

7/99

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

*Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique*

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE
*Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Génie Mécanique*

المدرسة الوطنية للصحة والتقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

THEME

**METHODOLOGIE DE MESURE DE LA VITESSE, DE
LA TEMPERATURE ET DE LA CONCENTRATION DANS UN
MILIEU REACTIONNEL : ETUDE, CHOIX ET ADAPTATION**

Présenté par :

Mr. SEKFALI Seddik

Proposé et dirigé par :

Mrs. S. LARBI
B. BENKOUSSAS

Membres de jury :

Mrs. B BENKOUSSAS
M BOUDJEMA
M HALLI
S LARBI

PROMOTION
JUN 1999

Remerciements



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

En premier lieu, je voudrais remercier :

- M^s BENKOUSAS
- M^s LARBI

mes deux encadreurs dont les conseils et soutien moral m'ont été du plus grand aide et qui ont cru en mes compétences jusqu'à la fin ;

- M^s BOUDJEMAA
- M^s HALLI

qui m'ont fait l'honneur de leur présence le jour de ma soutenance ;

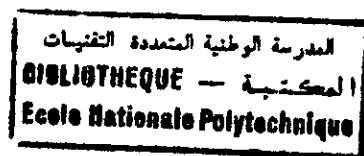
- Mes parents

dont je ne pourrais jamais oublier leurs dévouement et sacrifices à mon égard ;

- Tout le corps enseignant de l'*E.N.P*

Et enfin, toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Dédicaces



Je dédis ce modeste travail à :

- mes deux promoteurs
- mes chers êtres regrettés : que dieu les accueille dans son vaste paradis
 - ma tante Faffany
 - mon cousin Moustafa
 - ma cousine Acia
 - mes grands-parents
 - mon oncle Saleh
- mes parents
- mon frère
- ma sœur Rym
- madjemaa
- mes oncles
- mon oncle Belkacem
- mes tantes
- ma famille
- mes amis en particulier :
 - Bibo
 - Farid
 - Hicham
 - NB
 - Maamar
 - Mehdi (s)
 - Merouane
 - Mourad
 - Sid
 - Sofiane (s)
 - Wissam
 - Yanis.

ملخص

تمثل هذه الدراسة في البحث عن طرق حساب سرعة درجة حرارة و تركيز وسط ضمن غرفة احتراق. بعد المقارنة بين الطرق الملائمة اخترنا تلك التي تتجاوب مع متطلبات مخبر التجارب و هذا نظرا ان الطرق المستعملة اولا لا تتجاوب مع الطرق التجارية الحالية.

Résumé :

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la recherche de méthodes de mesure de la vitesse, de la température et de la concentration dans un milieu réactionnel. Après comparaison des performances de chaque méthode, nous avons choisi la plus appropriée à notre banc d'essai vu que l'instrumentation initialement prévue ne convient plus aux exigences expérimentales actuelles.

Abstract :

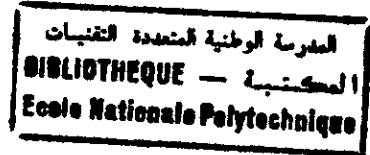
In this study, we worked on the resaerche of mesurment methods of velocity, temperature and concentration in a reactional media. After comparing between the performances of each method, we choose the most appropriate for our testing edge, on wich there is an inappropriate instrumentation with the actual requiring.

MOTS CLES : mesure ; vitesse ; température ; concentration ; combustion

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction

Introduction



Depuis la nuit des temps, l'homme est en perpétuelle conquête de tout ce qui lui permettra d'améliorer ses conditions d'existence ; parmi ses recherches, il s'est longuement attardé sur la possibilité d'exploiter toute source possible d'énergie. Au début, il utilisa ses propres muscles pour faire déplacer ou transporter des objets, puis il a exploité les animaux et la force du vent pour déplacer ses embarcations ; enfin, il s'est intéressé à l'énergie produite par la combustion des hydrocarbures. Etant donné la diversité de ces derniers, il voulut tout savoir sur leurs comportements et leurs aptitudes en combustion ; pour cela, il entreprit plusieurs expériences pour en dégager les hydrocarbures les plus avantageux.

Le phénomène de combustion, en lui même, est très complexe, mais peut se résumer à une introduction d'un mélange d'air et de carburant, dont la rapport volumique du premier au second est de l'ordre de 14 [12], dans une chambre de combustion où le phénomène sera enclenché par un système d'allumage. Cette réaction engendre une énergie considérable qui servira comme force de poussée.

L'expérimentation fournit à la recherche scientifique et au contrôle industriel un appui particulièrement efficace. Sa mise en œuvre rationnelle ouvre la voie à la description quantitative des phénomènes, à la vérification de certains postulats et d'hypothèses ainsi qu'à la consolidation des bases d'un grand nombre de théories. Le département de génie mécanique dispose d'un banc d'essai de combustion, créé par le professeur *GILBERT MATTON* en 1968 [6], afin d'étudier les performances des carburants ; néanmoins, ce banc d'essai nécessite une automatisation des systèmes d'acquisition des paramètres d'écoulement. Pour cela nous avons entrepris une recherche concernant les méthodes de mesure de la vitesse, de la température et de la concentration dans une chambre de combustion et avons fait le choix le plus approprié.

Notre travail se compose de trois grandes parties ; en premier lieu, on donnera quelques notions concernant les chambres de combustion et l'aspect thermochimique de la combustion ; en seconde partie, on exposera les différentes méthodes de mesure ainsi que leurs théories de base. En dernier lieu, une adaptation des systèmes de mesure est faite avec une schématisation appropriée.

Chapitre 1

Généralités sur la combustion et les chambres de combustion

1 . 1 - Notions de thermochimie

1 . 1 . 1 - Equation stœchiométrique de combustion

1 . 1 . 2 - Expression et calcul de la richesse

1 . 1 . 3 - Pouvoirs calorifiques

1 . 1 . 4 - Composition des gaz d'échappement

1 . 1 . 4 . 1 - Composition des produits de combustion en
équilibre thermodynamique

1 . 1 . 4 . 2 - Composition réelle des produits de combustion

1 . 2 - Généralités sur les chambres de combustion

1 . 2 . 1 - Différents types de chambres de combustion

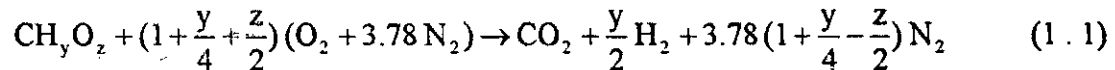
1 . 2 . 2 - Chambre de combustion du banc d'essai

1. 1 - Notions de thermochimie

1. 1. 1 - Equation stœchiométrique de combustion

L'analyse élémentaire quantitative du carburant fournit sa teneur massique en carbone, hydrogène et éventuellement oxygène ; elle permet donc d'écrire la formule globale $(\text{CH}_y\text{O}_z)_x$ où le coefficient x , lié à la masse molaire, n'a pas d'influence sur le dosage air - carburant .

L'équation chimique de combustion s'écrit :



On admet que pour l'air, la composition de 20.9 % d' O_2 et 79.1 % de N_2 . L'argon, dont la teneur volumique dans l'air est de 0.93 % et les autres constituants présents à l'état de traces sont assimilés à l'azote [4]. On appelle stœchiométrie la composition du mélange air - carburant requise pour obtenir une combustion complète.

Le rapport stœchiométrique r est le quotient des masses respectives m_a et m_c d'air et de carburant mises en présence dans les conditions stœchiométriques :

$$r = \left(\frac{m_a}{m_c}\right)_{st} \quad (1.2)$$

où r est généralement compris entre 13 et 15 pour les hydrocarbures et plus précisément entre 14 et 14.5 pour les carburants liquides classiques. Il augmente avec le rapport N_H/N_C (nombre de moles respectifs de H et C), de 11.49 pour le carbone pur jusqu'à 34.46 pour l'hydrogène ; la présence d'oxygène dans le carburant tend à diminuer le rapport stœchiométrique : celui-ci est de 6.46 pour le méthanol CH_3OH au lieu de 17.3 pour le méthane CH_4 .

1. 1. 2 - Expression et calcul de la richesse

Dans les applications industrielles (moteurs, turbines, foyers, etc..) les conditions de combustion sont généralement éloignées de celles correspondant à la stœchiométrie et se caractérisent soit par un excès, soit par un défaut de carburant par rapport à l'oxygène. La composition du milieu réactionnel s'exprime alors par la richesse Φ , définie par la relation :

$$\Phi = \frac{(m_c / m_a)_{re}}{(m_c / m_a)_{st}} \quad (1.3)$$

avec $(m_c / m_a)_{rc}$ rapport des masses respectives m_c et m_a de carburant et d'air réellement utilisées .

La richesse s'écrit également en fonction du rapport stœchiométrique r :

$$\Phi = (q_{m_c} / q_{m_a}) r \quad (1.4)$$

avec q_{m_c} débit massique d'air

q_{m_a} débit massique de carburant .

la richesse se rapporte donc au carburant, et le mélange est riche ou pauvre selon que le carburant est en excès ou en défaut; signalons qu'en Allemagne, la composition du mélange réactionnel est caractérisée par le coefficient d'excès d'air λ qui est l'inverse de la richesse :

$$\lambda = \frac{1}{\Phi} \quad (1.5)$$

1.1.3 - Pouvoirs calorifiques

Le pouvoir calorifique massique ou volumique représente la quantité d'énergie par unité de masse ou de volume du carburant lors de la réaction chimique de combustion complète conduisant à la formation de CO_2 et H_2O . Le carburant est pris, sauf mention contraire, à l'état liquide et à une température de référence, généralement 20°C , l'air et les produits de combustion sont considérés à cette même température .

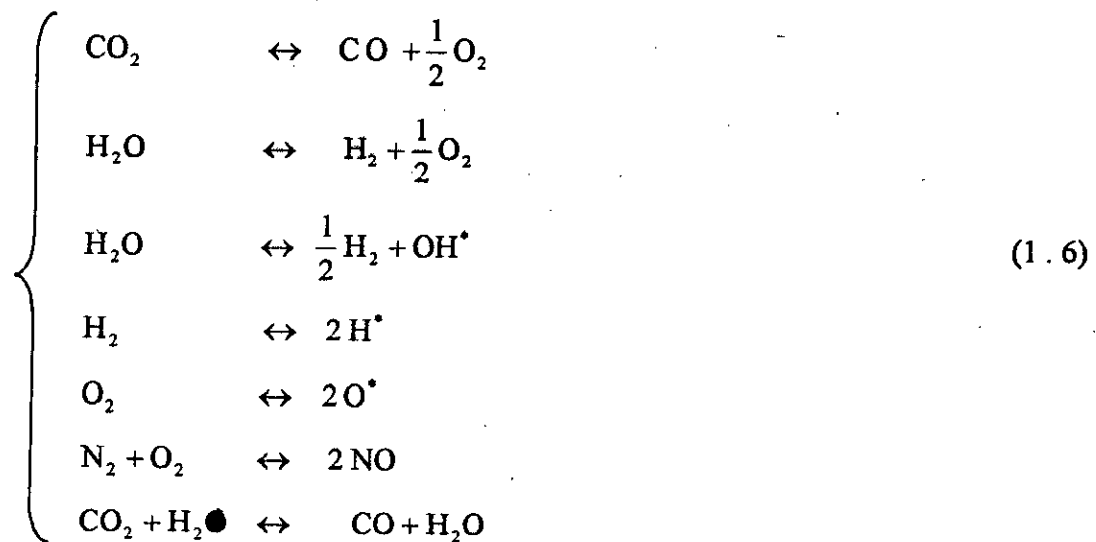
On fait la distinction entre le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et inférieur (PCI) selon que l'eau obtenue par combustion se trouve à l'état liquide ou gazeux; la seule grandeur véritablement utile est le PCI, puisque dans les produits de combustion des moteurs et des brûleurs, l'eau est rejetée à l'état gazeux . Pour le méthane qui compose principalement le *G.N.L* le PCI massique est de 50009 kJ / kg [4] .

1.1.4 - Composition des gaz d'échappement

1.1.4.1 - Composition des produits de combustion en équilibre thermodynamique

Les produits d'une combustion complète d'un hydrocarbure avec un oxydant sont le carbone qui se trouve sous forme d'anhydride carbonique et l'hydrogène sous forme d'eau. En réalité, la composition du mélange est beaucoup plus complexe. En mélange riche, le système réactionnel ne contient pas assez d'oxygène pour permettre une oxydation complète du carburant; il se forme alors, en plus des espèces citées précédemment, de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène. Par ailleurs, les produits obtenus peuvent subir un grand nombre de réactions entre eux (dissociations, combinaisons) dont le degré d'avancement dépend de la pression et de la température.

Citons ici quelques équations chimiques correspondant à des transformations possibles :



avec O^* et H^* radicaux libres ;

Les réactions précédentes se caractérisent par des constantes d'équilibre qui dépendent elles-mêmes de la température et de la pression (tout au moins pour celles où le nombre de moles de produits est différent du nombre de moles de réactifs); ces constantes sont fournis dans des tables thermodynamiques, ce qui permet de calculer la composition finale du mélange à pression et température données, si l'on suppose l'équilibre thermodynamique atteint. En fait l'état réel des gaz d'échappement est rarement celui correspondant à l'équilibre

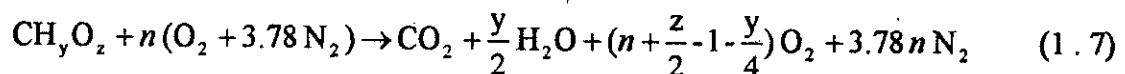
car plusieurs réactions chimiques conduisant à cet état stable se produisent avec une vitesse faible et sont donc figées à partir d'un certain seuil de température. Enfin, la présence toujours constatée de faibles quantités de produits imbrûlés n'est pas prise en compte dans ces prévisions.

1.1.4.2 - Composition réelle des produits de combustion

Si on considère un système de combustion donné, les paramètres initiaux sont la composition élémentaire du carburant et la richesse Φ , la richesse définit l'état du mélange il faut distinguer le cas des mélanges stœchiométriques ou pauvres et celui des mélanges riches.

- *Mélanges stœchiométriques ou pauvre*

L'équation de combustion s'écrit :



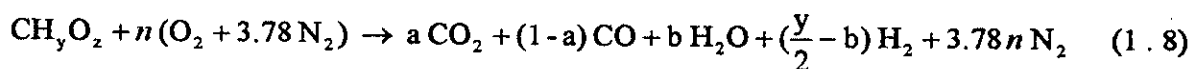
avec $n = \left(1 + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right)$ tel que: $\Phi \geq 1$

La stœchiométrie correspond au cas particulier où $\Phi = 1$

La composition des gaz d'échappement s'obtient directement dès que l'on connaît la richesse Φ ou le coefficient n . Les produits de combustion peuvent être considérés secs ou humides, selon que la vapeur d'eau est condensée ou pas. Enfin, il existe toujours une quantité plus ou moins importante d'oxygène résiduel.

- *Mélanges riches, équilibre du gaz à l'eau*

Il se forme alors simultanément CO_2 , CO , H_2O et H_2 . L'équation de combustion devient :



avec $n = \left(1 + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right)$ tel que: $\Phi < 1$

L'obtention des coefficients a et b nécessite une investigation complémentaire. En effet l'expérience montre que la composition des gaz mesurée à l'échappement correspond dans tout les cas à un figeage de la réaction précédente à une température de l'ordre de 1700K

pour laquelle la constante d'équilibre K_x vaut 3.8 .

On obtient ainsi :

$$K_x = \frac{x_{CO} x_{H_2O}}{x_{CO_2} x_{H_2}} = \frac{(1-a)b}{a\left(\frac{y}{2}-b\right)} = 3.8 \quad (1.9)$$

avec x_{CO} , x_{H_2O} , x_{CO_2} et x_{H_2} fractions molaires des différents constituants des gaz d'échappement .

En faisant intervenir le bilan matière en oxygène :

$$2n + z = 2a + (1-a) + b = a + b + 1 \quad (1.10)$$

Il est possible de déterminer les valeurs numériques de a et b et de calculer les concentrations relatives des effluents .

1. 2 - Généralités sur les chambres de combustion

La chambre de combustion est la partie vitale du réacteur, elle est le lieu de transformation de l'énergie chimique en énergie calorifique d'où découleront la puissance nécessaire à l'entraînement du compresseur, des pompes, accessoires et enfin surtout la puissance propulsive. On voit donc l'importance que l'on doit attacher à l'étude des chambres de combustion.

Le combustible se mélange avec l'air venant du compresseur et brûle, les gaz qui en résultent se dilatent et leur détente fournit alors la poussée. A première vue le problème paraît simple , mais en réalité il est très complexe. La combustion complète et sans dépôts de carbone se fait approximativement avec un rapport air – combustible de 14. La température s'élève aux environ de 1500 à 2000°C, ce qui est avantageux pour le rendement, mais de telles températures détérioreraient la turbine ainsi que les parois de la chambre.

1. 2. 1 - Types de chambres de combustion

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

- les chambres séparées ou chambres multiples
- les chambres annulaires
- les chambres mixtes

- *Chambres séparées ou multiples* : La disposition d'ensemble sur le réacteur des chambres séparées ou multiples est donnée par la figure (1 . 2), chacune d'elle comprend un injecteur, un dispositif d'accrochage de la flamme et un système pour le refroidissement des gaz avant d'entrer à la turbine. Toutes les chambres communiquent entre elles de façon à égaliser les pressions et assurer l'allumage , car en général, deux chambres seulement sont dotées de système d'allumage. Les chambres séparées, d'un emploi presque obligatoire avec un compresseur centrifuge du fait même de leur disposition, sont parfois utilisées avec un compresseur axial à cause de leur relative facilité de mise au point.

En effet , le débit d'air passant par chacune des chambres séparées n'est qu'une fraction de celui du compresseur qui lui peut être de l'ordre de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ [12].

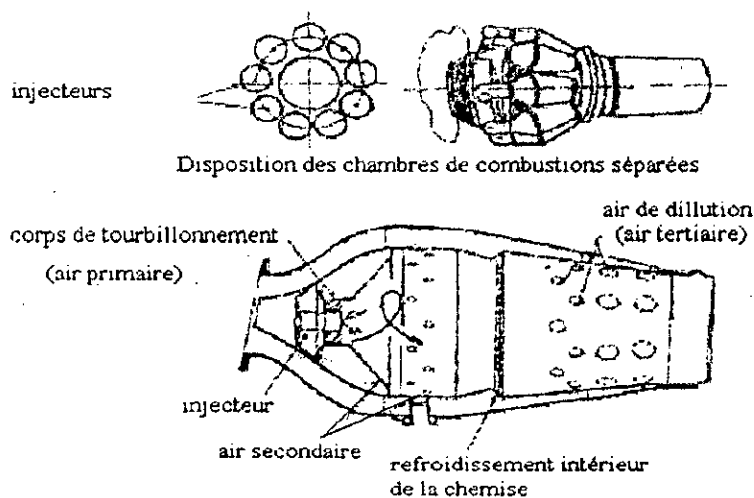


Fig (1 . 1) : Chambres séparées ou multiples

- *Chambres annulaires* : Tout le débit du compresseur passe ici dans une chambre unique comportant les mêmes éléments que les chambres séparées : dispositif d'injection; dispositif d'allumage; système d'accrochage de la flamme; dispositif de refroidissement des gaz avant la turbine ; mais cette fois tous les injecteurs sont dans la même chambre, chacun débite moins que l'injecteur d'une chambre séparée mais ils sont proportionnellement plus nombreux pour assurer l'homogénéité de l'anneau de flammes .

La difficulté de la mise au point d'une chambre annulaire réside surtout dans le fait que l'on ne peut que rarement disposer, lors des essais, d'un débit d'air égal à celui qu'enverrait normalement le compresseur du réacteur. On est alors réduit à essayer des "secteurs" de chambre partielle, puis à poursuivre l'étude sur le moteur complet. En revanche ce type de chambre présente un encombrement minimum, des pertes de charge très faibles et un poids moins important.

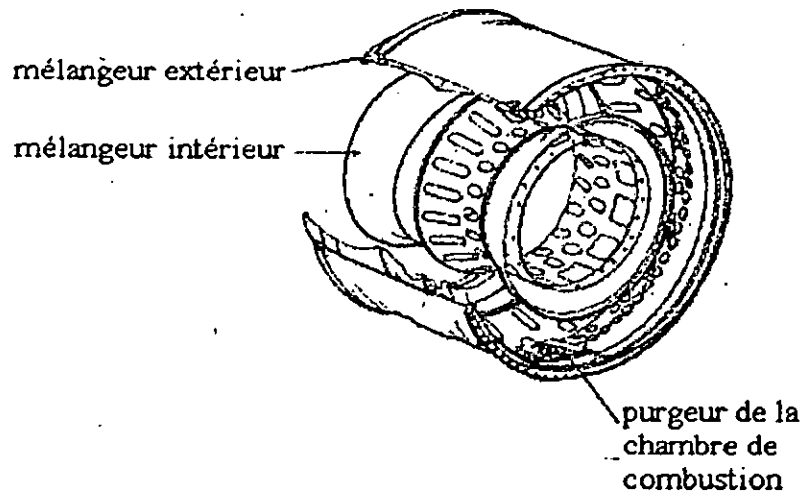


Fig (1 . 2) : Chambre annulaire

- **Chambres mixtes** : Elles s'apparentent en même temps aux deux catégories précédentes et plusieurs combinaisons sont possibles. La combustion peut commencer dans des chambres séparées et se poursuivre dans une chambre annulaire de façon à s'homogénéiser avant l'arrivée à la turbine. On peut encore effectuer la combustion dans des tubes de flammes disposés en barillet dans un espace annulaire où circule le débit secondaire. Les chambres mixtes semblent allier l'avantage d'encombrement réduit à la facilité de mise au point par élément partiel.

1.3 - Chambre de combustion du banc d'essai

C'est une chambre tubulaire modifiée [6] dont le tube est à orifices mixtes ; les expériences antérieures [6] ont prouvé que ce type de tube est favorable à une répartition de température plus homogène que la chambre dont le tube est à orifices circulaires. On dispose de plusieurs chambres dont le diamètre varie de 240 à 300 mm et la longueur de 700 à 1100 mm.

Cette chambre de combustion est composée essentiellement:

- *D'un dispositif d'injection* : Ce système est placé à l'entrée du tube de flamme; l'injection peut être directe ou à prévaporisation . Dans le système d'injection directe, le plus utilisé, le combustible est injecté dans une chambre de tourbillonnement de l'injecteur. Le jet sous l'action de la force centrifuge prend la forme d'une nappe conique qui éclate en millions de gouttelettes. L'injecteur est généralement placé au centre d'une rosace qui crée un tourbillon servant à stabiliser la flamme . Ce système, mis au point pour le carburant JP classique, est très utilisé actuellement, mais pour assurer la gamme de débit nécessaire tout en ayant une pulvérisation correcte, la pression d'injection peut atteindre 50 à 100 bars [6].

Le dispositif à prévaporisation a été utilisé au début de l'apparition des réacteurs.

Dans ce système le combustible est injecté avec une partie de l'air primaire dans des tubes soudés qui débouchent à contre – courant dans le tube de flamme. La prévaporisation réalise un prémélange partiel .

- *D'un tube de flamme* : Il est percé d'orifices dosant la répartition de l'air en air primaire (rosace et orifices périphériques) , air secondaire et air tertiaire ou de dilution .

La combustion d'un mélange d'air et d'hydrocarbures ne peut se faire qu'entre les limites de C/A finies (qui dépendent de plusieurs paramètres), la limite dite riche étant

après mélange avec l'air secondaire et de dilution est de l'ordre de 0.02 sans compter que la combustion doit pouvoir être assurée dans des conditions très variables de la pression, et de débit de combustible et d'air .

On est conduit à répartir l'air et à by-passer une grande partie de l'air (l'air secondaire et de dilution), seul l'air primaire participe à la combustion, dans la zone d'air primaire , on a localement f compris entre 0.045 et 0.08 où f est le rapport la quantité d'air et celle du carburant.

