

UNIVERSITE D'ALGER

8/75

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MECANIQUE

103c
T1

LABORATOIRE D'ENERGETIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE
SUR CHAMBRE DE COMBUSTION

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
GN & GNL
BIBLIOTHEQUE

11 PLANS

1

Responsable du projet
M. Gilbert MATTON
Professeur

Dirigé par
M. Jean-Pierre MULLER
Ingénieur-Assistant

Etudié par
MM. Hamlaoui BOUGHOUAS
Djamal BOUMAZA
Moussa ZAIRI

PROMOTION 1975

LABORATOIRE D'ENERGETIQUE

**ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE
SUR CHAMBRE DE COMBUSTION**

GN & GNL

**Responsable du projet
M. Gilbert MATTON
Professeur**

**Dirigé par
M. Jean-Pierre MULLER
Ingenieur-Assistant**

**Etudié par
MM. Hamlaoui BOUGHOUAS**

Djamal BOUMAZA

Moussa ZAÏRI

Promotion : 1975

* PARENTS *

Z.M B.H B.D
[Signature] *[Signature]* *[Signature]*
B.Df

R E M E R C I E M E N T S

Que M.M MATTON et MULLER daignent trouver ici toute
notre gratitude pour leurs conseils fructueux et l'aide
fournis pour la bonne marche de cette étude .

Nous saisissons l'occasion pour remercier le chef du
département, tous les professeurs, ainsi que tous ceux qui
ont contribué à notre formation .

T A B L E D E S M A T I E R E S

	<u>Pages</u>
Chapitre I:	
Diagramme H S ϕ	
I.1 Généralités.....	1.1
I.2 Diagramme enthalpie entropie de l'air.....	1.1
I.2.1 Construction.....	1.1
I.2.2 Utilisation.....	1.2
I.3 Diagramme H S ϕ	1.2
I.3.1 Définition de la richesse.....	1.2
I.3.2 Construction du diagramme enKj/Kg.....	1.3
I.3.3 Diagramme H S ϕ molaire	1.5
I.4 Utilisation des diagrammes	1.5
I.4.1 Application	1.5
I.5 Remarques	1.6
Chapitre II:	
Diagramme enthalpie richesse.....	
II.1 Introduction.....	2.1
II.2 Bilan d'énergie.....	2.1
II.3 Construction du diagramme H ϕ	2.2
II.4 Utilisation du dia gramme H ϕ	2.2
II.5 Remarques	2.4
III Calcul du rapport de mélange stoechiométrique GN ,GNL...	3.1
IV La dissociation	4.1
Annexe I: courbes C _p et ϵ pour le GN et le GNL	A1
Annexe II: valeurs pour l'air relatives au diagramme H S....	A2
Annexe III: " " GN " " " H S ϕ ..	A3
Annexe IV: " " GNL " " " " ••	A3
Annexe V: " " GN " " " HQ ϕ ..	A5

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

Les machines thermiques fonctionnent suivant un cycle approprié qui ne cesse d'évoluer. Cette évolution concerne la forme du cycle thermique, les valeurs extrêmes de celui-ci à savoir température et pression, mais un autre facteur important la nature du fluide utilisé dont il faut connaître les données sur les propriétés physiques que seules les expériences bien précises peuvent nous les fournir. Mais ces données doivent satisfaire à une deuxième condition à savoir une utilisation pratique, facile, La solution est donnée par les diagrammes Enthalpie Entropie pour le fluide considéré. Et cette présentation des données trouve son importance lorsqu'on a à utiliser un moteur à combustion interne comme par exemple une turbine à gaz. Le fluide se détendant dans cette turbine n'est ni homogène, ni de composition définie, mais un gaz de combustion dont la composition varie avec la nature du combustible utilisé et la richesse du mélange combustible comburant.

Le problème consiste à établir un diagramme Enthalpie Entropie qui soit non seulement suffisamment précis et facilement utilisable mais aussi applicable à toute la gamme de gaz de combustion pouvant être rencontrée dans une installation de turbine à gaz ou réacteur.

Nous avons été amené à établir plusieurs diagrammes d'utilisation différentes afin de résoudre les problèmes

Les données numériques ayant servi à la construction des diagrammes ont été relevées sur les listings de l'I F P.

Les listings étant calculés pour des valeurs de température non entières nous avons été obligé d'interpoler tous les résultats pour permettre de tracer des diagrammes avec des valeurs rondes .

I.1 Généralités/

L'enthalpie de l'air considéré comme un gaz parfait s'écrit:

$$H = C_p T + C_{te}$$

et ses chaleurs massiques C_p et C_v sont indépendantes de la pression et varient seulement avec la température. Tandis que pour l'air considéré comme un gaz réel, les chaleurs massiques varient non seulement avec la température mais aussi avec la pression, et cela est dû au fait qu'entre les molécules d'un gaz s'exerce une attraction mutuelle qui engendre une pression intérieure. L'élévation de température rapproche les propriétés du gaz réel de celles d'un gaz parfait, ce qui permet de considérer l'influence de la pression sur l'enthalpie comme pratiquement négligeable. Cela nous amène à conclure que la variation de la chaleur spécifique des gaz avec la température est importante et bien définie par contre sa variation avec la pression reste encore moins précise mais peu appréciable. Rassemblant ces conditions, les gaz réels peuvent être assimilés aux gaz parfaits tout au moins dans le domaine des turbines à gaz et les relations relatives aux transformations thermodynamiques restent toujours valables.

$$H = H_0 + \int_0^T C_p dT$$

$$S = S_0 + \int_{T_0}^T C_p \frac{dT}{T}$$

T_0 température prise pour origine

I.2 Diagramme Enthalpie Entropie de l'air

I.2.1 Construction

Les listings de l'IFP, nous donnent les valeurs de l'enthalpie et de l'entropie en fonction de la température et pour différentes pressions. Pour la commodité de l'utilisation, nous avons interpolé les valeurs de l'enthalpie et de l'entropie pour des températures rondes.

Nous portons en abscisse une échelle linéaire d'entropie en $J/Kg \cdot K$ sur l'axe des ordonnées également une échelle linéaire d'entropie d'enthalpie en KJ/Kg et comme l'enthalpie de l'air ne dépend que de la température nous pouvons aussi porter une échelle de température non linéaire sur l'axe des ordonnées.

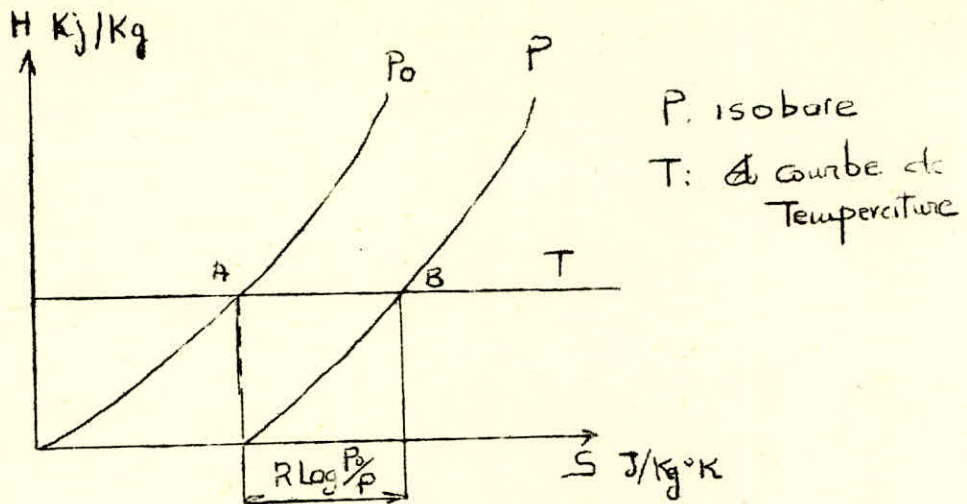


Fig .I.1

Nous prenons pour origine: ($T = 300^{\circ}\text{K}$, $S = 6500 \text{ J/Kg}^{\circ}\text{K}$)

D'où nous pouvons tracer l'isobare P_0 . Et prenant celle-ci comme référence nous traçons toutes les isobares (de 0,2 à 20 bars) en faisant une translation horizontale de l'isobare P_0 d'après la relation:

$$S = S_0 - R \log \frac{P}{P_0} \quad (\text{Log népérien})$$

Pour chaque pression il suffit de déterminer une seule grandeur numérique savoir l'entropie de l'air S correspondant à la température T connaissant la constante R des gaz parfaits qui a été calculée au préalable. Et comme l'enthalpie de l'air est fonction de la température, nous pouvons porter les droites de températures sur le diagramme qui sont des isenthalpiques

I.2.2 Utilisation

Ce diagramme permet de déterminer complètement l'état de l'air à la sortie d'un compresseur donc à l'entrée de la chambre de combustion. Mais pour la connaissance de la détente des gaz de combustion dans la turbine, il est nécessaire d'avoir un diagramme approprié $H S \phi$.

I.3 Diagramme $H S \phi$

I.3.1 Définition de la richesse

La composition d'un fluide évoluant dans une installation de turbo-motrice à gaz ou dans un moteur est variable. La compression s'effectue sur atmosphérique alors que c'est le mélange gazeux qui subit la détente (mélange gazeux provenant de la combustion) la composition de ce mélange dépend à la fois de la nature du carburant et de l'excès d'air comburant.

On définit la richesse par le rapport:

$$\phi = \frac{C/A}{(C/A)_{St}} = \frac{f}{f_s} \quad \text{où } f = C/A \quad f_s = (C/A)_{St}$$

$$f = c/A = \frac{\text{masse de carburant qui a servi à la combustion}}{\text{masse d'air qui a servi à la combustion}}$$

$$f_s = (C/A)_{St} = \frac{\text{masse théorique de carburant}}{\text{masse théorique d'air}}$$

pour plus de détails se référer au paragraphe : "Dissociation"

I.3.2 Construction du diagramme H S Φ

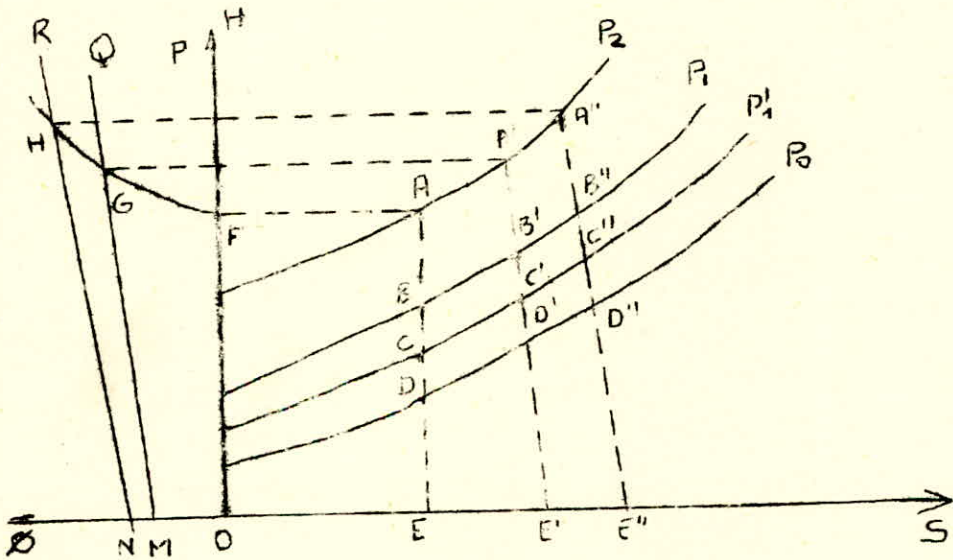
Reprenons le diagramme Enthalpique de l'air atmosphérique et considérons un gaz de composition définie par Φ_1 de température initiale T, se détendant isentropiquement de P2 à P1.

D'après les listings de l' I F P, l'enthalpie du gaz est supérieure à celle de l'air pour une certaine température T. Les listings nous donnent aussi pour les valeurs de T et de $\frac{P_2}{P_1}$ la variation d'entropie du gaz donc l'état final de la est fixé (point B'), ainsi que l'enthalpie (début de détente A')

Faisons maintenant varier la pression P1 nous obtenons la ligne A' B' C' D' E' qui est pratiquement une droite et qui fixe dans le système Enthalpie - Entropie l'inclinaison de l'isentropique du gaz défini pour Φ_1

De même pour Φ_2 la ligne A'' B'' C'' D'' E'' un peu plus inclinée que la précédente nous donne l'inclinaison de l'isentropique.

Sur l'axe des abscisses et à gauche du diagramme de l'air traçons MQ et NR respectivement parallèles à A' E' et A'' E''. Projetons les points A', A'', A''' respectivement sur OP, MQ, NR on obtient les points F, G, H la courbe obtenue à partir de ces points nous donne la courbe de température du gaz considéré et la droite FA correspond à la droite de température de l'air. (Fig 2)



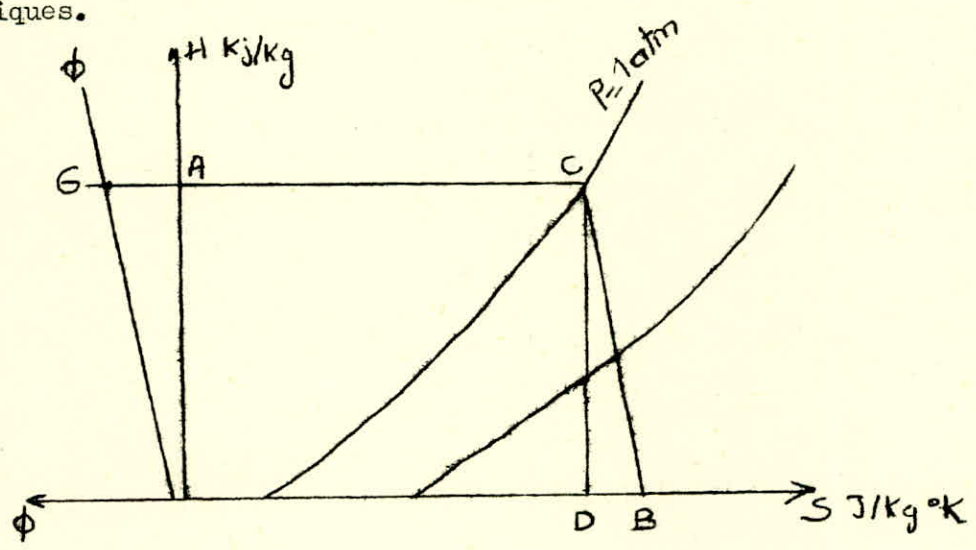
(Fig 2)

Mais cette méthode n'est pas suffisamment précise. Pour améliorer la précision du diagramme il faudrait tracer les droites de richesses point par point.

Pour une température T et une richesse \mathbb{M} les listings donnent l'enthalpie H et l'entropie S du gaz (Fig 3).

Par A correspondant à l'enthalpie H du gaz menons une isenthalpique qui coupe l'isobare 1 atm au point C. Par ce point faisons une détente théorique CD d'où S_D . L'état final de la détente réelle nous est donné par les listings d'où S_B . A partir de A nous portons $S_B - S_D$ d'où un point G de la détente de richesse \mathbb{M} . Pour d'autres températures faisons la même opération que précédemment on obtient point par point la droite de richesse \mathbb{M}_1 . On opère de la même manière pour les autres droites $\mathbb{M}_2, \mathbb{M}_3 \dots$ Cette méthode nous permet de trouver les points F, G, H, F', G', H'....

correspondant chaque'un à une valeur de \mathbb{M} et pour une même température. En reliant ces points nous obtenons les courbes de températures du gaz. Chaque droite de richesse porte une échelle propre de températures qui n'est pas linéaire et qui détermine par sa pente la direction des isentropiques.



(fig 3)

I.3.3 Diagramme Molaire H S ϕ

Une propriété remarquable des gaz de combustion consiste dans le fait que leur caractéristiques thermodynamiques rapportées à l'unité de masse molaire ne dépendent pas de leur composition et ne sont fonction que d'un seul paramètre ϕ . Cette propriété permet de construire le diagramme enthalpie entropie (molaire) des gaz de combustion dont la construction est identique à celle du diagramme H S ϕ en KJ/Kg. Il suffit de multiplier les enthalpies et les entropies par la masse molaire :

- pour l'air $M = 28,97 \text{ Kg/Kmole}$ (indépendante de la température)
- pour les gaz de combustion, la masse molaire relative à chaque richesse et température.

I.4. Utilisation des diagrammes

Le diagramme Enthalpie entropie à la fois valable pour l'air et les gaz de combustion permet d'étudier les transformations thermodynamiques dans une installation de turbine ou de réacteur.

I.4.1 Exemple d'application:

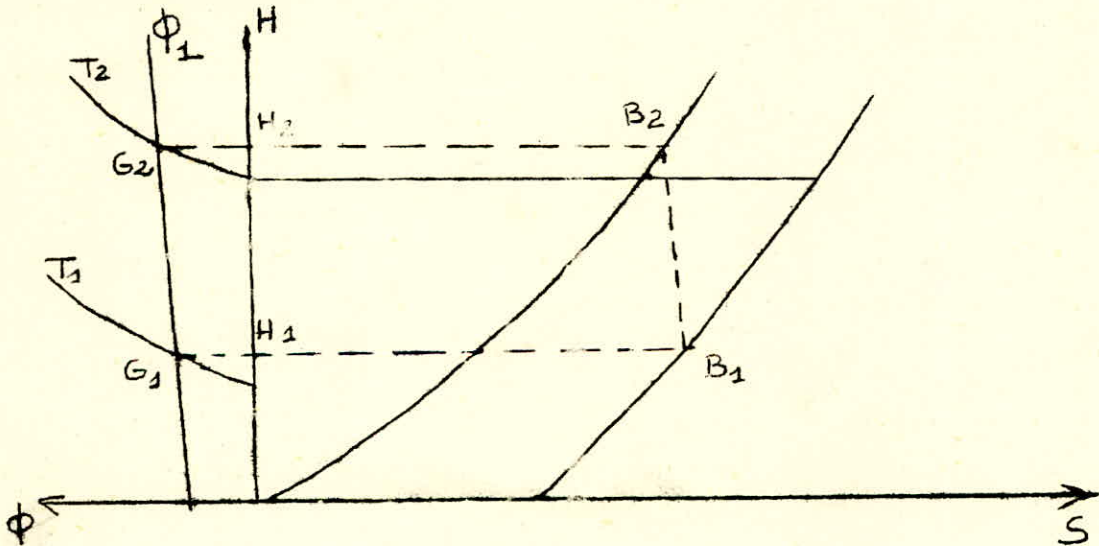


Fig I.

Etudions la détente isentropique d'un gaz de combustion défini par la richesse ϕ , entre la pression P_2 et P_1 . L'intersection des courbes T_2 et ϕ_1 fournit le point G_2 à gauche de l'axe OH . Ce point ensuite transporté horizontalement jusqu'en B_2 sur l'isobare P_2 . Soit H_2 l'enthalpie commune de ces deux points. La droite figurative de la détente B_2B_1 est obtenue en menant une parallèle à la courbe ϕ_1 . La température de fin de détente est lue sur l'isotherme inclinée qui passe par le point G_1 intersection de l'isenthalpique B_1G_1 .

D'où la chute d'enthalpie : $\Delta H = H_2 - H_1$

-- Exemple numérique:

Données:

- $P_2 = 15 \text{ atm}$
- $P_1 = 1 \text{ atm}$
- $\phi = 0,3$
- $T_2 = 1600^\circ\text{K}$

En faisant la détente de P_2 à P_1 le diagramme nous donne:

- $H_2 = 1590 \text{ Kj/Kg}$
- $H_1 = 605 \text{ Kj/Kg}$
- $T_1 = 570^\circ\text{K}$

D'où la chute d'enthalpie au cours de la détente:

$$\Delta H = 925 \text{ Kj/Kg}$$

I.5 Remarques:

I.5.1 Diagramme H S ϕ Kj/Kg

Ces diagrammes ont été établis pour le GN et GNL.

Origine: - $H = 0 \text{ Kj/Kg}$ à $T = 300^\circ\text{K}$ (GN)

$H = 300 \text{ Kj/Kg}$ à $T = 300^\circ\text{K}$ (GNL)

Pour les deux diagrammes nous avons sommes limités à la richesse 0,7

Car au delà des courbes de richesse ne sont plus des, ceux-ci est du au phénomène de dissociation provoqué par les trop fortes températures.

I.5.2 Diagramme H S ϕ Kj/Kmole

De même ces diagrammes ont été établis pour le GN et GNL.

Pour la précision et la facilité d'utilisation du diagramme, nous avons été amené à choisir une échelle qui ne nous permet pas d'aller au delà de la richesse 0,4.

I.5.3 Diagramme H S (Kj/Kg) pour $\phi = 0,3$

Il nous permet de vérifier la validité du diagramme H S ϕ (Kj/Kg). Pour cela nous allons faire un exemple d'application en des mêmes données que dans I.4.1.

Application

Soit la détente de P_2 à P_1

$$P_2 = 5 \text{ atm} , P_1 = 1 \text{ atm} , T_2 = 1400^\circ\text{K}$$

à partir du diagramme $\phi = 0,3$ on détermine:

$$H_2 = 1280 \text{ Kj/Kg} \quad H_1 = 725 \text{ Kj/Kg} \quad T_1 = 956^\circ\text{K}$$

En appliquant la même détente pour le diagramme H S ϕ nous trouvons:

$$H_2 = 1275 \text{ Kj/Kg} \quad H_1 = 725 \text{ Kj/Kg} \quad T_1 = 973^\circ\text{K}$$

ON constate que les résultats donnés par les deux diagrammes sont très voisins .

LE DIAGRAMME ENTHALPIE-RICHESSE

II.1 Introduction

Ce diagramme est établi pour les gaz de combustion.

Les paramètres utilisés sont:

- L'enthalpie massique (globale) h et la température des gaz.
- La richesse ϕ du mélange initial de combustible et de comburant.

II.2 Bilan énergétique:

Le bilan énergétique permet d'écrire:

$$\dot{m}_a \cdot h_a + \dot{m}_k \cdot h_k = (\dot{m}_a + \dot{m}_k) \cdot h \quad (1)$$

h : enthalpie globale des gaz de combustion. (Kj/Kg)

h_a : enthalpie globale de l'air à l'entrée. (")

h_k : enthalpie globale du carburant (GN à 298°K) "

\dot{m}_a : débit massique de l'air. (Kg/s)

\dot{m}_k : débit massique de carburant. (Kg/s)

Divisons l'expression (1) par \dot{m}_a on obtient:

$$h_a + \frac{\dot{m}_k}{\dot{m}_a} h_k = \left(1 + \frac{\dot{m}_k}{\dot{m}_a}\right) \cdot h \quad (2)$$

Sachant que :

$$f = \frac{\dot{m}_k}{\dot{m}_a} = \text{rapport du mélange carburant-air (C/A)}$$

$$f_s = (C/A)_{st} = \text{ " " " stoechiométrique.}$$

$$\phi = (f/f_s) = \text{richesse du mélange}$$

L'expression (2) devient:

$$\boxed{h_a + \phi f_s h_k = (1 + \phi f_s) h}$$

La quantité $(1 + \phi f_s) h$ représente l'enthalpie des gaz brûlés (Kj/Kg)

La quantité $(h_a + \phi f_s h_k)$ représente l'équation de la droite de mélange.

Les valeurs de h_a sont obtenues pour chaque température ronde,

par interpolation des valeurs données par les listings de l'I.F.P.

Les valeurs de f_s pour le GN et le GNL ont été calculées au chapitre

- pour le GN $f_s = 0,06555$

- pour le GNL $f_s = 0,05928$

II.3 Construction du diagramme:

La quantité $(1 + \phi f_s)h$, représentant l'enthalpie des gaz brûlés par unité de temps, et rapportée à l'unité de masse d'air consommée, est figurée en ordonnée pour chaque température ronde; la richesse (ϕ) est figurée en abscisse ($\phi = 0$ à 1,7).

Les isothermes sont représentées par un réseau de courbes présentant un minimum au voisinage des conditions stoechiométriques ($\phi = 1$)

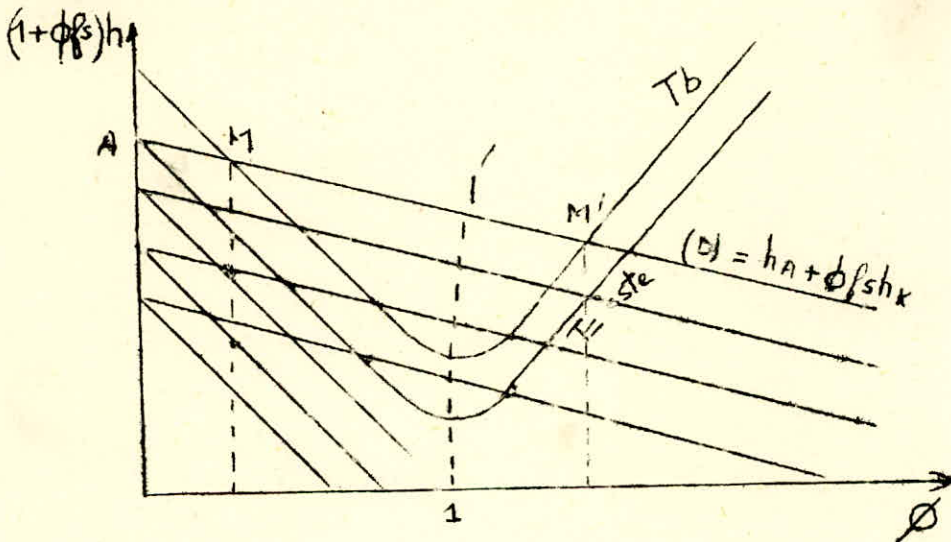


fig II.1

La droite (D) d'équation $y = h_A + \phi \cdot f_s \cdot h_k$ ou droite de mélange est déterminée si l'on connaît deux points (par ex: A et M) fig II.1
 (A): ordonnée h_A ($\phi = 0$) s'obtient à partir des tables d'enthalpie de l'air ($T_r = 0^\circ K$).

(M): s'obtient à partir de ϕ . Les valeurs f_s et h_k sont constantes et peuvent être calculées pour le carburant utilisé.

Les points M et M' sont à la même température (T_b) mais sont à deux richesses différentes.

La droite (D) a été tracée pour une température de sortie de la soufflante donnée, en répétant la même opération pour des températures différentes on obtient un réseau de droites parallèles.

II.4 utilisation du diagramme H- ϕ

Le diagramme présente plusieurs utilisations

- Détermination de la température de fin de combustion T_b .
- on connaît la température d'entrée d'air T_3 et la richesse ϕ .

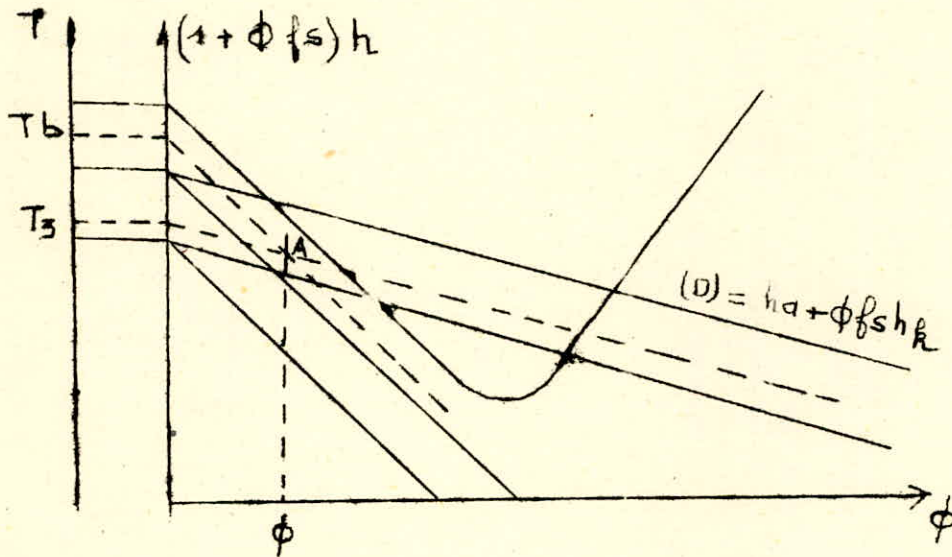


fig II.2

On trace la droite de mélange $h_a + \phi f_s h_k$ correspondant à T_3 .
Soit A l'intersection de cette droite avec la verticale élevée à partir de la richesse ϕ . A partir de A on mène une parallèle aux isothermes, d'où la lecture de T_b .

- Détermination de la richesse ϕ , connaissant T_3 et T_b .
- Détermination du rendement :

Le rendement de combustion par le rapport de l'augmentation d'enthalpie théorique.

Pour une combustion sans dissociation (mélange pauvre):

$$\eta = \frac{h_2 - h_1}{h_f - h_1} \quad (1)$$

h_2 = enthalpie des gaz brûlés dans la section de sortie à la température T_2

h_1 = enthalpie du mélange air combustible dans la section d'entrée à la température T_1 .

h_f = enthalpie des gaz de combustion sans dissociation dans la section de sortie à la température T_f .

Comme T_2 est voisin de T_f (température théorique de combustion sans dissociation), la relation (1) devient:

$$\eta_T = \frac{T_2 - T_1}{T_f - T_1} = \frac{T_{\text{réel}}}{T_{\text{théorique}}}$$

En tenant compte de la dissociation, on définit l'enthalpie h_b des gaz de combustion et le rendement a pour expression:

$$\eta' = \frac{h_2 - h_1}{h_b - h_1}$$

en fonction des températures on obtient:

$$\eta'_T = \frac{T_2 - T_1}{T_b - T_1}$$

Le diagramme H- ϕ permet de déterminer directement le rendement:

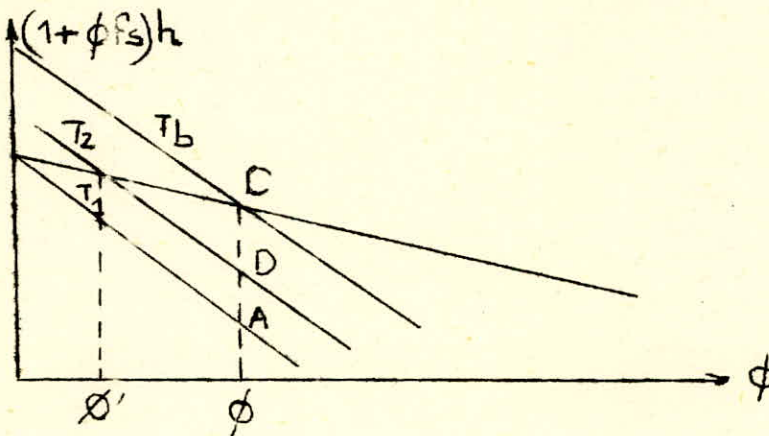


Fig- II.3 -

Le rendement est défini par:

$$\eta' = \frac{AB}{AC}$$

AC représente l'énergie théoriquement libérée par la combustion pour 1 Kg d'air consommé.

En fonction des températures le diagramme donne (Fig-II.3-):

$$\eta'_T = \frac{T_2 - T_1}{T_b - T_1}$$

II.5 Remarques

Plusieurs diagrammes H- ϕ ont été tracés pour plusieurs pressions (1;3;5;10, atm) pour le GN et pour $p = 1$ atm pour le GNL.

Le diagramme pour une atmosphère ($p = 1$ atm) peut être utilisé néanmoins pour des pressions différentes lorsque la pression est modérée d'une part et que la température reste inférieure à 1800°K.

On passe de la température $(T_2)_p$ à la pression p , à la température fictive $(T_2)_1$ correspondant à une atmosphère au moyen de la relation approchée suivante :

$$\boxed{(T_2)_1 = (T_2)_p p^{-n}}$$

n étant donné par les abaques.

- Le diagramme H-T permet de montrer que l'interpollation linéaire est valable sur les enthalpies.

CALCUL DU RAPPORT STOECHIOMETRIQUE (C/A)_{st} : GN et GNL

III.1 (C/A)_{st} du GN:

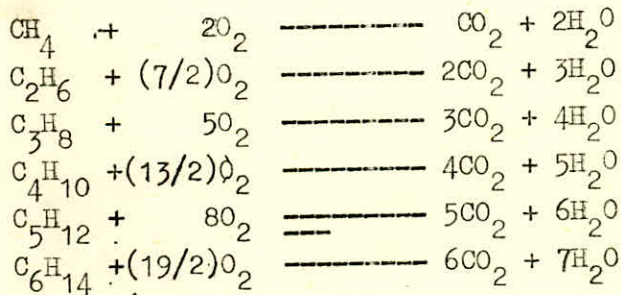
III.1.1 Masse molaire du GN: M_{GN}

100 moles de GN contiennent:

89,43 moles de Méthane.....(CH ₄)	pesant	89,43.16,042 =	1338,38406 gr
6,92 " " Ethane.....(C ₂ H ₆)	"	6,92.30,068 =	208,07056 gr
2,12 " " Propane.....(C ₃ H ₈)	"	2,12.44,094 =	93,47928 gr
0,83 " " Butane.....(C ₄ H ₁₀)	"	0,83.58,120 =	48,33960 gr
0,21 " " Pentane.....(C ₅ H ₁₂)	"	0,21.72,146 =	15,15066 gr
0,13 " " Hexane.....(C ₆ H ₁₄)	"	0,13.86,173 =	11,20236 gr
0,19 " " Hélium.....(He)	"	0,19.4,003 =	0,7657 gr
5,93 " " Azote.....(N ₂)	"	5,93.28,016 =	166,13488 gr
0,21 " " Gaz carbonique.(CO ₂)	"	0,21.44,010 =	9,24210 gr
<hr/>		<hr/>	<hr/>
=100			= 1890,664 gr

M _{GN} = 18,90664 Kg/Kmole

III.1.2 Réactions des composants du GN en mélange stoechiométrique:



III.1.3 Calcul de la masse d'air

Masse d'oxygène nécessaire à la combustion de 100 MOLES de GN :

Pour 89,43 moles de (CH ₄)	il faut :	2.89,43 =	166,86 moles d'O ₂
" 6,92 " " C ₂ H ₆	" " :	$\frac{7}{2} \cdot 6,92 =$	24,22 " "
" 2,12 " " C ₃ H ₈	" " :	5.2,12 =	10,60 " "
" 0,83 " " C ₄ H ₁₀	" " :	$\frac{13}{2} \cdot 0,83 =$	5,395 " "
" 0,21 " " C ₅ H ₁₂	" " :	8.0,21 =	1,68 " "
" 0,13 " " C ₆ H ₁₄	" " :	$\frac{19}{2} \cdot 0,13 =$	1,235 " "

La masse d'oxygène nécessaire à la combustion de 100 moles de GN est:
 $166,86 + 24,22 + 10,60 + 5,395 + 1,68 + 1,235 = 209,99$ moles d' O_2

La quantité de N_2 est : $3,76 \cdot 209,99$ moles de N_2

La masse d'air est de:

$$209,99 \cdot 32 + 3,76 \cdot 209,99 \cdot 28,016 = 6719,68 + 22120,3802 = 28840,0602 \text{ gr}$$

Pour 100 moles de GN il faut une masse d'air de:

$$\underline{A = 28840,0602 \text{ GR}}$$

III.1.4 - $(C/A)_{st}$ du GN:

100 moles de GN pèsent:

$$C = 100 \cdot M_{GN} = 1890,664 \text{ gr}$$

$$(C/A)_{st} = \frac{1890,664}{28840,0602} = 0,06555$$

$$\boxed{f_s = (C/A)_{st} = 0,06555}$$

III.2. $(C/A)_{st}$ du GNL:

III.2.1 Masse molaire du GNL

Nous partons du pourcentage en masse estimé suivant :

80 % de Méthane (CH_4)
 13,6 % " Ethane (C_2H_6)
 6,4 % " Propane (C_3H_8)

Ceci nous donne la composition molaire suivante:

89,301 % de Méthane (CH_4)
 8,100 % de Ethane (C_2H_6)
 2,599 % de Propane (C_3H_8)

100 moles de GNL contiennent donc:

89,301 moles de Méthane (CH_4)	qui pèsent	$89,301 \cdot 16,042 = 1432,5666$ gr
8,100 " " Ethane (C_2H_6)	" "	$8,100 \cdot 30,068 = 243,5508$ "
<u>2,599</u> " " Propane (C_3H_8)	" "	$2,599 \cdot 44,094 = \underline{114,6003}$ "
= 100		= 1790,7177 gr

$$\boxed{M_{GNL} = 17,907177 \text{ Kg/Kmole}}$$

III.2.2-Réactions chimiques:



III.2.3 Calcul de la masse d'air :

Pour 89,301 moles de CH_4 il faut $2.89,301 = 178,602$ moles d' O_2

" 8,100 " " C_2H_6 " " $\frac{7}{2} \cdot 8,100 = 28,350$ " "

" 2,599 " " C_3H_8 " " $5.2,599 = 12,995$ " "

La quantité d'oxygène nécessaire à la combustion de 100 moles de GNL est

$$178,602 + 28,350 + 12,995 = 219,947 \text{ moles d}'\text{O}_2$$

La quantité de N_2 est : $219,947 \cdot 3,76$ moles de N_2

La masse d'air est de:

$$219,947 \cdot 32 + 3,76 \cdot 219,947 \cdot 28,016 = 7038,304 + 23169,252 = 30207,256 \text{ Gr}$$

Pour 100 moles de GNL il faut une masse d'air de:

$$A = \underline{30207,256 \text{ gr}}$$

2.4 - $(C/A)_{st}$ du GNL:

100 moles de GNL pèsent:

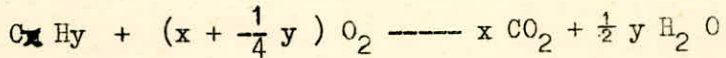
$$C = 100 \cdot M_{\text{GNL}} = 1790,7177 \text{ gr}$$

$$(C/A)_{st} = \frac{1790,7177}{30207,256} = 0,05928$$

$$\boxed{f_s = (C/A)_{st} = 0,05928}$$

La dissociation des molécules

- Un hydrocarbure de formule brute $C_n H_y$ qui brûle complètement dans l'oxygène fournit CO_2 et H_2O comme gaz brûlés suivant la réaction.



D'après cette réaction on peut en déduire que la combustion complète de 1g de cet hydrocarbure nécessite :

$$\text{- une masse d'oxygène de } \frac{32x + 8y}{12,01x + 1,008y}$$

Le deuxième membre de la réaction nous donne :

$$\frac{- 44,01}{12,01x + 1,008y} \quad \text{g de } CO_2$$

$$\frac{- 9,008 y}{12,01x + 1,008y} \quad \text{g de } H_2O$$

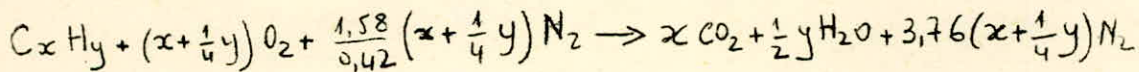
Et cela est obtenu en adoptant comme masse molaire des éléments:

$$C = 12,010 \quad H = 1,008 \quad O = 16,000 \quad N = 14,008$$

Le rapport des masses des 2 réactifs, combustible et comburant, dans le cas de la réaction exacte et complète, est dit rapport stoechiométrique .

Dans le cas où la combustion s'effectue avec l'air, on considère que ce dernier contient 21% en volume ou 23% en masse d'oxygène, le reste, l'azote n'intervenant pratiquement pas dans la réaction.

En tenant compte de l'air l'équation de combustion de l'hydrocarbure en question s'écrit :



Le rapport stoechiométrique est définie par le rapport $\frac{\text{air}}{\text{Combustible}} = \frac{A}{C}$

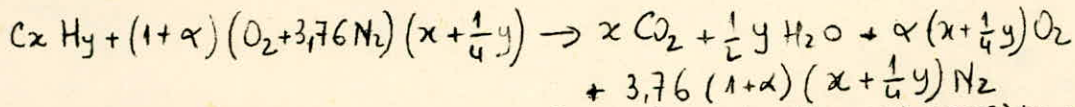
De même on définit la richesse φ

$$\varphi = \frac{(C/A)}{(C/A)_s}$$

La combustion n'étant pas toujours complète on y remédie à cela en ayant recours au mélange pauvre . C'est seulement ainsi que l'on peut espérer . obtenir une combustion complète puisque le mélange ne peut être parfaitement homogène. On définit ainsi un excès d'air α

$$\alpha = \frac{(1 - \varphi)}{\varphi}$$

L'équation de la réaction complète s'écrit :



La température est d'autant plus grande que la combustion est complète et les gaz moins dilués, c'est à dire pour un mélange homogène dans le rapport stoechiométrique ($\alpha = 0$ ($\varphi = 1$))

C'est dans ce cas aussi que les dissociations des produits de la combustion qui apparaissent aux températures élevées, prendront plus d'importance alors qu'on pourra les négliger si la dilution est suffisante ($\alpha > 1$)

L'état final étant bien défini chimiquement ; le calcul de la température de fin de combustion est très simple, en tenant compte de l'hypothèse que la chaleur produite sert uniquement à échauffer les gaz brûlés .

On a pour ainsi dire une combustion adiabatique .

Donc les molécules saturées produites restent à l'état stable seulement pour une température de fin de combustion relativement basse .

Mais vers les 2000°K , on a apparition des décompositions endothermiques donnant bien a des molécules telle que CO , OH.. , vers les 5000°K , on est en présence de la séparation des électrons périphériques (ionisation des molécules) .

Avec la dissociation on a une augmentation du nombre de molécules, ce phénomène ne reste pas sensible seulement à la température, mais il l'est aussi à la pression, et selon le principe du déplacement de l'équilibre il a tendance à croître quand la pression diminue et la température augmente .

Donc si la température reste inférieure à 2000°K - et cela en limitant le préchauffage de l'air - et qu'on a affaire à des mélanges pauvres, le schéma réactionnel suivant lequel tout le combustible est brûlé en CO_2 et H_2O reste valable, l'excédent de comburant intervenant comme une masse gazeuse supplémentaire à chauffer.

Mais si la température de fin de combustion est telle qu'elle provoque le phénomène de dissociation, ou que la richesse est trop grande et qu'il se produise des imbrûlés il est nécessaire de faire le calcul de la composition des gaz (voir analyse des gaz).

Pour illustrer cela nous avons tracé des courbes des températures de fin de combustion des mélanges air - GN pour différentes valeurs de préchauffage et des pressions de chambre allant de 0,1 à 20 atm. On remarque qu'un préchauffage important du comburant est néfaste ; il augmente le pourcentage de molécules

dissociés. On s'aperçoit qu'au fur et à mesure de l'élévation de la température de l'air, les courbes de températures en fonction du rapport de mélange ont des formes de plus en plus plates, les maximums se déplacent vers les mélanges riches les températures de fin de combustion n'augmentent pas aussi vite que la température de l'air (entrée) ; car de nombreuses réactions endothermiques de dissociations absorbent une bonne quantité de l'énergie apportée par l'air préchauffé.

La disposition des courbes suivant la valeur de φ est différente selon la nature du combustible mais surtout du comburant, en plus grande quantité, a une action plus marquée.

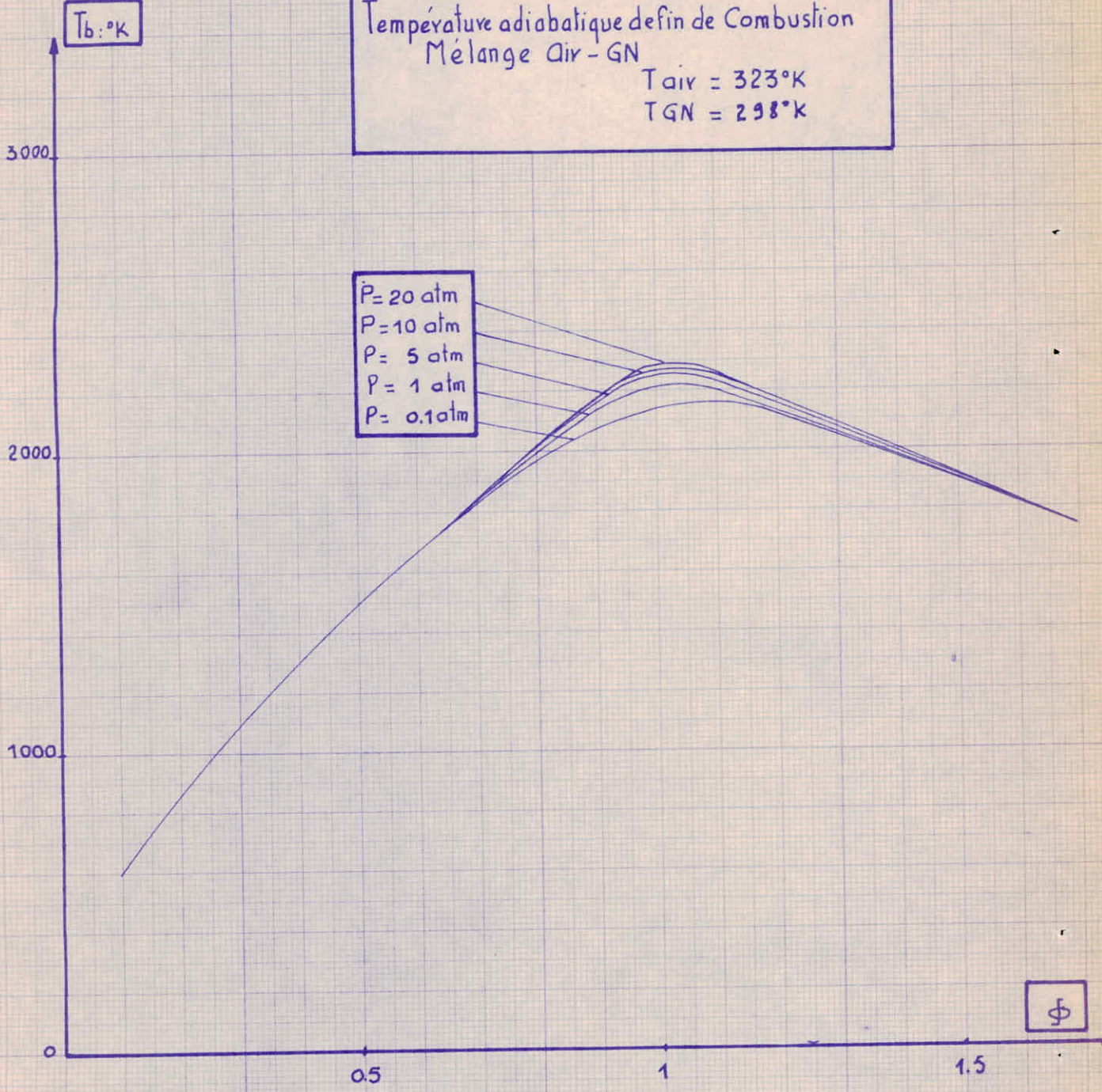
Température adiabatique de fin de Combustion
Mélange Air - GN avec $T_{GN} = 298^{\circ}K$

$T_b^{\circ}K$ / ϕ	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1	1.1	1.3	1.5	1.7	
$T_{air} = 323^{\circ}K$	$P_{=0.1}$	599.57	1081.38	1486.56	1840.74	2099.93	2166.06	2170.44	2047.32	1898.07	
	$P_{=1at}$	599.57	1081.38	1490.80	1845.59	2138.13	2227.86	2212.48	2056.95	1901.39	1756.34
	$P_{=5}$	599.57	1081.38	1490.89	1847.29	2153.46	2260.09	2225.87	2059.55	1902.27	1756.44
	$P_{=10}$	599.57	1081.38	1490.92	1847.78	2157.90	2271.29	2229.09	2060.18	1902.49	1756.51
	$P_{=20}$	599.57	1081.38	1490.49	1847.29	2153.46	2281.01	2231.35	2060.62	1902.64	1756.58
$T_{air} = 573^{\circ}K$	0.1	831.63	1284.76	1676.92	1993.68	2200.88	2250.41	2261.66	2176.37	2036.76	1895.01
	1at	831.63	1284.78	1674.11	2007.96	2262.33	2331.47	2332.88	2200.67	2046.04	1898.66
	5	831.63	1284.63	1674.55	2012.96	2291.26	2376.72	2383.46	2207.76	2048.59	1899.63
	10	831.63	1284.79	1674.68	2014.39	2300.37	2393.12	2371.96	2209.49	2049.21	1899.27
	20	831.63	1284.79	1674.79	2015.51	2307.73	2407.68	2378.22	2210.74	2049.65	1900.04
$T_{air} = 1073^{\circ}K$	0.1	1299.22	1701.77	2031.04	2252.80	2369.71	2399.07	2411.56	2383.53	2291.76	2170.60
	1at	1299.24	1701.03	2045.99	2312.61	2477.27	2518.76	2531.39	2467.84	2336.94	2194.00
	5	1299.24	1703.49	2051.32	2339.02	2539.65	2592.12	2601.38	2502.72	2353.22	2201.1
	10	1299.24	1703.63	2052.87	2347.09	2562.52	2620.49	2626.82	2512.46	2356.17	2202.87
	20	1299.24	1703.75	2054.09	2353.56	2582.80	2646.75	2649.01	2519.76	2350.06	2204.15
$T_{air} = 1573^{\circ}K$	0.1	1770.78	2101.28	2318.93	2442.21	2508.51	2526.59	2535.86	2527.52	2480.54	2399.53
	1at	1772.23	2119.90	2385.13	2558.48	2656.43	2682.63	2694.44	2672.28	2591.30	2475.12
	5	1772.76	2126.6	2414.60	2624.02	2750.90	2784.36	2796.92	2754.86	2643.09	2505.39
	10	1772.91	2128.54	2423.77	2647.39	2788.29	2825.37	2837.68	2783.66	2658.78	2513.84
	20	1773.04	2130.07	2431.12	2667.69	2823.32	2864.37	2875.92	2807.96	2671.04	2520.20

Température adiabatique de fin de Combustion
Mélange Air - GN

$T_{air} = 323^{\circ}K$

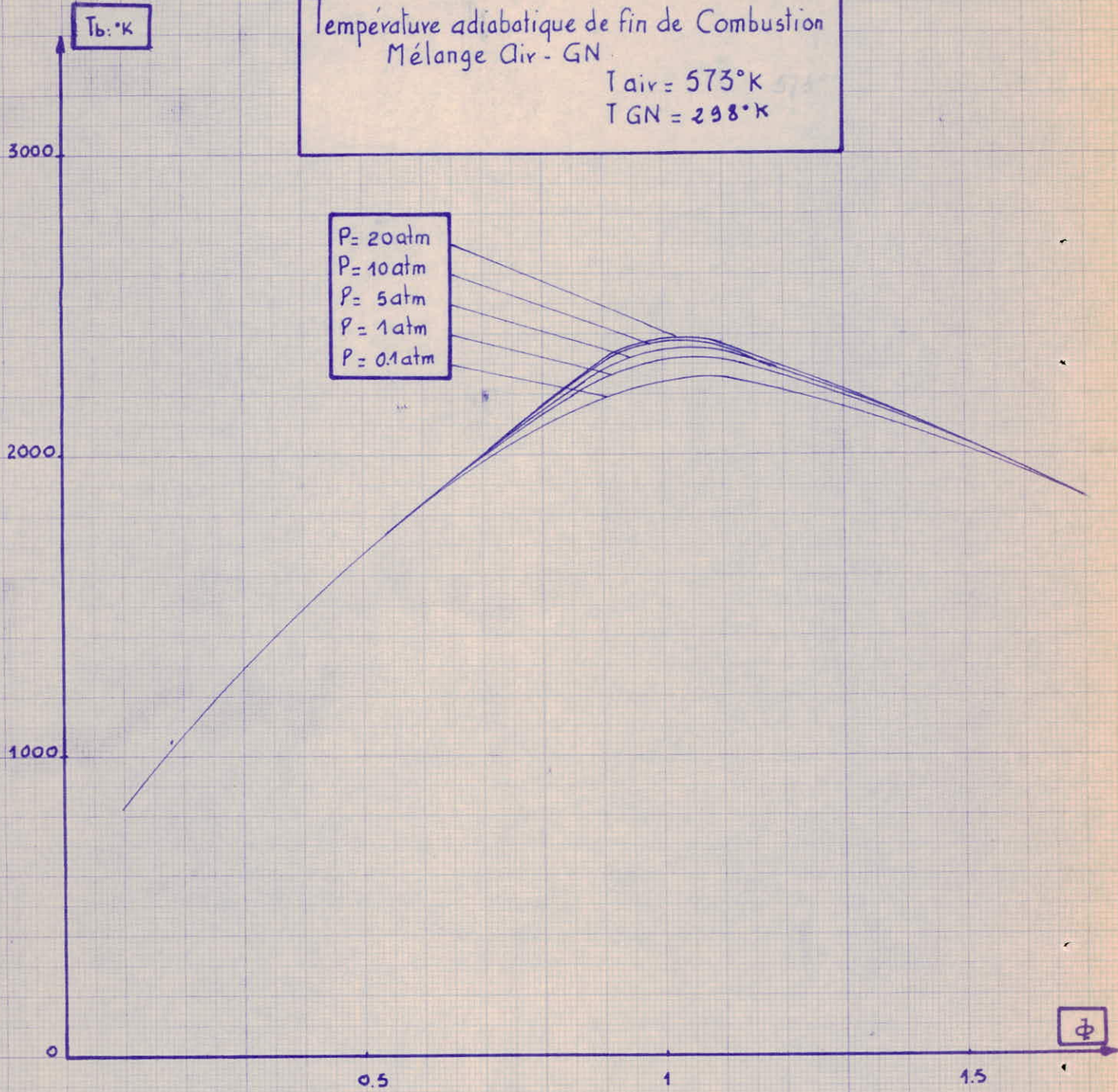
$T_{GN} = 298^{\circ}K$



Température adiabatique de fin de Combustion
Mélange Air - GN

$T_{air} = 573^{\circ}K$

$T_{GN} = 298^{\circ}K$



$T_b: ^\circ K$

Température adiabatique de fin de Combustion
Mélange Air - GN
 $T_{air} = 1073^\circ K$
 $T_{GN} = 298^\circ K$

$P = 20 \text{ atm}$
 $P = 10 \text{ atm}$
 $P = 5 \text{ atm}$
 $P = 1 \text{ atm}$
 $P = 0.1 \text{ atm}$

