

UNIVERSITÉ D'ALGER

1/75

1ex

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MECANIQUE

الدرسة لوطنية للعلوم الهندسية  
المكتبة  
PROJET DE FIN D'ETUDES  
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

Contribution à l'Étude et à la Réalisation  
d'un Réacteur Homogène

2 PLANCHES

Dirigé par  
G\_MATTON  
PROFESSEUR

Étudié par  
ADI\_M  
AOUNALLAH\_Y  
BAUCHE\_M

PROMOTION 1975



UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

" CONTRIBUTION A L'ETUDE ET A LA REALISATION  
D'UN REACTEUR HOMOGENE "

Dirigé par :

Mr G MATTON

Professeur

Etudié par :

ADI M

ACUNALLAH Y

BAUCHE M

Nous tenons à exprimer notre gratitude à Monsieur G. MATTON pour avoir supervisé notre travail et pour son aide précieuse.

Nous remercions Messieurs MULLER et DAIN pour leur collaboration technique.

Nous sommes reconnaissants envers Messieurs BOFFAT, LOUALI, et PERRIER pour leur contribution à la réalisation du projet.

Que toutes les personnes qui ont apporté leur aide dans l'anonymat acceptent nos sincères remerciements.

---



IntroductionChapitre I : ETUDE TECHNOLOGIQUE1. Description de l'installation générale.

## 1.1. Chambre de Combustion avec enceinte.

1.11. Deux demi-sphères

1.12. Deux demi-coquilles hémisphériques en réfractaire.

1.13. Deux brides

1.14. Un tube injecteur.

1.15. Enceinte.

## 1.2. Pupitre de commande

## 1.3. Poste de régulation

1.3.1 Schéma de la régulation

1.3.2 Principe et description.

## 1.4. Alimentation.

2. Dimensionnement des éléments de la chambre de combustionCalculs.

## 2.1. Chambre de combustion

2.11 Demi-sphères

2.12 Volume de la chambre de combustion

2.13 Injecteur : application = calcul du débit d'air

## 2.2. Cône de refroidissement

## 2.3. Calculs

2.3.1 Calcul pression de déflagration

2.3.2 Calcul du disque de sécurité

2.3.3 Tenue mécanique de l'enceinte.

- 2.3.3.1. Enveloppe cylindrique
- 2.3.3.2. Fond plat inférieur-circulaire
- 2.3.3.3. Fond plat supérieur en anse de panier
- 2.3.3.4. Hublots en pyrex.

## Chapitre II : RAPPELS THEORIQUES SUR LA COMBUSTION DU GN DANS L'AIR CONSTRUCTION DE DIAGRAMMES.

### 1. Définitions et Méthodes de calcul

- 1.1. Rapport stoechiométrique
- 1.2. Richesse
- 1.3. Excès d'air
- 1.4. Concentration des produits de combustion
- 1.5. Enthalpie globale du GN à  $T_i = 298^\circ\text{K}$  pour  $T_r = 0^\circ\text{K}$
- 1.6. Enthalpie de combustion ou PCI du GN à  $T_i = 298^\circ\text{K}$   
pour  $T_r = 0^\circ\text{K}$ .

### 2. Construction de diagrammes.

- 2.1. Diagramme Enthalpie - Richesse
- 2.2. Diagramme Enthalpie - Entropie - Richesse.
- 2.3. Exploitation des LISTINGS (IFP).

## Chapitre III : ETUDE DE LA COMBUSTION ET DE LA STABILISATION DE LA FLAMME DANS UN REACTEUR HOMOGENE.

- 1. Rappels sur la combustion et la stabilisation de la flamme.
- 2. Intérêt du réacteur.
  - 2.1. Installation
  - 2.2. Principe de la méthode
  - 2.3. Expérimentations et résultats de Longwell et Weiss.
  - 2.4. Autre étude sur le réacteur homogène.

Chapitre IV: ESSAIS ET CALCULS:

1. MISE en marche du reacteur.
2. Mesures relevées.
3. Discussion des essais.
4. Conclusion. des essais.

CONCLUSION.

- Annexe 1. Mode de perçage des calottes spheriques.
- Annexe 2. Procédé de moulage.
- Annexe 3. Difficultes expérimentales et amelioration de l'instalation.

BIBLIOGRAPHIE

Un hublot en vycor sur l'enceinte permet de visualiser la flamme et d'étudier son comportement.

Notre projet constitue une contribution à l'étude et à la réalisation d'un réacteur homogène sphérique dans une enceinte cylindrique.

CHAPITRE I /

ETUDE TECHNOLOGIQUE

---



1. Description de l'installation générale  
(voir planche n° 1)

Le but de l'installation est d'alimenter une chambre de combustion sphérique à l'intérieur d'une enceinte en mélange de gaz-naturel et d'air dont les pressions d'injection seront réglées pour des débits déterminés.

Un poste de régulation (à commande manuelle) assure les régulations de pression pour le gaz-naturel et l'air.

Des rotamètres installés sur le pupitre de commande permettent d'avoir des débits précis en agissant sur l'ouverture ou la fermeture de robinets-vannes.

Le mélange se formant dans un mélangeur à l'extérieur de l'enceinte passe à travers celle-ci et alimente l'injecteur.

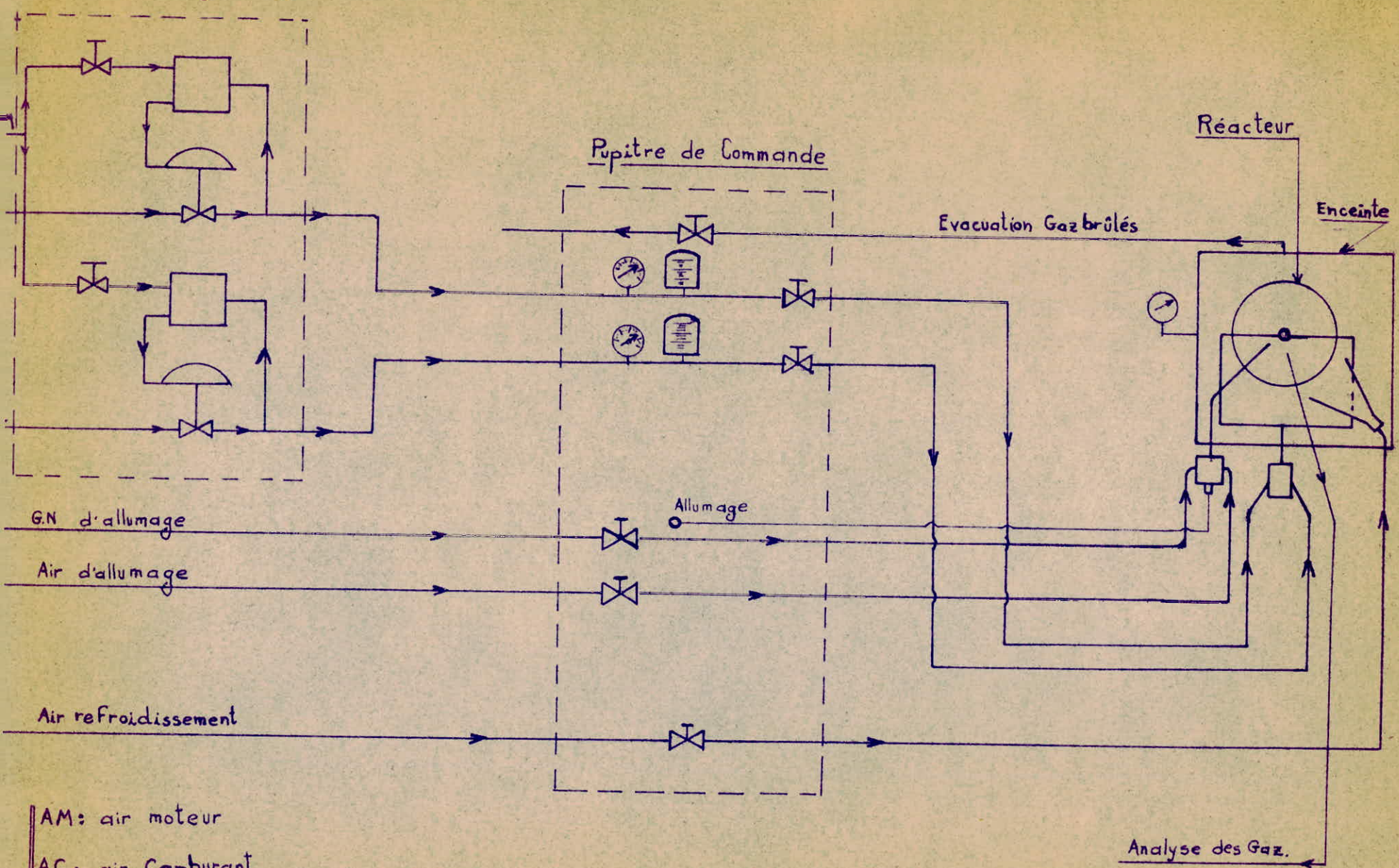
L'allumage se fait à partir d'une chambre d'allumage de l'extérieur de l'enceinte jusqu'à la chambre de combustion au niveau de l'injecteur.

Deux "vannes au quart de tour" commandent l'injection d'un mélange gaz-naturel et air dans la chambre d'allumage.

La flamme est donnée par une bougie au niveau de la chambre d'allumage, qu'on alimente en haute-tension par bouton-poussoir.



Système de régulation



- AM: air moteur
- AC: air Comburant
- GC: Gaz Carburant

PL: n° 1 Schéma de l'installation.



### 1.1. Chambre de combustion avec enceinte

1.1.1. Deux demi-sphères : en acier INOX Z8 CN 18-08 de diamètre 160 mm obtenues par emboutissage de tôle d'épaisseur  $e = 1$  mm.

Sur la sphère formée en bridant les deux demi-sphères, sont répartis uniformément 92 trous de 6 mm de diamètre. La répartition résulte de la division de la sphère en 20 triangles curvilignes équilatéraux et égaux (projection d'un icosaèdre sur la sphère. Sur chaque triangle on repère les sommets, les centres de gravité, les deux points divisant chaque côté en trois segments.

Les trous percés correspondent à ces points.  
(voir dessin d'ensemble et annexe n° 1).

### 1.1.2. Deux demi-coquilles hémisphériques en réfractaire :

Chaque coquille obtenue par moulage d'un mélange de réfractaire à base de béton et de réfracol, est percée de 46 orifices servant à l'échappement de gaz brûlés et ayant la même répartition uniforme que précédemment.

Les évidements demi-sphériques de diamètre 80 mm à l'intérieur des demi-coquilles constituent la chambre de combustion. Diamétralement un évidement demi-cylindrique sera réservé à la mise en place de l'injecteur.

N.B. : voir annexe n° 2 - méthode de moulage.

1.1.3. Deux brides : en acier inoxydable Z8 CN 18-08 permettent l'assemblage des deux demi-sphères contenant le réfractaire et la mise en place de l'injecteur dans l'évidement diamétral réservé à cet effet.

(voir dessin de définition).

1.1.4. Un tube injecteur : en acier inox Z8 CN 18-08

Il est formé en une seule pièce de longueur 240 mm par un injecteur sphérique central de diamètre 240 mm (percé de 36 trous de diamètre 1,5 mm) et par deux tubes d'alimentation terminés par une partie filetée à l'extérieur de la chambre de combustion (pour le relier à l'alimentation à l'aide de raccords tournants).

La forme sphérique percée de 36 trous répartis uniformément (répartition en quinconce) donne une meilleure convection pour le mélange carburé à l'intérieur de la chambre de combustion.

(voir dessin de définition).

1.1.5. Enceinte : en acier inox Z8 CN 18-08 de forme cylindrique (e = 5 mm  $\emptyset$  = 440 mm) assemblés à un fond plat inférieur (e = 26 mm  $\emptyset$  = 570 mm) et à un fond supérieur en anse de panier (e = 5 mm  $\emptyset$  = 440 mm), tous les deux circulaires. Le fond inférieur comporte 6 bossages répartis uniformément sur une circonférence ( $\emptyset$  = 300 mm) et un bossage central : ils permettent le passage étanche à l'aide de raccords tournants) des alimentations en mélange carburé vers l'injecteur, en air de refroidissement, du système d'allumage et de la sonde refroidie. (voir dessi

(voir dessin de définition).



La mise en place de la chambre de combustion à l'intérieur de l'enceinte est assurée par 2 tiges support (L=340 mm Ø=16 mm) (voir dessin définition). se vissant dans 2 trous taraudés "borgnes" sur le fond plat inférieur.

Le fonds supérieur en anse de panier comporte un orifice d'échappement des gaz brûlés (raccordé par "boa inox" à un robinet-vanne) un manomètre indiquant la pression règnant dans l'enceinte, un anneau de levage et un disque de sécurité.

Le réglage de la pression intérieur dans l'enceinte est obtenu par le robinet-vanne d'échappement des gaz brûlés.

L'enceinte est montée sur un support (voir dessin de définition) (voir dessin d'ensemble pour l'enceinte).

#### 1.2. Pupitre de commande :

Les éléments suivants sont montés sur le pupitre de commande :

- |                                  |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
| - trois robinets-vannes          | - air de refroidissement  |
|                                  | - air comburant           |
|                                  | - gaz-naturel             |
| - Deux rotamètres (débit-mètres) | - air comburant           |
|                                  | - gaz-naturel     donnant |

Le débit en gr/s

NB : Les rotamètres sont étalonnés pour une pression de 2,5 bars.

Une correction de débit est nécessaire lorsqu'on travaille à une pression différente.



- Deux manomètres
  - air comburant
  - gaz-naturel
- Deux robinets au quart de tour pour l'alimentation en air et gaz-naturel nécessaire à l'allumage. Un clapet anti-retour est placé sur l'alimentation en air d'allumage.
- Un bouton-poussoir : qui commande un transformateur fournissant une haute-tension de 5000 volts nécessaire à la bougie d'allumage.
- Un cadran pour thermocouple : nous n'avons pas placé de thermocouple dans la chambre de combustion à cause des problèmes d'étanchéité au niveau de l'enceinte.

