

10/89

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A ea

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

SIMULATION D'UN MOTEUR MONOCYLINDRE (VERSION GAZ)

Proposé par :

Mr M. BENBRAIKA

Etudié par :

Mr M. ET-TOUIL

Dirigé par :

Mr M. BENBRAIKA

PROMOTION : JUIN 89

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

A mes très chers Parents

A mes soeurs et ma tante

A tous ceux qui me sont chers

Je remercie tout particulièrement Monsieur M. BENBRAIKA
d'avoir dirigé cette étude et d'avoir veillé à son bon déroulement.

Que tous ceux qui ont contribué à ma formation trouvent
ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Je veux aussi exprimer ma gratitude à toutes les
personnes de l'atelier de mécanique qui nous ont manifesté leur
aide :

RACHID, QUABDESLEM, MOURAD, AHMED et ALI le magasinier.

Je remercie également mon ami HAMID D. qui m'a hébergé
lors de l'élaboration de ce mémoire.

S O M M A I R E

	pages
<u>INTRODUCTION</u>	1
CHAPITRE I- THEORIE DE LISSAGE ET MODELISATION	2
I-1.1 Modélisation	2
I-1.2 Modèle linéaire	2
I-1.3 Approximation (ou lissage) et interpolation	3
I-2 Méthode des moindres carrés pour un modèle linéaire.	5
I-3 Méthode de Gauss	8
I-3.1 Principe.	8
I-3.2 Description de la méthode.	9
CHAPITRE II- CALCUL DES PERFORMANCES	19
II-1 Caractéristiques du Butane commercial	19
II-2 Critères de performance	19
II-2.1 Puissance au frein	19
II-2.2 Friction et rendement mecanique	19
a/Pertes par friction	19
b/Rendement mécanique	19
II-2.3 Consommation spécifique	20
II-2.4 Rendement thermique	20
II-2.5 Rendement volumétrique	20
II-3 Tableaux de valeurs et courbes	22
II-4 Interprétation des résultats	74

CHAPITRE III- ANALYSE DES GAZ D'ECHAPPEMENT	76
III-1 Caractéristiques du butane commercial	77
III-1.1 Constituants du butane commercial	77
III-1.2 Réaction de combustion de chacun des constituant	77
III-1.3 Détermination de l'air théorique	77
III-2 L'analyseur d'ORSAT	78
III-2.1 Principe	78
III-2.2 Description	78
III-3 Préparation des réactifs	79
III-3.1 Liquide de garde	79
III-3.2 Réactif absorbant l'O ₂	79
III-3.3 Réactif absorbant le CO ₂	79
III-3.4 Réactif absorbant le CO	80
III-4 Mode opératoire pour l'analyse à l'Orsat	80
III-5 Résultats	82
CHAPITRE IV- BILANS THERMIQUES	84
IV-1 INTRODUCTION	84
IV-2 THEORIE	85
IV-2.1 Mesure du débit d'eau	87
IV-2.2 Energie fournie par le carburant	89
IV-2.3 Evaluation de la chaleur spécifique moyenne des gaz d'échappement	89
IV-3 Evaluation de la quantité de chaleur cédée à l'eau de refroidissement du moteur	91
IV-4 Résultats	91

CONCLUSION

A N N E X E S

ANNEXE 1 DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

*A1-1 Moteur

A1-1.1 Modification du taux de compression

A1-1.2 Système d'allumage

A1-2 Dynamomètre

A1-3 Instrumentation

A1-3.1 Vitesse du moteur

A1-3.2 Puissance au frein

A1-3.3 Couple

A1-3.4 Consommation d'air

A1-3.5 Consommation de carburant

ANNEXE 2 TABLEAUX DE VALEURS

* Références bibliographiques page 98

I N T R O D U C T I O N

Un système physique, chimique, économique ... peut se concevoir comme étant une relation entre des causes (ou variables d'entrée) et des conséquences (variables de sortie).

Scientifiquement, étudier un tel système c'est généralement chercher à prévoir son comportement. Pour ce faire, il est intéressant de synthétiser un modèle dont le comportement soit analogue à celui du système étudié, c'est à dire reproduisant les mêmes relations entre ses grandeurs d'entrée et ses grandeurs de sortie; le modèle simule le comportement du système. [1]

De part notre étude, le système considéré est un moteur monocylindre à taux de compression variable. La vitesse de rotation et le taux de compression constituent les variables d'entrée ; les variables de sortie sont les différentes performances du moteur (puissance, couple, consommation spécifique, et rendements). Dans le but de prévoir les paramètres caractéristiques de notre système, nous avons établi un programme informatique. Nous avons jugé très utile de faire quelques analyses des gaz d'échappement afin d'étudier la combustion du butane. Enfin et dans un but de donner donner une idée sur la répartition de l'énergie de combustion du carburant, un dernier chapitre a été consacré aux bilans thermiques.

CHAPITRE I

THEORIE DU LISSAGE ET MODELISATION

1.1.1 MODELISATION

L'ingénieur, l'organisateur, le sociologue, ... ont souvent à prendre des décisions au sujet de phénomènes dont ils ne connaissent le comportement qu'à partir de données expérimentales (mesures).

Dans certains cas, en physique par exemple, la connaissance fondamentale des phénomènes en question nous permet de proposer un modèle mathématique précis, déterministe que l'on nomme modèle de connaissance.

Mais souvent, on ignore les mécanismes précis du phénomène, ou encore les mesures effectuées sur le phénomène peuvent être influencées par les variations aléatoires de variables incontrôlables (bruits). On peut alors proposer un modèle statistique dont on cherchera à estimer les paramètres à partir de l'échantillon des mesures. [1]

1.1.2 Modèle Linéaire

Etant donnée une fonction réelle $y = g(x)$ définie sur $x \in [a, b]$ de \mathbb{R} et connue en un ensemble de points x_i , nous voulons approximer $g(x)$ par une fonction simple.

Le type de modèle le plus commun dérive de la classe de fonctions de la forme :

$$y^* = C_1 \cdot f_1(x) + C_2 \cdot f_2(x) + \dots + C_m \cdot f_m(x) \quad (1-1)$$

où les fonctions $f_j(x)$ constituent un sous espace vectoriel de dimension m .

Les paramètres $[C_1, C_2, C_3, \dots, C_m]$ apparaissent sous forme linéaire. On dira que le modèle (1) est linéaire (en terme des C_j).

1-1.3 Approximation (ou lissage) et interpolation

En pratique le problème est généralement posé comme suit : soit un ensemble de n valeurs x_i d'une grandeur X auxquelles correspond un ensemble de valeurs y_i d'une grandeur Y . on veut représenter la liaison entre X et Y par une relation de la forme :

$$Y^* = f(x_i, C_1, C_2, C_3, \dots, C_m) \quad i=1, n \quad (1-2)$$

où f est connue, mais où les valeurs des paramètres $[C_1, \dots, C_m]$ restent à définir. On supposera, pour commencer, que les paramètres $[C_1, C_2, \dots, C_m]$ apparaissent sous forme linéaire par la relation (1-2).

Si le modèle (1-2) est parfait, alors y_i^* représente exactement y_i aux points x_i donnés et l'on a :

$$y_i - y_i^* = 0 \quad i=1, n \quad (1-3)$$

soit

$$y_i - f(x_i, C_1, C_2, \dots, C_m) = 0 \quad i=1, n \quad (1-4)$$

Le système (1-4) est un système, linéaire par hypothèse, de n équations à m inconnues (C_1, C_2, \dots, C_m) .

Trois cas peuvent donc se présenter :

*Premier cas : $n < m$

Il y a plus d'inconnues que d'équations et donc une infinité de solutions $[C_1, C_2, \dots, C_m]$ existe pour la relation (1-4). Il y a indétermination d'ordre $(m-n)$.

exemple: soit :

$$y_i^* = \sum_{j=1}^m C_j \cdot x^{j-1} \quad i=1, n$$

avec $n=2$ et $m=3$

*Deuxième cas: $n=m$

Si les n équations de la relation (1-4) sont indépendantes, alors une solution unique $[C_1, C_2, \dots, C_m]$ existe et l'on peut définir la fonction $y_i^* = f(x_i, C_1, C_2, \dots, C_m)$ passant par chacun des n points.

On dit que l'on opère une interpolation.

*Troisième cas: $n > m$

On a un système surdéterminé de n équations à m inconnues. Il n'y a généralement aucune solution et aucune fonction $f(x_i, C_1, C_2, \dots, C_m)$ ne peut passer par tous les points.

exemple: soit:

$$y_i^* = \sum_{j=1}^m C_j \cdot x_i^{j-1} \quad i=1, n \quad \text{avec } m=2 \text{ et } n=3$$

Dans ce troisième cas, supposons que l'on propose un ensemble quelconque de valeurs $[C_1, C_2, \dots, C_m]$, alors aux points supports x_i la valeur calculée y_i^* diffère certainement de y_i .

On a défini mathématiquement deux types de problèmes de modélisation d'un ensemble de n couples (x_i, y_i) , par un modèle à m paramètres:

- 1- Le problème d'interpolation où $m=n$;
- 2- Le problème d'approximation où $m < n$.

Dans la pratique scientifique, ces deux problèmes, dont l'un semble être le cas particulier de l'autre, sont fondamentalement différents:

- 1- L'interpolation est utilisée dans le cas de données (x_i, y_i) connues "précisément", lorsque l'on veut prédire les valeurs y en des points x ne coïncidant pas avec les supports x_i .

2- Dans le cas de mesures, dont la précision est rendue douteuse, à cause de perturbations incontrôlées, le but de l'approximation (que l'on appelle aussi lissage) est d'essayer d'éliminer autant que possible l'influence du bruit de mesure (donc séparer l'information du bruit).

Dans le cas de données imprécises, le résultat d'une interpolation est aberrant, car très sensible aux erreurs.

Par contre l'approximation nous permet de dégager une tendance et déduire un y probable pour un x quelconque.

1-2 Méthode des MOINDRES CARRÉS pour un modèle linéaire

On propose le modèle linéaire (en terme des coefficients inconnus $C_j, j=1, m$)

$$y_i^* = C_1 \cdot f_1(x_i) + C_2 \cdot f_2(x_i) + \dots + C_m \cdot f_m(x_i) \quad i=1, n \quad (I-5)$$

où $x_i \in \mathbb{R}$

L'erreur commise au point i en approximant la valeur mesurée y_i par y_i^* s'écrit:

$$e_i = y_i - y_i^* \quad i=1, n \quad (I-6)$$

Combinant les relations (I-5) et (I-6) on a:

$$y_i - \sum_{j=1}^m C_j \cdot f_j(x_i) = e_i \quad i=1, n \quad (I-7)$$

Ce système de n équations à $(n+m)$ inconnues ($C_j, j=1, m; e_i, i=1, n$) admet une infinités de solutions.

Parmi toutes ces solutions, nous définissons la meilleure, comme celle qui rend minimale l'erreur quadratique représentée par:

$$Z = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (I-8)$$

On cherche à minimiser Z en réglant la valeur des paramètres $[C_1, C_2, \dots, C_m]$. Autrement dit, on cherche à définir le minimum de la fonction Z dans l'espace $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ des paramètres.

Une condition nécessaire pour que Z soit minimale dans l'espace $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ est que:

$$\frac{\partial Z}{\partial C_k} = 0 \quad k=1, m \quad (I-9)$$

Ce qui, d'après la relation (I-8), peut s'écrire:

$$\frac{\partial}{\partial C_k} \sum_{i=1}^n e_i^2 = 0 \quad k=1, m \quad (I-10)$$

En permutant les opérations de sommation et dérivation partielle, puis en dérivant, on a:

$$2 \cdot \sum_{i=1}^n e_i \cdot \frac{\partial e_i}{\partial C_k} = 0 \quad k=1, m \quad (I-11)$$

En dérivant la relation (I-7), on obtient:

$$\frac{\partial e_i}{\partial C_k} = -f_k(x_i) \quad k=1, m \quad (I-12)$$

Remplaçons dans la relation (I-11); e_i par son expression de la relation (I-7) et $\frac{\partial e_i}{\partial C_k}$ par son expression dans la relation (I-12).

On obtient:

$$\sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^m C_j f_j(x_i) \right) f_k(x_i) = 0 \quad k=1, m \quad (I-13)$$

Soit

$$\sum_{j=1}^m C_j \sum_{i=1}^n f_j(x_i) \cdot f_k(x_i) = \sum_{i=1}^n y_i \cdot f_k(x_i) ; k=1, m \quad (I-14)$$

Définissant :

$$b_k = \sum_{i=1}^n y_i \cdot f_k(x_i) \quad k=1, m \quad (I-15)$$

$$a_{kj} = \sum_{i=1}^n f_j(x_i) \cdot f_k(x_i) \quad \begin{matrix} k=1, m \\ j=1, m \end{matrix} \quad (I-16)$$

Le système (I-14) s'écrit :

$$\sum_{j=1}^m a_{kj} \cdot C_j = b_k \quad k=1, m \quad (I-17)$$

ou sous forme développée :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \vdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \vdots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \vdots & a_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad (I-18)$$

Les quantités a_{kj} et b_k des relations (I-15) et (I-16) sont entièrement déterminées car on connaît les couples x_i, y_i et le modèle que l'on propose, c'est à dire les fonctions $f_j(x)$. Dans le système linéaire (I-18), il ne reste donc que m inconnues : $[C_1, C_2, \dots, C_m]$.

Notre travail se réduit donc à la résolution du système linéaire d'ordre m : $AC=b$

On choisira pour notre étude un modèle polynômial simple

$$y^* = C_1 x^0 + C_2 x^1 + C_3 x^2 + \dots + C_m x^{m-1} \quad (I-19)$$

Il s'agit d'un cas particulier de la relation (I-5) où

$$f_j(x_i) = x_i^{j-1} \quad (I-20)$$

Les relations (I-16) et (I-17) deviennent alors:

$$b_k = \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i^{k-1} \quad k=1, m \quad (I-21)$$

$$a_{kj} = \sum_{i=1}^n x_i^{j+k-2} \quad \begin{matrix} k=1, m \\ j=1, m \end{matrix} \quad (I-22)$$

On utilisera pour la résolution du système linéaire, ainsi obtenu, la méthode de Gauss.

1-3 METHODE DE GAUSS

*Théorème de Gauss:

Étant donnée une matrice carrée A quelconque, il existe des matrices inversibles S telles que $SA=A'$, où A' est une matrice triangulaire supérieure.

1-3.1 Principe

La méthode de Gauss consiste à transformer le système $AC=b$ en un système équivalent $A'C=b'$, où A' est une matrice triangulaire supérieure.

1-3.2 Description de la méthode

Soit le système suivant :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \tag{I-23}$$

Sachant que les transformations seront opérées sur A et sur b, afin de ne pas modifier le système, on simplifie l'algorithme en formant la matrice augmentée [A,b] où le vecteur b devient (m+1)-ième colonne de la matrice A. Le système s'écrit donc :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \tag{I-24}$$

La méthode comporte m étapes

- Première étape

On transforme [A,b] en une matrice dont les termes sous diagonaux de la première colonne sont nuls :

$$a_{21}^{(1)} = a_{31}^{(1)} = \dots = a_{m1}^{(1)} = 0 \text{ (l'indice (1) notant l'étape 1).}$$

Prémultiplions $|A, b|$ par $E_{21}^{(*)}(-a_{21}/a_{11})$, seule la seconde ligne est modifiée et ses termes deviennent:

$$\left[\begin{array}{l} a_{21}^{(1)} = a_{21} - (a_{21}/a_{11}) \cdot a_{11} = 0 \\ a_{22}^{(1)} = a_{22} - (a_{21}/a_{11}) \cdot a_{12} \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ a_{2,m+1}^{(1)} = a_{2,m+1} - (a_{21}/a_{11}) \cdot a_{1,m+1} \end{array} \right.$$

ou sous forme générale:

$$a_{2j}^{(1)} = a_{2j} - (a_{21}/a_{11}) \cdot a_{1j} \quad (j=1, 2, \dots, m+1) \quad (I-25)$$

Prémultiplions $|A, b|$ par $E_{31}(-a_{31}/a_{11})$, nous modifions la troisième ligne où les nouveaux termes sont:

$$\left[\begin{array}{l} a_{31}^{(1)} = a_{31} - (a_{31}/a_{11}) \cdot a_{11} = 0 \\ a_{32}^{(1)} = a_{32} - (a_{31}/a_{11}) \cdot a_{12} \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ a_{3,m+1}^{(1)} = a_{3,m+1} - (a_{31}/a_{11}) \cdot a_{1,m+1} \end{array} \right.$$

Soit sous forme condensée:

$$a_{3j}^{(1)} = a_{3j} - (a_{31}/a_{11}) \cdot a_{1j} \quad (j=1, 2, \dots, m+1) \quad (I-26)$$

(*) $A' = E_{i1}(d) \cdot A$ signifie que A' est la matrice A dont la i -ème ligne est remplacée par la somme de la i -ème et de d fois la 1-ème ligne.

Pour annuler le terme a_{i1} on utilise la transformation $E_{i1}(-a_{i1}/a_{11})$, ce qui donne les nouveaux termes de la i ème ligne:

$$\left[\begin{array}{l} a_{i1}^{(1)} = a_{i1} - (a_{i1}/a_{11}) \cdot a_{11} = 0 \\ a_{i2}^{(1)} = a_{i2} - (a_{i1}/a_{11}) \cdot a_{12} \\ \dots\dots\dots \\ a_{i,m+1}^{(1)} = a_{i,m+1} - (a_{i1}/a_{11}) \cdot a_{1,m+1} \end{array} \right.$$

Donc la première étape s'écrit sous forme générale:

$$a_{ij}^{(1)} = a_{ij} - (a_{i1}/a_{11}) \cdot a_{1j} \quad \begin{array}{l} i=2,3,\dots,m \\ j=1,2,\dots,m+1 \end{array} \quad (I-27)$$

- Deuxième étape

Au cours de cette phase, nous devons annuler les termes sous diagonaux de la seconde colonne:

$$a_{32}^{(2)} = a_{42}^{(2)} = a_{52}^{(2)} = \dots = a_{m2}^{(2)} = 0$$

Prémultiplions $|A, b|^{(1)}$ par $E_{32}(-a_{32}^{(1)}/a_{22}^{(1)})$

La troisième ligne devient alors:

$$\left[\begin{array}{l} a_{32}^{(2)} = a_{32}^{(1)} - (a_{32}^{(1)}/a_{22}^{(1)}) \cdot a_{22}^{(1)} = 0 \\ a_{33}^{(2)} = a_{33}^{(1)} - (a_{32}^{(1)}/a_{22}^{(1)}) \cdot a_{23}^{(1)} \\ \dots\dots\dots \\ a_{3,m+1}^{(2)} = a_{3,m+1}^{(1)} - (a_{32}^{(1)}/a_{22}^{(1)}) \cdot a_{2,m+1}^{(1)} \end{array} \right.$$

soit:

$$a_{3j}^{(2)} = a_{3j}^{(1)} - (a_{32}^{(1)}/a_{22}^{(1)}) \cdot a_{2j}^{(1)} \quad (j=2, \dots, m+1) \quad (I-28)$$

De même, prémultiplions $|A, b|^{(1)}$ par $E_{i2}(-a_{i2}^{(1)}/a_{22}^{(1)})$, pour modifier la i ème ligne comme suit:

$$\left[\begin{array}{l} a_{i2}^{(2)} = a_{i2}^{(1)} - (a_{i2}^{(1)}/a_{22}^{(1)}) \cdot a_{22}^{(1)} = 0 \\ a_{i3}^{(2)} = a_{i3}^{(1)} - (a_{i2}^{(1)}/a_{22}^{(1)}) \cdot a_{23}^{(1)} \\ \dots\dots\dots \\ a_{i,m+1}^{(2)} = a_{i,m+1}^{(1)} - (a_{i2}^{(1)}/a_{22}^{(1)}) \cdot a_{2,m+1}^{(1)} \end{array} \right.$$

La deuxième étape s'écrit donc:

$$a_{ij}^{(2)} = a_{ij}^{(1)} - (a_{i2}^{(1)}/a_{22}^{(1)}) \cdot a_{2j}^{(1)} \quad \begin{array}{l} i=3, \dots, m \\ j=2, \dots, m+1 \end{array} \quad (I-29)$$

- k-ième étape

Au cours de cette étape, on veut annuler les termes:

$$a_{k+1,k}^{(k)} = a_{k+2,k}^{(k)} = \dots = a_{m,k}^{(k)} = 0$$

Prémultiplions $|A, b|^{(k-1)}$ par la matrice de transformation $E_{k+1,k}(-a_{k+1,k}^{(k-1)}/a_{kk}^{(k-1)})$

La $(k+1)$ -ième ligne de $|A, b|^{(k-1)}$ devient:

$$\left[\begin{array}{l} a_{k+1,k}^{(k)} = a_{k+1,k}^{(k-1)} - (a_{k+1,k}^{(k-1)}/a_{kk}^{(k-1)}) \cdot a_{kk}^{(k-1)} = 0 \\ a_{k+1,k+1}^{(k)} = a_{k+1,k+1}^{(k-1)} - (a_{k+1,k}^{(k-1)}/a_{kk}^{(k-1)}) \cdot a_{k,k+1}^{(k-1)} \\ \dots\dots\dots \\ a_{k+1,m+1}^{(k)} = a_{k+1,m+1}^{(k-1)} - (a_{k+1,k}^{(k-1)}/a_{kk}^{(k-1)}) \cdot a_{k,m+1}^{(k-1)} \end{array} \right.$$

Soit:

$$a_{k+1,j}^{(k)} = a_{k+1,j}^{(k-1)} - (a_{k+1,k}^{(k-1)}/a_{kk}^{(k-1)}) \cdot a_{kj}^{(k-1)}$$

$$(j = k, k+1, \dots, m+1)$$

Puis nous prémultiplions $[A, b]$ par :

$$E_{k+2, k} \left(-a_{k+2, k}^{(k-1)} / a_{kk}^{(k-1)} \right), \text{etc...}$$

Nous pouvons donc condenser ces transformations à la k -ième étape par :

$$a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)} - \left(a_{ik}^{(k-1)} / a_{kk}^{(k-1)} \right) \cdot a_{kj}^{(k-1)} \quad (I-31)$$

$$\text{avec } \begin{cases} i = k+1, \dots, m \\ j = k, \dots, m+1 \end{cases}$$

d'où l'algorithme de Gauss :

$$a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)} - \left(a_{ik}^{(k-1)} / a_{kk}^{(k-1)} \right) \cdot a_{kj}^{(k-1)} \quad \begin{matrix} i = k+1, m \\ j = k+1, m+1 \\ k = 1, m-1 \end{matrix} \quad (I-32)$$

Après calculs, on obtient le système triangulaire supérieur :

$$A^{(m-1)} \cdot C = b^{(m-1)}$$

b étant $(m+1)$ -ième colonne de $[A, b]$

Le système s'écrit aussi :

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot C_j = b_i \quad i=1, m \quad \text{où } a_{ij} = 0 \text{ si } j < i.$$

Il équivaut donc à :

$$b_i = \sum_{j=i}^m a_{ij} \cdot C_j = \sum_{j=i+1}^m a_{ij} C_j + a_{ii} C_i \quad i=1, m$$

C_i s'obtient donc aisément par le calcul à rebours suivant :

$$C_i = \frac{1}{a_{ii}} \cdot \left[b_i - \sum_{j=i+1}^m a_{ij} \cdot C_j \right] \quad i = m, m-1, \dots, 1 \quad (I-33)$$

II-4 ORGANIGRAMME

Variables d'entrée: Vitesse de rotation, taux de compression

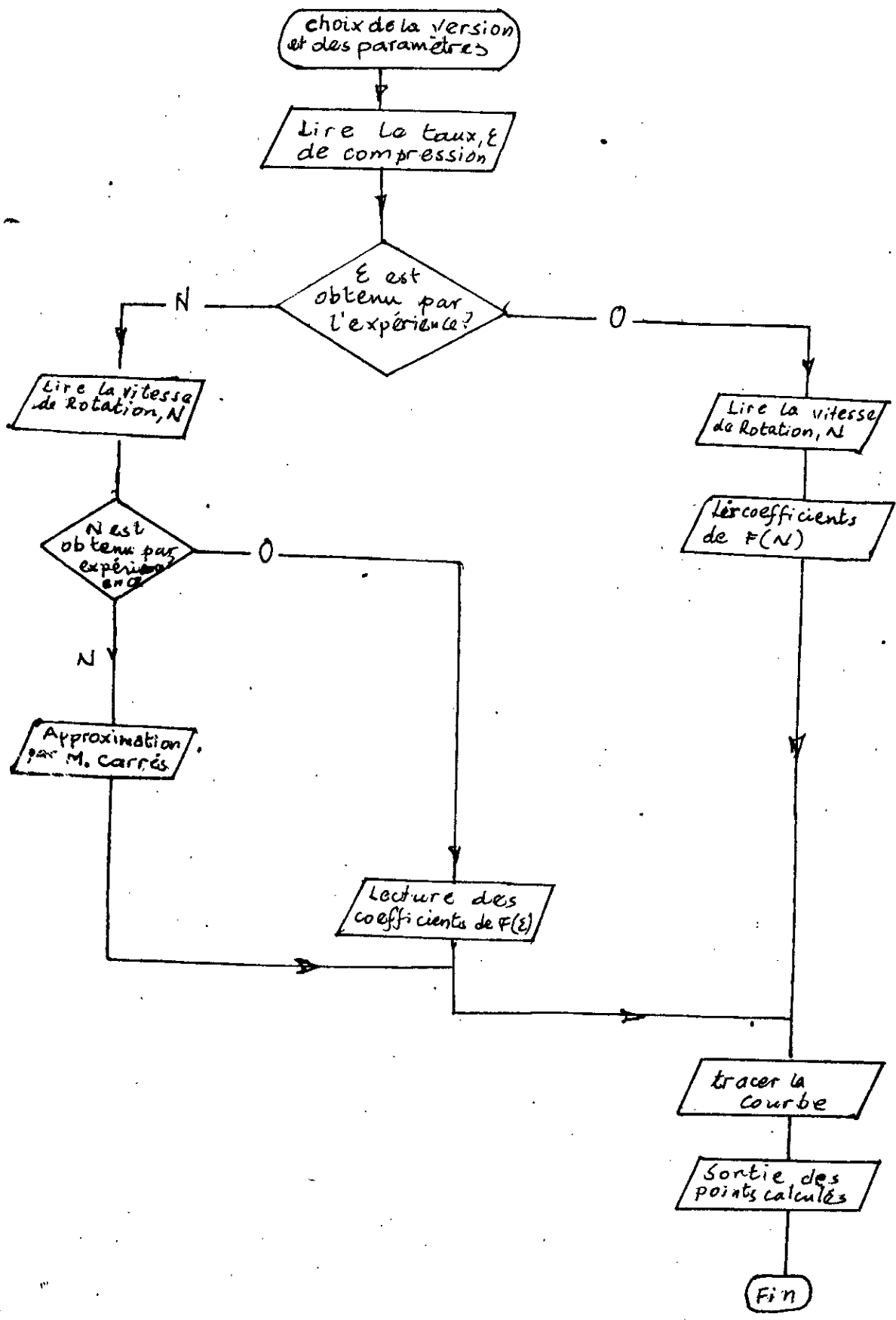
Variables de sortie: Puissance, couple, consommation spécifique, rendements thermique, mécanique et volumétrique.

Par la méthode des moindres carrés on crée des polynômes, modélisant les différents paramètres (le calcul des paramètres est détaillé au deuxième chapitre), dont les coefficients sont stockés sous forme de fichiers. On a établi ainsi:

- a) des modèles correspondant à des taux de compression constants, (les taux de compression sont ceux pour lesquels on a fait des expériences), pour lesquels les variables d'entrée sont ~~pour~~ les vitesses de rotation.
- b) des modèles correspondant à des vitesses constantes. Les variables d'entrée, dans ce cas là, sont les taux de compression.

présentation du programme:

- 1-Choix de la version et du paramètre.
- 2-Choix de la valeur du taux de compression et de celle de la vitesse de rotation.
- 3-si l'une des deux variables d'entrée correspond à l'un des modèles cités ci dessus alors on calcule la le paramètre pour les ~~valeurs~~ valeurs des variables d'entrée choisies.
- 4-Sinon, on calcule la valeur du paramètre pour chacun des modèles (b), le taux de compression étant celui choisi ci-dessus. un ensemble de couples est obtenu, par un lissage des points, ainsi obtenus, on détermine la valeur du paramètre aux conditions d'entrée choisies.



Exemple

LA PUISSANCE [kw] TAUX DE COMPRESSION 8.5 ALLUMAGE 10° AVANT PMH

EXPERIENCE	APPROXIMATION
4.075	4.100202
4.646	4.591685
4.98	4.988216
5.298	5.28095
5.328	5.461041
5.574	5.519445
5.574	5.447915
5.165	5.237007
4.839	4.878074
4.388	4.362272

LE COUPLE [N.m]

EXPERIENCE	APPROXIMATION
32.42	32.63296
32.86	32.43917
31.7	31.74054
30.66	30.58057
28.26	29.00272
27.3	27.05049
25.35	24.76734
21.92	22.19676
19.26	19.38224
16.43	16.36725

LA CONSOMMATION SPECIFIQUE [KG/KW.h]

EXPERIENCE	APPROXIMATION
.379	.3777026
.369	.3720624
.373	.3694324
.365	.370658
.379	.3765849
.397	.3880586
.397	.4059246
.429	.4310286
.469	.464216
.505	.5063324

RENDEMENT THERMIQUE

EXPERIENCE

APPROXIMATION

.209	.2089693
.214	.2132897
.212	.2147354
.217	.2134438
.209	.2095522
.199	.2031982
.199	.194519
.184	.1834522
.168	.1707351
.157	.1559051

RENDEMENT MECANIQUE

EXPERIENCE

APPROXIMATION

.738	.737339
.733	.7341574
.725	.7263738
.719	.714717
.697	.6999161
.683	.6826998
.664	.6637971

RENDEMENT VOLUMETRIQUE

EXPERIENCE

APPROXIMATION

.871	.8643233
.904	.899974
.886	.9207852
.924	.9278391
.98	.9222176
.894	.9050026
.851	.8772759
.842	.8401198
.799	.7946163
.743	.7418468

L'exemple ci-dessus constitue une comparaison entre les résultats expérimentaux et les paramètres prévus par le programme. La précision des valeurs données par le modèle est très appréciable.

CHAPITRE II

CALCUL DES PERFORMANCES

II-1 Caractéristiques du Butane commercial

- Masse volumique à 15°C 2.6 Kg/m³
- Pouvoir calorifique inférieur 45.538 MJ/Kg

On a préféré ne donner que les valeurs caractéristiques qui vont être utilisées dans les calculs de performances.

II-2 Critères de performance

II-2.1 Puissance au frein

On appelle puissance au frein la puissance effective disponible au vilebrequin du moteur, en raison du fait qu'elle s'obtient généralement en mesurant le couple du moteur alors qu'il travaille contre l'action d'un frein.

II-2.2 Friction et rendement mécanique

a/ Pertes par friction

c'est la différence entre la puissance indiquée et la puissance effective. Elles se calculent directement en enregistrant le couple nécessaire pour faire tourner le moteur à l'aide du dynamomètre utilisé comme moteur électrique.

$$\text{Pertes de friction} = \frac{2\pi N \cdot C_f}{60.000} \quad (\text{KW})$$

où C_f est le couple de friction indiqué par le couplemètre.

b/ Rendement mécanique

c'est le rapport de la puissance effective et la puissance indiquée

$$\eta_m = \frac{\text{Puissance au frein}}{P \text{ au frein} + P \text{ friction}}$$

$$\eta_m = \frac{1}{1 + P_f/P_e}$$

11-2.3 Consommation spécifique

Elle se définit comme suit :

$$sfc = \frac{\text{consommation de carburant (masse/unité de temps)}}{\text{Puissance effective}}$$

$$sfc = \frac{\dot{m}_c}{P} \quad (\text{Kg/KW.h})$$

Pour la consommation de gaz, on mesure le temps de consommation de 10 l de gaz, le débit volumique de carburant est donc :

$$\dot{v}_c = 0,01/t \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Le gaz a, au niveau du compteur, une pression légèrement inférieure à la pression atmosphérique.

La consommation de carburant est donnée par la relation :

$$\dot{m}_c = 2,6 \cdot \frac{0,01}{t} \cdot \frac{288}{T_{\text{réel}}} \cdot 3600 \quad (\text{Kg/h})$$

11-2.4 Rendement thermique

Le rendement thermique est le rapport de la puissance effective et de l'énergie fournie par le carburant.

$$\eta_t = \frac{\text{puissance effective}}{\dot{m}_c \times \text{pouvoir calorifique inférieur}}$$

$$\eta_t = \frac{3600}{sfc \times \text{pouvoir calorifique inférieur}}$$

11-2.5 Rendement volumétrique

La puissance délivrée par un moteur dépend de la charge qu'il est possible d'introduire dans le cylindre. Dans la pratique, le moteur n'aspire pas une pleine cylindrée d'air à chaque course d'admission.

Il convient de définir le rendement volumétrique de la manière suivante:

$$\eta_v = \frac{\text{masse d'air consommée par unité de temps}}{\text{masse d'air nécessaire pour remplir le volume de la cylindrée aux conditions atmosphériques}}$$

La masse d'air nécessaire pour remplir ce volume par unité de temps est de:

$$\begin{aligned} & p_a \times 582 \times 10^{-6} \times \frac{N}{2.60} \quad (*) \\ & = 4,85 \times 10^{-6} \times p_a N \end{aligned}$$

Par conséquent, le rendement volumétrique est donné par:

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_a}{4,85 \times 10^{-6} \times p_a N}$$

où \dot{m}_a est la consommation d'air en kg/s. Etant donné que cette valeur est très faible, il est d'usage dans la pratique de la redéfinir en kg/h. On a donc :

$$\eta_v = \frac{\text{masse d'air/h}}{0,0175 p_a N}$$

(*) $582 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ représente le volume de la cylindrée et p_a la masse volumique de l'air.

On a fait 24 essais pour des taux de compression allant de 5 à 10,5 et deux avances à l'allumage pour chaque taux de compression. Les résultats obtenus nous ont servi pour établir les tableaux de valeurs et les courbes représentant les variations des différentes performances du moteur avec la vitesse de rotation. (une partie des tableaux est représentée en annexe 2)

11-3. TABLEAUX DE VALEURS ET COURBES

Notations utilisées dans les tableaux:

CO : couple (N.m).

PU : puissance (KW).