ϕ

3000

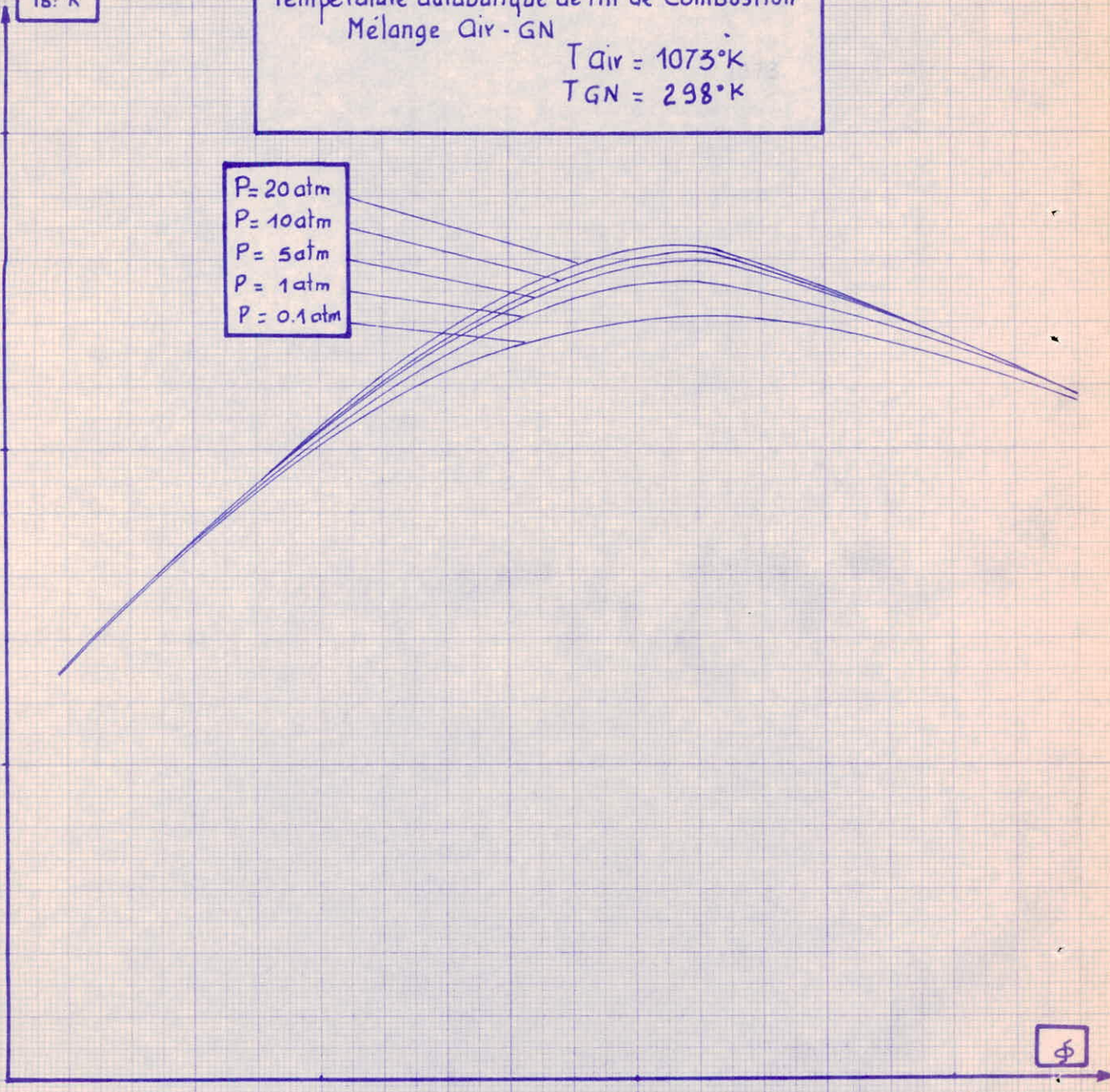
2000

1000

0.5

1

1.5



Température adiabatique de fin de Combustion
Mélange Air-GN

$T_{air} = 1523^{\circ}K$

$T_{GN} = 298^{\circ}K$

$T_b: ^{\circ}K$

- $P = 20 \text{ atm}$
- $P = 10 \text{ atm}$
- $P = 5 \text{ atm}$
- $P = 1 \text{ atm}$
- $P = 0.1 \text{ atm}$

ϕ

3000

2000

1000

0

0.5

1

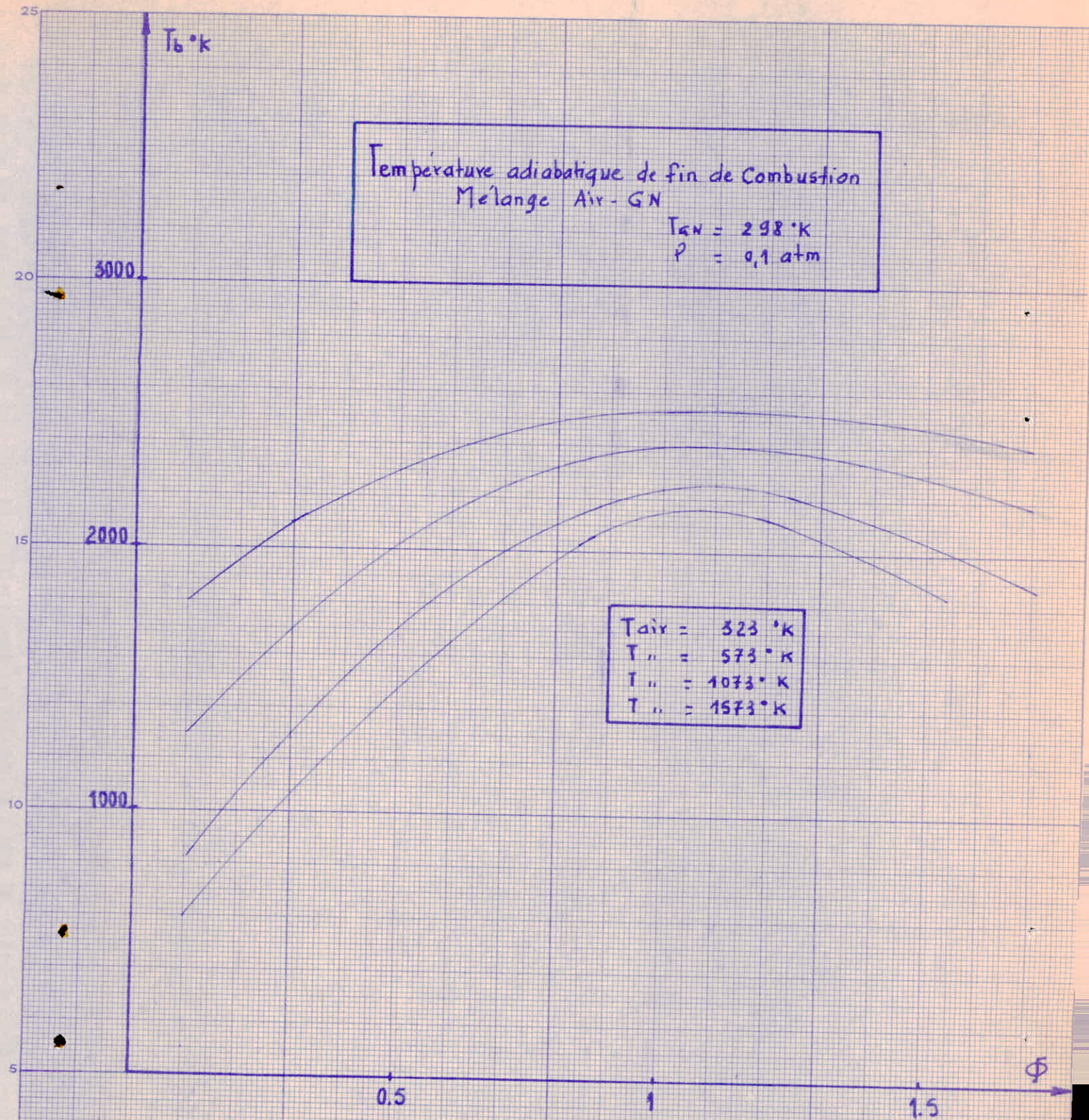
1.5

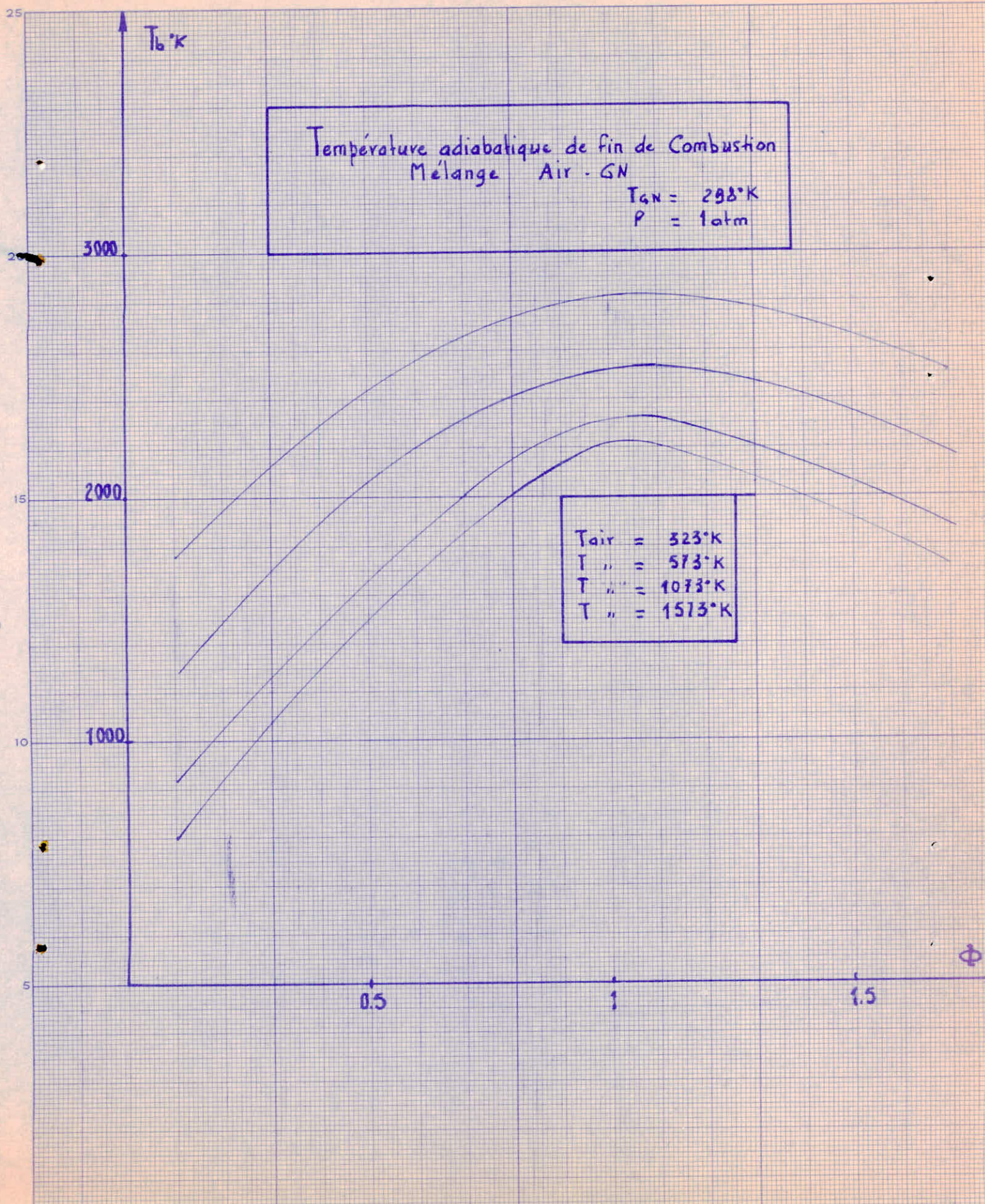
$T_b \text{ } ^\circ\text{K}$

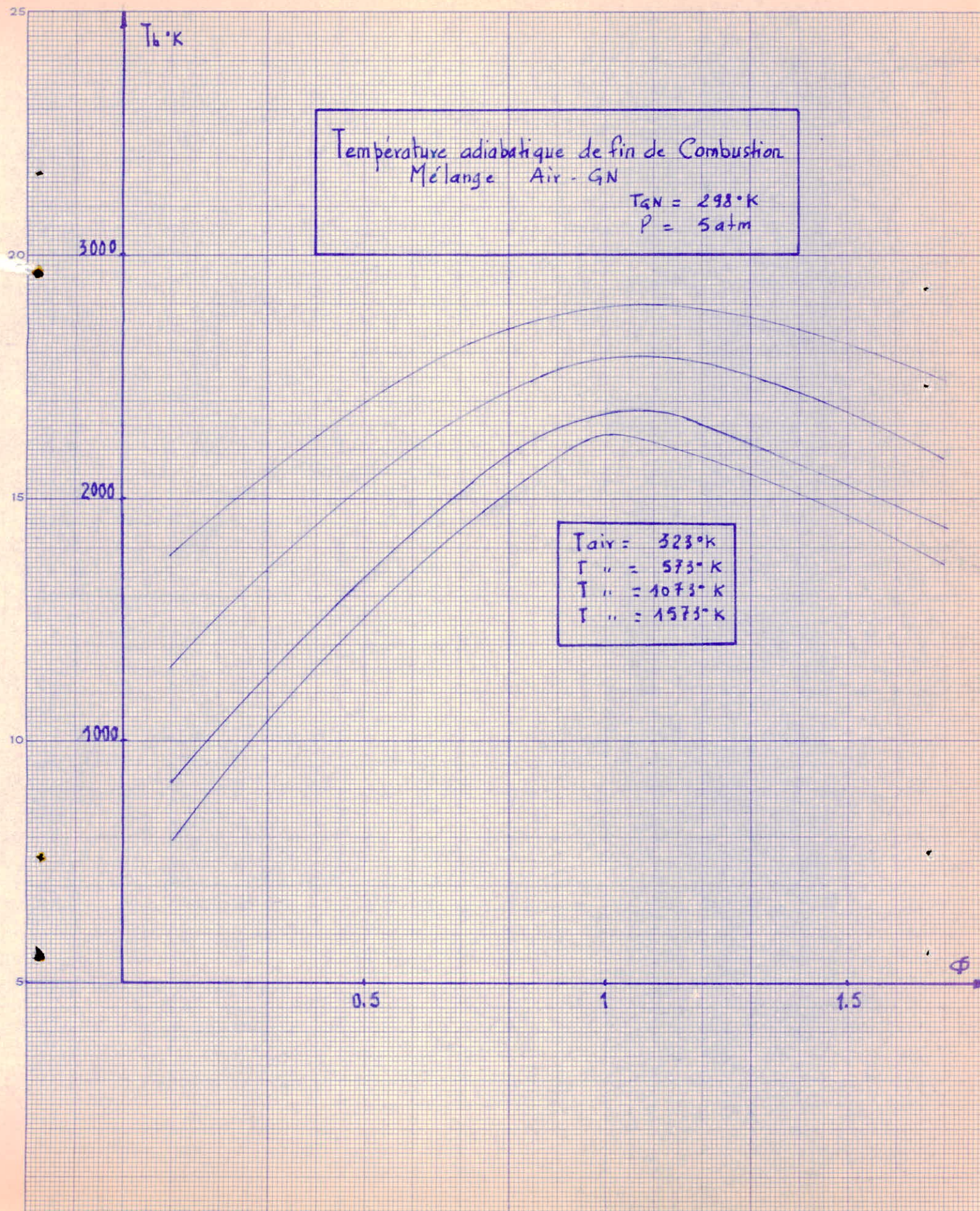
Température adiabatique de fin de Combustion
Mélange Air - GN

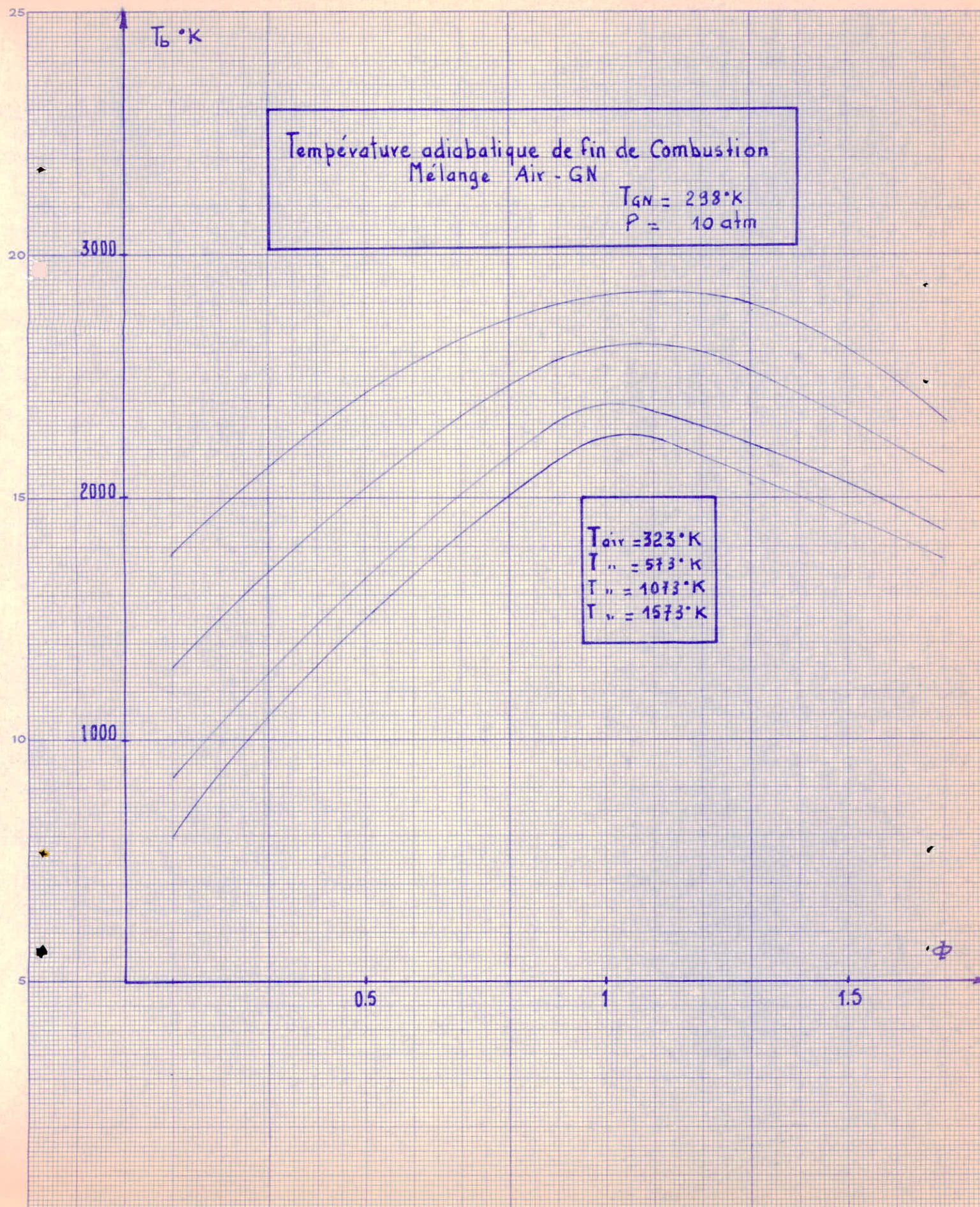
$T_{air} = 298 \text{ } ^\circ\text{K}$
 $P = 0,1 \text{ atm}$

$T_{air} = 323 \text{ } ^\circ\text{K}$
 $T_{air} = 573 \text{ } ^\circ\text{K}$
 $T_{air} = 1073 \text{ } ^\circ\text{K}$
 $T_{air} = 1573 \text{ } ^\circ\text{K}$









COURBES $C_p = f(t)$ et $\gamma = f(t)$.

1. Courbes $C_p = f(t)$

1-1. Influence de la température:

Pour les températures moyennes (de 300°K à 2000°K), la variation de chaleur spécifique à $p =$ constante (C_p) est linéaire. Mais à partir de 2000°K (richesses élevées), les courbes $C_p = f(t)$ s'incurvent et l'accroissement du C_p est plus important. Pour les intervalles assez réduits, l'interpolation linéaire sur le C_p est acceptable.

1-2. Influence de la pression:

Pour les températures élevées, la pression influe sur le C_p . Pour une température et une richesse données, le C_p diminue avec l'accroissement de la pression.

Cependant, l'influence de la pression, est négligeable pour les températures moyennes et basses (de 0°K à 1800°K).

2. Courbes $\gamma = f(t)$

2-1. Influence de la température:

Le paramètre γ diminue à mesure que la température augmente, mais les variations sont moins brusques que pour le C_p . L'interpolation linéaire est toujours valable. Pour une température donnée, γ diminue lorsque la richesse augmente.

2-2. Influence de la pression:

Pour les températures élevées, la pression influe sur le γ . Pour une température et une richesse données, le γ augmente à mesure que la pression augmente.

Mais pour les températures moyennes et basses, l'influence de la pression est négligeable.

3. Courbes $M = f(t)$

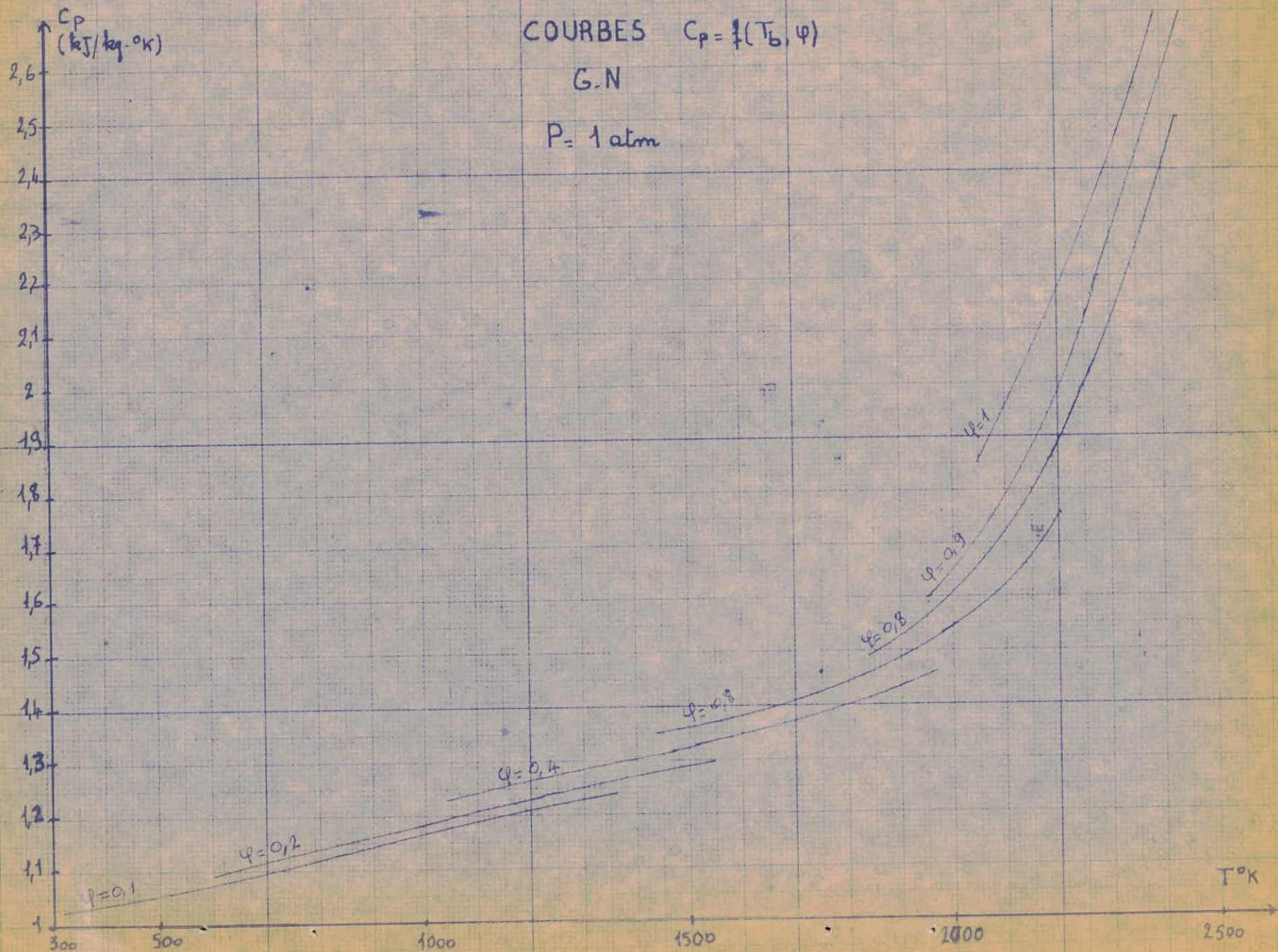
3-1 Influence de la température

Pour les petites richesses (jusqu'à $\phi = 0,3$) la masse molaire est constante. A mesure que la richesse augmente la masse molaire diminue à mesure que la température augmente. Cette diminution est d'autant plus sensible lorsque le régime est stoechiométrique.

3-2 Influence de la pression:

Normalement la masse molaire est indépendante de la pression.

Mais, étant donné que la pression atténue le phénomène de dissociation Il y a donc influence indirecte de la pression sur la masse molaire.



COURBES $C_p = f(T, \gamma)$

G-N

P = 3 atm

C_p
(kJ/kg·°K)

2,6

2,5

2,4

2,3

2,2

2,1

2

1,9

1,8

1,7

1,6

1,5

1,4

1,3

1,2

1,1

1

$\gamma = 0,1$

$\gamma = 0,3$

$\gamma = 0,5$

$\gamma = 0,7$

$\gamma = 0,9$

$\gamma = 1$

T°K

2500

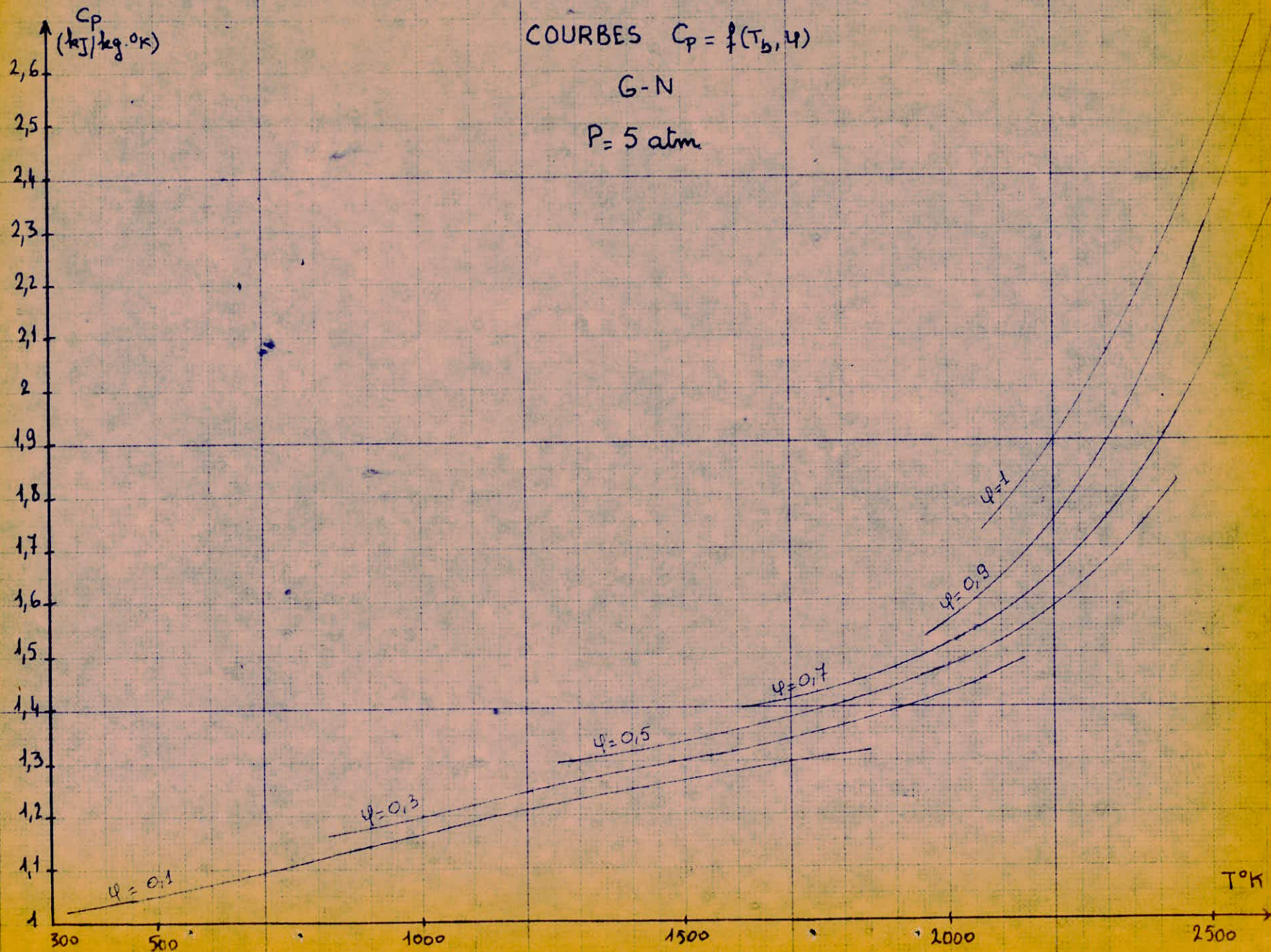
2000

1500

1000

500

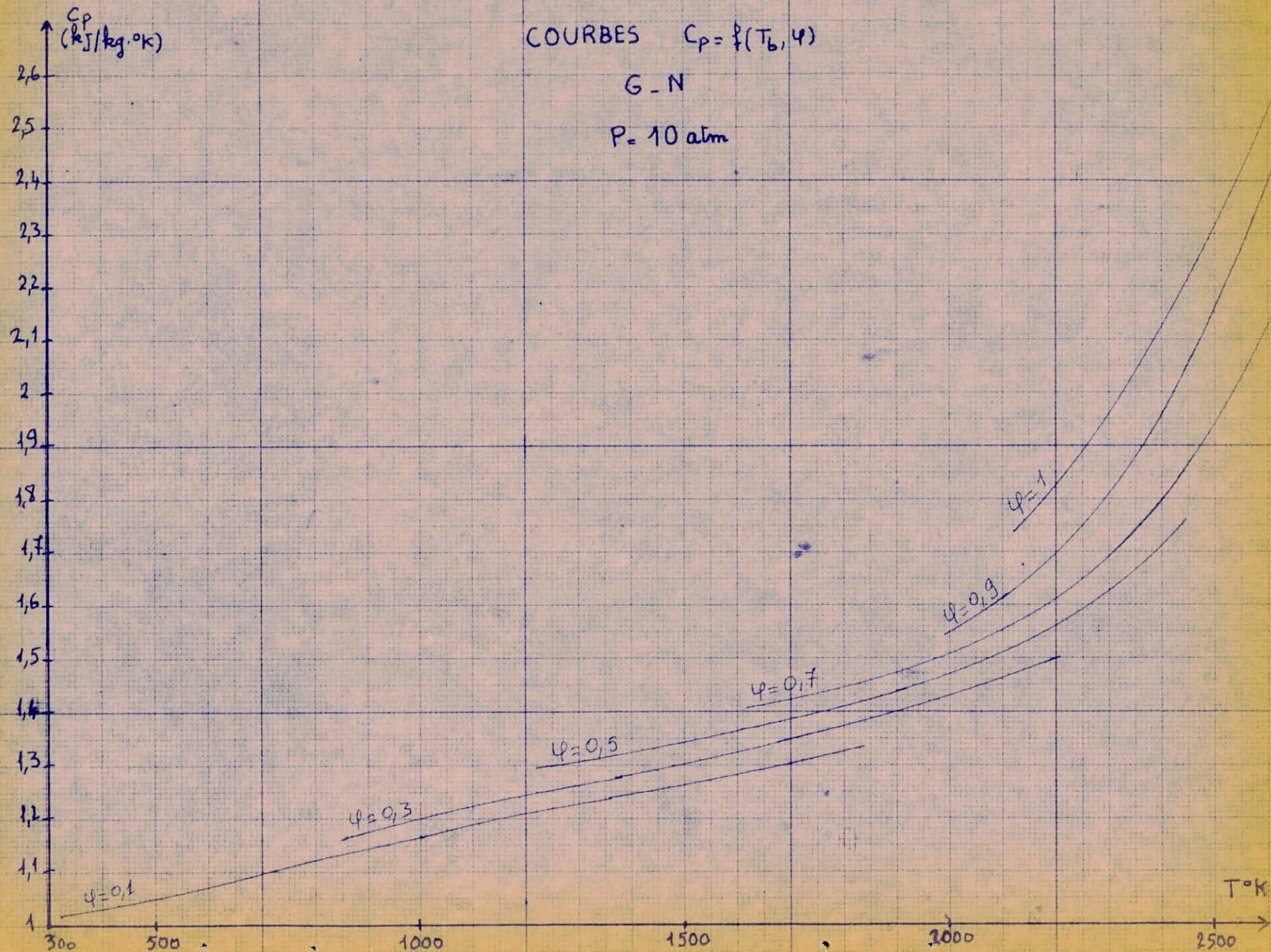
300



COURBES $C_p = f(T_b, \varphi)$

G - N

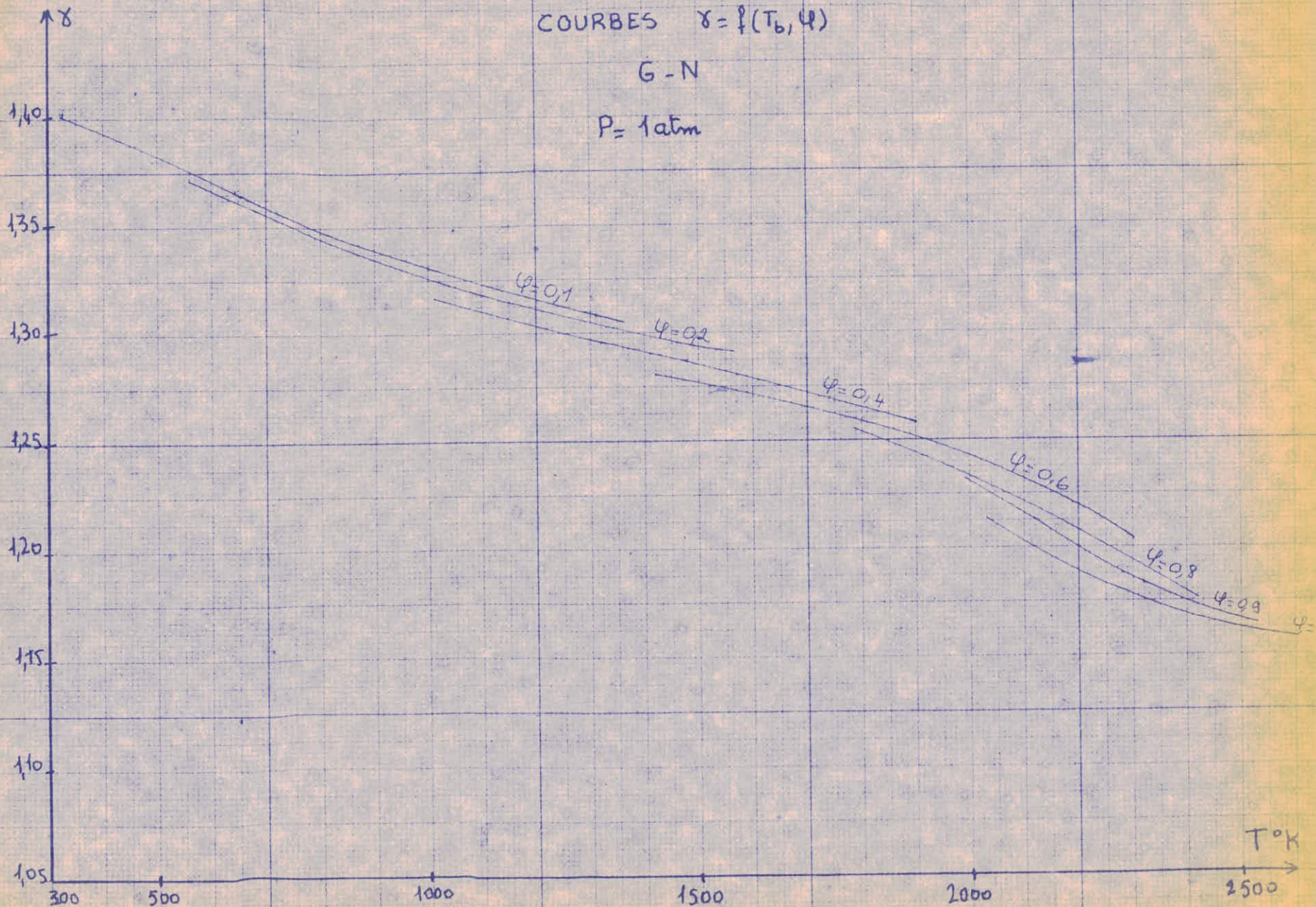
P = 10 atm



COURBES $\gamma = f(T_b, \varphi)$

G-N

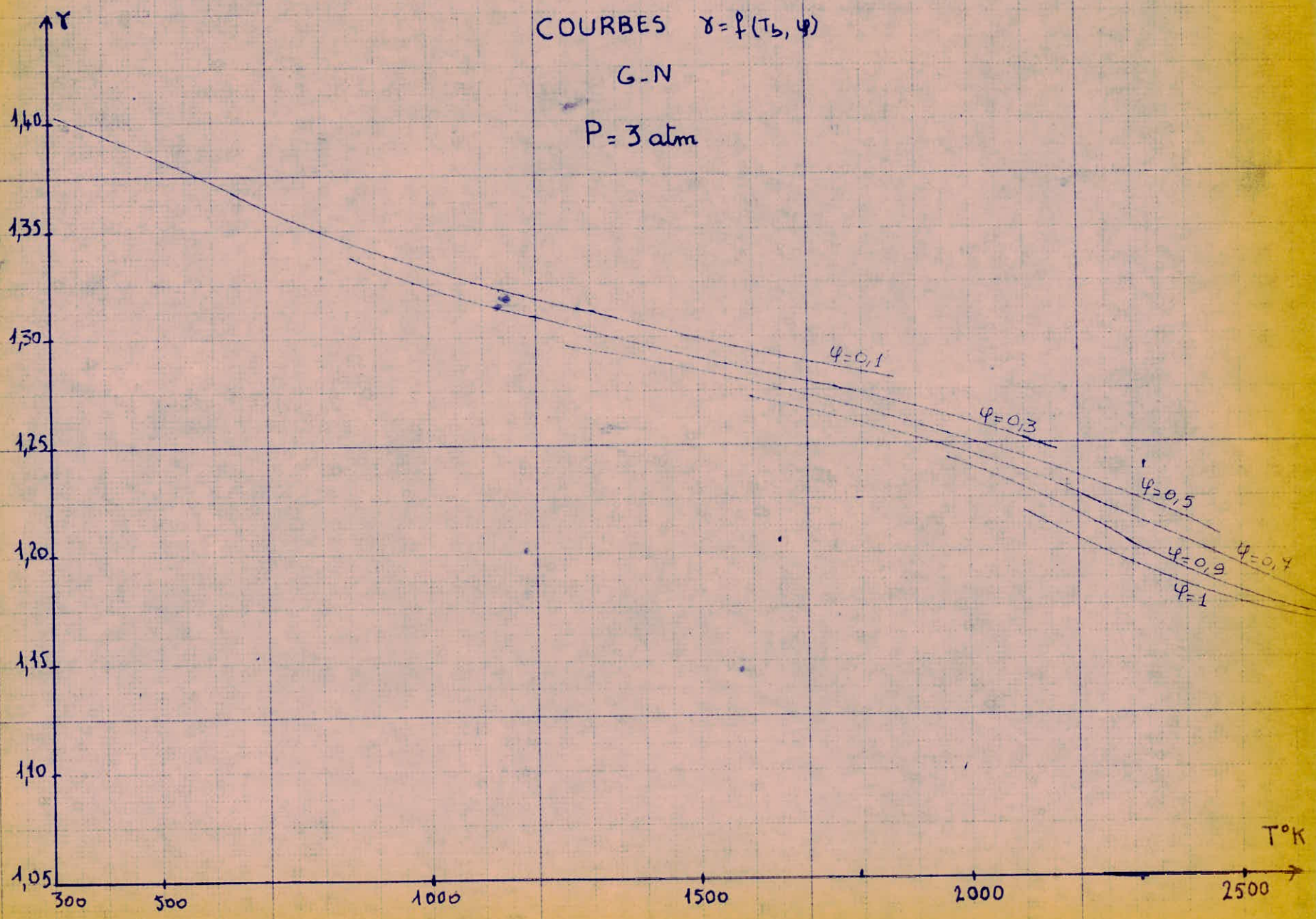
P = 1 atm



COURBES $\gamma = f(T_b, \varphi)$

G-N

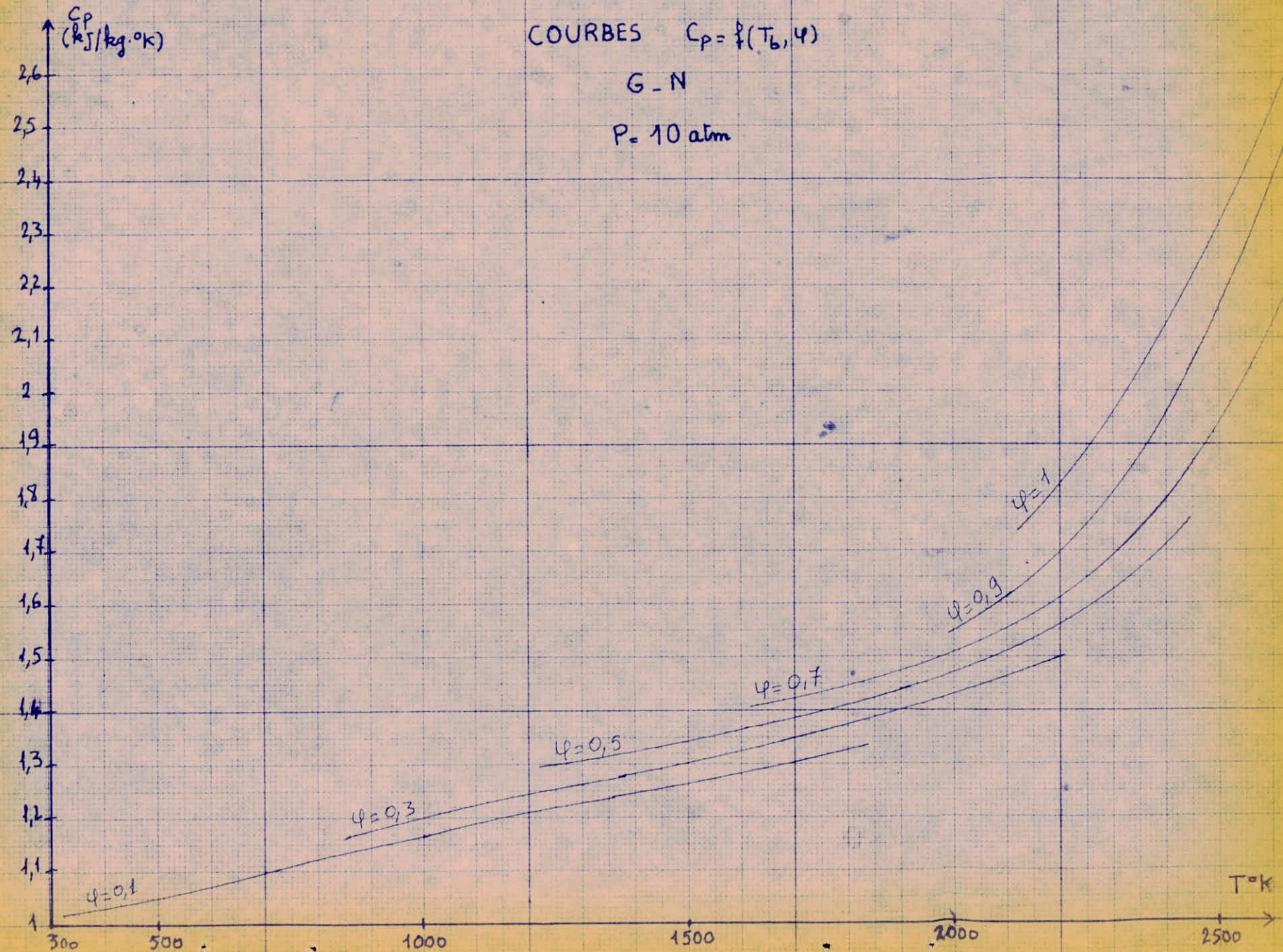
P = 3 atm

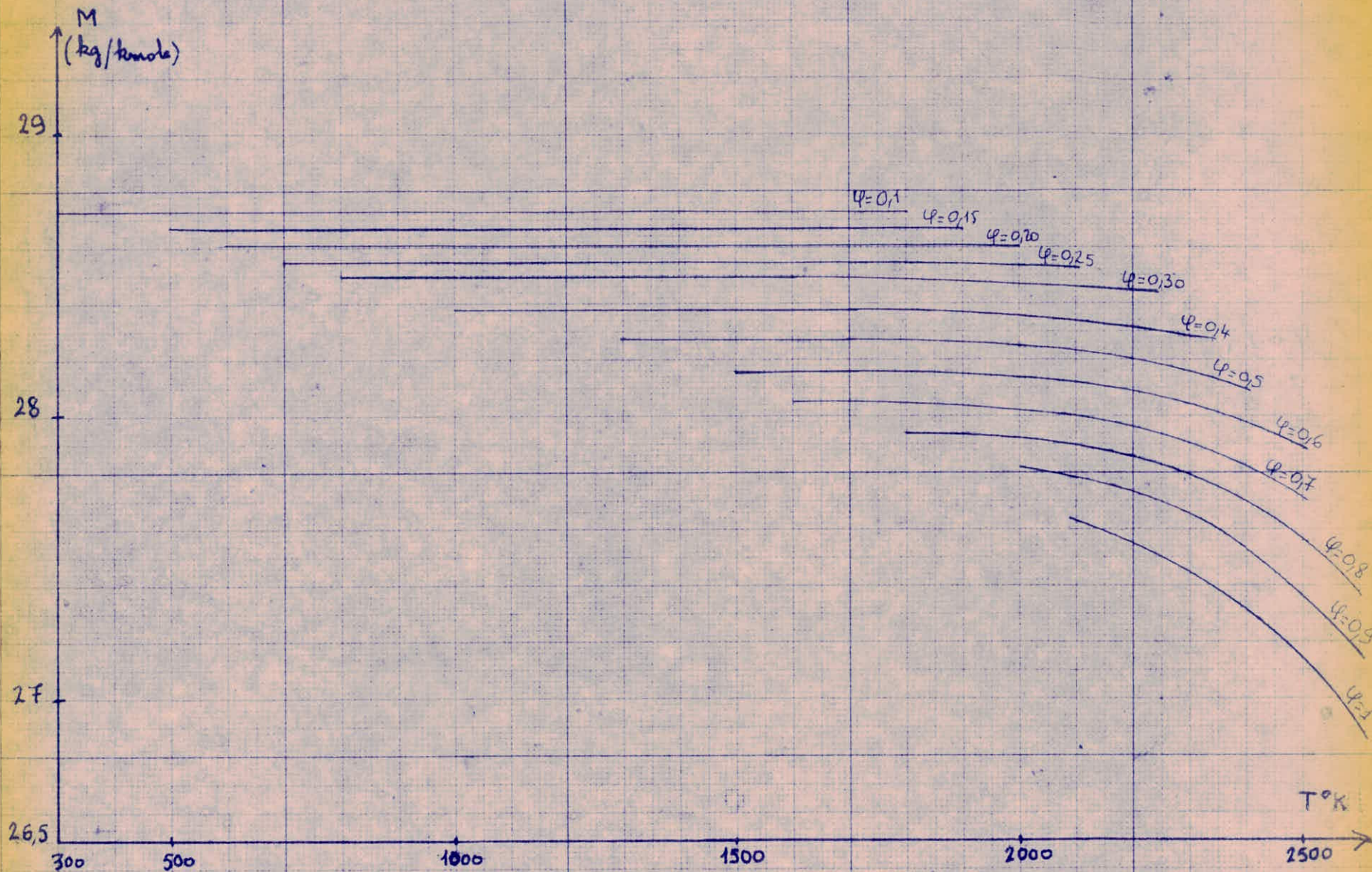


COURBES $C_p = f(T_b, \varphi)$

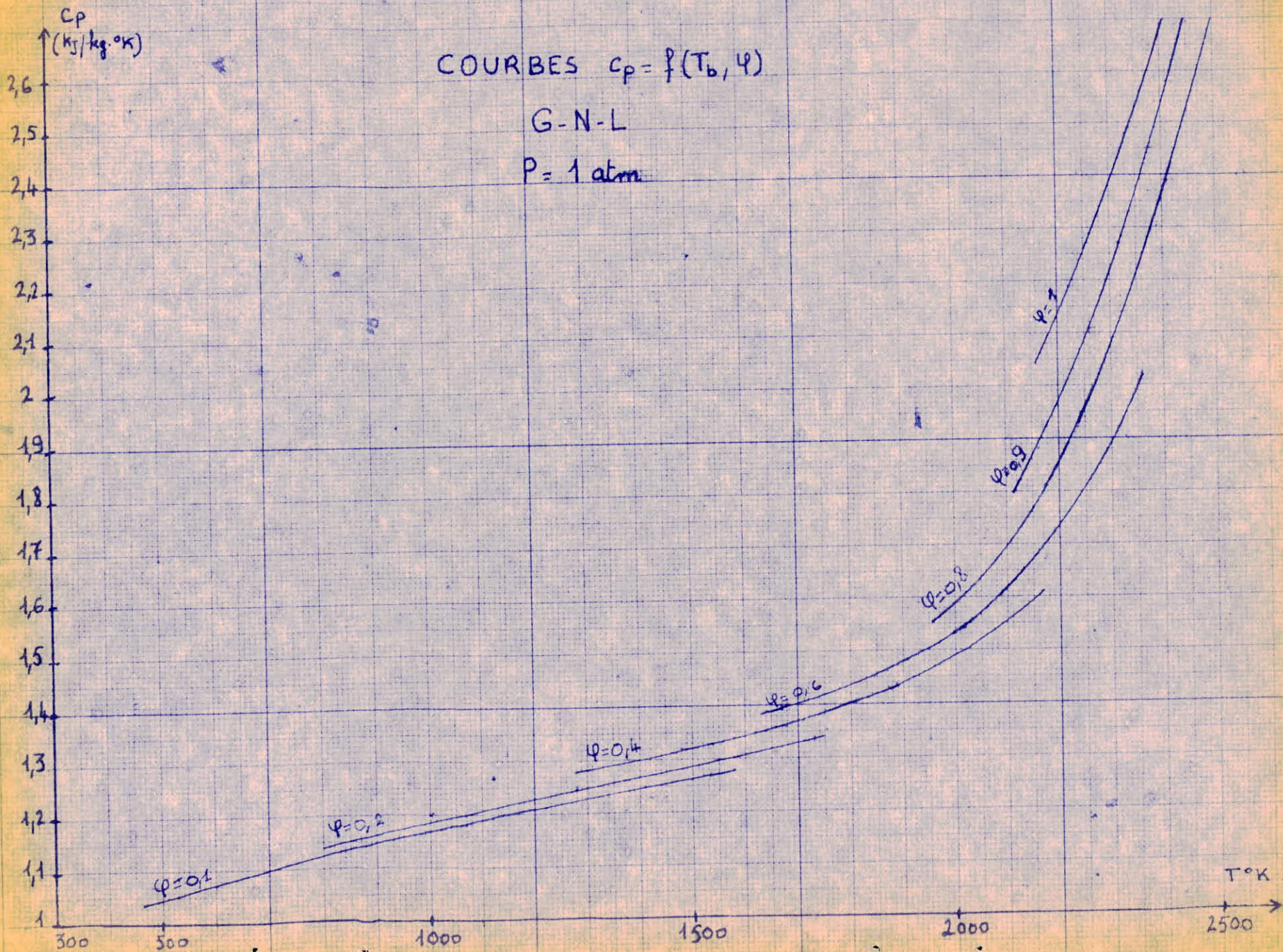
G - N

P = 10 atm





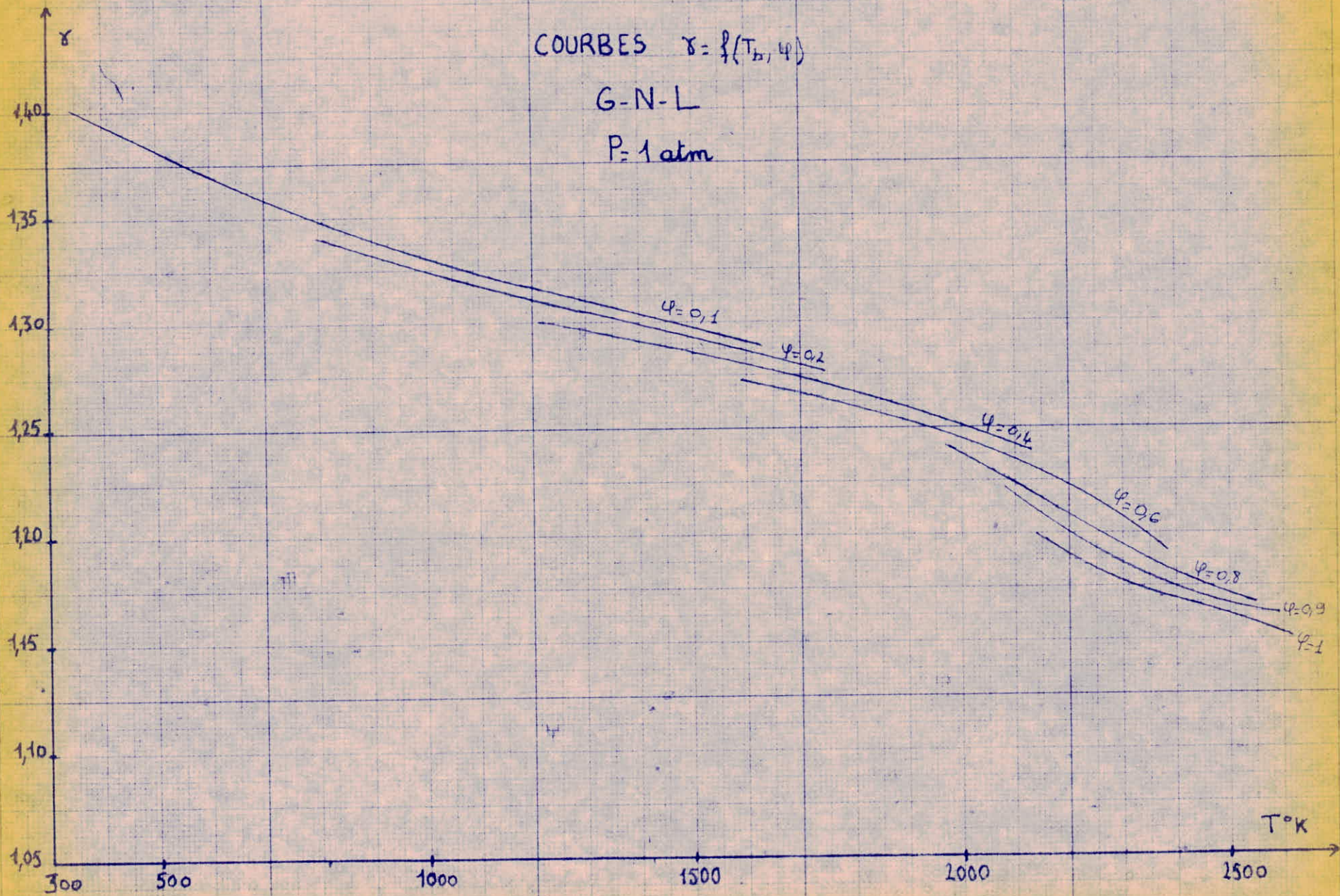
MASSE MOLLAIRE du MÉLANGE AIR-G.N
 $M = f(T_b, \varphi)$

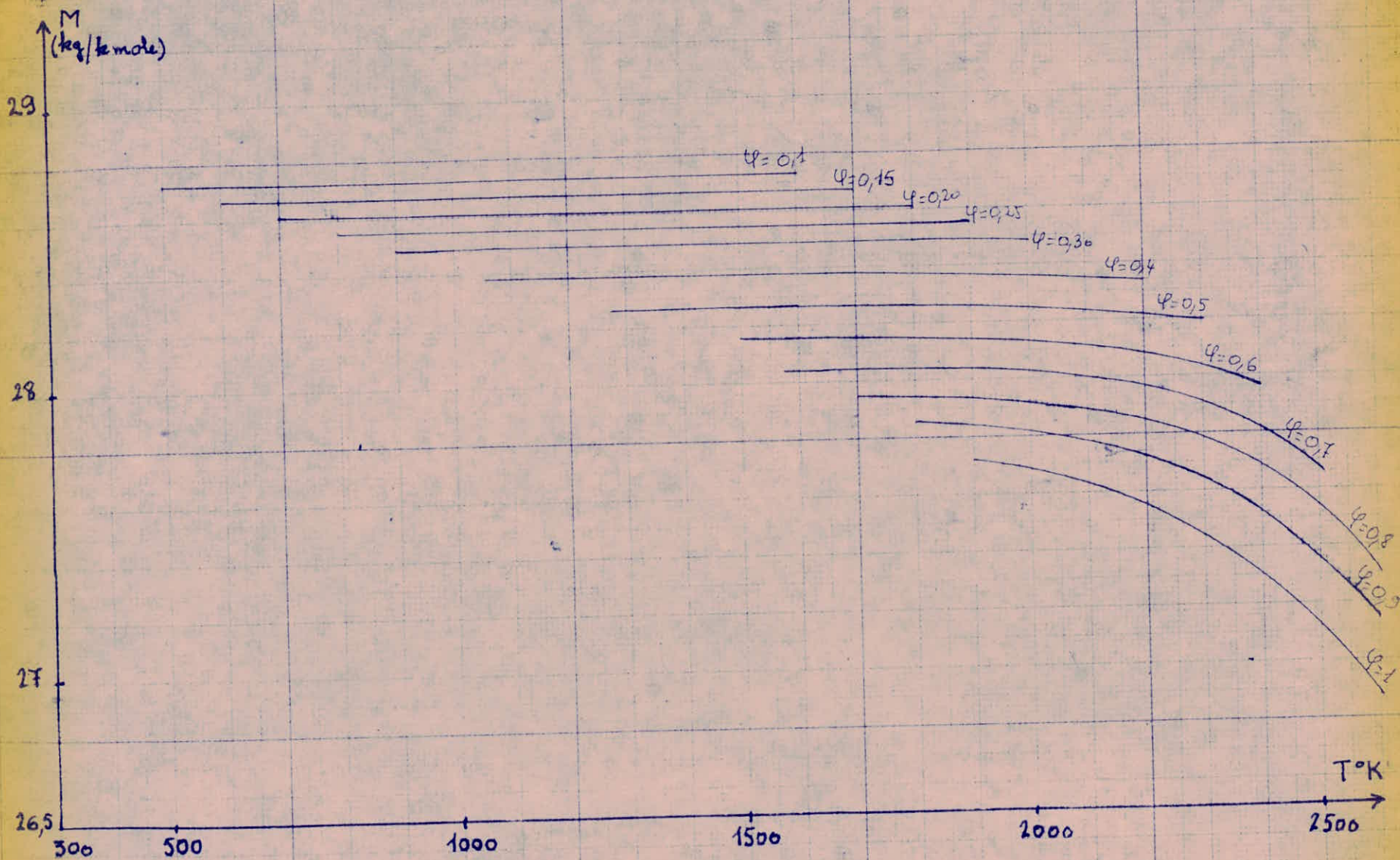


COURBES $\gamma = f(T_h, \varphi)$

G-N-L

P = 1 atm





MASSE Molaire du Melange Air - G.N.L

$$M = f(T_b, \varphi)$$

Méthode d'interpolation pour les tables

H S de l'air

I. Introduction

Ces tables ont été établies à partir des listings de l'I F P. Elles donnent les valeurs de l'enthalpie sensible et de l'entropie pour les températures variant de 300 à 2500°K (par pas de 100°K), et pour les pressions 0,1; 1; 5; 10; 15 atm. L'origine des enthalpies est $H(300^\circ\text{K}) = 0 \text{ Kj/Kg}$

2. Méthodes de calcul2.1 Problème

Il s'agit de déterminer les caractéristiques thermodynamiques de l'air pour des températures n'existant pas sur les tables.

