

UNIVERSITE D'ALGER

6/74  
152

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MECANIQUE



THESE DE FIN D'ETUDES

ANALYSE  
DE GAZ - COMBUSTION

ETUDES, ESSAIS ET MESURES

Dirigée par

G. MATTON

DOCTEUR ES-SCIENCES

Etudiée par

L. MARIR

PROMOTION 1974

(20)

10-15.

(10)

20-29

(3)

31-34

36-63



Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur MATTON pour ses conseils qui m'ont été précieux.

Je remercie MM. SPIES et MULLER pour leur collaboration technique dans la réalisation des montages.

Que toutes les personnes qui m'ont apporté une aide constante acceptent tous mes remerciements.

L. M A R I R  
~~-----~~

# // O M E N C L A T U R E

-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-

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

### CHAPITRE I : ANALYSE DES GAZ DE COMBUSTION.

1 -	<u>ANALYSEUR A INFRA-ROUGE</u> .....	1
	1.1. Principe	
	1.2. Fonctionnement.	
	Schéma du principe.....	2
2 -	<u>ANALYSEUR D'OXYGENE</u> .....	1
	2.1 Principe	
	2.2. Fonctionnement.	
	Schéma du principe.....	4
3 -	<u>ANALYSE DES GAZ DE COMBUSTION</u> .....	5
	3.1 Méthode d'analyse des gaz	
	Schéma de l'installation d'analyse des gaz.....	6
	3.2 Appareillage d'analyse des gaz	
	3.3. Précision de la méthode	
4 -	<u>REMPLISSAGE DES BOUTEILLES DE GAZ ETALON</u> .....	8
	4.1 Système de remplissage.	
	4.2 Principe de remplissage.	
	Schéma du système de remplissage.....	9

### C H A P I T R E   I I   :   E T U D E   T H E O R I Q U E   S U R   L A   C O M B U S T I O N   D U   G A Z   N A T U R E L   D E   H A S S I   R ' M E L

1 -	<u>COMPOSITION MOLAIRES DU GAZ NATUREL DE HASSI R'MEL</u> .....	10
2 -	<u>FORMULE BRUTE DU GN</u> .....	10
	2.1.1 Nombre d'atomes de carbone dans 1 mole de GN	
	2.1.2 Masse de carbone	
	2.2.1 Nombre d'atomes d'hydrogène dans 1 mole de GN	
	2.2.2 Masse d'hydrogène	
	2.3.1 Nombre d'atomes d'azote dans 1 mole de GN	
	2.3.2 Masse d'azote.	
3 -	<u>FORMULE FICTIVE DU GN</u> .....	12
4 -	<u>MASSE MOLAIRES DU GN</u> .....	13
5 -	<u>MASSE VOLUMIQUE DU GN</u> .....	13
6 -	<u>VOLUME MOLAIRES DU GN</u> .....	14
7 -	<u>CALCUL DU RAPPORT STOECHIOMETRIQUE (C/A)<sub>st</sub></u> .....	15
	7.1 Réactions chimiques des composants du G.N en mélange stoechiométrique	
	7.2 Calcul de la masse d'air.	

8 - DETERMINATION DES RELATIONS :	
$a \text{ CO}_2 = f(\phi)$ et $a' \text{ CO}_2 = f(\phi)$ .....	17.
8.1 Teneur en $\text{CO}_2$ des gaz brûlés non desséchés	
8.2 Teneur en $\text{CO}_2$ des gaz brûlés desséchés	
Tableau de valeurs.....	19
Courbes : $a \text{ CO}_2 = f(\phi)$ et $a' \text{ CO}_2 = f(\phi)$ .....	20
9 - CALCUL DES ENTHALPIES DU GN.....	21
9.1 Enthalpie de formation du GN à $T_r = 0^\circ\text{K}$ .....	21
9.1.1 Rappel théorique	
9.1.2 Application	
9.2 Enthalpie globale du GN à $298^\circ\text{K}$ ( $T_r = 0^\circ\text{K}$ ) .....	25
9.2.1 Rappel théorique	
9.2.2 Application.	
9.3 Enthalpie de combustion du GN à $298^\circ\text{K}$ ( $T_r = 0^\circ\text{K}$ ).....	27
9.3.1 Rappel théorique	
9.3.2 Application.	
9.4 Conclusion.....	29
Tableau récapitulatif .....	30

CHAPITRE III : ESSAIS ET MESURES.

1 - ESSAIS SUR MOTEUR R.16.....	31
1.1 Détermination de l'équation générale de combustion en fonction des produits d'échappement	
1.2 Diagramme de GREBEL.....	32
1.2.1 Application à l'essence et au gaz naturel	
1.2.2 Utilisation du diagramme de GREBEL....	
1.3 Interprétation des résultats.....	34
1.3.1 Essai à l'essence	
1.3.2 Essai au gaz naturel	
2 - <u>ESSAIS SUR BANC DE COMBUSTION</u> .....	36
Planches.....	37

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

## // INTRODUCTION



//- Avec le développement de l'industrie, la pollution de l'Air atmosphérique a pu atteindre des niveaux très élevés.

Il est bien connu que les polluants ont pour origines principales : d'une part, les Foyers et les émissions industrielles, d'autre part les gaz d'échappements des Véhicules munis de moteur à combustion interne.

Certains spécialistes pensent que non seulement cette pollution de l'air est nocive pour la santé des êtres humains mais aussi que la végétation peut en être affectée.

Quels sont donc les moyens de lutte contre ce Fléau ?

Les essais au gaz naturel sur la chambre de combustion et le moteur R.16 sont concluants.

Le gaz naturel est bien un combustible non polluant. Aucune action n'a donc à être envisagée à son encontre, et c'est vers le développement de son emploi qu'il faut s'orienter.

-o- /// H A P I T R E I -o-

///- N A L Y S E D E S G A Z D E C O M B U S T I O N

-o-

.....

-o-

## 1 - ANALYSEUR A INFRA-ROUGE.

### 1.1 Principe

L'analyseur à infra-rouge, comme son nom l'indique, est un appareil d'analyse continue des gaz qui utilise l'absorption dans l'infra-rouge. Il permet la mesure de la teneur d'un gaz (CO et CO<sub>2</sub>) considéré dans un mélange.

### 1.2 Fonctionnement (Page 2)

Les émetteurs (1 et 2), constitués par des filaments sont montés en série et parcourus par un courant continu.

Les rayonnements émis qui sont en fait de la chaleur traversent deux tubes d'analyse (5) et de comparaison (4) munis de fenêtres en fluorure de calcium, puis ils traversent les chambres de mesure (6 et 8) contenant le gaz à analyser, elles sont séparées par un condensateur dont une armature est rigide, tandis que l'autre constituée par une feuille d'aluminium (7), est déformable.

L'obturateur (3), entraîné par un moteur synchrone interrompt périodiquement et simultanément les deux faisceaux infra-rouges.

Lorsque ceux-ci passent, il se produit un échauffement dans chacune des deux chambres de mesure, qui se traduit par des élévations de pression pratiquement instantanées. Lorsque les faisceaux sont interrompus, ces surpressions diminuent par suite des pertes calorifiques, de sorte qu'il règne dans les chambres réceptrices deux pressions modulées qui sont synchrones et en phase et dont les intensités dépendent de l'intensité des rayonnements reçus.

La différence des maximums des deux pressions modulées qui caractérise la concentration du gaz à mesurer, fait donc vibrer la membrane du condensateur.

Le contrôle de la variation de cette capacité par l'intermédiaire d'un amplificateur permet d'alimenter un millivoltmètre.

## 2 - ANALYSEUR D'OXYGENE

### 2.1 Principe

L'analyseur d'oxygène est un appareil d'analyse basé sur les propriétés magnétiques des gaz.

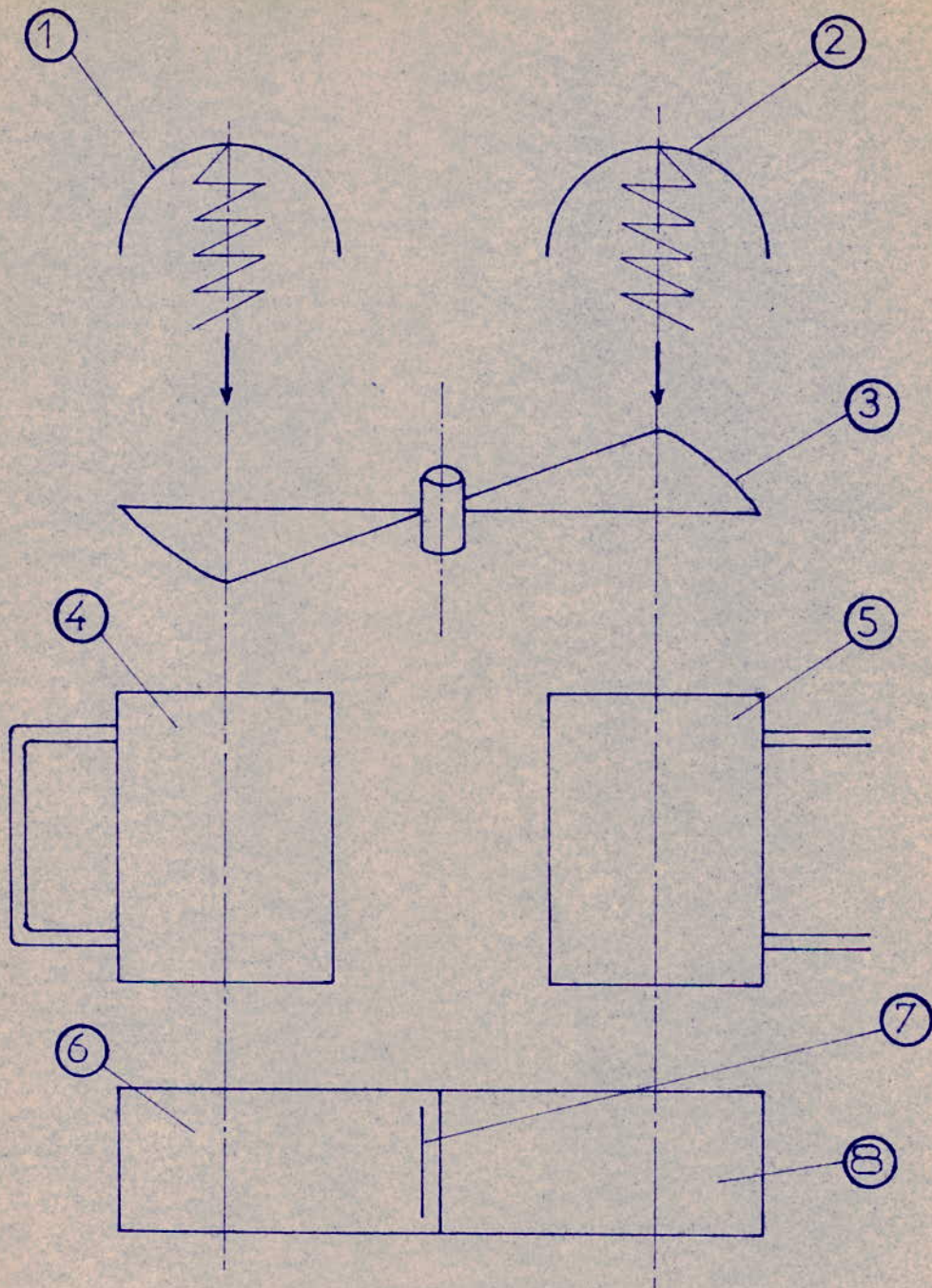
L'oxygène est un des rares gaz paramagnétiques. Ces gaz paramagnétiques sont attirés par la partie intense d'un champ magnétique, leur moment magnétique se superpose dans le même sens au Flux magnétique excitateur et l'amplifie.

Ceci est dû au fait que les atomes de ces gaz sont de nature, pourvus d'un moment magnétique permanent.

### 2.2 Fonctionnement.(Page 4)

Le mélange à analyser s'écoule dans les tubes T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub> placés dans l'entrefer d'un puissant aimant permanent dont l'un des pôles S, constitué moitié en fer doux (S<sup>+</sup>) moitié en matériau non magnétique (S<sup>-</sup>) tourne autour de son axe en soumettant les deux tubes à des actions périodiques de champ. Celles-ci provoquent dans le gaz paramagnétique des variations de forces qui, normalement sont égales deux à deux et de sens contraires. Afin d'obtenir une résultante positive on crée une dissymétrie du champ en chauffant une partie de la colonne de gaz par un enroulement.





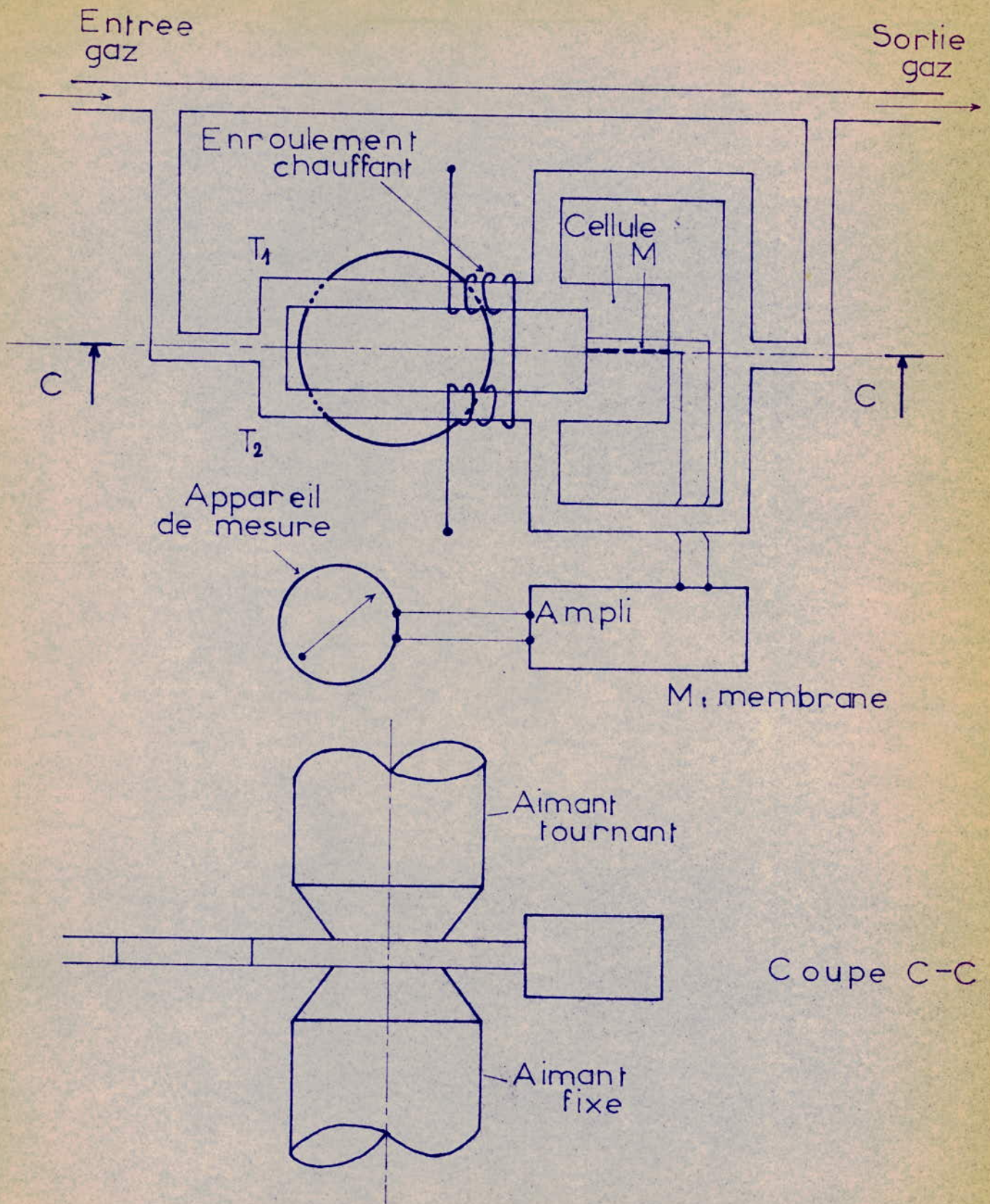
- |                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| 1-2 Emetteur     | 4 Tube de comparaison   |
| 5 Tube d'analyse | 3 Obturateur            |
| 7 Membrane       | 6-8 Chambre (récepteur) |

# SCHEMA SYNOPTIQUE DE L'ANALYSEUR A INFRA-ROUGE

Les forces admettent alors une résultante qui agit sous forme de variations de pression sur la membrane d'un condensateur à capacité variable.

Chaque fois que le pôle S tourne de  $180^\circ$  la pression sur la membrane change de sens et l'on recueille aux bornes une tension modulée.

La mesure de cette tension, après amplification et redressement peut être enregistrée ou lue.



SHEMA DE PRINCIPE DE L'ANALYSEUR D'OXYGENE

### 3 - ANALYSE DES GAZ DE COMBUSTION.

#### 3.1 Méthode d'analyse des gaz. (Page 6)

Le principe consiste à mesurer alternativement les concentrations en CO<sub>2</sub> , CO existant réellement dans les gaz et la quantité de CO<sub>2</sub> qui devrait exister si la combustion était totale.

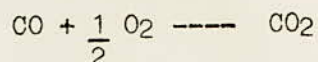
La prise des gaz de combustion se fait au moyen d'une sonde à circulation d'eau qui offre l'avantage de fixer l'échantillon de gaz, empêchant ainsi toute modification.

Cette sonde alimente par l'intermédiaire de deux robinets pointeau deux circuits en parallèle :

##### - Premier circuit :

Pour mesurer le CO<sub>2</sub> total, on réalise préalablement la combustion des imbrulés dans un four électrique qui doit être placé le plus près possible du lieu de prélèvement des gaz afin de récupérer les imbrulés liquides ou condensables, car ces imbrulés risqueraient de se déposer dans les canalisations, si le four était trop éloigné du lieu de prélèvement.

La transformation des imbrulés en CO<sub>2</sub> a lieu dans un tube en acier inoxydable contenant de la tournure de cuivre oxydée; l'oxygène non utilisé au cours de la combustion dans le foyer étudié permet la transformation des imbrulés en CO<sub>2</sub> ; d'après la réaction chimique élémentaire :



Le tube est chauffé à 1000° C pour que l'oxydation de tous les imbrulés soit rapide.

A la sortie du four le tube est entouré d'une circulation d'eau froide pour provoquer une chute rapide du gradient de température et "figer" les équilibres chimiques établis.

##### - Deuxième circuit :

Le CO<sub>2</sub> réel et les imbrulés sont dosés directement dans les gaz de combustion.

Les gaz provenant des deux circuits traversent un déshydrateur constitué d'un petit échangeur à contre-courant dans lequel le fluide réfrigérant est de l'eau fraîche provenant du réseau. La vapeur d'eau contenue dans les gaz de combustion est condensée et l'eau est recueillie en bas dans un pot de condensation.

Après un refroidissement convenable les gaz, qui sont chargés de poussières, sont épurés par un filtre puis desséchés par du chlorure de calcium (Ca Cl<sub>2</sub>). L'élimination totale de la vapeur d'eau est indispensable car très absorbante dans l'infra-rouge, elle risquerait d'introduire dans l'analyseur une absorption supplémentaire qui aurait pour conséquence de fausser les mesures.

L'aspiration des gaz se fait par une pompe placée à proximité de la sonde de prélèvement entre le déshydrateur et le filtre. L'emploi de la pompe placée en aval de l'analyseur, présente l'inconvénient de mettre l'ensemble en dépression, d'où rentrées d'air s'il y a la moindre fuite.

