

UNIVERSITÉ D'ALGER

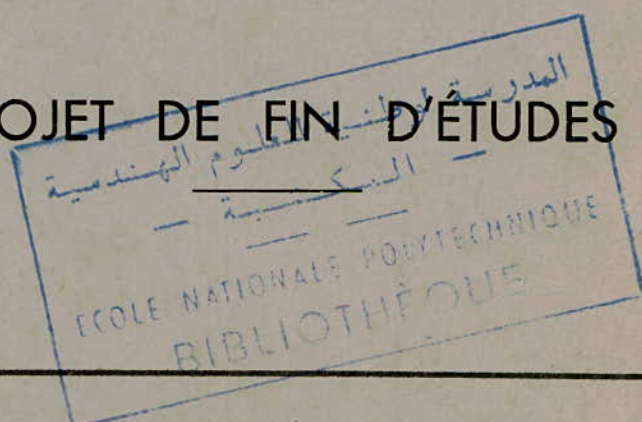
6/76

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MECANIQUE

1 ex

PROJET DE FIN D'ÉTUDES



CHAMBRE DE COMBUSTION
A TROUS CIRCULAIRES

PROPOSE PAR
M.J.P. MULLER

ETUDIE PAR
M.GAHMOUSSE A.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إِنَّ اللَّهَ لَا يَغَيِّرُ مَا بَقِيَ
حَتَّى يَغَيِّرُوا مَا بِأَنْفُسِهِمْ
صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمَ

-300-

"DIEU NE CHANGE RIEN A L'ETAT D'UN PEUPLE AVANT QUE
CELUI-CI N'AIT ACCOMPLI SA PROPRE TRANSFORMATION." (1)

(Coran : XII, 12)

(1) "Autrement dit : toute véritable renaissance ne peut se faire qu'en changeant l'homme (prise de conscience et volonté de changement de chacun.)

NOS REMERCIEMENTS A M. J. P. MULLER ET A TOUS LES PROFESSEURS
QUI ONT CONTRIBUE A NOTRE FORMATION , EN PARTICULIER M. MATTON

T A B L E D E M A T I E R E
-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-

- I - AVANT-PROPOS
- II- BUT
- III- GENERALITES SUR LA CHAMBRE DE COMBUSTION
- IV - CARACTERISTIQUES DES TUBES A FLAMME
 - A TROUS CIRCULAIRES
 - A TROUS MIXTES
- V - PLAN DE CALCUL
- VI - CHAMBRE A TROUS CIRCULAIRES
 - ESSAIS
 - DEPOUILLEMENT
 - TRACES DES COURBES $T_b = f(\varnothing)$
 - CARTES DE REPARTITION DES TEMPERATURES
 - COMMENTAIRES
- VII- CHAMBRE A TROUS MIXTES
 - ESSAIS
 - DEPOUILLEMENT
 - TRACES DES COURBES $T_b = f(\varnothing')$
 - CARTES DE REPARTITION DES TEMPERATURES
 - COMMENTAIRES
- VIII- PERTES DE CHARGES
 - METHODES DE CALCUL
 - C-C A TROUS CIRCULAIRES
 - C-C A TROUS MIXTES
- IX - CONCLUSION : ETUDE COMPARATIVE DES 2 CHAMBRES
- X - ANNEXE I : CALCUL THEORIQUE DES PERTES THERMIQUES
- XI - ANNEXE II : CALCUL THEORIQUE DU MACH DANS LA ZONE PRIMAIRE

A V A N T - P R O P O S

Depuis six ans au moins on commence à envisager de remplacer le carburéacteur classique existant dérivé du pétrole qui d'ailleurs se rarifie de plus en plus, par un hydrocarbure extrêmement abondant dans la nature : le méthane ou du moins le gaz naturel à forte proportion de méthane (les statistiques du 1^o janvier 1974 attribuent au G-N des réserves mondiales de 50.000 milliards de m³ . Ces dernières atteignent actuellement presque 69.000 milliards de m³).

Les hydrocarbures, pétrole et G-N pourvoient actuellement pour les 2/3 à l'approvisionnement en énergie du monde.

Admettons qu'un développement rapide de la fourniture d'énergie par voie nucléaire puisse se produire, il n'en reste pas moins vrai que les hydrocarbures devront fournir plus de 55% de l'accroissement de la demande en énergie jusqu'aux années 2000. D'autre part, le G-N s'avère bien un combustible non polluant répondant à la crise de la pollution atmosphérique dans le monde industriel qui a atteint des niveaux très élevés, nuisibles aussi bien pour la vie humaine que végétale.

C'est vers cet hydrocarbure que des recherches poussées sont orientées de nos jours en apportant des résultats concluants.

Sous forme gazeux, dans les conditions normales, le méthane ou G-N ne peut être envisagé dans le domaine aéronautique que sous sa forme cryogénique (- 162°C).

Son intérêt sous cette forme réside essentiellement :

- dans pouvoir calorifique plus élevé que les carburants utilisés
- dans sa capacité d'absorption de la chaleur beaucoup plus importante que celle du kérozène .
- son prix à bon marché.

B U T

Le remplacement dans les applications aéronautiques du kérozène par le G-N ne nécessiterait-il pas une nouvelle conception des chambres de combustion.?

Plusieurs essais déjà entrepris ont donné des résultats positifs et concluants en adoptant les chambres utilisant le kérozène, au G-N.

Le but de notre étude au G-N consiste à :

étudier une chambre de combustion tubulaire utilisant séparément 2 tubes de flammes l'un à trous circulaires et l'autre à trous mixtes et à en faire l'étude comparative, l'analyse des gaz de combustion étant l'un des moyens les plus déterminants.

LA CHAMBRE DE COMBUSTION

Partie vitale du turboréacteur, la chambre de combustion est le lieu de transformation de l'énergie chimique en énergie calorifique d'où découlent essentiellement la puissance nécessaire à l'entraînement du compresseur et la puissance propulsive.

On conçoit donc aisément l'importance que l'on doit attacher à l'étude des chambres de combustion.

D'une façon générale, il existe trois types de chambres de combustion:

- tubulaire
- annulaire
- mixte

Dans notre cas on a à étudier une chambre tubulaire à injection à pré-vaporisation.

En théorie, le calcul des températures atteintes lors de la combustion (G-N- air) et des valeurs de concentration des produits de combustion, est fait en supposant par hypothèse la combustion idéale autrement dit un foyer parfait où :

- la transformation est isobare (la combustion se fait à pression constante)
- l'écoulement est permanent (la combustion se propage continûment)
- la transformation est adiabatique (les pertes de chaleur sont nulles)
- les enthalpies sont calculées à la même température de référence (0°K)

Pour les raisons de cinétique et de résistance des matériaux, il est nécessaire de partager l'air pénétrant dans la chambre en fraction

- primaire : 13%
- secondaire } 15%
- tertiaire } 62% dilution
- muft 10%

Valeurs adoptées généralement par les constructeurs.

On rappelle que seul l'air primaire participe à la combustion proprement dite car si la combustion est rapportée à la totalité de l'air sortant du compresseur la température s'élèverait aux environs de 2000°C ce qui est excellent pour le rendement ; or la température à la sortie de la chambre ne doit guère dépasser 1370°K au grand max. pour éviter la destruction de la turbine à haute température: ceci pour une question de résistance des matériaux.

Aussi doit-on refroidir les gaz de combustion pour abaisser leur température à des valeurs admissibles; cela entraîne une perte de poussée inévitable. La température atteinte dans la chambre de combustion est d'ailleurs limitée par le phénomène de dissociation des produits de combustion en molécules plus simples et même en atomes avec forte absorption de chaleur. D'autre part il importe que l'écoulement à la sortie de la zone primaire soit assez homogène pour que la fonction de dilution puisse se réaliser correctement et assurer une bonne répartition de température à l'entrée de la turbine cette fonction de dilution est assurée par l'air secondaire et tertiaire 77%. Leur pénétration doit se faire de façon à ne pas entraver la combustion d'une part et obtenir un mélange à température bien répartie face à la turbine. L'air secondaire et tertiaire permettent la recirculation des gaz brûlés et la différence de vitesses entre ces

gaz recirculés et l'air entrant réalise le mélange par transferts turbulents assurant l'homogénéité de la température. La turbulence étant nécessaire pour que la réaction se fasse dans un temps minimum (quelques millisecondes). Pour ne pas gêner encore la combustion. L'air froid ne doit pas être introduit trop tôt sinon refroidissant les gaz en combustion, il augmente le temps nécessaire à celle-ci et les imbrûlés sortiraient alors de la chambre devenue trop courte. L'air du Muft permet quant à à lui d'assurer le refroidissement continu du tube à flamme (en plus de l'air de dilution)

Le tube à flamme représente la pièce maîtresse de la chambre de combustion. Il est constitué par une paroi continue percée d'orifice dont la forme, le nombre et l'emplacement tout autour du tube sont d'une importance capitale. On souligne que le nombre d'orifices (ou du moins leur section totale est limitée et déterminée par le débit d'air et par la résistance du tube. L'expérience, quant à elle détermine la meilleure forme et le meilleur emplacement de ces orifices.

L'état de combustion peut être défini, à partir de l'analyse des gaz de combustion et de la mesure des températures et des quantités d'air et de G-N utilisés dans la combustion.

Pour la détermination de ces quantités on a utilisé:

a/ Pour l'analyse des gaz, deux analyseurs à infra-rouge pour la détection et la mesure du CO_2 et du CO et un analyseur paramagnétique pour l' O_2 .

Leur utilisation nécessite un étalonnage précis. On fait remarquer que leur mise en marche doit être effectuée bien avant leur utilisation d'au moins deux heures.

L'étalonnage consiste en 3 opérations:

- un tarage à l'aide de l'azote (N_2) gaz neutre
- un étalonnage proprement dit à l'aide des gaz CO_2 , CO et O_2 de concentrations connues.
- un tracé des courbes d'étalonnage permettant la détermination directe des % de CO_2 , CO et O_2 dans les gaz de combustion.

La détermination du rendement de combustion devient particulièrement aisée en mesurant:

- le CO_2 réel : concentration de CO_2 existant réellement dans les gaz de combustion
- le CO_2 total : concentration de CO_2 qui devrait exister si la combustion était totale et parfaite.

Le CO_2 total est obtenu à partir d'une oxydation éventuelle des imbrûlés dans un four contenant de l'oxyde de cuivre, plus un catalyseur porté à une température d'environ 300°C . En négligeant les dissociations, ce qui est notre cas aux températures considérées qui ne dépassent guère 2000°C , le rendement de combustion est défini par l'expression

$$\eta_b = \frac{\text{CO}_2 \text{ réel}}{\text{CO}_2 \text{ total}}$$

b/ Les températures sont mesurées au moyen d'un thermo-couple en platine platine-rhodiée 10% ayant la possibilité de mesurer des T° élevées, placé sur une sonde en inox refroidie pouvant se mouvoir suivant les axes horizontal et vertical et assurant la prise des gaz de combustion.

L'analyse des gaz et la mesure des températures d'air à la sortie du compresseur en fonction des débits d'air et de G-N, permettent le tracé des différentes courbes de T° et de rendement en fonction de la richesse :

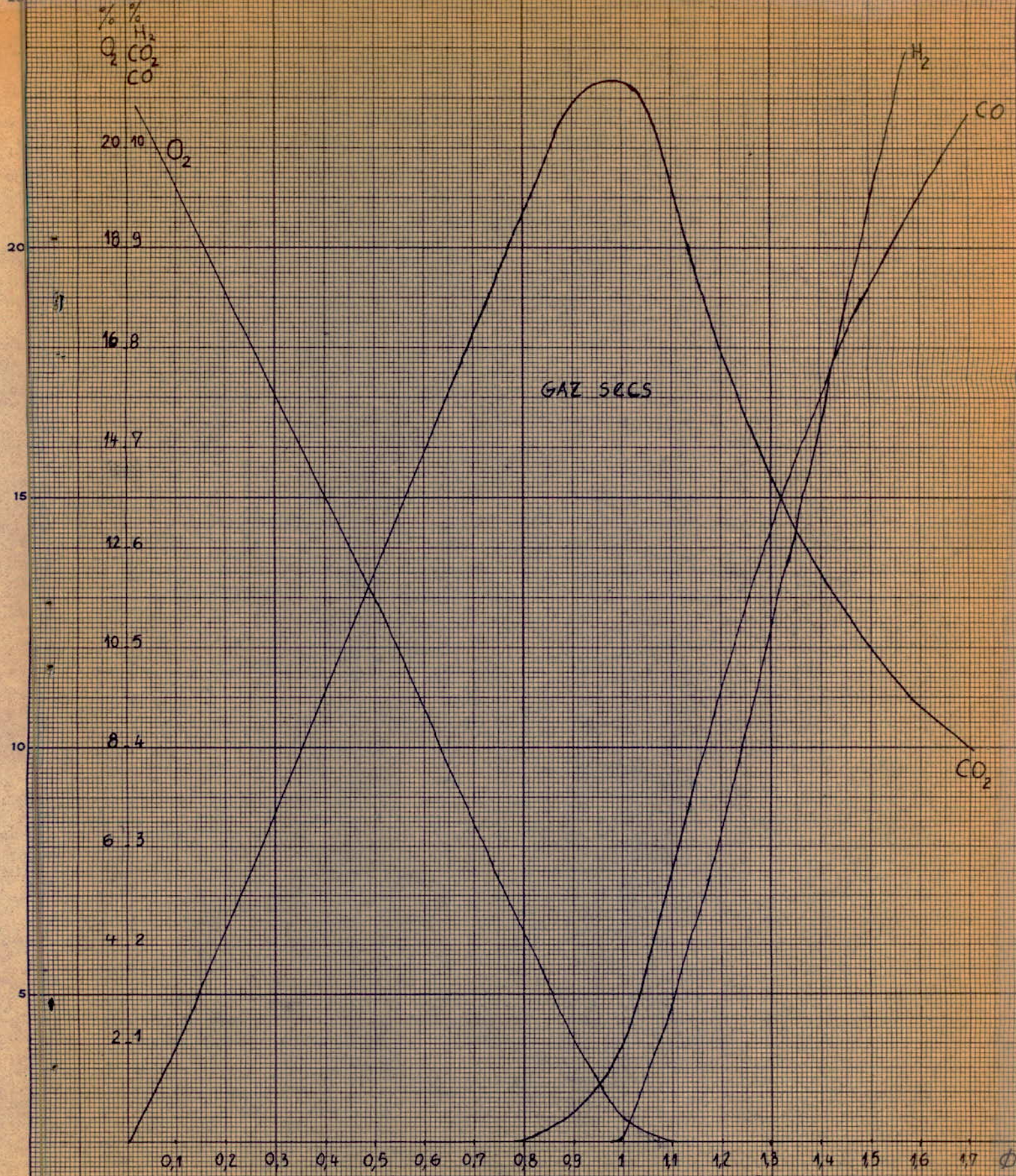
ϕ' : richesse locale déterminée à partir de la concentration du CO_2 dans les gaz de combustion et du diagramme

$$CO_2 = f(\phi')$$

T_b : température théorique obtenue à partir du diagramme Enthalpie-richesse.

Les résultats obtenus permettent non seulement de juger de l'évolution de la combustion mais aussi d'expliquer le processus de combustion Du G-N et d'effectuer une comparaison avec la théorie.

%
 O_2 %
 H_2 %
 CO_2 %
 CO



GAZ SECS

Variation des concentrations molaires des GAZ O_2 - CO_2 - CO et H_2
 Gaz de combustion du mélange GN-air
 $p_n = 298^\circ K$ $T_b = 323^\circ K$

5

10

15

20

PLAN DE CALCUL

Pour le dépouillement des résultats expérimentaux on a utilisé principalement les relations ci-dessous dont les détails de calcul ont été faits lors de travaux pratiques.

1°/ Masse volumique du gaz naturel (kg/m^3)

$$\rho_{\text{GN}} = P_{\text{GN}} / r T_{\text{GN}}$$

avec :

- P_{GN} = pression absolue du G-N en N/m^2
- r = constante du G-N = $440 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}$
- T_{GN} = température du G-N en $^\circ\text{K}$

2°/ Masse volumique de l'air (kg/m^3)

$$\rho_{\text{air}} = \rho_0 \frac{T_0}{T_a} \frac{P_a}{P_0}$$

avec :

- ρ_0 = masse volumique de l'air aux conditions standards
= $1,293 \text{ kg/m}^3$
- T_0 = 273°K
- P_0 = pression atmosphérique standard = 760 mm Hg
- P_a = pression atmosphérique ambiante en mm Hg
- T_a = température ambiante en $^\circ\text{K}$

3°/ Débit du gaz naturel :

a-, préchauffe :

$$m_{\text{gn.cp}} = 1,398 \cdot 10^{-4} (\rho_{\text{eau}} \cdot \Delta H \cdot \rho_{\text{gz}})^{0,5}$$

avec :

- ρ_{eau} = masse volumique de l'eau en kg/m^3
- ΔH = variation de pression du G-N cp en $\text{mm H}_2\text{O}$

b- chambre de combustion :

$$m_{\text{gn.cc}} = 4,056 \cdot 10^{-4} (\rho_{\text{eau}} \cdot \Delta H \cdot \rho_{\text{gaz}})^{0,5}$$

avec : ΔH = variation de pression du G-N C.C en m H_2O

4°/ Débit d'air :

$$m_{\text{air}} = 0,08924 (\rho_{\text{air}} \cdot \Delta H \cdot \rho_{\text{eau}})^{0,5}$$

avec : ΔH = variation de pression de l'air due au venturi
en m H_2O

5°/ Richesse globale :

$$\phi_{\text{globale}} = \frac{C/A}{(C/A)_{\text{st}}}$$

C = débit masse du G-N en g/s

A = débit masse de l'air en g/s

$(C/A)_{\text{st}}$ = rapport de mélange stochiométrique = 0,065 pour le
gaz naturel

6°/ Richesse locale :

Elle est lue sur la courbe $a' \text{CO}_2 = f(\phi)$

7°/ Rendement de combustion :

$$\eta_{\text{b}} = \frac{a' \text{CO}_{2\text{réel}}}{a' \text{CO}_{2\text{total}}}$$

N.B/

L'indice prime (a') exprime : sans dissociation .

// HAMBRE DE // OMBUSTION

//

// ROUS // IRCULAIRES

CARACTERISTIQUES DU TUBE DE FLAMME

A TROUS CIRCULAIRES

-Longueur totale = 678 mm

-Diamètre de sortie = 180 mm

-Trous circulaires: - 10 rangées

- 8 trous par rangée

- diamètre du trou = 19 mm

- Espace entre 2 rangées = 19 mm

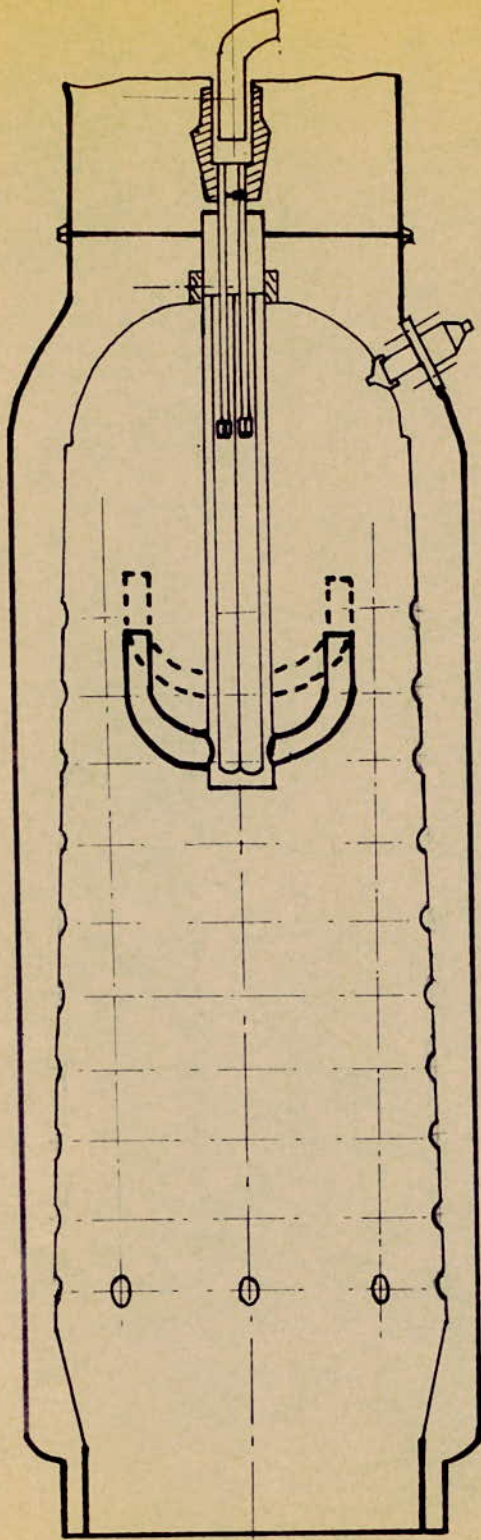
- La première rangée se trouve à 523 mm de la section de sortie

Section totale des trous circulaires = $80 \frac{d^2}{4}$

$$S_t = 22670,8 \text{ mm}^2 \text{ (secondaire + tertiaire)}$$

- Diamètre de l'orifice recevant la rosace = 43 mm

- La section approximative des fentes et des orifices constituant le
primaire = 2070 mm^2



Echelle : 1/4	E.N.-P.-A
CHAMBRE DE COMBUSTION A TROUS CIRCULAIRES	23-2-76

Exploration de la chambre à la sortie

(essai du 25/II/76)

Elle a été faite en général, de centimètre en centimètre.

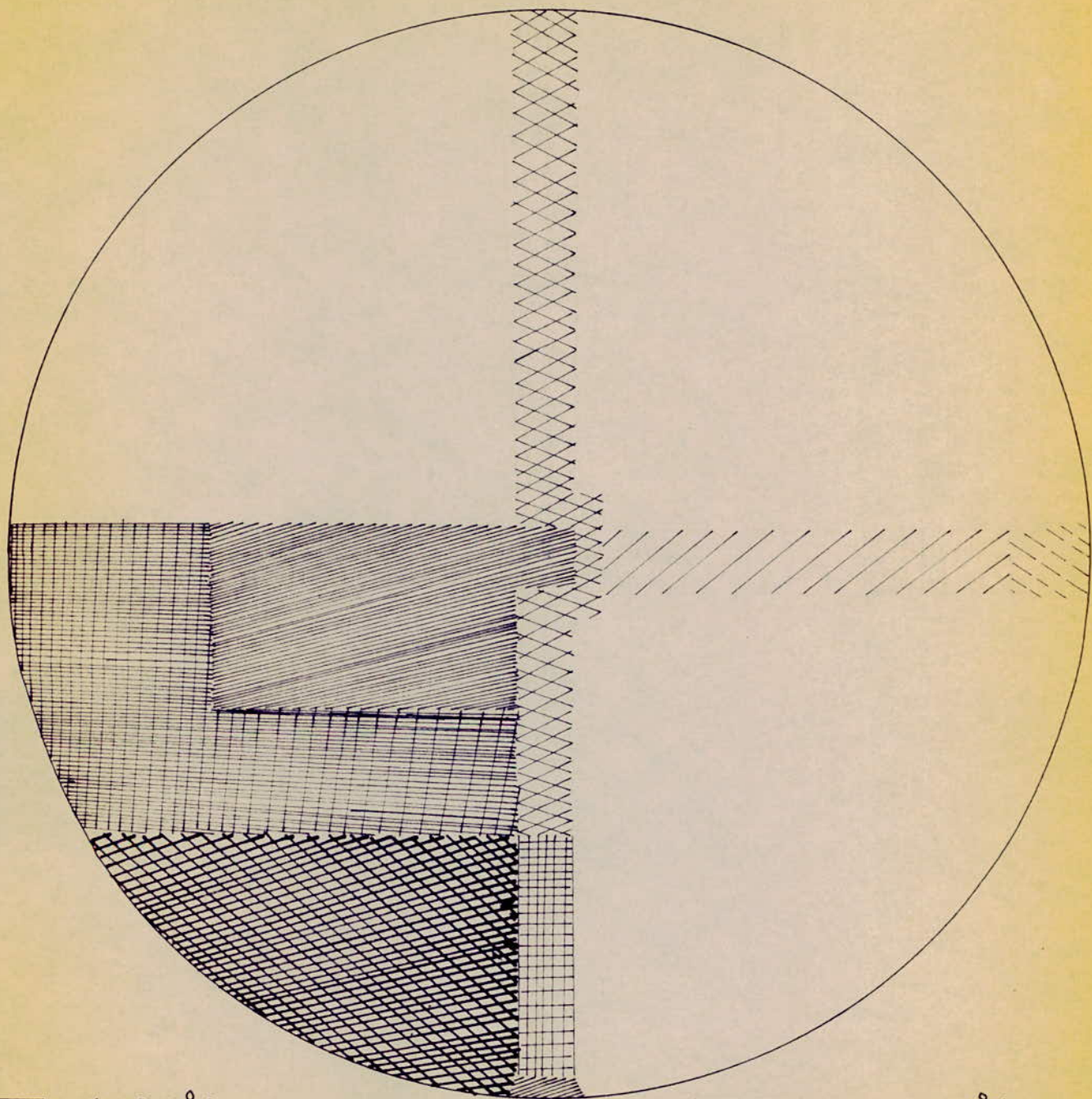
Les tracés de la carte de répartition des températures d'un premier essai (voir fig. IA et IB) ont fait ressortir nettement une concentration de chaleur dans un quart de la chambre.


Dans le but de vérifier si l'anomalie provient d'un mauvais positionnement de la rosace, on a procédé à la rotation de la chambre de 90° , à une nouvelle exploration dans le même plan que précédemment et à un nouveau tracé de la carte de répartition des températures (voir fig. 2A et 2B).


Effectivement, on a remarqué que la concentration de chaleur s'est déplacée aussi dans le même sens et de 90° . Ceci nous a amené au centrage de la rosace à l'intérieur de la chambre.


REPARTITION DES TEMPERATURES
Chambre à trous circulaires
sans uniformiseur


19/2/76





 $< 420^{\circ}\text{C}$


 $420 - 470^{\circ}\text{C}$


 $470 - 520^{\circ}\text{C}$

 $520 - 550^{\circ}\text{C}$

 $530 - 570^{\circ}\text{C}$

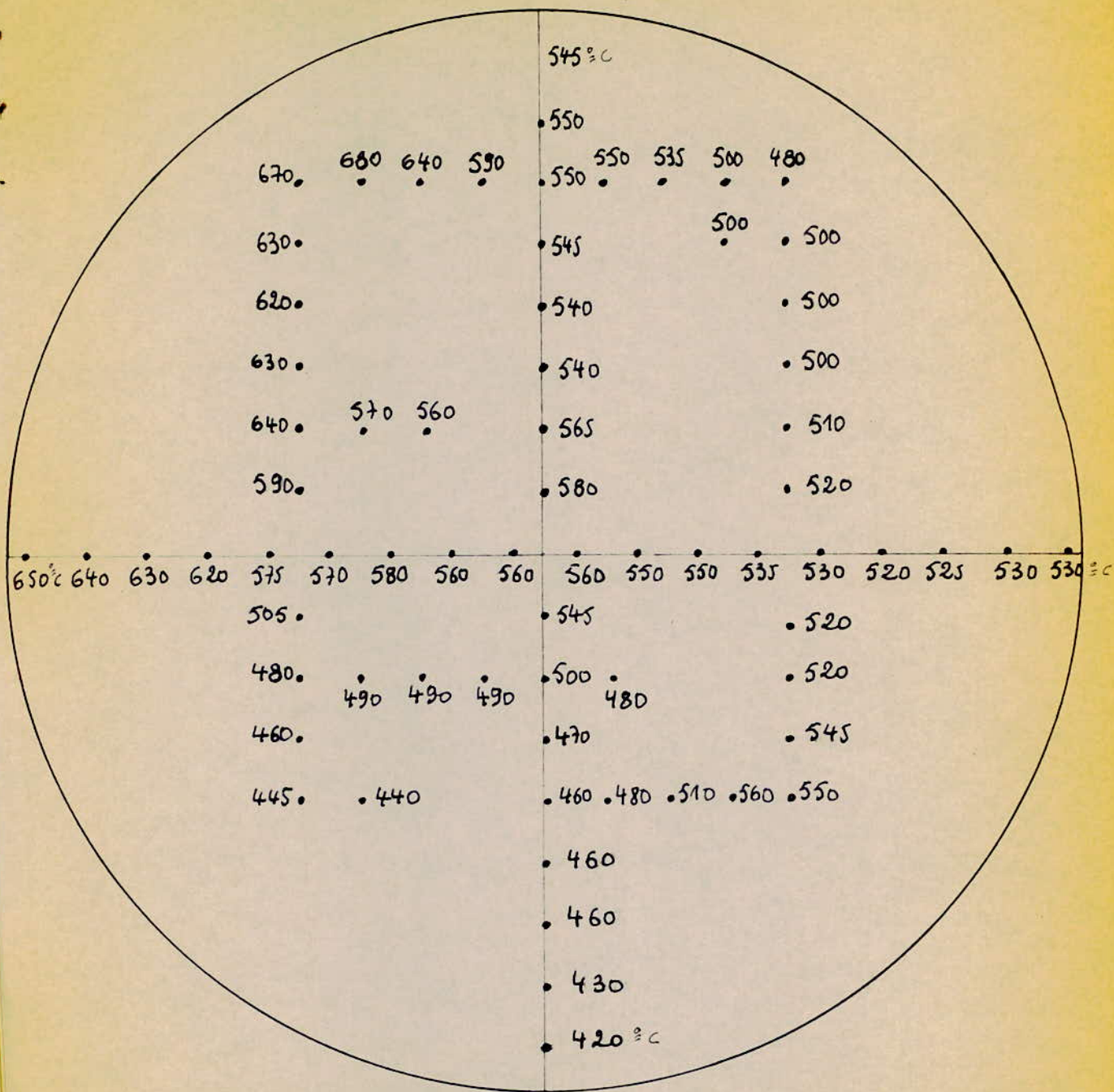
 $570 - 640^{\circ}\text{C}$

 $730 - 790^{\circ}\text{C}$

 Zone non sondée

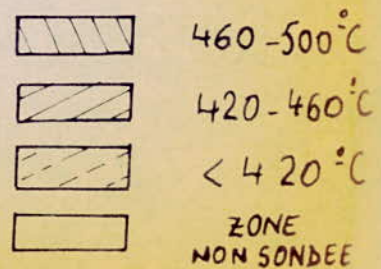
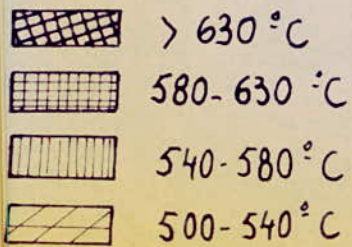
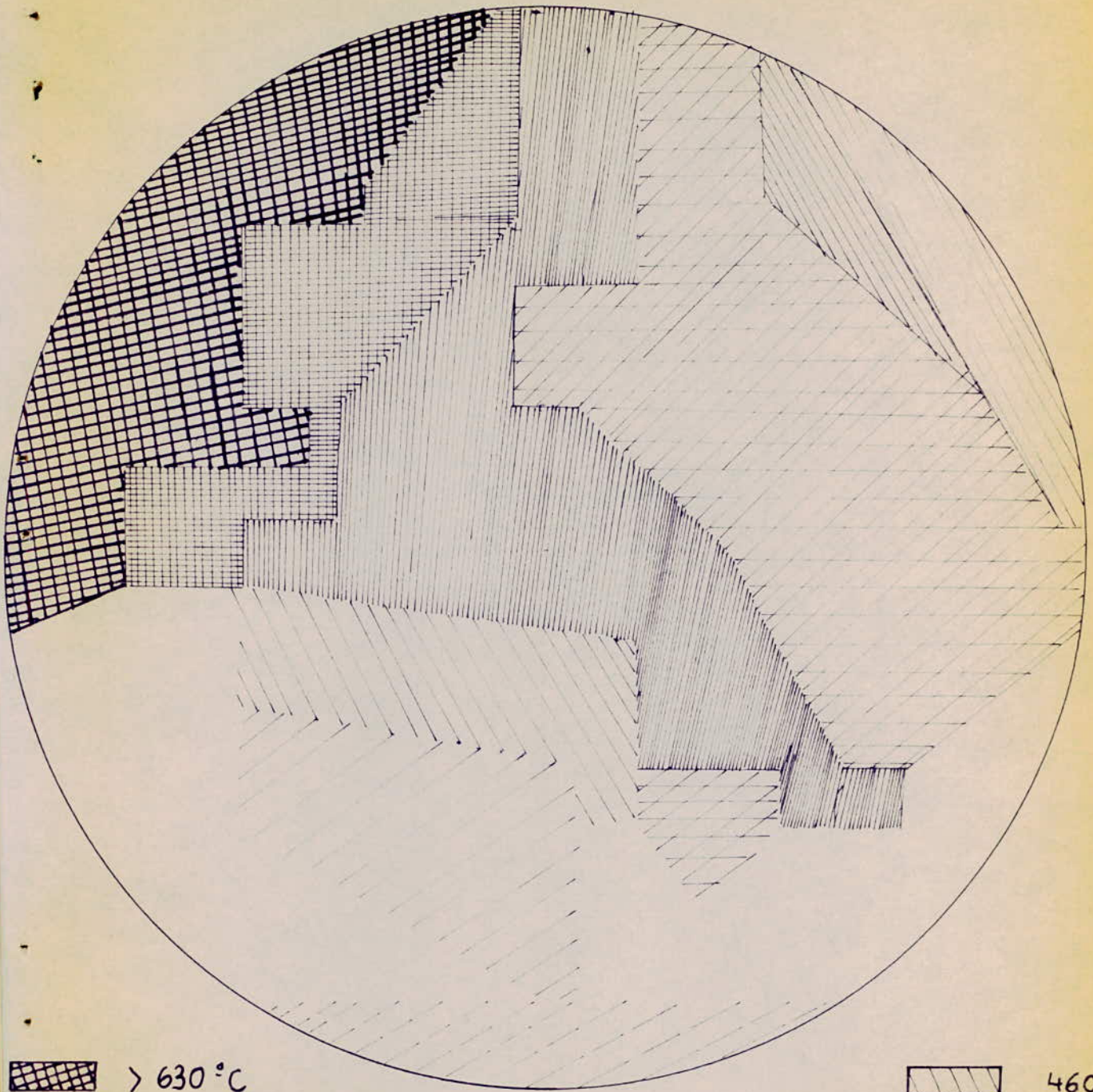
REPARTITION DES TEMPERATURES
 CHAMBRE A TROUS CIRCULAIRES SANS UNIFORMISEUR

20/2/76



REPARTITION DES TEMPERATURES
CHAMBRE A TROUS CIRCULAIRES SANS
UNIFORMISEUR

20.2.76



REMARQUES=DEDUITES DES ESSAIS DU 18/2/76 AU 24/3/76

L'utilisation d'une rallonge et de l'uniformiseur entraîne une chute de température de l'ordre de 40° relativement aux valeurs théoriques (cf $T_b = f(\varphi')$), ceci s'explique par les pertes thermiques occasionnées tout le long de la rallonge.