Données : T_1, H_1, S_1 T_2, H_2, S_2 T_i

Déterminer S_i, H_i

Exemple : $P = 10 \text{ atm}$

$$T_1 = 1700^\circ\text{K} \quad H_1 = 1591,98 \text{ Kj/Kg} \quad S_1 = 8809,75 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$$

$$T_i = 1723^\circ\text{K} \quad H_i = ? \quad S_i = ?$$

$$T_2 = 1800^\circ\text{K} \quad H_2 = 1716,39 \text{ Kj/Kg} \quad S_2 = 8883,36 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$$

2.2 Calcul de l'enthalpie

Nous considérons que l'enthalpie varie linéairement en fonction de la température.

d'où:

$$H_i = H_1 + (T_i - T_1) \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1} = 1620,59 \text{ Kj/Kg}$$

$$H_i = 1620,59 \text{ Kj/Kg}$$

2.3 Calcul de l'entropie

$$S_i = S_1 + \bar{c}_p \ln \frac{T_i}{T_1} \quad \bar{c}_p = \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1} = 1,2441$$

$$\bar{c}_p \ln T_i = 0,016719 \text{ Kj/Kg} = 16,719 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$$

$$S_i = 8826,469 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$$

H S de l'AIR

$P = 0.1 \text{ atm}$

T_r °K	\bar{C}_p KJ/Kg °K	S_r J/Kg °K	H_r KJ/Kg	M Kg/Kmole	S_r J/Kmole · K	H_r KJ/Kmole
300	1.013	7557.86	0	28.97	218951.39	0
400	1.022	7850.22	101.594	"	227440.97	2943.17
500	1.036	8079.01	204.472	"	234048.95	5923.55
600	1.058	8269.71	309.066	"	239573.62	8953.64
700	1.082	8434.56	416.214	"	244349.21	12057.71
800	1.106	8580.67	525.662	"	248582.06	15228.42
900	1.128	8712.25	637.456	"	252394.11	18467.10
1000	1.15	8832.37	751.35	"	255873.95	21766.60
1100	1.168	8942.92	867.236	"	259076.58	25123.82
1200	1.184	9045.54	984.868	"	262049.41	28531.62
1300	1.198	9141.34	1103.946	"	264824.72	31981.31
1400	1.21	9231.26	1224.37	"	267429.70	35469.99
1500	1.22	9316.16	1345.94	"	269889.15	38991.88
1600	1.23	9396.73	1468.51	"	272223.36	42542.73
1700	1.24	9473.65	1591.98	"	274451.70	46119.66
1800	1.248	9547.46	1716.496	"	276589.96	49726.89
1900	1.256	9618.77	1841.612	"	278655.95	53351.49
2000	1.262	9688.35	1967.574	"	280671.58	57000.61
2100	1.272	9757.16	2094.344	"	282664.93	60673.14
2200	1.28	9826.70	2221.96	"	284679.68	64370.18
2300	1.29	9898.43	2350.53	"	286757.60	68094.85
2400	1.302	9974.43	2480.154	"	288959.25	71850.06
2500	1.32	10056.93	2611.34	"	291349.36	75650.51

H S
de l'AIR
P = 1atm

T _r °K	\bar{C}_p KJ/Kg·°K	S _r J/Kg·°K	H _r KJ/Kg	M Kg/Kmole	S _r J/Kmole·°K	H _r KJ/Kmole
300	1.013	6894.06	0	28.97	199721.11	0
400	1.022	7186.42	101.594	"	208190.69	2943.17
500	1.036	7415.21	204.472	"	214818.66	5923.55
600	1.058	7605.91	309.066	"	220343.34	8953.64
700	1.082	7770.76	416.214	"	225118.93	12057.71
800	1.106	7916.87	525.662	"	229351.78	15228.47
900	1.128	8048.55	637.456	"	233166.72	18467.10
1000	1.15	8168.57	751.35	"	236643.67	21766.60
1100	1.168	8279.12	867.236	"	239846.30	25123.82
1200	1.184	8381.74	984.868	"	242819.13	28531.62
1300	1.198	8477.54	1103.946	"	245594.43	31981.31
1400	1.21	8567.46	1224.37	"	248199.42	35469.99
1500	1.22	8652.36	1345.94	"	250658.87	38991.88
1600	1.23	8732.93	1468.51	"	252993.07	42542.73
1700	1.24	8809.75	1591.99	"	255218.52	46119.66
1800	1.248	8883.16	1716.39	"	257345.19	49723.99
1900	1.254	8953.84	1841.55	"	259392.97	53349.94
2000	1.262	9022.05	1967.37	"	261368.87	56994.82
2100	1.27	9088.33	2093.89	"	263289.04	60659.99
2200	1.276	9153.35	2221.15	"	265172.74	64346.77
2300	1.28	9217.61	2348.96	"	267034.30	68049.37
2400	1.29	9281.99	2477.53	"	268899.38	71774.04
2500	1.298	9347.39	2606.94	"	270794.02	75523.22

H - S AIR

P = 5 atm

$\phi = 0$

T_r (°K)	\bar{C}_p kJ/kg.°K	S_r J/kg.°K	H_r kJ/kg.°K	M_r kg/kmole	S_r J/kmole.K	H_r kJ/kmole.°K
300	1,013	6430,166	0	28,970	186281,927	0
400	1,022	6722,523	101,594	" "	194751,509	2943,178
500	1,036	6951,211	204,472	" "	201376,587	5923,554
600	1,058	7141,914	309,066	" "	206901,263	8953,642
700	1,082	7306,860	416,214	" "	211679,748	12057,720
800	1,106	7452,872	525,662	" "	215909,700	15228,428
900	1,128	7584,558	637,456	" "	219724,645	18467,100
1000	1,150	7704,677	751,35	" "	223204,489	21766,610
1100	1,168	7815,127	867,236	" "	226404,223	25123,827
1200	1,184	7917,844	984,868	" "	229379,948	28531,626
1300	1,198	8013,543	1106,946	" "	232152,357	31981,316
1400	1,210	8103,464	1224,370	" "	234757,343	35469,998
1500	1,220	8188,360	1345,940	" "	237216,790	38991,882
1600	1,230	8268,933	1468,510	" "	239550,999	42542,735
1700	1,240	8345,752	1591,980	" "	241776,441	46119,660
1800	1,248	8419,062	1716,390	" "	243900,221	49723,992
1900	1,254	8489,548	1841,558	" "	245942,200	53349,935
2000	1,262	8557,453	1967,374	" "	247909,415	56994,825
2100	1,268	8623,109	2093,836	" "	249811,455	60658,429
2200	1,276	8686,957	2220,952	" "	251661,141	64340,979
2300	1,280	8749,315	2348,660	" "	253467,655	68040,680
2400	1,286	8810,750	2476,822	" "	255247,413	71753,533
2500	1,292	8871,530	2605,784	" "	257008,210	75489,562

H - S AIR

P = 10 atm

$\phi = 0$

Tr °K	\bar{C}_p kJ/kg.°K	Sr J/kg.°K	Hr kJ/kg	M kg/kmole	Sr J/kmole.°K	Hr kJ/kmole
300	1,013	6230,366	0	28,97	180493,72	0
400	1,022	6522,623	101,594	" "	188960,40	2943,178
500	1,036	6751,411	204,472	" "	195588,38	5923,553
600	1,058	6942,114	309,066	" "	201,113,05	7605,914
700	1,082	7107,060	416,214	" "	206891,54	12057,719
800	1,106	7253,071	525,662	" "	210121,49	15228,428
900	1,128	7384,757	637,456	" "	213936,43	18467,100
1000	1,15	7504,876	751,35	" "	217416,28	21766,609
1100	1,168	7615,326	867,236	" "	220616,01	25123,826
1200	1,184	7717,944	984,868	" "	223588,84	28531,625
1300	1,198	7813,743	1103,946	" "	226364,15	31981,315
1400	1,21	7903,663	1224,37	" "	228869,13	35469,998
1500	1,22	7988,560	1345,94	" "	231428,58	38991,881
1600	1,23	8069,133	1468,51	" "	233762,79	42542,734
1700	1,24	8145,952	1591,51	" "	235988,23	46119,660
1800	1,248	8219,261	1716,396	" "	238112,01	49723,992
1900	1,254	8289,647	1841,458	" "	240151,09	53347,038
2000	1,262	8357,453	1967,274	" "	242115,41	56991,927
2100	1,268	8423,008	2093,736	" "	244014,55	60655,531
2200	1,274	8486,532	2220,898	" "	245854,83	64339,415
2300	1,28	8548,514	2348,56	" "	247650,47	68037,783
2400	1,284	8609,126	2476,668	" "	249406,40	71749,071
2500	1,29	8668,90	2605,53	" "	251138,25	75482,204

H-S
AIR

P=15 atm

$\phi=0$

Tr	Cp	Sr	Hr	M	Sr	Hr
OK	KJ/kg OK	d/kg OK	KJ/kg	Kg/kwale	KJ/kwale	KJ/kwale
300	1.013	6443,466	0	28,97	177107,12	0
400	1.022	6405,823	104,594	"	185576,74	2943,172
500	1.036	6634,511	204,472	"	192201,78	5923,553
600	1.058	6825,214	309,066	"	197726,45	8953,642
700	1.082	6990,160	416,214	"	202504,94	12057,719
800	1.106	7136,171	525,662	"	206734,90	15228,428
900	1.128	7267,857	637,456	"	210549,84	18467,100
1000	1.15	7387,976	751,35	"	214029,69	21766,609
1100	1.168	7498,526	867,236	"	217232,32	25423,826
1200	1.184	7601,144	984,868	"	220205,14	28531,625
1300	1.198	7696,843	1103,946	"	222977,55	31981,315
1400	1.21	7786,763	1224,37	"	225582,54	35469,998
1500	1.22	7871,760	1345,94	"	228044,88	38991,881
1600	1.23	7952,233	1468,51	"	230376,20	42542,734
1700	1.24	8029,052	1591,98	"	232607,64	46119,660
1800	1.248	8102,361	1716,396	"	234725,42	49723,992
1900	1.254	8172,747	1841,458	"	236764,50	53347,038
2000	1.262	8240,553	1967,274	"	238728,82	56991,927
2100	1.268	8305,908	2093,736	"	240622,17	60655,531
2200	1.274	8369,432	2220,898	"	242462,45	64339,451
2300	1.278	8431,091	2348,506	"	244248,71	68036,218
2400	1.286	8491,549	2476,622	"	246000,18	71747,739
2500	1.29	8559,807	2605,43	"	247716,90	75479,307

Méthode d'interpolation pour les tables

H S ϕ 1. Méthode de calcul

On interpole linéairement pour:

- L'enthalpie sensible
- La chaleur spécifique à pression constante (C_p)
- La masse molaire

Étant donné que ces grandeurs ont une variation pratiquement linéaire avec la température. Pour l'entropie nous utilisons l'interpolation logarithmique

2. Exemple

$$P = 1 \text{ atm} \quad \phi = 0,3$$

$$T_1 = 1900^\circ\text{K} \quad C_{p1} = 1,4118 \quad M_1 = 28,4875 \text{ Kg/Kmole} \quad H_1 = 1925,39 \text{ Kj/Kg}$$

$$S_1 = 9185,67 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$$

$$T_i = 1914,20^\circ\text{K} \quad C_{pi} = ? \quad M_i = ? \quad H_i = ? \quad S_i = ?$$

$$T_2 = 2000^\circ\text{K} \quad C_{p2} = 1,4652 \quad M_2 = 28,4774 \quad H_2 = 2058,41 \quad S_2 = 9259,67$$

a) Calcul de C_{pi}

$$C_{pi} = C_{p1} + \int_{T_1}^{T_i} \frac{\Delta C_p}{\Delta T} = C_{p1} + (T_i - T_1) \frac{C_{p2} - C_{p1}}{T_2 - T_1}$$

L'application numérique donne :

$$C_{pi} = 1,4194 \text{ Kg/Kg}^\circ\text{K}$$

b) Calcul de M_i

$$M_i = M_1 + \int_{T_1}^{T_i} \frac{\Delta M}{\Delta T} = M_1 + (T_i - T_1) \frac{M_2 - M_1}{T_2 - T_1}$$

$$M_i = 28,4860 \text{ Kg/Kmole}$$

c) Calcul de Hi

$$H_i = H_1 + \delta T \frac{\Delta H}{\Delta T} = H_i + (T_i - T_1) \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1}$$

$$H_i = 1944,28 \text{ Kj/Kg}$$

d) Calcul de Si

- Si: $T_i - T_1 < T_2 - T_i$ (T_i plus proche de T_1 que de T_2)

$$S_i = S_1 + \bar{C}_p \ln \frac{T_i}{T_1} \quad \text{avec} \quad \bar{C}_p = \frac{C_{p1} + C_{pi}}{2} \quad (1)$$

- Si: $T_i - T_1 > T_2 - T_i$ (T_i plus proche de T_2 que de T_1)

$$S_i = S_2 + \bar{C}_p \ln \frac{T_i}{T_2} \quad \text{avec} \quad \bar{C}_p = \frac{C_{p2} + C_{pi}}{2} \quad (2)$$

Dans notre cas :

$$T_i - T_1 = 14,20^\circ \text{K}$$

$$T_2 - T_i = 85,80^\circ \text{K}$$

$$\implies T_i - T_1 < T_2 - T_i$$

d'où:

$$S_i = S_1 + \bar{C}_p \ln \frac{T_i}{T_1} \quad S_1 = 9185,67 \text{ J/Kg}^\circ \text{K}$$

$$\bar{C}_p = \frac{C_{pi} + C_{p1}}{2} = 1,4156 \text{ Kj/Kg}^\circ \text{K}$$

$$\bar{C}_p \ln \frac{T_i}{T_1} = 0,01054 \text{ Kj/Kg}^\circ \text{K} = 10,54 \text{ J/Kg}^\circ \text{K}$$

$$S_i = 9196,21 \text{ J/Kg}^\circ \text{K}$$

Nous pouvons obtenir les quantités S_i et H_i pour l'unité molaire

$$S'_i = S_i \cdot M_i \quad H'_i = H_i \cdot M_i$$

$$S'_i = \text{J/Kmole}^\circ \text{K} \quad H'_i = \text{Kj/Kmole}$$

$$S_i = \text{J/Kg}^\circ \text{K} \quad H_i = \text{Kj/Kg}$$

$$M_i = \text{Kg/Kmole}$$

Remarques:

- l'origine des enthalpies est : - 300°K $H(300^\circ \text{K}) = 0 \text{ Kj/Kg}$ pour le GL

- 0°K $H(0^\circ \text{K}) = 0 \text{ Kj/Kg}$ pour le GL

Remarques:

- L'origine des enthalpies est : - 300°K : $H(300^{\circ}\text{K}) = 0 \text{ Kj/Kg}$ pour le GN.
- 0°K : $H(0^{\circ}\text{K}) = 0 \text{ Kj/Kg}$ pour le GNL .
- Les Cp donnés dans les tables sont les Cp entre les températures correspondantes et les températures les plus proches tirées des listings de l'I F P .


 $P=1\text{atm}$
 $\Phi=0.3$

T_r °K	C_p KJ/Kg·°K	\bar{C}_p KJ/Kg·°K	S_r J/Kg·°K	H_r KJ/Kg	M Kg/kmole	S_r J/kmole·°K	H_r KJ/kmole
800	1,1538	1,1633	8051,78	542,31	28,4965	230749,47	15453,58
900	1,1771	1,1750	8234,73	661,86	28,4965	234661,04	18860,72
1000	1,2005	1,2100	8360,02	781,41	28,4965	238231,45	22267,46
1100	1,2233	1,2214	8475,55	901,72	28,4965	241523,59	25695,95
1200	1,2433	1,2518	8582,94	1025,37	28,4965	244583,84	29219,49
1300	1,2632	1,2617	8683,25	1149,51	28,4965	247442,32	32757,02
1400	1,2829	1,2919	8777,58	1276,38	28,4963	250128,87	36372,29
1500	1,3028	1,3019	8866,77	1403,46	28,4961	252668,63	39993,29
1600	1,3255	1,337	8951,44	1532,87	28,4952	255073,49	43679,50
1700	1,3483	1,3486	9032,49	1662,27	28,4943	257374,96	47365,47
1800	1,3799	1,3644	9090,27	1793,80	28,4909	258990,61	51107,06
1900	1,4118	1,4141	9185,67	1925,39	28,4875	261676,68	54849,63
2000	1,4652	1,440	9259,37	2058,41	28,4774	263683,40	58618,27
2100	1,5221	1,5278	9331,59	2191,76	28,4663	265635,98	62391,39
2200	1,5790	1,556	9405,72	2325,11	28,4552	26758,84	66161,55

H₂O GNL

P=1atm

Φ=0.1

T_v °K	C_p KJ/Kg·K	\bar{C}_p KJ/Kg·K	S_v J/Kg·K	H_v KJ/Kg	M Kg/Kmole	S_r J/Kmole·K	H_r KJ/Kmole
600	1.0717	1.0715	7690.95	617.72	28.7316	220973.36	17748.21
700	1.0968	1.0968	7858.10	727.81	28.7316	225775.85	20911.20
800	1.1218	1.1218	8001.99	837.89	28.7316	229910.19	24074.19
900	1.1449	1.1372	8135.51	951.74	28.7316	233746.29	27345.18
1000	1.1670	1.1740	8254.86	1067.22	28.7316	237175.41	30663.21
1100	1.1879	1.1844	8367.11	1184.35	28.7316	240400.63	34028.50
1200	1.2069	1.2162	8469.73	1304.29	28.7316	243349.10	37474.58
1300	1.2259	1.2257	8567.10	1424.29	28.7316	246146.60	40922.25
1400	1.2443	1.2349	8640.91	1544.49	28.7315	248266.49	44461.97
1500	1.2627	1.2659	8743.95	1670.70	28.7313	251225.06	48001.50

P=1atm

Φ=0.15

700	1.1049	1.1081	7884.36	729.02	28.6718	226058.81	20902.47
800	1.1289	1.1209	8033.48	842.90	28.6718	230334.53	24167.47
900	1.1527	1.1588	8164.92	956.77	28.6718	234103.18	27432.47
1000	1.1754	1.1706	8287.60	1073.05	28.6718	237620.49	30766.44
1100	1.1966	1.2046	8398.89	1191.77	28.6718	240811.35	34170.34
1200	1.2171	1.2149	8503.92	1311.41	28.6718	243822.71	37600.68
1300	1.2357	1.2454	8600.56	1433.95	28.6717	246593.22	41193.93
1400	1.2542	1.2546	8692.83	1556.48	28.6717	249139.23	44627.20
1500	1.2739	1.2645	8780.04	1681.81	28.6713	251735.23	48219.80
1600	1.2938	1.2973	8861.82	1807.27	28.6709	254407.61	51816.20

H-S- Φ
GNL

P=1atm

$\Phi=0.2$

T_r °K	C_p KJ/Kg °K	\bar{C}_p KJ/Kg °K	S_r J/Kg °K	M_r KJ/Kg	M Kg/Kmole	S_r J/Kmole °K	H_r KJ/Kmole
800	1,1383	1,1439	8059,78	844,56	28,6126	230611,41	24165,23
900	1,1611	1,1553	8195,18	961,90	28,6126	234485,62	27522,71
1000	1,1839	1,1914	8316,41	1079,25	28,6126	237954,14	30880,19
1100	1,2056	1,2022	8430,31	1198,06	28,6126	241213,24	34279,73
1200	1,2252	1,2335	8534,60	1319,64	28,6126	244197,21	37758,50
1300	1,2447	1,2432	8633,45	1441,71	28,6126	247025,68	41251,09
1400	1,2638	1,2740	8725,32	1566,69	28,6124	249652,40	44827,03
1500	1,2829	1,2836	8813,17	1691,68	28,6123	252165,31	48403,09
1600	1,3053	1,2948	8896,69	1819,33	28,6114	254546,77	52053,62
1700	1,3279	1,3315	8975,49	1946,91	28,6104	256792,41	55701,88

P=1atm

$\Phi=0.25$

900	1,1704	1,1776	8221,30	964,11	28,5540	234751,14	27529,24
1000	1,1923	1,1886	8345,76	1084,77	28,5540	238304,98	30974,61
1100	1,2142	1,2225	8458,71	1205,43	28,5540	241530,19	34419,98
1200	1,2354	1,2331	8565,30	1327,00	28,5540	244573,75	37891,33
1300	1,2547	1,2632	8663,69	1451,41	28,5540	247383,08	41443,65
1400	1,2740	1,2729	8757,38	1576,13	28,5539	250057,59	45004,75
1500	1,2940	1,3046	8844,83	1703,31	28,5534	252550,11	48635,40
1600	1,3140	1,3146	8928,99	1830,49	28,5530	254949,61	52266,11
1700	1,3397	1,3274	9009,42	1960,01	28,5511	257229,02	55960,47
1800	1,3659	1,3690	9085,90	2089,67	28,5492	259395,36	59658,40

H-S- Φ
GNL

$P=1\text{atm}$

$\Phi=0.3$

T_r °K	C_p KJ/Kg·K	\bar{C}_p KJ/Kg·K	S_r J/Kg·K	H_r KJ/Kg	M Kg/Kmole	S_r J/Kmole·K	H_r KJ/Kmole
1000	1,2032	1,2111	8371,78	1087,89	28,4960	238562,46	31000,64
1100	1,2233	1,2211	8487,42	1211,52	28,4960	241857,58	34523,67
1200	1,2434	1,2517	8593,31	1335,15	28,4960	244874,98	38046,70
1300	1,2635	1,2617	8693,64	1459,36	28,4960	247734,06	41586,03
1400	1,2831	1,2919	8786,89	1586,18	28,4958	250389,60	45199,52
1500	1,3030	1,3018	8876,09	1713,27	28,4955	252928,80	48820,53
1600	1,3256	1,3371	8960,06	1842,71	28,4946	255313,41	52507,49
1700	1,3483	1,3484	9041,11	1972,16	28,4937	257614,95	56194,22
1800	1,3801	1,3643	9119,09	2103,76	28,4901	259803,88	59936,37
1900	1,4119	1,4139	9193,78	2235,38	28,4864	261897,69	63678,04

$P=1\text{atm}$

$\Phi=0.4$

1200	1,2619	1,2709	8647,44	1347,49	28,3817	245429,14	38244,28
1300	1,2819	1,2809	8749,25	1476,33	28,3816	248317,77	41900,65
1400	1,3020	1,3104	8843,98	1605,16	28,3814	251004,57	45556,84
1500	1,3225	1,3206	8934,50	1734,41	28,3811	253571,10	49224,72
1600	1,3452	1,3544	9019,70	1865,78	28,3802	255981,13	52951,27
1700	1,3696	1,3666	9101,96	1997,58	28,3788	258302,73	56688,93
1800	1,4010	1,4136	9180,43	2131,19	28,3754	260498,54	60473,38
1900	1,4369	1,4369	9257,10	2265,14	28,3705	262628,78	64263,26
2000	1,4918	1,5130	9331,39	2400,50	28,3599	264637,38	68078,02
2100	1,5468	1,5405	9405,51	2535,86	28,3493	266639,83	71889,90

H-S- Φ
GNL

P=1atm

$\Phi=1.5$

T_r °K	C_p KJ/Kg °K	\bar{C}_p KJ/Kg °K	S_r J/Kg °K	H_r KJ/Kg	M Kg/Kmole	S_r J/Kmole °K	$H_r^{\#}$ KJ/Kmole
1600	1.5589	1.5611	10126.27	2144.93	24.9808	252962.40	53582.17
1700	1.5735	1.5684	10221.22	2298.82	24.9797	255323.12	57423.85
1800	1.5880	1.5949	10310.15	2452.70	24.9785	257532.25	61264.95
1900	1.6033	1.6026	10396.41	2606.72	24.9772	259673.28	65108.61
2000	1.6332	1.6399	10478.78	2763.22	24.9726	261682.50	69005.02
2100	1.6786	1.6620	10559.41	2920.86	24.9643	263608.51	72917.42
2200	1.7405	1.7343	10638.37	3079.48	24.9518	265446.57	76838.75
2300	1.8477	1.8659	10717.72	3239.65	24.9474	267165.04	80756.25
2400	2.0173	1.9507	10799.50	3401.36	24.8867	268764.07	84648.72
2500	2.2619	2.2101	10886.09	3564.39	24.8256	270253.91	88488.35

P=1atm

$\Phi=1.7$

1500	1.5890	1.5884	10314.38	2051.32	24.0597	248161.07	49354.35
1600	1.5997	1.5938	10417.29	2206.68	24.0592	250631.69	53091.00
1700	1.6104	1.6130	10513.01	2362.03	24.0588	252930.44	56827.73
1800	1.6248	1.6202	10605.42	2518.93	24.0577	255142.01	60599.87
1900	1.6438	1.6425	10693.20	2677.44	24.0557	257232.51	64407.88
2000	1.6753	1.6816	10777.67	2837.79	24.0510	259213.76	68251.72
2100	1.7224	1.7051	10860.40	2999.29	24.0423	261109.10	72110.06
2200	1.7845	1.7791	10941.37	3161.77	24.0298	262919.15	75976.06
2300	1.8887	1.9075	11022.66	3325.97	24.0058	264607.91	79842.63
2400	2.0443	1.9853	11105.95	3491.50	23.9674	266180.80	83682.38
2500							

* 0- 11 01 0- 0 0 *
* * * * *
* * * * *
* * * * *
* * * * *

Méthode d'interpolation H T ϕ

Le tracé du diagramme H T ϕ a été fait à partir des listings fournis par l'I F P . Les valeurs de température données par ces listings ne permettent pas une facilité de lecture des diagrammes , d'où la nécessité d'avoir des températures rondes . On fait une interpolation linéaire sur l'enthalpie globale pour trouver la valeur correspondant à chaque température ronde .

Exemple:

pour une pression P = 1 atm et une richesse $\phi = 0,3$ pour le GN

on a d'après les listings : $T_1 = 637,20^\circ\text{K}$ $H_1 = 39,80 \text{ Kj/Kg}$

$T_2 = 851,37^\circ\text{K}$ $H_2 = 280,30 \text{ Kj/Kg}$

On veut trouver la valeur de H_i correspondant à $T_i = 700^\circ\text{K}$ T_1 T_i T_2

$$\Delta H = H_2 - H_1 = 240,5 \text{ Kj/Kg}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 214,17^\circ\text{K}$$

$$\delta t = T_i - T_1 = 62,8$$

$$\frac{\Delta H}{\Delta T} \delta t = 70,520614 \text{ Kj/Kg}$$

$$\text{d'où l'enthalpie } H_i = H_1 + \frac{\Delta H}{\Delta T} \delta t = 39,8 + 70,5206 = 110,3206 \text{ Kj/Kg}$$

$$\text{pour le calcul de } H (1 + \phi f_s) = h$$

on a H (calculé précédemment)

$$\phi = 0,2$$

$$f_s = 0,0655 \text{ (pour le GN)}$$

$$\text{on tire : } h = 111,765 \text{ Kj/Kg}$$

DIAGRAMME ENTHALPIE-RICHESSE ^I

$\Delta U \text{ G.N} : h_k = -2861,0036 \text{ kJ/kg} \cdot f_s = 0,0655$
_{298°K.}

$\phi = 0$

$\phi = 1$

$T:K$	H	$\frac{\Delta H}{\Delta T} \text{ ST}$	H _{air}	$H(1+\phi f_s)$	$T:K$ ronde	$D = h_{air} + \phi \cdot f_s \cdot h_k$
323	325,9	23,322	302.578	302.578	300°K	115.18226
373	376.6					
373	376.6	23.506	404.194	404.194	400°K	216.79826
423	427.7					
473	479.1	23.828	507.072	507.072	500°	319.67626
523	530.9					
573	583.1	24.334	611.666	611.660	600°	424.27026
623	636.0					
673	689.6	24.886	718.814	718.814	700°	531.41826
723	743.7					
773	798.4	25.438	828.262	828.262	800°	640.86626
823	853.7					
873	909.6	25.99	940.11	940.11	900°	752.71426
923	966.1					
973	1023.0	26.45	1054.05	1054.05	1000°	866.65426
1023	1080.5					

SUI TE

II

$\phi = 0$						$\phi = 1$
$T^{\circ}K$	H	$\frac{\Delta H}{\Delta T} ST$	H_{air}	$H(1+\phi f_s)$	$T^{\circ}K_{ronde}$	$D = h_{air} + \phi \cdot f_s \cdot h_k$
1073	1138.5	26.956	1170.144	1170.144	1100	982.748264
1123	1197.1					
1173	1256.1	27.324	1288.176	1288.176	1200	1100.780264
1223	1315.5					
1273	1375.3	27.738	1407.862	1407.862	1300	1220.466264
1323	1435.6					
1373	1496.4	28.152	1529.448	1529.448	1400	1342.05226
1423	1557.6					
1473	1619.2	28.52	1652.68	1652.68	1500	1465.284264
1523	1681.2					
1573	1743.7	28.934	1777.666	1777.666	1600	1590.27026
1623	1806.6					
1673	1870.0	29.394	1904.506	1904.506	1700	1717.110264
1723	1933.9					
1773	1998.3	29.808	2033.292	2033.292	1800	1845.896264
1823	2063.1					
1873	2128.6	30.36	2164.24	2164.24	1900	1976.84426
1923	2194.6					

$$\phi = 0,1$$

$T \text{ } ^\circ\text{K}$	H	ΔH	$\frac{\Delta H}{\Delta T} \text{ ST}$	Hronde	$H(1 + \phi \cdot f_s)$	$T \text{ } ^\circ\text{K.ronde}$
368.39	60.9		+33.10313	94.00313	94.61885	400
		242.1	-104.273	198.72672	200.02838	500
599.57	303		0.450311	303.45031	305.4373	600
		255.5	110.574427	413.57426	416.28318	700
831.63	558.5		-34.8249	523.67510	527.10517	800
		268.9	79.046749	637.54675	641.72268	900
1064.21	827.4		-74.237118	753.16288	758.09609	1000
		283	43.094796	870.49479	876.19653	1100
1299.24	1110.4		-119.49504	990.90495	997.39537	1200
		295.2	+0.948193	1111.34819	1118.62752	1300
1535.85	1405.6		-169.4895	1236.11046	1244.20598	1400
		306	-44.72727	1306.8727	1369.78644	1500
1772.23	1711.6		83.043827	1488.644	1498.394	1600
			-93.50359	1618.0964	1628.695	1700

$$\phi = 0,15$$

$T \equiv K$	H	ΔH	$\frac{\Delta H}{\Delta T} S.T$	H. ronde	$H(1 + \phi \cdot h)$	Tronde $\equiv K$
505.74	50.3		-6.2183	44.08171	44.51421	500
		241.3	102.11888	152.41888	153.91639	600
728.47	291.6		-30.84228	260.7577	263.31955	700
		254.8	81.497707	373.0927	376.7583	800
952.12	546.4		-59.3793	487.02072	491.8057	900
		268	56.9696	603.3696	609.29774	1000
1177.36	814.4		-92.046173	722.3538	729.4509	1100
		282	27.93105	842.33105	850.60695	1200
1405.94	1096.4		130.69857	965.70143	975.18944	1300
		294.3	-7.58841	1088.8116	1099.5091	1400
1636.31	1390.7		120.1626	1216.5620	1228.5153	1500
		305	-46.38639	1344.31360	1357.5215	1600
186.77	1695.7		84.65724	1475.3572	1489.8526	1700
			87.422	1608.2780	1624.079	1800

$$\phi = 0,20$$

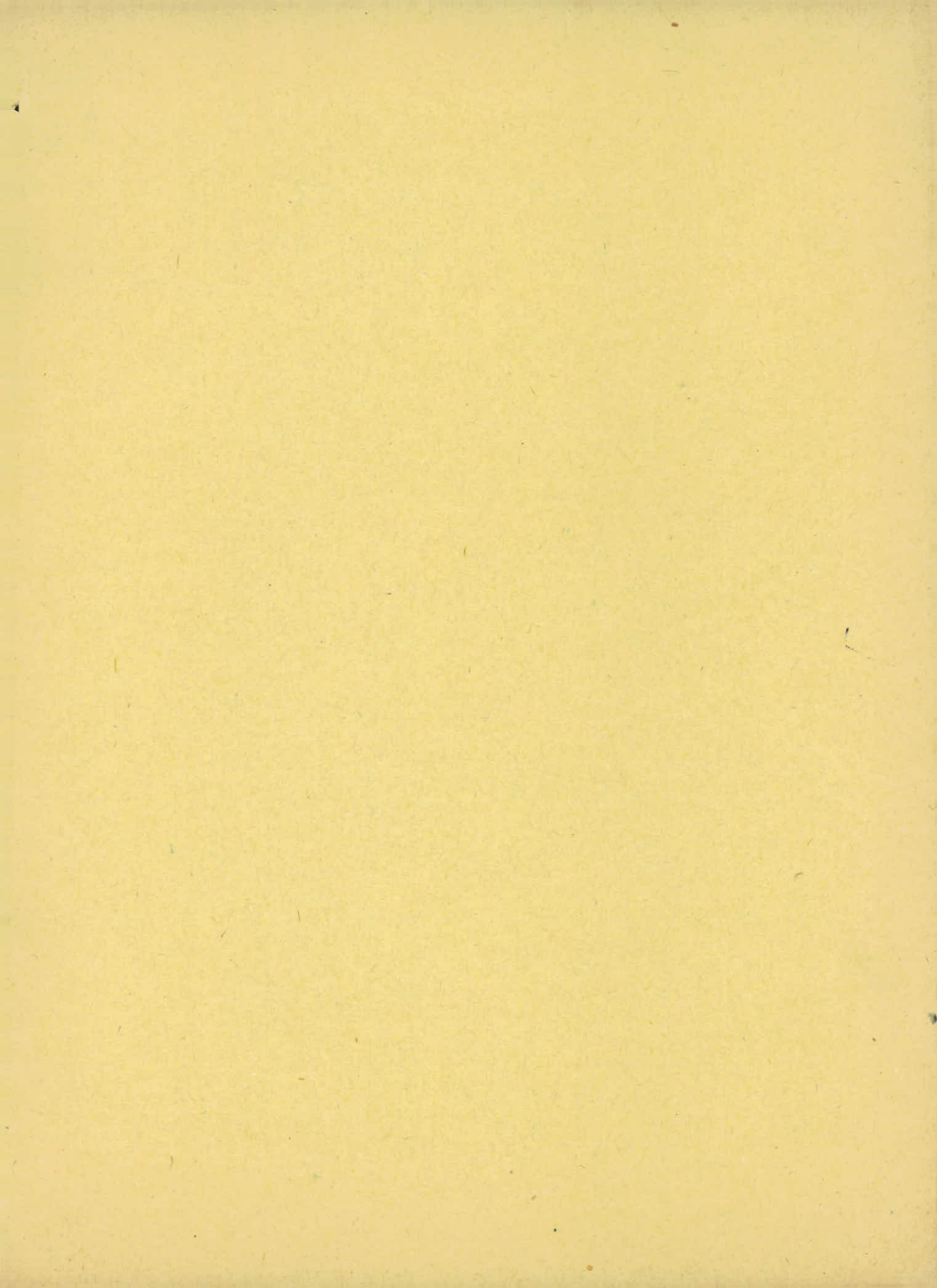
$T \cong K$	H	ΔH	$\frac{\Delta H}{\Delta T} ST$	H_{ronde}	$H(1+\phi f_s)$	$T_{ronde} \cong K$
637.20	39.8		-41.77335	-1.97335	-1.9992	600
		240.5	70.520614	110.32061	111.76584	700
851.37	280.3		-45.74599	234.5540	237.6266	800
		254	57.15353	337.45353	341.87467	900
1067.49	534.3		-79.31917	454.9808	460.94107	1000
		267.1	39.70108	574.00108	581.5205	1100
1286.21	801.4		-105.2793	696.1207	705.23987	1200
		281.2	17.426515	818.82651	829.55314	1300
1508.73	1082.6		-137.40282	945.1971	957.57926	1400
		293.3	-11.03216	1071.5678	1085.6054	1500
1732.84	1375.9		119.44799	1202.0479	1217.7948	1600
		304	-42.97877	1332.921	1350.3825	1700
1955.07	1679.9		91.87166	1467.771	1486.999	1800
			-75.33312	1604.5668	1625.5867	1900

$$\phi = 0,25$$

$T:K$	H	ΔH	$\frac{\Delta H}{\Delta T} ST$	H_{ronde}	$H(1+\phi \cdot f_s)$	$Tronde :K$
762.28	29.4		-72.2755	-42.87555	-43.57766	700
		239.7	43.77383	73.17383	74.37205	800
968.83	269.1		-79.87679	189.22321	192.3217	900
		253.2	37.6934	306.7934	311.8171	1000
1178.21	522.3		-94.57814	427.722	434.7258	1100
		266.2	27.26054	549.56054	558.5596	1200
1390.99	788.5		-113.8337	674.6663	685.71394	1300
		280.3	11.65115	800.15115	813.2536	1400
1607.75	1068.8		-139.3353	929.4646	944.6846	1500
		292.4	-10.0218	1058.778	1076.1157	1600
1825.5	1361.2		123.8755	1192.6755	1212.2056	1700
		303.1	-34.2420	1326.9579	1348.6869	1800
2039.9	1664.3		105.3216	1466.5216	1490.53589	1900
			-56.40713	1607.893	1634.2221	2000

$$\phi = 0,3$$

$T \approx K$	H	ΔH	$\frac{\Delta H}{\Delta T} S.T$	Hronde	$H(1+\phi.f_s)$	Tronde $\approx K$
881.63	19.0		21.979624	40.97962	41.78487	900
		239	-97.37081	160.6292	163.78555	1000
1081.38	252.0		23.09649	281.0965	286.62005	1100
		252.3	-105.1622	405.13778	413.09874	1200
1284.78	510.3		19.50152	529.8015	540.2121	1300
		265.5	-117.86759	657.9324	670.86077	1400
1491.99	775.8		10.6008	786.4008	801.85357	1500
		279.3	142.94538	918.74538	936.79873	1600
1703.03	1055.1		-4.01004	1051.0899	1071.744	1700
		291.4	133.81189	1188.9118	1212.2740	1800
1914.2	1346.5		-19.59502	1326.90498	1352.9786	1900
		302.2	126.0513	1472.55134	1501.4869	2000
2119.9	1648.7		-29.23568	1619.4643	1651.28679	2100



UNIVERSITE D'ALGER

8/75

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MECANIQUE

1ex
T₂

LABORATOIRE D'ENERGETIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للمعلم الهندسية
— البعثية —

**ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE
SUR CHAMBRE DE COMBUSTION
GN & GNL**

11 PLANS

2

Responsable du projet
M. Gilbert MATTON
Professeur

Dirigé par
M. Jean-Pierre MULLER
Ingénieur-Assistant

Etudié par
MM. Hamlaoui BOUGHOUAS
Djamal BOUMAZA
Moussa ZAIRI

PROMOTION 1975

LABORATOIRE D'ENERGETIQUE

**ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE
SUR CHAMBRE DE COMBUSTION**

GN & GNL

**Responsable du projet
M. Gilbert MATTON
Professeur**

**Dirigé par
M. Jean-Pierre MULLER
Ingenieur-Assistant**

**Etudié par
MM. Hamlaoui BOUGHOUAS**

Djamal BOUMAZA

Moussa ZAÏRI

Promotion : 1975



T A B L E D E S M A T I E R E S

Pages:

Introduction	
Sommaire	
I- Installation de combustion	1.1
II- Analyseurs de gaz à absorption de rayonnement I-R ANIR 11...	2.1
II- Analyseur d'oxygène type OSCAR	2.6
III- Méthode de mesure	3.1
IV- Méthode de dépouillement des essais	4.1
IV- Détermination du ρ du GNL.....	4.5
V- Essais au GN.....	
VI - Essais au GNL	
Conclusion	

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

Le GN, carburant de premier choix, trouve actuellement son application dans les foyers domestiques, la production de l'énergie thermique. Actuellement le GN est liquéfié uniquement pour le transport à grande distance.

Le développement extraordinaire de l'aviation avait été fondé jusqu'ici sur la disponibilité des carburants exagérément bon marché. En raison des augmentations de coût, de la difficulté de satisfaire une demande toujours plus grande, la situation deviendra très différente à l'avenir et la politique énergétique devra être modifiée radicalement. La crise actuelle est purement artificielle, le véritable danger réside dans le tarissement des réserves naturelles d'énergie, en l'occurrence le pétrole.

Dans l'hypothèse d'une raréfaction ou d'un renchérissement prohibitif des produits pétroliers, la recherche d'un nouveau carburant destiné à l'aviation a donné naissance à des discussions importantes. L'attention porte sur le GNL.

L'inconvénient réside au niveau du stockage qui exige des réservoirs soigneusement isolés (température de liquéfaction -162°C à la pression ambiante). Il était donc intéressant de prévoir un axe de recherche sur l'étude et l'utilisation de ce carburant cryogénique. Un laboratoire d'énergétique comportant plusieurs bancs d'essais (chambre de combustion de réacteur, turbine à gaz, moteur à explosion, réacteur homogène) a été créé au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Nous nous proposons de faire l'étude de l'utilisation des deux combustibles GN et GNL sur une chambre de combustion.

S O M M A I R E

Le projet qui nous a été confié se compose de deux parties:

- Utilisation des listings de l'I F P pour tracer les diagrammes des gaz de combustion pour le GN et le GNL.
- Etudier la combustion du GN et GNL dans l'air en déterminant les concentrations des produits de combustion, les températures atteintes, et les rendements de combustion et comparer les résultats obtenus à la théorie.

Les résultats théoriques précèdent l'étude expérimentale qui a été effectuée en utilisant comme foyer une chambre de combustion de turboréacteur. La chambre de combustion est la partie vitale d'un réacteur. C'est le lieu de transformation de l'énergie chimique en énergie calorifique. Le problème de combustion est fort complexe et son état peut être défini par trois paramètres à savoir:

- L'analyse des gaz de combustion
- La mesure des températures
- Les quantités de comburant et de carburant utilisées dans la combustion.

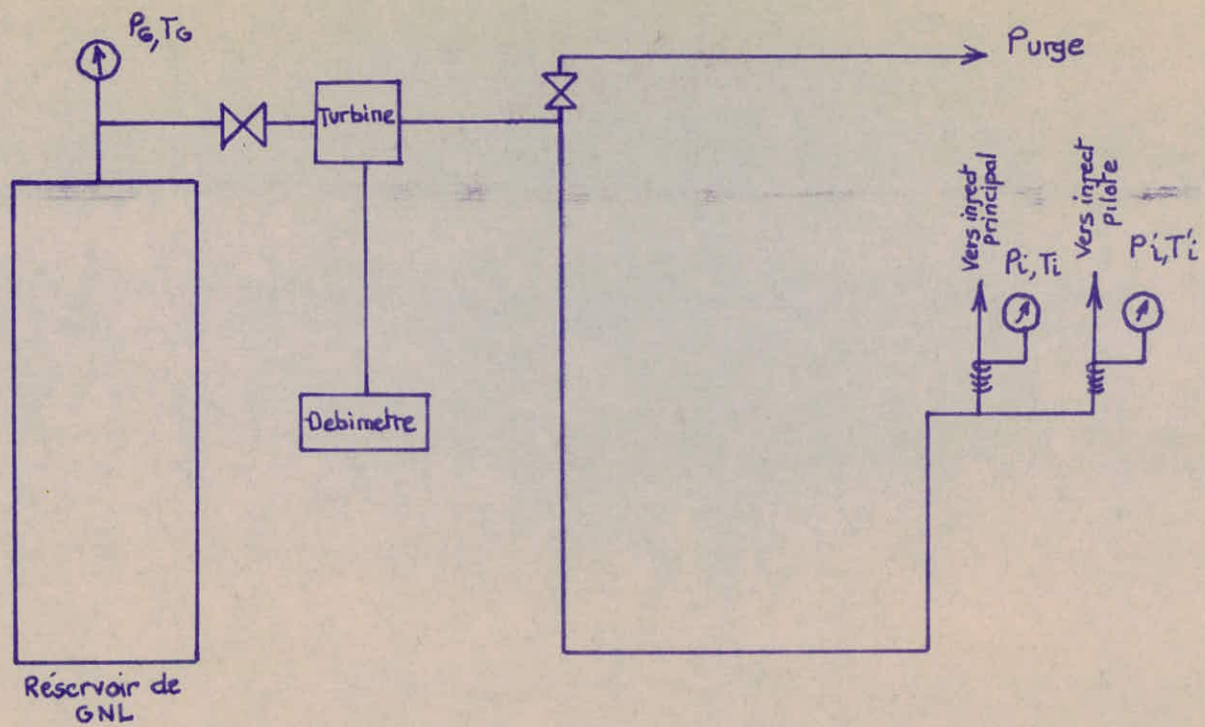
La détermination de ces paramètres nécessite des moyens appropriés.

- Un circuit d'analyse des gaz de combustion continu et à court temps de réponse a été mis au point. Ce circuit nous permet de déterminer alternativement les concentrations de CO , CO_{2r} , O_2 existant réellement dans les gaz de combustion et la concentration CO_{2T} qui devrait exister si la combustion était complète. Disposant de ces concentrations (CO_{2r} , CO_{2T}) nous pouvons déterminer le rendement de combustion.

- Pour mesurer les températures nous avons réalisé une sonde permettant une exploration et un balayage XY de la chambre. D'autres thermocouples ont été placés en différents points (panier mélangeur, chambre, préchauffage) et les

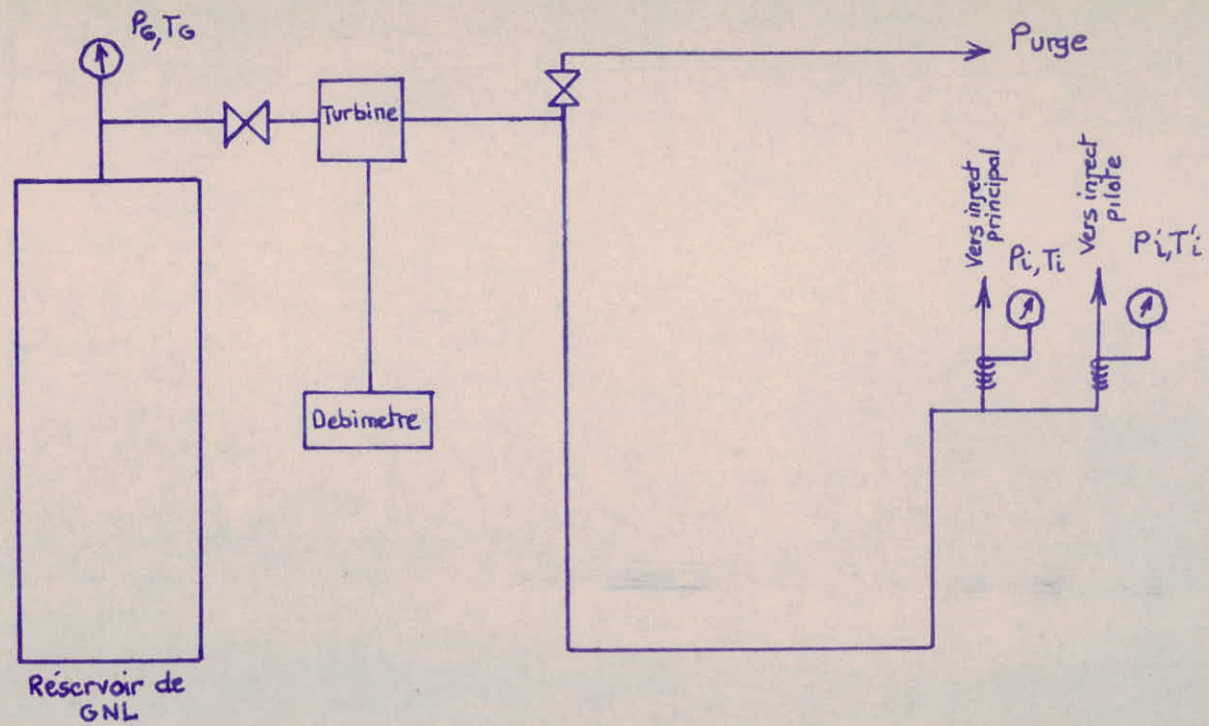
températures sont lues au moyen de pyromètres et d'enregistreurs. Des manomètres à eau nous donnent le ΔH et à partir de formules déjà établies nous pouvons déterminer les débits de comburant et de carburant .

A partir des mesures effectuées , des relations entre les concentrations températures, et les rapports comburant/comburant ont été établies .



CIRCUIT GNL

PL: 2



CIRCUIT GNL

PL: 2

INSTALLATION DE COMBUSTION

La combustion air GN ou GNL se effectue dans un foyer qui est une chambre de turboréacteur . L'installation générale de combustion comprend:

- Un turboventilateur
- Une chambre de préchauffage
- Une chambre de combustion
- Un uniformiseur ou panier mélangeur

I.1 Turboventilateur

C'est un compresseur centrifuge avec un taux de compression de 10 à 15. L'air entrant à la température ambiante ressort à une température qui peut atteindre 330°K. Le débit d'air peut varier de 10 à 100 m³/h.

I.2 Chambre de préchauffage

C'est un cylindre en inox avec un injecteur, elle permet d'élever la température de l'air à l'entrée de la chambre de combustion et la prévaporisation du combustible liquide éjecté dans la chambre. Le préchauffage améliore la combustion mais augmente la dissociation. Le débit de carburant est réglable et la température d'entrée d'air dans la chambre est contrôlée au moyen d'un thermocouple .

I.3 Chambre de combustion

I.3.1 Description de la chambre

C'est une chambre de turboréacteur qui se compose essentiellement de :

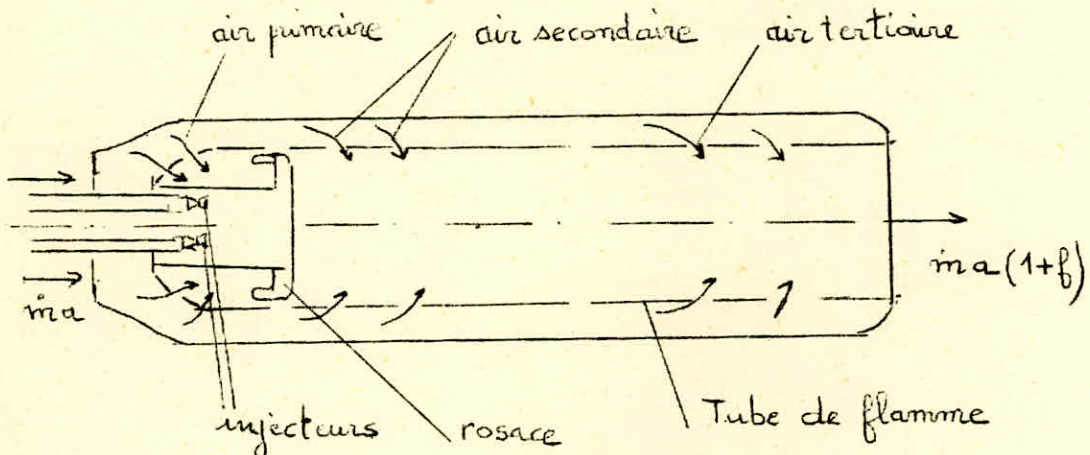
- Un injecteur à prévaporisation ou rosace
- Un tube de flamme qui est percé d'orifices dosant la répartition de l'air en "air secondaire" et en "air tertiaire" ou air de dilution.