# ANALYSEURS

robinet de réglage de débit

POTENTIOMETRE ENREGISTREUR

DESHYDRATEUR

robinet pointeau

prise de gaz

pompe

pot de garde

pot de condensation

FOUR

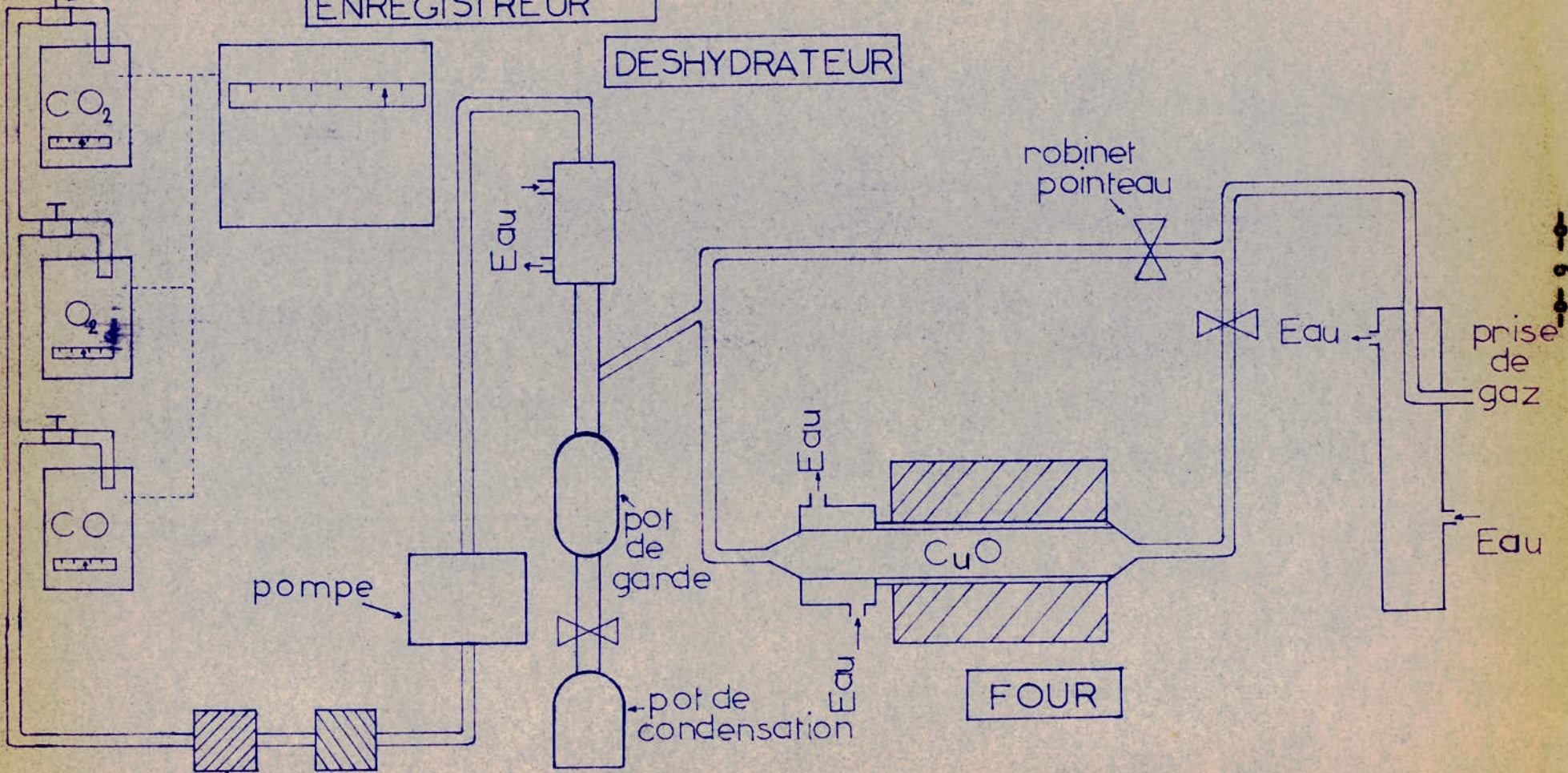
dessiccateur  $\text{CaCl}_2$  filtre

Eau

Eau

Eau

Eau



## SCHEMA DE L'INSTALLATION D'ANALYSE DES GAZ

La mesure des concentrations des gaz peut être enregistrée sur potentiomètre ou lue directement sur les analyseurs.

### 3.2 Appareillage d'analyse des gaz.

L'appareillage a été réalisé en trois parties distinctes :

- Une table, placée à proximité du foyer de combustion supporte le four et le dispositif des robinets à pointeau.
- Un rack qui comprend les appareils chimiques et les analyseurs.
- Un rack où sont placées les bouteilles de gaz étalon.

### 3.3 Précision de la méthode.

La précision de cette méthode d'analyse des gaz est assez difficile à déterminer car elle est liée à de nombreux facteurs. Les différentes erreurs peuvent provenir principalement :

- du four : on ignore si tous les inbrûlés sont transformés intégralement en CO<sub>2</sub>
- de la dessiccation des gaz : malgré l'emploi d'agents chimiques énergiques, il peut subsister une petite quantité de vapeur d'eau.
- de l'analyseur des gaz, la précision de cet appareil dépend :
  - a) de la précision avec laquelle l'étalonnage a été fait à partir de mélanges de concentrations connues c'est à dire de la pureté des gaz et de la méthode de mélange.
  - b) de la stabilité de l'appareil lui même : elle est subordonnée aux variations de tension et de fréquence du secteur et à la constance des éléments de constructions : lampes, condensateurs, etc...
  - c) des variations de pression et de température du gaz à analyser qui jouent un rôle sur l'absorption infra-rouge.

#### 4 - REPLISSAGE DES BOUTEILLES DE GAZ ETALON.

##### 4.1 Système de remplissage. (Page 9)

Nous disposons d'un banc destiné au remplissage de bouteilles étalon de gaz ou d'un mélange de gaz dans des proportions bien déterminées, à partir des bouteilles de  $N_2$ , CO,  $CO_2$ .

Le banc comprend :

- 1 bouteille de  $N_2$
- 1 bouteille de CO
- 1 bouteille de  $CO_2$

Les tubes de jonction entre ces différentes bouteilles sont en cuivre résistant aux fortes pressions.

Un manomètre permet de fixer la pression du gaz à injecter dans la bouteille à remplir.

Une pompe permet de faire le vide avant le remplissage pour éliminer les gaz résiduels.

Les tubes de jonction et les robinets pointeau sont fixés à un support en cornières.

##### 4.2 Principe de remplissage.

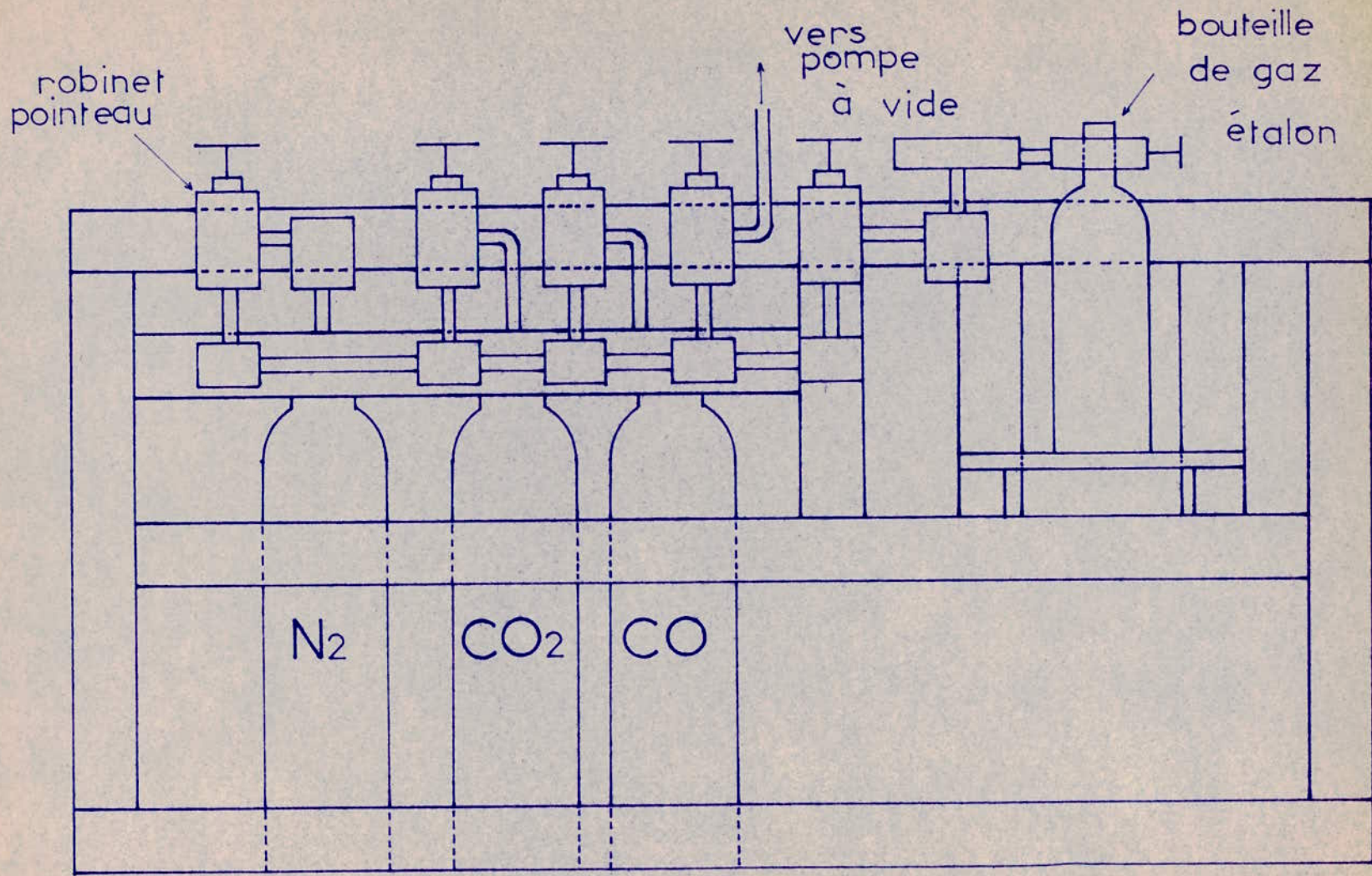
Soit à remplir une bouteille de gaz à un pourcentage donné comme le CO:

Après avoir fait le vide dans la bouteille ainsi que dans les canalisations, on affiche une pression de x bars en ouvrant la bouteille de CO. Une fois cette pression atteinte on ferme la bouteille de CO.

On complète ensuite jusqu'à 100 bars avec l'azote.

Le pourcentage de CO obtenu est approximatif, il est déterminé à partir de l'étalonnage fait avec des bouteilles de gaz étalon de CO remplies précédemment.

La même opération est répétée pour les autres gaz.



SHEMA DU SYSTEME DE REMPLISSAGE DES BOUTEILLES DE GAZ ETALON



-o- /// H A P I T R E II -o-

///- T U D E T H E O R I Q U E S U R L A C O M B U S T I O N  
D U G A Z N A T U R E L D E H A S S I R ' M E L

.....

1 - COMPOSITION MOLAIRE DU GAZ NATUREL DE HASSI R'MEL.

Méthane (CH <sub>4</sub> )	.....	83,43 %
Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	.....	6,92 %
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	.....	2,12 %
Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	.....	0,83 %
Pentane (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	.....	0,21 %
Hexane (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	.....	0,13 %
Hélium (He)	.....	0,19 %
Azote (N <sub>2</sub> )	.....	5,93 %
Gaz carbonique (CO <sub>2</sub> )	.....	0,21 %

2 - FORMULE BRUTE DU GAZ NATUREL.

2.1.1 Nombre d'atomes de carbone dans 1 mole de G.N : N (C).

83,43 moles de CH <sub>4</sub>	contiennent	: 1.	83,43	=	83,43	atomes de C		
6,92 " " C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	"	: 2.	6,92	=	13,84	" " "		
2,12 " " C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	"	: 3.	2,12	=	6,36	" " "		
0,83 " " C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	"	: 4.	0,83	=	3,32	" " "		
0,21 " " C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	"	: 5.	0,21	=	1,05	" " "		
0,13 " " C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	"	: 6.	0,13	=	0,78	" " "		
0,21 " " CO <sub>2</sub>	"	: 1.	0,21	=	0,21	" " "		

$$N (C) = 83,43 + 13,84 + 6,36 + 3,32 + 1,05 + 0,78 + 0,21 = 108,99$$

(108,96)

$N (C) = 108,99 \text{ atomes de C}$
--------------------------------------

2.1.2 Masse de carbone : m (C)

Masse atomique de C = 12,01

$$m (C) = 108,99 \cdot 12,01 = 1308,9699 \text{ gr}$$

2.2.1 Nombre d'atomes d'hydrogène dans 1 mole de GN : N (H).

83,43 moles de CH <sub>4</sub>	contiennent	:	4.	83,43	=	333,72	atomes de H
6,92 " " C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	"	:	6.	6,92	=	41,52	" " "
2,12 " " C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	"	:	8.	2,12	=	16,96	" " "
0,83 " " C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	"	:	10.	0,83	=	8,3	" " "
0,21 " " C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	"	:	12.	0,21	=	2,52	" " "
0,13 " " C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	"	:	14.	0,13	=	1,82	" " "

$$N (H) = 333,72 + 41,52 + 16,96 + 8,3 + 2,52 + 1,82 = 404,84$$

$$\boxed{N (H) = 404,84 \text{ atomes de H}}$$

2.2.2 Masse d'hydrogène : m (H)

Masse atomique de H = 1,008 g

$$m (H) = 404,84 \cdot 1,008 = 408,0787 \text{ g}$$

2.3.1 Nombre d'atomes d'azote dans 1 mole de G.N : N (N).

5,93 moles de N<sub>2</sub> contiennent : 2. 5,93 = 11,86 atomes de N.

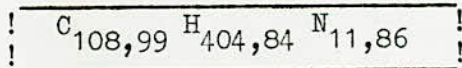
$$\boxed{N (N) = 11,86 \text{ atomes de N}}$$

2.3.2 Masse d'azote : m (N).

masse atomique de N = 14,008

$$m (N) = 11,86 \cdot 14,008 = 166,1348$$

La formule brute s'écrit :



3 - FORMULE FICTIVE DU GAZ NATUREL

Nous cherchons la formule fictive d'un gaz de la forme : C x Hy Nz.  
avec x,y,z les nombres d'atomes de carbone d'hydrogène et d'azote.

$$C_x H_y N_z \equiv C \frac{108,99}{K} \quad H \frac{404,84}{K} \quad N \frac{11,86}{K}$$

$$x = \frac{108,99}{K} \quad y = \frac{404,84}{K} \quad z = \frac{11,86}{K}$$

Pour une mole de 100 gr :

$$100 = 12,01x + 1,008y + 14,008z$$

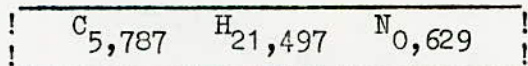
En remplaçant x,y,z par leurs expressions :

$$K = \frac{1}{100} \left[ 12,01 \cdot 108,99 + 1,008 \cdot 404,84 + 14,008 \cdot 11,86 \right]$$

$$K = 18,831$$

$$x = 5,787 \quad y = 21,497 \quad z = 0,629$$

La formule fictive s'écrit :



4 - MASSE MOLEAIRE DU G.N :  $M_{GN}$

masse molaire du	$CH_4$	=	16,042
"	"	"	$C_2H_6$ = 30,068
"	"	"	$C_3H_8$ = 44,094
"	"	"	$C_4H_{10}$ = 58,12
"	"	"	$C_5H_{12}$ = 72,146
"	"	"	$C_6H_{14}$ = 86,172
"	"	"	$H_e$ = 4,003
"	"	"	$N_2$ = 28,016
"	"	"	$CO_2$ = 44,01

$$M_{GN} = \frac{1}{100} (16,042 \cdot 83,43 + 30,068 \cdot 6,92 + 44,094 \cdot 2,12 + 58,12 \cdot 0,83 + 72,146 \cdot 0,21 + 86,172 \cdot 0,13 + 4,003 \cdot 0,19 + 28,016 \cdot 5,93 + 44,01 \cdot 0,21)$$

$M_{GN} = 18,90664 \text{ Kg/Knde}$
-------------------------------------

5 - MASSE VOLUMIQUE DU GN :  $\rho^{\circ} GN$

La masse volumique du	$CH_4$	est	$\rho^{\circ}$	=	0,7168 g/l
"	"	"	"	"	$C_2H_6$ " $\rho^{\circ}$ = 1,356 g/l
"	"	"	"	"	$C_3H_8$ " $\rho^{\circ}$ = 2,019 g/l
"	"	"	"	"	$C_4H_{10}$ " $\rho^{\circ}$ = 2,703 g/l
"	"	"	"	"	$N_2$ " $\rho^{\circ}$ = 1,2505 g/l

Les masses volumiques des différents composants du G.N sont données par les tables de RIBAUD.

$$\rho^{\circ} GN = \frac{1}{100} (83,43 \cdot 0,7168 + 6,92 \cdot 1,356 + 2,12 \cdot 2,019 + 0,83 \cdot 2,703 + 5,93 \cdot 1,2505) = 0,83125 \text{ g/l.}$$

6 - VOLUME MOLAIRE DU GN :  $V_o$  GN

Le Volume molaire du  $CH_4$  est  $V_o = 22,362$  l/mole

" " " "  $C_2H_6$  "  $V_o = 22,16$  l/mole

" " " "  $C_3H_8$  "  $V_o = 21,82$  l/mole

" " " "  $C_4H_{10}$  "  $V_o = 21,49$  l/mole

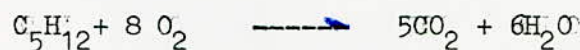
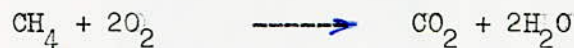
" " " "  $N_2$  "  $V_o = 22,40$  l/mole

$$V_{oGN} = \frac{1}{100} (83,43 \cdot 22,36 + 6,92 \cdot 22,16 + 2,12 \cdot 21,82 + 0,83 \cdot 21,49 + 5,93 \cdot 22,40) = 22,15769 \text{ l/mole.}$$

Pour le calcul de la masse volumique et du volume molaire nous avons négligé les composants du GN dont les pourcentages sont faibles.