Par contre, l'utilisation de l'uniformiseur seul donne des résultats plus proches et dans certains cas pratiquement les mêmes.

Le rendement de combustion $\eta_b = f(\varphi)$ présente un maximum en fonction de la richesse locale φ' .

L'utilisation d'une autre chambre comme rallonge et d'un uniformiseur a permis l'obtention de l'uniformité de la répartition des températures ainsi qu'un mélange homogène des gaz à la sortie.

Le rendement moyen de combustion est de $\eta_{b \text{ moy}} = 0,95$ et \varnothing locale \approx \varnothing globale.

La chute de température occasionnée par la rallonge est de l'ordre 150°C pour une température de sortie de chambre de 800°C; autrement dit une chute de 2/10.

Date : 18 - 2 - 76

25 - 2 - 76

26 - 2 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,628 mV 0,628 mV 0,638 mV			
CO 63%				
CO 0,497%				
AIR				83,2

+	P _A = 757 mm Hg	c-c seule sans panier sans rallong
	T _A = 13,5 °C	
⊙	P _A = 766,7 mm Hg	c-c + rallong
	T _A = 14 °C	+ panier
△	P _A = 766,4 mm Hg	c-c + rallong
	T _A = 14 °C	+ panier

+ ⊙ △

		+	⊙	△
T _{G.N.C.P.}	°C			
P _{G.N.C.P.}	bar rel			
ΔH _{G.N.C.P.}	mm H ₂ O			
T [°] AIR COMP	°C	45	46	44
T [°] SONDE	°C	930	440	460
T [°] Sortie	°C	700	580	580
T [°] G.N.C.C.	°C	9	11,5	11
P _{G.N.C.C.}	bar rel	8,6	9	9,2
ΔH _{G.N.C.C.}	mm H ₂ O	360,5	65	65
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	203,5	99	100
a' CO ₂ Total	mV	0,349	0,260	0,255
a' CO ₂ reel	mV	-	0,255	0,250
a' CO	%	0,350	0,040	0,044
a' O ₂		58	69,5	68,9
T [°] Four	°C	-	-	-

+ + + Section de sortie .

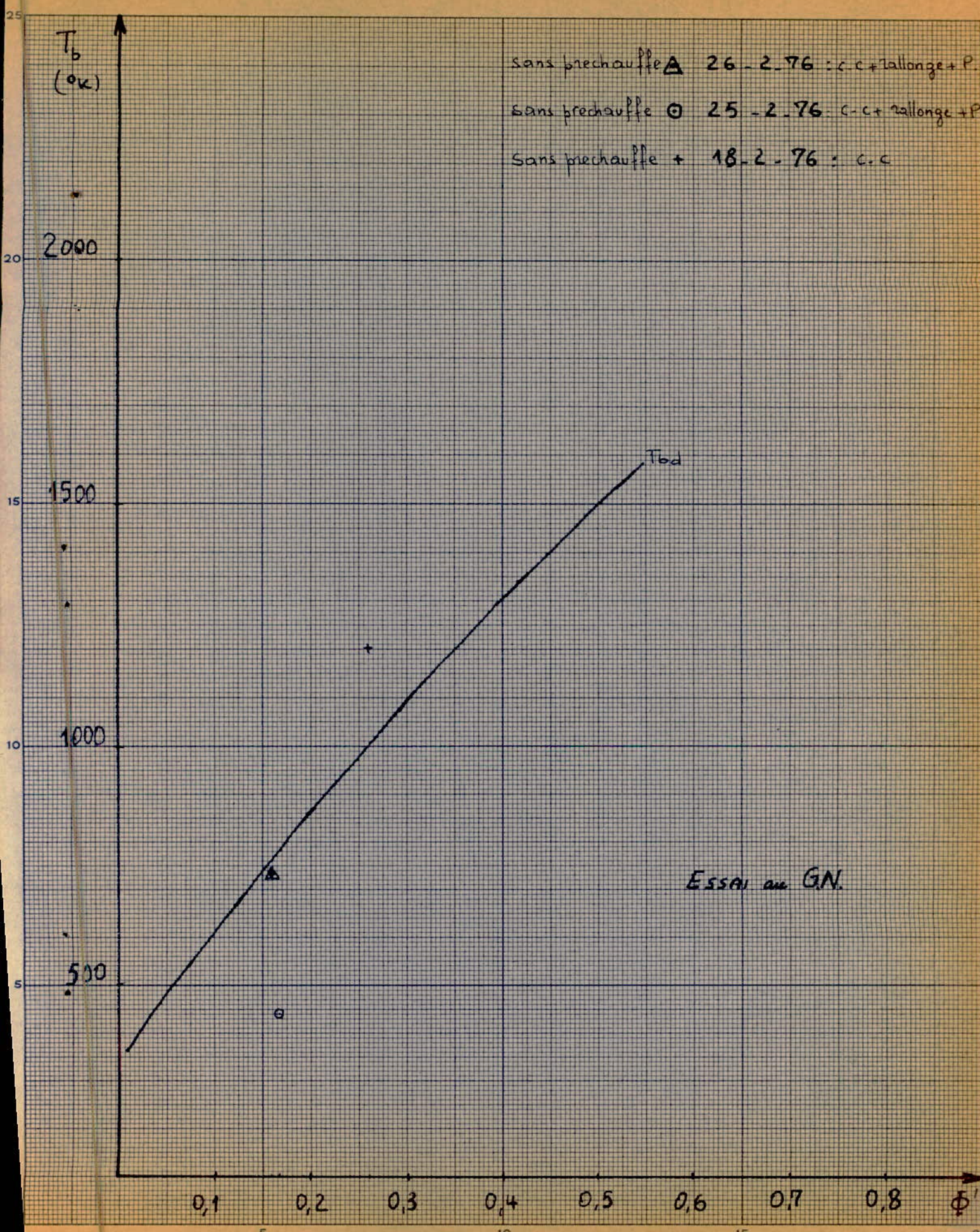
DATE : 18-2-76 +
 25-2-76 ⊙
 26-2-76 △

DEPOUILLEMENT

. C.C seule sans Panier s. rallonge
 . C.C + rallonge + Panier
 . C.C + rallonge + Panier

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu							
$T_{G.N.C.P}$	°K							
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m ³							
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s							
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	9,6	10	10,2				
$T_{G.N.C.C.}$	°K	282	284,5	284				
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m ³	7,736	7,990	8,162				
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	21,423	9,243	9,342				
T_{air}	°K	286,5	319	317				
ρ_{air}	kg/m ³	1,227	1,24	1,24				
\dot{m}_{air}	g/s	1410	990	993				
T_{sonde}	°K	1203	440	733				
T_{sortie}	°K	973	580	853				
a'_{CO_2T}	%	2,83	1,81	1,72				
a'_{CO_2R}	%	-	1,76	1,67				
a_{CO}	%	0,35	0,04	0,044				
a_{O_2}	%	14,5	16,15	17,22				
ϕ_e	$\frac{C/A}{P}$	0,23	0,14	0,143				
ϕ_R	$\frac{a_{CO_2R}}{P(\phi)}$	0,26	0,167	0,158				
η_c	$\frac{a'_{CO_2R}}{a'_{CO_2T}}$	-	0,972	0,97				

+ ⊙ △



Date : 19 - 2 - 75

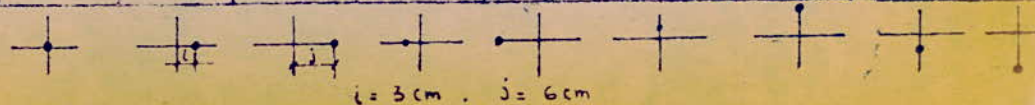
	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,7628mv			
CO 6,3%				
CO 0,49%				
AIR				89,2

P _A = 758	mm Hg
T _A = 13,5	°C

- C-C SEULE

- C-C + SANS RALLONGE , SANS
PANIER

T _{GN.C.P}	°C									
P _{GN.C.P}	bar rel									
ΔH _{GN.C.P}	mm H ₂ O									
T ^{air COMP}	°C	46	46	46	46	46	46	46	46	46
T ^{SONDE}	°C	540	470	465	540	590	490	500	520	535
T ^{Sortie}	°C	530	530	530	530	530	530	530	530	530
T ^{GN.C.C.}	°C	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
P _{GN.C.C.}	bar rel	9	9	9	9	9	9	9	9	9
ΔH _{GN.C.C.}	mm H ₂ O	65	65	65	65	65	65	65	65	65
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	100	100	100	100	100	100	100	100	100
a'CO ₂ Total	mv	0,2800	0,2864	0,2855	0,2879	0,2900	0,2860	0,2860	0,2856	0,2860
a'CO ₂ reel	mv	0,270	0,05959	0,250	0,274	0,290	0,252	0,256	0,250	0,258
a'CO	%	0,050	0,040	0,040	0,050	0,040	0,040	0,058	0,058	0,088
a'O ₂		69	71,4	71,3	69	66,5	70	70	69,7	69,6
T ^{Four}	°C									



l = 3 cm . j = 6 cm

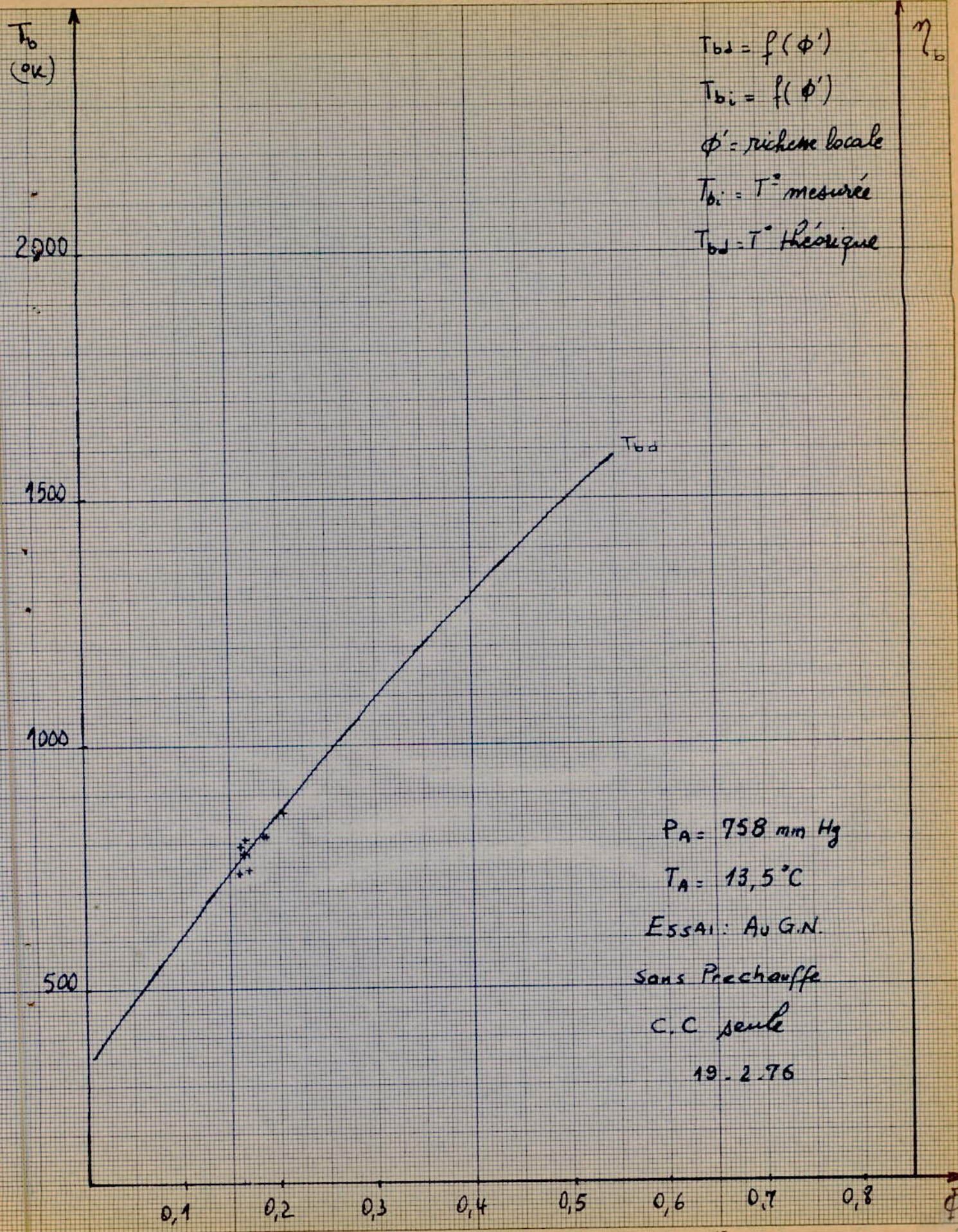
DATE : 19.2.76

DEPOUILLEMENT

- c.c seule

- c.c sans rallonge - sans
Panier

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu									
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$									
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3									
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s									
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$T_{G.N.C.C.}$	$^{\circ}K$	274,5	274,5	274,5	274,5	274,5	274,5	274,5	274,5	274,5
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	8,279	8,279	8,279	8,279	8,279	8,279	8,279	8,279	8,279
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	9,409	9,409	9,409	9,409	9,409	9,409	9,409	9,409	9,409
T_{air}	$^{\circ}K$	319	319	319	319	319	319	319	319	319
ρ_{air}	kg/m^3	1,228	1,228	1,228	1,228	1,228	1,228	1,228	1,228	1,228
\dot{m}_{air}	g/s	988,9	988,9	988,9	988,9	988,9	988,9	988,9	988,9	988,9
T_{sonde}	$^{\circ}K$	813	743	738	813	863	763	773	793	808
T_{sortie}	$^{\circ}K$	803	803	803	803	803	803	803	803	803
$a'CO_{2r}$	%	1,93	1,80	1,70	1,97	2,15	1,72	1,77	1,70	1,79
$a'CO_{2T}$	%	2,04	1,85	1,75	2,02	2,23	1,81	1,81	1,76	1,81
aCO	%	0,05	0,04	0,04	0,05	0,042	0,04	0,042	0,058	0,088
aO_2	%	17,2	17,7	17,7	17,2	17,6	17,5	17,5	17,4	17,5
ϕ_g	$\frac{c/A}{g}$	0,145	0,145	0,145	0,145	0,145	0,145	0,145	0,145	0,145
ϕ_l	$\frac{a'CO_{2r}}{\rho(\phi)}$	0,188	0,170	0,161	0,186	0,205	0,166	0,165	0,162	0,166
η_c	$\frac{a'CO_{2r}}{a'CO_{2T}}$	0,946	0,972	0,971	0,975	0,964	0,950	0,997	0,965	0,988



$T_{bd} = f(\phi')$
 $T_{bi} = f(\phi')$
 $\phi' = \text{richesse locale}$
 $T_{bi} = T^\circ \text{ mesurée}$
 $T_{bd} = T^\circ \text{ théorique}$

$P_A = 758 \text{ mm Hg}$
 $T_A = 13,5^\circ \text{C}$
 ESSAI: Au G.N.
 sans Préchauffe
 C.C seule
 19.2.76

Date : 27 - 2 = 76

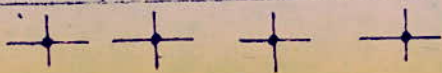
	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,628 _{mV}			
CO 6,3%				
CO 0,49%				
AIR				83,2

P _A = 765,6 mm Hg
T _A = 12,5 °C

- PRÉCHAUFFE SEULE

- C-C + RALLONGE + PANIER

T _{G.N.C.P}	°C	11,5	12	12	12				
P _{G.N.C.P}	bar rel	9	9	9	9				
ΔH _{G.N.C.P}	mm H ₂ O	45	72	92	132				
T _{air COMP}	°C	42	48	49,5	50				
T _{sonde}	°C	230	280	300	330				
T _{Sortie}	°C	250	310	340	380				
T _{G.N.C.C}	°C								
P _{G.N.C.C}	bar rel								
ΔH _{G.N.C.C}	mm H ₂ O								
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	44	43	43	43				
a'CO ₂ Total	mV	0,178	0,190	0,191	0,230				
a'CO ₂ reel	mV	0,168	0,185	0,190	0,200				
a'CO	%	78	76,5	75,5	74,5				
a'O ₂									
T _{Four}	°C								



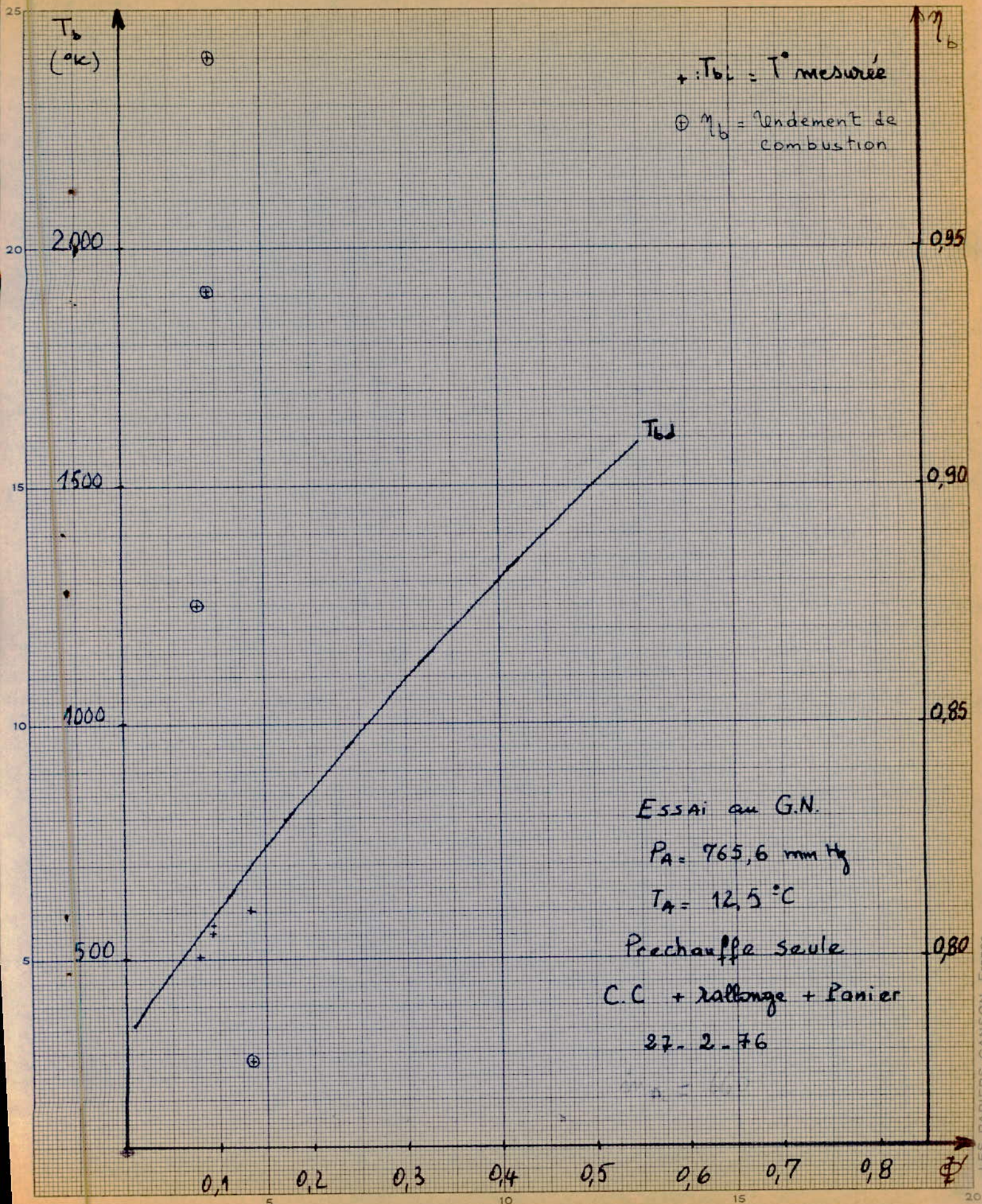
DATE : 27-2-76

DEPOUILLEMENT

- Prechauffe seule

- c.c + rallonge + Panier

$P_{GN.C.P}$	bar absolu	10	10	10	10				
$T_{GN.C.P}$	$^{\circ}K$	284,5	285	285	285				
$\rho_{GN.C.P}$	kg/m^3	7,99	7,99	7,99	7,99				
$\dot{m}_{GN.C.P}$	g/s	2,651	3,353	3,79	4,54				
$P_{GN.C.C.}$	bar absolu	-	-	-	-				
$T_{GN.C.C.}$	$^{\circ}K$	-	-	-	-				
$\rho_{GN.C.C.}$	kg/m^3	-	-	-	-				
$\dot{m}_{GN.C.C.}$	g/s	-	-	-	-				
T_{air}	$^{\circ}K$	315	321	322,5	325				
ρ_{air}	kg/m^3	1,25	1,25	1,25	1,25				
\dot{m}_{air}	g/s	660	656	656	656				
T_{sonde}	$^{\circ}K$	503	553	573	603				
T_{sortie}	$^{\circ}K$	523	583	613	653				
a'_{CO_2r}	%	0,77	0,96	1,02	1,13				
a'_{CO_2T}	%	0,88	1,02	1,03	1,47				
a_{CO}	%	-	-	-	-				
a'_{O_2}	%	19,5	19,13	18,88	18,63				
ϕ_g	$\frac{C/A}{\rho}$	0,06	0,08	0,09	0,11				
ϕ_l	$\frac{a'_{CO_2r}}{\rho(\phi)}$	0,08	0,094	0,095	0,135				
η_c	$\frac{a'_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}}$	0,875	0,941	0,990	0,768				



Date : 1 - 3 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,64mv			
CO 6,3%				
CO 0,497%				
AIR				83,2

P _A = 765,8	mm Hg
T _A = 14	°C

- PRECHAUFFE SEULE

- C-C + PANIER

T _{GN.C.P}	°C	12,5	12,5						
P _{GN.C.P}	bar rel	9	8,9						
ΔH _{GN.C.P}	mm H ₂ O	76	100						
T [°] air COMP	°C	46	51						
T [°] sonde	°C	288	310						
T [°] Sortie	°C	310	350						
T [°] GN.C.C.	°C								
P _{GN.C.C.}	bar rel								
ΔH _{GN.C.C.}	mm H ₂ O								
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	43	43						
a'CO ₂ Total	mv	0,19	0,19						
a'CO ₂ reel	mv	0,185	-						
a'CO	%								
a'O ₂									
T [°] Four	°C								



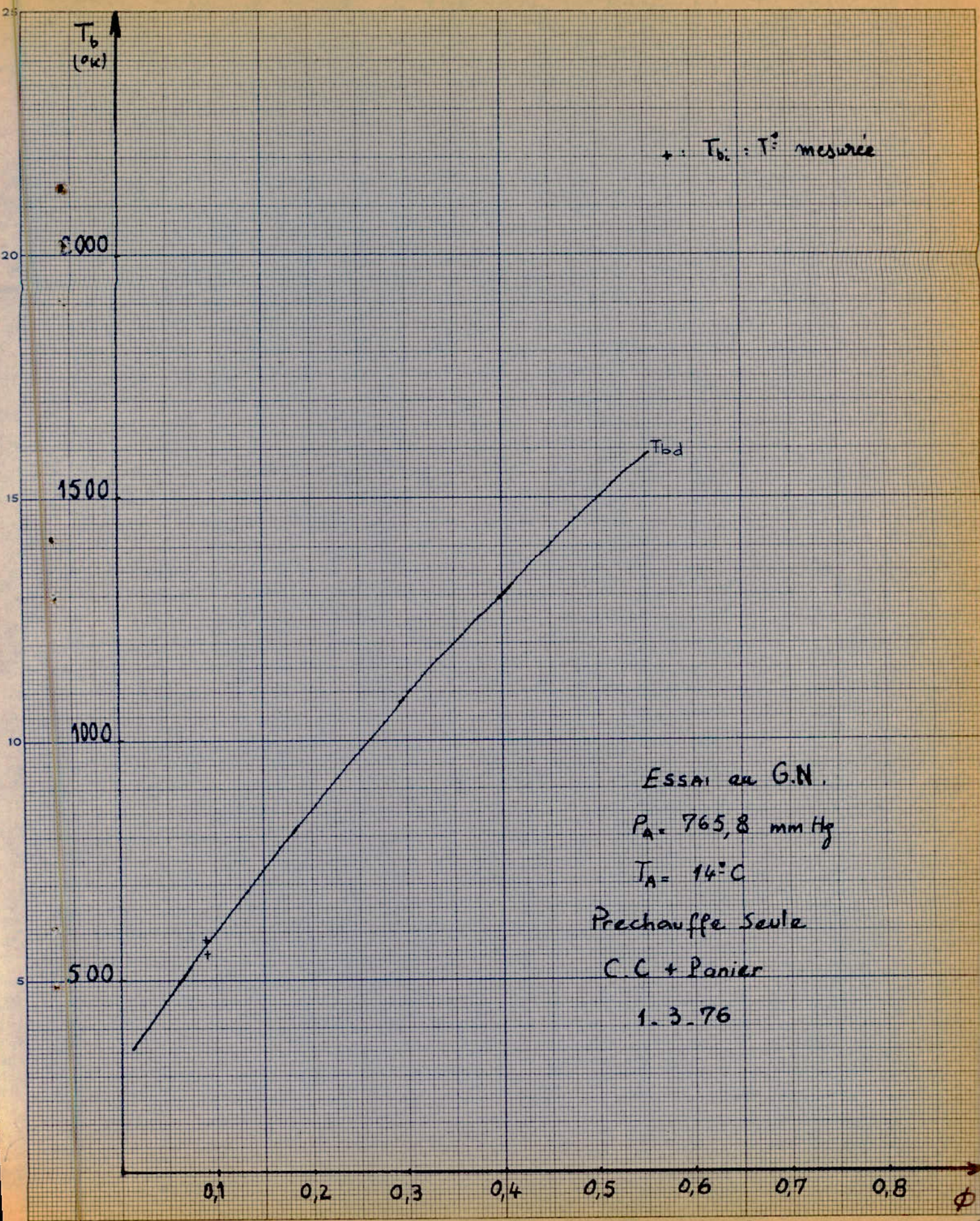
DATE: 1-3-76

DEPOUILLEMENT

- Prechauffe seule

- C-C + Panier

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu	10	9,9						
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$	285,5	285,5						
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3	7,960	7,880						
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s	3,438	3,924						
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	-	-						
$T_{G.N.C.C.}$	$^{\circ}K$	-	-						
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	-	-						
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	-	-						
T_{air}	$^{\circ}K$	319	324						
ρ_{air}	kg/m^3	1,239	1,239						
\dot{m}_{air}	g/s	651	651						
T_{sonde}	$^{\circ}K$	553	583						
T_{sortie}	$^{\circ}K$	583	623						
a'_{CO_2r}	%	0,94	-						
a'_{CO_2T}	%	0,99	0,99						
a_{CO}	%	-	-						
a'_{O_2}	%	-	-						
ϕ_g	$\frac{c/A}{\rho \cdot v}$	0,081	0,092						
ϕ_l	$\frac{a'_{CO_2r}}{\rho(\phi)}$	0,091	0,091						
η_c	$\frac{a'_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}}$	0,944	-						



Essai au G.N.