Air/Carb : rapport air carburant (Kg d'air/Kg de combustible).

Cs : consommation spécifique (Kg/KW.h).

R vol: rendement volumétrique.

R Mec: rendement mécanique.

R Th : rendement thermique.

*LES COURBES 1 CORRESPONDENT A UNE AVANCE DE 10°

LES COURBES 2 CORRESPONDENT A UNE AVANCE DE 20°.

PARAMETRES FIXES

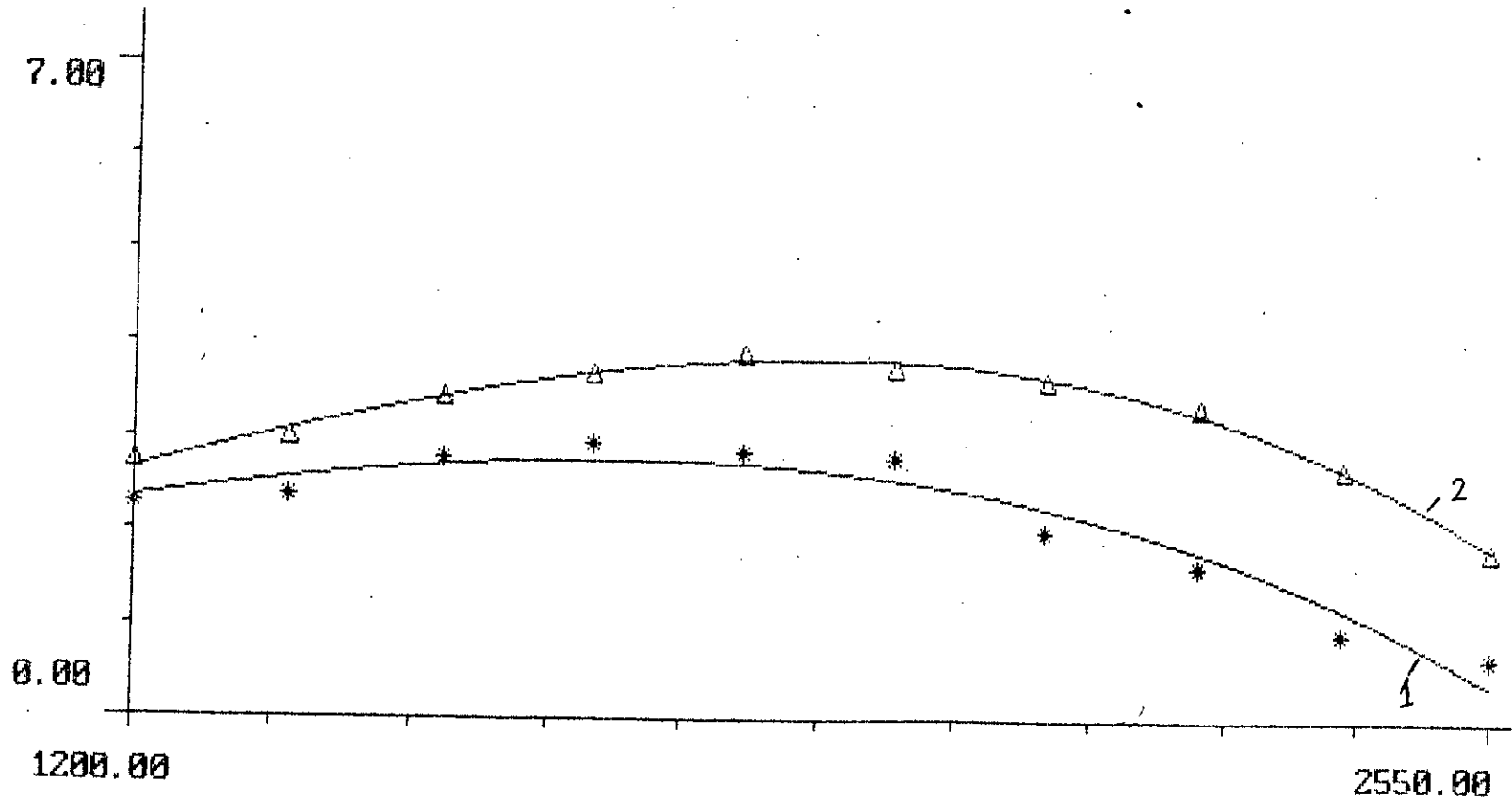
Date des essais	14 / 05 / 1989	Temperature ambiante	24.5
Carburant	Butane	Poids specifique	2,6
Taux de compression	5	Ouverture des gaz	Plaine
Réglage Allumage	10° Av. PMH	Réglage Carburateur	2,0 tours

N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	18,11	16.69	17.74	17.00	15.09	13.64	9.17	6.93	3.66	2.50
PU (Kw)	2.275	2.360	2.786	2.937	2.844	2.786	2.017	1.633	0.920	0.667
T (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
GAZ										
t (s)	71	65	59	52	49	47	47	47	44	43
(mm.H2O)	21.5	24	28	29.5	33	35.5	36.5	40.5	44	40.5
Air										
(Kg/h)	19.25	21.49	25.07	26.41	29.55	31.78	32.68	36.26	39.39	36.26
CO (N.m)	7	7.5	7.9	9	9	9	9	-	-	-
Friction										
PU (Kw)	0.88	1.06	1.24	1.56	1.7	1.84	1.98	-	-	-
Air/Carb	15.12	15.46	16.37	15.20	16.02	16.53	17.00	18.86	19.18	17.25
Cs (Kg/Kwh)	0.559	0.589	0.550	0.592	0.649	0.690	0.953	1.177	2.233	3.150
R UoI	0.774	0.768	0.807	0.773	0.792	0.787	0.751	0.778	0.792	0.686
R Mec	0.721	0.69	0.692	0.654	0.626	0.603	0.505			
R Th	0.141	0.134	0.144	0.134	0.122	0.115	0.083	0.067	0.035	0.025

PARAMETRES FIXES

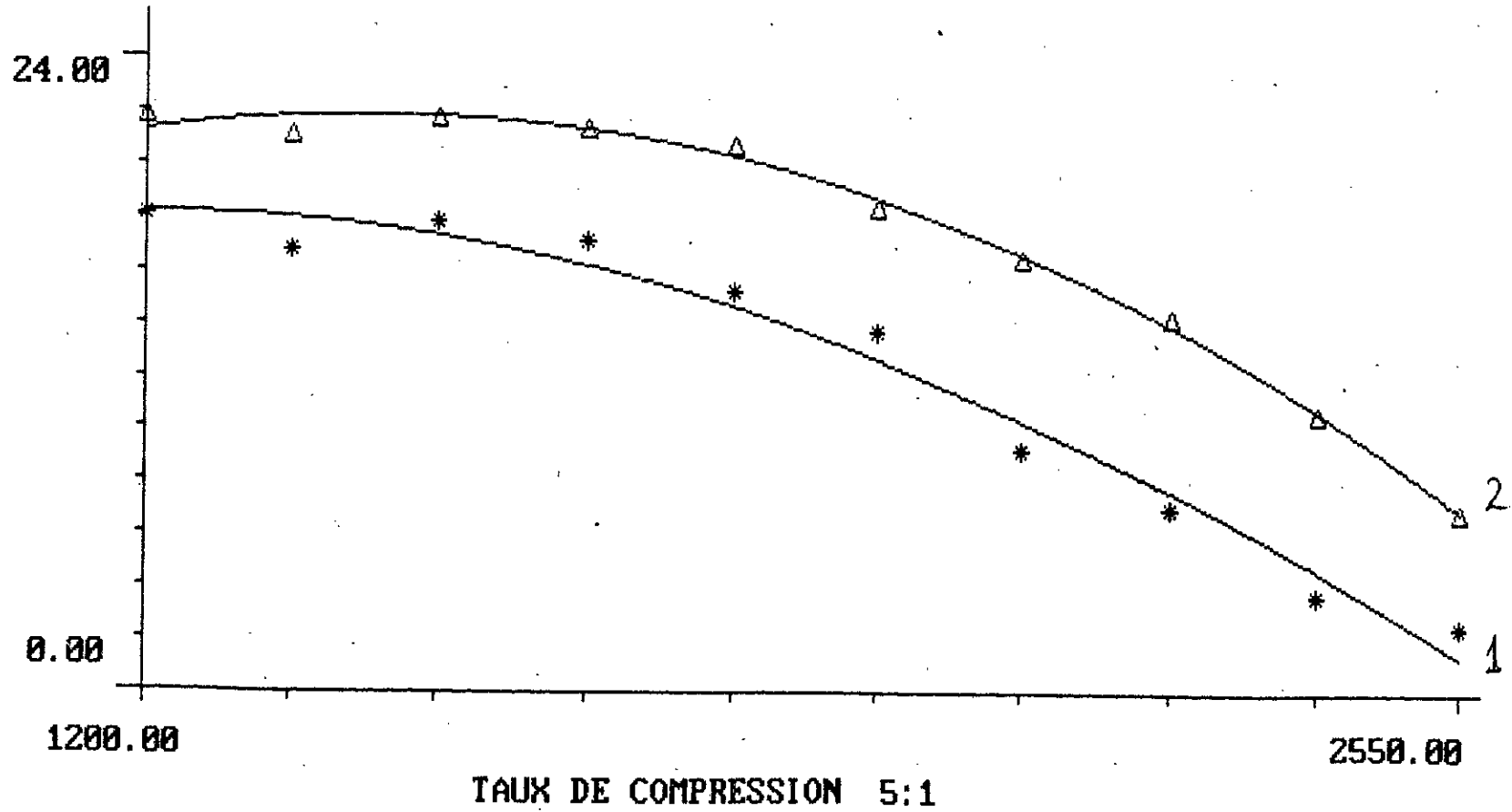
Date des essais	14 / 05 / 1989										Temperature ambiante	24
Carburant	Butane										Poids spécifique	2.6
Taux de compression	5,0										Ouverture des gaz	Pleine
Réglage Allumage	20° Av. PMH										Réglage Carburateur	2.0 tours
N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550		
CO (N.m)	21.78	21.07	21.72	21.29	20.61	18.34	16.41	14.19	10.62	14.82		
PU (Kw)	2.736	2.979	3.411	3.679	3.885	3.746	3.609	3.344	2.669	1.82		
T (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25		
GAZ												
t (s)	72	64	58	53	50	48	46	46	45	43		
(mm H2O)	21	21.5	27.5	30	34	33.5	36.5	40	41.5	30		
Air												
(Kg/h)	18.86	19.31	24.7	26.94	30.53	30.08	32.78	35.92	37.27	34.12		
CO (N.m)	7	7.5	7.9	9	9	9	9					
Friction												
PU (Kw)	0.88	1.06	1.24	1.56	1.7	1.84	1.98					
Air/Carb	15.02	13.67	15.85	15.80	16.89	15.98	16.68	18.28	18.56	16.24		
Cs (Kg/Kwh)	0.459	0.474	0.457	0.463	0.465	0.503	0.544	0.587	0.752	1.155		
R Uol	0.757	0.689	0.793	0.787	0.817	0.743	0.752	0.769	0.748	0.645		
R Mec	0.757	0.737	0.733	0.703	0.696	0.671	0.646					
P Th	0.172	0.167	0.173	0.171	0.169	0.157	0.145	0.135	0.105	0.069		

PUISSANCE [KW]=f(NOMBRE DE TOURS [T/Min])

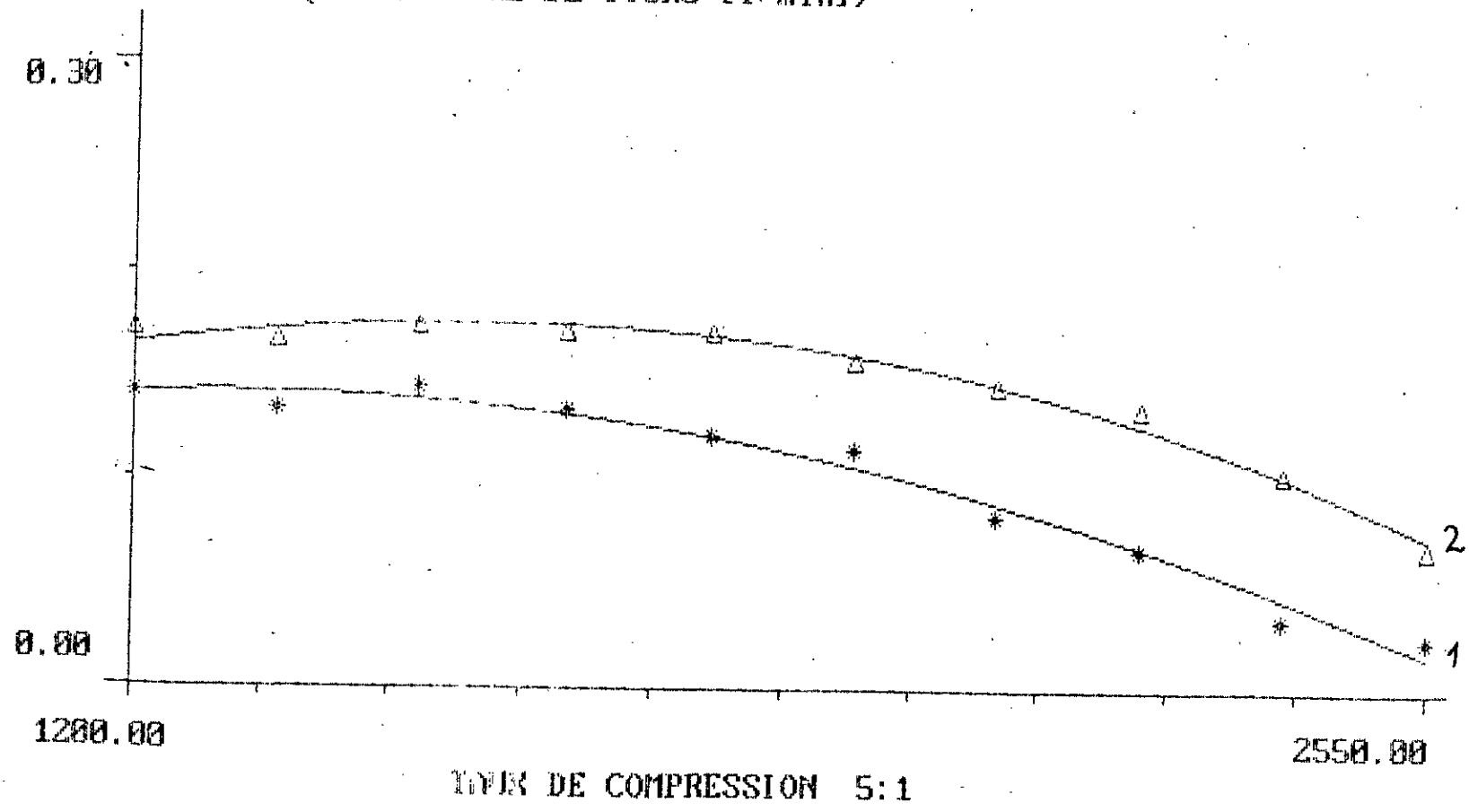


TAUX DE COMPRESSION 5:1

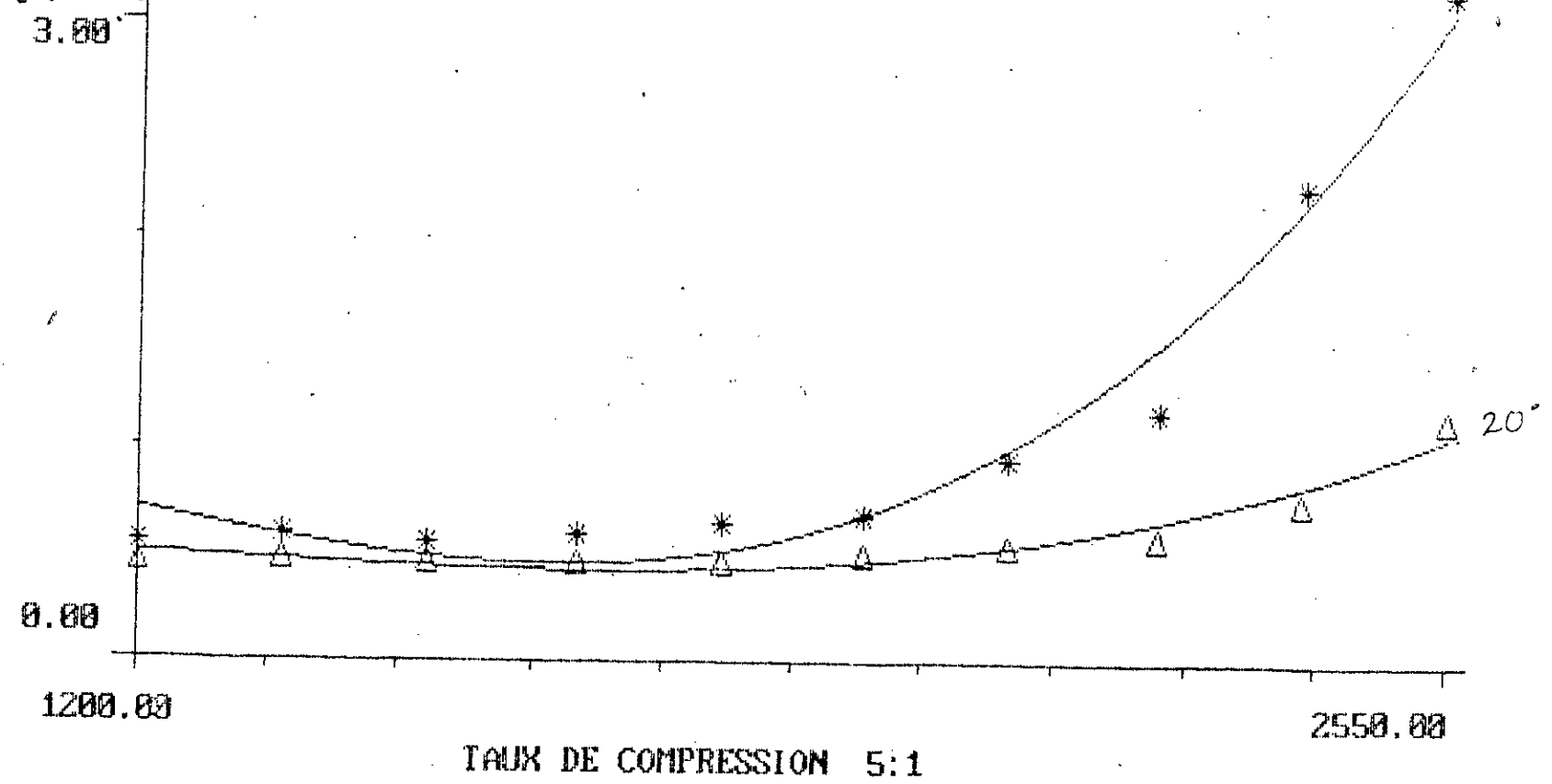
COUPLE [N.m] = f(NOMBRE DE TOURS [1/min])



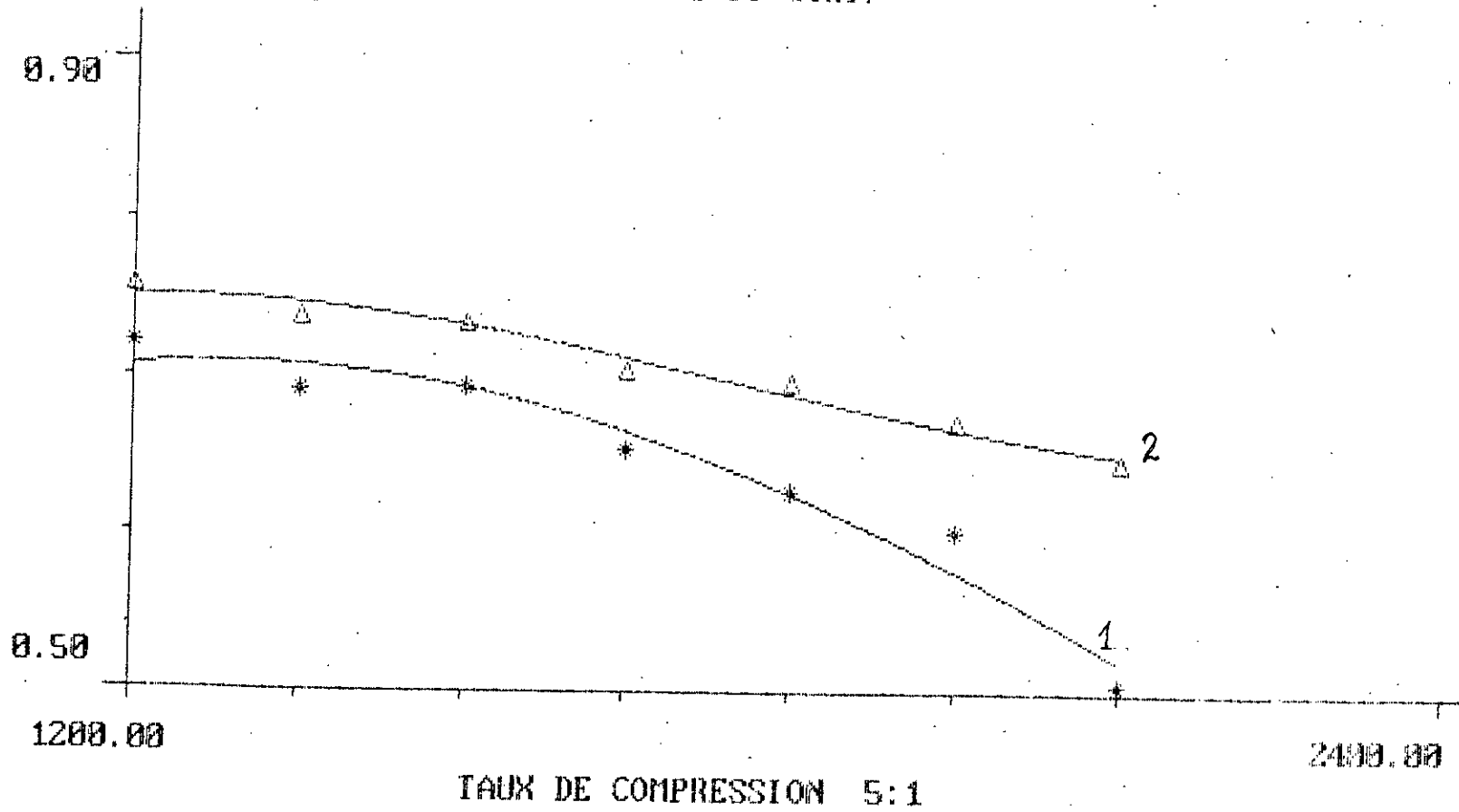
RENDMENT THEMIQUE-FONCTION DE TOURS (T/min)



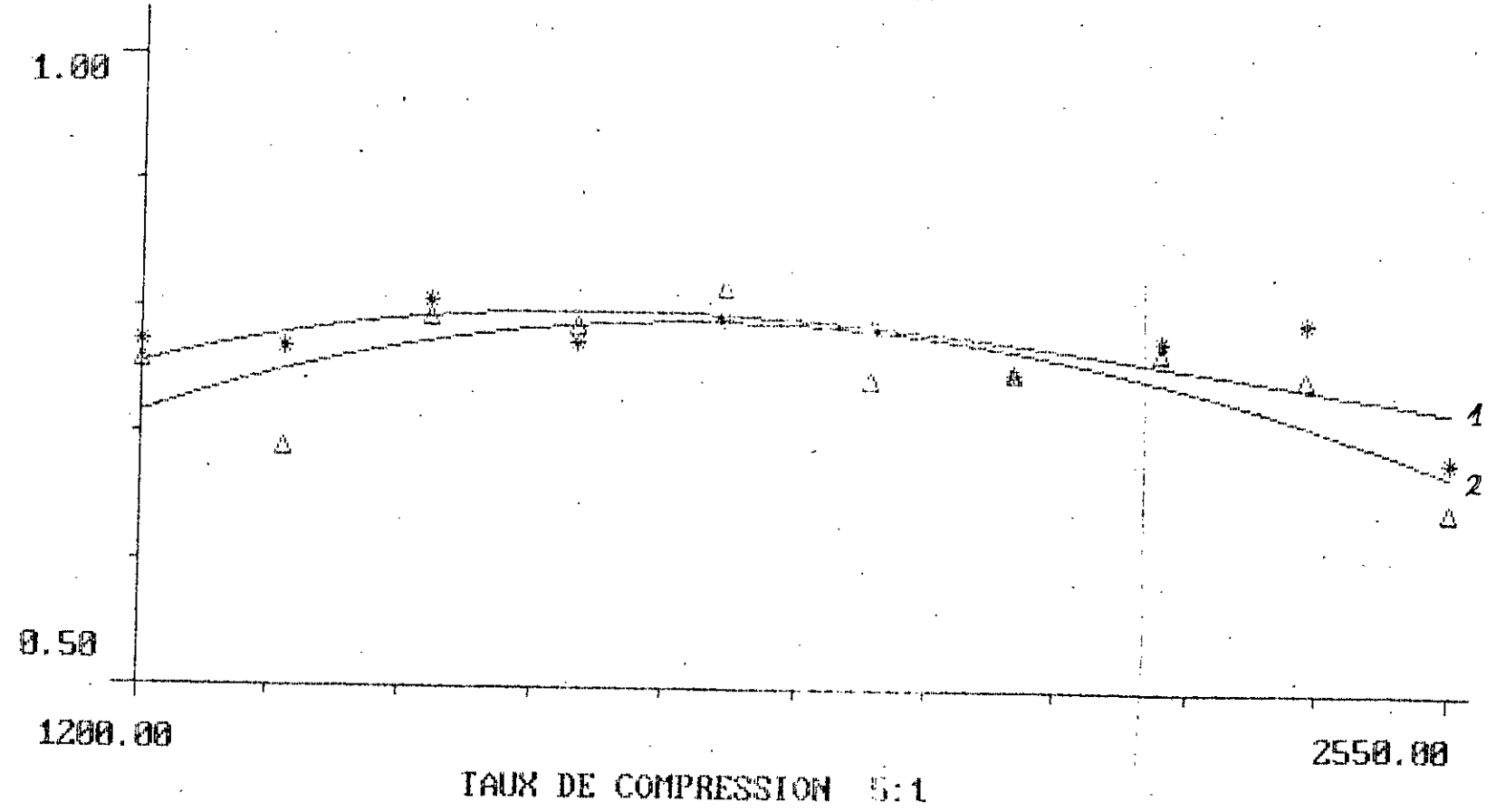
S F C=f(NOMBRE DE TOURS [T/Min])
[kg/Kw.h]



RENDMENT MECANIQUE=f(NOMBRE DE TOURS (1/min))



RENDEMENT VOLUMETRIQUE=f(NOMBRE DE TOURS L'ÉTAPE)



PARAMETRES FIXES

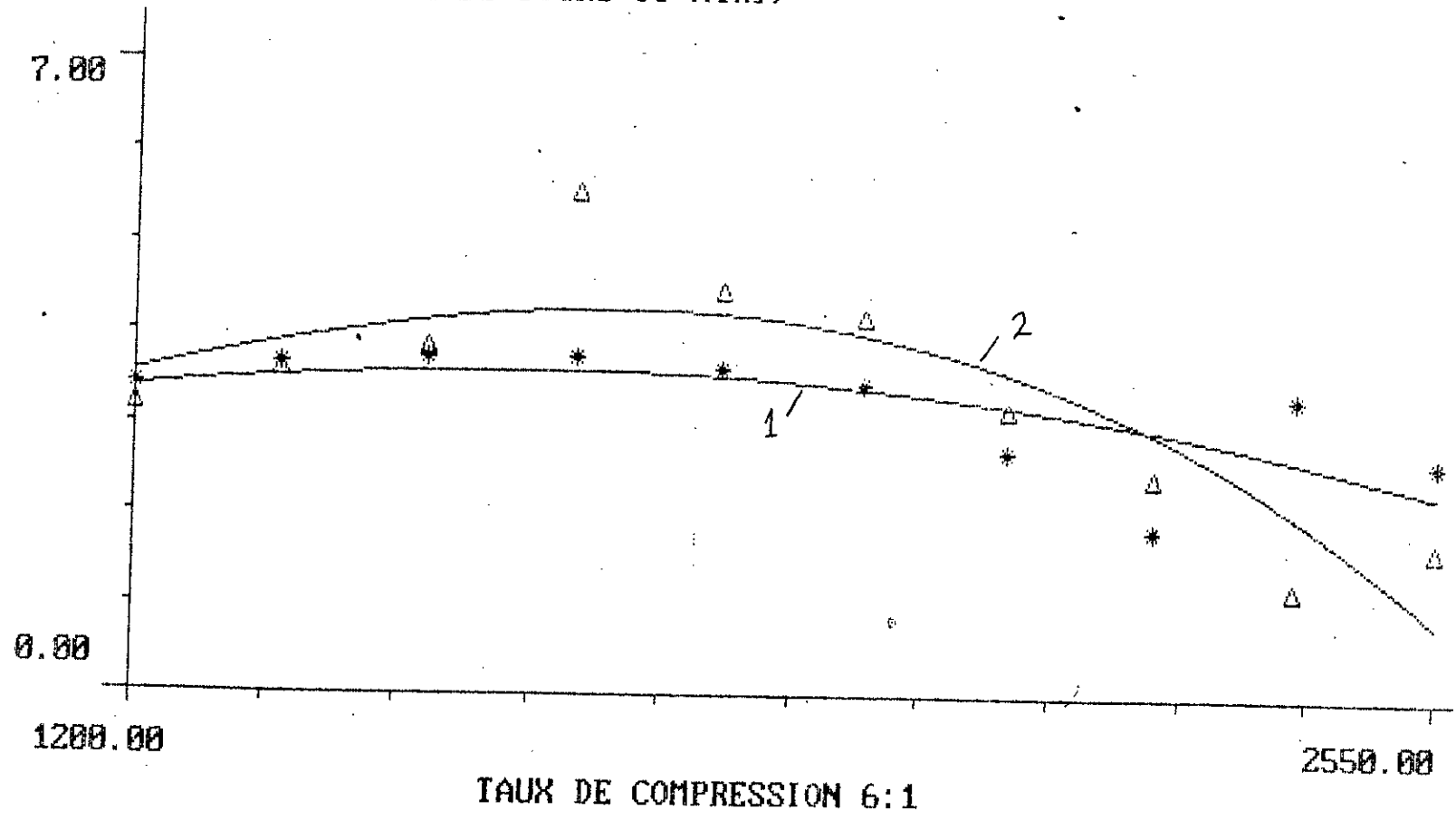
Date des essais	09/05/1989	Temperature ambiante	21.2°
Carburant	Butane	Poids specifique	2.6
Taux de compression	6.0	Ouverture des gaz	Pleine
Réglage Allumage	10° Av. PMH	Réglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/min)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	27.35	25.97	23.81	21.68	19.15	16.86	12.27	7.85	13.31	9.79
PH (Kw)	3.437	3.672	3.740	3.746	3.609	3.443	2.699	1.85	3.344	2.614
T (°C)	22.2	22.2	22.2	22.2	22.5	22.6	22.8	23	22.5	22.5
CAZ										
L (s)	60	55	52	50	47	46	45	46	45	44
(mm H2O)	23.5	26.5	31	34	38.5	37.5	38.5	41	43	40
air										
(Kg/h)	21.46	24.2	28.31	31.05	35.16	34.25	35.16	37.44	39.27	36.53
CO (N.m)	5.8	5.9	6	6.5	7	8	8			
Friction										
PH (Kw)	0.73	0.83	0.94	1.12	1.32	1.63	1.76			
Air/Carb	14.12	14.59	16.14	17.02	18.13	17.29	17.38	18.93	19.39	17.64
Cs (Kg/Kwh)	0.442	0.452	0.469	0.487	0.537	0.575	0.750	1.069	1.606	0.792
R Uol	0.854	0.856	0.901	0.898	0.932	0.838	0.799	0.794	0.781	0.684
R Mec	0.825	0.815	0.799	0.769	0.732	0.678	0.605			
R Th	0.179	0.175	0.168	0.162	0.147	0.137	0.105	0.074	0.13	0.099

