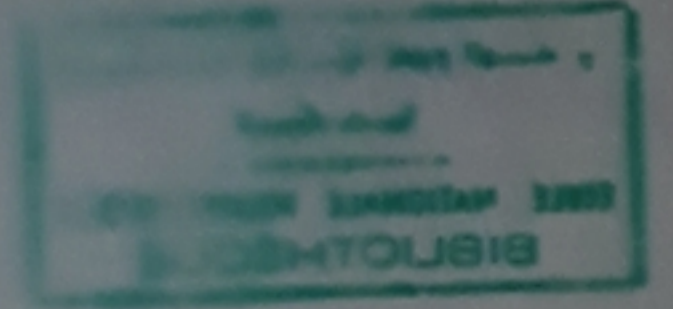
Mais la carburation au G.N. des moteurs à allumage commandé paraît d'un avenir prometteur, ne serait-ce que pour l'abondance des ressources, donc du coût, et de la production de Gaz d'Échappement moins toxiques.



Bibliographie.

- Incercarea motoarelor cu ardere interna : M. STRATULAT, S.D. MUNTEANU
Editura Tehnica - Bucuresti.
- Oxydations et Combustions (t.1) : A. Van TIGGELEN
Technip - Paris.
- Combaterea - P.P.E. de motoarele Autovehiculelor : A.C. Vasilescu
Editura Academiei R.S. Romania.
- Revue Technique Automobile Renault "16" 8cv.
- Carburants et Combustible pour M.C.I. J. WEISSMAN.
- M. MEDICI - Les Utilisations du G.N.
- These de fin d'Etude prom : 78

Trace des cycles Essence ($\lambda=0.9$), Gaz Naturel ($\lambda=1.1$)
et Gaz Naturel ($\lambda=2.3$)



Echelles

pour le cycle essence - on a pris $V_a = 30 \text{ cm}^3$ ce qui donne $V_c = \frac{V_a}{\lambda} = 35 \text{ cm}^3$
et $V_{c, \text{ess}} = \delta_c V_c = 8.9 \text{ cm}^3$. Tandis que pour
l'échelle de pression, 1 cm représente 1 kgf/cm^2
Par planimétrie la surface du cycle utile est
 $S_+ = 244.46 \text{ cm}^2$ et la surface perdue est $S_- = 7.12 \text{ cm}^2$
Dans ce cas la pression moyenne indiquée sera -
$$p_m = \frac{(S_+ - S_-)}{(V_a - V_c)} = \frac{244.46 - 7.12}{30 - 35} = 7.82 \text{ cm}$$

ce qui rep-
resentera $\therefore p_{m, \text{ess}} = 7.82 \text{ kgf/cm}^2$.

pour les cycle Gaz Naturel - Les échelles sur p et V sont identiques
à celles de l'essence sauf: $V_c = \delta_c V_a = 8.68 \text{ cm}^3$
Et par planimétrie on a obtenu pour le cycle ($\lambda=1.1$)
 $S_+ = 174.7 \text{ cm}^2$ et $S_- = 7.12 \text{ cm}^2$ - d'où une pression
moyenne indiquée de: $p_{m, \text{Gaz}} = 6.32 \text{ kgf/cm}^2$.