$P_A = 765,8$ mm Hg

$T_A = 14^\circ\text{C}$

Prechauffe seule

C.C + Panier

1.3.76

Date : 3 - 3 - 76

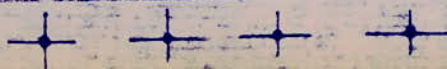
	CO ₂	CO 0.5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,645			
CO 63%				
CO 0,49%				
AIR				83,2

P _A = 762	mm Hg
T _A = 13	°C

- C-C SEULE

- C-C + PANIER

T _{G.N.C.P}	°C				
P _{G.N.C.P}	bar rel				
ΔH _{G.N.C.P}	mm H ₂ O				
T [°] air COMP	°C	42	45,5	49	51
T [°] sonde	°C	420	460	490	640
T [°] Sortie	°C	530	590	610	790
T [°] G.N.C.C.	°C	12	12	12	12
P _{G.N.C.C.}	bar rel	9	9	9	8,8
ΔH _{G.N.C.C.}	mm H ₂ O	18	65	30	85
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	47	100	46	44
a'CO ₂ Total	mV	0,2444	0,25	0,258	0,321
a'CO ₂ reel	mV	0,239	0,248	0,255	0,305
a'CO	%				
a'O ₂					
T [°] Four	°C				



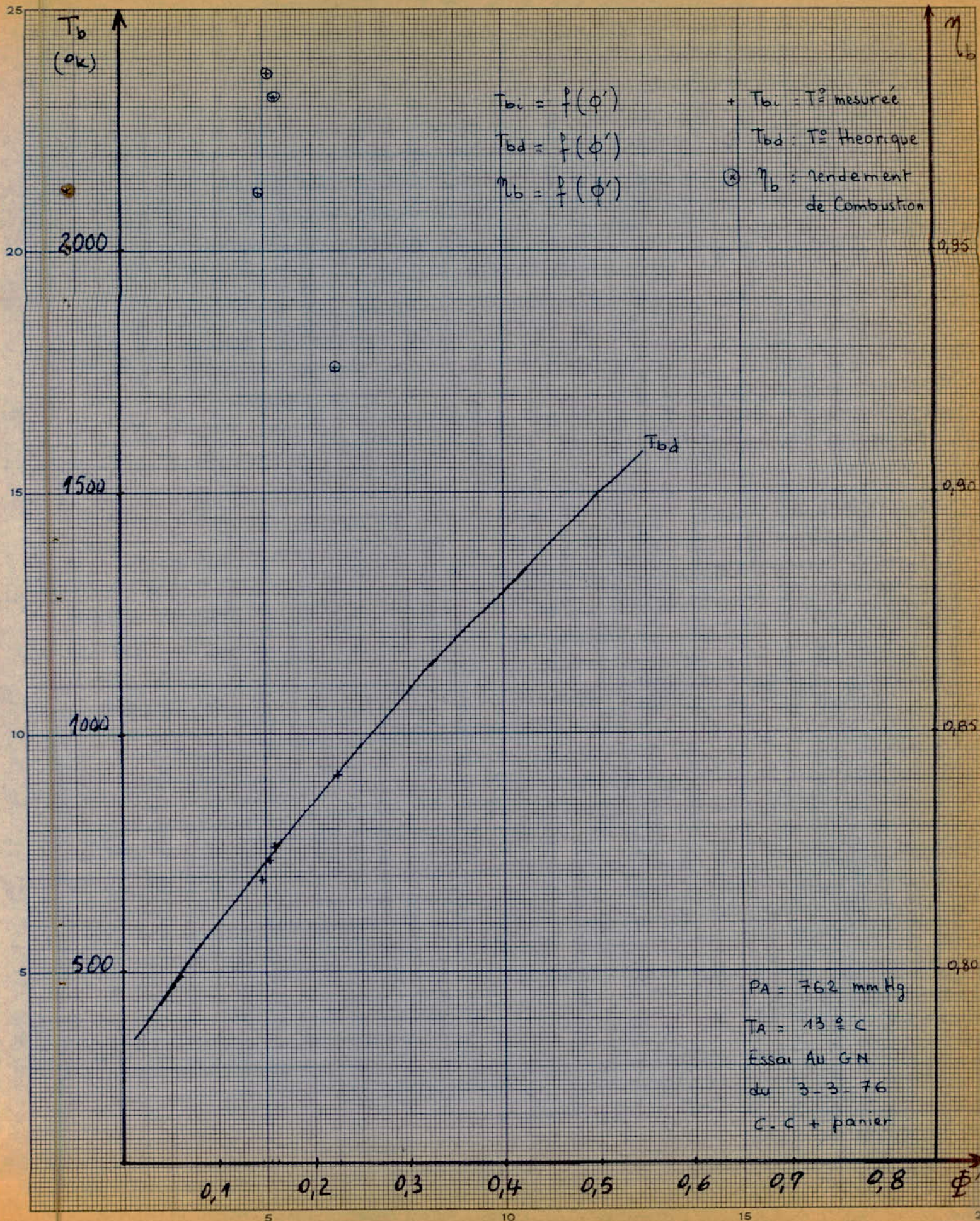
DATE : 3-3-76

DEPOUILLEMENT

- C - C SEULE

- C - C + PANIER

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu								
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$								
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3								
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s								
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	10	10	10	9,8				
$T_{G.N.C.C.}$	$^{\circ}K$	285	285	285	285				
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	7,97	7,97	7,97	7,81				
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	4,859	9,234	6,273	10,453				
T_{air}	$^{\circ}K$	315	318,5	322	324				
ρ_{air}	kg/m^3	1,237	1,237	1,237	1,237				
\dot{m}_{air}	g/s	680	992	673	658				
T_{sonde}	$^{\circ}K$	693	733	763	913				
T_{sortie}	$^{\circ}K$	803	863	883	1063				
$a'CO_{2r}$	%	1,54	1,64	1,72	2,27				
$a'CO_{2T}$	%	1,60	1,66	1,75	2,45				
aCO	%	-	-	-	-				
$a'O_2$	%	-	-	-	-				
ϕ_g	$\frac{C/A}{P}$	0,109	0,142	0,142	0,242				
ϕ_l	$\frac{a'CO_{2r}}{P(\phi)}$	0,147	0,153	0,161	0,226				
η_c	$\frac{a'CO_{2r}}{a'CO_{2T}}$	0,962	0,987	0,982	0,926				



Date : 3 - 3 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,632 mV			
CO 53%				
CO 0,49%				
AIR				83,2

P _A = 761,7 mm Hg
T _A = 16 °C

- C-C + PANIER

- SANS PRECHAUFFE

T _{GN.C.P}	°C								
P _{GN.C.P}	bar rel								
ΔH _{GN.C.P}	mm H ₂ O								
T [°] air COMP	°C	42,5	47,5	47,5					
T [°] sonde	°C	530	630	460					
T [°] sortie	°C	670	800	570					
T [°] GN.C.C.	°C	14,5	13,5	13					
P _{GN.C.C}	bar rel	9	8,8	9,4					
ΔH _{GN.C.C.}	mm H ₂ O	84	158	44					
ΔH air Venturi	mm H ₂ O	86	87	84					
a' CO ₂ Total	mV	0,298	0,351	0,260					
a' CO ₂ reel	mV	0,280	0,330	0,258					
a' CO	%								
a' O ₂									
T [°] Four	°C								



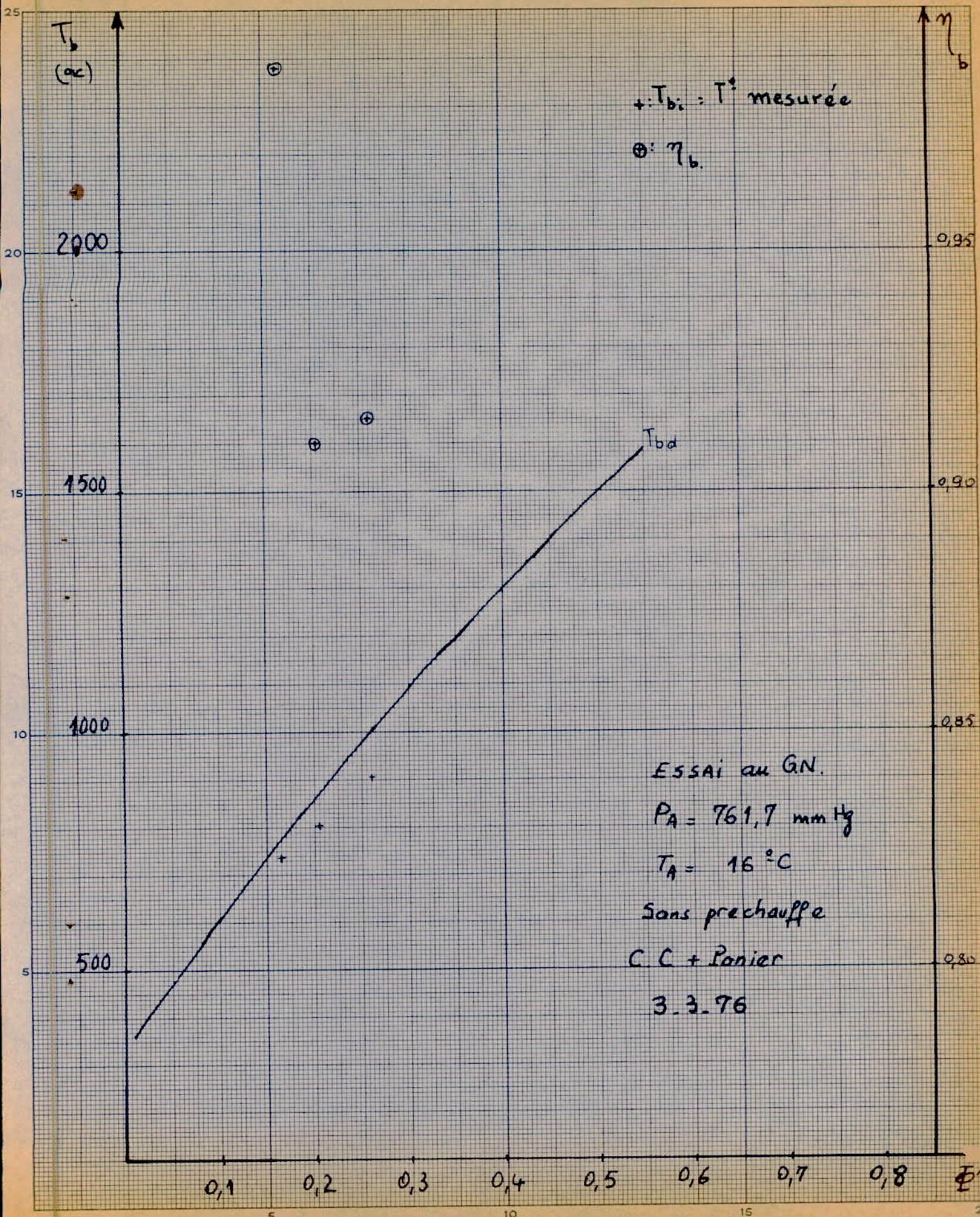
DATE : 3-3-76

DEPOUILLEMENT

- C-C + PANIER

- SANS PRECHAUFFE

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu							
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$							
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3							
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s							
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	10	9,8	10,4				
$T_{G.N.C.C.}$	$^{\circ}K$	287,5	286,5	286				
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	7,905	7,774	8,264				
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	10,451	14,215	7,734				
T_{air}	$^{\circ}K$	315,5	320,5	320,5				
ρ_{air}	kg/m^3	1,230	1,224	1,224				
\dot{m}_{air}	g/s	917	920	904				
T_{sonde}	$^{\circ}K$	803	903	733				
T_{sortie}	$^{\circ}K$	943	1093	843				
a'_{CO_2r}	%	2,03	2,59	1,78				
a'_{CO_2T}	%	2,23	2,83	1,80				
a_{CO}	%	-	-	-				
a'_{O_2}	%	-	-	-				
ϕ_g	$\frac{C/A}{D}$	0,173	0,235	0,130				
ϕ_l	$\frac{a'_{CO_2r}}{\rho(\phi)}$	0,205	0,261	0,166				
η_c	$\frac{a'_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}}$	0,91	0,915	0,988				



Date : 4 - 3 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,635mv			
CO 6,3%				
CO 0,497%				
AIR				

P _A = 761,5 mm Hg
T _A = 14,2 °C

-C-C SEULE

-C- C + PANIER

T _{GN.C.P.}	°C								
P _{GN.C.P.}	bar rel								
ΔH _{GN.C.P.}	mm H ₂ O								
T [°] AIR COMP	°C	45,5	50						
T [°] SONDE	°C	490	475						
T [°] Sortie	°C	600	580						
T [°] GN.C.C.	°C	14	14						
P _{GN.C.C.}	bar rel	9,2	9						
ΔH _{GN.C.C.}	mm H ₂ O	20	37						
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	24	50						
a' CO ₂ Total	mv	0,274	0,26						
a' CO ₂ reel	mv	0,27	0,255						
a' CO	%								
a' O ₂									
T [°] Four	°C								



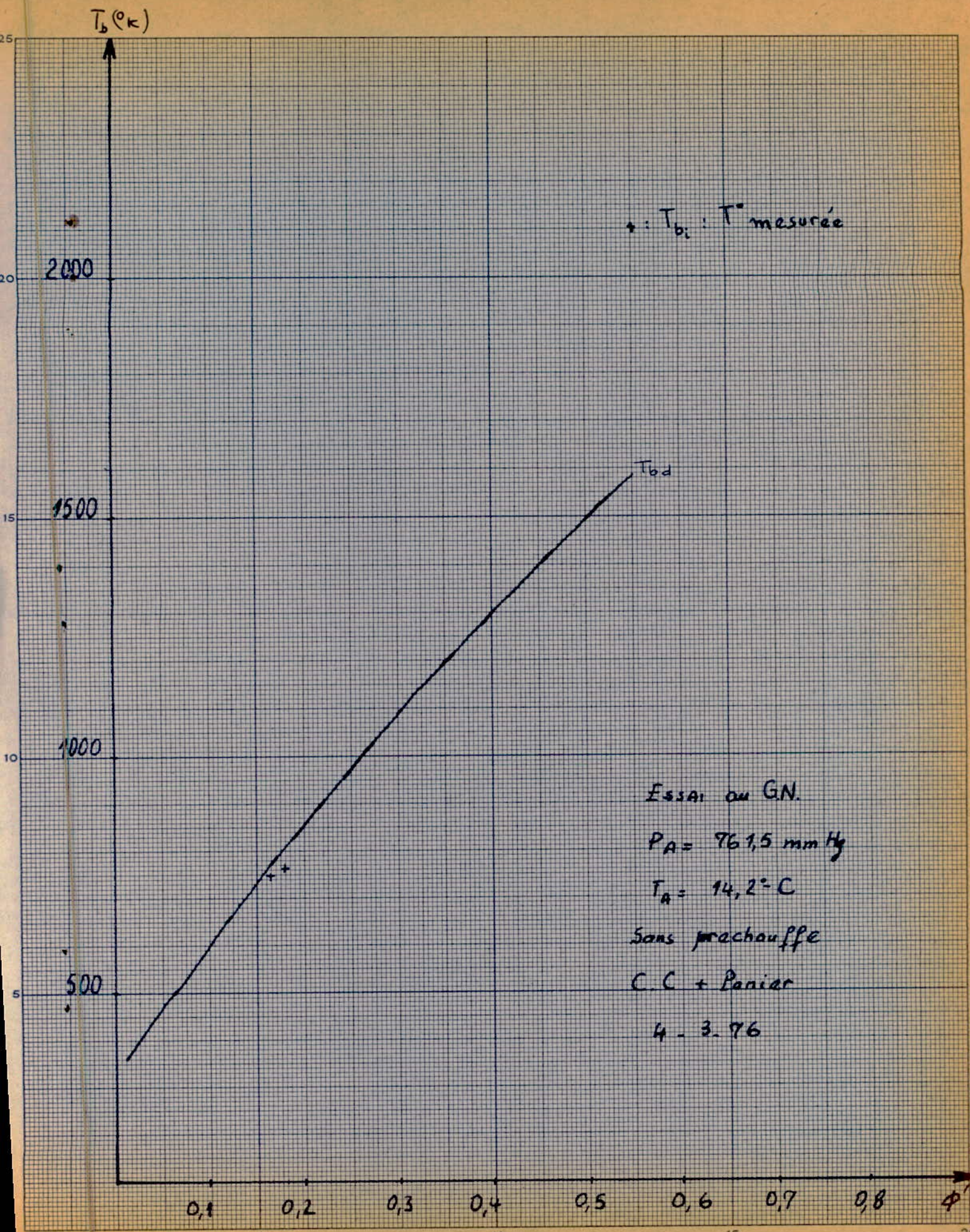
DATE: 4-3-76

DEPOUILLEMENT

- C-C SEULE

- C-C + PANIER

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu							
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$							
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3							
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s							
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	10,2	10					
$T_{G.N.C.C.}$	$^{\circ}K$	287	287					
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	8,077	7,919					
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	5,155	6,94					
T_{air}	$^{\circ}K$	287,2	287,2					
ρ_{air}	kg/m^3	1,231	1,231					
\dot{m}_{air}	g/s	485	700					
T_{sonde}	$^{\circ}K$	763	748					
T_{sortie}	$^{\circ}K$	873	853					
$a'CO_{2r}$	%	1,9	1,73					
$a'CO_{2T}$	%	1,95	1,79					
aCO	%	-	-					
$a'O_2$	%	-	-					
ϕ_g	$\frac{C/A}{K}$	0,162	0,151					
ϕ_l	$\frac{a'CO_2}{P(\phi)}$	0,18	0,165					
η_c	$\frac{a'CO_{2r}}{a'CO_{2T}}$	0,974	0,966					



Date : 5 - 3 - 76

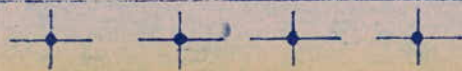
	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,648mv			
CO 5,3%				
CO 0,497%				
AIR				83,2

P _A = 757,2	mm Hg
T _A = 14,3	°C

- C-C SEULE

- SANS RALLONGE + PANIER
(SONDE DROITE)

T _{GN.C.P}	°C				
P _{GN.C.P}	bar rel				
ΔH _{GN.C.P}	mm H ₂ O				
T ^{air} COMP	°C	41	48,5	46,5	49
T ^{sonde}	°C	490	490	480	560
T ^{Sortie}	°C	610	610	610	700
T ^{GN.C.C}	°C	14	14	14	13,5
P _{GN.C.C}	bar rel	8,8	8,6	8,5	8,7
ΔH _{GN.C.C}	mm H ₂ O	24	58	79	46
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	32	70	97	40
a' CO ₂ Total	mv	0,24	0,24	0,24	0,262
a' CO ₂ reel	mv	0,236	0,235	0,234	0,26
a' CO	%				
a' O ₂					
T ^{Four}	°C				



Date : 5 . 3 . 76

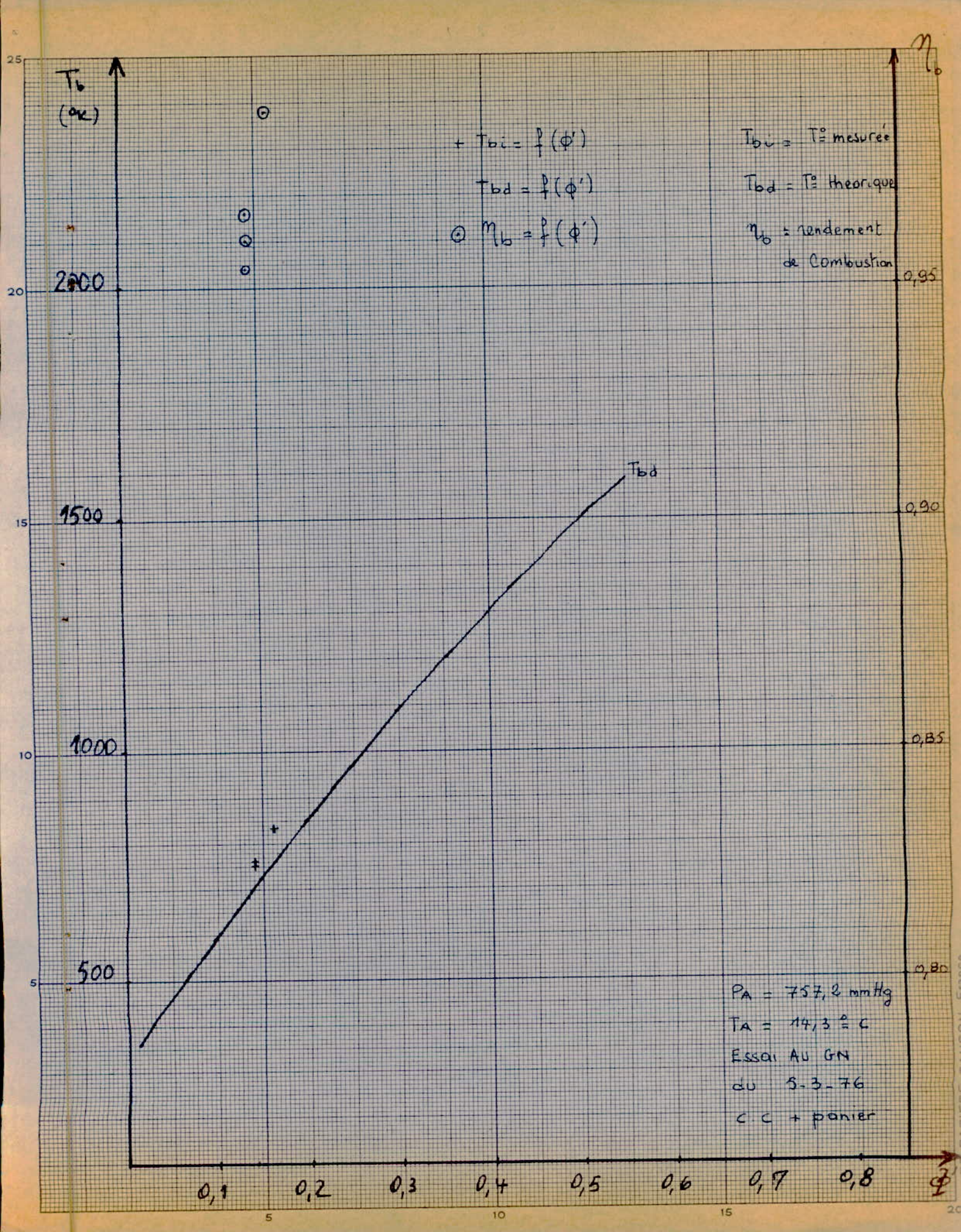
DEPOUILLEMENT

- C-C SEULE

-SANS RALLONGE +PANIER

(sonde droite)

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu								
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$								
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3								
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	$\% / s$								
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	9,8	9,6	9,5	9,7				
$T_{G.N.C.C.}$	$^{\circ}K$	287	287	287	286,5				
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	7,760	7,600	7,522	7,694				
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	$\% / s$	5,535	8,516	9,880	7,630				
T_{air}	$^{\circ}K$	314,0	321,5	319,5	322,0				
ρ_{air}	kg/m^3	1,224	1,224	1,224	1,224				
\dot{m}_{air}	$\% / s$	558,5	826,0	972,0	624,0				
T_{sonde}	$^{\circ}K$	763	763	753	833				
T_{sortie}	$^{\circ}K$	883	883	883	973				
a'_{CO_2r}	%	1,48	1,47	1,46	1,75				
a'_{CO_2T}	%	1,53	1,53	1,53	1,77				
a_{CO}	%								
a_{O_2}	%								
ϕ_g	$\frac{C/A}{K_1}$	0,151	0,158	0,155	0,186				
ϕ_l	$\frac{a'_{CO_2r}}{P(\phi)}$	0,141	0,141	0,141	0,163				
η_c	$\frac{C_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}}$	0,967	0,960	0,954	0,988				



Date : 15 - 3 - 76

	CO ₂	CO 0,3%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,622 mv			
CO 6,3%				
CO 0,49%				
AIR				83,2

P _A = 754 mmHg
T _A = 15,1 °C

- C-C SEULE

- SANS RALLONGE, + PANIER

T _{GN.C.P}	°C							
P _{GN.C.P}	bar rel							
ΔH _{GN.C.P}	mm H ₂ O							
T [°] AIR COMP	°C	39	46,5	46	48,8	54		
T [°] SONDE	°C	450	380	450	650	770		
T [°] Sortie	°C	580	510	590	810	920		
T [°] G.N.C.C.	°C	13	12	13,5	13	12,5		
P _{G.N.C.C.}	bar rel	9	9	9	8,9	8,8		
ΔH _{G.N.C.C.}	mm H ₂ O	65	45	65	65	65		
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	98	100	100	30	21		
a' CO ₂ Total	mv	0,248	0,225	0,240	0,330	0,390		
a' CO ₂ reel	mv	-	0,220	0,230	-	-		
a' CO	%	-	-	-	-	-		
a' O ₂		73	76,5	72	63,5	63		
T [°] Four	°C							



DATE = 15-3-76

DEPOUILLEMENT

- C.C. SEULE

- SANS RALLONGE, + PANIER

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu								
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$								
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3								
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s								
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	10	10	10	9,9	9,8			
$T_{G.N.C.C.}$	$^{\circ}K$	286	285	287	286	286			
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	7,95	7,97	7,92	7,95	7,95			
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	9,22	7,76	9,20	9,22	9,22			
T_{air}	$^{\circ}K$	313	320	319	322	328			
ρ_{air}	kg/m^3	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22			
\dot{m}_{air}	g/s	990	990	990	550	460			
T_{sonde}	$^{\circ}K$	723	653	723	923	1043			
T_{sortie}	$^{\circ}K$	853	783	853	1083	1203			
$a'CO_{2r}$	%	-	1,37	1,49	-	-			
$a'CO_{2T}$	%	1,70	1,43	1,60	2,64	3,33			
aCO	%	-	-	-	-	-			
$a'O_2$	%	18,25	19	18	15,88	15,75			
ϕ_g	$\frac{C/A}{P_A}$	0,143	0,120	0,143	0,258	0,308			
ϕ_l	$\frac{a'CO_{2r}}{P(\phi)}$	0,156	0,132	0,147	0,243	0,307			
η_c	$\frac{a'CO_{2r}}{C'CO_{2T}}$	-	0,958	0,931	-	-			

T_b
(°K)

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

* $T_{bi} = T_i^{\circ}$ mesurée
 ϕ' : richesse locale
 $T_{bd} = T_i^{\circ}$ théorique

2000

1500

1000

500

T_{bd}

0,1

0,2

0,3

0,4

0,5

0,6

0,7

0,8

ϕ'

$P_A = 754 \text{ mmHg}$

$T_A = 15,1^{\circ}\text{C}$

ESSAI AU GN du 15-3-76

c.c + panier

m...

Date : 16 - 3 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,66mv			
CO 63%				
CO 0,49%				
AIR				83,2

P _A = 754,8 mmHg
T _A = 13,5 °C

—PRECHAUFFE SEULE

—SANS RALLONGE + PANIER

T _{G.N.C.P.}	°C	12	13	13	13				
P _{G.N.C.P.}	bar rel	9	8,8	8,8	8,6				
ΔH _{G.N.C.P.}	mm H ₂ O	45	72	92	132				
T [°] _{AIR COMP.}	°C	42,5	49	50	50				
T [°] _{SONDE}	°C	240	280	300	340				
T [°] _{Sortie}	°C	255	300	330	380				
T [°] _{G.N.C.C.}	°C								
P _{G.N.C.C.}	bar rel								
ΔH _{G.N.C.C.}	mm H ₂ O								
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	43	43	42,5	44				
a'CO ₂ Total	mv	0,16	0,168	0,165	0,189				
a'CO ₂ reel	mv	0,152	0,165	0,16	—				
a'CO	%								
a'O ₂		67	68,5	67,5	66				
T [°] _{Four}	°C								



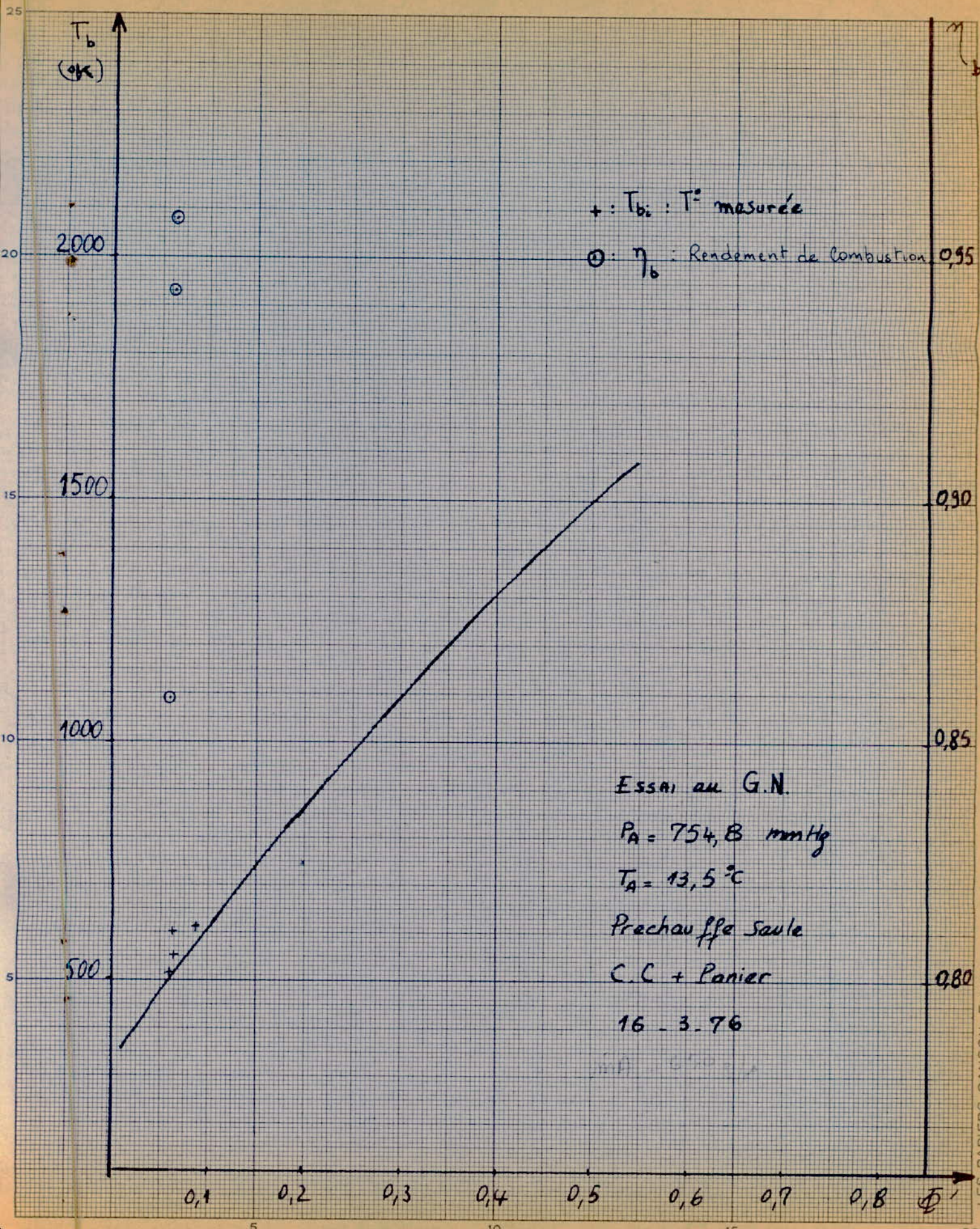
Date: 16.3.76

DEPOUILLEMENT

- Prechauffe seule

- Sans rallonge + panier

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu	10	9,8	9,8	9,6				
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$	285	286	286	286				
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3	7,97	7,78	7,78	7,62				
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s	2,647	3,308	3,740	4,433				
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	-	-	-	-				
$T_{G.N.C.C.}$	K	-	-	-	-				
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	-	-	-	-				
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	-	-	-	-				
T_{air}	$^{\circ}K$	315,5	322	323	323				
ρ_{air}	kg/m^3	1,223	1,223	1,223	1,223				
\dot{m}_{air}	g/s	647	647	643	654				
T_{sonde}	$^{\circ}K$	515	553	573	613				
T_{sortie}	$^{\circ}K$	528	573	603	653				
a'_{CO_2r}	%	0,55	0,69	0,66	-				
a'_{CO_2T}	%	0,64	0,72	0,70	0,95				
a_{CO}	%	-	-	-	-				
a'_{O_2}	%	16,75	17,12	16,87	16,5				
ϕ_g	$\frac{C/A}{\phi}$	0,062	0,078	0,089	0,100				
ϕ_l	$\frac{a'_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}} = \phi(\phi)$	0,059	0,066	0,064	0,087				
η_c	$\frac{a'_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}}$	0,859	0,958	0,943	-				



Date: 23 - 3 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,64 mv			
CO 6,3%				
CO 0,49%				
AIR				83,2

P _A = 758,8 mm Hg
T _A = 15,6 °C

- C-C + RALLONGE + PANIER

- SANS PRECHAUFFE

T _{GN.C.P.}	°C							
P _{GN.C.P.}	bar rel							
ΔH _{GN.C.P.}	mm H ₂ O							
T ^o _{AIR COMP.}	°C	46	45	45	46	46	46	46
T ^o _{SONDE}	°C	400	460	510	500	520	580	640
T ^o _{Sortie}	°C	550	620	670	660	650	710	870
T ^o _{GN.C.C.}	°C	15	14	11	14	14	10	8
P _{GN.C.C.}	bar rel	9	8,9	8,7	8,5	8,3	8	8
ΔH _{GN.C.C.}	mm H ₂ O	100	150	200	200	250	302	350
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	180	180	180	178	180	170	160
a'CO ₂ Total	mv	0,24	0,27	0,265	0,29	0,30	0,328	0,36
a'CO ₂ reel	mv	0,234	0,265	0,26	0,28	0,294	0,318	0,35
a'CO	%							
a'O ₂		71,4	68	-	67,5	66,5	64	61
T ^o _{Four}	°C							



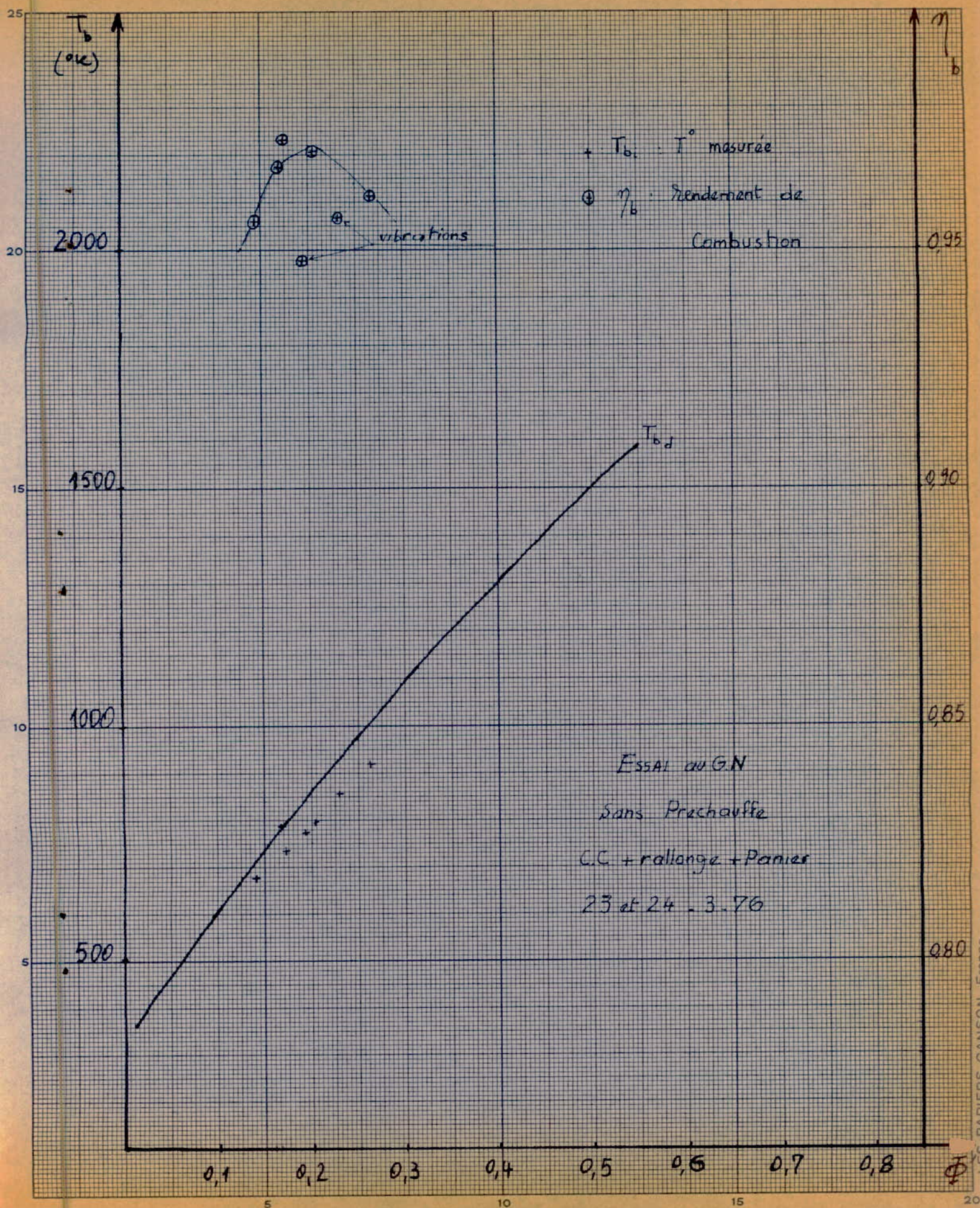
Date : 23-3-76

DEPOUILLEMENT

- C.C + rallonge + panier

- sans prechauffe

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu								
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$								
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3								
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s								
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	10	9,9	9,7	9,5	9,3	9	9	
$T_{G.N.C.C.}$	$^{\circ}K$	288	287	284	287	287	283	281	
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	7,891	7,839	7,762	7,522	7,364	7,227	7,279	
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	11,393	13,908	15,980	15,732	17,403	18,948	20,472	
T_{air}	$^{\circ}K$	319	318	318	319	319	319	319	
ρ_{air}	kg/m^3	1,215	1,215	1,215	1,216	1,216	1,216	1,216	
\dot{m}_{air}	g/s	1319	1319	1319	1312,9	1320	1283	1244	
T_{sonde}	$^{\circ}K$	673	733	783	773	793	853	913	
T_{sortie}	$^{\circ}K$	823	893	943	933	923	983	1143	
a'_{CO_2r}	%	1,49	1,84	1,78	2,000	2,156	2,422	2,777	
a'_{CO_2T}	%	1,56	1,89	1,84	2,111	2,222	2,533	2,888	
a_{CO}	%	-	-	-	-	-	-	-	
a'_{O_2}	%	17,85	17	-	16,875	16,625	16	15,25	
ϕ_g	$\frac{C.A}{\rho \cdot v}$	0,132	0,162	0,186	0,184	0,203	0,227	0,253	
ϕ_l	$\frac{a'_{CO_2r}}{\rho(\phi)}$	0,144	0,174	0,169	0,194	0,205	0,233	0,266	
η_c	$\frac{a'_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}}$	0,955	0,973	0,967	0,947	0,970	0,956	0,961	



A-CHAMBRE A TROUS CIRCULAIRES

Pour étudier l'état de combustion dans cette chambre on a procédé à l'exploration de celle-ci sur plusieurs sections :

- à la sortie de la chambre (zéro cm de profondeur)
- à 10 cm de profondeur
- à 20 cm de profondeur
- à 30 cm de profondeur
- à 35 cm de profondeur
- à 40 cm de profondeur
- à 42 cm de profondeur (juste en face de la rosace)

Sur les courbes $T_b = f(\phi)$ donnant la température théorique en fonction de la richesse ϕ : richesse locale donnée par l'analyse des gaz de combustion, sont reportés les points T_{bi} correspondants aux températures mesurées par le thermocouple placé sur la sonde et ceci pour chacune des sections.