7 - CALCUL DU RAPPORT STOECHIMETRIQUE (C/A)<sub>st.</sub>

7.1 REACTIONS CHIMIQUES DES COMPOSANTS DU G.N EN MELANGE STOECHIMETRIQUE :



7.2 CALCUL DE LA MASSE D'AIR.

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

Pour 83,43 moles de  $\text{CH}_4$  il faut :  $2 \cdot 83,43 = 166,86$  moles de  $\text{O}_2$

" 6,92 " "  $\text{C}_2\text{H}_6$  " " :  $\frac{7}{2} \cdot 6,92 = 24,22$  " "

" 2,12 " "  $\text{C}_3\text{H}_8$  " " :  $5 \cdot 2,12 = 10,60$  " "

" 0,83 " "  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  " " :  $\frac{13}{2} \cdot 0,83 = 5,395$  " "

" 0,21 " "  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  " " :  $8 \cdot 0,21 = 1,68$  " "

" 0,13 " "  $\text{C}_6\text{H}_{14}$  " " :  $\frac{19}{2} \cdot 0,13 = 1,235$  " "

La masse d'oxygène nécessaire à la combustion de 100 moles de G.N est :

$166,86 + 24,22 + 10,60 + 5,395 + 1,68 + 1,235 = 209,99$  moles  $\text{O}_2 = 209,99 \cdot 32$

$= 6719,68$  gr

masse de  $\text{N}_2$  correspondant à 3,76 moles de  $\text{N}_2$  :  $209,99 \cdot 3,76 \cdot 28,016 =$

22 120,3802 gr

La masse d'air :

$$6719,68 + 22120,3802 = 28840,0602 \text{ grs}$$

Or la masse du GN :  $M_{GN} = 18,90664 \text{ kg/kmde}$  (Voir page I3).

$$C = M_{GN} = 1890,664 \text{ pour 100 moles}$$

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

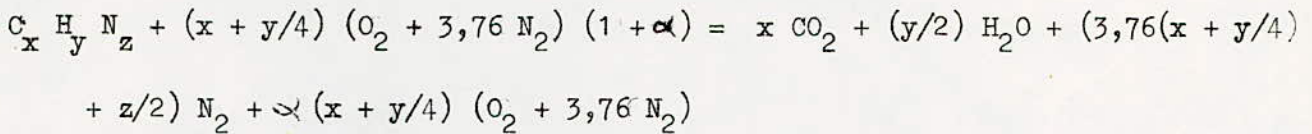
$$\boxed{\left( \frac{C}{A} \right)_{st} = 0,06555}$$



8 - DETERMINATION DES RELATIONS / :

$$a \text{ CO}_2 = f(\phi) \quad \text{et} \quad a' \text{ CO}_2 = f(\phi).$$

L'équation générale de la combustion d'un hydrocarbure s'écrit :



avec  $x, y, z$  les nombres d'atomes de C, de H<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>.

Le nombre de molécules de gaz produites par la combustion d'une molécule de l'hydrocarbure :

$$\begin{aligned} \check{V} &= x + y/2 + (3,76(x + y/4) + z/2) + \alpha(x + y/4)(1 + 3,76) = 4,76x + 5,76 \frac{y}{4} \\ &+ \frac{z}{2} + 4,76\alpha(x + y/4) = 4,76x + 1,44y + 0,5z + 4,76\alpha(x + y/4) \end{aligned}$$

En éliminant l'eau nous aurons :

$$\check{V}' = \check{V} - y/2$$

En remplaçant  $x, y, z$  par leurs valeurs trouvées à la page I2, il vient :

$$\check{V} = 58,8156 + 53,1275 \alpha$$

$$\check{V}' = 48,0671 + 53,1275 \alpha$$

$$\alpha = \frac{1 - \phi}{\phi} \quad ; \quad \alpha \text{ étant l'excès de l'air}$$

$$\phi = \frac{(C/A)}{(C/A)_{st}} \quad \text{la richesse}$$

$$\check{V} = (53,1275 + 5,6881 \phi) / \phi$$

$$\check{V}' = (53,1275 - 5,0604 \phi) / \phi$$

8.1 Teneur en CO<sub>2</sub> des gaz brûlés non desséchés : a CO<sub>2</sub>

$$a \text{ CO}_2 = \frac{100 x}{\check{V}} = \frac{5,787 \cdot 100 \cdot \phi}{53,1275 + 5,6881 \phi}$$

avec  $x$  : le nombre d'atomes de carbone

$$a \text{ CO}_2 = \frac{100 \phi}{9,1804 + 0,9829 \phi}$$

8.2 Teneur en CO<sub>2</sub> des gaz brûlés desséchés : a' CO<sub>2</sub>

$$a' CO_2 = \frac{100 \cdot x}{V'} = \frac{5,787 \cdot 100 \cdot \phi}{53,1275 - 5,0604 \phi}$$

$$\boxed{a' CO_2 = \frac{100 \phi}{9,1804 - 0,8744 \phi}}$$

Pour le tracé des courbes :

$$a CO_2 = f(\phi) \text{ et } a' CO_2 = f'(\phi).$$

Voir pages 19 et 20

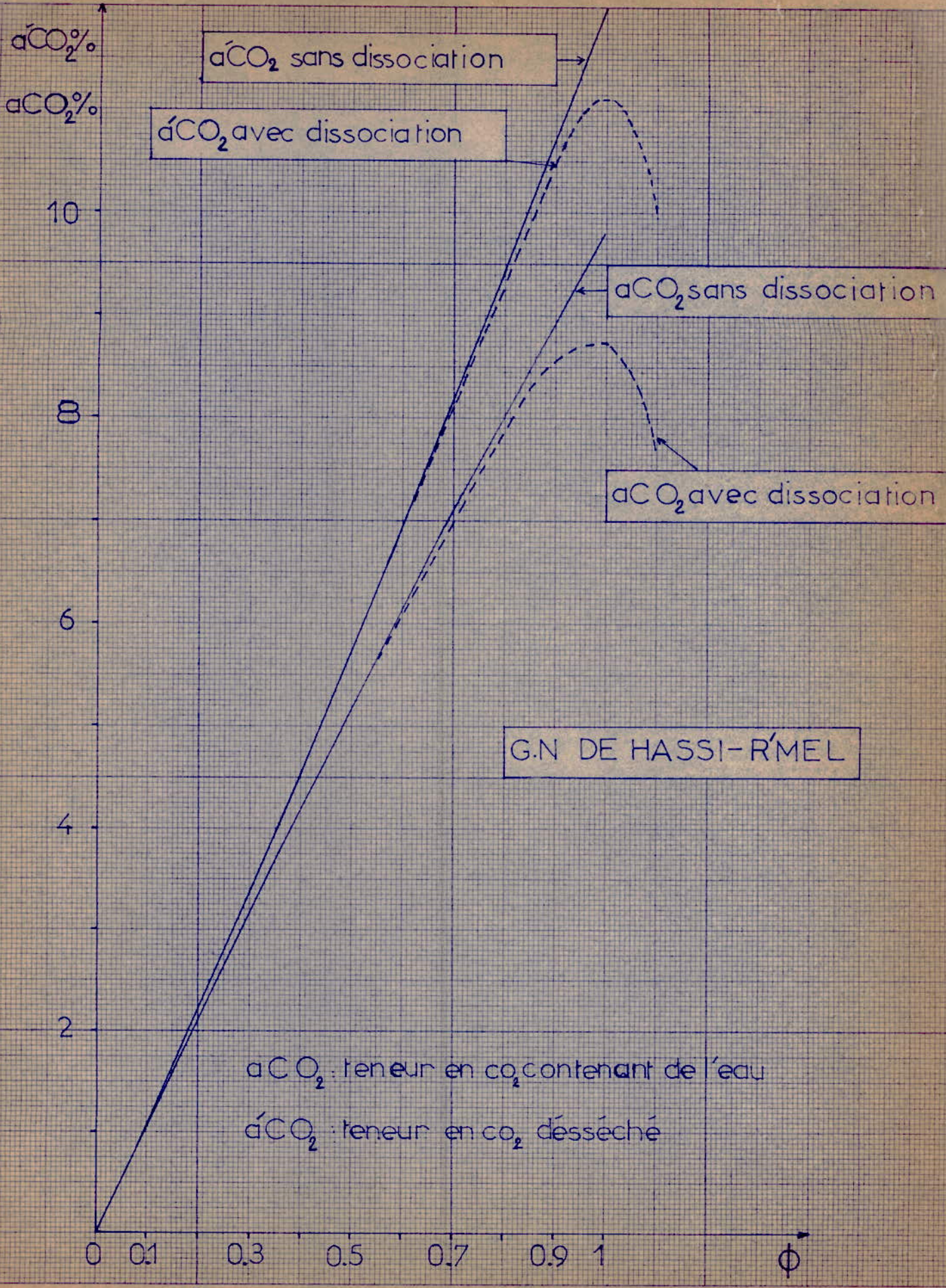
Intérêt des courbes :

Elles permettent de faire des comparaisons avec les valeurs données par les analyseurs connaissant les richesses.

$\phi$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$aC O_2$	1,077	2,132	3,166	4,178	5,169	6,141	7,093	8,026	8,941	9,832
$a'C O_2$	1,099	2,220	3,364	4,529	5,718	6,931	8,169	9,433	10,722	12,039

$$aC O_2 = f(\phi)$$

$$a'C O_2 = f(\phi)$$



9 - CALCUL DES ENTHALPIES DU GN :

9.1 Enthalpie de formation du GN à  $T_r = 0^\circ\text{K}$

9.1.1 Rappel théorique

L'enthalpie standard de formation ( $\Delta H_f^\circ$ ) est la variation d'enthalpie qui accompagne la formation d'une mole d'un composé dans son état standard à partir de ses éléments, également dans leur état standard.

L'enthalpie sensible est utilisée lorsqu'il n'y a pas de réactions chimiques dans les transformations thermodynamiques. Elle est symbolisée par :

$$\Delta H_s^\circ = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$

Ces enthalpies sont données par les tables de RIBAUD à la température de référence  $T_r = 298^\circ\text{K}$  et ceci pour chaque composant.

On peut facilement passer d'une énergie de formation d'un composant chimique  $i$ , à la température de référence  $T_r = 298^\circ\text{K}$  à l'énergie de formation à  $0^\circ\text{K}$  en réalisant les transformations fictives dans le diagramme  $H - T$  :

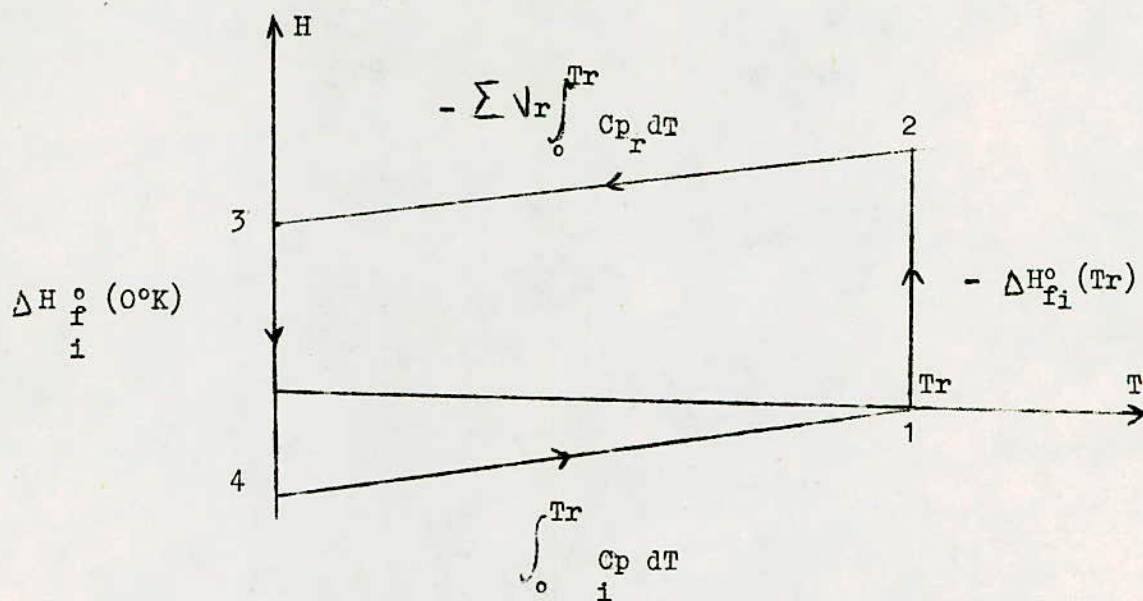
de 1 à 2 : décomposition du produit  $i$  en ses éléments à  $T_r$  K par fourniture de  $-\Delta H_{f,i}^\circ(T_r)$

de 2 à 3 : refroidissement de  $T_r$  à  $0^\circ\text{K}$  des gaz formés.

de 3 à 4 : formation du produit  $i$  à  $0^\circ\text{K}$  :  $\Delta H_{f,i}^\circ(0^\circ\text{K})$

de 4 à 1 : Echauffement du produit  $i$  de  $0^\circ\text{K}$  à  $T_r$  :

$$\int_0^{T_r} C_{pi} dT$$



$$\Delta H_{13} = -(\Delta H_{f_i}^0)^{Tr} - \sum (\nu_r \int_0^{Tr} C_{pr} dT)$$

$$\Delta H_{31} = (\Delta H_{f_i}^0)^0 + \int_0^{Tr} C_{p_i} dT$$

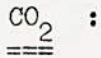
avec  $\nu_r$  le nombre de moles d'espèce  $r$  composant la mole  $i$ .

D'après la loi de HESS : Le  $\Delta H$  d'une réaction est indépendant du nombre d'étapes ou de la nature du chemin par lequel passe la réaction.

On peut écrire :

$$(\Delta H_{f_i}^0)^{Tr} - (\Delta H_{f_i}^0)^0 = \int_0^{Tr} C_{p_i} dT - \sum (\nu_r \int_0^{Tr} C_{p_r} dT)$$

9.1.2 Application :



$$(\Delta H_f^{\circ})_{CO_2}^{298^{\circ}K} - (\Delta H_f^{\circ})_{CO_2}^{0^{\circ}K} = \int_0^{298^{\circ}K} (C_p)_{CO_2} dT - \left[ \int_0^{298^{\circ}K} (C_p)_C dT + \int_0^{298^{\circ}K} (C_p)_{CO_2} dT \right]$$

$$(\Delta H_f^{\circ})_{CO_2}^{0^{\circ}K} = (\Delta H_f^{\circ})_{CO_2}^{298^{\circ}K} - \int_0^{298^{\circ}K} C_p dT + N \int_0^{298^{\circ}K} C_p dT + n \int_0^{298^{\circ}K} C_p dT$$

$$(\Delta H_f^{\circ})_{CO_2}^{0^{\circ}K} = (\Delta H_f^{\circ})_{CO_2}^{298^{\circ}K} - \Delta H_s^{\circ} CO_2 + \Delta H_s^{\circ} C + \Delta H_s^{\circ} O_2$$

La formule pratique pour le calcul sera :

$$(\Delta H_f^{\circ})_{gaz\ i}^{0^{\circ}K} = (\Delta H_f^{\circ})_{gaz\ i}^{298^{\circ}K} - (\Delta H_s^{\circ})_{gaz\ i} + N (\Delta H_s^{\circ})_C + \frac{n}{2} (\Delta H_s^{\circ})_{H_2}$$

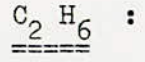
avec n et n respectivement le nombre d'atomes de C et de H du gaz i

$$(\Delta H_f^{\circ})_{CO_2}^{0^{\circ}K} = - 94,0518 - 2,23811 + 0,25160 + 2,06978 = - 93,96853 \frac{kcal}{mole}$$

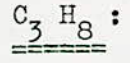
En partant de la formule générale nous aurons pour les composants suivants :



$$(\Delta H_f^{\circ})_{CH_4}^{0^{\circ}K} = - 17,889 - 2,397 + 1 \cdot 0,2516 + 2 \cdot 2,0381 = - 15,98678 \frac{kcal}{mole}$$



$$(\Delta H_f^{\circ})_{C_2H_6}^{0^{\circ}K} = - 20,236 - 2,856 + 2 \cdot 0,2516 + 3 \cdot 2,02381 = - 16,51737 \frac{kcal}{mole}$$



$$(\Delta H_f^{\circ})_{C_3H_8}^{0^{\circ}K} = - 24,820 - 3,512 + 3 \cdot 0,2516 + 4 \cdot 2,02381 = - 19,48196 \frac{kcal}{mole}$$

C<sub>4</sub> H<sub>10</sub> :

$$(\Delta H_f^\circ)^{0^\circ\text{K}} = - 29,812 - 4,645 + 4 \cdot 0,2516 + 5 \cdot 2,02381 = - 23,33155 \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

C<sub>5</sub> H<sub>12</sub> :

$$(\Delta H_f^\circ)^{0^\circ\text{K}} = - 35,000 - 5,668 + 5 \cdot 0,2516 + 6 \cdot 2,02381 = - 27,26714 \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

C<sub>6</sub> H<sub>14</sub> :

$$(\Delta H_f^\circ)^{0^\circ\text{K}} = - 39,960 - 6,691 + 6 \cdot 0,2516 + 7 \cdot 2,02381 = - 30,97473 \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

N<sub>2</sub> :

$$(\Delta H_f^\circ)^{0^\circ\text{K}} = 0 \text{ (par convention).}$$

H<sub>2</sub> O :

$$(\Delta H_f^\circ)^{0^\circ\text{K}} = - 57,7979 - 2,3651 + 1 \cdot 2,02381 + \frac{1}{2} \cdot 2,06978 = - 57,10430 \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

Pour le GN :

$$\begin{aligned} (\Delta H_f^\circ)_{\text{GN}}^{0^\circ\text{K}} &= \frac{1}{100} ( - 93,96853 \cdot 0,21 ) + ( - 15,98678 \cdot 83,43 ) + ( - 16,51737 \cdot 6,92 ) \\ &\quad + ( - 27,26714 \cdot 0,21 ) + ( - 30,97473 \cdot 0,13 ) + ( - 19,48196 \cdot 2,12 ) \\ &\quad + ( - 23,33155 \cdot 0,83 ) = \frac{1}{100} ( - 1538,230402 ) \end{aligned}$$

$$(\Delta H_f^\circ)_{\text{GN}}^{0^\circ\text{K}} = - 15,38230402 \text{ kcal/mole}$$



9.2 Enthalpie globale du GN à 298°K (Tr = 0°K)9.2.1 Rappel théorique

L'enthalpie globale à la température T (°K) (symbolisée par  $H^t$ ) est la somme de l'enthalpie de formation à la température de référence et de l'enthalpie sensible.

$$H^{298^\circ\text{K}} = (\Delta H_F^0)^{0^\circ\text{K}} + \int_0^{298^\circ\text{K}} C_p dT$$

9.2.2. ApplicationCO<sub>2</sub> :

$$H^{298^\circ\text{K}} = - 93,96853 + 2,23811 = - 91,73042 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

CH<sub>4</sub> :

$$H^{298^\circ\text{K}} = - 15,98678 + 2,397 = - 13,58978 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

C<sub>2</sub> H<sub>6</sub> :

$$H^{298^\circ\text{K}} = - 16,51737 + 2,856 = - 13,66137 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

C<sub>3</sub> H<sub>8</sub> :

$$H^{298^\circ\text{K}} = - 19,48196 + 3,512 = - 15,96996 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

C<sub>4</sub> H<sub>10</sub> :

$$H^{298^\circ\text{K}} = - 23,33155 + 4,645 = - 18,68655 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

C<sub>5</sub> H<sub>12</sub> :

$$H^{298^\circ\text{K}} = - 27,26714 + 5,668 = - 21,59914 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

C<sub>6</sub> H<sub>14</sub> :

$$H^{298^\circ\text{K}} = - 30,97473 + 6,691 = - 24,28373 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

N<sub>2</sub> :

$$H^{298^\circ\text{K}} = 0 + 2,07227 = 2,07227 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

O<sub>2</sub> :

$$H^{298^{\circ}K} = 0 + 2,06978 = 2,06978 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

H<sub>2</sub>O :

$$H^{298^{\circ}K} = - 57,1043 + 2,3651 = - 54,73920 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

Pour le GN :

$$H^{298^{\circ}K} = \frac{1}{100} \left[ (-91,73042 \cdot 0,21) + (-13,66137 \cdot 6,92) + (-13,58978 \cdot 83,43) \right. \\ \left. + (-15,96996 \cdot 2,12) + (-18,68655 \cdot 0,83) \right. \\ \left. + (-21,59914 \cdot 0,21) + (-24,28373 \cdot 0,13) + (2,07227 \cdot 5,93) \right]$$

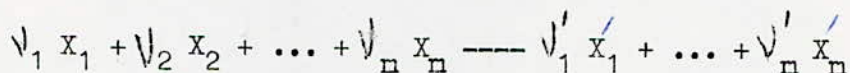
$$H^{298^{\circ}K} = \frac{1}{100} (-1292,365708)$$

$$H^{298^{\circ}K} = 12,92365708 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

