



OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

**RESUME THEORIQUE
&
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

MODULE N°15 : BRULEURS INDUSTRIELS

SPECIALITE : THERMIQUE INDUSTRIELLE

NIVEAU : TECHNICIEN SPECIALISE



ISTA.ma
Un portail au service
de la formation professionnelle

Le Portail <http://www.ista.ma>

Que vous soyez étudiants, stagiaires, professionnels de terrain, formateurs, ou que vous soyez tout simplement intéressé(e) par les questions relatives aux formations professionnelles, aux métiers, <http://www.ista.ma> vous propose un contenu mis à jour en permanence et richement illustré avec un suivi quotidien de l'actualité, et une variété de ressources documentaires, de supports de formation, et de documents en ligne (supports de cours, mémoires, exposés, rapports de stage ...) .

Le site propose aussi une multitude de conseils et des renseignements très utiles sur tout ce qui concerne la recherche d'un emploi ou d'un stage : offres d'emploi, offres de stage, comment rédiger sa lettre de motivation, comment faire son CV, comment se préparer à l'entretien d'embauche, etc.

Les forums <http://forum.ista.ma> sont mis à votre disposition, pour faire part de vos expériences, réagir à l'actualité, poser des questionnements, susciter des réponses. N'hésitez pas à interagir avec tout ceci et à apporter votre pierre à l'édifice.

Notre Concept

Le portail <http://www.ista.ma> est basé sur un concept de gratuité intégrale du contenu & un modèle collaboratif qui favorise la culture d'échange et le sens du partage entre les membres de la communauté ista.

Notre Mission

Diffusion du savoir & capitalisation des expériences.

Notre Devise

Partageons notre savoir

Notre Ambition

Devenir la plate-forme leader dans le domaine de la Formation Professionnelle.

Notre Défi

Convaincre de plus en plus de personnes pour rejoindre notre communauté et accepter de partager leur savoir avec les autres membres.

Web Project Manager

- Badr FERRASSI : <http://www.ferrassi.com>

- contactez : admin@ista.ma

REMERCIEMENTS

La DRIF remercie les personnes qui ont participé ou permis l'élaboration de ce module de formation.

Pour la supervision :

M. Rachid GHRAIRI : directeur du CDC Génie Electrique Froid et Génie Thermique

M. Mohamed BOUJNANE : Chef de pôle Froid et Génie Thermique

Mme. Ilham BENJELLOUN : Formatrice animatrice au CDC.GE.FGT

Pour l'élaboration :

MR EL KHATTABI M'HAMED : Formateur à L'ISGTF

Pour la validation :

- **MR AKKAOUI HASSAN** : Formateur à L'ISGTF
- **MR MAHBOUB AHMED** : Formateur à L'ISGTF
- **MR THATHA NOUREDDINE** : Formateur à L'ISGTF

Les utilisateurs de ce document sont invités à communiquer à la DRIF toutes les remarques et suggestions afin de les prendre en considération pour l'enrichissement et l'amélioration de ce programme.

M. SAID SLAOUI
DRIF

SOMMAIRE

	Page
Présentation du module	7
Résumé de théorie	
I – Les fiouls lourds	9
I – 1 – Propriétés et caractéristiques des fiouls lourds	10
I – 2 – Matériel de stockage, de transfert et de préparation	11
I – 3 – Exploitation des installations fiouls lourds	13
II – Technologie des brûleurs fiouls lourds	16
II.1 – La pulvérisation mécanique	17
II.2 – La pulvérisation par coupelle rotative	19
II.3 – La pulvérisation par air	19
II.4 – La pulvérisation vapeur	19
III. – Technologie des brûleurs à gaz industriels	26
III.1 – Généralités	27
III.2 – Rôles des brûleurs à gaz industriels	30
III.3 – Choix d'un type de brûleur à gaz	33
IV. – Le charbon	34
IV.1 – Les caractéristiques du charbon	35
IV.2 – Les brûleurs à charbon	36
IV.3 – Préparation du charbon	38
IV.4 – Les dépoussiéreurs	38
Guide de travaux pratiques	41
I.TP1 – Réglage du brûleur	42
II.TP2 – Dépannage d'un brûleur	43
Evaluation de fin de module	44
Liste bibliographique	45

MODULE : 15

Brûleurs Industriels

Durée : 60 H

80% : Théorique

20% : Pratique

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

COMPORTEMENT ATTENDU

Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit maîtriser la technologie, des brûleurs industriels selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent

CONDITIONS D'EVALUATION

- A partir des consignes données par le formateur
- A l'aide de la documentation technique donnée par le formateur.
- A partir de mises en situation

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- Etude correcte des notices techniques des constructeurs.

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

**PRECISIONS SUR
LE COMPORTEMENT ATTENDU**

**CRITERES PARTICULIERS DE
PERFORMANCE**

A- Connaître les fiouls lourds

- Connaissance correcte des propriétés et caractéristique des fiouls lourds.
- Description juste du matériel de stockage de transfert et de préparation.
- Connaissance correcte du fonctionnement et de l'exploitation des installations de fiouls lourds.

B- Connaître la technologie des brûleurs fioul lourd

- Description appropriée du brûleur à pulvérisation par fluide auxiliaire
- Connaissance adéquate du brûleur à pulvérisation par coupelle rotative
- Description juste du brûleur à pulvérisation mécanique.

C- Connaître la technologie des brûleurs à gaz industriels.

- Connaissance correcte des brûleurs sans mélange préalable
- Description juste du brûleur à prémélange
- Choix judicieux d'un type de brûleur à gaz.

D- Connaître le charbon

- Description juste des caractéristiques des charbons.
- Connaissance adéquate des brûleurs à charbon.
- Description correcte de la manutention et stockage des charbons
- Connaissance juste du dépoussiérage de fumées.

OBJECTIFS OPERATIONNELS DE SECOND NIVEAU

LE STAGIAIRE DOIT MAITRISER LES SAVOIRS , SAVOIR-FAIRE, SAVOIR-PERCEVOIR OU SAVOIR-ETRE JUGES PREALABLES AUX APPRENTISSAGES DIRECTEMENT REQUIS POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF DE PREMIER NIVEAU, TELS QUE :

Avant d'apprendre à connaître les fiouls lourds (A) :

- 1- Définir le pouvoir calorifique.
- 2- Définir la masse volumique.
- 3- Décrire le classement des dépôts et la réglementation correspondante.
- 4- Décrire les différents types de réchauffeurs.
- 5- Décrire la technologie des pompes de transfert.

Avant d'apprendre à connaître la technologie des brûleurs fioul lourd (B) :

- 6- Décrire le gicleur à retour.
- 7- Décrire la technologie des différents systèmes des brûleurs à pulvérisation mécanique
- 8- Connaître le principe de la pulvérisation par air.
- 9- Connaître le principe de la pulvérisation par coupelle rotative.

Avant d'apprendre à connaître la technologie des brûleurs gaz industriels (C) :

- 10- Définir la puissance d'un brûleur.
- 11- Décrire les modes de réalisation d'un mélange.
- 12- Décrire le choix d'un type de brûleur à gaz.

Avant d'apprendre à connaître le charbon (D) :

- 13- Définir l'indice de gonflement
- 14- Décrire une analyse élémentaire et immédiate des charbons.
- 15- Décrire la classification des charbons.

PRESENTATION DU MODULE

Le module de technologie des brûleurs industriels comprend 4 parties :

- la 1^{er} partie concernant la connaissance des caractéristiques physico-chimiques des fiouls lourds ainsi que leurs stockage, préparation et utilisation dans les chaufferies.
- La 2^{ème} partie donne un aperçu sur les modes de pulvérisation du fioul lourd dans l'industrie.
- La 3^{ème} partie décrit les principaux modes d'utilisation du gaz dans la combustion industrielle.
- Finalement la 4^{ème} partie fait connaître les caractéristiques du charbon ainsi que sa préparation et pulvérisation dans les brûleurs industriels.

Ce module est d'une durée de 60 heures, 80% de cette masse horaire est allouée à la théorie et 20% pour la pratique.

Module : Technologie des brûleurs industriels

RESUME THEORIE

I – LES FIOULS LOURDS

CHAPITRE I : LES FIOULS LOURDS

I – 1 – PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES FIOULS LOURDS

Ils proviennent de la distillation du pétrole brut.

Cinq qualités différentes sont commercialisées :

- Fioul domestique (F.O.D)
- Fioul lourd n° 1
- Fioul lourd n° 2
- Fioul lourd B.T.S base teneur en soufre
- Fioul lourd T.B.T.S très basse teneur en soufre

Ces qualités proviennent des mélanges, en proportion variable de fioul lourd et de gazoile.

Caractéristiques physiques :

- la viscosité :

Les fiouls lourds sont caractérisés par leur viscosité

Celle-ci est la résistance à l'écoulement du fluide.

On tient compte de la viscosité :

- pour le transfert du combustible-pompage, calcul des tuyauteries
- pour déterminer les conditions d'une bonne pulvérisation par le brûleur

La viscosité s'exprime en degré ENGLER : échelle de mesure comparant la vitesse d'écoulement du fioul à celle de l'eau ou en CENTISTOKE (Cst).

La viscosité décroît avec la température.

Par exemple :

En chauffant à une température convenable le fioul lourd, on le rend aussi fluide que du fioul domestique.

- Le point d'écoulement :

C'est la température la plus basse à partir de laquelle le fioul cesse de couler.

Sa valeur fixe la température de stockage.

- Inflammabilité – point d'éclair – :

C'est la température à laquelle un fioul s'enflamme.

Cette valeur est importante sur le plan de la sécurité car on est appelé à réchauffer le fioul avant sa combustion.

On se réfère principalement à son Point Eclair : qu'il puisse s'enflammer de façon fugitive au contact d'une flamme.

- Le soufre :

Deux problèmes liés à la teneur en soufre sont :

- la corrosion des circuits de fumée
- la pollution atmosphérique

- Le pouvoir calorifique :

Il varie de : 11 000 kcal/kg pour le fioul domestique.
à : 10 300 kcal/kg pour le fioul lourd

- Masse volumique :

La masse volumique d'un liquide, à une température donnée, est égale au quotient de la masse par son volume.

Elle s'exprime en kg/m³.

Pour les produits pétroliers, la masse volumique est généralement donnée à 15 °C.

Dans le cas des fiouls lourds, la masse volumique est déterminée à une température supérieure au point d'écoulement et ramenée à la température de référence de 15 °C.