Plus on pénètre à l'intérieur de la chambre (plus on se rapproche de la rosace) plus les points T_{bi} s'éloignent de la courbe théorique $T_b = f(\phi)$. L'écart devient appréciable à partir d'une profondeur de 20 cm (environ la moitié de la chambre).

Au delà de 30 cm de profondeur, quand la richesse augmente, on note que la température T_{bi} réellement mesurée est de beaucoup inférieure à la température théorique : l'écart allant de 300°C à 700°C. Ceci s'explique par le fait que la sonde refroidie, par transfert de chaleur, engendre une absorption de chaleur causant cette chute de T° , ceci d'une part. D'autre part, au delà de 30 cm, la combustion n'étant pas terminée une partie d'air froid arrivant du compresseur et n'ayant pas participé à la combustion occasionne un refroidissement des gaz qui, en plus de l'absence d'une bonne homogénéité de la combustion, au

delà de 30 cm, entraîne cette différence entre la T° théorique et celle mesurée.

N.B : de 0 à 30 cm de profondeur, la richesse locale est inférieure à l'unité ($\phi < 1$) et est déterminée à partir du CO_{2total} (CO étant pratiquement nul et le % d' O_2 appréciable). Par contre au delà de 30 cm de profondeur, cette richesse locale est supérieure à l'unité ($\phi > 1$); sa détermination se fait à partir de $CO_{2réel}$ (CO étant alors dans ces cas appréciable et l' O_2 négligeable)

voir fig

L'écart entre la richesse locale et globale augmente avec la profondeur. Ceci s'explique par le fait que la richesse globale rapporte le débit de G-N à la totalité du débit d'air fourni par le compresseur. En réalité la richesse est plus grande car c'est au débit d'air primaire participant seul à la combustion qu'il faut rapporter le débit de G-N (si le débit d'air diminue la richesse augmente). C'est ce qui se passe avec la richesse locale, plus on pénètre dans la chambre plus la concentration en CO_2 augmente d'où la richesse locale augmente.

Le rapport de mélange stochiométrique du G-N : C/A est de 0,0655. Sur la rosace, zone primaire, on mesure comme richesse locale $\phi = 0,8$ ce qui entraîne $C/A = 0,052$ (avec comme air primaire 13% environ du débit d'air total). A la sortie même de la chambre cet écart existe quoique faible, de l'ordre de 4%. L'explication vient du fait que l'air du Muft (10% environ) ne participe pas au mélange des gaz de combustion. L'utilisation d'un uniformiseur utilisant tout l'air débité par le compresseur réduit encore cet écart à 2% ($\phi_{loc} = \phi_{globale}$).

L'influence des pertes thermiques sur l'écart des T° théoriques et réelle est négligeable vu qu'à la sortie de la chambre, où il devrait y avoir le maximum de pertes (pertes à travers toute la longueur de la chambre) l'écart de T° est de $50^{\circ}C$ au maximum (on détaillera en annexe

le calcul de ces pertes thermiques).

Ci-dessous le tableau donnant le rendement de combustion moyen, les températures maximum, moyenne en fonction de la profondeur (caractéristiques de l'état de l'évolution de la combustion dans une chambre tubulaire à trous circulaires sous le régime correspondants à $\phi_{\text{global}} = 0,14$ ce qui équivaut à $C/A = 0,009$

Profondeur	Tmax °C	Tmoyenne °C	η_b moyen
section de sortie à 0 cm	670	530,4	0,970
section à 10 cm	770	532,6	0,974
section à 20 cm	1100	640,2	0,966
section à 30 cm	1300	918	0,958
section à 35 cm	1300	1072	0,864
section à 40 cm	1310	1107	0,682
section à 42 cm	1310	1027	-
section coupant les bras de la rosace	-	-	0,667

N.B/ Pour la température moyenne on a procédé à une approche en prenant la moyenne arithmétique; en réalité la température moyenne est donnée par la formule $T_{\text{moy}} = \frac{\sum m_i T_i}{\sum m_i}$ mais vu qu'on ne peut pas apprécier les débits partiels pour les isothermes, on s'est contenté de cette approche.

Remarque : la répartition des température au niveau de la rosace n'est que partiellement uniforme ceci étant dûe en partie à ce que le nombre de bras de la rosace n'assure pas une parfaite distribution du G-N. Une solution envisageable serait d'augmenter le nombre de bras.

Degré d'uniformité de la température en fonction de la profondeur

Si on tolère un écart de température $\Delta T = 200^{\circ}\text{C}$ sur chacune des

sections on aura: (régime choisi: $\Delta H = 78\text{mm H}_2\text{O}$; $\Delta H_{\text{GN}} = 50\text{mm H}_2\text{O}$)

- sur la section de sortie : 4/5 de la surface uniforme ($410^{\circ}\text{C}-610^{\circ}\text{C}$)
- à 10 cm de profondeur : 2/3 " " ($470^{\circ}\text{C}-670^{\circ}\text{C}$)
- à 20 cm de profondeur : 1/2 " " ($460^{\circ}\text{C}-660^{\circ}\text{C}$)
- à 30 cm de profondeur : 2/5 " " ($630^{\circ}\text{C}-830^{\circ}\text{C}$)
- à 35 cm de profondeur : 2/5 " " ($1000^{\circ}-1200^{\circ}$)
- à 40 cm de profondeur : 2/3 " " ($1100^{\circ}-1300^{\circ}$)
- sur la rosace: 42 cm de profondeur 2/3 " " ($1100^{\circ}-1310^{\circ}$)

Sur une même section la température varie, contrairement à la théorie qui considère un foyer idéal avec une température uniforme à l'entrée comme à la sortie de la chambre.

La répartition des température devient plus uniforme à la sortie de la chambre et accuse une moyenne uniformité au milieu de celle-ci

Cette uniformité est schématisée par la fig A.

On constate ainsi que la répartition de l'air secondaire et tertiaire (dilution) à travers les orifices du tube à flamme est correcte puisqu'on obtient la température la plus uniforme possible, juste à la sortie de la chambre.

La température maximum sur chaque section augmente avec la profondeur (de la sortie à l'entrée de la chambre).

- à la sortie de la chambre : $T_{\text{max}} = 670^{\circ}\text{C}$
- à 10 cm de profondeur : $T_{\text{max}} = 770^{\circ}\text{C}$
- à 20 cm de profondeur : $T_{\text{max}} = 1100^{\circ}\text{C}$
- à 30 cm de profondeur : $T_{\text{max}} = 1300^{\circ}\text{C}$

- à 35 cm de profondeur : $T_{\max} = 1300^{\circ}\text{C}$
- à 40 cm profondeur : $T_{\max} = 1310^{\circ}\text{C}$
- à 42 cm de profondeur : $T_{\max} = 1310^{\circ}\text{C}$

Ceci pour le régime G-N-air correspondant à $\phi_{\text{global}} = 0,14$:

($C/A = 0,0091$)

Il en est de même pour la température moyenne qui augmente aussi avec la profondeur.

En conclusion, on constate qu'en fin de combustion d'une part l'uniformité des températures est acceptable (4/5 de la section de sortie de la chambre), d'autre part la chute de température est de l'ordre de 500°C (écart entre les températures moyennes au niveau de la rosace et la sortie de la chambre).

L'utilisation de l'uniformiseur assure encore plus cette uniformité au dépend de la vitesse des gaz, autrement dit de la poussée; donc l'idée de l'uniformiseur est à retenir reste le côté technologique à étudier. Une solution de l'uniformité des températures serait d'augmenter théoriquement le nombre de fentes sur le tube de flamme, mais en pratique on est limité par sa résistance.

La fonction de dilution assurée par l'air secondaire et tertiaire dans notre cas est assez correcte.

Nous remarquons que 99% environ de la dilution se font sur une longueur de chambre de 30 cm : entre E et B; la fonction de dilution se termine pratiquement 10 cm avant la sortie : on fait remarquer que la dernière rangée de trous de dilution se situe à la même distance environ

- les trous du secondaire et du tertiaire assure la dilution d'une manière continue (la dilution du secondaire étant de 34% et celle du tertiaire de 65%)
- la chute de température occasionnée juste au niveau de la rosace

est dûe d'une part par un excès d'air provenant d'une combustion incomplète ($\eta_b = 0,7$), d'autre part à une absorption de la chaleur par la rosace constamment refroidie à l'intérieure par l'arrivée simultanée du G-N et de l'air relativement froids. (voir fig Tmax = f(l))

Le rendement de combustion moyen maximum est obtenu au niveau de la dernière rangée des trous du tertiaire (10 cm de la sortie)

$$(\eta_b = 0,974)$$

Il décroît avec la profondeur. Cette chute devient nette au delà de 30 cm de profondeur pour tomber à 0,67 au niveau de la rosace. Ceci s'explique par le fait que la combustion G-N - air n'a pas lieu instantanément, qu'elle est alors incomplète au niveau de la rosace et qu'elle évolue tout le long de la chambre: la combustion étant obligatoirement une fonction de la longueur de la chambre.

On note que 98% de la combustion sont assurés juste au niveau de la dernière rangée du secondaire (30 cm de profondeur). L'air secondaire permet à lui seul d'augmenter le rendement de combustion de l'ordre de 0,6 à 0,95 environ. Ceci montre que l'air secondaire assure beaucoup plus la continuité de la combustion que la dilution; par contre l'air tertiaire assure principalement la dilution .

Date : 25 - 3 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,645mv			
CO 6,3%				
CO 0,497%				
AIR				83,2

P_A = 763 mm Hg
 T_A = 14,5 °C

- C-C SEULE
- SANS PRECHAUFFE
-

T _{GN.C.P.}	°C								
P _{GN.C.P.}	bar rel								
ΔH _{GN.C.P.}	mm H ₂ O								
T ^o air COMP.	°C	44	45,5	45,7	46	46	46	46	46
T ^o SONDE	°C	580	520	590	540	510	530	540	520
T ^o Sortie	°C	560	580	550	570	570	570	570	560
T ^o GN.C.C.	°C	13	13	13	12	12	12	12	12
P _{GN.C.C.}	bar rel	9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
ΔH _{GN.C.C.}	mm H ₂ O	52	52	48	52	52	52	52	52
ΔH air Venturi	mm H ₂ O	80	80	88	89	89	88	78	78
a' CO ₂ Total	mv	0,318	0,301	0,314	0,292	0,280	0,293	0,292	0,274
a' CO ₂ reel	mv	0,308	0,291	0,310	0,289	0,2760	0,290	0,290	0,264
a' CO	%	-	-	-	-	-	-	-	-
a' O ₂		64,5	66	64	66,1	67,5	66,4	66	67
T ^o Four	°C								



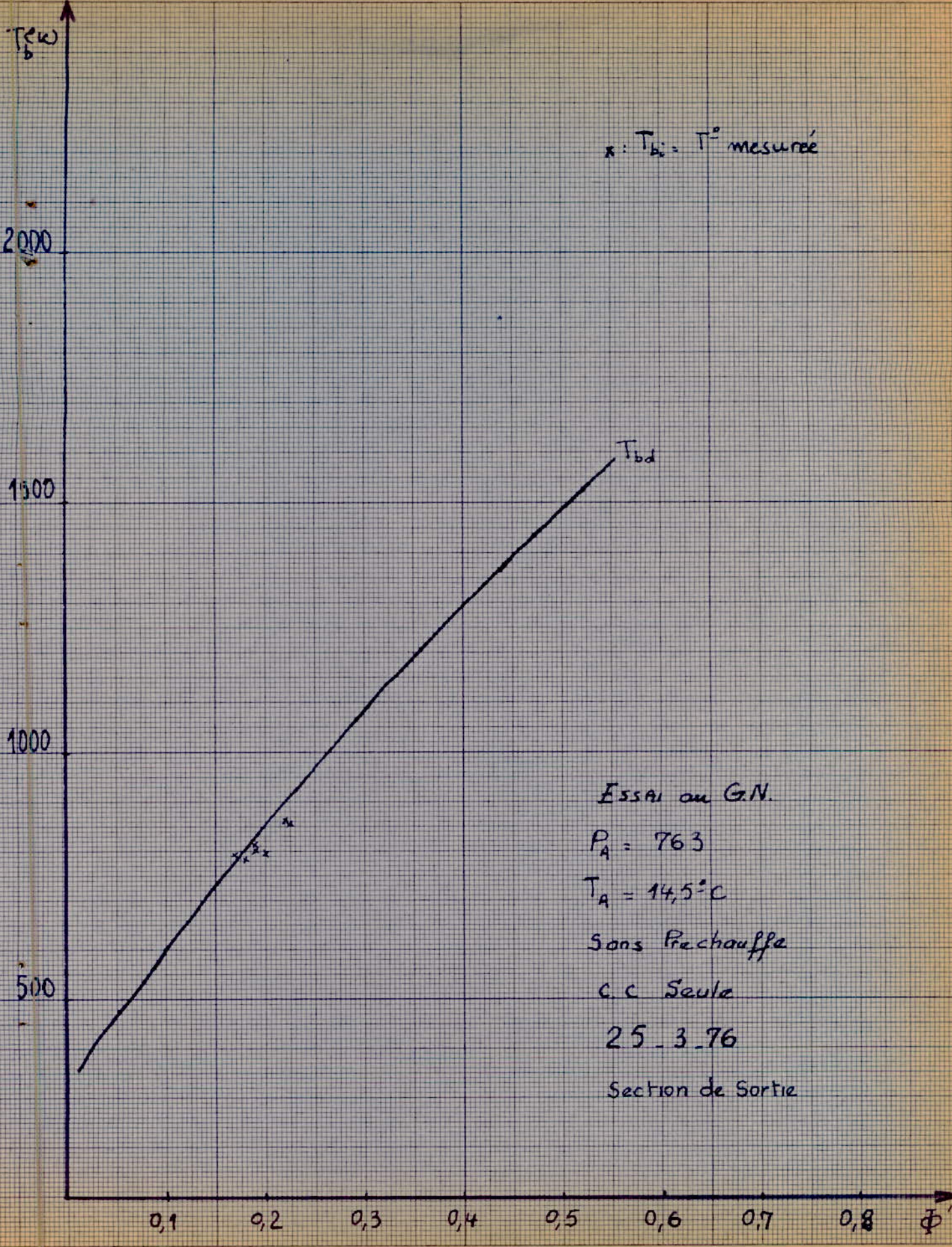
Date : 25-3-76

DEPOUILLEMENT

- C-C SEULE

- SANS PRECHAUFFE

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu								
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$								
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3								
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s								
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	10	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9
$T_{G.N.C.C.}$	$^{\circ}K$	286	286	286	285	285	285	285	285
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	7,946	7,946	7,946	7,974	7,974	7,974	7,974	7,974
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	8,244	8,244	7,921	8,259	8,259	8,259	8,259	8,259
T_{air}	$^{\circ}K$	317	318,5	318,7	319	319	319	319	319
ρ_{air}	kg/m^3	1,232	1,232	1,232	1,232	1,232	1,232	1,232	1,232
\dot{m}_{air}	g/s	885	885	874	880	880	874	874	874
T_{sonde}	$^{\circ}K$	853	793	863	813	783	803	813	793
T_{sortie}	$^{\circ}K$	833	823	823	843	843	843	843	833
a'_{CO_2r}	%	2,289	2,102	2,311	2,080	1,937	2,091	2,091	1,805
a'_{CO_2T}	%	2,400	2,212	2,355	2,113	1,980	2,124	2,113	1,915
a_{CO}	%	-	-	-	-	-	-	-	-
a'_{O_2}	%	16,125	16,500	16,000	16,525	16,875	16,600	16,500	16,750
ϕ_g	$\frac{C/A}{P_2}$	0,142	0,142	0,139	0,144	0,144	0,145	0,145	0,145
ϕ_l	$\frac{a'_{CO_2r}}{P(\phi)}$	0,225	0,205	0,220	0,190	0,180	0,190	0,190	0,170
η_c	$\frac{a'_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}}$	0,953	0,950	0,981	0,984	0,978	0,984	0,989	0,942



x: $T_b = T^{\circ}$ mesurée

Essai au G.N.

$P_A = 763$

$T_A = 14,5^{\circ}\text{C}$

Sans Prechauffe

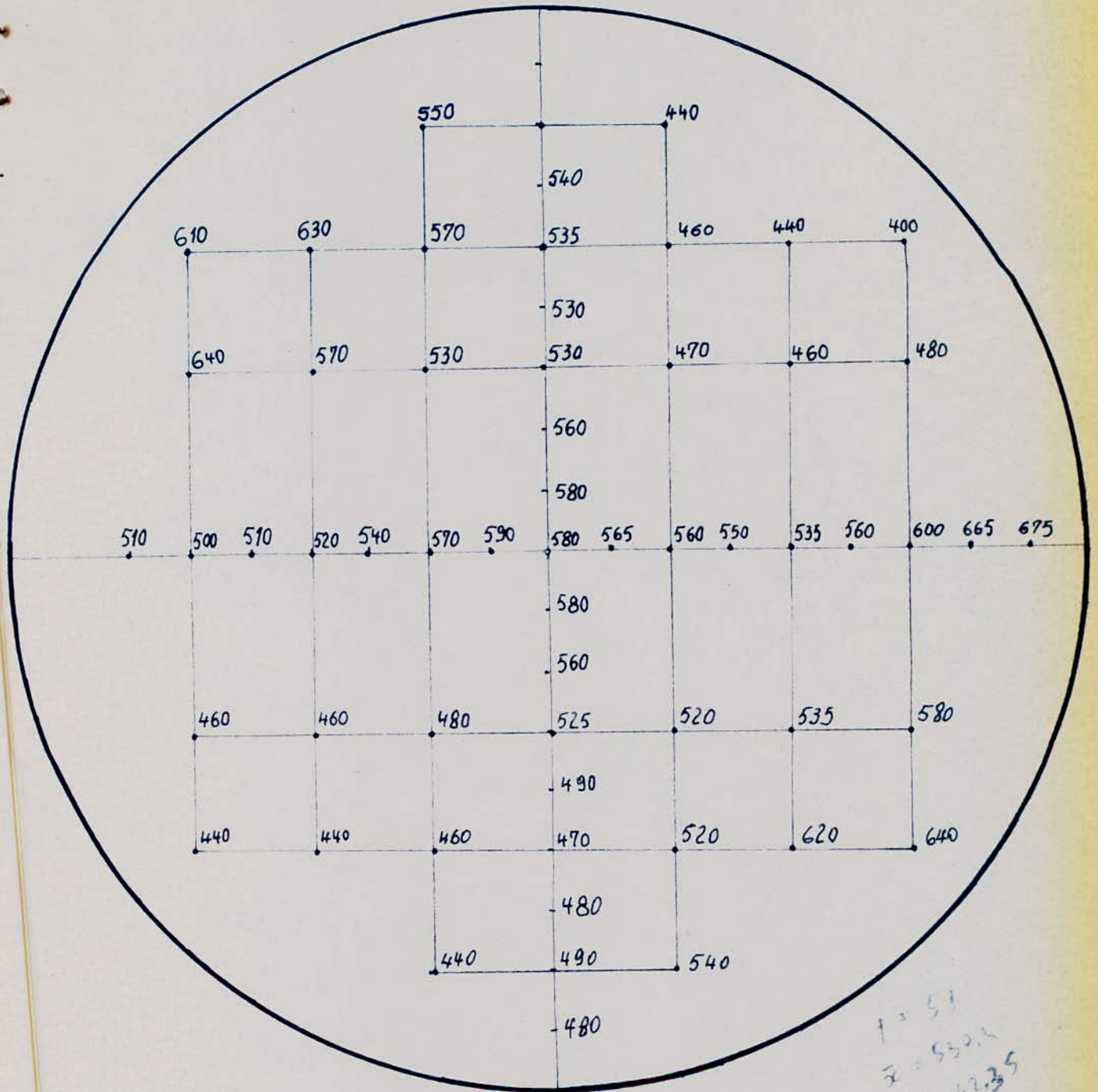
C.C. Seule

25-3-76

Section de Sortie

CHAMBRE A TROUS CIRCULAIRES

C.C. SEULE



$\bar{x} = 530.4$
 $\bar{y} = 62.35$

REPARTITION DES TEMPERATURES

25-3-76

SECTION DE SORTIE

regime

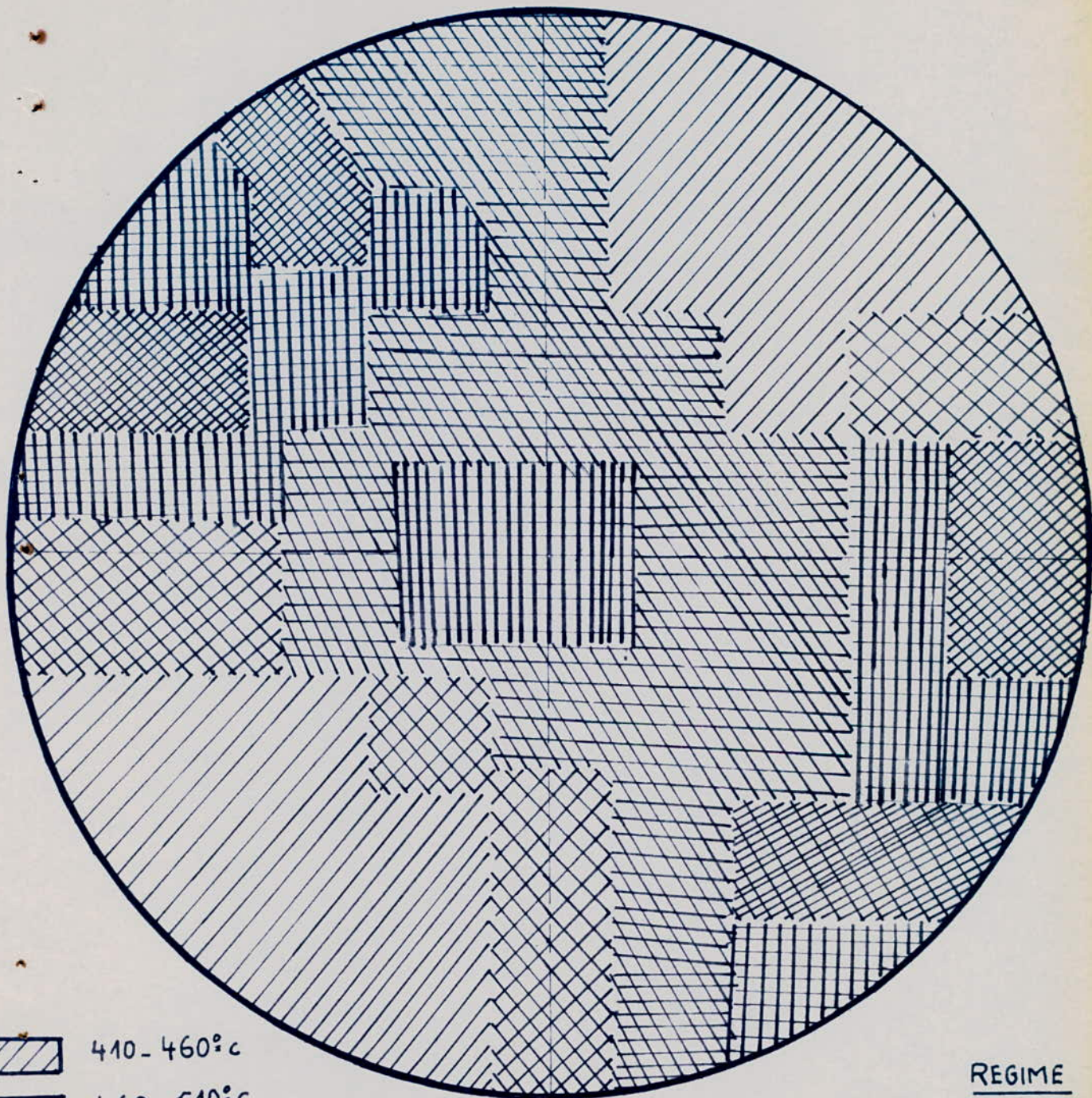
$\Delta H_{G.N.C.C.} : 50 \text{ mm H}_2\text{O}$






$\Delta H_{\text{air}} : 78 \text{ mm H}_2\text{O}$

CHAMBRE de COMBUSTION

A TROUS CIRCULAIRES

- C.C seule -



-  410 - 460°C
-  460 - 510°C
-  510 - 560°C
-  560 - 610°C
-  610 - 670°C

CARTE de REPARTITION des Températures

25-3-76

SECTION DE SORTIE

REGIME

$\Delta H = 50 \text{ mm H}_2\text{O}$
G.N.C.C

$\Delta H_{\text{air}} = 78 \text{ mm}$
H₂O

Date : 29 - 3 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,64 mv			
CO 63%				
CO 0,49%				
AIR				83,2

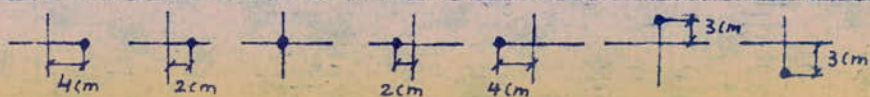
P _A = 762,2 mm Hg
T _A = 15,5 °C

- C₂C SEULE

- SANS PRECHAUFFE

- SECTION A 10 CM DE PROFON-
DEUR

T _{GN.C.P}	°C							
P _{GN.C.P}	bar rel							
ΔH _{GN.C.P}	mm H ₂ O							
T° AIR COMP	°C	46	47	47	47	47	47	47
T° SONDE	°C	500	580	710	625	560	520	630
T° Sortie	°C	560	565	560	570	570	565	585
T° GN.C.C.	°C	15	14,5	14,2	14	13	13	13
P GN.C.C.	bar rel	9	9	9	9	9	9	9
ΔH GN.C.C.	mm H ₂ O	50	50	50	50	50	50	50
ΔH air Venturi	mm H ₂ O	78	78	78	78	78	78	78
d'CO ₂ Total	mv	0,276	0,319	0,380	0,327	0,317	0,288	0,334
d'CO ₂ reel	mv	0,273	0,313	0,377	0,316	0,310	0,284	0,329
d'CO	%							
d'O ₂		68,8	65	60	65	65,9	68,2	64,8
T° Four	°C							



Date : 29.3.76

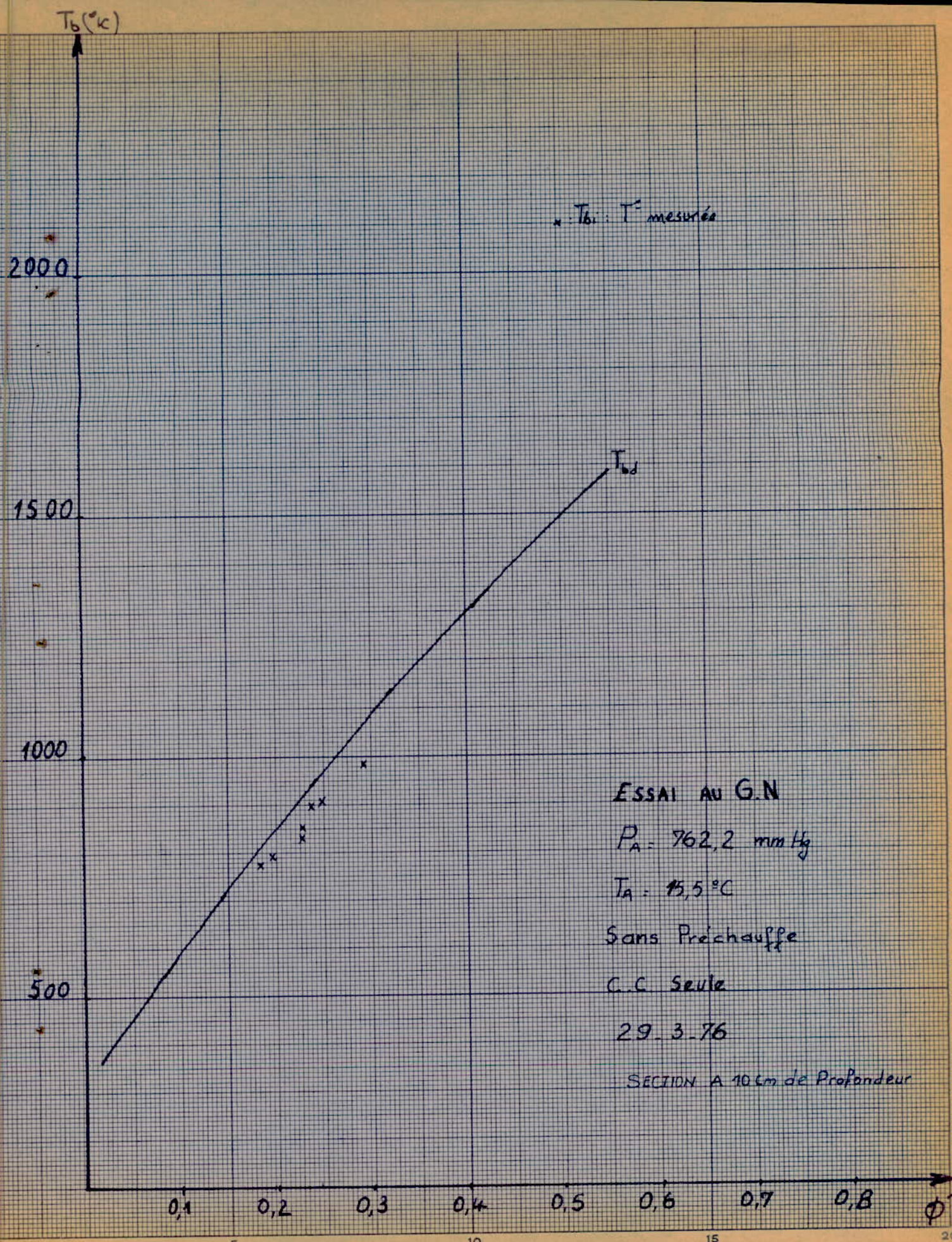
DEPOUILLEMENT

- C.C. SEULE

- Sans préchauffe

- Section à 10 cm de prof.