### 9.3 Enthalpie de combustion du GN à 298°K (Tr = 0°K).

#### 9.3.1 Rappel théorique.

Considérons l'équation stoechiométrique :



L'enthalpie de combustion à une température quelconque T est donnée par la formule de KIRCHOFF :

$$(\Delta H_c^\circ)^T = \sum_{i=1}^{i=n} \nu'_i \left[ (\Delta H_{F,i}^\circ)^{Tr} + \int_{Tr}^T (C_p)_{xi} dT \right] - \sum_{i=1}^n \nu_i \left[ (\Delta H_{F,i}^\circ)^{Tr} + \int_{Tr}^T (C_p)_{xi} dT \right]$$

avec  $\nu'_i$  et  $\nu_i$  respectivement le nombre de moles des produits et des réactifs.

$$\left[ (\Delta H_{F,i}^\circ)^{Tr} + \int_{Tr}^T (C_p)_{xi} dT \right] = H_{xi}^T : \text{représente l'enthalpie globale.}$$

du composant  $X_i$  à la température  $T = 298^\circ\text{K}$  ( $Tr = 0^\circ\text{K}$ )

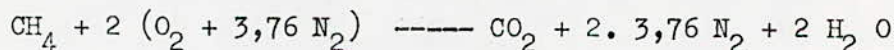
Finalement :

$$(\Delta H_c^\circ)^T = \sum_{i=1}^{i=n} \nu'_i H_{xi}^T (\text{produits}) - \sum_{i=1}^n \nu_i H_{xi}^T (\text{réactifs})$$

#### 9.3.2 Application

CH<sub>4</sub> :

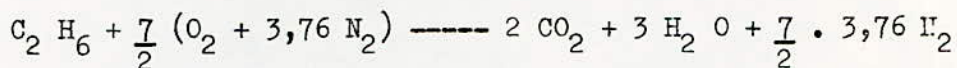
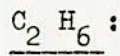
L'équation stoechiométrique de combustion du CH<sub>4</sub> s'écrit :



$$(\Delta H_c^\circ)_{\text{CH}_4}^{298^\circ\text{K}} = (H_{\text{CO}_2}^{298^\circ\text{K}} + 2 \cdot H_{\text{H}_2\text{O}}^{298^\circ\text{K}}) - (H_{\text{CH}_4}^{298^\circ\text{K}} + 2 \cdot H_{\text{O}_2}^{298^\circ\text{K}})$$

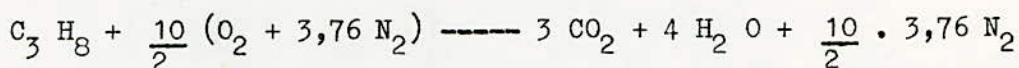
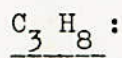
$$(\Delta H_c^\circ)_{\text{CH}_4}^{298^\circ\text{K}} = (-91,73042 - 2 \cdot 54,73920) - (-13,58978 + 2 \cdot 2,06978) = -191,75 \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

De la même manière, nous aurons pour les autres composants :



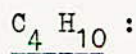
$$(\Delta H_c^\circ)^{298^\circ K} = 2 (- 91,73042) + 3 (- 54,73920) - (- 13,66137 + \frac{7}{2} \cdot 2,06978)$$

$$= - 341,2613 \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$



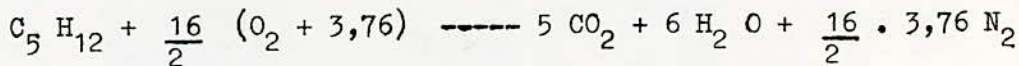
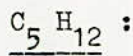
$$(\Delta H_c^\circ)^{298^\circ K} = 3 (- 91,73042) + 4 (- 54,73920) - (- 15,96996 + 5 \cdot 2,06978)$$

$$= -488, 527 \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$



$$(\Delta H_c^\circ)^{298^\circ K} = 4(- 91,73042) + 5(- 54,73920) - (- 18,68655 + \frac{13}{2} \cdot 2,06978)$$

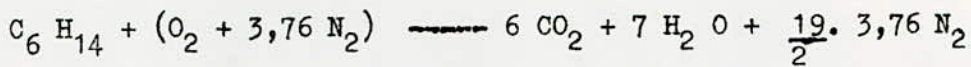
$$= -635,3847 \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$



$$(\Delta H_c^\circ)^{298^\circ K} = 5(- 91,73042) + 6(- 54,7392) - (- 21,59914 + 8 \cdot 2,06978)$$

$$= -782,0464 \frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$$

C<sub>6</sub> H<sub>14</sub> :



$$\begin{aligned} (\Delta H_c^\circ)^{298^\circ K} &= 6 (- 91,73042) + 7 (- 54,7392) - (- 24,28373 + \frac{19}{2} \cdot 2,06978) \\ &= -928,93609 \frac{\text{kcal}}{\text{mole}} \end{aligned}$$

Pour le GN :

$$\begin{aligned} (\Delta H_c^\circ)^{298^\circ K} &= \frac{1}{100} (- 191,75 \cdot 83,43) + (- 341,2613 \cdot 6,92) + (- 488,527 \cdot 2,12) \\ &\quad + (- 635,3847 \cdot 0,83) + (- 782,0464 \cdot 0,21) + (- 928,93609 \cdot 0,13) \\ &= - \frac{20207,98617}{100} = -202,0798617 \frac{\text{kcal}}{\text{mole}} = -10688,30074 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

#### 9.4 Conclusion

Comparons l'enthalpie de combustion du GN calculée avec celle donnée par les listings.

Enthalpie de combustion calculée :  $-10688,30074 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$

Enthalpie de combustion donnée par les listings :  $- 10707 \text{ kcal/kg}$

Nous aurons une erreur de :

$$\left| \frac{10707 - 10688,3}{10707} \right| = \frac{18,7}{10707} < 0,2 \%$$

Les valeurs des différentes enthalpies sont portées sur un tableau en kcal/mole, kcal/kg et kj/kg pour tous les composants du GN et pour le GN.

GAZ	COMP- OSITION	MASSE MOLEC- ULAIRE	$-(\Delta H_f^\circ)^{298^\circ}$	$\Delta H_s^\circ$	$-(\Delta H_f^\circ)^{0^\circ K}$			$-H^{298^\circ K}$			$-(\Delta H_c^\circ)^{298^\circ K}$		
					$\frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
	%	kg/kmole	$\frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{mole}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
N <sub>2</sub>	5,93	28,016	0	2,07227	0	0	0	-2,07227	-73,96737	-30,95904	0	0	0
O <sub>2</sub>		32	0	2,06978	0	0	0	-2,06978	-64,6806	-27,0720	0	0	0
H <sub>2</sub> O		18,016	57,7979	2,3651	57,1043	3169,643	13266,543	54,7392	3038,365	12717,08	0	0	0
He	0,19	4,003	0	—	0	0	0	—	—	—	—	—	—
CO <sub>2</sub>	0,21	44,01	94,0518	2,23811	93,96853	2135,1631	8936,72	91,73042	208,430	872,387	0	0	0
CH <sub>4</sub>	83,43	16,042	17,889	2,397	15,98678	996,5577	4171,0926	13,58978	84,71375	354,5694	19,17586	119,53534	500,3151
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6,92	30,068	20,236	2,856	16,51737	549,3338	2299,23	13,66137	45,43491	190,1678	34,12613	113,49650	475,03965
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2,12	44,094	24,82	3,512	19,4819	441,827	1849,27	15,96996	36,21798	151,59039	48,8527	110,79217	463,7206
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,83	58,12	29,812	4,645	2,33315	401,4375	1680,216	18,6865	32,15166	134,5708	63,5384	109,3229	457,57100
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,21	72,146	35	5,668	27,2671	377,943	1581,88	21,59914	29,93809	125,3059	78,2046	108,3977	453,6987
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,13	86,172	39,960	6,691	30,97473	359,4523	1504,487	24,2837	28,1805	117,94962	92,8936	107,8002	451,1978
GN		18,90664			15,38230	813,5926	3405,292	12,92365	68,35512	286,1003	20,2079	106,8830	447,3588

-o-        H A P I T R E   I I I   -o-

       S S A I S   E T          M E S U R E S

.....

1. ESSAIS SUR MOTEUR R. 16.

1.1. Détermination de l'équation générale de combustion en fonction des produits d'échappement

Ecrivons que le nombre de molécules d'eau est égal au nombre de molécules d'hydrogène qui ne se trouvent pas sous forme de  $H_2$  et de  $CH_4$  :

$$H_2O = 0,5 H/C (CO_2 + CO + CH_4) - H_2 - 2 CH_4 \quad (1)$$

avec  $H/C$  le nombre d'atomes d'hydrogène sur le nombre d'atomes de carbone.

Le nombre de molécules d'oxygène consommé peut être déduit des volumes d'azote et d'oxygène contenus dans les gaz d'échappement :

$$CO_2 + 0,5 CO + 0,5 H_2 O = \frac{1}{3,76} (N_2 - O_2) \quad (2)$$

En éliminant  $H_2 O$  entre (1) et (2) il vient :

$$N_2 = 3,76 (CO_2 + O_2 - CH_4) + 0,94 \frac{H}{C} (CO_2 + CO + CH_4) + 1,88 (CO - H_2) \quad (3)$$

En tenant compte de :

$$N_2 = 100 - (CO_2 + O_2 + CO + CH_4 + H_2)$$

$$H_2 = 0,5 CO \quad CH_4 = 0,22$$

(3) devient :

$$\begin{aligned} CO_2 (4,76 + 0,94 \frac{H}{C}) + CO (2,44 + 0,94 \frac{H}{C}) + 4,76 O_2 \\ = 100 + 0,22 (2,76 - 0,94 \frac{H}{C}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CO = \frac{100 + 0,22 (2,76 - 0,94 H/C)}{2,44 + 0,94 H/C} &= \frac{CO_2 (4,76 + 0,94 H/C)}{2,44 + 0,94 H/C} \\ &= \frac{4,76 O_2}{2,44 + 0,94 H/C} \end{aligned}$$



Cette dernière expression peut s'écrire sous forme de deux équations :

Pour  $CO=0$   
(4)

$$CO_2 = \frac{100 + 0,22 (2,76 - 0,94 H/C)}{4,76 + 0,94 H/C} - \frac{4,76}{4,76 + 0,94 H/C} O_2$$

Pour  $O_2=0$   
(5)

$$CO_2 = \frac{100 + 0,22 (2,76 - 0,94 H/C)}{4,76 + 0,94 H/C} - \frac{2,44 + 0,94 H/C}{4,76 + 0,94 H/C} CO$$

### 1.2 Diagramme de GREBEL.

Le diagramme de GREBEL constitue la méthode graphique la plus couramment utilisée pour l'interprétation des analyses de gaz brûlés de moteur.

Son tracé s'obtient en portant les pourcentages de  $CO_2$  en ordonnée et en abscisse, à partir de la même origine et dans deux directions opposées, les pourcentages de CO et de  $O_2$

Il est possible de tracer un tel diagramme pour chaque combustible connaissant  $\frac{H}{C}$

#### 1.2.1. Application à l'essence et au gaz naturel.

Pour l'essence :

$$\frac{H}{C} = 2,12$$

Portons la valeur de  $\frac{H}{C}$  dans les équations (4) et (5) établis précédemment :

$$CO_2 = \frac{100 + 0,22 (2,76 - 0,94 \cdot 2,12)}{4,76 + 0,94 \cdot 2,12} - \frac{4,76}{4,76 + 0,94 \cdot 2,12} O_2$$

$$= \frac{100,169}{6,75} - \frac{4,76}{6,75} O_2 = 14,95 - 0,705 \cdot O_2$$

$$CO_2 = \frac{100 + 0,22 (2,76 - 0,94 \cdot 2,12)}{4,76 + 0,94 \cdot 2,12} - \frac{2,44 + 0,94 \cdot 2,12}{4,76 + 0,94 \cdot 2,12} CO$$

$$= \frac{100,169}{6,75} - \frac{4,43}{6,75} CO = 14,95 - 0,656 \cdot CO$$

On peut alors tracer les droites de GREBEL (droites théoriques) :

$$\text{CO}_2 = (14,95 - 0,705 \cdot \text{O}_2) \%$$

Pour  $\text{O}_2 = 0$        $\text{CO}_2 = 14,95 \%$

Pour  $\text{CO}_2 = 0$        $\text{O}_2 = 21,2 \%$

La première droite passe par les 2 points de coordonnées : ( $\text{O}_2=0; \text{CO}_2 = 14,95 \%$ )  
et ( $\text{O}_2 = 21,2 \%$  ;  $\text{CO}_2 = 0$ )

$$\text{CO}_2 = (14,95 - 0,656 \text{ CO}) \%$$

Pour  $\text{CO}_2 = 0$        $\text{CO} = 22,8 \%$

La deuxième droite passe par les 2 points de coordonnées : ( $\text{CO}=0; \text{CO}_2 = 14,95 \%$ )  
et ( $\text{CO} = 22,8 \%$  ;  $\text{CO}_2 = 0$ )

Pour le gaz naturel :

$$\frac{\text{H}}{\text{C}} = \frac{404,84}{108,99} = 3,71$$

Les nombres d'atomes d'hydrogène et de carbone ont été calculés au chapitre III.  
Même méthode que précédemment.

$$\text{CO}_2 = \frac{99,839}{8,25} - \frac{4,76}{8,25} \text{O}_2$$

$\text{O}_2 = 0$        $\text{CO}_2 = 12 \%$

$\text{CO}_2 = 0$        $\text{O}_2 = 20,8 \%$

La première droite passe par les points :

( $\text{O}_2 = 0$  ;  $\text{CO}_2 = 12 \%$ ) et ( $\text{O}_2 = 20,8 \%$  ;  $\text{CO}_2 = 0$ )

La deuxième passe par :

( $\text{CO} = 0$  ;  $\text{CO}_2 = 12 \%$ ) et ( $\text{CO} = 21,2 \%$  ;  $\text{CO}_2 = 0$ )

### 1.2.2. Utilisation du diagramme de GREBEL.

Nous portons sur le diagramme de GREBEL les points des analyses effectuées pour de nombreux réglages du moteur, et ceci après une analyse réduite des valeurs expérimentales, réduction s'il y a lieu entre les teneurs en oxyde de carbone et en oxygène lorsque ces deux gaz subsistent simultanément.

Exemple : les valeurs données par les analyseurs sont :

$\text{CO}_2 = 5,4 \%$        $\text{O}_2 = 10 \%$        $\text{CO} = 0,3 \%$

Si la combustion était complète, 0,3 % CO peuvent encore brûler avec 0,15 % de O<sub>2</sub>.

Nous aurons donc :

$$\text{CO}_2 = 5,4 + 0,3 = 5,7 \%$$

$$\text{O}_2 = 10 - 0,15 = 9,85 \%$$

$$\text{N}_2 = 100 - (\text{O}_2 + \text{CO} + \text{CO}_2)$$

$$\text{N}_2 = 100 - (10 + 0,3 + 5,4)$$

$$\text{N}_2 = 84,3 \%$$

La somme totale est 99,85 (=5,7 + 9,85 + 84,3) au lieu de 100

Nous multiplions les valeurs précédentes par  $\frac{100}{99,85}$  pour rapporter à 100 les volumes occupés par les gaz résultant de la combustion totale

On obtient :

$$\text{CO}_2 = 5,7 \% \quad \text{O}_2 = 9,85 \% \quad \text{CO} = 0 \%$$

Nous avons de cette façon établi les tableaux récapitulatifs qui nous permettent de tracer les droites expérimentales de GREBEL.

### 1.3 Interprétation des résultats.

Chaque essai comprend :

- un tableau de mesures
- une courbe d'étalonnage des analyseurs
- un diagramme de combustion (diagramme de GREBEL)

#### 1.3.1 Essai à l'essence.

Sur le diagramme de GREBEL, nous avons obtenu des points en dessous de la droite théorique et dans le domaine du mélange riche en combustible.

On a donc une combustion incomplète, et l'éloignement des points de la droite théorique nous renseigne sur la qualité du réglage de la combustion et de l'analyse des gaz. En effet le circuit d'analyse n'étant pas parfaitement étanche, introduit de l'air dans les gaz prélevés.

1.3.2 Essai au gaz naturel.

Les remarques précédentes peuvent être aussi faites pour l'essai au gaz naturel.

La richesse déterminée à partir du  $\alpha' \text{CO}_2$  donné par l'analyseur (voir courbe p.20) ne correspond pas à la richesse mesurée, ceci est dû en partie à l'imprécision des débinètres du combustible et de l'air.

## 2. ESSAIS SUR BANC DE COMBUSTION.

Le rendement de combustion est donné par :

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

avec  $a' \text{ CO}_2$  réel : teneur en  $\text{CO}_2$  désséché avec dissociation.

$a' \text{ CO}_2$  total : teneur en  $\text{CO}_2$  désséché sans dissociation.

### Interprétation des résultats.

A partir de  $\phi$  mesuré nous pouvons déterminer la teneur en  $a' \text{ CO}_2$  (voir courbe p.20) et la comparer avec celle donnée par les analyseurs. Elle n'est pas la même, car l'air qui rentre ne participe pas tout à la combustion.

Courbes  $T_b = f(\phi)$  :

---

- Essai sur chambre de combustion : les points ne sont pas alignés, ce qui caractérise un écoulement des gaz non homogène.

- Essai avec panier mélangeur : dans ce cas les points sont sur une droite.

Courbes  $a' \text{ CO}_2, \text{O}_2, \text{CO}$ , en fonction de  $\phi$  :

---

- Essai sur chambre de combustion : Pour un même accroissement de la richesse la teneur en  $\text{O}_2$  augmente avec celle de  $\text{CO}_2$ , ce qui est anormal ceci est dû aux vibrations du banc de combustion qui sont transmis aux analyseurs, et en particulier celui de l'oxygène étant très sensible.