I.3.2 Processus de la combustion

a) Introduction du carburant (mélange et vaporisation avec l'air primaire).

b) Combustion du carburant vaporisé et mélange avec l'air secondaire et tertiaire .

Au cours de la phase a) (mélange et vaporisation du combustible) nous avons une diminution de l'enthalpie sensible de l'air par suite de l'enthalpie nécessaire pour rechauffer le carburant et le vaporiser ;



I.4 Uniformiseur ou panier mélangeur

Cet uniformiseur, placé immédiatement après la chambre de combustion, comporte un système de chicanes constitué par un tronc de cône percé de trous. Ce système assure le brassage des gaz, il est muni d'un élément cylindrique qui doit posséder une longueur suffisante (5 à 10 fois le diamètre) pour assurer la régularisation de l'écoulement. L'ensemble est calorifugé pour éviter les pertes calorifiques. Cet uniformiseur est destiné à mélanger les gaz de combustion pour transformer le flux gazeux hétérogène provenant de la chambre de combustion en un écoulement homogène. La technologie de cet uniformiseur nous limite en température à 800°C .

Analyseur de gaz à absorption de
rayonnement infrarouge

ANIR 11

1. Utilisation

Il assure la mesure en continu, de la teneur d'un gaz considéré, dans un mélange binaire ou complexe.

1.1 caractéristiques techniques

Etendue de la mesure

minimale (à la pression atmosphérique)

CO₂ 0 à 50 ppm.

CO 0 à 100 ppm.

$$1 \text{ ppm} = 10^{-6} = 10^{-4}\% \quad 1\% = 10^4 \text{ ppm}$$

ex: 1% CO = 10⁴ ppm

maximale: 0 à 100%.

1.2 Alimentation pneumatique:

- Caractéristiques du gaz : l'appareil résiste à tous les gaz usuels sauf aux vapeurs d'acide.

- Pression d'alimentation de 0,5 à 1,5 bar absolu, l'indication en concentration est directement proportionnelle à la pression absolue.

- Débit recommandé 60 l/h . Le débit est fonction de la pression d'alimentation.

- Température ambiante limite de fonctionnement +15 à +35°C

- Alimentation : 127V , 220V \pm 15% , 50 Hz

Consommation 100VA environ

- Bloc d'injection des gaz étalons

Il faut toujours prévoir des bouteilles de gaz étalons et d'azote munies de détendeurs régulateurs de pression de manière à ce que les trois gaz, mesure zéro (azote), fin d'échelle (gaz étalon) soient tous réglés à une même surpression comprise entre 120 et 150 mbar par rapport à la pression atmosphérique.

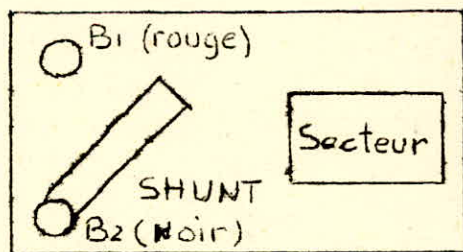
- la régulation du débit se fait à l'intérieur de l'analyseur par le robinet pointeau précédant le débitmètre.

- Ne jamais faire passer dans l'appareil un mélange gazeux saturé ou contenant des poussières.

1.3 Récepteur extérieur

La sortie de la mesure est en courant et en outre isolée de la masse. Il faut donc toujours shunter la sortie de l'analyseur (bornes B_1 et B_2) situées à l'arrière de l'appareil par une impédance donnant pour le courant maximal une chute de tension inférieure à 24V.

Par exemple: calibre 5mA impédance admissible de 0 à 4000 . Dans le cas où il y a plusieurs récepteurs extérieurs il faut les brancher en série.



Plaque de raccordement

Raccorder l'analyseur à une source tension 110 - 127 - 220 ou 237 V (50 Hz) au moyen du cordon.

Remarque ; au dessus du transformateur d'alimentation générale se trouve une plaque équipée de bornes permettant d'effectuer les différents raccordements secteur (110 \pm 127 - 220 - 237 V)

Raccordement gaz

Raccorder sur la face avant ;

- le filtre de sécurité à l'entrée du gaz
- la tubulure sortie à une canalisation d'évacuation

Exploitation

Si le mélange contenant le gaz à analyser est saturé d'humidité il est recommandé à brancher l'appareil au moins une heure à l'avance sans mettre la pompe en marche , pour éviter les condensations de la vapeur d'eau contenue dans le mélange à l'intérieur du tube d'analyse.

Si le temps de préchauffage de l'appareil est respecté le tarage sera précis et plus stable.

Mise en service de l'analyseur

-Vérifications préliminaires

Vérifier le zéro de l'amplificateur(agir sur le potentiomètre P_2 si c'est nécessaire , situé à l'intérieur de l'appareil).

-Réglage du zéro des teneurs

Faire circuler dans le tube d'analyse un gaz neutre(azote ou air) ne contenant pas le gaz à doser.

-Vérifier que le commutateur CO1 est sur la position mesure, et que le gain est à la valeur probable indiquée.

Pseudo-tarage et tarage

- Pseudo-tarage:

Cette opération consiste à contrôler le fonctionnement de l'appareil .

-Balayer le tube d'analyse avec un gaz neutre (N₂).

-Mettre le commutateur CO 1,(vérifier la correspondance entre la valeur lue

sur le milliampèremètre et la valeur indiquée sur la fiche d'instruction.

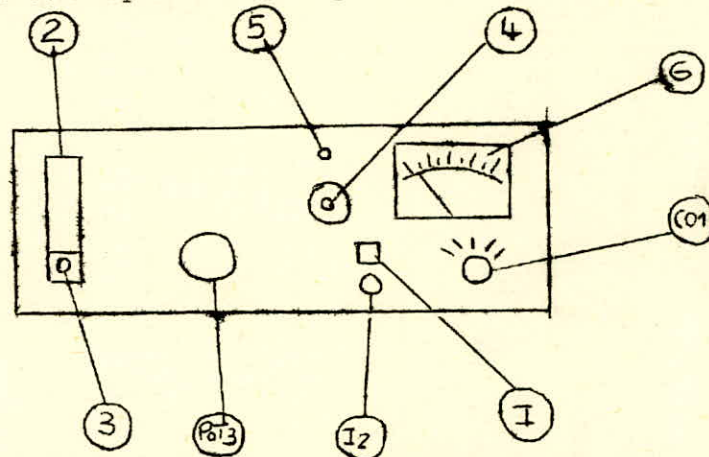
Tarage

-Mettre le commutateur sur la position mesure.

-Balayer le tube d'analyse avec un gaz titré.

-Controler que la valeur lue sur le milliampèremètre correspond à la valeur lue sur la courbe d'étalonnage .

-Ajuster cette correspondance en agissant sur le potentiomètre POT 3.



CO 1: commutateur (zéro amplificateur, tarage, mesure)

G : milliampèremètre

I : bouton poussoir MARCHE ARRÊT

I2 : inverseur zéro

POT3: potentiomètre gain

4 : filtre de sécurité

5 : tubulure sortie gaz

2 : débitmètre

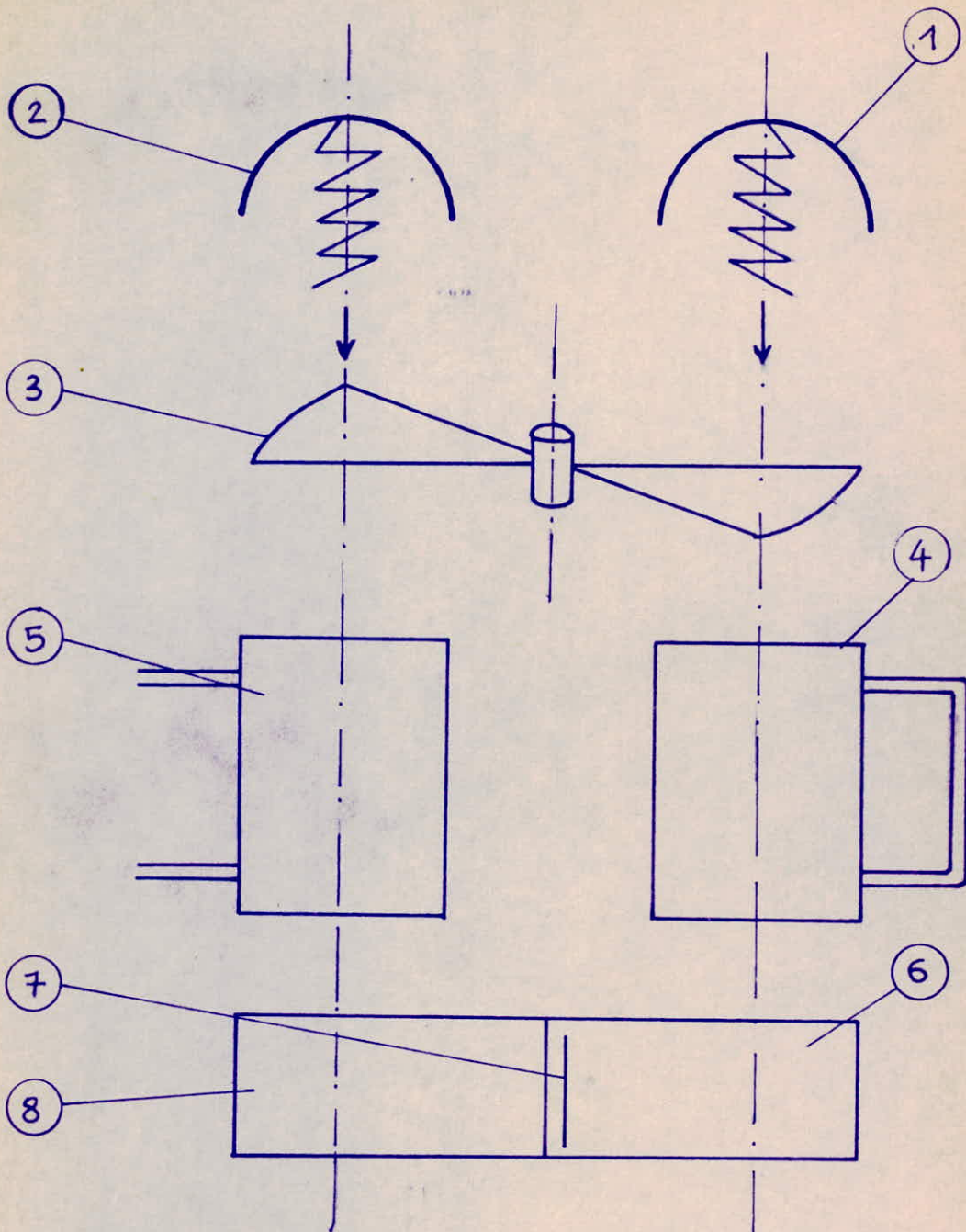
3 : axe fendu (débitmètre)

Fonctionnement

L'analyseur comprend deux émetteurs identiques 1 et 2 constitués de spirales chauffées électriquement au rouge, et munies de réflecteurs ; Les tubes 3 et 4 servent, l'un de tube d'analyse et contient le mélange gazeux à analyser, l'autre de tube de comparaison et contient un gaz neutre.

Les deux chambres 5 et 6 du récepteur sont remplies par le même gaz que celui que l'on veut analyser . Le gaz absorbera les radiations qui ont été affaiblies par la présence dans le mélange du gaz à doser .L'émission infra-rouge est interrompue périodiquement et simultanément par la rotation d'un obturateur 7 Les pressions qui régissent dans les deux chambres de mesure se trouvent modulées à la fréquence de passage des pales de l'obturateur .

La membrane séparant les deux chambres ,constituant l'armature d'un condensateur substitue la mesure de la variation de pression à une variation de capacité électrique , qui s'effectue au moyen d'un amplificateur dont le signal de sortie fait dévier un milliampèremètre .



1-2 Emetteurs

4 Tube de comparaison

5 Tube d'analyse

3 Obturateur

7 Membrane

6-8 Chambre (recepteur)

SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ANALYSEUR

Analyseur d'Oxygène

Type OSCAR

Principe : Oscar est un analyseur de gaz utilisant les propriétés paramagnétiques de l'oxygène. Il mesure en continu, la teneur en oxygène d'un mélange gazeux

gaz paramagnétiques : O_2 ; NO_2 ; NO

- De tous les gaz industriels, seul l' O_2 est paramagnétique
(les deux oxydes d'azote NO et NO_2 sont également paramagnétiques, mais leur susceptibilité magnétique est plus faible et on les rencontre généralement en très faible proportion)

Caractéristiques techniques

- alimentation secteur
- Tension 220V \pm 10%
- Fréquence 45 à 65 Hz sinusoïdal
- Consommation 120 VA

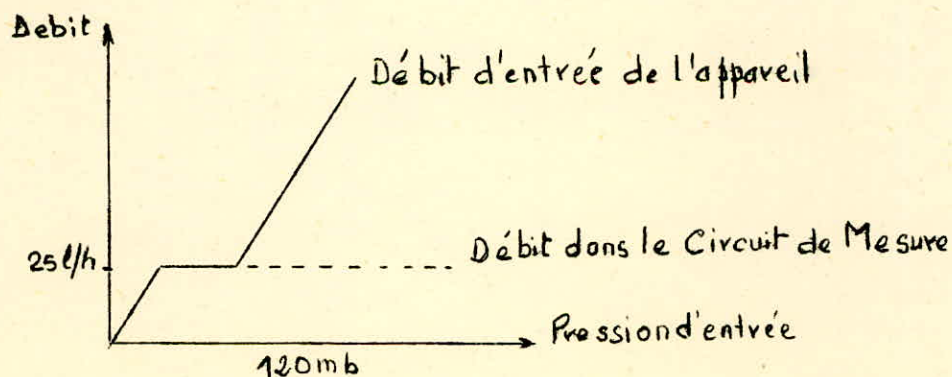
Alimentation pneumatique

L'appareil résiste à tous les gaz usuels sauf aux vapeurs de solvants et aux vapeurs d'acide (HCl).

Ne pas faire passer de mélange inflammable dans l'analyseur, celui-ci comportant un point chaud (230°) -

Pression d'alimentation : 0,1 à 1b absolu

Débit muni d'un régulateur à 25l/h



Etalonnage de l'analyseur

Reglage du zero des teneurs - après deux heures de fonctionnement faire passer de l'azote

- Ramener l'indicateur de l'échelle des teneurs à l'aide du potentiomètre (4)

- Lorsque l'appareil est utilisé sur ses 3 sensibilités, régler le zero sur la position 1 du commutateur (5)

Reglage du gain

Envoyer dans l'analyseur un mélange de gaz étalon . Amener la lecture à la valeur voulue en agissant sur le potentiomètre du gain (3)

quand l'appareil est utilisé sur ces trois sensibilités, faire le reglage du gain sur la sensibilité correspondant à la valeur du gaz étalon .

On peut utiliser l'air ambiant dans certains cas.

Fonctionnement

Circuit de mesure:

Le circuit de mesure est constitué de deux tubes en acier inoxydable amagnétique . Le gaz à doser est envoyé à l'intérieur de ces tubes qui ont une section rectangulaire afin de soumettre un grand volume de gaz aux variations du champ magnétique. Le gaz est chauffé par des résistances électriques.

Les tubes de mesure sont soumis à un champ magnétique périodique obtenu en alimentant simultanément la bobine en courant continu et en courant alternatif Cette superposition de courant, permet l'obtention d'un champ magnétique très intense . Les variations de pression sont transmises au condensateur de mesure.

Méthode de mesure

1 Méthode d'analyse des gaz1.1 Principe

Le principe de la méthode consiste à mesurer alternativement les concentrations en CO_2 , CO , O_2 existant réellement dans les gaz et la quantité de CO_2 qui devrait exister si la combustion était totale et parfaite. Les gaz d'échappement sont prélevés de la chambre au moyen d'une sonde refroidie puis acheminés vers les analyseurs par deux circuits indépendants. Le CO_2 réel et les imbrulés sont dosés directement dans les gaz d'échappement tandis que pour mesurer le CO_2 total, on réalise préalablement la combustion des imbrulés (constitués essentiellement de CO) dans un four électrique chauffé à 1000°C . Le four électrique doit être placé le plus près possible du lieu de prélèvement des gaz afin de récupérer les imbrulés liquides ou condensables. La transformation du CO , contenu dans les imbrulés, en CO_2 a lieu dans un tube en acier inoxydable contenant de la tournure de cuivre oxydée (Cu_2O). L'oxygène non utilisé au cours de la combustion permet la transformation du CO en CO_2 . A la sortie du four, les gaz passent dans un réfrigérant, celui-ci permet leur refroidissement avant l'entrée dans les analyseurs. Pour l'acheminement des gaz, du fait de leur énergie cinétique insuffisante et des pertes de charges dans les conduites, on utilise une pompe à membranes à deux circuits montés en parallèles. Ainsi les gaz de combustion sont aspirés à travers le four, les réfrigérants, vers les analyseurs. Mais avant d'atteindre les analyseurs, les gaz passent à travers un dessiccateur qui est destiné à débarrasser les gaz de particules solides qu'ils renferment et de les dessécher en absorbant la vapeur d'eau qui n'a pas été condensée dans les réfrigérants. L'élimination totale de la vapeur d'eau est indispensable, sinon elle introduit des erreurs sur les

mesures au niveau des analyseurs . Ceci s'explique par le fait que la vapeur d'eau a dans les analyseurs un ^{temps de} même réponse que celui du CO₂ .

1.2 Précision de cette méthode

Elle est difficile à déterminer , car elle est liée à de nombreux facteurs
Les erreurs peuvent provenir principalement :

- du four : on ignore si tous les imbrulés sont transformés intégralement en CO₂ .

- de l'analyseur des gaz : la précision de cet appareil dépend de la

- précision avec laquelle l'étalonnage a été fait

- stabilité de l'appareil

- des variations de pression et de température du gaz à analyser

(car elle jouent un rôle important dans l'absorption de l'infrarouge)

1.3 Rendement de combustion

Le rendement est défini par le rapport de la quantité de CO₂ réellement existant dans les gaz issus de la combustion à la quantité de CO₂ qui devrait exister si la combustion était complète

$$b = \frac{\text{CO}_2 \text{ réel}}{\text{CO}_2 \text{ T}}$$

Pour la connaissance de ces quantités de gaz issus de la combustion il est nécessaire d'avoir un appareillage approprié en l'occurrence : les analyseurs permettant une mesure rapide et précise de la teneur des gaz de combustion.

Précision de la mesure du rendement

Le rendement de combustion étant le rapport de deux quantités mesurées pratiquement au même instant avec le même appareil , aussi les causes d'erreur provenant de l'analyseur de gaz, n'interviennent pas dans la mesure du rendement (les erreurs de lecture mises à part).

114 Amélioration du circuit d'analyse des gaz de combustion

Lors des premiers essais nous avons utilisé le même circuit d'analyse des gaz de combustion que celui de l'année précédente, nous avons constaté la présence de CO dans le circuit CO_{2T} et dans la plus grande partie des essais CO_{2r} était supérieur au CO_{2T} donc un rendement de combustion supérieur à l'unité ce qui est incompatible et qui montre que le circuit avait des fuites. Dans un premier temps nous avons pensé que la tournure de cuivre était insuffisante pour l'oxydation complète du CO en CO_2 . Nous avons augmenté la quantité de tournure de cuivre, l'analyse s'est un peu améliorée du moins pour les premières mesures et puis nous avons le même problème pour le rendement de combustion. A quoi cela est-il dû?

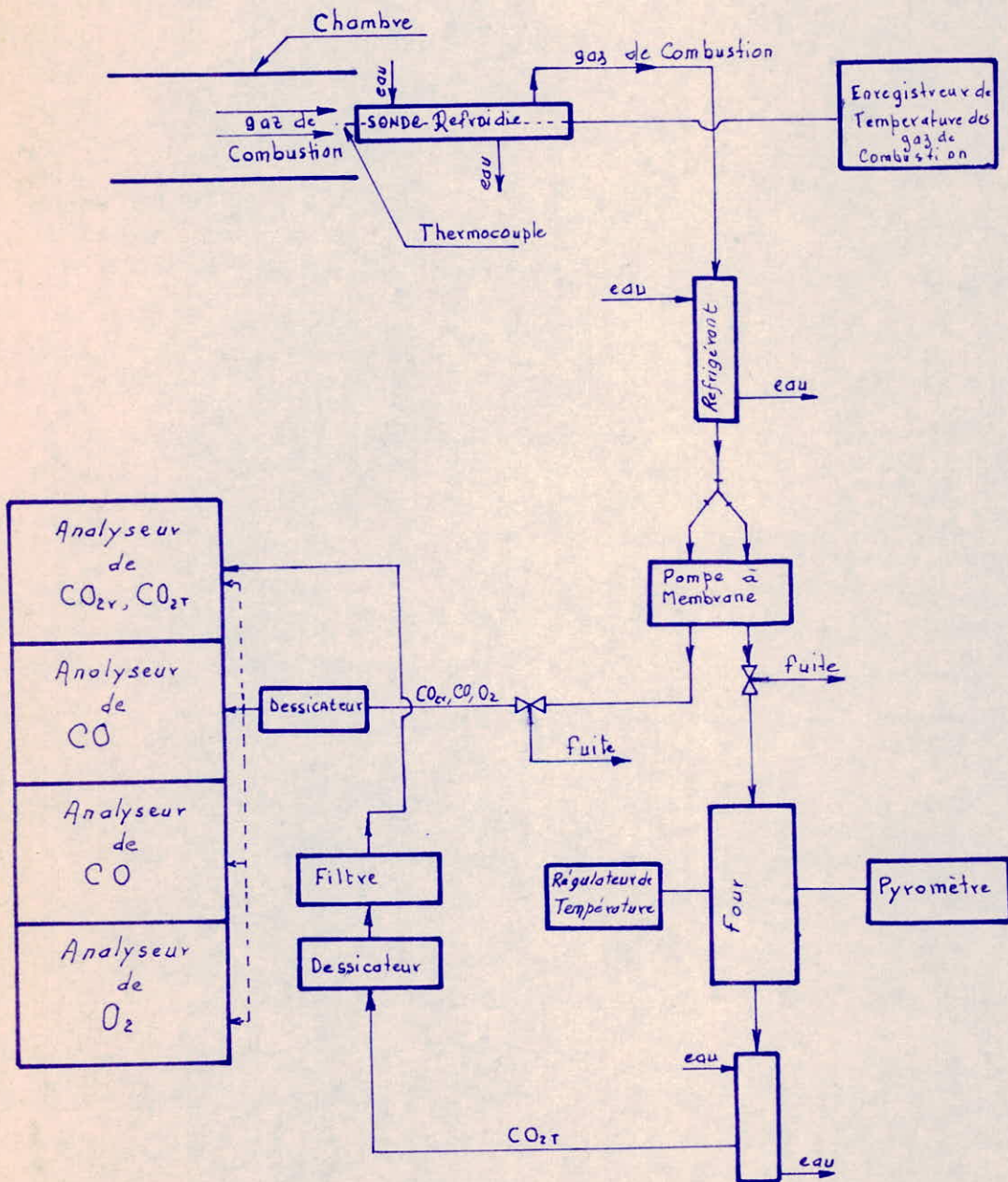
Trois hypothèses se sont posées :

- Soit que nous avons une fuite dans le circuit .
- Soit que le four ne chauffe pas assez donc la réaction n'a pas lieu.
- Soit que la réaction n'a pas lieu pour une autre cause.

Après vérification de l'étanchéité et emplacement du pyromètre les deux hypothèses ont été écartées .

Or en voulant vérifier l'oxyde de cuivre nous avons constaté que nous n'avons plus que du cuivre . c'est que nous avons un débit de gaz trop important qui passe sur l'oxyde de cuivre et en consomme une grande partie après un ou deux mesures d'où une oxydation insuffisante pour les autres mesures . Nous avons procédé à l'installation du circuit suivant (Pl3):

Les gaz de combustion sont recueillis au moyen d'une sonde refroidie par l'eau (PL 4°). Ces gaz passent dans un réfrigérant pour ne pas détériorer les membranes de la pompe qui aspire les gaz de combustion . C'est une pompe à deux étages indépendants, l'un est utilisé pour l'acheminement des CO, CO_{2T}, O_2 , ces gaz passent ensuite dans un dessiccateur pour passer ensuite dans les analyseurs . Entre les analyseurs et la pompe existe une fuite qui



Circuit d'analyse des gaz de Combustion

permet de régler le débit de gaz.

L'autre étage amène aussi du CO_2 , CO , O_2 , ces gaz passent dans le four à travers l'oxyde de cuivre où nous avons la transformation de CO en CO_2 .

A la sortie du four nous devons avoir théoriquement que du CO_2 (ce qui est en réalité obtenu), ce gaz passe ensuite dans un réfrigérant pour passer ensuite dans un dessiccateur et un filtre et enfin dans les analyseurs. Entre la pompe et le four existe une fûite pour régler le débit de gaz ce qui rédiut la quantité de gaz à oxyder.

1. Sonde refroidie

Les gaz de combustion sont prélevés au moyen d'une sonde constituée par un tube de 5mm de diamètre, en acier inoxydable, entouré de deux tubes concentriques entre lesquels circule un courant d'eau. La circulation de l'eau permet un refroidissement brutal des gaz ainsi que du métal. Les réactions chimiques sont conservées tout le long de la sonde (composition chimique des gaz à l'entrée et à la sortie identique). (PL4)

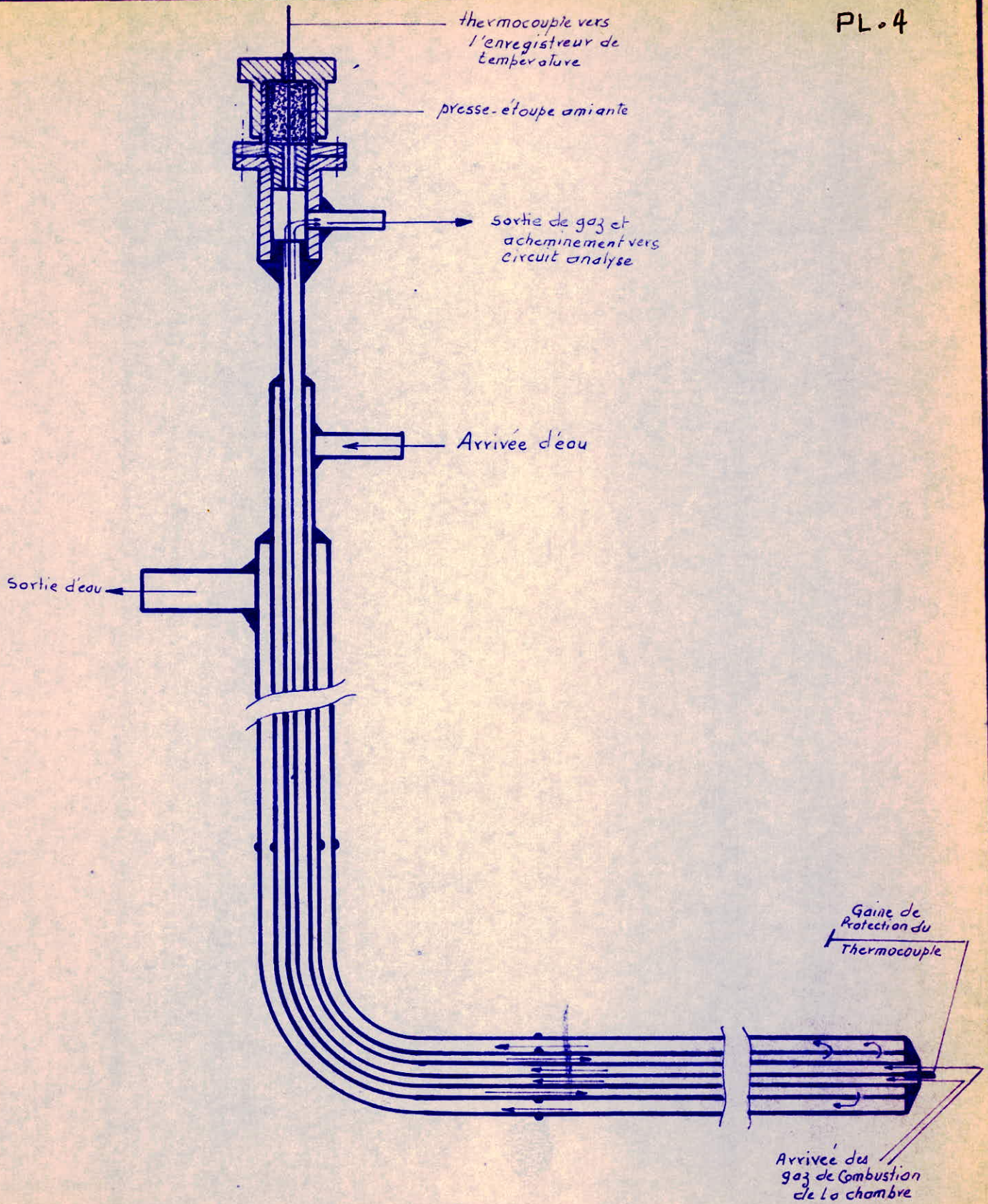
Un thermocouple introduit dans le tube de diamètre 5mm, permet la mesure de la température en chaque point de prélèvement des gaz. Un porte sonde avec deux déplacements, l'un vertical l'autre horizontal, permet de faire un balayage dans un plan perpendiculaire à l'axe de la chambre.

2. Méthode de mesure des températures

Pour la mesure de température, on utilise des thermocouples. Ceux-ci sont branchés sur des pyromètres ou des enregistreurs qui permettent la lecture directe de la température ou indirecte suivant la courbe d'étalonnage.

Chaque appareil dépend de la nature du thermocouple qui est branché dessus. Par exemple, on trouve des pyromètres spécialement conçus pour des thermocouples en chromel-alumel de même pour le platine-platine rhodié.

Avant d'utiliser ces appareils, il est nécessaire de faire au préalable un étalonnage.



Sonde Refroidie

2.1 Étalonnage des appareils de mesure des température

Il suffit de faire plusieurs mesures de températures avec un thermocouple branché sur un potentiomètre, mais sans omettre de relever au fur et à mesure les valeurs données par l'appareil à étalonner, puis de tracer la courbe d'étalonnage en reportant en abscisse la température vraie (température donnée par le potentiomètre) et en ordonnée la température lue (température indiquée par l'appareil à étalonner).

2.2 Appareils de mesure de température et thermocouples utilisés

- Pour la mesure de la température sortie préchauffe, entrée chambre de combustion, on dispose d'un pyromètre avec un thermocouple chromel-alumel

- A la sortie de la chambre de combustion, on dispose d'un thermocouple platine-platine rhodié 10% relié à un spot lumineux.

- A la sortie du panier mélangeur, on utilise pour la mesure de température le thermocouple de la sonde refroidie en chromel-alumel, il est relié à un enregistreur.

- Pour la mesure de température à la sortie du turboventilateur, on dispose d'un thermomètre ou d'un thermocouple Fe-Cst.

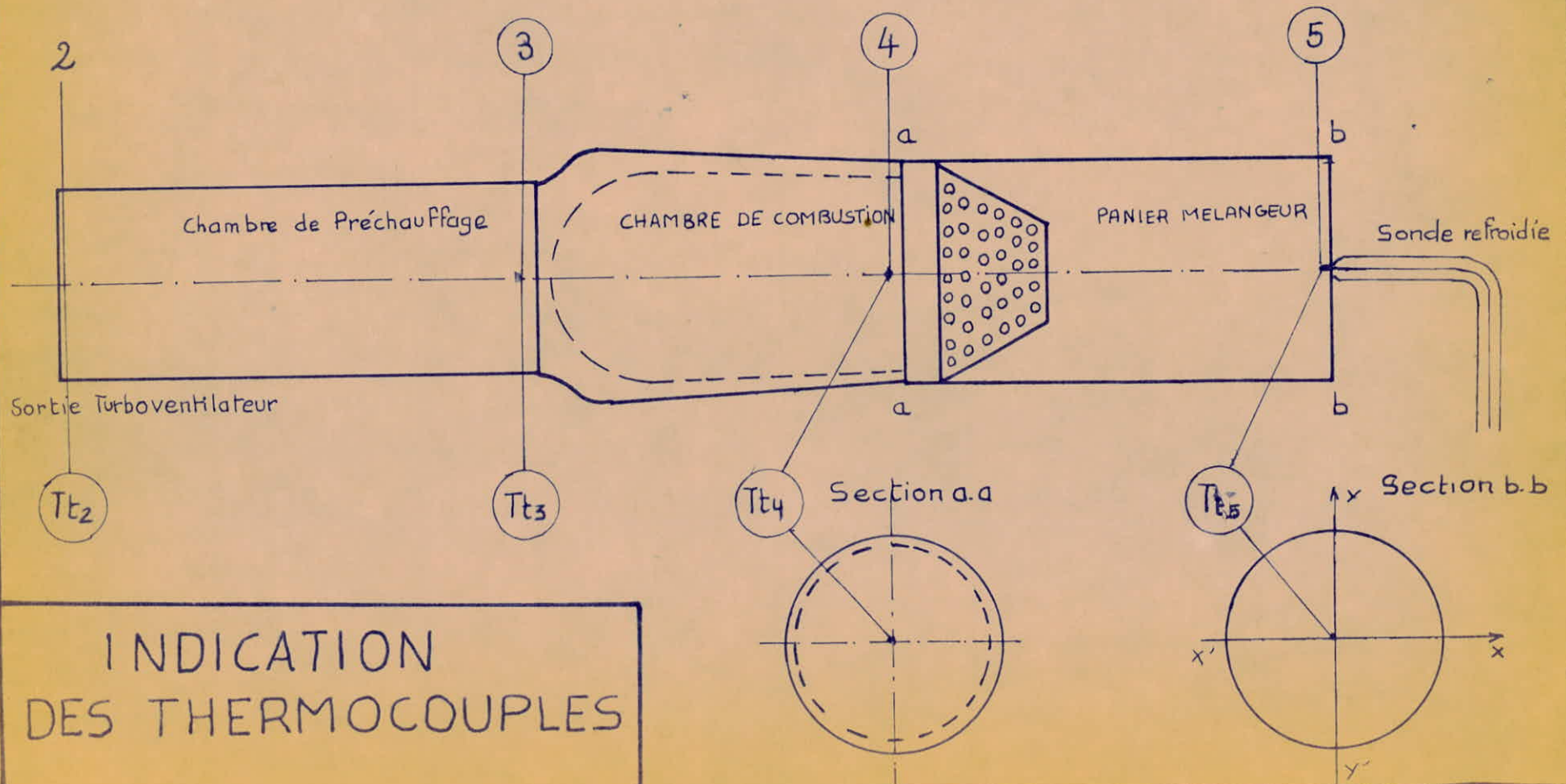
Le thermocouple de la sonde refroidie permet de faire des mesures de température dans tout le plan de la section du panier grâce à un porte sonde.

Le fait d'utiliser une sonde refroidie permet de mesurer des températures relativement élevées. Pour diminuer les erreurs par rayonnement et

conduction il serait intéressant d'utiliser une sonde à aspiration sonique

La soudure thermoelectrique est placée au col d'une petite tuyère dans laquelle on maintient un débit sonique au moyen d'une pompe d'aspiration.

la sonde refroidie peut
se déplacer suivant xx' et yy'



INDICATION
DES THERMOCOUPLES

$T_{\text{indiqué}}$
(°C)

1500

Le 29-04-75

ETALONNAGE de l'ENREGISTREUR
THERMOCOUPLE de la SONDE REFROIDIE
et AVEC ASPIRATION

1000

500

0

100

200

300

400

500

600

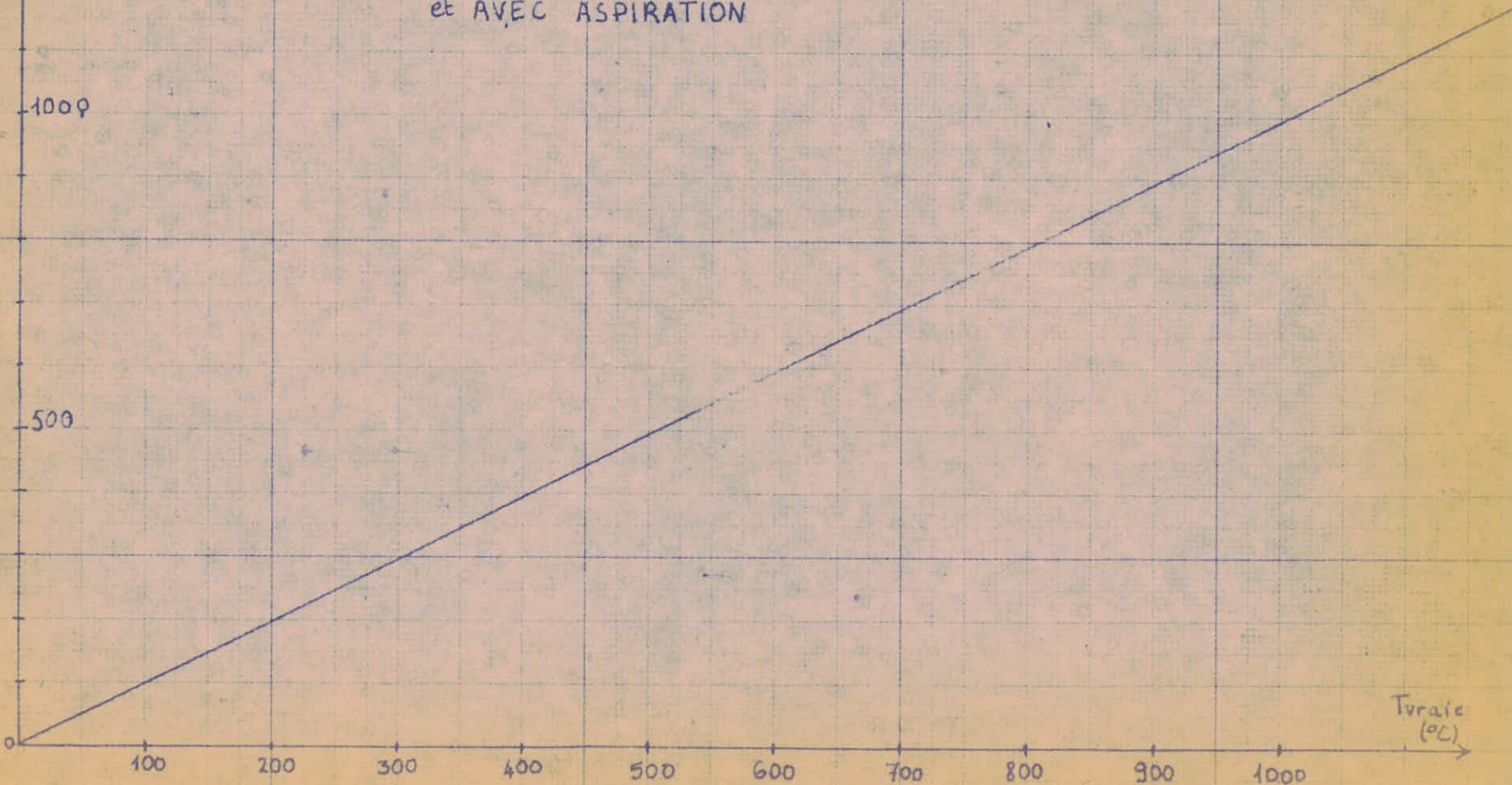
700

800

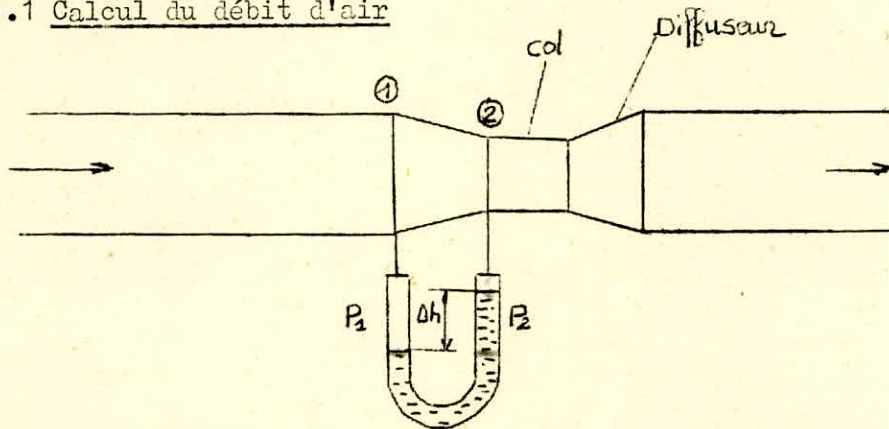
900

1000

T_{vraie}
(°C)



Méthode de dépouillement des essais

1. Dépouillement des essais au GN1.1 Calcul du débit d'air

Le principe de continuité et le théorème de Bernouilli permettent le calcul du débit d'air du turboventilateur.

Le débit d'air est donné par la formule :

$$A = 89,24 \sqrt{\rho_{\text{air}} h} \quad \text{en g/s}$$

On remarque que le calcul de A ,nécessite la connaissance de la masse volumique de l'air au venturi placé à l'aspiration . On prendra pour masse volumique celle de l'air à température et pression ambiante ce qui introduit d'ailleurs une erreur très faible .

Connaissant l'état standard $P_0 = 760 \text{ mm Hg}$, $T_0 = 273^\circ\text{K}$, $\rho_0 = 1,293 \text{ Kg/m}^3$ ainsi que P_a et T_a (air ambiant) et en assimilant l'air à un gaz parfait

on calcule ρ_a :

$$\rho_a = \frac{T_0}{T_a} \cdot \frac{P_a}{P_0} \cdot \rho_0$$

Donc , au cours des essais , il suffit de lire le Δh sur un manomètre , et de relever la pression et la température de l'air ambiant .

1.2 Calcul du débit de GN1.2.1 Débit de gaz dans la chambre de préchauffage

Le débit de gaz est donné par la formule :

$$C_1 = 0,1375 \sqrt{\Delta h} e_{GN}$$

Pour le calcul de C_1 , il suffit de connaître Δh et e_{GN} (masse volumique du GN)

Δh est lu sur le débitmètre tandis que e_{GN} est calculé.

On prélève la température du GN à l'entrée du débitmètre et en assimilant le GN à un gaz parfait on calcule sa masse volumique

$$e_{GN} = \frac{P_{GN}}{r T_{GN}} \quad r = 440 \text{ J/Kg}$$

P_{GN} étant la pression absolue amont lue sur le manomètre de la chambre de préchauffage (le manomètre nous donne des pressions relatives)

Diamètre du diaphragme = 8 mm

Diamètre de la conduite = 20 mm

$K = 0,97$ (coefficient de correction de débit)

- Calcul du rapport de mélange de la chambre de préchauffage

Connaissant le débit de gaz de la chambre de préchauffage C_1 et le débit d'air A , on peut calculer le rapport de mélange f_1

$$f_1 = \frac{C_1}{A}$$

On pourrait de même calculer la richesse globale

$$\phi_1 = \frac{C_1/A}{(C/A)_{st}} \quad (C/A)_{st} \text{ étant connu pour le GN et sa valeur est:}$$

$$(C/A)_{st} = 0,0655$$

1.2.2 Débit de gaz dans la chambre de combustion

On peut connaître le débit de gaz grâce à la formule :

$$C_2 = 0,398 \sqrt{e_{GN} \Delta h}$$

- Diamètre du diaphragme = 13 mm

- Diamètre de la conduite = 20 mm

h est lu sur le débimètre de la chambre de combustion . Pour la masse volumique e_{GN} on fait le même calcul que pour la chambre de préchauffage

$$e_{GN} = \frac{P_{GN}}{rT_{GN}} \quad \text{avec } r = 440 \text{ J/Kg}$$

P_{GN} étant la pression absolue amont donnée par le manomètre de la chambre de combustion .

- Rapport de mélange de la chambre de combustion f_2

$$f_2 = C_2/A \quad A \text{ étant le débit d'air calculé précédemment .}$$

La richesse globale de la chambre de combustion est donnée par :

$$\phi_2 = (C_2/A) / (C/A)_{st}$$

Pour l'ensemble chambre de préchauffage et chambre de combustion la richesse globale sera $\phi = \phi_1 + \phi_2$

1.3 Analyse des gaz de combustion

1.3.1 Détermination des teneurs des gaz d'échappement

Pour cela on utilise des analyseurs , mais il est nécessaire de faire au préalable un étalonnage . On envoie dans chaque analyseur des gaz étalons dont on connaît la teneur et on relève les valeurs indiquées par le galvanomètre . Cela nous permet de tracer les courbes d'étalonnage .

Pour la connaissance des différentes concentrations des gaz d'échappement il suffit de relever les valeurs indiquées par le milliampèremètre des analyseurs , puis grâce aux courbes d'étalonnages correspondants à ceux-ci on peut lire la teneur des gaz de combustion .

Nous disposons de trois analyseurs , l'un pour la mesure de la teneur en CO_{2r} et CO_{2T} , l'autre pour le CO, et le troisième pour l'oxygène .

1.3.2 Rendement de combustion

Connaissant les quantités de CO_{2r} et CO_{2T} , on peut calculer le rendement de combustion:

$$\eta_b = \frac{\text{CO}_{2r}}{\text{CO}_{2T}}$$

1.3/3 Richesse locale

On determine la richesse d'après l'analyse des gaz . Nous disposons d'une courbe a' $\text{CO}_2 = f(\phi)$ pour le GN qui nous permet, connaissant le pourcentage de a' CO_{2T} , de déterminer la richesse locale ϕ' .

1.4 Exploitation des essais

on trace ; $T_{bi} = f(\phi')$ et $T_{bi} = f(\phi)$

$$T_{bd} = f(\phi') \quad \text{et} \quad T_{bd} = f(\phi)$$

$$\eta_b = f(\phi')$$

$$\eta_b = f(T_{bi})$$

T_{bi} : température de fin de combustion

T_{bd} : température théorique relevée sur le diagramme H ϕ

ϕ : richesse globale

ϕ' : richesse locale

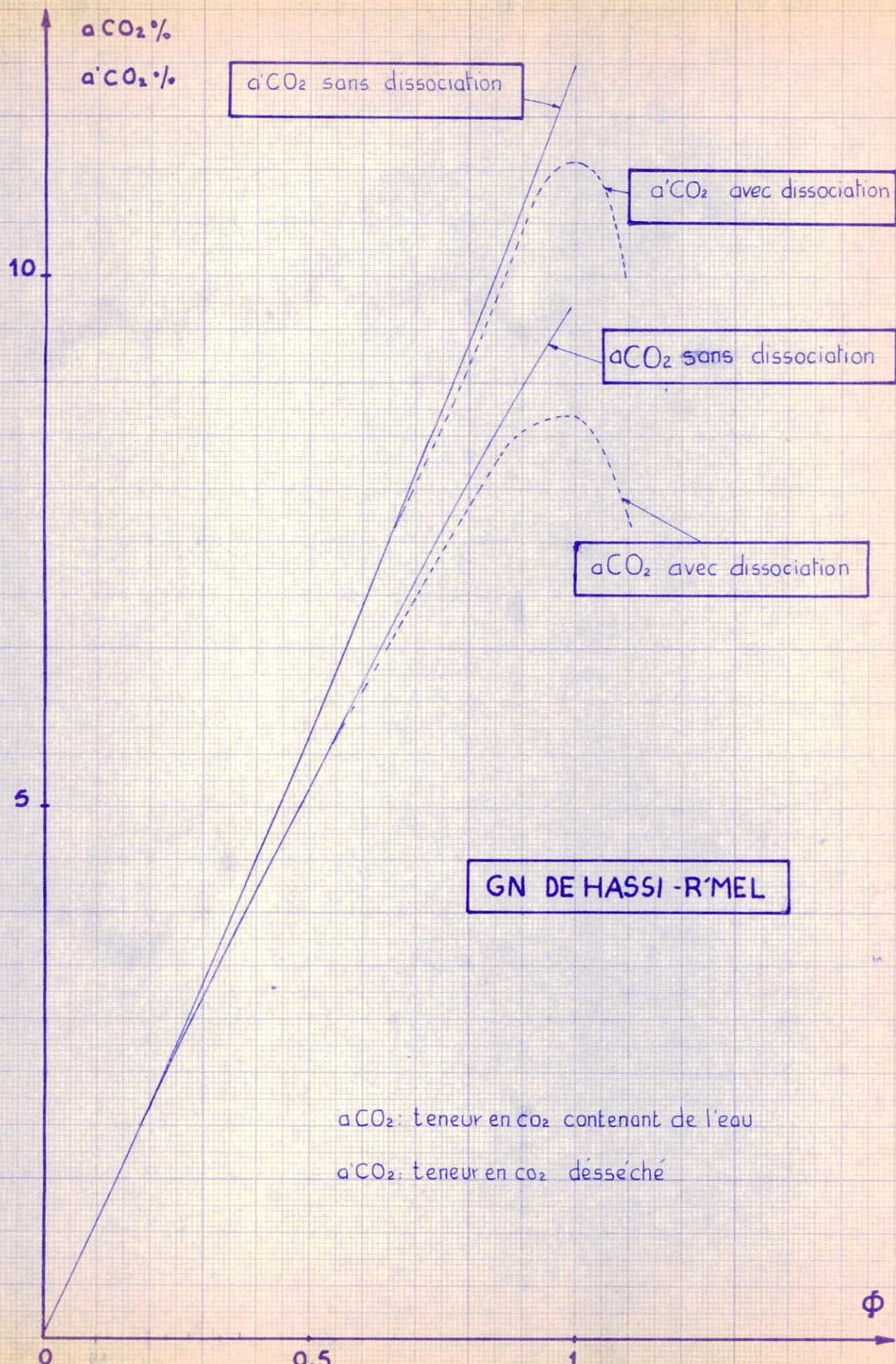
2. Dépouillement des essais au GNL

Pour le débit d'air , c'est le même calcul que pour le GN .

2.1 Calcul du débit de GNL

Pour cela , on dispose d'un débitmètre , permettant la mesure du débit volumique :: Pour la connaissance du débit massique il suffit de connaître

ρ du GNL .



$T_b, ^\circ K$

DIAGRAMME Theorique
 $T_b : f(\phi)$

2000

1500

1000

500

0.1

0.2

0.3

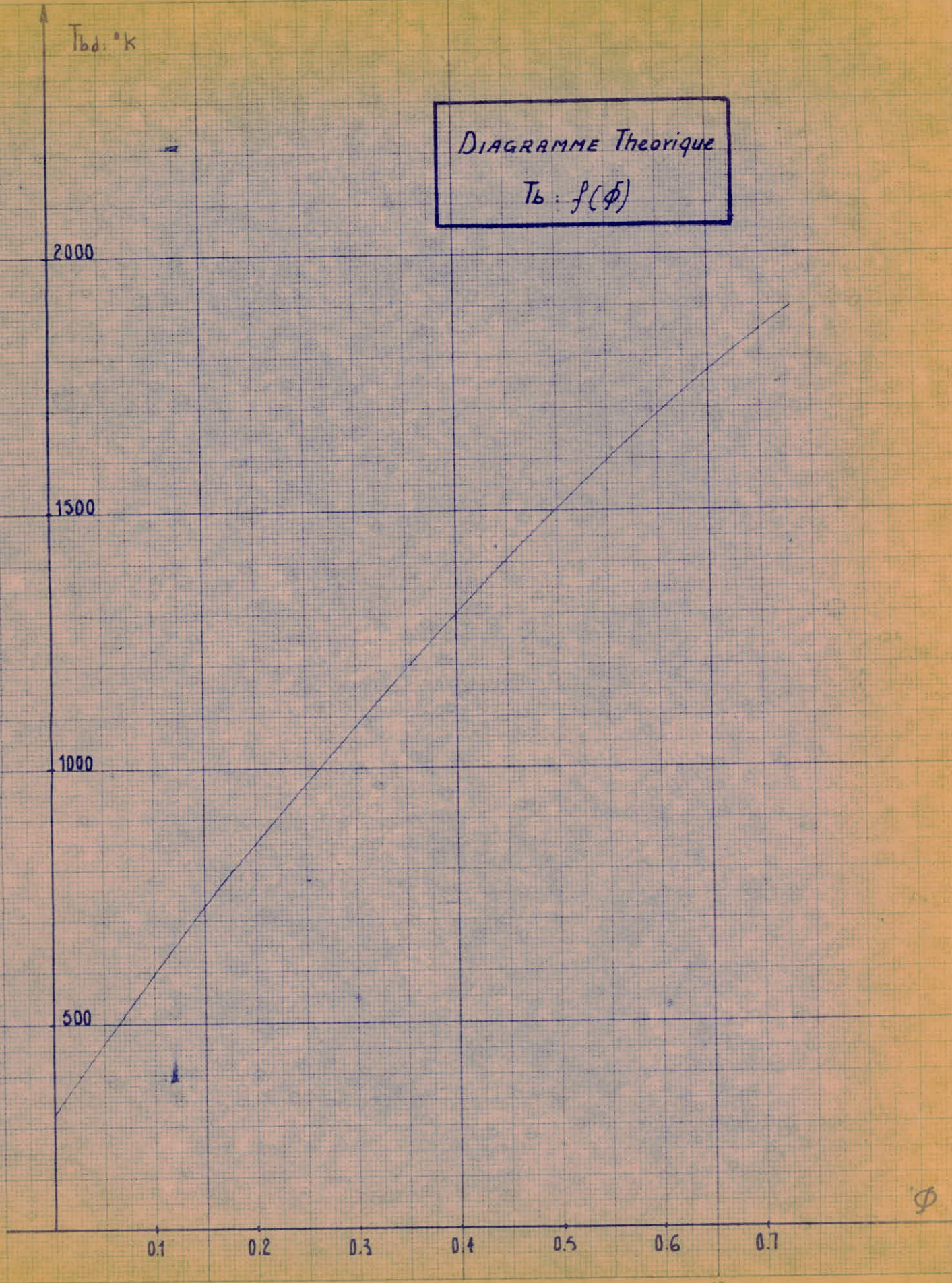
0.4

0.5

0.6

0.7

ϕ



Détermination du ρ du GNL

Pour une composition molaire donnée quelconque, et pour chaque température l'expression donnant la masse volumique du GNL est (en négligeant les composants lourds)

$$\rho = \frac{M_{\text{CH}_4} + M_{\text{C}_2\text{H}_6} + M_{\text{C}_3\text{H}_8}}{\frac{M_{\text{CH}_4}}{\rho_{\text{CH}_4}} + \frac{M_{\text{C}_2\text{H}_6}}{\rho_{\text{C}_2\text{H}_6}} + \frac{M_{\text{C}_3\text{H}_8}}{\rho_{\text{C}_3\text{H}_8}} - E} \quad (\text{d'après publication ELF Aquitaine})$$

M : masse d'un constituant

ρ_{CH_4} : masse volumique d'un constituant

E étant un facteur correctif qui dépend uniquement de la proportion de Méthane (CH_4) et de la température du mélange et qui a pour expression:

$$E = f(x, t)a + bx + cx^2 + a'T$$

La fonction $f(x, t)$ n'est pas connue.