$P_{GN.C.P}$	bar absolu							
$T_{GN.C.P}$	$^{\circ}K$							
$\rho_{GN.C.P}$	kg/m^3							
$\dot{m}_{GN.C.P}$	g/s							
$P_{GN.C.C.}$	bar absolu	10	10	10	10	10	10	10
$T_{GN.C.C.}$	$^{\circ}K$	288	287,5	287,2	287	286	286	286
$\rho_{GN.C.C.}$	kg/m^3	7,891	7,905	7,913	7,918	7,946	7,946	7,946
$\dot{m}_{GN.C.C.}$	g/s	8,056	8,063	8,067	8,070	8,084	8,084	8,084
T_{air}	$^{\circ}K$	319	320	320	320	320	320	320
ρ_{air}	kg/m^3	1,227	1,227	1,227	1,227	1,227	1,227	1,227
\dot{m}_{air}	g/s	873	873	873	873	873	873	873
T_{sonde}	$^{\circ}K$	773	853	983	898	833	793	903
T_{sortie}	$^{\circ}K$	833	838	833	843	843	838	838
a_{CO_2r}	%	1,922	2,366	3,077	2,400	2,333	2,044	2,544
a_{CO_2T}	%	1,955	2,433	3,111	2,522	2,411	2,088	2,600
a_{CO}	%	-	-	-	-	-	-	-
a_{O_2}	%	17,200	16,250	15	16,250	16,475	17,200	16,200
ϕ_g	$\frac{C/A}{P}$	0,1419	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142
ϕ_L	$\frac{a_{CO_2r}}{P(\phi)}$	0,183	0,228	0,291	0,236	0,226	0,195	0,243
η_c	$\frac{a_{CO_2r}}{a_{CO_2T}}$	0,983	0,972	0,989	0,950	0,967	0,978	0,978



ESSAI AU G.N

$P_A = 762,2 \text{ mm Hg}$

$T_A = 15,5 ^{\circ}C$

Sans Préchauffe

C.C. seule

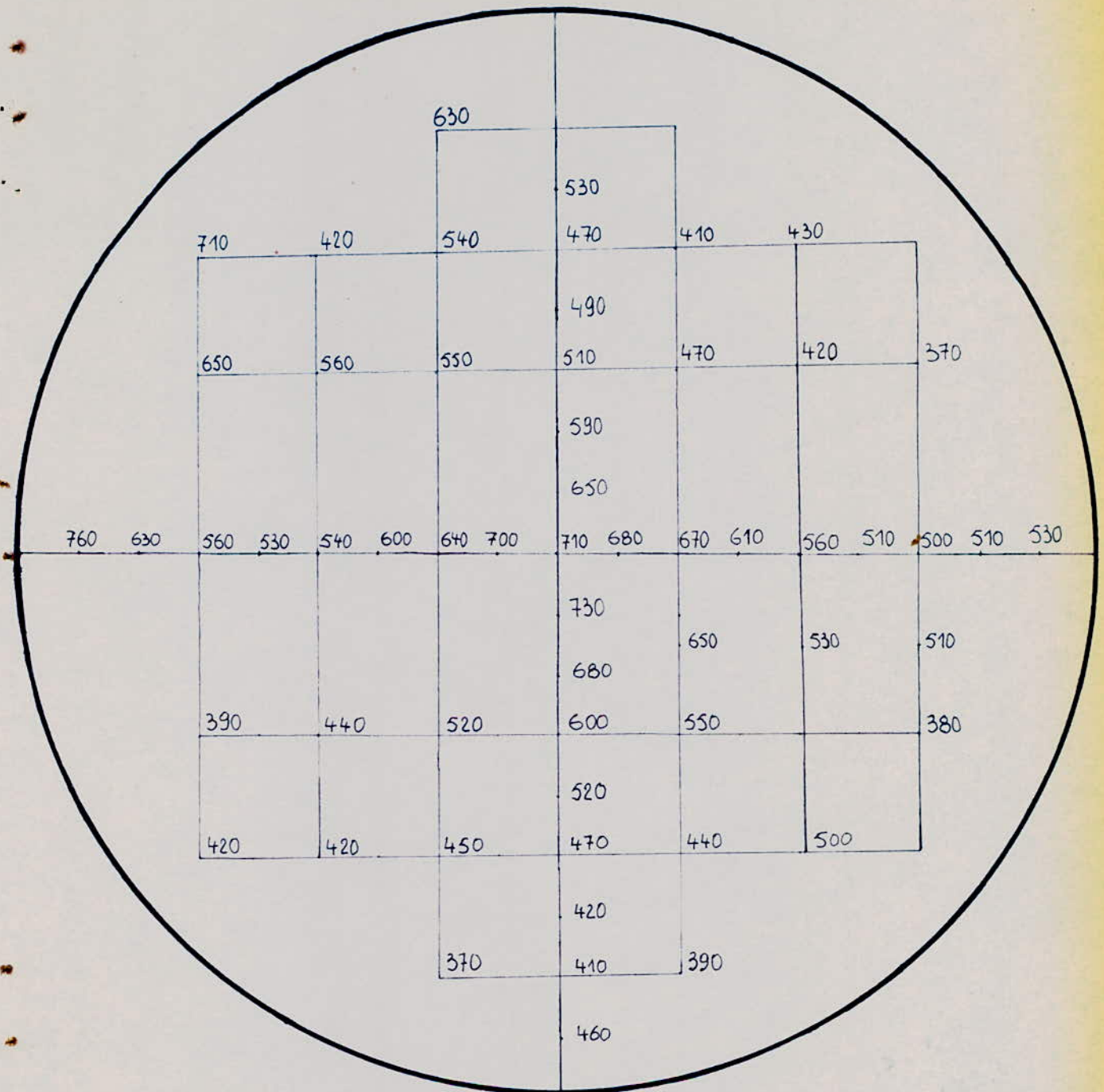
29.3.76

SECTION A 10 cm de Profondeur

CHAMBRE de COMBUSTION

A TROUS CIRCULAIRES

C.C SEULE



REPARTITION des TEMPERATURES

27-3-76

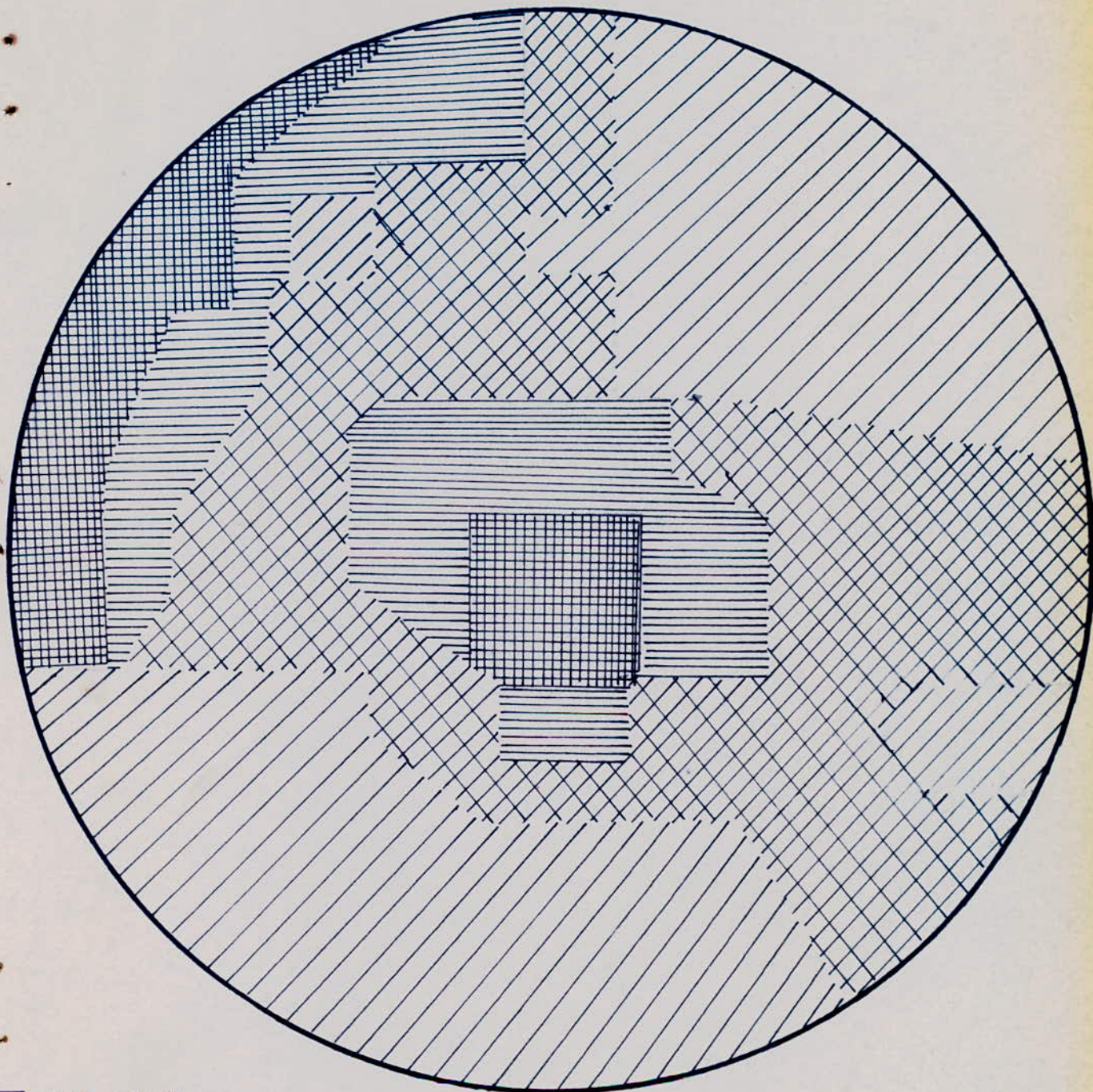
SECTION A 10cm de Profondeur





REGIME : $\Delta H_{G.N.C} = 50 \text{ mm H}_2\text{O}$ $P_A = 766,3 \text{ mm Hg}$
 $\Delta H_{AIR} = 78 \text{ mm H}_2\text{O}$ $T_A = 15,2^\circ \text{C}$

CHAMBRE de COMBUSTION

A TROUS CIRCULAIRES

C.C SEULE



-  370 - 470 °C
-  470 - 570 °C
-  570 - 670 °C
-  670 - 770 °C

CARTE de REPARTITION des TEMPERATURES

27-3-76

SECTION A 10 cm de Profondeur

REGIME : $\Delta H_{NCC} = 50 \text{ mm H}_2\text{O}$ $P_A = 766,3 \text{ mm Hg}$
 $\Delta H_{AIR} = 78 \text{ mm H}_2\text{O}$ $T_A = 15^\circ \text{C}$

Date : 30 - 3 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,64			
CO 6,3%				
CO 0,49%				
AIR				83,2

$P_A = 761,2$ mm Hg
$T_A = 15,2$ °C

- C-C SEULE
- SANS PRECHAUFFE
- SECTION A 20 CM DE PROFONDEUR

T _{GN.C.P.}	°C							
P _{GN.C.P.}	bar rel							
ΔH _{GN.C.P.}	mm H ₂ O							
T ^o air COMP	°C	46	47	47	47,3	47,5	47,5	47,5
T ^o sonde	°C	580	770	980	960	500	710	850
T ^o Sortie	°C	570	570	570	570	570	570	570
T ^o GN.C.C.	°C	14	14	14	13,51	13	13	13
P _{GN.C.C.}	bar rel	9	9	9	9	9	9	9
ΔH _{GN.C.C.}	mm H ₂ O	50	50	50	50	50	50	50
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	78	78	78	78	78	78	78
a' CO ₂ Total	mV	0,300	0,407	0,549	0,490	0,270	0,362	0,430
a' CO ₂ net	mV	0,292	0,402	0,537	0,478	0,26	0,350	0,425
a' CO	%							
a' O ₂		66,8	56,6	43,6	48,5	69,5	61,5	55
T ^o Four	°C							



DATE: 30.3.76

DEPOUILLEMENT

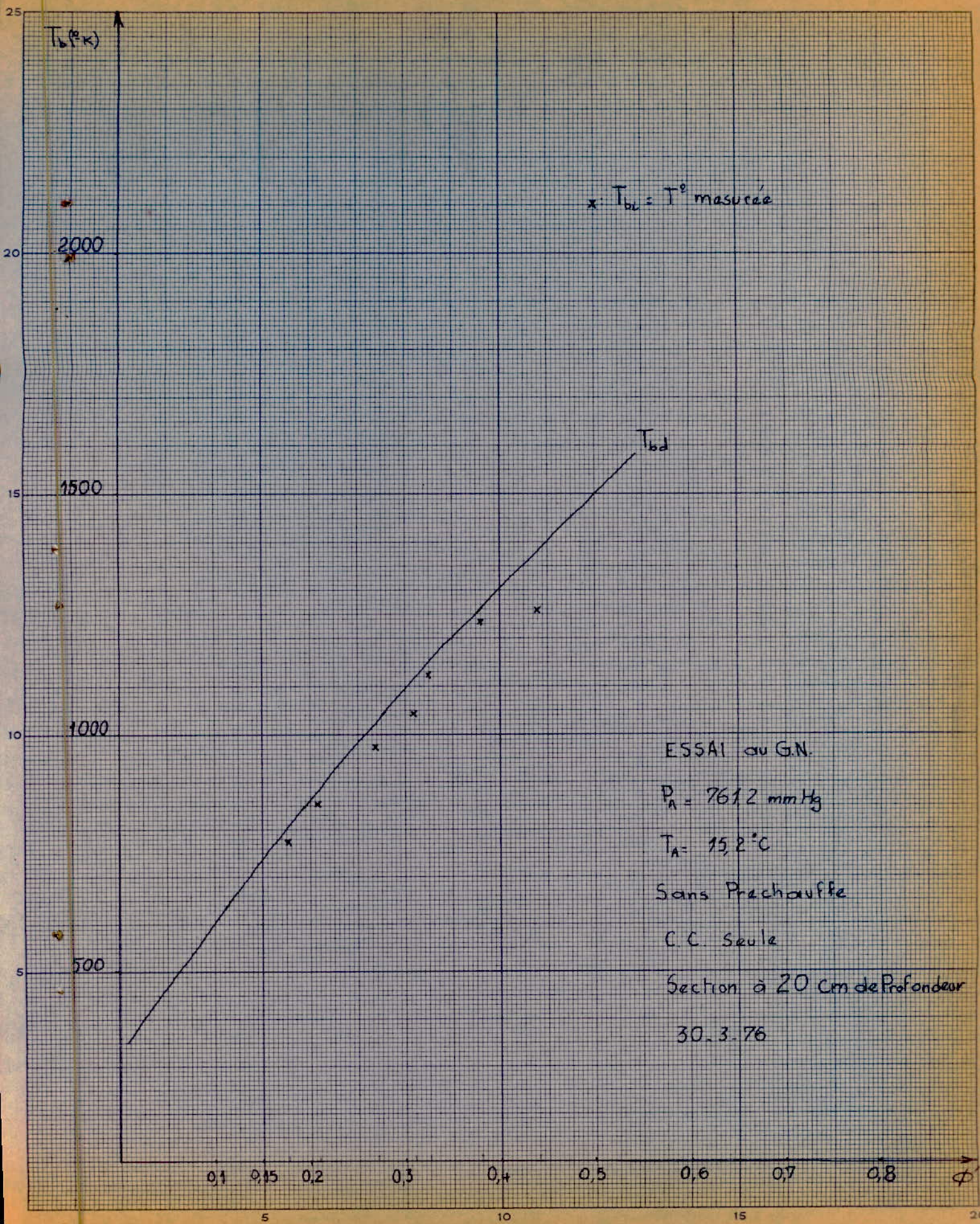
- C.C SEULE

- SECTION A 20 cm de

profondeur

- SANS PRECHAUFFE

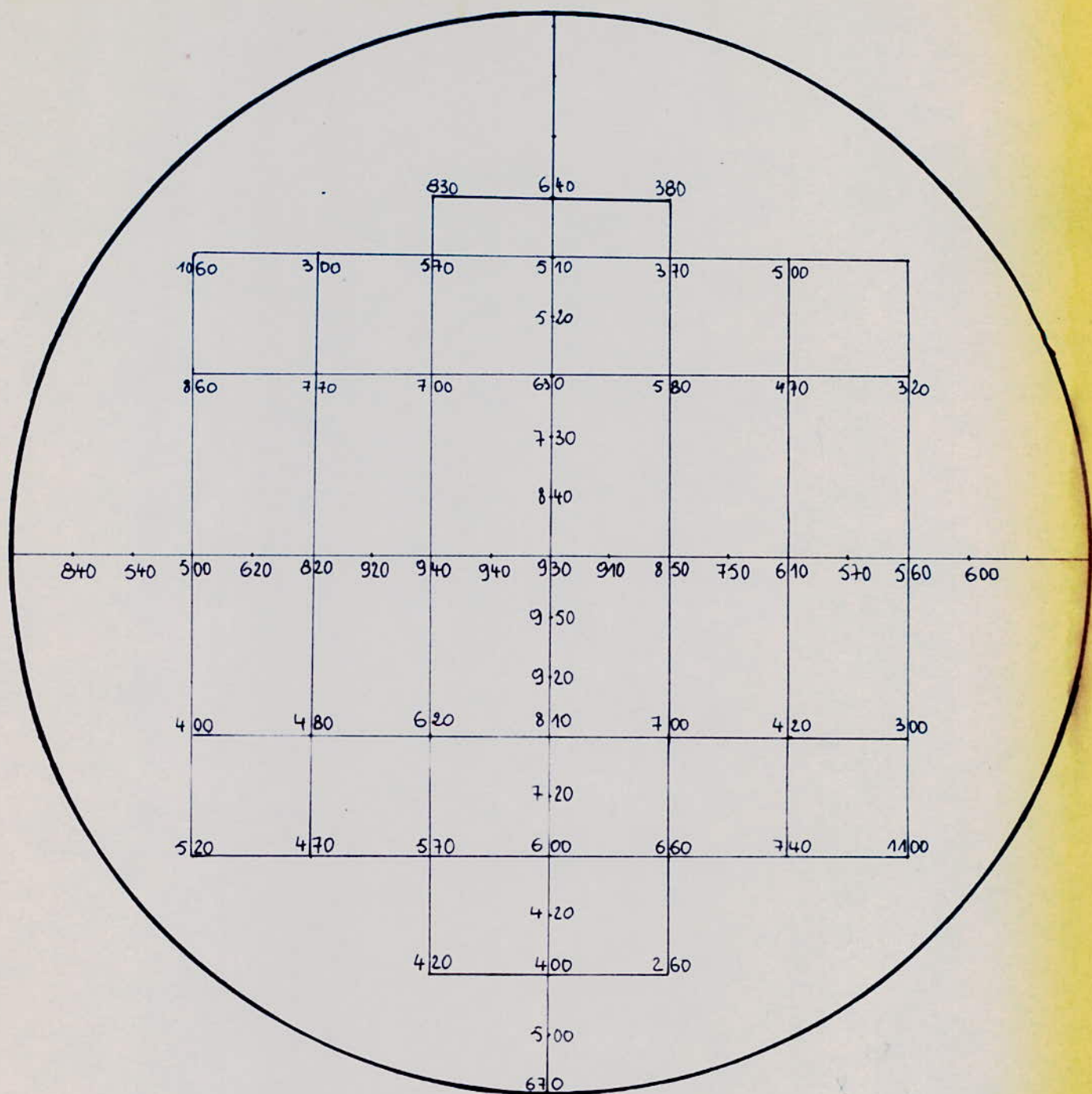
$P_{G.N.C.P}$	bar c. solu								
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$								
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3								
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s								
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	10	10	10	10	10	10	10	
$T_{G.N.C.C.}$	$^{\circ}K$	287	287	287	286,5	286	286	286	
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	7,918	7,918	7,918	7,932	7,946	7,946	7,946	
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	8,070	8,070	8,070	8,077	8,084	8,084	8,084	
T_{air}	$^{\circ}K$	319	320	320	320,3	320,5	320,5	320,5	
ρ_{air}	kg/m^3	1,226	1,226	1,226	1,226	1,226	1,226	1,226	
\dot{m}_{air}	g/s	872	872	872	872	867	867	867	
T_{sonde}	$^{\circ}K$	853	1043	1253	1233	773	983	1123	
T_{sortie}	$^{\circ}K$	843	843	843	843	843	843	843	
a'_{CO_2r}	%	2,133	3,355	4,855	4,20	1,777	2,777	3,611	
a'_{CO_2T}	%	2,222	3,411	4,988	4,333	1,888	2,911	3,666	
a_{CO}	%								
a'_{O_2}	%	16,700	14,150	10,900	12,125	17,375	15,375	13,750	
Φ_g	$\frac{c/A}{\dot{m}}$	0,142	0,142	0,142	0,142	0,147	0,147	0,147	
Φ_l	$\frac{a'_{CO_2r}}{\dot{m}}$	0,208	0,310	0,440	0,380	0,177	0,270	0,325	
η_c	$\frac{a'_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}}$	0,959	0,983	0,973	0,969	0,941	0,953	0,984	



CHAMBRE DE COMBUSTION

A TROUS CIRCULAIRES

C.C SEULE



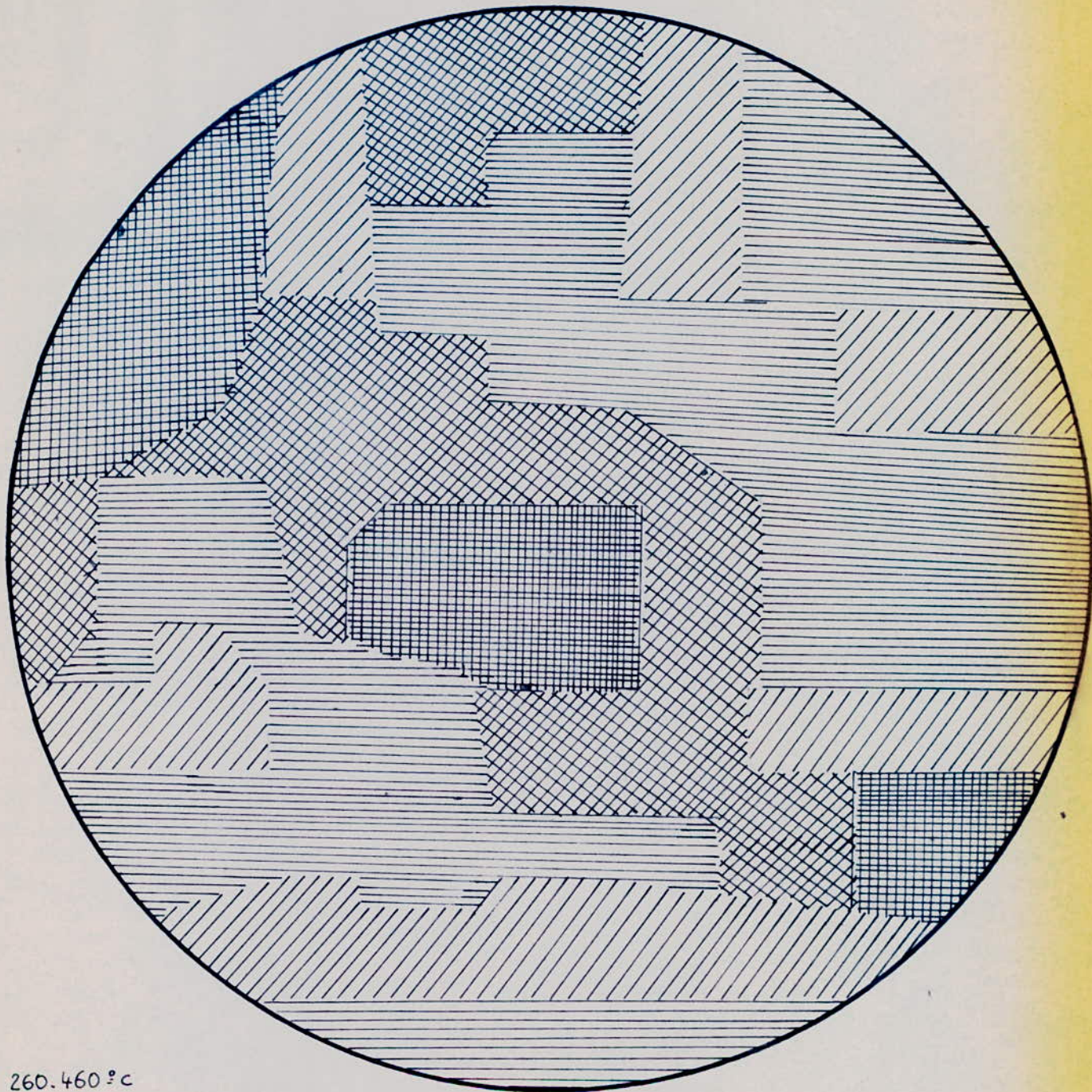
REPARTITION DES TEMPERATURES


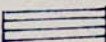

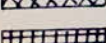
29.3.76

SECTION A 20 cm DE PROFONDEUR

REGIME : $\Delta H_{G.N.C.C} = 50 \text{ mm H}_2\text{O}$
 $\Delta H_{Air} = 78 \text{ mm H}_2\text{O}$

CHAMBRE DE COMBUSTION
A TROUS CIRCULAIRES
C.C. SEULE



-  260. 460 °c
-  460. 660 °c
-  660. 860 °c
-  860. 1100 °c

CARTE DE REPARTITION DES TEMPERATURES

29.3.76

SECTION A 20cm DE PROFONDEUR

REGIME : $\Delta H_{GN.c.c.} = 50 \text{ mmH}_2\text{O}$

$\Delta H_{AIR} = 78 \text{ mmH}_2\text{O}$

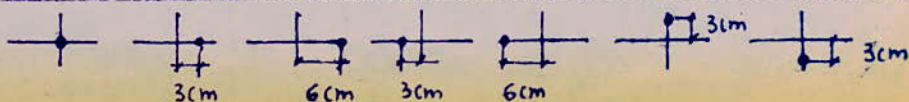
Date : 30 - 3 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,64 mv			
CO 63%				
CO 0,49%				
AIR				83,2

P _A = 760	mm Hg
T _A = 16	°C

- o-c seule
- sans préchauffe
- section à 30 cm de profondeur

T _{AN.C.P}	°C							
P _{GN.C.P}	bar rel							
ΔH _{GN.C.P}	mm H ₂ O							
T ^o air COMP	°C	47	47	47,5	47	47	47	47
T ^o sonde	°C	1170	960	780	1040	990	1130	960
T ^o sortie	°C	530	540	540	540	545	540	535
T ^o GN.C.C.	°C	15	15	14,4	14	14	14	14
P _{GN.C.C.}	bar rel	9	9	9	9	9	9	9
ΔH _{GN.C.C.}	mm H ₂ O	50	50	50	50	50	50	50
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	80	80	80	80	80	80	80
a' CO ₂ Total	mv	0,74	0,533	0,340	0,570	0,530	0,702	0,490
a' CO ₂ réel	mv	0,70	0,520	0,338	0,553	0,50	0,668	0,480
a' CO	%							
a O ₂		23	43,5	63	40	44	27	47,6
T ^o Four	°C							



Date : 30.3.76

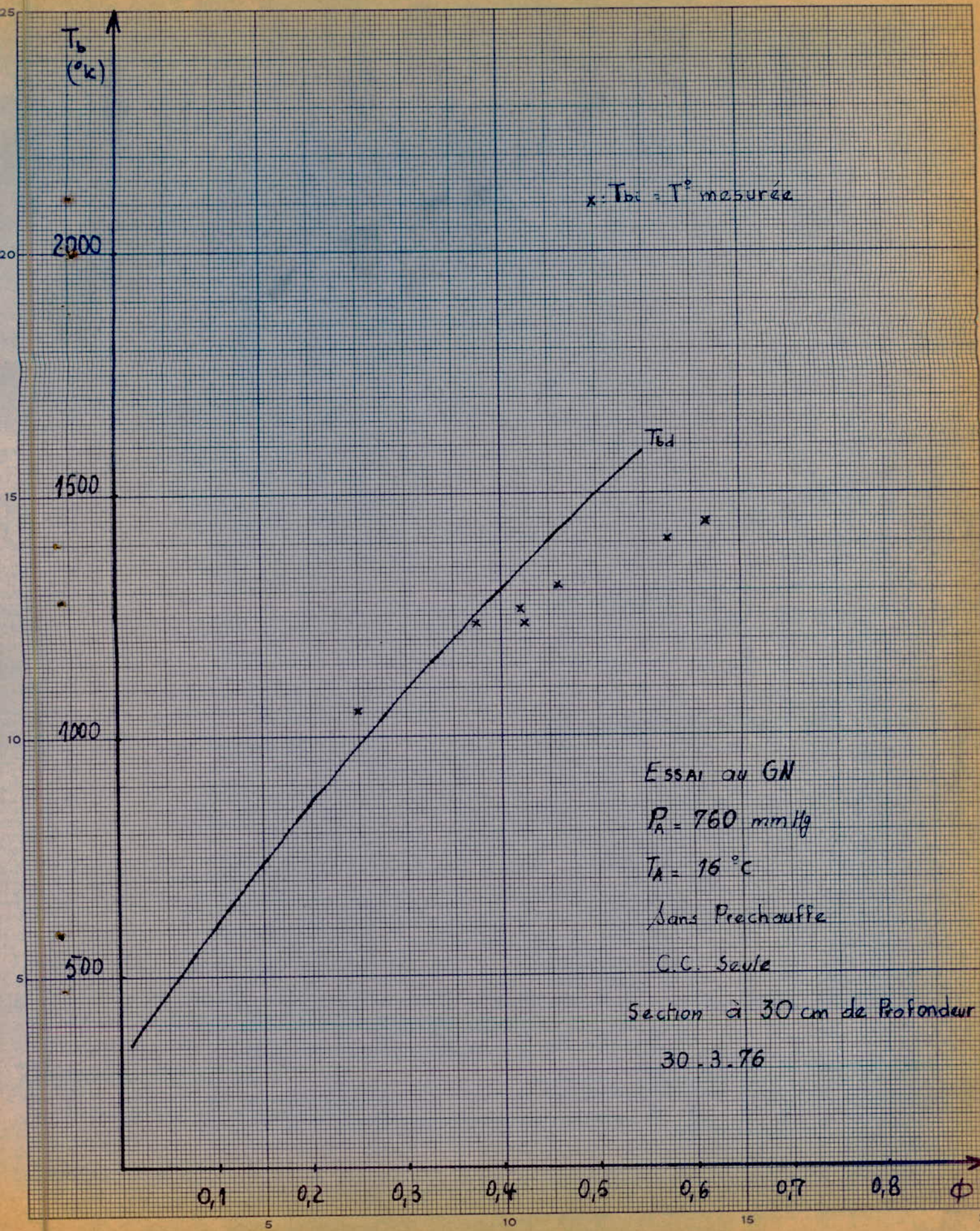
DEPOUILLEMENT

- C.C. seule

- sans préchauffe

- section à 30 cm de prof.