TABLEAU-1-

		CO	d'CO <sub>2</sub>			O <sub>2</sub>			
ETALONNAGE		gain 526	gain 360			gain 580			
		pseudo tarage 7,55	pseudo tarage 9						
		air : 1 mV	air : 1 mV			air : 8,4 mV			
		3,2 % CO : 4,35 mV	10,15 % CO <sub>2</sub> : 8,2 mV			100 % CO <sub>2</sub> : 1 mV			
		6,8 % CO : 7,95 mV	4,5 % CO <sub>2</sub> : 3,85 mV						
MESURES					ANALYSE REDUITE				
		% CO	% d'CO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	φ	% CO	% d'CO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	% N <sub>2</sub>
	1	0,3	6,9	7,1	0,663	0	7,20	7,1	85,7
	2	0,2	7,8	5,7	0,7	0	8	5,7	86,3
	3	0,2	8,2	4,5	0,77	0	8,4	4,5	87,1
	4	0,2	8,8	3,4	0,83	0	9	3,4	87,6
	5	0,2	9,5	2	0,862	0	9,7	2	88,3
	6	0,2	10,7	0	0,97	0,2	10,7	0	89,1
7	1,4	10,1	0	1,04	1,4	11,5	0	88,5	

ESSAI DU-3-5-74 AU GN SUR MOTEUR R16

- 57 -

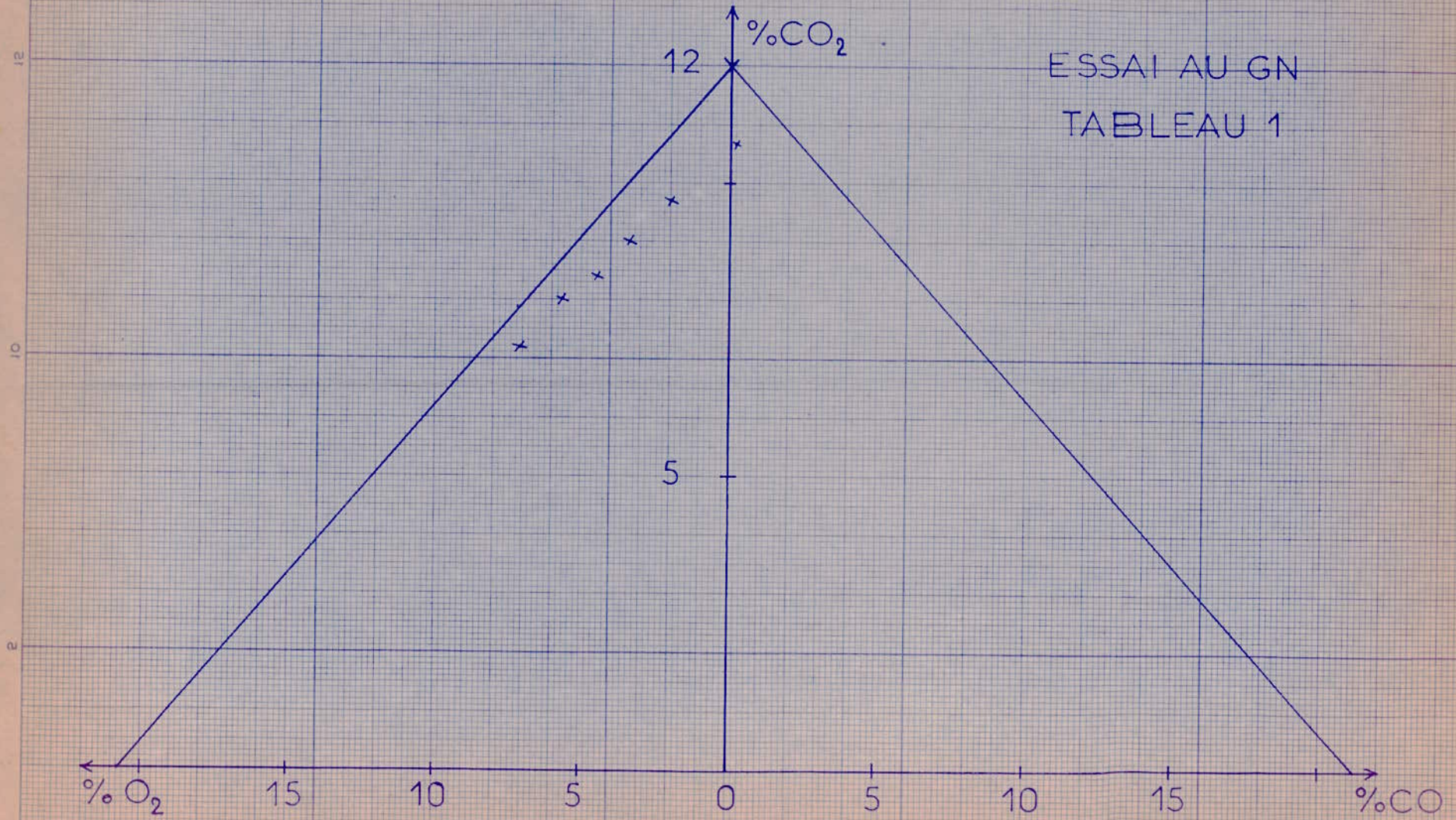


DIAGRAMME DE COMBUSTION

# ETALONNAGE DU -3-5-74

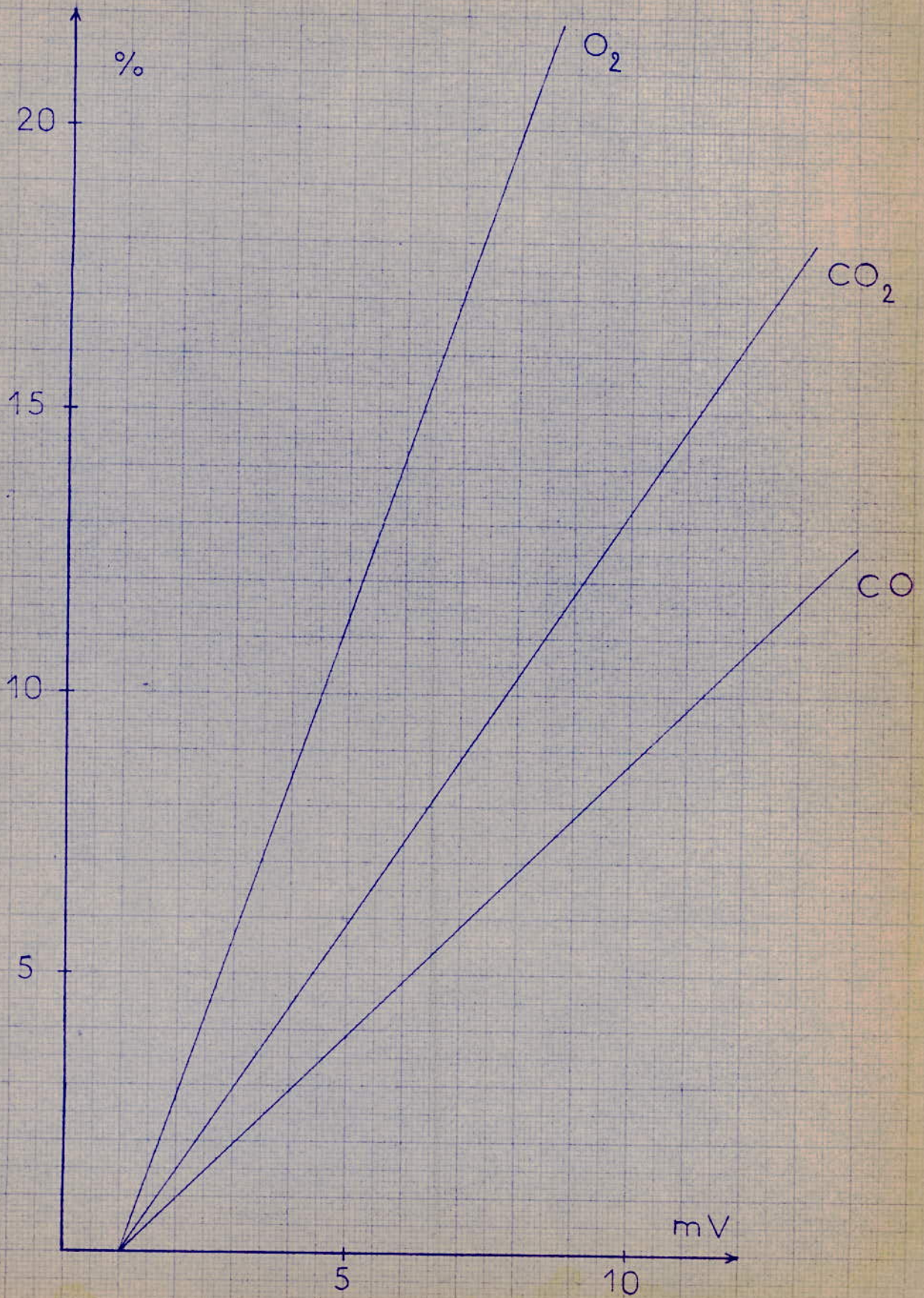




TABLEAU-2-

		CO		dCO <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>				
		gain	515	gain	362	gain	580			
ETA LONNAGE		pseudo tarage 755		pseudo tarage 9						
		air : 1 mV		air : 1 mV		air : 8,5 mV				
		3,2%CO : 4,4 mV		4,5%CO <sub>2</sub> : 3,8 mV		100%CO <sub>2</sub> : 1 mV				
		6,8%CO : 8 mV		10,15 % CO <sub>2</sub> : 8,3 mV						
MESURES						ANALYSE REDUITE				
			%CO	%dCO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	φ	%CO	%dCO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	% N <sub>2</sub>
		1	0,2	8,9	4,5	1	0	9,11	4,41	86,5
		2	0,2	9,2	3,3	1,01	0	9,42	3,21	87,5
		3	0,2	9,4	2,9	1,03	0	9,62	2,81	87,6
		4	0,2	9,8	2,2	1,09	0	10,01	2,11	87,9
		5	0,2	10	1,9	1,1	0	10,25	1,8	88
		6	0,2	10,5	0,8	1,2	0	10,71	0,71	88,6
7	2,6	9,2	0,4	1,34	1,8	9,6	0	88		

ESSAI DU -7-5-74 AU GN SUR MOTEUR R16

- 49 -

ESSAI AU GN  
TABLEAU 2

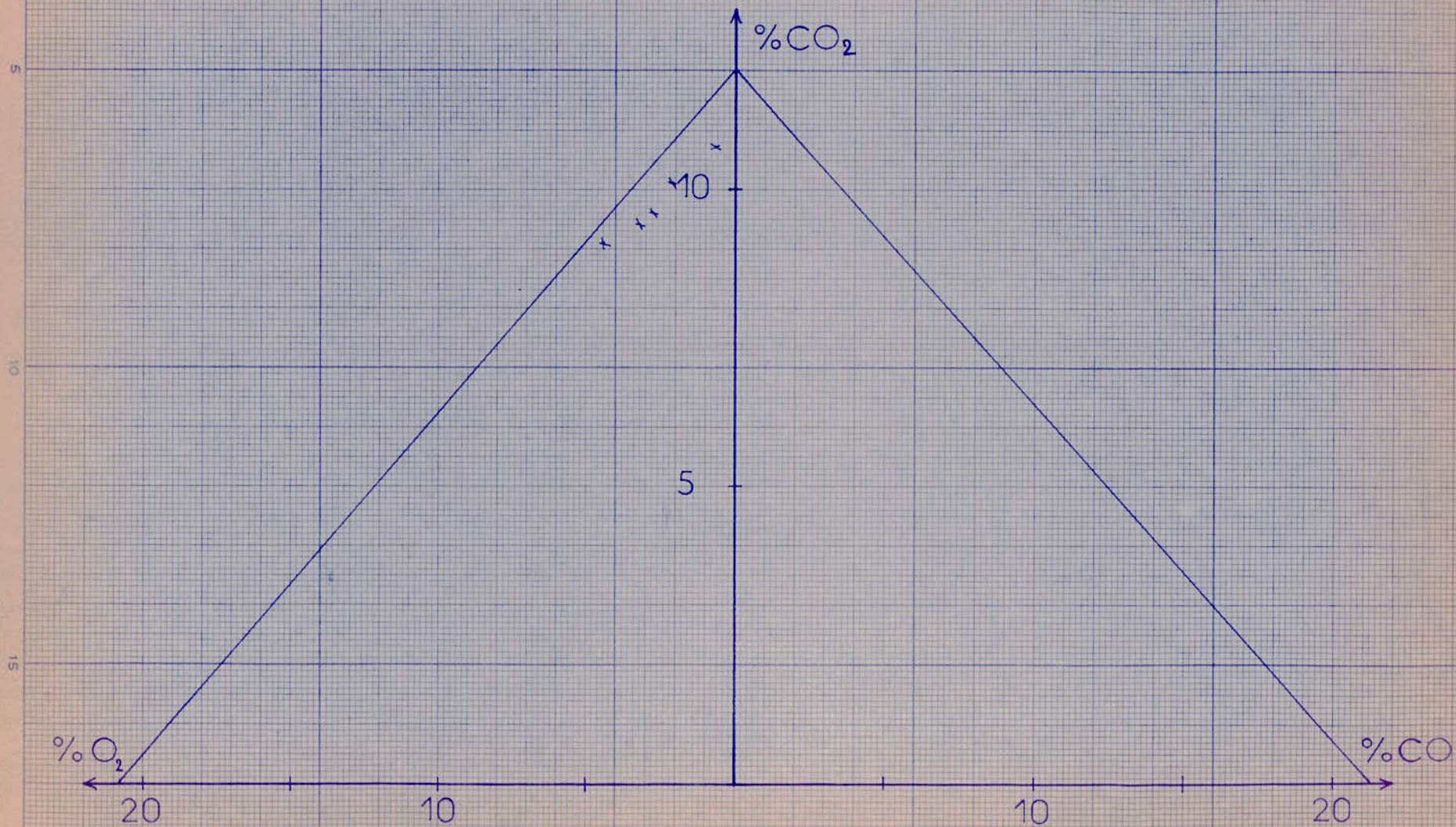


DIAGRAMME DE COMBUSTION

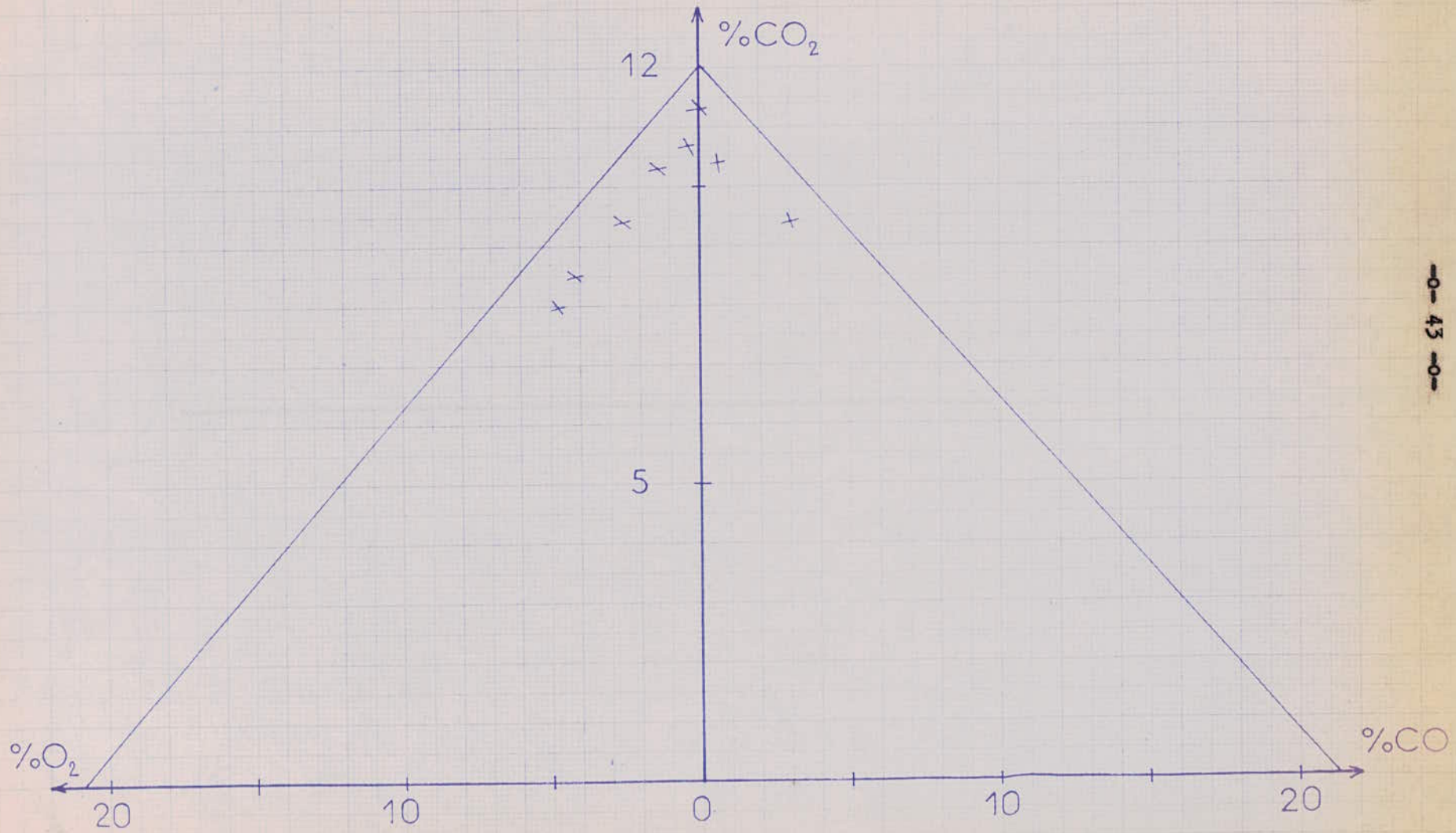
TABLEAU-3-

		CO		d'CO <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>			
ETALONNAGE		voir tableau 2		"		"			
		"		"		"			
		"		"		"			
		"		"		"			
		"		"		"			
MESURES						ANALYSE REDUITE			
		%CO	%d'CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	φ	%CO	%d'CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
	1	0,2	7,8	4,9	0,88	0	8,01	4,81	87,11
	2	0,2	8,3	4,3	0,918	0	8,52	4,21	87,21
	3	0,2	9,2	2,7	1,01	0	9,42	2,61	87,91
	4	0,2	10,1	1,3	1,135	0	10,31	1,21	88,42
	5	0,25	10,5	0,3	1,21	0	10,78	0,176	88,96
	6	0,8	10,3	0,1	1,242	0,6	10,4	0	89,9
7	3	9,4	0	1,425	3	9,4	0	88,6	