La masse volumique varie avec la température selon la formule suivante :

$$\rho_t = \frac{\rho_{15}}{1 + K(t-15)}$$

Dans laquelle :

ρ_t = masse volumique à la température considérée

ρ_{15} = masse volumique à la température 15 °C

K = coefficient moyen pour des écarts de température importants
par exemple t = 60 °C

MASSE VOLUMIQUE ρ_{15}	925	950	975	1000	1025
K.10 ³	0,777	0,749	0,724	0,702	0,678

I – 2 – MATERIEL DE STOCKAGE, DE TRANSFERT ET DE PREPARATION**Mise en œuvre des fiouls :****- Stockage :**

Le stockage des fiouls se fait dans des réservoirs en tôle d'acier soudé, en général de type horizontal pour les capacités inférieures à 50 m³ et de type vertical pour les capacités supérieures.

Les caractéristiques de construction de ces réservoirs et leurs conditions d'emplacement font l'objet de règlements administratifs.

Ils sont généralement munis d'un système de réchauffage, pour le fioul lourd.

- **Le réchauffeur de masse :**

Ce dispositif, placé au fond du bac ou à la périphérie, permet de réchauffer et de maintenir la masse du produit à une température supérieure à son point d'écoulement.

Le réchauffeur d'aspiration permet le pompage.

Ce réchauffage peut se faire par :

- de la vapeur
- de l'eau surchauffée
- ou à l'électricité

- **Présence d'eau :**

Les teneurs en eau à la livraison sont très faibles.

Si la présence d'eau est faible et répartie de façon homogène, elle ne présente pas de problèmes particuliers.

L'aspiration d'un fioul contenant des "poches d'air" hétérogène entraîne inévitablement des problèmes d'exploitation :

- cavitation de pompe
- vaporisation
- extinction de flamme

De plus, il peut y avoir formation de boues qui vont se déposer, risquant d'être entraînées au pompage et de colmater les filtres.

L'eau doit être extraite par des purges périodiques.

- **Le transfert :**

Le transfert du fioul vers la chaufferie se fait au moyen de la pompe de gavage. Celle-ci permet d'alimenter le groupe de préparation.

Ce dernier comporte principalement les filtres – à froid et à chaud – et le réchauffeur.

Celui-ci permet de porter le fioul à la température qui le rendra suffisamment fluide pour sa pulvérisation aux brûleurs.

Le fioul est repris à l'entrée au groupe de préparation par pompe H.P. Sa pression est portée à une valeur supérieure à celle de fonctionnement des brûleurs. Elle est réglée par un détendeur à la valeur d'admission à ces derniers.

- **La combustion des fiouls :**

Les fiouls contiennent les trois éléments combustibles :

- carbone
- hydrogène
- soufre

Quelques sédiments, et, parfois, des traces d'eau non combustibles existent également.

En combustion oxydante ou avec excès d'air, les gaz de combustion contiennent :

- du dioxyde de carbone
- des oxydes de soufre
- de la vapeur d'eau
- de l'oxygène
- de l'azote

Deux remarques fondamentales avant d'aborder la réalisation pratique de la combustion :

- 1 litre de fioul nécessite approximativement 13 000 l d'air en combustion neutre.
Le taux de CO₂ est compris entre 15,5 et 16%, suivant la nature du fioul.
Dans la pratique, cette teneur est comprise entre 13 et 14%.
- la combustion d'un liquide s'opère toujours en phase vapeur.

I – 3 – EXPLOITATION DES INSTALLATIONS DE FIOULS LOURDS

- Pulvérisation et vaporisation :

Pour les fiouls lourds, la vaporisation résulte presque instantanément de la pulvérisation réalisée par les brûleurs.

Une bonne pulvérisation dépend de trois facteurs principaux, à savoir :

- s'effectuer dès la sortie de la tête du brûleur,
- permettre des particules très fines.

Ces fines particules doivent s'écarter les unes des autres au fur et à mesure qu'elles avancent dans le foyer.

Cette bonne pulvérisation dépend de trois facteurs principaux, à savoir :

- la fluidité du combustible liquide,
- la pression d'admission de ce combustible,
- le réglage et l'état du brûleur.

- Fluidité :

Pour obtenir cette viscosité, il est nécessaire de chauffer le fioul à une certaine température qu'il est indispensable de connaître.

Elle varie environ entre 120 et 150 °C.

- Pression :

Elle doit être conforme aux valeurs de fonctionnement données pour le type de brûleur utilisé.

Elle doit être régulière pour que, débit, pulvérisation et combustion, soient réguliers.

- Réglage et état du brûleur :

La nécessité d'un réglage correct va de soi.

La pulvérisation devient rapidement mauvaise si les orifices de passage sont déformés ou décentrés ou si les canaux d'arrivées comportent des érosions, des bavures ou des dépôts de coke, même faibles.

Les défauts des pièces ne sont pas toujours bien visibles et ne sont parfois décelés qu'à la loupe.

La vaporisation se produit d'autant plus vite que la pulvérisation est fine et que la température de l'enceinte est élevée

Pour la favoriser, on aménage au débouché des brûleurs des ouvreaux en maçonnerie réfractaire qui rayonnent leur chaleur en direction du jet de fioul pulvérisé.

Si la vaporisation est trop lente, des particules liquides peuvent atteindre les parois du foyer et ne pas brûler complètement.

- Inflammation et combustion :

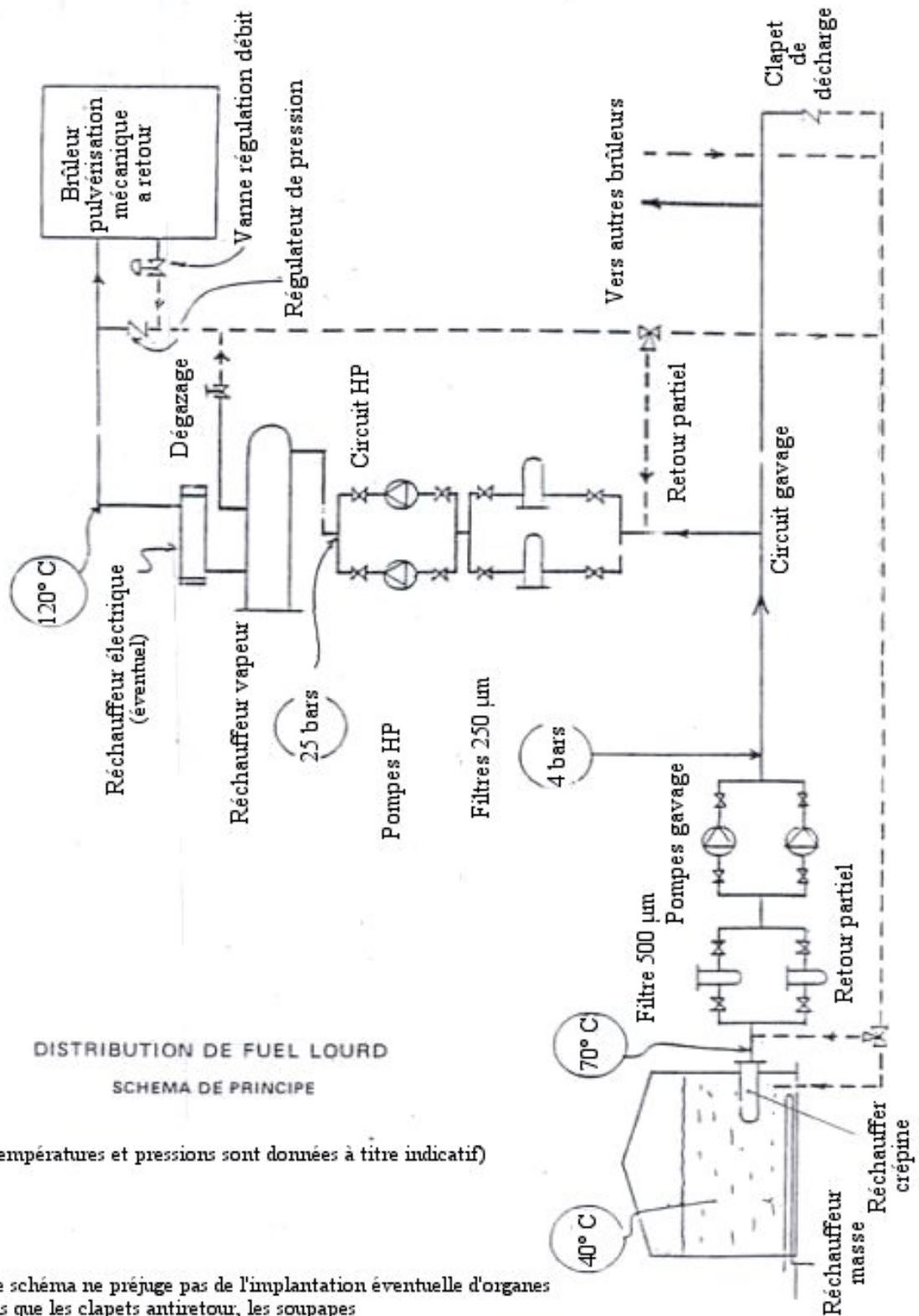
La température d'inflammation est relativement basse de l'ordre de 200° et se produit facilement, pourvu qu'il y ait de l'air comburant.

La combustion amorcée se poursuit dans de bonnes conditions si :

- la température du foyer est suffisamment élevée,
- l'air comburant est bien dosé,
- son mélange avec le combustible est homogène.

Cette dernière condition est de mieux en mieux réalisée sur les brûleurs modernes où l'on a convenablement divisé l'air comburant en air primaire et air secondaire.

Des réglages précis peuvent être faits, ce qui permet de bien régler la combustion.



II – LA TECHNOLOGIE DES BRULEURS FIOULS LOURDS

CHAPITRE II : LA TECHNOLOGIE DES BRULEURS FIOULS LOURDS

Deux remarques fondamentales avant d'aborder la réalisation pratique de la combustion du fioul lourd :

- 1 litre de fioul nécessite approximativement 10 000 litres d'air en combustion neutre,
- la combustion d'un liquide s'opère toujours en phase vapeur.

Pour une bonne combustion il faudra donc :

- augmenter la surface spécifique du liquide (c'est le rôle de la pulvérisation),
- accélérer sa vaporisation,
- le mélanger intimement avec l'air.

Dans la pratique, ces opérations sont réalisées par le brûleur, sans oublier l'importance de son environnement : le foyer qui lui est associé.

A – La pulvérisation :

Pour vaincre les forces de cohésion du liquide, qui dépendent en partie de sa viscosité, il faudra fournir une certaine quantité d'énergie.