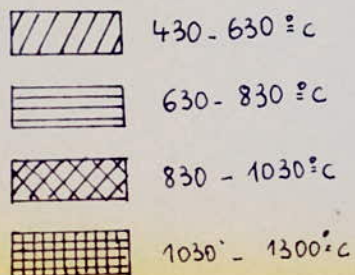
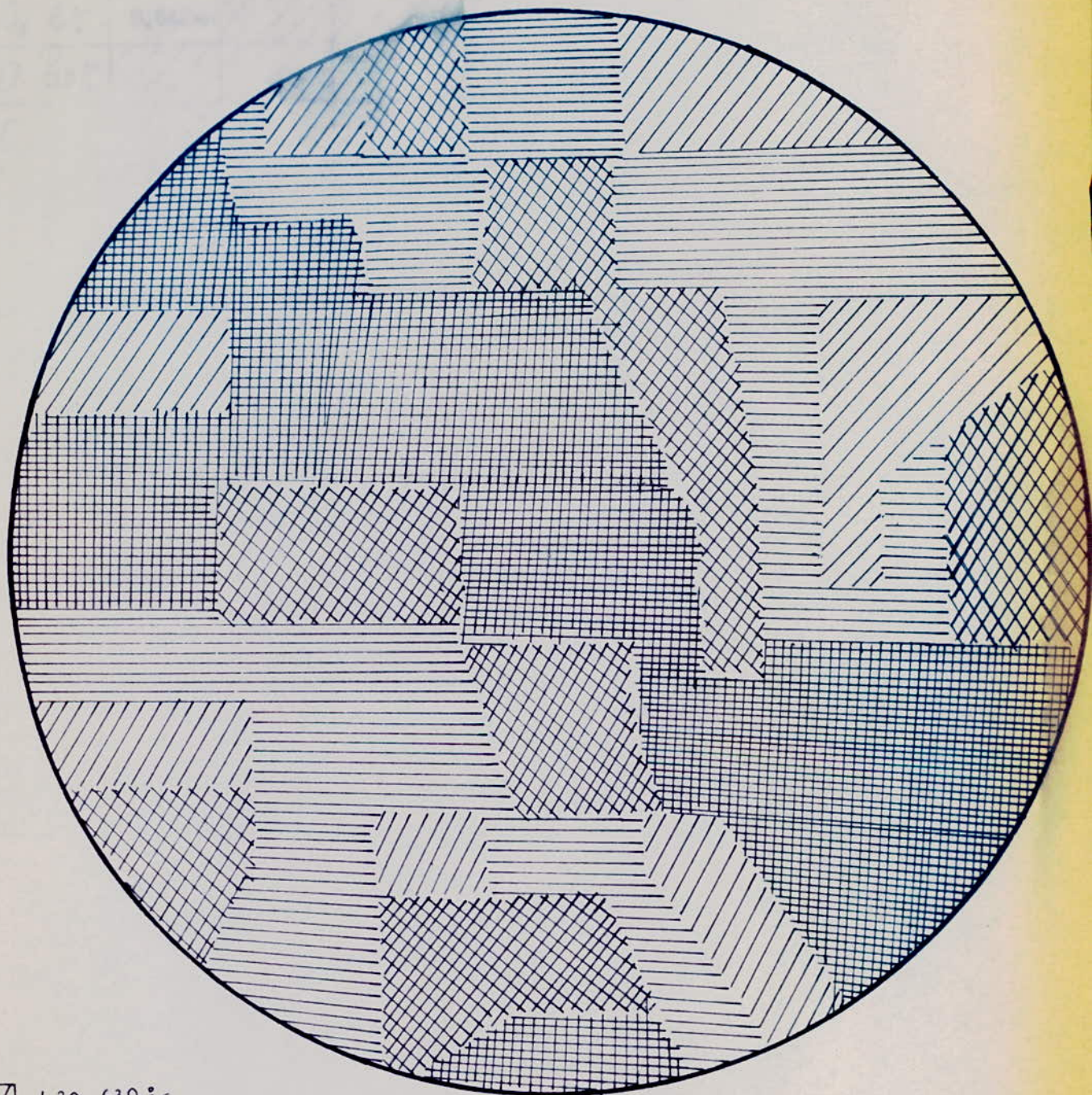
$P_{G.N.C.P}$	bar absolu							
$T_{G.N.C.P}$	°K							
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3							
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s							
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	10	10	10	10	10	10	10
$T_{G.N.C.C.}$	°K	288	288	287,4	287	287	287	287
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	7,891	7,891	7,907	7,918	7,918	7,918	7,918
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	8,056	8,056	8,064	8,070	8,070	8,070	8,070
T_{air}	°K	320	320	320,5	320	320	320	320
ρ_{air}	kg/m^3	1,221	1,221	1,221	1,221	1,221	1,221	1,221
\dot{m}_{air}	g/s	881	881	881	881	881	881	881
T_{sonde}	°K	1443	1233	1053	1313	1263	1403	1233
T_{sortie}	°K	803	813	813	813	818	813	808
a'_{CO_2r}	%	6,666	4,666	2,644	5,033	4,444	6,311	4,222
a'_{CO_2T}	%	7,111	4,811	2,666	5,222	4,777	6,688	4,333
a_{CO}	%	-	-	-	-	-	-	-
a'_{O_2}	%	5,750	10,875	15,750	10	11	6,75	11,900
ϕ_g	$\frac{c/A}{f_A}$	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140
ϕ_l	$\frac{a'_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}} = f(\phi)$	0,615	0,425	0,249	0,460	0,420	0,580	0,380
η_c	$\frac{a'_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}}$	0,937	0,969	0,991	0,963	0,930	0,943	0,974



CHAMBRE DE COMBUSTION

A TROUS CIRCULAIRES

c.c. seule



CARTE DE RÉPARTITION DES TEMPERATURES

30-3-76

SECTION A 30cm DE Profondeur

Régime : $\Delta H_{G.N.c.c.} = 50 \text{ mm H}_2\text{O}$

$\Delta H_{AIR} = 80 \text{ mm H}_2\text{O}$

$P_A = 761 \text{ mm Hg}$

$T_A = 16^\circ \text{C}$

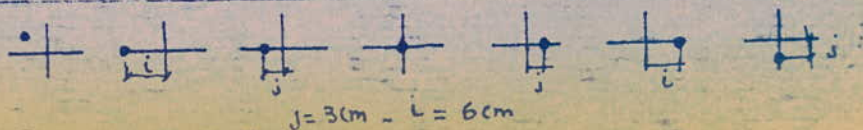
Date : 31 - 3 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,642 mV			
CO 63%				
CO 0,49%				
AIR				83,2

P _A = 758,9 mm Hg
T _A = 16,2 °C

- C-C SEULE
- SANS PRECHAUFFE
- SECTION A 35 CM DE PRO-FONDEUR

T _{G.N.C.P.}	°C							
P _{G.N.C.P.}	bar rel							
ΔH _{G.N.C.P.}	mm H ₂ O							
T [°] air COMP	°C	47	47,5	47,5	47,5	47,5	47,5	47,5
T [°] sonde	°C	1210	1170	1200	1250	940	1180	1250
T [°] sortie	°C	550	555	555	545	550	550	555
T [°] G.N.C.C.	°C	15	14,5	14	13,4	13,4	13,4	13,4
P _{G.N.C.C.}	bar rel	9	9	9	9	9	9	9
ΔH _{G.N.C.C.}	mm H ₂ O	50	50	50	50	50	50	50
ΔH air Venturi	mm H ₂ O	83	82	82	82	82	82	82
a' CO ₂ Total	mV	0,907	0,770	0,8370	0,95	0,469	0,64	0,96
a' CO ₂ reel	mV	0,758	0,69	0,727	0,816	0,44	0,599	0,80
a' CO	%	-	-	-	-	-	-	-
a' O ₂		8	21	14	3	51,4	35,6	4,2
T [°] Four	°C							



Date : 31-3-76

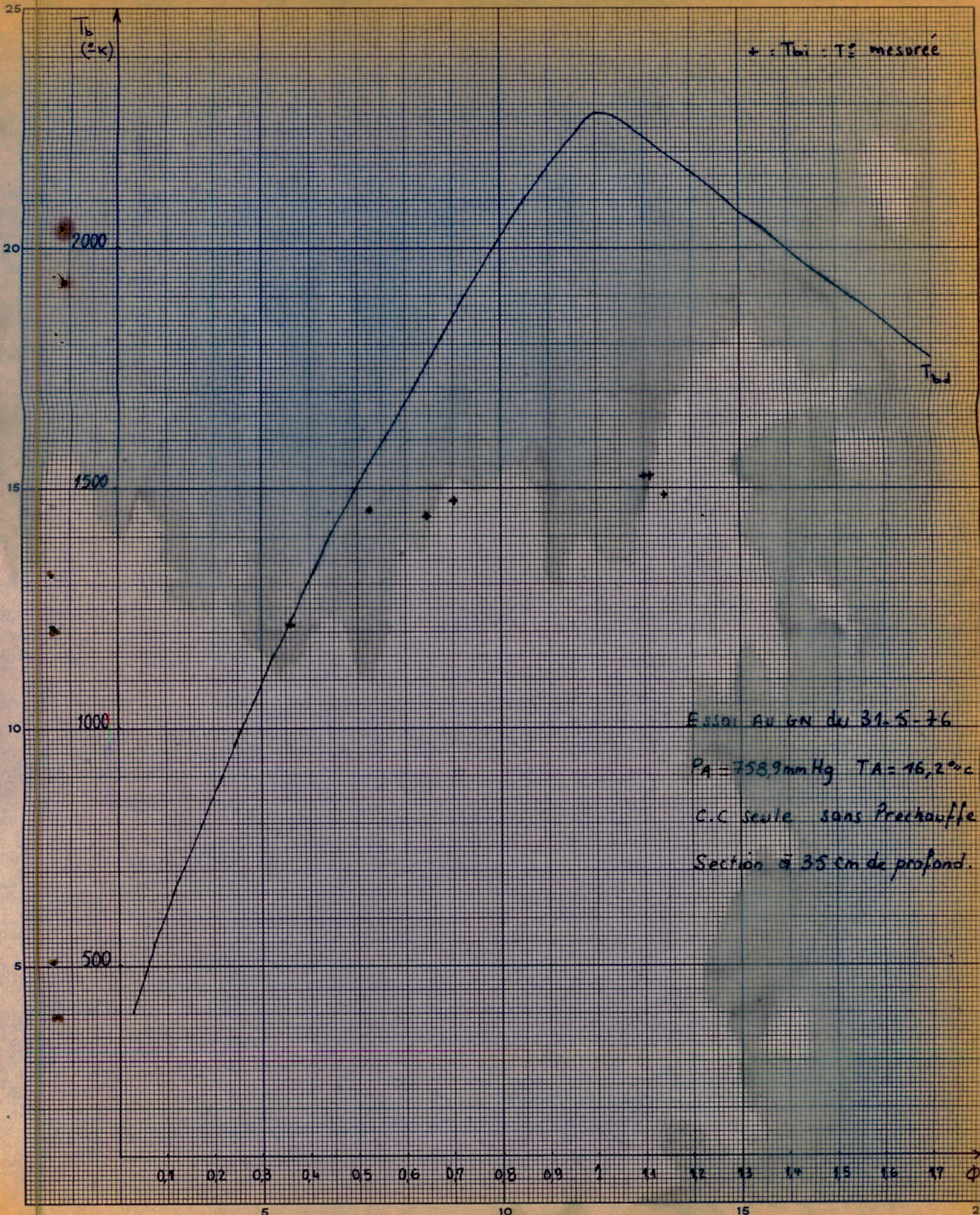
DEPOUILLEMENT

- c.c. seule

- sans prechauffe

- Section à 35 cm de
profondeur

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu							
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$							
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3							
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s							
$P_{G.N.C.C.}$	bar absolu	10	10	10	10	10	10	10,1
$T_{G.N.C.C.}$	$^{\circ}K$	288	287,5	287	286,4	286,4	286,4	286,4
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	7,891	7,905	7,918	7,935	7,935	7,935	7,935
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	8,056	8,063	8,070	8,079	8,079	8,079	8,079
T_{air}	$^{\circ}K$	320	320,5	320,5	320,5	320,5	320,5	320,5
ρ_{air}	kg/m^3	1,218	1,218	1,218	1,218	1,218	1,218	1,218
\dot{m}_{air}	g/s	897	891,8	891,8	891,8	891,8	891,8	891,8
T_{sonde}	$^{\circ}K$	1483	1443	1473	1523	1213	1453	1523
T_{sortie}	$^{\circ}K$	823	828	828	818	823	823	828
$a'_{CO_2,r}$	%	7,284	6,531	6,941	7,926	3,763	5,524	7,749
$a'_{CO_2,T}$	%	8,933	7,417	8,158	9,409	4,085	5,977	8,520
a_{CO}	%	-	-	-	-	-	-	-
a'_{O_2}	%	2,00	5,25	3,50	0,75	12,05	8,90	1,05
ϕ_g	$\frac{c/A}{\rho}$	0,138	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139
ϕ_l	$\frac{a'_{CO_2,r}}{\rho(\phi)}$	1,14	0,64	0,70	1,11	0,365	0,523	1,1
η_c	$\frac{a'_{CO_2,r}}{a'_{CO_2,T}}$	0,815	0,880	0,851	0,842	0,921	0,924	0,814

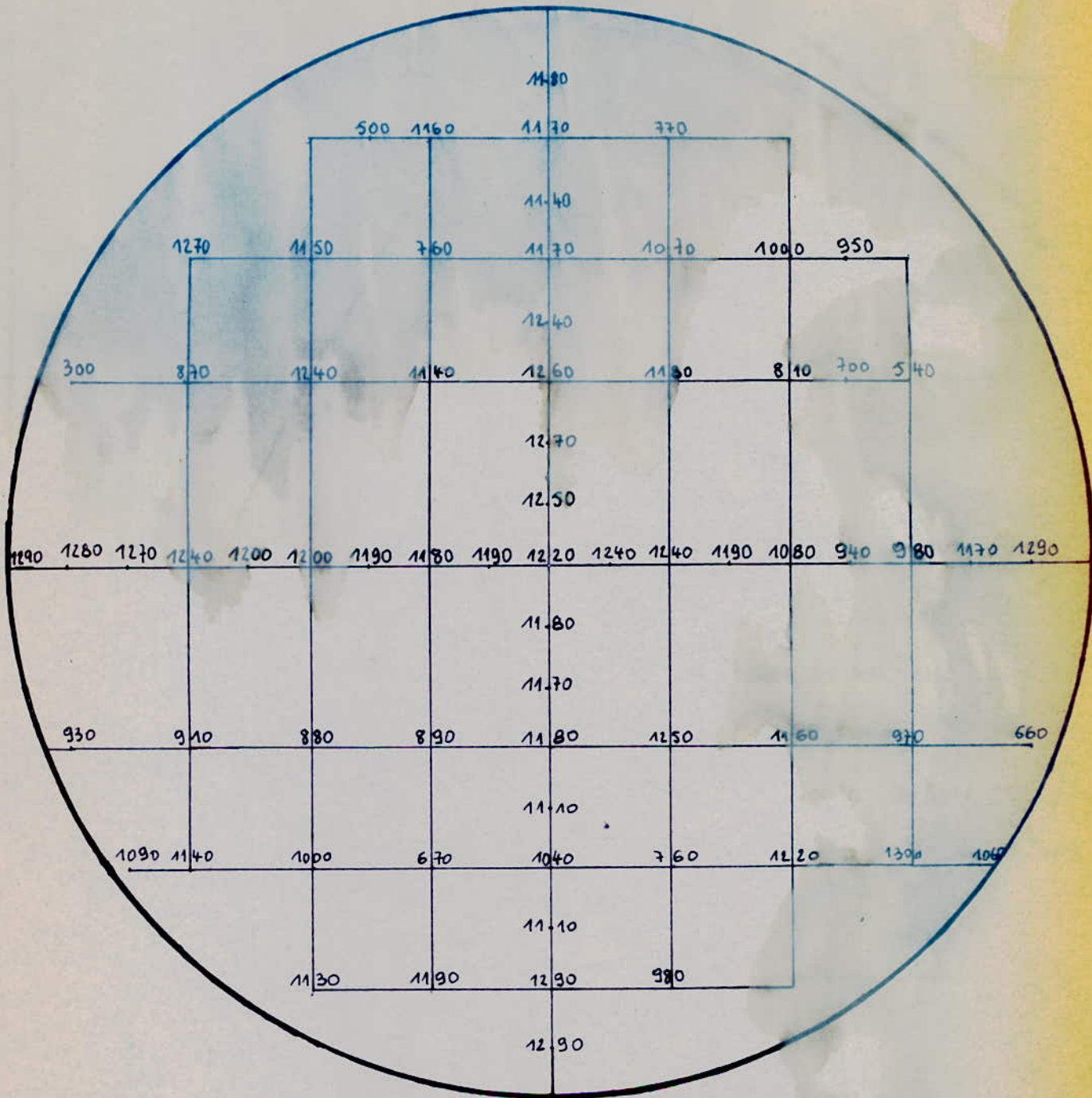


Essai au GN du 31.5-76
 PA = 758,9 mm Hg TA = 16,2 °C
 C.C seule sans Préchauffe
 Section $\bar{\sigma}$ 35 cm de profond.

CHAMBRE DE COMBUSTION

A TROUS CIRCULAIRES

C.C. SEULE



REPARTITION DES TEMPERATURES ($^{\circ}\text{C}$)

1-4-76

SECTION A 35cm DE PROFONDEUR

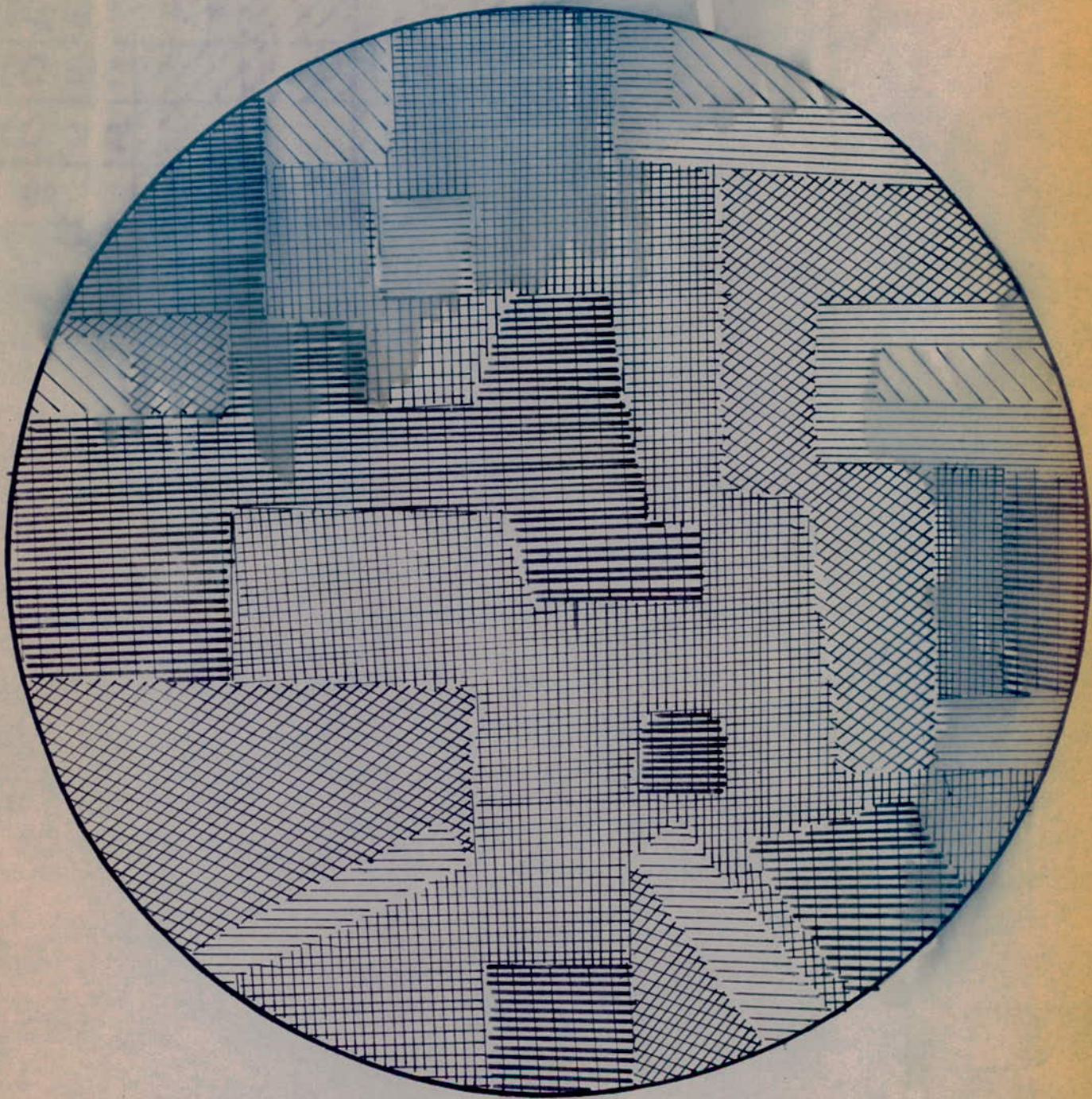
Régime : $\Delta H_{\text{G.N.C.C.}} = 50 \text{ mm H}_2\text{O}$ $P_A = 759 \text{ mmHg}$






$\Delta H_{\text{AIR}} = 78 \text{ mm H}_2\text{O}$ $T_A = 16^{\circ}\text{C}$

CHAMBRE DE COMBUSTION

A TROUS CIRCULAIRES

C.C SEULE



-  300 - 600°C
-  600 - 800°C
-  800 - 1000°C
-  1000 - 1200°C
-  1200 - 1300°C

CARTE DE REPARTITION DES TEMPERATURES

1-4-76

SECTION A 35 cm DE PROFONDEUR

Régime : $\Delta H_{G.N.C.C} = 50 \text{ mm H}_2\text{O}$ $P_A = 759 \text{ mmHg}$

$\Delta H_{AIR} = 78 \text{ mm H}_2\text{O}$ $T_A = 16^\circ \text{C}$

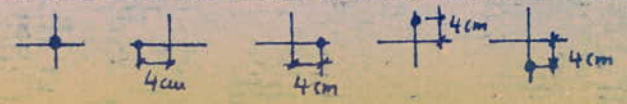
Date : 5 - 4 - '76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,648			
CO 6,3%			5,13	
CO 0,49%				
AIR				83,2

$P_a = 757,7 \text{ mmHg}$
 $T_A = 17,8 \text{ } ^\circ\text{C}$

- C-C SEULE
- SANS PRECHAUFFE
- SECTION A 40 CM DE PROFONDEUR

T _{G.N.C.P.}	°C							
P _{G.N.C.P.}	bar rel							
ΔH _{G.N.C.P.}	mm H ₂ O							
T [°] _{AIR COMP}	°C	47	48	49	49	49		
T [°] _{SONDE}	°C	1110	1220	1130	1160	1215		
T [°] _{Sortie}	°C	560	560	560	560	560		
T [°] _{G.N.C.C.}	°C	16	16	16	15,5	15		
P _{G.N.C.C.}	bar rel	9	9	9	9	9		
ΔH _{G.N.C.C.}	mm H ₂ O	50	50	50	50	50		
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	78	78	78	78	78		
α' CO ₂ Total	mV	0,995	0,95	0,96	0,97	0,98		
α' CO ₂ reel	mV	0,78	0,66	0,70	0,659	0,675		
α' CO	%	3,7	3,35	3,43	4,79	2		
α' O ₂		1	2	2,2	1,5	1,8		
T [°] _{Four}	°C							



Date : 5-4-76

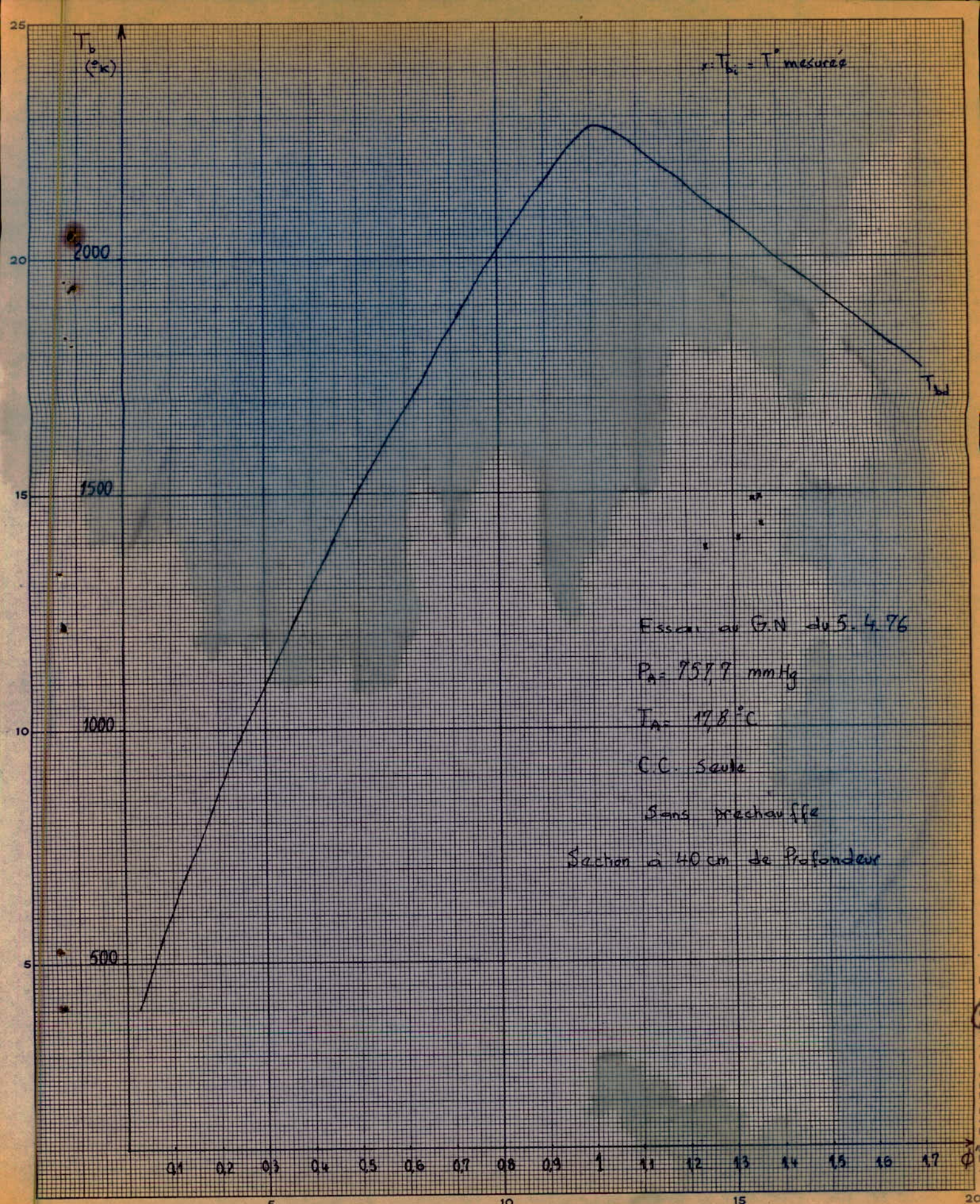
DEPOUILLEMENT

- C.C SEULE

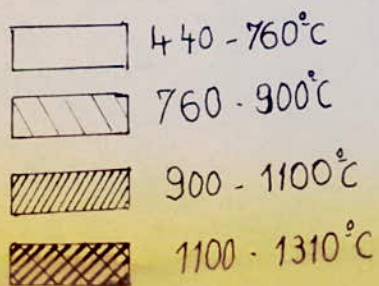
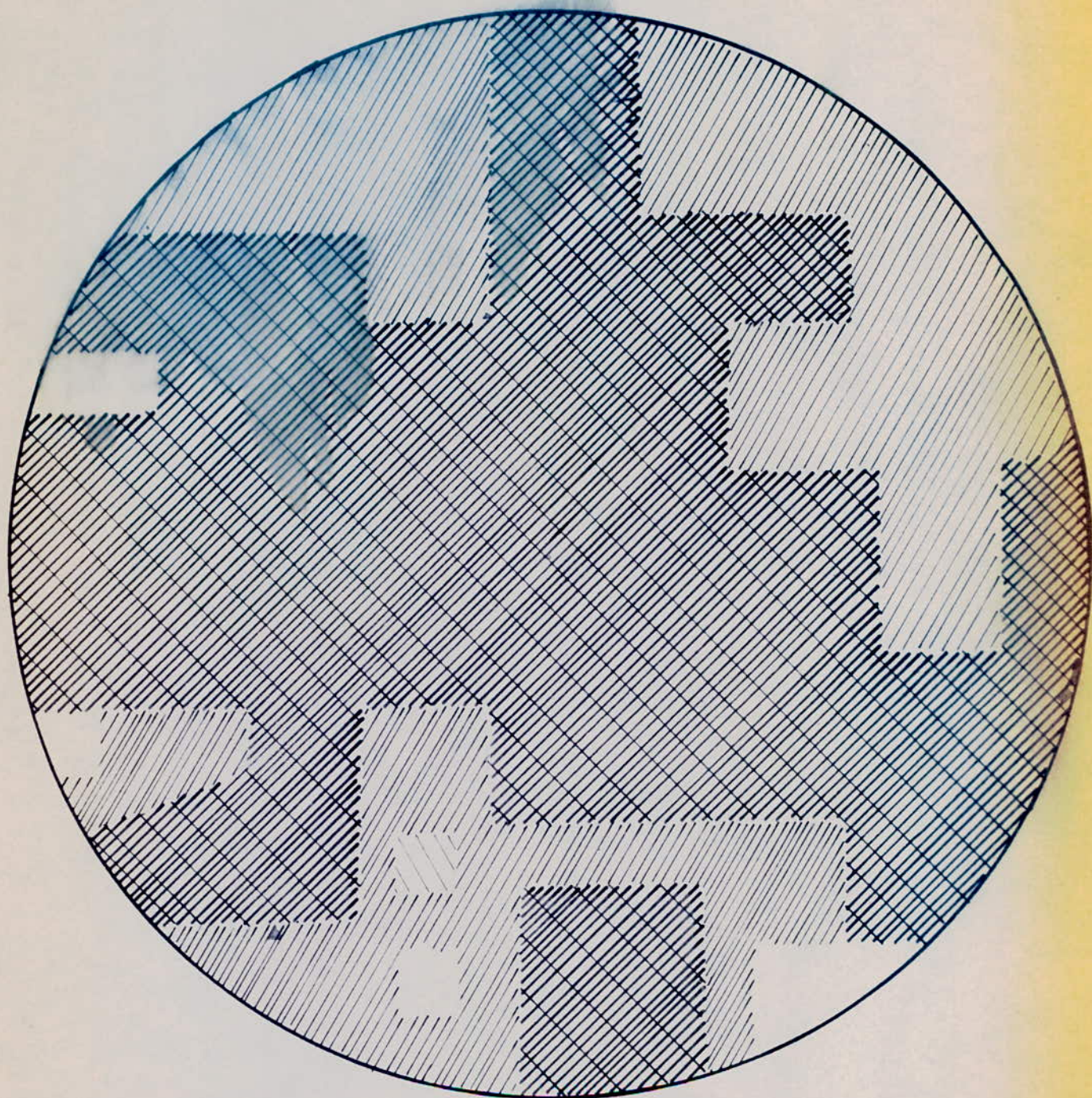
- sans préchauffe

- section à 40 cm de prof.

$P_{G.N.C.P}$	bar absolu								
$T_{G.N.C.P}$	$^{\circ}K$								
$\rho_{G.N.C.P}$	kg/m^3								
$\dot{m}_{G.N.C.P}$	g/s								
$P_{G.N.C.}$	bar absolu	10	10	10	10	10			
$T_{G.N.C.C}$	$^{\circ}K$	289	289	289	288,5	288			
$\rho_{G.N.C.C.}$	kg/m^3	7,864	7,864	7,864	7,877	7,891			
$\dot{m}_{G.N.C.C.}$	g/s	8,042	8,042	8,042	8,049	8,056			
T_{air}	$^{\circ}K$	320	321	322	322	322			
ρ_{air}	kg/m^3	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21			
\dot{m}_{air}	g/s	866	866	866	866	866			
T_{sonde}	$^{\circ}K$	1383	1493	1403	1433	1488			
T_{sortie}	$^{\circ}K$	833	833	833	833	833			
a'_{CO_2r}	%	7,445	6,130	6,560	6,120	6,295			
a'_{CO_2T}	%	9,799	9,306	9,416	9,525	9,635			
a_{CO}	%	3,910	3,310	3,450	5,780	0,995			
a'_{O_2}	%	0,250	0,500	0,550	0,375	4,500			
ϕ_g	$\frac{c/A}{\rho}$	0,142	0,142	0,142	0,142	0,143			
ϕ_l	$\frac{a'_{CO_2r}}{\rho(\phi)}$	1,240	1,355	1,310	1,360	1,340			
η_c	$\frac{a'_{CO_2r}}{a'_{CO_2T}}$	0,759	0,658	0,696	0,642	0,653			



CHAMBRE DE COMBUSTION
A TROUS CIRCULAIRES
c.c. seule



CARTE DE REPARTITION DES TEMPERATURES
2-4-76

SECTION A 40 cm DE PROFONDEUR

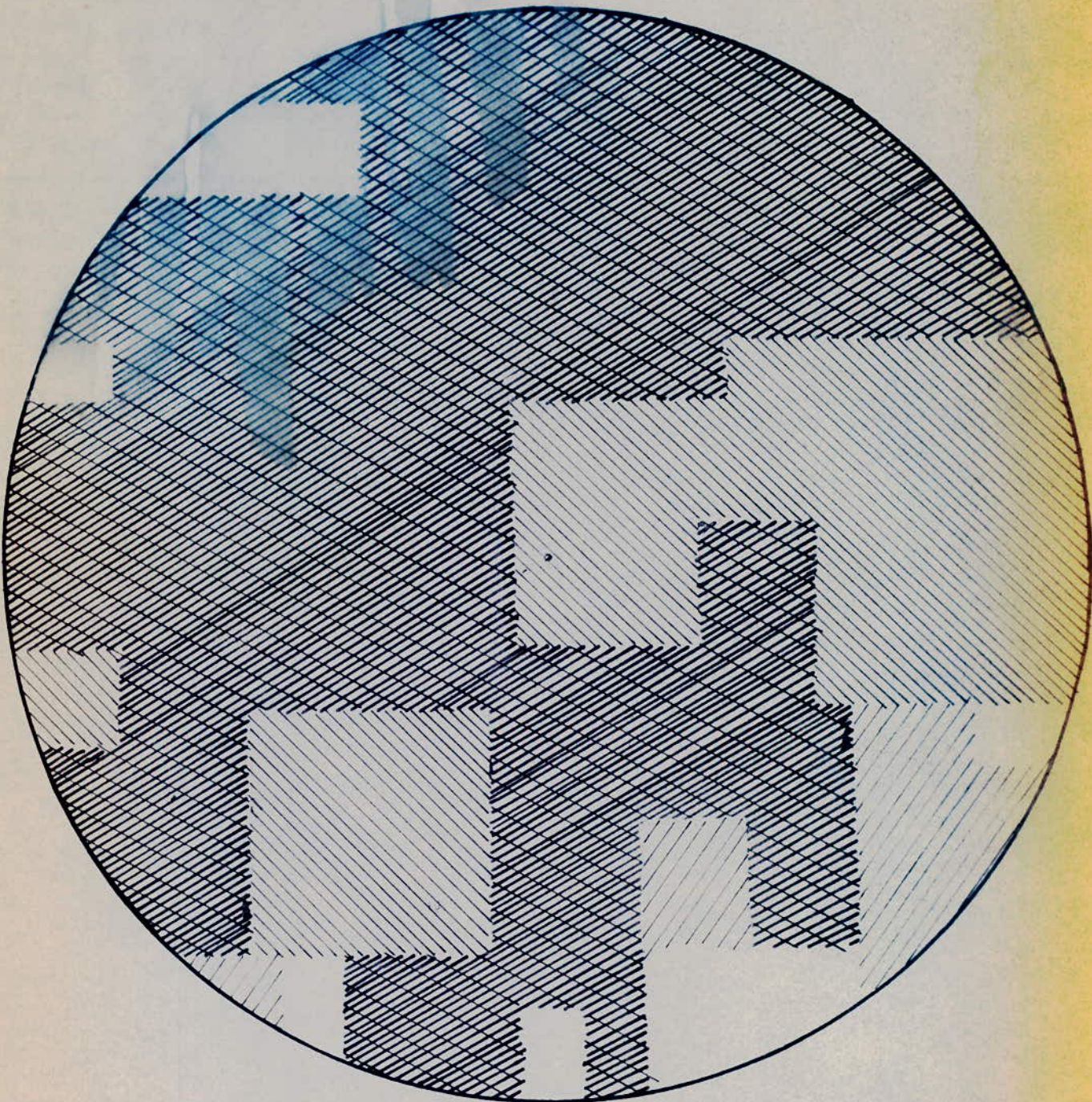
Régime : $\Delta H_{G.N.CC} = 50 \text{ mm H}_2\text{O}$