Les variations, en fonction de la température, des masses volumiques, des composants ($\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8$) sont connus. Notre but est de calculer la masse volumique du GNL produit par le laboratoire d'énergétique : $\rho_{L.E}$

Pour cela il faut connaître E. Or, il existe une composition de GNL, qui a le même pourcentage de méthane que celle du laboratoire d'énergétique. Il s'agit du GNL de BRUNEI (INDONESIE). Nous en connaissons les variations de la masse volumique ρ_B en fonction de la température ainsi que la composition de ce mélange.

Composition en masse du GNL de BRUNEI

$$\text{CH}_4 = 79,55 \%$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 = 12,55 \%$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 = 7,9 \%$$

d'où

$$E = f(T) = \left(\frac{79,55}{\rho_{\text{CH}_4}} + \frac{12,55}{\rho_{\text{C}_2\text{H}_6}} + \frac{7,9}{\rho_{\text{C}_3\text{H}_8}} \right) - \frac{100}{\rho_B} \quad (3)$$

Composition massique du GNL du laboratoire d'énergétique :

$$\text{CH}_4 = 80 \%$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 = 12,55 \%$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 = 7,9 \%$$

Etant donné que E ne dépend que de la température et du pourcentage de méthane (qui est le même pour le GNL de Brunei et du laboratoire d'énergétique), nous pouvons écrire pour chaque température:

$$\rho_{L.E} = \frac{100}{\frac{80}{\rho_{\text{CH}_4}} + \frac{12,55}{\rho_{\text{C}_2\text{H}_6}} + \frac{7,9}{\rho_{\text{C}_3\text{H}_8}} - E}$$

E est calculé d'après l'expression (3)

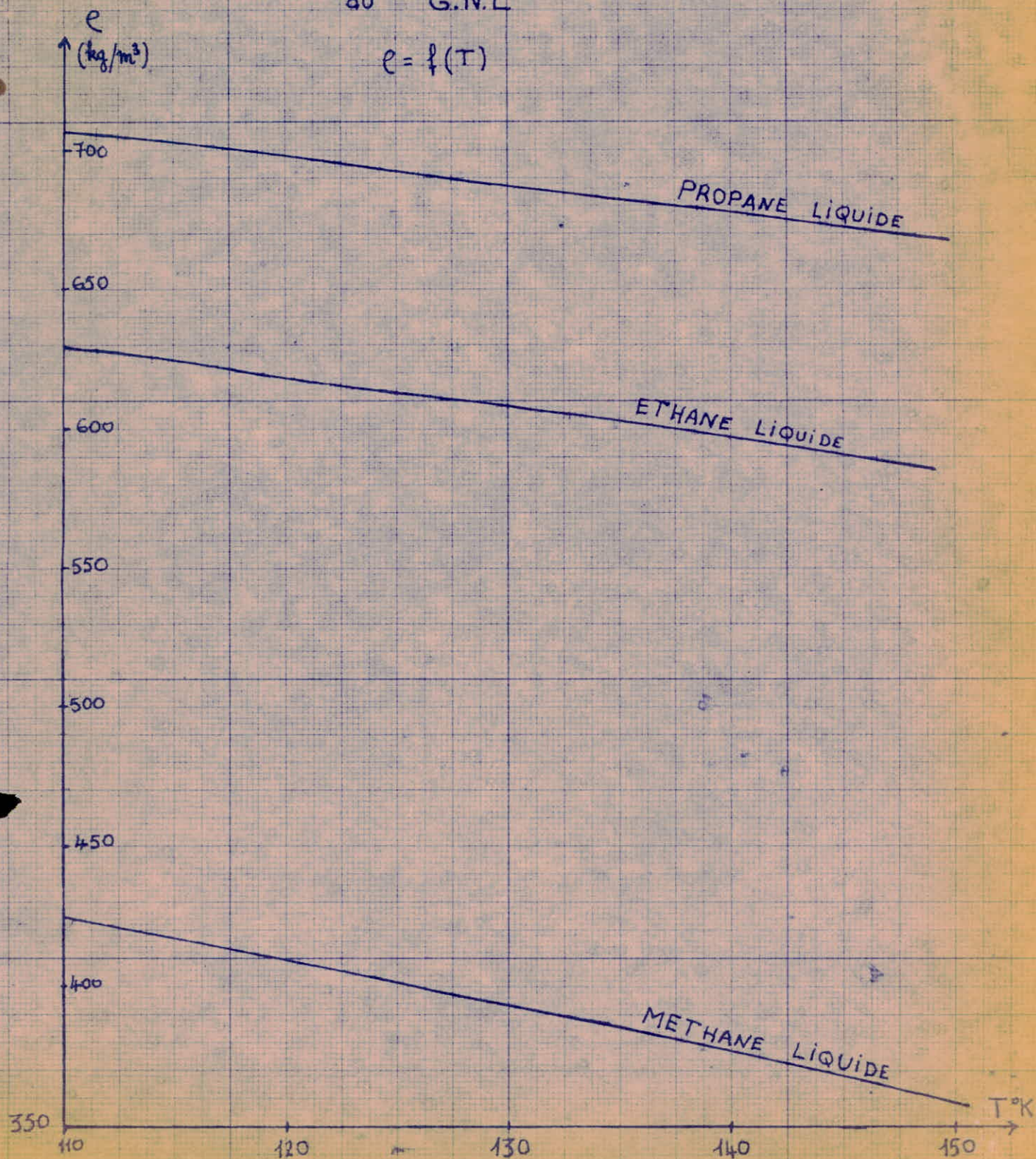
Connaissant les variations de E et de la masse volumique en fonction de la température, nous en déduisons les courbes $\rho_{L.E.} = f(T)$.

Comme la température du GNL varie avec la pression, il faudrait pour chaque pression du réservoir, relever du diagramme la température correspondante pour le calcul du ρ *méthane liquide*

Mais les valeurs données par le débitmètre ne sont pas acceptables du fait de la vaporisation partielle du GNL, qui augmente considérablement le volume (ébullition nucléée).

MASSE VOLUMIQUE
des principaux composants
du G.N.L

$$\rho = f(T)$$



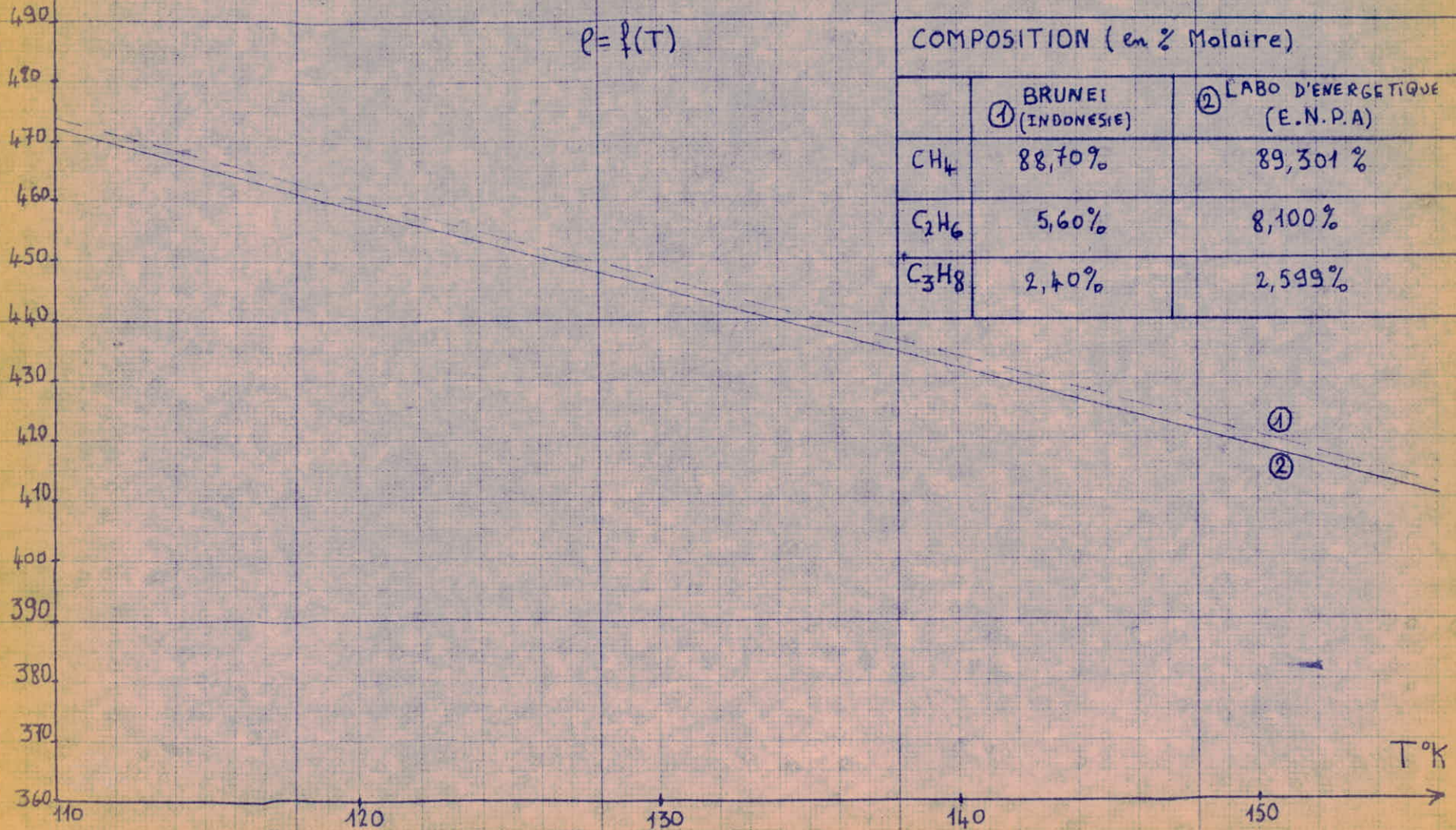
ρ
(kg/m³)

MASSE VOLUMIQUE du G.N.L

$\rho = f(T)$

COMPOSITION (en % Molaire)

	① BRUNEI (INDONESIE)	② LABO D'ENERGETIQUE (E.N.P.A)
CH ₄	88,70%	89,301%
C ₂ H ₆	5,60%	8,100%
C ₃ H ₈	2,40%	2,599%



Elle peut être évitée en refroidissant le GNL juste à l'entrée de la turbine au moyen d'un échangeur à l'air liquide .

2.2 Analyse des gaz de combustion

Même procédé que pour le GN .

On calcule le débit massique avec ϕ'

$$\phi' = \frac{C/A}{(C/A)_{st}}$$

C : étant le débit de GNL

A : débit d'air

$(C/A)_{st}$ pour le GNL = 0,05928

d'où: $C = \phi' \left(\frac{C}{A} \right)_{st} \cdot A$

2.3 Exploitation des essais

On trace :

$$T_{bi} = f(\phi')$$

$$T_{bd} = f(\phi')$$

$$\eta_b = f(\phi')$$

$$\eta_b = f(\omega_{bi})$$

T_{bi} : température de fin de combustion

T_{bd} : température théorique relevée sur le diagramme

ϕ' : richesse locale

$\Delta d'CO_2$ %

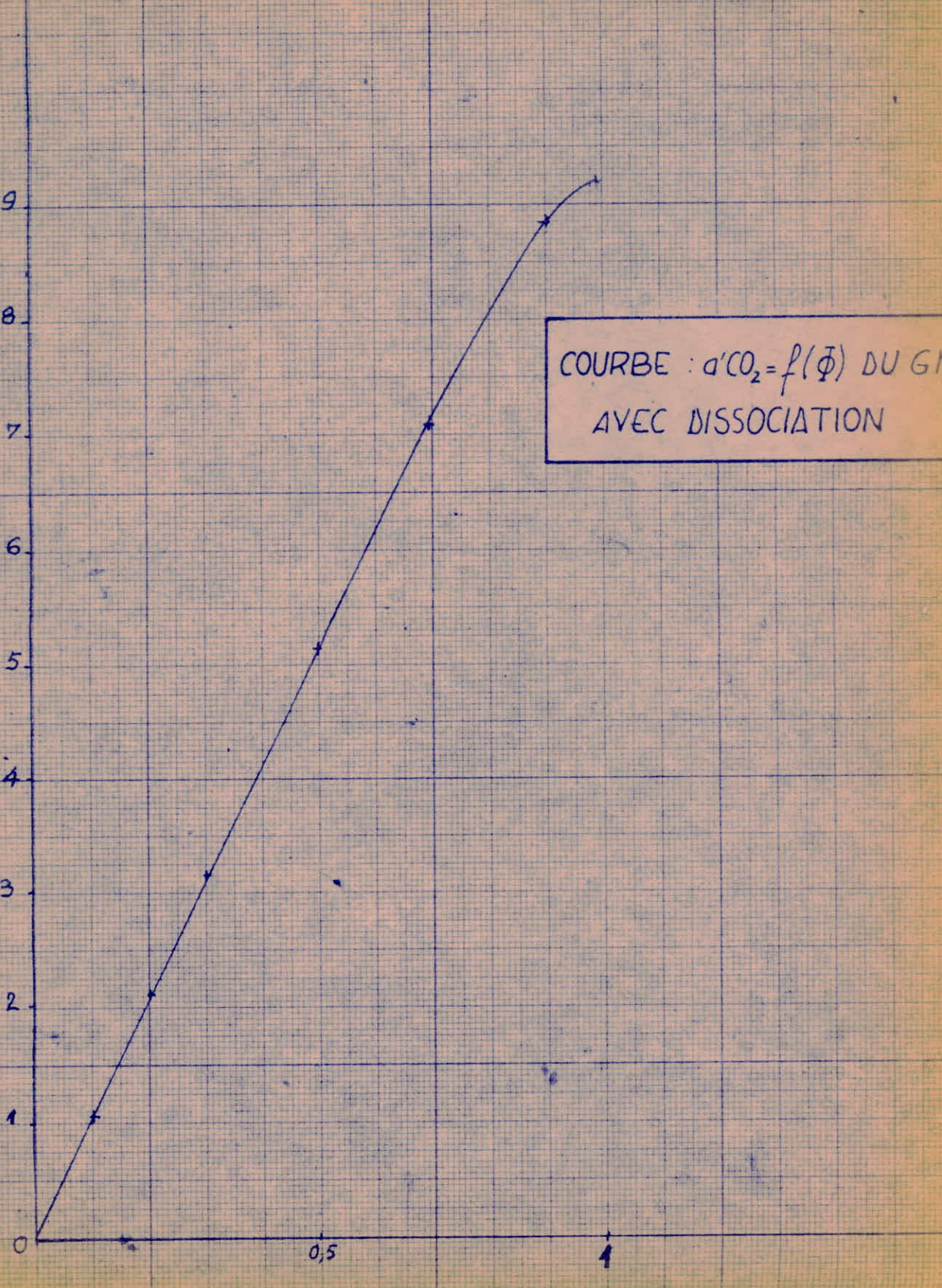
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

0,5

1

COURBE : $d'CO_2 = f(\Phi)$ DU GNL
AVEC DISSOCIATION

Φ



II-SSAIS $\sqrt{-}$ U

(-) D/

ESSAI AU GN sans préchauffage et sans panier

07 - 3 - 75

Cet essai a été fait avec l'ancien circuit d'analyse de gaz . Il se compose de deux parties . L'une où l'on maintient un débit d'air minimum, et l'autre un débit d'air maximum fixe .

L'analyse des gaz est erronée; pour des raisons que nous ignorons actuellement, une question à résoudre dans l'immédiat .

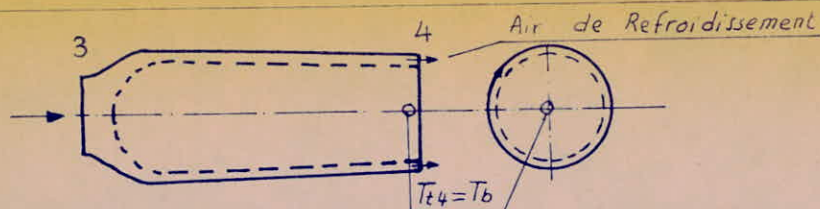
Les températures indiquées en fonction de ϕ et ϕ' sont situées au dessus de la courbe théorique et ce qui est anormal .

Pour $T_{bi} = f(\phi)$, cela est dû au fait que probablement le thermocouple est situé dans des points chauds .

Pour $T_{bi} = f(\phi')$ ϕ' étant déterminée par l'analyse des gaz qui est erronée .

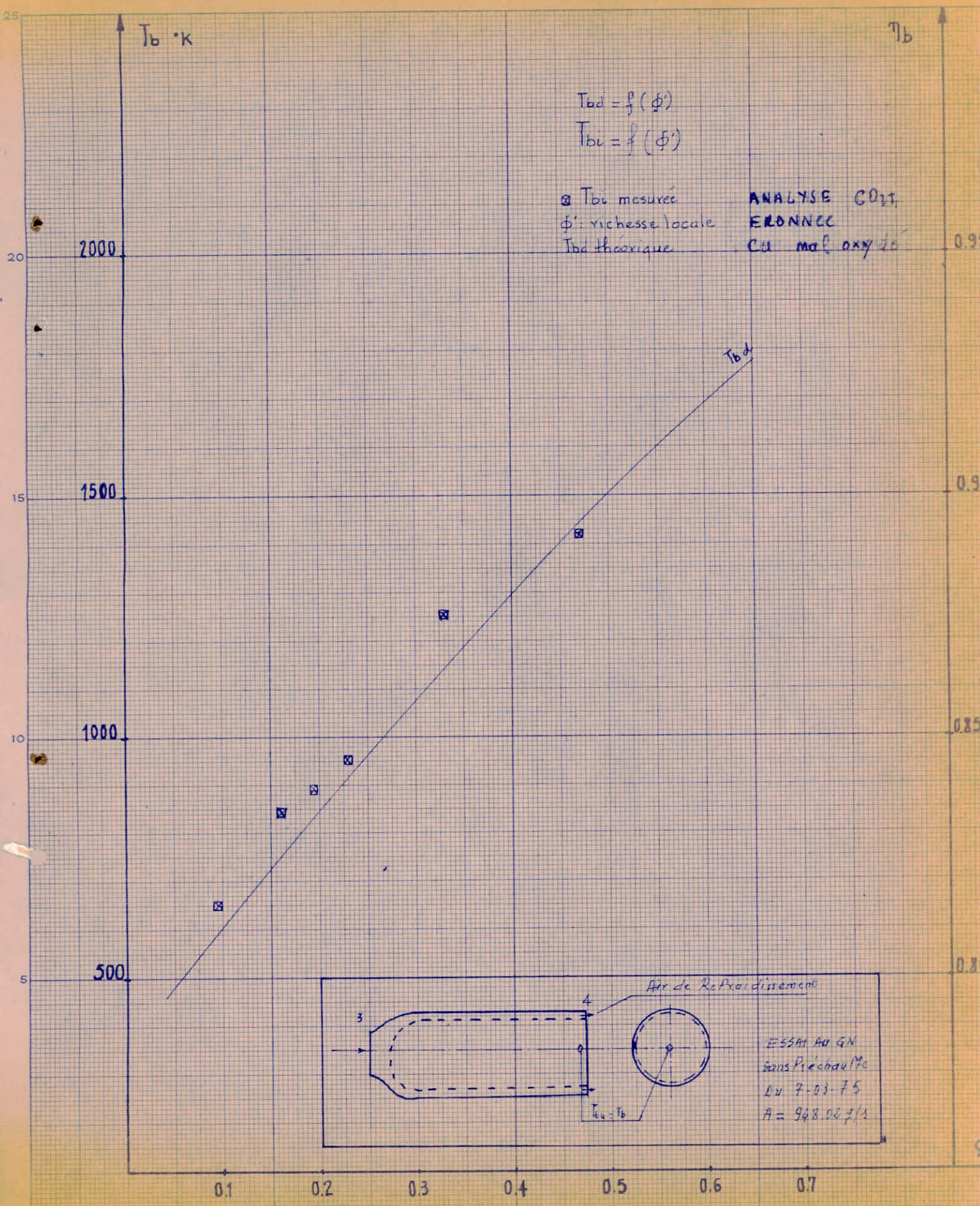
ESSAI AU GN SANS PRECHAUFFE SANS PANIER

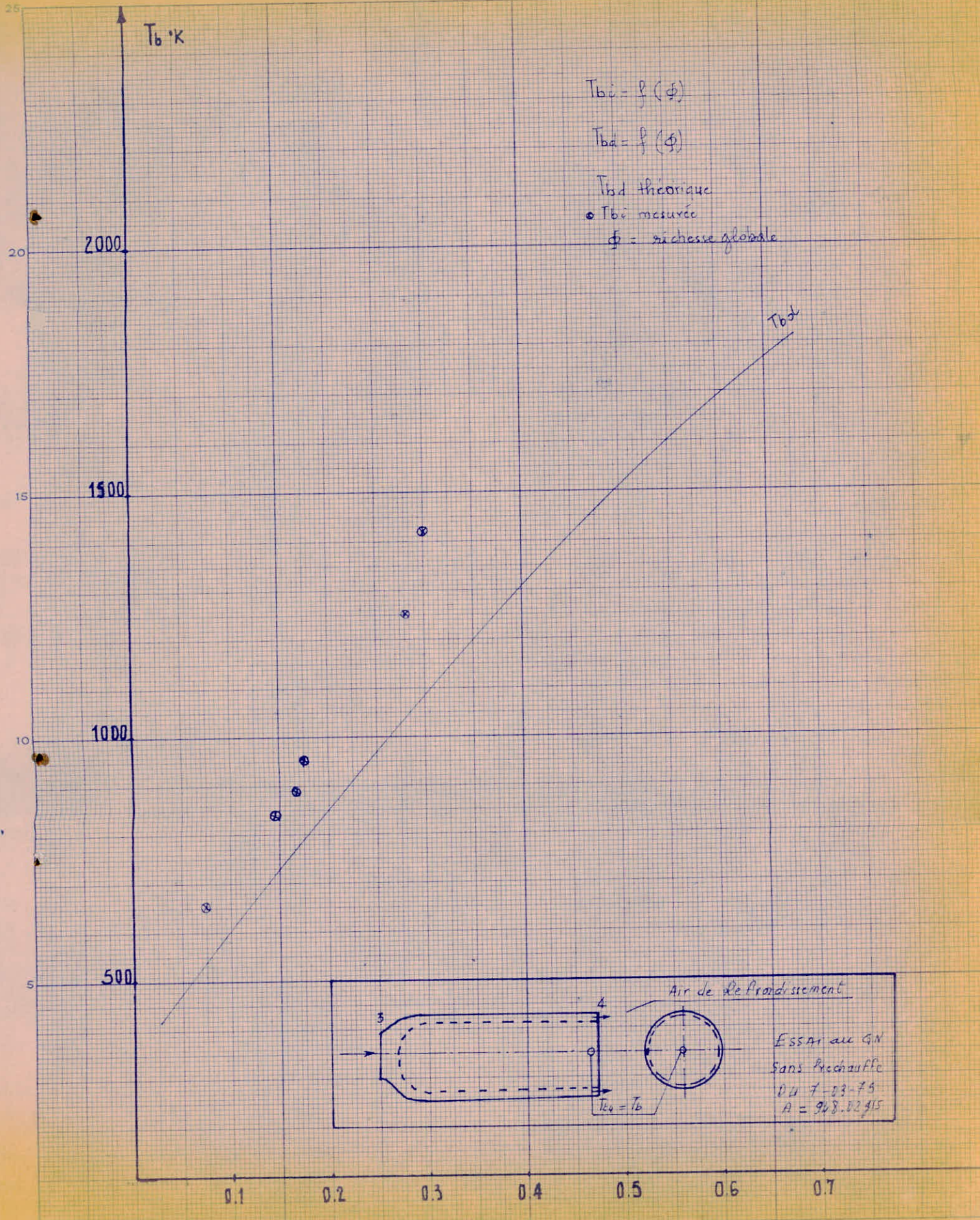
le: 07-03-75

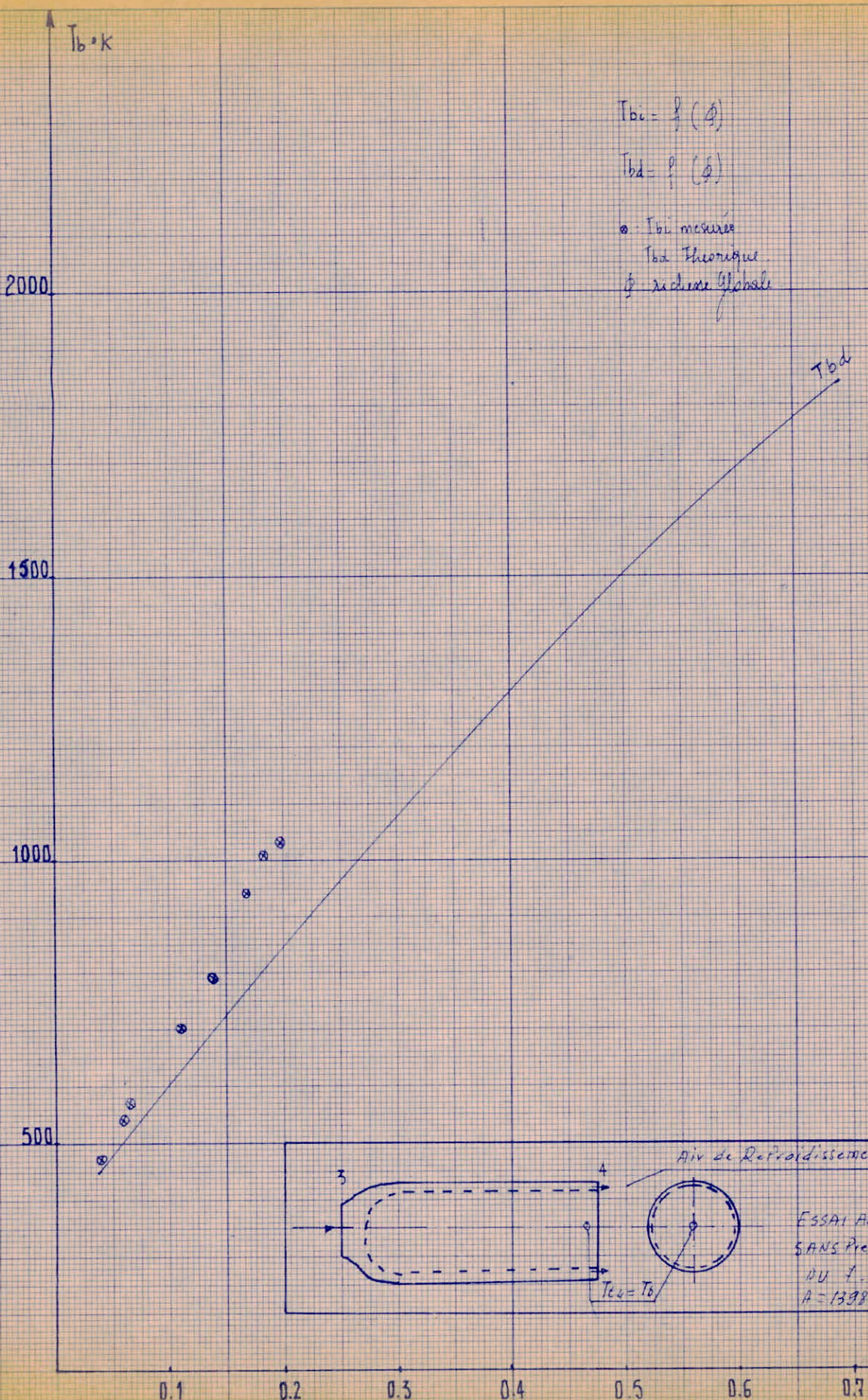


$P_A = 769 \text{ mmHg}$
 $T_A = 288 \text{ }^\circ\text{K}$
 $P_A =$
 $(\frac{C}{A})_{sc} = 0.0655$

Essai N° Mesures	Indicateur	Unités	1	2	3	4	5	6	7
VENTURI	ΔH	mm H ₂ O	91	91	91	91	91	91	
DEBIT D'AIR	A	g/s	948.02	948.02	948.02	948.02	948.02	948.02	
DEBIT GN	C ₂	g/s	4.956	9.04	10.519	10.876	14.50	18.64	
$f_2 = \frac{C_2}{A}$	$f_2 \times 10^{-3}$	/	5.227	9.53	11	11.47	18.29	19.66	
TEMPERATURE APRES CHAMBRE	T _{bi}	°K	653	843	893	953	1253	1423	
TEMPERATURE D'APRES DIAGRAMME	\bar{T}_{bd}								
TEMPERATURE D'APRES O'CO ₂	\bar{T}_{bo}	°K							
TEMPERATURE sortie Turbo-Vent	T ₂	°K	318	318	318	318.5	318.5	318.5	
O'CO ₂ Total	/	%	1.05	1.7	2.15	2.55	4.25	5.30	
O CO ₂	/	%	0.9	1.525	2.05	2.50	4.1	5.60	
CO	/	%	0.1	0.1	0.1	0.15	0.35	0.55	
O ₂	/	%							
RICHESSSE	ϕ	/	0.079	0.145	0.167	0.174	0.279	0.299	
RICHESSSE par O'CO ₂	ϕ'	/	0.095	0.16	0.195	0.23	0.38	0.47	
RENDEMENT DE COMBUSTION	η_b	/	0.857	0.897	0.953	0.98	0.96		
VITESSE de L'AIR	V ₂	m/s							
VITESSE DU SON	D	m/s							
NOMBRE DE MACH ENTREE PRECHAUFFE	M	/							



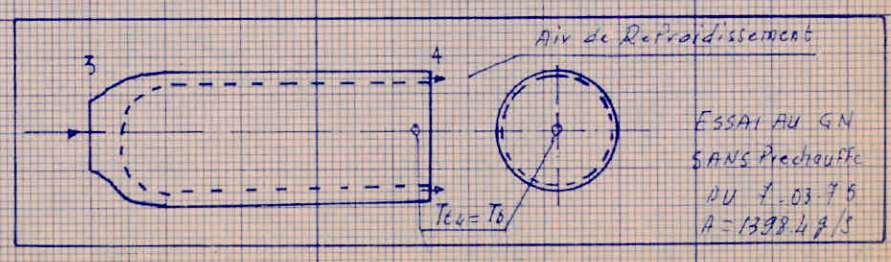




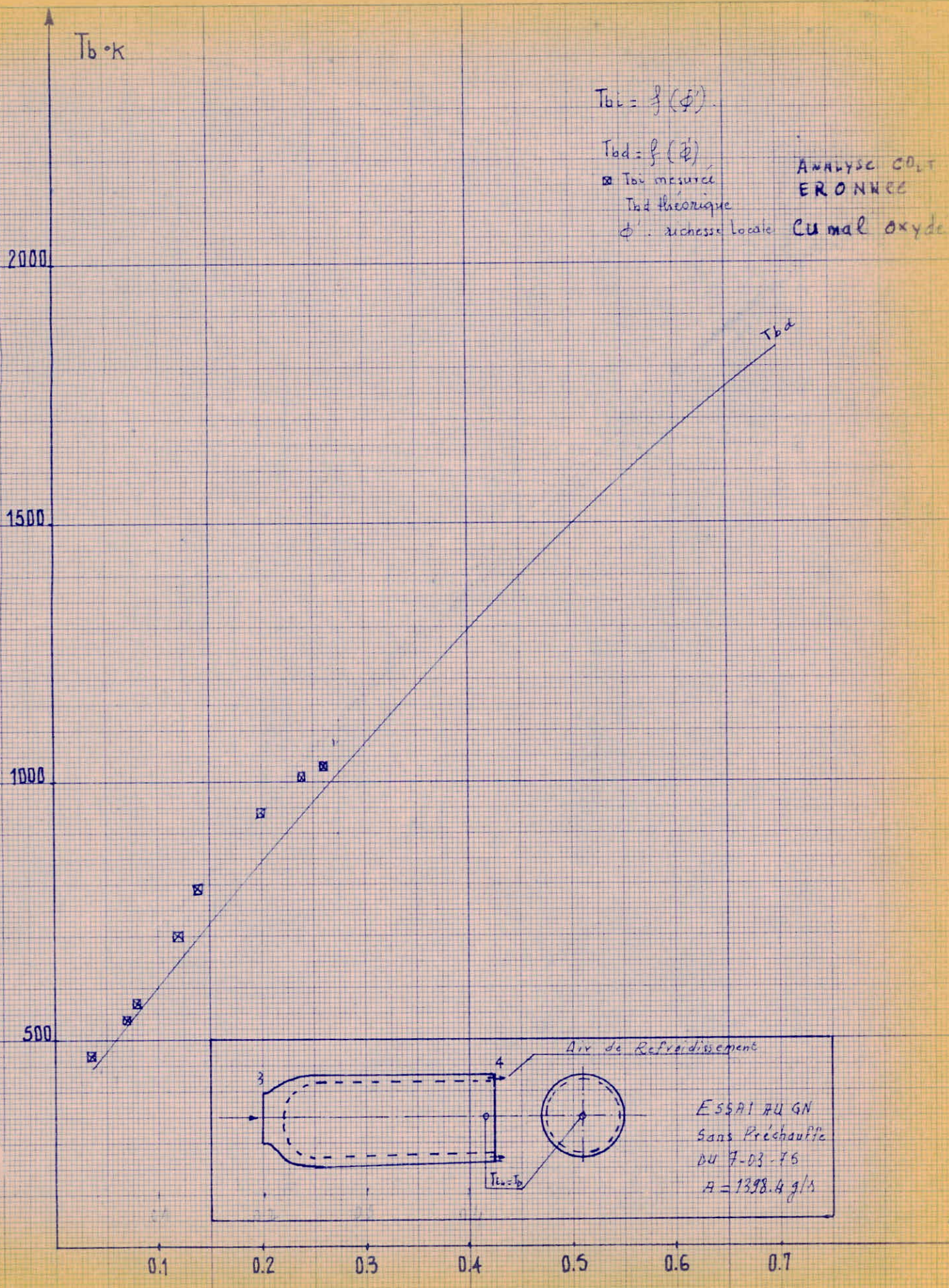
$$T_{bi} = f(\phi)$$

$$T_{bd} = f(\phi)$$

\circ : T_{bi} mesurées
 \odot : T_{bd} théorique
 ϕ : puissance globale



ESSAI AU GN
 SANS Préchauffe
 DU 1.03.76
 A=1398.49/S



$T_b \cdot K$

$T_{bi} = f(\phi)$

$T_{bd} = f(\phi)$

x: T_{bi} mesurée

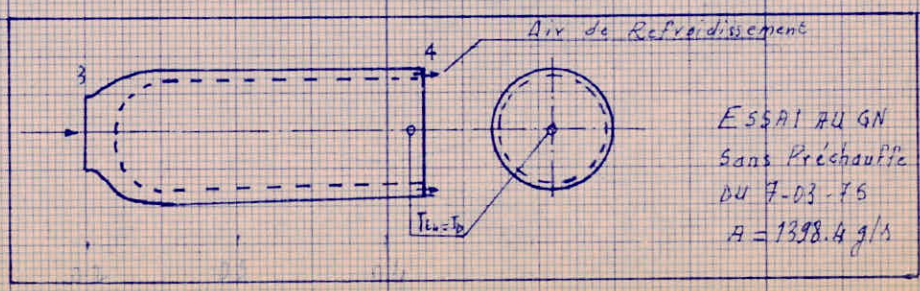
T_{bd} théorique

ϕ : richesse locale

ANALYSE CO_2 ET ERONNEE

Cu mal oxyde

T_{ba}



ESSAI AU GN
Sans Préchauffe
DU 7-03-76
 $A = 1398.4 \text{ g/s}$

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

5

10

15

ESSAI AU GN SANS PRECHAUFFE SANS PANIER MELANGEUR.

(7 - 04 - 75)

C'est le premier essai avec le nouveau circuit d'analyse des gaz. Nous avons utilisé un débit d'air minimum et qui sera maintenu constant tout au long de l'essai. Par contre, nous avons fait varier le débit de GN, ce qui entraîne une variation de la température des gaz de combustion et de la richesse ϕ . Le pourcentage de CO dans CO_{2T} est nul. Donc l'oxydation dans le four est complète, le pourcentage de CO_{2r} est très voisin du pourcentage de CO_{2T} ce qui nous donne un bon rendement de combustion.

En ce qui concerne les températures indiquées, elle se rapprochent de la théorie donc des pertes thermiques réduites.

Le rendement de combustion croît avec la température, de même qu'on note une augmentation de η avec la diminution de la richesse locale c'est à dire pour les petits régimes. Cela peut être expliqué par le fait que lorsque ϕ augmente la flamme s'allonge dans la chambre vers la sortie, et pour les petits régimes la flamme se trouve près de la canne de prévaporisation, donc la chambre tend à jouer le rôle de panier mélangeur, ce qui explique aussi que les deux courbes $T_{bi} = f(b')$ et $T_{bi} = f(\phi)$ tendent à se rapprocher vers les petits régimes. Pour les gros débits de gaz, le thermocouple baigne dans la flamme et n'est plus influencé par l'air de dilution.

$T_b: ^\circ K$

η_b

$T_{bi} = f(\phi')$

$\eta_b = f(\phi')$

2000

0.35

1500

0.90

1000

0.85

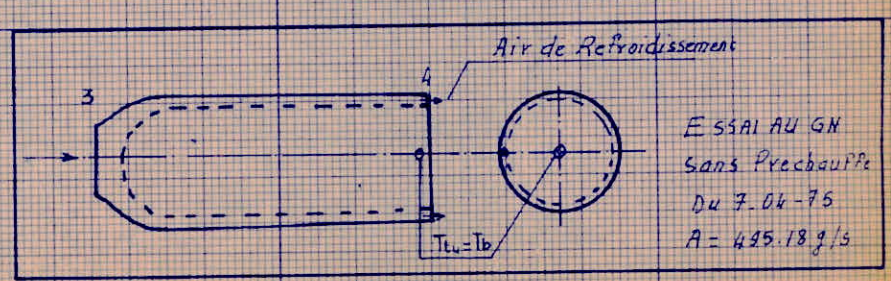
500

0.8

T_{bd}

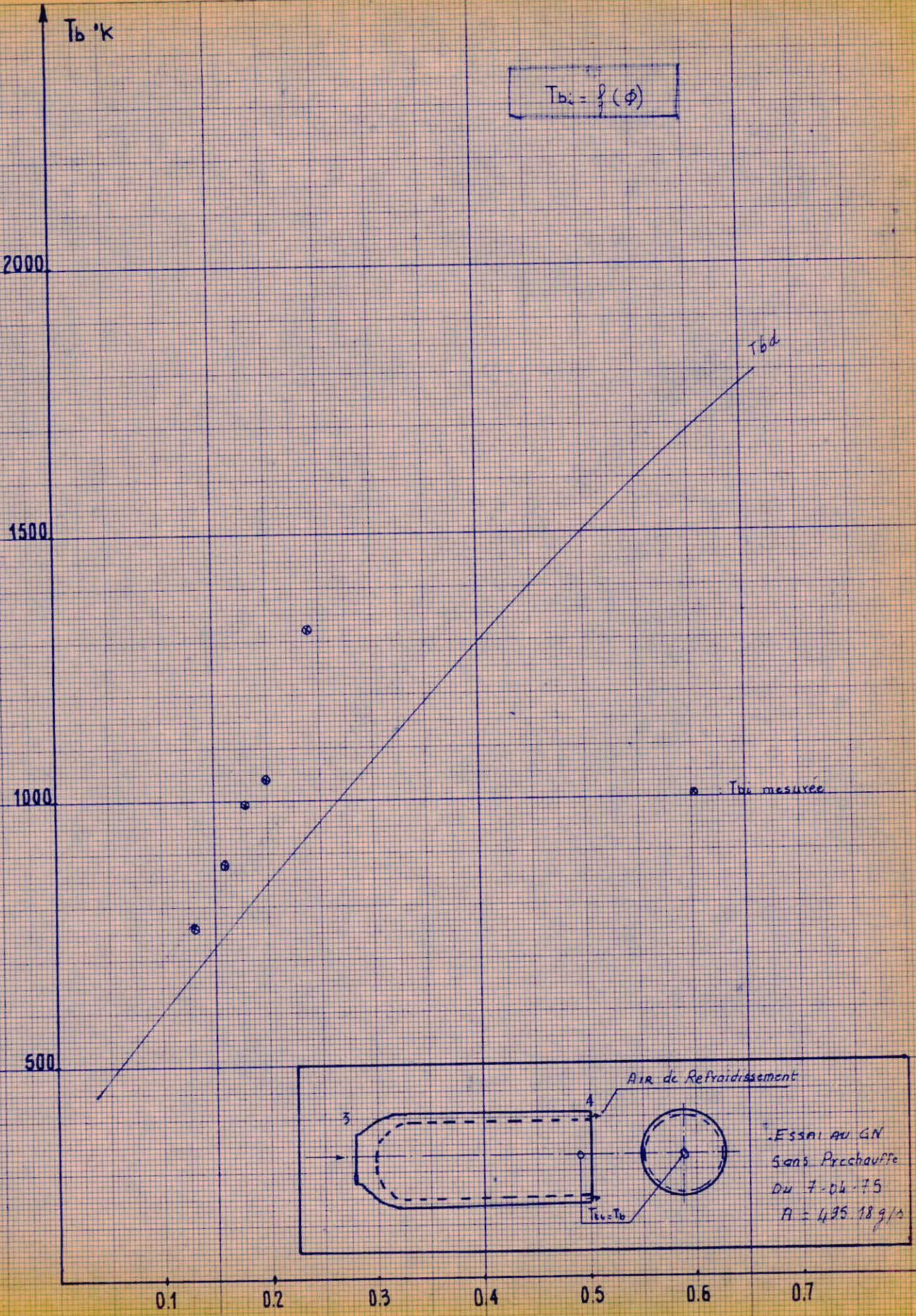
η_b

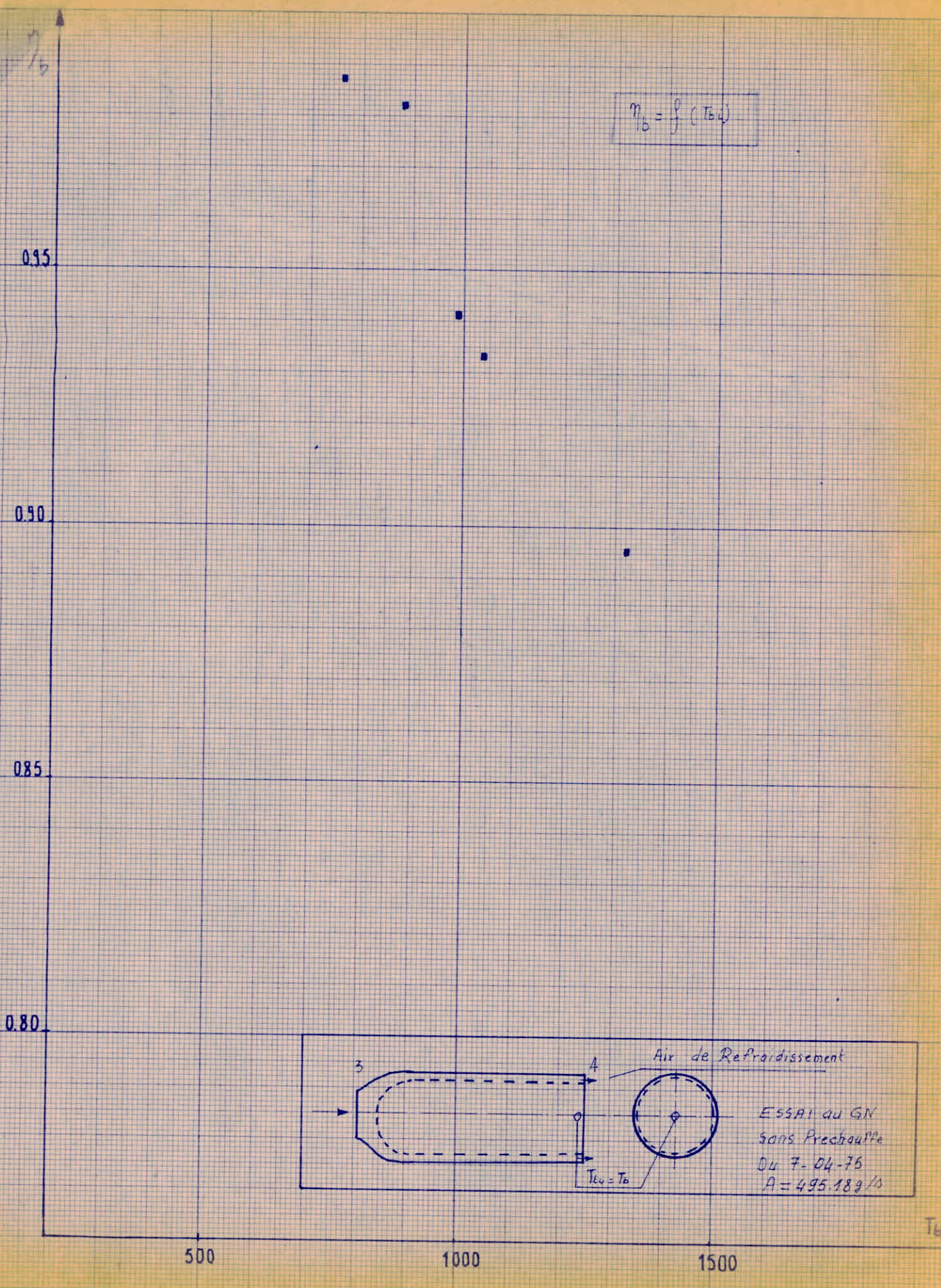
T_{bi} mesurée



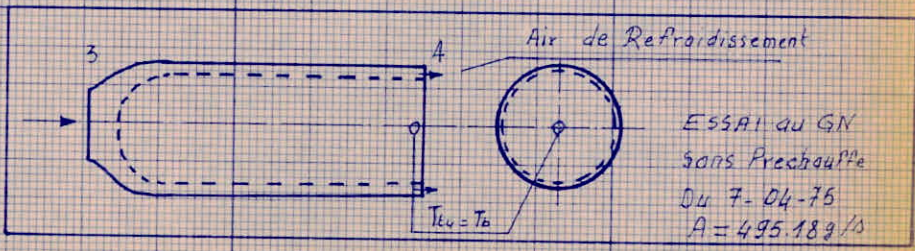
ESSAI AU GN
 sans Préchauffe
 Du 7.04-75
 A = 425.18 g/s

0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7





$$\eta_b = f(T_b)$$



ESSAI au GN
 sans Prechauffe
 Du 7-04-75
 $A = 495.189/s$

500

1000

1500

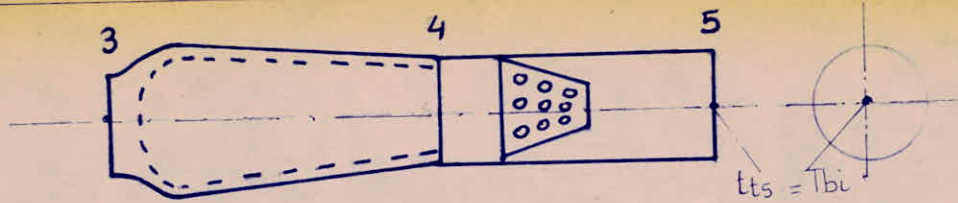
E S S A I AU GN sans préchauffage avec panier

15 - 4 - 75

Dans cet essai, on constate que les points obtenus pour les températures indiquées de fin de combustion, en fonction de la richesse globale sont très proches de la courbe théorique. Tandis que pour ceux obtenus à partir de la richesse locale sont plus éloignés de la courbe théorique ceci est dû certainement aux pertes thermiques au niveau du panier mélangeur. Les rendements de combustion sont bons pour l'ensemble des mesures. Le rendement maximum est de 0,98 pour la richesse locale de 0,23.

ESSAI AU GN AVEC PANIER S. PRECHAUFFE

le 15.4.75

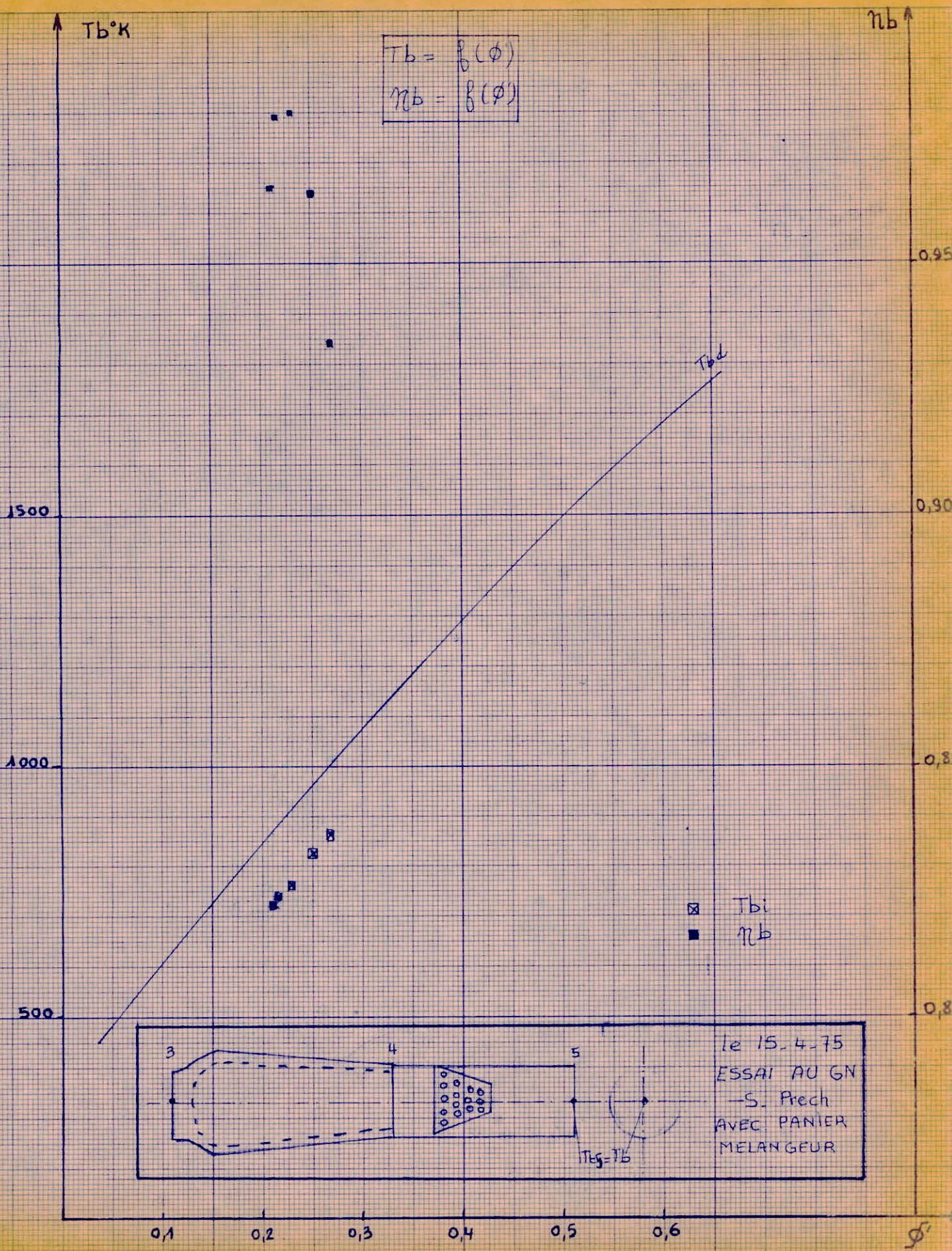


$$P_A = 768 \text{ mmHg}$$

$$T_A = 18,2^\circ\text{C}$$

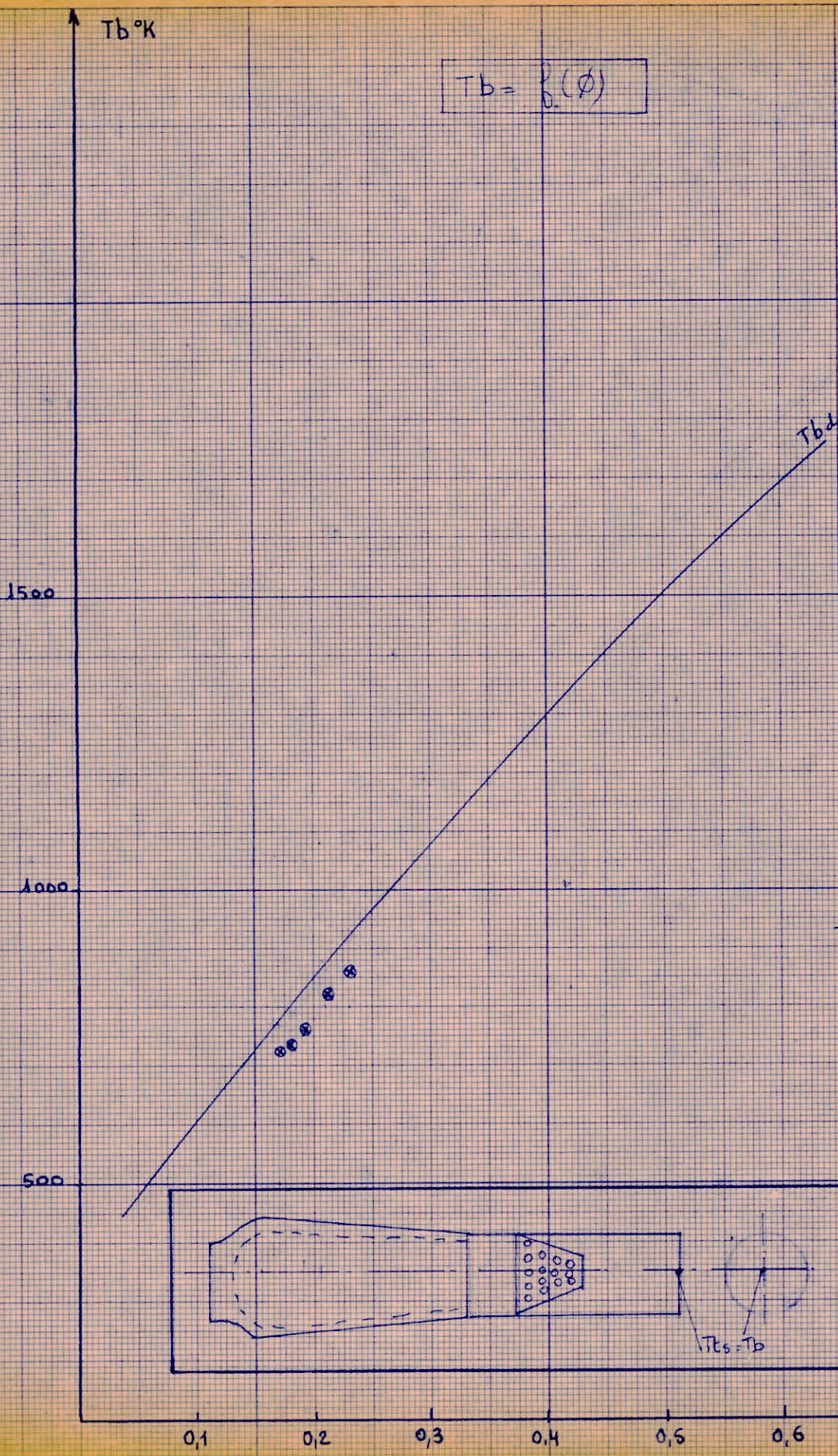
$$P_A = 1,174 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

N° ESSAI		Indication	Unités	1	2	3	4	5
MESURES								
VENTURI	ΔH	mm H ₂ O	182	188	180	172	163	
Debit d'air	A	g/s	1304,8	1326,17	1297,65	1268,49	1234,8	
Pression GN	P _{GN}	bar	10,6	10,5	10	9,6	8,8	
Masse volumique GN	ρ_{GN}	kg/m ³	8,415	8,39	7,994	7,674	7,05	
Debit GN C.C	C ₂	g/s	14,87	15,63	16,38	17,43	18,725	
$\beta = \frac{C_2}{A}$	β	-	0,01139	0,01178	0,01262	0,0137	0,01516	
richesse globale	ϕ_G	-	0,173	0,1799	0,1927	0,209	0,231	
CO ₂ red	CO _{2R}	%	2,27	2,35	2,5	2,70	2,85	
CO ₂ Total	CO _{2T}	%	2,35	2,40	2,65	2,80	3,05	
CO	CO	%	0,12	0,12	0,12	0,14	0,15	
O ₂	O ₂	%	17,5	17,5	17	16,5	16	
rendement de combustion	η_b	-	0,965	0,979	0,98	0,964	0,934	
richesse locale	ϕ'	-	0,21	0,215	0,23	0,25	0,27	
Temperature apres panier	T _{bi}	°K	723	733	763	823	863	
Temperature entree C.C	T ₃	°K	321	321	321	322	322	
Temperature (φ) d'apres diagramme	T _{bd}	°K	771	793	823	871	921	
Temperature diagramme (φ')	T _{ba}	°K	871	886	921	962	1010	



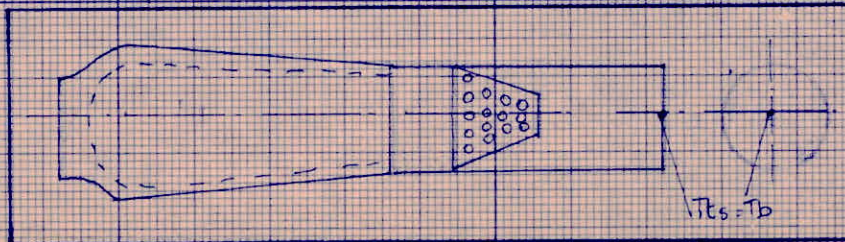
Tb °K

$$T_b = f(\phi)$$

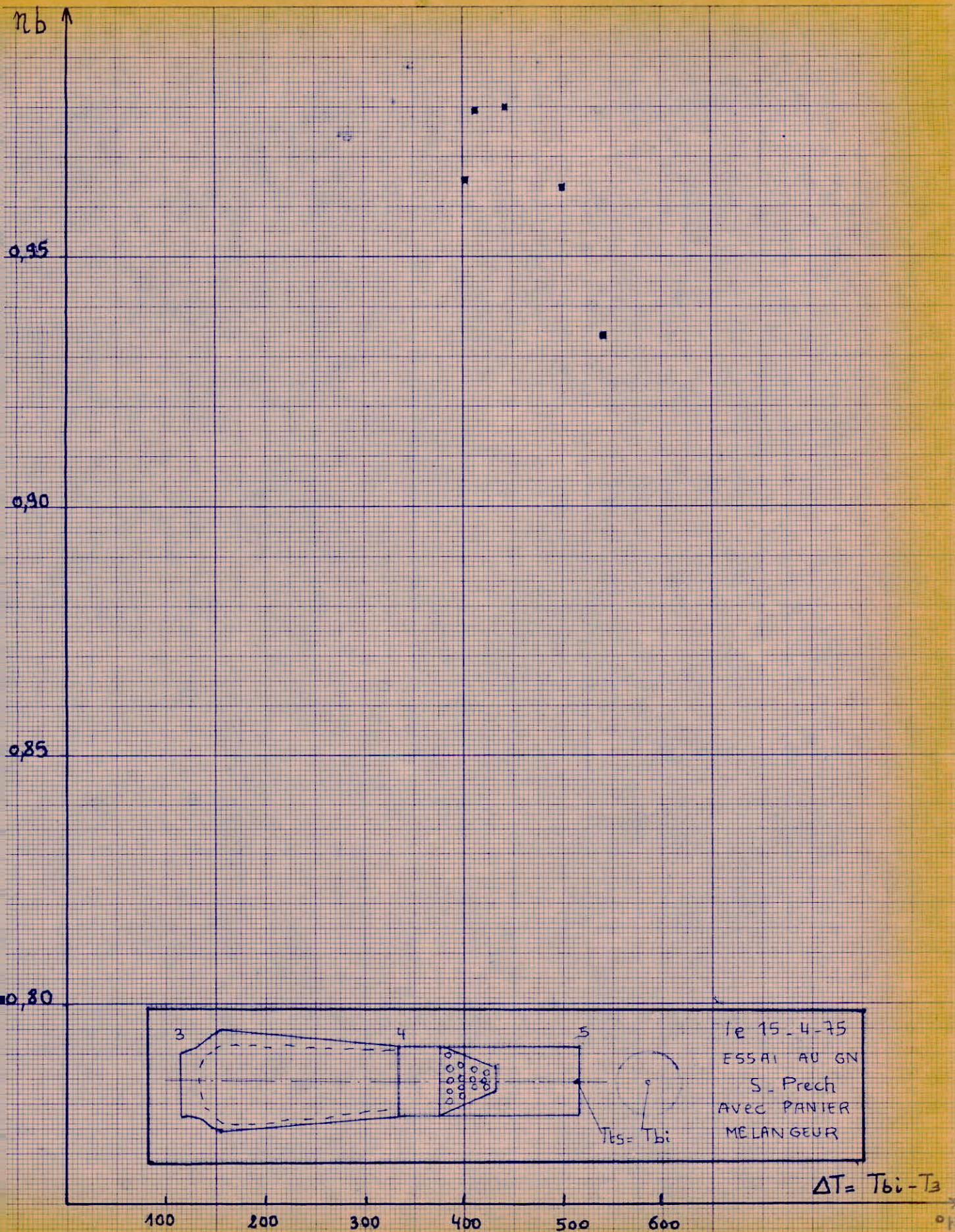


Tbd: courbe théorique

⊗ Tbi mesuré



le 15.4.75
ESSAI AU GN
S. Prech
AVEC PANIER
MELANGEUR



E S S A I S AU GN avec et sans préchauffage

avec panier

29 et 30 - 4 - 75

Nous avons fait une série d'essais avec deux débits d'air différents .
Pour chaque débit d'air :

- Un essai avec préchauffage seul avec panier .
- Un essai sans préchauffage avec panier .
- Deux essais avec deux températures différentes de préchauffage .