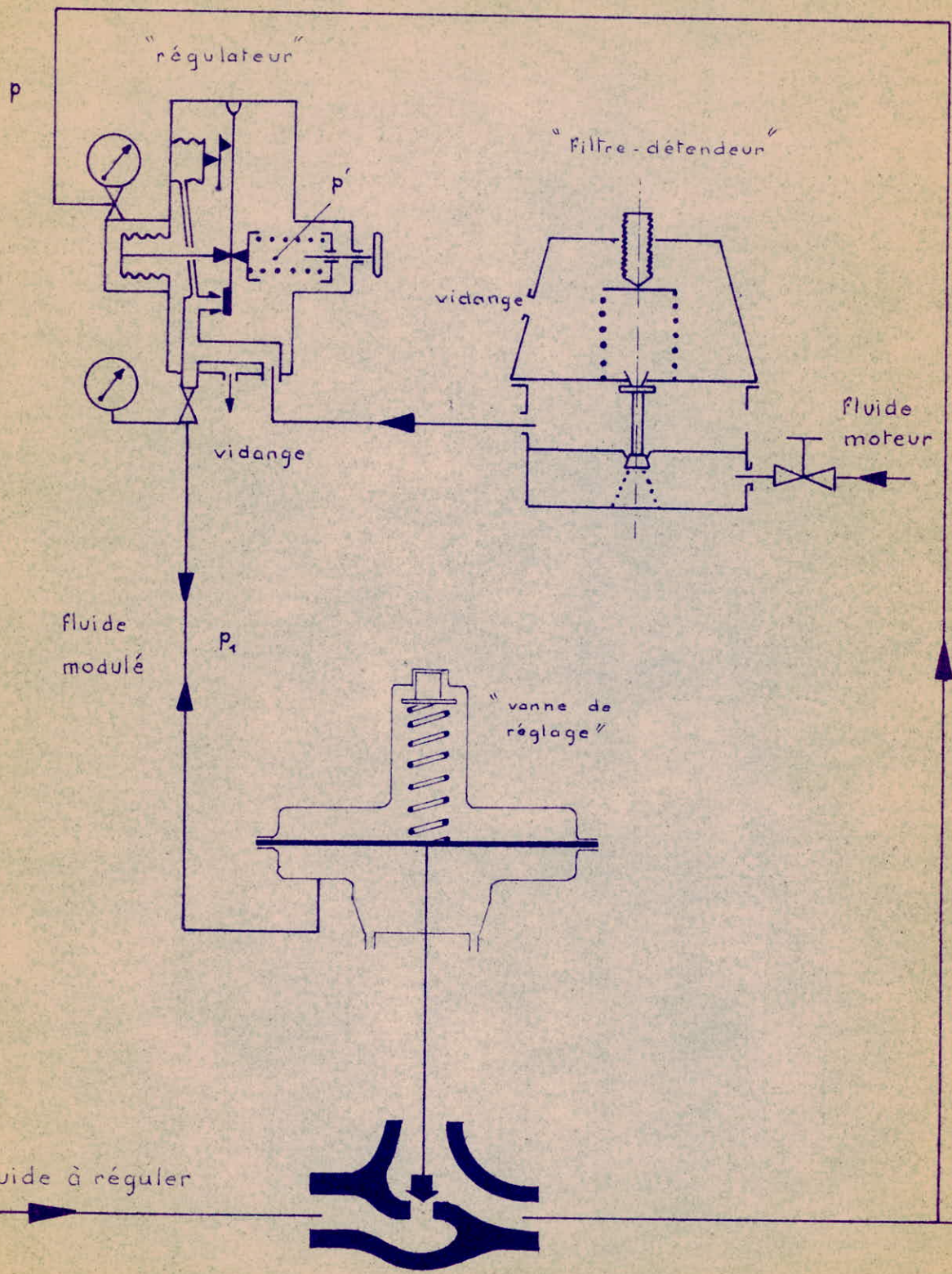
### 1.3. Poste de régulation :

Le poste de régulation comprend deux systèmes identiques de régulation à commande manuelle pour obtenir des pressions déterminées d'air comburant et de gaz-naturel carburant.

Ces deux gaz constitueront le mélange alimentant l'injecteur.

#### 1.3.1. Schéma de la régulation : voir planche n° 2

N.B. : Les montages étant identiques, un seul système de régulation sera décrit.





### 1.3.2. Principe de fonctionnement et description de la régulation \*

La chaîne de régulation comporte :

- Une vanne de réglage : (organe final) permet de modifier la section de passage de fluide sous l'impulsion d'une variation de pression d'air émise par le régulateur.

- Un régulateur :

C'est un régulateur pneumatique à balance de forces.

Il permet, en un point, de maintenir constante la pression mesurée, en délivrant une pression à la commande de vanne de réglage, cad à son servo-moteur.

Deux forces sont appliquées en opposition

- une force correspondant à la consigne  $P'$
- une force correspondant à la pression mesurée  $P$

Une force  $P_1$  proportionnelle à la différence des deux précédentes équilibre le système.

Tout écart entre les deux forces  $P$  et  $P'$  se traduit par une variation, compensatrice de la pression d'air  $P_1$  émise au servo-moteur.

- Un filtre détendeur -

Il alimente le régulateur en air moteur.

Un clapet est en équilibre sous l'action d'une force de consigne (ressort) et une force due à la pression de sortie agissant sur la membrane.

Le réglage de la pression régulée se fait en choisissant la tension du ressort ; celui de l'action proportionnelle est obtenu par le curseur. (cf. Planche)

1.4. Alimentation :

L'alimentation en gaz naturel se fait sur le réseau du Département

L'installation en air comburant, air de refroidissement, air d'allumage et air moteur pour la régulation est donnée par un compresseur.

2. Dimensionnement des éléments de la chambre de combustion.Calculs

Nous avons tenu compte des dimensions des éléments de la chambre de combustion (Projet 1971) pour faire le nouveau dimensionnement.

2.1. Chambre de combustion :2.1.1. Demi-sphères :

Les demi-sphères utilisées ont pour diamètre moyen 160 mm.

Le rapport entre les diamètres des anciennes et des nouvelles demi-sphères servira pour le calcul des autres éléments :

Ce rapport sera : 
$$K = \frac{R \text{ ancien}}{R \text{ nouveau}} = \frac{100}{80} = 1,25$$

$$k = 1,25$$

.../...

2.1.2. Volume de la chambre de combustion-dimensions des coquilles :

. L'ancien diamètre de la chambre de combustion étant :  
 $d_0 = 100 \text{ mm}$ .

Le nouveau sera :  $d = \frac{d_0}{K}$

$$\text{AN : } d = \frac{100}{1,25} = 80 \text{ mm} \quad \boxed{d = 80 \text{ mm}}$$

. L'épaisseur des coquilles en réfractaire se déduit des dimensions des demi-sphères et de la chambre de combustion :

$$e = \frac{D-d}{2} \quad \text{AN : } c = \frac{160-80}{2} = 40 \text{ mm}$$

$$\boxed{e = 40 \text{ mm}}$$

Application : Calcul des pertes de chaleur par conduction à travers le réfractaire.

Les pertes de chaleur à travers la coquille sont données par :

$$Q = \left[ \frac{\lambda(T_1 - T_2) 4\pi}{\left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right)} \right]$$

avec

$T_1$  = température des gaz brûlés  
 $T_2$  = température de l'air vicié extérieur à la chambre

$R_2 = \frac{D}{2}$  = rayon externe de la coquille

$R_1 = \frac{d}{2}$  = rayon interne de la coquille

$\lambda$  = coefficient de conductivité thermique



Application numérique :

Nous avons pris les valeurs suivantes pour estimer les pertes de chaleur :

$$\begin{aligned} R_2 &= 80 \cdot 10^{-3} \text{ m} & R_1 &= 40 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ T_2 &= 2000^\circ \text{ K} & T_1 &= 500^\circ \text{ K} \\ \lambda &= 0,22 \text{ Kcal/m.h.}^\circ \text{ C} & & \text{(briques isolantes en kaolin)} \end{aligned}$$

Le calcul donne :

$$Q = \frac{0,22 \cdot 1500 - 4 \cdot 3,14}{\left[ \frac{1}{8} - \frac{1}{4} \right] \cdot 10^2} = 330 \text{ Kcal/h}$$

soit :  $Q = 330 \text{ Kcal/h}$  ou  $1379 \text{ Kj/h}$

Ces pertes sont négligeables en comparaison avec le flux de chaleur dégagé par la combustion.

A titre d'exemple pour un débit de mélange  $m=3\text{gr/s}$

le calcul donne un flux de chaleur :

$$Q = \dot{m} \frac{\text{PCI}}{\text{mélange}}$$

avec PCI (mélange)	$= \frac{(\text{PCI})_{\text{GN}}}{1 + \alpha A}$	au régime stochiométrique $\alpha = 1$ A = 15,4 kg pour C = 1 Kg
-----------------------	---	---

$$\text{PCI (mélange)} = 2804 \text{ kj/kj}$$

Ce qui donne  $Q = 30\,000 \text{ kj/h}$

.../...

### 2.1.3. Injecteur :

Les diamètres de la sphère centrale et des tubes d'alimentation de l'injecteur ont été calculés par la méthode précédente.

Ce qui donne

diamètre de la sphère centrale 24 mm
tubes d'alimentation: - diamètre externe 11 mm
- diamètre interne 6,8mm

Le nombre de trous de l'injecteur et leur diamètre ont été calculés de sorte à garder la même charge aérodynamique que pour l'ancien injecteur pour une même pression d'injection.

Le nouveau débit d'air sera donné par la relation :

$$\dot{m}_a = \frac{V}{V_0} \dot{m}_{a_0}$$

$$\text{soit : } n \cdot s = \frac{V}{V_0} n_0 s_0$$

Pour plus de simplification on a pris  $n = n_0 = 36$  trous pour le nouvel injecteur

Ce qui donne le nouveau diamètre des trous de l'injecteur

$$d_t = d_{t_0} \sqrt[2]{k^3} \quad \text{car } \frac{V_0}{V} = k^3$$

$$\underline{\underline{AN}} : \text{ pour } d_{t_0} = 2 \text{ mm}$$

$$\text{on a : } d_t = 1,5 \text{ mm}$$

Application : calcul du débit d'air comburant

Le débit d'air sera calculé en fonction des conditions initiales en prenant comme état générateur les tubes d'alimentation de l'injecteur.

.../...

La partie sphérique centrale de l'injecteur est assimilée à un orifice de section égale à la somme des sections des trous d'injection :

$$S_i = n s_i$$

Le débit masse en air théorique comburant est donné par :

$$Q = \sqrt{\frac{\gamma}{r} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \cdot S_i \frac{P_i}{\sqrt{T_i}}$$

En tenant compte d'un coefficient de perte de charge  $Q=0,6$  le débit réel est :

$$Q_r = \sqrt{\frac{\gamma}{r} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \cdot 0,6 n s_i \frac{P_i}{\sqrt{T_i}}$$

avec  $r = 287 \text{ j/kg}^\circ\text{k}$        $\gamma = 1,4$        $T_i = 300^\circ\text{k}$   
 $d_t = 1,5 \text{ mm}$        $s_i = 1,78 \text{ mm}^2$

$$Q_r = 4,4185 \cdot 10^{-4} \cdot P_i \cdot n_i$$

↳ gr/s

avec

$P_i$  = pression d'injection  
bar

$n_i$  = nombre de trous de l'injecteur.

Les calculs ont été faits pour une pression d'injection allant de 1,5 à 10 bars pour plusieurs nombres de trous d'injecteur



$Q_v$  (g/s)

PL: n° 3

Courbes  $Q_v = f(P_i, n)$

110  
100  
90  
80  
70  
60  
50  
40  
30  
20  
10  
5

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10  $P_i$

$n=36$

$n=24$

$n=18$

$n=12$

$n=6$

LES PAPIERS CANSON France



Tableau de variation :-

	$O_2$	$H_2$	$H_2O$	$N_2$	$CO$	$CO_2$
36	23,85	31,8	39,76	79,53	119,30	159,06
24	15,90	21,20	26,51	53,02	79,53	106,04
18	11,92	15,90	19,88	39,76	59,6	79,53
12	7,95	10,60	13,25	26,5	39,76	53,02
6	3,97	5,30	6,62	13,25	19,88	26,51
$n \uparrow$ $P \rightarrow$	1,5	2	2,5	5	7,5	10

Voir PL N°3 : courbes représentant  $Q_r = f(P_i, n_i)$

## 2.2. Cône de refroidissement

L'angle de cônité  $\alpha = 30^\circ$  a été choisi suffisamment grand pour que le jet d'air de refroidissement couvre la plus grande surface de la chambre de combustion.

La longueur de cône ( $L=150$  mm) a été choisie en tenant du minimum d'encombrement.

Application : calcul de débit d'air de refroidissement :

Ce calcul a été fait pour avoir une température ambiante dans l'enceinte de  $500^\circ C$ . Les pertes de chaleur à travers la paroi de l'enceinte ont été négligées.



Conditions d'entrée de l'air de refroidissement

$$\dot{m}_{\text{air}}^{\circ} = \text{débit d'air}$$

$$T_{\text{air}}^{\circ} = 300^{\circ}\text{K}$$

Les conditions des gaz de combustion ont été choisies pour  $\phi = 1$  et  $P = 5\text{ATM}$

$$\dot{m}_{\text{GC}}^{\circ} = \text{débit gaz de combustion}$$

$$T_{\text{b}}^{\circ} = 2260^{\circ}\text{K}$$

Le débit d'air de refroidissement est donné par :

$$\dot{m}_{\text{air}}^{\circ} = \frac{\dot{m}_{\text{GC}}^{\circ} \sum X_i \Delta h_i}{\Delta h_{\text{air}}}$$

2260°K
773°K
300°K

avec  $X_i$  = pourcentage en masse des produits de la combustion

$$\Delta h_{\text{air}} = \bar{c}_{\text{pair}} \Delta T$$

773°K
300°K
2260°K

$$\Delta h_i = \bar{c}_{\text{p}} \Delta T$$

773°K
-------

(GB) GB

Les listings KFP donnent à  $P=5\text{ ATM}$   $\phi = 1$  les teneurs

(pourcentage molaire) des produits de la combustion :

$$a_{\text{O}_2} = 3,06 \times 10^3$$

$$a_{\text{CO}} = 6,52 \cdot 10^3$$

$$a_{\text{H}_2} = 2,334 \cdot 10^3$$

$$a_{\text{CO}_2} = 9,085 \cdot 10^2$$

$$a_{\text{N}_2} = 7,139 \cdot 10^1$$

$$a_{\text{H}_2\text{O}} = 1,791 \cdot 10^1$$

.../...

$$\frac{AN}{\Delta h_{air}} \left| \begin{array}{l} 773^{\circ}K \\ 300^{\circ}K \end{array} \right. = 1,049 \cdot 473 = 496,177$$

$$\Sigma X_i \cdot \Delta h_{i(GB)} \left| \begin{array}{l} 2260^{\circ}K \\ 773^{\circ}K \end{array} \right. = 2078,826$$

Finalemment :  $\dot{m}_{air} = \dot{m}_{GC} \cdot \frac{2078,826}{496,177} \approx 4,2 \dot{m}_{GC}$

$$\dot{m}_{air} = 4 \cdot \dot{m}_{GC}$$

Le débit d'air de refroidissement ; est 4 fois plus grand que le débit de gaz de combustion.

### 2.3. Calculs : Pression de Flagration, disque de sécurité - Tenue Mécanique de l'enceinte :

#### 2.3.1. Calcul pression de déflagration :

Nous supposons que l'enceinte est entièrement remplie de gaz frais à une pression  $p_0$  et que l'explosion a lieu.

On raisonne sur une masse  $M$  de mélange (air + Gaz Naturel) stoechiométrique qui brûle entièrement.

L'évolution a lieu à volume constant :  $V_0$

$$(1) \text{ Energie interne (gaz brulés) Etat (1) = } \\ \text{Energie interne (gaz frais) Etat (0) + } \\ \text{Energie dégagée par la combustion}$$

On assimile le mélange (air + GN) et les gaz brulés à des gaz parfaits.