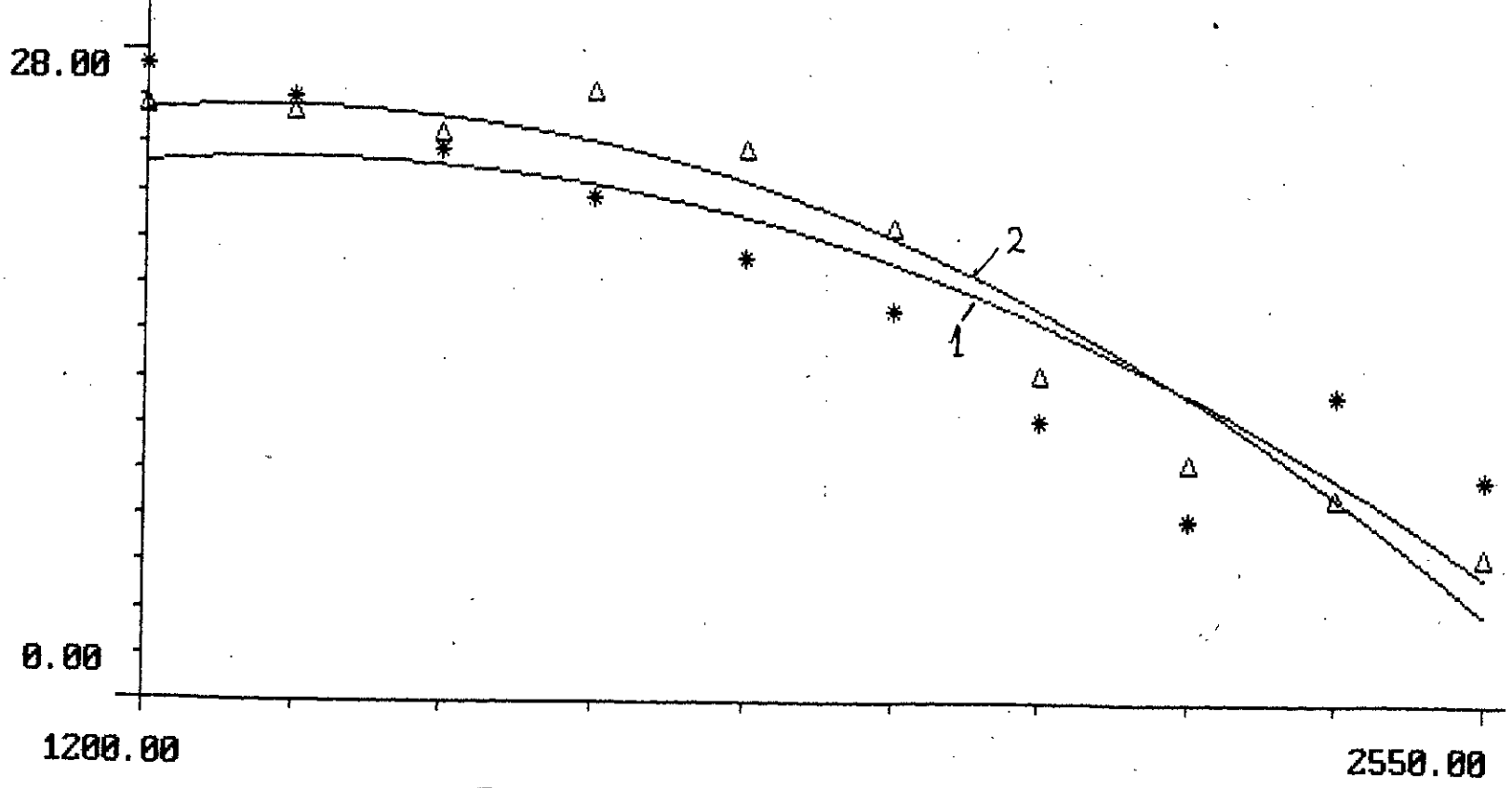
PARAMETRES FIXES

Date des essais	! 09 / 05 / 1989!										Temperature ambiante	21.2
Carburant	! Butane										Poids specifique	2.6
Taux de compression	! 6.0										Ouverture des gaz	Pleine
Reglage Allumage	! 20° Avant PMH!										Reglage Carburateur	2,0 tours
N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550		
CO (N.m)	25.66	25.42	24.58	23.3	23.78	20.50	14.14	10.35	8.84	6.40		
PU (Kw)	3.22	3.594	3.861	5.544	4.482	4.186	3.176	2.439	1.216	1.676		
T (°C)	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	23.0	23.0	23.0	23.0		
GAZ												
t (s)	67	62	59	50	49	49	49.5	47.5	49	49		
(mm H2O)	22	24	28	31.5	36.5	36.5	37	41	42	38		
Air												
(Kg/h)	20.09	21.92	25.57	28.77	33.33	33.33	33.79	37.44	38.36	34.7		
CO (N.m)	5.8	5.9	6	6.5	7	8	8					
Friction												
PU (Kw)	0.73	0.83	0.94	1.12	1.32	1.63	1.76					
Air/Carb	15.43	13.71	14.59	15.15	16.83	16.09	16.71	19.55	20.66	18.69		
Cs (Kg/Kwh)	0.422	0.409	0.400	0.329	0.414	0.444	0.578	0.785	1.527	1.108		
R Vol	0.799	0.775	0.814	0.834	0.884	0.816	0.768	0.794	0.763	0.65		
R Mec	0.815	0.812	0.804	0.832	0.772	0.72	0.64					
R Th	0.187	0.193	0.198	0.24	0.19	0.178	0.137	0.101	0.052	0.071		

PUISSANCE [KW]=F(NOMBRE DE TOURS [T/Min])

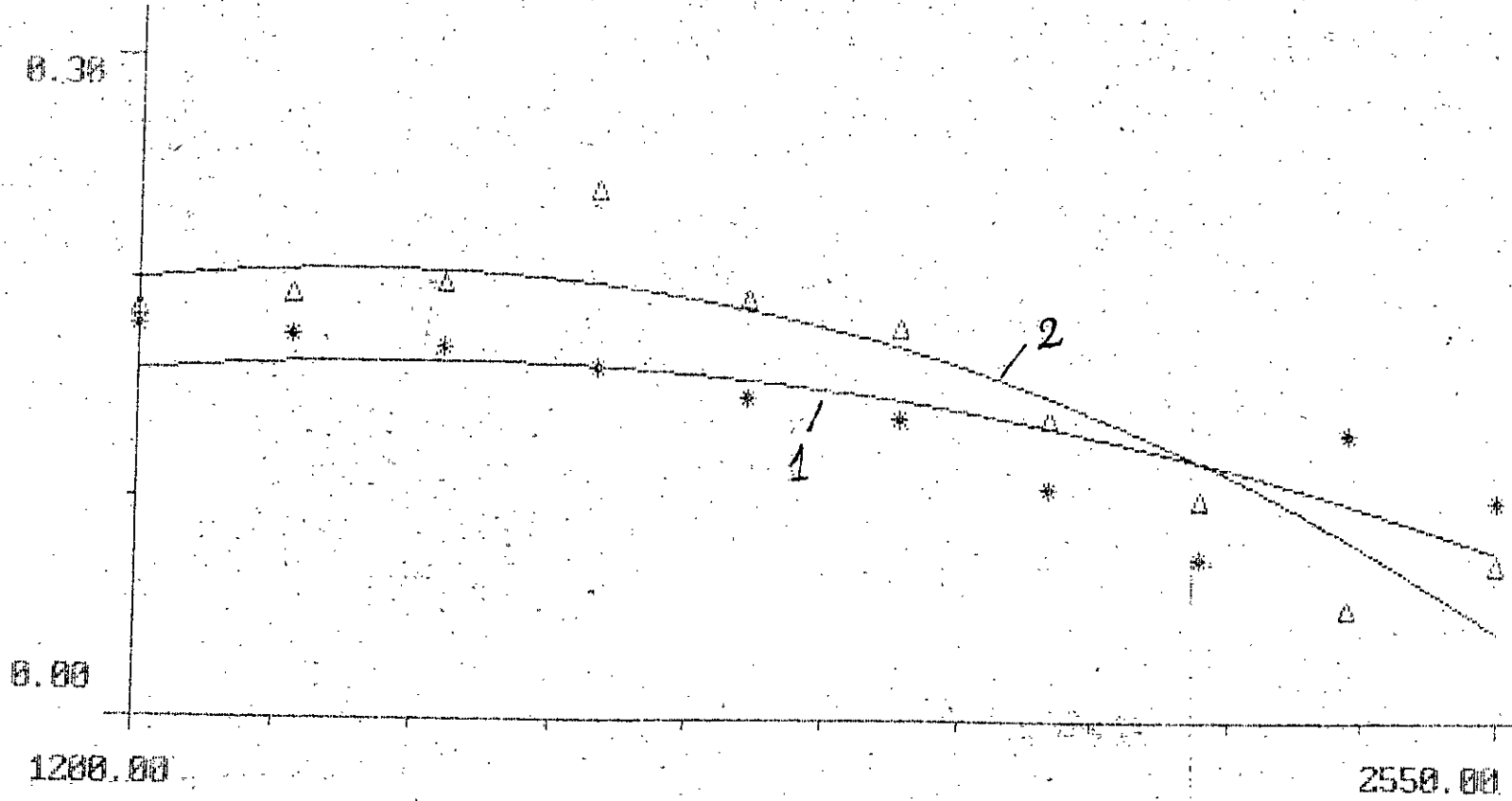


COUPLE [N.m] = f(NOMBRE DE TOURS [1/min])



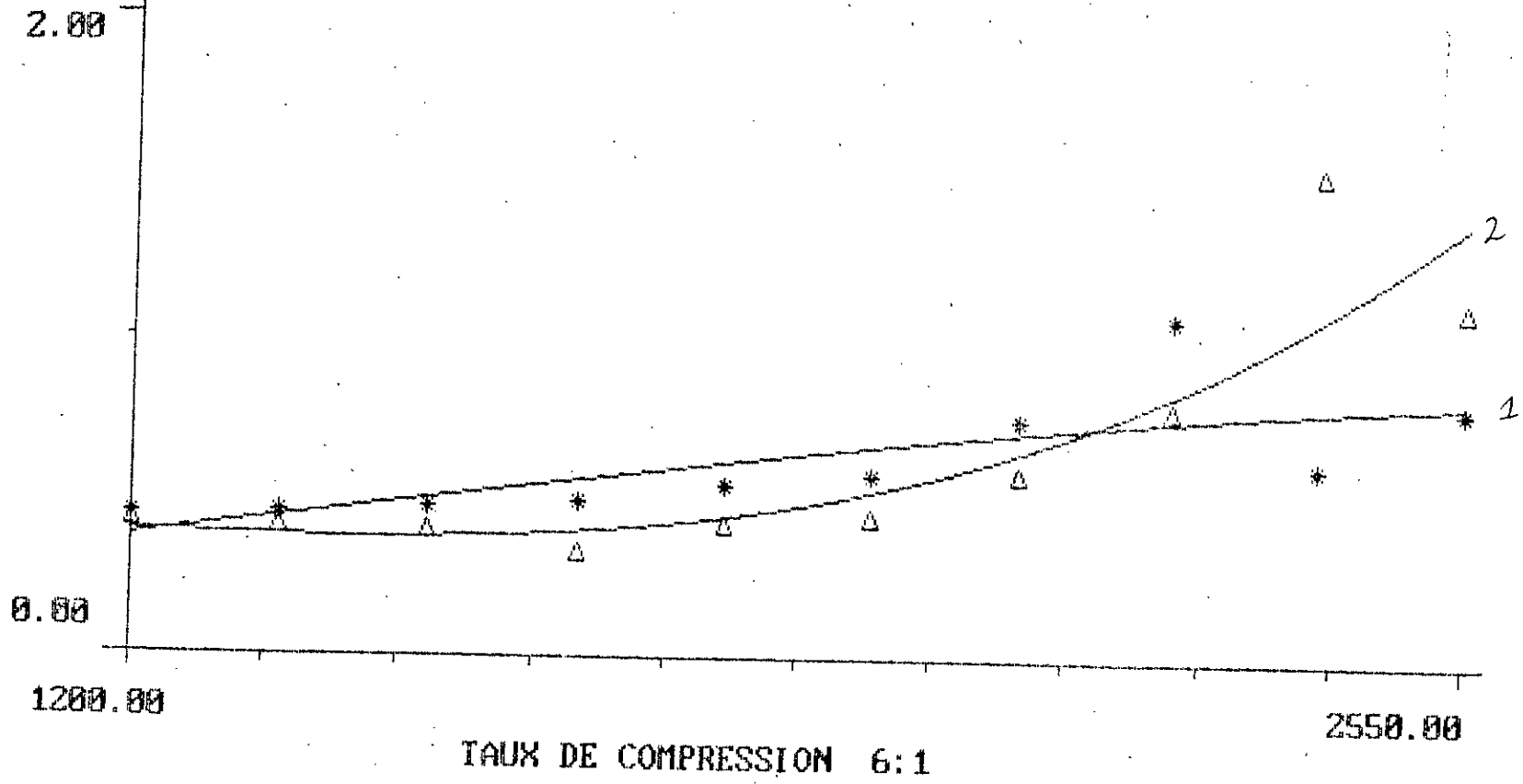
TAUX DE COMPRESSION 6:1

RENDEMENT THERMIQUE = f(NOMBRE DE TOURS (r/min))

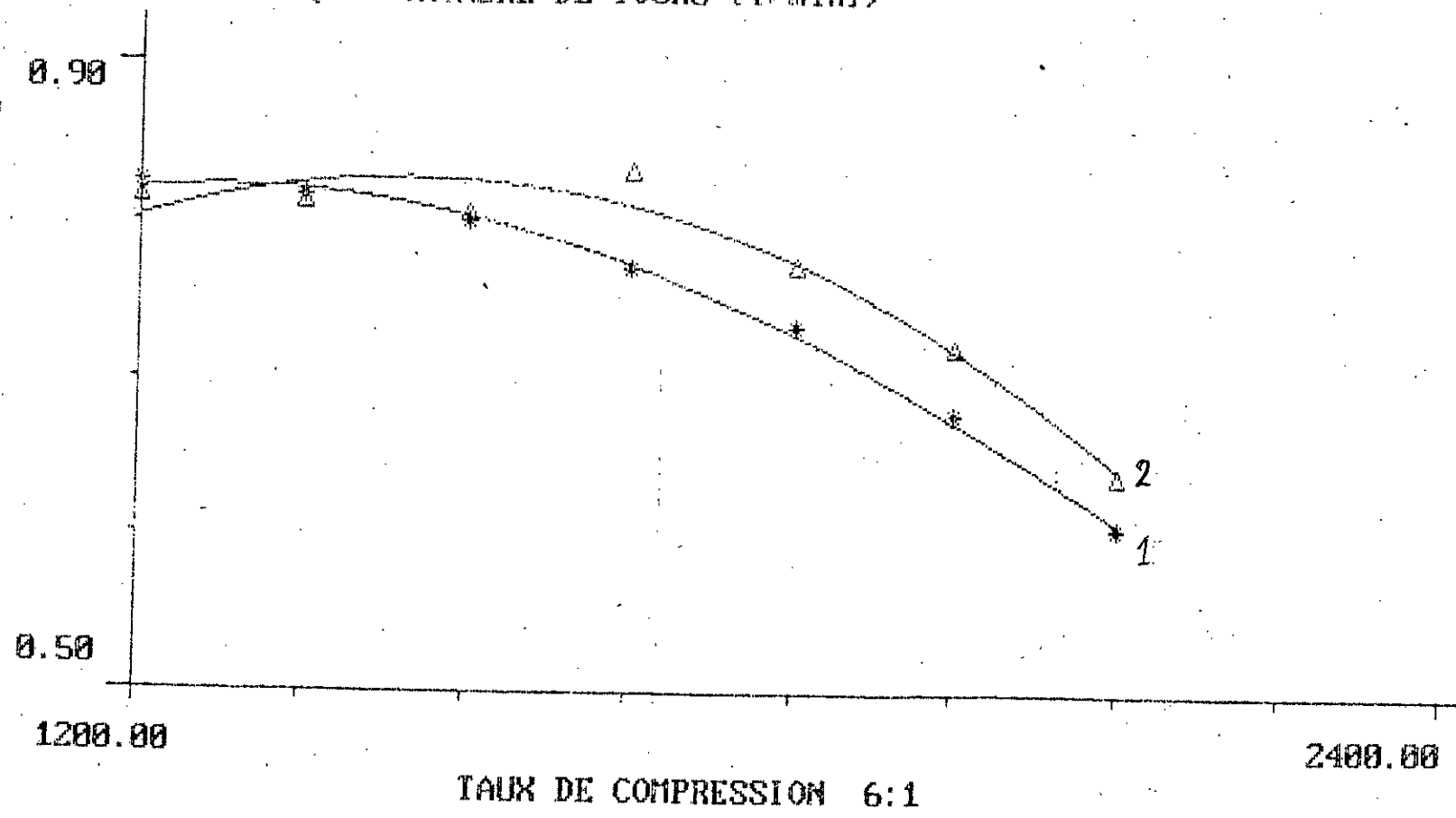


TAUX DE COMPRESSION 6:1

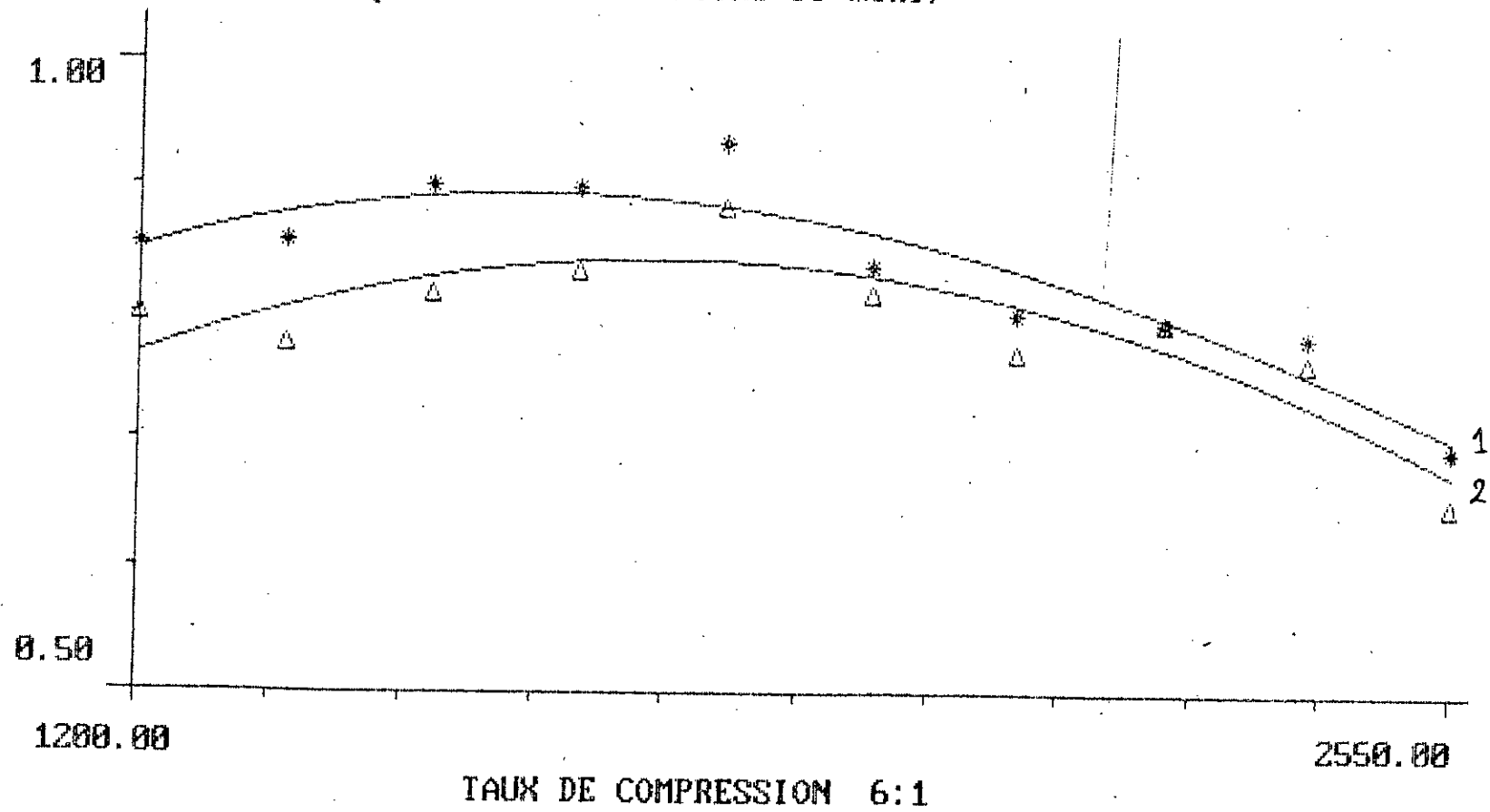
S F C=f(NOMBRE DE TOURS [1/min])
[kg/Kw.h]



RENDEMENT MECANIQUE=F(NOMBRE DE TOURS (1/min))



RENDEMENT VOLUMETRIQUE=f(NOMBRE DE TOURS (T/min))



-----PARAMETRES FIXES-----

Date des essais	10 / 05 / 1989	Temperature ambiante	22.2
Carburant	Butane	Poids specifique	2.6
Taux de compression	7.0	Ouverture des gaz	Pleine
Réglage Allumage	10° Av. PMH	Réglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	26.69	28.70	27.42	26.27	26.11	24.51	21.67	17.38	15.46	14.28
PU (Kw)	3.354	4.025	4.308	4.538	4.922	5.004	4.765	4.095	3.885	3.812
T (°C)	22.5	22.5	22.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5
GAZ										
t (s)	67	58	54	48	46	44	42	41	42	39
(mm. H2O)	22.5	25.5	30.5	34	36.5	38	38	42	44	42
Air										
(Kg/h)	20.42	23.15	27.69	30.86	33.13	34.5	34.5	38.13	39.94	38.13
CO (N.m)	7.5	8	8	7.9	8	8.5	9	—	—	—
Friction										
PU (Kw)	0.94	1.13	1.26	1.37	1.51	1.74	1.98	—	—	—
Air/Carb	15.02	14.73	16.41	16.31	16.78	16.71	15.95	17.21	18.47	16.37
Cs (Kg/Kwh)	0.405	0.390	0.392	0.417	0.401	0.412	0.454	0.541	0.557	0.611
R Uol	0.815	0.821	0.884	0.896	0.882	0.847	0.787	0.812	0.797	0.716
R Mec	0.781	0.781	0.774	0.769	0.765	0.742	0.706	—	—	—
R Th	0.195	0.202	0.202	0.19	0.197	0.192	0.174	0.117	0.142	0.129

-----PARAMETRES FIXES-----

Date des essais	15 / 05 / 1989	Temperature ambiante	22.1
Carburant	Butane	Poids specifique	2.6
Taux de compression	7.0	Ouverture des gaz	Pleine
Décalage Allumage	20° Av. PMH	Reglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	29.25	30.58	29.66	29.30	28.69	28.12	26.49	23.66	21.37	19.03
PU (Kw)	3.676	4.323	4.659	5.063	5.407	5.743	5.825	5.574	5.370	5.081
θ (°C)	22.5	22.5	22.5	23	23	23	24	24	24	23.5
GAZ										
t (s)	66	62	56	50	47	44	43	42	41	41
(mm.H2O)	22.5	24	29	30.5	36.5	38	38.5	42	43.5	41
AIR										
(Kg/h)	20.44	21.8	26.34	27.7	33.45	34.52	34.97	38.15	39.51	37.24
CO (N.m)	7.5	8	8	7.9	8	8.5	9	—	—	—
Friction										
PU (Kw)	0.94	1.13	1.26	1.37	1.51	1.74	1.98	—	—	—
AIR/Carb	14.8	14.83	16.19	15.23	17.13	16.69	16.58	17.67	17.87	16.81
CS (Kw/Kwh)	0.376	0.340	0.349	0.355	0.358	0.360	0.362	0.387	0.412	0.436
P. Vol	0.815	0.773	0.841	0.804	0.882	0.848	0.797	0.812	0.788	0.699
P. Mec	0.796	0.793	0.788	0.788	0.782	0.768	0.746	—	—	—
P. Th	0.210	0.232	0.226	0.22	0.221	0.22	0.218	0.204	0.192	0.181

PUISSANCE [KW]=f(NOMBRE DE TOURS [T/Min])

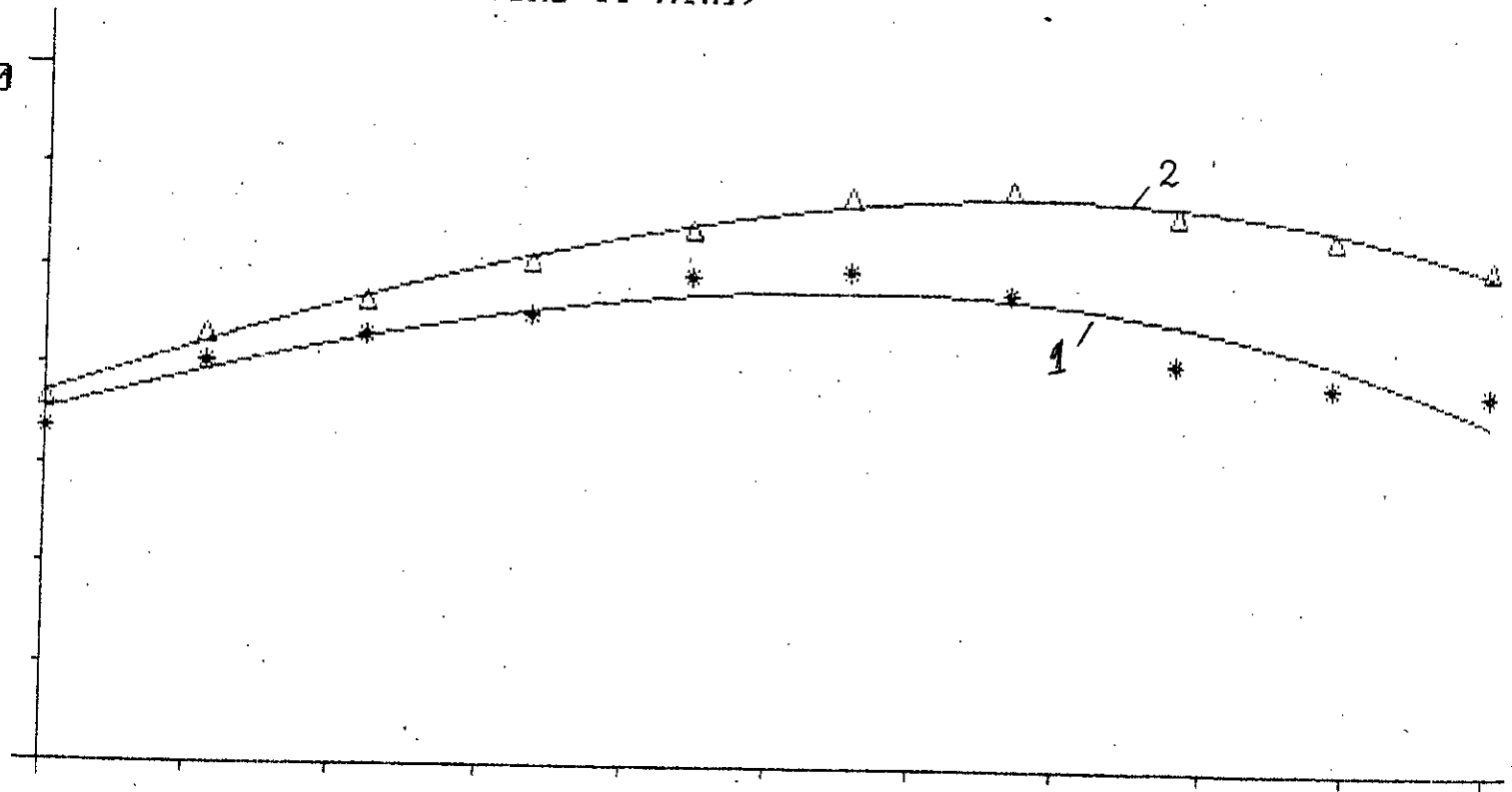
7.00

0.00

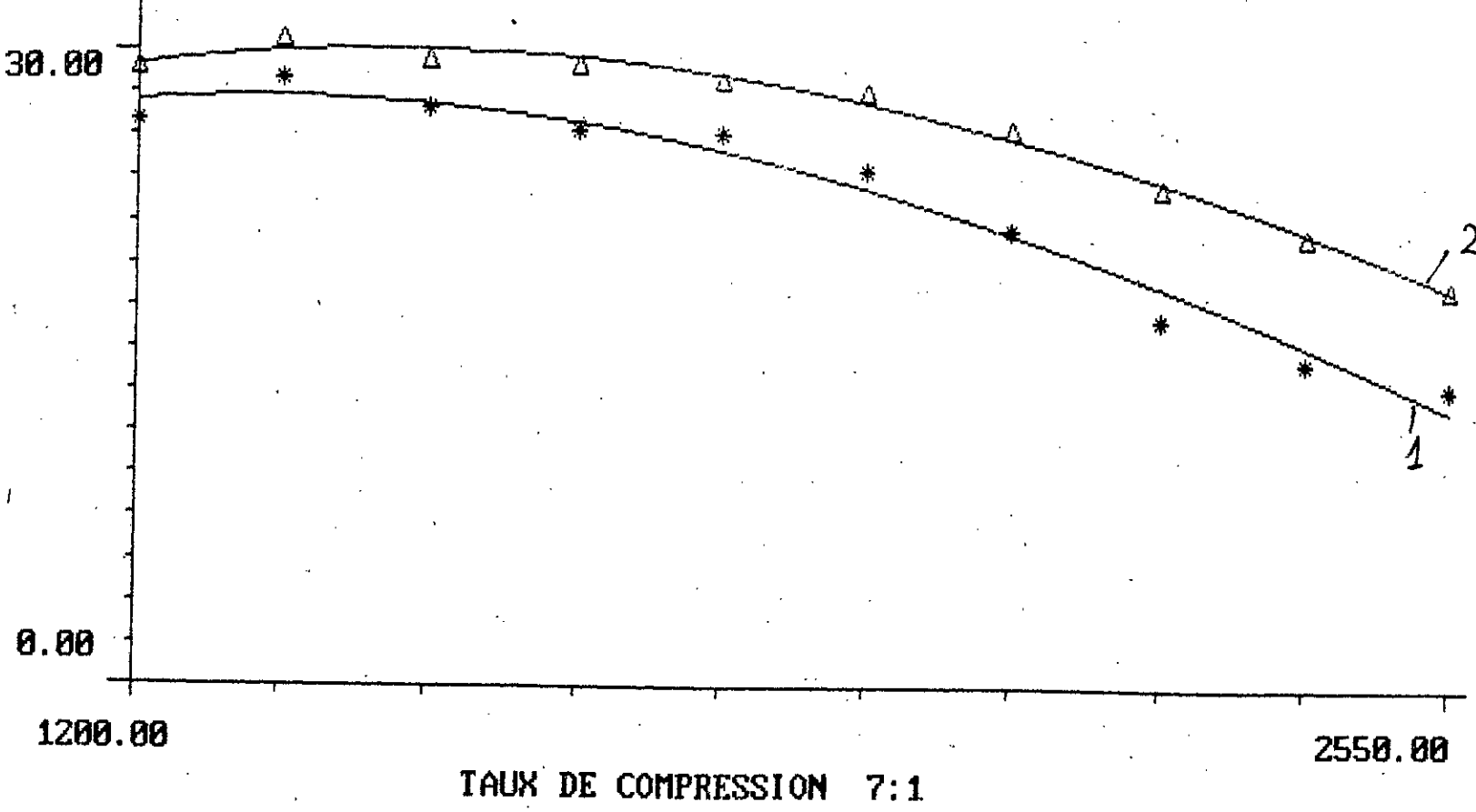
1200.00

2550.00

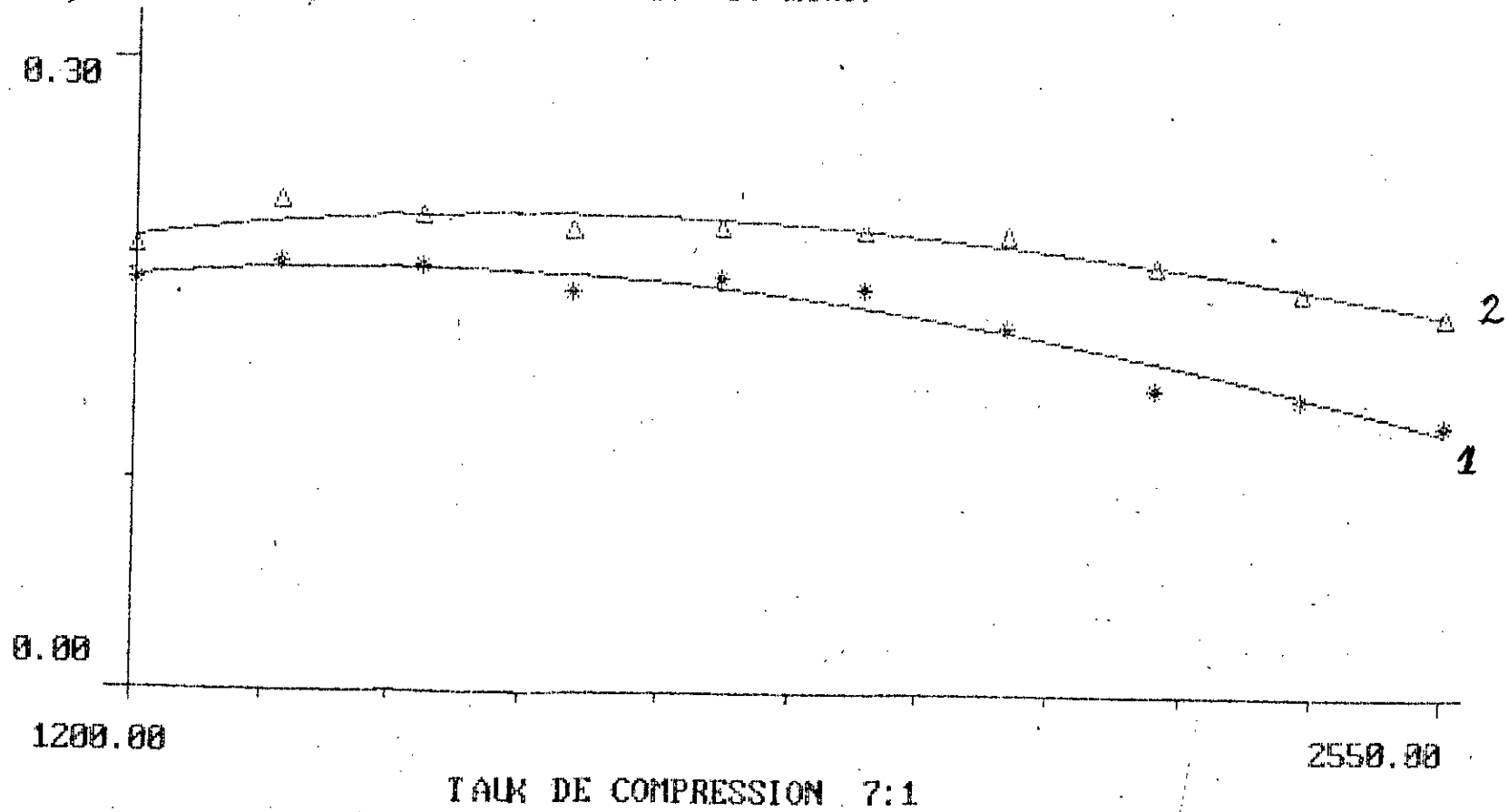
TAUX DE COMPRESSION 7:1



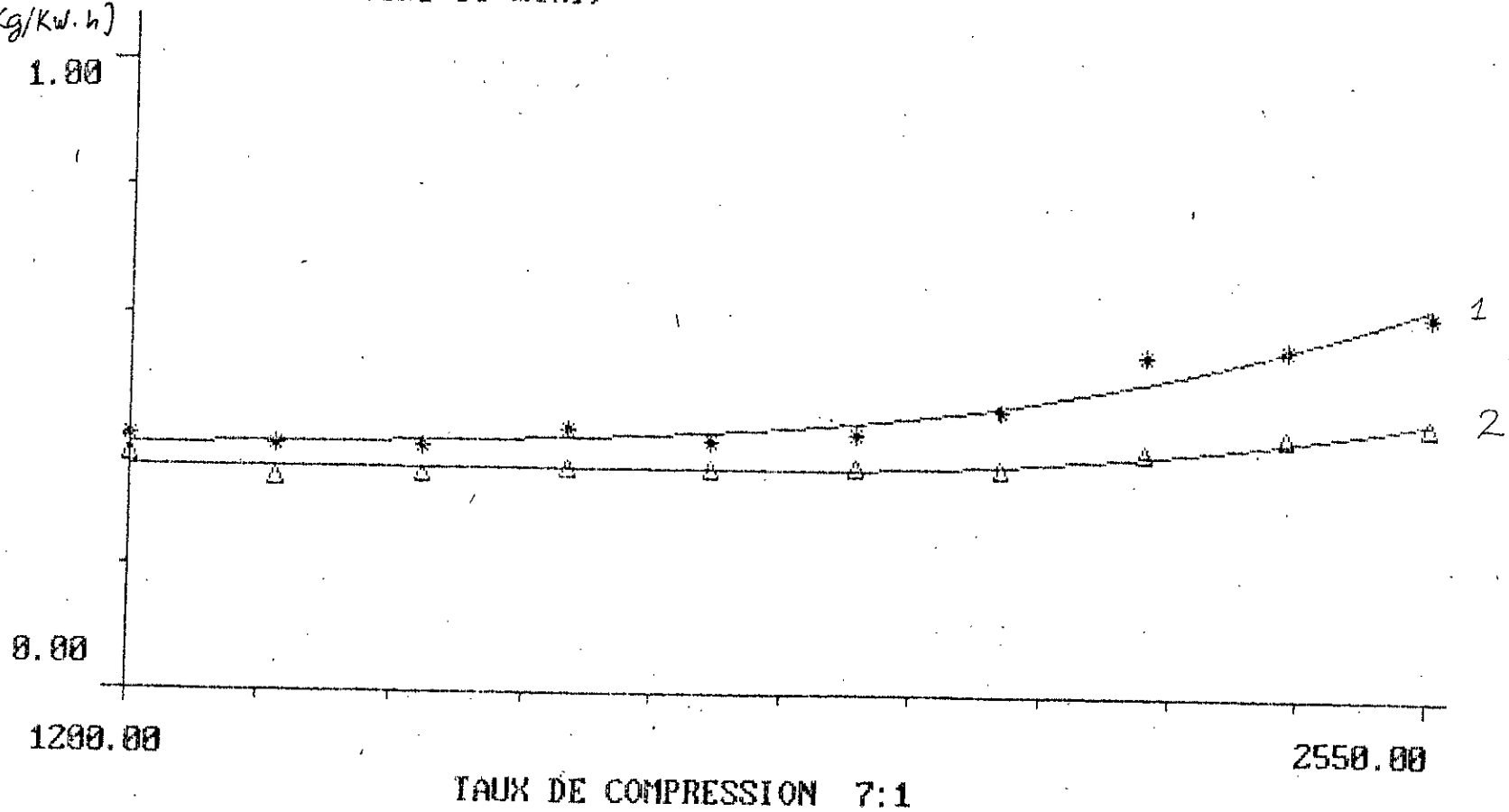
COUPLE [N.m] = f(NOMBRE DE TOURS [T/min])