- *D'un système d'allumage* : Une bougie placée entre la sortie du mélange (air primaire – combustible) de la rosace et l'entrée du tube de flamme; elle est reliée à une bobine de transformateur haute tension et déclenche l'allumage à l'aide de deux boutons placés sur le pupitre . Le premier servant à mettre le transformateur en marche et le second déclenchant l'étincelle au bout de la bougie dans le tube de flamme. Grâce à ce système , l'allumage est aisé à tout débit d'air contrairement à la chambre de préchauffage . Pour éviter le fonctionnement inutile de la bobine, le premier bouton doit être arrêter une fois l'allumage obtenu .

2.1 - Méthodes faisant appel à l'équation de *BERNOULLI*

Le principe de la mesure des vitesses basé sur l'équation de *BERNOULLI* est donné par la figure suivante :

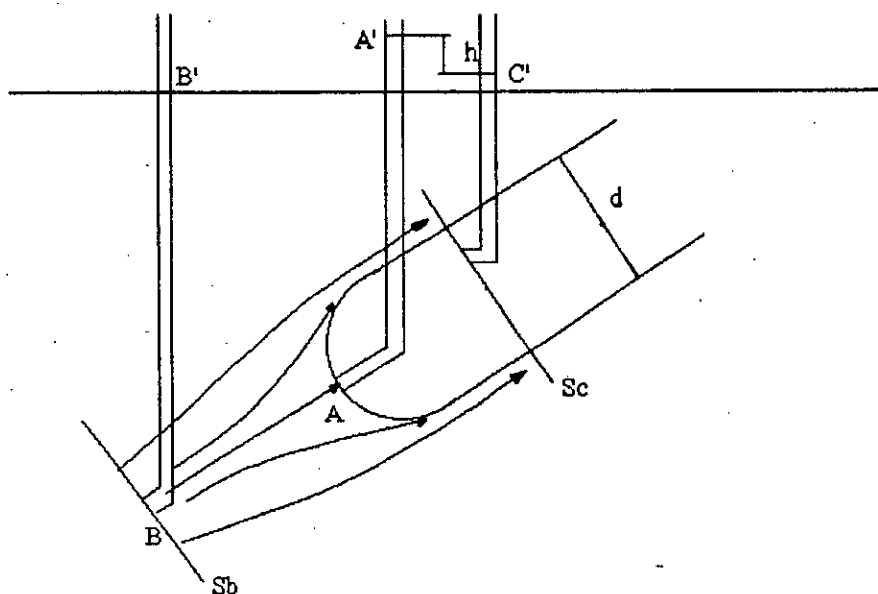


Fig (2.1) : Principe du tube de *PITOT*

L'équation de *BERNOULLI* appliquée aux points *A* et *B* donne :

$$p_A^* - p_B^* = \frac{1}{2} \rho V_B^2 \quad (V_A = 0)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p_A^* = p_{A'}^* = p_a + \rho g h_{A'} \\ p_B^* = p_{B'}^* = p_a + \rho g h_{B'} \end{array} \right. \Rightarrow \frac{1}{2} \rho V_B^2 = \rho g \Delta h \Rightarrow V_B = \sqrt{2g \Delta h} \quad (2.1)$$

entre *A* et *A'* et *B* et *B'* ($p_a = 0$)

Concrètement, si le diamètre d du tube est suffisamment petite pour ne pas créer d'augmentation de vitesse entre les sections droites S_B et S_C , on mesurera Δh par les prises de pression A et C .

2. 1. 1 - Tube de PITOT

Le tube de *PITOT* est de dénomination initiale tube de " *PRANDLT* ". La distance entre les prises de pression totales et statiques est de 6 à 8 d selon les normes.

Lorsqu'on n'est pas sûr de la direction de la vitesse, on utilise des appareils avec prises de pression latérales A et A' , l'orientation est correcte lorsque les pressions en A et A' sont égales. Ces prises peuvent se trouver sur un tube de *PITOT* ou sur une sonde spéciale clinométrique.

Les tubes de *PITOT* normalisés donnent une erreur sur la pression différentielle inférieure à 1.5 % lorsque l'angle entre l'axe de la sonde et la direction de la vitesse est inférieur à 14 °.

2. 1. 2 - Anémomètre à 5 trous

Le tube de *PITOT* ne peut être utilisé que s'il est dans l'alignement du vecteur vitesse. Or, il existe des cas où ceci est impossible, ou bien si l'on ne connaît pas la direction de la vitesse.

L'anémomètre à 5 trous, dont le principe a été décrit par *JC LEE* et *JE ASH* [10], permet de mesurer la valeur et la direction d'une vitesse inconnue a priori. Il est principalement constitué d'une sphère ou d'une demi - sphère sur laquelle sont percés cinq prises de pression, une dans l'axe de la sonde et les quatre autres symétriquement.

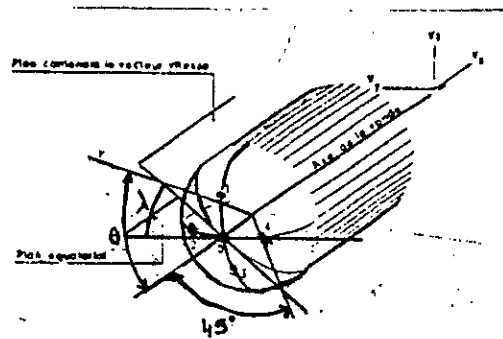


Fig (2 . 2) : Anémomètre à 5 trous

Remarquons que, contrairement au tube de *PITOT*, l'ensemble des prises de pression est placé sur une demi - sphère qui devra donc être usinée avec une très grande précision.

L'équation de *BERNOULLI* permet d'écrire pour chaque prise de pression :

$$p_n - p_\infty = \frac{1}{2} * \rho * V_\infty^2 * \left(1 - \frac{V_n^2}{V_\infty^2}\right) \quad (2 . 2)$$

avec n : numéro de la prise de pression .

On trouve bien ici l'équation de *PRANDTL* où $V_0 = 0$

Si on appelle γ_n l'angle que font entre eux le vecteur vitesse et le rayon de la sphère passant par la prise de pression, on aura :

$$V_n = V \left(\frac{3}{2} * \sin(\gamma_n)\right) \quad (2 . 3)$$

La valeur de la pression à chaque prise est donc :

$$p_i = p_\infty + \frac{V_\infty^2}{2} \left[1 - \frac{9}{4} \sin^2(\gamma_i) \right] \quad (2 . 4)$$

On appelle α l'angle au centre des prises de pression avec l'axe :

La direction de la vitesse est repérée par les angles θ et λ . On mesure généralement les différences de pression suivantes :

$$A = p_0 - p_1 ; B = p_0 - p_2 ; C = p_0 - p_3 ; D = p_0 - p_4 .$$

Le calcul de la vitesse à l'aide de ces quatre mesures peut donner la vitesse en coordonnées polaires (V, θ, λ) ou cartésiennes (V_x, V_y, V_z) .

Pour les sondes constituées d'une demi - sphère, la mesure rigoureuse n'est valable que pour des inclinaisons de θ inférieures à 65° mais une précision encore satisfaisante est obtenue pour des angles de 85° [10].

Deux méthodes de dépouillement sont possibles :

- par ordinateur ou calculateur de bureau
- à la main, à l'aide d'abaques (pas de pression statique), elle est cependant utile au moment des mesures pour détecter s'il existe une erreur dans les valeurs des pressions différentielles

Nous développerons ci - dessous la première méthode :

L'angle λ se calcule pour $\alpha = 45^\circ$, par :

$$\lambda = \arctan\left(\frac{A-C}{B-D}\right) \quad (2.5)$$

L'expérience montre que dans la plupart des cas, la courbe d'étalonnage s'écarte peu de la courbe théorique.

L'angle λ_1 donné par la calcul est compris entre -90° et 90° , pour le définir entre -180° et 180° , on adopte la règle suivante :

- si $A - C < 0$ et $B - D < 0 \Rightarrow \lambda = \lambda_1$
- si $A - C \geq 0$ et $B - D < 0 \Rightarrow \lambda = \lambda_1$
- si $A - C \geq 0$ et $B - D > 0 \Rightarrow \lambda = \lambda_1 - 180^\circ$
- si $A - C < 0$ et $B - D > 0 \Rightarrow \lambda = \lambda_1 + 180^\circ$

L'angle θ se calcule comme suit :

Soit :

$$K = \sqrt{1 - \frac{A+B+C+D}{\sqrt{2(A^2+C^2)} + \sqrt{2(B^2+D^2)}}} \quad (2.6)$$

on montre que :

$$K = \sqrt{\frac{2 \sin^2(\theta)}{1 + \cos^2(\theta)}} \quad (2.7)$$

L'expérience confirme que la valeur de K est bien indépendante de λ et V jusqu'à des valeurs de $\theta < 85^\circ$; par contre, la valeur expérimentale de K diffère de la valeur théorique.

La valeur de la vitesse se détermine par :

$$\sqrt{2(A^2+B^2)} + \sqrt{2(C^2+D^2)} = \frac{9}{8} \rho \frac{V^2}{2} [2 + 2 \cos^2(\theta)] \quad (2.8)$$

d'où :

$$V^2 = \frac{0.07189}{P_0} L * (273+t) * [\sqrt{2(A^2+B^2)} + \sqrt{2(C^2+D^2)}] \quad (2.9)$$

t : [°C]

p : [mm de colonne d'eau]

$$L = \frac{1}{1 + \cos^2(\theta)} \quad (2.10)$$

L est obtenu par étalonnage et s'écarte assez de la valeur théorique (la théorie est établie pour une sphère).

La pression statique est égale à la différence entre la pression atmosphérique et celle que mesure une prise de pression perpendiculaire à la vitesse . On la calcule par :

$$P_0 - P_\infty = \rho \frac{V^2}{2} \left[1 - \frac{9}{4} \sin^2(\gamma) \right] \quad (2.11)$$

soit :

$$P = M - \frac{13.91 \rho V^2}{273+t} \quad (2.12)$$

M est donné dans une courbe d'étalonnage en fonction de θ .

2.1.3 - Avantages et inconvénients des méthodes faisant appel à l'équation de BERNOULLI

- Facilité d'usage ;
- Prix intéressant ;
- Encombre réduit ;
- Modification de l'écoulement ;
- Précision médiocre ;

2.2 - Vélocimétrie laser à effet Doppler

Cette méthode, non intrusive, permet de mesurer de façon optique des vitesses dans un espace très petit et sans utilisation de sondes locales qui sont nécessairement d'une certaine dimension, ce qui permet des mesures très fines ; elle reste réservée aux mesures de laboratoires.

La méthode repose sur le fait qu'une particule solide de vitesse V , éclairée par un rayonnement de fréquence f_0 diffuse un rayonnement de fréquence $f_0 + f_d$, f_d étant proportionnelle à V (principe de l'effet Doppler). Elle porte le nom de vélocimétrie et non anémométrie pour bien marquer qu'on ne mesure que des vitesses de particules et non de fluide proprement dit.

Cette technique s'est développée grâce à l'existence des lasers dont la qualité principale dans cette application est de fournir une énergie lumineuse très intense dans une direction bien déterminée; les plus utilisés sont les lasers à Argon (raie verte : $\lambda = 514.15 \mu m$, ou raie bleu : $\lambda = 488 \mu m$).

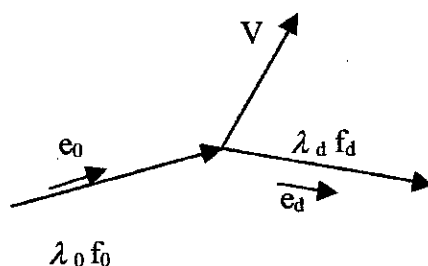


Fig (2.3) : Diagramme de la composition de la vélocimétrie laser

Soit une particule se déplaçant à une vitesse V (éclairée par un faisceau f_0), cette particule diffuse une lumière de fréquence f_d , dans toutes les directions, qui est fonction de l'angle d'observation ; un observateur fixe reçoit dans la direction e_d cette lumière diffusée avec une fréquence f_d telle que :

$$f_d = f_0 + V \left(\frac{e_d}{\lambda_d} + \frac{e_0}{\lambda_0} \right) \quad (2.13)$$

la vitesse de la particule étant petite devant celle de la lumière, on aura :

$$f_d = f_0 + \frac{V}{\lambda_0} (e_0 + e_d) \quad (2.14)$$

La fréquence Doppler est :

$$f_D = f_d - f_0 \Rightarrow f_D = \frac{V}{\lambda_0} (e_d + e_0) \quad (2.15)$$

En pratique f_D varie de quelques *Khz* à quelques dizaines de *Mhz*, alors que f_0 est de l'ordre de 10^{14} *hz* [11].

Il est impossible de mesurer directement f_d avec les détecteurs existants, si bien que des méthodes appropriées doivent être utilisées pour mesurer des différences ou des temps accessibles, deux méthodes sont utilisées :

2.2.1 - La méthode du faisceau de référence

On mesure la lumière diffusée par les particules à laquelle on mélange un faisceau de référence provenant directement de la source ; on a alors affaire à un mélange de deux fréquences f_0 et f_d qui donne naissance à une fréquence de battement f_B telle que :

$$f_B = 2 \frac{u}{\lambda} \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (2.16)$$

u : composante de la vitesse V dans le plan de référence et perpendiculaire à la bissectrice de l'angle formé par les deux faisceaux .

Cette méthode, qui a été la première mise au point par *YEH* et *CUMMINS* [11], est délicate d'emploi, notamment à cause du réglage de l'intensité du faisceau de référence par rapport à la lumière diffusée.

Elle est dans pratiquement tous les cas remplacée par la méthode des franges.

2.2.2 - La méthode des franges (Doppler différentielle)

Deux faisceaux laser se croisent, délimitant un volume de croisement v . A l'intérieur de celui-ci apparaissent des franges d'interférence selon la figure :

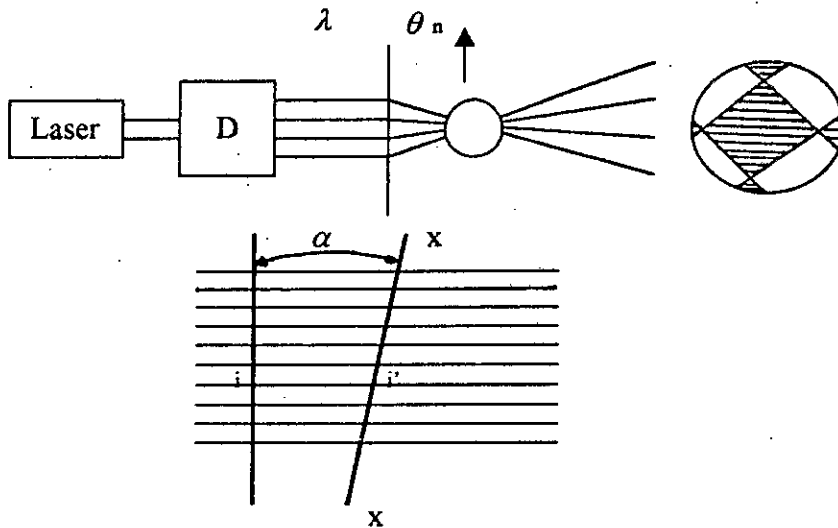


Fig (2.4) : Zone d'interférence des faisceaux

L'interfrange est :

$$i = \frac{\lambda_0}{2 \sin\left(\frac{\theta_n}{2}\right)} \quad (2.17)$$

θ_n : angle des deux faisceaux dans le milieu d'indice n .

n : peu différent de un dans l'air.

si θ est faible, on a :

$$i = \frac{\lambda_0}{\theta} \quad (2.18)$$

Une particule de vitesse V traversant ces franges parcourt un espace i' pendant un temps T selon la figure précédente ; et émet un rayonnement de fréquence f_0 chaque fois qu'elle traverse une frange brillante. Ce passage d'une frange brillante à une autre engendre une fréquence f_D :

$$f_D = \frac{1}{T} = \frac{V \cos \alpha}{i} = \frac{u}{i} \quad (2.19)$$

soit :

$$u = f_D \cdot i \quad (2.20)$$

avec u : composante de la vitesse V normale au plan des franges.

Le signal de fréquence recueilli est donc la composition de deux fréquences f_0 et f_D , très éloignées l'une de l'autre, dont seule f_D est mesurée par le récepteur.

En pratique, on obtient une série de vitesses u , plus ou moins superposées résultant de " bouffées " de fréquence f_D due chacune au passage d'une particule dans le volume v , selon la figure.

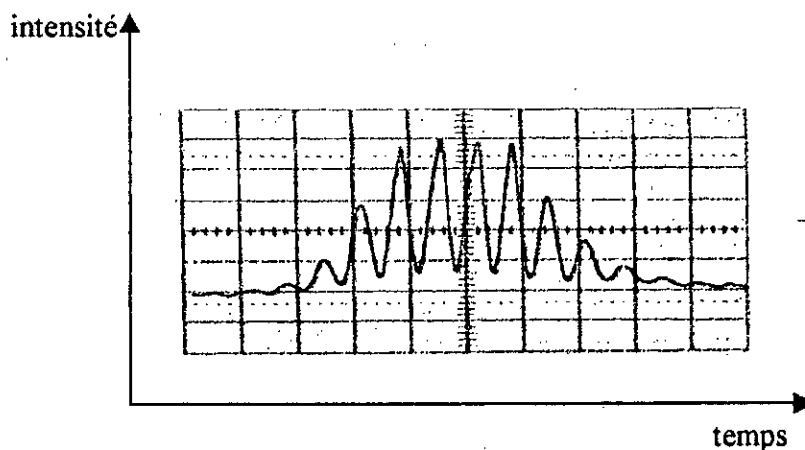


Fig (2.5) : Exemple de signal enregistré

Un traitement de signal est nécessaire pour en déduire une valeur exploitable.

Les méthodes utilisées sont l'analyse spectrale, les mesures de fréquences, la corrélation de photons, le comptage (mesure de la période du signal).

Les résultats obtenus permettent de calculer la vitesse moyenne et la plupart des caractéristiques aérodynamiques de l'écoulement dont la turbulence.

La lumière diffusée est généralement mesurée en rétrodiffusion, c'est-à-dire du côté de la source d'émission. Ce procédé, bien que donnant un signal d'intensité plus faible qu'une mesure en diffusion avant, est souvent préféré car il ne nécessite un appareillage que d'un côté de l'écoulement.

Des optiques à focales variables permettent désormais une exploration d'une veine d'écoulement sans avoir à déplacer tout le bloc optique.

Le sens de la vitesse peut être mesuré en faisant défiler les franges dans l'espace par un léger décalage de fréquence d'un des deux faisceaux.

Il est possible de mesurer la vitesse suivant deux composantes perpendiculaires en utilisant trois faisceaux donnant des franges d'interférence dans deux plans perpendiculaires.

2. 2. 3 - L'ensemencement en particules

Pour que les particules soient représentatives de la vitesse du fluide, il est nécessaire qu'elles soient légères et de petite dimension (inférieur au μm), on emploie des fumées (tabac ; encens) ; le dioctyle-phtalate ou pour les flammes des particules d'alumine de zircon ou d'oxyde de titane. Il est parfois possible d'utiliser les poussières naturelles contenues dans l'air à condition de filtrer, si nécessaire, les particules les plus grosses.

2. 2. 4 - Avantages du vélocimètre à effet Doppler -

- *pas de contact avec le milieu à mesurer*

Les lasers anémomètres mesurent les vitesses des fluides en focalisant le faisceau laser sans perturber le flux et l'écoulement. Les seules conditions nécessaires sont un milieu transparent avec une bonne concentration des particules traçantes et un accès optique à travers des fenêtres ou bien un détecteur submergé.

- *pas de calibrage - pas de dérive*

Le laser a une unique réponse intrinsèque à la vitesse des fluides "linéarité absolue"

La mesure est basée sur la stabilité et la linéarité des ondes électromagnétiques et est peut affectée par la température et la pression.

- *réponse directionnelle bien définie*

La quantité mesurée par le laser anémomètre est la projection du vecteur vitesse selon une direction bien définie par le système optique.

- *haute résolution spatiale et temporelle*

Les optiques sont capables de définir de très petits volumes de mesure et donc fournir une résolution spatiale et permettre une mesure de la vitesse. La mesure sur de petits volumes en combinaison avec un processeur de signal électronique rapide permet une haute bande de fréquences.

- *mesure locale et instantanée du vecteur vitesse*

2. 2. 5 - Limites du vélocimètre à effet Doppler

- *la vitesse du fluide n'est pas exactement celle mesurée car on mesure celle des particules et non celle du fluide ;*
- *dans des écoulements à très hautes températures, des particules réfractaires doivent être utilisées (oxyde de zirconium ZrO_2) ;*
- *exploration des couches limites difficile (En raison du problème de lumière parasite).*

2. 3 - Anémomètres à fil chaud

Comme son nom l'indique, ce type d'appareillage comporte essentiellement un fil métallique chauffé par un courant électrique ; placé dans un écoulement, le fil se refroidit plus ou moins suivant la vitesse du fluide et il en résulte une variation de sa résistance.

L'évaluation des vitesses au moyen de ces anémomètres est basée sur la mesure soit de la résistance électrique du fil, soit de l'intensité du courant nécessaire pour le maintenir à une température fixe ; la technique varie selon le type de sondes.

2.3.1 - Lois d'échange thermique

2.3.1.1 - Forme générale

L'étude en similitude des équations des écoulements monophasiques et continus donne un nombre de Nusselt Nu :

$$Nu = (Re, Pr, Gr, Ec, l/d, \frac{\theta - \theta_a}{\theta_a}, \psi, \varphi)$$

l/d : rapport entre la longueur et le diamètre du fil .

$\frac{\theta - \theta_a}{\theta_a}$: coefficient de surchauffe .

ψ, φ : angles définissant la direction de la vitesse par rapport au fil et aux broches .

En ce qui concerne Gr et Ec , dans la plupart des cas pratiques, la loi d'échange correspond à une loi d'échange de convection forcée en fluide incompressible, pour laquelle aucun de ces deux paramètres n'intervient, les lois d'échange dépendent de la forme du capteur, c'est pourquoi elles sont, le plus souvent, déterminées par un étalonnage préalable dans les conditions d'utilisation .

Pour les éléments cylindriques dont l'axe est perpendiculaire à la vitesse, on peut utiliser la relation valable en convection forcée incompressible [2] :

$$Nu = 0.42 Pr^{0.2} + 0.57 Pr^{0.33} Re^{0.5} \quad (2.21)$$

Dans la plupart des cas, le rayonnement est faible par rapport aux échanges par convection.

2.3.1.2 - Forme simplifiée pour un fluide donné

Comme Nu est proportionnel au flux de chaleur, donc la puissance électrique $R^* i^2$ et que d'autre part Re est proportionnel à la vitesse du fluide, pour un fluide et un fil donné, on aura[2] :

$$\frac{R^* i^2}{R - R_0} = A + B \sqrt{U_{eff}} \quad \text{Loi de KING} \quad (2.22)$$

R : résistance du fil chaud

R_a : résistance du fil à la température ambiante

i : intensité du courant qui passe dans le fil

U_{eff} : vitesse effective de refroidissement du fil

A, B : constantes liées aux caractéristiques physiques du fil et du fluide

Dans le cas où le fil est en platine, $\frac{R - R_a}{R_a}$ est quasi égale à $\frac{\theta - \theta_a}{\theta_a}$, ce rapport est donc aussi appelé coefficient de surchauffe, même lorsque l'égalité n'est pas rigoureuse.

La forme de la loi de KING montre qu'on peut lier la vitesse U_{eff} soit à une mesure de résistance lorsque le courant passant le fil est maintenu constant, soit à une mesure de courant en maintenant la résistance du fil constante.

2.3.1.3 - Nature des grandeurs mesurées

En première approximation, U_{eff} est la composante de la vitesse du fluide normale au fil U_n .