Des relations (1) et (2) on tire :

$$(3) \frac{1}{\gamma-1} (P_i - P_o) \cdot V_o = M \cdot C_v \Delta T \quad \left| \begin{array}{l} T_1 \\ T_o \end{array} \right.$$

On remplace dans l'équation (3)  $V_o$  par sa valeur  $\frac{M R T_o}{P_o}$

On aura après simplification :

$$(P_1 - P_o) = P_o \frac{\Delta T}{T_o} \quad \left| \begin{array}{l} T_1 \\ T_o \end{array} \right.$$

soit :

$$P_1 = P_o \left[ 1 + \frac{(T_1 - T_o)}{T_o} \right]$$

AN : On calcule les différentes pressions de déflagration en fonction de  $P_o$ , en prenant pour simplification :

$$T_b \simeq T_1 = 2200^\circ \text{k}$$

$$T_o \simeq 300^\circ \text{k}$$

Tableau de variation :  $P_1 = f(P_o)$

$P_o$ (ATM)	1	2	3	4	5
$P_1$ (ATM)	7,35	14,7	22,05	29,40	36,75

.../...



### 2.3.2. Calcul du disque de sécurité :

Le disque de sécurité est prévu pour l'enceinte

En cas de déflagration, il y a rupture du disque de sécurité

La théorie des plaques minces circulaires s'appliquant au disque de sécurité supposé encastré donne :

$$e \geq 0,703 \quad r \sqrt{\frac{P}{R}}$$

- avec :
- r = rayon de disque de sécurité = 20,5 cm
  - e = épaisseur du disque de sécurité en mm à estimer.
  - P = pression admissible maximale choisie pour l'enceinte
  - R = résistance à la rupture pour l'inox = 60kg/mm<sup>2</sup>

AN : Tableau de variation e = f (P)

P (bars)	5	6	7	8	9	10	12
e (mm)	0,66	0,72	0,78	0,83	0,885	0,94	1

La pression admissible choisie est P = 8 bars ce qui donne une épaisseur de disque de sécurité e ≈ 0,80 mm.

.../...

### 2.3.3. Tenue Mécanique de l'enceinte :

#### 2.3.3.1. Enveloppe cylindrique

L'épaisseur  $e$  de l'enveloppe est exprimée par la relation :

$$e = \frac{P \cdot D \cdot X}{200 R \alpha}$$

avec

$e$	= épaisseur du cylindre en mm
$P$	= pression admissible de fonctionnement en $\text{kg/cm}^2$
$X$	= coefficient de sécurité
$D$	= diamètre du cylindre en mm
$R$	= charge de rupture du matériau en $\text{kg/mm}^2$
$\alpha$	= coefficient de joint qui dépend u mode de soudure.

La pression admissible pour l'enveloppe cylindrique est :

$$\text{Padm} = 200 \frac{R \cdot \alpha \cdot e}{D \cdot X}$$

<u>AN.</u>	pour	$e = 5 \text{ mm}$	
		$R = 60 \text{ kg/mm}^2$	(INOX)
		$D = 440 \text{ mm}$	
		$\alpha = 0,8$	

Tableau de variation de  $\text{Padm} = f(X)$ .

X	Padm (bars)
1	100
2	50
3	33
4	25
5	20

### 2.3.3.2. Fond plat inférieur circulaire

La contrainte  $\sigma_{\max} = \frac{3 Pr^2 \cdot X}{4 e^2} \leq R_p$

avec P= pression admissible en Kg/ cm<sup>2</sup>

r= rayon du fond en cm (22)

e= épaisseur du fond en mm (26)

R<sub>p</sub> = résistance à la rupture du matériau ( 60 Kg/mm<sup>2</sup>)

X= coefficient de sécurité

La pression admissible pour le fond est :

$$Padm = \frac{4e^2 \cdot Rp}{3r^2 \cdot X}$$

Les calculs donnent le tableau de variation suivant :

$$Padm = f (X)$$



X	Padm (bars)
1	100
2	50
3	33
4	25
5	20

### 2.3.3.3. Fond plat supérieur en anse de panier

La théorie des coques donne la relation pour l'estimation de la contrainte maximale :

$$\sigma_{\max} = \frac{2,172}{4} \cdot \frac{P \cdot D \cdot X}{e \cdot 10^2} \leq R_p \quad \text{pour } \frac{2h}{D} = 2$$

La pression admissible pour le fond supérieur est :

$$P_{adm} = \frac{4 \cdot e \cdot R_p \cdot 10^2}{2,172 \cdot D \cdot X} \quad \text{avec } \begin{array}{l} e = 5 \text{ mm} \\ D = 440 \text{ mm} \\ R_p = 60 \text{ kg/mm}^2 \end{array}$$

Tableau de variation =  $P_{adm} = f(x)$

X	P (bars)
1	125
2	62
3	41
4	31
5	25

#### 2.3.3.4. Hublots en vycor

La contrainte maximale est donnée par la même formule que pour le fond plat inférieur

$$\max = 3 \frac{P \cdot r^2}{4e^2} \leq R_p$$

La pression admissible est :  $P_{adm} = \frac{4 e^2 R_p}{3 r^2 \cdot X}$

avec  $e = 12 \text{ mm.}$

$r = 3,25 \text{ cm}$

$R_p \text{ (vycor) } = 100 \text{ kg/mm}^2.$

Tableau de variation :  $P_{adm} : f(X)$

X	$P_{adm}$ (bars)
1	36
2	18
3	12

CHAPITRE II/

RAPPELS THEORIQUES SUR LA COMBUSTION

DU GAZ - NATUREL DANS L'AIR

CONSTRUCTION DE DIAGRAMMES : EXPLOITATION

DES LISTINGS - IFP.



Dans ce chapitre on se limitera à rappeler certaines définitions, à exposer les méthodes de calcul et à dresser un tableau récapitulatif des grandeurs thermodynamiques concernant la combustion du gaz naturel dans l'air.

Enfin on s'intéressera aux méthodes d'établissement de diagrammes à partir de Listings IFP, et à l'utilisateur de ces diagrammes pour résoudre des questions fondamentales de combustion.

## 1 - Définitions et méthodes de calcul

### 1.1. Rapport stoechiométrique

On appelle rapport stoechiométrique  $\left(\frac{C}{A}\right)_{st} = f_s$ , le rapport des 2 réactifs combustible et comburant dans le cas d'une combustion exacte et complète.

C = masse du combustible

A = masse d'air ou d'oxygène

NB = dans ce cas la richesse est dite égale à 1.

On calcul  $\left(\frac{C}{A}\right)_{st}$  à partir de l'équation générale de la combustion complète du gaz-naturel dans l'air.

### 1.2. Richesse : $\phi$

La richesse d'un mélange est définie par le rapport :

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

Le mélange est riche lorsque  $\phi > 1$  (excès de combustible)

Le mélange est dit pauvre dans le cas contraire  $\phi < 1$ .

$$NB = \phi = \frac{A_{th}}{A_{réel}} = \frac{C_{réel}}{C_{th}} = \frac{1}{\lambda}$$

$\lambda$  = coefficient utilisé par CHAMBADAL.

### 1.3. Excès d'air

Dans le cas où la combustion s'effectue avec l'air atmosphérique, il se forme un mélange pauvre qui assure une combustion complète.

L'excès d'air utilisé est défini par :

$$\alpha = \frac{1 - \phi}{\phi} = n - 1$$

n : coefficient utilisé dans le diagramme d'Ostwald

### 1.4. Concentration des produits de combustion

Des concentrations en teneurs des produits de combustion dépendent des indices x, y, z de la formule fictive du Gaz-Naturel et de la richesse  $\phi$ .

**M**-concentration de gaz carbonique pour des produits humides :

$$a \text{ CO}_2 \% = \frac{100 \cdot x \cdot \phi}{4,76 x + 1,19 y + \phi (0,5 z + 0,25 \cdot y)}$$

**X** concentration de gaz carbonique pour des produits secs :

$$a' \text{ CO}_2 \% = \frac{100 \cdot x \cdot \phi}{4,76 x + 1,19 y - \phi (0,25 y - 0,5 z)}$$

C'est cette quantité  $a' \text{ CO}_2$  (gaz secs) appelée  $\text{CO}_2$  total formée en combustion complète que l'on considère dans les analyses de gaz et qui constitue un point important pour le contrôle de la combustion.

On détermine ces équations à partir de l'équation générale de la combustion du gaz-naturel dans l'air.

1.5. Enthalpie globale du Gaz-Naturel : à  $T_i = 298^\circ \text{ K}$  pour  $T_r = 0^\circ \text{ K}$

On appelle enthalpie globale la somme de l'enthalpie de formation à l'état "standard" et de l'enthalpie sensible.

$$H^T = \left( \Delta H_f^\circ \right)_{T_r} + \int_{T_r}^T C_p dT = h_k \quad \begin{array}{l} T = 298^\circ \text{ K} \\ T_r = 0^\circ \text{ K} \end{array}$$

L'enthalpie globale du Gaz-Naturel se calcule à partir des enthalpies globales de chaque composant de ce gaz en tenant compte de leurs pourcentages.

Remarques = L'enthalpie globale de l'air est égale à l'enthalpie sensible, son enthalpie de formation étant nulle.

Les valeurs des enthalpies globales pour différentes températures sont données par des tables thermodynamiques.

1.6. Pouvoir calorifique inférieur ou enthalpie de combustion du Gl :  
à  $T = 298^\circ \text{ K}$  pour  $T_r = 0^\circ \text{ K}$

Comme la variation d'enthalpie associée à une réaction chimique ne dépend que de l'état initial des réactifs et de l'état final des produits, l'enthalpie de combustion est égale à la différence des enthalpies globales des produits finals et initiaux de la réaction.

$$\left( \Delta H_c^\circ \right)^T = \sum_{i=1}^n \nu_i' \cdot H_{x_i}^T (\text{produits}) - \sum_{i=1}^m \nu_i \cdot H_{x_i}^T (\text{réactifs})$$

C'est l'application de la relation de KIRCHOFF en considérant les équations stoechiométriques de combustion des éléments du Gaz-Naturel dans l'air.

./...



# CARACTERISTIQUES DU GAZ NATUREL

## Composition molaire:

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 "
Helium	He	0,19 "
Azote	N <sub>2</sub>	5,93 "
Gaz carbonique	CO <sub>2</sub>	0,21 "

Formule brute	C <sub>108,93</sub> H <sub>404,86</sub> N <sub>11,86</sub>
Formule fictive	C <sub>5,787</sub> H <sub>21,497</sub> N <sub>0,629</sub>
Masse molaire	M = 18,90664 kg/k.mole
Masse volumique	ρ <sub>0</sub> = 0,83540 g/l
Volume molaire	V <sub>0</sub> = 22,20443 l/mole

Enthalpie de formation	ΔH <sub>f</sub> <sup>°</sup> = -15,3823 kcal/mole
Enthalpie globale	H <sup>298°K</sup> = 12,92365 kcal/mole
Enthalpie de combustion	ΔH <sub>c</sub> <sup>°</sup> = -202,07986 kcal/mole

Rapport stoechiométrique	(c/A) <sub>st</sub> = 0,0655
Pourcentage de CO <sub>2</sub> : (non desséchés)	$a \cdot CO_2 = \frac{100 \cdot \phi}{9,1804 + 0,9829 \cdot \phi}$
Pourcentage de CO <sub>2</sub> : (desséchés)	$a' \cdot CO_2 = \frac{100 \cdot \phi}{9,1804 - 0,8744 \cdot \phi}$



Tableau récapitulatif = cf PLANCHE N° 4

## 2 - Construction de diagrammes - Exploitation des listings

### 21. Diagrammes enthalpie-richesses :

#### 2.11. Principe

En tenant compte de la conservation d'énergie au cours de la combustion on aura :

$$h_a + \varnothing f_s \cdot h_k = (1 + \varnothing f_s) h$$

$h_a$  = enthalpie globale de l'air dans les conditions d'entrée

$h_k$  = enthalpie globale du gaz comburant à 298 ° K.

$f_s$  = (C/A) st

$\varnothing$  = richesse                       $h$  : enthalpie globale des gaz de combustion

#### 2.12 Construction du diagramme à partir des listings =

On porte en ordonnée la valeur  $(1 + \varnothing f_s) h$  pour chaque température ronde interpolée (de 300 ° à 2500° K) en fonction de  $\varnothing$ .

Les droites de fonctionnement sont représentées par :  $D = h_a + \varnothing f_s \cdot h_k$ .

Il suffit de connaître au moins 2 points de ces droites pour les tracer.

Exemple  $\varnothing = 0$      $h_{air} = f(T)$

$\varnothing = 1$  - on calcul  $h_a(T) + \varnothing f h_k(298^\circ K)$

Les diagrammes peuvent être construits pour plusieurs pressions

#### 1.13 Utilisation

Travaillant à une pression  $p$

on se donne :  $\left\{ \begin{array}{l} (D) \\ \varnothing \end{array} \right.$  on obtient  $T_b$  = température théorique de fin de combustion

$\left\{ \begin{array}{l} (D) \\ T_b \end{array} \right.$  on obtient  $\varnothing$  = richesse à laquelle il faut opérer pour avoir  $T_b$  donnée.

## 2.2. Diagrammes Enthalpie - Entropie - Richesse

### 2.21 Principe =

Ce diagramme a pour base le diagramme Enthalpie - Entropie de l'air; en y ajoutant les droites de richesses le nouveau diagramme tiendra compte de la composition du gaz.

### 2.22 Construction du diagramme à partir des listings :

On trace le diagramme enthalpie - entropie pour l'air pour plusieurs pressions.

Pour l'obtention des droites de richesse en fait les calculs de  $S_r$ ,  $H_r$  pour chaque richesse et pour chaque température ronde  $T_r$  interpolée.

Les droites de richesse sont obtenues point par point : à partir d'une isobare du diagramme pour l'air on porte la valeur  $S_r$  pour chaque enthalpie  $H_r$  correspondant à la même pression.

Construction des droites de température : pour chaque point obtenu correspond une température ; il suffit de joindre les points correspondant à la même température pour plusieurs richesses.

NB : A chaque droite de richesse correspond une échelle de température. Pour les enthalpies on se réfère, pour toutes les richesses, à l'échelle correspondant à la richesse nulle.

### 2.23 Utilisation

A partir de la pente des droites de richesses on peut déterminer la direction des isentropiques pour le calcul des énergies de détente des gaz de combustion dans une turbine.



Remarques : Nous avons tracé les diagrammes  $H - \phi$  et  $H - S - \phi$  relatifs au Méthane liquide. Nous utiliserons les diagrammes relatifs au Gaz Naturel établis par un autre groupe.

### 2.3. Exploitation des Listings I F P

Nous avons essayé d'exploiter au maximum les listings sur le Gaz Naturel.

#### 2.31 Influence de la température à $P_i = act$ sur l'évolution des Gaz de combustion.

cf pl n° 5, 6, 7.

Cette évolution des gaz de combustion se manifeste dans un domaine de richesse  $0,55 \leq \phi \leq 1,2$ . Elle est en rapport direct avec la dissociation.