RENDEMENT THERMIQUE=F(NOMBRE DE TOURS (1/min))

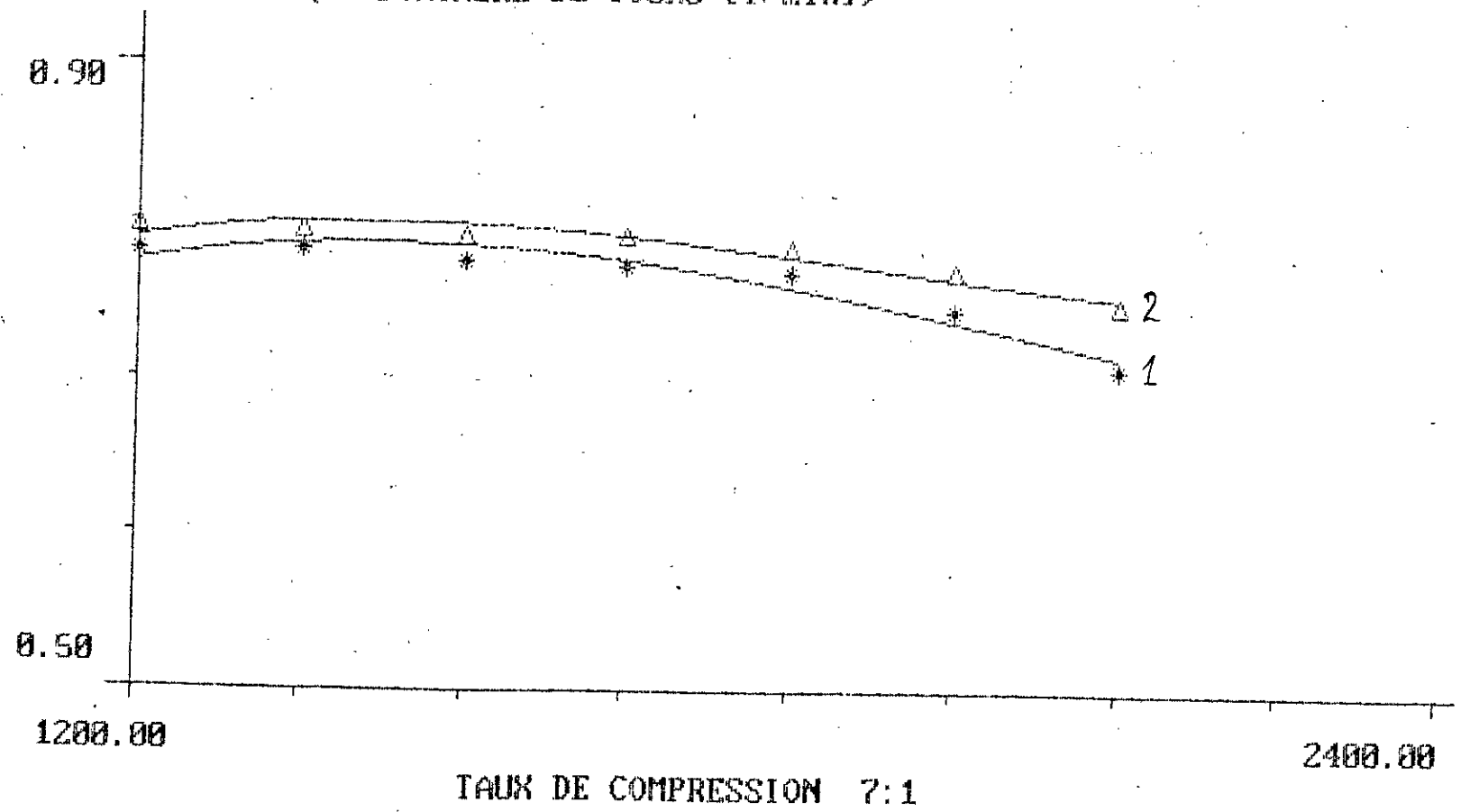


S F C=f(NOMBRE DE TOURS IT/min)
(Kg/Kw.h)



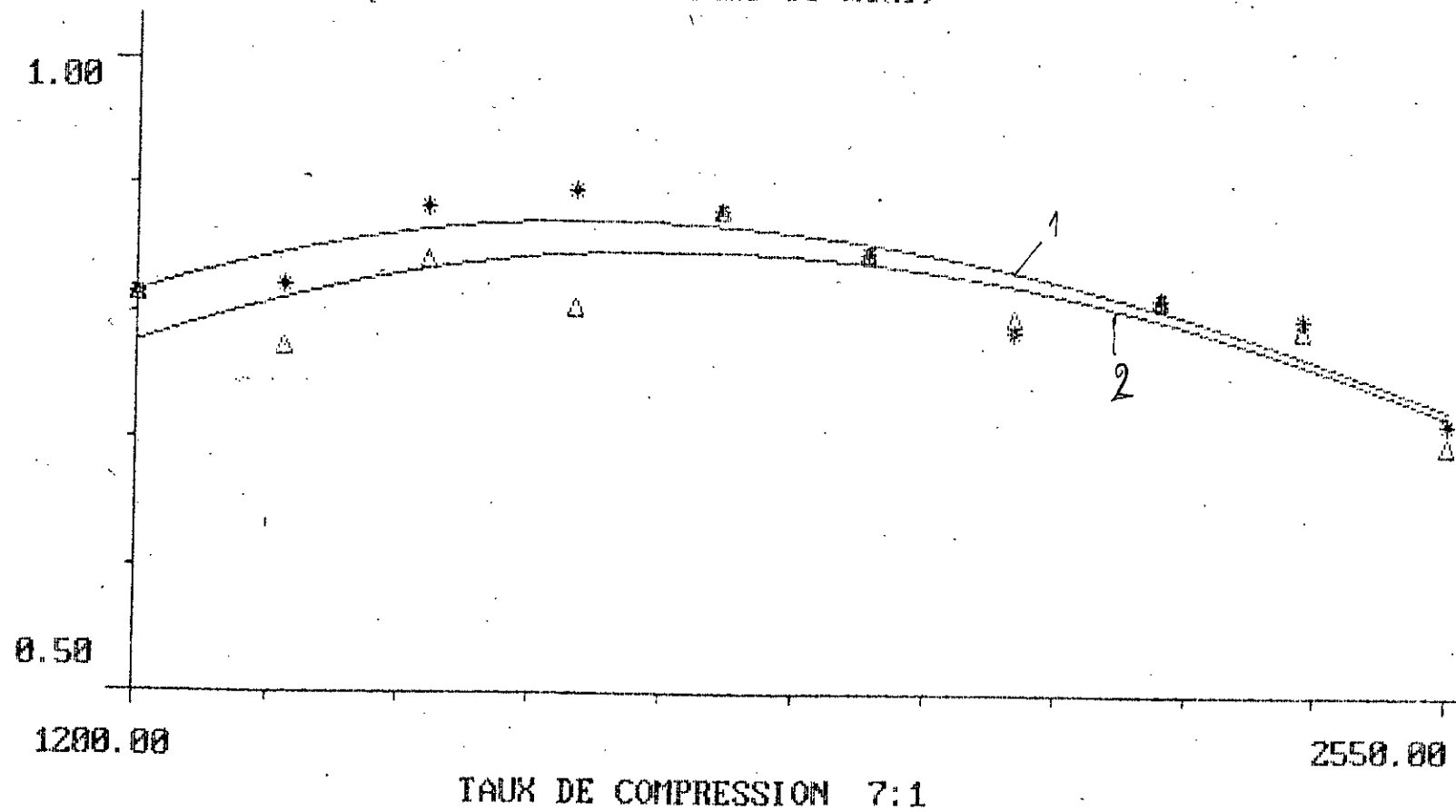
45.

RENDEMENT MECANIQUE=F(NOMBRE DE TOURS [1/min])



46.

RENDEMENT VOLUMETRIQUE=f(NOMBRE DE TOURS [T/min])



PARAMETRES FIXES

Date des essais	13 / 05 / 1989										Temperature ambiante	24
Carburant	Butane										Poids specifique	2.6
Taux de compression	8.0										Ouverture des gaz	Pleine
Reglage Allumage	10° Av. PMH										Reglage Carburateur	2.0 tours
N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550		
CO (N.m)	27.02	27.36	28.80	27.98	27.81	26.09	22.76	21.92	20.40	18.74		
PU (Kw)	3.396	3.868	4.524	4.835	5.243	5.328	5.004	5.165	5.126	5.004		
T (°C)	25	25	25	25	25	25	24	24	23.5	23		
GAZ												
t (s)	57	53	49	46	42	41	42	41	40	37		
(mm H2O)	23	25.5	30.5	33	39	38	37	40	43.5	42		
Air												
(Kg/h)	20.65	22.9	27.39	29.63	35.02	34.12	33.23	35.92	39.06	37.72		
CO (N.m)	7.5	8	8	9.5	9.5	10	10					
Friction												
PU (Kw)	0.94	1.13	1.26	1.64	1.79	2.04	2.2					
Air/Carb	13.03	13.43	14.85	15.08	15.28	15.48	15.39	16.24	17.2	15.34		
Co (Kg/Kwh)	0.467	0.441	0.408	0.406	0.410	0.414	0.431	0.428	0.443	0.491		
R Vol	0.829	0.817	0.88	0.865	0.938	0.843	0.762	0.769	0.784	0.713		
R Mec	0.783	0.774	0.784	0.747	0.745	0.723	0.695					
R Th	0.169	0.179	0.194	0.195	0.193	0.191	0.183	0.186	0.178	0.161		

PARAMETRES FIXES

Date des essais	13 / 05 / 1989	Temperature ambiante	23.8
Carburant	Butane	Poids specifique	2.6
Taux de compression	8.0	Ouverture des gaz	Pleine
Reglage Allumage	20° Av. PMH	Reglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	26.28	27.67	27.42	26.69	26.14	24.91	24.23	22.79	21.37	19.95
PU (Kw)	3.303	3.911	4.308	4.611	4.928	5.087	5.328	5.370	5.370	5.328
T (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
CO2										
t (s)	62	60	55	49	47	45	46	44	41	44
(mm. H2O)	21.5	23	26.5	29	33	32	33.5	37.5	41	38.5
Air										
(Kg/h)	19.33	20.68	23.83	26.07	29.67	28.77	30.12	33.72	36.86	34.62
CO (N.m)	7.5	8	8	9.5	9.5	10	10			
Friction										
PU (Kw)	0.94	1.13	1.26	1.64	1.79	2.04	2.2			
Air/Carb	13.26	13.73	14.5	14.14	15.43	14.33	15.33	16.42	16.72	16.85
CS (Kg/Kwh)	0.441	0.385	0.331	0.400	0.390	0.395	0.369	0.382	0.410	0.385
R Uol	0.776	0.738	0.765	0.761	0.794	0.71	0.691	0.723	0.74	0.654
R Mec	0.778	0.776	0.774	0.737	0.733	0.714	0.708			
R Th	0.179	0.205	0.207	0.198	0.203	0.2	0.214	0.207	0.193	0.205

PUISSANCE [KW]=f(NOMBRE DE TOURS [1/Min])

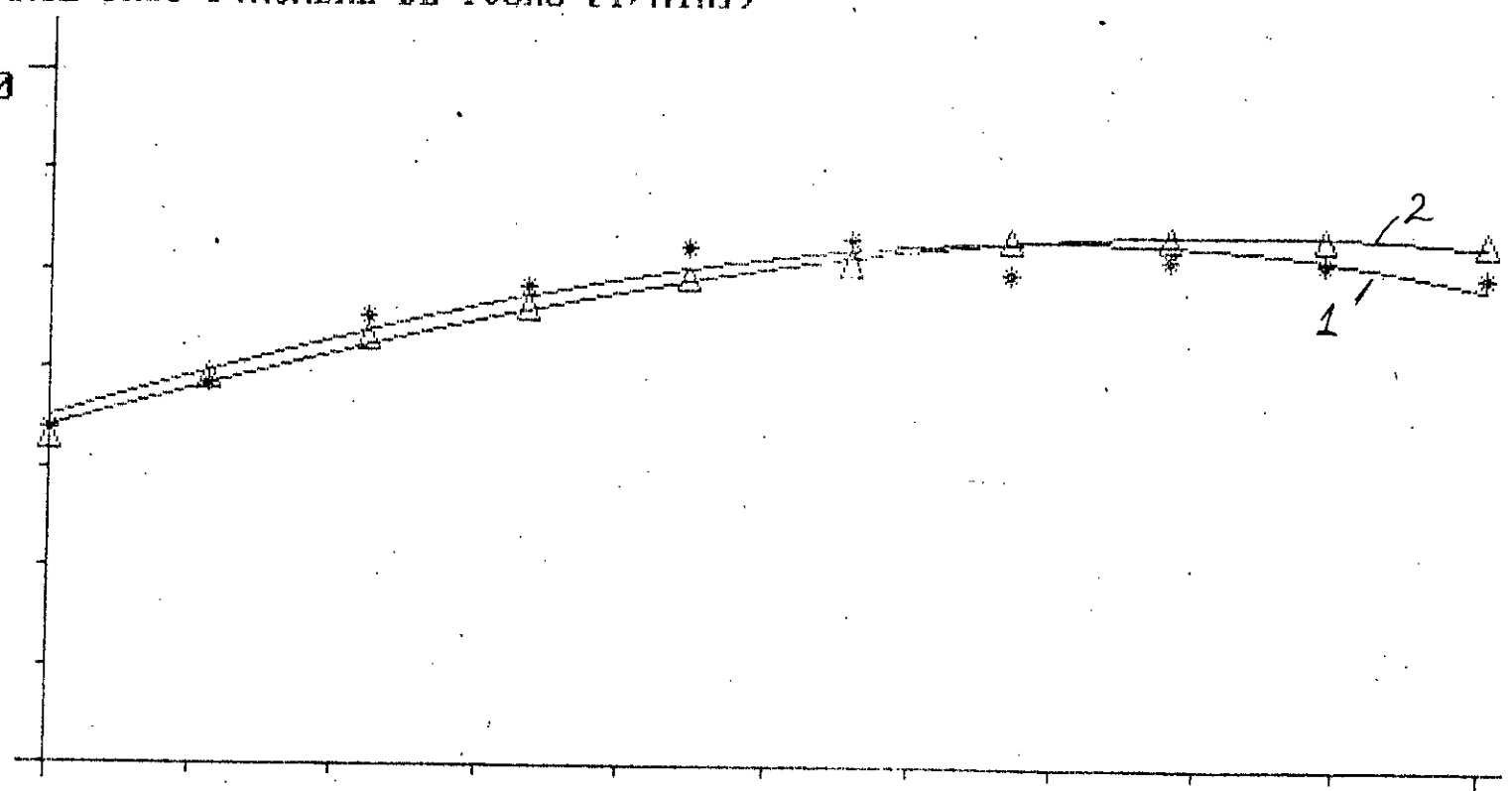
7.00

0.00

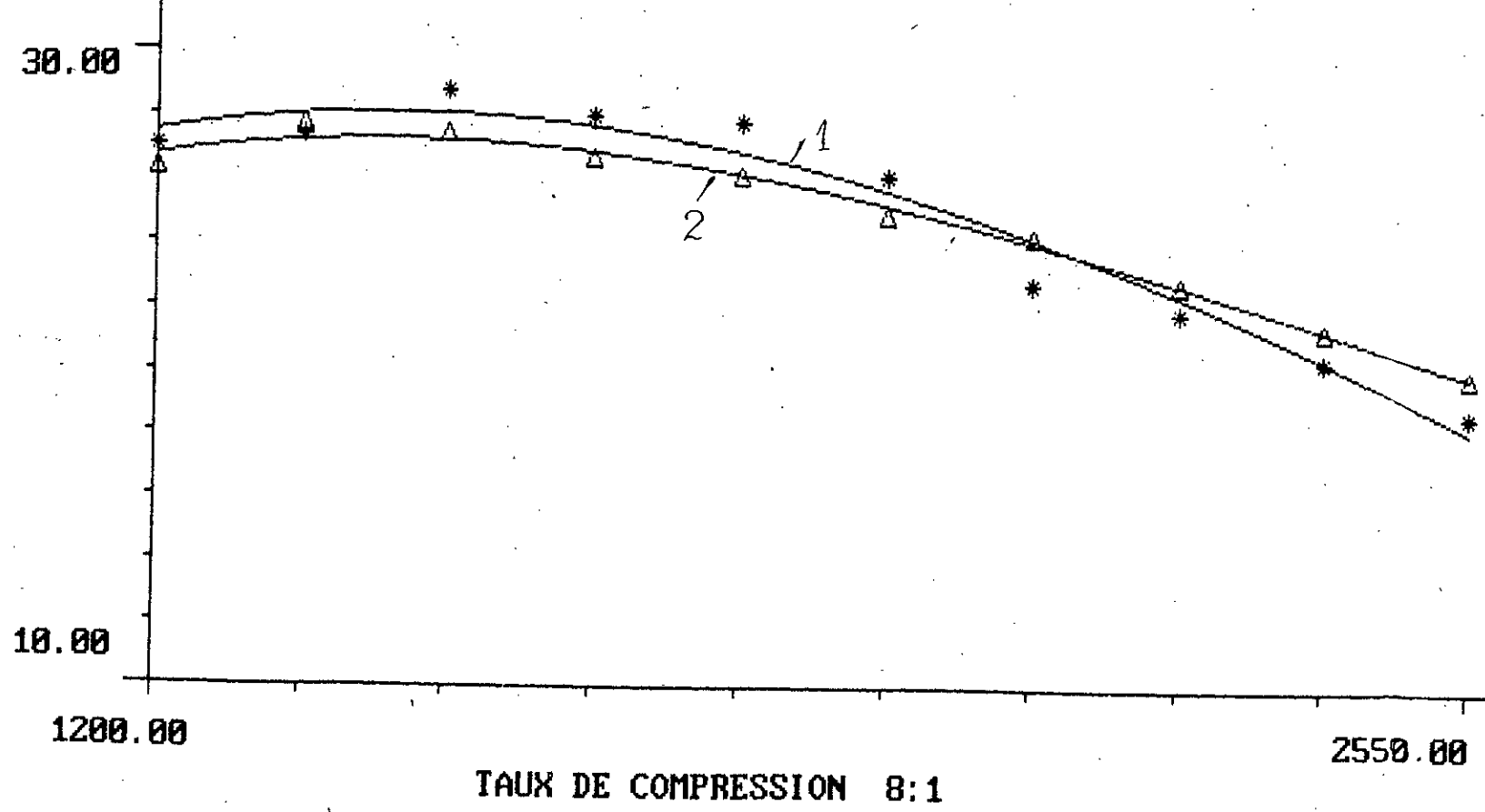
1200.00

2550.00

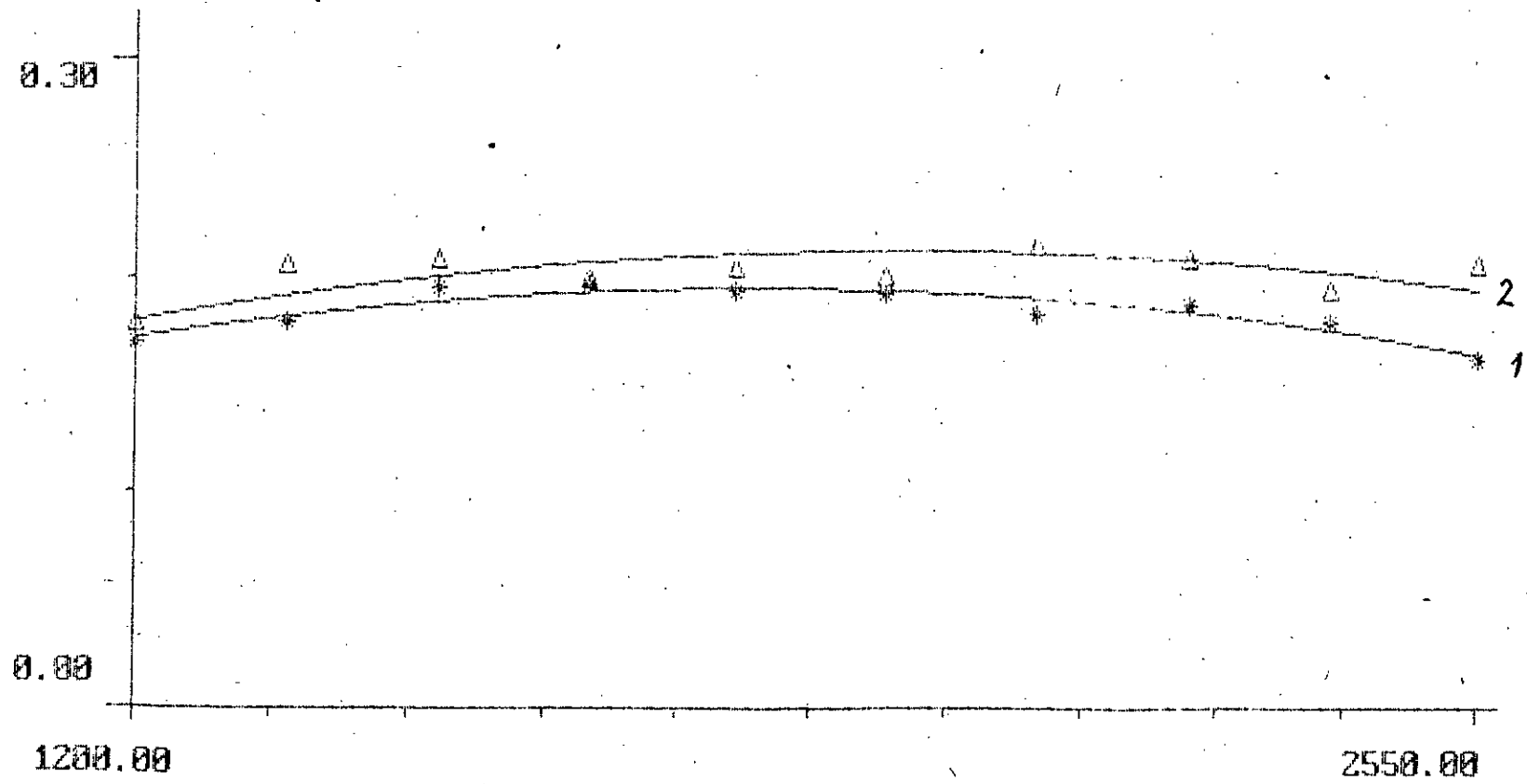
TAUX DE COMPRESSION 0:1



COUPLE [N.m] = f(NOMBRE DE TOURS [1/min])



RENDEMENT THERMIQUE=f(NOMBRE DE TOURS (T/min))



TAUX DE COMPRESSION 8:1

S F C=f(NOMBRE DE TOURS ET/min)
[Kg/kw.h]

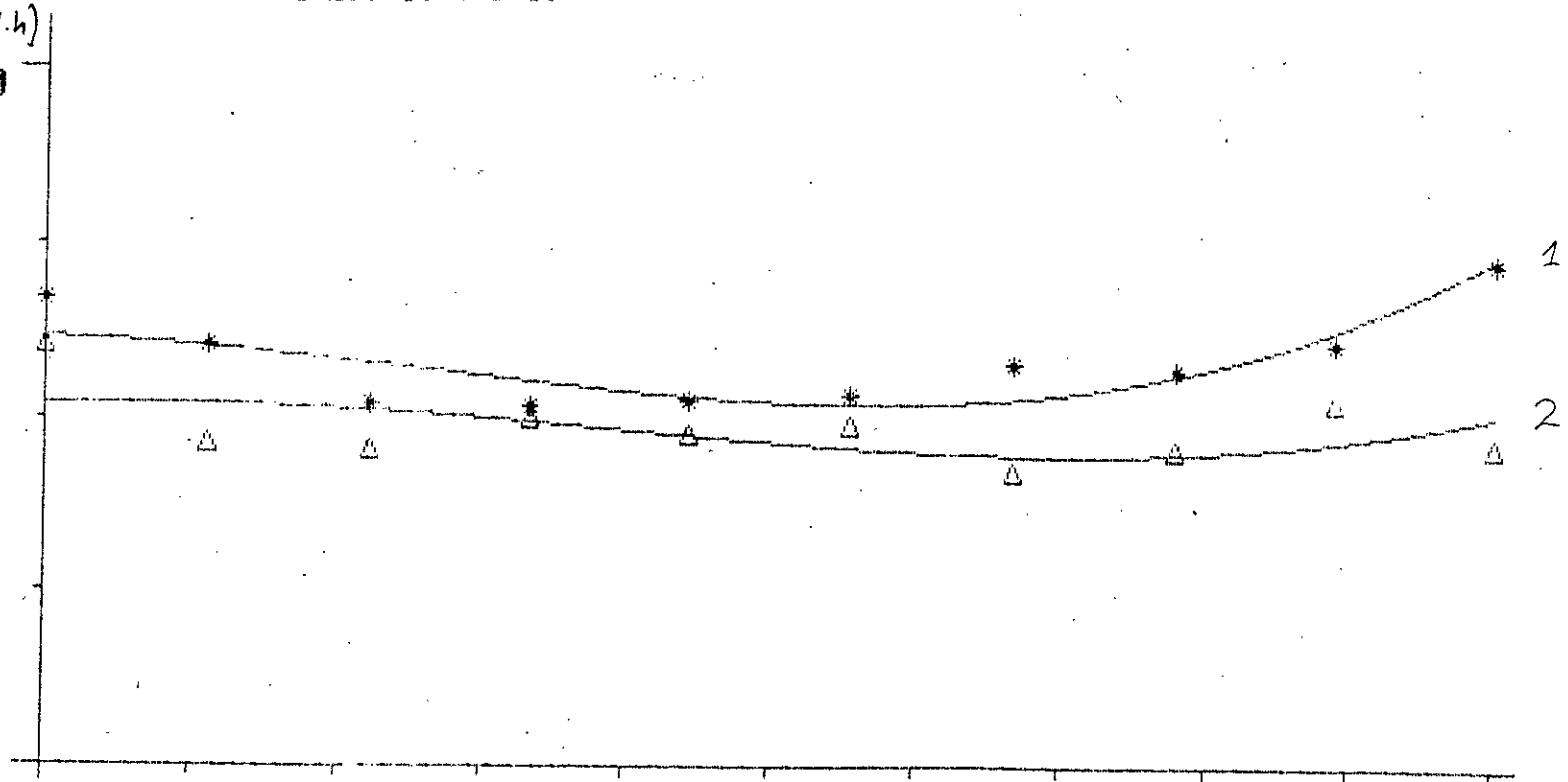
0.60

0.20

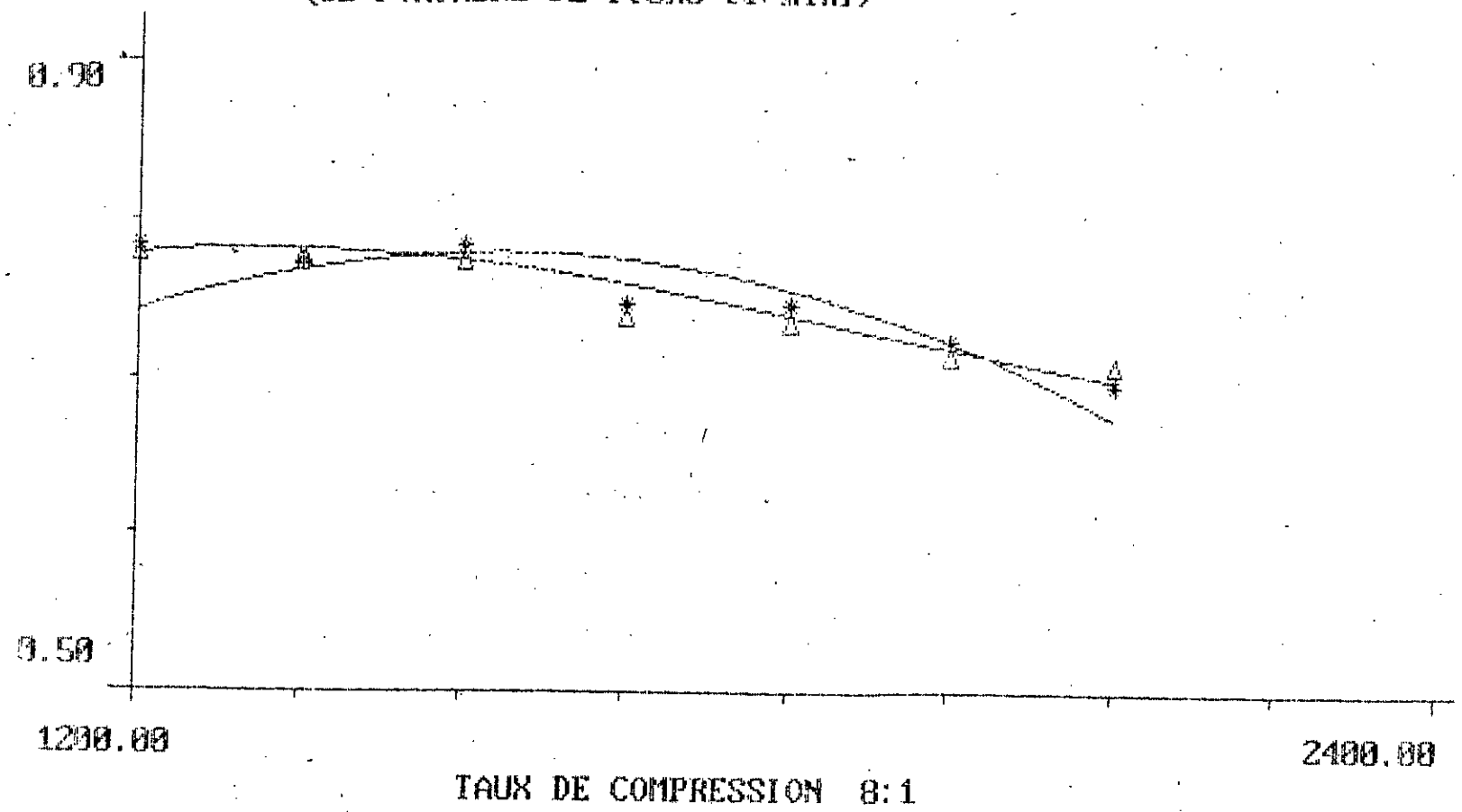
1200.00

2550.00

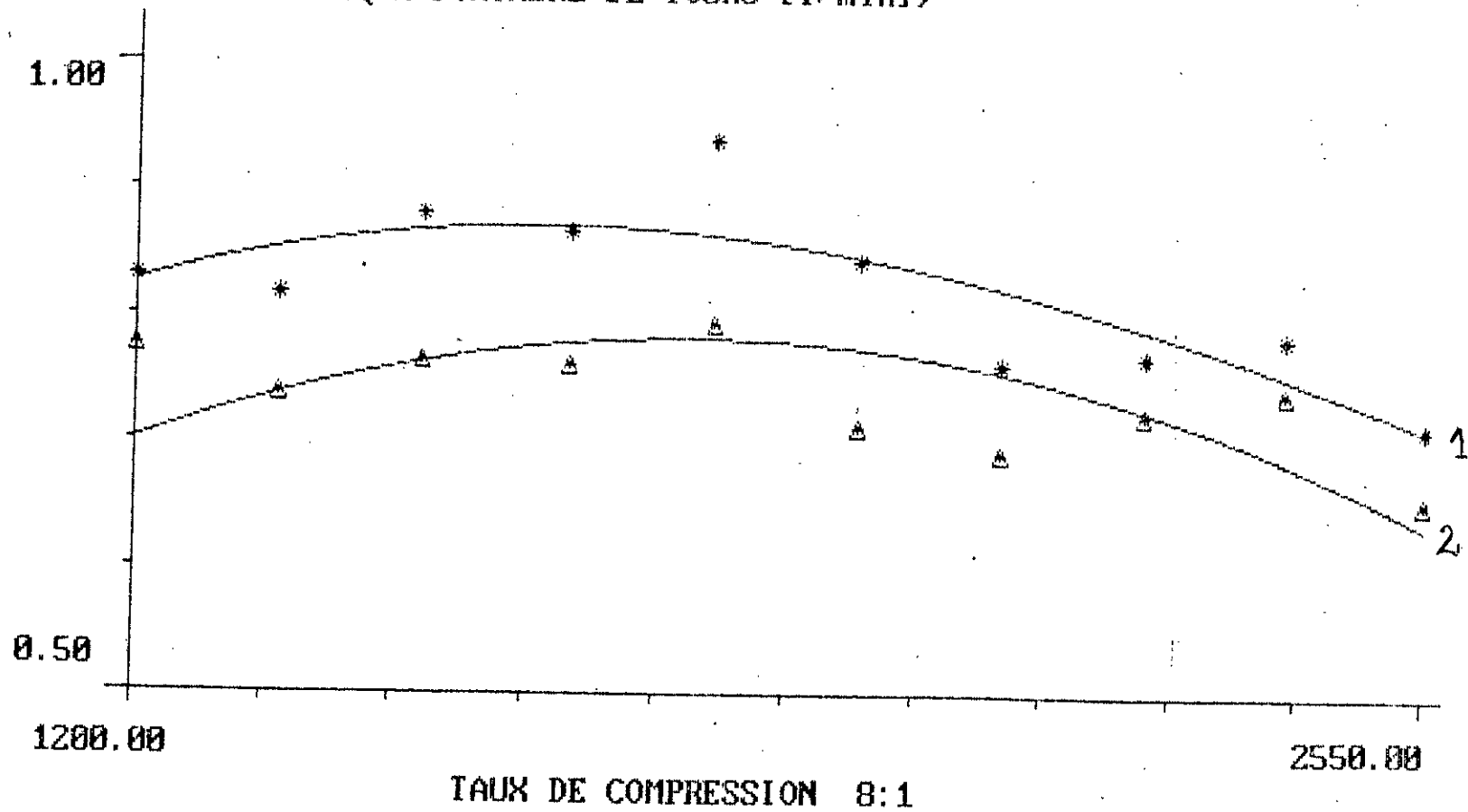
TAUX DE COMPRESSION 8:1



RENDIMENT MECANIQUE=f(NOMBRE DE TOURS (1/min))