On s'est cependant aperçue que la composante de la vitesse parallèle au fil, ainsi que le blocage due aux broches et au corps de la sonde devaient être pris en compte pour des mesures précises. On peut écrire :

$$U_{eff}^2 = U_N^2 + p^2 U_T^2 + q^2 U_B^2 \quad (2.23)$$

Avec : $Q^2 = U_N^2 + U_T^2 + U_B^2$

$$U_n^2 = U_N^2 + U_B^2$$

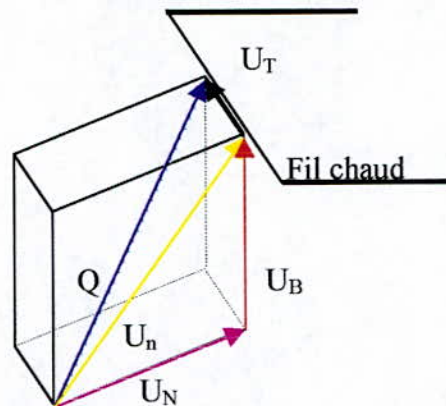


Fig (2 . 6) : Décomposition du vecteur vitesse

p et q sont des paramètres qui tiennent compte, d'une part, du refroidissement longitudinal du fil et d'autre part, de l'effet des broches et du blocage de l'écoulement par la sonde.

A condition que les angles d'incidence ne soient pas trop grands (20 à 30°), ces coefficients peuvent être considérés comme constants, p est compris entre 0 et 0.2 suivant la valeur de ld et que q est voisin de 1. Ainsi dans le cas le plus simple où le fil est normal à la vitesse :

$$U_{\text{eff}} = Q = U_n \quad (2 . 24)$$

2 . 3 . 2 - Différents montages de mesure

2 . 3 . 2 . 1 - Anémomètre à intensité de courant constante

Le courant est maintenu constant par une résistance élevée montée en série avec la résistance du fil. Un circuit spécifique est nécessaire pour la correction de l'inertie thermique.

2 . 3 . 2 . 1 . 1 - Inertie thermique

Elle est due au fait que, malgré la petite taille des fils, un changement de vitesse se traduit par un changement de résistance avec un certain retard, à cause de la couche limite autour du fil et de la conduction dans le fil . Si les fluctuations de vitesse sont petites, un seul paramètre M suffit à rendre compte du phénomène avec une bonne approximation. Si E est la tension aux bornes du fil, cette tension s'exprime, en fonction de la réponse idéale E^* qu'aurait le fil sans inertie, par :

$$E = \frac{E^*}{1 + j \cdot \omega \cdot M} \quad (2.25)$$

ω : pulsation des fluctuations de vitesse .

La constante de temps M dépend de la nature de l'élément sensible et des conditions d'essai

2.3.2.2 - Anémomètre à température constante

Pour ce montage, un circuit d'asservissement permet de maintenir la résistance, donc la température du fil, constante. On place pour cela l'élément sensible dans un pont de *WHEASTONE* qui est maintenu en équilibre par un circuit de contre réaction. C'est l'intensité du courant nécessaire pour l'équilibre de ce pont qui constitue le signal pour la mesure.

L'avantage principal du montage à température constante est que les effets dus à l'inertie thermique sont considérablement diminués si l'on compare celui-ci avec celui à intensité de courant constante (de l'ordre de 100 fois), c'est donc le système qui est proposé aujourd'hui par la plupart des constructeurs. Un signal carré est utilisé pour adapter la réponse du circuit d'asservissement au capteur. Les courbes de réponse du système n'étant pas linéaires, un circuit de linéarisation peut être intégré à l'appareil.

2.3.3 - Etalonnage

La méthode générale de dépouillement que nous décrivons est celle proposée par *WALLASE* et ses collaborateurs [2]. Elle suppose que les signaux issus des anémomètres soient numérisés et stockés pour leur traitement en différé. Nous avons vu que U_{eff} est liée à U_N , U_T et U_B composantes de la vitesse du fluide Q dans un repère lié au fil et à ses supports. Si l'on se place dans un repère lié à l'écoulement où les composantes sont U , V et W , la transposition de la loi d'échange dans ce nouveau repère entraîne que la réponse du fil peut être écrite sous la forme d'une fonction $P(E)$ de la tension E en sortie du pont de l'anémomètre :

$$P(E) = U^2 - K_1 V^2 - K_2 W^2 - K_3 UV - K_4 UW - K_5 VW \quad (2.26)$$

Avec :

$$P(E) = A_0 + A_1 E + A_2 E^2 + A_3 E^3 + A_4 E^4 \quad (2.27)$$

On admet qu'une fonction du 4^{ème} degré est suffisante pour décrire la fonction $P(E)$. Les coefficients K_i et A_i sont obtenus en soumettant le fil à un écoulement uniforme où la vitesse Q peut varier

$$\begin{cases} U = Q \cos \alpha \cos \beta \\ V = Q \sin \alpha \cos \beta \\ W = Q \sin \beta \end{cases} \quad (2.28)$$

α et β : angles d'incidence et d'inclinaison du fil

Les trois composantes de la vitesse U , V et W peuvent donc être calculées à chaque instant et toutes les caractéristiques de la turbulence au point de mesure peuvent être déduites.

2.3.4 - Association de plusieurs fils

Nous avons vu que les fils chauds étaient sensibles à la fois à la vitesse et à la température ; cette double sensibilité nécessite l'adjonction dans les écoulement à température variable d'un fil sensible uniquement à la température. Une autre technique a été proposée par *CALVET* et *LIOUSSE* [10] qui consiste à alimenter l'élément sensible par des impulsions de courant ; un traitement de signal adapté permet alors de déterminer la vitesse, on peut utiliser une sonde à deux fils, le 2^{ème} sensible uniquement à la température, étant utilisé pour repérer le sillage du premier par rotation autour de celui-ci.

2.3.5 - Technique du traitement de signal

Les techniques de traitement de signal à partir de signaux de fils chauds sont très variées, puisqu'elles visent d'une part à caractériser la turbulence et d'autre part à apporter des informations pour faciliter l'élaboration et la validation des codes de calcul. On calculera donc des valeurs moyennes, des écarts types, des spectres ...

2. 3. 6 - Choix pratique d'un anémomètre

Pour la sonde :

- suivant la nature du fluide : en général films chauds pour les liquides et fils chauds pour les gaz ;
- si l'écoulement est isotherme, il faut au moins un élément sensible par composante à mesurer ;
- si la température est variable, il faut un élément sensible de plus ;
- la réponse en fréquence est liée à la taille des éléments sensibles (compromis entre la réponse en fréquence et la solidité).

Pour l'anémomètre :

- en général, on utilise ceux à température constante ;
- il faut un anémomètre par élément sensible et il est nécessaire de vérifier si les anémomètres peuvent s'adapter à la résistance et à la surchauffe choisies pour chaque capteur

Comme nous l'avons déjà rappeler, l'utilisation d'un anémomètre à fil ou à film chaud est délicate ; les problèmes auxquels on se heurte sont les suivant :

- étalonnage fréquent dû au vieillissement de la sonde ;
- variation de température ;
- direction suivant laquelle on effectue la mesure dans un écoulement fortement tridimensionnel
- la présence d'une sonde perturbe sensiblement l'écoulement, on se heurte à des difficultés technologiques lorsque l'on veut décrire avec la sonde le volume de mesure.

2.4 - Choix de la méthode de mesure de la vitesse

D'après tous ce qui a été dit à propos des méthodes de mesure de la vitesse, des exigences de notre banc d'essai et après mûre réflexions, notre choix s'est porté sur la vélocimétrie laser qui offre le meilleur rapport précision, encombrement et facilité d'usage même si le prix de revient le désavantage.

Chapitre 3

Méthodes de mesures de la température

3 . 1 - les thermocouples

3 . 1 . 1 - Le phénomène de thermoélectricité

3 . 1 . 2 - Les circuits thermoélectriques

3 . 1 . 2 . 1 - Jonction de référence ou soudure froide

3 . 1 . 2 . 2 - Câbles de compensation

3 . 1 . 2 . 3 - Fils de jonction

3 . 1 . 3 - Choix d'un thermocouple

3 . 1 . 4 - Isolation des thermocouples

3 . 1 . 5 - Protection des thermocouples

3 . 1 . 6 - Les thermocouples pour les très hautes températures

3 . 2 - Pyromètres monochromatiques

3 . 2 . 1 - Rappel des lois fondamentales concernant
le rayonnement des corps

3 . 2 . 2 - Principe de la lunette à disparition de filament

3 . 2 . 2 . 1 - Précision de la mesure – correction

3 . 2 . 2 . 1 . 1 - Corps non noirs

3 . 2 . 2 . 1 . 2 - Précision de la mesure

3 . 2 . 3 - Réalisations industrielles

3 . 2 . 3 . 1 - Lunette à courant variable

3 . 2 . 3 . 2 - Lunette à courant constant

3 . 2 . 4 - Précautions d'emploi

3 . 2 . 5 - Etalonnage et utilisation des pyromètres
à radiation monochromatique

3 . 2 . 5 . 1 - Pyromètres étalon

3 . 2 . 5 . 2 - Pyromètres usuels

3 . 2 . 6 - Performances et utilisations

3 . 3 - Choix de la méthode de mesure de la température

3.1 - Les thermocouples

3.1.1 - Le phénomène thermoélectrique

Soient deux fils A et B, homogènes, de nature différente soudés à leur extrémités en S et S', t et t' étant les températures des soudures. Plaçons le conducteur A parallèlement à une aiguille aimantée NS en équilibre sous le champ magnétique terrestre. Pour cette expérience fondamentale SEEBECK [5] utilisait une lame de Bismuth et une lame d'antimoine. Prenons plus simplement un fil de cuivre associé à un fil de Constantin. On constate le phénomène suivant :

- Si les soudures sont portées à des températures différentes $t' \neq t$ l'aiguille aimantée tend à se mettre en croix avec le conducteur A ; elle est donc soumise à un champ magnétique supplémentaire créé par un courant d'intensité 'i' qui circule dans le circuit AS'BSA ;
- Si les soudures S et S' ont des températures égales, l'aiguille aimantée conserve sa position

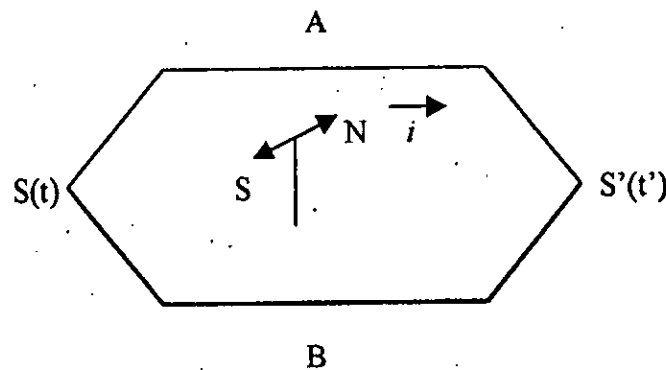


Fig (3.1) : Expérience fondamentale de SEEBECK

Un courant 'i' circulant dans le circuit quand S et S' sont à des températures différentes ; il existe entre les deux soudures une différence de potentiel e qui dépend des températures t et t' ;

- Si on recommence les expériences précédentes avec deux fils identiques (A par exemple) on ne décèle aucun courant dans le circuit .

- Si on chauffe A ou B en un point quelconque assez éloigné des soudures pour ne pas en modifier les températures, la déviation reste constante.

Ces constatations peuvent se traduire par l'énoncé suivant :

((Si les soudures S et S' de deux métaux différents à des températures différentes, il existe entre elles une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des fils et de la température des soudures)) .

On peut écrire que : $e = f(A, B, t, t')$

F étant une fonction inconnue de A, B, t, t' . La valeur de e est indépendante des sections des conducteurs ainsi que des températures intermédiaires entre les deux soudures à condition toutefois que chacun des conducteurs soit homogène sur toute sa longueur .

Il est facile de mesurer cette différence de potentiel avec un galvanomètre intercalé entre les deux soudures comme le montre la figure :

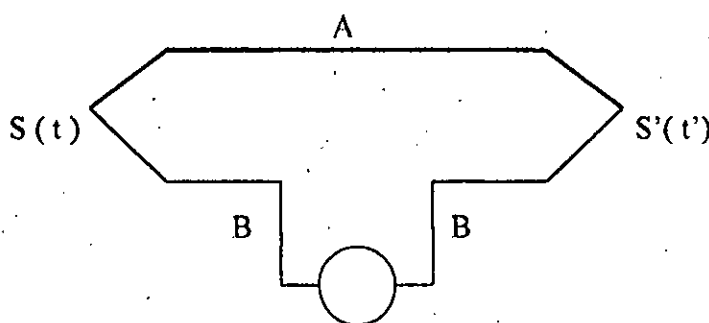
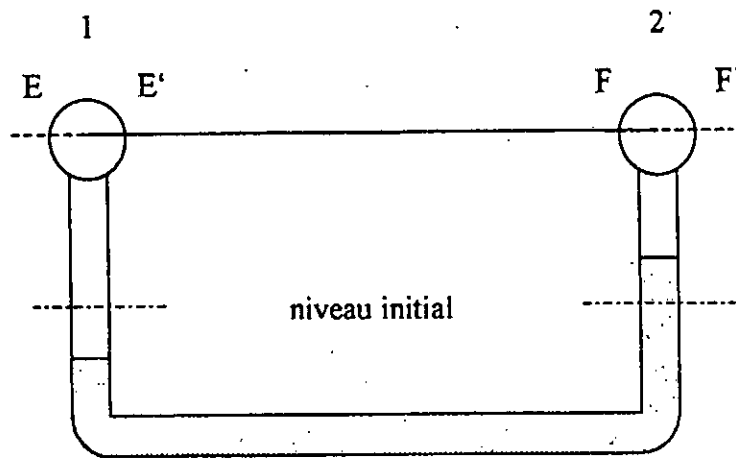


Fig (3 . 2) : mesure de la Fem

Si R est la résistance totale du circuit et 'i' l'intensité du courant qui le traverse, on a : $e = R \cdot i$. Quand le courant apparaissant à la soudure froide circule de A vers B, on appelle l'ensemble thermocouple AB, ce qui revient à nommer en premier l'élément positif du couple.

Cet effet thermoélectrique qui est réversible, en 1834, PELTIER [7] montra que si l'on fait passer un courant électrique dans un thermocouple, une des deux soudures absorbe de la chaleur tandis que l'autre en émet. On peut mettre cette propriété en évidence avec un dispositif simple représenté ci-dessous :

Fig (3 . 3) : mise en évidence de l'effet *PELTIER*

Deux ballonnets entourant les soudures sont reliés par un tube en verre contenant de l'eau .

Au repos , les deux niveaux sont situés dans le même plan horizontal. Le passage d'un courant électrique ' i ' provoque une variation des niveaux dans le tube en U. La chaleur Q_1 dégagée en 1 est donc supérieure à Q_2 dégagée en 2. Or dans chaque ballonnet, l'effet Joule dans les proportions de conducteur EE' , FF' se manifeste par un dégagement de chaleur Q , le même pour les deux ballonnets. Etant donnée la symétrie du système, on peut exprimer Q_1 et Q_2 comme suit :

$$\begin{cases} Q_1 = Q + Q' \\ Q_2 = Q - Q' \end{cases} \quad (3 . 1)$$

Avec $Q' = \frac{Q_1 - Q_2}{2}$

Si l'on inverse le sens du courant, c'est Q_2 qui sera supérieure à Q_1 . Il est logique de considérer que la quantité de chaleur Q' qui dépend du sens du courant est liée à l'hétérogénéité du conducteur au niveau de la soudure. Ces expériences, jointes à l'étude théorique des thermocouples par la thermodynamique conduisent à admettre que chaque soudure est le siège d'une force électromotrice qui est fonction de sa température .

Si on place S' dans de la glace fondante, on admet par définition que l'on mesure la force électromotrice E_i développée par la soudure S :

$E_t = f(A, B, t, 0)$ et visversa : $E_t = f(A, B, 0, t)$ et l'on peut dire que la force électromotrice E développée quand les deux soudures sont à des températures différentes résulte de l'opposition des deux forces électromotrices E_t et E_t' . D'où la relation fondamentale :

$$E = E_t - E_t' \quad (3.2)$$

3.1.2 - Les circuits thermoélectriques

3.1.2.1 - Jonction de référence ou soudure froide

Si l'on maintient la jonction $S'(t')$, appelée jonction de référence ou soudure froide, à une température constante, $t' = 0$ par exemple, on pourra connaître la température de l'autre jonction, appelée jonction de mesure ou soudure chaude, en mesurant la différence de potentiel qui existe entre les deux soudures ; des tables numériques fournissent pour un thermocouple donné la relation entre la force électromotrice développée dans ces conditions et la température de la soudure chaude.

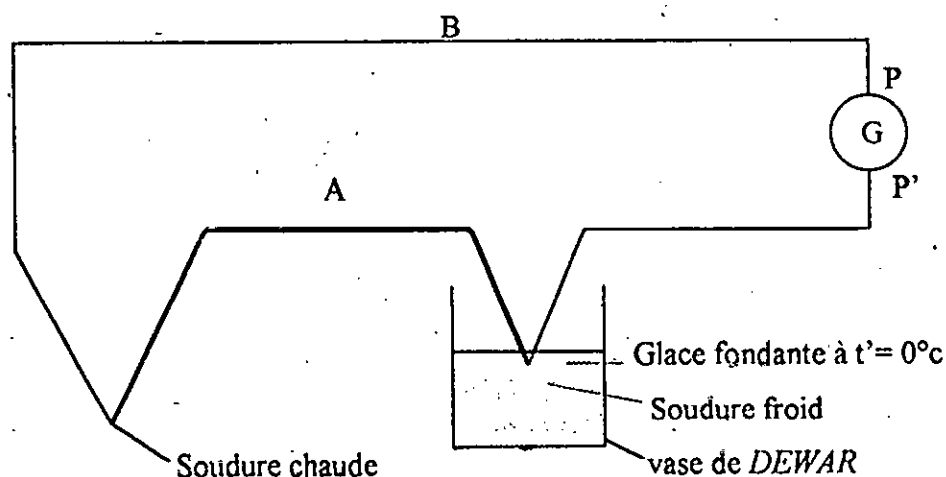


Fig (3.4) : Circuit thermoélectrique pour une mesure précise de la température

La force électromotrice mesurée par le galvanomètre ne dépend pas de l'endroit où il est inséré tant que ses deux bornes de raccordement P et P' sont isothermes

Industriellement, on met souvent à profit cette propriété en faisant considérer l'ouverture PP' du circuit avec la soudure froide. Tout se passe comme si le galvanomètre

était la soudure froide car une série de soudures isothermes se comporte comme une soudure directe des métaux extrêmes.

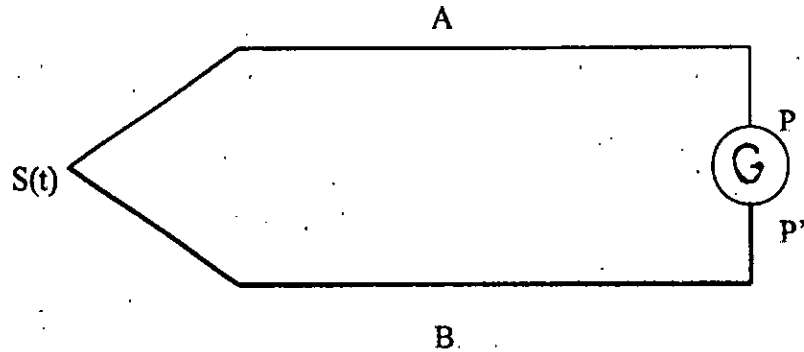


Fig (3 . 5) : Circuit thermoélectrique direct (les bornes $P P'$ constituent la soudure froide)

3 . 1 . 2 . 2 - Câble de compensation

Plus généralement, la liaison entre le thermocouple et l'appareil de mesure est effectuée avec un câble de compensation bifilaire.

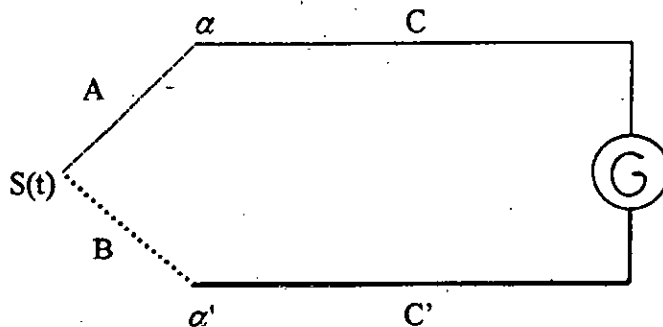


Fig (3 . 6) : Circuit thermoélectrique avec câbles de compensation

Les conducteurs C et C' doivent avoir les mêmes propriétés thermoélectriques que les fils du thermocouple qu'ils remplacent dans une zone de température peu élevée, de 100°C au maximum à la sortie de l'enceinte où l'on veut mesurer la température, à la température ambiante où est placé l'appareil de lecture. Ces conducteurs peuvent être de même nature que ceux du couple ou de nature différente. Les deux principaux avantages présentés par la substitution sont les suivants :

- Le câble de compensation est souvent moins onéreux que les fils du couple qui sont l'objet d'une sélection sévère afin d'assurer l'exactitude et la fiabilité du thermocouple sur une vaste échelle de températures .
- Le câble de compensation est livré sous diverses présentations qui permettent de l'adapter aux conditions de service .

Pour que la compensation se fasse correctement, il faut que les températures de connexion α et α' entre les conducteurs du câble et les fils du thermocouple soient égales . En effet, les câbles de compensation sont choisis de manière que pour une températures t' , inférieure à une température limite, fixée par le fabricant, généralement de l'ordre de 100°C , le couple formé par les deux câbles de compensation C et C' développe en P et P' la même force électromotrice que le couple A et B .

3 . 1 . 2 . 3 - Fils de jonction

Lorsque la distance entre le couple et l'appareil de mesure est grande, on est amené à remplacer le câble de compensation par du câble à deux conducteurs en cuivre sur une partie de la ligne .

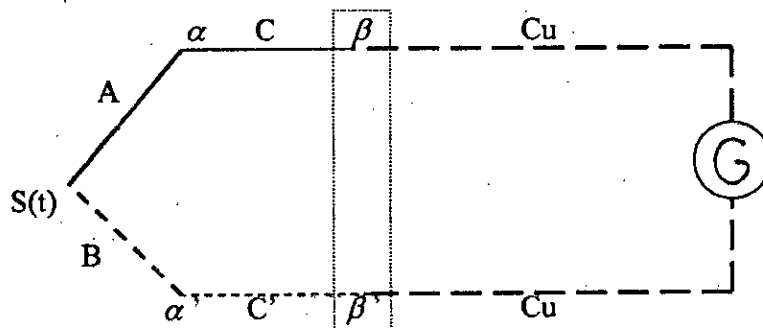


Fig (3 . 7) : Circuit thermoélectrique avec câbles de compensation et fils de jonction

3 . 1 . 3 - Choix d'un thermocouple

C'est la valeur de la température à mesurer qui intervient en premier lieu, parmi les couples pouvant être utilisés on choisit celui qui a la force électromotrice la plus grande pour obtenir une meilleure précision . Parfois quand le thermocouple est directement en contact

avec le milieu contrôlé, c'est la tenue des éléments à la corrosion qui impose le type à employer.

3.1.4 - Isolation des thermocouples

En dehors de la jonction de mesure, les fils du couple doivent être isolés électriquement l'un par rapport à l'autre. Généralement, on utilise des isolateurs en matériaux réfractaires dont les formes et les dimensions se prêtent à de nombreuses combinaisons. Leur diamètre est très variable : isolation unifilaire de 1mm de diamètre et des bifilaires à partir de 2,5mm. Suivant la température maximum qu'ils doivent supporter, ils sont fabriqués en stéarite, porcelaine silice ...