ESSAI DU -7-5-74 AU GN SUR MOTEUR R16

9-12-9

ESSAI AU GN  
TABLEAU 3



0-43-0-

DIAGRAMME DE COMBUSTION

# ETALONNAGE DU -7-5-74

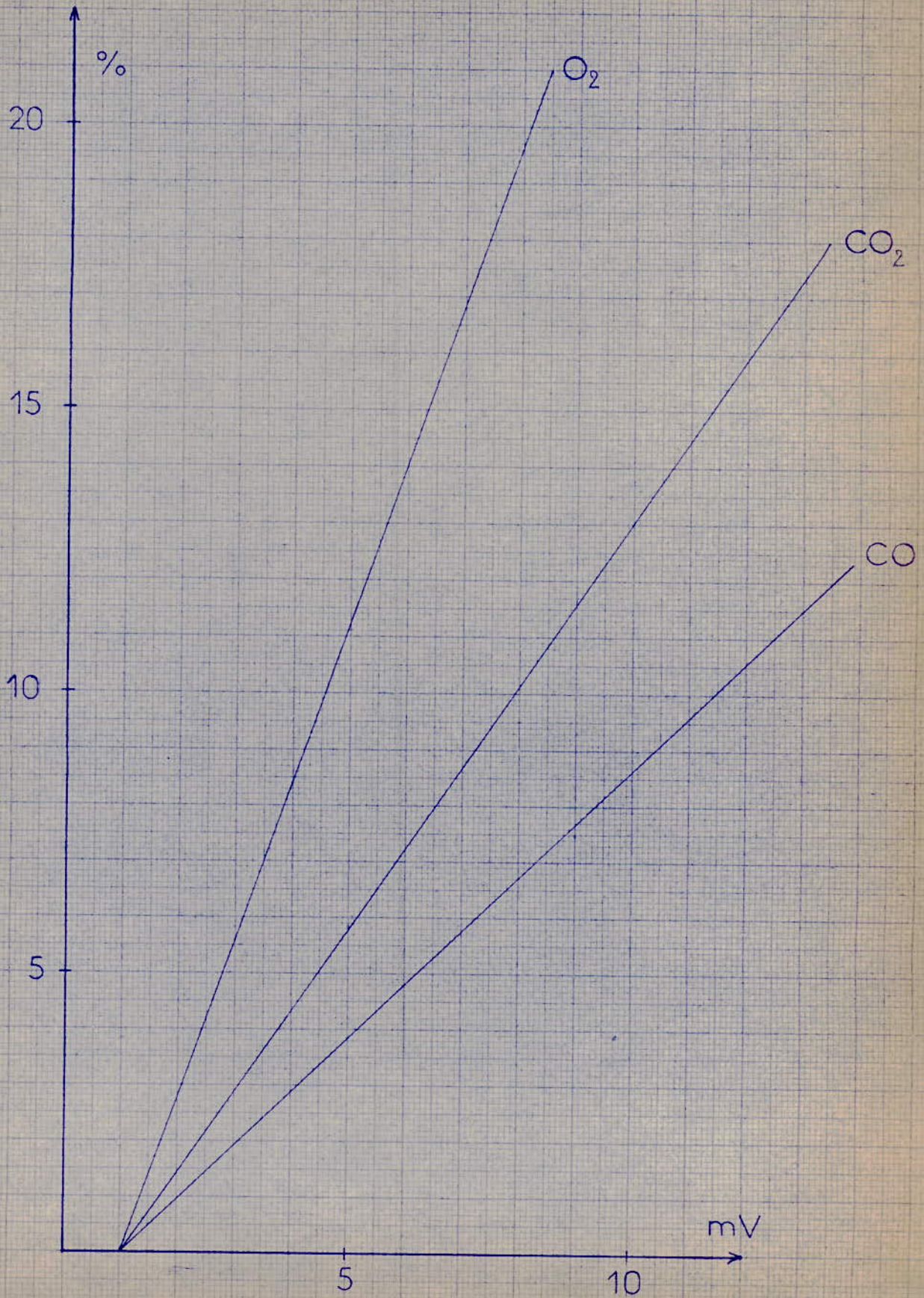
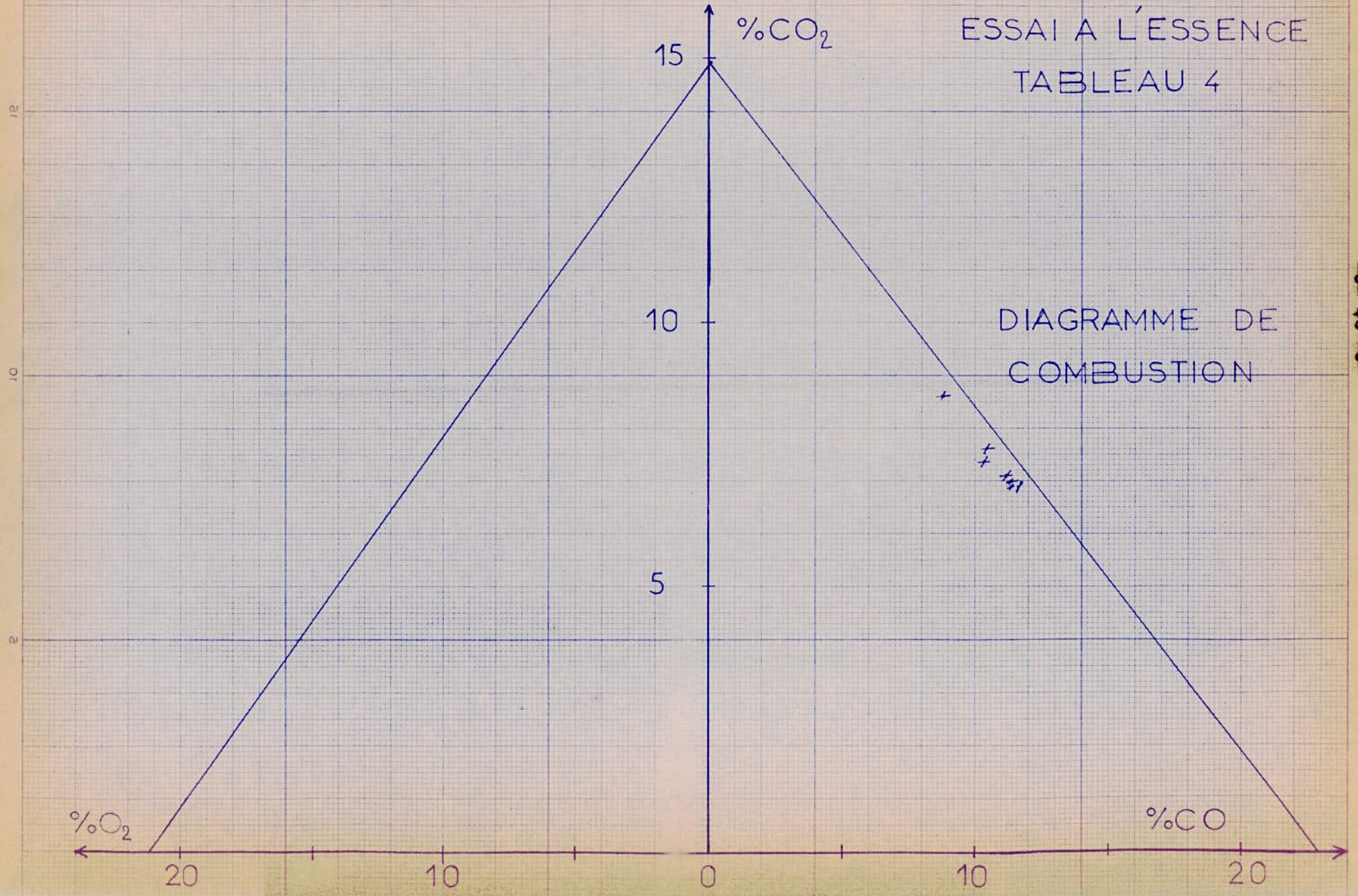


TABLEAU-4-

		CO	$\alpha'CO_2$			$O_2$			
ETA LONNAGE	gain	380	gain 356			gain 580			
	pseudo tarage	5,1	pseudo tarage 9						
	air	: 1,05 mV	air : 1 mV			air : 8,5 mV			
	3,2%CO	: 3,55 mV	4,5%CO <sub>2</sub> : 3,8 mV			100%CO <sub>2</sub> : 1 mV			
	6,8 %CO	: 6,3 mV	10,15%CO <sub>2</sub> : 8,3 mV						
MESURES					ANALYSE REDUITE				
		%CO	% $\alpha'CO_2$	%O <sub>2</sub>	$\phi$	%CO	% $\alpha'CO_2$	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
	1	11,3	7	0,3	1,66	10,7	7,35	0	81,8
	2	11,3	7	0	1,66	11,3	7	0	81,7
	3	11,3	6,9	0	1,76	11,3	6,9	0	81,8
	4	11,35	6,9	0	1,67	11,35	6,9	0	81,75
	5	11,1	7,1	0	1,60	11,1	7,1	0	81,8
	6	10,45	7,6	0	1,64	10,45	7,6	0	81,95
7	8,65	8,6	0	1,49	8,65	8,6	0	82,75	

ESSAI DU-8-5-74 A L'ESSENCE SUR MOTEUR R16

ESSAI A L'ESSENCE  
TABLEAU 4



ESSAI A L'ESSENCE  
TABLEAU 5

DIAGRAMME DE  
COMBUSTION

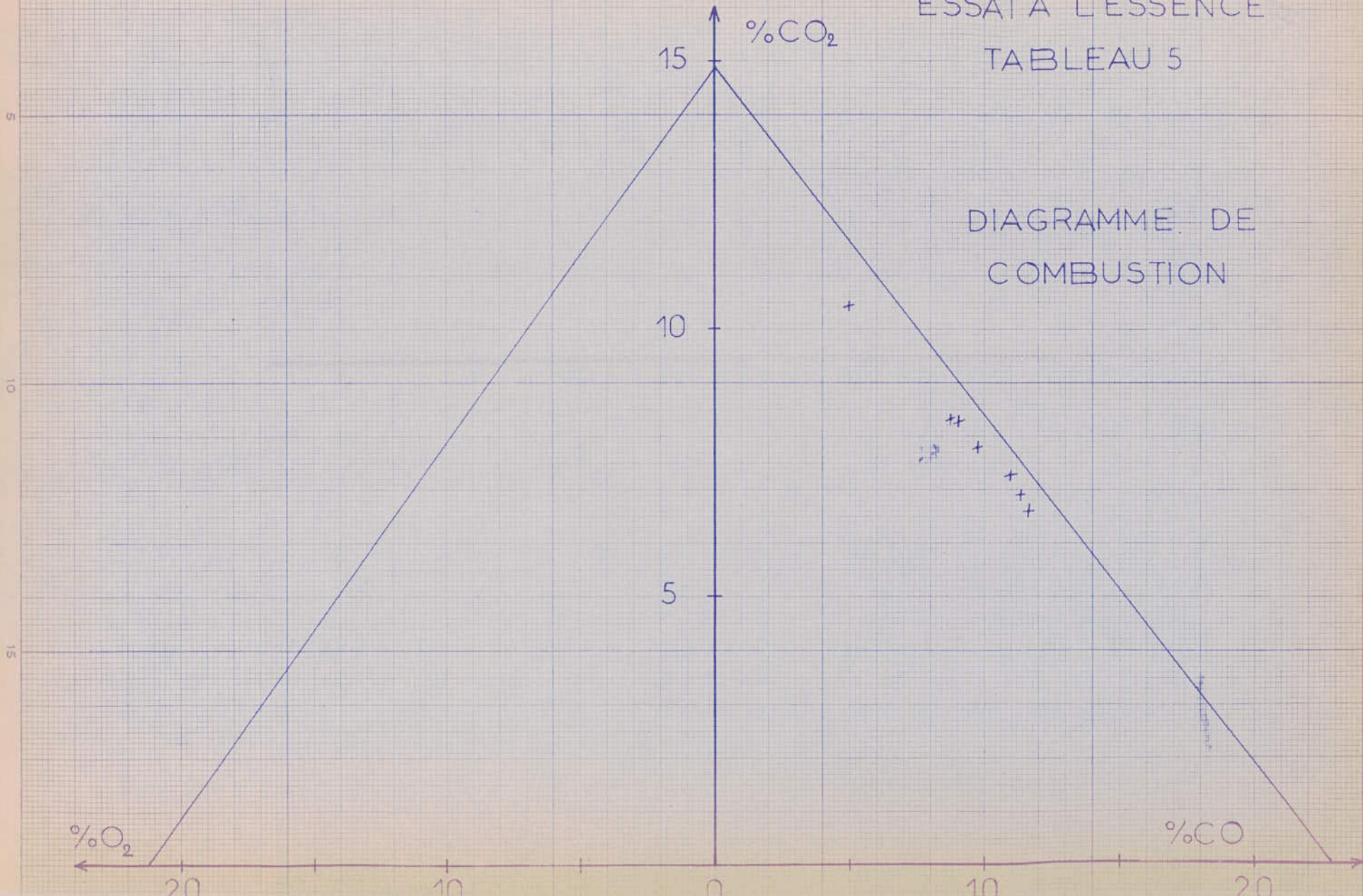




TABLEAU -5-

ETALONNAGE	CO		d'CO <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>				
	voir tableau 4		"		"				
	"		"		"				
	"		"		"				
	"		"		"				
	"		"		"				
MESURES					ANALYSE REDUITE				
		%CO	%d'CO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	Φ	% CO	% d'CO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	% N <sub>2</sub>
	1	11,5	6,6	1,5	1,64	8,76	8,35	0	82,8
	2	11,8	6,5	1,15	1,73	9,72	7,82	0	82,5
	3	11,6	6,6	0	1,68	11,6	6,6	0	81,8
	4	11,35	6,9	0	1,63	11,35	6,9	0	81,75
	5	10,9	7,3	0	1,58	10,9	7,3	0	81,8
	6	9	8,3	0	1,49	9	8,3	0	82,7
	7	5,55	10,1	0,3	1,19	4,97	10,45	0	84,5

ESSAI DU 8-5-74 A L'ESSENCE SUR MOTEUR R16

TABLEAU-6-

		CO		d'CO <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>			
		voir	tableau 4	"	"	"	"	"	"
ETALONNAGE									
MESURES						ANALYSE REDUITE			
		%CO	%d'CO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	φ	%CO	%d'CO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
	ralenti	5	66	0	1,64	0	11,6	0	88,4
	1	0,1	8,4	4,3	0,975	0	8,5	4,25	87,2
	2	0,1	8,9	3,5	1,005	0	9	3,45	87,5
	3	0,1	9,3	2,9	1,01	0	9,4	2,85	87,7
	4	0,1	9,9	1,5	1,12	0	10	1,45	88,5
	5	0,6	10,7	0	1,18	0,6	10,7	0	88,1
	6	2,35	9,6	0	1,32	2,35	9,6	0	88,05