RENDEMENT VOLUMETRIQUE=f(NOMBRE DE TOURS [T/min])



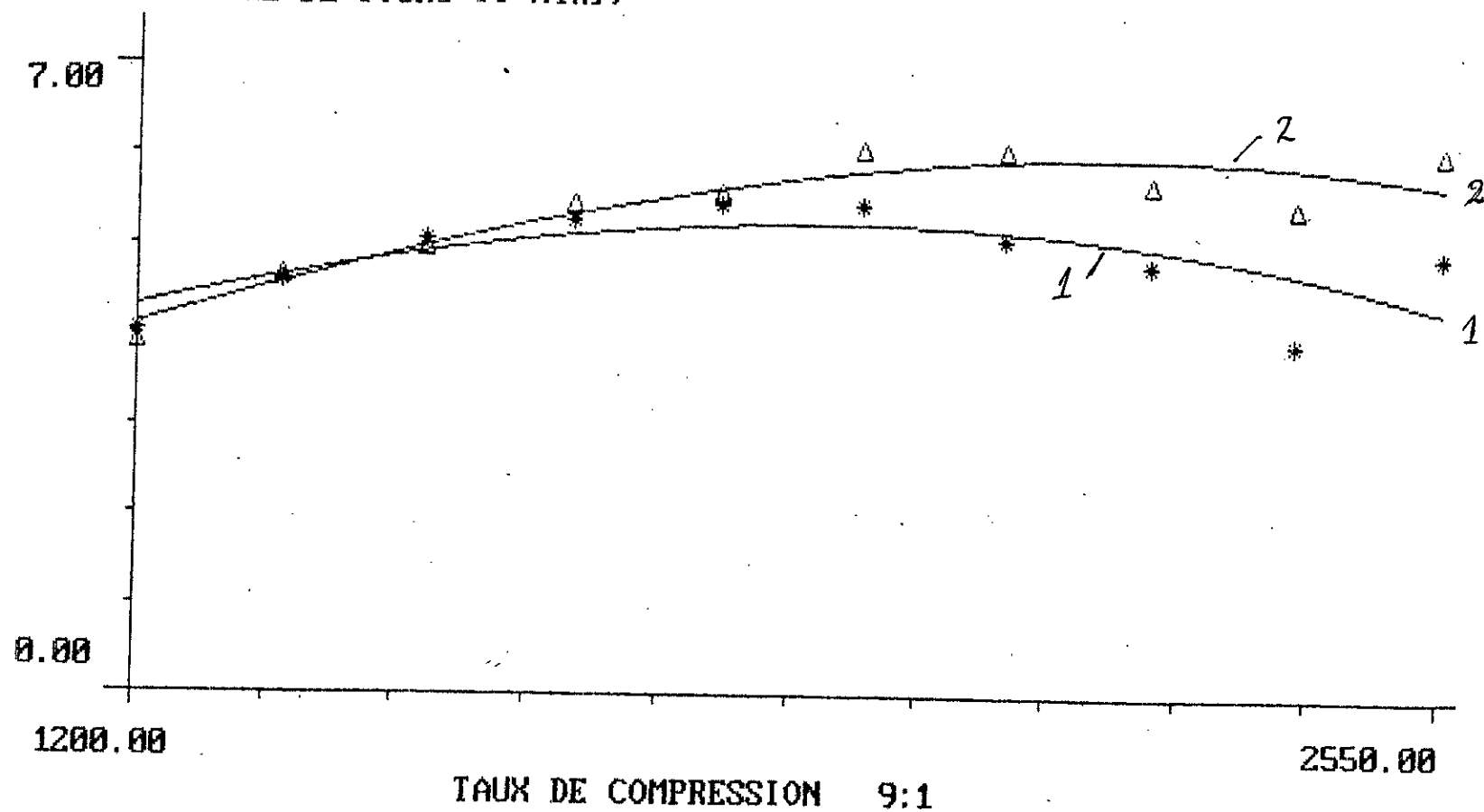
-PARAMETRES FIXES-

Date des essais	14 / 05 / 1979	Temperature ambiante	25°C
Carburant	Butane	Poids spécifique	2.6
Taux de compression	9.0	Ouverture des gaz	Pleine
Reglage Allumage	10° Av. PMH	Reglage Carburateur	2.0 tours

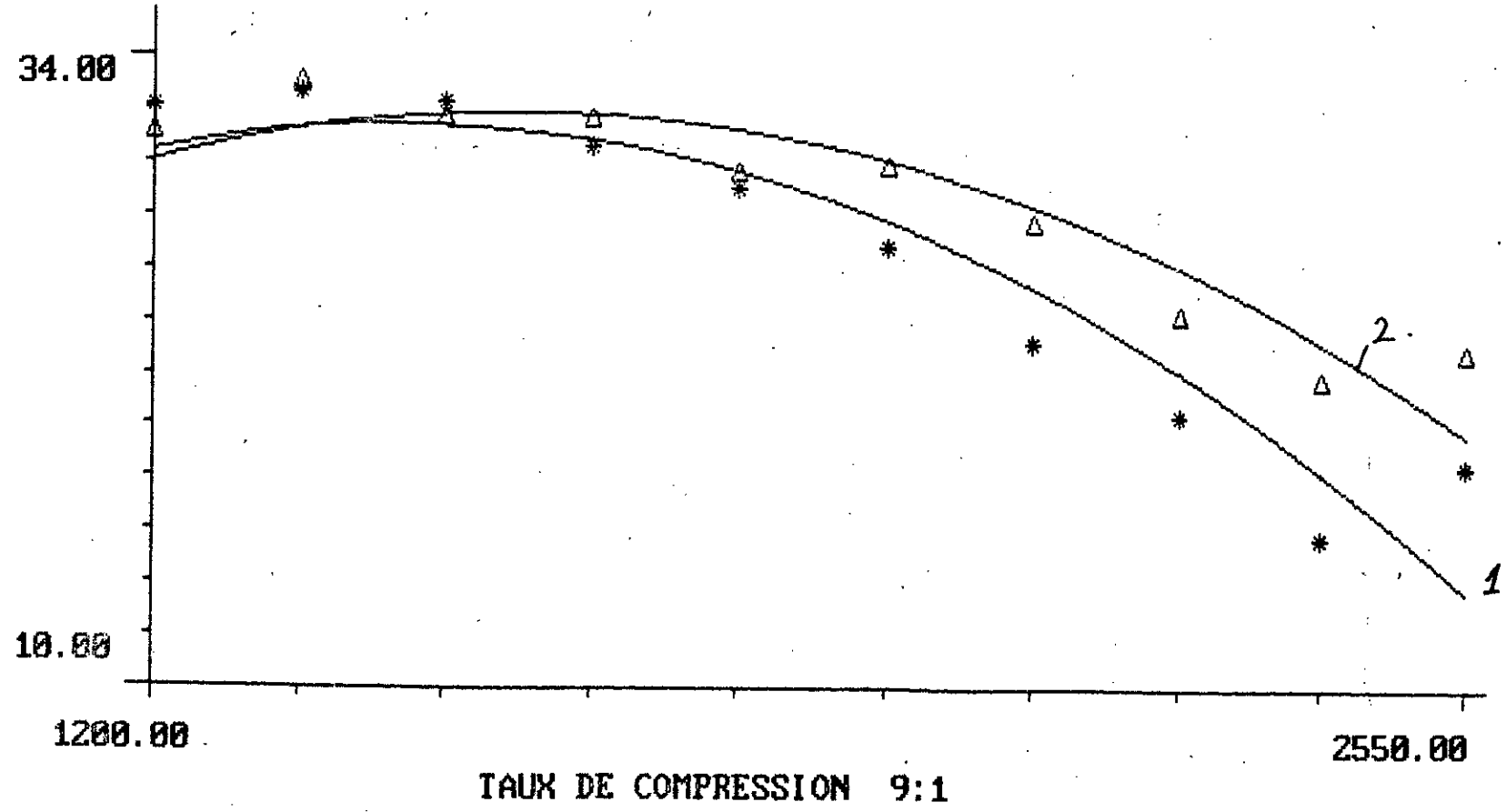
N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	32.07	32.57	32.15	30.56	28.94	26.71	23.10	20.40	15.74	18.45
PU (Kw)	4.030	4.605	5.051	5.280	5.455	5.455	5.08	4.806	3.957	4.928
T (°C)	23	23	23	23.5	23.5	24	25	23.5	23.5	23.5
t (s)	61	57	54	51	48	46	45	43	44	45
(mm H2O)	22.5	25.5	29.5	33	37	36	39.5	45	44	44.5
(Kg/h)	20.09	22.76	26.33	29.46	33.03	32.14	35.26	40.17	39.28	39.72
CO (N.m)	10	10.5	10.5	10.5	11	10.5	10.5	9.5		
Friction										
PU (Kw)	1.26	1.48	1.65	1.81	2.07	2.14	2.31	2.24		
Air/Carb	13.47	14.26	15.63	16.54	17.46	16.28	17.47	19.02	19.03	19.68
CS (Kg/Kwh)	0.370	0.347	0.334	0.337	0.347	0.362	0.397	0.440	0.522	0.410
D _{Uol}	0.809	0.815	0.849	0.863	0.887	0.797	0.812	0.863	0.791	0.753
D _{Mec}	0.762	0.746	0.754	0.744	0.725	0.718	0.687	0.682		
R _{Th}	0.214	0.228	0.237	0.234	0.228	0.218	0.199	0.18	0.151	0.193

PARAMETRES FIXES

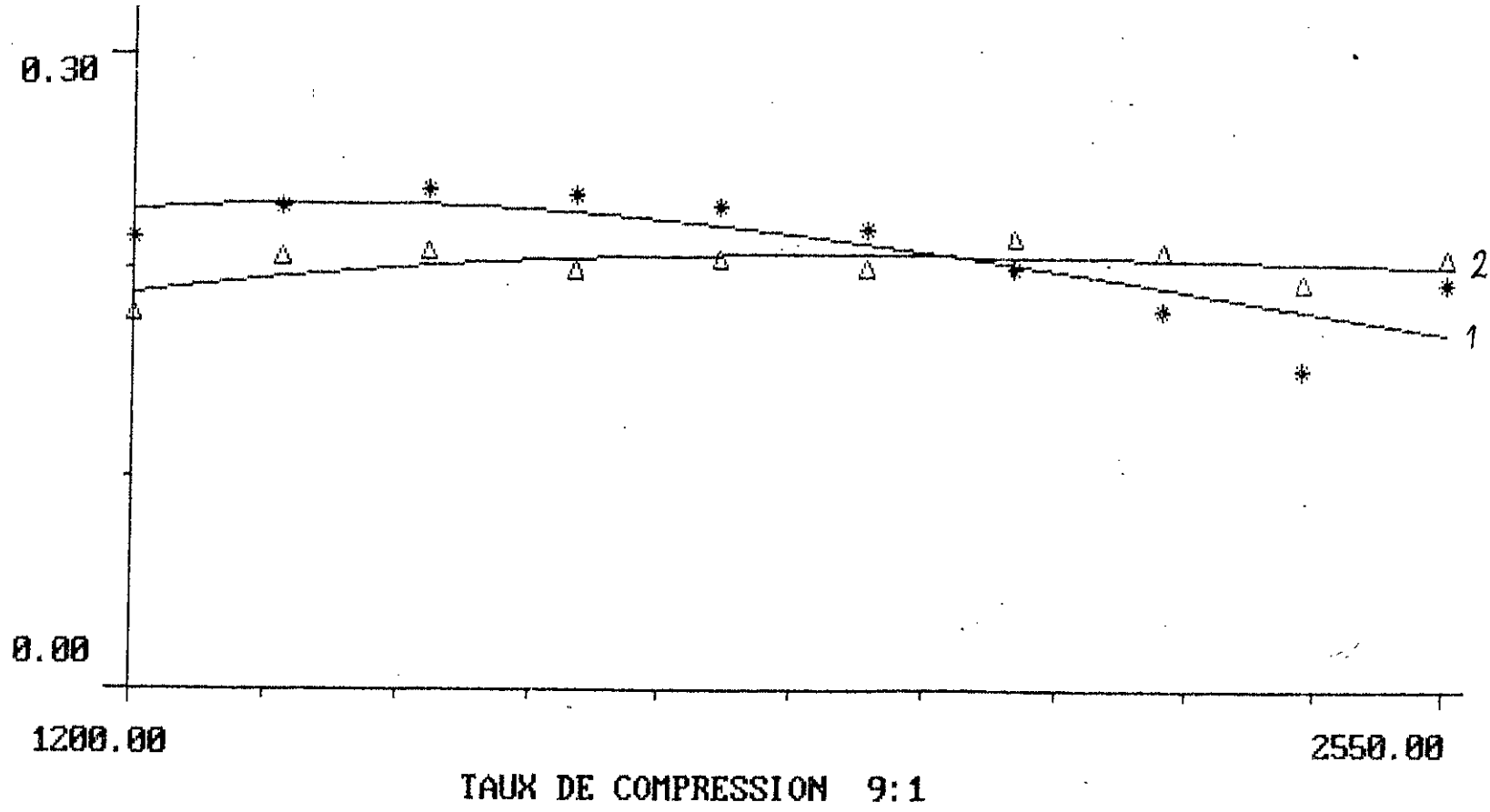
Date des essais	14 / 05 / 1989		Temperature ambiante	25°C						
Carburant	Butane		Poids specifique	2.6						
Taux de compression	9.0		Ouverture des gaz	Pleine						
Réglage Allumage	20° Av. PMH		Réglage Carburateur	2.0 tours						
Nitr (mm)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	31.19	32.90	31.70	31.62	29.57	29.82	27.69	24.21	21.69	22.90
PU (Kw)	3.920	4.651	4.980	5.464	5.574	6.089	6.089	5.705	5.450	6.089
T (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
GAZ										
L (s)	73	62	58	53	46	46	47	49	46	43
(mm. H2O)	20.5	25	28.5	31.5	36	36.5	38.5	41.5	42	44
Air										
(Kg/h)	18.3	22.32	25.44	28.12	32.14	32.6	34.37	37.05	37.49	39.28
CO (N.m)	10	10.5	10.5	10.5	11	10.5	10.5	9.5		
Friction										
PU (Kw)	1.26	1.48	1.65	1.81	2.07	2.14	2.31	2.24		
Air/Carb	14.78	15.31	16.32	16.49	16.36	16.59	17.87	20.09	19.08	18.69
CS (Kg/Kwh)	0.316	0.313	0.313	0.312	0.352	0.323	0.316	0.323	0.360	0.345
R. Unl	0.737	0.799	0.82	0.824	0.863	0.808	0.791	0.796	0.755	0.745
R. Mec	0.757	0.758	0.761	0.751	0.729	0.74	0.725	0.718		
R. Th	0.25	0.252	0.253	0.253	0.224	0.245	0.25	0.244	0.219	0.229

$P \text{ [kW]} = f(\text{NOMBRE DE TOURS [T/Min]})$ 

COUPLE [N.m] = f(NOMBRE DE TOURS [T/min])



RENDEMENT THERMIQUE=f(NOMBRE DE TOURS [1/min])



S F C=f(NOMBRE DE TOURS [1/min])
[Kg/kw.h]

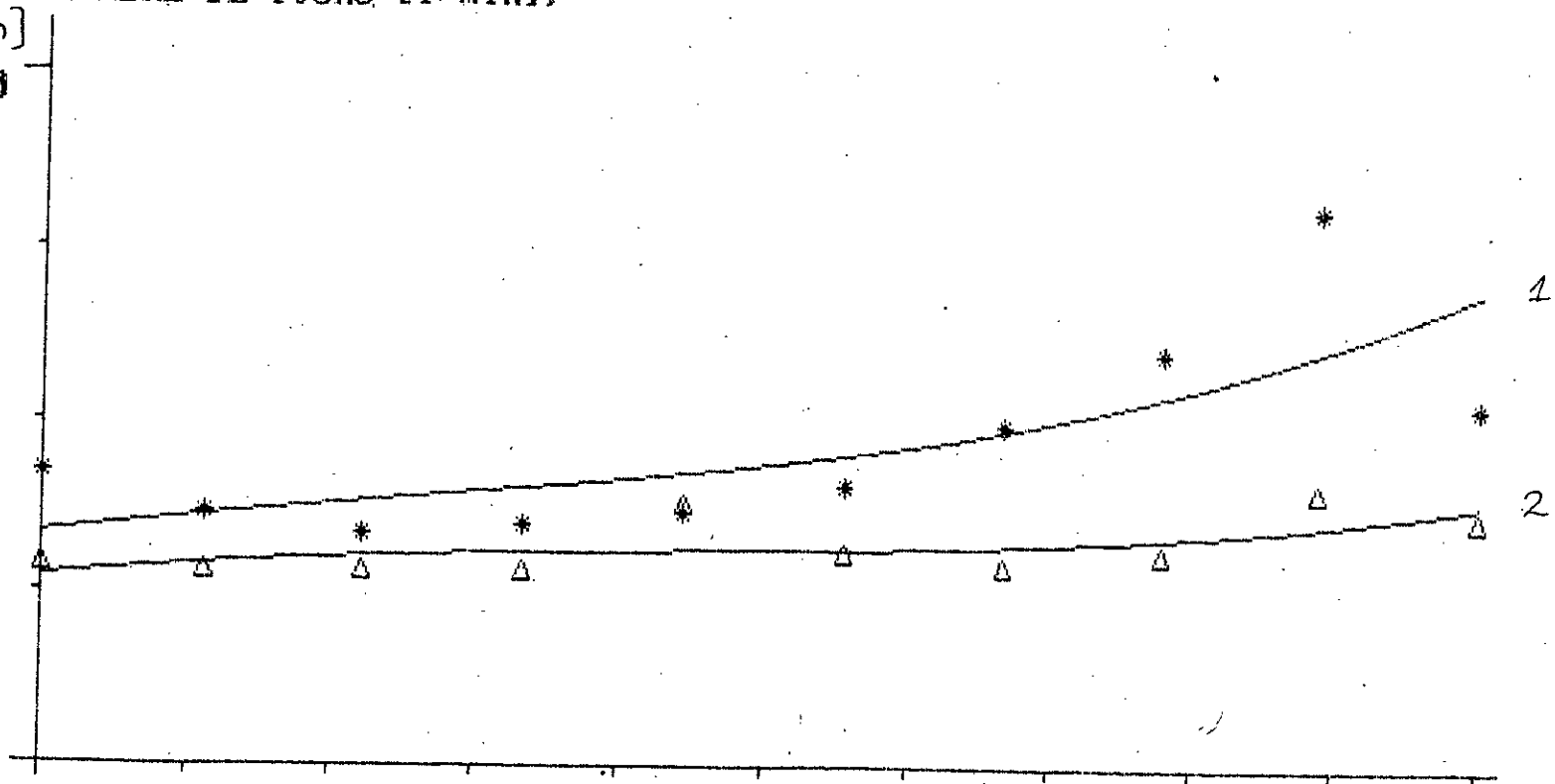
0.60

0.20

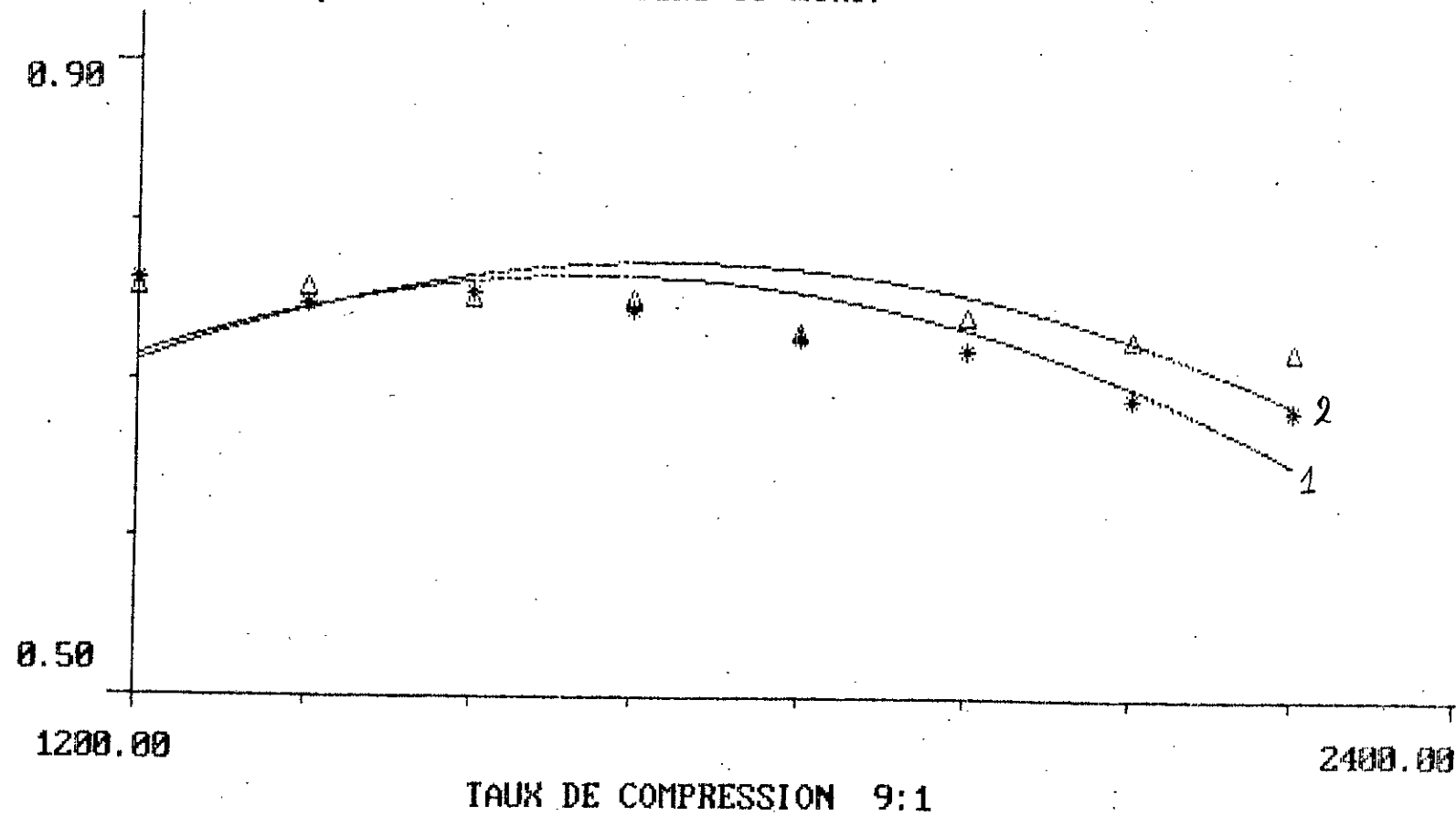
1200.00

2550.00

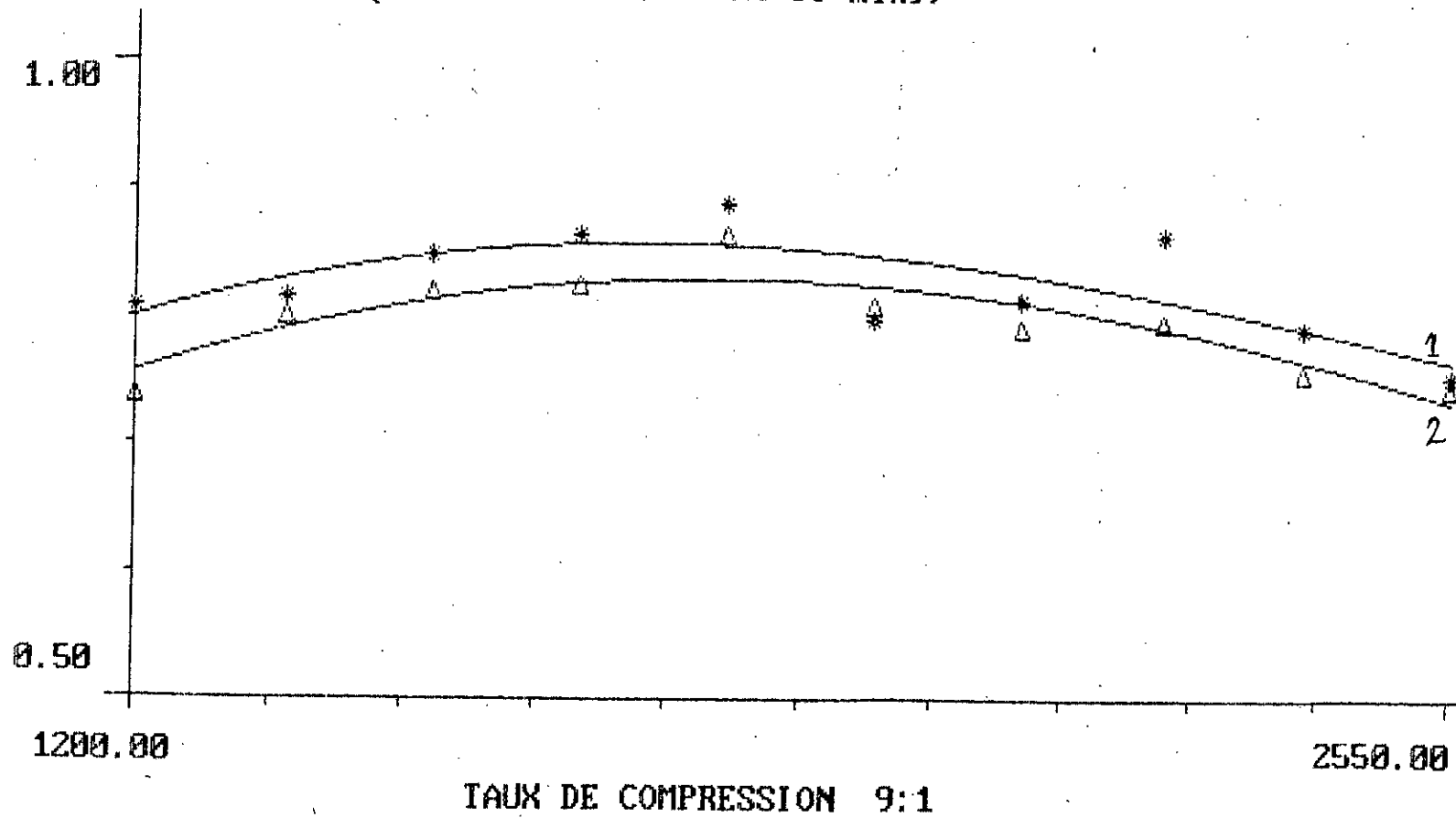
Taux de compression 9:1



RENDMENT MECANIQUE=f(NOMBRE DE TOURS [I/min])



RENDEMENT VOLUMETRIQUE=f(NOMBRE DE TOURS [T/min])



PARAMETRES FIXES

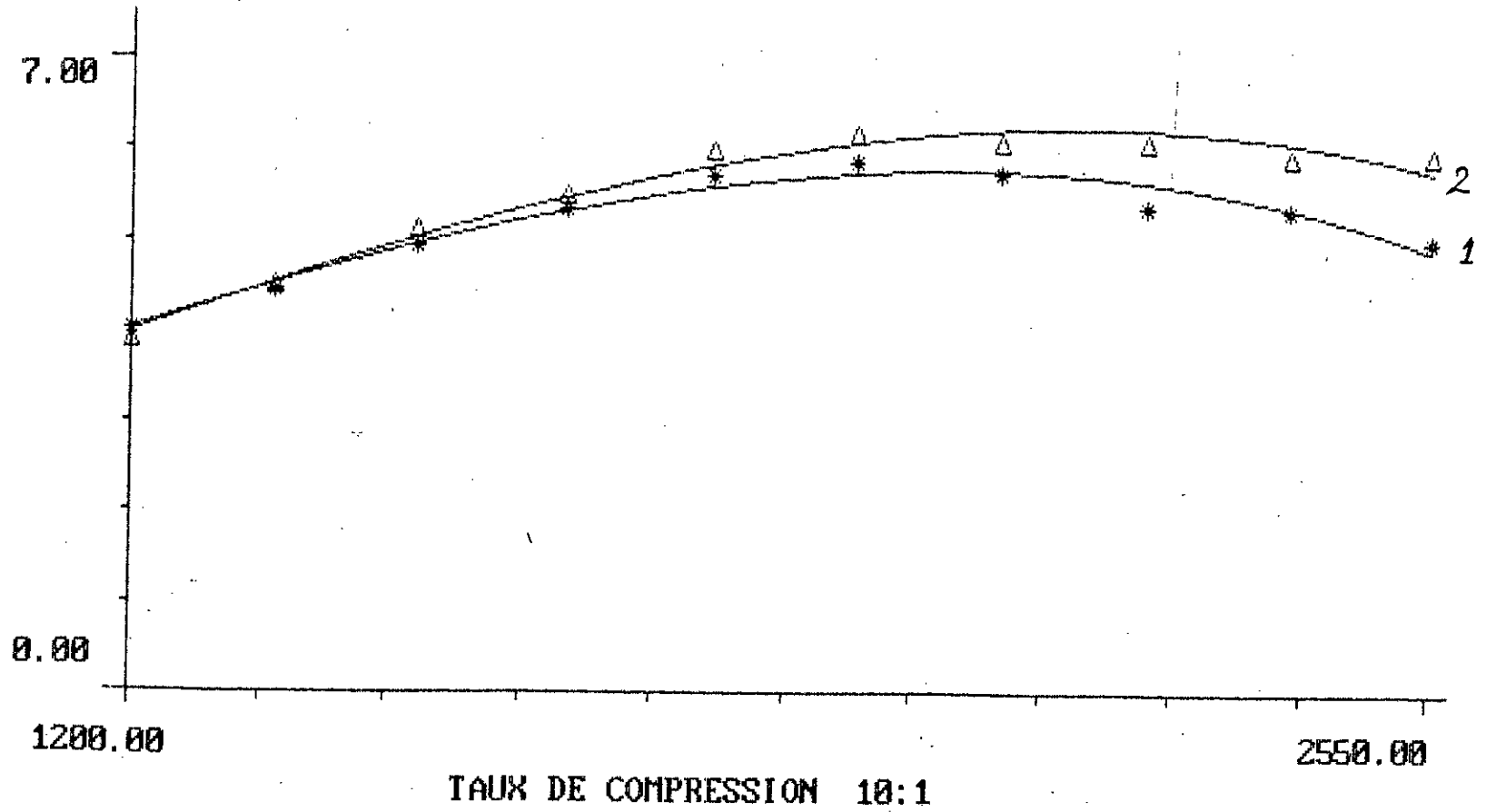
Date des essais	15 / 04 / 1989	Temperature ambiante	25 °C
Carburant	Butane	Poids specifique	2.6
Taux de compression	10.0	Ouverture des gaz	Pleine
Réglage Allumage	10° Av. P.M.H.	Réglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	31.99	31.38	31.39	30.93	30.28	28.74	26.12	22.80	21.20	18.74
PU (Kw)	4.020	4.436	4.93	5.344	5.707	5.870	5.743	5.370	5.328	5.004
T (°C)	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5
GAZ										
t (s)	68	61	57	52	48	46	46	45	44	42
(mm. H2O)	22.5	25	29	32	36	36	38.5	42.5	43	42
Air										
(Kg/h)	20.09	22.32	25.89	28.57	32.14	32.14	34.37	37.94	38.38	37.49
CO (N.m)	8	8	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	9.5		
Friction										
PU (Kw)	1.01	1.13	1.34	1.47	1.6	1.74	1.87	2.24		
Air/Carb	15.14	14.49	16.36	16.46	17.1	16.39	17.52	18.92	18.72	17.45
CS (Kg/Kwh)	0.330	0.336	0.307	0.310	0.314	0.311	0.318	0.329	0.334	0.352
R Vol	0.809	0.767	0.834	0.837	0.863	0.797	0.791	0.815	0.773	0.711
R Mec	0.8	0.797	0.787	0.784	0.781	0.772	0.754	0.702		
R Th	0.24	0.237	0.246	0.243	0.24	0.237	0.23	0.212	0.205	0.184