Les différents modes de pulvérisation que l'on rencontre, correspondent donc à des apports d'énergie sous formes différentes :

II – 1 – LA PULVERISATION MECANIQUE :

C'est la plus répandue car peu coûteuse. Elle nécessite la mise en pression du liquide, et un réchauffage plus important.

Deux paramètres importants sont à retenir :

- La viscosité

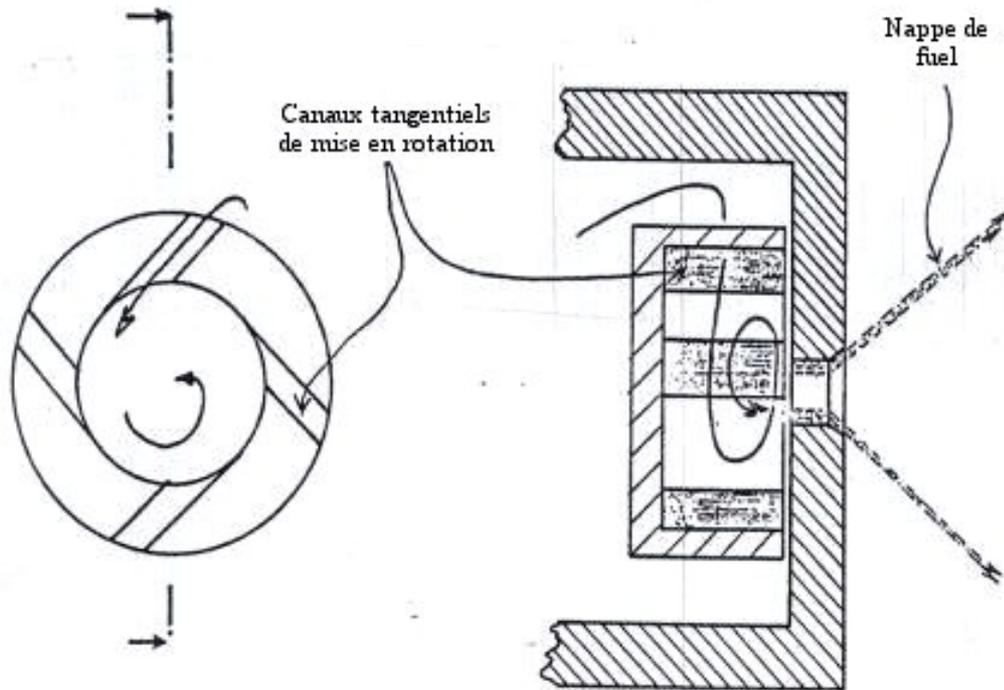
La taille des gouttelettes ainsi que le débit de fioul augmentent avec la viscosité, d'où l'intérêt de travailler à viscosité constante, en accord avec les recommandations des constructeurs de brûleurs.

Influence de la viscosité sur le débit du brûleur

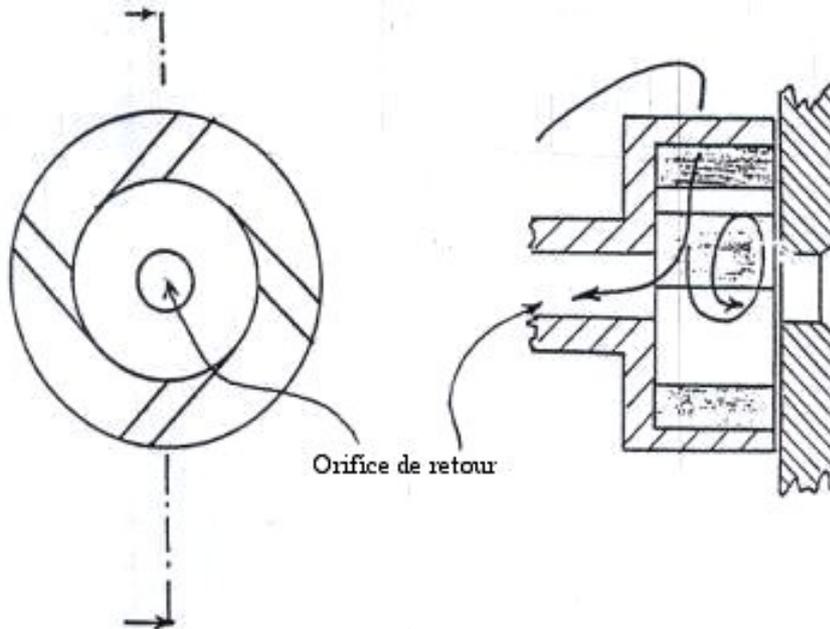
Le débit augmente avec la viscosité.

DISPOSITIFS DE PULVERISATION MECANIQUE

PASTILLE D'UN BRULEUR INDUSTRIEL SANS RETOUR



PASTILLE D'UN BRULEUR INDUSTRIEL AVEC RETOUR



Le fioul sous pression pénètre par l'intermédiaire de canaux tangentiels dans la chambre de rotation du gicleur. Il y a formation d'une veine d'air dont l'épaisseur croît avec la vitesse de rotation du fioul et en raison inverse de la viscosité.

Il en résulte que plus le fioul est fluide et plus le diamètre de la veine d'air augmente ce qui entraîne une diminution du débit de fioul.

- **La pression**

Le débit variant comme \sqrt{P} , les possibilités de modulation de débit sont donc limitées sur un brûleur sans retour, c'est pourquoi le brûleur avec retour est davantage utilisé dans l'industrie.

Pour améliorer la stabilité de la pulvérisation, on imprime au fioul un mouvement de rotation, par des canaux tangentiels, ce qui favorise également le mélange du fioul avec l'air.

Matériellement, deux dispositifs sont courants :

- **les gicleurs** : généralement utilisés pour le fioul domestique.
- **Les pastilles** : avec ou sans retour ; c'est le cas le plus fréquent dans l'industrie.

II – 2 – LA PULVERISATION PAR COUPELLE ROTATIVE :

Le cône du fioul est réalisé ici par la projection du fioul sur une coupelle tournante dont la vitesse de rotation détermine l'épaisseur de la nappe (3 à 10 000 tours par minute).

La nappe ainsi formée est brisée par une partie de l'air mis en pression par un ventilateur. La pression du fioul peut donc être très modérée (4 à 5 bar). De plus, le rayonnement de la flamme préchauffe le fioul au cours de son passage dans la coupelle rendant inutile un réchauffage initial important.

II – 3 – LA PULVERISATION PAR AIR :

C'est l'impact de l'air sur le jet de fioul qui assure son atomisation. La force d'impact varie comme le produit débit x vitesse, le débit d'air mis en jeu varie donc avec la pression.

Ce sont des brûleurs simples, robustes, dont le débit unitaire est faible. C'est pourquoi ils sont beaucoup utilisés pour les fours de métallurgie. Leur débit peut subir une modulation importante.

II – 4 – LA PULVERISATION VAPEUR :

La pulvérisation vapeur pure s'apparente à la pulvérisation par air, mais les débits de vapeur nécessaires rendent le procédé coûteux.

On préfère la pulvérisation mécanique assistée à la vapeur. Le fioul subit une pulvérisation mécanique classique, la nappe résultante est brisée par des jets de vapeur. Le mélange est injecté dans la chambre.

Cette variante nécessite cependant 5 à 15% de vapeur.

Ce mode de pulvérisation est très efficace car il permet de réduire le niveau d'imbrûlés solides.

B – Le mélange avec l'air :

Chaque molécule de fioul doit pouvoir s'unir avec la quantité d'oxygène nécessaire.

Rappelons les différents systèmes de mélange :

- brûleurs à mélange naturel,
- brûleurs à disque de stabilisation,
- brûleurs à mise en rotation de l'air,
- brûleurs à modulation de flamme (air primaire – air secondaire).

Il faut noter que ces brûleurs sont d'autant plus coûteux que la technologie est complexe mais ils permettent d'atteindre des combustions hautement performantes, avec de très faibles excès d'air (de l'ordre du pour-cent dans les chaudières très performantes).

C – Autres fonctions du brûleur :

L'allumage :

- Allumage électrique,
- Flamme pilote au gaz
- Torche manuelle pour certains

Le contrôle de la flamme :

- Cellule à détection de rayonnement U.V.
- Cellule à scintillation, à ionisation...