Cette gamme a été choisie afin de voir l'influence du débit d'air et du préchauffage sur les rendements et les températures de fin de combustion .

Pour ces essais , que ce soit avec ou sans préchauffage, les points obtenus à partir de $T_{bi} = f(\phi')$ sont très voisins de la courbe théorique .

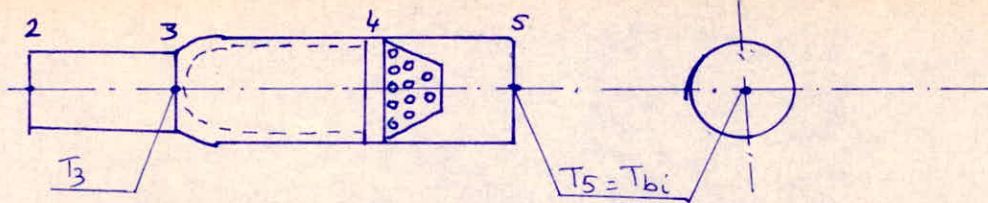
Pour $T_{bi} = f(\phi)$ nous avons une répartition de part et d'autre de la courbe théorique . Par contre le préchauffage améliore le rendement de combustion.

Ce dernier augmente avec la température de préchauffage . On note que pour certains essais le rendement de combustion chute jusqu'à 0,8 . Nous constatons que pour le débit d'air de 424,46 g/s, nous avons une meilleure répartition du rendement de combustion .

Il faudra donc refaire des essais avec ce débit d'air pour essayer de retrouver les résultats des essais précédents . En effet , nous constatons une anomalie au niveau du compresseur de gaz (graissage defectueux du piston) . Nous ne pouvons donc pas conclure vu le nombre d'essais réduits. Par contre pour les premiers essais on distingue un maximum pour le rendement . A vérifier par des essais ultérieurs .

ESSAI AU GN - PRECHAUFFE SEULE - AVEC PANIER

le: 29-04-75



$P_A = 746 \text{ mm Hg}$

$T_A = 291^\circ \text{K}$

$\rho_A = 1,1907 \text{ kg/m}^3$

$\left(\frac{C}{A}\right)_{St} = 0,0655$

ESSAI N°	Indicat	Unités	1	2	3	4	5
VENTURI	ΔH	mm H ₂ O	19	19	19	19	19
DEBIT D'AIR	A	g/s	424,46	424,46	424,46	424,46	424,46
P.AMONT GN CH. PRECHAUFFE	P_{acp}	bars abs.	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
TEMPERATURE du GN	T_{GN}	°K	292	292	292	292	292
MASSE VOLUMIQUE du GN	ρ_{GN}	kg/m ³	6,70	6,70	6,70	6,70	6,70
DEBIT GN	ΔH_{cp}	mm H ₂ O	40	52	61	84	115
DEBIT GN	C_1	g/s	2,25	2,563	2,777	3,261	3,816
RICHESSSE GLOBALE	ϕ	/	0,08	0,092	0,099	0,117	0,137
TEMPERATURE SORTIE CH. PRECH	T_3	°K	623	673	723	773	873
TEMPERATURE APRES PANIER	T_{bi} (T_5)	°K	533	563	583	613	673
TEMPERATURE d'après Diagramme (ϕ')	\bar{T}_{bd} (ϕ')	°K	280	580	610	650	720
α'_{CO_2r}	/	%	0,87	1	1,05	1,2	1,5
α'_{CO_2t}	/	%	0,92	1,05	1,15	1,30	1,60
CO	/	%	0,025	0,035	0,04	0,045	0,055
O ₂	/	%	19	19	18,75	18,75	18
RENDEMENT de COMBUSTION	η_b	/	0,945	0,952	0,913	0,923	0,937
RICHESSSE LOCALE	ϕ'	/	0,02	0,095	0,105	0,12	0,15

T6K

$T_{6i} = f(d)$

2000

1500

1000

500

0.1

0.2

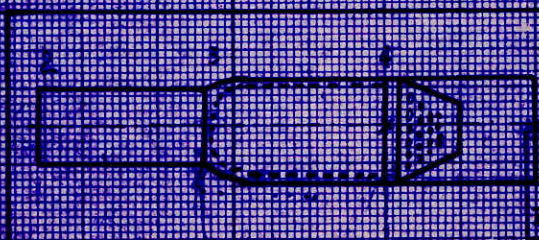
0.3

0.4

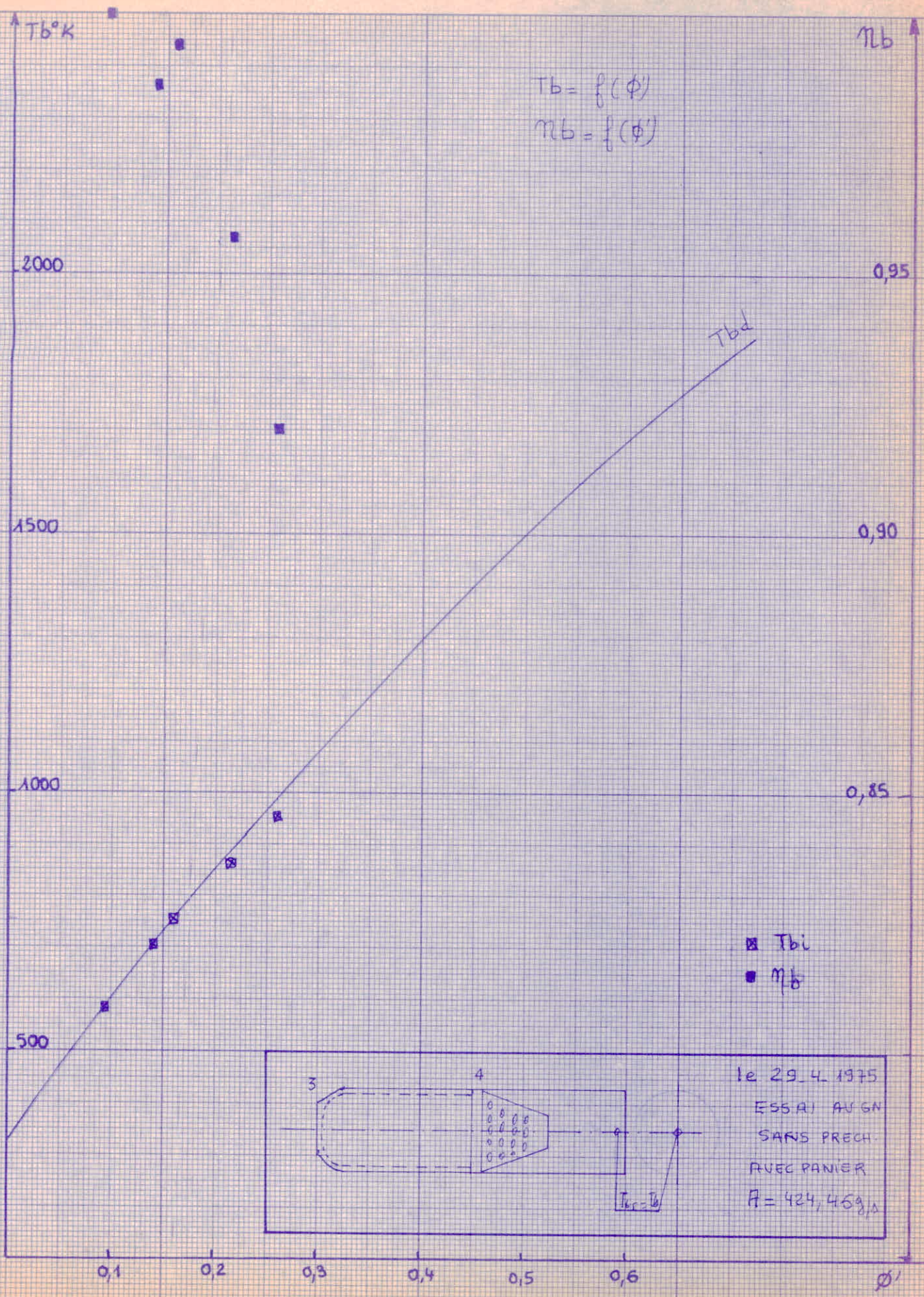
0.5

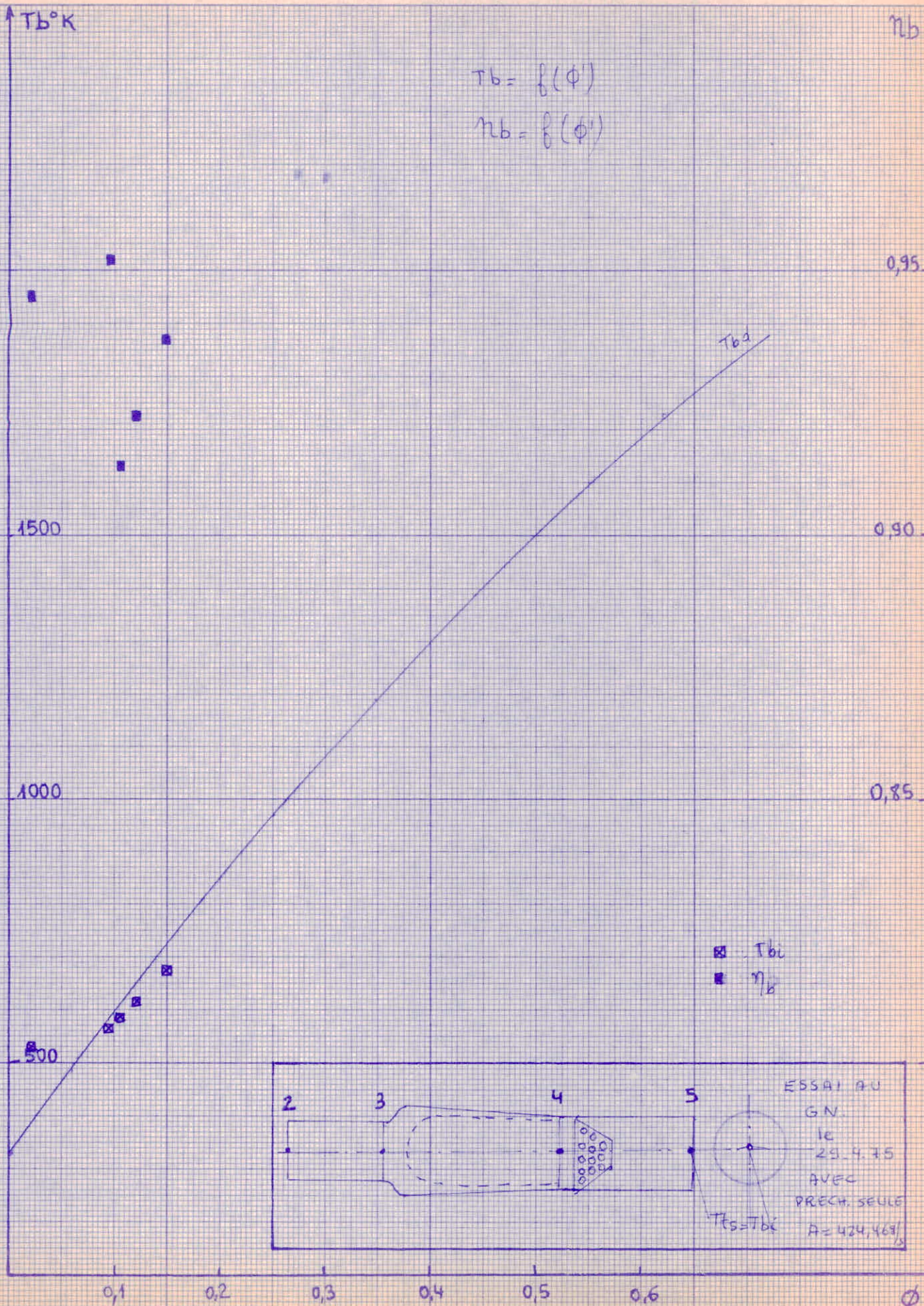
0.6

● T6i

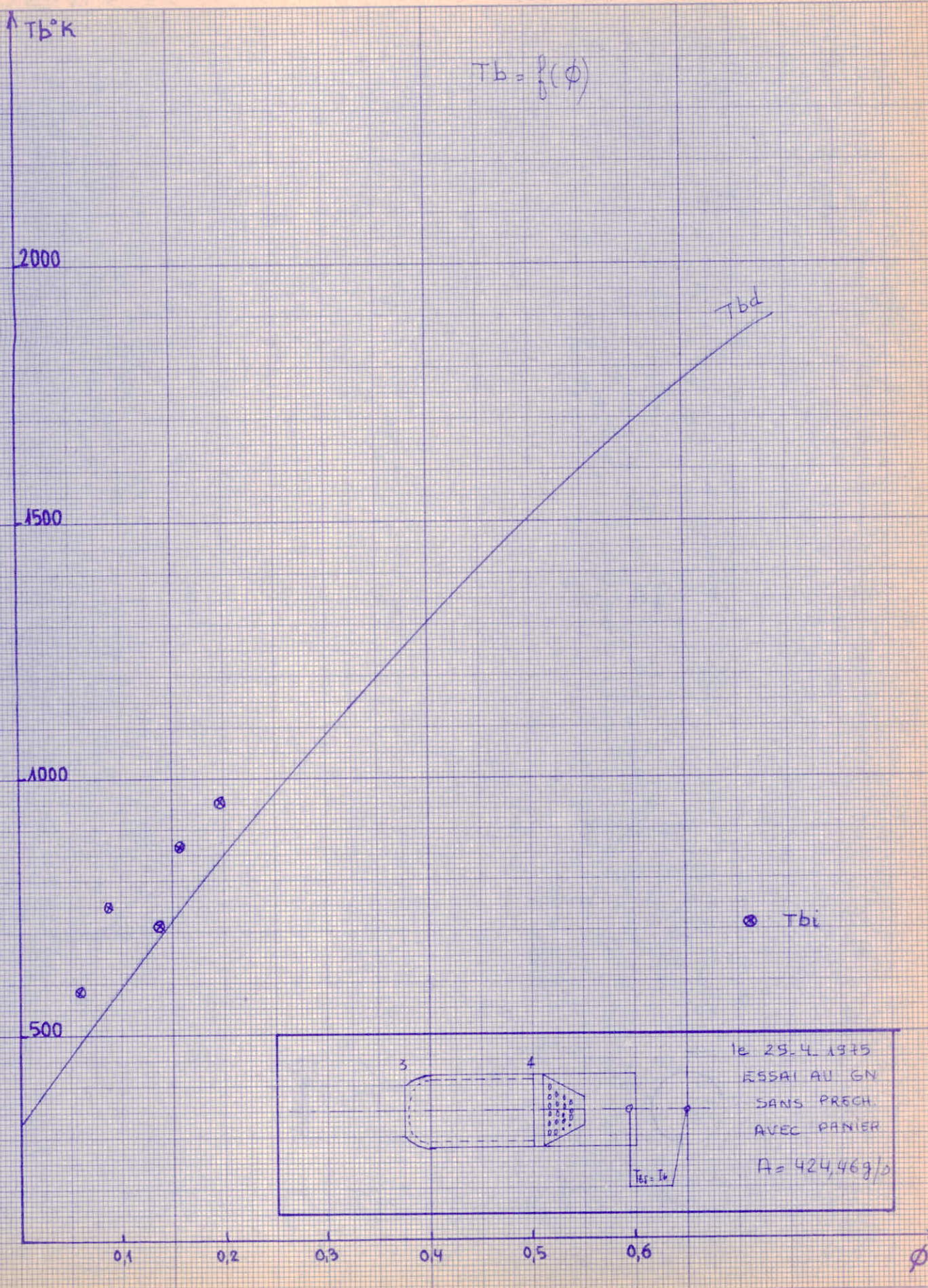


№ 25.4.75
 ЭСЛЛ ПУ-66
 АУС ПРМ
 БЕЛС
 П-424763/1

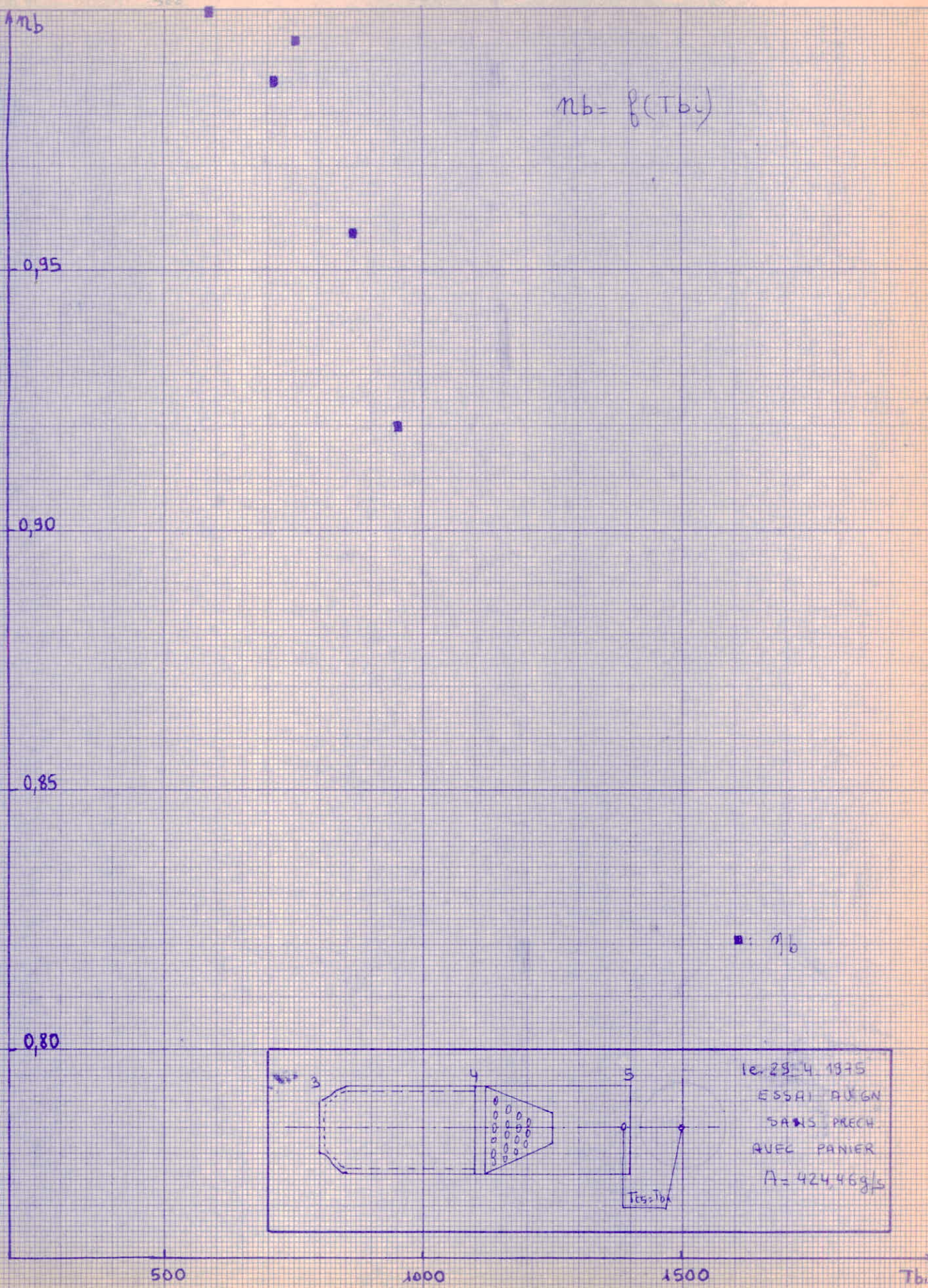




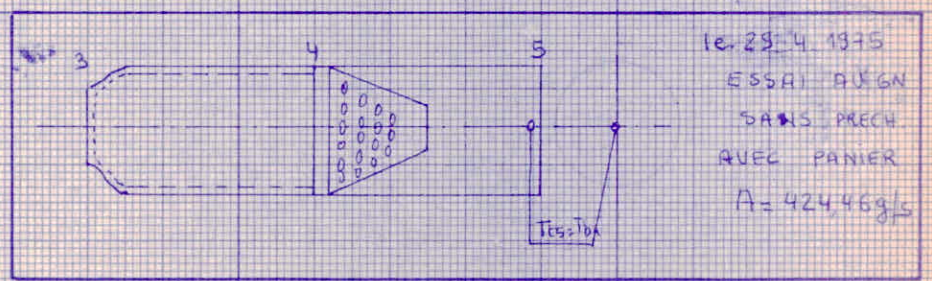
$$T_b = f(\phi)$$



$$\eta_b = f(T_b)$$



■: η_b



le. 25. 4. 1975
 ESSAI A UEN
 SANS PRECH
 AVEC PANIER
 $A = 424,46 \text{ g/s}$

500

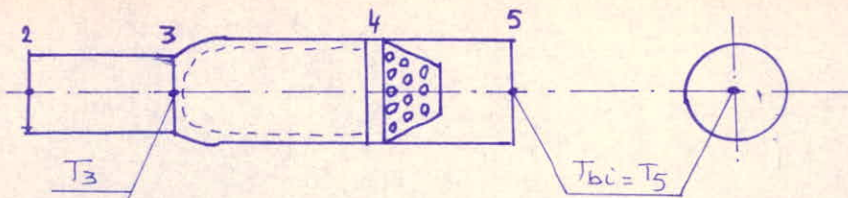
1000

1500

T_b

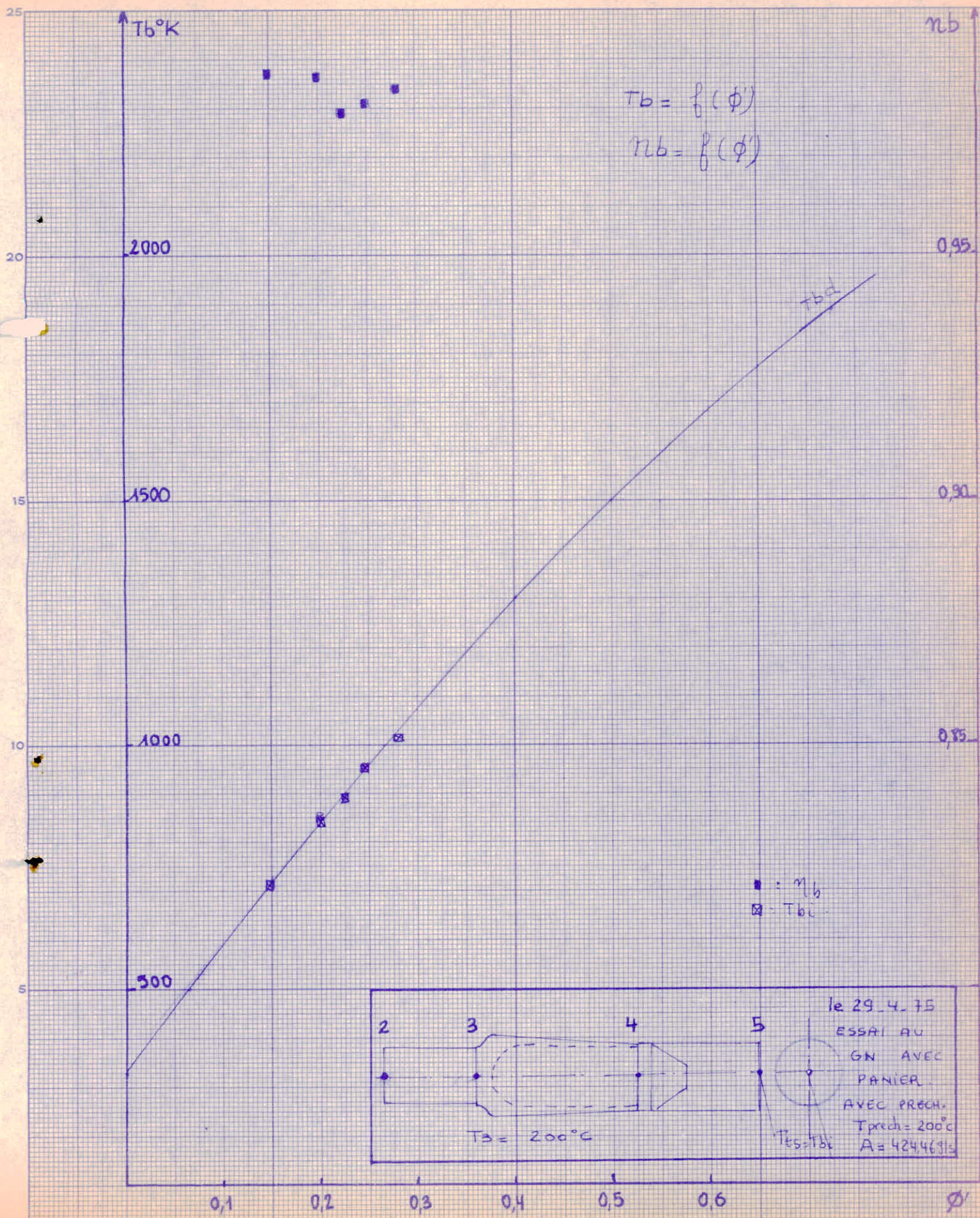
ESSAI au GN — AVEC PRECHAUFFE — AVEC PANIER

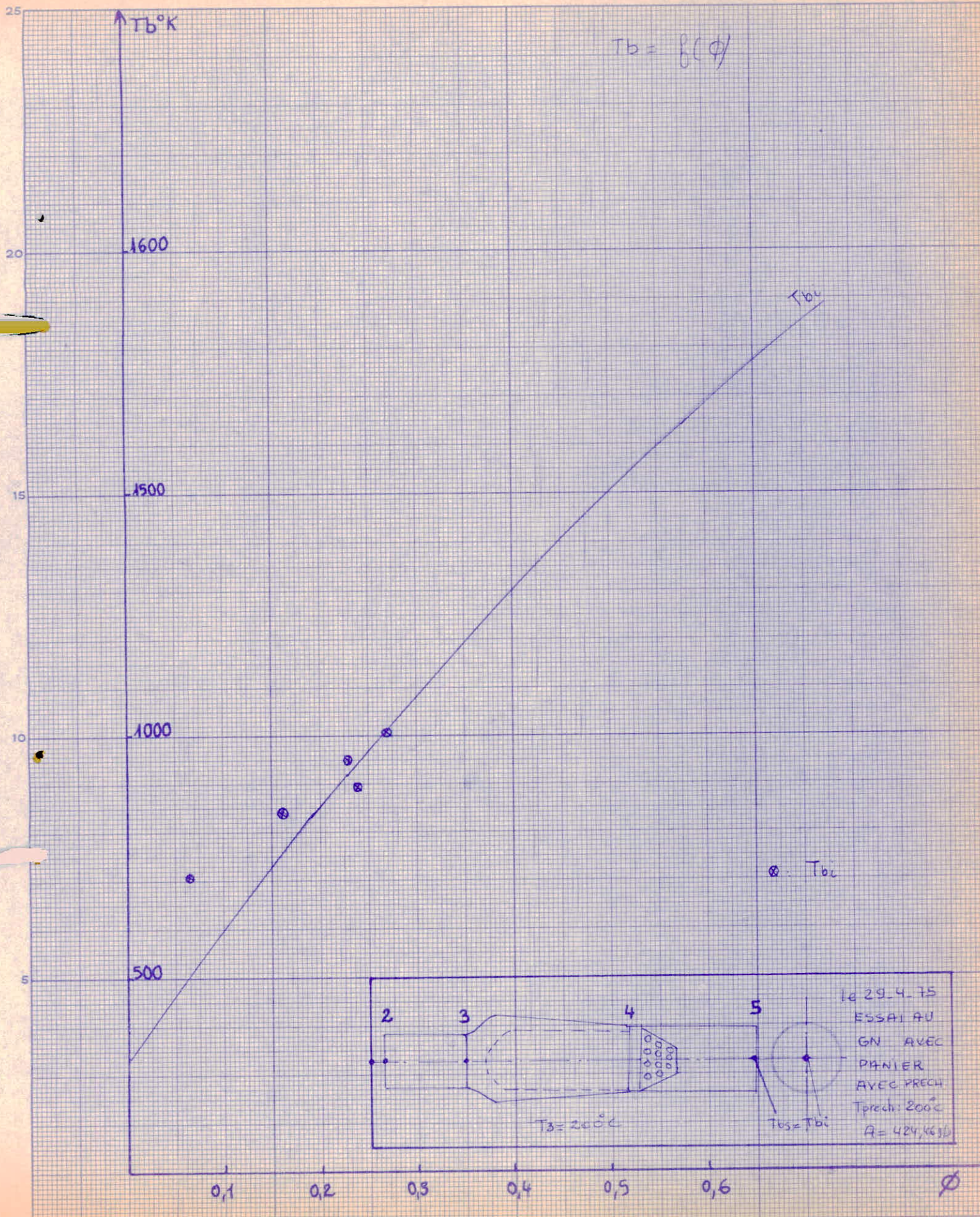
le: 29-04-75

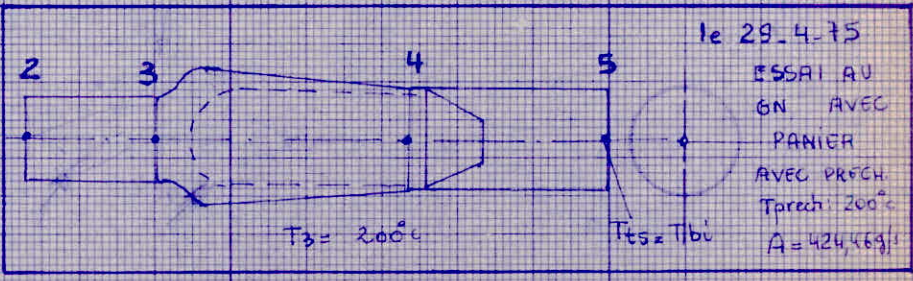
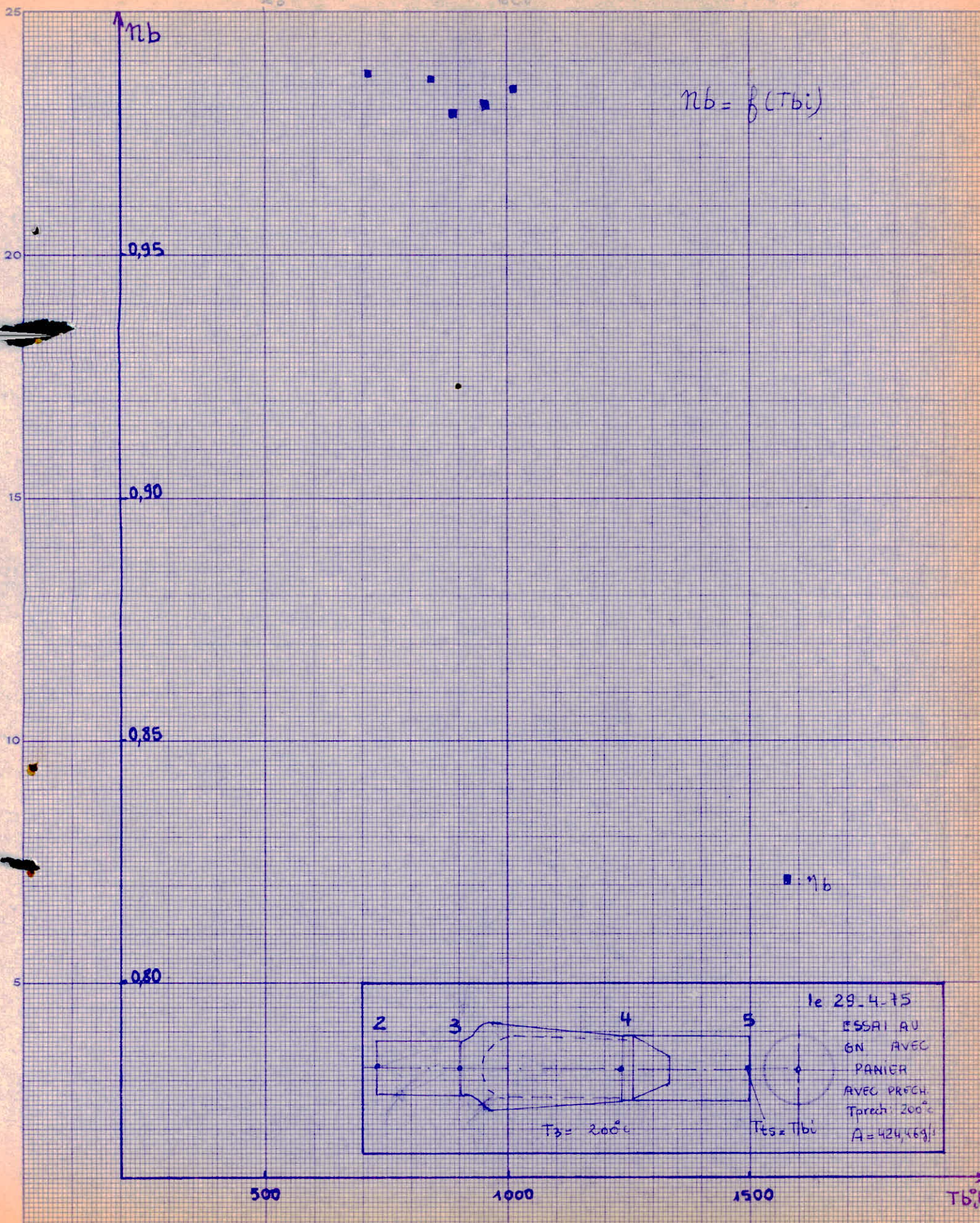


$P_A = 746 \text{ mm Hg}$
 $T_A = 291^\circ \text{K}$
 $\rho_A = 1,1907 \text{ kg/m}^3$
 $\left(\frac{C}{A}\right)_{st} = 0,0655$

ESSAIS MESURES	Indicat.	Unités	1	2	3	4	5
VENTURI	ΔH	mm H ₂ O	19	19	19	19	19
DEBIT D'AIR	A	g/s	424,46	424,46	424,46	424,46	424,46
P. AMONT GN CH. COMBUSTION	P_{acc}	bars absolus	10,4	10,4	10,5	10,6	10,8
TEMPERATURE du GN	T_{GN}	°K	292	292	292	292	292
MASSE VOLUMIQUE du GN (C.C)	ρ_{GNc}	kg/m ³	8,2	8,2	8,278	8,357	8,515
DEBIT GN CH. de COMBUSTION	ΔH_{cc}	mm H ₂ O	22	30	20	8	6
DEBIT GN CH. de COMBUSTION	C_2	g/s	5,345	6,242	5,12	3,254	2,844
P. AMONT GN CH. de. PRECHAUFFE	P_{accp}	bars absolus	8,8	8,7	8,7	8,7	8,7
MASSE VOLUMIQUE du GN (C.P)	ρ_{GNP}	kg/m ³	6,938	6,859	6,859	6,859	6,859
DEBIT GN CH. de. PRECHAUFFE	ΔH_{cp}	mm H ₂ O	12	12	12	12	12
" " "	C_1	g/s	1,254	1,247	1,247	1,247	1,247
$f_1 + f_2$	$\frac{C_1 + C_2}{A}$	—	0,0155	0,0146	0,0150	0,0106	0,001
RICHESSE GLOBALE	ϕ	—	0,237	0,268	0,229	0,16	0,065
TEMPERATURE de PRECHAUFFE	T_3	°K	473	473	473	473	473
TEMPERATURE SORTIE du PANIER	T_{bi}	°K	893	1013	953	843	713
TEMPERATURE D'APRES DIAGRAMME (ϕ')	T_{bd}	°K	900	1030	950	840	713
$a'CO_2r$,	%	2,4	3,1	2,67	2,17	1,6
$a'CO_2T$,	%	2,45	3,15	2,72	2,20	1,62
CO	,	%	0,02	0,02	0,02	0,02	0,018
O ₂	,	%	15,75	14,25	15	16,25	17,5
RENDEMENT de COMBUSTION	η_b	—	0,979	0,984	0,981	0,986	0,987
RICHESSE LOCALE	ϕ'	—	0,225	0,28	0,245	0,2	0,15







le 29.4-75
 ESSAI AU
 GN AVEC
 PANIER
 AVEC PROFCH.
 Tprech: 200°C
 A = 424,469/1

$T_3 = 200^\circ C$

$T_5 = T_{bi}$

500

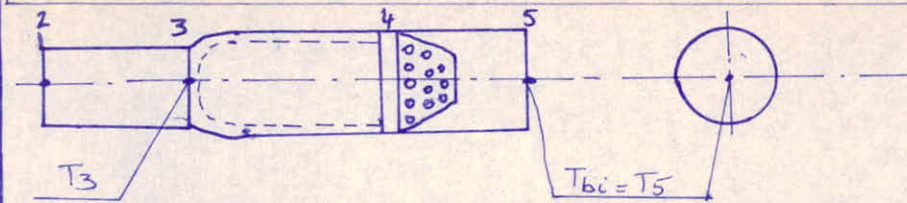
1000

1500

T_{bi}

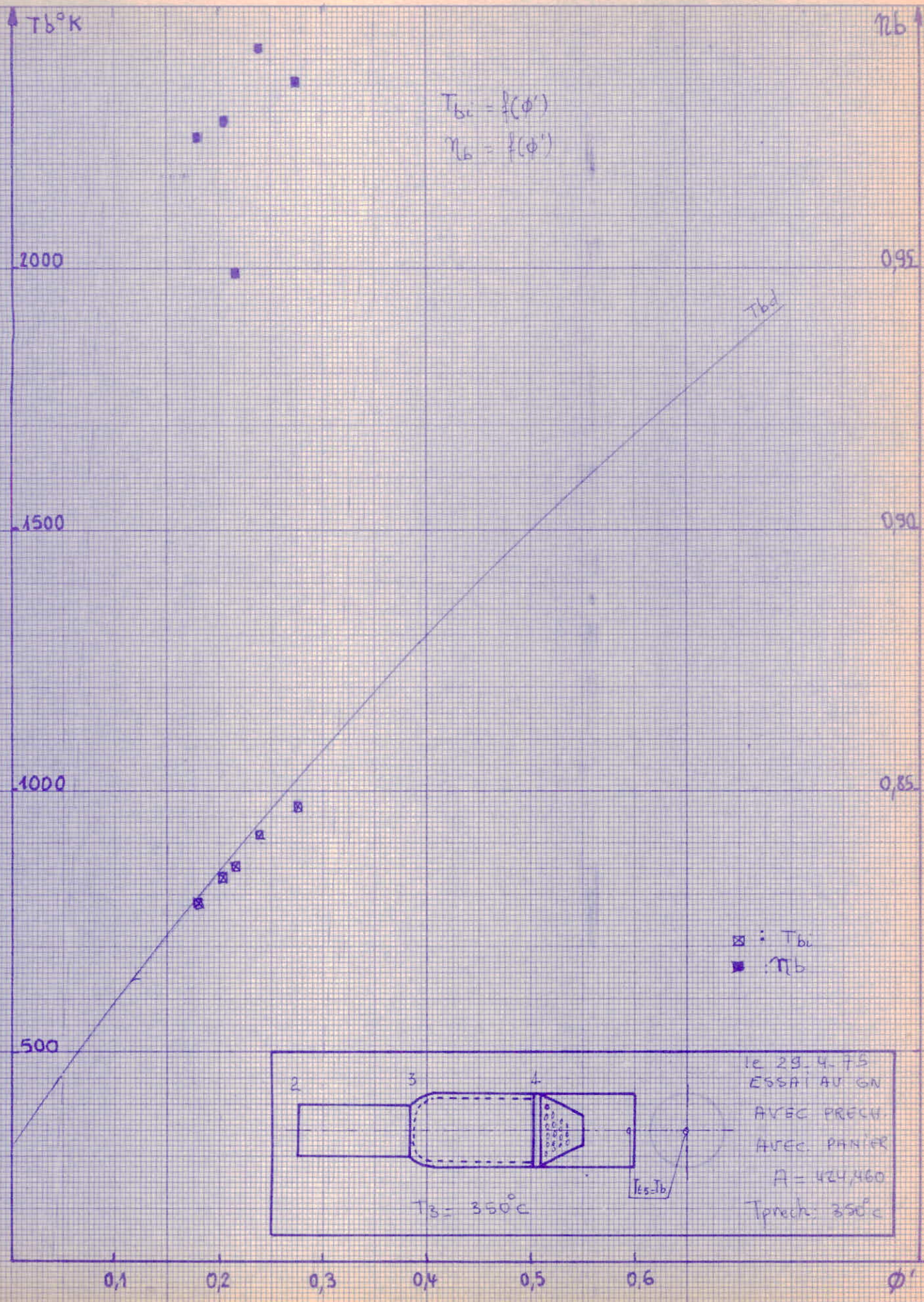
ESSAI AU GN - AVEC PRECHAUFFE - AVEC PANIER

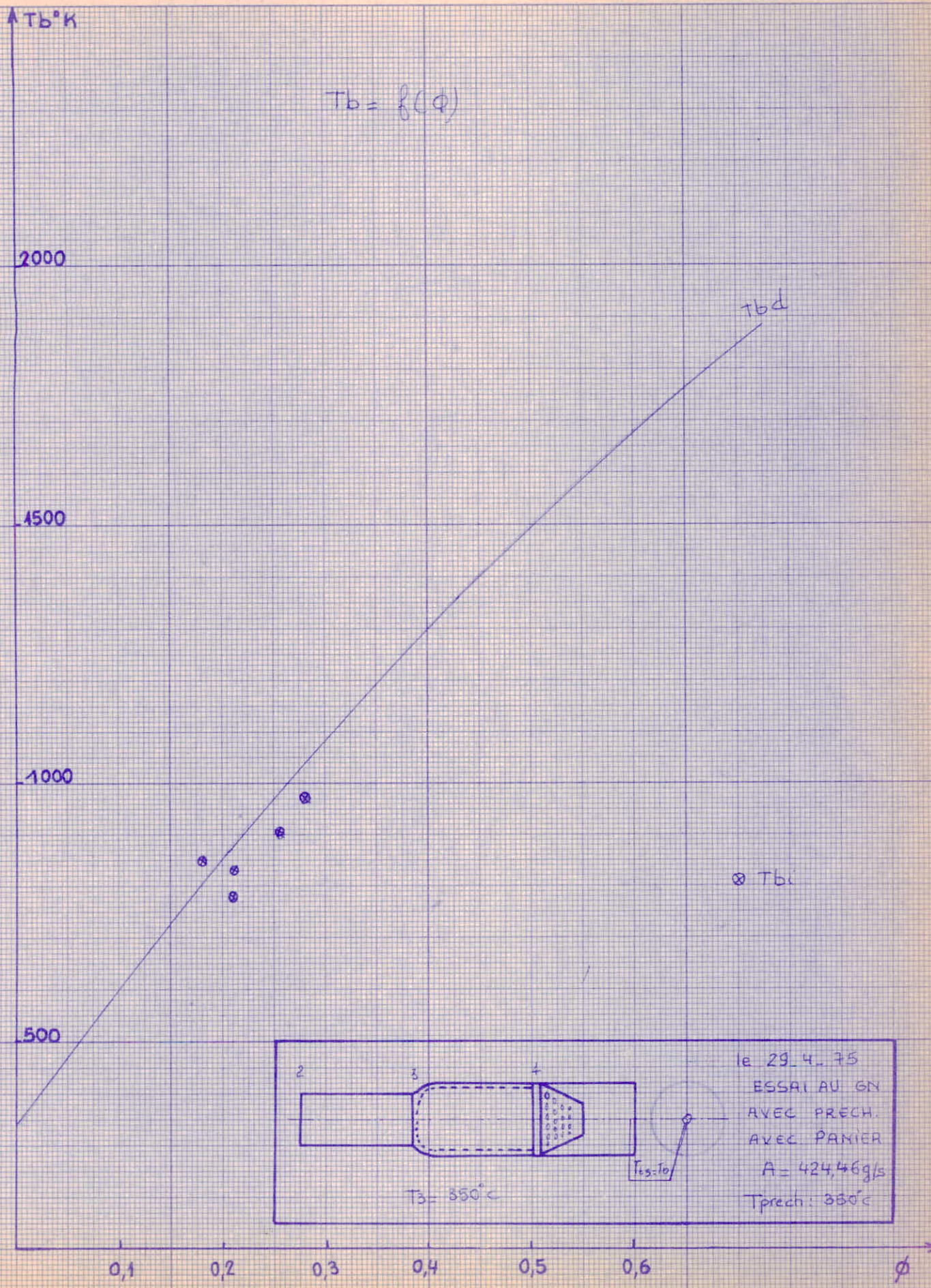
le: 29-04-75

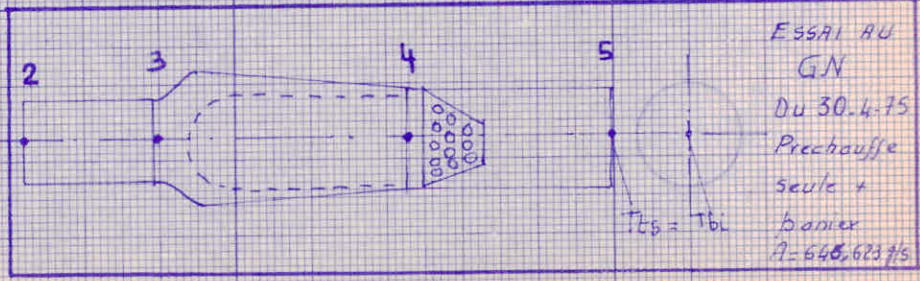
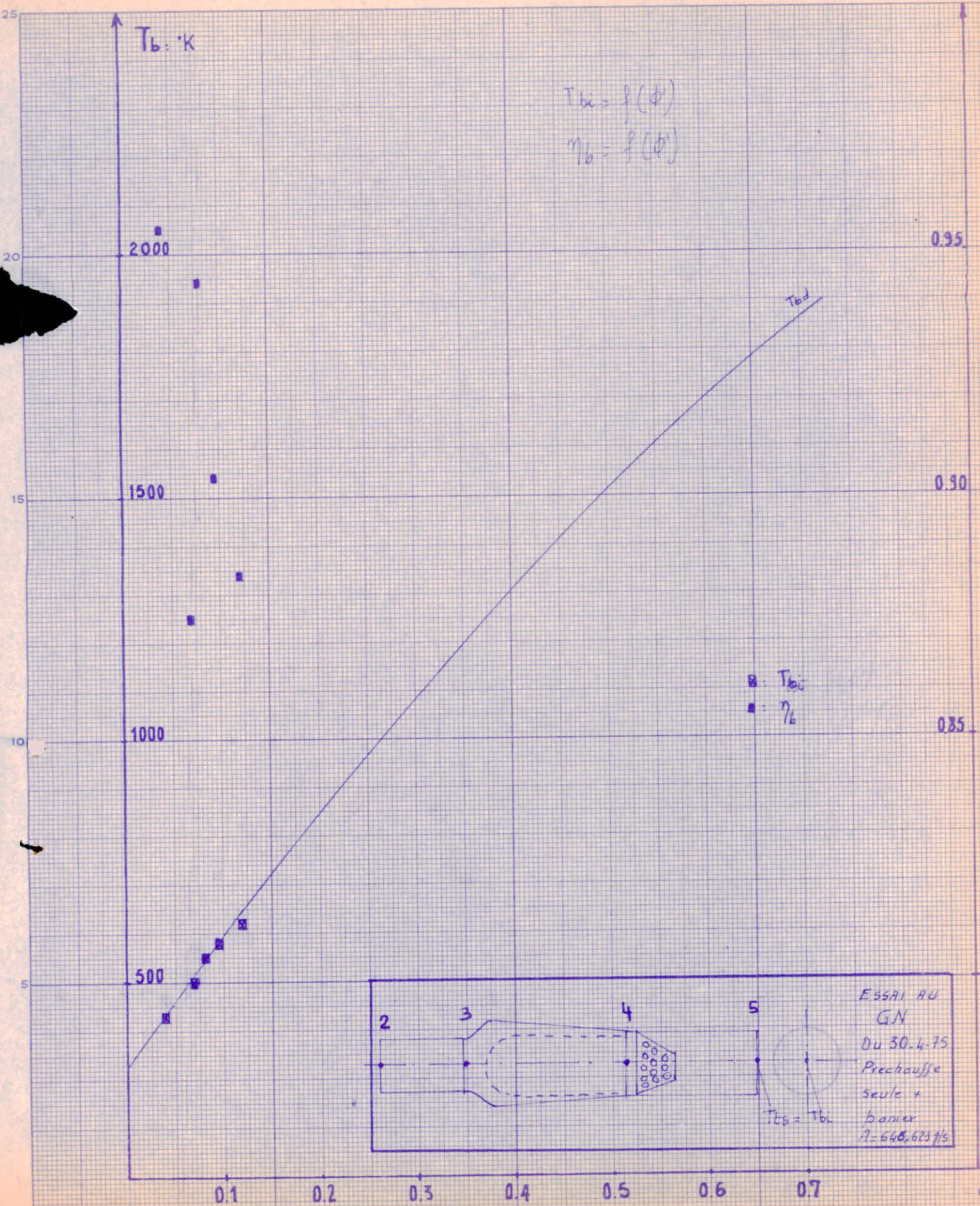