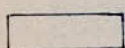



$\Delta H_{AIR} = 78 \text{ mm H}_2\text{O}$

CHAMBRE DE COMBUSTION

A TROUS CIRCULAIRES

C.C. seule



-  100 - 600°C
-  600 - 900°C
-  900 - 1100°C
-  1100 - 1310°C

Carte de repartition des Temperatures

Section à 42 cm de Profondeur

3 - 3.76

Regime

$\Delta H_{G.N. cc} = 50 \text{ mm H}_2\text{O}$

$P_A = 759,8 \text{ mm Hg}$

$\Delta H_{air} = 78 \text{ mm H}_2\text{O}$

$T_A = 18,6^\circ\text{C}$

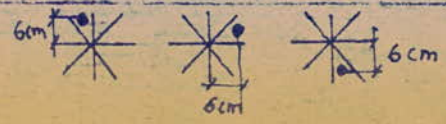
Date : 6 - 4 - 76

	CO ₂	CO 0,5%	CO 10%	O ₂
N ₂				
CO ₂ 6%	0,648 mV			
CO 6,3%			5,12 mA	
CO 0,49%				
AIR				83,2

$P_A = 758,7 \text{ mmHg}$
 $T_A = 17,4 \text{ } ^\circ\text{C}$

- C-C SEULE
- SANS PRECHAUFFE
- Section coupant les bras de la rosace

T _{G.N.C.P}	°C								
P _{G.N.C.P}	bar rel								
ΔH _{G.N.C.P}	mm H ₂ O								
T [°] air COMP	°C	49,5	49,5	49					
T [°] sonde	°C	1150	1090	1150					
T [°] Sortie	°C	560	560	560					
T [°] G.N.C.C.	°C	16	16	16					
P _{G.N.C.C}	bar rel	9	9	9					
ΔH _{G.N.C.C.}	mm H ₂ O	50	50	50					
ΔH _{air Venturi}	mm H ₂ O	80	80	80					
a' CO ₂ Total	mV	0,718	0,572	0,738					
a' CO ₂ reel	mV	0,520	0,515	0,620					
a' CO	mV	5,570	5,830	2,130					
a' O ₂		2	2,1	21,8					
T [°] Four	°C								



Date : 6-4-76

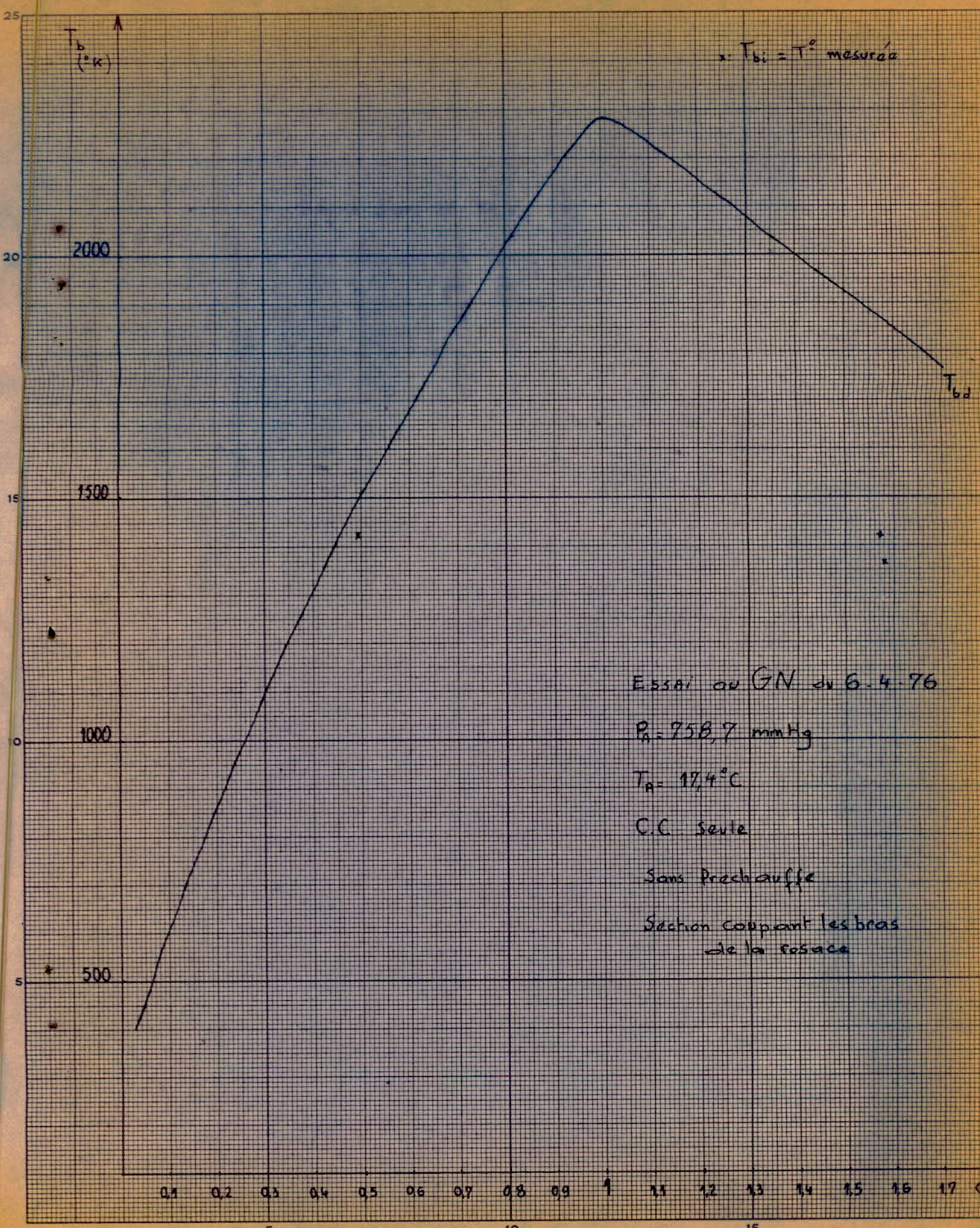
DEPOUILLEMENT

- C-C SEULE

- sans prechauffe

- Sect. coupant les bras de la rosace

$P_{GN.C.P}$	bar absolu						
$T_{GN.C.P}$	$^{\circ}K$						
$\rho_{GN.C.P}$	kg/m^3	1					
$\dot{m}_{GN.C.P}$	g/s						
$P_{GN.C.C.}$	bar absolu	10	10	10			
$T_{GN.C.C.}$	$^{\circ}K$	289	289	289			
$\rho_{GN.C.C.}$	kg/m^3	7,864	7,864	7,864			
$\dot{m}_{GN.C.C.}$	g/s	8,042	8,042	8,042			
T_{air}	$^{\circ}K$	322,5	322,5	322			
ρ_{air}	kg/m^3	1,213	1,213	1,213			
\dot{m}_{air}	g/s	879	879	879			
T_{sonde}	$^{\circ}K$	1423	1363	1423			
T_{sortie}	$^{\circ}K$	833	833	833			
a'_{CO_2r}	%	4,598	4,543	5,693			
a'_{CO_2T}	%	6,766	5,167	6,985			
a_{CO}	%	7,124	7,560	1,35			
a'_{O_2}	%	0,500	0,525	5,45			
ϕ_g	$\frac{C/A}{P}$	0,140	0,140	0,140			
ϕ_l	$\frac{a'_{CO_2r}}{P(\phi)}$	1,57	1,58	0,495			
η_c	$\frac{a'_{CO_2r}}{C \cdot CO_2T}$	0,679	0,879	0,815			



Essai au GN du 6-4-76

$P_A = 758,7$ mmHg

$T_A = 17,4^{\circ}\text{C}$

C.C. seule

Sans préchauffe

Section coupant les bras
de la rosace

Degre d'uniformité de T° , par section, en fonction
de la profondeur

$$D^\circ = f(l)$$

$$\Delta H_{\text{air}} = 78 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$\Delta H_{\text{GNCC}} = 50 \text{ mm H}_2\text{O}$$

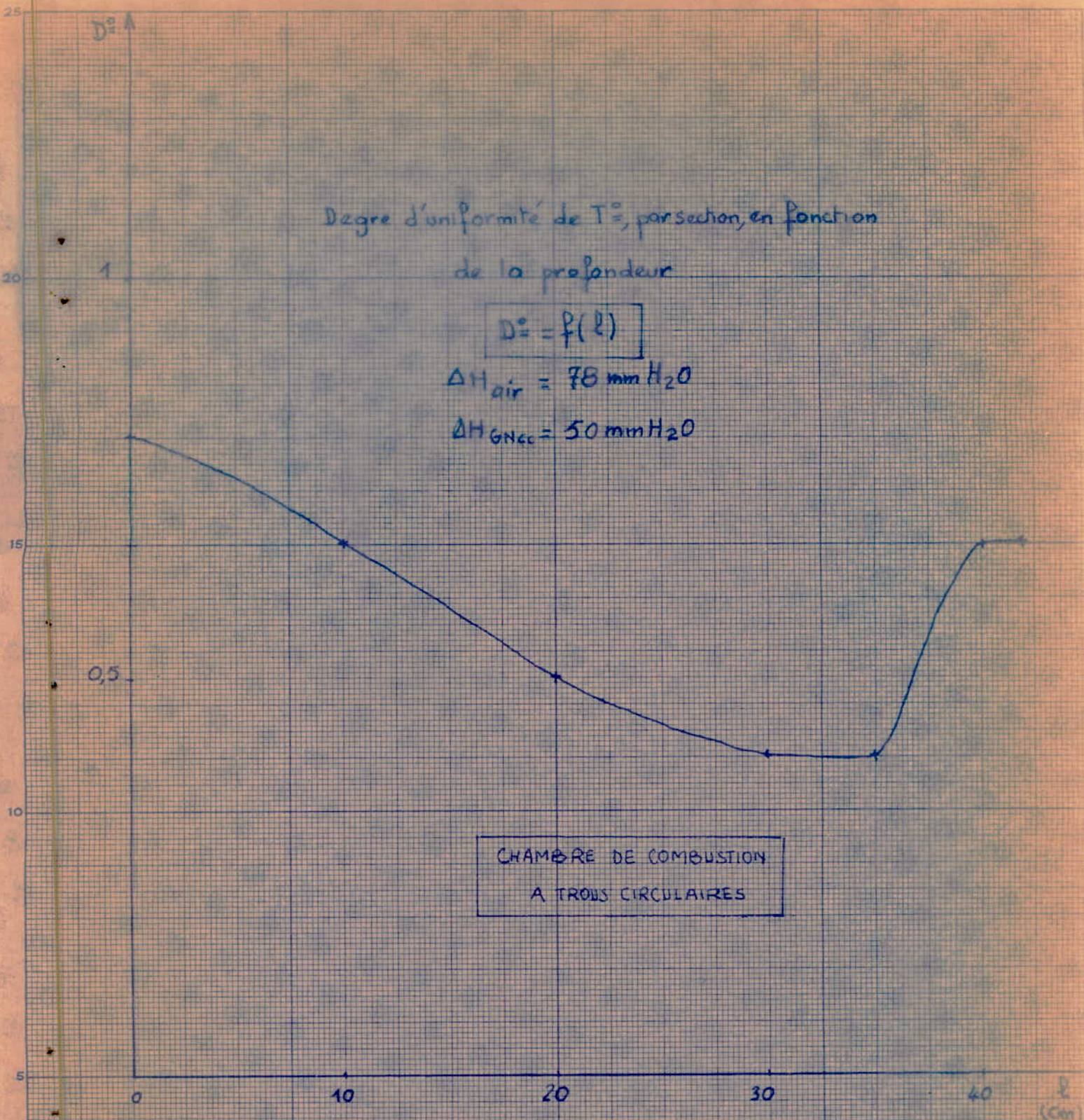
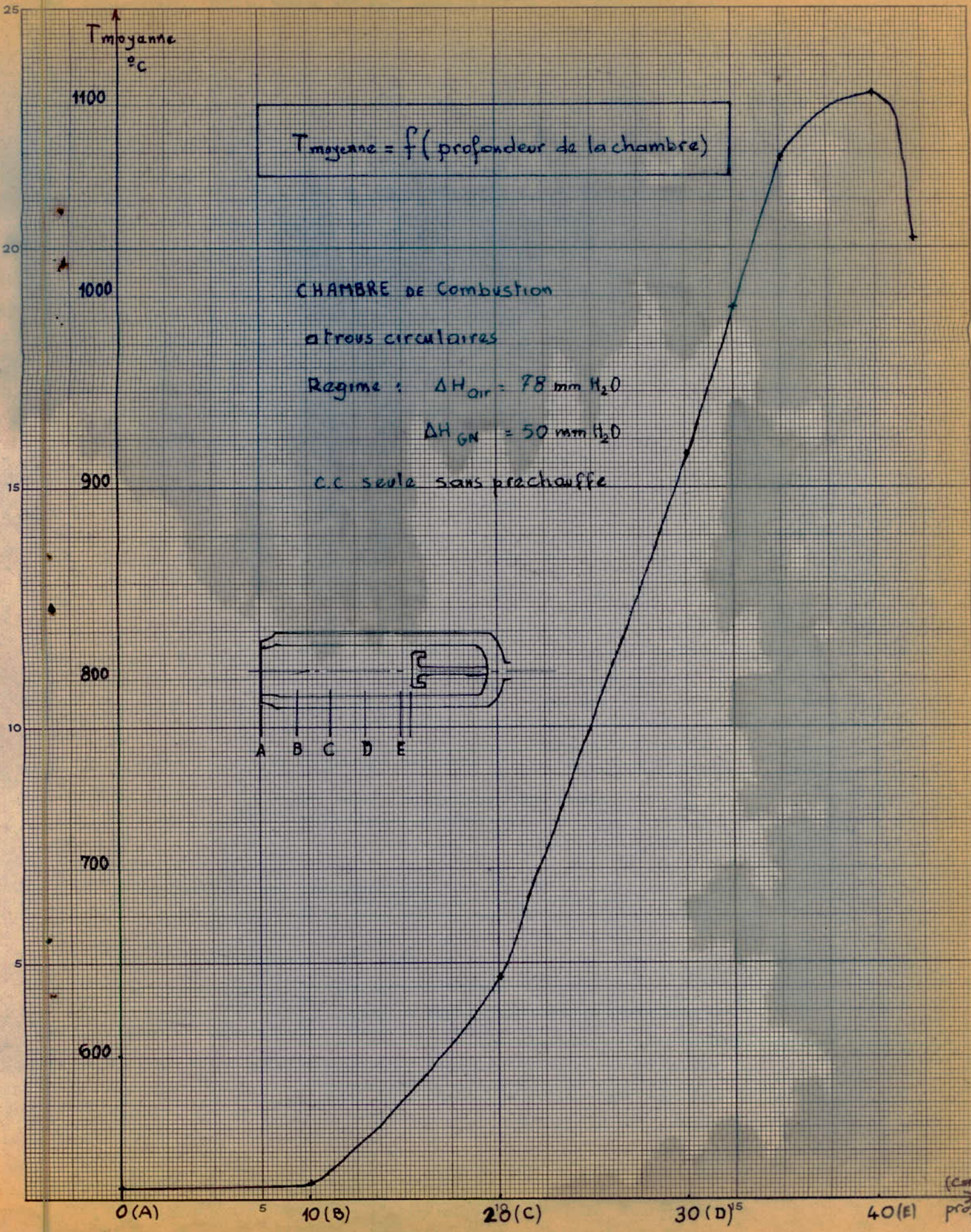
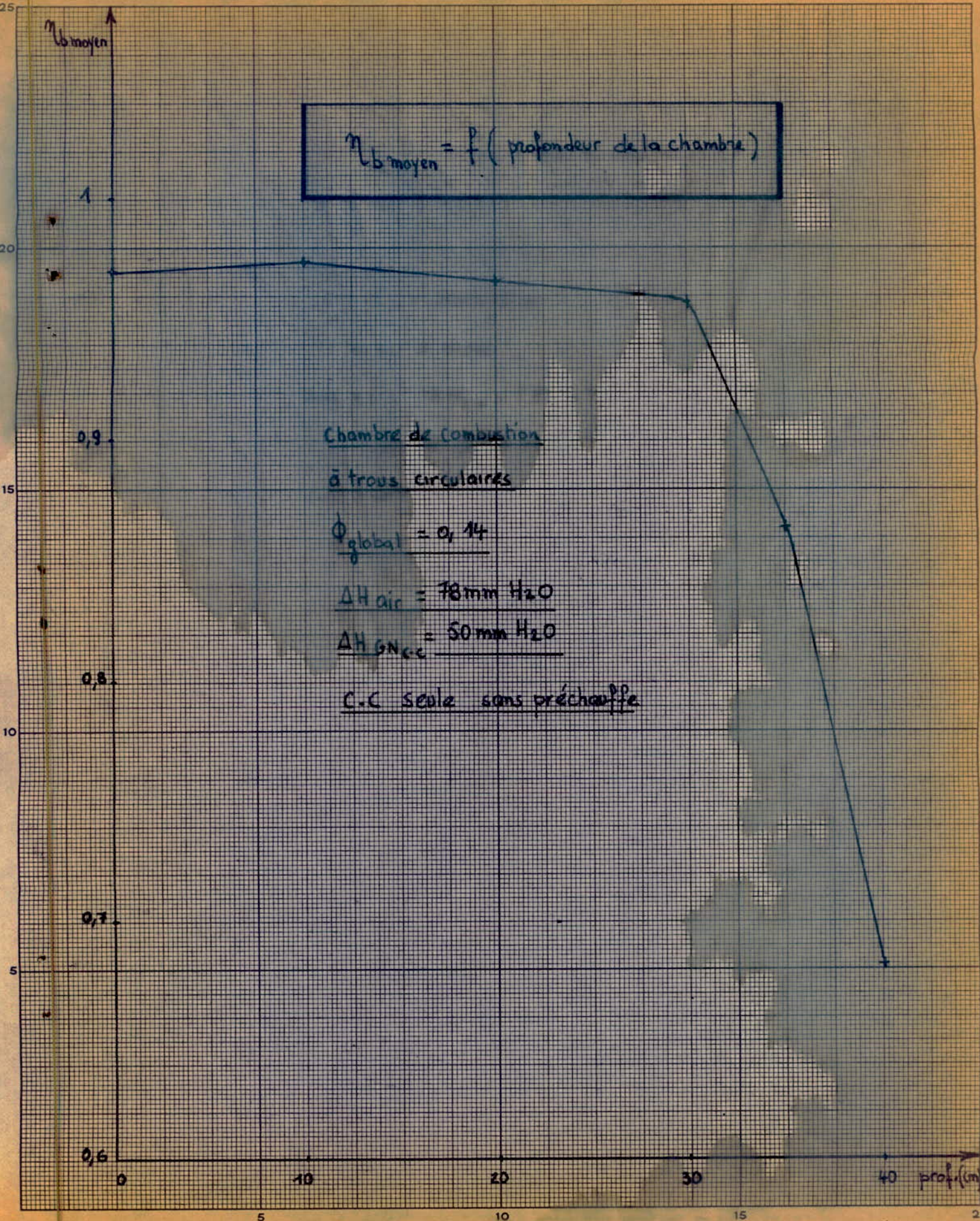


fig. A



$$\eta_{b \text{ moyen}} = f(\text{profondeur de la chambre})$$



Chambre de combustion


à trous circulaires

$$\phi_{\text{global}} = 0,14$$

$$\Delta H_{\text{air}} = 78 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$\Delta H_{\text{GNCC}} = 50 \text{ mm H}_2\text{O}$$

C.C seule sans préchauffe

ERTES . DE CHARGES
=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=

PERTES DE CHARGES
-o-o-o-o-o-o-o-o-o-

Une bonne chambre de combustion doit permettre la combustion complète du carburant avec le minimum de pertes de charges, sa réalisation fait appel en grande partie à l'expérience. La théorie ne permet que d'évaluer les performances de la chambre et de guider le constructeur.

La perte de charge, qui est un paramètre important, s'évalue en décomposant celle-ci en deux parties:

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_{\text{thermiques}}$$

ΔP_a : étant la perte de charge aérodynamique ; elle se mesure généralement à froid et se définit de la façon suivante :

$$\Delta P_a = \frac{P_{t5} - P_{t6}}{P_{t5}}$$

(5) : entrée de la chambre

(6) : sortie de la chambre

ou encore par :

$$K = \frac{P_{t5} - P_{t6}}{1/2 \rho V_5^2}$$

ΔP : perte de charge totale; elle se mesure à chaud et se définit de la façon suivante :

$$\Delta P = \frac{P_{t5} - P_{t6}}{P_{t5}}$$

$\Delta P_{\text{thermiques}}$: étant les pertes de charges thermiques.

Calcul des pertes de charges thermiques :

- 1/ Méthode expérimentale :

Elles peuvent être aussi déterminées à partir de la mesure de ΔP_{totale} et de ΔP_a :

$$\Delta P_{\text{th}} = \Delta P - \Delta P_a$$

2/ Méthode théorique :

Ces pertes thermiques peuvent être aussi déterminées théoriquement à partir de l'équation de Raleigh suivante qui considère :

- une section constante
- l'absence de frottement
- un apport de chaleur
- un régime permanent

$$\frac{P_{t6}}{P_{t5'}} = \frac{I + \gamma M_{5'}^2}{I + \gamma M_{6'}^2} \left[\frac{I + \frac{\gamma - 1}{2} M_{6'}^2}{I + \frac{\gamma - 1}{2} M_{5'}^2} \right]$$

$M_{5'}$: étant le mach des gaz dans la zone primaire ; la vitesse dans cette zone étant pratiquement nulle. On prendra $M_{5'} = 0$ d'où

$$\frac{P_{t6}}{P_{t5'}} = \frac{I}{I + \gamma M_{6'}^2} \left[I + \frac{\gamma - 1}{2} M_{6'}^2 \right]$$

Ce qui donne

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{th}} &= 1 - \frac{P_{t6}}{P_{t5'}} \\ &= \frac{P_{t5'} - P_{t6}}{P_{t5'}} \end{aligned}$$

PLAN DE CALCUL DES PERTES DE CHARGES
 -o-

a / Calcul du Mach :

Il est déterminé à partir de la relation suivante découlant du théorème de Barré de Saint-Venant :

$$\frac{P_i}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

d'où $M = \left(\left[\left(\frac{P_i}{P} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \cdot \frac{2}{\gamma - 1} \right)^{\frac{1}{2}}$

Cette dernière relation applicable en écoulement isentropique subsonique permet de calculer le nombre de Mach à partir de la pression totale P_t donnée par la sonde (puisque $P_i = P_t$) et de la pression statique P

b / Calcul de la vitesse d'écoulement des gaz :

Elle est évaluée à partir de l'expression du Mach

$$M = \frac{V}{a}$$

avec : - $a = (rT)^{0,5}$ soit la vitesse locale du son

- $r =$ constante du gaz en $J/kg \cdot ^\circ K$

- $\gamma = 1,405$ pour l'air frais ; pour les gaz, il est déterminé à partir des courbes $\gamma = f (\phi)$ et de T (pour les valeurs de ϕ_{loc} voir le dépouillement ci-après.).

- $T =$ température mesurée au point considéré, en $^\circ K$

Commentaire (c.c à trous circulaires)

I / Pertes de charges : $\frac{P_s - P_e}{P_{t_s}} = f(M_s)$

- A froid : les pertes de charges aérodynamiques (mesurées à froid) présentent un minimum pour un Mach d'entrée $M_m = 0,125$, soit $4,5 \cdot 10^{-3}$. Lorsque le Mach s'éloigne de M_m (par valeurs inférieures), on note une brusque augmentation des pertes de charges . Par contre au delà de M_m les pertes augmentent de manière plus lente . Il serait donc logique de travailler à partir d'un Mach supérieur ou égal à M_m .

- A chaud (avec combustion)

a/ Débit de G-N constant :

Dans ce cas l'expérience montre une augmentation continue des pertes de charges avec le Mach d'entrée .

b/ Débit d'air constant :

Les pertes de charges ne varient pratiquement pas avec la variation du débit de GN . Donc l'influence du débit de gaz sur celles-ci est négligeable . On conclut donc que lors de la combustion c'est l'air qui influe principalement sur les pertes de charges .

2/ Pertes de charges : $\frac{P_s - P_e}{\frac{1}{2} \rho V_s^2} = f(M_s)$

En considérant les pertes à froid sous cette forme on déduit des expériences que la courbe des pertes a la même allure que la courbe précédente à froid ; elle présente un minimum pour un Mach d'entrée $M_m = 0,15$.

3/ Pertes thermiques :

On remarque que les pertes thermiques augmentent avec le Mach d'entrée . Pour M_m inférieur ou égal à 0,08 ces pertes sont

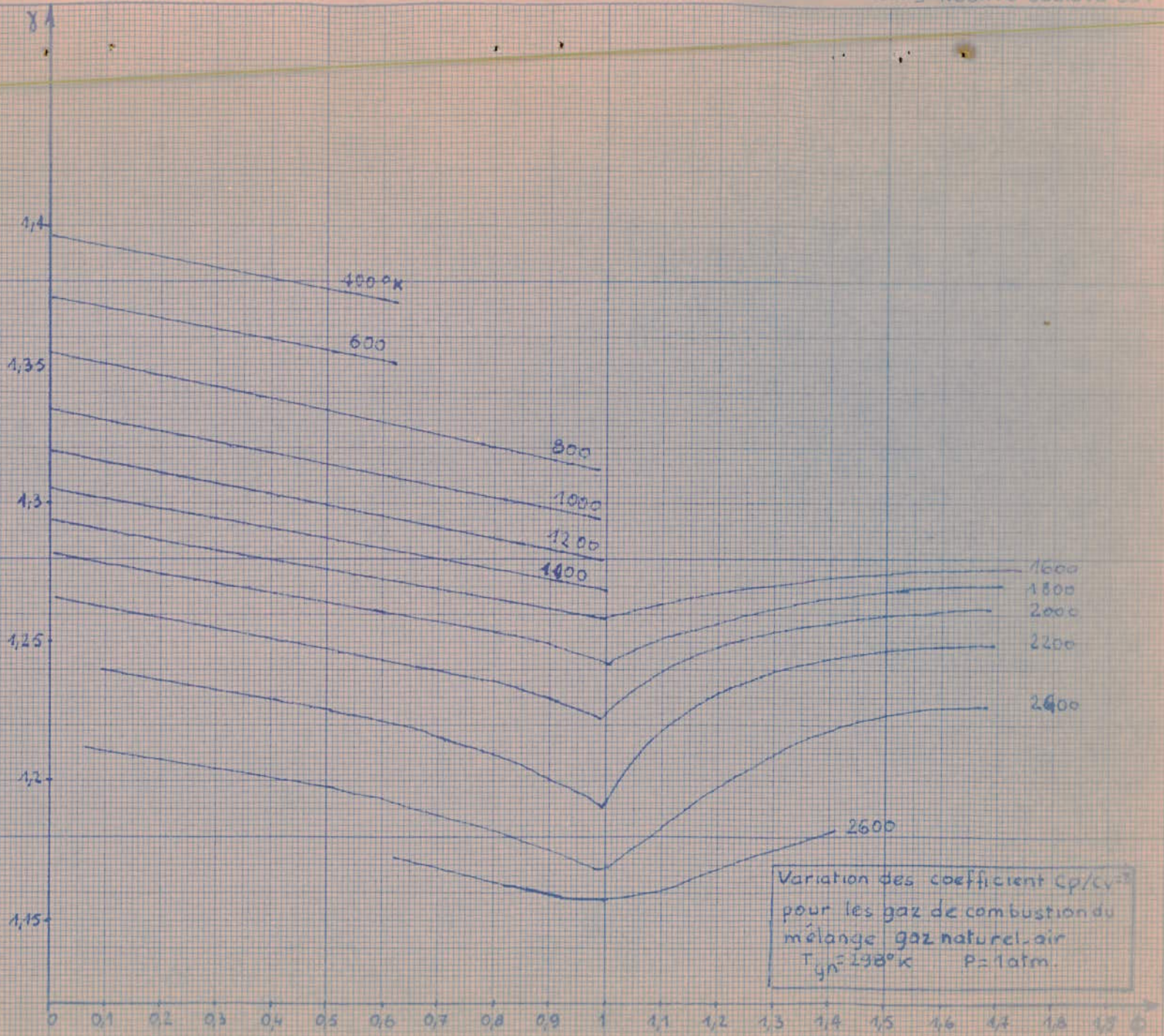
pratiquement nulles . Elles valent environ $3,5 \cdot 10^{-3}$ pour $M_m = 0,2$
 (négligeables , voir annexe pour leur calcul théorique).

Les pertes de charges sont donc en majorité des pertes aérodynamiques .

Ci-dessous le tableau de valeurs des pertes thermiques obtenues par les méthodes expérimentale et théoriques :

I	0	0,71 10^{-3}	0,84 10^{-3}	2,12 10^{-3}	1,73 10^{-3}	3,04 10^{-3}	2,85 10^{-3}	2,49 10^{-3}	Méthode expérimentale
II	2,50 10	3,32 10^{-3}	3,80 10^{-3}	5,38 10^{-3}	6,66 10^{-3}	8,66 10^{-3}	9,75 10^{-3}	II 10^{-3}	Méthode théorique

Cette différence entre la pratique et la théorie vient essentiellement du fait que la seconde (Raleigh) considère une section constante (débit constant le long du tube) ; par contre l'expérience est telle qu'on a une augmentation continue du débit au moyen des trous du tube de flamme le long de la chambre (ce qui équivaut à une section non constante) .



Variation des coefficient C_p/C_v pour les gaz de combustion du mélange gaz naturel-air
 $T_{gn} = 298^\circ K$ $P = 1 \text{ atm}$.