ESSAI DU 8-5-74 AU GN SUR MOTEUR R16

ESSAI AU GN  
TABLEAU 6

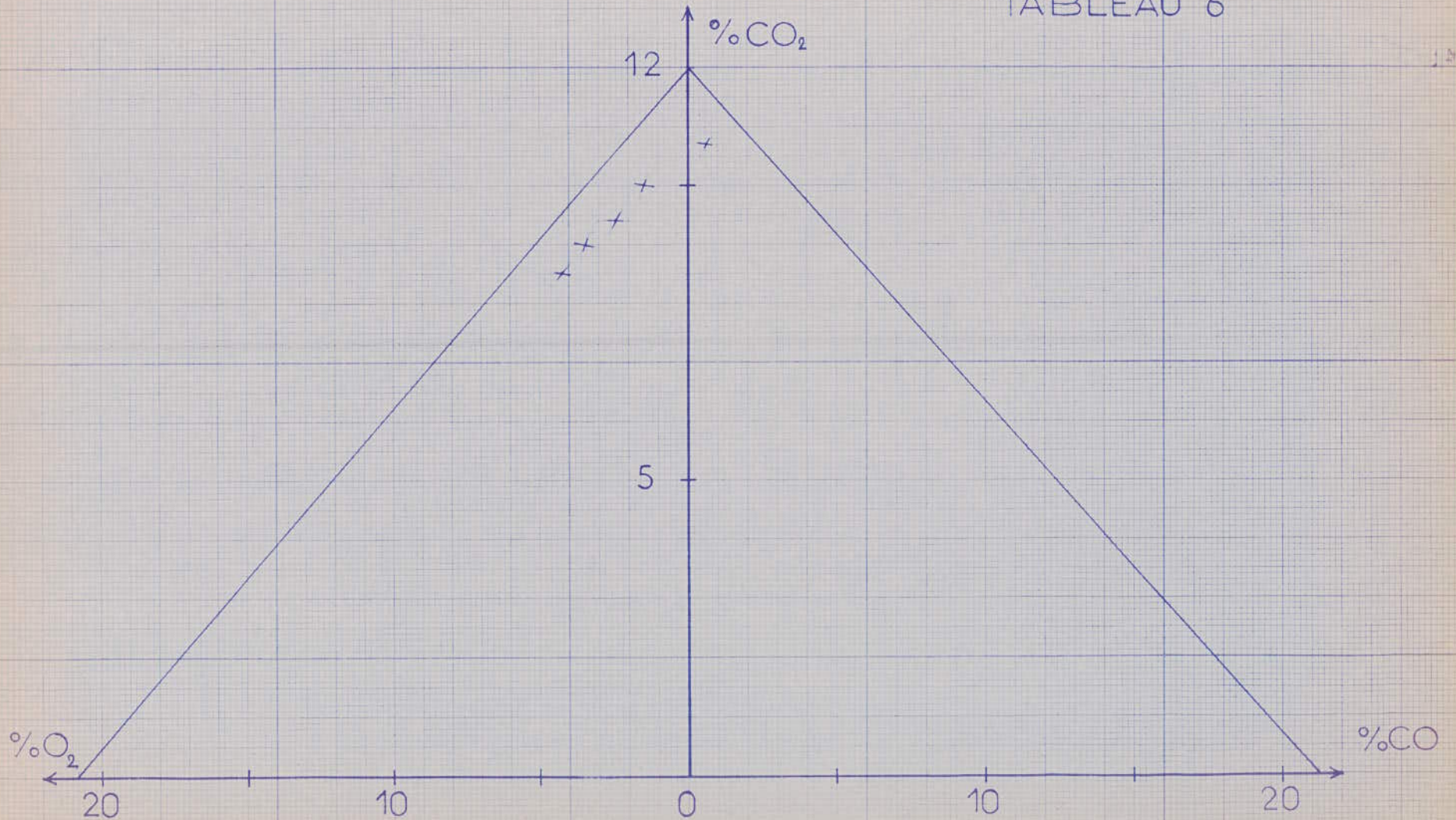


DIAGRAMME DE COMBUSTION

# ETALONNAGE DU 8-5-74

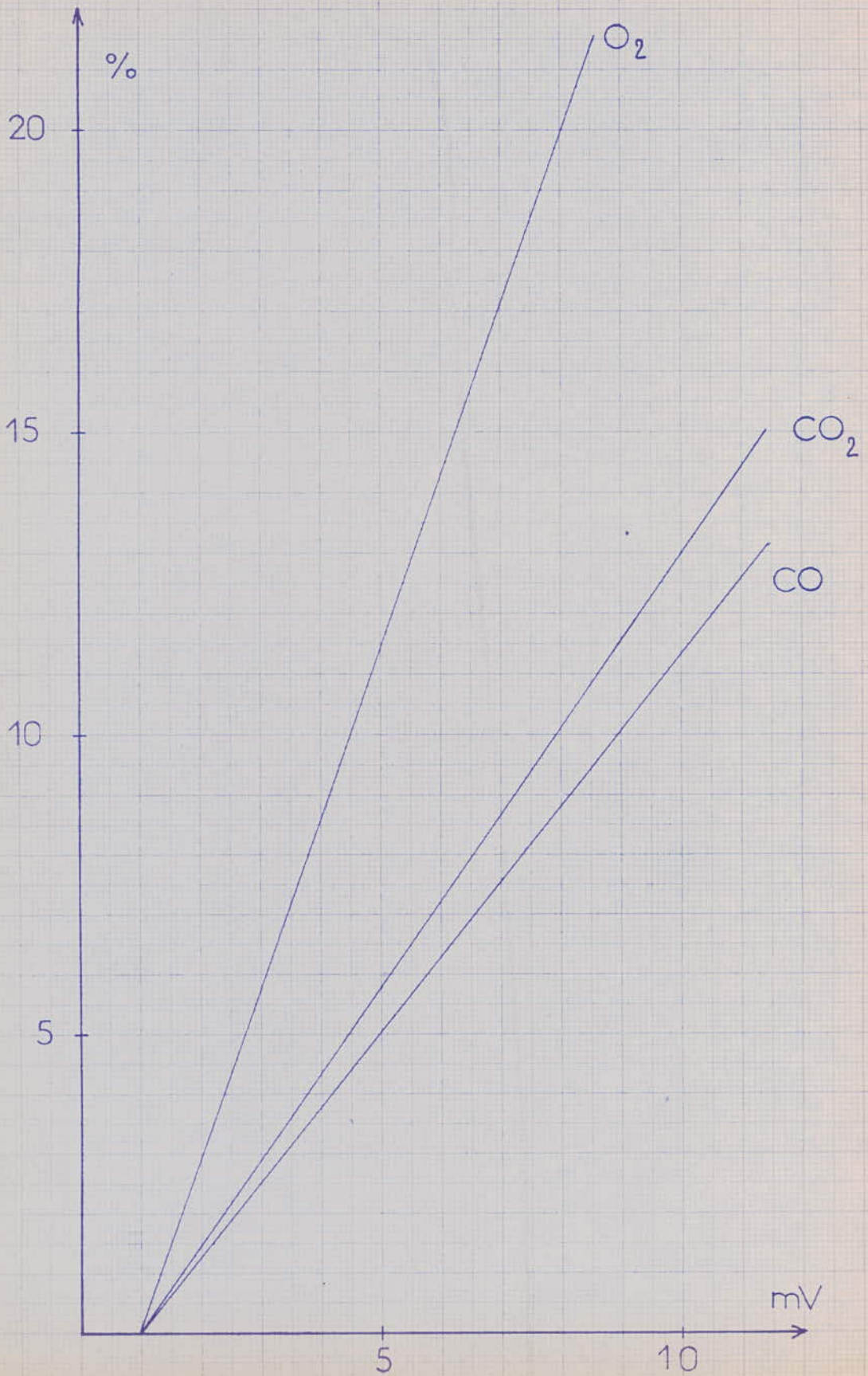


TABLEAU -7-

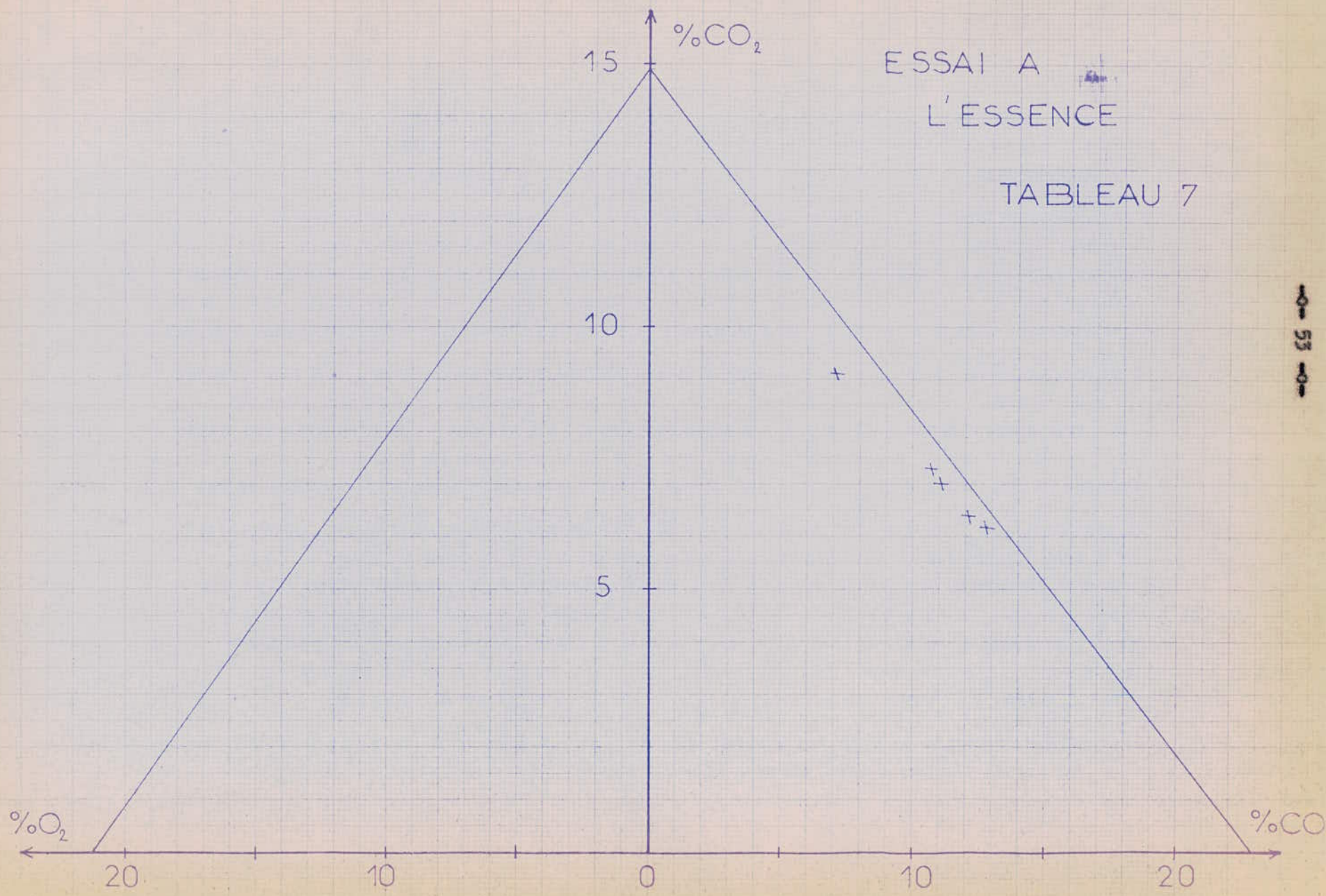
		CO		d'CO <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>			
ETALONNAGE	gain	382		gain	360		gain	580	
	pseudo tarage	5		pseudo tarage	9				
	air	: 1 mV		air	: 1 mV		air	: 8,5 mV	
	6,8 %CO	: 6,05 mV		4,5%CO <sub>2</sub>	: 3,95 mV		100%CO <sub>2</sub>	: 1 mV	
	3,2 % CO	: 3,4 mV		10,15%CO <sub>2</sub>	: 8,3 mV				
MESURES					ANALYSE REDUITE				
		%CO	%d'CO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	φ	%CO	%d'CO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	% N <sub>2</sub>
	1	4	8,9	3,9	2,26	0	13,09	1,95	85
	2	12,8	6,2	0	1,95	12,8	6,2	0	81
	3	12,1	6,4	0	1,95	12,1	6,4	0	81,5
	4	11,15	7	0	2,11	11,15	7	0	81,85
	5	10,7	7,3	0	1,7	10,7	7,3	0	82
	6	4	8,5	0,5	1,445	7,12	9,1	0	83,6
7	6,45	7,6	2,2	1,4	2,14	10,25	0	83,75	

ESSAI DU -14-5-74 A L'ESSENCE SUR MOTEUR R16

-0-52-0-

ESSAI A  
L'ESSENCE

TABLEAU 7



# ETALONNAGE DU-14-5-74

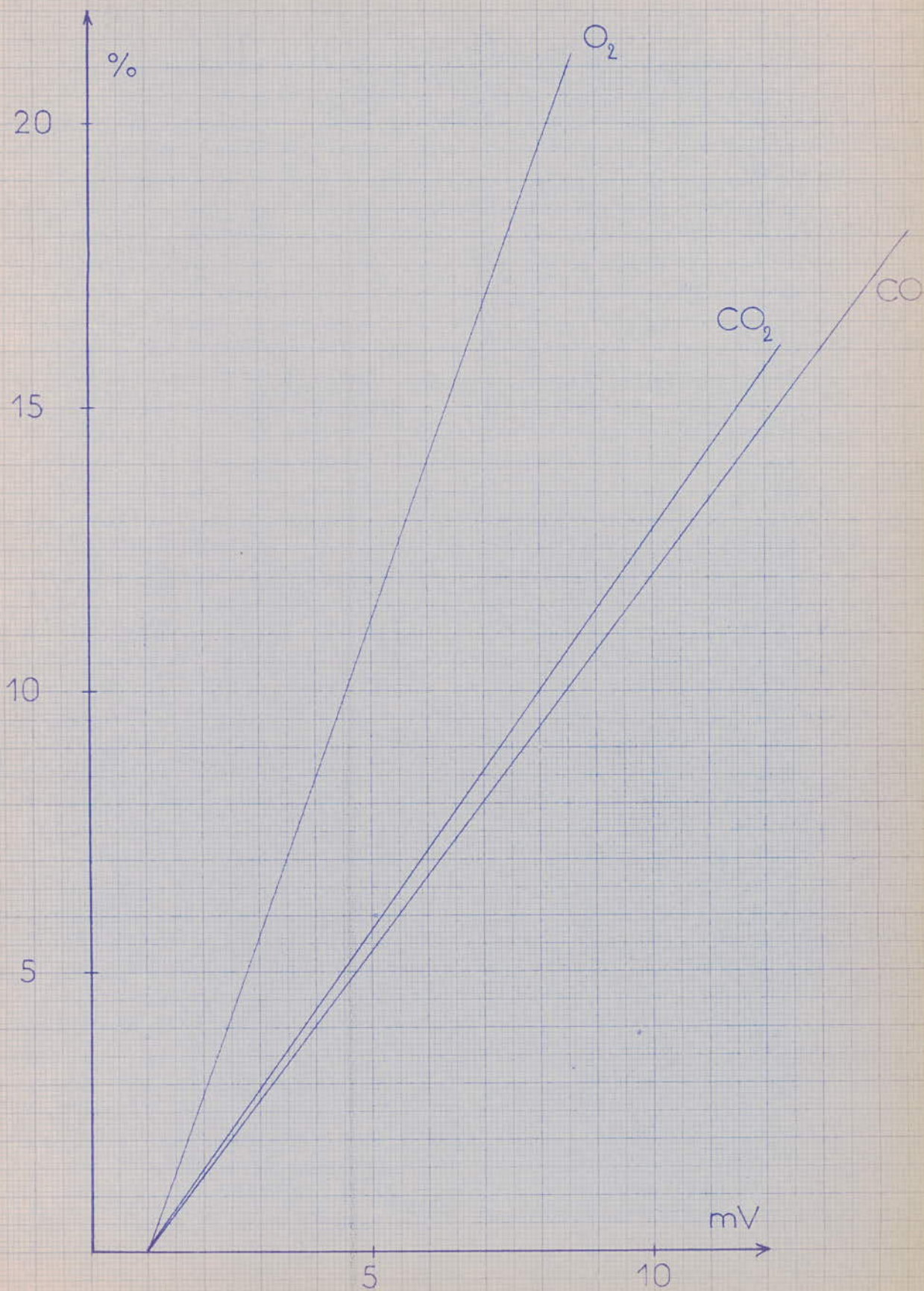


TABLEAU-1-

		CO	$\alpha'CO_2$			$O_2$		
ETALONNAGE		gain 524	gain 356			gain 580		
		pseudo tarage 7,75	pseudo tarage 8,9					
		air : 1 mV	air : 1 mV			air : 7,8 mV		
		6,8 %CO : 7,95 mV	10,15 %CO <sub>2</sub> : 8,25 mV			100% CO <sub>2</sub> : 1 mV		
		3,2 %CO : 4,3 mV	4,5 % CO <sub>2</sub> : 3,9 mV					
MESURES		% CO	$\alpha'CO_{2, reel} \%$	$\alpha'CO_{2, total} \%$	$\eta_b$	%O <sub>2</sub>	$\phi$	T <sub>b</sub> (°K)
	1	0,3	2,25	2,3	0,978	17	0,259	1403
	2	0,25	4,35	4,6	0,945	15,7	0,255	1293
	3	0,5	5,35	5,4	0,990	10,5	0,287	1293
	4	0,35	4,8	4,9	0,979	12,6	0,229	1113
	5	0,2	2,2	2,25	0,977	16	0,1544	813
	6	0,4	4,55	4,6	0,989	14,2	0,230	1063
	7	0,4	5,4	5,5	0,981	10,5	0,299	1343

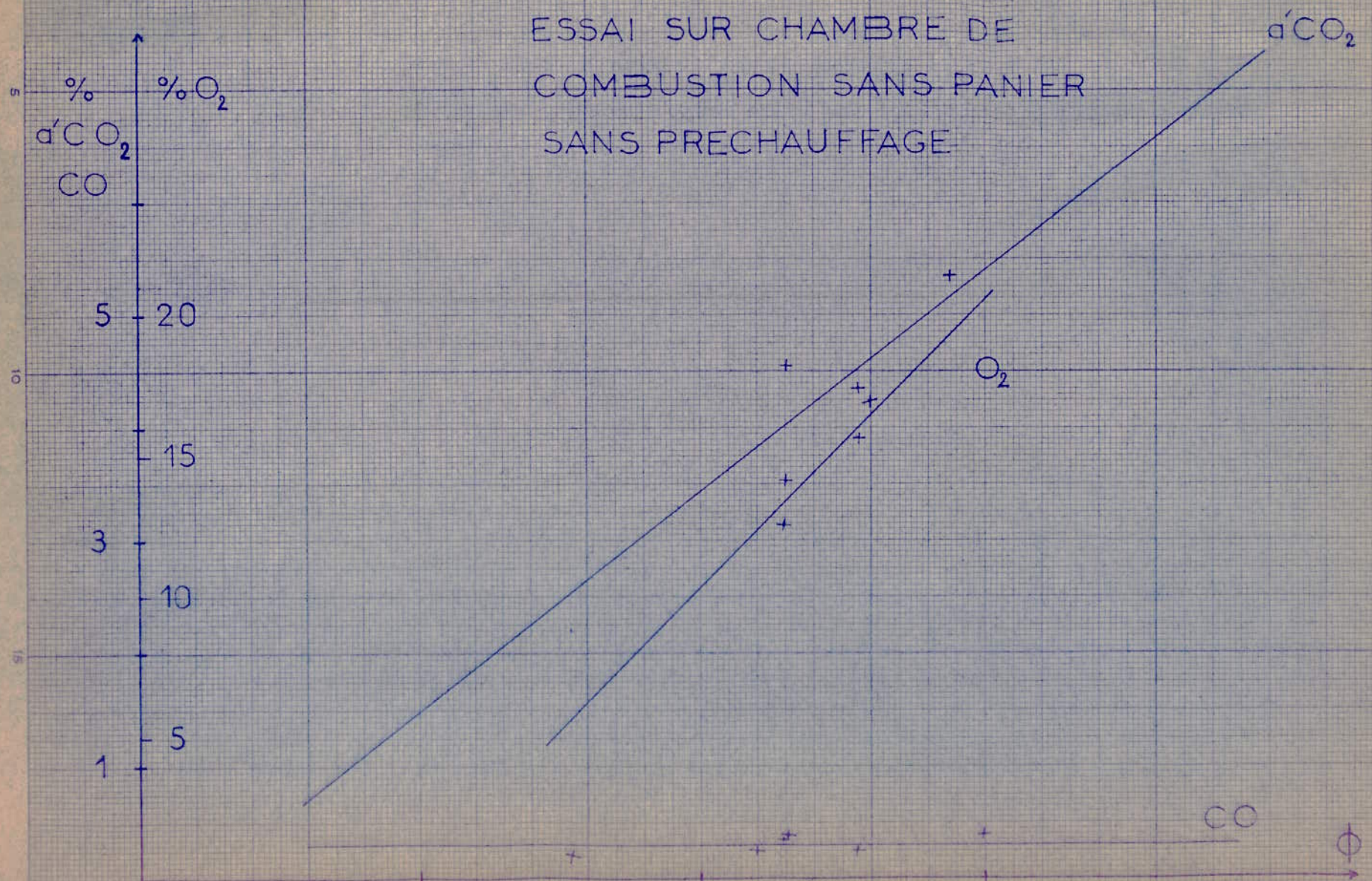
ESSAI DU-9-5-74 AU GN SUR CHAMBRE DE COMBUSTION