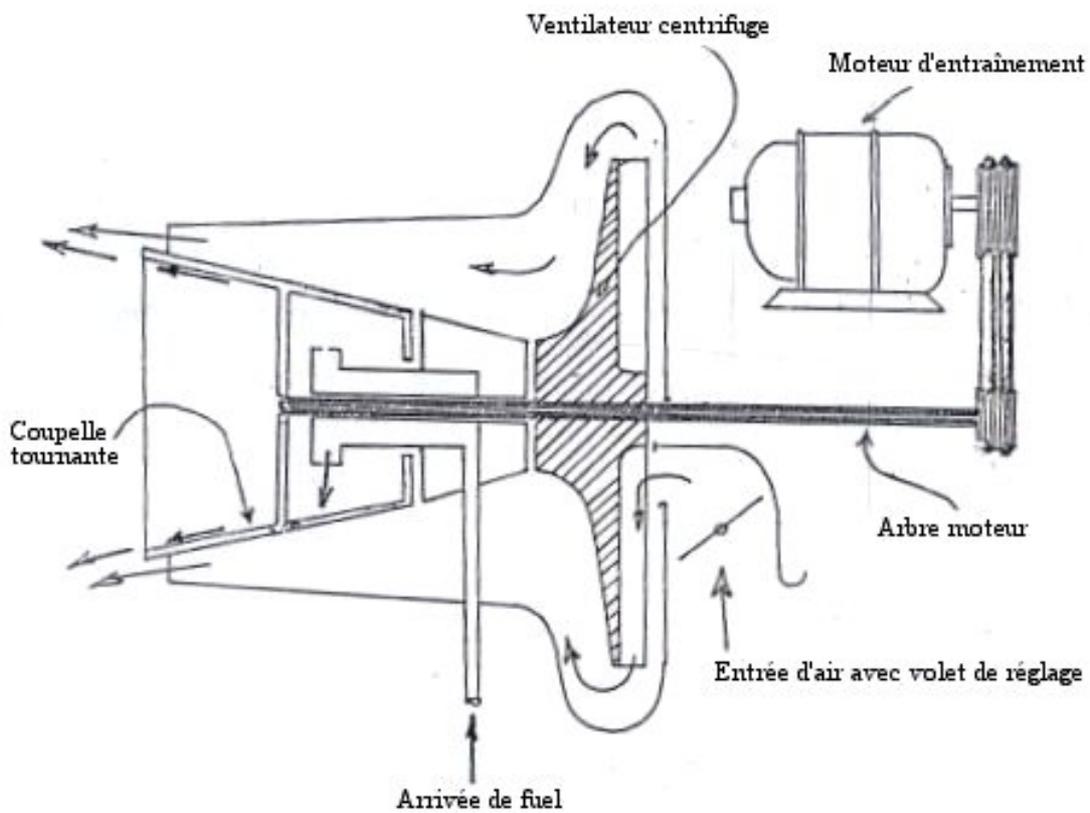
Réglage du rapport air-fioul

C'est un paramètre très important car en dépendant

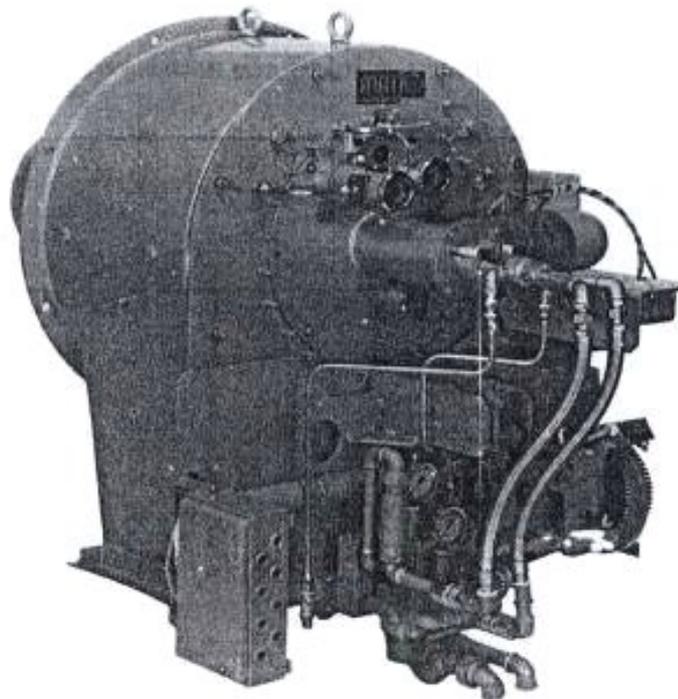
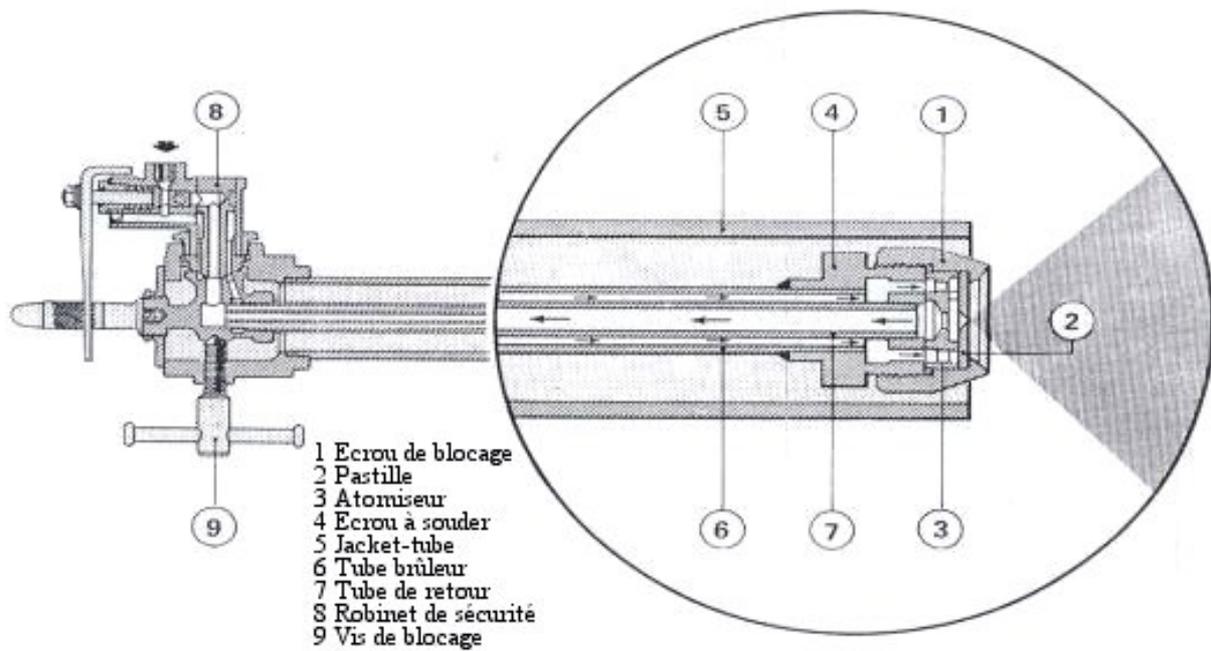
- La qualité de la atmosphère (oxydante ou réductrice)
- Le rendement des fours et générateurs
- Les émissions d'imbrûlés et autres polluants