CHAMBRE DE COMBUSTION
A TROUS CIRCULAIRES

(A Froid)

P_{s5}/P_{t5}	0,9901	0,9858	0,9815	0,9924	0,9943	0,9784	0,9732	0,9951
M_5	0,119	0,143	0,164	0,105	0,090	0,177	0,197	0,083
P_{s6}/P_{t6}	0,9982	0,9973	0,9961	0,9985	0,9990	0,9953	0,9942	0,9995
M_6	0,050	0,063	0,074	0,046	0,038	0,082	0,092	0,026
d_5 (mm)	362	362	362	362	362	362	362	362
V_5 (m/s)	43,08	51,76	59,37	38,01	32,58	64,07	71,31	30,05
$P_{t5} - P_{t6}/P_{t5}$	$4,83 \cdot 10^{-3}$	$5,57 \cdot 10^{-3}$	$7,45 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-3}$	$14,26 \cdot 10^{-3}$	$18,35 \cdot 10^{-3}$	$21,44 \cdot 10^{-3}$	$27,57 \cdot 10^{-3}$
$P_{t5} - P_{t6}/\frac{1}{2}\rho V_5^2$	0,045	0,036	0,037	0,117	0,229	0,078	0,074	0,520

$P_A = 758,6 \text{ mmHg}$

$T_A = 19,3^\circ\text{C}$

CHAMBRE DE COMBUSTION

A TROUS circulaires

Debit de G.N. constant = $8,029 \text{ g/s}$

$\Delta H_{\text{G.N.C.C}}$ mm H ₂ O	50	50	50	50	50	50	50	50
ΔH_{air} mm H ₂ O	27	40	55	78	110	153	182	235
$P_{t5 \text{ rel}}$ mm H ₂ O	91	99	126	183	238	317	360	445
$P_{s5 \text{ rel}}$ mm H ₂ O	25	36	45	70	93	125	141	166
$P_{t6 \text{ rel}}$ mm H ₂ O	25	34	40	56	70	90	102	124
$P_{G.N. \text{ rel}}$ (bar)	9	9	9	9	9	9	9	9
$T_{\text{air comp}}$ (°C)	55	53	52	52	50	49	47	46
$T_{\text{G.N.}}$ (°C)	17	17	17	17	17	17	17	17
T_{sortie} (°C)	840	720	620	560	500	440	400	350

CHAMBRE DE COMBUSTION
A TROUS CIRCULAIRES

Débit G.N = $c^t = 8,029 \text{ g/s}$

(à chaud)

P_{s5}/P_{t5}	0,9955	0,9939	0,9922	0,9891	0,9862	0,9818	0,9793	0,9739
δ_5	1,405	1,405	1,405	1,405	1,405	1,405	1,405	1,405
M_5	0,080	0,093	0,107	0,125	0,141	0,162	0,173	0,195
P_{s6}/P_{t6}	0,9976	0,9967	0,9961	0,9945	0,9932	0,9913	0,9901	0,988
δ_6	1,303	1,328	1,357	1,377	1,354	1,361	1,364	1,370
T_6 ($^{\circ}\text{K}$)	1113	993	893	833	773	713	673	633
M_6	0,061	0,071	0,076	0,090	0,100	0,114	0,121	0,132
Q_5 (m/s)	363,68	362,56	362	362	360,89	360,33	359,21	358,65
V_5 (m/s)	29,09	33,72	38,73	45,25	50,88	58,37	62,14	69,94
$\frac{P_{t5} - P_{t6}}{P_{t5}}$	$4,45 \cdot 10^{-3}$	$6,28 \cdot 10^{-3}$	$8,29 \cdot 10^{-3}$	$12 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$	$21,4 \cdot 10^{-3}$	$24,3 \cdot 10^{-3}$	$30 \cdot 10^{-3}$

CHAMBRE DE COMBUSTION

ATROUS CIRCULAIRES

$P_A = 758,6 \text{ mm Hg}$

$T_A = 19,3^\circ\text{C}$

DEBIT D'air constant = 865 g/s

ΔH_{GNCC} mm H ₂ O	78	102	127	154	180	227	
ΔH_{air} mm H ₂ O	78	78	78	78	78	78	r
$P_{t5 \text{ rel.}}$ mm H ₂ O	186	195	200	205	209	213	
$P_{s5 \text{ rel.}}$ mm H ₂ O	78	85	93	97	100	106	
$P_{t6 \text{ rel.}}$ mm H ₂ O	65	70	75	75	75	82	
$P_{GN \text{ rel.}}$ (bar)	9	9	9	9	9	8,7	
$T_{air \text{ comp}}$ (°C)	48	49	49	49	49	49	
T_{GN} (°C)	17	17	16	15,5	15	15	
T_{sortie} (°C)	650	700	830	1080	1120	1200	

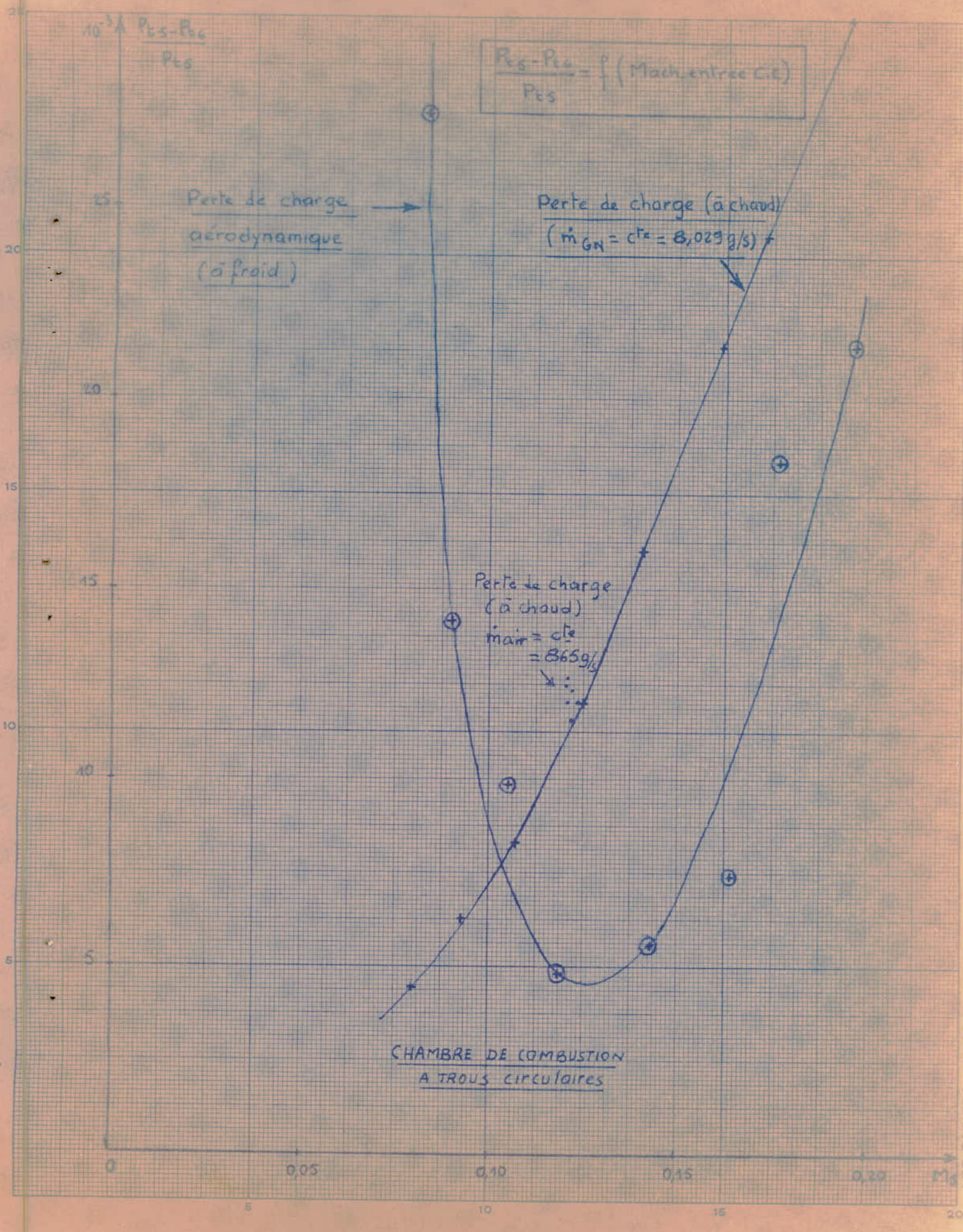
CHAMBRE DE COMBUSTION

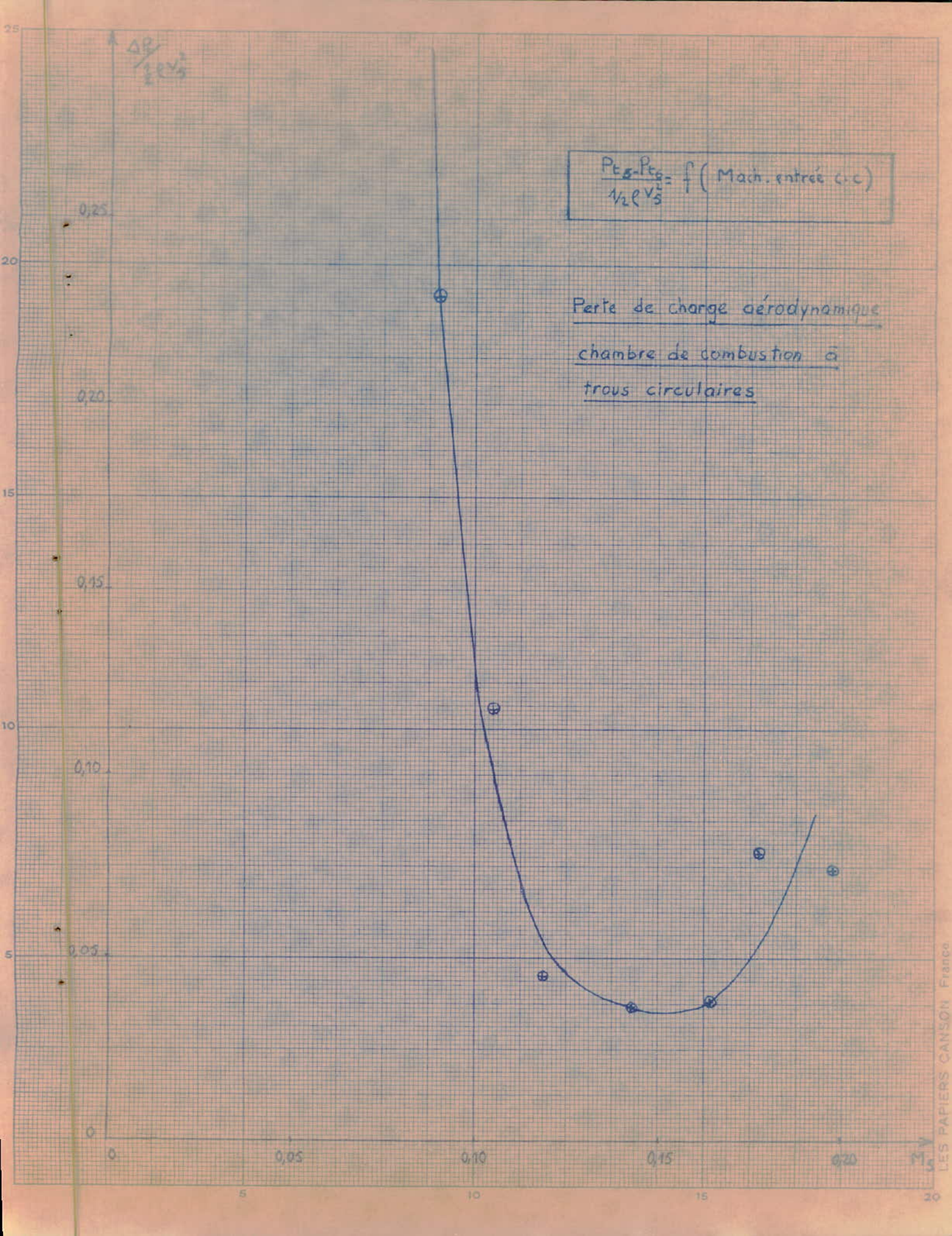
ATROUS CIRCULAIRES

Débit d'air = $\dot{C}_s^* = 865 \text{ g/s}$

(\bar{a} chaud)

P_{s5}/P_{t5}	0,9896	0,9894	0,9897	0,9896	0,9897	0,9898
δ_s	1,405	1,405	1,405	1,405	1,405	1,405
M_s	0,122	0,123	0,121	0,122	0,121	0,121
P_{s6}/P_{t6}	0,9937	0,9932	0,9927	0,9927	0,9927	0,9921
δ_6	1,336	1,329	1,317	1,300	1,297	1,291
T_6 ($^{\circ}\text{K}$)	923	973	1103	1353	1393	1473
M_6	0,098	0,101	0,105	0,106	0,106	0,111
a_s (m/s)	359,77	360,33	360,33	360,33	360,33	360,33
V_s (m/s)	43,89	44,32	43,56	43,96	43,56	43,56
$\frac{P_{t5} - P_{t6}}{P_{t5}}$	$11,50 \cdot 10^{-3}$	$11,97 \cdot 10^{-3}$	$11,96 \cdot 10^{-3}$	$12,43 \cdot 10^{-3}$	$12,62 \cdot 10^{-3}$	$12,52 \cdot 10^{-3}$





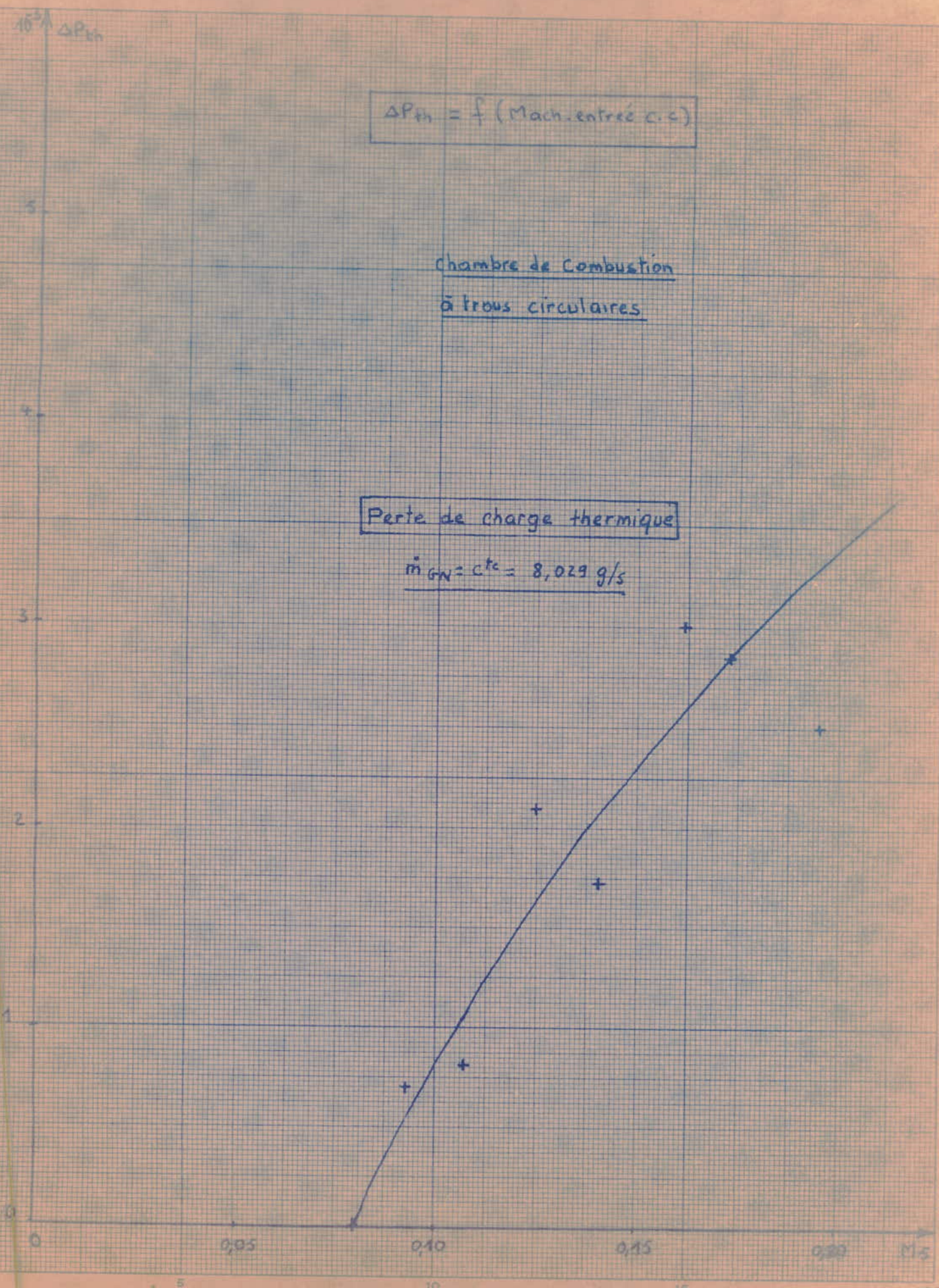
$10^3 \Delta P_{th}$

$\Delta P_{th} = f(\text{Mach. entrée c.c.})$

Chambre de Combustion
à trous circulaires

Perte de charge thermique

$\dot{m}_{GN} = cte = 8,029 \text{ g/s}$



ΔP_{th}

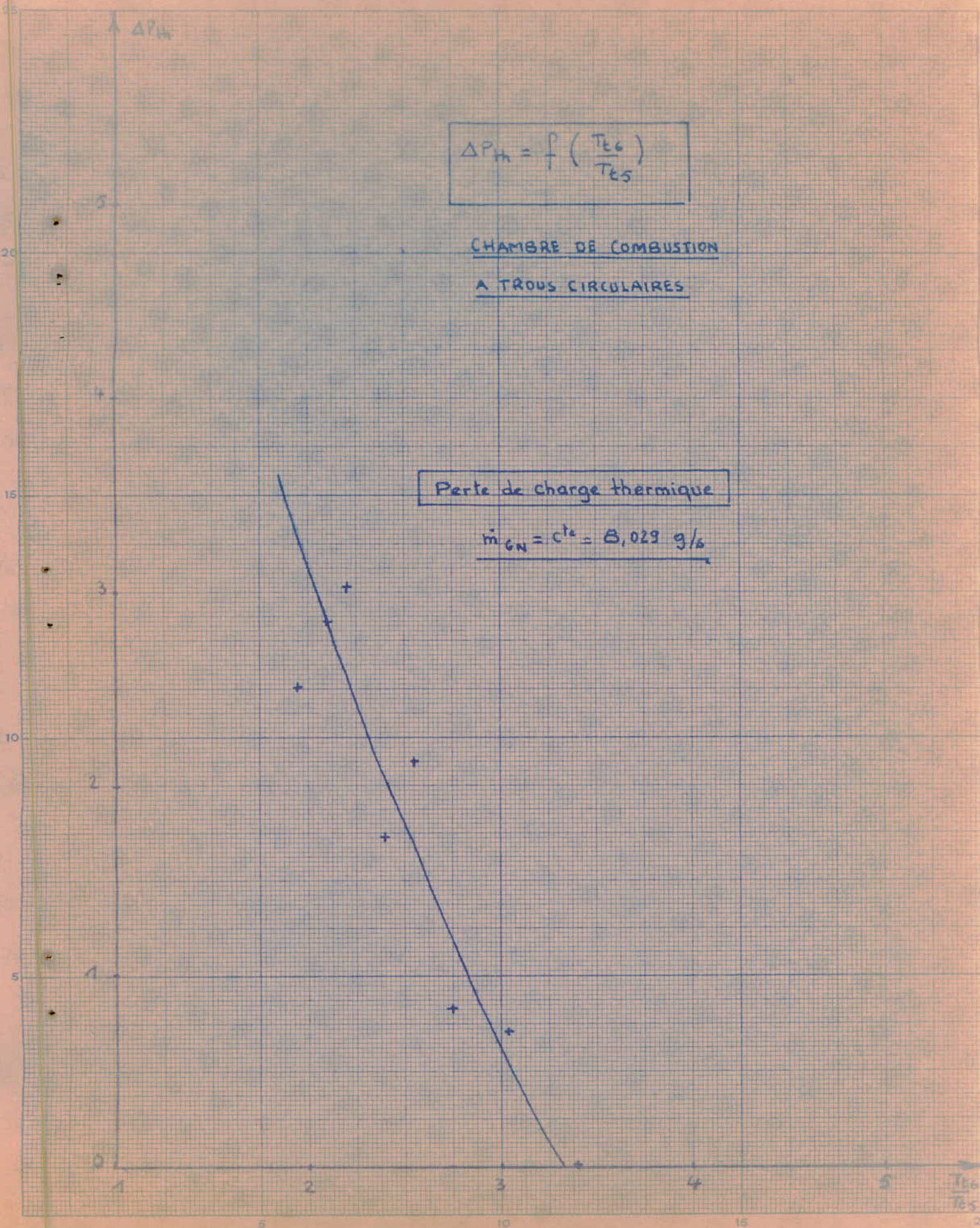
$$\Delta P_{th} = f\left(\frac{T_{e6}}{T_{e5}}\right)$$

CHAMBRE DE COMBUSTION

A TROUS CIRCULAIRES

Perte de charge thermique

$$\dot{m}_{GN} = c^{te} = 8,029 \text{ g/s}$$



$10^3 \Delta P_{th}$

CHAMBRE DE COMBUSTION
A TROUS CIRCULAIRES

Débit de G.N. = $C^* = 8,029$ g/s

$\Delta P_{th} = f(\text{Mach entrée ec.})$

Pertes de charges thermiques
théoriques

Pertes de charges thermiques
expérimentales

0

0

25

10

20

15

6

4

2

0

0,05

0,10

0,15

0,20

M₅

5

10

15

20

II O N C L U S I O N

=O=O=O=O=O=O=O=O=O=

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

Comparaison des deux chambres à trous circulaires et à trous mixtes :

Les caractéristiques à la sortie de la chambre étant les plus déterminants, la comparaison sera faite en général pour cette section .

1° / Du point de vue rendement de combustion :

A la sortie on a obtenu les rendements moyens suivants :

- chambre de combustion à trous circulaires :

$$\eta_b = 0,97$$

- chambre de combustion à trous mixtes :

$$\eta_b = 0,985$$

2° / Du point de vue températures à la sortie :

- chambre de combustion à trous circulaires :

$$T_{\max} = 670^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{MOY}} = 530^{\circ}\text{C}$$

- chambre de combustion à trous mixtes :

$$T_{\max} = 860^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{moy}} = 548^{\circ}\text{C}$$

N.B/ La T° moyenne pour la chambre de combustion à trous mixtes a été toujours supérieure à celle de l'autre chambre pratiquement pour toutes les sections considérées .

3° / Du point de vue homogénéité de la T° à la sortie :

- chambre de combustion à trous circulaires :

$$\text{degré d'homogénéité} = 4/5$$

- chambre de combustion à trous mixtes :

$$\text{degré d'homogénéité} = 5/6$$

On fait remarquer que l'homogénéité est une caractéristique de la chambre d'une importance capitale .

4° / Du point de vue pertes de charges :

On remarque que les pertes de charges de la chambre à trous circulaires sont moindres que celles de la chambre à trous mixtes quoique relativement négligeables dans les deux cas , de l'ordre de 3% au maximum ; l'explication vient du fait que la section des trous sur la surface latérale du premier tube de flamme est supérieure à celle du second, ce qui augmente les frottements pour ce dernier ;

Des valeurs expérimentales ci dessus , on pourrait dire que la chambre à trous mixtes :

- donne une meilleure combustion
- permet l'obtention d'une température de sortie supérieure (autrement dit une poussée plus grande)
- assure une homogénéité de température plus complète, conséquence d'une meilleure dilution ; cette homogénéité permet alors une répartition plus uniforme des contraintes sur les aubes de la turbine , favorable à sa résistance .

Le rendement de combustion , la température et l'homogénéité plus élevés pour la chambre à trous mixtes sont le résultat d'une bonne répartition des trous et de leurs formes .

En conclusion, la chambre de combustion à trous mixtes s'avère plus avantageuse que celle à trous circulaires (du moins pour ce régime arbitrairement choisi.) .

Calcul des pertes thermiques dans la chambre de combustion:

Les gaz chauds traversant la chambre de combustion cèdent une partie de leur chaleur par convection forcée à la paroi interne ; cette chaleur est transmise par conduction à la paroi extérieure pour se transmettre à l'air ambiant essentiellement par convection naturelle (libre)

Vu que les flux de chaleur par convection forcée, par conduction et par convection naturelle sont égaux on utilisera pour nos calculs le dernier cas à savoir que : le flux par convection naturelle qui vaut

$$\phi = h_{\text{air}} \cdot S_e (T_{p2} - T_{\text{air}})$$

ϕ en Kcal/h

h_{air} en Kcal/m².h.°

T_{air} : température de l'air ambiant

T_{p2} : température de la paroi extérieure

S_e : surface latérale de la chambre de combustion

h_{air} est le coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle

Son calcul est donné par la formule suivante :

$$\frac{h_{\text{air}}}{T^{0,25}} = \frac{5,3}{D^{0,25}}$$

d'où

$$h_{\text{air}} = 5,3 \left(\frac{T}{D} \right)^{0,25}$$

avec

D (mm) = diamètre extérieur de la chambre = 236 mm

$$T = T_{p2} - T_{\text{air}} = 90^\circ - 13^\circ = 77^\circ$$

90° étant une température approchée de la paroi extérieure

h_{air} vaudra alors :

$$h_{\text{air}} = 5,3 \left(\frac{77}{236} \right)^{0,25} = 4 \text{ Kcal/h.m}^2.\text{°}$$

$$S_c = .D.1$$

l = longueur de la chambre où a lieu la convection naturelle

$$= 490 \text{ mm}$$

$$S_e = 3,14 \times 0,236 \times 0,49 = 0,363 \text{ m}^2$$

Le flux de chaleur vaudra alors :

$$\phi = 4 \cdot 0,363 \cdot 77 = 111,837$$

$$\phi = 111,837 \text{ Kcal/h}$$

Les pertes thermiques sont effectivement négligeables

N.B/

Ne pas confondre ϕ (richesse) avec ce ϕ (flux de chaleur)

ANNEXE II

=0=0=0=0=

Détermination du Mach théorique $M_{5,}$ au niveau de la zone primaire:

Les équations de Raleigh donnent:

$$\frac{T_{t6}}{T_{t5,}} = \frac{(1 + M_{5,}^2) \cdot M_6^2}{(1 + M_6^2)^2 \cdot M_{5,}^2} \cdot \frac{1 + (\gamma - 1/2) \cdot M_6^2}{1 + (\frac{\gamma - 1}{2}) \cdot M_{5,}^2}$$

A partir du nombre de Mach de sortie, et du rapport d'élévation de température, déterminés par l'expérience on déduit de l'équation précédente l'expression suivante donnant $M_{5,}$:

$$\frac{\gamma - 1}{2} \cdot \frac{T_{t6}}{T_{t5,}} \cdot \frac{1}{A} - 2 \cdot M_{5,}^4 + \frac{T_{t6}}{T_{t5,}} \cdot A - 2\gamma M_{5,}^2 - 1 = 0$$

avec

$$A = \frac{M_6^2 (1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_6^2)}{(1 + M_6^2)^2}$$

$$\gamma = 1,405$$

$$\gamma = f(T_{t6}, \varnothing_{\text{locale}})$$

$$T_{t5,} = 323^\circ\text{K} \text{ (} T^\circ \text{ d'entrée de la chambre de combustion)}$$

D'où le tableau suivant :

a- C-C à trous circulaires :

$M_{5,}$	0,033	0,041	0,046	0,056	0,064	0,076	0,082	0,094
----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Remarque: la courbe $M_{5,} = f(m_{\text{air}})$ montre que $M_{5,}$ est pratiquement une fonction linéaire du débit d'air.

b- C-C à trous mixtes:

$M_{5,1}$	0,024	0,029	0,032	0,04	0,046	0,06	0,065	0,076
-----------	-------	-------	-------	------	-------	------	-------	-------

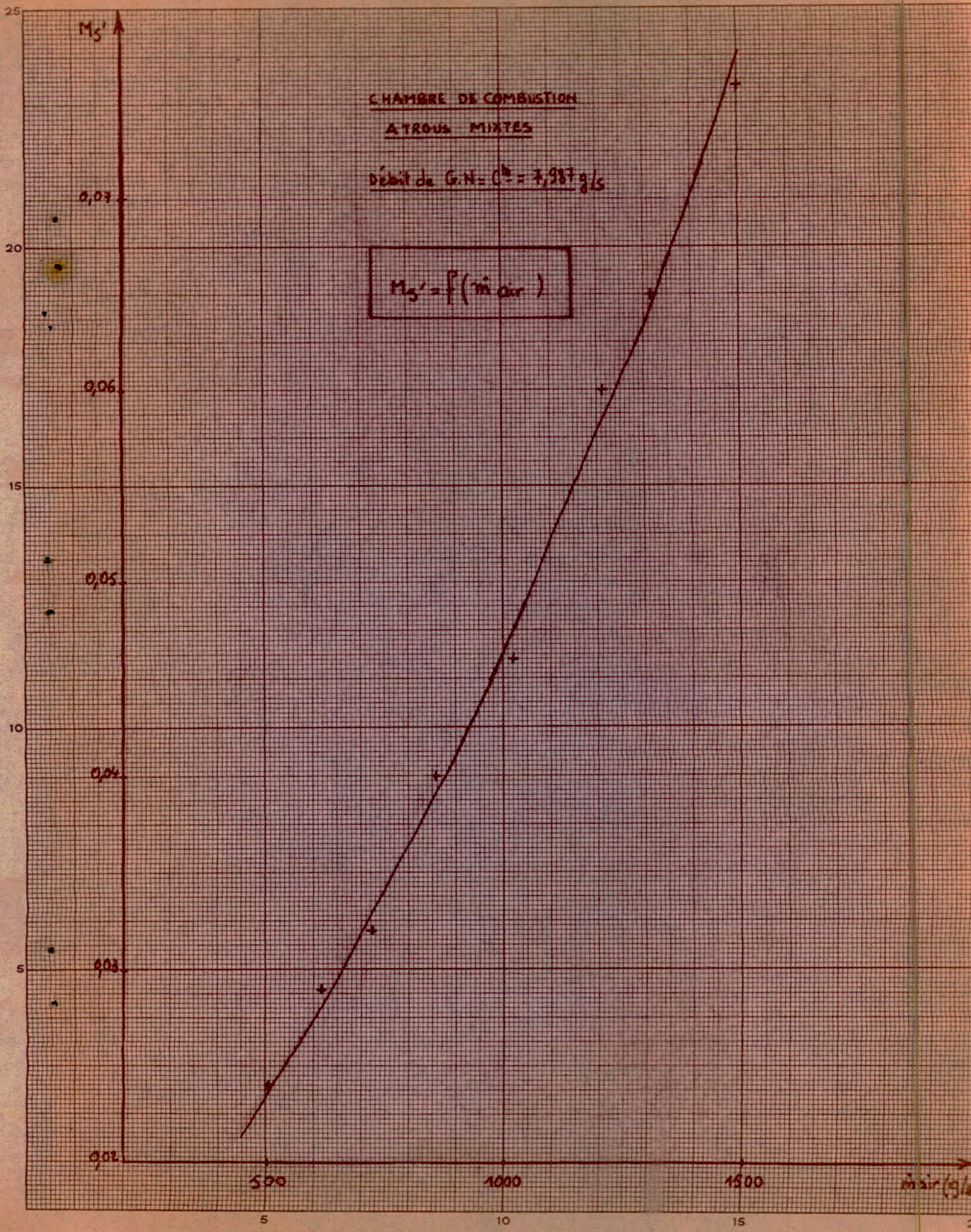
De même $M_{5,1}$ est approximativement une fonction linéaire du débit d'air
 (voir courbe $M_{5,1} = f (m_{\text{air}}) .)$.

L'approximation $M_{5,1} = 0$ faite antérieurement est justifiée par ces
 résultats.

CHAMBRE DE COMBUSTION
ATROUS MIXTES

Débit de G.N = $Q^2 = 7,987 \text{ g/s}$

$$M_{S'} = f(\dot{m}_{\text{air}})$$



500

1000

1500

$\dot{m}_{\text{air}} \text{ (g/s)}$

5

10

15

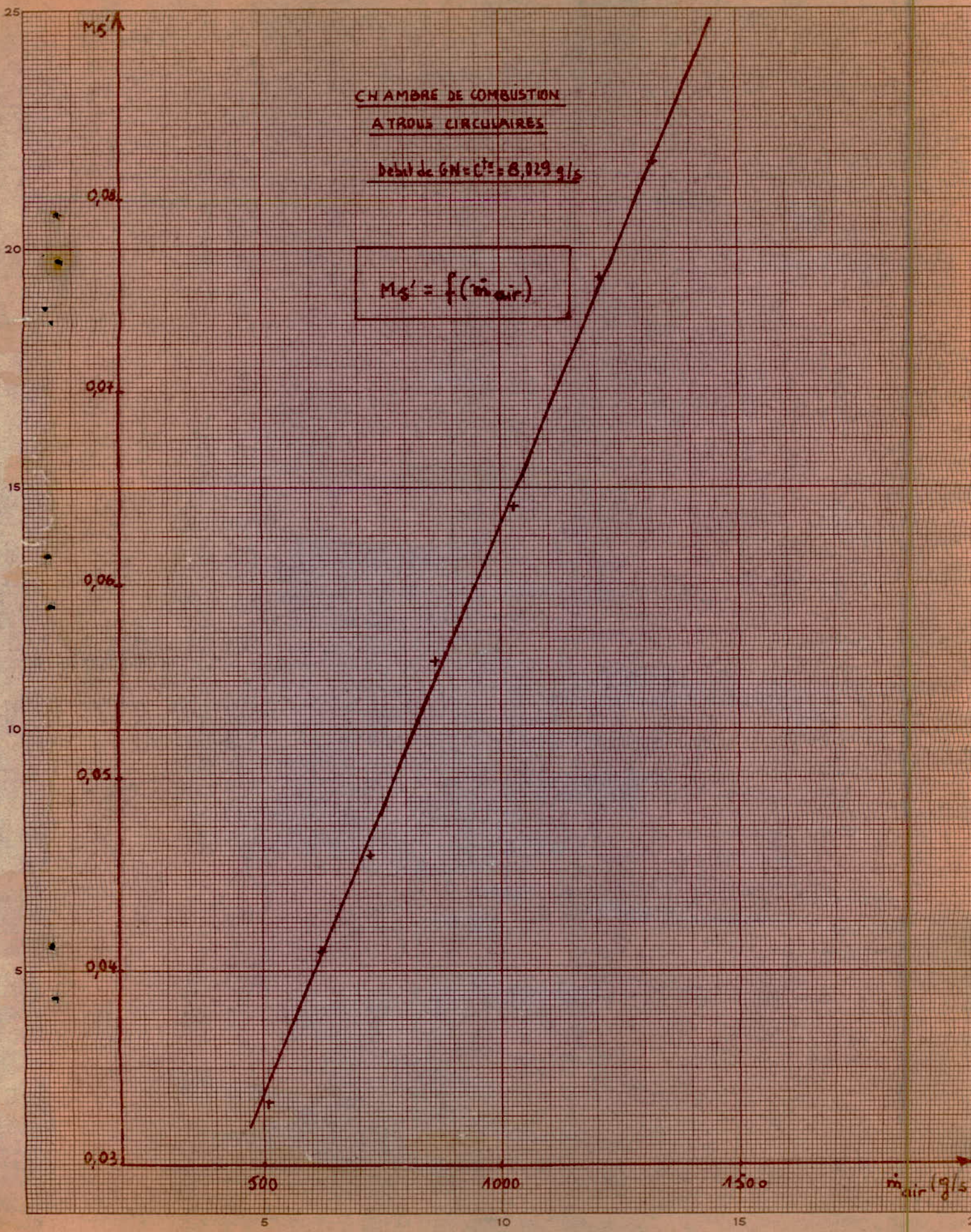
2

CHAMBRE DE COMBUSTION

ATROUS CIRCULAIRES

Debit de GN = $C^2 = 8,029 \text{ g/s}$

$M_{s'} = f(\dot{m}_{air})$



BIBLIOGRAPHIE
-O-O-O-O-O-O-

- Le turboréacteur et autres moteurs à réaction

A. KALNIN - M. LABORIE

-Pratique de la mesure et du contrôle dans l'industrie . Tome 3

J. BURTON

-Recherche sur la combustion d'un mélange d'hydrocarbures

J. RAPPENEAU

-Document de la SNECMA

-Transmission de la chaleur

MAC. ADAMS

-Revue de l'institut français du pétrole

-Revue: Entropie

-Cours de M^r MATTON

- Fluides compressibles

- Combustion

- Notion sur l'aérodynamique

- Le turboréacteur

-Fusées et astronautique

LAROUSSE

-Thèses de fin d'études

- Analyse de gaz de combustion (74)

- Méthodes de mesures et essais sur chambre de combustion (73)

- Etude théorique et expérimentale sur chambre de combustion - G-N et G-N-L - (75)