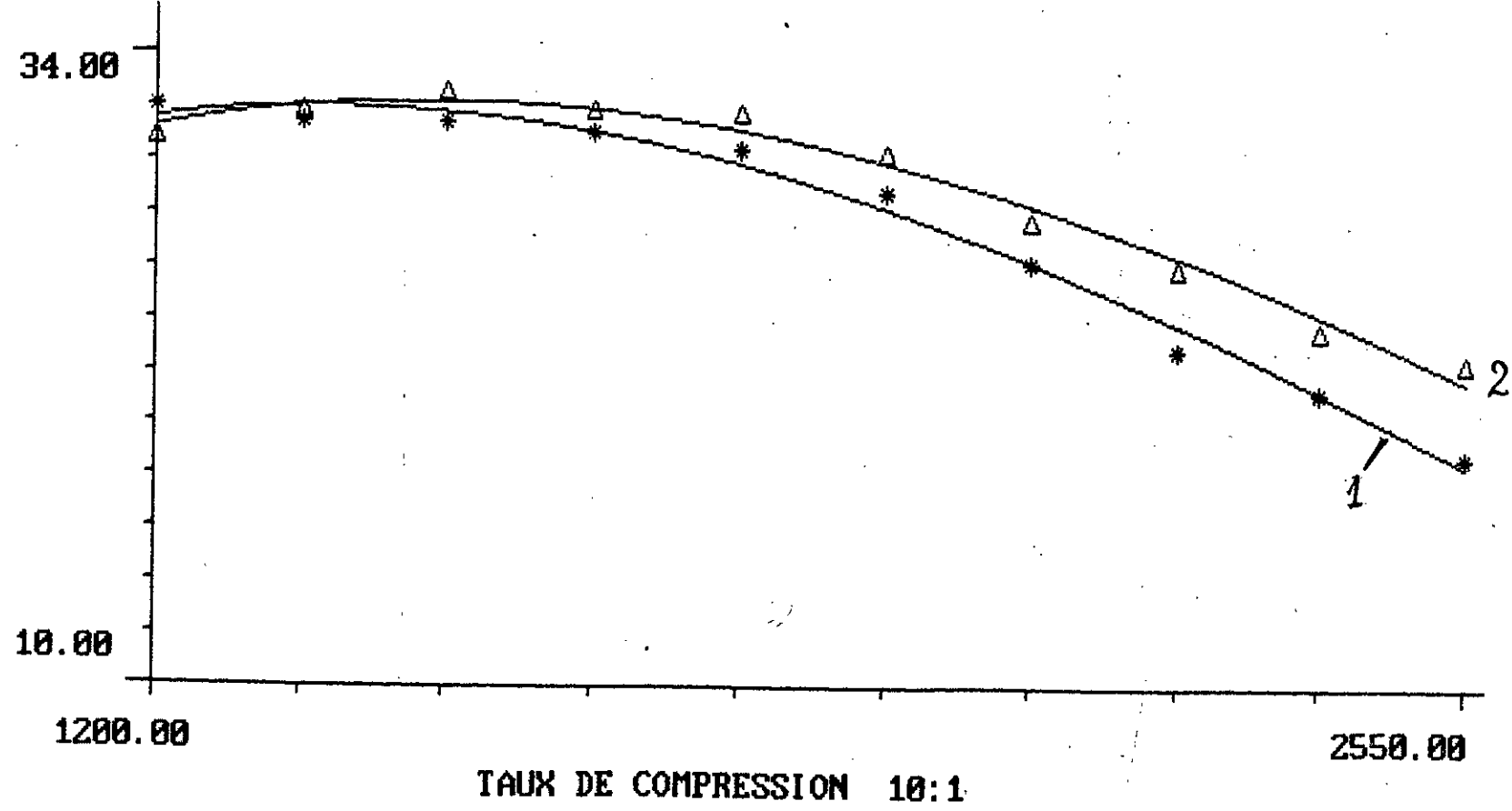
-----PARAMETRES FIXES-----

Date des essais	14/05/1989		Temperature ambiante		25°C					
Carburant	Butane		Poids specifique		2.6					
Taux de compression	10.0		Ouverture des gaz		Pleine					
Réglage Allumage	20° Av. P.M.H.		Reglage Carburateur		2.0 tours					
N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	30.81	31.77	32.51	31.81	31.72	30.24	27.65	25.84	23.53	22.32
PU (Kw)	3.872	4.492	5.107	5.496	5.98	6.173	6.079	6.079	5.915	5.960
T (°C)	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5
GAZ										
t (s)	68	63	60	52	49	47	48	47	46	44
(mm H2O)	22	24	28	31	35.5	35	37	41	41.5	38.5
Air (Kg/h)	19.64	21.42	24.99	27.67	31.69	31.24	33.03	36.6	37.05	34.37
CO (N.m)	8	8	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	9.5		
Friction										
PU (Kw)	1.01	1.13	1.34	1.47	1.6	1.74	1.87	2.24		
Air/Carb	14.8	14.96	16.62	15.95	17.21	16.28	17.57	19.07	18.89	16.76
CS (Kg/Kwh)	0.343	0.319	0.294	0.316	0.308	0.311	0.309	0.315	0.332	0.344
R Uol	0.791	0.767	0.806	0.811	0.851	0.775	0.76	0.786	0.746	0.652
R Mec	0.794	0.799	0.793	0.789	0.789	0.78	0.765	0.731		
R Th	0.231	0.248	0.268	0.25	0.257	0.254	0.256	0.251	0.238	0.23

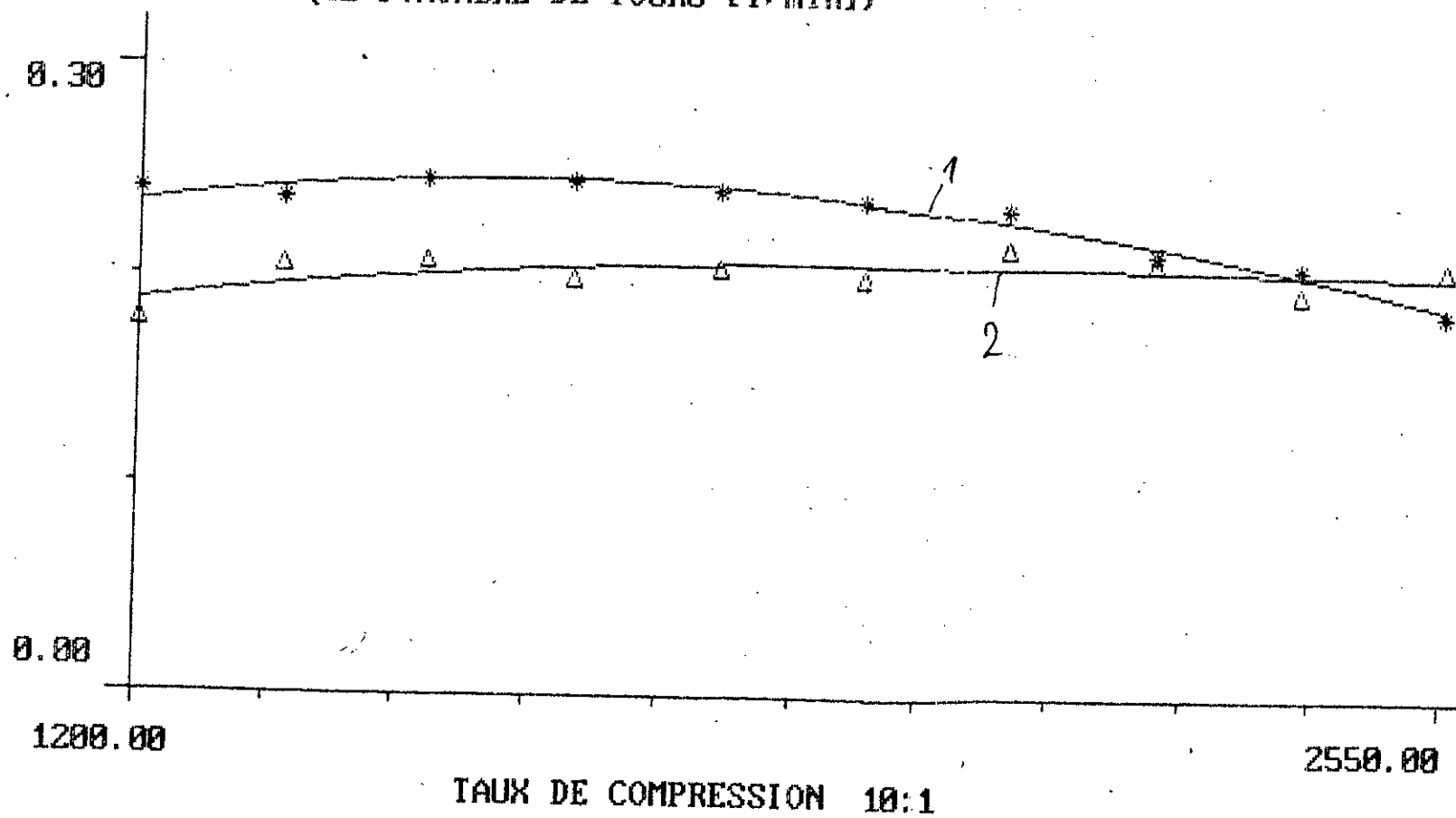
P [kW]=f(NOMBRE DE TOURS [T/Min])



COUPLE [N.m] = f(NOMBRE DE TOURS [1/min])



RENDEMENT THERMIQUE=f(NOMBRE DE TOURS [I/min])



S F C=f(NOMBRE DE TOURS [T/min])

[Kg/KW.h]

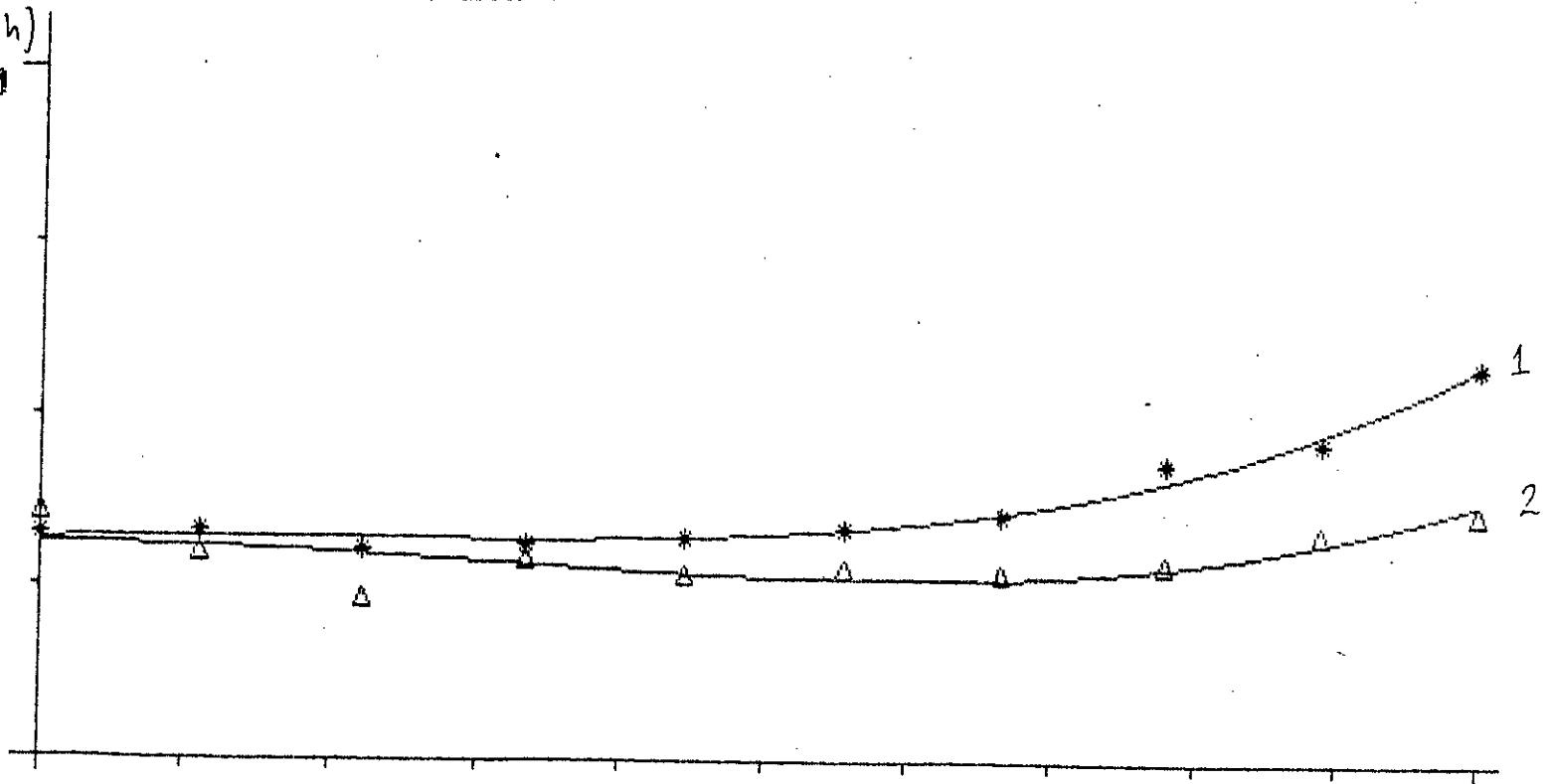
0.60

0.20

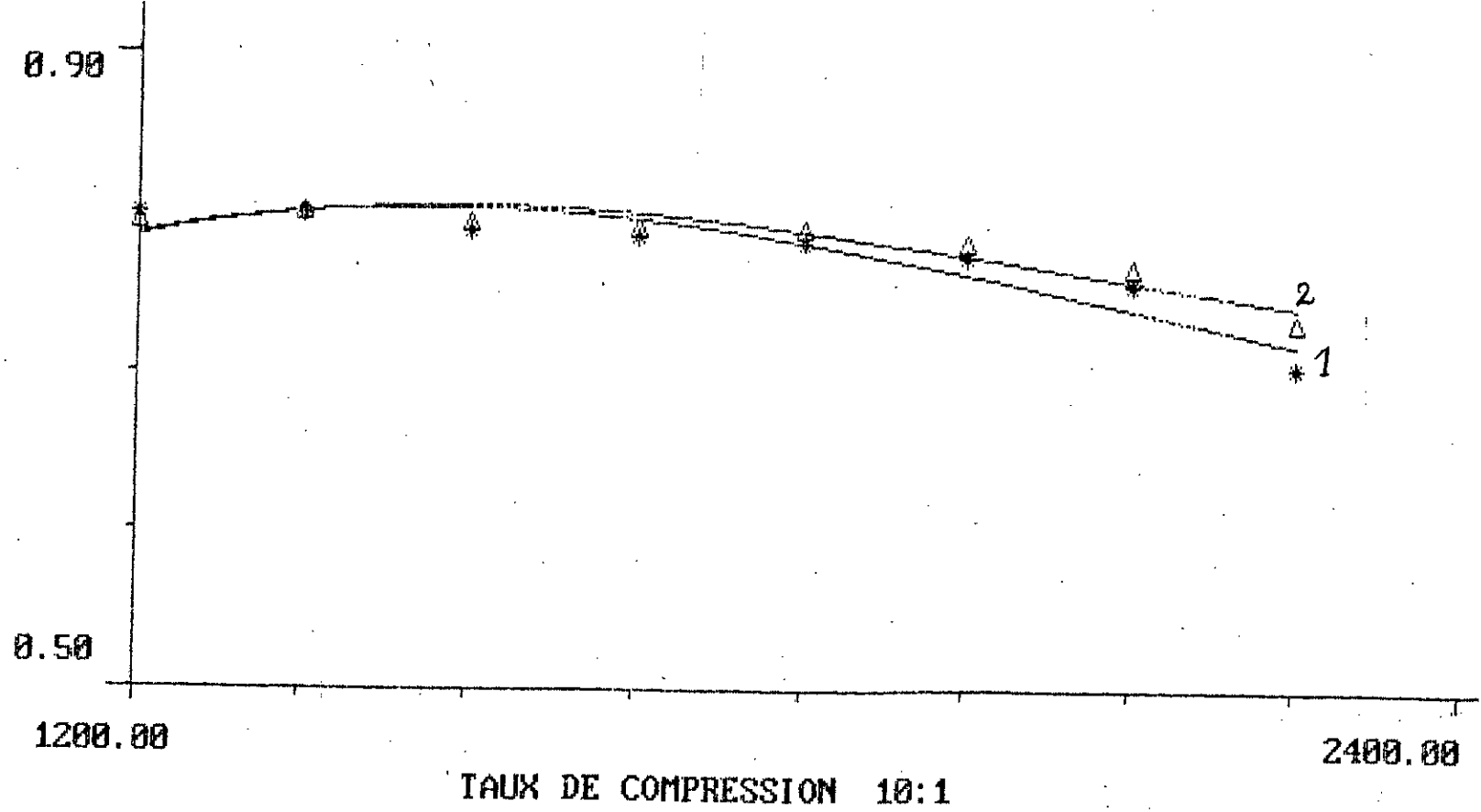
1200.00

2550.00

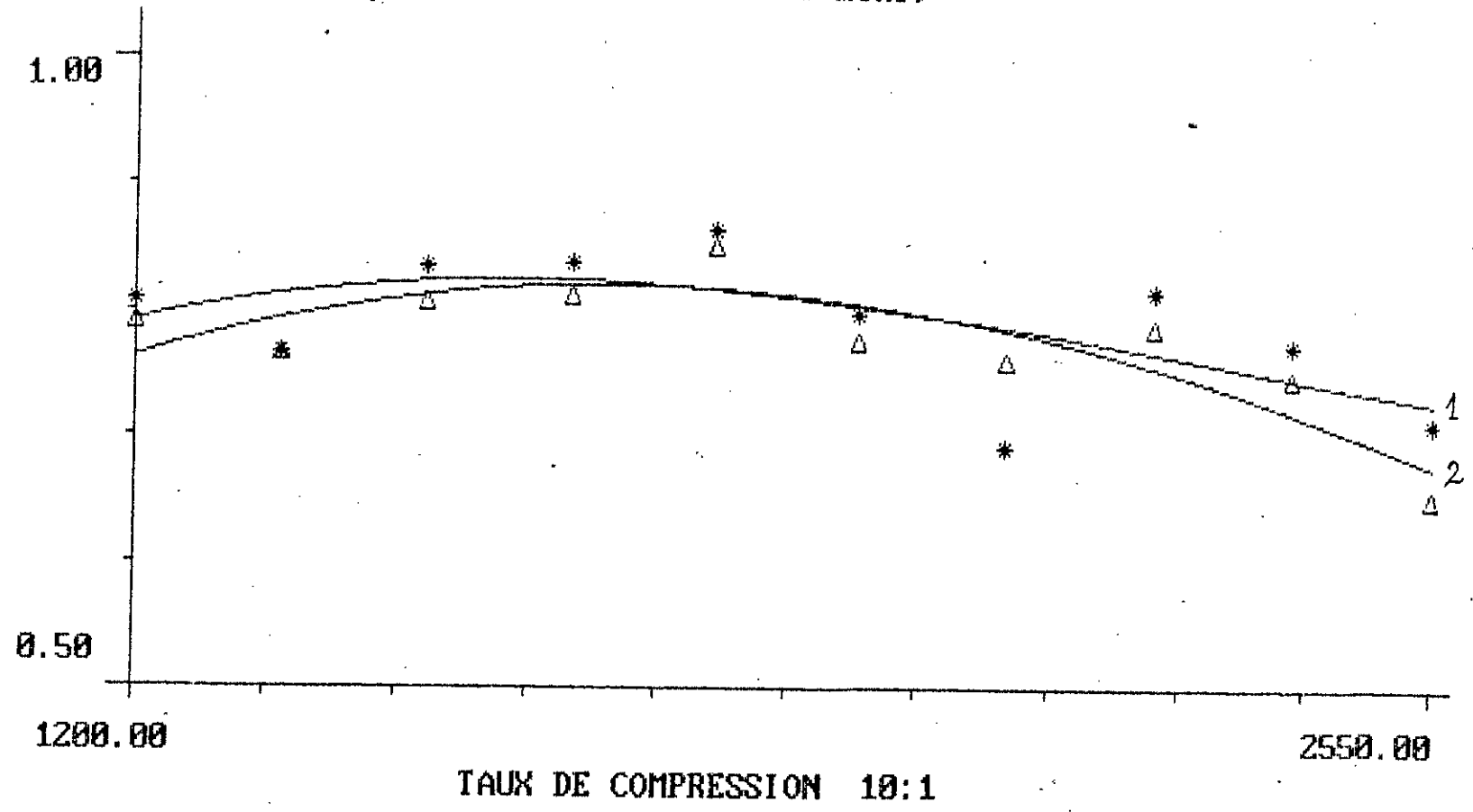
TAUX DE COMPRESSION 10:1



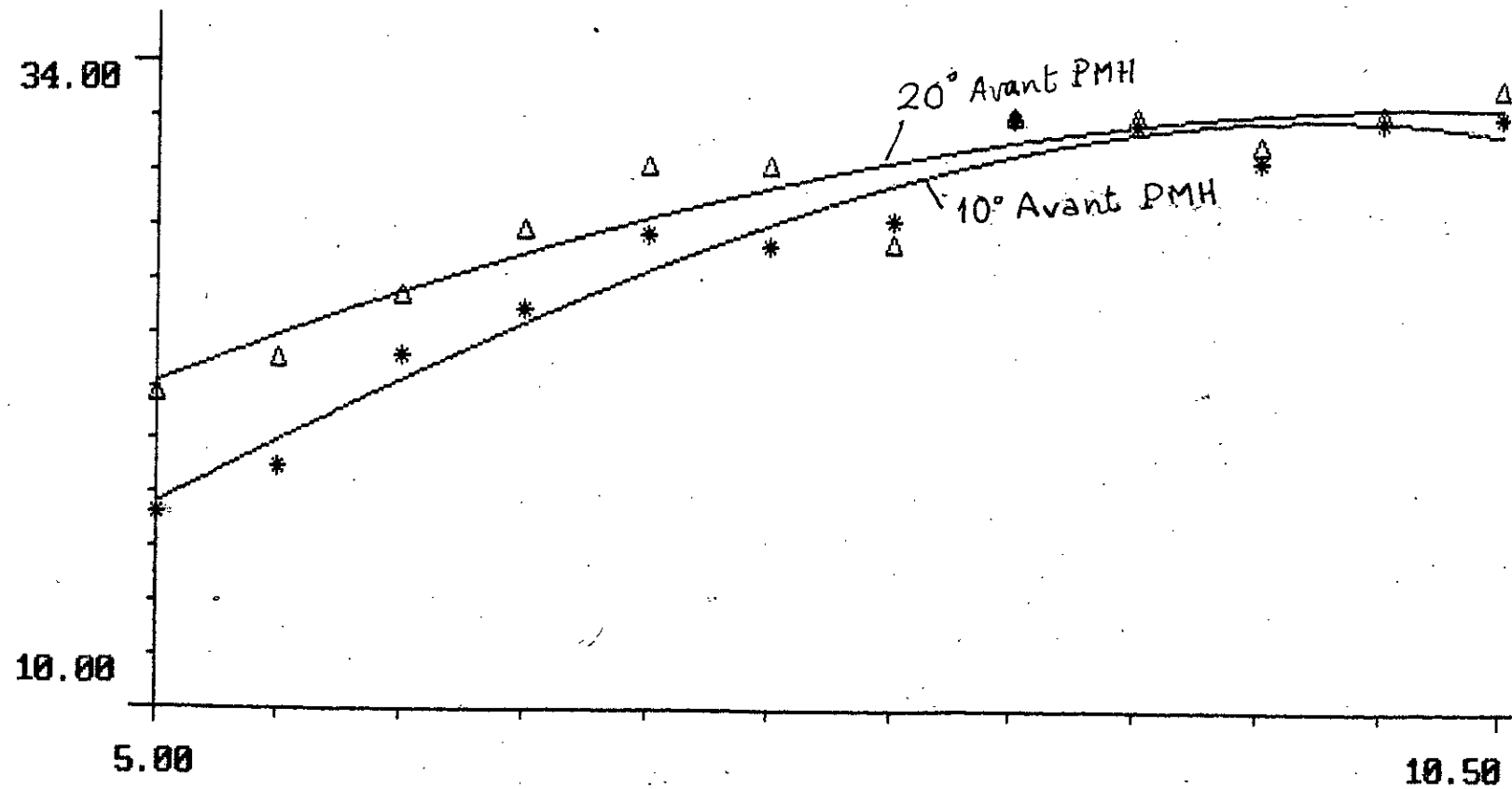
RENDEMENT MECANIQUE=f(NOMBRE DE TOURS [T/min])



RENDEMENT VOLUMETRIQUE=f(NOMBRE DE TOURS [l/min])

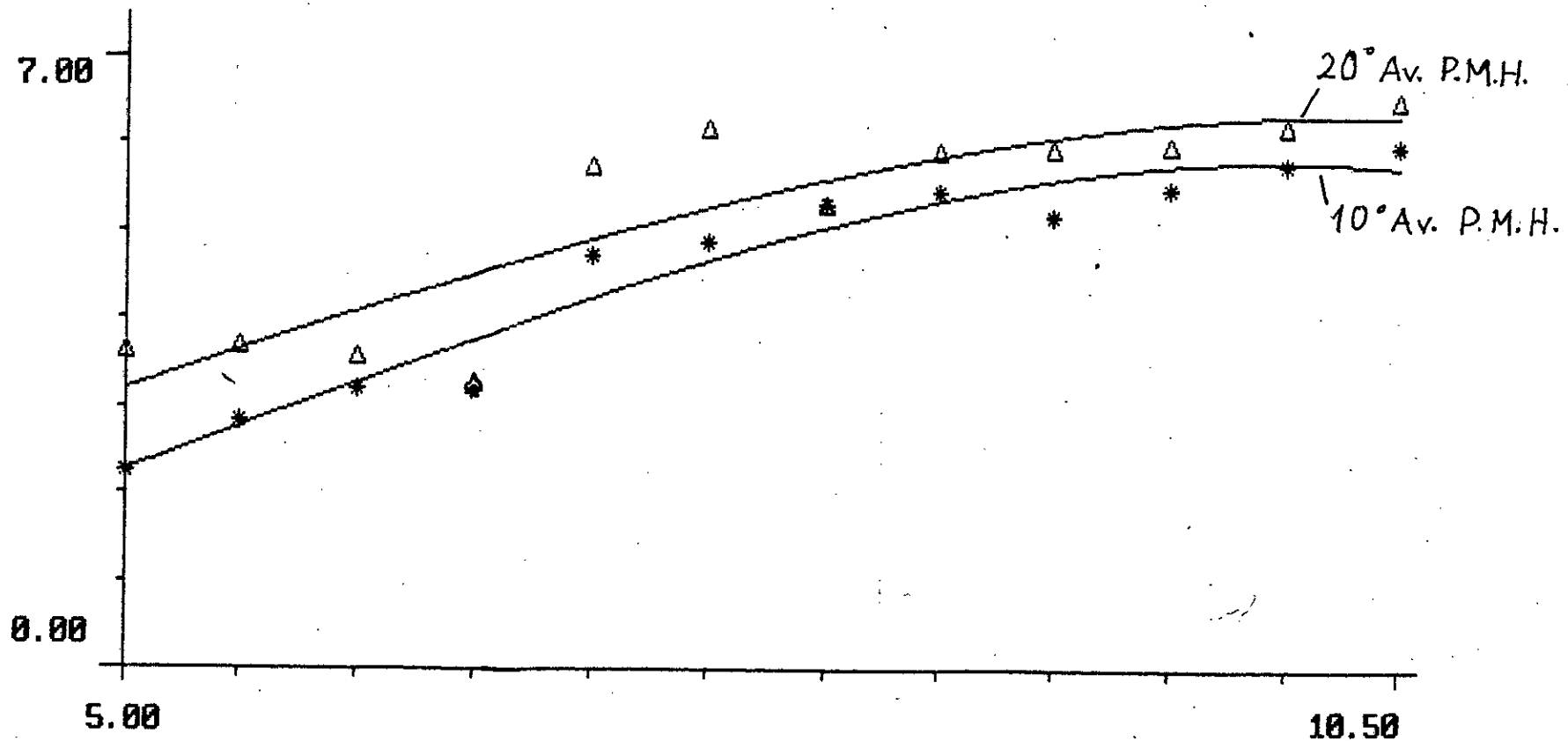


COUPLE [N.m]=f(TAUX DE COMPRESSION)



INFLUENCE DU TAUX DE COMPRESSION SUR LE COUPLE
POUR UNE VITESSE DE 1500 t/min

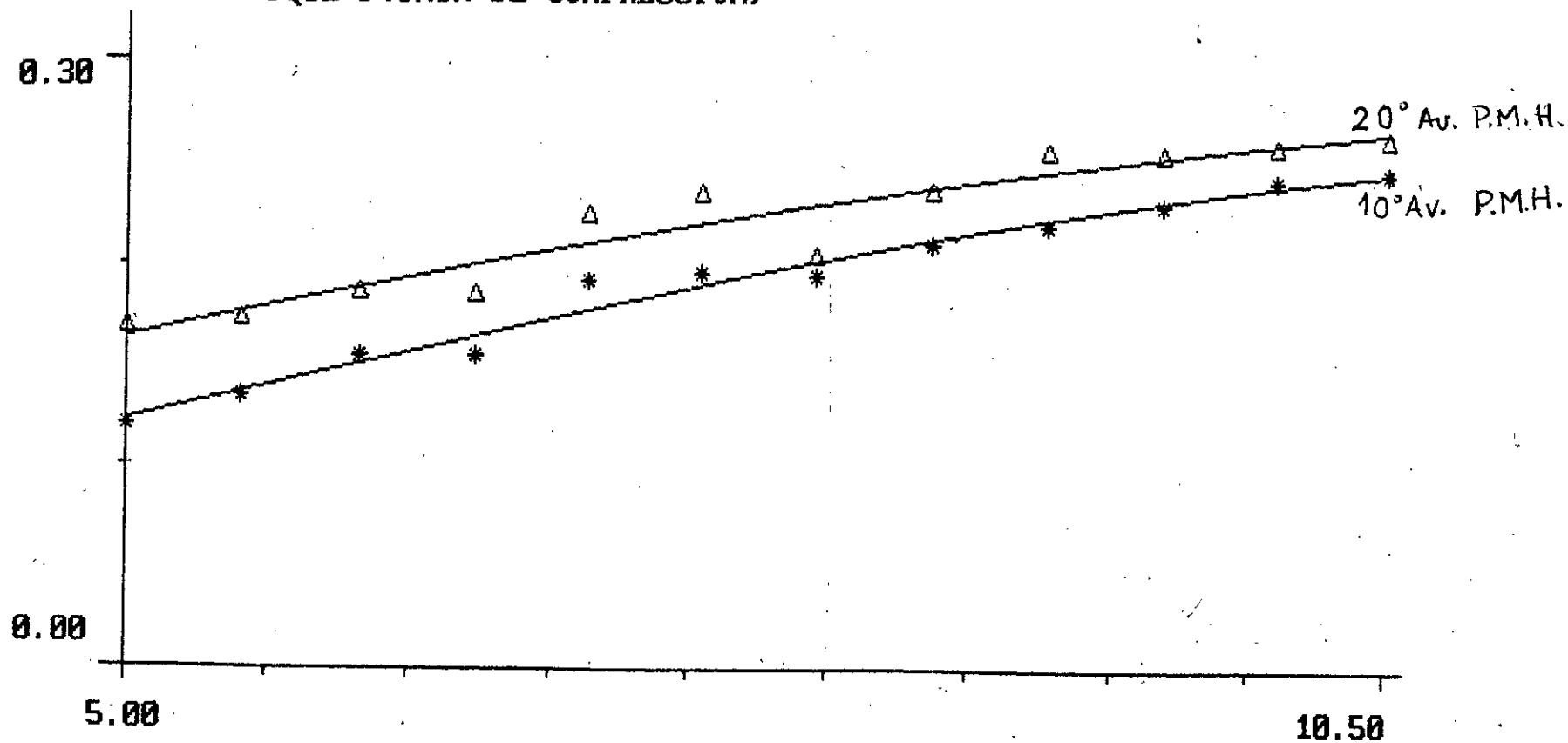
PUISSANCE [KW]=f(TAUX DE COMPRESSION)



INFLUENCE DU TAUX DE COMPRESSION SUR LA PUISSANCE

POUR UNE VITESSE DE 2100 t/min

RENDEMENT THERMIQUE=f(TAUX DE COMPRESSION)



INFLUENCE DU TAUX DE COMPRESSION SUR LE RENDEMENT THERMIQUE

POUR UNE VITESSE DE 1800 t/min

11-4 Interprétation des courbes

Les courbes représentant les variations de la puissance effective avec la vitesse de rotation ont une allure presque parabolique. Elles admettent un maximum pour une vitesse située entre 2000 et 2100 T/min. La diminution de puissance au delà de cette vitesse est due aux pertes de charge au niveau du carburateur, dans les canalisations et au niveau des soupapes. Ces mêmes pertes causent aussi une diminution considérable du couple moteur à grande vitesse. Les courbes du couple admettent un maximum entre 1400 et 1500 t/min.

La consommation spécifique diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation jusqu'à atteindre un minimum (Ce minimum correspond à la vitesse économique) ensuite la courbe croît rapidement.

Etant donné que le rendement thermique est inversement proportionnel à la consommation spécifique de carburant, la courbe du rendement thermique admet un maximum qui devrait correspondre au minimum de la courbe représentant les variations de la consommation spécifique.

Les pertes par friction augmentent avec la vitesse de rotation, entraînant ainsi une diminution du rendement mécanique avec l'augmentation de la vitesse de rotation.

Influence du taux de compression

Les performances du moteur (puissance, couple, rendement thermique, consommation spécifique) s'améliorent avec l'augmentation du taux de compression. Mais cette augmentation est limitée par l'apparition du phénomène de détonation. La détonation carburant est caractérisée par une combustion extrêmement rapide du carburant et de fortes ondes de pression dans le cylindre du moteur. Par conséquent, le taux de compression maximal est déterminé par le fait que la détonation est à éviter. Dans notre cas le taux de compression max. est d'environ 10 car il y a apparition du phénomène de détonation à 10,5 pour de faibles vitesses.

Influence du calage de l'allumage

La combustion du mélange carburé n'est pas instantanée, d'où la nécessité d'une avance à l'allumage. L'avance à l'allumage consiste en la production de l'étincelle avant que le piston n'ait atteint le P.M.H. La différence entre les positions angulaires du vilebrequin au moment de l'étincelle et au P.M.H. constitue la valeur de l'avance à l'allumage.

On s'est limité à comparer deux avances différentes 10° et 20° . Pour un même taux de compression l'avance de 20° donne de meilleures performances, comparées à celles obtenues avec une avance de 10° .