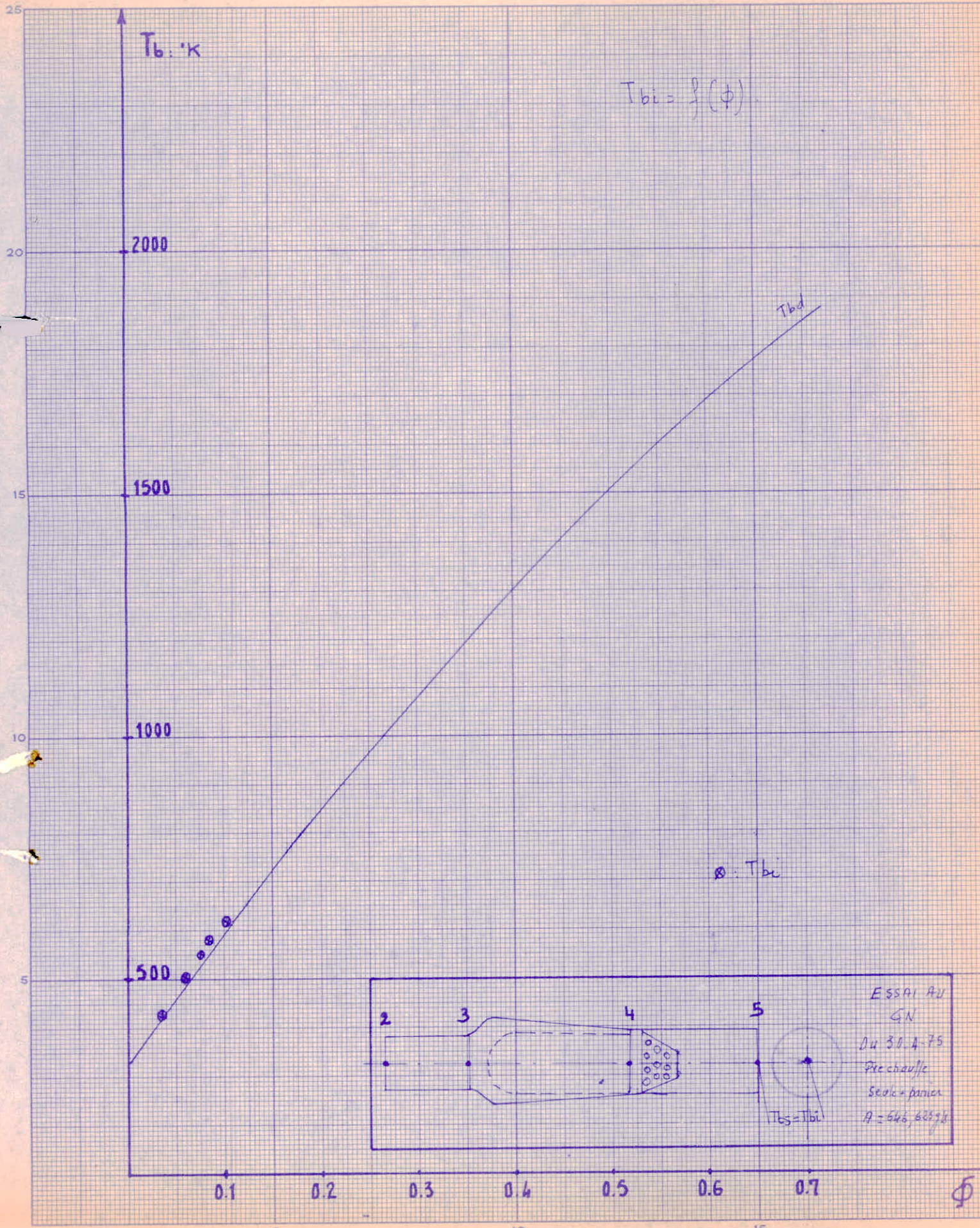
$P_A = 746 \text{ mm Hg}$
 $T_A = 2910 \text{ K}$
 $\rho_A = 1,1907 \text{ kg/m}^3$
 $\left(\frac{C}{A}\right)_{st} = 0,0655$

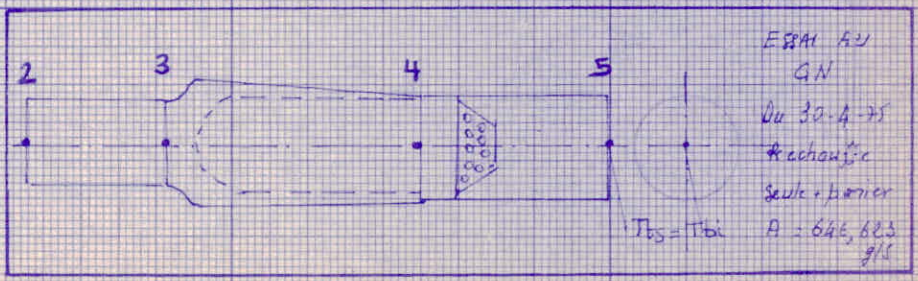
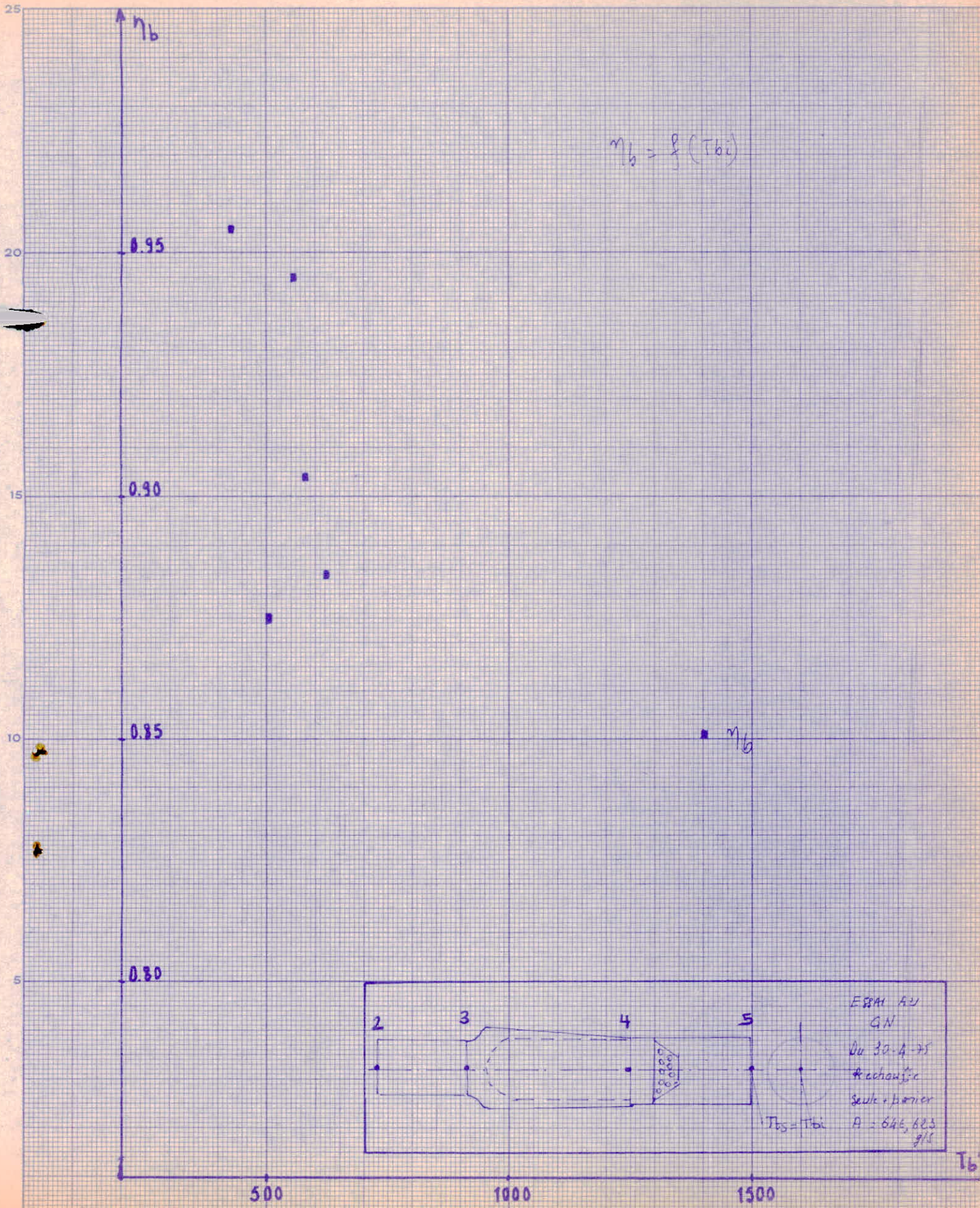
ESSAI MESURES	Indicatif	Unités	1	2	3	4	5
VENTURI	ΔH	mm H ₂ O	19	19	19	19	19
DEBIT D'AIR	A	g/s	424,46	424,46	424,46	424,46	424,46
P.A.MONT GN CH. de COMBUSTION	P_{acc}	bars absolus	10,8	10,8	10,5	10,7	10,6
TEMPERATURE du GN	T_{GN}	°K	292	292	292	292	292
MASSE VOLUMIQUE du G.N (C.C)	ρ_{GNC}	kg/m ³	8,515	8,515	8,278	8,436	8,357
DEBIT GN CH. de COMBUSTION	ΔH_{cc}	mm H ₂ O	10	6	24	10	18
" " " "	C_2	g/s	3,672	2,844	5,609	3,655	4,88
P.A.MONT GN CH. de PRECHAUFFE	P_{acc}	bars absolus	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
MASSE VOLUMIQUE du GN (C.P)	ρ_{GNP}	kg/m ³	6,78	6,78	6,78	6,78	6,78
DEBIT GN CH. de PRECHAUFFE	ΔH_{cp}	mm H ₂ O	38	38	40	40	40
" " "	C_1	g/s	2,206	2,206	2,264	2,264	2,264
$P_1 + P_2$	$\frac{C_1 + C_2}{A}$	—	0,0138	0,0118	0,0185	0,0139	0,0168
RICHESSSE GLOBALE	ϕ	—	0,210	0,180	0,282	0,212	0,256
TEMPERATURE de PRECHAUFFE	T_3	°K	623	623	623	623	623
TEMPERATURE SORTIE du PANIER	T_{bi}	°K	783	853	973	833	913
TEMPERATURE D'APRES DIAGRAMME (ϕ')	T_{bd}	°K	800	880	1020	860	940
$\alpha'CO_{2r}$	—	%	1,95	2,25	2,98	2,20	2,65
$\alpha'CO_{2T}$	—	%	2	2,37	3,02	2,25	2,67
CO	—	%	0,022	0,025	0,03	0,03	0,03
O ₂	—	%	17	16,25	14,5	16,25	15,5
RENDEMENT de COMBUSTION	η_b	—	0,975	0,949	0,986	0,977	0,992
RICHESSSE LOCALE	ϕ'	—	0,182	0,215	0,275	0,205	0,24



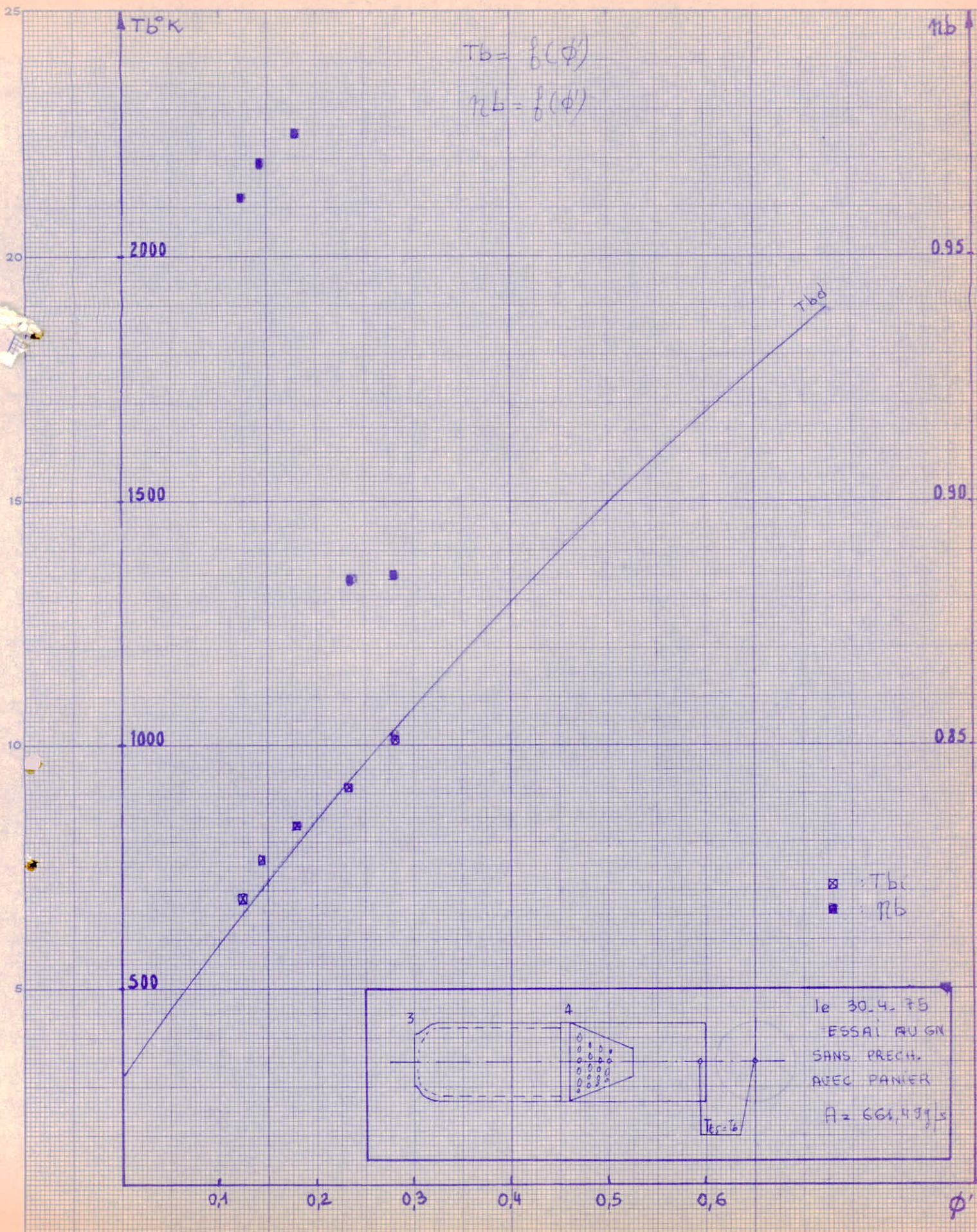


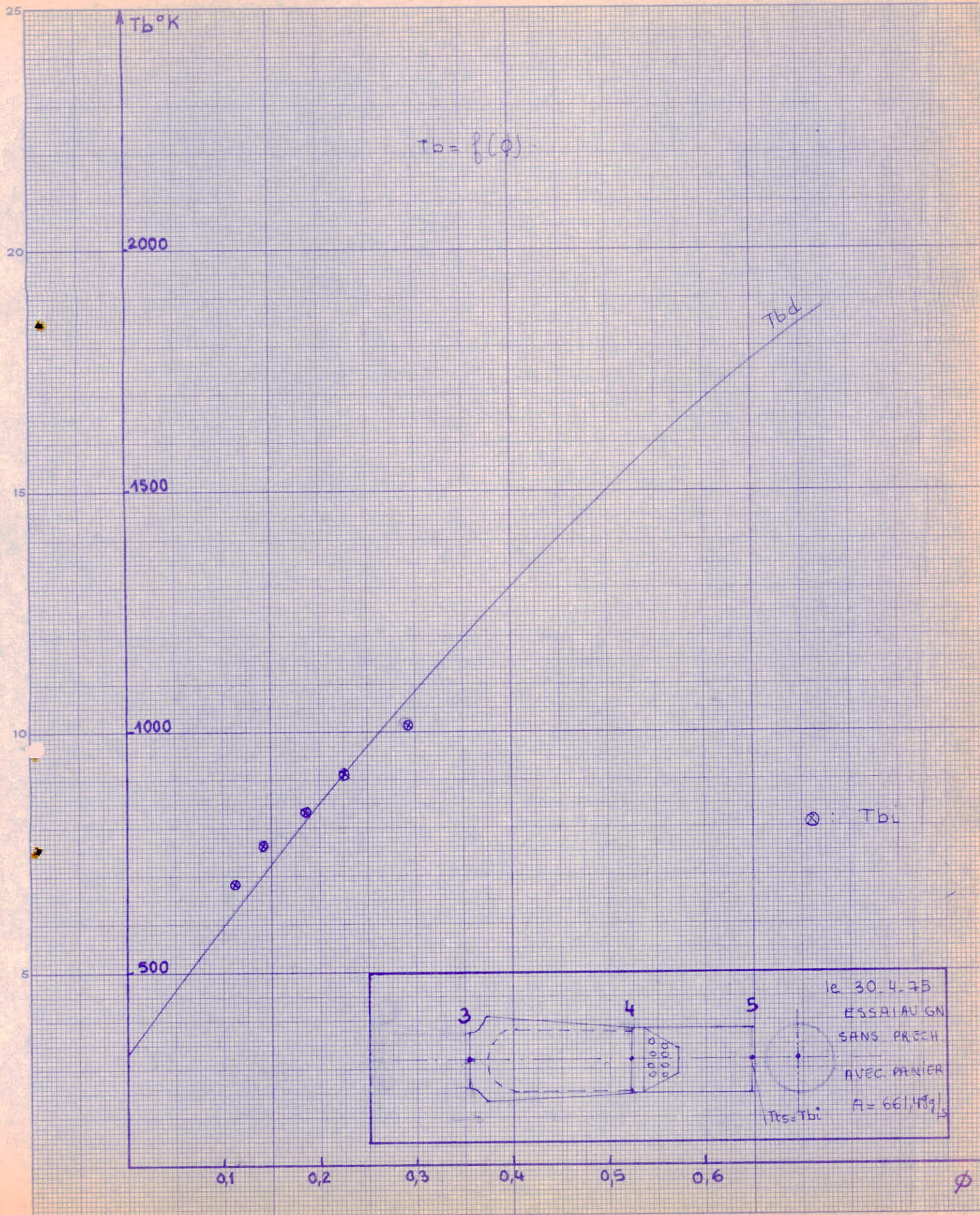


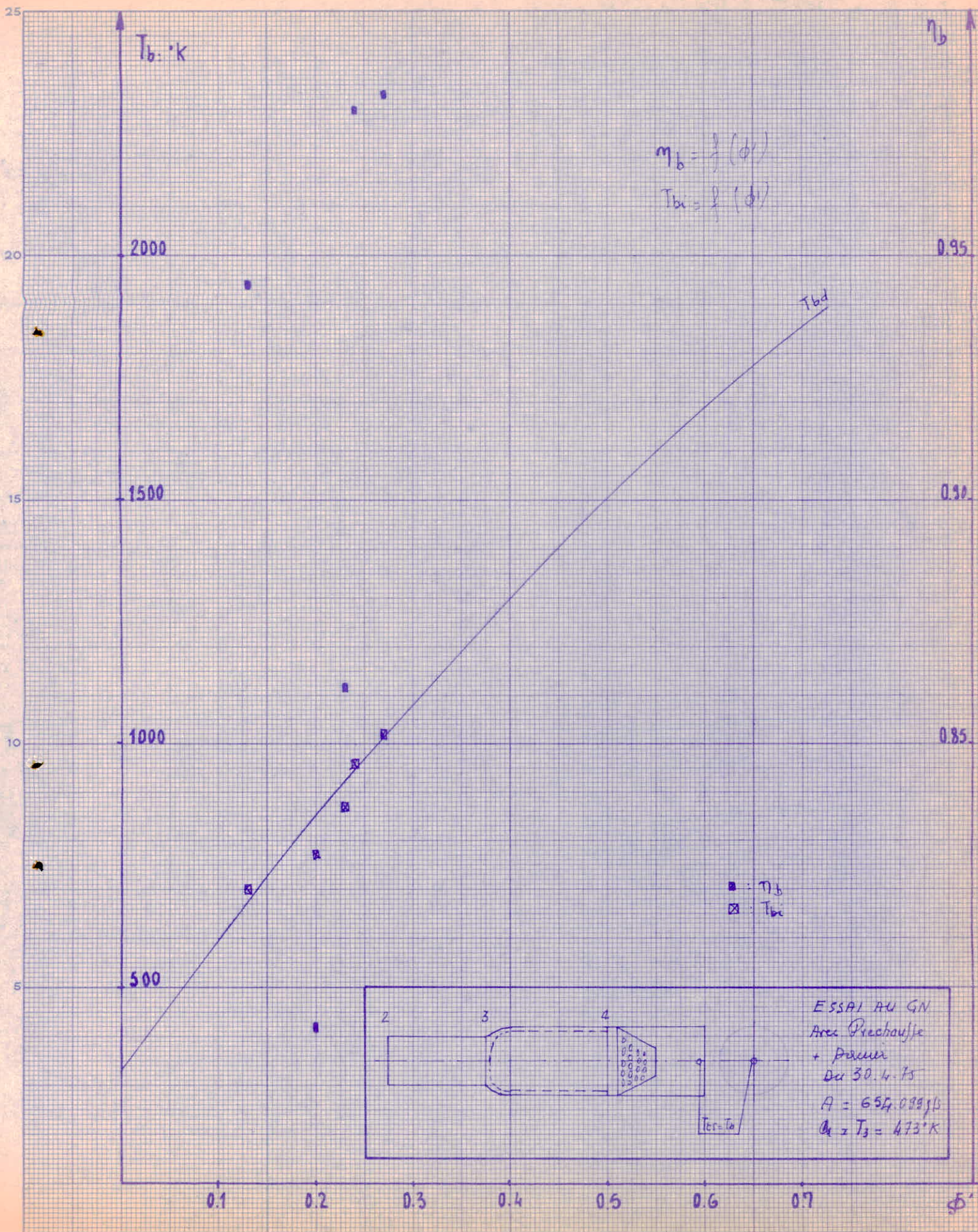


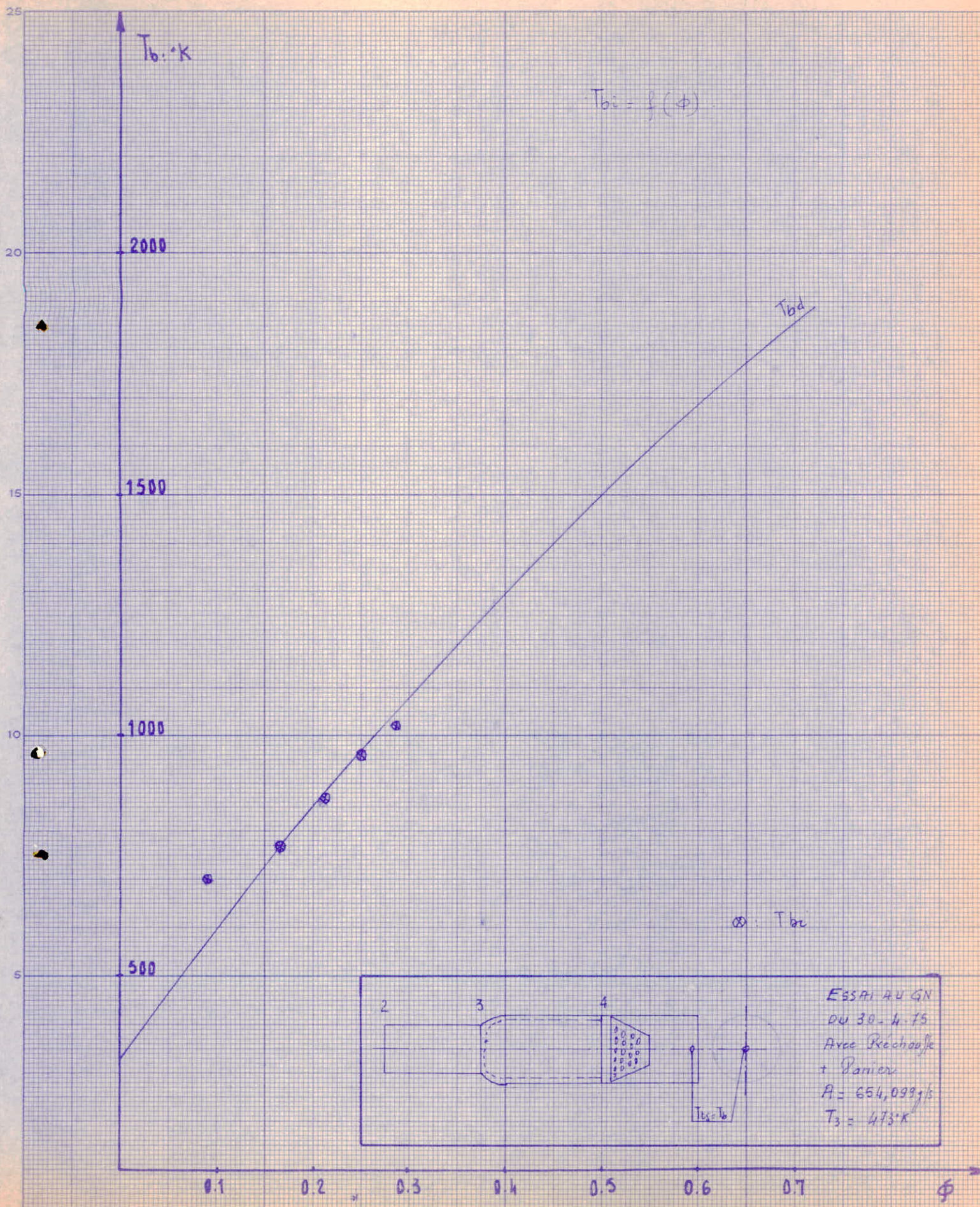


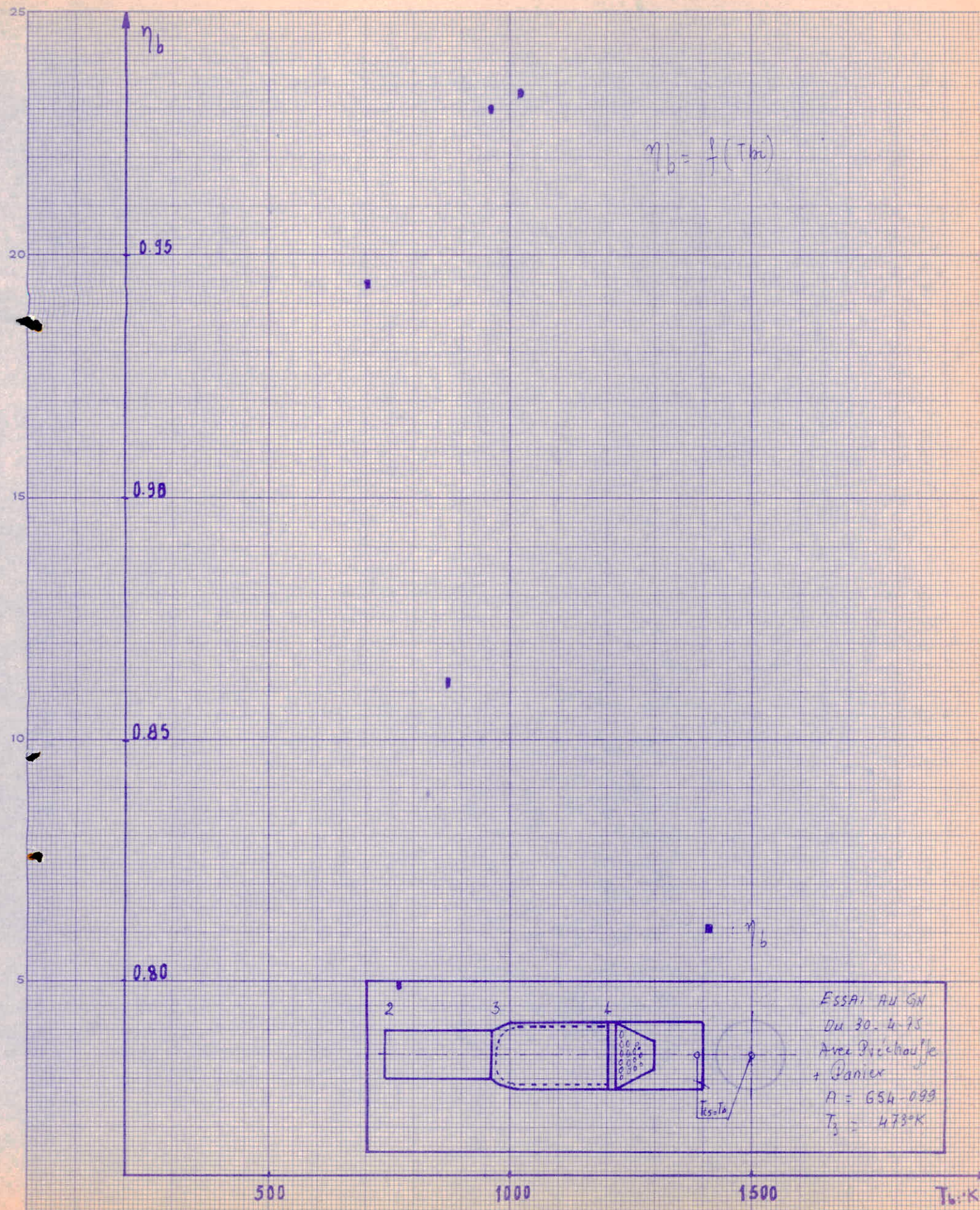
T_b





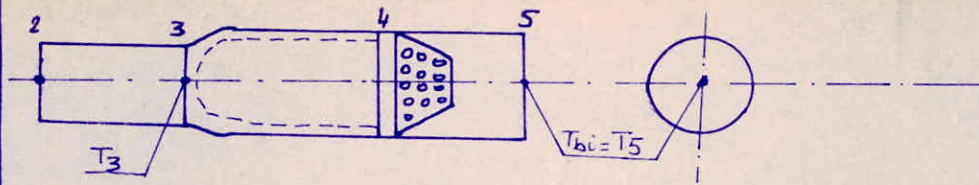






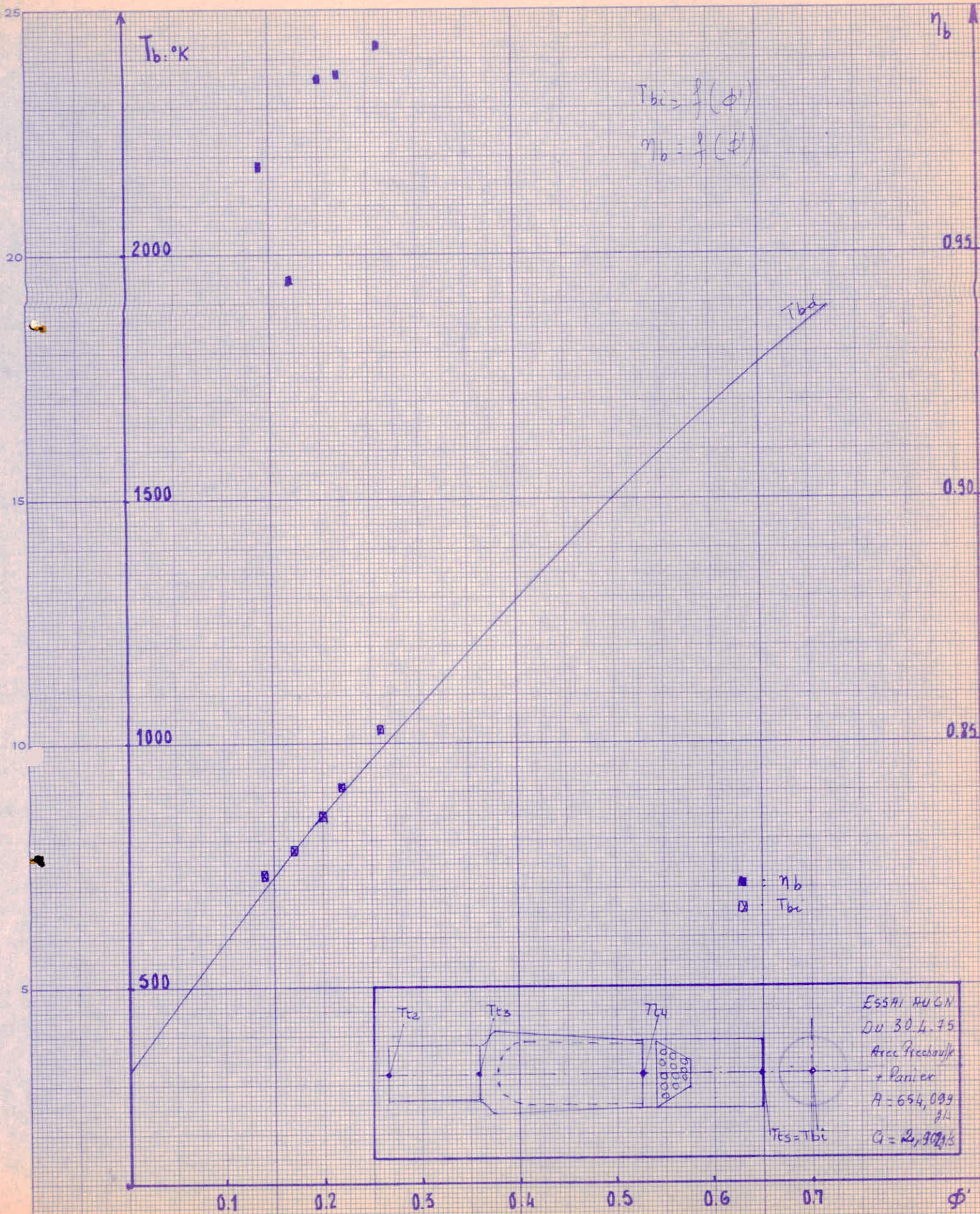
ESSAI AU GN - AVEC PRECHAUFFE - AVEC PANIER

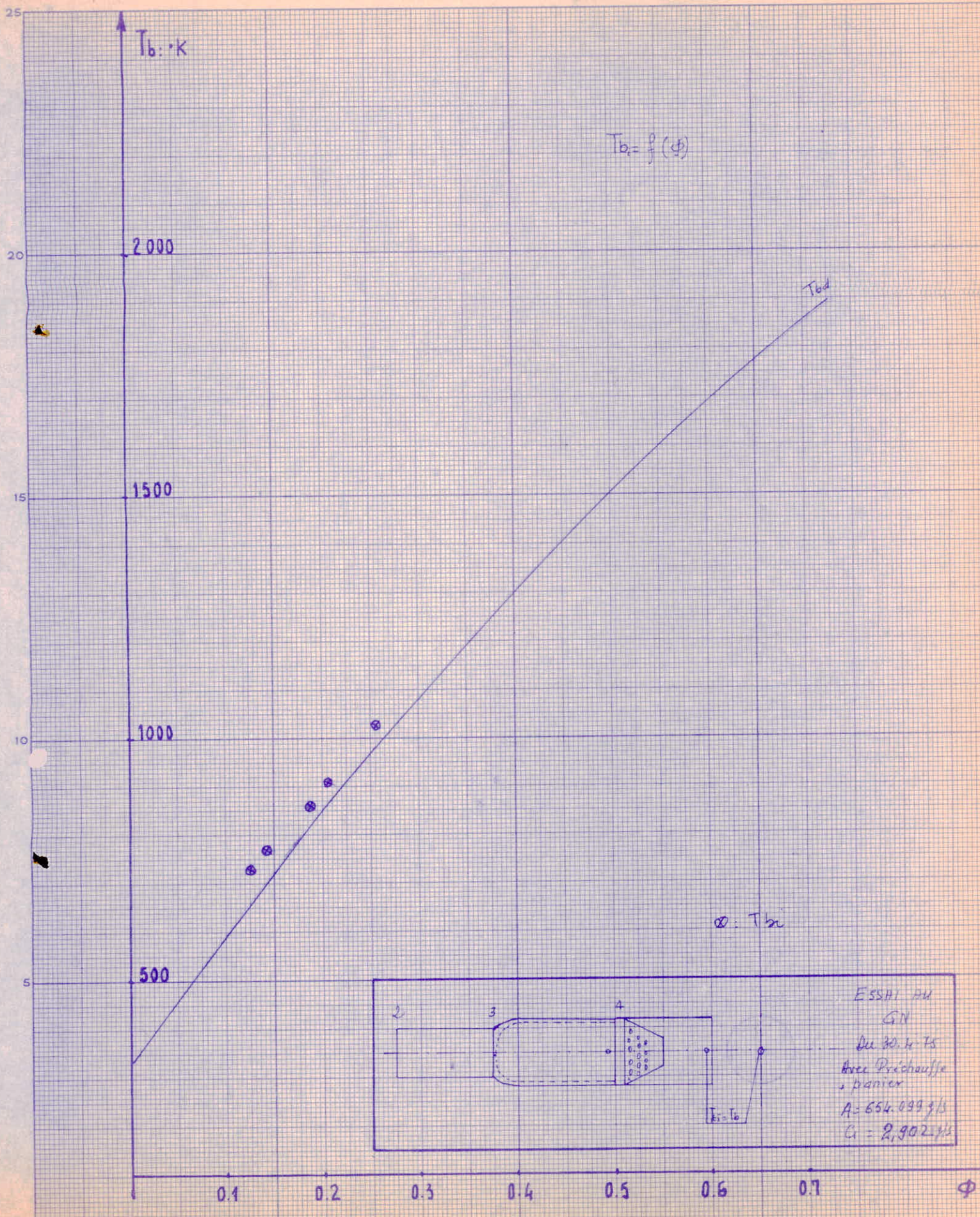
le: 30-04-75

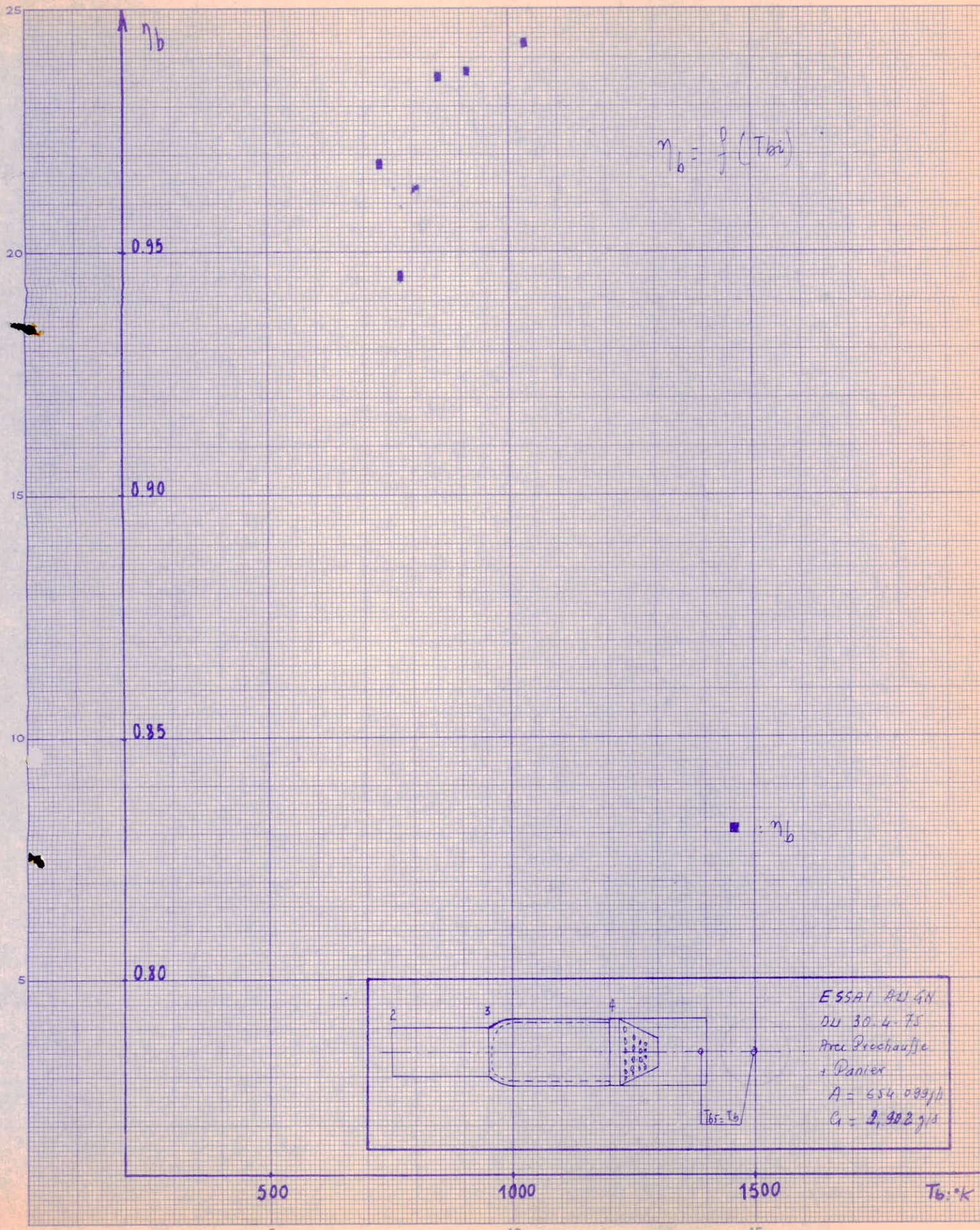


$P_A = 768 \text{ mm Hg}$
 $T_A = 291,5 \text{ }^\circ\text{K}$
 $\rho_A = 1,221 \text{ kg/m}^3$
 $\left(\frac{C}{A}\right)_{SF} = 0,0655$

ESSAIS MESURES	Indicat	Unités	1	2	3	4	5
VENTURI	ΔH	mm H ₂ O	44	46	46	44	42
DEBIT D'AIR	A	g/s	654,099	665,78	665,78	654,099	636,175
P. AMONT GN CH. de COMBUSTION	P_{acc}	bars absolus	10,5	10,6	10,5	10,3	10,2
TEMPERATURE du GN	T_{GN}	$^\circ\text{K}$	291	291	291	291	291
MASSE VOLUMIQUE du GN (C.C)	ρ_{GN}	kg/m ³	8,307	8,386	8,307	8,148	8,069
DEBIT GN CH. de COMBUSTION	ΔH_{cc}	mm H ₂ O	20	5	8	27	48
" " " "	C_2	g/s	5,13	2,577	3,264	5,903	7,832
P. AMONT GN CH. de PRECHAUFFE	P_{acc}	bars absolus	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
MASSE VOLUMIQUE du GN (C.P)	ρ_{GNP}	kg/m ³	6,962	6,962	6,962	6,962	6,962
DEBIT GN CH. de PRECHAUFFE	ΔH_{cp}	mm H ₂ O	66	64	64	64	64
" " " "	C_1	g/s	2,902	2,902	2,902	2,902	2,902
RICHESSSE GLOBALE	ϕ	/	0,187	0,125	0,140	0,205	0,257
TEMPERATURE de PRECHAUFFE	T_3	$^\circ\text{K}$	623	623	623	623	623
TEMPERATURE SORTIE du PANIER	T_{bi}	$^\circ\text{K}$	853	733	773	913	1033
TEMPERATURE DIAPHR DIAGRAMME (ϕ')	T_{bd}	$^\circ\text{K}$	850	700	780	900	1000
α'_{CO_2T}	/	%	2,17	1,55	1,75	2,37	2,9
α'_{CO_2T}	/	%	2,2	1,6	1,85	2,40	2,92
CO	/	%	0,04	0,04	0,04	0,04	0,035
O ₂	/	%	16,5	17,75	17,5	16,25	15
RENDEMENT DE COMBUSTION	η_b	/	0,986	0,968	0,945	0,987	0,993
RICHESSSE LOCALE	ϕ'	/	0,2	0,14	0,17	0,22	0,26

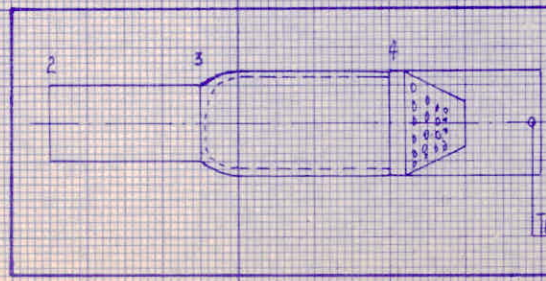






$$\eta_b = f(T_b)$$

■ : η_b



ESSAI AU GN
 DU 30-4-75
 Avec Prechauffe
 + Panier
 $A = 654.089/jh$
 $C_1 = 2,902 g/s$

500

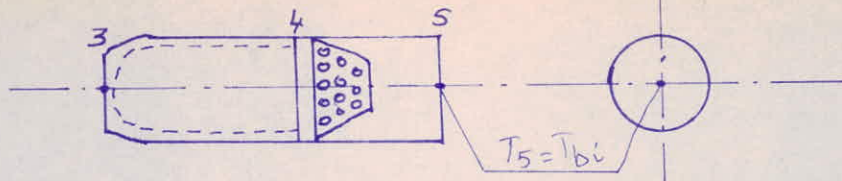
1000

1500

$T_b:°K$

ESSAI AU GN - SANS PRECHAUFFAGE - AVEC PANIER

le: 30-04-75



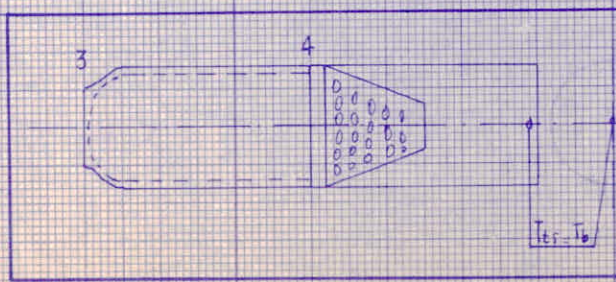
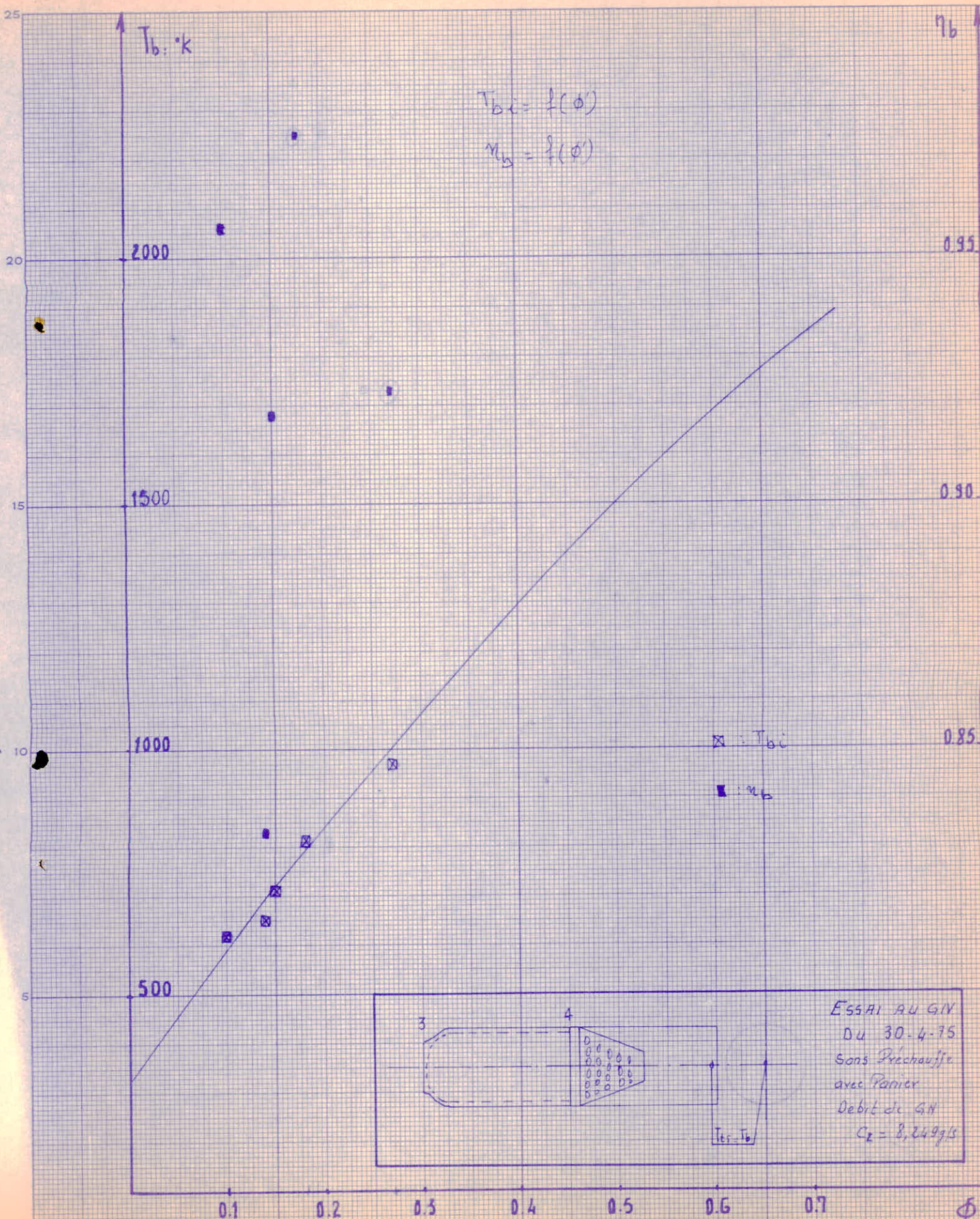
$P_A = 768 \text{ mm Hg}$

$T_A = 293,5 \text{ }^\circ\text{K}$

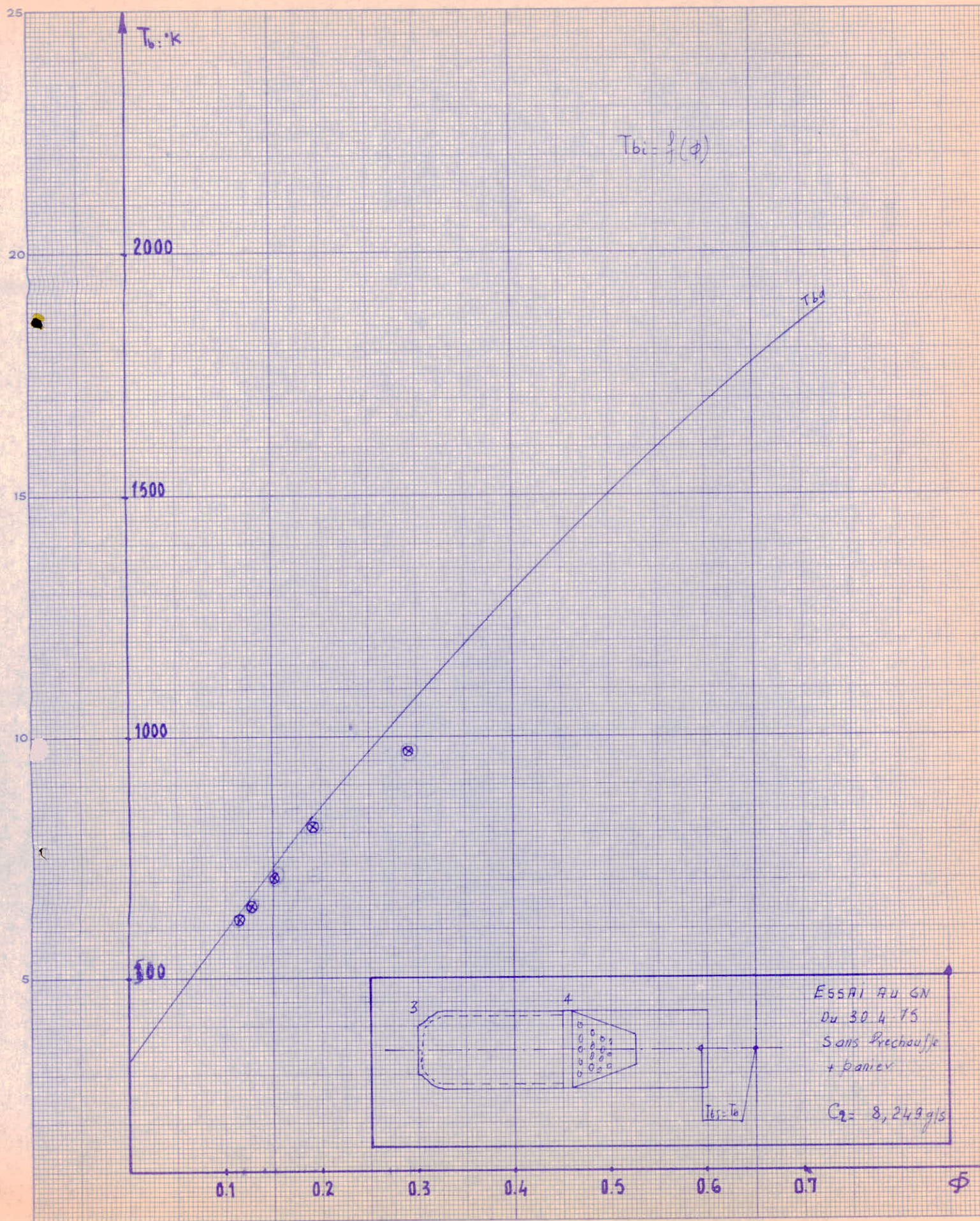
$\rho_A = 1,221 \text{ kg/m}^3$

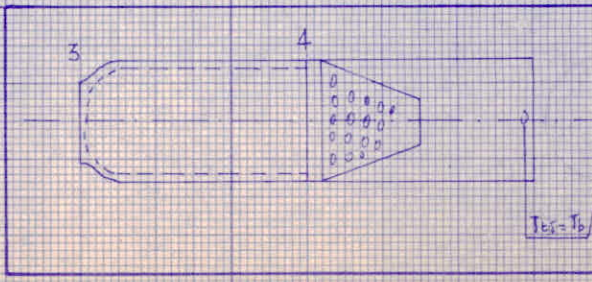
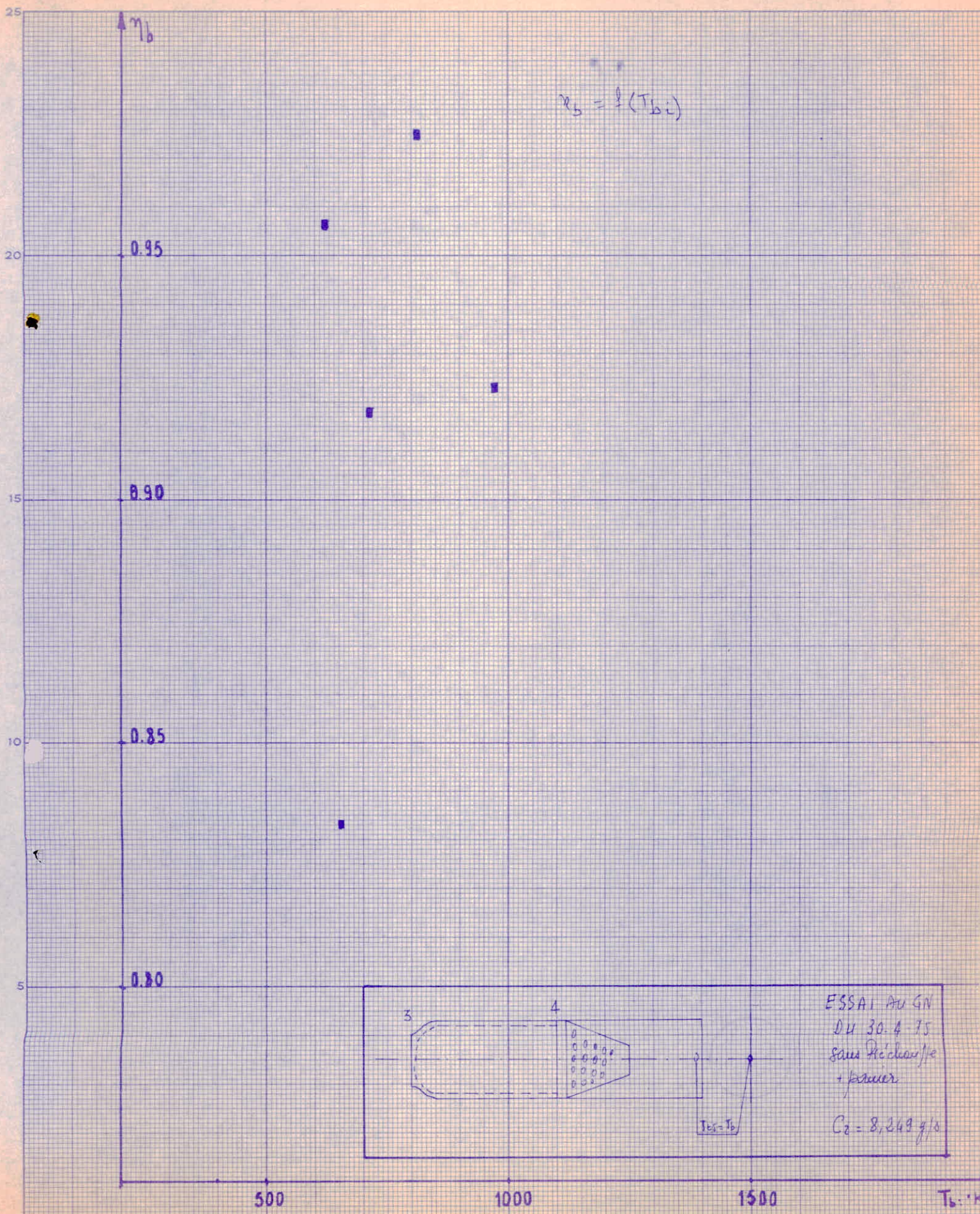
$\left(\frac{C}{A}\right)_{st} = 0,0655$

ESSAI MESURES	Indicqt.	Unités	1	2	3	4	5
VENTURI	ΔH	mm H ₂ O	19	44	70	95	118
DEBIT D'AIR	A	g/s	429,82	654,09	825,023	961,123	1071,169
P. AMONT GN CH. COMBUSTION	P_{acc}	bars absolus	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
TEMPERATURE du G.N	T_{GN}	$^\circ\text{K}$	290	290	290	290	290
MASSE VOLUMIQUE du GN	ρ_{GN}	kg/m ³	8,177	8,177	8,177	8,177	8,177
DEBIT GN CH. COMBUSTION	ΔH_{cc}	mm H ₂ O	55	55	55	55	54
DEBIT GN	G_2	g/s	8,249	8,249	8,249	8,249	8,174
RICHESSE GLOBALE	ϕ	—	0,293	0,192	0,152	0,131	0,116
TEMPERATURE SORTIE PANIER	T_{bi}	$^\circ\text{K}$	973	813	713	653	623
TEMPERATURE d'après Diag. (ϕ')	T_{bd}	$^\circ\text{K}$	1000	790	720	700	600
α'_{CO_2F}	—	%	2,77	1,95	1,47	1,25	1,1
α'_{CO_2T}	—	%	3	2	1,6	1,5	1,15
CO	—	%	0,12	0,025	0,03	0,03	0,03
O ₂	—	%	15,25	17,25	18	18,25	18,75
RENDEMENT de COMBUSTION	η_b	—	0,923	0,975	0,918	0,833	0,956
RICHESSE LOCALE	ϕ'	—	0,27	0,18	0,15	0,14	0,1



ESSAI AU GIV
 DU 30-4-75
 Sans Préchauffe
 avec Poricex
 Débit de GN
 $C_E = 2,249g/s$





ESSAI AU GN
 DU 30.4-75
 sans recharge
 + premier
 $C_0 = 8,248 \text{ g/10}$

ESSAIS U
(-) /

Le 11 . 4 . 75

ESSAI AU GNL

Sans préchauffage avec panier mélangeur

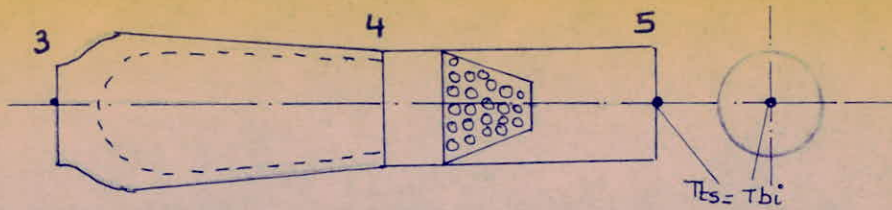
Nous avons fait deux essais, l'un avec des gicleurs de diamètre 1,05 mm l'autre avec des gicleurs de diamètre 1,10 mm.