SANS PRECHAUFFAGE Pd=759 mm Hg

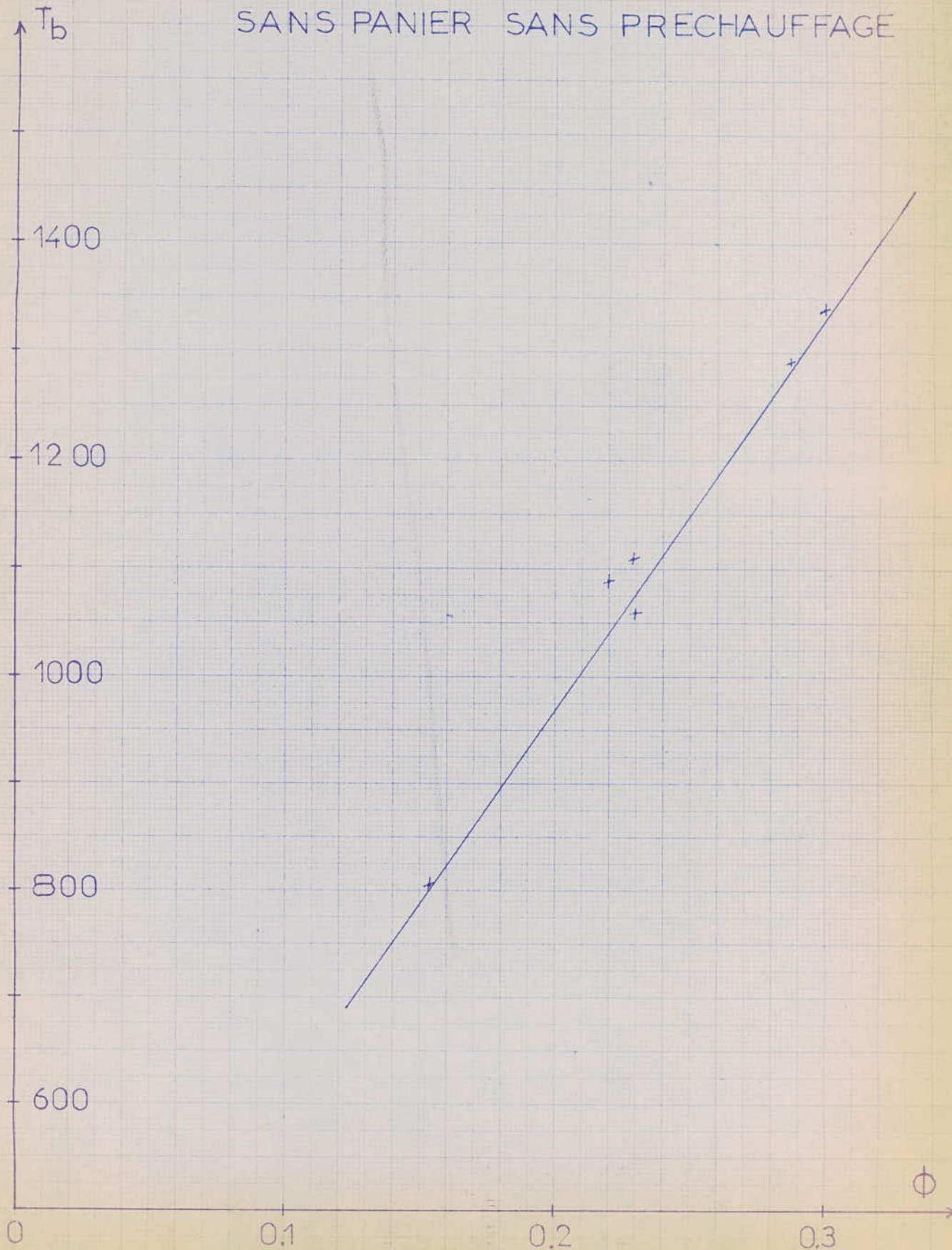
Td=22 °C



ESSAI DU-9-5-74 AU GN  
 ESSAI SUR CHAMBRE DE  
 COMBUSTION SANS PANIER  
 SANS PRECHAUFFAGE



ESSAI DU-9-5-74 AU GN  
SUR CHAMBRE DE COMBUSTION  
SANS PANIER SANS PRECHAUFFAGE



ESSAI DU 9-5-74 AUGN  
SUR CHAMBRE DE COMBUSTION  
SANS PANIER SANS PRECHAUFFAGE

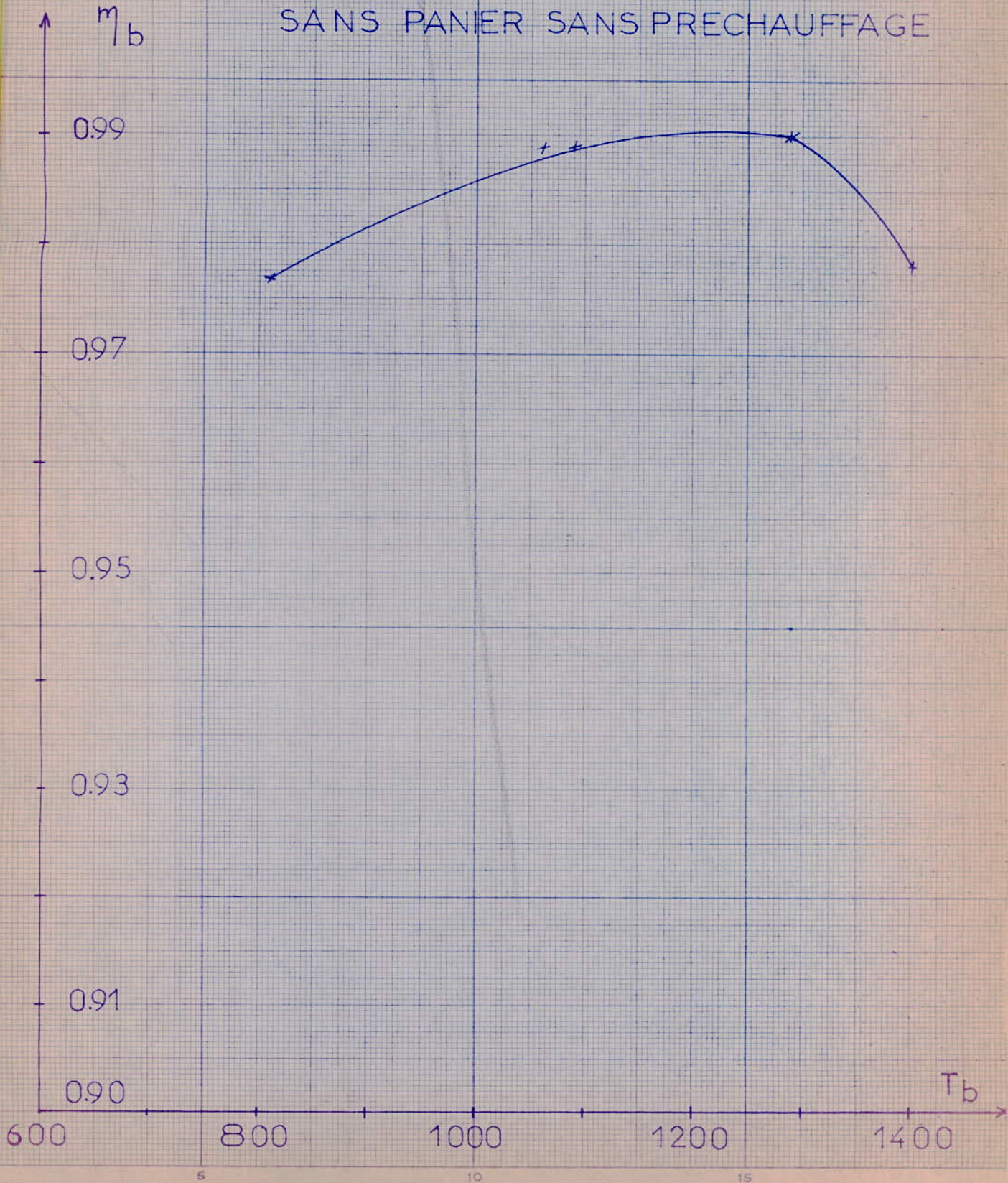


TABLEAU -2-

		CO	d'CO <sub>2</sub>			O <sub>2</sub>		
ETALONNAGE		idem au tableau 1	idem au tableau 1			idem au tableau 1		
		"	"			"		
		"	"			"		
		"	"			"		
		"	"			"		
MESURES		%CO	d'CO <sub>2</sub> reel %	d'CO <sub>2</sub> total %	$\eta_b$	%O <sub>2</sub>	$\phi$	T <sub>b</sub>
	1	0,1	1,9	2	0,978	17,6	0,179	798
	2	0,15	2,45	2,5	0,98	16	0,229	903
	3	0,2	2,9	3	0,966	15,1	0,27	983
	4	0,1	3,8	3,85	0,987	13,6	0,314	1118
	5	0,15	2,8	2,85	0,982	15,4	0,245	943

ESSAI DU-9-5-74 AU GN

COMBUSTION AVEC PANIER SANS PRECHAUFFAGE

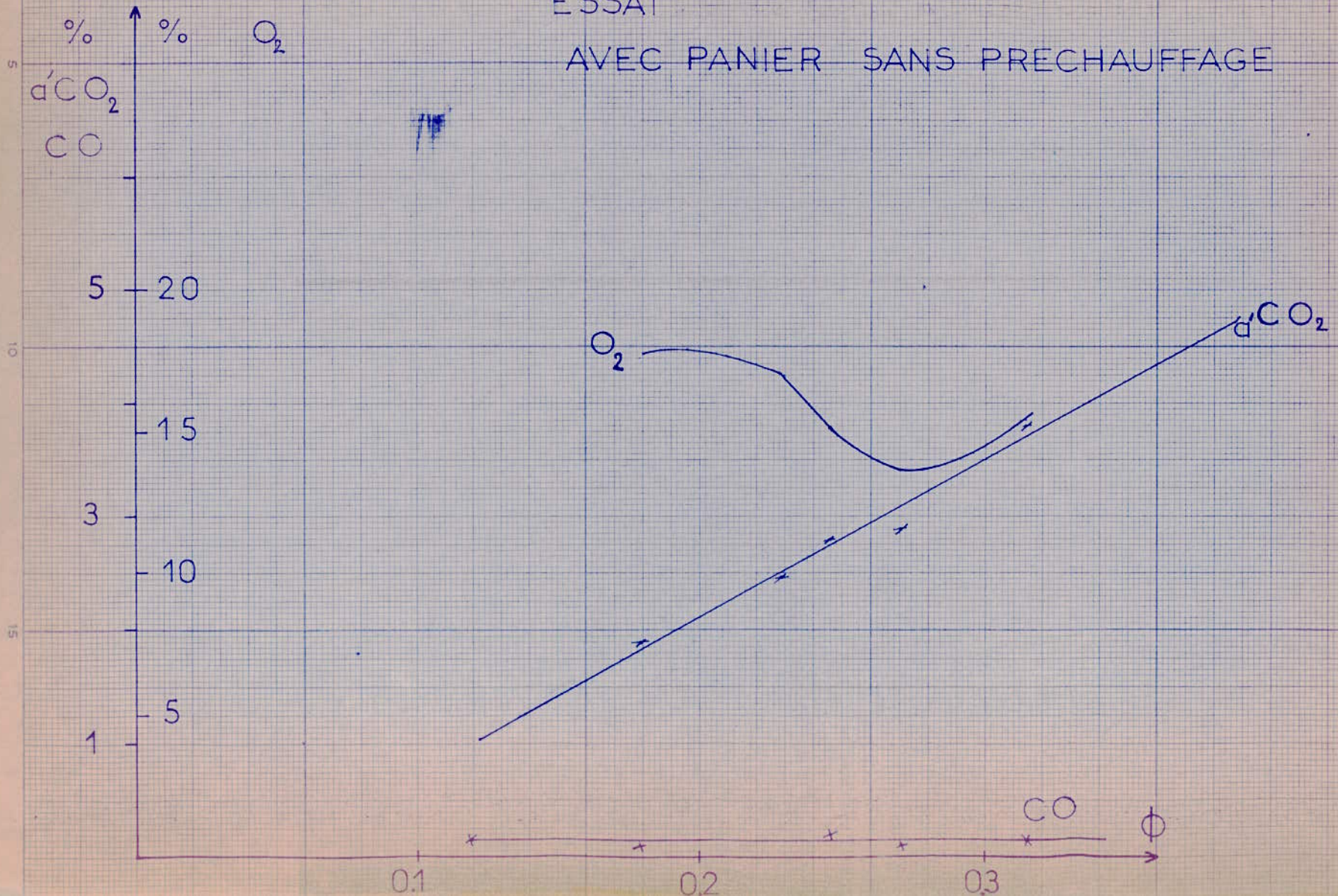
Pa = 759 mm Hg

Ta = 22 °C

ESSAI DU-9-5-74 AU GN

ESSAI

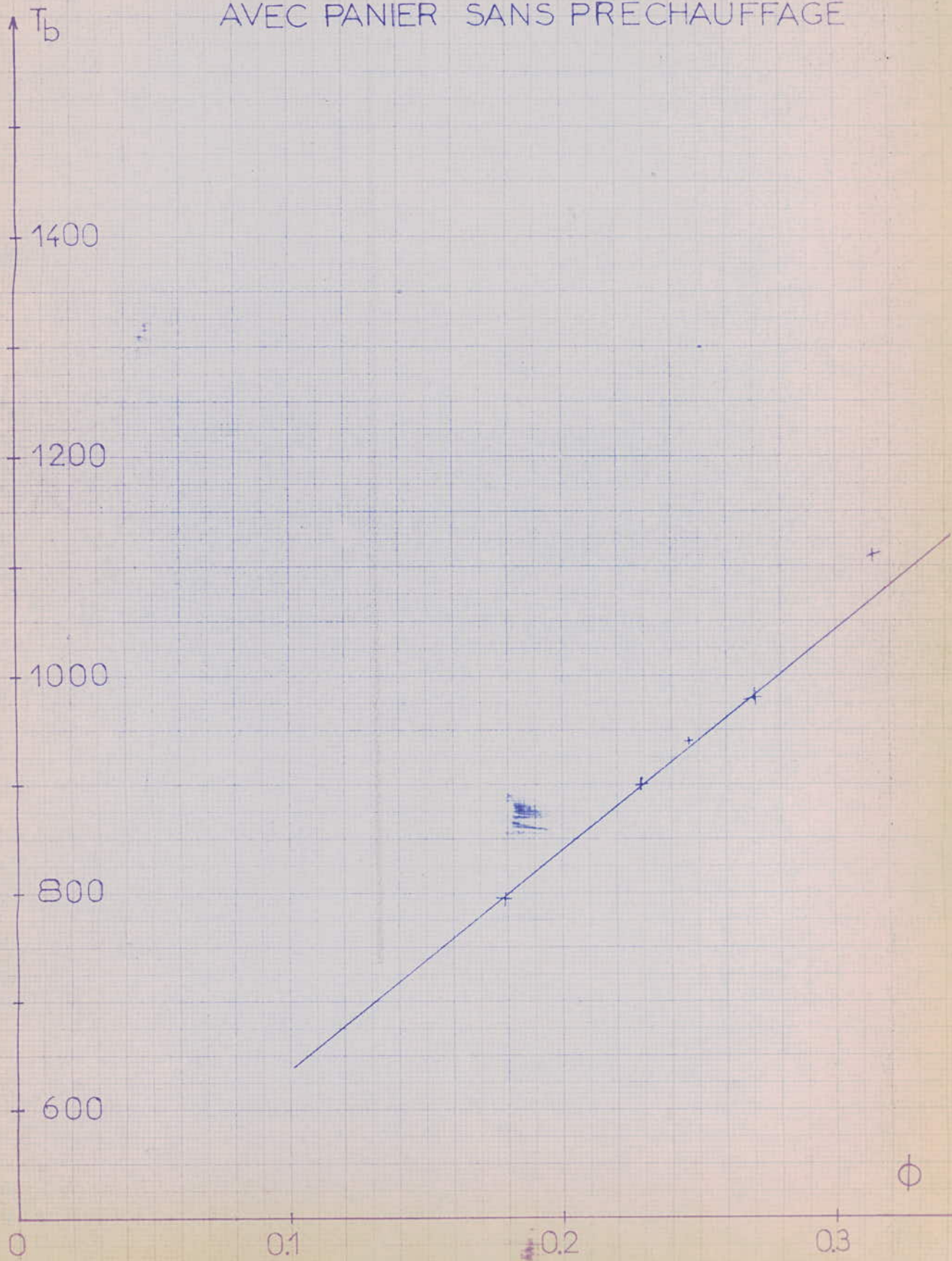
AVEC PANIER SANS PRECHAUFFAGE



0-88-0-

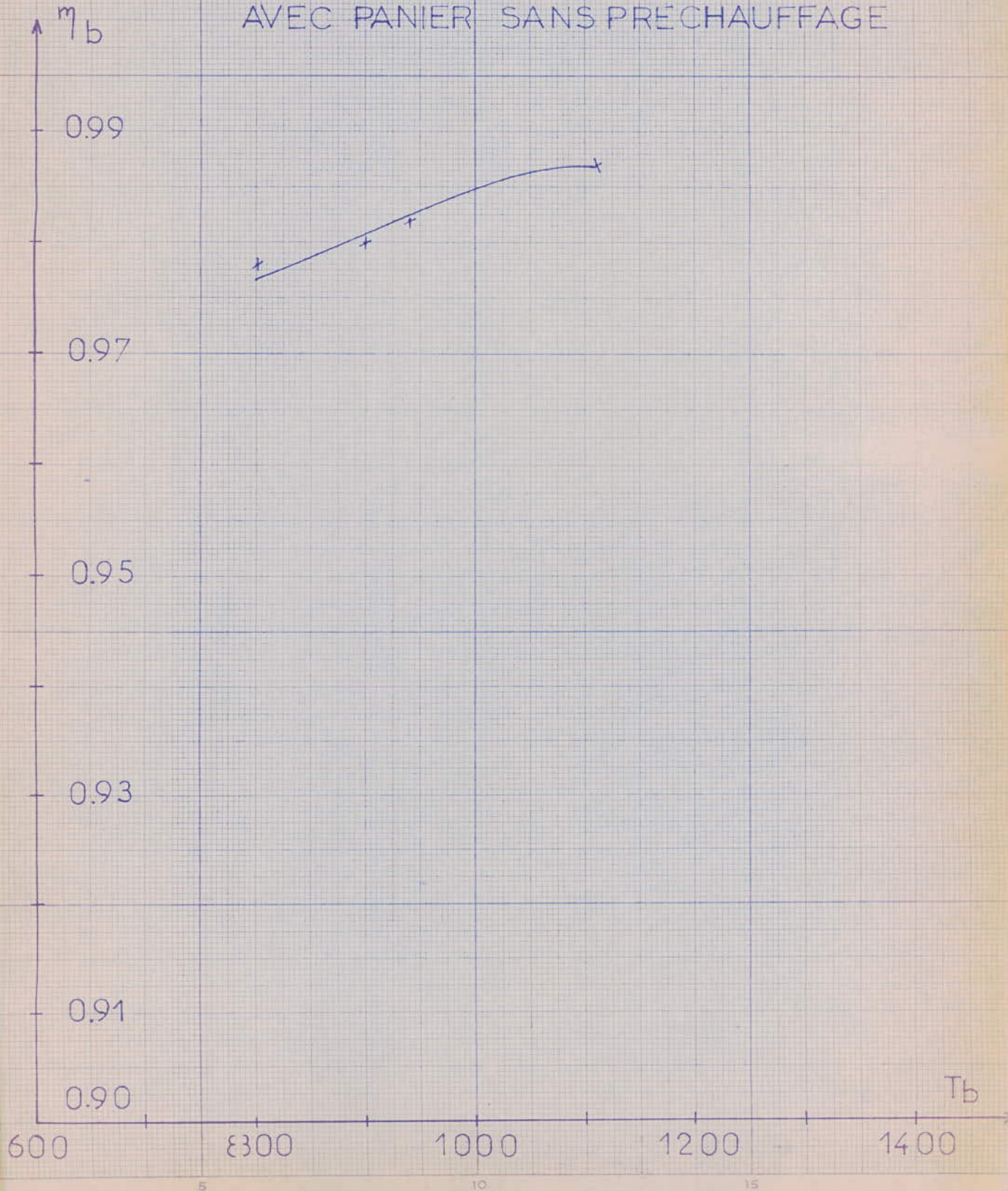
# ESSAI DU-9-5-74 AU GN

AVEC PANIER SANS PRECHAUFFAGE

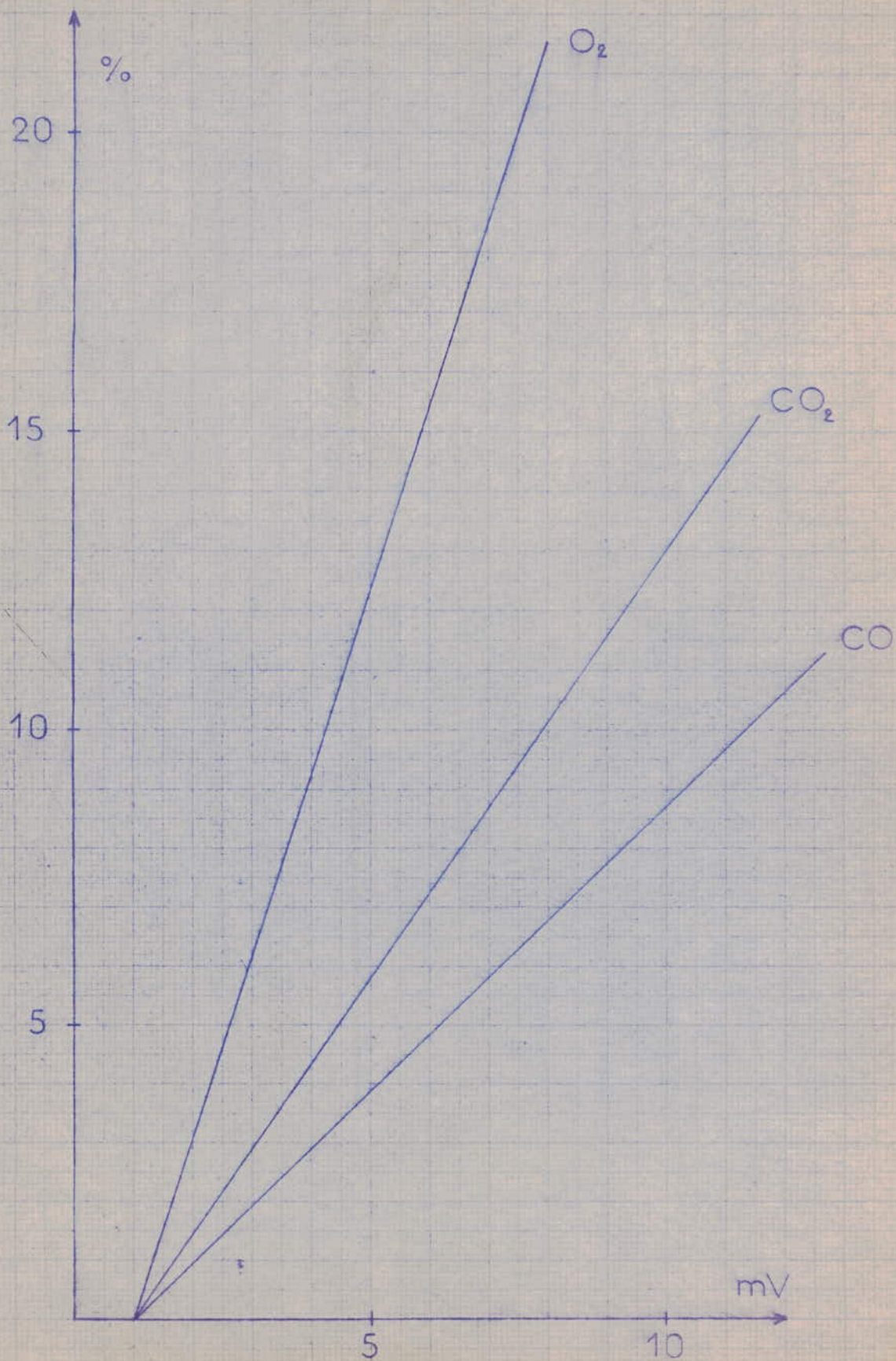


# ESSAI DU -9-5-74 AU GN

AVEC PANIER SANS PRECHAUFFAGE



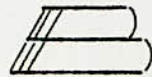
# ETALONNAGE DU-9-5-74



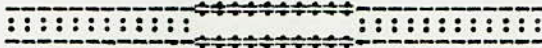


## CONCLUSION.

—/ Nous venons de faire plusieurs applications du contrôle de combustion. L'intérêt de ces applications ne réside pas dans la perfection des résultats obtenus, mais au contraire dans leur imperfection ; car cette imperfection nous a amené à chercher ses causes et entrevoir les possibilités de la réduire.



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



- G. M A T T O N : Cours polycopiés
- J. R A P P E N E A U : Recherches sur la combustion d'un mélange d'hydrocarbures.
- J. B U R T O N : Pratique de la mesure et du contrôle dans l'industrie.
- Notices des analyseurs
- Listings I F P.

INDEX

OF

THE