3.1.5 - Protection des thermocouples

Soit pour protéger le couple des chocs ou des atmosphères corrosives, soit pour assurer l'étanchéité de l'enceinte où s'effectue la mesure, on place le couple dans des gaines appelées cannes pyrométriques. Celles-ci doivent réunir les propriétés suivantes :

- bonne tenue mécanique à la température de service ;
- résistance aux chocs mécaniques et thermiques ;
- grande conductibilité thermique ;
- faible conductibilité électrique surtout pour celles utilisées dans les fours à chauffage électrique ;
- étanchéité par rapport au milieu ambiant ;
- bonne tenue à la corrosion ;

Pour définir une canne complètement, on doit préciser :

- sa longueur, son diamètre et sa forme : droite, inclinée, coudée ...
- son étanchéité vis-à-vis du milieu contrôlé : canne ouverte à son extrémité ou complètement étanche

- son mode de fixation :
 - * appui simple avec une bride glissante réglable en hauteur ;
 - * raccord fileté avec joint d'étanchéité ;
 - * soudure directe sur l'enceinte contrôlée.
- la pression extérieure à laquelle elle est soumise : celle-ci conditionne son épaisseur
- la nature et la forme de sa tête de raccordement :
 - * cannes avec borne non protégée
 - * cannes avec tête de raccordement étanche aux jonction
 - * cannes avec tête de raccordement étanche aux gaz

3.1.6 - Les thermocouples pour les très hautes températures

Différents thermocouples à base d'éléments métalliques ou céramiques permettent de mesurer des températures de l'ordre de 2000°C . Parmi ceux-ci nous citerons :

- *Le thermocouple iridium allié - iridium* : l'alliage à 50 % de rhodium est celui qui fournit la force électromotrice la plus élevée : environ 10 mV à 2000°C ; par contre l'alliage à 40 % de rhodium possède une meilleure stabilité. Pratiquement, chaque thermocouple est livré avec sa courbe d'étalonnage
- *Le thermocouple tungstène - molybdène* : sa force électromotrice est faible : 5,3 mV à 2000°C mais il est très stable, il permet d'atteindre une précision de $\pm 10^\circ\text{C}$ vers 1800°C
- *Le thermocouple tungstène - iridium* : il est utilisable jusqu'à environ 2100°C, la force électromotrice, linéaire en fonction de la température a une valeur élevée .
- *Le thermocouple tungstène - graphite* : il développe une force électromotrice d'environ 38 mV à 1650°C
- *Le thermocouple graphite - carbure de bore* : il est utilisable jusqu'à 2500°C, température à laquelle il développe une force électromotrice d'environ 700 mV.

3. 2 - Pyromètres monochromatiques

3. 2. 1 - Rappel des lois fondamentales concernant le rayonnement des corps

Tous les corps, quel que soit leur état, émettent de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques qui se manifestent à nous d'une manière différente suivant leur longueur d'onde λ . Quand le rayonnement frappe un corps absorbant pour les longueurs d'ondes qui le composent, l'énergie qu'il transporte se transforme partiellement ou totalement en chaleur. Dans les limites des températures usuelles, la plus grande partie de l'énergie rayonnée se présente sous forme de rayons infrarouges.

Pour l'étude des phénomènes concernant le rayonnement, on raisonne sur le *CORPS NOIR*, corps idéal qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit ; son pouvoir absorbant $\alpha_{\lambda T}$ défini comme étant le rapport de l'énergie absorbée à l'énergie incidente, est égale à 1 pour chaque longueur d'onde, quelle que soit sa température absolue T.

La quantité rayonnée $e_{\sigma T}$ par unité de surface du corps noir dans toutes les directions est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température absolue ; cette loi s'exprime par la relation :

$$e_{\sigma T} = \rho_0 T^4 \quad \text{loi de STEFAN - BOLTZMAN} \quad (3.3)$$

avec ρ_0 constante appelée coefficient de rayonnement du corps noir, sa valeur est [5]:

$$\rho_0 = 4.89 * 10^{-8} \text{ Kcal / m}^2 \text{ h (}^\circ\text{K)}^4$$

3. 2. 2 - Principe de la lunette à disparition de filament

On compare l'énergie émise par le corps visé à la température absolue T, dans une bande de longueur d'onde très étroite ($\lambda, \lambda+d$) ; à l'énergie émise par une source étalon dans la même bande. Pratiquement, dans le pyromètre à disparition de filament mis au point par *HOLBORN* et *KURLBAUM* [5], on compare la brillance du corps visé à celle d'un filament de tungstène chauffé par effet Joule pour la longueur d'onde $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ correspondant aux radiations traversant un filtre rouge monochromatique.

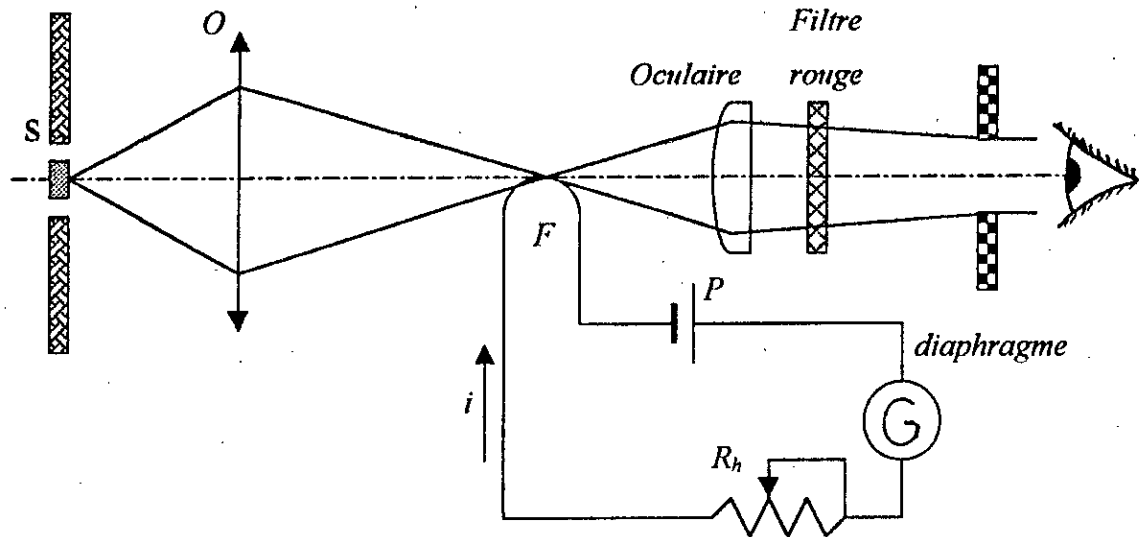


Fig (3 . 8) : Principe de la lunette à disparition de filament

La lunette représentée sur la figure comprend :

- un objectif O donnant de la source S une image S' dans le plan du filament F d'une lampe étalon ;
- un filtre rouge R délimitant la bande étroite de longueur d'onde dans laquelle on effectue la comparaison des brillances de l'image de la source et celle du filament ;
- une oculaire qui donne de la source et du filament une image redressée et agrandie, l'œil placée derrière l'oculaire, voit à la fois l'image de la source et celle du filament ;

Quand la température du filament est inférieure à celle de la source, il se détache en sombre sur le fond brillant de la source . En faisant croître le courant I traversant le filament, sa température augmente et il arrive un moment où son image disparaît dans celle de la source .

Ce phénomène se produit quand la brillance de la source et celle du filament sont égales pour la longueur d'onde utilisée, si on admet que la source et le filament sont assimilables au corps noir, leur brillance, pour une longueur d'onde déterminée, ne dépend

que de la température. Connaissant par un étalonnage préalable la relation existant entre l'intensité traversant le filament et sa température, on en déduit immédiatement celle du corps visé puisque leurs températures sont égales.

3. 2. 2. 1 - Précision de la mesure – correction

3. 2. 2. 1. 1 - Corps non noirs

La température mesurée n'est exacte que lorsque le corps visé est assimilable à un corps noir. Pratiquement la température mesurée B est inférieure à la température absolue T car le pouvoir émissif de la source à λ_T est la plus souvent inférieur à l'unité.

L'énergie reçue de la source est de la forme $K e \lambda_T$ et la lunette à disparition de filament étalonnée pour les conditions du corps noir, indique une température B définie par :

$$K e \lambda_B = K e \lambda_T = K a \lambda_T e_{0\lambda_T} \quad (3.4)$$

Calculons T d'après la loi de *WIEN* ; on peut écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{0\lambda_B} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda B}} \\ e_{0\lambda_T} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \end{array} \right. \Rightarrow a \lambda_T = \frac{e_{0\lambda_B}}{e_{0\lambda_T}} = c \frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{B} - \frac{1}{T} \right) \quad (3.5)$$

En prenant les logarithmes des deux membres on obtient :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{B} + \frac{\lambda}{C_2} \log a \lambda_T \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{B} + \frac{1}{9623} \log_{10} a \lambda_T \quad (3.7)$$

3.2.2.1.2 - Précision de la mesure

Différentions l'expression reliant la température mesurée à la température absolue :

$$\frac{dT}{T^2} = \frac{dB}{B^2} - \frac{\lambda}{C_2} \frac{da_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} \quad (3.8)$$

Le maximum de l'erreur que l'on peut commettre est :

$$\Delta T \approx \Delta B + \frac{\lambda B^2}{C_2} \frac{\Delta a_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} \quad (3.9)$$

On a remplacé T^2 par B^2 qui est peu différent pour calculer cette expression.

Erreur absolue ΔB

Elle se compose en deux termes : le premier provient de l'égalisation des deux brillances qu'un opérateur entraîné juge avec une précision supérieur à 1 % ; le second correspond à l'incertitude sur la reproductibilité de la brillance du filament. Estimons chacun d'eux :

En différentiant l'expression : $e_{0\lambda T} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda B}}$

On obtient :

$$dB = \frac{\lambda T^2}{C_2} \frac{de_{0\lambda B}}{e_{0\lambda B}} \quad (3-10)$$

A 2000 K, avec une longueur d'onde de travail $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$, on a :

$$\Delta B_1 = \frac{0.65 * 2000^2}{14387} * 0.01 \approx 1.9 \text{ K} \quad \text{soit une précision relative meilleure que } 0.1 \%$$

Pour déterminer le second terme, il faut connaître la loi de variation de la brillance du filament en fonction de l'intensité du courant I le traversant. Pour les lampes à ruban de tungstène qui donnent les meilleurs résultats, cette loi est représentée sensiblement par la formule [7]:

$$I = I_0 \frac{B^{1.8}}{B_0} \quad (3.11)$$

ce qui nous permet de calculer :

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{1}{1.8} \frac{\Delta I}{I} \quad (3.12)$$

En maintenant I constant à un millième près, ce qui est relativement facile, l'erreur ΔB_2 est, pour une température de l'ordre de 2000 K :

$$\Delta B_2 = \frac{2000}{1.8} \frac{1}{1000} = 1.1 \text{ K}$$

L'erreur absolue totale est donc : $\Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2 = 1.9 + 1.1 = 3 \text{ K}$

Erreur due au pouvoir émissif relatif

C'est la cause d'erreur la plus importante en pratique. Bien qu'il existe des tables donnant le pouvoir émissif monochromatique des différents corps, à certaines températures, il est prudent de déterminer ceux-ci dans les conditions expérimentales réelles. On emploiera les mêmes méthodes que celles décrites pour déterminer les pouvoirs émissifs relatifs totaux.

- Quand on vise un corps noir $\alpha_{\lambda T} = 1$, l'erreur absolue de la mesure est uniquement ΔB , la précision est excellente jusqu'à 2000 K, il est facile d'avoir $\Delta B = 3 \text{ K}$, ceci conduit à une exactitude sensiblement égale à $\pm 0.15 \%$. C'est l'une des raisons ayant fait choisir le pyromètre monochromatique à disparition de filament pour définir l'échelle pratique des températures au-dessus du point de fusion de l'or (1063 °C).
- Industriellement, si on ne mesure pas directement le pouvoir émissif, on risque de l'évaluer à $\pm 15 \%$ d'après les tables et vers 2000 K la précision de mesure n'est plus que de $\pm 2 \%$. Avec une détermination directe de $\alpha_{\lambda T}$, la précision peut atteindre $\pm 0.5 \%$.

3. 2. 3 - Réalisations industrielles

La comparaison des brillances peut se faire, soit en faisant varier celle du filament, soit celle de l'image de la source avec un dispositif absorbant réglable placé entre l'objectif et le filament. Les deux solutions sont utilisées industriellement.

3. 2. 3. 1 - Lunette à courant variable

Le filament F est connecté en série avec un rhéostat de réglage R_h et la pile d'alimentation P .

L'interrupteur M étant fermé, on fait varier, avec R_h , l'intensité du courant I jusqu'à la disparition du filament dans l'image de la source. La mesure du courant I peut se faire de plusieurs façons :

- Avec un milliampèremètre placé dans le circuit ; ou un voltmètre branché aux bornes de la lampe étalon. La précision est celle de l'indicateur et l'on mesure I avec une précision ne dépassant pas $\pm 0.5 \%$ (appareil classe 0.5).
- Avec un circuit de tarage analogue à celui d'un potentiomètre. Le montage comporte une pile étalon PE et un galvanomètre de zéro G . On déplace le curseur C jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro. La chute de tension entre les bornes d et c est alors égale à la force électromotrice de la pile étalon. Le curseur se déplace devant une échelle graduée directement en degrés.

L'inconvénient des lunettes à courant variable réside dans le vieillissement du filament qui est très chauffé car il doit atteindre la température de la source visée. Le vieillissement se traduit par une variation de son pouvoir émissif et la courbe d'étalonnage de l'appareil change

Pour les températures supérieures à $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, on interpose, en avant du filament, un verre neutre absorbant ayant un coefficient de transmission bien défini. Les lectures se font sur une échelle différente qui tient compte de la diminution de brillance apparente de la source.

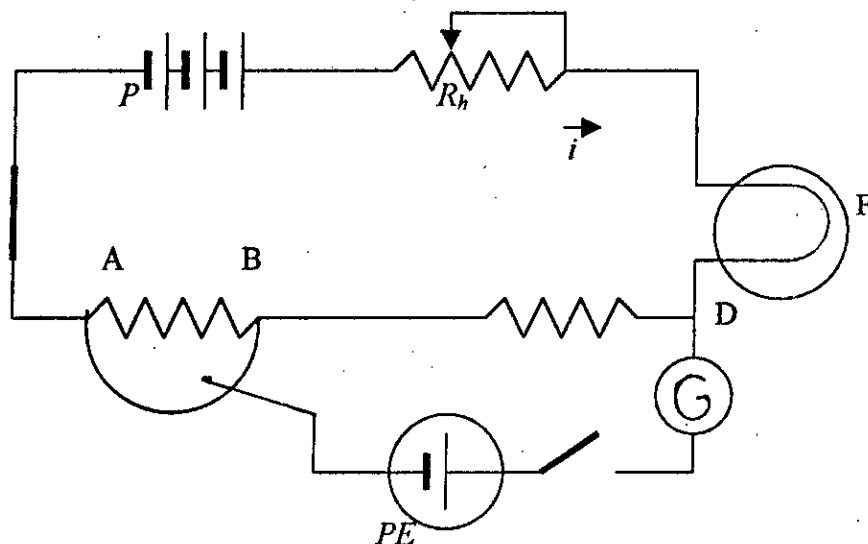


Fig (3 . 9) : Lunette à courant variable

3 . 2 . 3 . 2 - Lunette à courant constant

Le filament est toujours traversé par la même intensité de courant et on fait varier l'énergie reçue de la source par un dispositif optique absorbant placé entre l'objectif et la lampe étalon. Le filtre absorbant peut être constitué par un disque en verre fumé d'épaisseur variable ou par un coin en verre fumé que l'on déplace perpendiculairement à l'axe du faisceau afin que l'épaisseur traversée soit de plus en plus grande. L'intensité du courant est contrôlée, soit avec un milliampèremètre, soit avec un circuit de tarage comprenant une pile étalon.

Le pyromètre optique *RIBAUD* [5] comporte un circuit légèrement différent. La lampe à filament de tungstène constitue l'une des branches d'un pont de *WHEATSTONE* comportant trois autres résistances R_1 , R_2 et R_3 sans coefficient de température. La résistance du tungstène étant fonction de la température, le pont ne peut être en équilibre que pour un courant bien déterminé dans le filament, courant pour lequel la résistance de ce dernier équilibre exactement le pont. Pour réaliser cet équilibre, on agit sur la tension d'alimentation grâce au rhéostat R_h . Un galvanomètre de zéro de faible encombrement est fixé sur l'appareil.

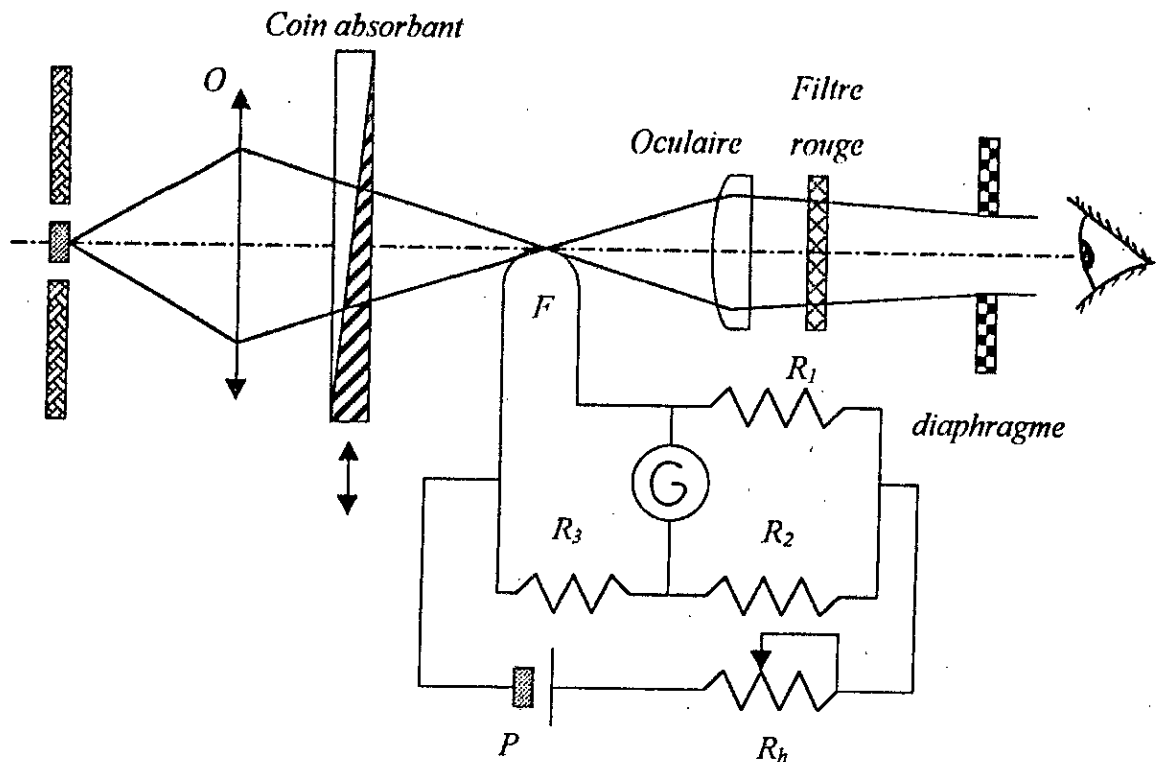


Fig (3 . 10) : Principe de la lunette à courant constant

Les pyromètres à courant constant présentent, par rapport aux pyromètres à intensité variable, un certain nombre d'avantages parmi lesquels :

- *Une excellente fidélité* : la lampe tare est traversée par un courant fixe dont la valeur est faible de sorte que le vieillissement du filament est peu important. En outre, le réglage ne faisant appel qu'à un système optique aux propriétés invariables dans le temps, l'étalonnage de l'appareil est très stable.
- *Une grande souplesse d'utilisation* : l'emploi d'un dispositif à coin absorbant permet une correction automatique de toute l'échelle par un simple décalage de l'origine de la graduation. Cette opération peut être rendue nécessaire par un certain vieillissement du filament ou une modification des surfaces optiques (ternissement, poussière, etc. ...).

Soit n la division lue sur l'échelle du coin correspondant à l'épaisseur traversée par le faisceau incident. L'absorption du coin est égale à e^{-kn} et l'énergie transmise est de la forme :

$$K e_0 \lambda \tau * e^{-kn} = K e_0 \lambda B \quad (3 . 13)$$

B étant la température du filament .

D'après la loi de *WIEN* [7] , on peut écrire :

$$e^{\frac{C_2}{\lambda T}} * e^{-kn} = e^{\frac{C_2}{\lambda B}} \quad (3.14)$$

D'où l'on déduit :

$$n = \frac{C_2}{\lambda k} \left(\frac{1}{B} - \frac{B}{T} \right) = A - \frac{A'}{T} \quad (3.15)$$

A et A' sont des constantes .

La courbe représentant $\frac{1}{T}$ en fonction de n est donc une droite. La modification des surfaces optiques, par exemple, revient à ajouter une épaisseur fictive au coin absorbant. Pour tenir compte de cette erreur, il faut diminuer n d'autant ; cette opération est rendue très facile du fait que la relation linéaire existant entre $\frac{1}{T}$ et n ; il suffit de décaler l'origine de la graduation de l'appareil d'une quantité constante déterminée par des pointés convenables, l'appareil étant mis en place .

3. 2. 4 - Précautions d'emploi

Le faisceau incident doit couvrir l'objectif en entier d'autant plus que l'objectif a une faible ouverture .

Les lunettes étant conçues pour des distances de visée variables, on doit effectuer un réglage préalable en visant, soit directement le corps à contrôler, soit un objectif placé à la même distance.

Le filtre rouge étant sorti du champ et le filament n'étant pas alimenté, on règle l'oculaire afin de voir très nettement le filament ; ensuite, on agit sur la lentille de l'objectif pour que l'image de l'objectif visé apparaisse clairement dans le champ.

Etant donné la longueur d'onde de travail ($\lambda = 0.65 \mu\text{m}$), les objectifs et les prismes peuvent être en verre et on ne risque pas de voir les mesures faussées par la présence d'anhydride carbonique ou de vapeur d'eau dont la transparence est totale pour cette longueur d'onde .

3. 2. 5 - Etalonnage et utilisation des pyromètres à radiation monochromatique

3. 2. 5. 1 - Pyromètres étalons

Ils sont étalonnés en visant un corps noir porté à une température connue. Celle-ci est maintenue constante en utilisant les points de fusion des métaux purs :

- point de fusion de l'or $T = 1063 \text{ }^\circ\text{C}$
- point de fusion du palladium $T = 1552 \text{ }^\circ\text{C}$
- point de fusion du platine $T = 1769 \text{ }^\circ\text{C}$

On peut également utiliser un seul point fixe, celui du point de solidification de l'or et utiliser la relation de *WIEN*.

Dans une première mesure, le corps noir étant à 1063°C , on détermine le courant tare nécessaire à la disparition du filament.

On pointe ensuite le pyromètre sur un corps noir à une température plus élevée T et on interpose entre le corps noir et l'appareil, un filtre absorbant qui laisse passer une fraction connue $\frac{1}{n}$ de l'énergie reçue de façon à réaliser de nouveau la disparition du filament .

La température inconnue se calcule à partir de l'équation :

$$\frac{1}{n} * e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} = e^{-\frac{C_2}{\lambda T_0}} \quad (3. 16)$$

d'où :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{\lambda}{C_2} \log(n) \quad (3. 15)$$

Il est nécessaire de connaître avec exactitude la longueur d'onde effective λ du filtre rouge utilisé, ce qui complique cette méthode d'étalonnage .

3. 2. 5. 2 - Pyromètres usuels

Ils sont étalonnés en visant une lampe à filament de tungstène semblable à celle utilisée dans le pyromètre, on relève la température du filament avec une lunette étalon et avec la lunette en cours d'étalonnage.