BRULEUR A PULVERISATION PAR COUPELLE ROTATIVE

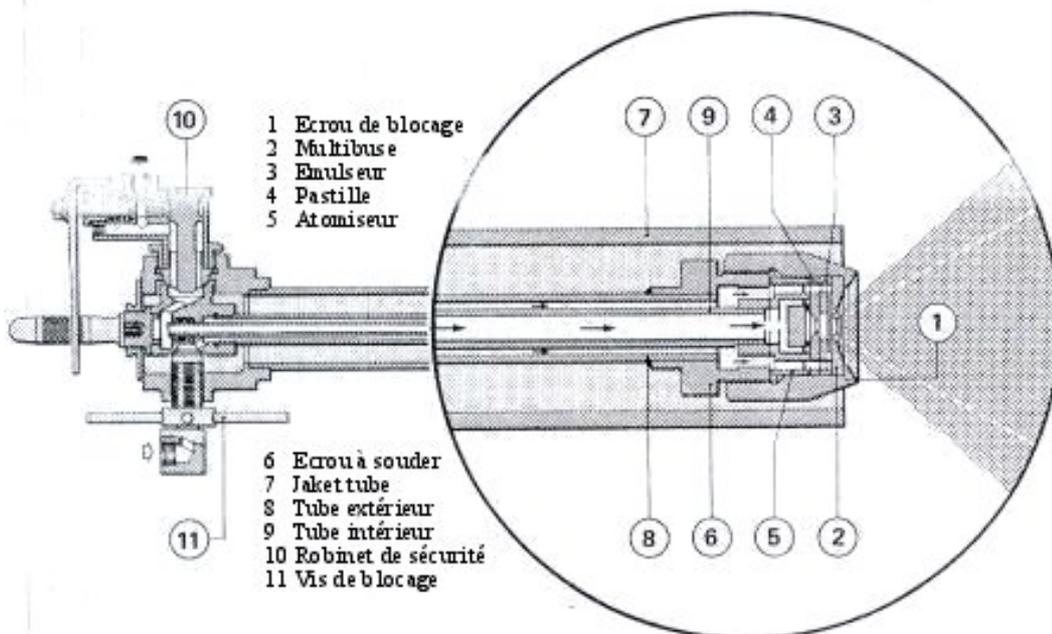
SCHEMA DE PRINCIPE



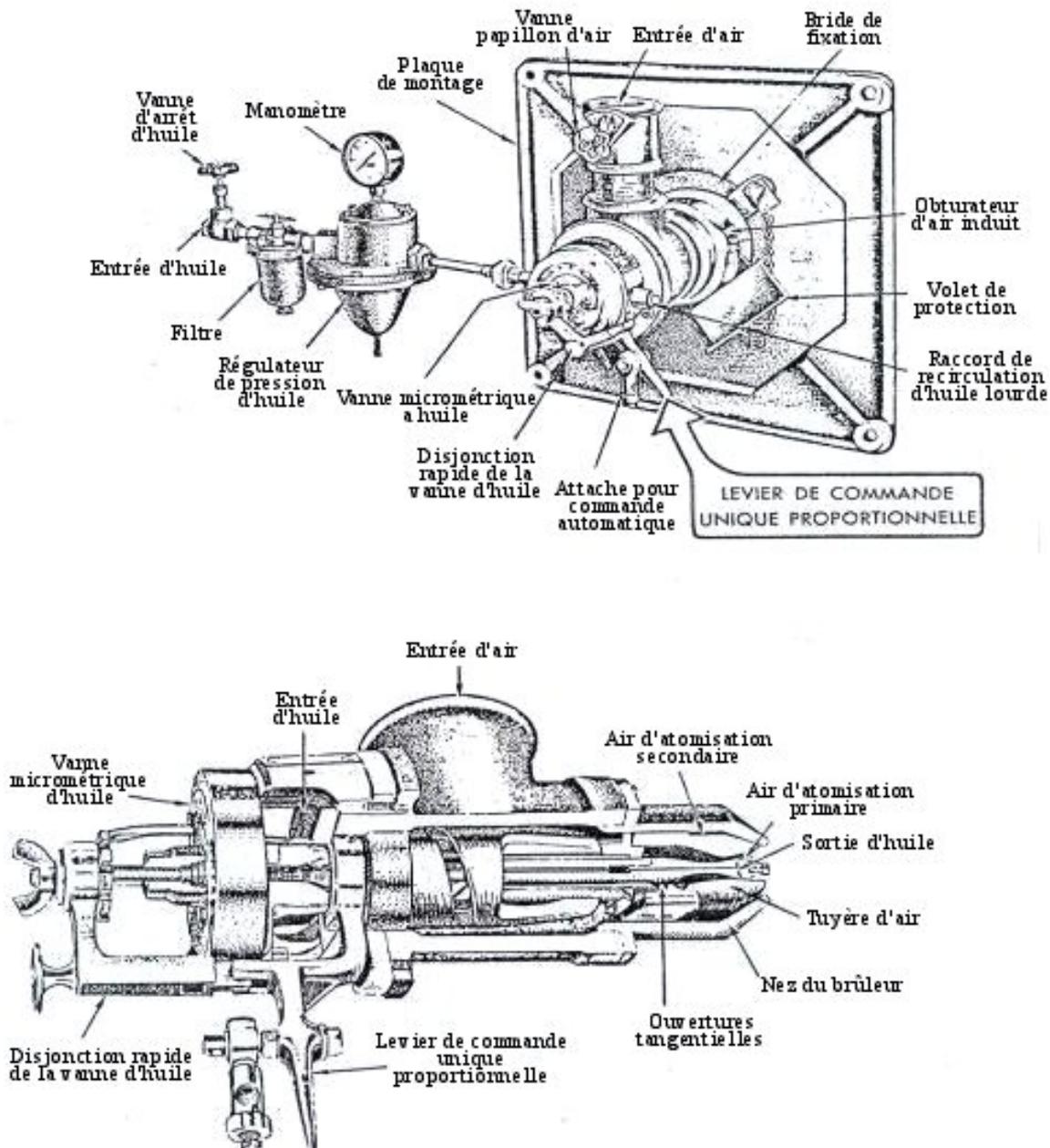
BRULEUR A PULVERISATION MECANIQUE A RETOUR



BRULEUR A PULVERISATION MECANIQUE ASSISTEE A LA VAPEUR

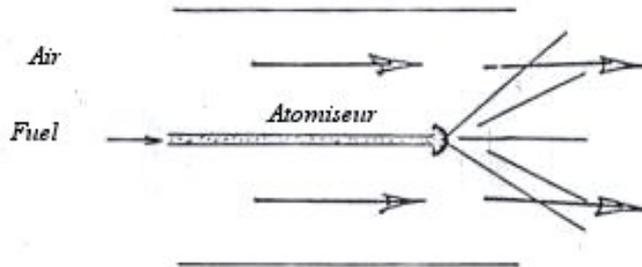


BRULEUR A PULVERISATION PAR AIR



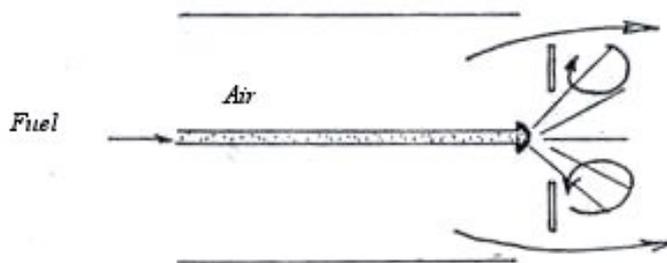
DISPOSITIFS DE MELANGE ENTRE L'AIR ET LE FUEL

BRULEUR A SIMPLE MELANGE



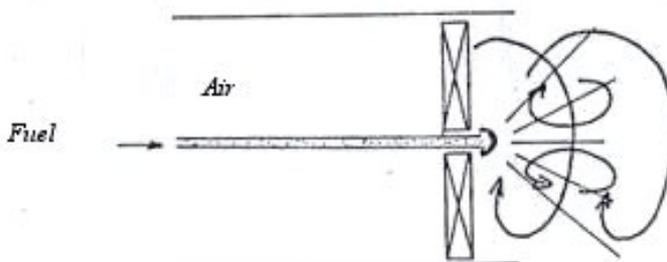
Il n'y a pas d'accroche-flamme.
Risques de soufflage de la flamme et d'instabilités.

BRULEUR A DISQUE DE STABILISATION



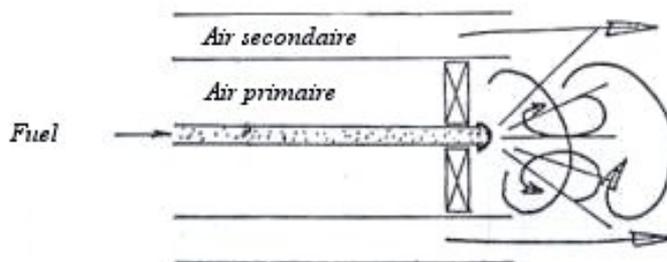
L'obstacle crée un tourbillant de recirculation qui stabilise la flamme et l'alimente de gaz chauds.
On peut régler la position du disque.

BRULEUR MUNI D'AILETTES DE MISE EN ROTATION



L'effet précédent est fourni par une mise en rotation de l'air. Le taux de rotation est réglable.

BRULEUR A MODULATION DE FLAMME



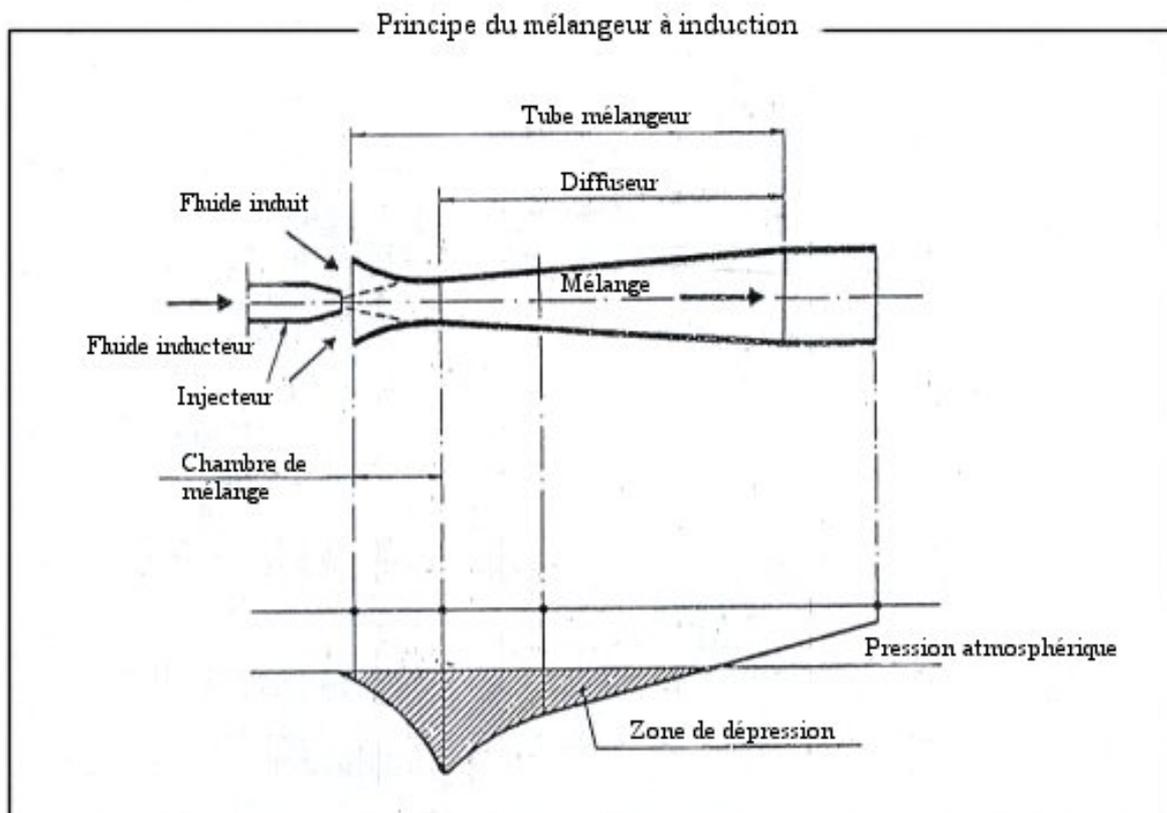
On peut régler la répartition entre air secondaire (axial) et air primaire (en rotation) et agir ainsi sur la forme de la flamme : longue et molle (air secondaire) courte et dure (air primaire).

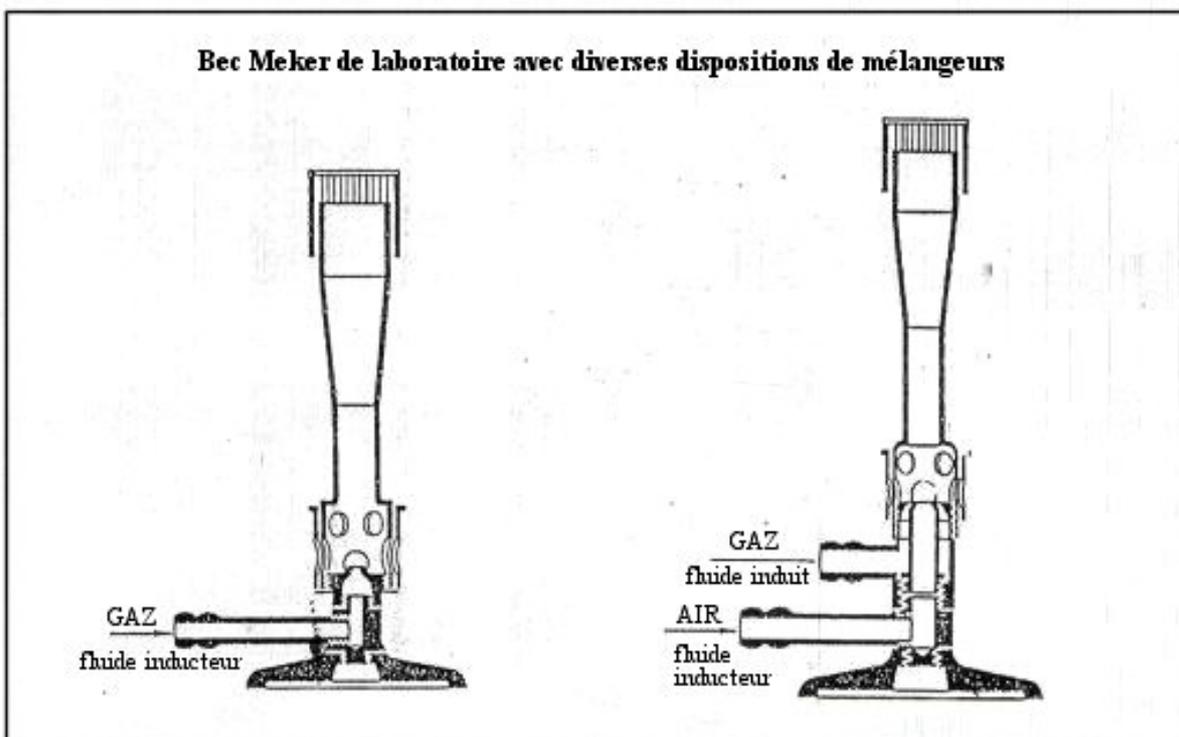
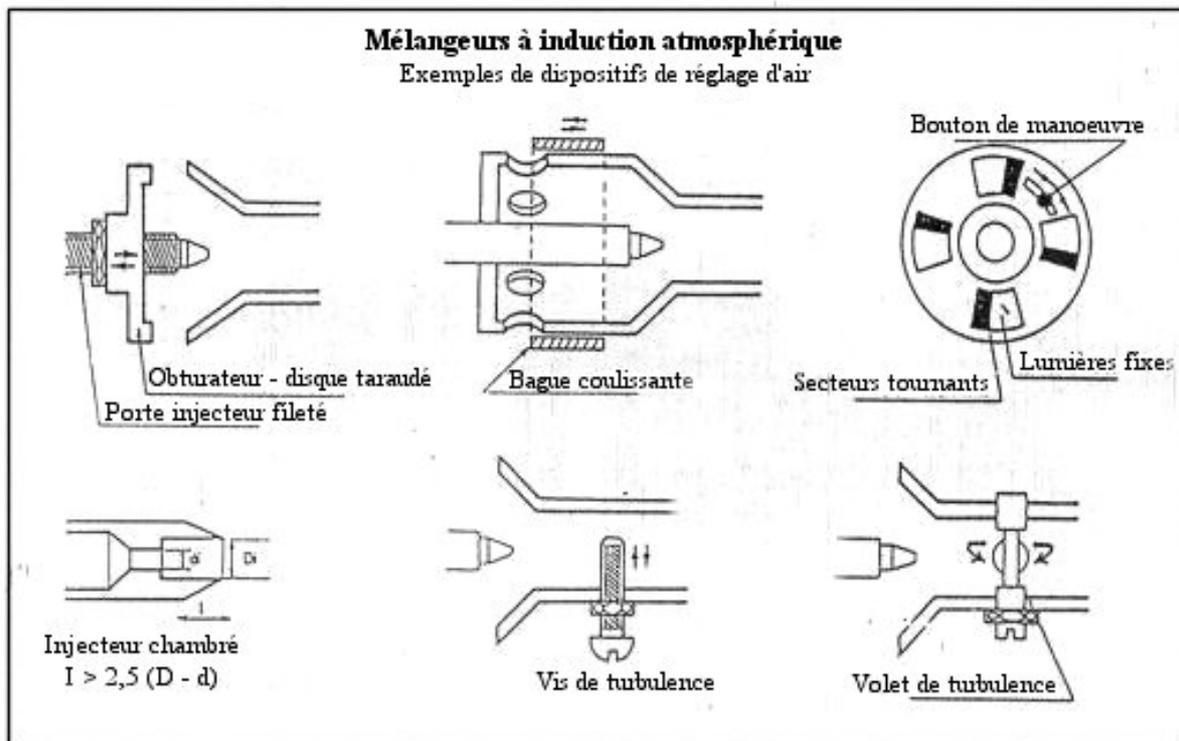
III – LA TECHNOLOGIE DES BRULEURS A GAZ