CHAPITRE III

ANALYSE DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT

Une des qualités des gaz de pétrole liquéfiés est qu'ils brûlent complètement et proprement. Les recherches qui se font, dans le but de l'amélioration des moteurs fonctionnant au gaz, s'inscrivent aussi dans la contribution à la lutte contre la pollution de l'air des villes.

Cette pollution est due essentiellement à l'oxyde de carbone (CO), aux oxydes d'azote (NOx), aux hydrocarbures imbrûlés (CnHm) et additifs du combustible.

Afin de connaître l'ordre de grandeur de la teneur en CO, en CO₂, et en O₂ des produits de combustion, on a effectué quelques analyses des gaz d'échappement pour différents taux de compression.

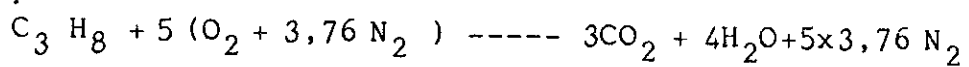
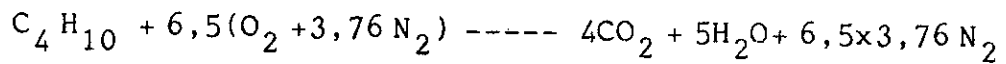
III-1 Caractéristiques du butane commercial

III-1.1 Constituants du butane commercial

Butane C_4H_{10} 90% (masse molaire 58g)

Propane C_3H_8 10% (masse molaire 44g)

III-1.2 Réaction de combustion de chacun des constituants



III-1.3 Détermination de l'air théorique

On appelle air théorique, la quantité minimale d'air qui fournit assez d'oxygène pour la combustion complète de combustible. Mais en pratique, la combustion complète n'est réalisée qu'avec un excès d'air.

On définit donc la richesse comme étant le rapport de la quantité d'air théorique et la quantité d'air réellement fournie.

Pour la combustion d'une quantité de butane commercial contenant 0,9 mole de butane et 0,1 mole de propane, il faut une quantité d'air correspondant à $(6,5 \times 0,9 + 5 \times 0,1)(O_2 + 3,76N_2)$
 D'où le rapport air(théorique)/Carburant

$$(A/C)_{st} = \frac{(6,5 \times 0,9 + 5 \times 0,1) \times 137,34}{0,9 \times 58 + 0,1 \times 44} = 15,41 \text{ kg d'air/kg combustible}$$

ce rapport est appelé aussi rapport stochiométrique.

III-2 L'ANALYSEUR D'ORSAT

III-2.1 Principe

Avec l'analyseur d'Orsat, on mesure les variations de volume, consécutives aux absorptions sélectives des constituants des gaz d'échappement, au moyen des réactifs appropriés.

III-2.2 Description

L'appareil d'Orsat simple (fig. III-1), comprend une rampe R en tube de verre, trois Laboratoires A et une burette de mesure B de 100cm^3 , entourée d'une chemise d'eau. La burette graduée est reliée par un tuyau de caoutchouc à un flacon moteur F.

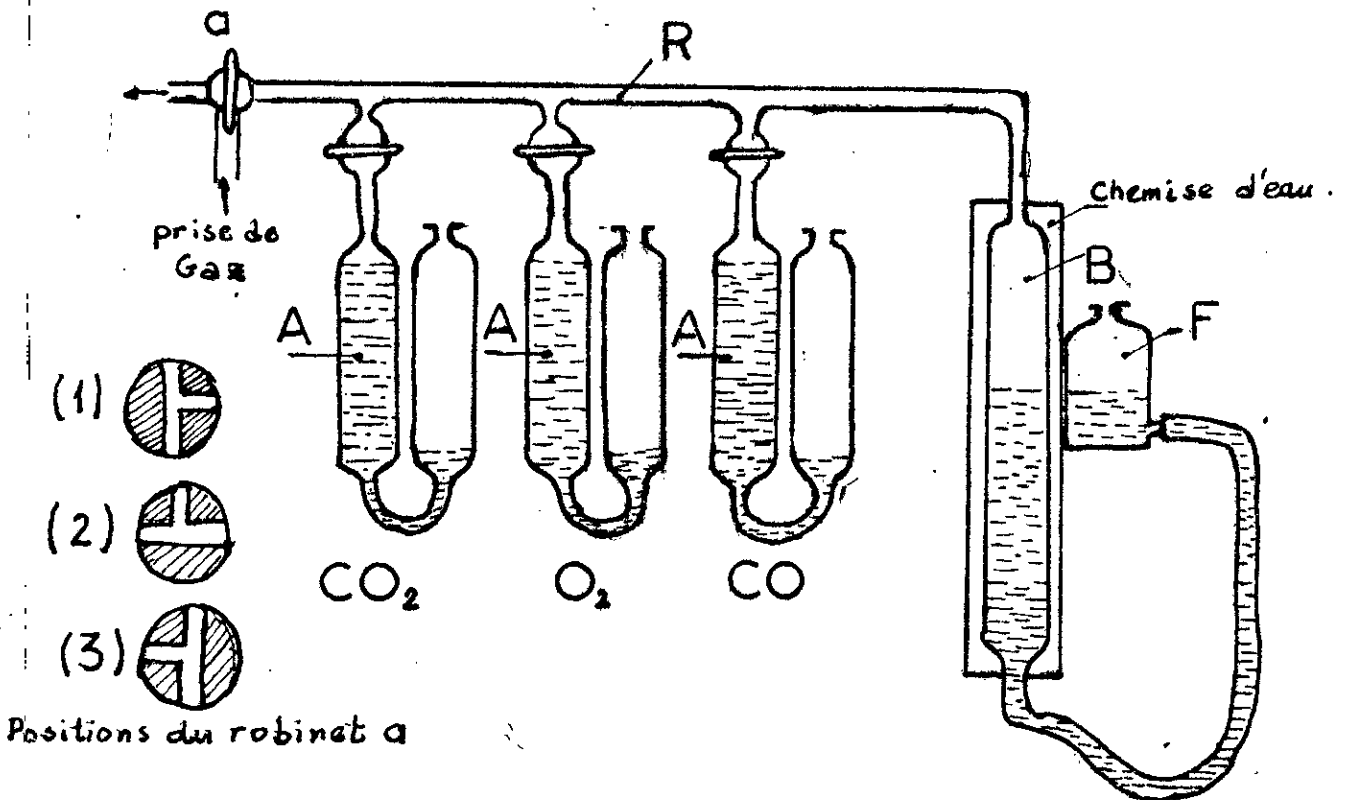


Fig III-1 Appareil d'Orsat

III-3. PREPARATION DES REACTIFS

III-3.1 Liquide de Garde

Le mercure est le liquide de garde qui offre toute garantie de non solubilité des constituants gazeux.

Malheureusement, son emploi dans un appareil d'Orsat se heurte à des difficultés de manipulation.

C'est pourquoi on a préféré utiliser une solution de chlorure de calcium. Cette solution aqueuse à 37% en poids de CaCl_2 (68,45 g de CaCl_2 pour 500 ml de solution) et rendue acide par addition de quelques gouttes d'acide chlorhydrique, est colorée à l'hélianthine.

III-3.2 Réactif absorbant l'Oxygène (O_2)

L'absorption de l'oxygène se fait dans l'eau contenant du phosphore, dans le pyrogallol, dans l'hydrosulfite ou dans le chlorure chromeux.

De ces réactifs, on a employé l'hydrosulfite qui se prépare en réunissant après refroidissement, deux solutions dont la première se compose de 30g d'hydrosulfite de soude ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) dissous prudemment sans trop remuer, dans 250ml d'eau distillée.

A cette solution on ajoute une seconde, composée de 8g de potasse (KOH) dissous dans 50ml d'eau distillée.

L'hydrosulfite est un réactif excellent, offrant l'avantage d'une absorption très rapide.

III-3.3 Réactif absorbant le CO_2

L'absorption de ce gaz se fait dans une solution de soude (NaOH) ou de potasse (KOH).

La solution de potasse qu'on a utilisé et qui est la plus employée, se prépare en versant dans un flacon, 500ml d'eau distillée et en y ajoutant 160g de potasse caustique pure.

L'absorption du CO_2 est rapide; en général, cinq passages dans le laboratoire garantissent une absorption presque complète. Précisons que 1 ml de cette solution absorbe 40 à 60 ml de CO_2 .

III-3.4 Réactif absorbant l'oxyde de carbone (CO)

Les réactifs utilisés pour absorber le CO sont le chlorure cuivreux ammoniacal, le chlorure cuivreux acide, le chlorure cuivreux neutre et le bêta naphthol.

On a préféré ne détailler que la préparation du réactif employé: le chlorure cuivreux acide. Ce dernier se prépare en mélangeant 33g de chlorure cuivreux (CuCl_2) et 250ml d'eau distillée.

Après mélange, on ajoute 250ml d'acide chlorhydrique; la solution vire alors au brun. On ajoute ensuite des copeaux de cuivre.

III-4 MODE OPERATOIRE POUR L'ANALYSE A L'ORSAT

Les éléments à analyser sont le CO_2 , l' O_2 et le CO.

Le gaz à analyser est aspiré dans la burette de mesure B, en abaissant le flacon moteur F. Pour ce faire on place le robinet à trois voies (a) en position 1.

Lorsque la burette B est remplie de gaz, on place le robinet (a) en position 2 et en élevant le flacon F, on rejette le gaz vers l'atmosphère. On répète cette opération deux ou trois fois. A la dernière, on remplit la burette B de façon qu'il y ait plus de 100ml de gaz dans celle-ci.

On ferme alors le robinet (a). On amène le flacon moteur F de façon telle, que le niveau supérieur du liquide de garde soit en regard du zéro de la graduation de la burette B et on expulse vers l'atmosphère, le surplus de gaz en plaçant un court instant le robinet à trois voies (a) en position 2. Lorsque le niveau du liquide de garde dans la burette B est exactement au zéro de la graduation, on remet le robinet (a) en position 3.

On obtient de cette façon 100ml de gaz à la pression atmosphérique.

On élève ensuite le flacon moteur F à un niveau supérieur à la burette B et on ouvre le robinet de l'absorbeur de CO_2 . Lorsque l'absorbeur est rempli de gaz, on ferme le robinet, on abaisse le flacon moteur et on reprend le gaz dans la burette B en ouvrant le robinet de l'absorbeur.

On répète cette opération jusqu'à refus et on effectue une lecture du volume restant, sur la règle graduée de la burette de mesure, par équilibre des niveaux du liquide de garde.

On passe alors à l'absorbeur suivant et ainsi de suite.

Supposons que nous trouvions après passage dans le premier absorbeur, 75 ml. Après le second, 73 ml. Après le troisième, toujours 73 ml.

Nous avons 100 ml de gaz. Il a donc été absorbé 25 ml. de CO_2 et 2 ml d' O_2 . Le gaz contenait donc 25% de CO_2 , 2% d' O_2 et 0% de CO. [7]

III-5 RESULTATS

On a fait des analyses pour trois taux de compression différents (l'avance à l'allumage étant de 10°)

1-Taux de compression 6:

	800 t/min	1500 t/min	2550 t/min
%CO ₂	5,5	10,5	10,5
%O ₂	2,5	0,5	0,5
%CO	3,5	0,5	0,5

2-Taux de compression 8,5

	800 t/min	1500 t/min	2550 t/min
%CO ₂	10,5	11	10,5
%O ₂	0,5	0,5	0,5
%CO	1	1	0,5

3-Taux de compression 10,5

	800 t/min	1500 t/min	2550 t/min
%CO ₂	10,5	11	10
%O ₂	0,5	0,5	0,5
%CO	2	0,5	0,5

Les résultats obtenus correspondent à une bonne combustion due au fait que le taux d'oxyde de carbone est très faible, excepté pour les faibles vitesses où le taux de CO est relativement élevé, la combustion n'a donc pas été complète. Ceci est essentiellement dû à un manque d'air (rapport air/carburant inférieur au rapport stoechiométrique).

CHAPITRE IV.

BILANS THERMIQUES

IV-1 INTRODUCTION

Dans un moteur à combustion interne, seulement 20 à 25% de l'énergie calorifique fournie par la combustion du carburant sont transformés en travail utile.

Une plus grande proportion (50%) est évacuée par les gaz d'échappement. Il y a aussi un échange de chaleur considérable (environ 20%) entre les gaz dans le cylindre et la paroi de celui-ci. Une quantité plus faible est perdue sous forme de chaleur rayonnée. [8]

De l'énergie est perdue aussi, par frottement, sous forme de travail. Une autre quantité de travail est nécessaire, à cause de la chute de pression dans les soupapes, pour remplir le cylindre d'air et pour rejeter les produits de combustion.

Un calorimètre des gaz d'échappement est utilisé pour évaluer la quantité de chaleur perdue dans les gaz d'échappement.

Le calorimètre des gaz d'échappement TD41 a été conçu pour être utilisé avec des moteurs tels le moteur à taux de compression variable TD43.

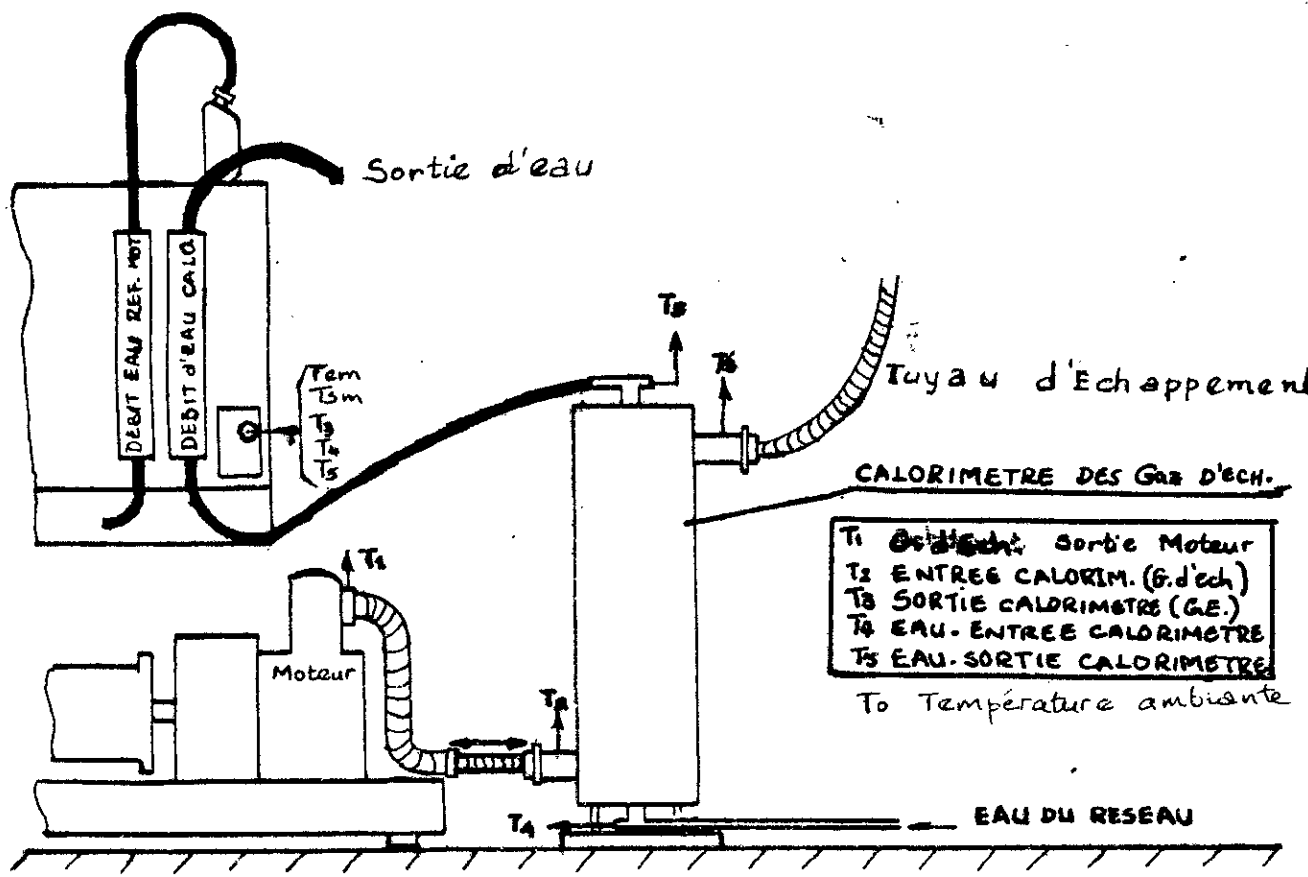


FIG IV - 1 Schema d'Ensemble.

IV-2 THEORIE

Il est possible de faire une évaluation de la quantité de chaleur dégagée avec les gaz d'échappement, en prenant comme chaleur spécifique des gaz 1 KJ/Kg.K

$$Q_g = \dot{m}_g \cdot C_{p_g} \cdot (T_1 - T_0) \quad (IV-1)$$

Le débit massique des gaz d'échappement sortant du moteur est égal, au débit massique total d'air et de carburant dans le moteur,

$$\dot{m}_g = \dot{m}_f + \dot{m}_a \quad (IV-2)$$

le débit masse étant souvent mesuré en Kg/h, il ne faut donc pas oublier de faire la conversion de ce même débit en Kg/s.

Une meilleure méthode, pour mesurer la chaleur perdue dans les gaz d'échappement, consiste à utiliser un calorimètre des gaz d'échappement. Ce dernier est constitué essentiellement d'un échangeur de chaleur utilisant de l'eau comme fluide de refroidissement; cette dernière technique est plus précise car la chaleur spécifique de l'eau est connue.

La quantité de chaleur absorbée par l'eau dans le calorimètre est donnée par:

$$Q_e = m_e \cdot C_{p_e} \cdot (T_5 - T_4) \quad (IV-3)$$

Toute la chaleur contenue dans les gaz d'échappement ne peut pas être absorbée par l'eau, et ce pour trois raisons:

1) La température de l'eau ne doit pas dépasser la température d'ébullition. Par mesure de sécurité, la température de l'eau sortant du calorimètre ne doit donc pas dépasser 85°C.

2) La température des gaz d'échappement ne doit pas être basse afin d'éviter que la vapeur d'eau, produite lors de la combustion, ne se condense dans le pot et le tuyau d'échappement. Pour cela, une température des gaz d'échappement minimale de 120°C est recommandée comme limite inférieure.

3) Une partie de la chaleur est perdue à travers la paroi du tuyau d'échappement, situé entre la sortie du moteur et l'entrée du calorimètre, et ce malgré que le tuyau d'échappement est calorifugé.

- Les gaz d'échappement sortant du calorimètre contiennent encore une quantité appréciable de chaleur, qui n'a pas été cédée à l'eau, elle doit être estimée par extrapolation linéaire.

- La chaleur totale contenue dans les gaz d'échappement, entre la température à laquelle les gaz quittent le moteur et la température ambiante, est approximée par la relation ci-dessous, considérant que la chaleur perdue entre T1 et T2 est négligeable:

$$Q_g = \frac{(T_2 - T_0)}{(T_2 - T_3)} \cdot Q_e \quad (\text{IV-4})$$

Pour une bonne précision, il faut essayer d'obtenir une chute de température, dans le calorimètre, aussi importante que possible.

IV-2.1 Mesure du débit d'eau

Un rotamètre est utilisé pour mesurer le débit volumique d'eau \dot{v}_e , et de mesurer ainsi, le débit massique de l'eau en utilisant la relation:

$$\dot{m}_e = \rho_e \cdot \dot{v}_e \quad (IV-5)$$

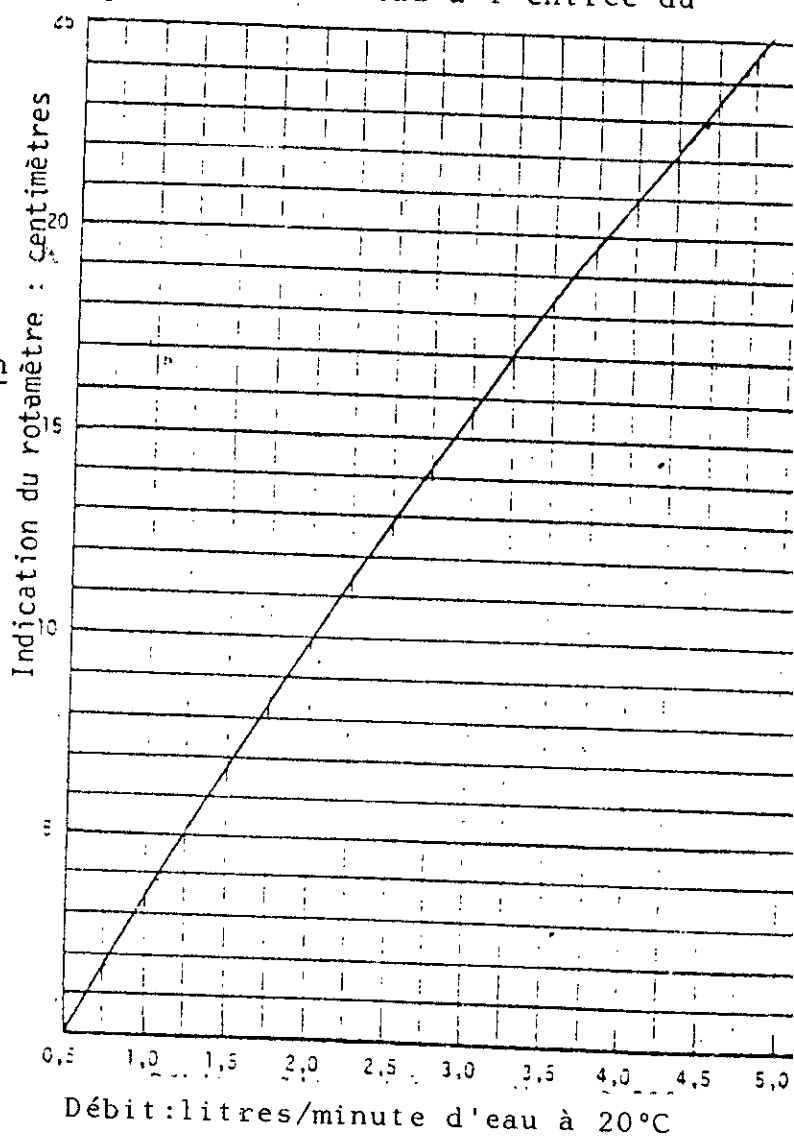
La fig IV-2.1 représente la courbe d'étalonnage du rotamètre à 20°C.

La température de l'eau étant supérieure à 20°C, il est recommandé de multiplier la valeur lue par $(1 + 0,00025 \cdot t)$.

t représente la température de l'eau en °C.

On considèrera que la température de l'eau au niveau du rotamètre est égale à la température de l'eau à l'entrée du calorimètre.

Fig IV-2.1 courbe d'étalonnage du rotamètre.



Remarque: La courbe donne le débit volumique en l/min, on doit donc faire la conversion en m^3/s comme suit:

$$1 \text{ l/min} = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

d'où

$$\dot{m}_e = 1,67 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_e \cdot \dot{v}_e \quad (\text{Kg/s})$$

où \dot{v}_e représente le débit volumique en l/min.

La densité de l'eau vaut 1000 Kg/m^3 à 4°C et diminue avec l'augmentation de température

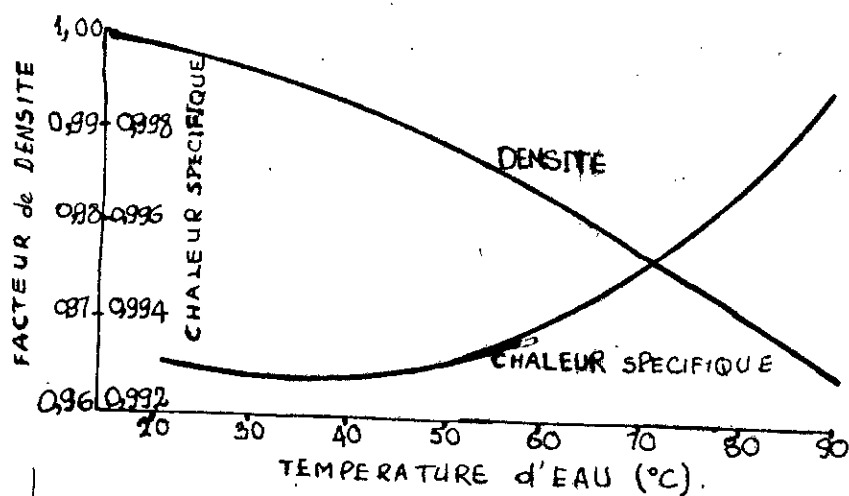


fig IV-2.2 Variations de la densité et de la chaleur spécifique (à pression constante) de l'eau avec la température

L'échange de chaleur dans le calorimètre entraîne une augmentation de la température de l'eau y circulant. La densité de l'eau n'est donc pas constante, mais on obtient d'assez bons résultats en prenant une valeur moyenne de la densité de l'eau.
 par exemple: si l'eau entre dans le calorimètre à 30°C et en sort à 80°C, la densité moyenne de l'eau dans le calorimètre vaut donc:

$$\frac{1}{2} \cdot (0,997 + 0,969) \cdot 1000 = 983 \text{ Kg/m}^3$$

La chaleur spécifique varie, elle aussi, avec la température:

$$C_{pe} = 4,21 \times \text{facteur donné} \quad (\text{KJ/Kg} \cdot \text{K})$$

IV-2.2 Chaleur fournie par le carburant

la chaleur fournie par la combustion du carburant vaut:

$$Q_c = \dot{m}_c \cdot PC_i \quad (\text{KW}) \quad (\text{IV-6})$$

où PC_i représente le pouvoir calorifique inférieur du carburant en KJ/Kg

IV-2.3 Evaluation de la chaleur spécifique moyenne des Gaz d'échappement

La quantité de chaleur dégagée dans les gaz d'échappement s'écrit:

$$Q_g = \dot{m}_g \cdot C_{pg} \cdot (T_1 - T_0) = \frac{(T_1 - T_0)}{(T_1 - T_3)} \cdot Q_e$$

d'où

$$C_{pg} = \frac{Q_e}{\dot{m}_g (T_1 - T_3)} \quad (\text{IV-7})$$

Si la chaleur cédée, par les gaz d'échappement, entre T_1 et T_2 est négligeable, T_1 peut être remplacée, dans les équations ci-dessus, par T_2 .

La quantité de chaleur totale, dégagée avec les gaz d'échappement (équation IV-2.1), s'écrit :

$$Q_g = \dot{m}_g \cdot C_{pg} \cdot (T_1 - T_0)$$

La quantité de chaleur perdue entre la sortie du moteur et l'entrée du calorimètre est donnée par :

$$Q_1 = \dot{m}_g \cdot C_{pg} \cdot (T_1 - T_2)$$

Si on néglige cette quantité, on pourra poser :

$$T_1 = T_2$$

La quantité de chaleur cédée à l'eau dans le calorimètre, comme donnée par l'équation IV-2.3 s'écrit :

$$Q_e = \dot{m}_g \cdot C_{pg} \cdot (T_2 - T_3) = \dot{m}_e \cdot C_{pe} \cdot (T_5 - T_4)$$

La quantité de chaleur restant dans les gaz d'échappement vaut donc :

$$Q_g' = \dot{m}_g \cdot C_{pg} \cdot (T_3 - T_0)$$

La quantité de chaleur totale est donnée par la somme :

$$Q_g = Q_1 + Q_e + Q_g'$$

IV-3 Evaluation de la quantité de chaleur cédée à l'eau du système de refroidissement du moteur

l'eau de refroidissement entre dans le bloc moteur à une température T_e et en sort à une température plus grande T_s .

La quantité de chaleur cédée par le fluide moteur, à travers la paroi du cylindre, à l'eau de refroidissement est donnée par la relation:

$$Q_{er} = \dot{m}_{er} \cdot (T_s - T_e) \cdot C_{pm} \quad (KW) \quad (IV-8)$$

Pour calculer le débit massique de l'eau, on procède de la même manière qu'au IV-2.1, car le rotamètre, utilisé ici, a la même courbe d'étalonnage que le rotamètre précédent. Il est à noter que l'eau passe dans le rotamètre après sa sortie du moteur, donc avec une température T_s .

On prend comme chaleur spécifique la valeur moyenne, comme indiqué précédemment.

IV-4 RESULTATS

On a établi le bilan énergétique pour trois taux de compression différents.

Notations utilisées dans les tableaux:

Débits (kg/h)

Mer: eau de refroidissement du moteur.

Mec: " " " " du calorimètre.

Mg : Gaz d'échappement.

Températures (°C)

Tem: eau à l'entrée du moteur.

Tsm: eau à la sortie du moteur.

T₁ : gaz d'échappement à la sortie du moteur.

T₂ : gaz d'échappement à l'entrée du calorimètre.

T₃ : gaz d'échappement à la sortie du calorimètre.

T₄ : eau à l'entrée du calorimètre.

T₅ : eau à la sortie du calorimètre.

Chaleurs spécifiques moyennes (KJ/Kg.K)

C_{pm} : eau de refroidissement du moteur.

C_{pc} : eau de refroidissement du calorimètre.

C_{pg} : gaz d'échappement.

Quantités de chaleur (KW)

Q_{ec} : reçue par l'eau du calorimètre.

Q_c : Fournie par la combustion du carburant.

Q_g : contenue dans les gaz d'échappement.

Q_{er} : cédée à l'eau de refroidissement du moteur.

PARAMETRES FIXES

Date des essais	09 / 05 / 1989	Temperature ambiante	21.2 °C
Carburant	Butane	Poids specifique kg/m ³	2.6
Taux de compression	6,0	Ouverture des gaz	Pleine
Réglage Allumage	10° Avant PMH	Réglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
Mer (Kg/h)	278.6	260.3	241.0	258.9	260.4	270.8	278.2	278.3	289.4	288.9
Tem (°C)	30	34	34	36	37	38	40	40	28	35
Tsm (°C)	45	48	54	56	60	60	63	62	48	57
Mec (Kg/h)	227.9	228.9	225.9	225.9	218.7	218.6	226.0	154.4	241.3	241.2
T4 (°C)	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
T5 (°C)	31	32	34	35	36	38	40	39	36	37
Mg (Kg/h)	22.98	25.9	30.05	32.89	37.05	36.22	37.18	39.38	41.33	38.58
T1 (°C)	600	640	690	715	750	770	800	790	740	770
T2 (°C)	570	610	650	675	710	730	760	750	700	730
T3 (°C)	38	42	43	45	56	66	87	121	54	68
CPM	4.176	4.176	4.178	4.177	4.178	4.178	4.179	4.177	4.176	4.177
CPG	4.14	4.178	4.178	4.177	4.177	4.177	4.177	4.177	4.177	4.177
Qec (Kw)	2.63	2.92	3.41	3.67	3.81	4.31	4.98	3.22	4.2	4.48
CPD	0.77	0.72	0.673	0.638	0.566	0.645	0.716	0.468	0.49	0.631
Qc (Kw)	19.23	20.98	22.2	23.08	24.53	25.06	25.58	25.03	25.62	26.19
Qg (Kw)	2.84	3.21	3.76	4.04	4.25	4.86	5.76	3.94	4.24	5.06
Qer (Kw)	4.85	4.23	5.59	6.01	6.95	6.91	7.43	7.1	6.72	7.37

PARAMETRES FIXES

Date des essais	! 15 / 05 / 1989 !	Temperature ambiante	! 21.5 °C !
Carburant	! Butane . !	Poids specifique ρ_{g/m^3}	! 2,6 !
Taux de compression	! 8,5 !	Ouverture des gaz	! Pleine !
Réglage Allumage	! 10° Avant PMH !	Réglage Carburateur	! 2.0 tours !

N (tr/mn)	! 1200 !	! 1350 !	! 1500 !	! 1650 !	! 1800 !	! 1950 !	! 2100 !	! 2250 !	! 2400 !	! 2550 !
Mer (Kg/h)	! 258.12 !	! 269.87 !	! 270.12 !	! 275.65 !	! 275.36 !	! 281.17 !	! 284.07 !	! 284.01 !	! 283.83 !	! 283.73 !
Tem (°C)	! 35 !	! 36 !	! 32 !	! 38 !	! 41 !	! 40 !	! 43 !	! 43 !	! 44 !	! 44 !
Tsm (°C)	! 50 !	! 54 !	! 50 !	! 57 !	! 61 !	! 63 !	! 64 !	! 65 !	! 67 !	! 68 !
Mec (Kg/h)	! 37.47 !	! 60.06 !	! 60.08 !	! 65.99 !	! 56.88 !	! 56.8 !	! 52.23 !	! 52.12 !	! 52.04 !	! 51.94 !
T4 (°C)	! 21 !	! 21 !	! 21 !	! 21 !	! 21 !	! 21 !	! 21 !	! 21 !	! 21 !	! 21 !
T5 (°C)	! 55 !	! 47 !	! 45 !	! 53 !	! 60 !	! 65 !	! 70 !	! 76 !	! 80 !	! 85 !
Mg (Kg/h)	! 23.42 !	! 27.25 !	! 29.66 !	! 33.84 !	! 38.94 !	! 38.67 !	! 39.6 !	! 41.87 !	! 42.38 !	! 41.88 !
T1 (°C)	! 555 !	! 590 !	! 590 !	! 640 !	! 675 !	! 690 !	! 725 !	! 750 !	! 770 !	! 780 !
T2 (°C)	! 525 !	! 560 !	! 560 !	! 605 !	! 640 !	! 630 !	! 685 !	! 710 !	! 725 !	! 735 !
T3 (°C)	! 84 !	! 80 !	! 75 !	! 102 !	! 124 !	! 136 !	! 148 !	! 161 !	! 169 !	! 178 !
Cpm	! 4.176 !	! 4.177 !	! 4.177 !	! 4.177 !	! 4.178 !	! 4.179 !	! 4.179 !	! 4.18 !	! 4.18 !	! 4.181 !
Cpc	! 4.18 !	! 4.179 !	! 4.179 !	! 4.18 !	! 4.181 !	! 4.183 !	! 4.184 !	! 4.186 !	! 4.188 !	! 4.19 !
Qec (Kw)	! 1.46 !	! 1.81 !	! 1.67 !	! 2.45 !	! 2.58 !	! 2.9 !	! 2.97 !	! 3.33 !	! 3.572 !	! 3.87 !
Cpd	! 0.509 !	! 0.498 !	! 0.418 !	! 0.518 !	! 0.462 !	! 0.546 !	! 0.503 !	! 0.521 !	! 0.522 !	! 0.597 !
Qc (Kw)	! 19.49 !	! 21.71 !	! 23.49 !	! 24.41 !	! 25.49 !	! 28.01 !	! 28.01 !	! 28.07 !	! 28.8 !	! 27.95 !
Qd (Kw)	! 1.77 !	! 2.14 !	! 1.96 !	! 3.01 !	! 2.85 !	! 3.92 !	! 3.89 !	! 4.42 !	! 4.60 !	! 5.27 !
Qer (Kw)	! 4.49 !	! 5.636 !	! 5.641 !	! 6.076 !	! 6.391 !	! 7.507 !	! 6.925 !	! 7.255 !	! 7.58 !	! 7.908 !