Un bon étalonnage bien conçu comporte un dispositif à glissières permettant de substituer rigoureusement les deux pyromètres l'un à l'autre. La lampe étalon et le diaphragme définissant l'angle solide d'émission sont fixés de manière à obtenir des conditions géométriques d'émission immuables

3. 2. 6 - Performances et utilisations

La lunette à disparition de filament est l'appareil le plus précis pour la mesure des hautes températures. En laboratoire, il est possible d'obtenir une précision de ± 0.2 °C pour des températures supérieures à 1000 °C. Industriellement, la précision est encore de ± 0.5 % avec un pyromètre de bonne qualité, si le corps visé est assimilable au corps noir ou si on détermine son pouvoir émissif dans les conditions de la mesure. Les lunettes à radiation monochromatique permettent de mesurer les température de 800 °C environ jusqu'à 3000 °C, en deux ou trois échelles.

Leur emploi est simple mais il nécessite l'appréciation d'un observateur ; en conséquent, elles ne permettent pas l'enregistrement et la régulation des températures.

3. 3 - Choix de la méthode de mesure de la température

En ce qui concerne le choix de la méthode de mesure de la température, les deux méthodes précédemment décrites semblent satisfaire les critères imposés, néanmoins nous choisirons la moins onéreuse, celle qui utilise les thermocouples à très grandes températures, en portant notre choix sur un thermocouple graphite – carbure de bore qui peut aller jusqu'à 2500 °C avec une force électromotrice d'environ 700 mV.

Chapitre 4

Structure des gaz d'échappement

- 4 . 1 - La chromatographie en phase gazeuse
 - 4 . 1 . 1 - Historique et introduction
 - 4 . 1 . 2 - Théorie de base de la chromatographie
 - 4 . 1 . 2 . 1 - Coefficient de partage
 - 4 . 1 . 2 . 2 - Rapport frontal
 - 4 . 1 . 2 . 3 - Volume de rétention
 - 4 . 1 . 2 . 4 - Isothermes de distribution
 - 4 . 1 . 2 . 3 - Exposé des théories de la chromatographie
 - 4 . 1 . 3 . 1 - Théorie des plateaux
 - 4 . 1 . 3 . 2 - Théorie cinétique
 - 4 . 1 . 3 . 3 - Applications particulières des théories
- 4 . 1 . 4 - Appareillages
 - 4 . 1 . 4 . 1 - Le gaz vecteur
 - 4 . 1 . 4 . 2 - Les débitmètres
 - 4 . 1 . 4 . 3 - La chambre d'injection
 - 4 . 1 . 4 . 4 - Régulation de la température
 - 4 . 1 . 4 . 5 - Récupération des échantillons
 - 4 . 1 . 4 . 6 - Les colonnes
- 4 . 1 . 5 - Application aux hydrocarbures
- 4 . 2 - Analyseur de gaz à adsorption de rayonnement infrarouge
 - 4 . 2 . 1 - Caractéristiques techniques
 - 4 . 2 . 2 - Récepteur extérieur
 - 4 . 2 . 3 - Exploitation
 - 4 . 2 . 4 - Mise en service de l'analyseur
 - 4 . 2 . 5 - Fonctionnement
- 4 . 3 - Méthode d'analyse des gaz
- 4 . 4 - Choix de la méthode de mesure de la concentration

4. 1 - La chromatographie en phase gazeuse

4. 1. 1 - Historique et introduction

En 1906, un botaniste russe, du nom de *TSWETT* [1], étudiait les pigments des végétaux, il voulait filtrer une solution de pigments de feuilles vertes dans l'éther de pétrole à l'aide d'un tube de verre tenu verticalement et plein de carbonate de calcium ; il remarqua qu'il se formait une série de bandes horizontales colorées en vert et jaune, correspondant aux différents constituants du mélange, qui se trouvait ainsi fractionné.

Ayant observé ce phénomène, qu'il compara à la décomposition de la lumière blanche par un prisme, il découpa la colonne de carbonate selon ces bandes colorées ; en éluant chaque tronçon par un solvant approprié, il obtint les différents pigments pratiquement purs ; En découvrant cette méthode simple et pratique, il établit les bases de la technique chromatographique .

Depuis, la chromatographie sur colonne, telle que la découvrit *TSWETT* [1], n'a fait que progresser ; brièvement, on peut dire que la substance à analyser est disposée au sommet d'une colonne, constituée par un tube de verre vertical ouvert aux deux extrémités et rempli d'un adsorbant pulvérulent (ex : carbonate de calcium) ; on ajoute ensuite un solvant, qui entraîne les constituants du mélange à des vitesses différentes selon leur nature, ce qui conduit à leur séparation .

Dans la technique de *TSWETT* [1], les produits à séparer sont *adsorbés* sur le carbonate de calcium, c'est-à-dire qu'ils s'accumulent à l'interface des grains d'adsorbant et du liquide solvant . C'est pour cela que l'on parle de chromatographie d'adsorption .

Une nouvelle technique, celle de la chromatographie de partage, vue le jour en 1941, *MARTIN* et *SYNGE* [9], étudiant la solubilité des acétyls – acides aminés dans différents solvants, mettent au point un dispositif permettant de séparer ces corps .

Ils utilisent une colonne remplie de fil de coton et de fil de laine parallèles ; le coton, conduisant de l'eau par capillarité, entraîne les acétyls – acides aminés dans un sens ; tandis que le fil de laine conduit un solvant organique dans l'autre sens . Selon leur solubilité, les acétyls – acides aminés se répartissent entre les deux solvants, ce qui permet leur séparation .

La chromatographie en phase gazeuse est une application des deux précédents principes, elle est destinée à séparer les composés gazeux, alors que les deux autres s'adressaient aux produits liquides ou dissous .

Il existe deux principes généraux de la chromatographie ; la chromatographie par adsorption utilise la différence d'adsorption des constituants d'une phase mobile sur une phase fixe qu'ils traversent, alors que la chromatographie de partage est basée sur le coefficient de partage d'un corps dans deux solvants non miscibles. Ce dernier principe est le même que celui de la technique du contre – courant. L'un des solvants est généralement l'eau qui imprègne un support inerte garnissant la colonne, et l'autre, un solvant organique qui contient les corps à séparer en solution.

Pour faciliter la compréhension de la méthode, on présente un schéma de principe d'un chromatographe en phase gazeuse classique :

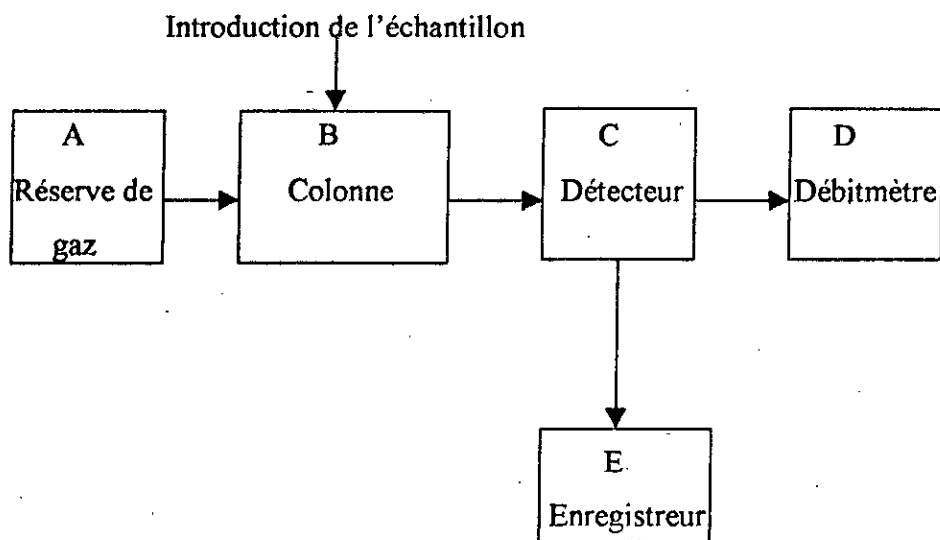


Fig (4 . 1) : Schéma de principe d'un chromatographe en phase gazeuse

Comme dans les autres types de chromatographie, la colonne constitue la partie la plus importante où se produit la séparation des constituants, elle est alimentée en gaz vecteur par la réserve de gaz ; l'introduction du mélange à séparer se fait en tête de colonne ; à la sortie de la colonne sont placés les éléments nécessaires à l'analyse : détecteur, enregistreur donnant directement le chromatogramme.

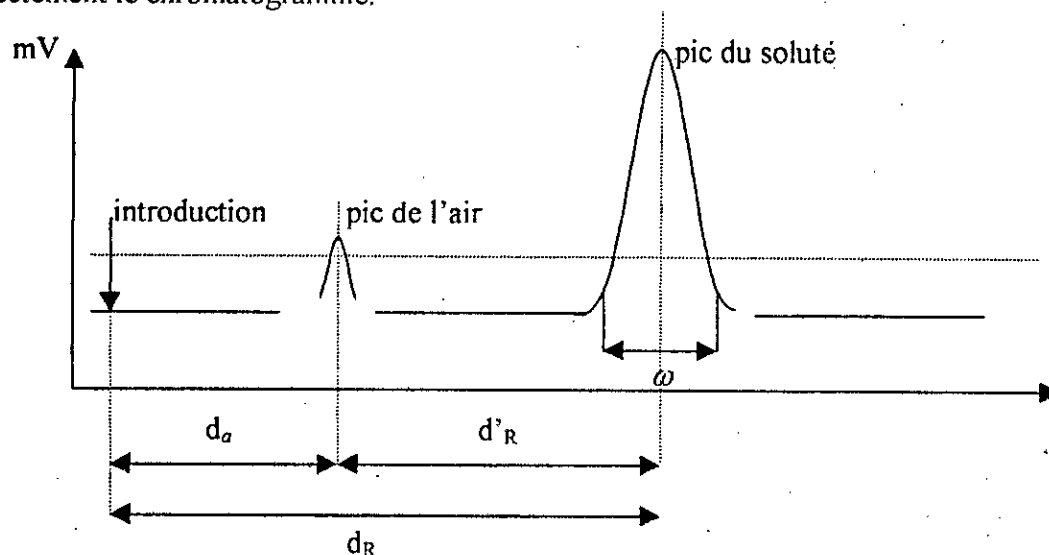


Fig (4 . 2) : Chromatogramme type

- Où : d_a distance de rétention du pic de l'air
 d_R distance de rétention du soluté
 d'_R distance de rétention corrigée du soluté
 ω largeur du pic à la base

La chromatographie en phase gazeuse a été tout d'abord un type particulier de la chromatographie d'adsorption où la phase mobile est gazeuse. Cette technique est donc applicable aux gaz et tous les corps volatiles. La phase fixe est constituée par un adsorbant solide au travers duquel cheminent les gaz à séparer, entraînés par un courant de gaz inerte, ou gaz vecteur, qui joue le rôle de solvant. Puis, l'adsorbant solide a été remplacé par un liquide peu volatil réparti sur la surface d'un support solide inerte ; c'est la chromatographie de partage gaz - liquide.

Cette méthode avait été prévue théoriquement par *MARTIN* et *SYNGE* [1] dès 1941, mais mise au point par *JONES* et *MARTIN* [1] en 1952 ; elle connaît maintenant un très grand développement et de multiples applications car elle présente beaucoup d'avantages tels que :

- *L'emploi d'échantillons minimes (quelques micro-litre de liquide ou gaz) :* on décele en effet beaucoup plus facilement des vapeurs dans un gaz permanent que des corps dissous dans un solvant.
- *L'équilibre rapide des constituants du mélange avec le matériau de remplissage :* car la diffusion dans le gaz éluant est très prompte.
- *L'efficacité des colonnes :* car la compressibilité et la faible viscosité des gaz permet de choisir des colonnes longues et étroites.
- *L'accueille individuel des constituants :* après leur séparation, on peut les recueillir individuellement pour les soumettre à des études supplémentaires par spectrographie de masse, infrarouge ou ultra - violette.

Le chromatogramme permet donc la séparation, l'identification et le dosage des constituants d'un mélange de gaz.

Cette technique est très appréciée en ce qui concerne l'analyse, mais elle n'est pas encore complètement au point, en effet, des difficultés proviennent de la compressibilité des gaz, qui entraîne dans la colonne la présence d'un gradient de vitesse, et de l'énorme influence de la température sur le volume. Il est donc difficile d'exprimer mathématiquement les résultats expérimentaux obtenus.

4. 1. 2 - Théorie de base de la chromatographie

4. 1. 2. 1 - Coefficient de partage

On appelle coefficient de partage le rapport :

$$K = \frac{C_f}{C_m} \quad (4-1)$$

où C_f : poids de vapeur par unité de volume de phase fixe

C_m : poids de vapeur par unité de volume de phase mobile

4. 1. 2. 2 – Rapport frontal

Le rapport frontal est défini par :

$$R_f = \frac{\text{mouvement du point de concentration maximum de vapeur}}{\text{mouvement simultané de la phase mobile}} \quad (4.2)$$

Le coefficient de partage peut être relié au rapport frontal ou R_f par la relation :

$$K = \frac{\alpha}{b} \left(\frac{1}{R_f} - 1 \right) \quad (4.3)$$

où α est la fraction de la surface de la section de la colonne utilisée par la phase mobile et b la fraction de surface utilisée par la phase fixe .

4. 1. 2. 3 - Volume de rétention

C'est la quantité de gaz vecteur écoulee dans la colonne entre l'entrée du soluté et sa sortie ; c'est une caractéristique physique du soluté .Un soluté introduit en tête de colonne en sort après un certain temps suivant un régime de concentration Gaussien . Ceci sera démontré dans la théorie des plateaux [1]. Les chromatogrammes obtenus sont donc du type de la figure (4.2) pour un soluté unique donné.

Ce chromatogramme étant en général enregistré directement à la sortie de l'appareil, le volume de rétention V_R est donné par la relation :

$$V_R = D_S \frac{d_R}{u} \quad (4.4)$$

u : vitesse de déroulement du papier de l'enregistreur

D_S : débit gazeux à la sortie de la colonne

$\frac{d_R}{u}$: temps de séjour du soluté dans la colonne .

Cette expression de V_R est idéale et suppose que l'introduction du soluté se fait rigoureusement à l'entrée de la colonne et sa détection à la sortie exacte de celle – ci ; et que la vitesse linéaire u du gaz vecteur est la même en tous les points de la colonne .

Ceci n'étant pas réalisé complètement, il faut toujours en pratique appliquer quelques corrections aux volume de rétention mesuré directement, en tenant compte :

- du volume mort de la colonne , qui est exprimé par le volume de réduction de l'air V_a , car l'air ne subit pas de rétention par la phase stationnaire . On définit ainsi le volume de rétention réduit V'_R :

$$V'_R = V_R - V_a = D_S \frac{d_R - d_a}{u} \quad (4.5)$$

- de la variation de vitesse du gaz vecteur , en appliquant un coefficient de perte de charge j ; on obtient alors le volume de rétention limite V_R^0 et le volume de rétention réduit limite $V_R^{0'}$:

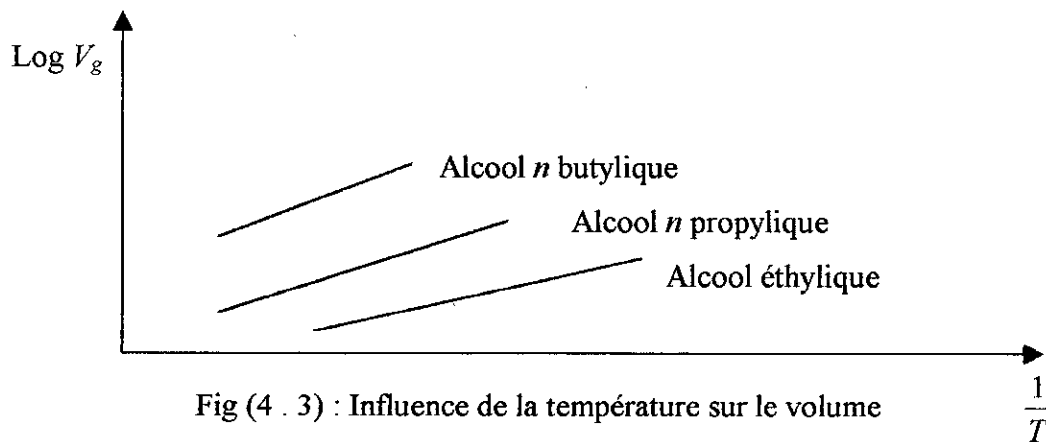
$$V_R^0 = j \cdot V_R = j \cdot D_S \frac{d_R}{u} \quad (4.6)$$

$$V_R^{0'} = j \cdot V'_R = j \cdot D_S \frac{d_R - d_a}{u} \quad (4.7)$$

Ce dernier est appelé aussi volume de rétention absolu ou encore volume de rétention net V_N par les anglo-saxons .

En rapportant V_N à l'unité de masse de phase fixe et à 0°C, on a le volume de rétention spécifique V_g . Un certain nombre d'autres facteurs agissent aussi sur le volume de rétention, en particulier la température de la colonne. Toute augmentation de température diminue le volume de rétention d'un soluté déterminé, ceci peut entraîner une mauvaise séparation due à un rapprochement des pics, mais ces derniers sont plus étroits et mieux dessinés.

On constate expérimentalement (fig 4 . 3) que les courbes représentant les logarithmes du volume de rétention spécifique d'un soluté donné en fonction de l'inverse de la température absolue sont des droites .



HOARE et PURNELL [9] ont montré mathématiquement que les volumes de rétention relatifs de deux solutés sont moins affectés par les variations de température que chacun des volumes de rétention propres des solutés .

Il faut bien insister sur l'influence de la température de la colonne ; en effet, la chromatographie à température programmée est une technique qui est basée sur la variation du volume de rétention avec la température .

4 . 1 . 2 . 4 - Isothermes de distribution

La distribution du soluté entre la phase mobile et la phase fixe est une conséquence des interactions soluté – phase mobile et soluté – phase fixe. Elle se traduit par le coefficient de partage K , qui varie quand la concentration totale du soluté varie, puisqu'il dépend des concentrations de ce dernier dans les phases mobile et stationnaire. Ces variations se traduisent par trois types de courbes ou isothermes de distribution, auxquelles correspondent trois formes de pics caractéristiques des solutés .

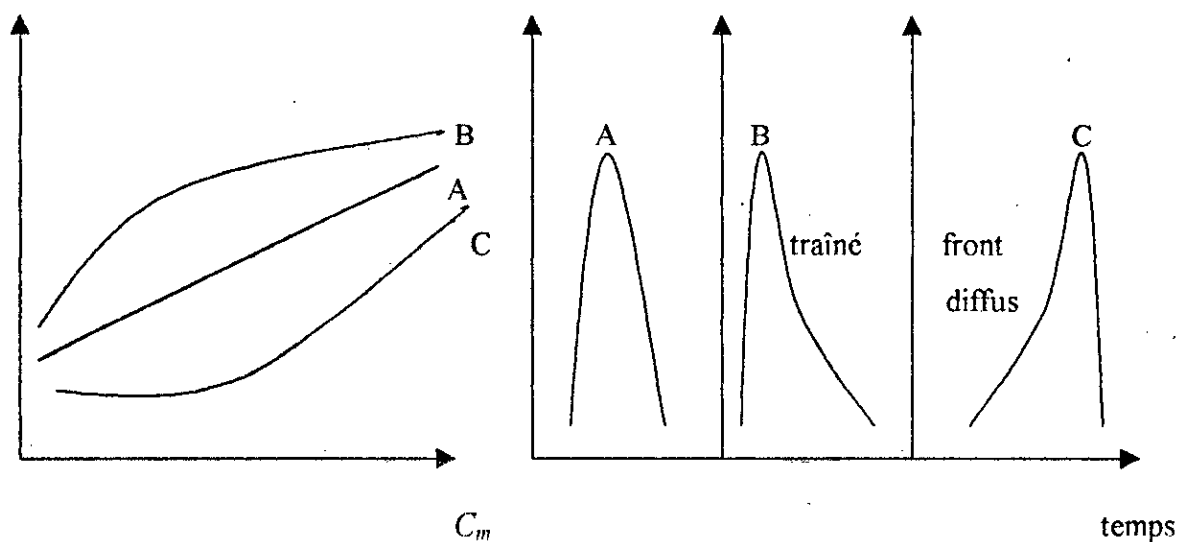


Fig (4 . 4) : Isothermes de distribution et formes des pics correspondants

Le cas A est celui d'une chromatographie idéale où l'isotherme est une droite qui traduit exactement le coefficient de partage et qui donne :

$$C_f = K C_m \quad (4 . 8)$$

Le pic correspondant est parfaitement symétrique; l'équilibre est thermodynamiquement réversible et il n'y a pas de diffusions longitudinales, donc pas de traînées .

Le cas B représente l'isotherme dite de *FREUNDLICH* [1] où :

$$C_f = K \cdot C_m^n \quad (4.9)$$

$n = \text{cte}$.

Dans ce cas, la concentration dans la phase fixe est grande et celle dans la phase mobile est faible , il en résulte une traînée pour le pic. Pratiquement, ceci peut être due à la granulométrie trop lâche de l'adsorbant ou du support ou encore, dans le cas d'une chromatographie gaz – liquide, d'une adsorption par le support (qui devrait être totalement inactif).

Le cas C représente l'isotherme dite de *LANGMUIR* [1]:

$$C_f = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot C_m}{1 + K_1 \cdot C_m} \quad (4-10)$$

K_1 et K_2 sont des constantes .

Dans ce cas, le pic correspondant présente un front diffus, qui peut provenir d'une température de colonne trop basse ou d'une mauvaise vaporisation de l'échantillon .

4.1.3 - Exposé des théories de la chromatographie

Il existe deux théories principales : la théorie des plateaux et la théorie cinétique. Tous les raisonnements sont élaborés dans le cas de la chromatographie gaz – liquide. Cependant, bien que les théories concernant la chromatographie gaz –solide soient légèrement différentes, les formules obtenues sont valables dans les deux cas .

4.1.3.1 - Théorie des plateaux

Reprenant la théorie de la chromatographie de partage en phase liquide de *MARTIN* et *SYNGE* [1], *JAMES* et *MARTIN* [1] l'appliquèrent à la chromatographie en phase gazeuse.

Puis *VAN DEEMTER*, *ZUIDERWEG* et *KLINKENBERG* [9], *KLINKENBERG* et *SJENITZER* [9], ainsi que *GLUECKAUF* [9] s'intéressèrent à l'aspect mathématique du problème.

Dans cette théorie, copiée sur celle de la distillation fractionnée, on définit la hauteur équivalente pour un plateau théorique (H.E.P.T), c'est l'épaisseur de la colonne telle que la phase mobile qui en sort est en équilibre avec la phase fixe qui y est contenue, on la désigne par h .

C'est une suite de récipients renfermant chacun un volume V_m de phase gazeuse et un volume V_f de phase liquide en équilibre.

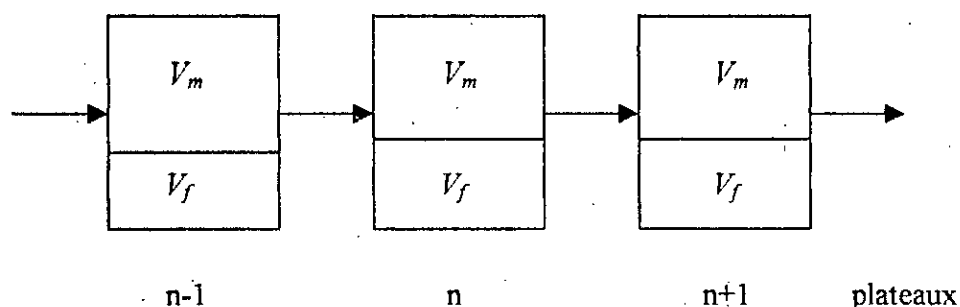


Fig (4 . 5) : Représentation d'une colonne de chromatographie de partage gaz-liquide

Le calcul met en jeu les probabilités de répartition entre les phases des plateaux successifs. Sans entrer dans le détail, donnons le résultat de ce calcul : quand un soluté placé sur le plateau initial de la colonne a traversé les n plateaux théoriques, il fournit à la sortie une bande dont la longueur relative (rapport de la bande de dispersion au volume de rétention du plateau) est égale à $2\sqrt{n}$.