La dissociation augmente avec l'augmentation de température

#### 2.32 Influence de la pression à $T_i = cte$ sur les Gaz de combustion cf. pl n° 8,9 et 10.

L'influence de la pression sur l'évolution se manifeste seulement au voisinage du mélange stoechiométrique.

La dissociation diminue avec l'augmentation de pression.

#### 2.33 Courbes $T_b = f(\phi)$ en fonction de $T_i$ pour plusieurs pressions

cf pl n° 11, 12 et 13

L'augmentation de température initiale augmente la température théorique de combustion dans tout le domaine de richesse :

$$0,1 < \phi < 1,7$$

Ces courbes nous permettent d'avoir la température théorique de combustion en connaissant la richesse déduite de l'analyse des gaz.



$a_{CO_2}$  %  
 $a'_{CO_2}$  %

10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

323°K  
573°K  
823°K  
323°K  
573°K  
823°K

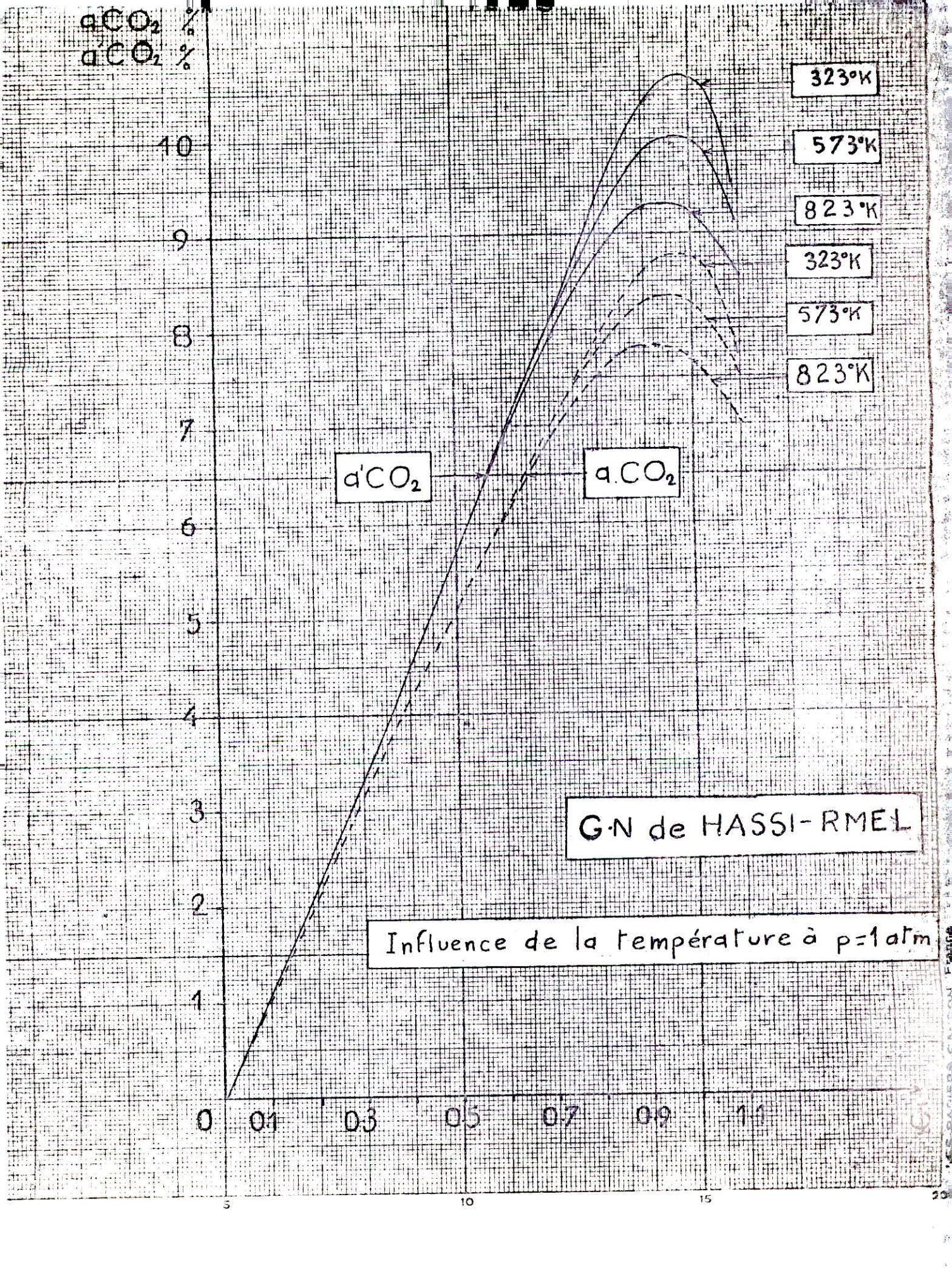
$a'_{CO_2}$

$a_{CO_2}$

G·N de HASSI-RMEL

Influence de la température à  $p=1\text{atm}$

0 01 03 05 07 09 11





$dCO_2$  %  
 $d'CO_2$  %

10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

323°K  
573°K  
823°K  
323°K  
573°K  
823°K

$d'CO_2$

$dCO_2$

G.N de HASSI-RMEL

Influence de la température à  $p=3atm$

0 0.1 0.3 0.5 0.7 0.9 1.1



$a_{CO_2}$  %  
 $a'_{CO_2}$  %

10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

PL. NR. 7

323°K  
573°K  
823°K  
323°K  
573°K  
823°K

$a'_{CO_2}$

$a_{CO_2}$

G-N de HASSI-REMEL

Influence de la température à  $p=5\text{atm}$

0 01 03 05 07 09 11



$a_{CO_2}$  %  
 $a'_{CO_2}$  %

10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1

$P = 5 \text{ atm}$   
 $P = 3 \text{ atm}$   
 $P = 1 \text{ atm}$   
 $P = 5 \text{ atm}$   
 $P = 3 \text{ atm}$   
 $P = 1 \text{ atm}$

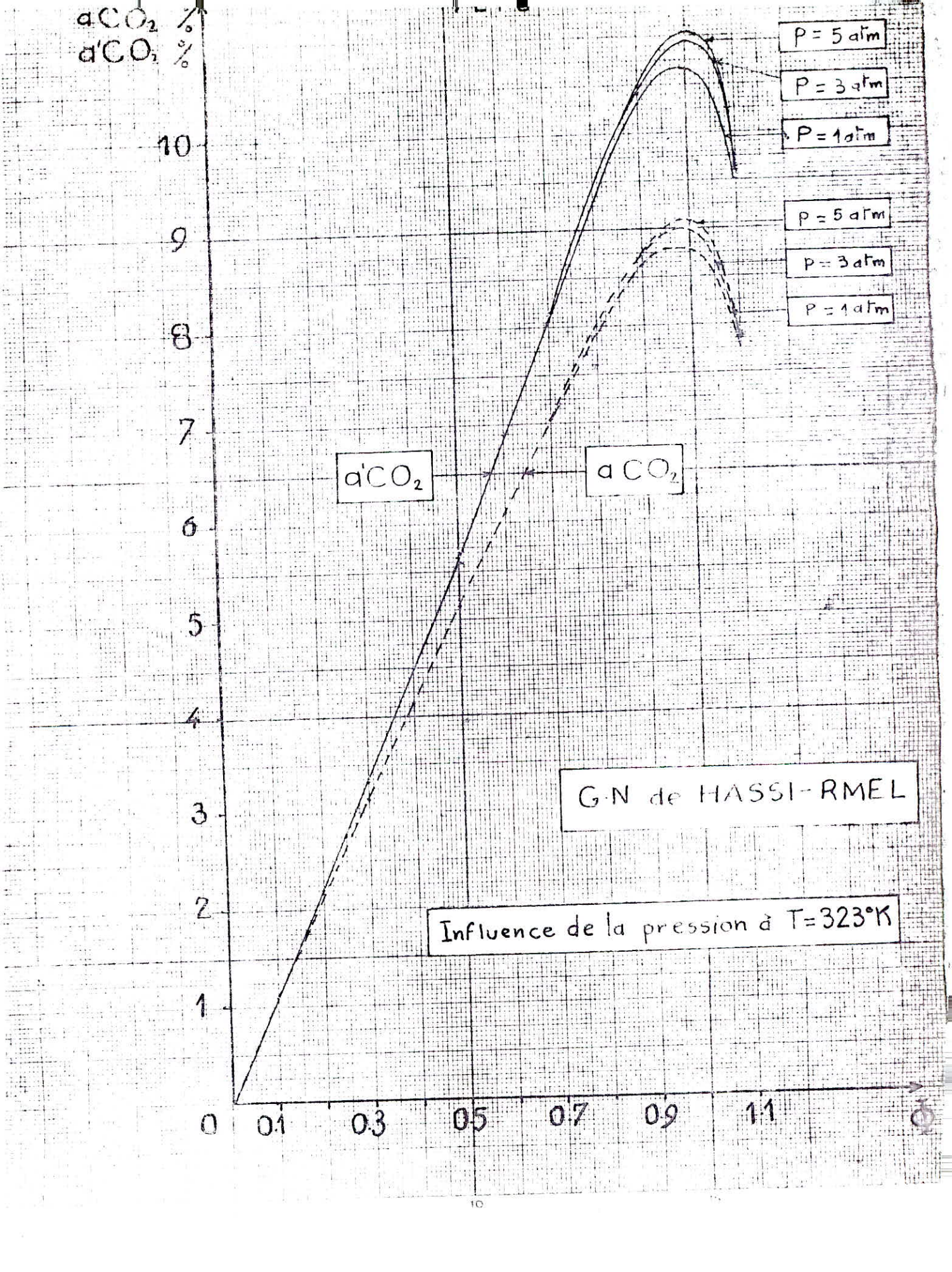
$a'_{CO_2}$

$a_{CO_2}$

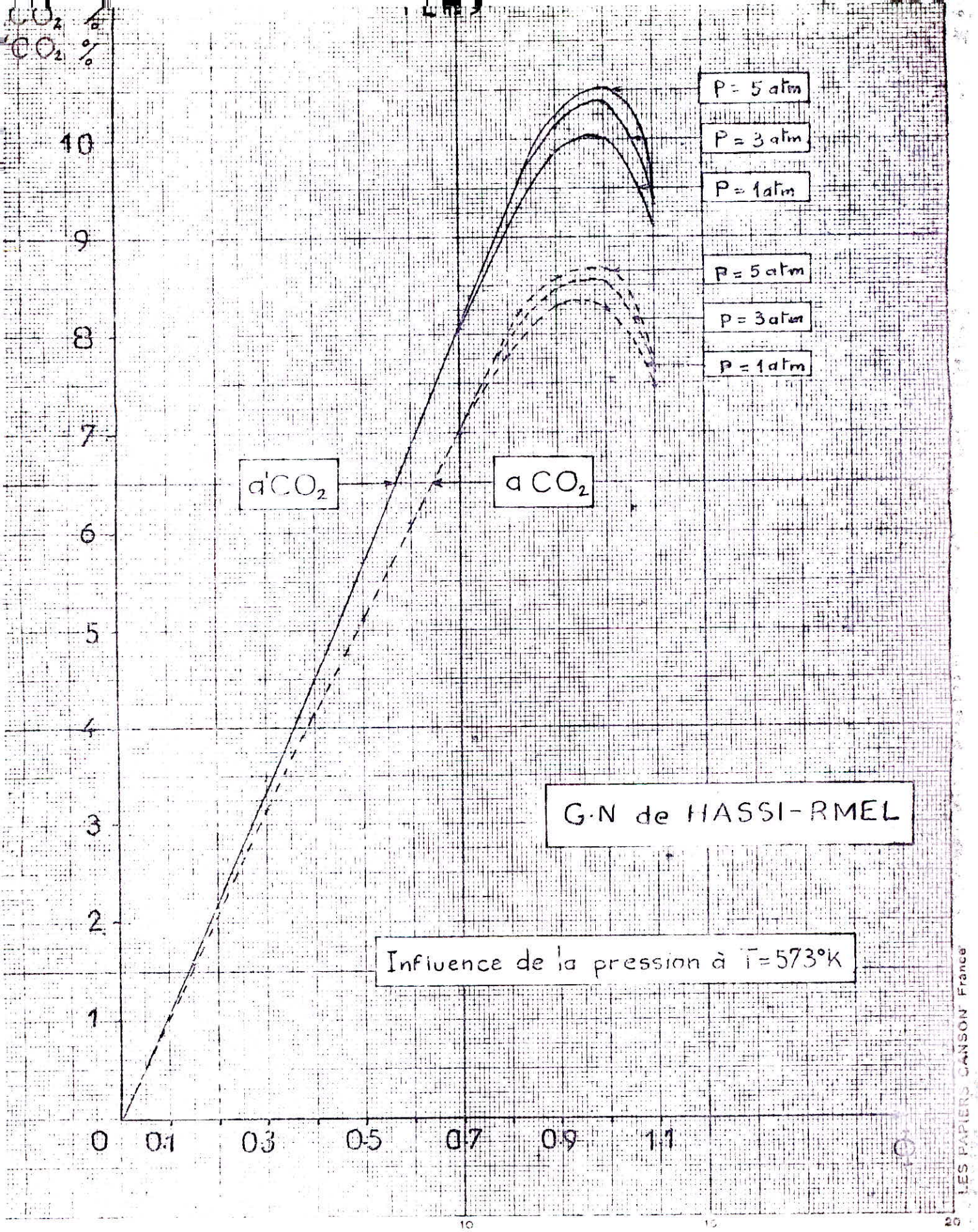
G-N de HASSI-RMEL

Influence de la pression à  $T = 323^\circ K$

0 0.1 0.3 0.5 0.7 0.9 1.1









$a_{CO_2} \%$   
 $d_{CO_2} \%$

10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

$P = 5 \text{ atm}$   
 $P = 3 \text{ atm}$   
 $P = 1 \text{ atm}$   
 $P = 5 \text{ atm}$   
 $P = 3 \text{ atm}$   
 $P = 1 \text{ atm}$