CHAPITRE III : TECHNOLOGIE DES BRULEURS A GAZ

III – 1 – GENERALITES SUR LES BRULEURS A GAZ INDUSTRIELS

Tout appareil d'utilisation comporte un ou plusieurs brûleurs à gaz. Un brûleur permet de mettre en présence le gaz et le comburant (air ou oxygène) pour assurer la combustion qui se manifeste en général sous forme d'une flamme d'allure variable suivant la nature du brûleur ; tout brûleur comporte un ou plusieurs orifices de sortie à partir desquels la combustion doit normalement s'amorcer.





Les conditions de mélange du gaz et du comburant sont multiples et dépendent de la nature de l'appareil sur lequel les brûleurs sont installés.

Les appareils d'usage domestique – dont peuvent s'inspirer cependant des appareils à usage commercial ou industriel – comportent des brûleurs de conception simple.

Avec les gaz manufacturés, on avait recours pour certains appareils (chauffe-eau, chauffe-bains) à des brûleurs sans mélange préalable, dits brûleurs à "flamme blanche". Le gaz, s'échappant par des petits trous sous forme de jets minces, trouvait dans l'atmosphère l'air nécessaire à sa combustion. Avec les gaz naturels et les GPL, de tels brûleurs ne peuvent assurer une combustion satisfaisante du gaz.

On a alors recours aux brûleurs à mélange préalable. Dans les modèles les plus simples, valables pour tous usages, le gaz et l'air sont mélangés dans des proportions définies avant la sortie du brûleur. Généralement, le gaz arrive à l'appareil avec une certaine pression à partir d'un branchement sur réseau ou d'une bouteille. Le gaz s'échappant par un injecteur crée un jet qui entraîne une partie de l'air ambiant introduit par des orifices dits « d'air primaire ». à la sortie du brûleur le mélange trouve, si nécessaire, un complément d'aération constitué par l'air dit « secondaire », ces brûleurs sont appelés « atmosphériques » ou « à flamme bleue » pour tenir compte de l'aspect de la flamme. Celle-ci comporte en effet un front net de flamme bleutée de forme conique. La hauteur du cône bleu dépend de plusieurs facteurs dont la vitesse fondamentale de déflagration. Quand la quantité d'air primaire est insuffisante pour la combustion en donnant naissance à un panache de flamme de diffusion.

Quand le front de flamme est stabilisé, sa vitesse relative est exactement opposée à celle du courant gazeux.

Si la vitesse du mélange devient trop élevée, la flamme décolle et devient aérienne, on a atteint la vitesse de soufflage.

Inversement, si la vitesse descend au-dessous d'une certaine valeur, dite vitesse critique de retour de flamme, la flamme remonte le courant gazeux à l'intérieur du brûleur et provoque la prise de feu à l'injecteur.

Ces vitesses caractéristiques :

- Vitesse fondamentale de déflagration
- Vitesse de soufflage
- Vitesse critique de retour de flamme dépendent de la nature du gaz, du taux d'aération, de la température, du régime d'écoulement (turbulent ou laminaire) et même du diamètre des orifices ou tubulures.

La vitesse de déflagration des gaz courants croît dans l'ordre suivant : gaz naturel, propane, butane, gaz manufacturé, hydrogène. Elle est très importante pour l'hydrogène.

Avec le gaz manufacturé, on redoute plus la prise de feu à l'injecteur que le soufflage, celui-ci étant plus courant avec le gaz naturel, le propane ou le butane.

Des améliorations dans la tenue des flammes ont pu être obtenues avec les brûleurs à flamme pilote ou autostabilisé grâce à la présence de flammes secondaires de faible débit qui entourent la flamme principale.

III – 2 – ROLES DES BRULEURS INDUSTRIELS A GAZ

Généralités

Dans les brûleurs industriels, et en particulier pour ceux qui sont destinés à obtenir des hautes températures, les solutions de mélange gaz-comburant (air ou oxygène) sont multiples et dépendent de la nature des appareils. D'autre part, certains appareils exigent des brûleurs très particuliers adaptés à l'opération à effectuer (chalumeaux, par exemple).

Les différents types de brûleurs industriels répondent à sept critères différents :

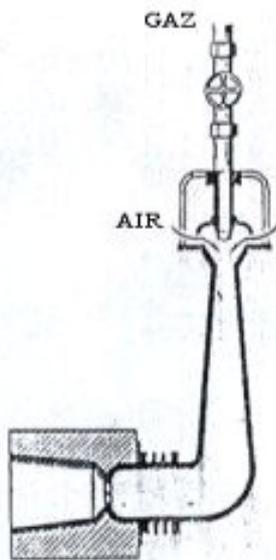
1. Mode de formation du mélange air-gaz.
Mélange préalable total - mélange préalable partiel - sans mélange préalable.
2. Catégorie de pression en gaz et en air.
Gaz à haute pression, à basse pression, à la pression atmosphérique, air sous pression ou à la pression atmosphérique.
3. Mode d'écoulement du mélange aux orifices de sortie.
Écoulement par un ou plusieurs orifices - écoulements parallèles ou convergents ou giratoires, à travers des réfractaires poreux, sur rotor.
4. Mode de stabilisation de la flamme.
Par flammes auxiliaires - par recirculation des gaz chauds - par un obstacle - par une surface réfractaire.
5. Localisation de la combustion.
Flammes libres - dans un réfractaire conique - au contact d'une masse de réfractaires - sur une surface réfractaire - dans un tunnel de combustion réfractaire - dans un tube métallique ou céramique - au contact d'une masse catalytique.
6. Préchauffage ou non de l'air de combustion.

La multiplicité des combinaisons des sept critères permet d'obtenir une variété de brûleurs capables de répondre à toutes les caractéristiques imposées aux appareils d'utilisation

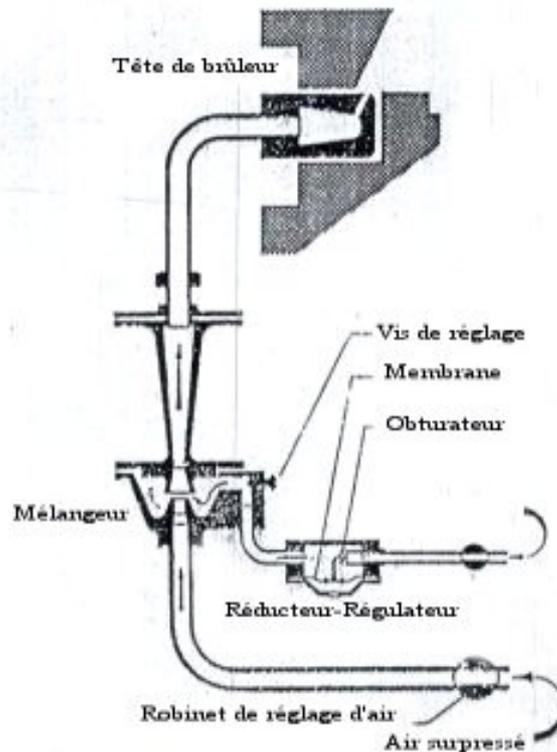
On peut obtenir des flammes de formes, longueurs et températures variées en jouant éventuellement sur les organes de réglage existants. Des flammes de forme originale peuvent être obtenues plates, étalées, ou en forme de boule.

Pour obtenir les pressions désirées pour le gaz et pour l'air, on a recours à des surpresseurs ou des détendeurs adéquats, pour le gaz, éventuellement, la pression de distribution simplement.

Les brûleurs sont munis souvent de dispositifs réglables et sous la dépendance, éventuellement, de systèmes de régulation. On peut varier les rapports air-gaz pour obtenir des produits de combustion neutres, oxydants ou réducteurs suivant la nature de l'atmosphère nécessitée par l'usage en cause.