Cette bande est une courbe de *GAUSS* classique, si les hypothèses suivantes sont respectées :

- linéarité de l'isotherme de distribution

- indépendance du coefficient de partage d'un soluté vis-à-vis des autres solutés présents
- vitesse de diffusion dans une phase négligeable par rapport à la vitesse de mise en équilibre

Si on appelle δ l'écart - type , on a :

$$\delta = \frac{d_R}{n} \Rightarrow n = \left(\frac{d_R}{\delta} \right)^2 \quad (4.11)$$

Or 2δ est la longueur du pic entre les points d'inflexion et la ligne de base (application des propriétés des triangles et des courbes de GAUSS).

Si on pose : $\omega = 4\delta$, on a :

$$n = 16 \left(\frac{d_R}{4\delta} \right)^2 \Rightarrow n = 16 \left(\frac{d_R}{\omega} \right)^2 \quad (4.12)$$

Il donc est facile de calculer le nombre de plateaux théoriques d'une colonne avec simplement un double - décimètre ou un papier enregistreur millimétré, en mesurant sur le chromatogramme les deux distances $\frac{d_R}{2}$ et ω .

On peut aussi utiliser l'expression : $n = 5.54 \frac{d_R}{\tau}$, τ étant la largeur du pic à mi - hauteur , qu'on peut souvent mesurer plus précisément que ω .

Dans le cas des colonnes capillaires, il est plus exacte d'utiliser d'après PURNELL et GIDDINGS [1] la formule :

$$n' = 16 \left(\frac{d'_R}{\omega} \right)^2 \quad (4.13)$$

en mesurant les distances d'_R à partir du pic de l'air et en introduisant des facteurs correctifs en fonction du volume de la colonne .

Expérimentalement, les valeurs trouvées pour n sont de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers et même de centaines de milliers dans le cas des colonnes capillaires. Il suffit de comparer ces chiffres avec le nombre de plateaux théoriques d'une colonne à distiller (une centaine pour une colonne à bande tournante) pour reconnaître que le grand mérite de la théorie des plateaux a été d'expliquer l'extraordinaire efficacité des colonnes de chromatographie en phase gazeuse .

Des résultats mathématiques de cette théorie [9], on peut tirer les conclusions pratiques suivante :

- $\omega = 4 \frac{d_R}{\sqrt{n}}$
- la masse de l'échantillon ne figure pas dans l'expression de n et la largeur ω du pic dépend de n , cette largeur ne dépend pas de la quantité de soluté introduite (en respectant la condition d'équilibre thermodynamique imposée, c'est-à-dire en ne surchargeant pas la colonne)
- suivant la définition même du volume de rétention, on a : $d_R = \frac{V_R \cdot u}{D_S}$ donc $\omega = \frac{4V_R \cdot u}{D_S \cdot \sqrt{n}}$

La longueur du pic est donc :

- proportionnelle au volume de rétention, ce qui signifie que les pics s'élargissent du début à la fin du chromatogramme (les solutés ayant les plus grands volumes de rétention sortent les derniers de la colonne) ;
 - Inversement proportionnelle à la racine carrée du nombre de plateaux théoriques, ce qui signifie que c'est la colonne qui a le plus grand nombre de plateaux théoriques qui présente les pics les plus étroits.
- si on augmente le nombre de plateaux en allongeant la colonne, on augmente le volume de rétention, donc la largeur des pics. Il est intéressant d'augmenter la longueur des colonnes pour obtenir une meilleure séparation, mais dans une certaine limite. Ceci est calculé dans des conditions idéales, et pratiquement, la nombre de plateaux obtenu en appliquant la formule $n = 16 \left(\frac{d_R}{\omega} \right)^2$ n'est qu'approximatif, il faut d'ailleurs bien noter que ce nombre est différent suivant qu'il est calculé par rapport à l'un ou à l'autre des constituants du mélange introduit.

4. 1. 3. 2 - théorie cinétique

La théorie des plateaux représente d'une façon très simplifiée les phénomènes véritables se produisant pendant le passage d'un soluté dans une colonne. Les auteurs qui se

sont intéressés à la théorie des plateaux [9] en plus de *BOYD, MYERS* et *ADAMSON* [1], *LAPIDUS* et *AMUNDSON* [1] ont approfondi l'étude, en introduisant les notions suivantes :

- diffusion à travers un film liquide qui se traduit par un coefficient de transfert ;
- dimension des grains ;
- diffusion entre les grains ;
- diffusion à travers le film de phase fixe qui se traduit par un coefficient de transfert.

Si on apporte quelques simplifications , on obtient encore une distribution Gaussienne, et la hauteur du plateau théorique est alors exprimée en fonction des paramètres précités .

L'H.E.T.P est alors donnée par l'équation de *VAN DEEMTER* :

$$h = A + \frac{B}{u_m} + C \cdot u_m \quad (4.14)$$

u_m : vitesse linéaire du gaz vecteur

A , B et C sont des constantes

A dépend du remplissage de la colonne

B dépend de la diffusion moléculaire en phase mobile

C dépend du coefficient de partage, de la diffusion moléculaire en phase fixe, et de l'épaisseur moyenne du film en phase fixe

Cette équation est celle d'une hyperbole ; h est minimum pour $u_m = \sqrt{B \cdot C}$ et il vaut $A + 2\sqrt{B \cdot C}$

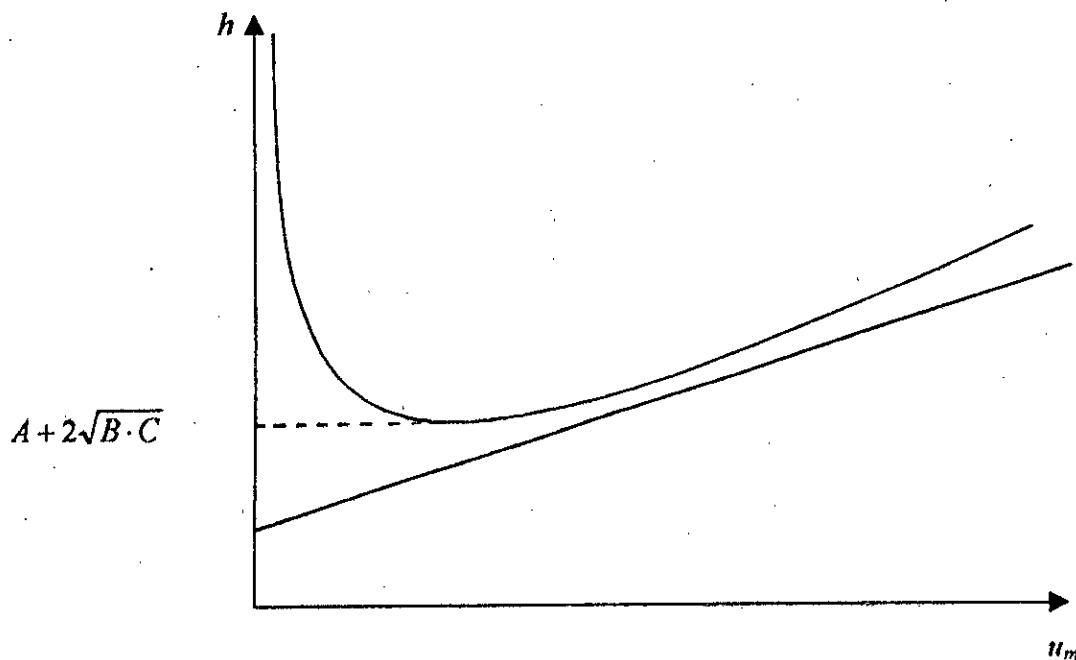


Fig (4 . 6) : Représentation graphique de l'équation de *VAN DEEMTER*

Cette équation, bien que rendant imparfaitement les phénomènes réels, a de nombreuses applications dans le domaine pratique. Sachant que pour augmenter l'efficacité d'une colonne, il faut augmenter le nombre de ses plateaux théoriques, donc, dans le cas d'une colonne de longueur donnée, diminuer h ; il faut choisir u_m au voisinage du minimum de la courbe. En fait, les courbes expérimentales présentent une asymptote très inclinée sur l'axe des abscisses et il en découle une plage optimum assez large pour u_m .

En dehors de la variable u_m , on peut encore jouer sur les constantes A , B et C pour augmenter l'efficacité d'une colonne tel que:

- diminuer la constante A le plus possible pour diminuer h , par l'utilisation d'une granulation fine et régulière ; A représente la diffusion turbulente, liée au garnissage de la colonne ;
- Il est difficile d'agir sur la constante, on peut utiliser un gaz vecteur lourd comme l'argon, celui-ci est défavorable à la constante C , on peut aussi augmenter ensemble les pressions d'entrée et de sortie de la colonne en gardant le rapport proche de 1, alors la

vitesse u_m s'accroît pendant que le coefficient de diffusion moléculaire diminue, B représente la diffusion moléculaire ;

- il faut constituer un film de phase fixe suffisamment fin autour des grains du support, mais, une trop grande diminution de l'épaisseur de ce film entraîne des irrégularités de revêtement défavorable à A . C représente la résistance au transfert de masse.

La quantité optimum de liquide stationnaire apparaît être généralement 15 à 30 % du poids du support.

On peut aussi, comme *DE WET* et *PRETORIUS* [1], écrire l'équation de *VAN DEEMTER* en fonction du pourcentage de phase liquide et déplacer ainsi l'hyperbole, son minimum se trouvant vers 30 %.

Il faut signaler l'influence de la température sur les termes de l'équation de *VAN DEEMTER* ; *DE WET* et *PRETORIUS* [1], après avoir étudié l'action de la température en particulier sur le coefficient de diffusion et le coefficient de partage, donnent une nouvelle expression à l'H.E.T.P :

$$h = A + B' \cdot T + \frac{C'}{T} \quad (4.15)$$

C'est encore l'équation d'une hyperbole ; on voit que, de même qu'il existe une vitesse du gaz vecteur optimum, il existe une température optimum pour obtenir h_{min} , donc pour l'efficacité maximum de la colonne .

Les restrictions faites pour les résultats de la théorie des plateaux sont valables également pour ces expressions de l'H.E.P.T . En effet, du fait de la compressibilité des gaz, u_m n'est pas constante tout au long de la colonne. Des corrections ont été proposées par *GIDDINGS*, *LITTLEWOOD* [1] et *JONES* [1]. En ce qui concerne les colonnes capillaires, *GALAY*, *SCOTT*, *KHAN* [1] ont donné des équations assez compliquées pour l'expression de h

Une introduction du gaz qui n'est pas instantanée entraîne un élargissement des bandes, le volume du détecteur, le diamètre des colonnes ont également leur importance .

La nature du liquide stationnaire, en particulier sa polarité vis-à-vis des solutés, est très importante pour l'efficacité de la séparation .

4. 1. 3. 3 - Application particulière des théories

– *Chromatographie gaz – solide :*

On a déjà dit que les résultats des théories précédentes, se rapportant à la chromatographie gaz – liquide, sont valables aussi pour la chromatographie gaz – solide. Cependant, les pics des isothermes d'adsorption présentent toujours des traînées. Pour contourner cet inconvénient, il faut introduire de très faibles quantités de soluté ou ajouter une très faible quantité de liquide stationnaire pour masquer une partie des sites actifs de l'adsorbant, c'est alors une chromatographie gaz – solide modifiée.

– *Chromatographie très rapide :*

Bien que la chromatographie gazeuse soit une méthode très rapide, certains contrôles en cours de fabrication demandant à être fait dans les plus bref délais ; pour cela, il faut avoir une vitesse linéaire des gaz vecteurs très grande, avec une colonne à faible pertes de charges, mais comportant un nombre suffisant de plateaux, comme il peut être pratique d'utiliser des colonnes capillaires courtes avec peu de pertes de charges, mais un assez grand pouvoir séparateur. Dans ces conditions, on peut obtenir le résultat de l'analyse en moins de 30 secondes .

– *Chromatographie continue :*

Pour allier au procédé de la chromatographie en phase gazeuse les avantages d'une technique comme la spectrographie de masse, *PICHLER* et *SCHULTZ* [1] ont imaginé un système de mouvement de la phase fixe à contre – courant du gaz vecteur. Si la vitesse de cette phase est $-u$, chacun des n solutés aura une vitesse de la forme $u_m - u$. On pourra choisir u de façon que les constituants se déplacent dans des conditions différentes, réalisant ainsi leur séparation .

– *Chromatographie circulaire :*

Dans ce procédé, dû à *PORTER* et *JOHNSON* [1], la colonne est refermée sur elle-même, les solutés décrivent ainsi plusieurs cycles successifs, ce qui accroît la longueur apparente de la colonne, donc le nombre de plateaux et l'efficacité.

– *Chromatographie à température programmée :*

L'emploi des colonnes isothermes rencontre une très grosse difficulté quand il s'agit de séparer des constituants à points d'ébullition très différents. En effet, quelle que soit la température choisie, il y aura toujours un groupe de constituants qui serait mal séparé car la température ne leur conviendra pas. *GRIFFITHS, JAMES* et *PHILLIPS* [1] ont apporté une excellente solution à ce problème ; l'analyse est commencée à une température suffisamment basse pour séparer les composés à bas point d'ébullition, puis la température de la colonne est élevée progressivement pour accélérer la sortie des substances lourdes, cette méthode augmente l'efficacité de la colonne. Par contre, l'introduction de cette technique est la source d'un certain nombre de difficultés, surtout d'ordre technique ; il faut, en effet, faire monter la température linéairement, et éviter la dérive de la ligne de base du chromatogramme entraînée par la modification de la viscosité du gaz vecteur au cours de la montée en température. Cependant, les résultats de cette méthode sont bien supérieurs à ceux obtenus en mode isotherme.

4. 1. 4 - Appareillages

Comme le montre la figure en début de chapitre, un chromatographe se compose principalement d'une chambre d'introduction, d'une colonne de séparation et d'un système de détection.

4. 1. 4. 1 - Le gaz vecteur

Il faut que ce soit un gaz pur, ou un mélange de gaz de titre parfaitement connu, pour que les résultats soient reproductibles du point de vue quantitatif, mais la nature même du gaz vecteur est sans importance théorique, et c'est l'expérience qui fait choisir les gaz suivants :

- l'hélium
- l'hydrogène
- le gaz carbonique
- l'azote et l'argon

4.1.4.2 - Les débitmètres

Ils doivent permettre des mesures de débits relativement faibles (*ml / min*) avec une précision correcte. Les débitmètres couramment utilisés sont les suivants :

- débitmètre à flotteur
- débitmètre à pression différentielle
- débitmètre à film de savon

Pour maintenir le débit du gaz vecteur constant, on utilise généralement un manodétendeur à trois étages de détente, celui-ci peut être suivi d'un récipient tampon.

4.1.4.3 - La chambre d'injection

L'échantillon à analyser ne doit pas être introduit directement dans la colonne, c'est pourquoi cette dernière est précédée d'une chambre d'injection à température plus élevée pour faciliter l'évaporation des échantillons.

L'introduction dans cette chambre se fait de manières différentes suivant la nature des échantillon :

- pour les gaz, le bouchon en matière plastique de la chambre est percé avec l'aiguille d'une seringue qui sert à l'injection du produit. La seringue peut être avantageusement remplacée par une valve d'injection rotative ou à piston.
- pour les liquides, on utilise les seringues classiques en verre à piston de Téflon.
- pour les solides, à forte tension de vapeur, la seringue peut être encore utilisée, mais avec une aiguille bien plus grosse, tandis que les solides à tension de vapeur négligeable sont pyrolysés dans la chambre d'injection, par surchauffe ou par décharge d'un condensateur.

4.1.4.4 - Régulation de la température

Il faut distinguer ici plusieurs types de chromatographie :

– *Chromatographie isotherme :*

La température de la colonne est maintenue rigoureusement constante par un thermostat à circulation d'air chaud qui a l'avantage de permettre une modification rapide de la température de la colonne .

– *Chromatographie à température programmée :*

La modification de la température devant être progressive, il faut utiliser un programmeur. Le contrôle de la montée en température est effectué par un thermocouple, le détecteur est placé dans un thermostat spécial, à grande inertie thermique, pour que sa température ne change pas pendant le déroulement d'un programme .

– *Chromatographie à température inférieure à la température ambiante :*

Dans l'analyse de certains gaz, il peut être nécessaire de travailler à une température constante inférieure à la température ambiante ; alors, les colonnes sont placées dans un *DEWAR* à bain réfrigérant ou dans un réfrigérateur classique .

4. 1. 4. 5 - Récupération des échantillons

Bien que la séparation intégrale d'un mélange en ses constituants ne soit possible qu'avec un appareil préparatif, il est possible de récupérer une partie des solutés avec un appareil analytique, à condition que son système de détection ne soit pas destructif. Pour cela, on l'équipe d'un piège approprié à la suite du détecteur .

Les pièges sont de différents types :

– *pièges à liquide :*

le courant gazeux est envoyé dans une ampoule contenant un solvant , ce piège est efficace si on prend soin de refroidir le solvant .

– *pièges à condensation :*

ce sont des pièges en verre classiques , de formes variables , refroidis par de la neige carbonique .

– *pièges à bromure de potassium :*

ils sont utilisés si l'échantillon doit être soumis à la spectrographie infrarouge..

4.1.4.6 - Colonnes

Il faut distinguer les colonnes à remplissage et les colonnes capillaires :

- *Colonnes à remplissage :*

Le tube

Il est en verre, en aluminium, en acier inoxydable ou même en chlorure de polyvinyle ; les parois ne doivent produire aucun effet catalytique ; le diamètre intérieur varie de 3 à 6 mm (Europe) et de 1/8 à 3/8 de pouce (USA) ; sa longueur est de 0.5 à 6 m pour la chromatographie de partage et peut atteindre 30 m pour la chromatographie d'adsorption. Il est généralement replié en V, en W ou en hélice pour diminuer l'encombrement .

Technique de remplissage

Quel que soit le type de chromatographie employée, il faut remplir la colonne avec beaucoup de soin. En effet, la densité de remplissage doit être régulière et parfaitement reproductible. En chromatographie gaz – solide, les colonnes sont remplies par vibration ; par contre en chromatographie gaz – liquide, on procède par tassage mécanique avec un poussoir, une tige en verre ou métallique, des portions de grains ajoutées successivement ou on emploie une méthode de sédimentation pour tasser les colonnes .

- *Colonnes capillaires :*

Elles sont constituées par un tube vide, de faible diamètre dans lesquels la phase stationnaire , au lieu d'être répartie sur un support, est fixée directement sur les parois internes de la colonne ; le film de phase fixe sur les parois est réalisé par évaporation d'une solution, il est donc très régulier .

Divers matériaux ont été proposés pour construire le tube tels que :

- le cuivre
- le verre
- l'acier inoxydable
- le Nylon .

4. 1. 5 - Application aux hydrocarbures

Ils constituent le meilleur terrain de la chromatographie en phase gazeuse. En effet, outre leurs qualités de volatilité et de détection facile, ils ne présentent pas d'adsorption parasite.

Surtout, la complexité des produits pétroliers est si grande que seule la chromatographie en phase gazeuse en a permis l'analyse correcte, ce qui a beaucoup contribué au développement de la méthode.

Choix d'une phase stationnaire

Le squalane et l'huile de paraffine à température modérée sont réservés aux composés légers ; alors que les graisses à vide du genre Apiezon sont utilisées à température élevée pour séparer des hydrocarbures lourds. A une température supérieur à 250 °C, la graisse de silicone est une bonne phase apolaire. Il existe, d'autre part, beaucoup de phases stationnaires polaires employées dans des cas de séparation délicats.

4. 2 - Analyseur de gaz à adsorption de rayonnement infrarouge

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

4. 2. 1 - Caractéristiques techniques

- Caractéristiques du gaz : l'appareil résiste à tous les gaz usuels, sauf aux vapeurs d'acide
- Pression d'alimentation : de 0.5 à 1.5 bar absolu
- Débit recommandé 60 l/h
- Température limite d'utilisation +15 à +35 °C
- Alimentation : 220 V ± 15 %, 50 Hz
- Bloc d'injection des gaz étalon : Il faut toujours prévoir des bouteilles de gaz étalon et d'azote munies de détendeurs régulateurs de pression de manière à ce que les trois gaz ; gaz étalon , azote et gaz à analyser , soient tous réglés à une même surpression comprise entre 120 et 150 mbar par rapport à la pression atmosphérique .
- La régulation du débit se fait à l'intérieur de l'analyseur par un robinet pointeau précédant le débitmètre.

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

4. 2. 2 - Récepteur extérieur :

La sortie de la mesure un courant et isolée de la masse ; il faut donc shunter la sortie de l'analyseur (bornes B_1 et B_2) située à l'arrière de l'appareil par une impédance donnant une chute de tension inférieure à 24 V .

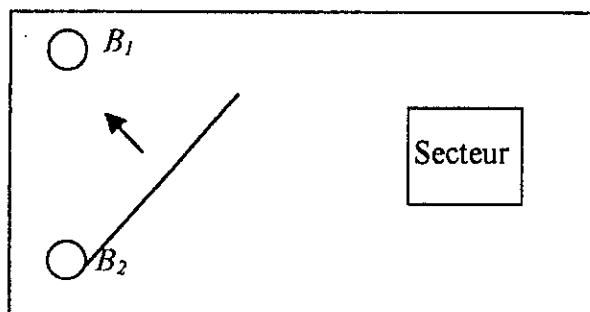


Fig (4 . 7) : Plaque de raccordement

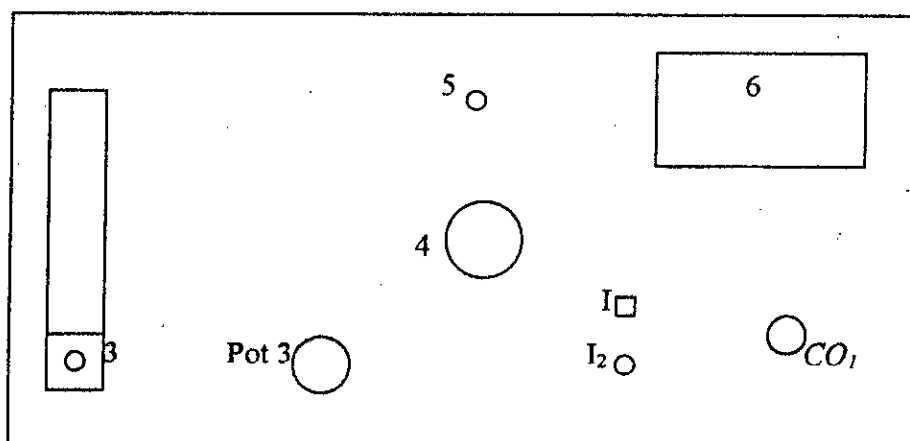
4. 2. 3 - Exploitation

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

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

4. 2. 4 - Mise en service de l'analyseur

- Vérifications préliminaires : vérifier le zéro de l'amplificateur (agir sur le potentiomètre P_2 si c'est nécessaire, situé à l'intérieur de l'appareil)
- Réglage du zéro des teneurs : faire circuler dans le tube d'analyse un gaz neutre (azote ou air) ne contenant pas le gaz à analyser
- Vérifier que le commutateur CO_1 est sur la position mesure



CO_1 : commutateur

I : bouton poussoir MARCHE ARRET

I_2 : inverseur zéro

2 : débitmètre

3 : axe fondu (débitmètre)

4 : filtre de sécurité

5 : tubulure sortie gaz

6 : galvanomètre

Pot 3 : potentiomètre gain

Fig (4 . 8) : Appareillage de contrôle

4 . 2 . 5 - Fonctionnement

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

Les deux chambres 5 et 6 du récepteur sont remplies par le même gaz que celui que l'on veut analyser . Le gaz absorbera les radiations qui ont été affaiblies par la présence dans le mélange d'un gaz à doser, l'émission infrarouge est interrompue périodiquement et simultanément par la rotation d'un obturateur 7.

Les pressions qui règnent dans les deux chambres de mesure se trouvent modulées à la fréquence de passage des pales de l'obturateur .