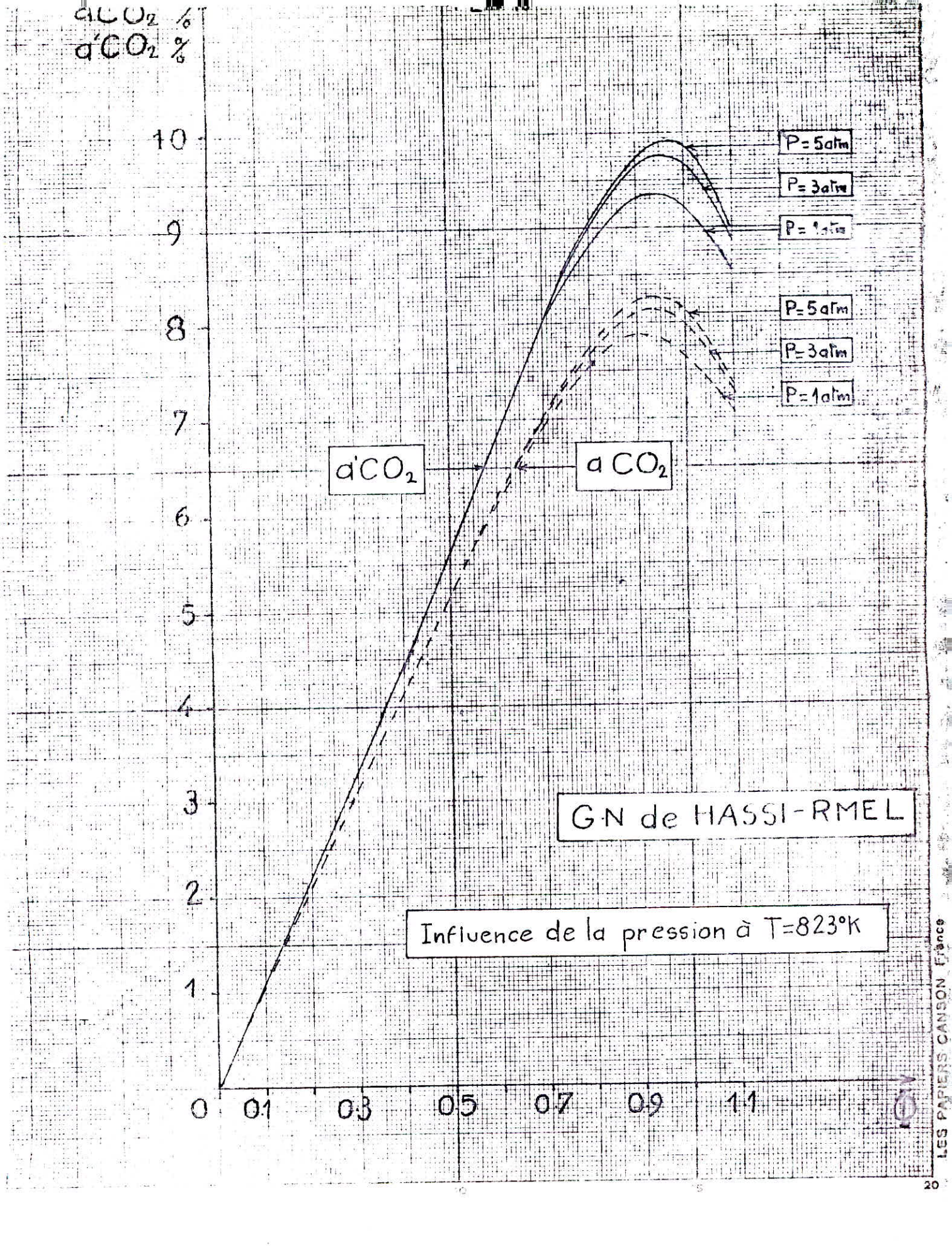
$d_{CO_2}$

$a_{CO_2}$

GN de HASSI-RMEL

Influence de la pression à  $T = 823^\circ K$

0 01 03 05 07 09 11

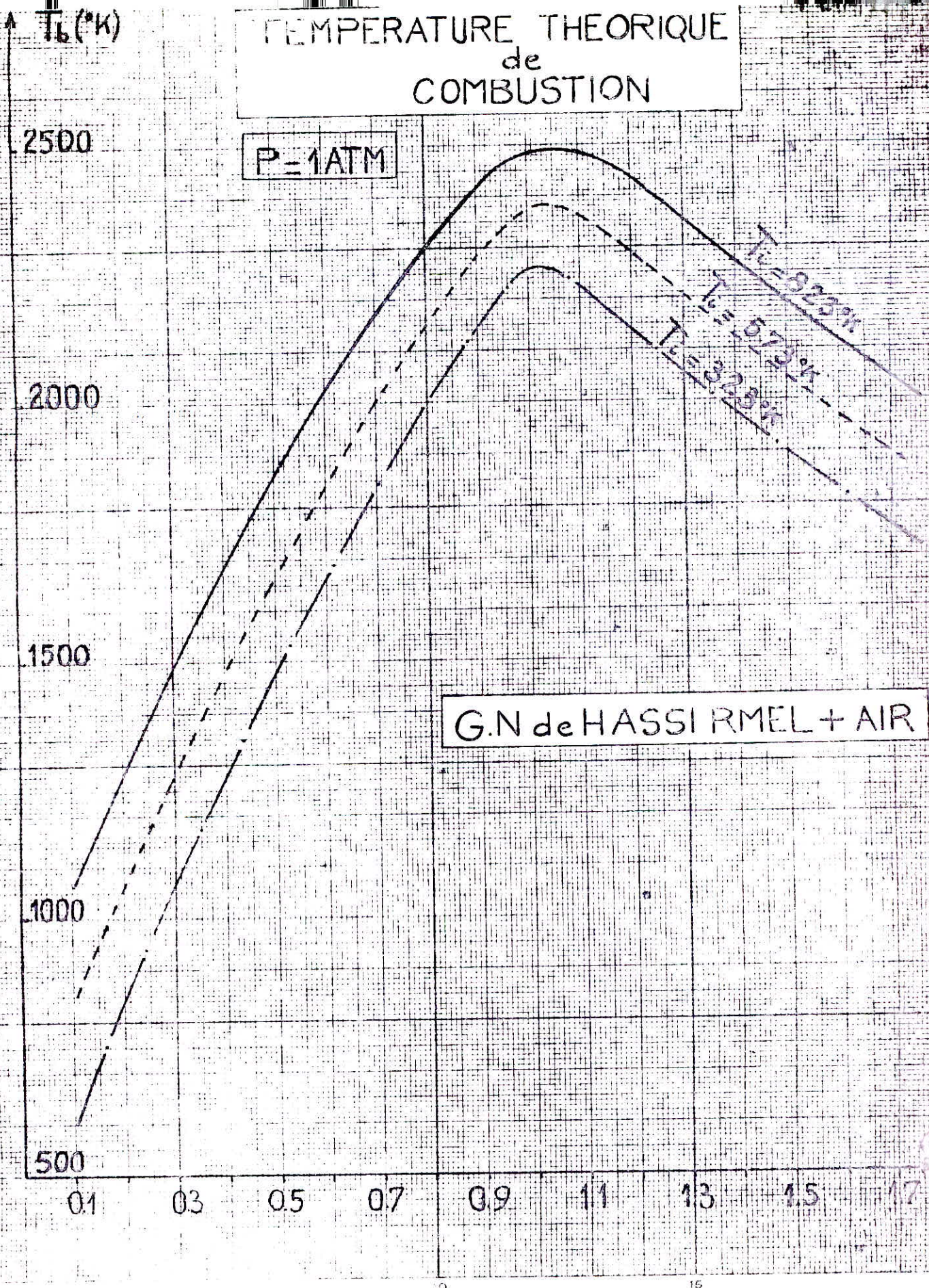




# TEMPERATURE THEORIQUE de COMBUSTION

P=1ATM

G.N de HASSI RMEL + AIR





# TEMPERATURE THEORIQUE de COMBUSTION

P=3ATM

2500

2000

1500

1000

500

01

03

05

07

09

11

13

15

17

G.N. de HASSI RMEL + AIR

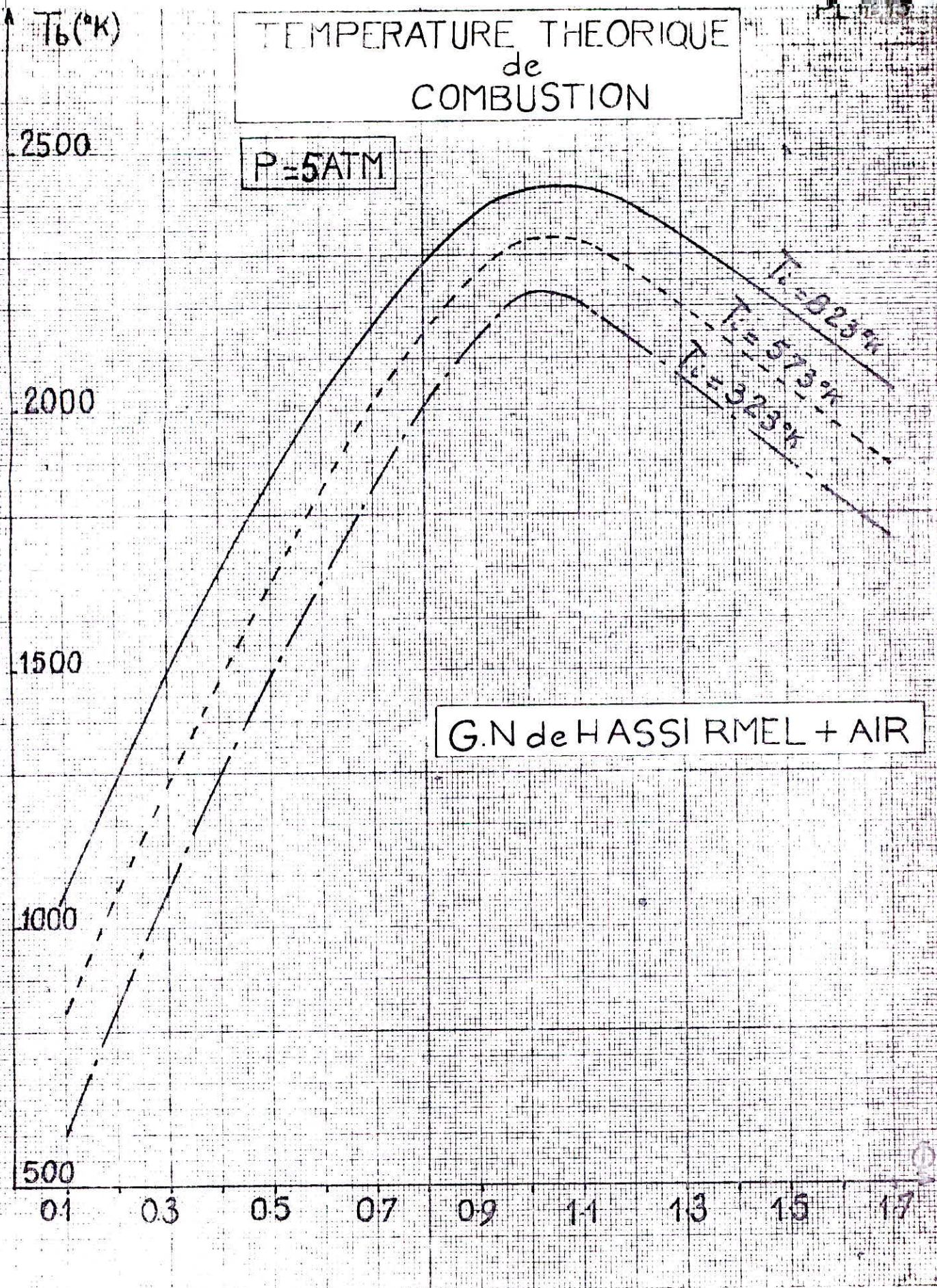
$T_c = 0.23^\circ K$   
 $T_c = 57.3^\circ K$   
 $T_c = 223^\circ K$



# TEMPERATURE THEORIQUE de COMBUSTION

P=5ATM

G.N de HASSI RMEL + AIR





CHAPITRE III

ETUDE DE LA COMBUSTION ET DE LA  
STABILISATION DE LA FLAMME DANS UN REACTEUR HOMOGENE

## 1- Rappels sur la combustion et sur la stabilisation de la flamme

Le processus théorique d'une combustion adiabatique et homogène donnant des intensités maximales, représente une limite impossible à atteindre.

Il faudrait arriver à disperser uniformément et instantanément dans le volume de combustion, le carburant et le comburant.

Les études sur la combustion ont confirmé le fait d'accélérer la réaction de mélange frais avec les produits chauds de la combustion.

Cependant, les intensités sont si élevées pour certains systèmes qu'ils peuvent devenir chimiquement limités : il y a extinction de la flamme.

Plusieurs auteurs se sont penchés sur les problèmes concernant le mécanisme de la stabilisation de la flamme.

Il y a deux catégories de facteurs contrôlant le domaine de la stabilisation de la flamme.

- facteurs physico-chimiques
- facteurs aérodynamiques.

## 2 - Intérêt de réacteur

Utilisé pour la première fois en 1955 par LOSWALD et BISS, le réacteur homogène reste très satisfaisant mais assez contesté objet de recherche sur la combustion et la stabilisation de la flamme dans des conditions approchant la pratique.



## 2.1. Installation

L'installation générale utilisée pour notre projet et décrite dans le chapitre I est inspirée de celle de Longwell et Weiss

## 2.2. Principe de la méthode

Si la combustion est contrôlée par la cinétique, elle sera régie par l'équation.

$$(1) \dot{Q}_A = k \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot V \cdot C_F^\alpha \cdot C_A^\beta$$

$\dot{Q}_A$  = débit d'air comburant

V = volume de la chambre de combustion

E = Energie d'activation

T = Température de combustion

K = Facteur de collision

$C_F$  = Concentration carburant  $\alpha$  = ordre de la réaction en carburant

$C_A$  = " " en air  $\beta$  = ordre de la réaction en air

Si la loi des gaz parfaits peut être utilisée on peut remplacer

$C_F$  par  $f_F \cdot \frac{P}{RT}$  avec  $f_F$  = nombre de moles de carburant

$C_A$  par  $f_A \cdot \frac{P}{RT}$  avec  $f_A$  = nombre de moles d'air.

L'équation (1) devient :

$$\dot{Q}_A = k \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot V \cdot f_F^\alpha \cdot f_A^\beta \left( \frac{P}{RT} \right)^{\alpha + \beta}$$

Pour plus de simplification on admet que la température atteinte et la composition en mélange frais sont fonction de  $\phi$  ; alors  $f_A$  et  $f_F$  seront aussi uniquement fonction de  $\phi$

En substituant  $n$  : ordre de la réaction à  $(\alpha + \beta)$  et en tenant compte d'autres facteurs, l'équation (2) devient :

$$(3) \frac{Q_A}{V \cdot P^n} = (E, T, \phi, \beta, n, K, T_i)$$

$$\text{avec } \Psi = \frac{Q_A}{V \cdot P^n} = \text{charge aérodynamique}$$

En supposant que les paramètres  $K, T_i, E, n$  sont constants la charge aérodynamique dépend seulement de la température de combustion pour un rapport de mélange air-combustible donné

LONGWELL et WEISS ont montré en traçant la courbe  $T = f(\Psi)$  pour une réaction à forte énergie d'activation que l'extinction a lieu pour une certaine température. D'où l'idée d'avoir des déductions concernant le domaine de stabilisation de la flamme à partir d'expériences sur l'extinction dans le réacteur homogène: la charge aérodynamique à l'extinction est uniquement fonction de  $\phi$

En se basant sur l'analyse précédente l'exposant "h" peut être défini par :

$$h = \frac{\partial \ln(Q_A/V)}{\partial \ln P}$$

En supposant que les paramètres  $K, T_i, E, n$  sont constants la charge aérodynamique dépend seulement de la température de combustion pour un rapport de mélange air-combustible donné LONGWELL et WEISS ont montré en traçant la courbe  $T = f(\Psi)$  pour une réaction à forte énergie d'activation que l'extinction a lieu pour une certaine température. D'où l'idée d'avoir des déductions concernant le domaine de stabilisation de la flamme à partir d'expériences sur l'extinction dans le réacteur homogène: la charge aérodynamique à l'extinction est uniquement fonction de  $\phi$



Application = méthode de calcul de n

On détermine "n" en répétant l'expérience pour plusieurs pressions régnant dans l'enceinte.