Nous constatons pour le premier, que les températures lues sont voisines de la courbe théorique tracée à partir du diagramme. Par contre pour le deuxième essai, les valeurs des températures lues sont un peu plus éloignées de la courbe théorique. Donc il serait intéressant de faire des essais avec des gicleurs de différents diamètres.

Les essais ont été faits avec le panier mélangeur. Le but de ce dernier est d'uniformiser la température. En effet au niveau de la chambre, la combustion n'étant pas parfaite du fait qu'une partie du combustible brûle en mélange riche, l'autre en mélange pauvre, ce qui entraîne une répartition non uniforme de la température tout le long de la chambre. Il est à noter aussi que le premier essai a été fait à débit d'air constant, mais on constate une légère variation de celui-ci due certainement aux pertes de charges. Le débitmètre nous a donné des valeurs qui paraissent à première vue erronées. En effet elles sont trop grandes par rapport aux valeurs qu'on devrait réellement avoir, mais devrait s'expliquer par vaporisation partielle du GNL, qui même infime, augmente considérablement le volume massique du GNL. Ce phénomène qu'on nomme ébullition nucléée peut être évité en soufreffroidissant le GNL juste à l'entrée de la turbine au moyen d'un échangeur à l'air liquide. On a obtenu des rendements de combustion qui se situent pour les deux essais entre les valeurs 0,92 et 0,96. Le pourcentage de CO étant très faible pour l'ensemble des mesures. ~~Les~~ L'avantage prédominant que possède le GNL par rapport aux autres combustibles liquides, c'est d'avoir une pollution très réduite de l'atmosphère.

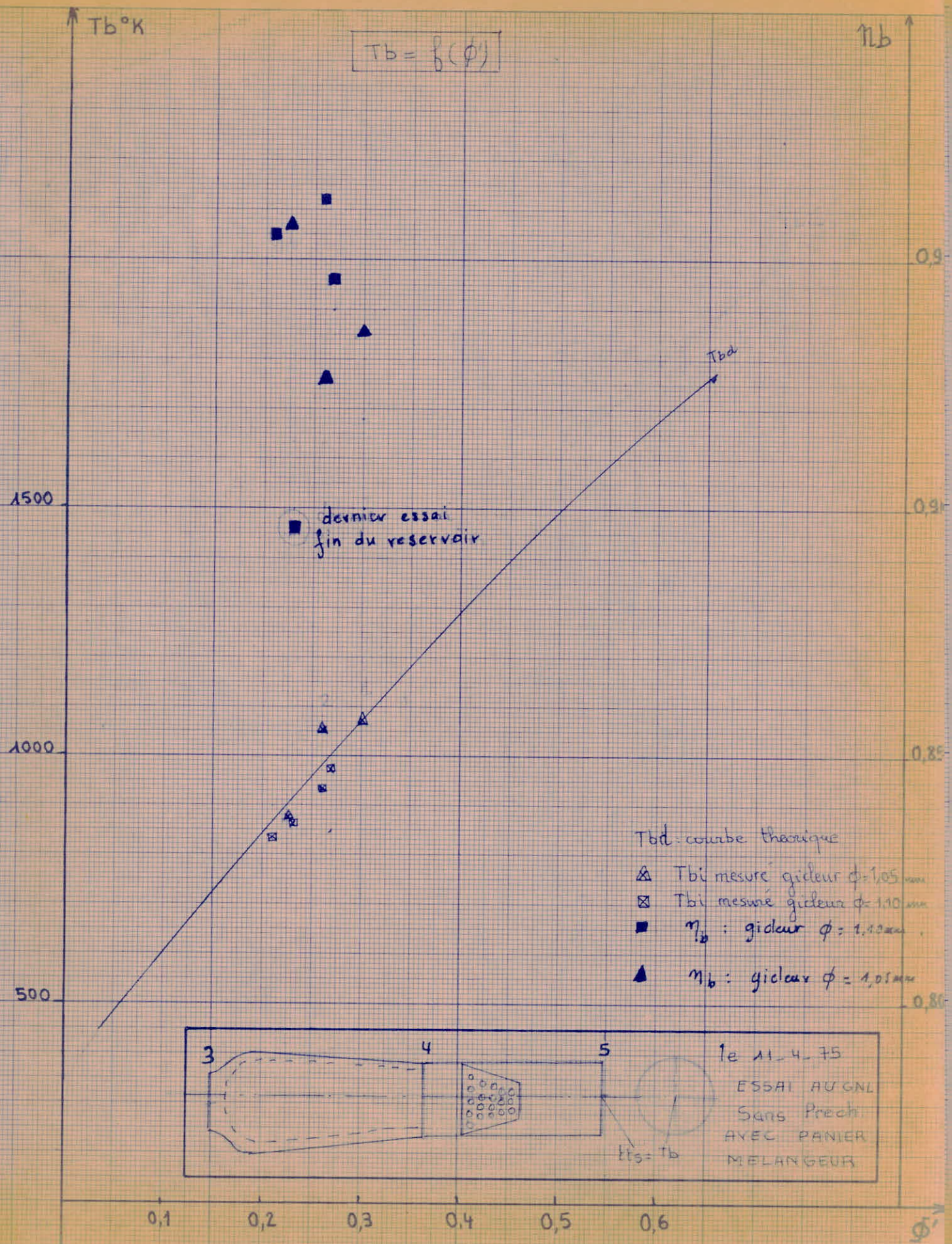
ESSAI AU GNL AVEC PANIER S. PRECHAUFFE

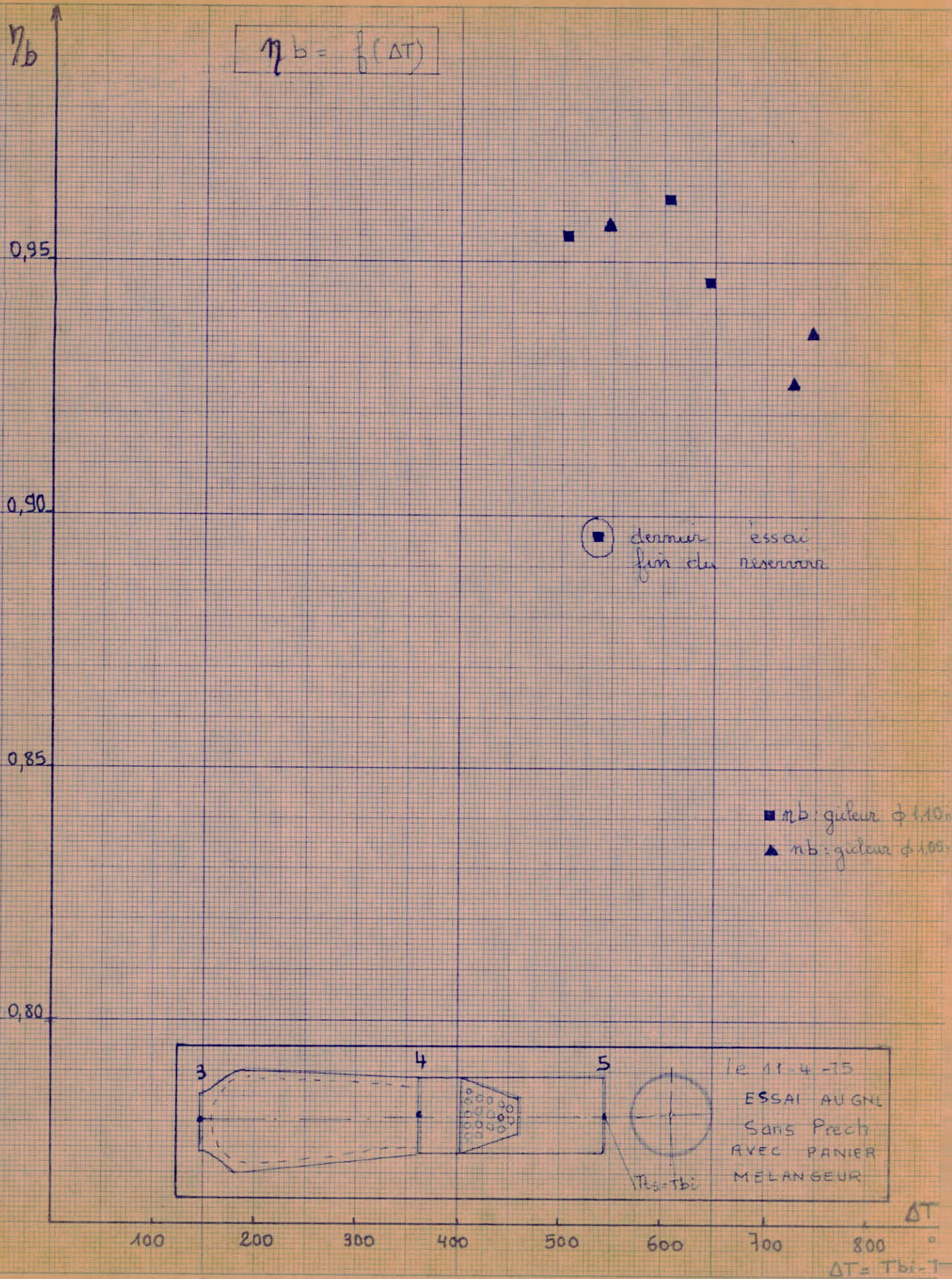
le 11-4-75



$P_A = 770 \text{ mmHg}$
 $T_A = 15^\circ\text{C}$
 $\rho_A = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

N° ESSAI MESURES	Indication	Unités	1	2	3	4	5	6	7
VENTURI	ΔH	mm H ₂ O	60	65	68	82,5	120	110	152
DEBIT D'AIR	A	g/s	754	784	802,76	884,21	1066,4	1021	1200,2
PRESSIION. RESV	P_R	bar abs	11	10,7	10,3	9,9	9,6	9,2	9
PRESSIION. INT	P_I	bar abs	9	7	6,3	7,3	6,9	8	7,75
OXYDE DE CARBONE	CO	%	0,12	0,09	0,06	0,08	0,08	0,1	-
OXYGENE	O ₂	%	18,5	17	15,75	16	16,75	16,75	16,5
GAZ CARBONI. REEL	$d'CO_2r$	%	2,95	2,5	2,225	2,55	2,10	2,65	2,15
GAZ CARBONI TOTAL	$d'CO_2T$	%	3,15	2,70	2,325	2,65	2,20	2,80	2,40
RENDEMENT DE COMBUSTION	η_b	-	0,936	0,926	0,957	0,962	0,955	0,946	0,896
RICHESSE LOCALE. ($d'CO_2T$)	ϕ'	-	0,3	0,26	0,225	0,255	0,21	0,27	0,23
DEBIT MASSIQUE D'APRES ϕ'	C	g/s	13,4	12,08	10,70	13,63	13,27	16,34	16,36
TEMPERATURE SORTIE PANIER	T _{bi}	°K	1073	1053	873	933	833	973	863
TEMPERATURE GNL	T _{GNL}	°K	151,55	150,84	150	149,23	148,66	147,7	147,1
TEMPERATURE ENTREE C.C	T ₃	°K	328	328	328	328	328	328	328
MASSE VOLUMIQUE DU GNL	ρ_{GNL}	kg/m ³	416	417	418	419	420	421	422
DEBIT CALCULÉ	C _c	g/s	27,73	23,16	20,9	27,93	27,41	27,48	30,47
INDICATION DEBITRE	Q _v	l/h	240	200	180	240	235	235	260
Rapport des débits	C/C _c	-	2,06	1,91	1,95	2,04	2,06	1,68	1,86
Gicleur ϕ	ϕ	mm	1,05	1,05	1,05	1,10	1,10	1,10	1,10





-o- C O N C L U S I O N -o-

Nous ne prétendons pas avoir terminé cette étude , néanmoins dans certains cas nous n'avons fait que cerner les problèmes qui affectent la combustion dans l'air du G.N & du G.N.L . Plusieurs variables entrent dans cette étude , (débits de carburant et de comburant , préchauffage) dont il faudrait déterminer l'influence sur la combustion.

Les sources d'erreurs sont nombreuses , issues du manque de fiabilité du matériel utilisé. Les difficultés majeures résident au niveau des essais au G.N.L.

- Le débit n'est pas déterminé avec précision , ceci est dû au phénomène de l'ébullition nucléée au niveau de la turbine.

- La présence des deux phases (liquide et gazeuse) entraîne une fluctuation de la flamme. Pour cela l'étude d'un séparateur est nécessaire.

Nous espérons , par notre modeste participation , avoir contribué à la bonne marche de cette étude.

B I B L I O G R A P H I E

- Les diagrammes - Enthalpie - EntropieP. CHAMBADAL
- CombustionSURUGUE-BARRERE
- Recherches sur la combustion d'un mélange
d'HydrocarburesJean Rappeneau
- CombustionG. MAITON
- Pratique de la mesure et du contrôle
dans l'Industrie.....BURTON
- Projet de fin d'Etudes : Essais mesures sur chambre de
combustion (G.N) (G.N.L).....Année 1974.



H kJ/kg

2000

1500

1000

500

7500

8000

8500

9000

9500

10.018

5

3

1

3

2

1.018

1000

900

1100

1200

1300

1400

1500

1600

1700

1800

1900

2000

2100

0.1

0.2

المدرسة الوطنية للعلوم التطبيقية
جامعة سطيف
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

DIAGRAMME
ENTHALPIE . ENTROPIE
Pour 1Kg de Gaz de Combustion
GN de Hassi-RMel
Richesse: 0.3

PM00875
-1-

S J/kg K

T°K h kJ/kg

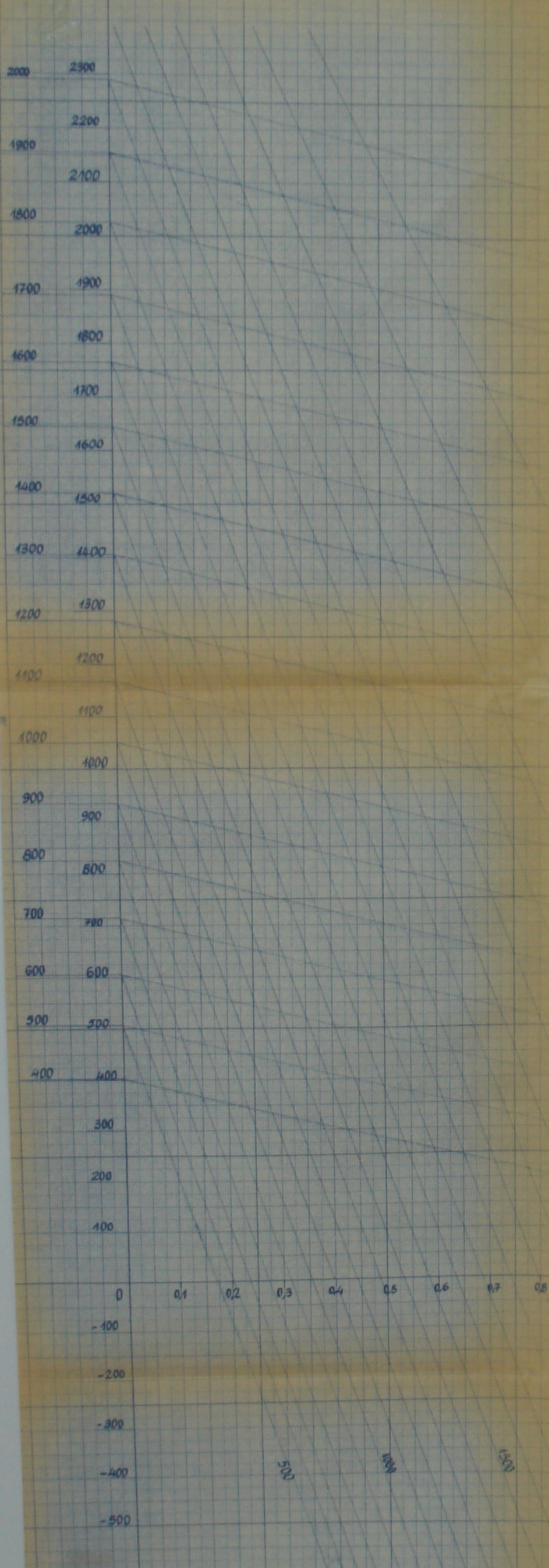


DIAGRAMME - ENTHALPIE - RICHESSE
 DES GAZ DE COMBUSTION DU
 MELANGE GNL - AIR O₂ = 21% (F)
 h = (1 + f_s \phi) H h_{re} = h_{air} + \phi f_s h_{air}

h: enthalpie des gaz de combustion kJ/kg air
 H: " " " " " kJ/kg gaz
 h_{re}: " du mélange kJ/kg air f_s = 0.05928
 h_{air}: " globale du GNL a -162°C h_{air} = 4075.23 kJ/kg

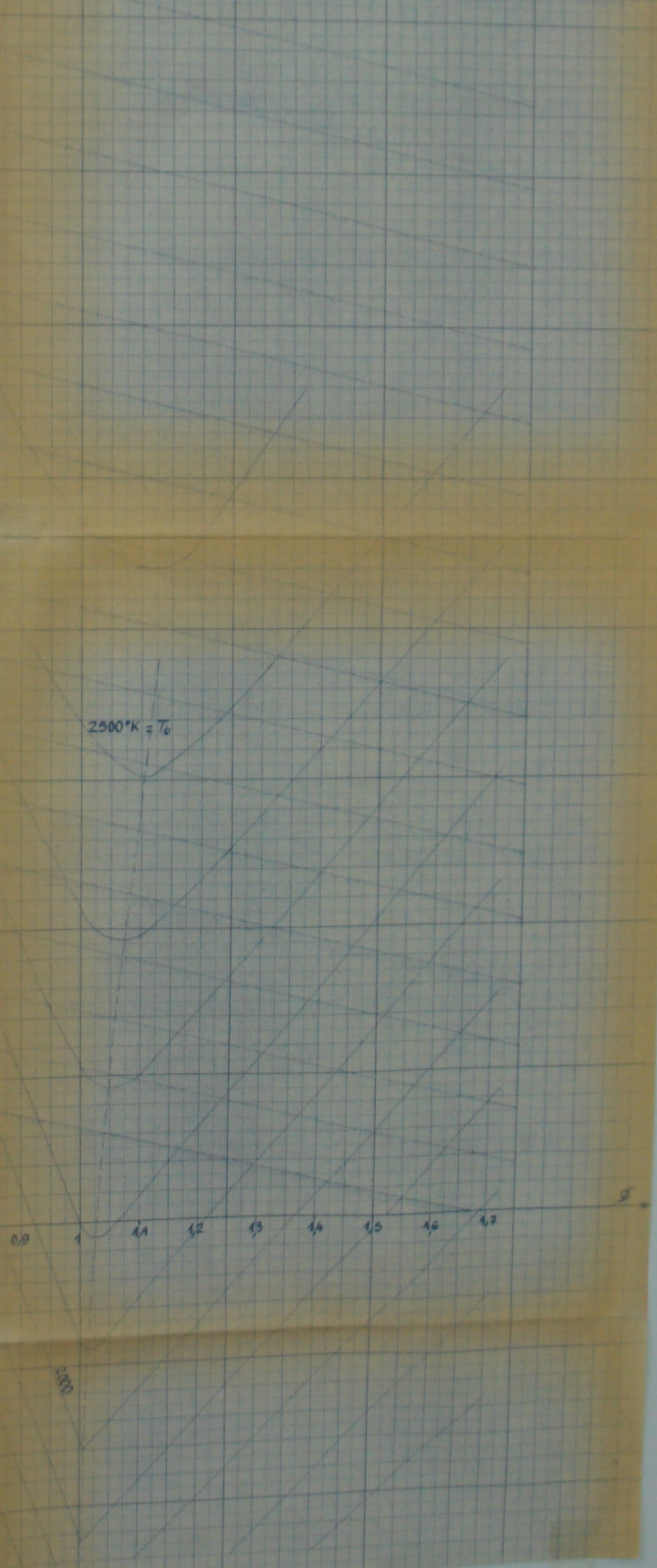


DIAGRAMME ENTHALPIE-RICHESSE

Des gaz de combustion du mélange
Gaz naturel Hassi R'Mel - Air

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 الجزائر

 ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
 BIBLIOTHÈQUE

$P = 10 \text{ atm}$

$h = (1 + \phi)H$
 $h_w = h_w \phi, h_w$
 h : enthalpie des gaz de combustion kJ/kg air
 H : " " " " " " " " kJ/kg gaz
 h_w : enthalpie du mélange kJ/kg air
 h_w : enthalpie globale du gaz naturel à 25°C
 ϕ : richesse $h_w = 2861.0056 \text{ kJ/kg}$ $f_w = 0.0635$

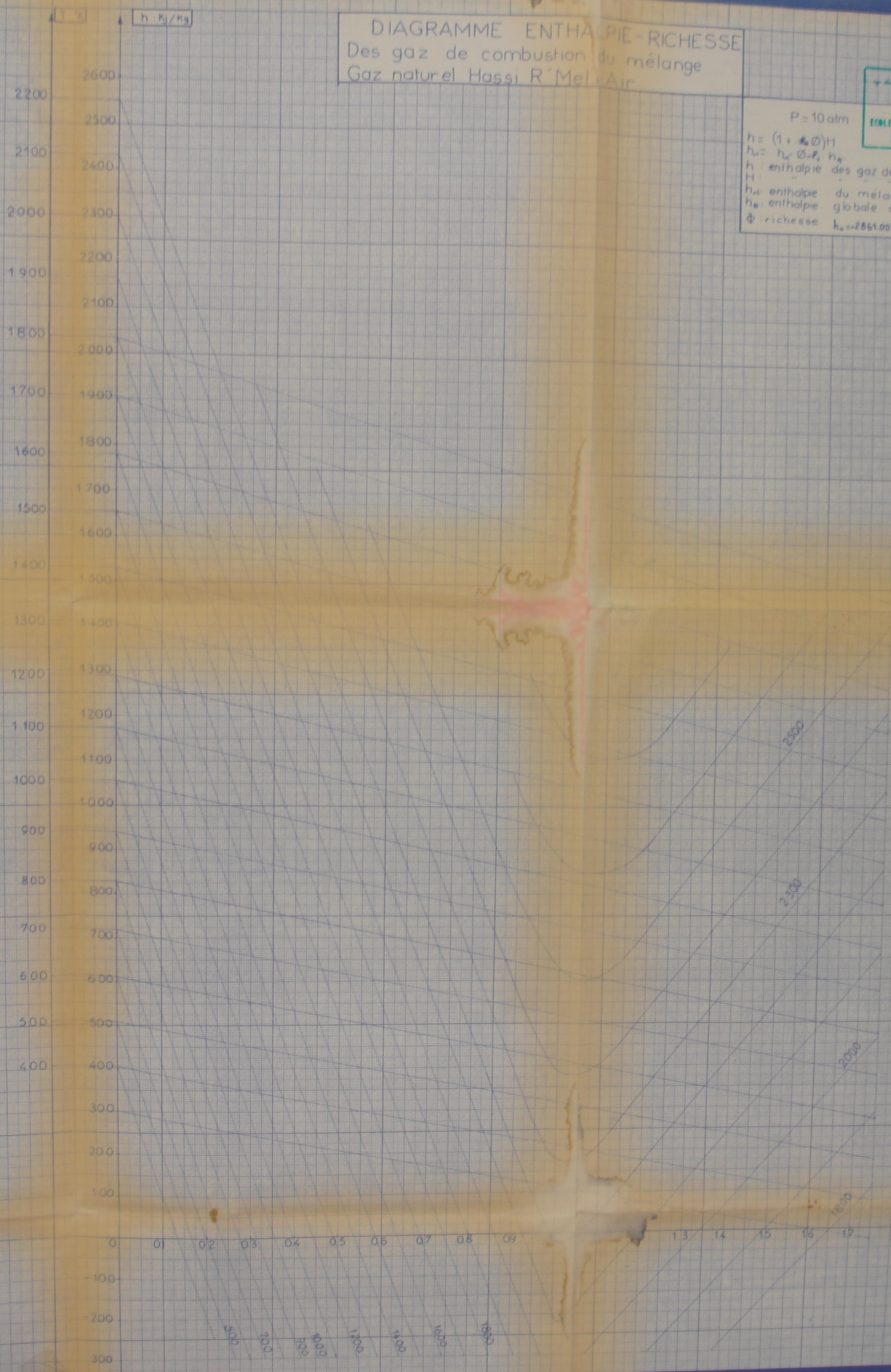


DIAGRAMME ENTHALPIE - RICHE SSE

Des gaz de combustion du mélange:
Gaz naturel Hassi R'Mel + Air

$P = 5 \text{ atm}$
 $h = (1 + \phi) h_a$
 $h_u = h_{u1} + \phi h_{u2}$
 h : enthalpie des gaz de combustion kJ/kg air
 h_u : enthalpie du mélange kJ/kg air / kJ/kg gaz
 h_{u2} : enthalpie globale du gaz naturel à 25°C
 ϕ : richesse $h_{u2} = 2861.0056 \text{ kJ/kg}$ $\phi_2 = 0.0635$

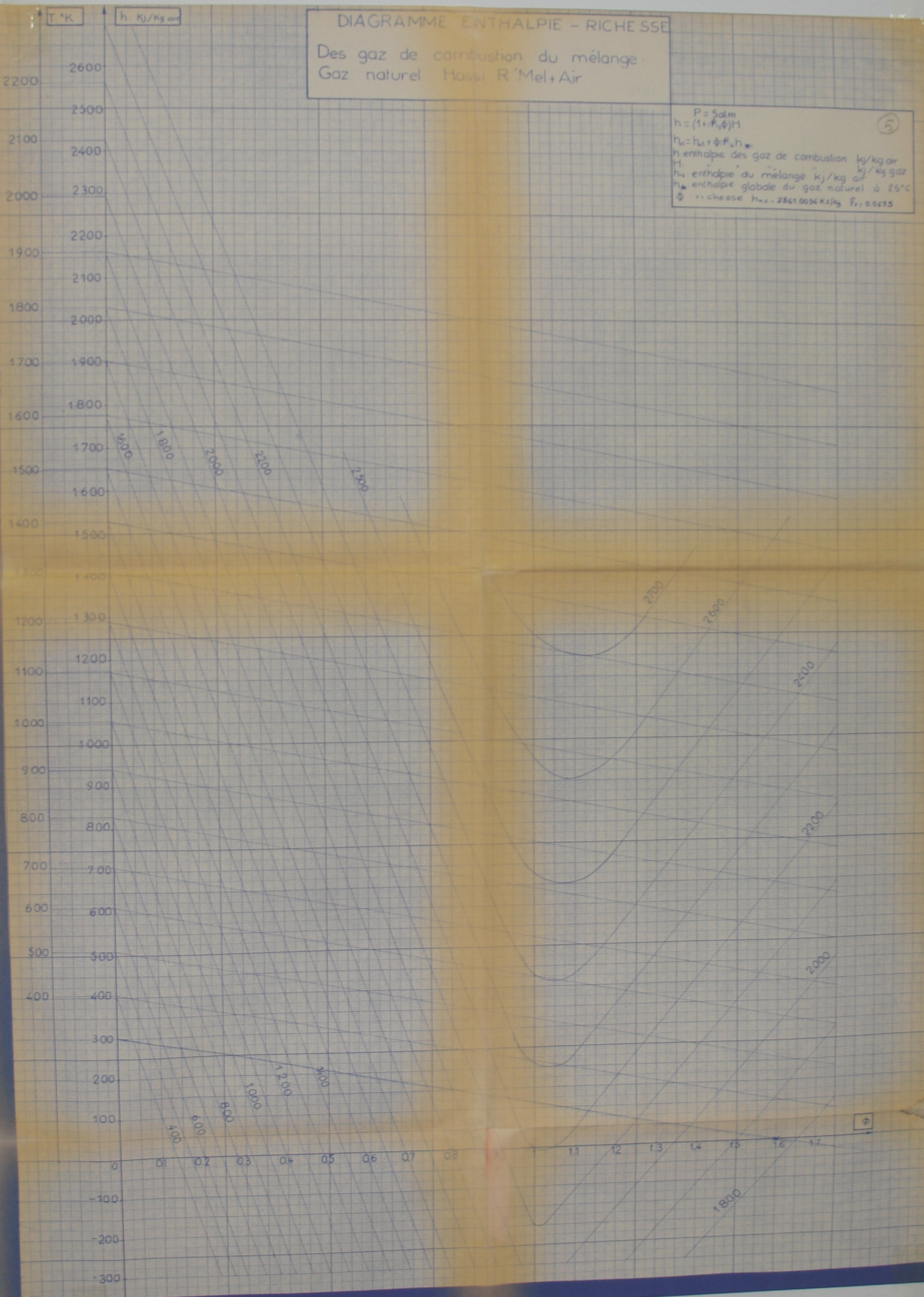
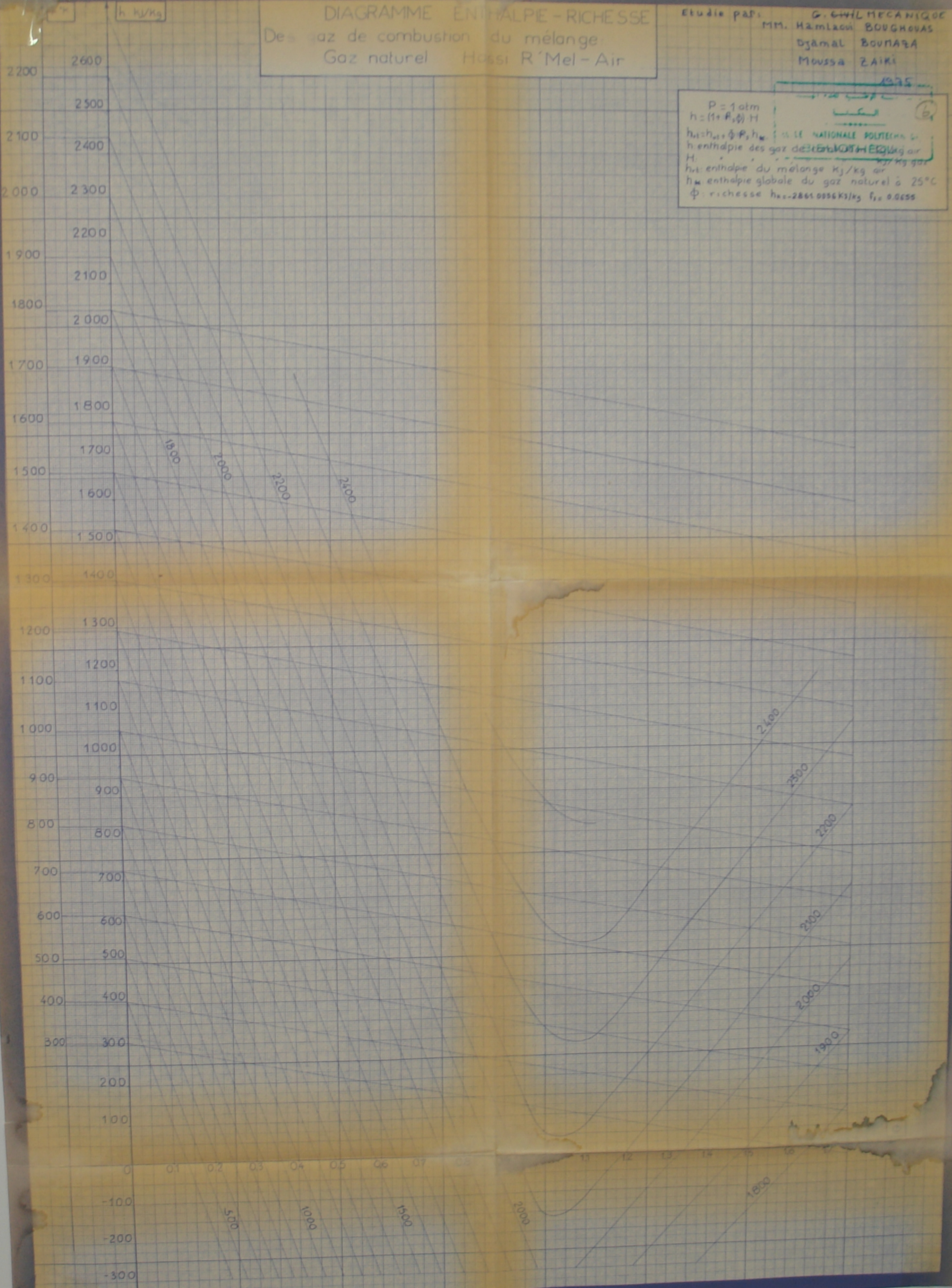
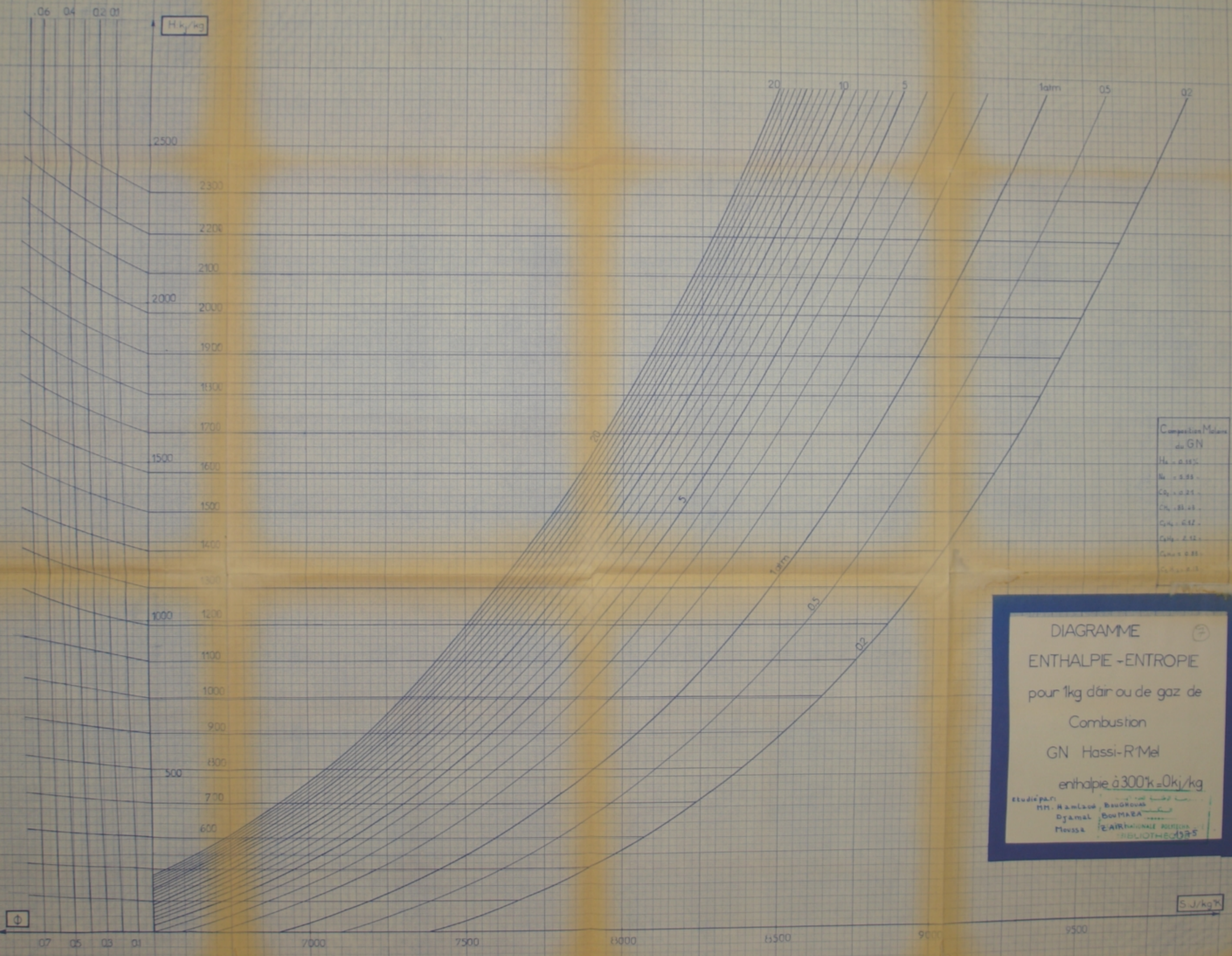


DIAGRAMME EN ENTHALPIE - RICHESSE
 Des gaz de combustion du mélange
 Gaz naturel Hassi R'Mel - Air

Etude par: G. CHILMECANIQUE
 MM. HAMILAOU BOUGHOUAS
 Djamel BOUNABA
 Moussa ZAÏKI



$P = 1 \text{ atm}$
 $h = (1 + R_s \phi) H$
 $h_{g1} = h_{g1} + \phi P_s h_{w1}$
 h : enthalpie des gaz de combustion kJ/kg air
 H : enthalpie du mélange kJ/kg gaz
 h_{w1} : enthalpie globale du gaz naturel à 25°C
 ϕ : richesse $h_{w1} = 2861.0056 \text{ kJ/kg}$ $f_{s1} = 0.0655$



Composition Molaire du GN

H ₂	0.18%
Ne	0.95%
CO ₂	0.21%
CH ₄	83.43%
C ₂ H ₆	6.12%
C ₃ H ₈	2.12%
C ₄ H ₁₀	0.83%
C ₅ H ₁₂	0.13%

DIAGRAMME
 ENTHALPIE -ENTROPIE
 pour 1kg d'air ou de gaz de
 Combustion
 GN Hassi-R'Mel
 enthalpie à 300°K = 0 kJ/kg
 étudié par:
 MM. Hamza BOUGROUB
 Djamel BOUMARA
 Moussa BOUMARA
 BIBLIOTHÈQUE

s kJ/kg·K

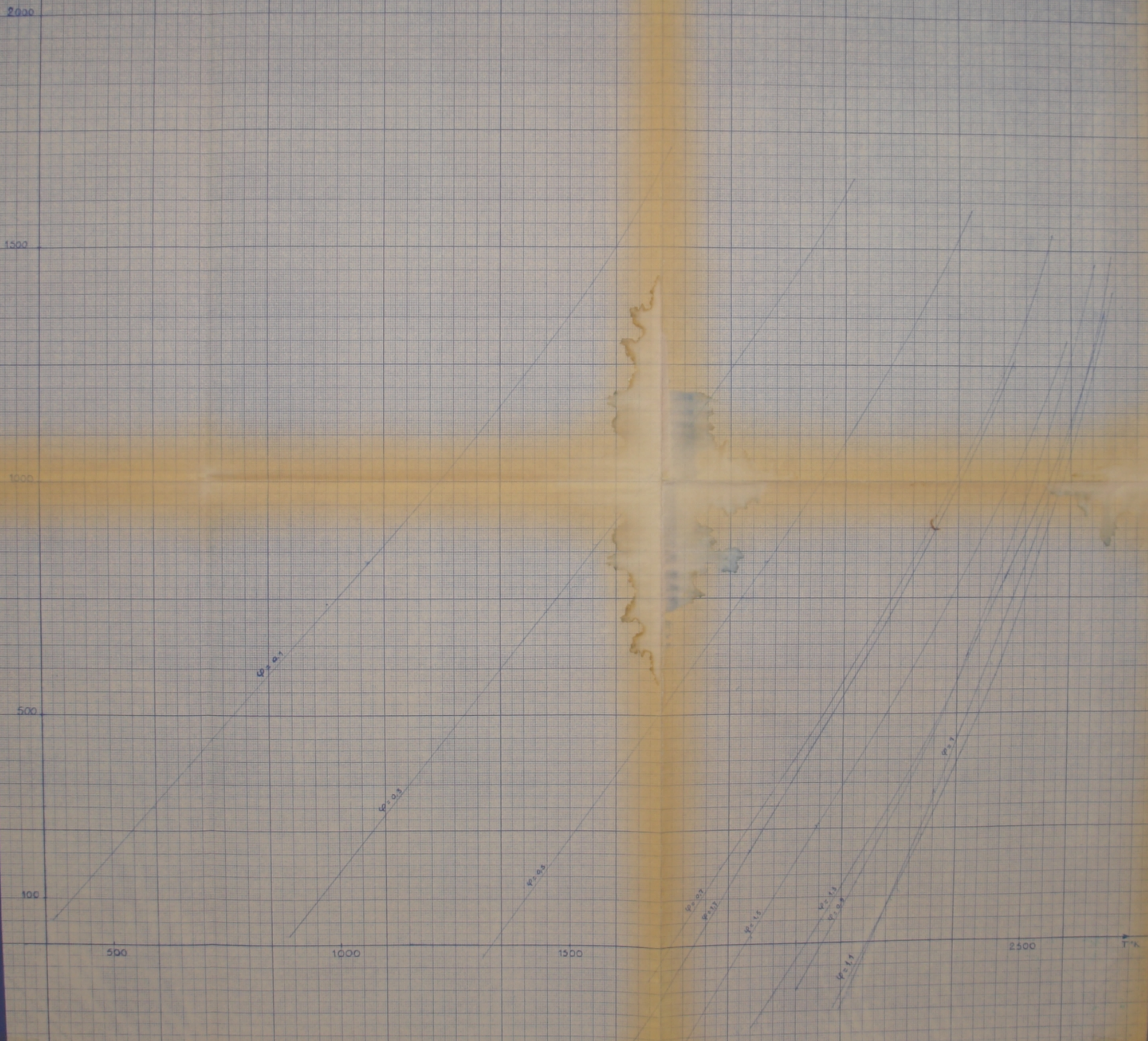
H, KJ/kg

DIAGRAMME ENTHALPIE TEMPERATURE
Des gaz de combustion du melange
Gaz naturel Hassi R'Mel + Air

P = 1 atm

مستودع الوثائق العلمية
البيئية
Ecole Nationale Polytechnique
BIBLIOTHEQUE

8



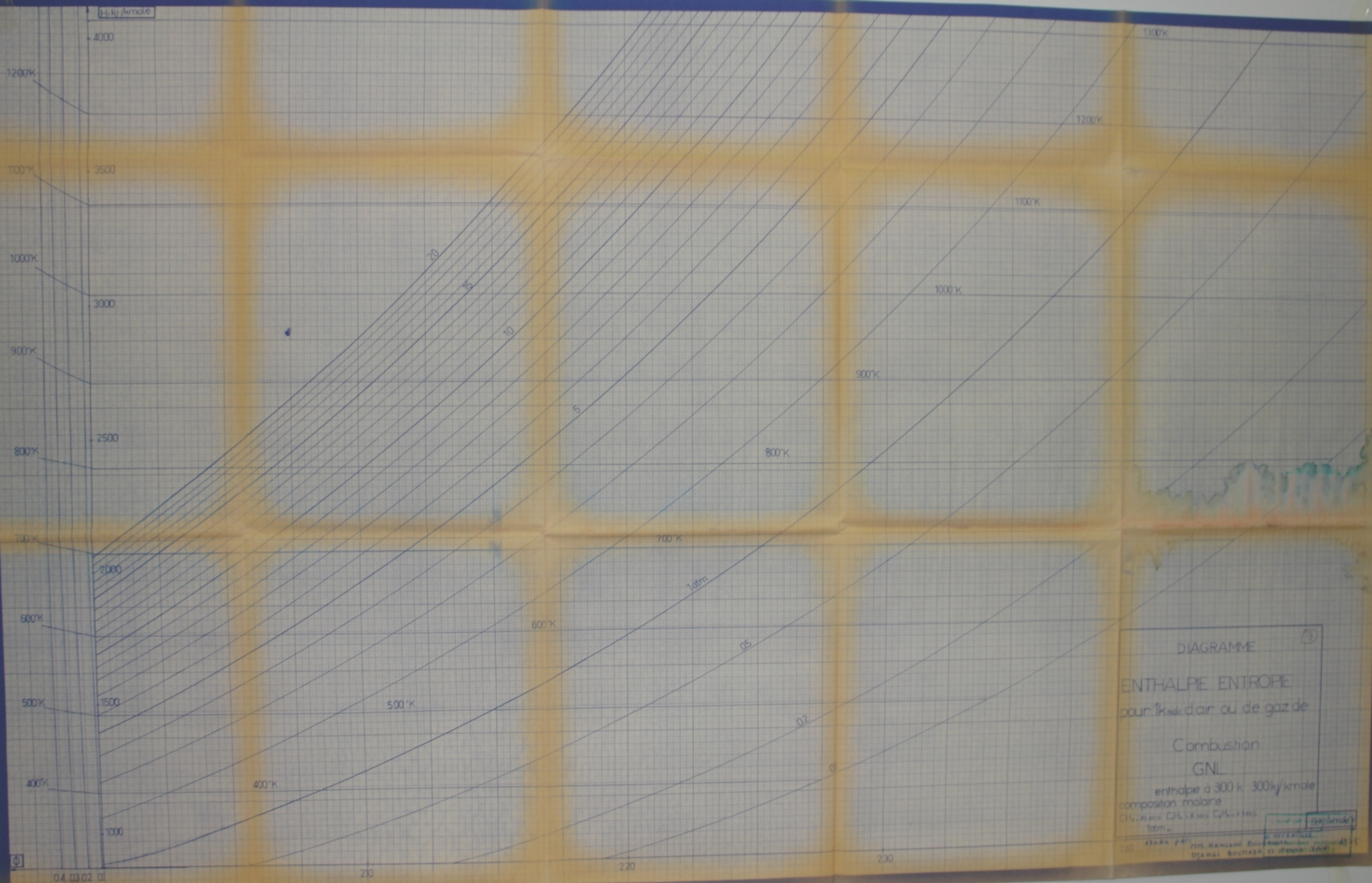


DIAGRAMME (3)
 ENTHALPIE ENTROPIE
 pour 1 kmole d'air ou de gaz de
 Combustion
 GNL
 enthalpie à 300 k 300 kJ/kmole
 composition molaire
 CH_4 0,05 kmol C_2H_6 0,05 kmol C_3H_8 0,05 kmol
 Total = 0,15 kmol

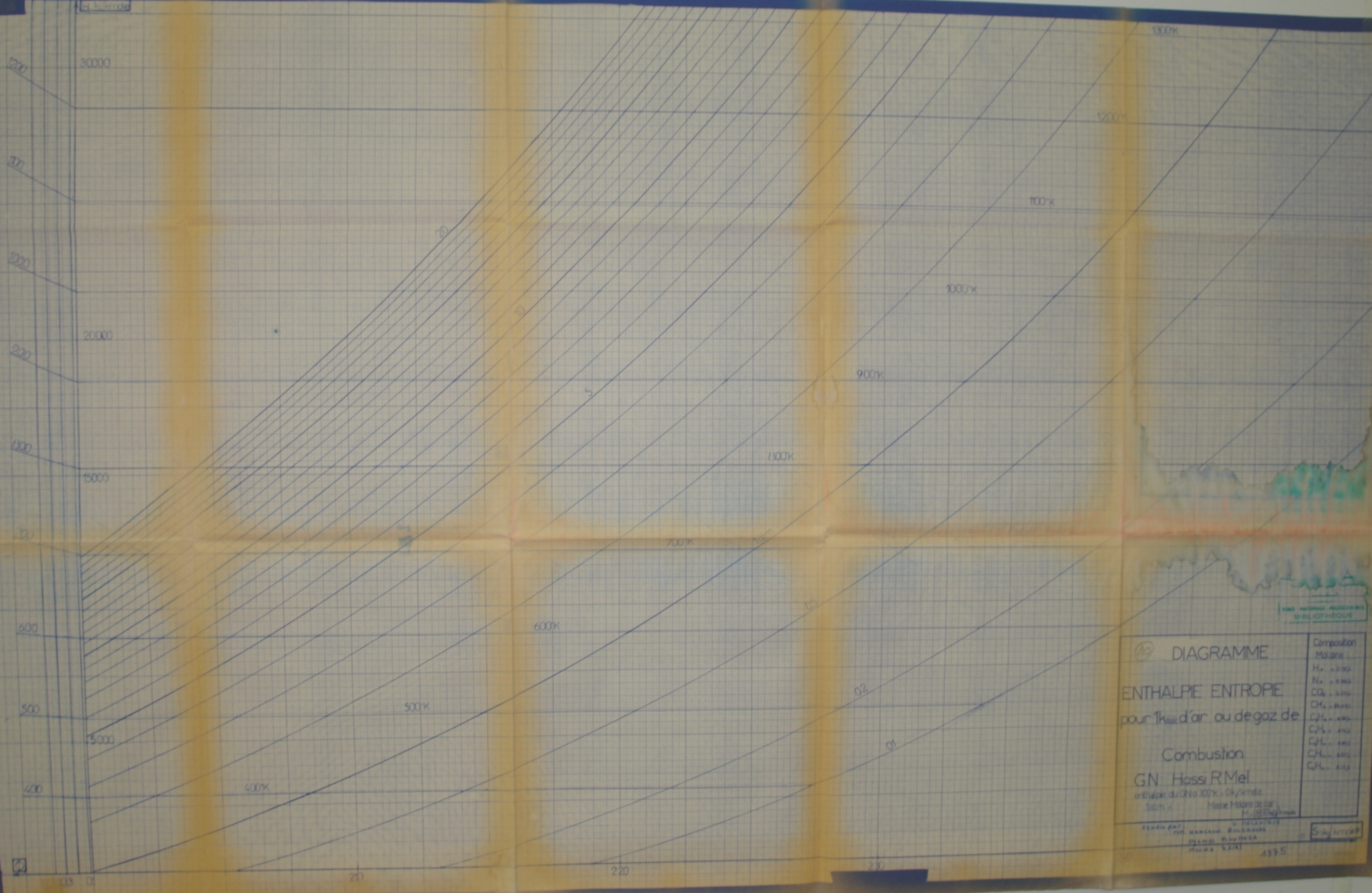
200 210 220 230

1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000

400K 500K 600K 700K 800K 900K 1000K 1100K 1200K 1300K

01 02 05 1atm 5 10 15 20

04 03 02 01



10 DIAGRAMME
 ENTHALPIE ENTROPIE
 pour 1kg d'air ou de gaz de
 Combustion
 GN Hassi R Mel
 enthalpie du GN à 300°K : 0k/1mole
 10m x Masse Molaire de l'air

Composition Molaire	
H ₂	0.012
N ₂	0.755
CO ₂	0.110
CH ₄	0.005
C ₂ H ₆	0.001
C ₃ H ₈	0.001
C ₄ H ₁₀	0.001
C ₅ H ₁₂	0.001
C ₆ H ₁₄	0.001

REPARÉ PAR :
 1997 MARSEILLE BOUCHERON
 02 91 81 00 00
 (02 91 81 00 00)

Sik/1000