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

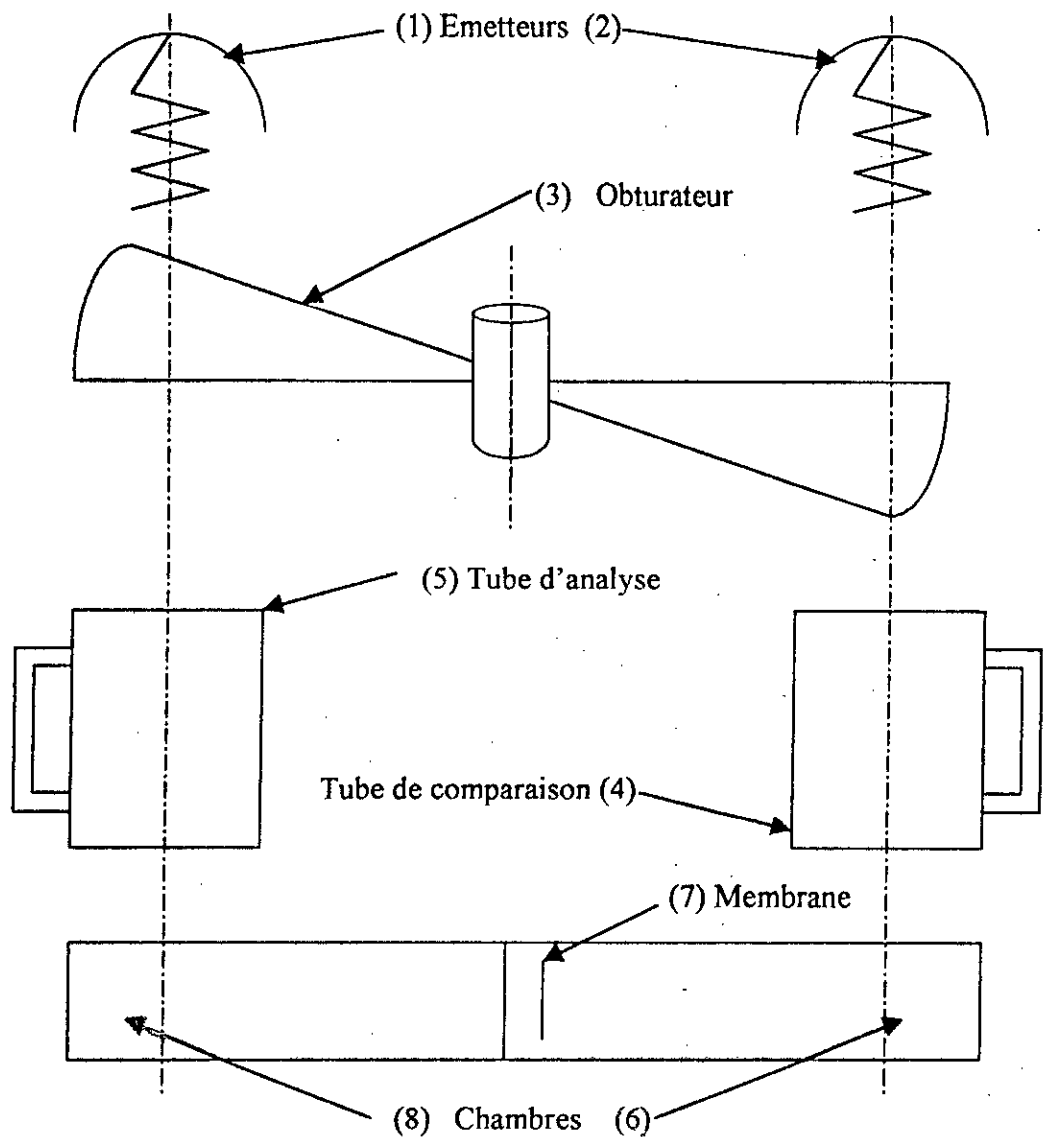


Fig (4 . 9) : Schéma de principe de l'analyseur

4. 3 - Méthode d'analyse des gaz

Le principe de la méthode consiste à mesurer alternativement les concentrations en CO , CO_2 et O_2 existant réellement dans les gaz et la quantité de CO_2 qui devrait exister si la combustion était totale et parfaite. Les gaz d'échappement sont prélevés de la chambre au moyen d'une sonde refroidie puis acheminés vers les analyseurs par deux circuits indépendants .

Le CO_2 réel et les imbrûlés sont prélevés directement dans les gaz d'échappement tandis que pour mesurer le CO_2 total, on réalise préalablement la combustion des imbrûlés (constitués essentiellement de CO) dans un four électrique chauffé à $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Il doit être placé le plus près possible du lieu de prélèvement des gaz afin de récupérer les imbrûlés liquides ou condensables. La transformation du CO , contenu dans les imbrûlés, en CO_2 a lieu dans un tube en acier inoxydable contenant de la tournure de cuivre oxydée. L'oxygène non brûlé au cours de la combustion permet cette transformation .

A la sortie du four, les deux échantillons passent dans un réfrigérant, celui-ci permet leur refroidissement avant l'entrée dans les analyseurs. Pour l'acheminement des gaz, du fait de leur énergie cinétique insuffisante et des pertes de charges dans les conduites, on utilise une pompe à membranes à deux circuits montés en parallèle. Ainsi les gaz de combustion sont aspirés à travers le four et les réfrigérants vers les analyseurs ; mais avant d'atteindre ces derniers, ils passent par un dessiccateur qui est destiné à débarrasser les gaz de particules solides qu'ils renferment et de les dessécher en absorbant la vapeur d'eau qui n'a pas été condensée dans les réfrigérants ; l'élimination totale de la vapeur d'eau est indispensable, sinon elle introduit des erreurs sur les mesures au niveau des analyseurs ; ceci s'explique par le fait qu'elle a le même temps de réponse que le CO_2 dans les analyseurs .

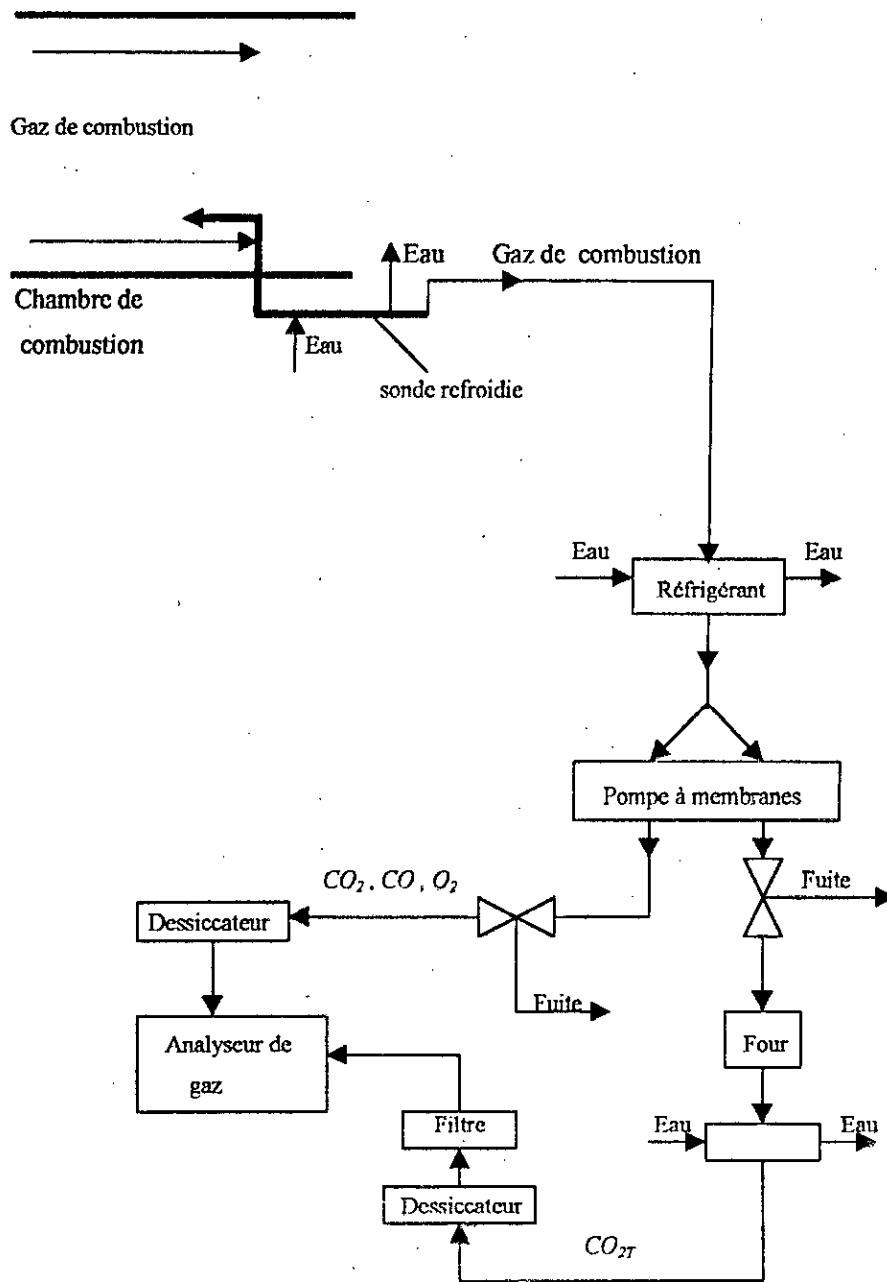


Fig (4 . 10) : Circuit d'analyse des gaz de combustion

4 . 4 - Choix de la méthode de mesure de la concentration

Concernant le choix de la méthode de mesure de la concentration, nous remarquons que la méthode la plus appropriée à notre banc d'essai est la chromatographie en phase gazeuse qui est la plus précise dans l'analyse et la détections des hydrocarbures.

Chapitre 5

Adaptation des appareils de mesure au banc d'essai

- 5 – 1 Description du banc d'essai de chambre de combustion
 - 5 – 1 – 1 Systèmes de réglage du débit d'air et de sa mesure
 - 5 – 1 – 2 Chambre de préchauffage
 - 5 – 1 – 2 – 1 Technologie de la chambre de préchauffage
 - 5 – 1 – 3 Centrale de gaz naturel
 - 5 – 1 – 4 Installation cryogénique de *G.N*
- 5 – 2 Installation de mesure de la concentration
- 5 – 3 Installation de mesure de la vitesse
- 5 – 4 Installation de mesure de la température

5.1 - Description du banc d'essai de chambre de combustion

Le banc d'essai de chambre de combustion se compose essentiellement de: (planche 1)

- Un ventilateur centrifuge *RATEAU* type *VBC 110* de puissance 110 CV, tournant à 2950 *tr / min*, débitant 3 *m³ / s* maximum, avec une perte de charge de $\Delta p_T = 2000 \text{ mm}_{\text{H}_2\text{O}}$;
- Un système de réglage du débit d'air par vanne de laminage *RATEAU*, placé en amont d'un venturi de mesure de débit ;
- Une chambre de préchauffage permettant d'élever la température à l'entrée de la chambre d'essai, jusqu'à la température désirée ;
- Une chambre d'essai placée à la sortie de la chambre de préchauffage ;
- Eventuellement, une chambre pour essais de réchauffe en veine semi - guidée ;
- Un diffuseur de sortie refroidi ;
- Un pupitre de commande qui comprend :
 - les rotamètres ;
 - les robinets à pointeau pour le réglage des débits de gaz ;
 - les contacteurs d'allumage à HT ;
 - les vannes d'admission d'oxygène et de propane pour les chambres auxiliaires d'allumage ;
 - les contacteurs de mise en route des pompes et du ventilateur ;
 - les pyromètres à thermocouples ;
- Instrumentation :
 - mesure du débit d'air par venturi et manomètre ;
 - mesure de la pression statique et totale en différentes sections ;
 - mesure de la vitesse de l'écoulement par laser ;
 - mesure de la température par thermocouples ;
 - potentiomètre *PHILIPS* électronique 3500 à 12 voies ;
 - mesure du débit de *G.N.L* par diaphragme et mesuré de la dépression ;
 - sondes d'aspiration de gaz brûlés ;
 - analyseur de gaz par chromatographie en phase gazeuse ;
- Auxiliaires et centrale de *G.N*.

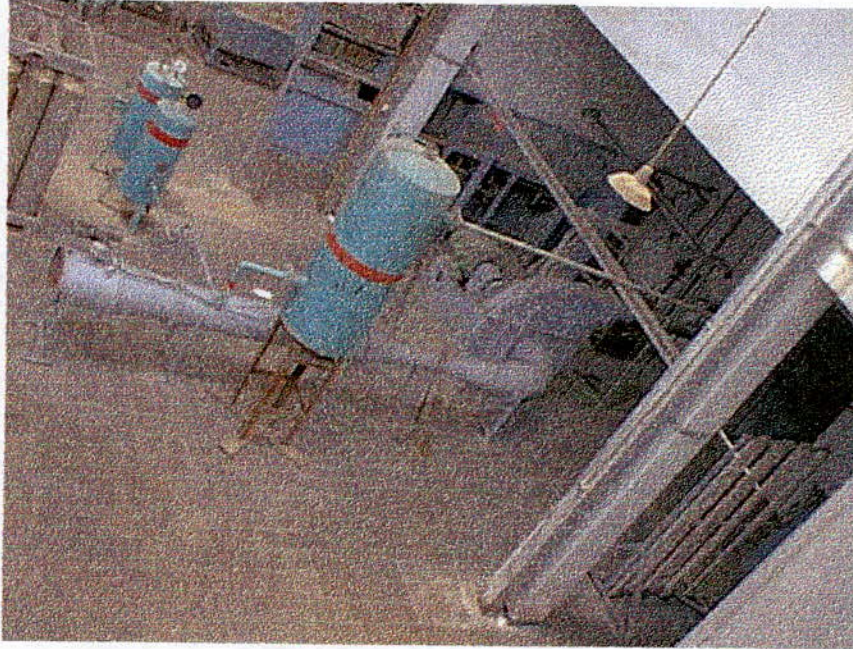


Fig (5 . 1) : Vue d'ensemble du banc d'essai

5 . 1 . 1 - Système de réglage du débit d'air

Compte tenu de la perte de charge admissible et des facilités de construction le choix s'est porté sur un venturi .

5 . 1 . 2 - Chambre de préchauffage (planche 2)

Dans cette première phase de recherche, il a été décidé de procéder au préchauffage de l'air en utilisant une chambre de préchauffage à combustible gazeux ou liquide, donc donnant de l'air vicié. Cette chambre est prévue d'une alimentation en gaz naturel à l'état gazeux sous une pression de quelques bars. L'étude théorique de la combustion du gaz naturel dans la chambre de préchauffage a été faite suivant les méthodes classiques des cours de thermopulsion, compte tenu des caractéristiques du gaz naturel algérien [2] .

5.1.2.1 - Technologie de la chambre de préchauffage

La chambre prévue (planche 2) comprend essentiellement :

- Un injecteur ;
- Un tronc de cône avec orifice d'air primaire et de dilution .

La mise au point de ce type de chambre est essentiellement expérimentale et alimentée par la centrale de gaz sous pression .

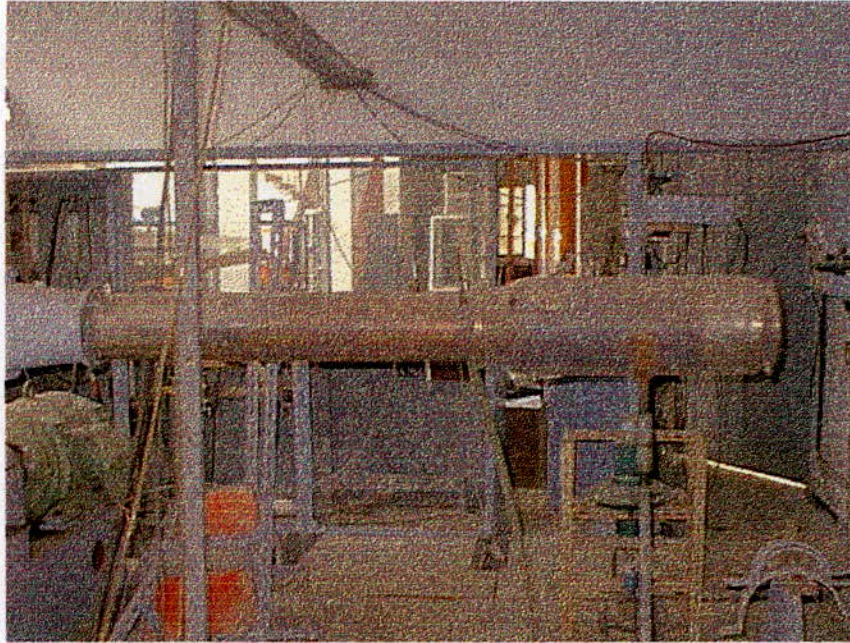


Fig (5 . 2) : Chambres de préchauffage et de combustion

5.1.3 - Centrale de gaz naturel

L'installation de stockage et de détente de gaz naturel existe et nécessite un entretien elle prévoit :

- 1^{er} poste , sous une pression jusqu'à 5 bars pour l'alimentation d'une turbine à gaz ou d'un foyer de combustion homogène, débit : $43 \text{ m}^3 / \text{h}$;
- 2^{ème} poste , sous une pression pouvant atteindre 10 à 12 bars pour l'alimentation des chambres de combustion et de préchauffage, débit maximum : $190 \text{ Nm}^3 / \text{h}$.

La capacité de stockage prévue est de 8 bouteilles de 7 m^3 chacune, le nombre de bouteilles pourra être augmenter selon la cadence des essais. Un système double de détente

avec réchauffeur a été prévu afin d'avoir une pression stable; toute la partie stockage, réchauffeur et première détente est à l'extérieure du bâtiment.

Le compresseur utilisé est à piston à 4 étages type *C4NHI* pour gaz naturel de la société suisse *BURCKHARDT*, permettant de comprimer $17.8 \text{ m}^3 / \text{h}$ à $950 \text{ tr} / \text{min}$; il est entraîné par un moteur *CEM 10 CV* à poulies réductrices de vitesse. Le tableau de commande est placé à l'extérieure de la cellule du compresseur, dans le couloir de la centrale.

5. 1. 4 - Installation cryogénique de G.N

Compte tenu des spécifications du banc d'essai :

L'alimentation en gaz naturel à une pression très légèrement supérieure à la pression atmosphérique avec un débit de l'ordre de 10 à 40 *grammes / s* et une pression d'injection jusqu'à 10 bars .

Le banc est composé d'un liquéfacteur de gaz monocylindrique type *PLA-107*, il permet la liquéfaction de l'air ou des gaz autres qui sont liquéfiables au-dessus de $-200 \text{ }^\circ\text{C}$; la production est de l'ordre de 8 à 9 *l/h*. Ce liquéfacteur fonctionne selon le cycle de réfrigération *PHILIPS - STERLING*, il est très employé dans les centres de recherches .

Il alimente un réservoir cryogénique type *130 / 12* de l'air liquide ; ce dernier peut contenir 130 *l* et stocker le *G.N.L* jusqu'à une pression d'une dizaine de bars .

L'implantation de ce cryogénérateur est dans une salle de la centrale où est également disposé le réservoir d'où part la conduite de *G.N.L* vers le pupitre de commande et la chambre d'essais .

5.4 - Installation de mesure de la concentration

Concernant la mesure de la concentration, notre choix s'est porté sur la chromatographie en phase gazeuse; on prélèvera l'échantillon de gaz à étudier juste à la sortie de la chambre de combustion.

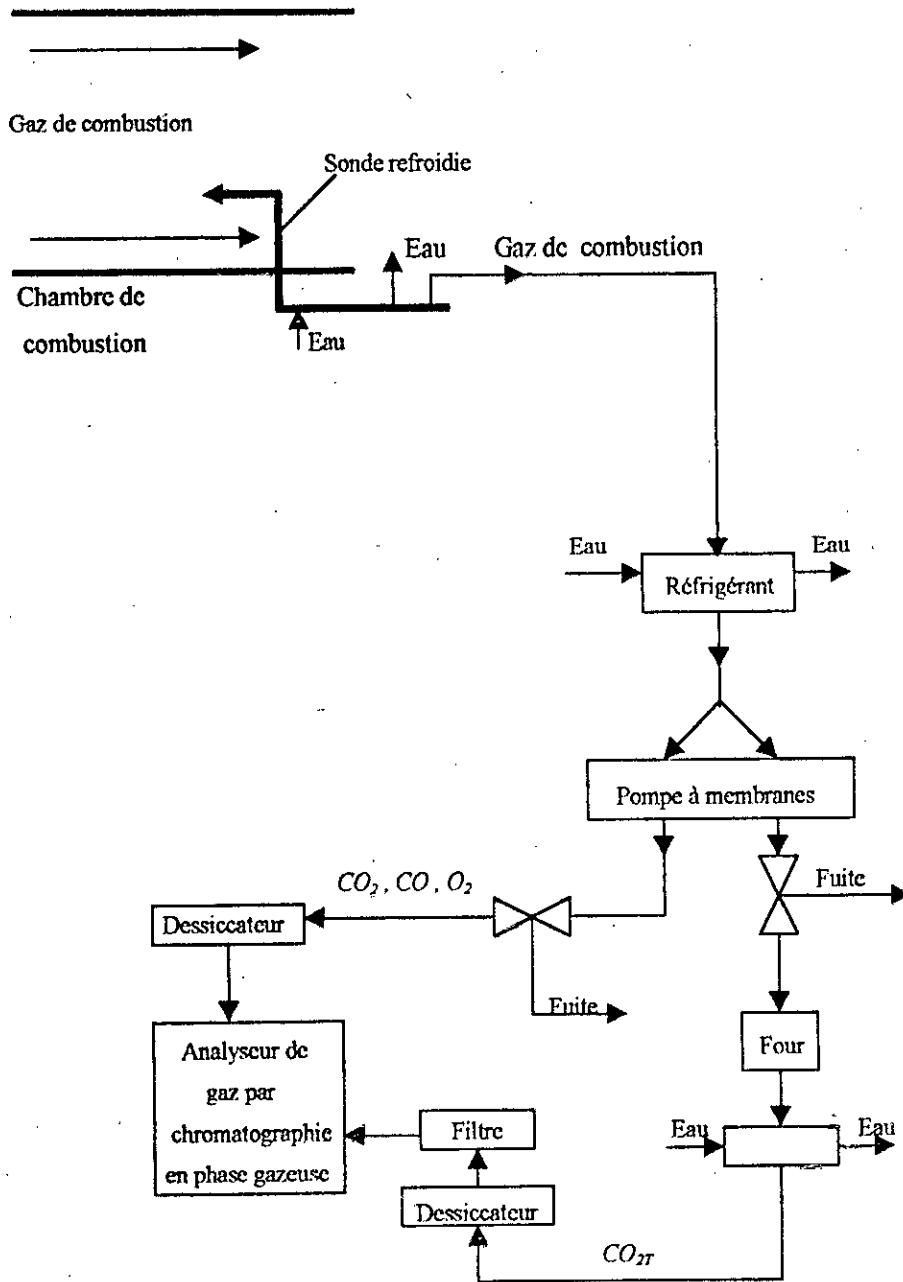


Fig (5.3) : Installation de mesure de la concentration

5. 5 – Installation de mesure de la vitesse

Pour balayer toutes les parties de circulation du gaz, il nous a semblé plus judicieux de concevoir un système pouvant se mouvoir sur des rails; le laser est posé sur un support fixe et émet un faisceau qui est réfléchi par deux miroirs jusqu'au récepteur; le premier miroir est fixé sur un chariot commandé numériquement tandis que le second est raccordé au premier par une tige verticale et au récepteur par une tige en forme de U qu'on peut déplacer verticalement. L'ensemencement en particules se fait à travers de petits orifices placés à l'entrée de la chambre de préchauffage ou de la soufflante.

Tous les résultats sont transmis à la partie commande d'où est commandé le chariot et le déplacement vertical du second miroir et du récepteur.