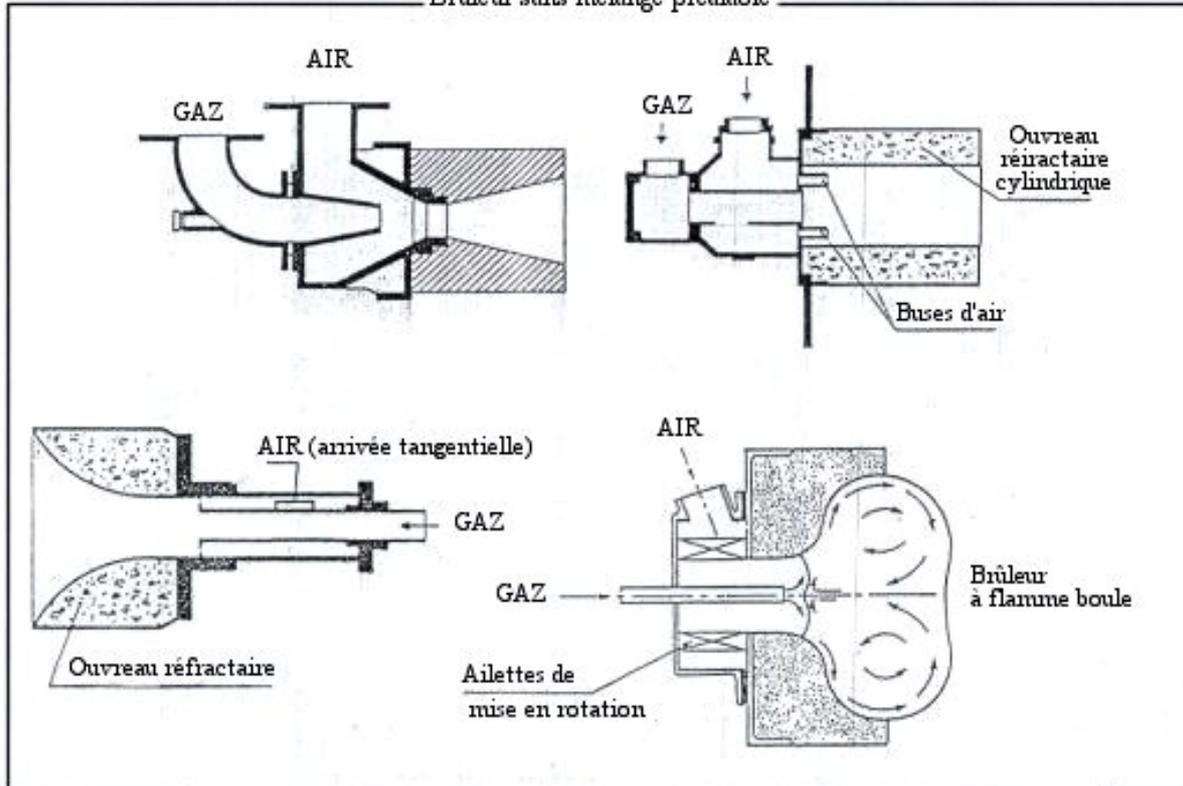


Brûleur atmosphérique à induction à gaz "supressé" également appelé "à haute pression"

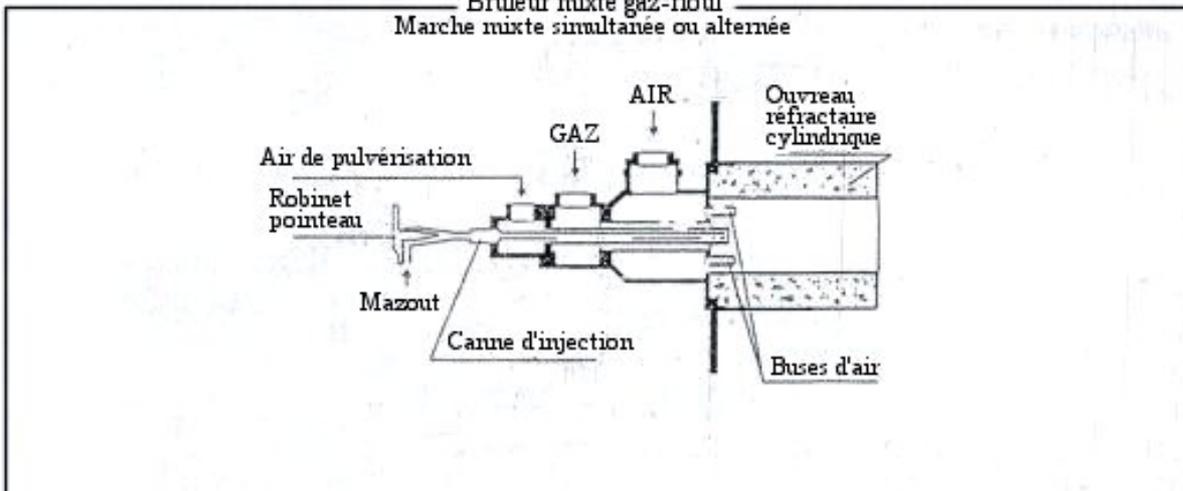


Brûleur à air soufflé ou à basse pression La pression du gaz est ramenée à 0 (pression atmosphérique) par le régulateur, ce qui maintient constant le rapport air/gaz quel que soit le débit demandé

Brûleur sans mélange préalable



Brûleur mixte gaz-fioul
Marche mixte simultanée ou alternée



III – 3 – CHOIX D’UN TYPE DE BRULEUR A GAZ

Grâce aux différents modèles des brûleurs dont on vient de parler, le choix d’un brûleur adapté à tel genre d’installation dépend du matériel à équiper c’est à dire de sa puissance.

Pour les faibles puissances, on est amené à utiliser les brûleurs à flammes de diffusion sans ou avec peu d’aération primaire.

Pour les puissances moyennes et fortes, on a recours soit à des brûleurs sans mélange préalable (mélange au nez), où le débit des deux fluides peut être accru selon les besoins, soit à des brûleurs à mélange préalable du type à induction par le gaz ou à air soufflé. La fixation du taux d’aération permet d’obtenir le genre de flamme qui convient.

IV – LE CHARBON

CHAPITRE IV : LE CHARBON

IV – 1 – LES CARACTERISTIQUES DES CHARBONS

Ce sont essentiellement des combustibles végétaux, soit sous leur forme actuelle (bois, bagasse, etc....) soit sous forme fossile où ils deviennent charbon (les tourbes lignites, houilles et anthracite), ces derniers proviennent de la décomposition de végétaux aux cours des époques géologiques. Plus le combustible est ancien, plus sa teneur en carbone augmente tandis que diminuent ses teneurs en hydrogène et en oxygène, c'est le cas de l'anthracite.

Tout combustible solide est constitué :

- De matière organique dont les principaux constituants sont le carbone, l'hydrogène et l'oxygène auxquelles s'ajoutent en proportion faible le soufre et l'azote.
- De matières minérales souvent assimilées aux cendres, ce sont des mélanges de minéraux complexes (argiles, schistes, etc....).
- D'eau d'humidité, on distingue l'eau de mouillage appelée humidité externe, liée aux conditions de traitement et de stockage du combustible et l'eau de rétention appelée humidité interne, retenue au sein même de la matière organique liée à la nature du combustible.

La composition chimique des combustibles solides varie en fonction de leur origine et de leurs conditions de formation. Deux méthodes sont utilisées pour caractériser et analyser un combustible solide.

1- L'analyse chimique élémentaire qui consiste à :

- Brûler complètement, en présence d'oxygène par, un échantillon de charbon sec (si possible dépourvu de tout élément minéral)
- Mesurer ensuite les pourcentages du gaz carbonique (CO_2) ; de la valeur d'eau (H_2O), de l'anhydride sulfurique (SO_3), de l'oxygène (O_2) et l'azote (N_2) présents dans les fumées
- Déduire les pourcentages en carbone (C), en hydrogène (H_2), en soufre (S), en Oxygène (O_2) et en azote (N_2) contenus dans le charbon.

A titre d'exemple, on donne la composition moyenne d'un charbon (matières sèches)

{	Carbone	: 87%
	Hydrogène	: 5,2%
	Soufre	: 5,2%
	Oxygène	: 5,8%
	Azote	: 1,5%

L'analyse chimique élémentaire des combustibles solides nécessite un matériel complexe, on pratique couramment l'analyse sommaire ou immédiate d'exécution rapide et simple.

- 2- L'analyse sommaire ou immédiate qui consiste à chauffer à l'abri de l'air (pyrolyse) un échantillon représentative du charbon de masse P.
- Vers 105 à 110 °C, le charbon perd son humidité, il reste alors une masse P₁ de charbon sec. On détermine la teneur en eau :

$$H_2O = \frac{P - P_1}{P}$$

Pendant la pyrolyse, le charbon s'échauffe et au dessus d'une certaine température, de l'ordre de 350 °C, il se dégage des constituées de gaz essentiellement (H₂, CH₄, CO, CO₂). La quantité de gaz dégagée est une caractéristique importante du charbon.

- Enfin de chauffe, vers 1000 °C, il se forme un résidu solide, le coke de masse P₂. on détermine l'indice de matières volatiles : (indice de mat.vol.= $\frac{P_1 - P_2}{P}$)
- Brûler en fin le coke en présence de l'oxygène, il reste un résidu incombustible, les cendres de masse P₃. La partie combustible du coke est appelée carbone fixe.

On détermine alors la teneur (CO) en carbone fixe.

$$(CO) = \frac{P_2 - P_3}{P} \text{ et la teneur en cendre (cendre) } = \frac{P_3}{P}$$

Avec le dégagement des matières volatiles, on constate au cours de l'échauffement de certains charbons se ramollissent passagèrement, ce qui permet aux grains de s'agglutiner et de gonfler. Ce phénomène peut modifier la couche de charbon en combustion. Cette propriété est caractérisée par l'indice de gonflement.

On notera par ailleurs que la classification des combustibles solides repose généralement sur l'indice des matières volatiles et sur l'indice de gonflement.

IV – 2 – LES BRULEURS A CHARBON

La combustion d'un charbon peut se décomposer en quatre phases, deux phases endothermiques et deux phases exothermiques :

- Evaporation de l'humidité
- Distillation des matières volatiles
- Combustion des matières volatiles
- Combustion des matières organiques solides
(carbone fixe)

la chaleur nécessaire pour les deux premières phases doit être apportée par les deux suivantes. Il faut donc, soit un mélange intime de braises de coke en ignition avec les

combustibles frais, ce qui est le cas des foyers à combustion en masse et à combustion sur grille mécanique, soit une concentration importante des poussières près du brûleur dans une zone à très haute température, pour permettre la combustion rapide du méthane et l'embrasement des grains de coke pulvérisé.

Nous allons examiner les diverses méthodes de préparation et de combustion sur grille, en précisant les conditions particulières à adopter pour les anthracites et charbons maigres :

- Température élevée dans la zone d'allumage
- Temps de séjour des grains dans le foyer plus important que pour les autres charbons
- Grande finesse du charbon pulvérisé
- Bonne concentration du charbon pulvérisé dans l'air primaire

Rapport important entre air secondaire et air primaire

Foyer à grille

De nombreux foyers à grilles ont été installés pour brûler des charbons maigres ou des anthracites, ces combustibles ayant l'avantage de donner des fumées incolores sans suies ni goudrons.