Les pentes des courbes  $\frac{QA}{V}$  en fonction de P avec  $\phi$  comme paramètre en coordonnées logarithmiques, donnent les valeurs possibles pour le coefficient .

Longwell et Weiss recommandent une valeur de  $n = 1,8$ .

### Rendement de la combustion dans le réacteur homogène

En supposant que la combustion est adiabatique (confirmée par le calcul des pertes de chaleur à travers le réfractaire) pour le calcul de température en fonction des gaz de combustion, le rendement serait donné par :

$$\eta = \frac{T_{\text{exp}} - T_i}{T_{\text{th}} - T_i}$$

{  $T_{\text{exp}}$  = température de combustion à partir de l'expérience  
{  $T_{\text{th}}$  = température théorique de combustion  
{  $T_i$  = température d'injection

## 2.3. Expérimentations et résultats : de LONGWELL et WEISS

### 2.3.1. Effet du type de combustible

Utilisant plusieurs types de combustibles et traçant leurs courbes respectives d'extinction  $\Psi = f(\phi)$ , il a été confirmé l'hypothèse que les combustibles réagissent les uns plus vite que les autres.

Le combustible réagissant plus vite que l'autre à une charge aérodynamique plus grande pour la même richesse  $\phi$ . Cette différence devient plus notable pour les richesses faibles.

### 2.32. Forme de l'injecteur

Longwell et Weiss recommandent l'injecteur sphérique (68 trous 0,0465 in de diamètre) qui donne une meilleure courbe d'extinction et un jet d'écoulement assez homogène.

### 2.33. Diamètre des trous de l'injecteur

Il a été remarqué que pour 2 injecteurs semblables mais avec des nombres et diamètres de trous différents en gardant le même débit de mélange : la charge aérodynamique est plus grande pour celui qui a le plus grand nombre de trous.

Remarque : ceci est contradictoire avec la théorie du fait que la charge aérodynamique dans ce cas doit rester constante pour les 2 injecteurs pour chaque richesse. Cette augmentation est due peut être à l'opération de réglage de pression et injection pour garder le même débit.

### 2.34. Pression régnant dans l'enceinte.

Leurs expériences montrent que la charge aérodynamique augmente avec la pression régnant dans l'enceinte.

### 2.4. Autre étude sur le réacteur homogène = (AE CLARKE - J. ODGERS..)

Le but de leurs expériences était de clarifier la situation quant à l'effet de la géométrie des systèmes et des pertes de charge sur le degré de mélange dans la chambre de combustion, et sur la courbe d'extinction.

Des essais hydrauliques montrant les écoulements des différents injecteurs confirment les résultats sur la courbe d'extinction.



Série A : Utilisation de plusieurs cylindriques injecteurs (géométrie variable, pertes de charge constantes)

nombre de trous : variant de 3 à 68  
Diamètre des trous : variant de 0,2214 in. à 0,0465 in.

Les injecteurs ayant 3 à 68 trous donnant les meilleures courbes d'extinction. Les essais hydrauliques montrent que ces mêmes injecteurs donnent un jet d'écoulement homogène. (bonne recirculation)  
(voir planche n° 14)

NB : l'injecteur sphérique recommandé par Longwell et Weiss donne un aussi bon jet d'écoulement que les 2 injecteurs cités  
ces essais montrent l'importance de la géométrie du système pour l'étude des limites de stabilité de la combustion et son homogénéité.

Série B : Utilisation d'autres injecteurs cylindriques

géométrie constante (n = 68 trous = constant mais différents diamètres)  
pertes de charge variables

Les courbes d'extinction obtenues pour ces injecteurs sont toutes aussi satisfaisantes. Les essais hydrauliques confirment cela et montrent que tous ces injecteurs donnent un jet d'écoulement homogène.

A partir de ces essais les auteurs déduisent, du moins pour ces injecteurs, que la signification géométrique a plus d'importance que les pertes de charge.

Cependant l'effet des pertes de charge sur les courbes d'extinction commence à partir d'une valeur = 20 %.

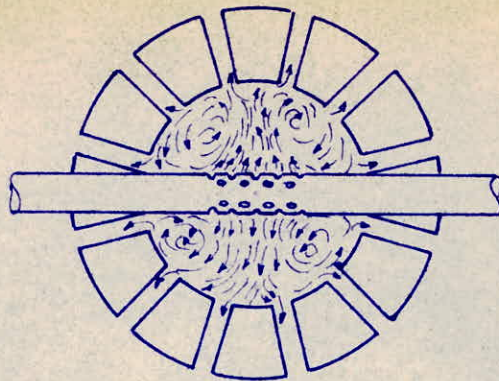


fig:1      Injecteur cylindrique avec 68 trous  $\varnothing$  0,0625 in.

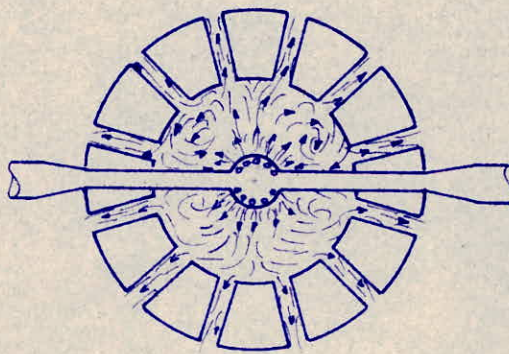


fig:2      Injecteur sphérique avec 68 trous  $\varnothing$  0,0465 in.

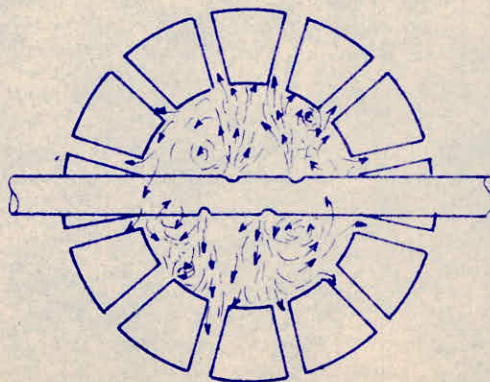


fig:3      Injecteur parallèle avec 12 trous  $\varnothing$  0,1110 in.



CHAPITRE IV/

- ESSAIS ET CALCULS -

---

---

## 1 . Mise en marche du réacteur.

- Opérations à suivre :
  - Gonfler le compresseur d'air à 5 ou 6 bars et purger.
  - Ouvrir les bouteilles de gaz naturel et régler le détendeur avant la régulation à 4 bars.
  - Régler le débit gaz et le débit d'air comburant par une pression de 2,5 bars de façon à être en régime stoechiométrique en agissant sur les régulateurs de pression et les robinets-vannes.
- Effectuer l'allumage :
  - injecter de l'air et du gaz à l'aide des robinets 1/4 de tour avec apport d'oxygène et provoquer l'étincelle.

NB : Le régime stoechiométrique est maintenu jusqu'à porter au rouge le réfractaire afin qu'il y ait auto-allumage du réacteur en passant à d'autres régimes (s'il y a extinction).

Ne pas maintenir longtemps le régime stoechiométrique car on risque de brûler l'injecteur.



## 2. Mesures relevées

### 2.1. Essai du 6 Juin 1975 : détermination des limites d'extinction.

#### Méthode :

On règle un débit de gaz naturel et on fait varier le débit d'air comburant jusqu'à extinction.

- Afficher un débit d'air et faire varier le débit gaz jusqu'à extinction.

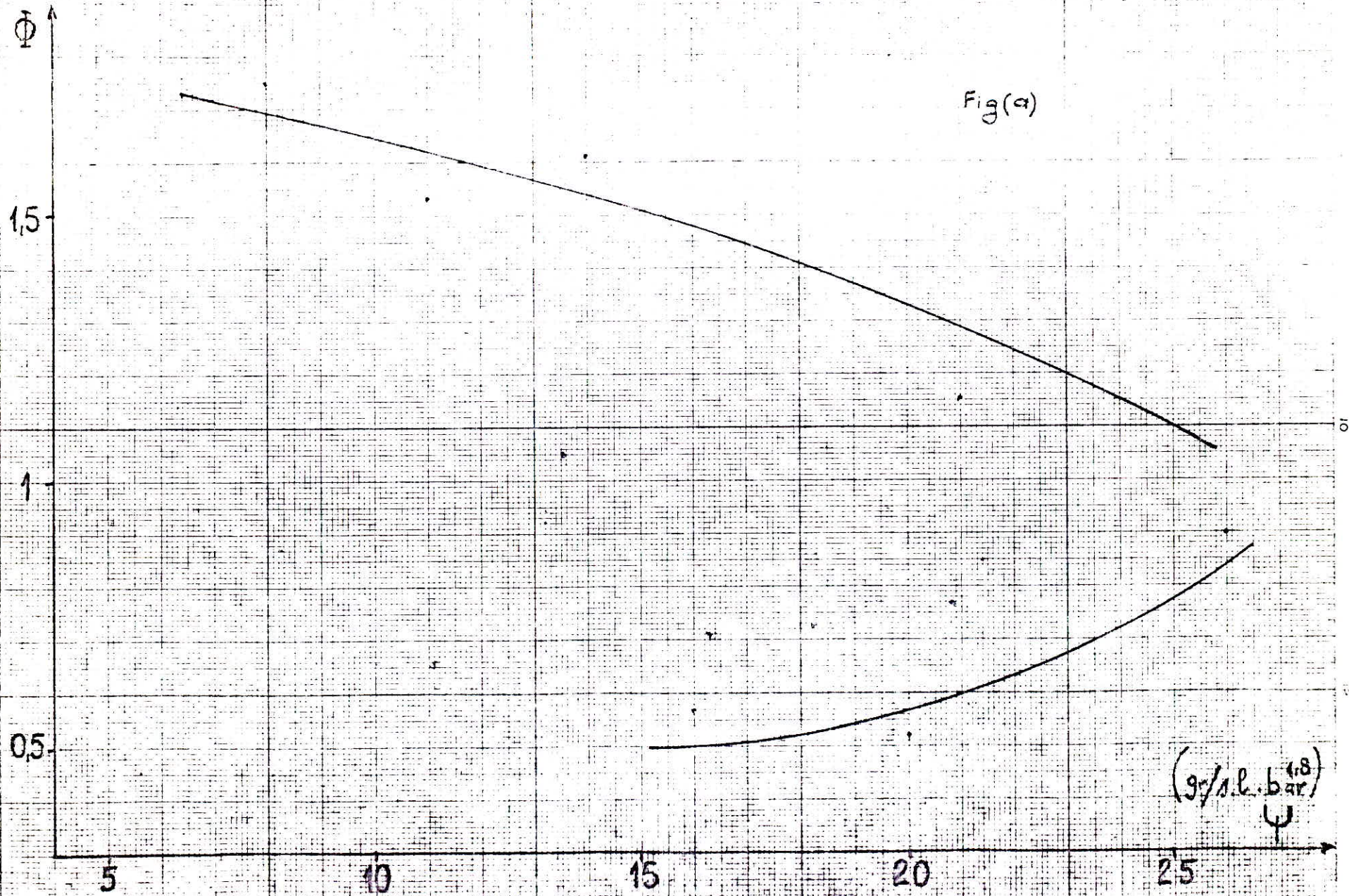
Cette deuxième méthode n'a pas été utilisée car la régulation de pression du gaz naturel a un temps de réponse beaucoup plus grand que celui de la régulation pour l'air.

- On calcule la charge aérodynamique  $\Psi = \frac{\dot{m}}{V \cdot P^{1,8}}$   
pour tous les points d'extinction :  $V = 0,25 \text{ l}$   
 $P = P_{ch} = 1 \text{ bar.}$

Les résultats de cet essai sont donnés sur le tableau n° 1 ci-dessous :

$Q_A$	$Q_G$	$\phi$	$\Psi$	$P_{air}$	$P_{GAZ}$	$P_{ch}$
2,5	0,25	1,53	10	1,5	1,5	1
3,5	0,37	1,613	14	"	"	"
5,30	0,40	1,15	21	"	"	"
2	0,22	1,75	8	"	"	"
5	0,17	0,52	20	"	"	"
4	0,15	0,574	16	"	"	"
6,6	0,39	0,9	26	"	"	"
gr/s	gr/s		$gr/s.l.atm^{1,8}$	bar	bar	bar





COURBE D'EXTINCTION



2.2. ESSAI DU 10 JUIN 1975

Analyse des gaz de combustion.

Cet essai aurait dû être fait en même temps que l'essai pour la détermination des limites de stabilité.

C'est pour cela que nous avons choisi des points de fonctionnement au voisinage des limites d'extinction.

Les courbes d'étalonnage des analyseurs correspondant à cet essai sont données sur la figure (b).

Les résultats sont donnés sur le tableau n° 2 ci-dessous :

Q <sub>A</sub>	Q <sub>G</sub>	Ø	T <sub>c</sub>	a'CO		a'CO <sub>2</sub>		Ø'	T <sub>c</sub>
6,6	0,39	0,903	2145	1,1	0,2	7,4	10,5	0,92	2170
10	0,3	0,458	1400	1,05	0,1	4,5	5,75	0,5	1470
7	0,4	0,874	2120	1,05	0,1	7,5	10,6	0,93	2180
6	0,3	0,764	1965	1,08	0,15	6,95	9,75	0,83	2040
5,30	0,4	1,152	2170	5,45	6,55	5,55	7,5	1,23	2115
3,5	0,37	1,615	1820	8	10,45	3,4	4	1,70	1760
2,5	0,25	1,53	1870	7,8	10,1	3,8	4,60	1,57	1850
2	0,22	1,68	1770	8,05	10,5	3,30	3,8	-	-
gr/s	gr/s	*	° K	mV	%	mV	%	*	° K



GN + Air

Courbes de  $\alpha'_{CO_2}$ ,  $\alpha'_{CO_2} = F(\phi)$

en trait fin les courbes théoriques  
(I.F.P.)