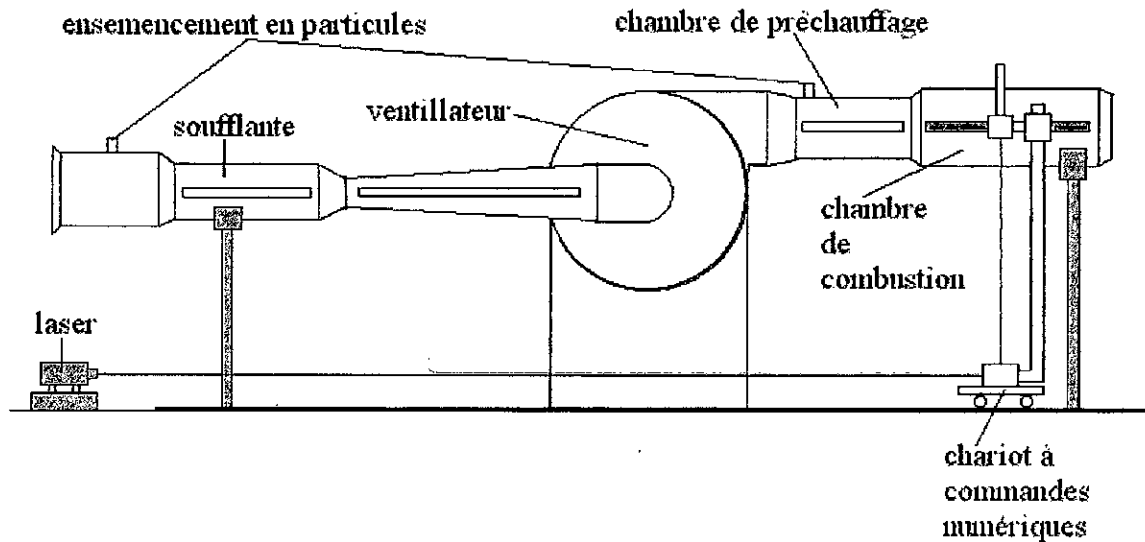


Fig (5 . 4) : Installation de mesure de la vitesse (vue de face sans partie commande)

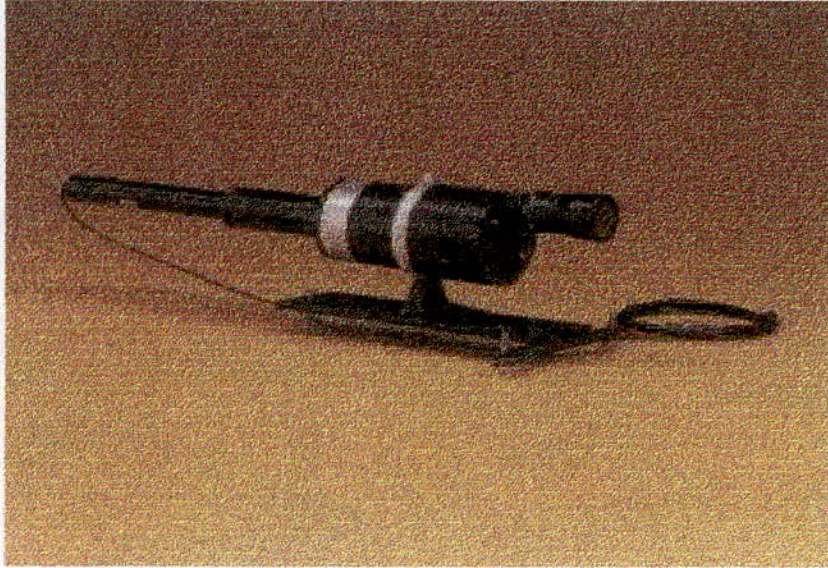


Fig (5 . 5) : Photo du laser

5 . 6 – Installation de mesure de la température

Pour que l'étude de la variation de la température à l'intérieur de la chambre de combustion soit plus complète, nous suggérons de mettre plusieurs orifices tout le long de la chambre de combustion pour faire passer un thermocouple graphite – carbure de bore et le munir d'un système de guidage pour pénétrer à l'intérieur de la chambre et balayer ainsi un plus grand nombre de points. Il est sont relié à la partie commande où les résultats de mesures sont affichés .

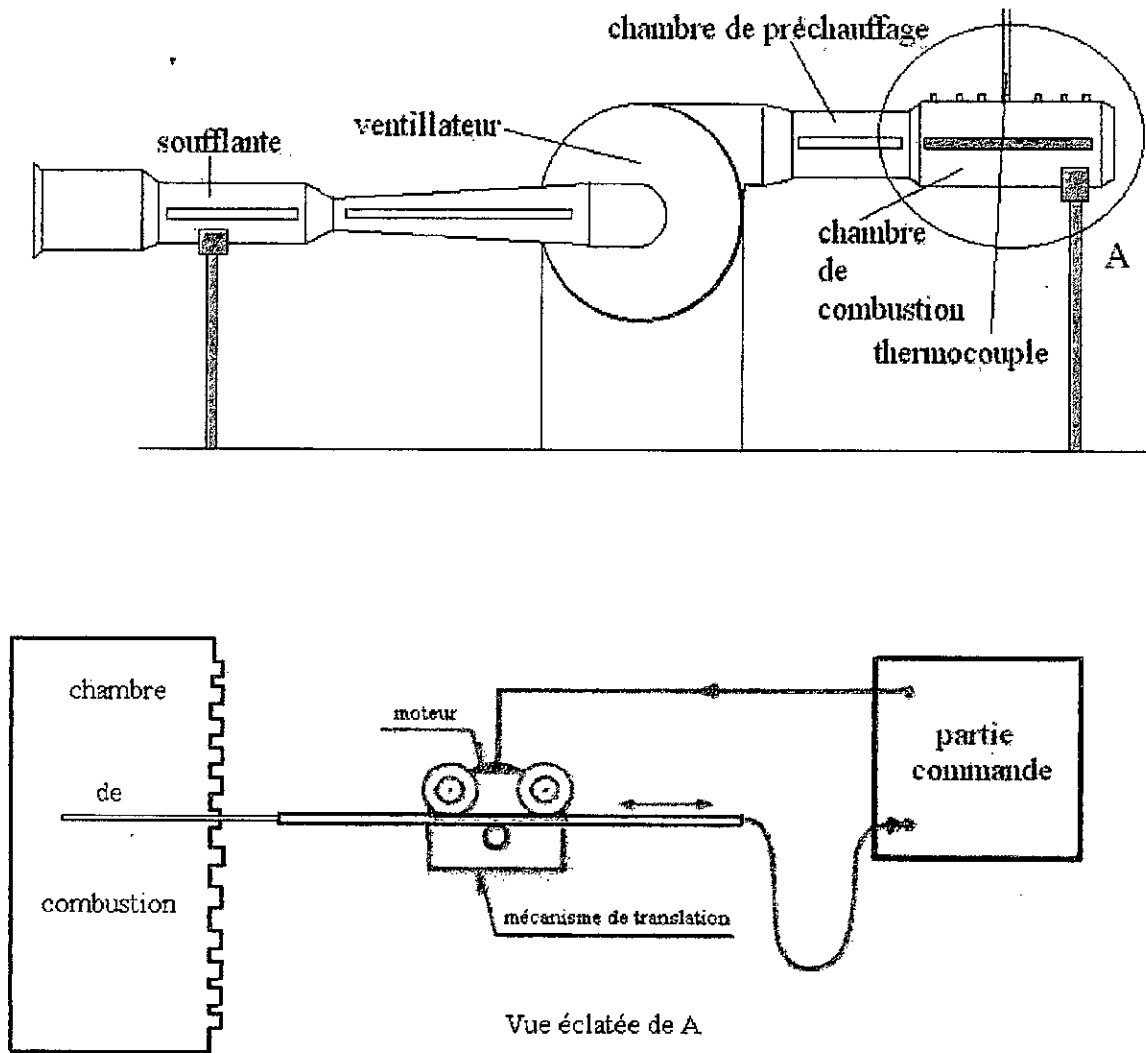


Fig (5 . 6) : Installation de mesure de la température

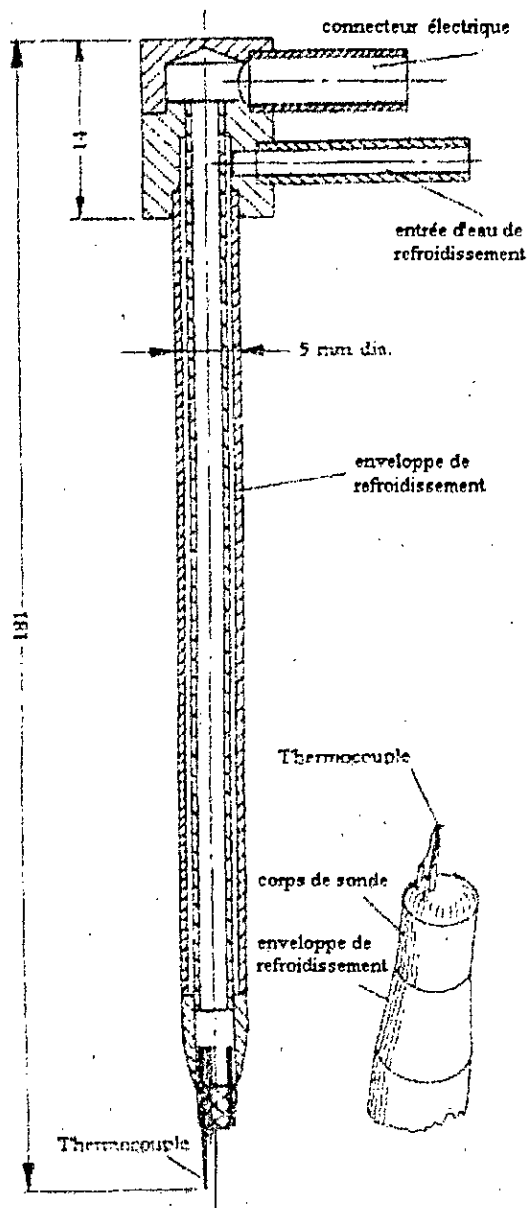


Fig 5 . 8 : sonde du thermocouple



Conclusion

Conclusion

Dans ce modeste travail, on s'est intéressé à la recherche de méthodes de mesure de la vitesse, de la température et de la concentration des gaz d'échappement dans un milieu réactionnel, étant donné que l'instrumentation actuelle dont nous disposons ne convient plus aux exigences d'un laboratoire d'école d'ingénieurs.

Pour la mesure de la vitesse, les méthodes étudiées sont : le tube de *PITOT*, l'anémomètre à cinq trous, le laser à effet *DOPPLER* et l'anémomètre à fil chaud. Après comparaison des performances, notre choix s'est porté sur la méthode laser à effet *DOPPLER*, qui fournit une mesure adéquate et précise.

En ce qui concerne la température, et étant donné que l'on a affaire à des températures pouvant atteindre 2500°C, les méthodes de mesure exposées sont : les thermocouples à très hautes températures et les pyromètres monochromatiques. Vu leurs performances voisines, on a adopté la mesure par thermocouples, et plus précisément, le thermocouple graphite - carbure de bore dont le prix est moins élevé.

Enfin, pour la mesure de la concentration des gaz d'échappement, les méthodes étudiées sont : la chromatographie en phase gazeuse et l'analyseur de gaz à adsorption de rayonnement infrarouge. En comparant les performances de chacune d'elles, notre choix s'est porté sur la chromatographie en phase gazeuse qui présente une meilleure adaptation à l'analyse des hydrocarbures [9].

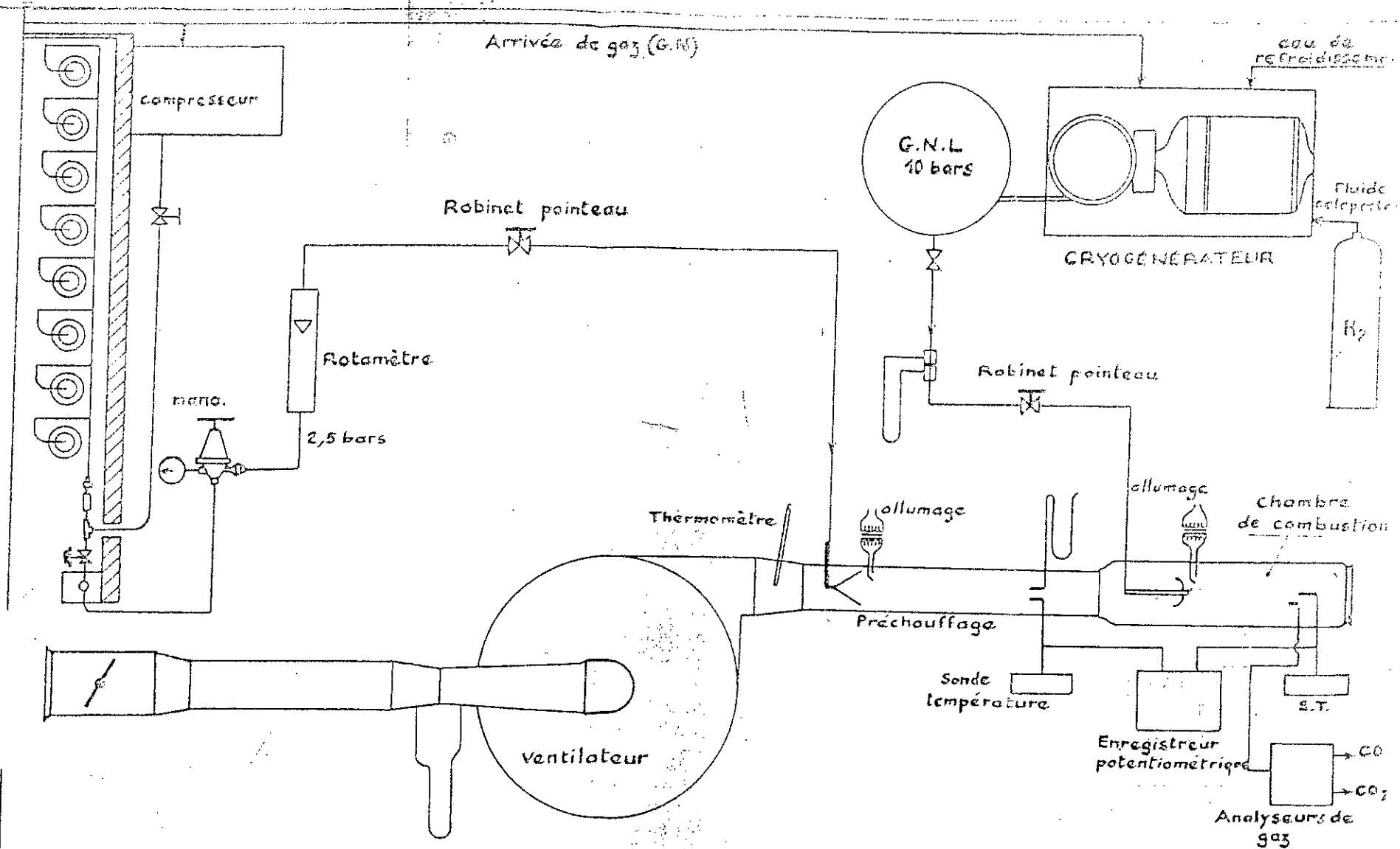
En tout dernier lieu, on s'est intéressé à l'adaptation de ces différentes méthodes au banc d'essai, en proposant des schémas explicites.

Pour conclure, nous espérons que ce modeste travail contribuera à la mise en marche du banc d'essai et que les études ultérieures pourront contribuer à son exploitation en vue de mener des études de caractérisation des performances des hydrocarbures.

Bibliographie

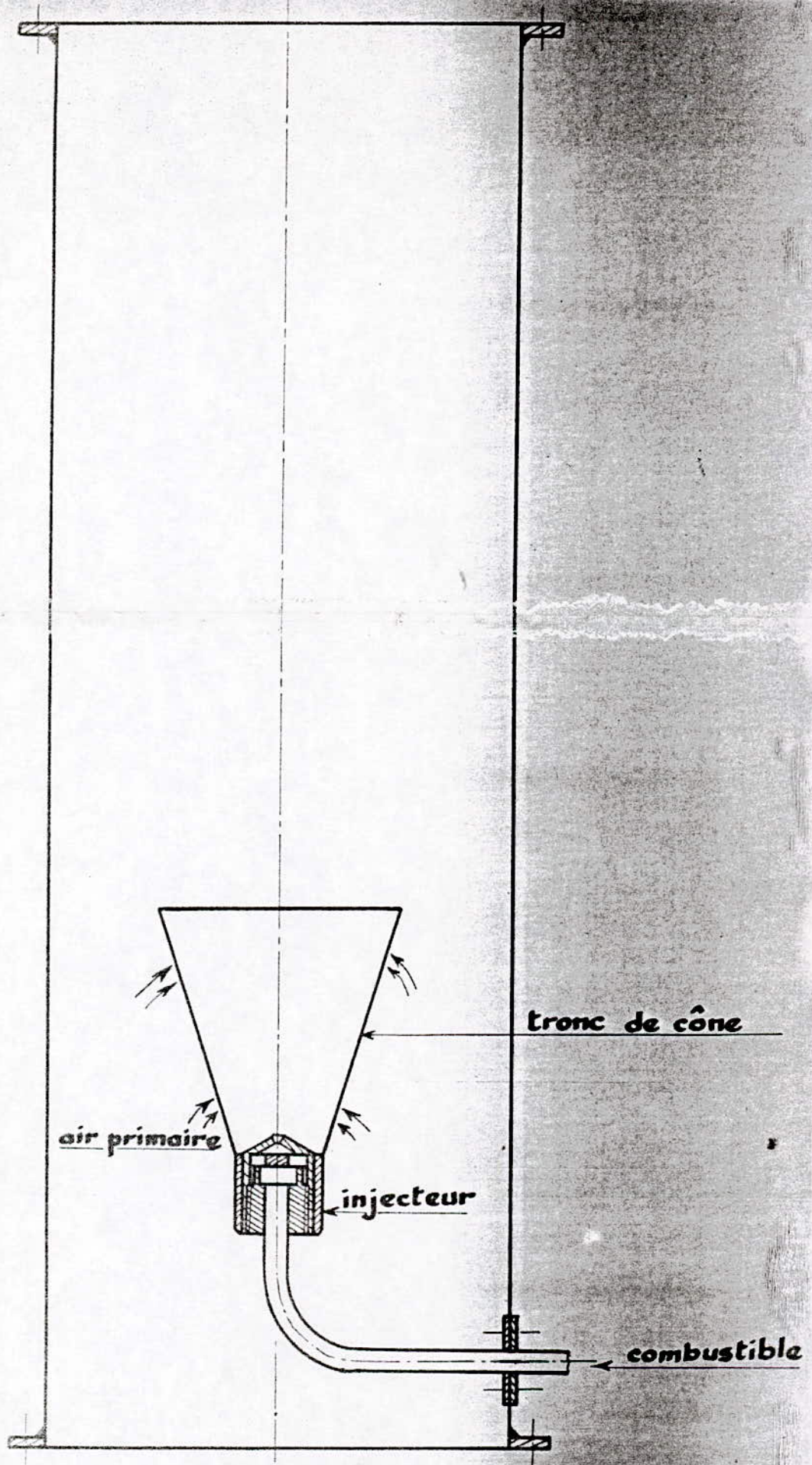
- [1] **BERTHILLIER Alain**
« La chromatographie et ses applications »
Dunod 1972
- [2] **CHARNAY Georges, COMTE-BELLOT Geneviève et SCHON Jean-Paul**
« Anémomètre à fil ou à film chaud »
Techniques de l'ingénieur 1996 (R 2272)
- [3] **DISA**
« Laser . Doppler . Anemometer »
Prospectus 1983
- [4] **GUIBET Jean-Claude**
« Les carburants et la combustion »
Techniques de l'ingénieur 1996
- [5] **LECORDIER Jean-Claude, PETIT Claude et PARANTHOEN Pierre**
« Mesure locale et instantanée de la température des fluides »
Techniques de l'ingénieur.1996
- [6] **MATTON Gilbert**
« Etude et réalisation d'un banc de combustion »
Laboratoire d'énergétique. *ENP.* 1968

- [7] **TERNY. M**
« La mesure de la température au laboratoire et dans l'industrie »
Dunod. 1962
- [8] **THERMOCOAX**
« Quel thermocouple choisir ? »
Prospectus (Société française **THERMOCOAX**)
- [9] **TRANCHANT Jean**
« La chromatographie en phase gazeuse »
Techniques de l'ingénieur. 1998
- [10] « Technique de mesure dans les écoulements »
Cycle de conférence tenu à Ernouville. Eyrolles. 1974
- [11] **ROYER Henry et BOUTIER Alain**
« Visualisation et mesures optiques en aérodynamique »
Techniques de l'ingénieur. 1998
- [12] **ZUYEV S.V**
« Combustion Chambers for Jet Propulsion Engines »
Pergamon Press. 1964



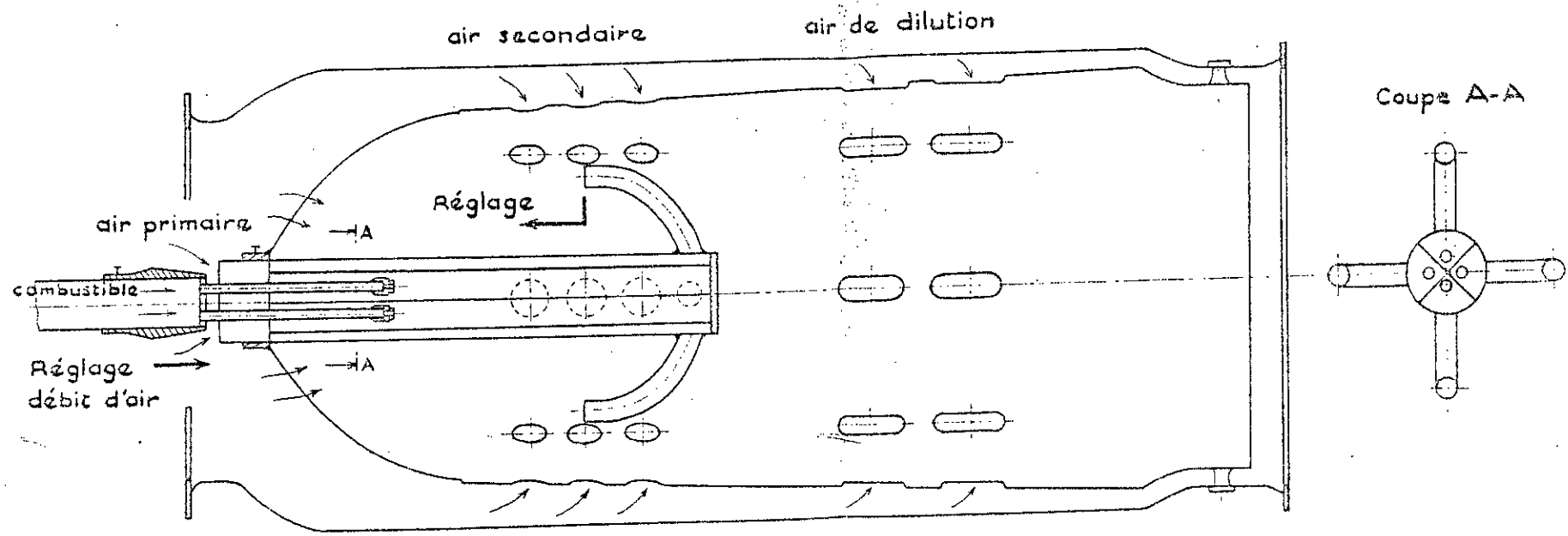
IMPLANTATION GÉNÉRALE DE L'INSTALLATION

MÉTHANE LIQUIDE (G.N.L.)



CHAMBRE DE PRÉCHAUFFAGE

Planche : 2



CHAMBRE DE COMBUSTION A PRÉVAPORISATION

MÉTHANE LIQUIDE (G.N.L)