PARAMETRES FIXES

Date des essais	14 / 05 / 89	Temperature ambiante	25 °C
Carburant	Butane	Poids specifique kg/m^3	2.6
Taux de compression	10.5	Ouverture des gaz	Pleine
Réglage Allumage	10° Avant PMH	Réglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/min)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
Mer (Kgr/h)	269.37	275.29	275.19	269.14	275.12	275.19	275.36	275.58	284.86	
Tem (°C)	42	42	42	43	42	40	39	38	34	
Tsm (°C)	61	62	63	64	64	63	61	58	54	
Mec (Kgr/h)	52.42	52.37	53.84	52.3	53.81	53.76	53.76	56.77	56.78	
T4 (°C)	22	22	22	22	22	22	22	22	22	
T5 (°C)	58	61	63	66	65	68	68	67	66	
Mg (Kgr/h)	21.42	26.03	27.94	30.78	34.5	34.10	36.77	40.83	44.33	
T1 (°C)	560	580	620	640	655	670	670	670	670	
T2 (°C)	530	550	590	605	620	635	630	630	630	
T3 (°C)	130	137	143	146	156	150	148	146	141	
Cpm	4.178	4.178	4.179	4.179	4.179	4.179	4.178	4.177	4.177	
Cpc	4.182	4.183	4.183	4.184	4.184	4.185	4.185	4.185	4.184	
Qec (Kw)	2.19	2.373	2.565	2.674	2.689	2.875	2.875	2.97	2.904	
Cpd	0.920	0.795	0.739	0.683	0.605	0.626	0.584	0.541	0.517	
Qc (Kw)	16.762	18.717	20.417	22.393	24.298	24.853	24.85	25.386	25.9	
Qd (Kw)	2.929	3.182	3.414	3.583	3.651	3.825	3.847	3.958	3.830	
Qep (Kw)	5.94	6.39	6.708	6.561	7.026	7.347	7.031	6.395	6.610	

On constate une diminution de la quantité de chaleur contenue dans les gaz d'échappement avec l'augmentation du taux de compression, cette diminution est accompagnée d'une augmentation de la puissance effective et du rendement thermique.

La quantité de chaleur citée ci-dessus représente 10 à 20 % de l'énergie du combustible.

La chaleur prise par l'eau de refroidissement du moteur est de l'ordre de 20 à 30% de l'énergie totale. Le refroidissement du moteur est nécessaire car il évite une surchauffe de l'huile de lubrification qui perd ses qualités lubrifiantes au delà d'une certaine température et aussi parce que le joint de culasse ne résiste pas à une haute température.

Pour une utilisation rationnelle de l'énergie du carburant, certains moteurs sont équipés d'échangeur air/air utilisant la chaleur des gaz d'échappement pour chauffer l'air admis afin de favoriser la vaporisation du carburant.

CONCLUSION

L'étude qui nous a été proposée nous a permis d'établir les différentes performances du moteur (alimenté au butane).

La teneur en CO des gaz d'échappement **est** un des critères de choix du combustible, pour cela on a fait quelques analyses des gaz d'échappement, les résultats obtenus étaient satisfaisants. L'analyse à l'ORSAT prend du temps, c'est pourquoi on limité le nombre d'analyses. Une étude comparative basée sur l'analyse des produits de combustion de différents carburants serait recommandée. L'utilisation d'appareils tels que l'analyseur à infrarouge ou le chromatographe donnerait des résultats plus précis.

Un bilan énergétique pour 3 taux de compression nous a permis de connaître l'influence du taux de compression sur la répartition de l'énergie de combustion du carburant.

Enfin, le programme que nous avons établi et qui constitue l'essentiel de notre travail permet de prévoir la valeur des performances aux conditions désirées.

Les résultats obtenus à l'aide du programme sont assez précis, comparés à ceux obtenus par l'expérience.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) M. BOUMAH RAT , A. GOURDIN Méthodes numériques appliquées
OPU 1983 ALGER (Chap.5, chap.8)
- (2) J.P. PELLETIER Techniques numériques appliquées au
calcul scientifique. Dunod PARIS.
- (3) M. MENARDON Les moteurs. Chotard et associés
- (4) R.. STONE Introduction to internal combustion engine.
- (5) G.J. VAN WYLEN; R.E. SONNTAG Thermodynamique appliquée
Ed. du renouveau pédagogique, Inc. Qttawa, Canada 1981
- (6) A. VAN TIGGELEN Oxydations et combustions Technip PARIS
- (7) J.BURTON "Pratique de la mesure et du contrôle dans l'industrie"
tome 3 Dunod PARIS 1964. (p. 208-222)
- (8) Document Tecquipment TD41 EXHAUST GAS CALORIMETER.
- (9) PFE Ammar Khodja Performances d'un moteur à taux de compression
variable ENP Janvier 1988
- (10) PFE Ounis A. Modélisation thermodynamique du banc TD43 .
E.N.P. Janvier 1988
- (11) P.F.E. Meftah B. Conversion et étude d'un moteur R16
au Gaz Naturel E.N.P. 1974.

ANNEXE 1

DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

AI- Description du banc

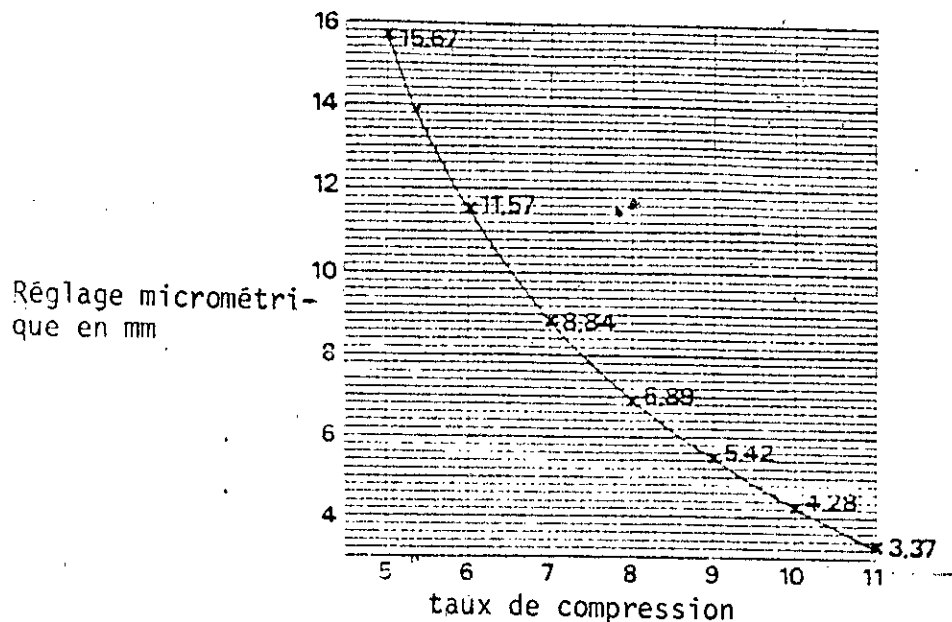
Le banc d'essai TD43 est construit à partir d'un moteur Diesel marin à quatre temps refroidi par eau. On peut faire varier le taux de compression entre 5 ET 18. Le moteur fonctionne à l'essence, au gasoil ou au gaz.

AI-1 MOTEUR

AI-1.1 Modification du taux de compression

On modifie le taux de compression en déplaçant la partie supérieure du moteur par rapport au carter à l'aide de la manette à cliquet.

On mesure le déplacement du cylindre à l'aide d'un micromètre. La figure I-1 montre une copie de la courbe d'étalonnage attachée à la console des instruments de mesure.



FigAI-1 Courbe d'étalonnage taux de compression

AI-1.2 Système d'allumage

Le système d'allumage utilise une bobine automobile traditionnelle de 12 V et un rupteur.

L'allumage peut être calé entre 30° avant le PMH et 10° après.

AI-2 DYNAMOMETRE

Le dynamomètre est un appareil électrique conventionnel à courant continu qui, outre son rôle de frein d'essai du moteur, sert également à mettre celui-ci en marche et à le faire tourner lors des essais de mesure des frictions. Les commandes du dynamomètre sont situées sur la console de gauche.

AI-3. INSTRUMENTATION

AI-3.1 Vitesse du moteur

La vitesse du moteur est normalement mesurée électriquement par un dispositif de comptage d'impulsions. Ce dernier dispositif étant défectueux, on a préféré se servir d'un tachymètre mécanique à main, qu'on maintient contre l'arbre du dynamomètre, pour mesurer la vitesse de rotation du moteur.

AI-3.2 Puissance au frein

Les signaux électriques du couplemètre (voir AI-3.3) et du tachymètre sont transmis au circuit de mesure de la puissance, qui applique électriquement la relation suivante:

$$\text{Puissance au frein} = \frac{2\pi N C}{60.000} \quad (\text{KW})$$

On a été donc contraint à procéder autrement pour déterminer la valeur de la puissance au frein:

La puissance du moteur est égale à la puissance électrique développée par le dynamomètre, qui est donnée par la relation:

$$P = E \cdot I / 1000 \quad (\text{KW})$$

où E représente la force électromotrice

$$E = U + R \cdot I$$

U: ddp aux bornes de l'induit (Volts)

I: intensité du courant produit par le dynamo. (Amp.)

R; résistance interne (R = 0.2 Ohm)

Pour mesurer U, on a branché un Voltmètre aux bornes de l'induit de la génératrice ; et pour mesurer l'intensité du courant on a utilisé un shunt et un millivoltmètre. Le shunt ayant une résistance très faible, on le met en série avec la génératrice, et on mesure, à l'aide du millivoltmètre, la chute de tension (très faible, à cause de la faible résistance du shunt) aux bornes du shunt qui a une résistance de 2 m.

une chute de tension de 2 mV aux bornes du shunt correspond donc à 1 A. La valeur lue sur le millivoltmètre doit être divisée par deux pour obtenir la valeur de l'intensité du courant en Amp.

$$\text{d'où } P = (U + 0.2 \times I) \cdot I / 1000 .$$

AI-3.3 Couple

Le carter du dynamomètre est monté sur roulements et peut pivoter entre des limites très étroites. La tendance du carter à tourner avec l'arbre est absorbée par un bras poussant contre un ressort dont la compression est mesurée par un potentiomètre linéaire. Le signal électrique de sortie du potentiomètre est proportionnel au couple exercé sur le carter du dynamo. et se lit sur le cadran du couplemètre.

On peut aussi calculer le couple à partir de la relation:

$$C = \frac{P \cdot 30000}{\pi N}$$

AI-3.4 Consommation d'air

Un débitmètre visqueux est destiné à mesurer la consommation d'air du moteur. La mesure du débit s'effectue en relevant la chute de pression mesurée à l'aide d'un manomètre à tube incliné étalonné en millimètres d'eau, et la courbe d'étalonnage nous donne la valeur du débit d'air admis (fig 1-2)

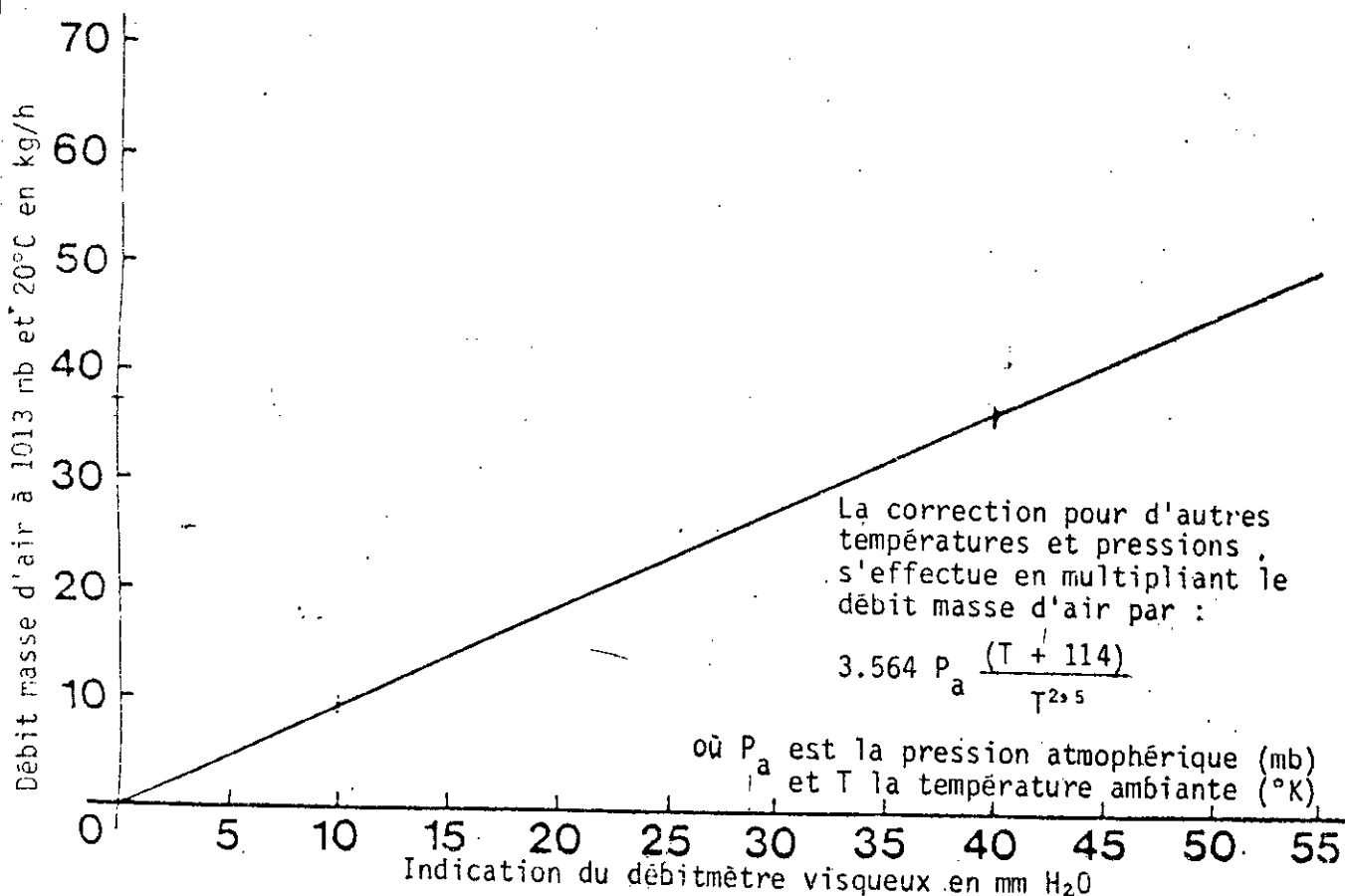


Fig AI-2 Etalonnage type du débitmètre visqueux

AI-3.5 Consommation de carburant

L'installation d'alimentation en gaz du moteur est équipée d'un compteur à gaz domestique, on peut y lire le volume de gaz consommé.

Le débit volumique de combustible se détermine en mesurant le temps nécessaire pour la consommation de 10 litres (0.01 m³) de gaz.

ANNEXE 2

T A B L E A U X D E V A L E U R S

PARAMETRES FIXES

Date des essais	14 / 05 / 1989										Temperature ambiante	24
Carburant	Butane										Poids specifique	2.6
Taux de compression	5.5										Ouverture des gaz	Pleine
Reglage Allumage	10° Av. PMH										Reglage Carburateur	2.0 tours
N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550		
CO (N.m)	19.92	19.36	18.52	17.88	16.39	15.74	11.48	7.72	5.97	2.50		
PU (Kw)	2.504	2.736	2.909	3.089	3.089	3.215	3.524	4.820	4.501	0.667		
T (°C)	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26		
GAZ												
U (g)	71	67	58	53	49	46	45	45	45	46		
(mm.H2O)	21	23	28.5	30	35.5	36.5	39.5	43	44	41		
AIR												
(Kg/h)	18.86	20.65	25.59	26.94	31.88	32.78	35.47	38.61	39.51	36.82		
CO (N.m)	6.5	7	7.5	8.5	9	9	9					
Friction												
PU (Kw)	0.82	0.99	1.18	1.47	1.7	1.84	1.98					
Air/Carb	14.87	15.36	16.48	15.85	17.34	16.74	17.72	19.29	19.74	18.8		
CS (Kg/Kwh)	0.507	0.491	0.534	0.550	0.595	0.609	0.793	1.100	1.333	2.935		
R Vol	0.757	0.737	0.822	0.787	0.853	0.810	0.814	0.827	0.793	0.696		
R Mec	0.754	0.734	0.712	0.678	0.645	0.636	0.56					
R Th	0.156	0.161	0.148	0.144	0.133	0.13	0.1	0.072	0.059	0.027		

PARAMETRES FIXES

Date des essais	14 / 05 / 1989	Temperature ambiante	24
Carburant	Butane	Poids specifique	2.6
Taux de compression	5.5	Ouverture des gaz	Pleine
Réglage Allumage	20° Av. PMH	Réglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	22.44	23.79	22.97	22.48	20.99	21.30	16.41	13.11	13.31	11.34
PU (Kw)	3.820	3.363	3.609	3.886	3.957	4.349	5.609	3.089	3.344	3.029
T (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
GAZ										
t (s)	73	65	58	54	50	48	47	42	44	44
(mm.H2O)	22	24	28	30	35	36	37.5	43	44	41
Air										
(Kwh)	19.76	21.55	25.14	26.94	31.43	32.33	33.68	38.61	39.51	36.82
CO (N.m)	6.5	7	7.5	8.5	9	9	9			
Friction										
PH (Kw)	0.82	0.99	1.18	1.47	1.7	1.84	1.98			
Air/Carb	15.96	15.5	16.14	16.10	17.39	17.17	17.51	17.95	19.24	17.93
Cs (Kg/Kwh)	0.439	0.413	0.432	0.430	0.457	0.433	0.533	0.697	0.614	0.678
R Uel	0.793	0.769	0.808	0.787	0.841	0.799	0.773	0.827	0.793	0.696
R Mec	0.775	0.773	0.754	0.726	0.7	0.703	0.646			
R Th	0.18	0.191	0.183	0.183	0.173	0.183	0.148	0.113	0.129	0.117

-----PARAMETRES FIXES-----

Date des essais	09/05/1989	Temperature ambiante	21.2
Carburant	Butane	Poids specifique	2.6
Taux de compression	6.5	Ouverture des gaz	Pleine
Reglage Allumage	10° Av. PMH	Reglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	28.87	25.97	24.96	21.68	19.52	17.67	10.84	10.61	8.03	1.80
PU (Kw)	3.628	3.672	3.921	3.746	3.679	3.609	2.384	2.499	2.017	0.48
T (°C)	22.5	22.5	22.5	22.0	22.0	22.0	21.5	21.5	21.5	21.5
CAZ										
t (s)	60	59	54	50	48	46	44	46	46	47
(mm H2O)	24	26.5	30	33	37	36.5	40	43.5	43.0	36.5
Air										
(Kg/h)	21.92	24.2	27.4	30.14	33.79	33.33	36.53	39.73	39.27	33.33
CO (N.m)	8.5	9	9	9	9.5	10	10			
Friction										
PU (Kw)	1.07	1.27	1.41	1.56	1.79	2.04	2.2			
Air/Carb	14.43	15.67	16.23	16.51	17.77	16.8	17.58	19.98	19.75	17.13
Cs (Kg/Kwh)	0.419	0.421	0.430	0.487	0.517	0.550	0.872	0.795	0.986	4.053
R Vol	0.872	0.856	0.872	0.872	0.896	0.816	0.83	0.843	0.781	0.624
R Mec	0.772	0.743	0.735	0.707	0.673	0.639	0.52			
R Th	0.189	0.188	0.184	0.162	0.153	0.144	0.091	0.099	0.08	0.019

PARAMETRES FIXES

Date des essais	10/05/1989	Temperature ambiante	20.6
Carburant	Butane	Poids specifique	2.6
Taux de compression	6.5	Ouverture des gaz	Pleine
Réglage Allumage	20° Av. PMH	Reglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	28.87	27.05	26.20	30.11	26.57	19.69	11.86	7.58	4.37	1.45
PU (Kw)	3.628	3.824	4.115	5.202	5.009	4.02	2.609	1.785	1.099	0.387
T (°C)	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5
GAZ										
t (s)	61	59	60	46	48	50	52	53	54	62
(mm. H2O)	22	24	28.5	33	37.5	36.5	36	39	40	35
Air (Kg/h)	20.17	22.0	26.12	30.25	34.37	33.46	33.0	35.75	36.66	32.08
CO (N.m)	8.5	9	9	9	9.5	10	10	—	—	—
Friction										
PU (Kw)	1.07	1.27	1.41	1.56	1.79	2.04	2.2	—	—	—
Air/Carb	13.45	14.19	17.14	15.22	18.04	18.29	18.76	20.72	21.65	21.75
Cs (Kg/Kwh)	0.413	0.405	0.370	0.382	0.380	0.455	0.674	0.967	1.541	3.816
R Vol	0.8	0.776	0.83	0.873	0.909	0.817	0.749	0.757	0.728	0.599
R Mec	0.772	0.75	0.744	0.77	0.737	0.663	0.543	—	—	—
R Th	0.191	0.195	0.213	0.207	0.208	0.174	0.117	0.082	0.051	0.021

PARAMETRES FIXES

Date des essais	14 / 05 / 1989										Temperature ambiante	24
Carburant	Butane										Poids specifique	2.6
Taux de compression	7.5										Ouverture des gaz	Pleine
Réglage Allumage	10° Av. PMH										Reglage Carburateur	2.0 tours
N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550		
CO (N.m)	27.35	26.86	27.02	26.05	25.31	24.46	22.71	19.87	16.26	14.95		
PU (Kw)	3.437	3.769	4.244	4.502	4.772	4.995	4.995	4.682	4.087	3.992		
T (°C)	24	24	24	23.7	24	24	24	24	24	24		
GAZ												
t (s)	65	61	54	49	47	43	43	43	43	42		
(mm.H2O)	22	24.5	29.5	31.5	37.5	38.5	39	41.5	44	44		
Air (Kg/h)	19.76	22	26.49	28.29	33.68	34.57	35.02	37.27	39.51	39.51		
CO (N.m)	9	9.2	9.5	9.8	10	10.5	11					
Friction												
PU (Kw)	1.13	1.3	1.49	1.69	1.88	2.14	2.42					
Air/Carb	14.16	16.01	15.78	15.29	17.46	16.4	16.61	17.67	18.74	18.30		
Cs (Kg/Kwh)	0.406	0.394	0.396	0.411	0.404	0.422	0.422	0.450	0.516	0.541		
R Uol	0.793	0.849	0.851	0.826	0.902	0.854	0.804	0.798	0.793	0.747		
R MEC	0.752	0.743	0.74	0.727	0.717	0.7	0.674					
R TH	0.195	0.2	0.2	0.192	0.195	0.187	0.187	0.175	0.153	0.146		

PARAMETRES FIXES

Date des essais	10 / 05 / 1989	Temperature ambiante	23
Carburant	Butane	Poids spécifique	2.6
Taux de compression	7.5	Ouverture des gaz	Plaine
Réglage allumage	20° Av. PMH	Réglage Carburateur	2.0 tours

N (Revol/min)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
P0 (N.m)	29.82	31.00	27.23	25.63	31.72	30.53	28.49	26.79	23.89	18.30
P1 (Kw)	3.748	4.383	4.277	4.429	5.98	6.234	6.266	6.312	6.005	4.887
T (°C) Gaz	23.5	23.5	23.5	23.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
t (s)	74	53	64	58	40	43	39	39	40	43
Taux H2O Air	22.5	26	29	33	39	38	38.5	41.5	43	40
(Kg/h)	20.33	23.49	26.2	29.8	25.23	34.33	34.78	37.49	38.85	36.14
CG (N.m)	9	9.2	9.5	9.8	10	10.5	11	—	—	—
Friction										
P2 (Kw)	1.13	1.3	1.49	1.69	1.88	2.14	2.42	—	—	—
App/Carb	14.32	15.78	15.86	16.08	18.17	16.95	16.79	17.69	17.48	17.05
Co (Kg/Kwh)	0.379	0.340	0.386	0.418	0.324	0.325	0.331	0.336	0.370	0.434
P Vol	0.814	0.876	0.839	0.868	0.94	0.846	0.796	0.80	0.777	0.681
P Mec	0.768	0.771	0.741	0.723	0.76	0.744	0.721			
P Tr	0.209	0.233	0.205	0.189	0.244	0.243	0.239	0.235	0.214	0.182

-PARAMETRES FIXES-

Date des essais	15 / 05 / 1989										Temperature ambiante	21.5
Carburant	Butane										Poids specifique	2.6
Taux de compression	8.5										Ouverture des gaz	Pleine
Reglage Allumage	10° Av. PMH										Reglage Carburateur	2.0 tours
N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550		
CO (N.m)	32.42	32.86	31.70	30.66	28.26	27.30	25.35	21.92	19.26	16.43		
PU (Kw)	4.074	4.646	4.98	5.298	5.328	5.574	5.574	5.165	4.839	4.388		
T (°C)	23	23	23	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5		
GAZ												
t (s)	59	53	49	47	45	41	41	41	40	41		
(mm.H2O)	24	28	30.5	35	40.5	40	41	43.5	44	43.5		
Air												
(Kg/h)	21.88	25.53	27.90	31.91	36.92	36.46	37.38	39.66	40.11	39.66		
CO (N.m)	11.5	12	12	12	12.3	12.7	12.6					
Friction												
PU (Kw)	1.45	1.7	1.88	2.07	2.32	2.59	2.81					
Air/Carb	14.19	14.87	14.97	16.51	18.29	16.46	16.87	17.9	17.67	17.9		
Cs (Kg/Kwh)	0.379	0.369	0.373	0.365	0.379	0.397	0.397	0.429	0.469	0.505		
R Uol	0.871	0.903	0.886	0.924	0.98	0.894	0.85	0.842	0.799	0.743		
R Mec	0.738	0.732	0.725	0.719	0.697	0.682	0.664					
R Th	0.209	0.214	0.212	0.217	0.209	0.199	0.199	0.184	0.169	0.157		

PARAMETRES FIXES

Date des essais	15 / 05 / 1989										Temperature ambiante	21.5	
Carburant	Butane										Poids specifique	2.6	
Taux de compression	8.5										Ouverture des gaz	Pleine	
Reglage Allumage	20° Av. PMH										Reglage Carburateur	2.0 tours	
N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550			
CO (N.m)	31.27	29.89	36.49	30.66	29.57	28.34	26.90	24.91	22.18	20.57			
PU (Kw)	3.930	4.226	5.731	6.298	5.574	5.787	5.915	5.870	5.574	5.493			
T (°C)	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5			
GAZ													
t (s)	65	59	55	50	46	45	45	44	43	42			
(mm.H2O)	22.5	24.5	29	32.5	36	36	38	40.5	42	42.5			
Air													
(Kg/h)	20.51	22.33	26.44	29.63	32.82	32.82	34.64	36.92	38.29	38.74			
CO (N.m)	11.5	12	12	12	12.3	12.7	12.6						
Friction													
PU (Kw)	1.45	1.7	1.88	2.07	2.32	2.59	2.81						
Air/Carb	14.68	14.51	16.01	16.31	16.26	16.26	17.16	17.89	18.13	17.92			
Cs (Kg/kwh)	0.356	0.364	0.288	0.343	0.354	0.349	0.341	0.352	0.379	0.394			
R Vol	0.817	0.791	0.842	0.858	0.871	0.804	0.788	0.784	0.762	0.726			
R Mec	0.731	0.713	0.752	0.719	0.706	0.691	0.678						
R Th	0.222	0.217	0.274	0.23	0.223	0.227	0.232	0.225	0.209	0.201			

-----PARAMETRES FIXES-----

Date des essais	14 / 05 / 1989										Temperature ambiante	25°C
Carburant	Butane										Poids specifique	2.6
Taux de compression	9.5										Ouverture des gaz	pleine
Reglage Allumage	10° Av. PMH										Reglage Carburateur	2.0 tours
N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550		
CO (N.m)	30.40	29.93	30.28	29.30	28.72	27.72	25.35	21.59	18.98	19.05		
PU (Kw)	3.820	4.231	4.756	5.063	5.413	5.661	5.574	5.087	4.771	5.087		
T (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25		
GAZ												
t (s)	67	64	58	52	48	46	46	45	44	43		
(mm H2O)	22.5	25	28.5	32.5	36	36.5	38.5	42	42.5	44		
Air												
(Kg/h)	20.09	22.32	25.44	29.01	32.14	32.6	34.37	37.49	37.94	39.28		
CO (N.m)	6.5	7	7.5	8.2	8.5	8.5	8.7	8.7	9.5			
Friction												
PU (Kw)	0.82	0.99	1.18	1.42	1.6	1.74	1.91	2.05	2.39			
Air/Carb	14.89	15.8	16.33	16.69	17.07	16.59	17.49	18.67	18.47	18.69		
Cs (Kg/Kwh)	0.353	0.334	0.328	0.343	0.348	0.347	0.352	0.395	0.430	0.413		
R. Uol	0.809	0.799	0.82	0.85	0.863	0.808	0.791	0.806	0.764	0.745		
R. Mec	0.824	0.81	0.801	0.781	0.772	0.765	0.744	0.713	0.666			
R. Th	0.224	0.237	0.241	0.23	0.224	0.228	0.224	0.20	0.184	0.195		

PARAMETRES FIXES

Date des essais	14 / 05 / 1989	Temperature ambiante	25 °C
Carburant	Butane	Poids specifique	2.6
Taux de compression	9.5	Ouverture des gaz	Pleine
Réglage Allumage	20° Av. P.M.H.	Réglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	29.25	30.63	31.70	31.21	29.89	28.97	26.90	24.75	22.85	22.32
PU (Kw)	3.676	4.33	4.98	5.392	5.634	5.915	5.915	5.832	5.743	5.960
T (°C)	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5
GAZ										
t (s)	67	62	59	54	51	49	48	47	47	43
(mm. H2O)	21.5	24	28	31.5	34.5	34	37	40.5	41	38
Air										
(Kg/h)	19.19	21.42	24.99	28.12	30.8	30.35	33.03	36.15	36.6	33.92
CO (N.m)	6.5	7	7.5	8.2	8.5	8.5	8.7	8.7	9.5	
Friction										
PU (Kw)	0.82	0.99	1.18	1.42	1.6	1.74	1.91	2.05	2.39	
Air/Carb	14.25	14.72	16.35	16.93	17.41	16.48	17.57	18.33	19.07	16.17
Cs (Kg/Kwh)	0.366	0.336	0.307	0.310	0.314	0.311	0.318	0.329	0.334	0.352
R Vol	0.773	0.767	0.806	0.824	0.827	0.752	0.76	0.777	0.737	0.643
R Mec	0.818	0.814	0.809	0.792	0.779	0.773	0.756	0.74	0.706	
R Th	0.216	0.235	0.257	0.255	0.252	0.254	0.249	0.24	0.236	0.225

PARAMETRES FIXES

Date des essais	14/05/1989	Temperature ambiante	25°C
Carburant	Butane	Poids specifique	2.6
Taux de compression	10.5	Ouverture des gaz	Pleine
Réglage Allumage	10° Av. P.M.H.	Réglage Carburateur	2.0 tours

N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550
CO (N.m)	30.81	31.77	32.11	31.62	31.15	29.82	26.90	24.03	21.54	19.95
PH (Kw)	3.872	4.492	5.043	5.464	5.88	6.089	5.915	5.661	5.413	5.328
T (°C)	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5
GAZ										
t (s)	68	61	56	51	47	46	46	45	44	42
(mm.H2O)	22.5	27.5	29.5	32.5	36.5	36	39	43.5	44	40
Air										
(Kg/h)	20.09	24.55	26.33	29.01	32.58	32.14	34.81	38.83	39.28	35.71
CO (N.m)	8.5	9	9	10	10	10	10.5	10.5		
Friction										
PU (Kw)	1.07	1.27	1.41	1.73	1.88	2.04	2.31	2.47		
Air/Carb	15.14	16.6	16.35	16.4	16.97	16.38	17.75	19.37	19.16	16.62
CS (Kg/Kwh)	0.343	0.329	0.319	0.324	0.326	0.322	0.332	0.354	0.379	0.403
R Vol	0.809	0.879	0.849	0.85	0.875	0.797	0.802	0.834	0.791	0.677
R Mec	0.784	0.779	0.781	0.76	0.757	0.749	0.719	0.696		
R Th	0.231	0.24	0.247	0.244	0.242	0.245	0.238	0.223	0.209	0.196

PARAMETRES FIXES

Date des essais	14 / 05 / 1989										Temperature ambiante	25 °C
Carburant	Butane										Poids specifique	2.6
Taux de compression	10.5										Ouverture des gaz	Pleine
Reglage Allumage	20° Av. P.M.H.										Reglage Carburateur	2.0 tours
N (tr/mn)	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550		
CO (N.m)	29.70	33.30	33.18	34.22	32.99	32.31	28.49	25.84	24.93	23.46		
PU (Kw)	3.732	4.708	5.212	5.913	6.218	6.599	6.266	6.009	6.266	6.266		
T (°C)	26	26	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5		
t (s)	70	61	57	52	48	46	46	46	45	43		
(mm H2O)	22.5	26	29	32	36.5	35.5	37.5	41	43	39.5		
(Kg/h)	20.09	23.21	25.89	28.57	32.58	31.69	33.47	36.6	38.38	35.26		
CO (N.m)	8.5	9	9	10	10	10	10.5	10.5				
Friction												
PU (Kw)	1.07	1.27	1.41	1.73	1.88	2.04	2.31	2.47				
Air/Carb	15.61	15.72	16.36	16.46	17.34	16.16	17.07	18.66	19.15	16.81		
cs (Kg/Kwh)	0.345	0.314	0.304	0.293	0.302	0.297	0.313	0.322	0.320	0.335		
R Vol	0.809	0.831	0.834	0.837	0.875	0.786	0.771	0.786	0.773	0.669		
R Mec	0.777	0.787	0.787	0.774	0.768	0.764	0.731	0.711				
R Th	0.229	0.252	0.26	0.269	0.261	0.266	0.253	0.245	0.247	0.236		