Fig. (c)

$CO_2\%$   
 $CO\%$

10

5

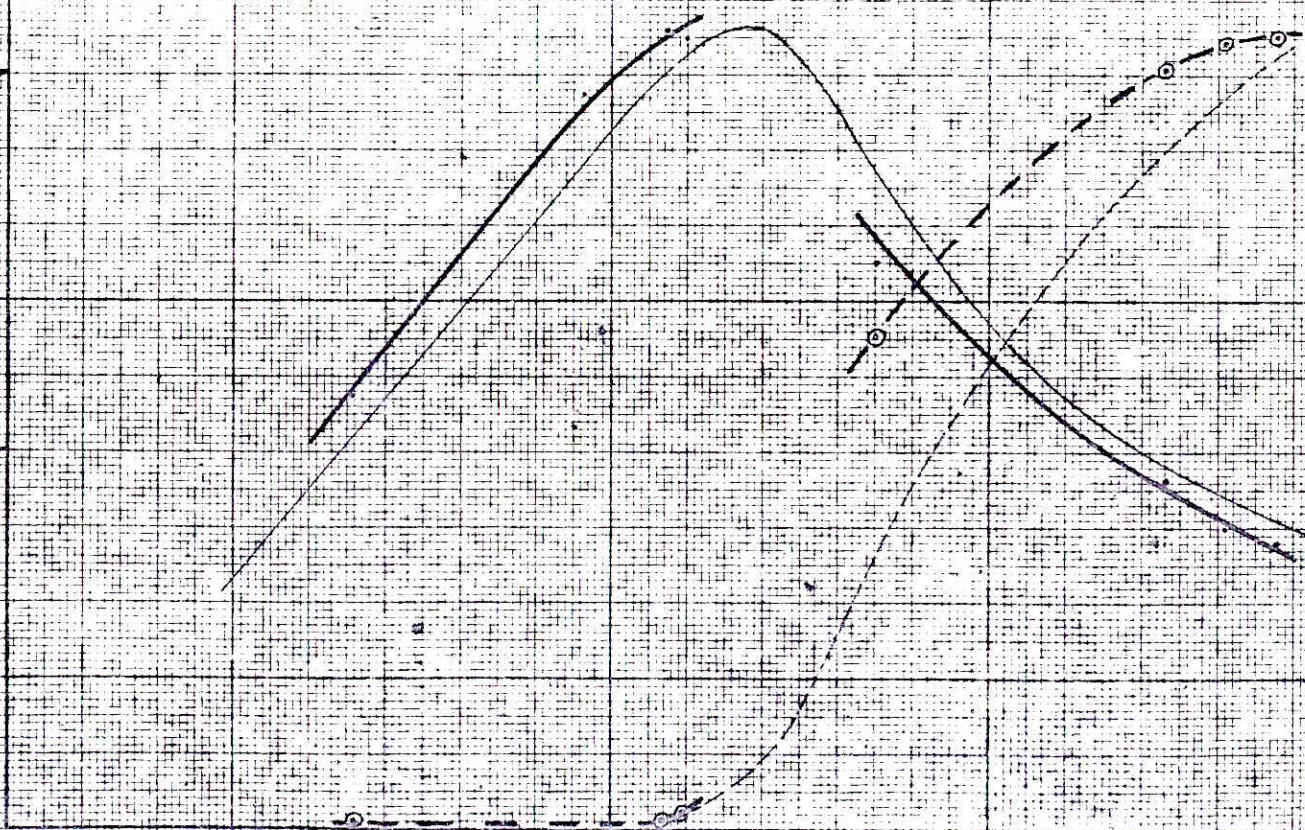
0

0,5

1

1,5

$\phi$





### 3- Discussion des essais.

#### + Essais pour la détermination de la courbe d'extinction

L'extinction a lieu à partir du moment où il y a une chute brusque de température de combustion. Connaissant les débits gaz, le débit d'air et le rapport de mélange stoechiométrique, on en déduit la richesse  $\phi$ .

La charge aérodynamique se calcule à partir du volume de la chambre de combustion, de la pression de l'enceinte et du débit d'air au voisinage de l'extinction.

La courbe  $\Psi = f(\phi)$  donne les zones de stabilité de la flamme ; cette courbe est représentée sur la figure (a)

#### + Essais d'analyse des gaz de combustion.

Les courbes donnant le taux de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{CO}$  (desséchés) en fonction de la richesse  $\phi$  sont représentées sur la figure (c).

Les mesures données par l'analyseur montrent bien que le pourcentage en  $\text{CO}$  est faible au niveau du régime stoechiométrique.

Le pourcentage en  $\text{CO}$  est faible en régime pauvre alors qu'il est important en régime riche.

A partir des résultats de l'analyse des gaz et des courbes  $\text{CO}_2 = f(\phi)$  (IFP) on détermine les températures  $T'c$

Les courbes de température de combustion en fonction de la richesse :  $T_c=f(\phi)$  et  $T'_c=f(\phi)$  sont représentées sur la fig.(d).

#### 4. Conclusions sur les essais.

La courbe d'extinction obtenue montre que la charge aérodynamique reste sensiblement la même pour l'ancien et le nouvel injecteur.

Elle a une forme analogue à celle obtenue par Longwell et Weiss.

Il est difficile de porter des conclusions sur l'analyse des gaz du fait qu'un seul essai a été fait.

Cependant, cet essai donne des courbes assez satisfaisantes en milieu pauvre : zone la plus intéressante en combustion.

Les différences avec les courbes déterminées à partir des listings seraient peut être dues à de mauvaises lectures sur les débitmètres.

Vu le pourcentage en CO donné par les analyses de gaz en régime pauvre, on pourrait conclure que le rendement de combustion est assez bon.



## C O N C L U S I O N

Les études expérimentales sur le réacteur sphérique montrent qu'il est possible de réaliser des combustions homogènes et adiabatiques atteignant une charge d'extinction maximale.

Il a été montré l'importance des caractéristiques dynamiques du mélange carburé sur les limites d'extinction de la combustion.

La géométrie de l'injecteur (forme, diamètre, nombre de trous et distance les séparant) est aussi un important paramètre. Une étude plus approfondie de leurs effets s'impose avant que le mécanisme réel de la combustion dans le réacteur soit défini et que les corrections justifiées y soient apportées.

Il existe deux voies d'utilisation du réacteur homogène :

- la première est de voir la correspondance entre le réacteur homogène et d'autres systèmes pour voir l'effet des différentes variables. On peut espérer que les performances de n'importe quel système dans lequel les réactions chimiques ont une importance pourraient être semblables à ceux établis par Longwell et Weiss.
- la deuxième c'est d'étendre analytiquement le genre de conditions d'expérience pour définir certains cas pratiques pour lesquels aucune étude n'a été faite.

## A n n e x e I

La répartition des trous sur les calottes demi-sphériques ayant été donnée dans le paragraphe (I), il s'agit de présenter dans cette annexe la méthode de perçage.

### 1\_ Traçage : (voir planche n°15)

- a. On trace des parallèles aux différents niveaux qu'occupent les trous c'est à dire à des hauteurs  $h_i$  (par rapport à une surface de référence telle que

$$h_i = h_0 \cdot \cos \alpha_i$$

avec

$$h_0 = \text{rayon extérieur de la } \frac{1}{2} \text{ sphère}$$
$$\alpha_i = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ.$$

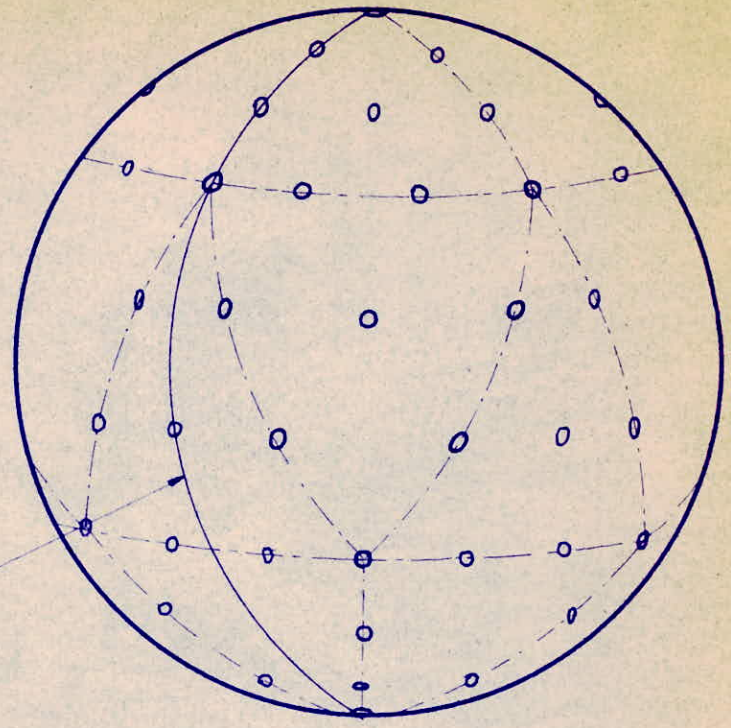
- b. Ces parallèles étant tracées, on trace un méridien de référence. La demi sphère est montée ensuite sur une semelle munie d'un téton (en bois) : les trois éléments étant coaxiaux et solidaire.

L'ensemble est monté sur le support du "plan incliné" (une feuille de papier préalablement graduée en degrés y est collée.

Sur chaque parallèle on fait des pointages à chaque rotation de la demi sphère ( variant suivant les parallèles).



Fig 1: répartition des trous sur la sphère.



méridien de référence

Fig 2: traçage et pointage

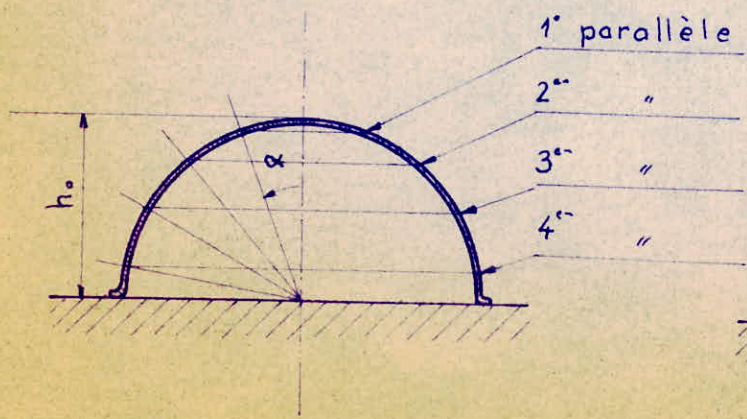
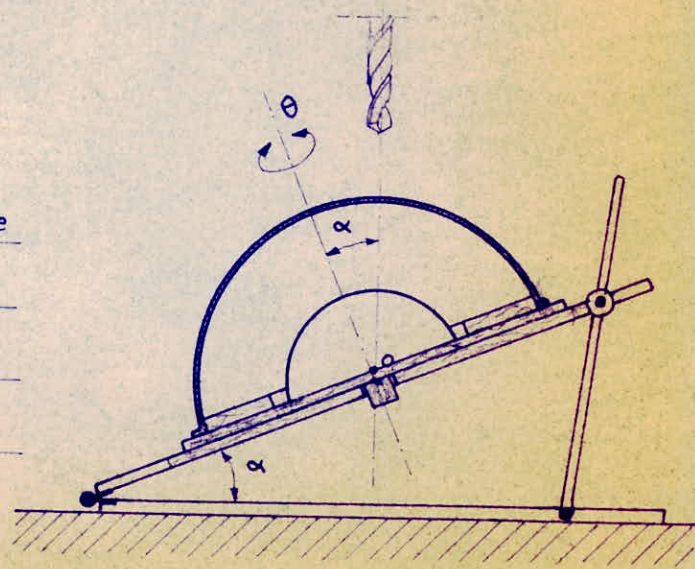


Fig 3: montage de perçage.



X sommet	0°	(1 trou)
X 1ère parallèle	$\varnothing \frac{360^\circ}{5}$	72° (5 trous)
X 2ème parallèle	$\varnothing \frac{360^\circ}{10}$	36° (10 trous)
X 3ème parallèle	$\varnothing \frac{360^\circ}{15}$	24° (15 trous)
X 4ème parallèle	$\varnothing \frac{360^\circ}{15}$	24° (15 trous)

avec décallage de 12° par rapport au méridien de référence.

La position des trous est ainsi déterminée.

## 2 - Perçage

Pour amortir les efforts de coupe, un disque est ajusté à la surface interne de la demi-sphère et solidaire avec la semelle.

Pour des raisons de moulage on monte sur la semelle une demi-sphère en bois (même dimensions que la chambre de combustion)

On perce ensemble les calottes en inox ainsi que les demi-sphères (bois) en choisissant les angles d'inclinaison à l'aide du "plan incliné"

Cependant certaines précautions pratiques sont à prendre :

- l'axe du forêt doit toujours passer par le point 0.
- on fait un repère entre la demi-sphère en bois et les calotte en inox avant démontage (après perçage).
- Le plan "incliné" doit être bridé sur la table de la perceuse

(Voir PL N° 15 pour le montage d'usage)



## A n n e x e II

---

### Moulage

#### 1- Matériaux utilisés pour les coquilles en réfractaire

Le matériau utilisé doit être réfractaire (1500° C mini.) et isolant thermiquement. Il doit présenter le minimum de retrait après cuisson et séchage

Deux essais ont été faits avec :

75% de kaolin

25% de réfracol

l'un avec 15% (du total) d'eau, l'autre sans eau.

- . le premier essai a donné un réfractaire fissuré et beaucoup de retrait
- . le deuxième essai ne présentait pas ces défauts mais se moulait très mal.

Finalement un responsable de la SNAIT, Rue Bachir ATTAR Tel. 66 36 03 a bien voulu résoudre ce problème de moulage en restant toutefois assez discret au sujet des composants du mélange.

Le seul renseignement utile donné est le pourcentage d'alumine (37 à 40%).

#### 2- Montage pour le moulage

On positionne les demi sphères en bois à l'intérieur des calottes en inox avec des tiges en acier du diamètre des trous de perçage. Il est

A N  
A n n e x e III

---

DIFFICULTES EXPERIMENTALES ET AMELIORATION  
DE L'INSTALLATION

1. Les problèmes se situent essentiellement au niveau :
  - . de l'allumage : l'obtention d'une flamme jusqu'au niveau de l'injecteur à partir d'un allumeur situé à l'extérieur de l'enceinte était difficile (à cause des difficultés de réglage du mélange carburé dans l'allumeur avec les "vannes 1/4 de tour" et à cause des pertes de charge).
  - . du compresseur : le compresseur utilisé a un faible débit et n'est pas équipé de dessiccateur. La présence d'eau dans le débitmètre fausse les mesures.  
Le débit d'air comprimé n'est pas suffisant pour assurer le refroidissement et l'alimentation en air comburant.
  - . du thermocouple : il n'y a pas de thermocouple adaptable à l'enceinte.
  - . des débitmètres : le débitmètre n'est pas adapté aux besoins des expériences du fait de son échelle.



## 2. Améliorations proposées :

- . Allumage : on pourra utiliser un allumeur muni d'une courte lance (5cm) placée directement dans l'un des orifices du réfractaire.

cf. schéma

NB : le corps de l'allumeur devra être plus épais que celui utilisé (au moins deux fois plus épais).

- . Compresseur : un compresseur d'air plus perfectionné est nécessaire.
- . Débitmètre : il serait plus souhaitable de mettre un tube de VENTURI au niveau du débitmètre de gaz pour avoir des débits assez précis.
- . Thermocouple : il serait avantageux d'avoir un thermocouple avec une longue gaine (coudée si possible) pour résoudre le problème d'étanchéité au niveau du fond de l'enceinte.
- . Injecteur : l'injecteur utilisé n'a pas d'évidement au niveau de sa partie sphérique d'où un nombre de trous limité (problèmes d'usinage). Un injecteur comportant un évidement assurerait une meilleure homogénéité et préparait le mélange à être injecté suivant une répartition sphérique.