L'anthracite, quoi que dur, éclatant facilement en fines poussières lors du concassage, les grilles supports de combustion doivent éviter le tamisage, c'est à dire le passage des grains à travers les barreaux.

Sur grille, les braises se consomment lentement et ceci nécessite des foyers de grande longueur avec des voûtes de rayonnement, à l'amont de la grille, une voûte pièces réfractaires permet de préchauffer le combustible avant sa distillation et son embrasement, à l'arrière couvrent près de 2/3 de la longueur, une longue voûte également garnie de réfractaires maintient une zone à haute température où la consommation des braises s'achève.

Pour éviter les envolées, une certaine quantité d'air peut être injectée à haute vitesse au dessus de la voûte avant et parfois également au dessus de la voûte arrière, ce qui permet d'incinérer les poussières imbrûlées. De plus les poussières récoltées sous dépoussiéreur sont réinjectées dans la zone à haute température pour finir leur incinération. L'air de combustion injectée essentiellement sous la grille doit être préchauffé à des températures de 160 °C à 190 °C.

Chauffe au pulvérisé

Les anthracites, à cause de leur lenteur de combustion due à leur faible teneur en matières volatiles, sont difficiles à allumer et leurs une zone d'allumage à haute température et être suffisamment grands pour permettre le développement des

flammes. Les foyers à chauffe tangentielle sont acceptables pour les charbons peu maigres et les foyers à chauffe verticale ont été inventés pour la combustion des anthracites.

- **Chauffe tangentielle :** Dans les foyers à chauffe tangentielle, le combustible est injecté dans les angles et se développe en tourbillonnant dans le foyer, de telle sorte que chaque particule de charbon peut suivre un trajet hélicoïdal ascendant et avoir ainsi le temps avant de brûler d'atteindre les panneaux des surchauffeurs.
- **Chauffe verticale :** Dans la chauffe verticale, le mélange air primaire/charbon est injecté verticalement, à faible vitesse dans le foyer. La voûte support du brûleur, le mur avant et les murs latéraux sont garnis de produits réfractaires pour créer une ambiance à haute température qui facilite la combustion des particules de charbon, la combustion des matières volatiles et l'inflammation des grains de coke.

La flamme se développe d'abord en un trajet vertical ; au fur et à mesure de l'allègement des particules par disparition du carbone et de leur échauffement dans la flamme, leur vitesse diminue. Quelques mètres en dessous de l'injection dans la flamme, leur vitesse diminue. Quelques mètres en dessous de l'injection, un rebroussement de flammes se produit, les particules continuant à brûler dans la trajet ascendant. La combustion se termine dans le col situé au-dessus et entre les voûtes.

Ainsi la flamme, par son double trajet, est très longue et la combustion peut s'accomplir lentement et sûrement.

IV – 3 – PREPARATION DU CHARBON

Dans le cas de la combustion du charbon sur grille, il n'y a pas de préparation spéciale du combustible qui est introduit directement sur la grille par une trémie de chargement. Par contre dans le cas d'une chauffe au charbon pulvérisé, il est nécessaire de disposer d'une installation de broyage. Cette installation devra permettre d'obtenir la finesse de grains désirée en consommant le minimum d'énergie et avec les frais d'entretien les plus réduits possibles.

IV – 4 – LES DEPOUSSIEREURS

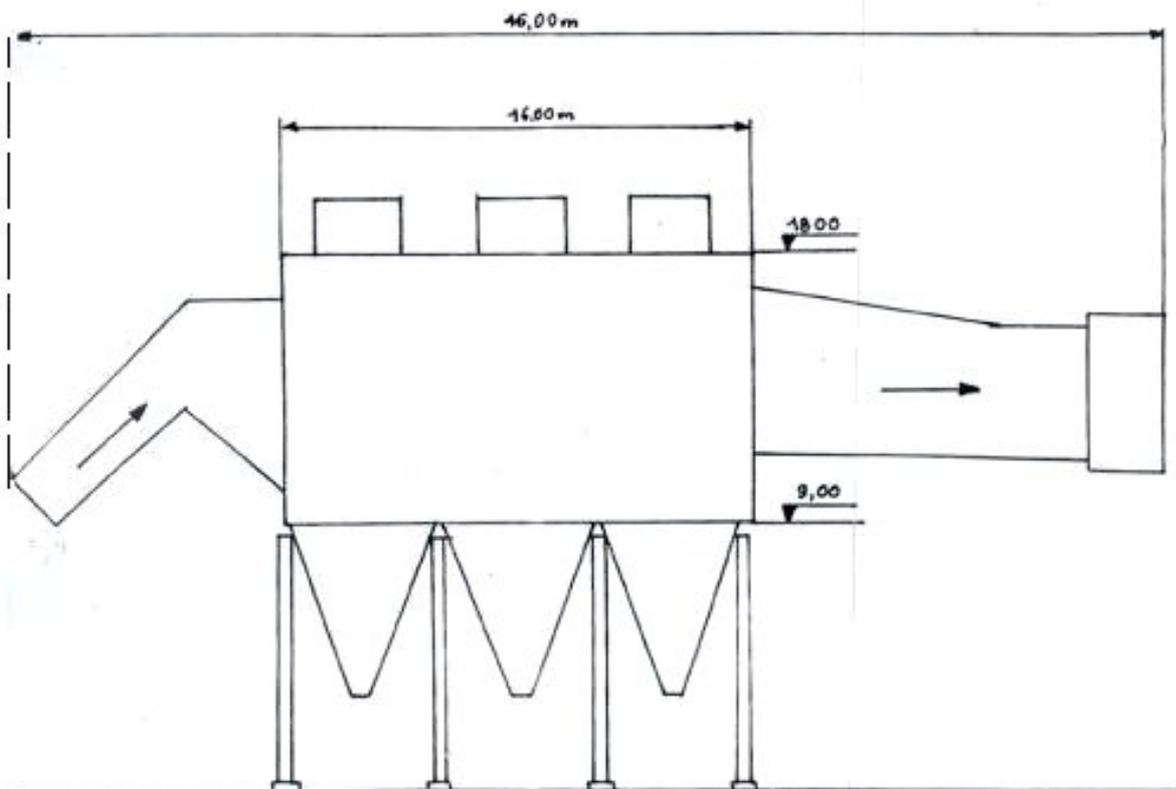
Généralités :

La pollution par les poussières contenues dans les gaz de combustion peut être réduite par l'emploi de cheminées de grandes hauteurs et de dépoussiéreurs. Les cheminées jouent un rôle important dans la pollution atmosphérique, les gaz rejetés sont d'autant mieux dispersés que la cheminée est plus haute que les gaz s'en échappent à grande vitesse (supérieure à 9 m/s) et que leur température est plus élevée. C'est ainsi que les centrales construites depuis moins de 20 ans comptent de 120 – 240 mètres de haut d'où les gaz s'échappent à 20 m/s à pleine charge.

Pour une tranche de 600 MW consommant 220 t/h de charbon à 20% de cendres, la quantité de cendres produite journalièrement est de 44 x 24, soit environ 1000 tonnes, dont 200 tonnes sont récupérées au foyer et 800 tonnes arrivent au dépoussiéreur. Si celui-ci à un rendement de 99% il reste encore 8 t/jour soit près de 3000 tonnes par an qui sont envoyées à l'atmosphère.

Les différents types de dépoussiéreurs :

- **Les dépoussiéreurs mécaniques :** Ces dépoussiéreurs, quel que soit leur type, ont un fonctionnement basé sur la différence de poids spécifiques entre les particules de poussière et les gaz.
- **Les dépoussiéreurs poreux :** Ce sont des filtres (étoffes, papier ...) qui retiennent les poussières.
- **Les dépoussiéreurs électrostatiques :** Les poussières sont ionisés en traversant un champ électrique de 50 à 60 kV et se déposent sur une électrode où elles se déchargent électriquement.
Elles tombent ensuite dans le fond sous l'effet de chocs ou de vibrations périodiques sur les électrodes
- **Les dépoussiéreurs laveurs :** Dans ces appareils, les gaz chargés de poussières et mis au contact d'eau qui agglomère les poussières sous forme de boues. Le principe c'est la pulvérisation d'eau dans les gaz.



ENCOMBREMENT DU DEPOUSSIEREUR

Module : Technologie des brûleurs industriels
GUIDE DES TRAVAUX PRATIQUES

I. TP 1 : Réglage du brûleur

I. 1. Objectif(s) visé(s) :

Régler un brûleur.

I. 2. Durée du TP :

6 heures

I. 3. Matériel (équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Equipement :

- *Brûleur fioul*
- *Analyseur électronique*

b) Matière d'œuvre :

- *Gazoil*

I. 4. Description du TP :

Il faut effectuer l'analyse des gaz de combustion et régler l'excès d'air

I. 5. Déroulement du TP :

Après préparation de la chaudière le stagiaire démarre le brûleur et mesure dans la cheminée les paramètres de combustion moyennant l'appareil électronique et règle le brûleur en agissant soit sur le débit de combustion ou l'air, jusqu'à l'obtention du taux de CO₂ maximum, ainsi le réglage du brûleur industriel est fait.

I. TP 2 : Dépannage du brûleur

I. 1. Objectif(s) visé(s) :

Comment dépanner un brûleur industriel.

I. 2. Durée du TP :

6 heures

I. 3. Matériel (équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Equipement :

- Brûleurs
- Analyseur électronique

b) Matière d'œuvre :

- Gazoil

I. 4. Description du TP :

Il s'agit de provoquer diverses pannes pendant 6 H, le stagiaire doit dépanner correctement le brûleur

I. 5. Déroulement du TP :

- *Provoquer des pannes dans divers brûleurs de l'atelier thermique industrielle*
- *Après mise en service le stagiaire réfléchit pour trouver les pannes et remèdes.*

Evaluation de fin de module

- 1 – Décrire les propriétés physiques des fiouls lourds*
- 2 – Décrire le transfert et les conditions d'une bonne pulvérisation du fioul lourd.*
- 3 – Décrire les pulvérisations mécaniques et avec fluide auxiliaire des fiouls lourds.*
- 4 – Quels sont les sept critères que doivent avoir les brûleurs à gaz industriels*
- 5 – Décrire les différents types de dépoussiéreurs.*

Liste de référence bibliographique

Ouvrage	Auteur	Edition
Gestion rationnelle des chaufferies industrielles	CITECH	
Fuel lourd	AFPA	
Charbon	STEIN INDUSTRIE	