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

---

- WEISS M.A., LANG J.R., and LONGWELL J.P. Combustion rates in spherical reactors effects of inlet temperature and fuel type. Ind. Eng. Chemic. 50,257(19 (1958).
- LONGWELL J.P. and WEISS M.A. High temperature reaction in hydrocarbur combustion Ind. Chem. 47,1634 (1955)
- CLARKE A.E., ODGERS J., RYAN P. Further studies of combustion phenomene in a sperical combustor p. 982-994. Eight Symposium on Combustion. The Williams W Wilkins Company Baltimore 1962.
- WEISS M.A., ROURER J.C. and LONGWELL J.P. Some effects of fuel reactivity and heat less a flamma stabilisatic Symposium on combustion p. 339-447
- CLARKE A.E., HARRISON and ODGERS, 5-7; Symposium on carbur- ation p. 664 Butterworth and Company LMD, London 1959.



M.Y. HERBERT. Atheoretical Analysis of reaction rate controlled systems part 1.

AGARDOGRAPH 15, Combustion Researches and Reviews 1957

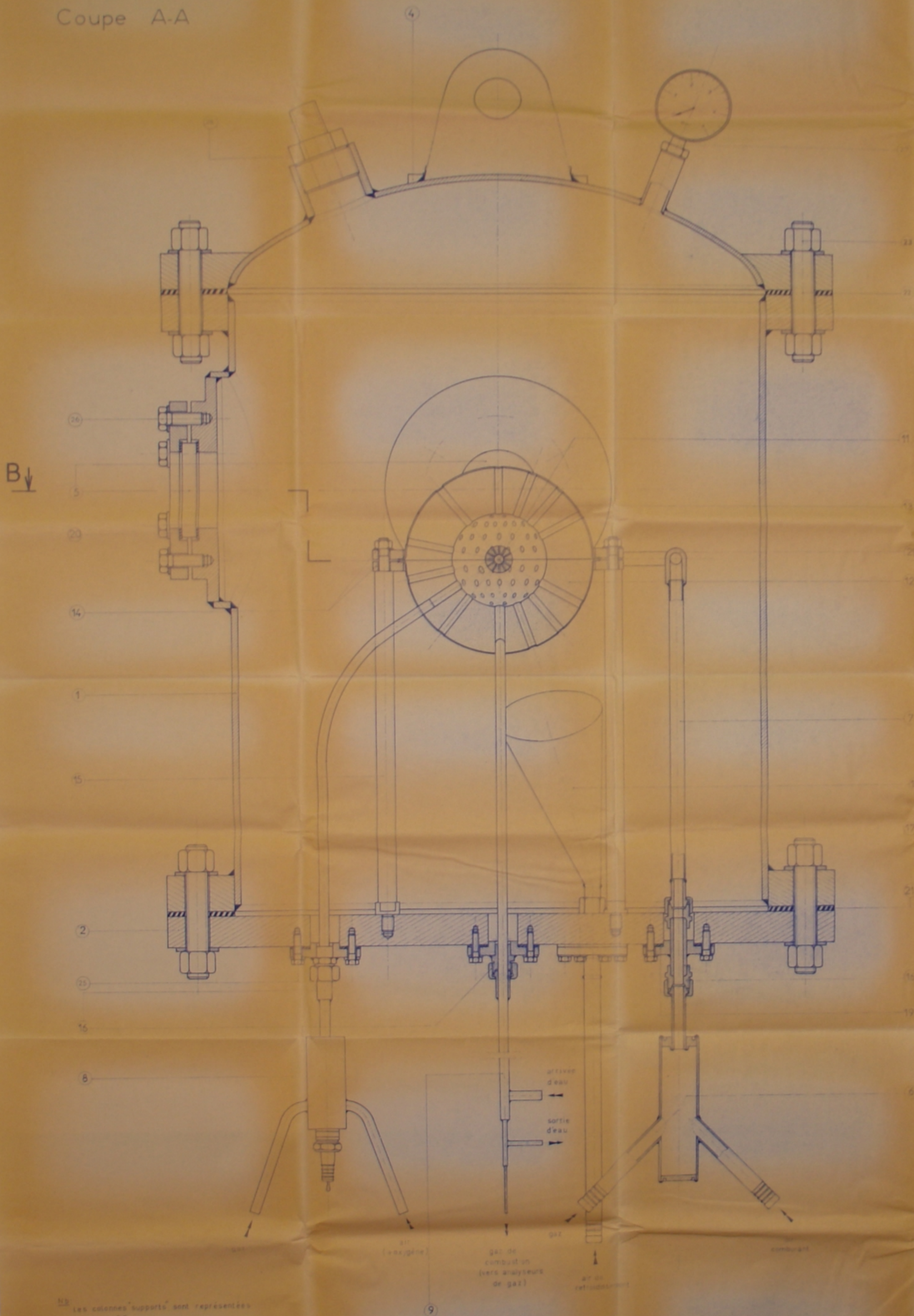
M.Y. HERBERT. A theoretical analysis of reaction controlled systems

Symposium on combustion part 2.

- . \* Cours photocopié : "Combustion" G. MATTON
- . \* Documentation SNECMA. Etude spatiale Bordeaux (1964)
- . \* A. TIMOSHENKO : Cours de R.D.M.
- \* Projet (1971) : "Réacteur homogène" BOUARROUDJ -  
BOUHADDOUDA
- \* La technologie des produits réfractaires et céramiques : A. GAUTHIER (GAUTHIER et VILLARS 1966)
- \* Documentation SCHLUMBERGER
- \* Tables thermodynamiques.



Coupe A-A



REACTEUR  
HOMOGÈNE

B ↓

B ↓

13 Les colonnes "supports" sont représentées en coupe CC

FM00495

1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1
31	1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1
33	1	1	1	1	1
34	1	1	1	1	1
35	1	1	1	1	1
36	1	1	1	1	1
37	1	1	1	1	1
38	1	1	1	1	1
39	1	1	1	1	1
40	1	1	1	1	1
41	1	1	1	1	1
42	1	1	1	1	1
43	1	1	1	1	1
44	1	1	1	1	1
45	1	1	1	1	1
46	1	1	1	1	1
47	1	1	1	1	1
48	1	1	1	1	1
49	1	1	1	1	1
50	1	1	1	1	1
51	1	1	1	1	1
52	1	1	1	1	1
53	1	1	1	1	1
54	1	1	1	1	1
55	1	1	1	1	1
56	1	1	1	1	1
57	1	1	1	1	1
58	1	1	1	1	1
59	1	1	1	1	1
60	1	1	1	1	1
61	1	1	1	1	1
62	1	1	1	1	1
63	1	1	1	1	1
64	1	1	1	1	1
65	1	1	1	1	1
66	1	1	1	1	1
67	1	1	1	1	1
68	1	1	1	1	1
69	1	1	1	1	1
70	1	1	1	1	1
71	1	1	1	1	1
72	1	1	1	1	1
73	1	1	1	1	1
74	1	1	1	1	1
75	1	1	1	1	1
76	1	1	1	1	1
77	1	1	1	1	1
78	1	1	1	1	1
79	1	1	1	1	1
80	1	1	1	1	1
81	1	1	1	1	1
82	1	1	1	1	1
83	1	1	1	1	1
84	1	1	1	1	1
85	1	1	1	1	1
86	1	1	1	1	1
87	1	1	1	1	1
88	1	1	1	1	1
89	1	1	1	1	1
90	1	1	1	1	1
91	1	1	1	1	1
92	1	1	1	1	1
93	1	1	1	1	1
94	1	1	1	1	1
95	1	1	1	1	1
96	1	1	1	1	1
97	1	1	1	1	1
98	1	1	1	1	1
99	1	1	1	1	1
100	1	1	1	1	1

REACTEUR  
HOMOGÈNE

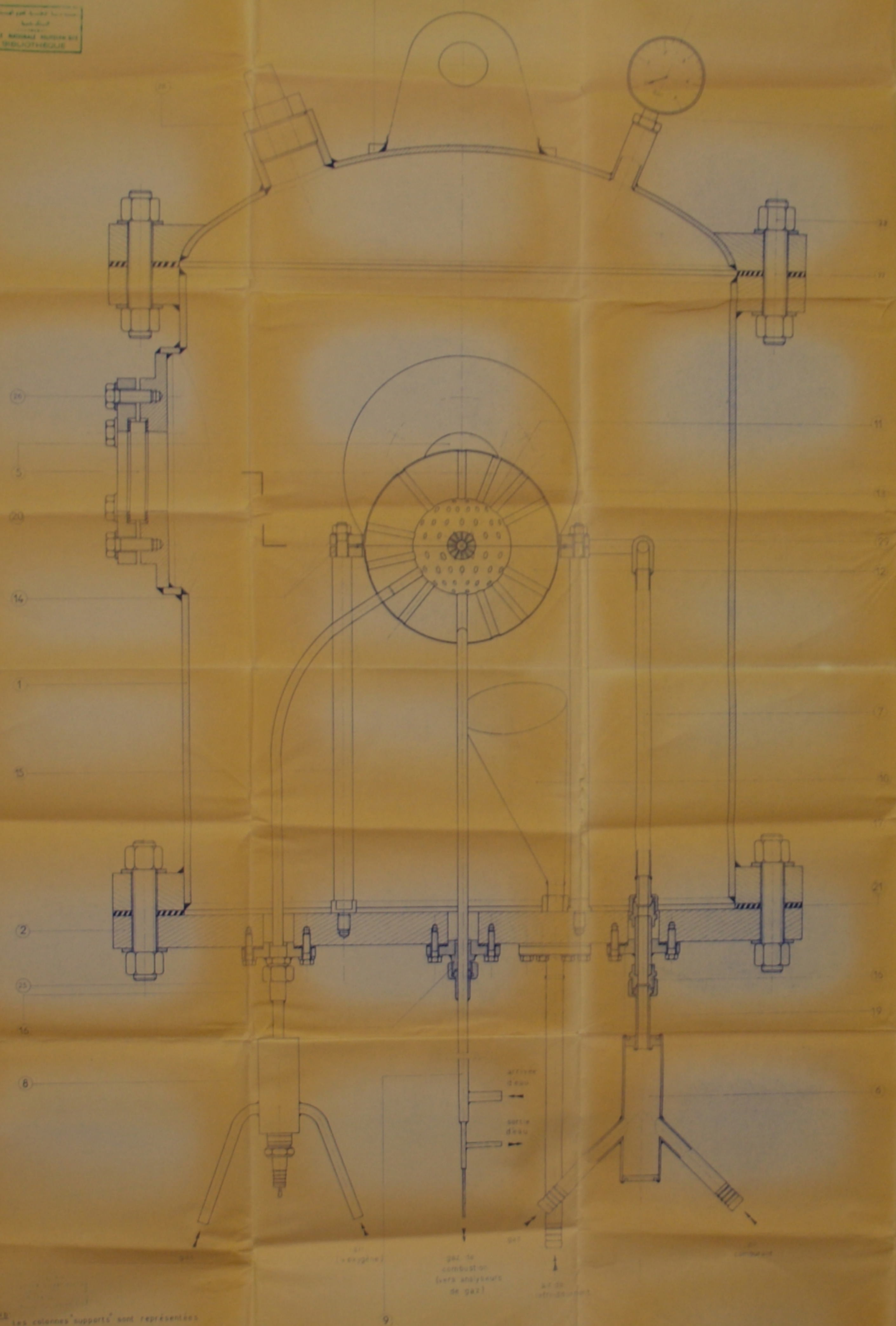


Coupe A-A

PROJET DE REACTEUR  
 112 NORMALE SUPERIEURE  
 POLYTECHNIQUE

B ↓

↓ B



NB Les colonnes supports sont représentées en coupe OC

1	Vis type "fenêtré"	
2	Mouche à la suppression	
3	Mouche	
4	Vis M 6 x 30	
5	Vis M 6 x 21	
6	Chapeau	
7	Carrou	
8	Carrou	
9	Tiges M 6 x 100	
10	Joints d'étanchéité ø 2 mm	
11	Joints d'étanchéité ø 2 mm	
12	Joints d'étanchéité ø 2 mm	
13	Carrou type "rouleau"	
14	Carrou type "rouleau"	
15	Carrou type "rouleau"	
16	Carrou type "rouleau"	
17	Carrou type "rouleau"	
18	Carrou type "rouleau"	
19	Carrou type "rouleau"	
20	Carrou type "rouleau"	
21	Carrou type "rouleau"	
22	Carrou type "rouleau"	
23	Carrou type "rouleau"	
24	Carrou type "rouleau"	
25	Carrou type "rouleau"	
26	Carrou type "rouleau"	
27	Carrou type "rouleau"	
28	Carrou type "rouleau"	
29	Carrou type "rouleau"	
30	Carrou type "rouleau"	
31	Carrou type "rouleau"	
32	Carrou type "rouleau"	
33	Carrou type "rouleau"	
34	Carrou type "rouleau"	
35	Carrou type "rouleau"	
36	Carrou type "rouleau"	
37	Carrou type "rouleau"	
38	Carrou type "rouleau"	
39	Carrou type "rouleau"	
40	Carrou type "rouleau"	
41	Carrou type "rouleau"	
42	Carrou type "rouleau"	
43	Carrou type "rouleau"	
44	Carrou type "rouleau"	
45	Carrou type "rouleau"	
46	Carrou type "rouleau"	
47	Carrou type "rouleau"	
48	Carrou type "rouleau"	
49	Carrou type "rouleau"	
50	Carrou type "rouleau"	
51	Carrou type "rouleau"	
52	Carrou type "rouleau"	
53	Carrou type "rouleau"	
54	Carrou type "rouleau"	
55	Carrou type "rouleau"	
56	Carrou type "rouleau"	
57	Carrou type "rouleau"	
58	Carrou type "rouleau"	
59	Carrou type "rouleau"	
60	Carrou type "rouleau"	
61	Carrou type "rouleau"	
62	Carrou type "rouleau"	
63	Carrou type "rouleau"	
64	Carrou type "rouleau"	
65	Carrou type "rouleau"	
66	Carrou type "rouleau"	
67	Carrou type "rouleau"	
68	Carrou type "rouleau"	
69	Carrou type "rouleau"	
70	Carrou type "rouleau"	
71	Carrou type "rouleau"	
72	Carrou type "rouleau"	
73	Carrou type "rouleau"	
74	Carrou type "rouleau"	
75	Carrou type "rouleau"	
76	Carrou type "rouleau"	
77	Carrou type "rouleau"	
78	Carrou type "rouleau"	
79	Carrou type "rouleau"	
80	Carrou type "rouleau"	
81	Carrou type "rouleau"	
82	Carrou type "rouleau"	
83	Carrou type "rouleau"	
84	Carrou type "rouleau"	
85	Carrou type "rouleau"	
86	Carrou type "rouleau"	
87	Carrou type "rouleau"	
88	Carrou type "rouleau"	
89	Carrou type "rouleau"	
90	Carrou type "rouleau"	
91	Carrou type "rouleau"	
92	Carrou type "rouleau"	
93	Carrou type "rouleau"	
94	Carrou type "rouleau"	
95	Carrou type "rouleau"	
96	Carrou type "rouleau"	
97	Carrou type "rouleau"	
98	Carrou type "rouleau"	
99	Carrou type "rouleau"	
100	Carrou type "rouleau"	

REACTEUR  
 NORMALE SUPERIEURE



